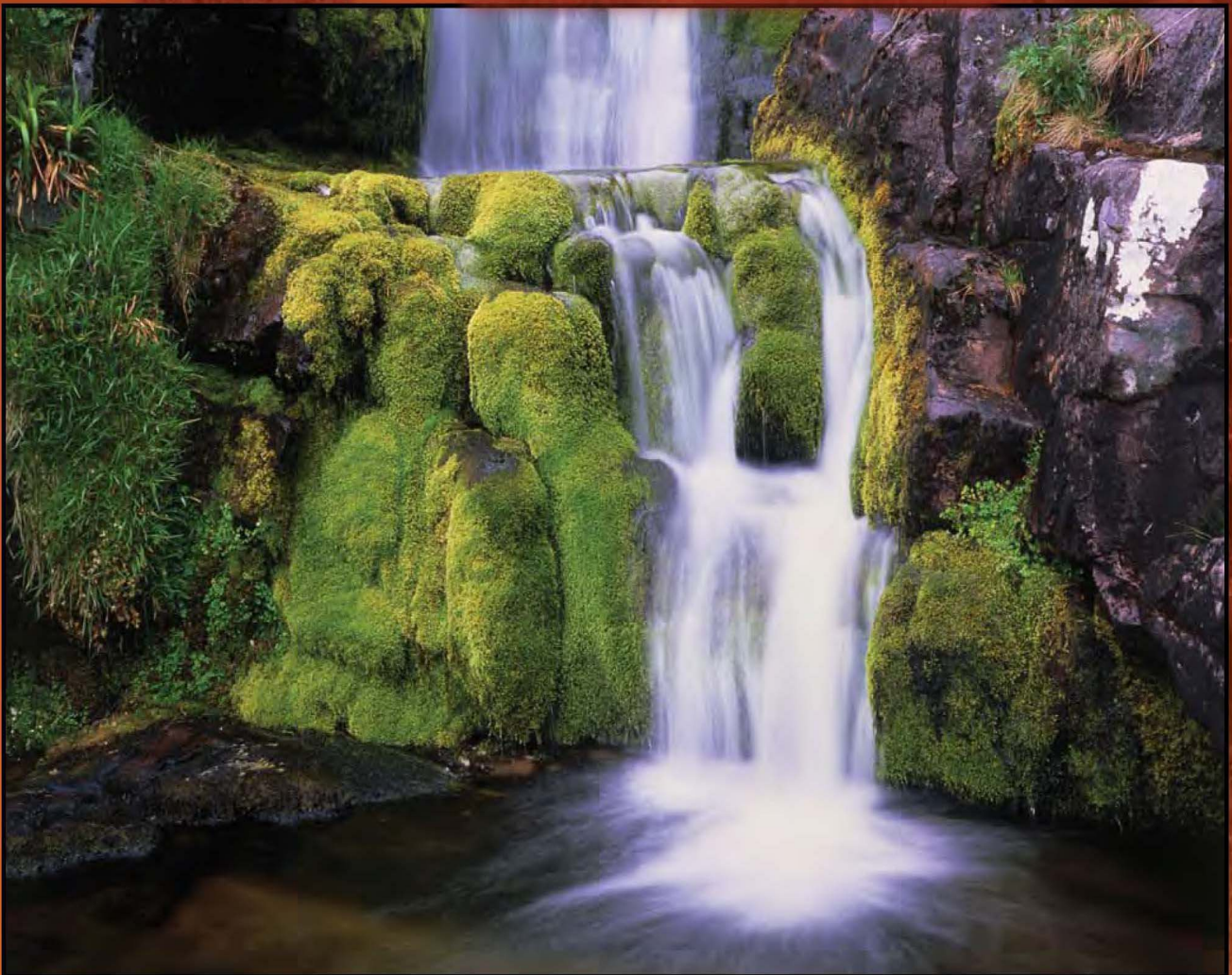


발간등록번호

11-1611000-000469-01

기후변화와 물

IPCC 기술 보고서 - VI



국토해양부
Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs



기상청
Korea Meteorological Administration

“As a UN body the IPCC publishes only in the six official UN languages. This translation of the IPCC Technical Paper-VI, 「Climate Change and Water」, into the Korean language is therefore not an official translation by the IPCC. It has been provided by the Korea Meteorological Administration together with the Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs with the aim of reflecting in the most accurate way the language used in the original text.”

이 보고서는 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)의 제28차 총회(2008년 4월, 헝가리 부다페스트)에서 공식 발표를 거쳐 2008년 6월 발행된 IPCC 기술보고서 VI (Technical Paper-VI) 「기후변화와 물 (Climate Change and Water)」을 기상청과 국토해양부가 공동으로 번역 출판한 것입니다.

2009년 6월

이 보고서의 내용은 기후변화정보센터
홈페이지 (<http://climate.go.kr>)에서도 보실 수 있습니다.

원본 출처 : IPCC 홈페이지 (<http://www.ipcc.ch>)



기후변화에 관한 정부간 협의체
(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)



기후변화와 물

편집

Bryson Bates
CSIRO (호주)

Zbigniew W. Kundzewicz
polish Academy of Sciences (폴란드)
Potsdam Institute for
Climate Impact Research (독일)

Shaohong Wu
Chinese Academy
of Sciences (중국)

Jean Palutikof
Met Office Hadley Centre (영국)

이 책자는 “기후변화에 관한 정부간 협의체”의 결의에 따라 만들어진 기술 보고서이다. 이 책자에 실려 있는 내용은 전문가와 회원국들의 감수를 거쳤으나 협의체에 의한 공식적인 채택이나 승인은 고려되지 않았다.

2008년 6월

이 보고서는 IPCC 제 II 실무그룹(WGII)의 기술지원단(TSU)의 관리 하에 제작되었다.

이 기술보고서는 아래와 같이 인용하기 바람:

Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu and J.P. Palutikof, Eds., 2008 : Climate Change and Water, Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 pp.

© 2008, Intergovernmental Panel on Climate Change

ISBN: 978-92-9169-123-4

표지 사진: © Simon Fraser/Science Photo Library

목차

서문	ix
감사의 글	xi
실행요약서	3
1. 기후변화와 물의 관계에 대한 소개	7
1.1 배경	8
1.2 범위	8
1.3 본 기술 보고서의 배경 : 사회·경제적 및 환경적 조건	9
1.3.1 관측된 변화들	9
1.3.2 전망되는 변화들	10
1.4 본 기술 보고서의 개요	12
2. 물과 관련하여 관측된 기후의 변화와 전망된 기후의 변화	15
2.1 물과 관련하여 관측된 기후의 변화	16
2.1.1 강수량과 수증기량	16
2.1.2 눈과 육지상의 얼음	20
2.1.3 해수면	21
2.1.4 증발산	21
2.1.5 토양수분	22
2.1.6 유출과 하천 유량	22
2.1.7 대규모 변동성의 패턴	23
2.2 수문학적 변화가 기후에 미치는 영향과 피드백	24
2.2.1 지표면 영향	24
2.2.2 해양 순환에 있어서의 변화를 통한 피드백	25
2.2.3 수문학적 과정이나 생물·지질 화학적 피드백에 의한 발생원과 흡수원	25
2.3 물과 관련하여 전망된 기후의 변화	25
2.3.1 강수량과 수증기량	26
2.3.2 눈과 육지상의 얼음	28
2.3.3 해수면	29
2.3.4 증발산	30
2.3.5 토양수분	30
2.3.6 유출과 하천 유량	30
2.3.7 대규모 변동성의 패턴	32
3. 기후변화와 수자원의 연계 : 영향과 반응	33
3.1 관측된 기후변화의 영향	34
3.1.1 빙권의 변화로 인해 관측된 영향	34
3.1.2 수문과 수자원	34
3.2 기후변화로 인한 물의 가용성 및 물 수요의 미래 변화	37
3.2.1 미래의 담수 시스템에 대한 기후 관련 동인	37
3.2.2 미래의 담수 시스템에 영향을 미치는 비 기후적 동인	42
3.2.3 미래의 담수 가용량에 미치는 기후변화의 영향	43
3.2.4 미래의 담수 수요량에 미치는 기후변화의 영향	43

3.2.5 미래의 물 스트레스에 미치는 기후변화의 영향	43
3.2.6 담수의 비용과 기타 사회·경제적 측면에 미치는 기후변화의 영향	44
3.2.7 기후변화에 대단히 취약한 담수 지역과 부문	46
3.2.8 담수 시스템에 미치는 기후변화 영향에 대한 전망의 불확실성	46
3.3 기후변화에 대한 물 관련 적응 : 개요	47
3.3.1 통합 수자원 관리	50
4. 각종 시스템과 부문에 있어서의 기후변화와 수자원	51
4.1 생태계와 생물 다양성	52
4.1.1 개관	52
4.1.2 수문 현상의 전망된 변화와 전 지구적 생물 다양성과의 관계	52
4.1.3 주요 생태계의 유형에 미치는 수문 현상의 변화 영향	52
4.2 농업과 식량안보, 토지 이용과 임업	55
4.2.1 개관	55
4.2.2 관측현황	57
4.2.3 전망	57
4.2.4 적응, 취약성, 그리고 지속 가능한 개발	60
4.3 인간의 건강	64
4.3.1 개관	64
4.3.2 관측현황	66
4.3.3 전망	66
4.3.4 적응, 취약성, 그리고 지속 가능한 개발	66
4.4 용수 공급과 위생 서비스	66
4.4.1 개관	66
4.4.2 관측현황	66
4.4.3 전망	67
4.4.4 적응, 취약성, 그리고 지속 가능한 개발	68
4.5 주거와 기반 시설	70
4.5.1 주거	70
4.5.2 기반 시설	70
4.5.3 적응	71
4.6 경제 : 보험, 관광, 산업, 교통 등	71
4.6.1 개관	71
4.6.2 사회·경제적 비용, 완화, 적응, 취약성, 그리고 지속 가능한 개발	72
5. 기후변화와 수자원의 지역적 측면에 대한 분석	73
5.1 아프리카	74
5.1.1 개관	74
5.1.2 현재의 관측	74
5.1.3 전망되는 변화들	76
5.1.4 적응과 취약성	80
5.2 아시아	80
5.2.1 개관	80
5.2.2 물에 미치는 관측된 기후 변화의 영향	80
5.2.3 물과 주요 취약성에 미치는 전망되는 기후변화의 영향	82
5.2.4 적응과 취약성	83
5.3 호주와 뉴질랜드	85
5.3.1 개관	85

5.3.2	관측된 변화들	85
5.3.3	전망되는 변화들	86
5.3.4	적응과 취약성	87
5.4	유럽	88
5.4.1	개관	88
5.4.2	관측된 변화들	88
5.4.3	전망되는 변화들	88
5.4.4	적응과 취약성	90
5.5	라틴 아메리카	91
5.5.1	개관	91
5.5.2	관측된 변화들	91
5.5.3	전망되는 변화들	93
5.5.4	적응과 취약성	95
5.6	북미	97
5.6.1	개관 및 관측된 변화들	97
5.6.2	전망되는 변화와 변화로 인한 결과	97
5.6.3	적응	99
5.7	극 지역	101
5.7.1	개관	101
5.7.2	관측된 변화들	102
5.7.3	전망되는 변화들	103
5.7.4	적응과 취약성	104
5.8	군소 도서 국가	104
5.8.1	개관	104
5.8.2	관측된 기후적 경향과 도서 지역에 대한 전망	104
5.8.3	적응, 취약성, 그리고 지속 가능성	106
6.	기후변화의 완화 수단과 물	109
6.1	서론	110
6.2	부문별 고유의 완화 수단	110
6.2.1	이산화탄소 포집 및 저장	110
6.2.2	바이오 에너지용 농작물	110
6.2.3	바이오 매스 전기	112
6.2.4	수력	112
6.2.5	지열 에너지	112
6.2.6	건물에서의 에너지 사용	112
6.2.7	토지 이용 변화 및 관리	112
6.2.8	농작물 경작지의 관리 (물)	113
6.2.9	농작물 경작지의 관리 (경작지의 감소)	113
6.2.10	조림 및 재조림	113
6.2.11	삼림 벌채의 기피 혹은 감소	114
6.2.12	고형 폐기물의 관리 : 폐수의 처리	114
6.2.13	비 전통적인 오일	115
6.3	온실 가스 배출과 완화에 미치는 물 관리 정책 및 수단의 영향	115
6.3.1	수력댐	115
6.3.2	관개	115
6.3.3	간류물의 회귀	115
6.3.4	농작물 경작지의 배수	116

6.3.5	폐수의 처리	116
6.3.6	해수의 담수화	117
6.3.7	지열 에너지	117
6.4	적응과 완화 사이의 잠재적 수자원 갈등	117
7.	정책과 지속 가능한 개발에 관련되는 사항들	119
7.1	부문별 정책에 관련되는 사항들	120
7.2	지역별 주요 물 관련 영향에 대한 전망	121
7.3	기후변화의 완화 정책에 관련되는 사항들	123
7.4	지속 가능한 발전에 관한 사항들	123
8.	지식의 부족과 추후 연구를 위한 제안	125
8.1	관측의 필요성	126
8.2	기후의 전망과 그 영향들에 대한 이해	126
8.2.1	기후 변화에 대한 이해와 전망	126
8.2.2	물 관련 영향	127
8.3	적응과 완화	127
	참고문헌	129
	부록 I: 기후모델에 대한 설명	155
	부록 II: 용어 해설	156
	부록 III: 약어, 화학기호, 과학단위	172
	부록 IV: 저자 목록	174
	부록 V: 감수자 목록	176
	부록 VI: 출판 허가	179

서문

“기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)”의 「기후변화와 물」에 관한 기술보고서는 IPCC 기술 보고서 시리즈의 여섯 번째 보고서로 2002년 4월 스위스 제네바에서 개최되었던 IPCC의 제 19차 전체회의에서 “세계 기후 프로그램-물 (World Climate Program-Water, WCP- Water)”의 사무국과 “물과 기후에 관한 국제 대화 추진위원회 (International Steering Committee of the Dialogue on Water and Climate)”가 내어 놓은 제안에 대한 반응으로 작성되었다. “기후변화와 물”에 관한 자문회의가 2002년 11월에 제네바에서 개최되어 이 주제에 대한 특별 보고서 (Special Report)를 준비하기보다는 “기후변화와 물”에 관한 기술 보고서를 준비할 것을 추천하였다. 그러한 보고서는 IPCC의 제 4차 평가보고서에 담긴 내용뿐만 아니라 IPCC의 이전 출판물에서 밝혀진 내용들에 주로 근거하는 것으로 하였다. 또한, 협의체는 제 4차 평가보고서에서 물은 핵심적인 주제 (cross-cutting theme)중의 하나로 취급되어야 한다고 결의한 바 있다.

이 기술 보고서는 담수 (淡水, freshwater)의 문제를 다루고 있다. 해수면 상승은 해안 지역에서 담수에 영향을 미칠 경우에 국한하여 다루어지고 있다. 기후와 담수, 그리고 생물·물리학적 및 사회·경제학적 시스템은 대단히 복잡하게 서로 연관되어 있어서 이들 중 어느 하나에 변화가 생기면 다른 어느 하나에 모종의 변화를 가져올 수 있다. 담수 관련 문제들은 주요 지역별 및 부문별 취약성을 결정하는데 핵심적인 사항이 되므로, 기후 변화와 담수 자원 사이의 관계는 인간 사회에 일차적인 관심거리가 되는 것이며 모든 생명체와 밀접한 관계를 가지게 되는 것이다.

지역별 제목별 균형을 이룰 수 있도록 IPCC 실무그룹 의장단(Working Group Bureau)은 대표 저자들로 구성되는 다학제적 집필진을 선택하였다. IPCC의 다른 모든 기술 보고서의 경우처럼 이 보고서도 이전에 승인을 받았거나 채택된 바 있는 IPCC 보고서의 내용에 기초하고 있으며, 전문가와 각 국 정부의 감수를 거친 후 최종적인 정부 감수를 받았다. IPCC의 실무그룹 의장단들은 기술 보고서의 마무리 단계에서 감수 과정에서의 지적 사항들에 대한 대표 저자들의 적절한 조치가 취해졌는지를 확신하기 위해 편집진의 역량을 발휘하였다.

IPCC 의장단은 2008년 4월에 부다페스트에서의 37차 회의에서 모임을 가져 최종적인 정부차원의 감수과정에서 수집된 주요 지적 사항들을 정리하였으며, 이들 지적 사항에 대한 조치 방향을 고려하여 대표 저자들은 본 기술 보고서를 최종적으로 마무리 한 후, IPCC 사무국은 이 보고서의 공공 배포를 승인하게 되었던 것이다.


귀한 시간을 관대하게 할애하여 출판 스케줄에 맞추어 이 기술 보고서 집필을 완료해 준 대표 저자들 (보고서에 리스트 되어있음)에게 크게 감사드린다. 또한, IPCC 제 II 실무그룹의 기술지원 단장이신 Jean Palutikof 박사가 이 보고서의 출판 과정을 통해 보여준 기교 넘치는 지도력에도 감사를 드리고 싶다.



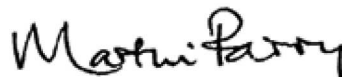
Rajendra K. Pachauri (IPCC 의장)



Renate Christ (IPCC 사무국장)



Osvaldo Canziani (IPCC 제 II 실무그룹 공동의장)



Martin Parry (IPCC 제 II 실무그룹 공동의장)

감사의 글

우리는 제 II 실무그룹 기술지원단, 특히 Norah Pritchard 씨와 Clair Hanson 씨가 이 기술 보고서의 준비에 열정적인 노력을 아끼지 않은데 대해 감사드린다.

캐나다 정부는 친절하게도 대표 저자들의 두 번째 회동을 주최하는데 동의해 주었으며, British Columbia의 Victoria에서 이 회동의 조직을 맡아주었던 Terry Prowse 씨에게 감사드린다.

캘리포니아 주 수자원국의 Maurice Roos 씨와 Manitoba Hydro의 Bill Girling씨는 이 기술 보고서의 이용자 측면에서의 여러 가지 충고와 제안을 해주기 위해 이 대표저자들의 두 번째 회동에 참석하였었다.

Marilyn Anderson 씨는 인덱스 (찾아보기)를 작성해 주었으며, Nancy Boston 씨는 본문을 편집해 주었다.

모든 저자 및 기관들과 정부들에게 이 기술 보고서의 출판을 가능하게 해준데 대해 감사드린다.

2008년 6월 23일

Bryson Bates
Zbyszek Kundzewicz
Shaohong Wu
Jean Palutikof

본 기술 보고서에서 인용된 참고문헌

• IPCC 보고서들의 표기 방법

- 제 4차 평가 보고서 (4th Assessment Report, AR4)로부터 인용된 내용은 본 기술 보고서의 각 문단 마지막 부분의 대괄호 [] 안에 다음의 예와 같이 표기하였다.

예 : [WGII 3.5]는 AR4를 위한 실무그룹II(Working Group II, WGII)의 제 3장 3.5절에 실려 있는 내용을 인용한 것임 (참고 문헌 ; IPCC, 2007 a,b,c,d).

- 제 4차 평가 보고서의 각종 요약 보고서는 다음과 같은 약식 명칭으로 인용된다.

ES : Executive Summary (실행요약서)

SPM : Summary for Policy Makers (정책 결정자를 위한 요약서)

예 : [WGI SPM 5.5]는 WGI의 “정책 결정자를 위한 요약서”의 제 5.5절에 실려 있는 내용을 인용한 것임.

TS : Technical Summary (기술요약서)

예 : [WGI TS 6.2]는 WGI의 기술 요약서의 제 6.2절에 실려 있는 내용을 인용한 것임.

SYR : Syntheses Report (종합보고서)

- IPCC의 제 4차 평가 보고서가 아닌 다른 자료원으로부터 발췌된 내용은 다음과 같은 약식 명칭으로 인용된다.

TAR : Third Assessment Report, IPCC, 2001 a,b,c

RICC : Special Report on Regional Impacts of Climate Change, Watson et al., 1997

LULUCF : Special Report on Land Use, Land-Use Change and Forestry, IPCC, 2000

SRES : Special Report on Emissions Scenarios, Nakićenović and Swart, 2000

CCB : Technical Paper V- Climate Change and Biodiversity, Gitay et al., 2002

CCS : Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Metz et al., 2005

• IPCC 보고서가 아닌 참고문헌들의 표기 방법

- 본 기술 보고서에 인용된 IPCC의 보고서가 아닌 참고문헌들은 해당 내용을 기술하는 위치에서 소괄호 () 안에 저자명과 출판 연도를 표기하였고, 본문 말미의 참고문헌 목록에 상세한 내용을 수록하였다.

기후변화와 물

이 기술 보고서는 “세계 기후 프로그램-물 (World Climate Program-Water, WCP-Water)”과 “물과 기후에 관한 국제 대화 추진 위원회 (International Steering Committee of the Dialogue on Water and Climate)”, 그리고 기타 물의 공급과 관련되는 조직들의 제안에 응하고자 IPCC 전체 회의에서의 요청에 따라 IPCC 의장인 R.K. Pachauri 박사의 후원 아래 준비되었다.

총괄 대표 저자 (Coordinating Lead Authors)

Bryson Bates (호주), Zbigniew W. Kundzewicz (폴란드), Shaohong Wu (중국)

대표 저자 (Lead Authors)

Nigel Arnell (영국), Virginia Burkett (미국), Petra Döll (독일), Daniel Gwary (나이지리아), Clair Hanson (영국), Bertjan Heij (네덜란드), Blanca Elena Jiménez (멕시코), Georg Kaser (오스트리아), Akio Kitoh (일본), Sari Kovats (영국), Pushpam Kumar (영국), Christopher H.D. Magadza (짐바브웨), Daniel Martino (우루과이), Luis José Mata (독일/베네수엘라), Mahmoud Medany (이집트), Kathleen Miller (미국), Taikan Oki (일본), Balgis Osman (수단), Jean Palutikof (영국), Terry Prowese (캐나다), Roger Pulwarty (미국/트리니다드 토바고), Jouni Räisänen (핀란드), James Renwick (뉴질랜드), Francesco Nicola Tubiello (미국/이탈리아), Richard Wood (영국), Zong-Ci Zhao (중국)

기여 저자 (Contributing Authors)

Julie Arblarter (오스트리아), Richard Betts (영국), Aiguo Dai (미국), Christopher Milly (미국), Linda Mortsch (캐나다), Leonard Nurse (바베이도스), Richard Payne (호주), Iwona Pinskiwar (폴란드), Tom Wilbanks (미국)

실행요약서 (Executive Summary)

각종 관측 기록들과 여러 가지 기후 전망에 따르면, 담수 자원이 대단히 취약하며 기후변화로 인해 매우 큰 영향을 받을 수 있는 잠재성을 내재하고 있어, 인간사회 및 생태계의 광범위한 영역에 걸쳐 여러 가지 영향을 초래할 것이라는 충분한 증거가 있다.

지난 수십 년에 걸쳐 관측된 온난화는 대규모의 수문 순환 과정에서의 변화들과 연관되어 있다. 이와 같은 변화에는 증가하는 대기 중 수증기 함량, 변화하는 강수 패턴과 강수 강도 및 극한 강수량, 감소하는 적설과 얼음의 광범위한 용해, 토양수분과 유출량의 변화 등이 포함된다. 강수량의 변화는 상당한 공간적 및 10년 단위 변동성을 보이고 있다. 20 세기에 걸쳐 강수량이 대부분의 경우 북위의 높은 육지지역에서 증가한 반면, 1970년대 이래 남위 10° 에서 북위 30° 까지는 강수량의 감소가 지배적이었다. 강한 강수 사상(혹은 총 강수량 중 강한 강도의 강수량 비율)의 발생 빈도는 대부분의 지역에서 증가하였다 (*likely*¹⁾, 가능성 있음). 전 지구적으로 보면, 대단히 건조한 지역으로 분류된 지역의 면적은 1970년대 이래 2배 이상 늘어났다 (*likely*). 산악 지역의 빙하와 북반구의 적설에 저류되어 있는 물은 상당한 규모로 감소되었다. 빙하와 융설로 인해 유지되는 하천유출의 크기나 시기의 변경, 그리고 하천과 호수에서의 얼음 관련 현상들의 여러 가지 변화들이 계속 관측되어 왔다 (*high confidence*, 신뢰성이 높음). [2.12]

21 세기 기후 모델에 의한 모의 결과는 고위도 지역 (*very likely*, 대단히 가능성이 큼)과 열대 지역의 상당 부분에서는 강수량의 증가를, 아열대 지역과 중위도 지역의 낮은 지대 (*likely*)에서는 강수량의 감소를 일관성 있게 전망하고 있다. 이들 지역 이외의 지역에서는 전망된 변화의 부호와 크기는 모델에 따라 어느 정도 변화를 보이고 있어, 강수량 전망³⁾에 있어서 상당한 불확실성을 초래한다. 따라서, 미래의 강수량 변화에 대한 전망은 어떤 지역에 대해서는 다른 지역의 경우보다 더 분명해지기도 한다. 공간적 스케일을 작게 잡을수록 모델들에 의한 전망은 일관성이 줄어들게 된다. [2.3.1]

21 세기 중반까지는 연평균 하천 유출량과 물의 가용량이 기후변화⁴⁾로 인해 고위도 지역과 일부 습윤한 열대 지역에서는 증가할 것으로 전망되고, 중위도 지역의 일부 건조한 지역과 건조한 열대 지역에서는 감소할 것으로 전망되고 있다.⁵⁾ 많은 반건조 및 건조 지역들 (예: 지중해 지역의 유역, 미국의 서부 지역, 아프리카의 남부 지역, 브라질의 북동부 지역 등)은 기후변화 영향에 특히 노출되어 있으며, 기후변화로 인한 수자원의 감소를 겪게 될 것으로 전망되고 있다 (*high confidence*). [2.3.6]

증가된 강수의 강도와 변동성은 수많은 지역에서 홍수 범람과 가뭄의 발생 위험을 증가시킬 것으로 전망되고

있다. 강한 강수 사상(혹은 총 강수량 중 강한 강도의 강수량 비율)의 발생 빈도는 21 세기 동안 많은 지역에 걸쳐 증가할 가능성이 대단히 크며 (*very likely*), 강우로 인해 발생하는 홍수 위험을 초래하게 될 것이다. 또한, 여름동안 대륙의 내륙지역, 특히 저위도 및 중위도에 위치한 아열대 지역에서 건조해지는 경향에 더하여 언제든지 극심한 가뭄을 겪게 될 지역의 비율이 증가할 가능성이 있다. [2.3.1, 3.2.1]

빙하 또는 적설에 저장된 물의 공급은 금세기 동안 줄어들 것으로 전망되고 있어, 현재 전 세계 인구의 1/6 이상이 살고 있는 주요 산악 지역으로부터의 녹은 물로 공급되는 지역에서 온난·건조한 기간 동안의 물의 가용량을 감소시키게 될 것이다. (하천 유량의 계절적 크기변화, 연 평균 유량에 대한 겨울철 유량비의 증가, 저 유하량의 감소 등으로 인한) (*high confidence*). [2.1.2, 2.3.2, 2.3.6]

수은의 증가와 홍수 및 가뭄을 포함하는 극한 수문 사상의 변화는 수질에 영향을 미쳐 여러 가지 형태의 수질 오염을 보다 악화시킬 것으로 전망되고 있다. 이와 같은 수질 오염은 하천수 속의 유사라든지 영양 물질, 용존 유기질 탄소, 병원균, 살충제, 소금 등과 열 오염 등으로 인해 발생하게 되며, 생태계와 인간의 보건 및 물 관련 시스템의 신뢰도와 운영경비에 여러 가지 부정적인 영향을 미칠 수 있다 (*high confidence*). 2050년대까지 기후변화로 인한 물 스트레스가 증가하는 지역은 감소하는 지역의 2배 이상이 될 것으로 전망되고 있고, 유출량이 감소될 것으로 전망되고 있는 지역에서는 수자원에 의해 제공되는 각종 서비스의 가치에 분명한 감소가 있을 것으로 예상된다. 일부 지역에서의 연 유출량 증가는 용수 공급 총량을 증가시킬 것으로 전망되고 있다. 그러나, 여러 지역에서 이와 같은 편익은 증가된 강수의 변동성이라든지, 용수 공급을 위한 계절 유량의 시간적 크기 변화, 수질과 홍수 위험 등의 부정적 영향에 의해 상쇄될 가능성이 있는 것으로 보고 있다 (*high confidence*). [3.2.5]

기후 변화로 인한 수량과 수질의 변화는 식량의 가용성, 안정성, 접근성 및 활용성에 영향을 미칠 것으로 예상되고 있으며, 특히 건조 및 반건조 열대 지역과 아시아 및 아프리카의 거대 델타 지역에 사는 가난한 농민들의 식량 안보를 저하시키며 취약성을 증가시킬 것으로 예상되고 있다. [4.2]

기후 변화는 수력발전, 구조물적 홍수 방어시설, 관개·배수 시스템 등을 포함하는 기존의 물 관련 기반

1) Box 1-1 참조.
 2) 대괄호 속의 숫자는 본 기술 보고서 본문의 절 번호를 나타낸다.
 3) 고려된 전망은 IPCC의 SRES (Special Report on Emission Scenarios)에 의해 개발된 비 완화 시나리오의 범위에 기초한 것이다.
 4) 이 기술은 관개와 같은 비 기록 인자의 변화는 포함하지 않는다.
 5) 이러한 전망들은 비 완화 배출 시나리오인 SRES A1B를 사용한 기후 모델의 앙상블에 기초하고 있다. 21세기 중반에 대한 여러 SRES 시나리오에 걸친 기후 반응의 범위를 고려할 때 이와 같은 결론은 보다 광범위한 시나리오에 걸쳐 적용이 가능하다.

시설의 기능과 운영, 그리고 물 관리 실무 관행에 영향을 미치게 된다. 담수 시스템에 미치는 기후변화의 부작용은 인구 팽창이나 경제 활동의 변화, 토지 이용 변화, 도시화 등과 같은 다른 종류의 스트레스의 영향을 더욱 악화시킨다 (*very high confidence*). 전 지구적으로 보면, 주로 인구의 증가와 인간 생활의 필요로움이 가속되기 때문에 용수 수요는 다가오는 수십 년 동안 계속 증가하게 될 것이며, 지역적으로는 기후변화에 따라 관개용수 수요에 큰 변화가 있을 것으로 예상되고 있다 (*high confidence*). [1.3, 4.4, 4.5, 4.6]

현재의 물 관리 방식들은 용수 공급의 신뢰도, 홍수 위험, 보건, 농업, 에너지, 수 생태계 등에 미치는 기후변화 영향에 대처해 나가는데 충분히 적절하다고 할 수는 없다. 많은 지역에서 물 관리는 현재의 기후 변동성에도 만족스러운 대응을 할 수 없어서 대규모 홍수와 가뭄이 계속 발생하고 있다. 따라서, 첫 단계로서 현재의 기후 변동성에 관한 정보를 물 관련 관리에 활용할 수 있도록 함으로써 장기적인 기후변화 영향에 적응하는데 도움을 줄 수 있게 될 것이다. 기후적 인자들과 인구 증가나 피해 잠재력 등의 비 기후적 인자들은 장래에 여러 가지 문제들을 더욱 더 악화시킬 가능성이 매우 크다 (*very high confidence*). [3.3]

기후변화는 과거의 수문학적 경험이 미래의 조건에 대한 훌륭한 지침(*guide*)을 제공한다는 전통적인 가정에 도전장을 내고 있다. 기후변화의 결과는 현재의 물 관련 시스템과 물 관련 기반 시설들의 신뢰도를 변경시킬 수도 있다. 하천 유역단위로 강수량이나 하천 유량, 하천 수위 등의 변화에 대한 정량적인 추정은 불확실하지만, 미래에 수문학적 특성이 변화할 가능성은 대단히 크다. 관련 불확실성과 함께 전망된 수문학적 변화를 고려하여 채택된 적응절차와 위험관리 대책들은 일부 국가와 지역에서 개발되고 있다. [3.3]

평균적 조건이나 가뭄 조건하에서의 용수 공급을 보장하고자 마련된 적응 옵션들은 공급 측면의 전략뿐만 아니라 수요 측면의 전략도 통합한 것이어야 한다. 수요 측면의 전략은 물 이용의 효율성을 개선하는 것으로, 예를 들어 물의 재순환이 이에 속한다. 물의 보존과 물 시장의 형성 및 물 거래를 장려하기 위한 물 이용량의 계량 (*water metering*) 및 가격 책정 (*water pricing*)을 포함하는 경제적인 인센티브 제도의 확대 적용은 물 절약과 물의 고 부가가치 사용에의 재할당을

촉진하게 된다. 한편, 공급 측면의 전략은 일반적으로 저류 용량의 증가와 수원으로부터의 효율적인 취수, 물의 유역 변경 등을 포함한다. 통합 수자원 관리는 사회·경제적, 환경적 및 행정적 시스템에 걸쳐 적응 대책의 구축을 위한 중요한 체계를 제공하며, 통합적 접근 방법이 효율적이기 위해서는 적절한 스케일의 설정이 대단히 중요하다. [3.3]

완화 수단들은 수자원에 미치는 지구 온난화 영향의 크기를 줄일 수 있어서 적응의 필요성을 감소시킬 수 있다. 그러나, 완화 수단들이 지속 가능한 위치에 설계되고 관리되지 않으면 조림과 재조림 활동 혹은 바이오 에너지용 농작물을 위한 물 소요량의 증가와 같은 부정적인 부작용을 일으킬 수 있게 된다. 다른 한편으로는, 수력 댐과 같은 물 관리 정책 수단들은 온실가스 배출에 영향을 미칠 수 있다. 수력 댐은 재생 가능한 에너지의 원천이 되기도 하지만 수력 댐 자체가 온실가스를 배출하게 되며, 이 배출의 크기는 수력 댐 지점의 구체적인 여건과 수력 댐의 운영방법에 의존하게 된다. [제 6절]

수자원 관리는 에너지라든지, 보건, 식량 안보 및 자연보존 등과 같은 다른 여러 정책 분야에 분명히 여러 가지 영향을 미친다. 따라서 적응과 완화 옵션들에 대한 평가는 물에 의존하는 다양한 부문에 걸쳐 이루어질 필요가 있다. 저소득 국가들이나 지역들은 고소득 국가들보다는 기후변화에 적응하기 위한 옵션들을 덜 가질 수밖에 없어서 당분간은 취약한 상태에 처해 있을 가능성이 있다. 따라서 적응 전략은 개발과 환경 및 보건 정책의 맥락에서 설계되지 않으면 안 된다. [제 7절]

“기후변화와 물”에 관련한 각종 관측과 연구의 필요성 측면에서 보면, 현재의 지식에는 부족함이 많이 존재한다. 각종 관측 자료나 자료의 활용은 기후변화에서의 적응 관리에 전제 조건임에도 불구하고 여러 자료 관측망들은 점점 축소되어 가고 있다. 의사 결정에 적합한 스케일로 수문 순환과 관련된 기후변화에 대한 이해와 모델링을 개선할 필요성은 분명히 있다. 기후변화의 물 관련 영향에 관한 정보는 아직 충분하지 못하다. 특히 수질과 수생태계, 지하수, 그리고 이들의 사회·경제적 측면의 중요성에 관한 정보가 부족한 것이 현실이다. 끝으로, 물에 의존하는 여러 부문에 걸친 적응과 완화 옵션에 대한 통합 평가를 쉽게 할 수 있는 현재의 도구 또한 부적절하다 하겠다. [제 8절]

1

기후변화와 물의 관계에 대한 소개

**Introduction to Climate Change
and Water**

1.1 배경

물과 기후변화 간의 관계를 밝히기 위해 “기후변화에 관한 정부간 협의체 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)”의 특별 출판물을 출간하려는 생각은 2000년 4월 스위스의 제네바에서 열렸던 제19차 IPCC 회의에서 하게 되었다. 이 회의에서 “세계 기후 프로그램과 물 (World Climate Program-Water, WCP-W)”과 “물과 기후에 관한 대화를 위한 국제 추진위원회 (International Steering Committee of the Dialogue on Water and Climate)”는 IPCC로 하여금 물과 기후에 대한 특별 보고서를 준비할 것을 요청하였다. 2002년 11월에 제네바에서 개최되었던 “기후변화와 물 (Climate Change and Water)”에 관한 자문 회의에서는 WCP-W가 요청한 물과 기후에 관한 특별 보고서가 2005년 혹은 2006년에 발간될 경우, 2007년에 완성하기로 되어 있었던 IPCC의 4차 평가 보고서 (Fourth Assessment Report, AR4)로 인해 쓸모가 별로 없게 될 우려가 있다고 판단하여 AR4가 발간된 후에 AR4의 내용을 추출하고, 기 발간된 IPCC의 다른 출판물의 내용도 포함하여 “기후변화와 물”에 대한 기술 보고서 (Technical Paper)를 작성할 것을 추천하게 되었다.

그리하여, 지역과 집필 토픽의 형평을 고려하고 여러 분야의 전문성을 대표할 수 있도록 IPCC의 3개 실무 작업반 (Working Group)에서는 다학제적 집필진을 선택, 구성하고 하고 UN 관련 기관과 NGO's, 민간 부문을 포함하는 이해 당사자 집단으로부터 명망 있는 전문가를 추천받았으며, 이들이 기술 보고서의 준비와 최종 검토 작업에 광범위하게 참여하였다.

IPCC는 내부적으로 기술 보고서의 작성에 있어서 다음의 자료원을 사용하는 것을 지침으로 삼았다.

- (a) IPCC 평가 보고서 (Assessment Reports) 및 특별 보고서 (Special Reports)의 내용과 이들 보고서를 인용하여 작성된 연구 성과
 - (b) IPCC의 이들 보고서에 정보를 제공하는데 사용된 가정을 전제로 한 관련 모델 (models)과 사회·경제적 가정을 근거로 한 각종 시나리오
- 이상의 지침은 본 기술 보고서에서 줄곧 지켜졌다.

1.2 범위

본 기술보고서에서는 담수 (fresh water)만을 취급하며, 해수면 상승 (sea-level rise)은 지하수의 염수화 등 해안 지역에서의 담수에 영향을 주는 경우에 대해서만 취급하였다. 이 보고서에서는 온실가스 농도가 안정적인 상태에 이르더라도 지구 온난화와 해수면 상승 현상은 여러 세기동안 계속될 것이라는 인식 하에 21세기 동안 계속 진행될 기후변화를 다루고 있다. [WGI SPM]

의제 21 (Agenda 21), 세계 물 포럼 (World Water Forum), 천년 생태시스템 평가 (Millennium Ecosystem Assessment), 세계 수자원 개발 보고서 (World Water Development Report) 등 국제적인 시각에서 분명하게 강조되고 있듯이, 인류의 생존을 위한 담수의 중요성은

광범위하게 인식되고 있다. 즉, 담수는 모든 형태의 생명체에 필수 불가결한 요소이며, 모든 유형의 인간 활동에 다량으로 필요한 것이다. 기후와 담수, 생물학적, 물리학적 및 사회·경제적 시스템은 복잡하게 서로 연계되어 있어, 이들 중 어느 하나에 변화가 생기면 다른 것이 바로 변화를 일으키게 된다. 인간 활동으로 인해 유발된 기후변화는 지속 가능한 담수의 확보가 이미 문제가 되고 있는 여러 나라에 중대한 압력을 추가적으로 가하고 있는 것이다. 담수와 관련된 도전은 물의 과다, 물의 과소, 그리고 심한 수질 악화이며, 이들 문제는 모두 기후변화로 인해 보다 더 악화일로에 놓여 있다. 담수 관련 문제점들은 지역적인 취약성 중에서도 가장 중심적인 역할을 한다고 할 수 있으므로, 기후변화와 담수자원 간의 관계는 인간에게 가장 주된 관심사 중의 하나라 할 수 있다.

아직까지 수자원 문제는 기후변화 분석과 기후 관련 정책 수립에서 적절하게 다루어지지 못했다고 할 수 있으며, 기후변화 문제 또한 수자원의 해석 및 관리, 정책 수립 등에 제대로 다루어지지 못해 왔다고 할 수 있다. 여러 전문가들에 따르면, 물과 물의 부존 정도, 그리고 수질은 기후변화 영향 아래의 인류 사회와 환경에 미치는 중요한 압력이고 문제가 될 것으로 보고 있다. 따라서, 이들 문제들에 대한 이해를 높이는 것은 꼭 필요하다 하겠다.

IPCC의 제21차 회의자료 (IPCC-XXI-Doc.9)에서 밝힌 바와 같이 본 기술보고서의 목표는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 자연적으로 발생하는 기후변화와 인간활동으로 유발되는 기후변화간의 연관성과 그로 인한 각종 영향, 기후변화에의 적응 및 영향의 완화 대안 등과 물 관련 각종 문제들의 이해를 촉진하며,
- 정책 결정자 및 관련 이해 당사자들에게 기후변화의 영향과 수자원 문제해결을 위한 대응방안 등을 이해시킬 뿐 아니라 여러 가지 기후변화 시나리오에 따른 수자원 영향과 대응책에 대한 자료를 제공하기 위함이다.

이 기술보고서 내용의 범위는 기후변화가 수문 순환 과정과 체계에 미치는 영향과 담수 자원의 부존과 이용 및 관리, 그리고 수질에 미치는 영향을 평가하기 위한 것이며, 보고서에서는 현재와 기후변화로 인한 앞으로의 지역별 핵심적 취약성과 적응 전망을 고려하고자 노력하였다.

이 기술보고서는 주로 담수 자원의 관리라든지 기후변화, 전략적 연구, 지역 계획이나 사회·경제 개발계획 분야에 중사하는 정책 결정자를 위해 작성되었으나, 물과 기후변화 분야에서 활동하는 과학자나 NGO's, 그리고 언론계에서 중사사하는 분들을 포함한 폭넓은 집단에게도 유용한 정보가 될 것이다.

물과 기후변화의 관계에 관한 자료는 IPCC의 제4차 평가 보고서 (AR4)와 종합 보고서 (Synthesis Report)의 곳곳에 흩어져 있으므로, 기후변화와 물에 초점을 맞춘 단일의 종합적인 보고서를 출판하는 것이 독자들에게 훨씬 유용할 것으로 생각하였으며, AR4 이전의 IPCC 보고서 및 자료도 참고로 하였다. 이 기술보고서의 추가적인 가치는

6) “기후변화와 물”에 관한 기술 보고서의 내용 범위를 정한 Scoping Paper. (<http://www.ipcc.ch/meetings/session21.htm>, 참조)

물과 기후변화 관계에 관련된 자료를 선별 정리하고, 자료의 중요성을 고려하여 취합하였으며, 자료의 중요성을 해석한 데 있다 하겠다.

본 기술보고서에 기재된 내용은 철저히 IPCC가 출간한 여러 보고서의 내용을 근거로 작성되었으며, 내용상 약간의 차이가 있는 경우는 IPCC 보고서들의 결론을 지지하고 부연 설명을 하기 위한 것이라 할 수 있다. 중요한 내용에 관한 문단은 IPCC의 출간보고서를 인용하였으며, 문단 말미의 대괄호 속에 참고문헌으로 표기하였다.

다음은 본 기술보고서에서 인용된 IPCC 보고서들의 표기방법이다.

- 제4차 평가 보고서 (Fourth Assessment Report, AR4)는 가장 많이 인용된 보고서이며, 예를 들어 [WG II 3.5]는 AR4를 위한 Working Group II의 제3장, 제3.5절에 실려 있는 내용을 인용한 것이다 (IPCC, 2007a, b, c, d).
- 제4차 보고서가 아닌 IPCC의 다른 자료원으로부터의 내용은 다음과 같은 약식 명칭의 보고서로부터 발췌하였다: TAR (Third Assessment Report: IPCC, 2001a, b, c), RICC (Special Report on Regional Impacts of Climate Change: Watson et al., 1997), LULUCF (Special Report on Land Use, Land-Use Change and Forestry: IPCC, 2000), SRES (Special Report on Emissions Scenarios: Nakićenović and Swart, 2000), CCB (Technical Paper V - Climate Change and Biodiversity: Gitay et al., 2002), CCS (Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage: Metz et al., 2005). 예를 들면, [WG II TAR 5.8.3]은 IPCC 제3차 평가 보고서 (TAR)의 Working Group II 보고서의 제5장 8.3절을 지칭한다.
- 이들 이외의 다른 보고서의 약식 명칭으로는 제4차 평가 보고서에 대한 ES (Executive Summary, 실행 요약서), SPM (Summary for Policymakers, 정책 결정자를 위한 요약서), TS (Technical Summary, 기술 요약서), SYR (Synthesis Report, 종합보고서) 등이 있다.

한편, 인용된 원래의 참고문헌은 해당 내용을 기술하는 위치에서 소괄호 안에 출처를 표기하였으며, 본문의 말미에 참고문헌의 상세목록이 첨부되어 있다.

1.3 본 기술 보고서의 배경: 사회·경제적 및 환경적 조건

본 기술보고서는 일련의 IPCC 평가보고서와 특별보고서에서 살펴본 기후변화와 담수간의 관계를 고찰하기 위한 것으로, 이 관계는 독립적인 것이 아니라 사회·경제적 및 환경적 조건들의 상호 작용에 의해 형성되는 것이라 할 수 있다. 따라서, 본 절에서는 담수에 관련되는 이들 주요 조건의 면면을 관측된 사실과 전망되는 현상을 함께 포함하여 기술하고자 한다.

전 지구 규모를 포함하여 지역 혹은 국지 규모로 담수

자원에 영향을 미치는 비 기후적인 인자에는 여러 가지가 있다(UN, 2003). 수량이나 수질 측면에서 수자원은 농경 활동이라든지 토지 이용 변화, 저수지의 건설 및 관리, 오염물질의 배출, 정수처리 및 하수처리 등을 포함하는 인간 활동으로 인해 심각한 영향을 받게 된다. 물의 이용은 주로 인구와 식량 소비, 물 값을 포함하는 경제정책, 물 관련 기술, 물 소비 생활습관, 그리고 담수 생태계의 가치에 대한 사회적 인식 등에 있어서의 변화와 직결되어 있다. 따라서, 기후변화와 물간의 관계를 평가하기 위해서는 물이 이들 비 기후적 인자의 변화에 의해 어떻게 영향을 받아 왔으며, 앞으로 어떻게 영향을 받게 될 것인가에 대해 고찰할 필요가 있다. [WG II 3.3.2]

1.3.1 관측된 변화들

전 지구 규모의 평가에서는 한 유역의 인구 1인당 물 이용 가능량이 연간 1,000m³ 보다 적거나 장기간 안의 연평균 유출량에 대한 연간 실제 이용량이 40% 이상일 경우, 그 유역은 물 스트레스를 받는(water-stressed)⁸⁾ 것으로 정의되며, 물 스트레스를 받는다는 것은 각종 용수 공급에 있어서 물 부족 위험에 노출되어 있음을 의미한다. 인구 1인당 연간 1,000m³의 물은 통상적인 생활용수 또는 농업용수 및 농업용수로 필요한 물의 양을 상회하는 것으로 알려져 있다. 물 스트레스를 받는 국가들은 북아프리카, 지중해 지역, 중동지역, 근동지역, 남부아시아, 중국의 북부지역, 호주, 미국, 멕시코, 브라질의 북동부, 남미의 서해안 지역 등에 위치하고 있으며 (그림 1.1), 이들 물 스트레스 지역에 살고 있는 인구는 14억 명 내지 21억 명 정도인 것으로 추정되고 있다. (Vörösmarty et al., 2000; Alcamo et al., 2003a, b; Oki et al., 2003; Arnell, 2004). [WG II 3.2]

관개용수의 경우를 보면 물 이용량은 일반적으로 기온 상승에 따라 증가하나 강수량이 증가하면 오히려 감소하며, 기후변화와 관련한 장기간 동안의 물 이용량의 변화 성향에 대한 증거자료가 발표된 바는 아직 없다. 이는 아마도 물 이용량이 비 기후적 인자에 의해 좌우되며 일반적으로 물 이용 자료의 신뢰도가 떨어지기 때문인 것으로 보고 있다. [WG II 3.2]

지표수와 천층(淺層) 지하수 관점으로부터의 물 이용 가능량은 하천유량의 계절성과 경년변동에 의해 좌우되며, 안정적인 용수공급은 계절적인 저수유량(低水流量)에 의해 결정된다. 눈(雪)이 지배적인 하천 유역에서는 기온이 높아지면 강설량이 적어져서 하천 유량이 감소하게 되어 하절기에는 용수 공급량이 감소하게 된다 (Barnett et al., 2005). [WG II 3.2]

물 스트레스를 받는 지역에서의 인간과 생태계는 기후변화로 인해 감소되고 변동성이 커지는 강수량에 특히 취약하며, 이는 후술하는 제5절에서 예시하기로 한다.

극히 소수의 산업화된 국가를 제외하고는 대부분의 국가에서는 인구 증가 및 경제 성장과 생활 습관의 변화, 관개용수 수요의 급격한 증가와 함께 각종 용수공급 시스템의 확충 등으로 인해 물 이용량은 최근 수십 년 동안 급격히 증가해왔다. 전 세계적으로 보면, 관개용수량은 총 물

7) 식기 세척기, 세탁기, 잔디용 스프링클러 등과 같은 물의 다소비형 가전제품을 사용함을 말함.

8) 물 스트레스는 사람들이 물 부족 위험에 얼마나 노출되어 있는지를 설명하는 개념임.

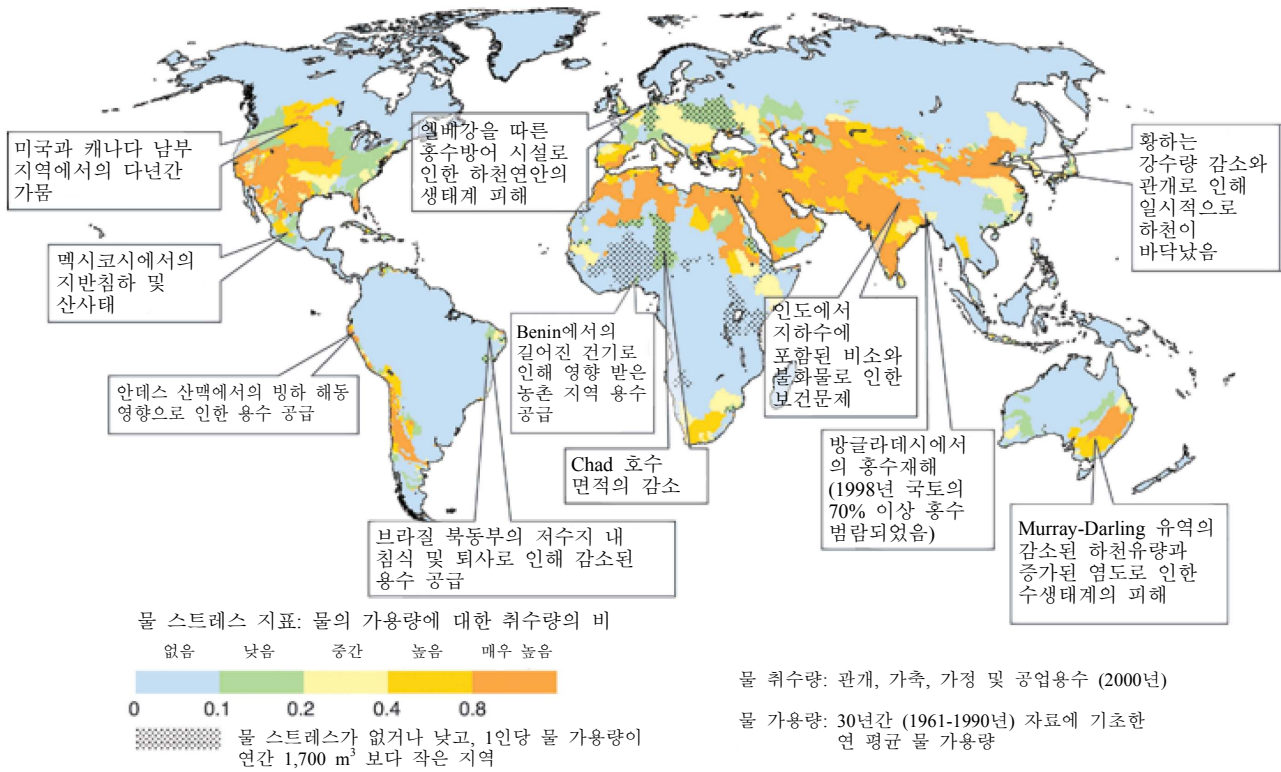


그림 1.1: 담수 자원과 그의 관리에 대한 현재의 취약성 사례들; WaterGAP (Alcamo et al., 2003a)에 기초한 물 스트레스 지도가 표시되어 있으며, 기후변화와의 관계에 대해서는 본문을 참조할 것. [WG II Figure 3.2]

이용량의 약 70%를 차지하며, 소비수량의 약 90% 이상을 차지하는 것으로 알려져 있다. [WG II 3.2] 전 세계 농산물 생산량의 약 40%는 관개에 의한 것이며 (Fischer et al., 2006), 전 지구상의 관개면적은 1961~1963년의 1.4억 ha에서 1997~1999년의 2.7억 ha로 연평균 약 2%의 증가율로 1960년 이래 거의 선형적인 증가를 해왔으며, 이는 현재의 전 세계 재배 면적의 약 18%를 차지하고 있다 (Bruinsma, 2003).

지역적인 인구의 변화율은 전 지구 평균인구와 상당한 편차를 보이지만, 전 세계 인구의 증가율은 이미 감소하고 있다. 전 지구적 물 이용량은 개발도상국에서의 경제성장으로 인해 증가하고 있는 것으로 추측되지만, 물 이용량의 증가율에 대한 신빙성 있는 자료는 현재로서는 찾기 힘들다. [WG II 3.2, 5.3]

지표수와 지하수의 수질은 농업 및 공업 생산활동의 활성화로 인해 최근 수십 년간 악화되어 왔으며 (UN, 2006), 이러한 문제에 대처하기 위해 유럽연합이나 캐나다 등 많은 국가들은 방류수 수질기준을 법제화 하고 하수처리 시설을 개선하는 등 수질 개선을 위한 노력을 경주하고 있다 (GEO-3, 2003). [WG II 3.3.2, Table 8.1]

1.3.2 전망되는 변화들

1.3.2.1 일반적인 배경

장래에 전망되는 기후변화와 수자원에 관한 여러 연구의 기본을 이루는 IPCC의 “온실가스 배출 시나리오에 관한 특별보고서 (Special Report on Emissions Scenarios,

SRES: Nakićenović and Swart, 2000)”에서 가정하는 4가지 줄거리 (storylines) (혹은 가설)에서는 그림 1.2에서처럼 21세기에 걸친 인구와 경제 활동의 다양한 변화를 가정하고 있다.

세계 경제가 전 지구적인 무역과 국가 간 협력에 의해 지배될 것이라고 가정하는 시나리오(A1과 B1 상황)에서는 전 세계의 인구가 현재의 66억 명에서 2050년에는 87억 명으로 최대치에 이를 것으로 예상하는 반면에, 세계화 또는 국가 간 협력이 덜 이루어질 것이라고 가정하는 시나리오 (A2와 B2 상황)에서는 2100년까지 각각 104억 명 (B2 상황)과 150억 명 (A2 상황)으로 증가할 것으로 예상된다. 모든 SRES 시나리오는 대체로 오늘날보다 더욱 풍요로운 사회가 될 것으로 가정하여 전 세계의 국내 총생산(GDP)은 2100년까지 현재 수준보다 약 10~16배 더 증가할 것으로 내다보고 있다. 지구상의 지역 간 국내 총생산의 편차는 인구변화나 경제발전이 못지않게 기술발전의 역할이 중요하게 되어 더욱더 좁혀질 것으로 모든 SRES 시나리오에서 가정하고 있다. [SRES SPM]

1.3.2.2 수자원

기후변화가 있을 경우와 없을 경우를 상정한 미래 수자원에 대한 예측에 있어서 흥미로운 점은 댐의 신규 건설과 해체, 용수 공급시설, 하수처리 및 처리수의 재사용, 해수의 담수화, 오염물질의 배출, 관개를 고려한 토지 이용 등에 있어서 발생할 수 있는 변화들이다. 비록 현재의 전 세계의 45,000여개 대규모 댐 보다는 숫자에 있어서는 작겠지만, 기후변화에 관계없이 개발도상국에서는 수력발전과 용수공급 목적으로 신규 댐이

경제 강조 (Economic Emphasis) →	
<p>A1 줄거리</p> <p>세계 (World): 시장지향 경제 (Economy): 고도성장 인구 (Population): 2050년 최고점 도달 후 감소 지배구조 (Governance): 강한 지역 간 상호 작용 기술 (Technology): 3가지 시나리오 그룹 • A1F: 화석연료 사용 • A1T: 비화석 에너지원 사용 • A1B: 모든 에너지 균형사용</p>	<p>A2 줄거리</p> <p>세계 (World): 분화됨 경제 (Economy): 지역중심, 최저성장 인구 (Population): 계속 증가 지배구조 (Governance): 지역 정체성 보존 기술 (Technology): 가장 분화되고 더딘 발전</p>
<p>B1 줄거리</p> <p>세계 (World): 집중 경제 (Economy): 서비스 및 정보 기반, A1 보다는 저성장 인구 (Population): A1 경우와 동일 지배구조 (Governance): 경제적, 사회적, 환경적 지속 가능성의 확보를 위한 전 지구적인 해답 기술 (Technology): 청정 기술</p>	<p>B2 줄거리</p> <p>세계 (World): 지역적 해답 경제 (Economy): 중간 수준의 성장 인구 (Population): A2 경우보다 낮은 비율로 계속 증가 지배구조 (Governance): 환경보호 및 사회적 공평성 확보를 위한 지방/지역적 해답 기술 (Technology): A2 경우보다는 빠르게 발전하나, A1/B1 보다는 느리고 다양하게 발전</p>
← 환경 강조 (Environmental Emphasis)	

↑ 전 지구적 통합 (Global Integration)

지역 강조 (Regional Emphasis) ↓

그림 1.2: 4가지 SRES 줄거리의 각종 특징에 대한 요약 (Nakićenović and Swart, 2000). [WG II Fig. 2.5]

건설될 것이다. 그러나, 수력발전 수요측면에서의 장래 증가가 가져올 충격은 심각하게 고려되지 못하고 있다. (World Commission on Dams, 2000; Scudder, 2005). 이미 산업화된 국가에서는 댐의 수는 별 변동이 없을 것이 거의 분명하며, 일부 댐들은 해체되는 경우도 있을 것이다. 기후변화로 인한 유출의 시간적 변동성이 커지는 상황에서 댐에 저류되는 수자원은 연 유출량이 크게 감소하지 않는 지역에서 특히 큰 편익을 주게 될 것이다. 환경 유량에 대한 수요에 대처하기 위해서는 저수지의 운영률을 수정해야 할 필요가 생길 것이며, 타 목적의 수자원 이용이 제약이 받게 될 가능성도 있다. UN의 새천년 개발목표 (Millennium Development Goals, MDGs, 표 7.1 참조)를 달성하기 위해서는 수자원과 위생상태의 개선이 필수적이다. 또한 장래에는 하수처리수의 재이용과 해수 담수화는 건조 지역이나 준 건조 지역에서 용수 공급원으로서 대단히 중요한 위치를 차지할 것으로 전망되나, 해수 담수화에 사용되는 과도한 에너지 사용과 하수 처리수의 재이용과 관련되는 환경적 영향 등 앞으로 해결해 나가야 할 문제점도 없지 않다. 효율적인 물 가격 정책이나 비용 측면에서 유리한 물 수요 관리 정책 등 수자원 관련 대안들이 적극적으로 고려되어야 할 것이다. [WG II 3.3.2, 3.4.1, 3.7]

장래에는 선진국이나 개발도상국에 있어서 하수처리의 증가가 예상되나 개발도상국의 경우는 영양 물질이나 중금속 및 유기 물질 등 점 오염 물질의 방류는 증가할 것으로 예상된다. 개발도상국이건 산업화된 국가이건 간에 각종 화학 물질의 생산과 소비가 증가될 것이기 때문에 지표수나 지하 수역으로의 유기질 미생물 오염 부하의 배출은 증가할 것으로 예상된다. 이들 오염물질 중 상당 부분은 현재의 하수 처리 기술로는 제거가 어렵다. 또한, 해수면 상승이 우배수 시스템의 운영과

해안지역에서의 하수 배제에 미치는 영향 때문에 수질이 악화될 우려가 있다. [WG II 3.2.2, 3.4.4]

농경활동으로부터 발생하는 영양 물질과 농약의 확산형 배출은 산업화된 선진국의 경우 계속적으로 중요한 문제가 될 것으로 보이며, 개발도상국에서도 크게 증가할 것이 분명하므로 심각한 수질악화 문제가 발생할 것으로 예상된다. “천년생태계평가 (Millennium Ecosystem Assessment, 2005a)”에서의 4가지 시나리오(Global orchestration, Order from strength, Adapting mosaic, TechnoGarden)에 의하면 전 지구적인 질소 비료 사용량은 2000년의 9천만 톤에서 2050년까지는 1억 4천만 톤으로 크게 증가할 것으로 예상하고 있다. 4가지 시나리오 중 앞의 3가지 시나리오의 경우는 2050년까지 하천에서의 질소 성분의 운송이 증가하나, TechnoGarden 시나리오 (IPCC SRES 시나리오 B1과 유사함)의 경우는 질소 운송량이 감소할 것으로 보고 되고 있다(Millennium Ecosystem Assessment, 2005b). [WG II 3.3.2]

물 이용에 가장 중요한 영향을 미치는 인자는 인구와 경제 발전이지만, 물의 가치에 대한 사회적 인식변화 또한 대단히 중요하다. 물의 가치에 대한 인식변화란 관개용수 공급보다는 생활용수 및 공업용수 공급에 우선권을 인정하며, 물 절약기술과 용수가격 정책 등을 포함하는 물의 효율적 이용의 필요성이 강조되어야 함을 의미한다. 위에서 언급한 4가지 천년 생태계 평가 시나리오 모두에서 2050년의 연간 인구 1인당 생활 용수량은 유럽 지역의 2000년도 평균값인 약 100m³ 정도이며, 전 세계 여러 지역에서의 평균값도 이와 비슷한 것으로 보고되고 있다 (Millennium Ecosystem Assessment, 2005b). [WG II 3.3.2]

장래의 관개용수 이용에 지배적인 영향을 미치는 비 기후 변화 인자들은 관개 면적의 범위라든지 재배작물의 종류, 재배강도 (cropping intensity), 관개용수 이용의 효율성 등이다. UN 식량기구 (Food and Agriculture Organization, FAO)의 전망에 의하면 전 세계 관개면적의 75%를 차지하는 개발도상국들은 2030년까지 매년 0.6%씩 관개면적을 확장해 나갈 것으로 보고 있으며, 관개면적에서의 재배강도 또한 매년 1.27 작물 수에서 1.41 작물 수로 증가할 것이며, 관개용수 이용효율도 약간은 증가할 것으로 전망하고 있다(Bruinsma, 2003). 이와 같은 전망치는 Bruinsma가 2030년까지는 기후변화가 농업에 영향을 미치지 않을 것이라는 가정을 전제로 한 것이다.

위에서 언급한 관개용수 관련 비 기후 인자들의 장래 증가 성향은 아시아 남부지역과 중국 북부지역, 근동 지역 및 북미지역 등 이미 물 스트레스를 받고 있는 지역에서 나타나고 있다. 그러나, “새천년 생태계 평가”에서의 4가지 시나리오에서는 2050년까지 전 지구적인 관개면적 증가율이 매년 0~0.18% 밖에 되지 않을 것으로 가정하고 있다. 2050년 이후에는 시나리오 “Global orchestration” (IPCC SRES의 A1 시나리오와 유사함)을 제외한 모든 시나리오에서 관개 면적은 안정적인 상태에 들어 가거나 혹은 약간 감소하는 것으로 가정하였다 (Millennium Ecosystem Assessment, 2005a). 수정 A2 인구 시나리오와 FAO의 장기 전망에 근거한 다른 한 연구에서는 전 지구적으로 관개 면적이 2080년까지 아시아 남부 지역과 아프리카, 라틴 아메리카 등지에서 약 40% 이상 증가할 것으로 전망하였으며, 이는 매년 약 0.4% 평균 증가율에 해당한다 (Fischer, 2006). [WG II 3.3.2]

1.4 본 기술 보고서의 개요

이 기술보고서는 전부 8개 절(Sections)로 구성되어 있다. 제1절 서론에 이어, 제2절은 주로 WG I의 평가를 기본으로 하여 수문변량의 관측과 전망을 배경으로 기후변화 과학(Science of Climate Change)의 내용에 관해 살펴보고, 제3절에서는 WG II의 평가로부터 도출된 관측되었거나 전망되는 기후변화로 인한 물 관련 영향과 가용한 적응

전략(adaptation strategies)에 대해 개략적으로 살펴보았다. 제4절에서는 수자원 분야의 부문별로 기후변화로 인한

영향의 관찰과 전망, 그리고 적응전략과 지속가능한 개발 방향 등을 다루었으며, 제5절에서는 지구상의 지역(혹은 대륙별)로 기후변화와 수자원의 관계를 분석하였다. 제6절에서는 WG III의 평가를 기초로 물 관련 기후변화 영향의 완화(mitigation) 방안을 살펴보았고, 제7절에서는 기후변화 대응정책과 지속가능한 개발을 위한 방향을 조망하였으며, 마지막으로 제8절에서는 기후변화 관련한 현재의 지식기반의 부족함과 추후의 연구방향에 대하여 제안하였다. 이 기술보고서에서는 Box 1.1과 같이 IPCC 제4차 보고서(AR4)에서 사용한 불확정성(uncertainties)에 관련되는 표준적인 어휘(standard uncertainty language)를 그대로 사용하고 있다 (Box 1.1 참조).

Box 1.1: 현 지식에 있어서의 불확실성: 본 기술보고서에서의 처리방법 (SYR)

IPCC의 Uncertainty Guidance Note⁹⁾는 IPCC 산하 모든 실무그룹 (Working Groups, WG)의 활동과 본 기술보고서 작성 과정에서 부딪치게 되는 불확실성 (Uncertainty)의 처리를 위한 일관된 체계를 정의하고 있다. WG 별로 각기 다른 전문 영역의 자료를 평가하고 참고문헌으로부터 발췌된 불확실성의 처리를 위한 다양한 접근 방법을 다루어야 하기 때문에 불확실성의 처리를 위한 이 체계는 대단히 광범위하고 복잡하다. 자연과학 분야에서 사용되는 자료나 각종 지표 및 해석의 성격은 일반적으로 기술 개발의 평가나 사회과학 분야에서 사용되는 것과는 상당히 다르다. WG I은 전자 (前者, 자연과학 분야)에 초점을 맞추어 활동하며, WG III는 후자 (後者, 기술개발 분야)에 초점을 맞추며, WG II는 두 분야를 함께 다룬다할 수 있다.

불확실성을 서술하기 위해서는 3가지 각기 다른 접근 방법이 사용되며, 각각은 독특한 형태의 언어로 서술된다. 이들 3가지 접근방법 중에서 어느 방법을 선택하느냐는 가용한 정보의 성격과 현재의 각종 과학적 이해의 사실 정도와 완벽도에 대한 저자의 전문적 판단에 달려있는 것이다.

불확실성을 정상적으로 평가하고자 할 경우에는 당해 증거 (어떤 주장이 사실인지 혹은 타당한지를 증명해 주는 이론에 근거한 정보나 현상의 관측 혹은 모델)의 양과 질, 그리고 합치 정도 (특정현상에 대한 문헌상의 사실과의 일치 정도)를 상대적으로 특성지어 주는 방법을 사용할 수 있다.

이 방법은 WG III가 사용한 방법으로 다음과 같은 용어를 사용하였다.

- High agreement: 높은 수준의 일치도가 인정됨
- Much evidence: 많은 증거가 있음
- Medium agreement: 중간 수준의 일치도가 인정됨
- Medium evidence: 중간정도의 증거가 있음.

관련 자료와 모델 혹은 각종 분석의 정확성 여부에 대한 전문가 판단에 의해 보다 정량적으로 불확실성을 평가하고자 할 경우에는 다음과 같은 신뢰도 수준 (confidence level)을 사용하여 평가된 현상의 사실여부를 표현하고 있다.

- Very high confidence: 최소 90%의 신뢰도
- High confidence: 약 80%의 신뢰도
- Medium confidence: 약 50%의 신뢰도
- Low confidence: 약 20%의 신뢰도
- Very low confidence: 10% 이하의 신뢰도

9) <http://www.ipcc.ch/meetings/ar4-workshops-express-meetings/uncertainty-guidance-note.pdf>.

Box 1.1: 현 지식에 있어서의 불확실성: 본 기술보고서에서의 처리 방법 (SYR) <계속>

한편, 어떤 특정 사안의 불확실성을 전문가 판단과 관련 자료 혹은 모형에 의한 모의 자료의 통계학적 분석에 의해 평가할 경우에는 다음과 같은 발생 가능성 (likelihood) 범위를 사용하여 특정 현상의 발생 확률을 평가한다.

- Virtually certain: 99% 이상의 확률로 확정적
- Extremely likely: 95% 이상의 확률로 발생
- Very likely: 90% 이상의 확률로 발생
- More likely than not: 50% 이상의 확률로 발생
- About as likely as not: 33%~66%의 확률로 발생
- Unlikely: 33% 이하의 확률로 발생
- Very unlikely: 10% 이하의 확률로 발생
- Extremely unlikely: 5% 이하의 확률로 발생
- Exceptionally unlikely: 1% 이하의 확률로 발생

WGII는 위의 신뢰도 수준과 발생 가능성 평가의 두 가지를 혼합하여 사용한 반면 WG I은 주로 발생 가능성 평가 기준을 사용하였다.

이 기술보고서에서는 WG별로 사용한 불확정성 평가 기준을 따르기로 하며, 사안이 1개 이상의 WG로부터 제공된 정보를 바탕으로 할 경우에는 불확정성은 WG별 보고서에서 도출된 내용과 일관성 있게 기술하였다.

2

물과 관련하여 관측된 기후변화와
전망된 기후변화

**Observed and Projected Changes
in Climate as They Relate to Water**

물은 대기권, 수권(水圈), 생물권, 지표면 등 기후 시스템을 구성하고 있는 모든 요소에 모두 포함되어 있으므로 기후변화는 여러 가지 메커니즘을 통해 물에 여러 가지 영향을 미치게 된다. 본 절에서는 물과 관련된 여러 가지 변수들의 최근 변화에 대한 관측 결과와 장래 변화에 대한 전망을 토론하고자 한다.

2.1 물과 관련하여 관측된 기후의 변화

수문순환 과정 (hydrological cycle)은 대기의 온도 및 복사열 수지와 밀접하게 연결되어 있다. 전 지구적인 평균 기온 및 해수면 온도의 상승과 눈과 얼음의 광범위한 용해 및 해수면의 상승 등은 각종 관측을 통해 사실로 확인되고 있기 때문에 최근 수십 년간 진행되어 온 기후 시스템의 온난화는 이제 명백한 사실로 받아들일 수밖에 없다. 기후에 미치는 인위적인 순 복사강제력은 양(+의 값으로 산정되며 (온난화 효과), 2005년 기준 최적 산정치는 약 1.6Watt/m^2 (1750년 산업화 이전 값과 비교할 경우)이다. 1906년부터 2005년까지의 최근 100년간 지구 표면 온도에 대한 최적 산정치의 선형적 경향은 약 0.74°C (지역에 따라 $0.56\sim 0.92^\circ\text{C}$ 일 가능성 있음)의 온난화로 나타나고 있으며, 최근 50년 동안 급속한 온난화 성향이 계속되고 있다. 새로운 해석에 의하면 대류권의 저층 및 중층부에서의 온난화율은 지구 표면에서의 온난화율과 비슷한 것으로 나타났으며, 20세기 중반 이후에 관측된 지구 온도 증가는 실측된 인간 활동으로 인한 온실가스 농도의 증가 때문임이 거의 확실 (*very likely*)한 것으로 보고 있다. 대륙규모에서 볼 때 최근 50년 동안 남극 대륙을 제외한 모든 대륙에서 인간 활동으로 인한 온난화는 상당한 진전을 보았을 것으로 (*likely*) 보고 있으며, 광범위한 지역에서 추운 낮과 밤, 그리고 서리 등의 발생 횟수가 줄어든 반면에 뜨거운 낮과 밤, 그리고 열 파(heatwaves) 현상 등이 자주 발생한 것으로 관측되고 있다. [WGI SPM]

지난 수십 년간에 걸친 기후 온난화는 강수 강도와 극한치를 포함하는 강수 패턴의 변화라든지, 광범위한 눈과 얼음의 용해, 대기 중 수증기의 증가, 증발량의 증가, 토양 수분과 유출량의 변화 등 수문순환과 수문 시스템의 여러 구성 요소에서 생기는 변화들과 지속적인 관련성을 가진다. 즉, 수문순환 과정의 여러 성분 과정은 경년적으로 혹은 10년 단위로 중요한 자연적 변동성을 보이게 된다. 그러나, 지역적인 큰 차이라든지 각종 계측망의 공간적 및 시간적 계측 범위의 한계 때문에 각종 수문변량의 변동 성향에는 아직도 상당한 불확실성이 존재한다 (Huntington, 2006). 현재에도 대양에서의 강수량의 경년적 변동과 성향을 밝히는 일은 쉽지 않다. [WGI 3.3]

관측된 수문현상의 변화를 이해하고 그 원인을 밝히는 것도 쉽지 않은 일이다. 유출과 같은 수문변량에 대해 비 기후관련 인자들 (취수량의 변화 등)은 국지적으로 아주 중요한 역할을 하며, 강제력 매개체에 대한 기후 반응 또한 대단히 복잡하다. 예를 들면, 에어러솔 (煙霧, aerosol)이 발휘하는 효과중의 하나는 지면으로 도달할 열을 에어러솔 층에서 차단함으로써 증발을 유도하여 지표면상에 잠재열을 방출하게 된다. 따라서,

열을 흡수하는 에어러솔은 국지적으로 증발량과 강수량을 감소시킬 수 있다. 여러 기후 모델에서는 에어러솔의 이러한 과정을 생략하거나 혹은 아주 간단하게 포함 시키기도 하며, 강수에 미치는 이들 영향의 국지적인 크기는 적절히 고려되지 못하고 있다. 이와 같은 불확실성에도 불구하고 관측된 수문학적 변화의 원인규명에 관해서 여러 가지 해설이 있으며, 이들은 AR4에서의 평가 결과를 바탕으로 하여 아래에서 개개 변량에 대해 토의하기로 한다. [WGI 3.3, 7.5.2, 8.2.1, 8.2.5, 9.5.4; WGII 3.1, 3.2]

2.1.1 강수량과 수증기량

육지 상에서의 강수량의 변화 성향은 여러 자료군을 사용하여 분석되어 왔다. 가장 대표적인 연구는 Global Historical Climatology Network (GHCN: Peterson and Vose, 1997)이며, 이밖에도 Precipitation Reconstruction over Land (PREC/L: Chen et al., 2002), Global Precipitation Climatology Project (GPCP: Adler et al., 2003), Global Precipitation Climatology Centre (GPCC: Beck et al., 2005), 그리고 Climatic Research Unit (CRU: Mitchell and Jones, 2005) 등이 있다. 20세기 동안의 육지 상의 강수량은 북위 $30\sim 85^\circ$ 사이에서 일반적으로 증가하였으나, 최근 30~40년 동안에는 남위 10° 에서 북위 30° 사이 (그림 2.1)에서 상당히 감소하였다. 북대서양 지역 및 남위 25° 의 남부지역에서의 해수면도의 감소는 대양에서의 강수량의 변화를 암시한다. 북위 $10\sim 30^\circ$ 까지는 강수량은 1900년에서 1950년대까지 크게 증가하였으나, 1970년 이후에는 감소 성향을 보였다. 남반구의 과열대 지역에 걸친 반구 규모의 경향성은 크게 나타나지 않았다. 강수량은 큰 규모의 자연적 변동성 패턴에 의해 크게 영향을 받는 것이므로 현재로서는 전 지구적인 강수량의 변화에 대한 원인은 분명하지 못하다고 할 수 있다. [WGI 3.3.2.1]

그림 2.2에 표시된 GHCN (Global Historical Climatology Network)의 1901년~2005년 기간 동안의 전 지구적 평균 강수량의 선형적 경향은 통계학적으로는 의미가 별로 없다. 1951년~2005년에 대한 강수량의 변동 성향 추정도 유의성을 가지지 못하며, 자료집단 간에 상당한 차이를 보이고 있어 공간적 및 시간적으로 큰 변동성을 가지는 강수량과 같은 자연 현상을 계측한다는 것이 얼마나 어려운가를 보여주고 있다. 전 지구적인 변화는 결코 선형적이지 않아 상당한 크기의 경년 혹은 10년 간격 변동폭을 보이며, 1950년~1970년 기간 동안은 비교적 강수량이 많은 기간이었으나 그 후에는 강수량이 감소하였음을 알 수 있다. 전 지구적인 평균 강수량은 열대 지방과 아열대 지방의 강수량에 의해 크게 지배됨을 알 수 있다. [WGI 3.3.2.1]

그림 2.3은 위도와 경도 격자 $5^\circ\times 5^\circ$ 로 내삽한 GHCN 관측소의 강수량 자료를 사용하여 산정한 연평균 강수량의 공간적 분포 성향을 보이고 있다. 북미지역과 유럽 및 아시아 지역 대부분의 경우, 1901년부터 105년간 연평균 강수량은 증가해왔고, 이는 그림 2.1의 결과와 비교하면 일관성 있는 변화라 할 수 있다. 1979년~2005년 기간의 경우는 북미의 남서부 지역 강수량이 크게 적어지는 등 보다 복잡한 패턴을 보이고 있고, 유럽 및 아시아 지역 대부분의 경우는 두 기간 공히 강수량 증가를 보이는 격자수가 강수량 감소를 보이는 격자수보다 더 큼을 알 수 있다. 또한, 북유럽 지역과 지중해 지역 사이에는 북대서양 진동 (North Atlantic

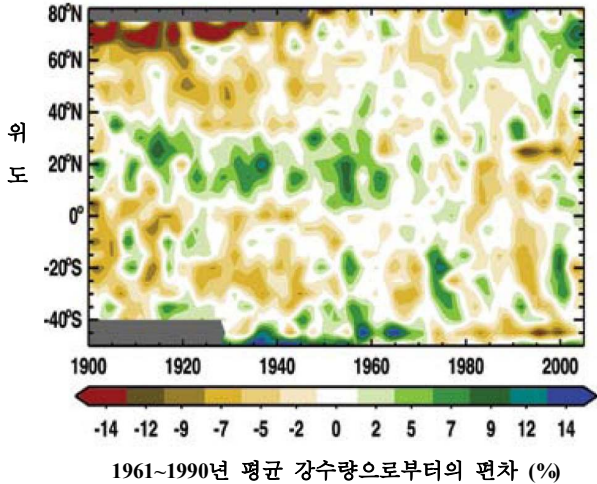


그림 2.1: 1961~1990년의 연강수량 평균값에 대비한 1900~2005년간의 육지상 연강수량의 편차(%)에 대한 위도-연도 관계. 편차값들은 모든 위도에 걸쳐 평균되었으며, 약 6년보다 작은 변동량을 제거하기 위해 필터로 평활화 하였다. 색깔스케일은 비선형적이며 회색으로 표시된 부분은 결측 자료를 표시한다. [WGI Fig. 3.15]

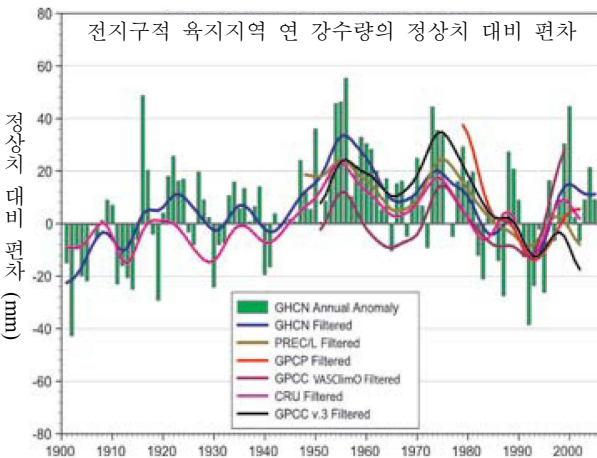


그림 2.2: 1981~2000년 기준 기간에 대한 GHCN으로 관측된 전 지구적 육지 지역 연강수량의 정상치 대비 편차(mm)의 1900~2005년 시계열. 10년 단위 스케일의 평활화된 값들이 GHCN, PREC/L, GPCP, GPCC, 그리고 CRU 자료 세트에 대해 주어져 있다. [WGI Fig. 3.12]

Oscillation, NAO)의 변화와 관련된 역변동의 성향을 나타내고 있다 (제2.1.7절 참조). [WGI 3.3.2.2]

남미 전체에 걸쳐서는 아마존 강 유역이라든지 남미의 남동부 지역과 파타고니아 (Patagonia) 지역 등에서 관측된 강수량은 대체로 증가한 반면, 칠레와 남미의 서해안 지역은 관측된 강수량이 오히려 감소하였다. 아마존 지역이나 중앙아메리카, 북미의 서부 지역 등은 위도 상으로 볼 때 비슷한 위치에 있으며 몬순 기후의 영향을 받는 것으로 보인다. [WGI 3.3.2.2]

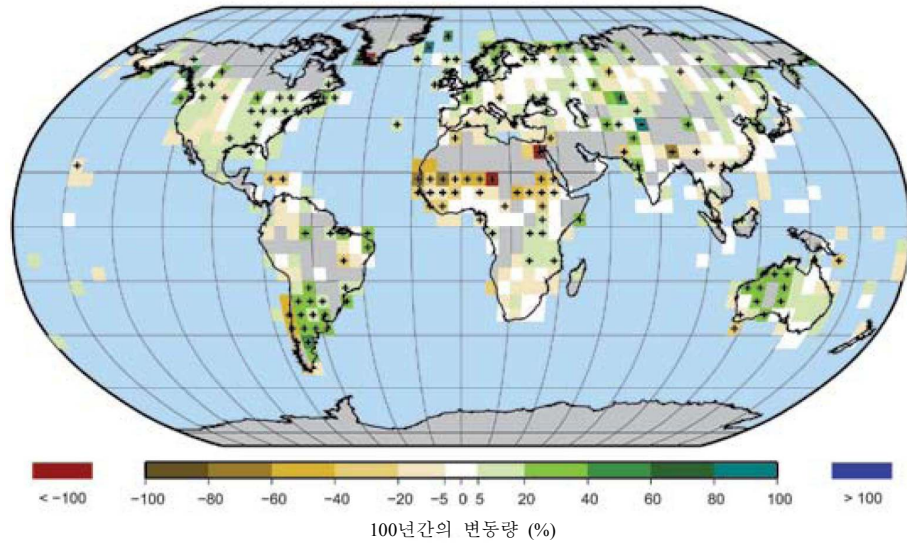
1901년 이래 연평균 강수량의 가장 큰 감소는 서부 아프리카 및 Sahel (제5.1절 참조) 지역에서 관측되었으며, 아프리카의 다른 많은 지역과 아시아의 남부 지역에서도 강수량의 감소 성향이 관측되었다. 1979년 이후에는 Sahel 지역과 열대 아프리카 지역의 여러 곳에서 강수량은 증가하였으며 이는 원격상관 (Teleconnection) 패턴과 관련된 강수량의 변동과 관련이 있는 것으로 보인다. 인도의 북서부 지역에서의 1901년~2005년 기간 동안의 연평균 강수량은 100년 동안 약 20% 이상의 증가를 보였으나, 동일 지역에서의 1979년 이후 연평균 강수량은 크게 감소한 것으로 나타났다. 또한, 호주의 북서부 지역에서는 그림 2.3의 두 기간 동안 연평균 강수량이 상당히, 혹은 크게 증가한 것으로 나타났으나 남동부 지역에서는 반대로 감소 성향을 보였다. [WGI 3.3.2.2]

몇 가지 기후모델에 의한 연구에 따르면 인간 활동이나 화산 활동, 태양열 등으로 인한 열방사 조건에 있어서의 변화는 연평균 강수량의 관측 성향에 일부 영향을 미쳤다고 볼 수 있으나, 기후 모델은 관측 값과 비교할 때 연평균 강수량의 분산을 과소 추정하는 경향을 보인다. 이러한 차이는 태양열의 단파 요인의 과소평가라든지 과소평가된 기후의 변동성, 관측오차, 혹은 이들 요인의 복합적인 원인 때문인지는 분명하지 않다. 이론적인 고찰에 의해 온실가스의 증가가 연평균 강수량을 증가시킨다는 결론을 내리기는 힘들다. [WGI 9.5.4]

연간 총 강수량이 감소하는 지역에서도 대단히 큰 강수 사상이 세계 여러 곳에서 발생하는 것으로 관측되고 있다. 이러한 사상별 강수량의 증가는 대기 중의 수증기량의 증가와 연관되어 있으며 관측된 온난화 현상과 일관성을 가진다(그림 2.4). 그러나, 강수량의 통계치들은 경년 혹은 10년 간격 규모의 변동성에 의해 지배되며 변동성향에 대한 추정은 공간적으로 상관성이 없다 (Peterson et al., 2002; Griffiths et al., 2003; Herath and Ratnayake, 2004). 더욱이, 극히 소수의 지역에서만 신뢰성을 가지고 극한 강수량의 발생성향을 평가하기에 충분한 질과 자료 기간을 가진 자료 계열을 확보할 수 있다. 통계적으로 매우 강한 강수의 발생 회수가 크게 증가하는 곳으로는 유럽과 북미지역 (Klein Tank and Können, 2003; Kunkel et al., 2003; Groisman et al., 2004; Haylock and Goodess, 2004)이 관측에 의해 입증되었다. 연평균 강수량 변화의 계절성은 지구상의 위치에 따라 다른 것으로 미국에서는 따뜻한 계절에 강수량 증가가 가장 큰 반면에, 유럽지역에서는 차가운 계절에 가장 큰 것으로 관찰되었다 (Groisman et al., 2004; Haylock and Goodess, 2004). 지역적인 강수량 변화에 대한 내용은 제5절에서 추가적으로 살펴보기로 한다. [WGI 3.8.2.2]

이론적인 기후모델에 의한 연구결과에 따르면 증가하는 온실가스로 인해 온난화되는 기후변화에서는 평균 강수량에 비해 극한 강수량(extreme precipitation)이 더욱 더 커지는 것으로 나타났다. 따라서, 인간 활동으로 인한 기후변화 영향은 평균값보다 극한 강수량 자료에서 그 영향을 더 쉽게 밝힐 수 있을 것으로 보인다. 이는 극한 강수량은 대기 중에 존재하는 수증기량에 의해 결정되지만 평균 강수량은 대기가 태양복사열 증장과 에너지를 공간적으로 방사하는 능력에 의해 결정되며, 온실가스량이 증가하면 장파에너지의 방출은

연 강수량의 변동성향 (1901~2005)



연 강수량의 변동성향 (1979~2005)

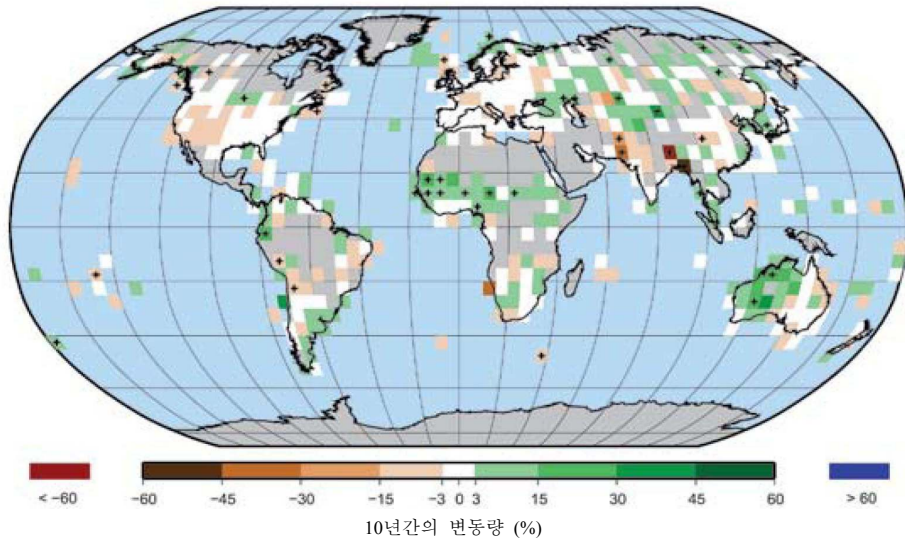


그림 2.3: 연강수량의 변동 성향, 1901~2005년(위의 그림: 100년간의 변동량, %)과 1979~2005년(아래 그림: 10년간의 변동량, %). 여기서, 변동량(%)은 1961~1990년 동안의 GHCN 관측소 자료로부터 산정한 평균 연강수량을 기준으로 한 값이다. 회색으로 표시된 지역은 신뢰할만한 성향을 표시하기에는 자료가 불충분한 지역이다. [WGI Fig. 3.13]

제한을 받기 때문이다. 이와 같은 점을 미루어보면 관측되었거나 모델에 의한 연구결과에 의한 결론으로 극한 강수 사상의 발생 횟수는 20세기 말에 걸쳐 대부분의 육지지역에서 크게 증가하였을 것으로 보며, 이러한 성향은 인간 활동의 영향을 받은 결과일 것으로 예상된다, 현재로서는 그 영향의 크기를 평가하기는 어렵다. [WGI SPM, 9.5.4, 10.3.6, FAQ10.1]

약 1970년 이래에 북대서양 지역에서의 강력한 열대 사이클론이 발생한 횟수가 증가되었음이 관측되었으며, 이로 인해 열대지방의 해수면 온도(SSTs)가 증가하였다. 북대서양 지역이외의 다른 지역에서도 강력한 열대 사이클론의 발생이 증가하는 것으로 보고되고 있으나,

이들 지역에서의 자료의 질은 크게 떨어지는 것으로 알려져 있다. 1970년경부터 시작된 일상적인 인공위성 관측 이전에 관측된 열대 사이클론 기록의 질과 수십 년 주기의 변동성은 열대 사이클론 활동의 장기 변동성향을 밝혀내는데 어려움을 준다. 열대 사이클론의 연간 발생 횟수는 뚜렷한 경향을 보이지 않으며, 인간 활동의 영향은 관측된 강력한 열대 사이클론 활동의 증가에 상당한 기여를 한 것으로 보인다. 그러나, 지구상의 여러 지역에서 1970년 이래에 발생한 강도가 대단히 큰 강수 사상은 분명히 증가하였으며, 그 증가 정도는 현재에 사용되고 있는 여러 기후모델로 모의되는 값보다 훨씬 큰 것으로 알려져 있다. [WGI SPM]

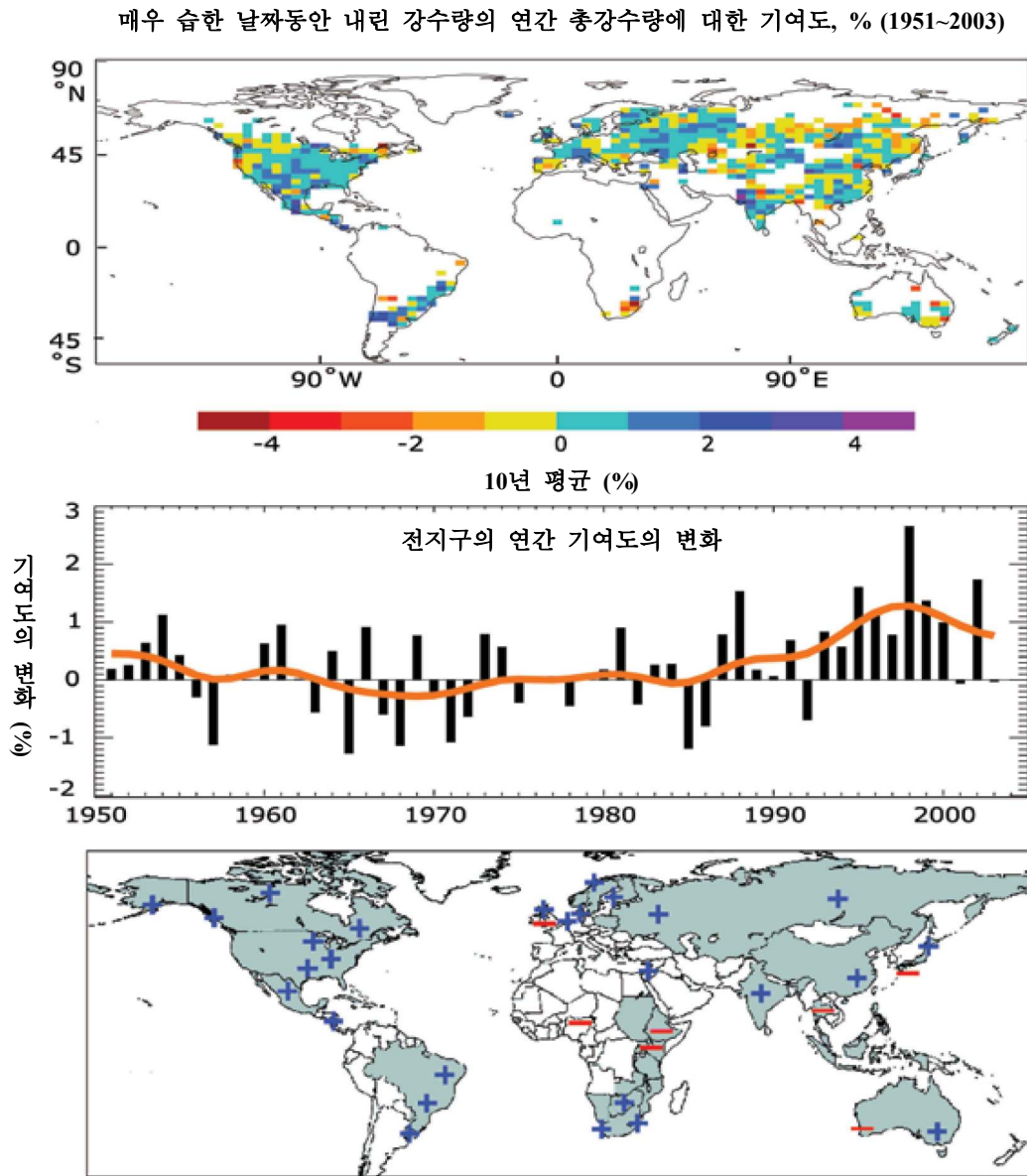


그림 2.4: 위의 그림은 1951-2003년 기간 동안의 매우 습한 날짜 (95 백분위수 이상)동안 내린 강수량의 연간 총 강수량에 대한 기여도 (10년 평균, %)의 관측된 성향을 표시함. 중간 그림은 전 지구의 연간강수량에 대한 매우 습한 날짜 동안 내린 강수량의 기여도 (1961-1990년 평균치인 22.5%와 비교한 %)의 변화를 표시함 (Alexander et al., 2006 참조). 아래 그림은 연 혹은 계절 강수량의 변화에 대비한 강한, 혹은 매우 강한 강수의 불균형한 변화들이 증가(+) 혹은 감소(-)로 기록된 지역들을 표시하고 있다 (Groisman et al., 2005 참조). [WGI Fig. 3.39]

최근 수십 년 동안 대류권의 수증기는 증가하고 있는 것으로 관측되었으며, 이는 관측되고 있는 온난화 현상과 상대습도가 거의 일정해져가고 있는 현상과도 대체로 일치한다. 대기 중의 수증기량은 1988년부터 2004년까지 매 10년당 1.2±0.3%씩 바다에서의 수증기량보다 증가해왔으며, 이는 해수면의 온도 변화와도 일치하는 성향을 나타낸다. 여러 연구에서도 지표면 부근의 대기 중 수분은 증가하는 것으로 나타났으나, 지역 간 편차나 낮과 밤사이의 편차가 존재한다. 수문 순환

과정의 다른 성분 과정에서처럼 수증기의 경년 및 10년간격 변화는 상당히 크나 바다 지역과 북반구의 여러 지역에서 관측된 증가 성향은 뚜렷하다. 관측된 해수면 온도(Sea Surface Temperature, SST)의 상승은 주로 인간 활동으로 인한 것으로 보이며, 이는 인간 활동이 바다에서의 대기 중 수분을 증가시키는데 영향을 미치는 것으로 보고 있다. 그러나, AR4를 작성하는 시점에서 정확한 원인 규명을 위해 시도된 공식적인 연구는 찾아볼 수 없다. [WGI 3.4.2, 9.5.4]

2.1.2 눈과 육지 상의 얼음

육지 상의 눈, 얼음 및 적설 지표면 (snow cover)으로 구성되는 빙권 (氷圈, cryosphere)은 전 세계 담수의 약 75%의 물을 저장하고 있다. 기후 시스템에 있어서 빙권과 그곳에서 일어나는 변화는 지표면의 에너지 수지와 물 순환 및 해수면 변화와 밀접하게 연관되어 있다. 전 세계 인구의 약 1/6 이상이 빙하 (glacier) 또는 용설 (snowmelt)로 인해 흐르는 하천 유역에 살고 있다 (Stern, 2007). [WGII 3.4.1] 그림 2.5는 빙권에 있어서의 여러 구성성분의 연차적인 변동성향을 보여주고 있다. [WGI Chapter 4]

2.1.2.1 적설 지표면, 동토, 호수 및 하천의 얼음

눈으로 덮이는 지면(적설 지표면, snow cover)은 지구상의 모든 지역에서 크게 감소되어 왔으며 특히, 봄과 여름에 심한 감소를 보였다. 1966년~2005년에 걸쳐 인공위성으로 관측된 북반구의 적설 지표면은 11월과 12월을 제외하고는 1980년대 후반부 동안 연평균으로 매월 5%씩 계단식 감소를 보여 왔다. 북미주의 서부지역과 스위스 알프스 지역의 고산 지대의 표고가 낮은 지역에서의 적설지표면의 감소가 가장 컸다. 한편, 적설지표면의 규모에 대한 자료가 빈약한 남반구 지역에서는 지난 40여 년 동안 약간 감소하였거나 별로 변화가 없는 것으로 보고되고 있다. [WGI 4.2.2]

영구 동토(permafrost)나 계절적 결빙 지역의 해동은 지표면의 특성이나 배수 시스템에 큰 변화를 가져오게 된다. 계절적으로 얼어붙는 지면 (계절 동토)은 영구 동토 지역이 아닌 곳에서의 얼어있는 토양이 녹는 지역과 여름에는 녹고 겨울에는 얼어버리는 영구 동토의 표층부 지역을 뜻한다. 비영구 동토 지역에서의 계절적 결빙 지역의 최대 범위는 1901년~2002년 동안 북반구에서 약 7% 정도 감소하였으며 봄철에는 15%까지도 감소한 것으로 알려져 있다. 20세기 중반부 이래 유럽과 아시아 지역에서의 최대 해동 깊이는 온난화된 겨울과 적설 깊이의 증가로 인해 약 0.3m에 달하는 것으로 알려져 있으며, 1956년~1990년 기간 동안 러시아의 31개 관측소에서 측정된 결빙 지면의 해동 깊이는 약 0.21m에 달하였다. 한편, 영구 동토층의 상부에서의 기온은 극지방에서 1980년 이래 약 3℃까지 증가하였다. 영구 동토의 온난화와 결빙지면의 해동은 여름철 대기 온도의 상승과 적설 지표면의 깊이 및 적설 기간의 변화로 인한 것으로 추측된다. [WGI 4.7, Chapter 9]

하천과 호수의 얼음이 얼고 녹는 날짜는 공간적으로 상당한 변동성을 보인다. 과거 150년간의 북반구에 대한 자료를 평균해보면 결빙 시작일은 100년간 약 5.8±1.6일 정도 늦어지며 해빙 시작일은 100년간 약 6.5±1.2일 정도 빨라진다. 하천과 바다에서의 결빙 두께의 변화 성향을 평가할 수 있는 발간된 자료는 현재로서는 충분하지 못하다. 모델링에 의한 연구 (Duguay et al., 2003)에 의하면 최대 결빙 두께와 해빙 시작일의 변동성은 주로 강설 현상의 변동성에 의해 좌우되는 것으로 알려져 있다. [WGI 4.3]

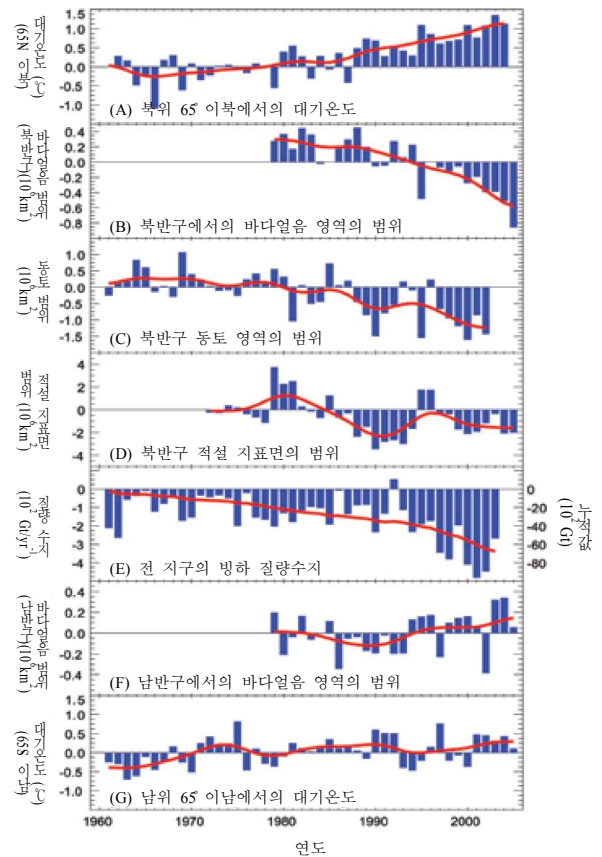


그림 2.5: 빙권의 여러 특성치들의 편차 (장기간 동안의 평균치 기준) 시계열 (A) 북위 65° 이북에서의 대기온도, (B) 북반구에서의 바다얼음 영역의 범위, (C) 북반구 동토 (frozen ground) 영역의 범위, (D) 북반구 적설 지표면의 범위, (E) 전 지구의 빙하 질량수지, (F) 남반구에서의 바다얼음 영역의 범위, (G) 남위 65° 이남에서의 대기온도. [WGI FAQ 4.1에서 발췌]

2.1.2.2 빙하와 만년설

북반구와 남미의 남단에 위치한 Patagonia 지방에 있는 빙하(glaciers)와 만년설(萬年雪, ice caps)은 지난 반세기 동안 평균적으로 그 체적이 용해작용에 의해 점점 크게 줄어들어 왔다.[WGI 4.5.2, 4.6.2.2.1] 그 결과 그림 2.6에서 보듯바와 같이 빙하와 만년설의 체적 (질량)은 빠른 속도로 상당한 감소를 보여 왔다. 1960/61년부터 1989/90년까지의 감소량은 136 ± 57 Gt/year (0.3 ± 0.16 mm/year의 상당 해수면, sea-level equivalent, SLE)였으며, 1990/91년부터 2003/04년까지의 감소량은 280 ± 79 Gt/year (0.77 ± 0.22 mm/year, SLE)에 달했다. 20세기 기간 동안의 빙하와 만년설의 전 지구적 체적 감소는 열대지역에서는 대기 수분의 변화로 인한 것일 수 있으나 대체로 광범위한 지구 온난화가 그 원인인 것으로 이해되고 있으며, 이와 같은 빙하와 만년설의 지속적인 용해가 관측되고 있는 해수면 상승에 크게 영향을 미치는 것이 거의 틀림이 없는 것으로(very likely) 보고 있다. [WGI 4.5 Table 4.4, 9.5]

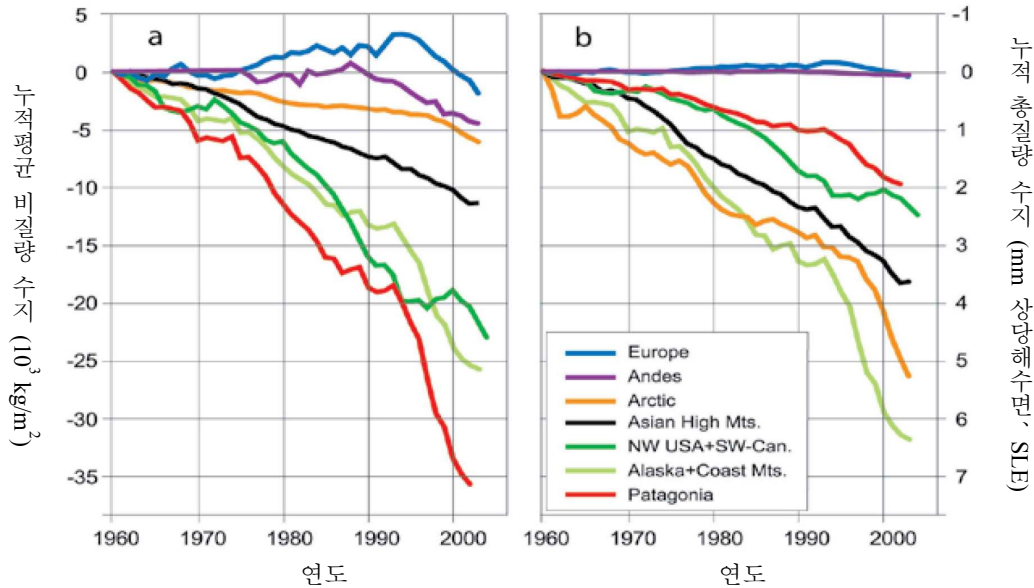


그림 2.6: 넓은 지역에 대하여 계산된 빙하와 만년설의 누적 평균 비 질량수지 (Cumulative mean specific mass balances) (a)와 누적 총 질량 수지 (b) (Dyrgerow and Meier, 2005). 빙하의 질량 수지는 수년 동안의 모든 질량 이득과 손실의 합으로 표시되며, 평균 비 질량수지는 총 질량 수지를 지역의 모든 빙하와 만년설의 총 표면적으로 나눈 값으로, 각 지역에서의 변화의 강도를 표시한다. 총 질량 수지는 각 지역으로부터 해수면 상승에 기여하는 정도로 표시된다. [WGI 4.5.2, Figure 4.15]

히말라야 (Himalayas), 안데스 (Andes), 알프스 (Alps) 등을 포함하는 급경사 산악 지역에서는 빙하가 LIA (Little Ice Age) 퇴석 (堆石) 으로부터 후퇴하여 자연 호수가 형성되고 있으며, 이들 호수로부터 쏟아지는 홍수의 발생 빈도는 증가하고 있다. [WGII 1.3.1.1, Table 1.2]

2.1.3 해수면

전 지구적으로 보면 해수면은 상승해 왔으며 해수면 상승률은 19세기 중반부터 20세기 중반 사이에 계속 증가되어 왔다는 것은 거의 확실한 (high confidence) 사실로 인식되고 있다. 20세기 동안의 평균 상승률은 1.7 ± 0.5 mm/year로 1961년~2003년 기간 동안에는 1.8 ± 0.5 mm/year, 1993년~2003년 기간 동안에는 3.1 ± 0.7 mm/year로 알려져 있으며, 1993년~2003년의 높은 상승률이 10년 주기의 변동성으로 인한 것인지 혹은 장기간 동안의 성향으로 인한 상승인지는 아직 알려져 있지 않다. 공간적으로 보면 해수면의 변화는 대단히 불균등한 것으로, 1993년~2003년 기간 동안 일부 지역에서의 해수면 상승률은 전 지구 평균 상승률의 여러 배가 되는 경우도 있는가 하면 어떤 지역에서의 해수면은 오히려 떨어지는 것으로 관측된 바 있다. [WGI 5.ES]

장기간 동안의 해수면 변화에 영향을 미치는 인자별로 해수면 변동량을 산정하는 데에는 불확실성이 많다. 1993년~2003년의 경우 열팽창 (thermal expansion) 으로 인한 상승률은 1.6 ± 0.5 mm/year, 빙하와 만년설의 체적 감소로 인한 상승률은 0.77 ± 0.22 mm/year, Greenland 빙하의 용해로 인한 상승률은 0.21 ± 0.07 mm/year, 남극 지역의 빙상 (氷床, ice sheet) 용해로 인한 상승률은 0.21 ± 0.35 mm/year 등 전체 상승률은 2.8 ± 0.7 mm/year에 달하였다. 이 기간 동안 이들 인자별 해수면 상승량의 합은 관측오차의 범위 내에서 위에서

언급한 직접 관측된 해수면 상승량과 일관성이 있다고 할 수 있다. 보다 더 긴 기간인 1961년~2003년의 경우 인자별 해수면 상승량의 합은 실제로 관측된 해수면 상승량 보다 작게 산정되었으며, 이는 1993년 이전의 해수면 관측 시스템의 신뢰도가 떨어졌기 때문인 것으로 풀이된다. 위에서 언급한 두 기간 모두에서 열팽창과 빙하 및 만년설의 용해로 인한 해수면 상승률은 Greenland나 남극지방 빙상의 용해로 인한 해수면 상승률보다 크다. 위에서 언급한 남극지방의 평균 상승률(0.21 mm/year)로 부터의 큰 오차(0.35 mm/year)는 남극 대륙이 해수면 상승에 긍정적인 영향을 미치는지, 혹은 부정적인 영향을 미치는지를 확인하기 어렵다. 해수면의 상승은 지구 온난화 현상과 일관성이 있다고 할 수 있으며, 모델 연구결과에 따르면 20세기 후반부 동안 인위적인 강제력에 대한 반응은 해수면 상승에 결정적인 영향을 미쳤을 가능성이 대단히 크다 (very likely). 그러나, 적절한 연구 노력의 부족과 함께 관측의 불확실성으로 인해 인간 활동의 영향을 정량적으로 평가한다는 것은 현재로서는 어렵다. [WGI SPM, 5.5, 9.5.2]

상승하는 해수면은 해안 지역에 여러 가지 악영향을 미칠 가능성이 크나 근본적인 원인은 아직 분명치 않다. 1975년 이래의 전 지구적인 극심한 해수면 상승은 평균적인 해수면 상승뿐 아니라 대규모의 10년 간격 기후 변동성 (inter-decadal climate variability) 에도 관계가 있는 것으로 보고되고 있다 (Woodworth and Blackman, 2004). [WGII 1.3.3]

2.1.4 증발산

전 지구 표면에 걸친 실제 증발산량을 직접 측정한 자료는 대단히 제한적이며, 전 지구적인 분석 결과물 (Analysis products)¹⁰⁾은 분석의 형태에 민감하며 많은

오차를 포함할 수 있어서 경향 분석에는 적절하지 못하다. 따라서, 실제 증발산량이건 잠재 증발산량이건 간에 증발산량의 관측된 경향에 대한 참고문헌은 매우 드물다. [WGI 3.3.3]

2.1.4.1 증발 접시 증발량

최근 수십 년 동안 미국 (Peterson et al., 1995; Golubev et al., 2001; Hobbins et al., 2004), 인도 (Chattopadhyay and Hulme, 1997), 호주 (Roderick and Farquhar, 2004), 뉴질랜드 (Roderick and Farquhar, 2005), 중국 (Liu et al., 2004; Qian et al., 2006b), 그리고 태국 (Tebakari et al., 2005) 등지에서 증발 접시 (evaporation pan)로 실측된 증발량 자료는 많지는 않으나 대체로 증발량은 감소하는 성향을 보였다. 증발 접시로 측정되는 증발량은 실제 증발량을 대표하지 못하며 (Brutsaert and Parlange, 1998) 측정치의 최근 감소 추세는 미국, 유럽의 일부 지역, 러시아 등의 지역에서의 지표면으로의 태양 방사 열량의 감소, 중국 지역에서의 공기 오염과 대기 중 에어로졸 증가 및 구름 증가와 관련되는 것으로 보이는 일조시간의 감소 때문인 것으로 해석되고 있다. [WGI 3.3.3, Box 3.2]

2.1.4.2 실제 증발산량

IPCC의 제3차 평가보고서(TAR)에서는 미국과 러시아의 가장 건조한 지역에서는 증가된 강수량으로 인한 지표면상의 가용 수분량의 급격한 증가와 기온 상승으로 인한 대기 중 수분량의 증가 때문에 20세기 후반부 동안 실제 증발산량은 크게 증가한 것으로 보고되고 있다 (Golubev et al., 2001). 강수량 관측치와 기온, 지표면으로의 태양 복사열 자료를 입력으로 하는 종합적인 지표면 모델을 사용하여 Qian et al., (2006a)은 지표면에서의 증발산량의 전 지구적 변동이 강수량의 변동을 밀접하게 따라간다는 사실을 발견하였다. 전 지구적인 강수량은 1970년대 초에 최고치에 달하였으며, 그 후 열대 지방에서 어느 정도 감소하였으나, 강수량은 위도가 높은 지역에서는 대체로 증가한 것으로 보고되고 있다. 증발산량의 변화는 수분 공급량뿐만 아니라 가용 에너지와 지표면에서의 바람에 의해 크게 영향을 받는다. [WGI 3.3.3]

실제 증발산량에 영향을 미치는 인자들 중에는 식물의 생리현상에 미치는 대기 중의 이산화탄소 농도의 직접적인 영향이 포함된다. 관측된 증발산량의 성향과 관련되는 이와 같은 직접적인 영향에 관한 참고문헌은 없으나, 유출에 미치는 증발산량의 영향에 관한 문헌은 있다. [WGI 9.5.4]

연간 증발산량은 부분적으로 성수기 (盛水期, growing season)의 길이에 관계가 있다. IPCC의 제4차 평가 보고서는 성수기의 길이가 길어져가고 있다는 증거를 제시하고 있다. 이와 같은 성수기 기간의 증가는 봄철에 마지막 서리가 내리는 날짜가 빨라지고, 가을철에 서리가 시작되는 날짜가 늦어지는 성향이 관측되는 등 유라시아 (Eurasia)의 온난지역 (Moonen et al., 2002; Menzel et al.,

2003; Genovese et al., 2005; Semenov et al., 2006)과 북미의 대부분 지역에서 (Robeson, 2002; Feng and Hu, 2004) 분명해지고 있다. [WGII 1.3.6.1]

2.1.5 토양 수분

토양 속의 수분함량을 현지 측정 (in-situ measurement)한 자료는 아주 제한된 지역에서 찾아볼 수 있으며, 자료기간 또한 대단히 짧은 것이 보통이다. [WGI 3.3.4] 여러 가지 다양한 기후 특성을 가지고 있는 지역에 설치된 600여개 이상의 관측소 중에서 Robock et al. (2000)은 과거의 소련 연방과 중국 및 미국의 중부지역 등에 주로 위치한, 자료 기록 연수가 가장 긴 관측소에서의 여름 동안의 지표토층 (지면으로부터의 깊이 약 1m)의 토양 수분함량이 장기적으로 증가하는 성향을 가지고 있음을 확인하였다. 우크라이나가 보유하고 있는 가장 긴 자료기간의 토양 수분함량 측정 자료는 지표면 토양 수분이 대체로 증가하고 있음을 보여주고 있으나, 최근 수십 년간의 증가 성향은 상당히 둔화되고 있는 것으로 보고되고 있다 (Robock et al., 2005). 토양 수분함량을 산정하기 위한 초기의 접근방법은 Palmer의 가뭄지수 (Palmer Drought Severity Index, PDSI)를 관측된 강수량과 기온 등의 기상 인자를 사용하여 계산하는 것이었다. 기후변화로 인한 PDSI의 변화에 관해서는 제3.1.2.4절에서 토론하기로 한다. [WGI Box 3.1, 3.3.4]

2.1.6 유출과 하천유량

지난 20세기 기간 동안 소하천 유역 단위에서 전 지구 단위에 이르기까지 하천유량의 변동 성향을 밝히고자 한 연구는 수없이 많다. 어떤 연구에서는 하천유량의 어떤 지표에 중요한 변동 성향이 있다는 결과가 제시되었으며, 또한 어떤 연구에서는 하천유량의 변동이 기온과 강수량의 변동 성향과 밀접한 관계가 있음을 통계학적으로 증명하기도 하였다. 그러나, 대부분의 연구에서는 하천유량의 변동에 경향성이 없거나 혹은 하천유량의 변동에 미치는 기온과 강수량의 영향을 하천 유역에서의 인간 활동으로 인한 영향으로부터 분리시키는데 실패하였다. 하천유량의 변동 성향을 파악하기 위해 사용되는 방법이 어떤 것인가에 따라 그 결과가 달라질 수도 있다. 예를 들면, 통계학적 검사 (tests) 방법에 따라 검사 결과의 유의성 (有意性)이 달라질 수 있고, 자료기간 (특히, 기간의 시점일과 종점일)이 달라지면 변동률이 달라질 수 있으며, 유역들 간의 교차상관성 (交叉相關性, cross-correlation)을 허용하지 않을 경우에는 중요한 변동성을 보이는 하천유역의 수를 과대 추정할 수도 있게 된다. 경향성 분석의 또 다른 하나의 한계는 일관성 있고 품질 관리가 잘된 자료가 부족한데 있다. 가용한 하천유량 측정 자료들은 전 지구의 토지 지역을 배수하는 하천유역의 약 2/3 정도 밖에 다루지 못하고 있을 뿐 아니라, 군데군데 결측년이 많고 지역에 따라 자료 보유기간이 다른 것이 현실이다 (Dai and Trenberth, 2002). 마지막으로, 수많은 하천유역에서 인간 활동이 하천의 흐름체계 (flow regime)에 영향을 미쳐 유출과 하천유량에 변동성을 가져왔다는 연구들이 보고되고 있다. [WGI 3.3.4, 9.1, 9.5.1; WGII 1.3.2]

10) 분석 결과물(Analysis products)이란 일상적인 매일의 일기예보를 하는 방법으로, 날씨 예보 모델 혹은 기후 모델에 일련의 관측 자료를 동화시켜 생산한 과거 기후 변동의 산정치를 의미한다. 실무에 사용되는 일기 분석/예보 시스템들은 오랜 기간에 걸쳐 개발되므로 수많은 재분석(reanalysis)이 이루어졌으며, 가용한 관측 정보들을 단일 시스템에 동화시킴으로서 분석 시스템에서 생기는 변화로 인한 자료의 점프나 경향성을 제거하게 된다. 이들 분석 시스템의 장점중의 하나는 직접 측정이 안 되는 여러 정보를 포함하는 전 지구적인 장(場)을 생산하는 것이다. 한편, 이 시스템의 잠재적 단점은 모든 장(場)이 관측 자료와 모델의 혼합으로 되어 있고 관측 자료가 거의 없는 지역이나 변량들은 사용되는 모델의 기후학을 대표할 수 밖에 없다는 것이다.

전 지구적인 규모에서 보면, 연유출량의 변화는 지역에 따라 상당한 차이를 보인다. 위도가 높은 지역과 대부분의 미주 지역에서는 연유출량이 증가하는가 하면, 서부 아프리카의 많은 부분과 유럽의 남부지역, 남아메리카의 최남단부지역 등에서는 연유출량의 감소를 보이고 있다 (Milly et al., 2005). 지구상 여러 곳에서의 연차적인 하천 유량의 변동은 ENSO, NAO, PNA 등과 관련된 대규모 기후 패턴에 의해 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다.¹¹⁾ Labat et al.(2004)은 20세기 동안 기온이 1°C 증가함에 따라 지구 전체적인 유출량은 약 4%정도 증가하며 지역적으로는 다소 편차가 있다고 주장하였으나, 이 결론에 대한 반론 (Labat et al., 2004; Legates et al., 2005)은 비 기후적인 요인이 유출에 미치는 영향과 충분하지 못한 자료의 사용으로 인한 영향에 초점이 맞추어졌다. Gedney et al.(2006)은 20세기 기간 동안 광범위한 지역에서의 유출량 증가는 CO₂ 농도 증가에 따른 식물면적의 통기공(通氣孔)으로부터의 증발산 억제 때문이라고 주장하였으나, 그러한 주장에 대한 다른 증거는 찾기 힘들며, 제2.1.4절에서 증발산량의 증가에 대한 증거를 제시한바 있다. [WGII 1.3.2]

유출량의 변동 성향은 강수량의 변동 성향과 항상 일관성을 보이지는 않으며, 이는 아마도 강수량 자료의 부족과 댐에 의한 유출의 저류와 같은 인간 활동이나 강수량과 기온변화 영향 (Lindstrom et al., 2003) 등으로 인한 것으로 볼 수 있다. 그러나, 겨울철에 내리는 강수가 눈인 여러 지역에서의 하천유출의 시기는 상당한 변화를 보이고 있다는 증거가 여러 곳에서 관찰되고 있다. 대기온도가 높아지면 상당 부분의 겨울철 강수는 눈이 아닌 비로 내리게 되며 융설이 시작되는 시기도 빨라진다. 미국 New England 지방의 여러 곳에서 융설이 시작되는 시기는 1936년과 2000년 사이에 약 1~2주정도 빨라진 것으로 보고되고 (Hodgkins et al., 2003) 있으나, 이것이 여름철 하천유출에 결정적인 영향을 미친다는 증거는 없다 (Hodgkins et al., 2005). [WGII 1.3.2]

2.1.7 대규모 변동성의 패턴

기후 시스템은 지구상의 물 순환의 여러 성분 과정에 직접적인 영향을 미치는 여러 가지 규모의 기후 변동성 패턴을 가지고 있다. 한 지역의 기후는 “원격상관 (teleconnections)” 때문에 갑자기 크게 변할 수 있다. 여기서 “원격상관”이란 지구상에서 멀리 격리되어 있는 지역들의 기후 변동 인자 사이의 연관성을 말하며, 물리적으로는 대규모의 파동운동 (large-scale wave motions)의 결과로서 에너지원으로부터 특정 경로를 따라 대기중으로 전달되는 것을 뜻한다. 원격상관은 가뭄과 홍수, 그리고 인간에게 큰 영향을 미치는 다른 형태의 변화와 연관되어 있다. 주요 원격상관 패턴에 관한 간단한 소개는 아래에 요약되어 있으며 보다 완벽한 내용을 위해서는 WGI AR4의 제3.6절을 참조하기 바란다.

원격상관은 공간적인 패턴과 크기 (magnitude)와 위상 (phase)의 향으로 변동성을 서술하는 시계열로 정의된다. 공간적 패턴은 관측점에서의 관측치를 근거로 한 어떤 지표나 격자에 걸쳐서 정의될 수 있다. 예를 들면, 남방 진동 지수(Southern Oscillation Index, SOI)는 태평양 동부의 Tahiti와 태평양 서부의 Darwin 사이의 평균 해수면의 차이

만을 근거로 하여 결정되지만, SOI는 열대 태평양 지역에 걸쳐서 일어나는 대규모 대기 순환의 복잡한 변동성을 대표하는 지수이다. 원격상관 패턴은 겨울철에 (특히 북반구에서), 그리고 평균적인 순환이 가장 강할 때 가장 두드러지게 발생하는 성향을 보이며, 원격상관의 강도와 지표면의 기후에 영향을 미치는 양상 또한 대단히 긴 시간 장경에 걸쳐 변화하는 것으로 알려져 있다. [WGI 3.6.1]

SOI는 El Niño-Southern Oscillation(ENSO)의 대기 성분을 서술하는 지표로서 전 지구적 기후의 연차적 변동성 중에서 가장 중요한 모드(mode)이기도 하다. ENSO는 대기 순환과 강수, 기온 등에 전 지구적인 영향을 미치며 (Trenberth and Caron, 2000), 열대 태평양 강수 사상의 동서 변이와 연관되어 있고, 주요 열대 수렴 지역 (tropical convergence zones)의 변화와도 연관되어 있다. 또한, ENSO는 주요 지역별 기후에 영향을 미치는 Pacific-North American (PNA) 패턴이라든지, Pacific-South American (PSA) 패턴과 같은 열대권 밖의 대기 순환에 대한 파동형 교란 (disturbances)과도 연관되어 있으며, ENSO 사상의 강도와 주기는 평균 해수면 온도와 20년 이상의 시간 스케일로 열대 지역 대기 온도를 조절하는 Pacific Decadal Oscillation (PDO, 혹은 Inter-decadal Pacific Oscillation, IPO로도 알려져 있음)에 연계되어 10년 단위 시간 스케일로 변화하는 것으로 알려져 있다. 1976/1977년의 기후 전이 (Trenberth, 1990)는 El Niño 발생의 변화와 관련이 있으며 (Trenberth and Stepaniak, 2001), El Niño의 발생은 더욱 더 오래 지속되면서 그 강도도 커지는 성향을 보였다. 그러나, 아직까지 ENSO의 변동성과 관련한 공식적인 관측 자료는 없다. [WGI 3.6.2, 3.6.3]

열대권 밖에서의 1개월 혹은 그 이상의 시간 스케일 동안의 대기 순환의 변동성은 제트 흐름 (jet streams)의 발생 강도 및 위치와 북방 (Northern) 및 남방 (Southern) “극진동 (Annular Modes)” (NAM and SAM이라 각각 부름: Quadrelli and Wallace, 2004; Trenberth et al., 2005)으로 특징지어 지는 폭풍 경로 (storm track)의 변동에 의해 지배된다. NAM은 전술한 바 있는 북대서양 진동 (North Atlantic Oscillation, NAO)과 밀접하게 연관되어 있으며, NAO는 대서양 폭풍 경로 및 유럽지역의 기후 변동과 가장 강하게 연관되어 있다. NAO는 대서양 지역의 중위도와 고위도에서의 예외적인 압력 차이로 특징지어지며, 북대서양 진동(NAO)의 양(+)의 위상이 강화된 Iceland Low와 Azores High를 보일 때 겨울철에 가장 강하게 나타난다 (Hurrell et al., 2003). 밀접하게 연관되어있는 NAM은 대서양 지역에서는 NAO와 비슷한 구조를 가지나 위도 상으로 보면 보다 대칭적이다. NAO는 북반구 대부분의 지역에 걸쳐서 겨울철의 지표면 온도에 강한 영향을 줄 뿐 아니라 유럽과 북아프리카 지역에서의 강수 사상에도 큰 영향을 미친다. 강수량은 양(+)의 위상에서는 극지방으로 치우치며, 음(-)의 위상에서는 적도 지방으로 치우친다. 지나간 수세기동안 양과 음의 NAO가 상당기간 계속된 증거가 있다(Cook et al., 2002; Jones et al., 2003a). 겨울철에는 1960년대 후반의 최소 지표 값으로부터 1990년대 중반의 강한 양(+)의 NAO 지표 값으로 바뀌었으며, 그 이후 NAO 값은 장기간 동안의 평균값에 가깝게 떨어졌었고, 그 원인을 구명하기 위한 연구 결과에 의하면 북방 극진동 (NAM)의 최근 수십 년 동안의 변동 성향은 상당부분 인간 활동과

11) ENSO = El Niño-Southern Oscillation, NAO = North Atlantic Oscillation, PNA = Pacific-North American; 제2.1.7절과 부록II의 용어 풀이집 추가 참조)

관련이 있을 것으로 보고 있다. 그러나, 기후 모델로 모의된 자연적인 요인과 인간 활동으로 인한 요인에 대한 반응은 관측된 것 보다는 작은 것으로 보고되고 있다. [WGI 3.6.4, 9.E5]

남방 극진동(Southern Annular Mode, SAM)은 중위도와 고위도 지역에서의 동시에 발생하는 서로 반대되는 부호의 압력 변화와 밀접한 관계를 가지며, 이는 극지방에서의 서쪽 방향 바람 역에서 생기는 변화를 반영하는 것이다. Southern Ocean에서의 강화된 서풍은 SAM의 양(+)의 위상에서 발생하며 최근 수십 년 동안 보다 자주 발생하여 극지방 주위에 보다 잦은 횡수의 사이클론(cyclones)을 일으켜(Sinclair et al., 1997) 극지방 쪽으로의 강수 전이와 남극 지방의 강수 발생에 큰 기여를 하는 것으로 보고되고 있다 (Noone and Simmonds, 2002). SAM은 또한 남극지방 (Genthon et al., 2003)과 남아메리카의 남부 지역 (Silvestri and Vera, 2003)에서의 강수량의 공간적 변동 패턴에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 모델에 의한 모의 연구에 따르면 SAM의 최근 변동 성향은 온실가스 농도의 증가로 인해 영향을 받아왔으며, 특히 성층권의 오존량 감소로 인한 영향은 큰 것으로 알려져 있다. [WGI 3.6.5, 9.5.3.3]

북대서양의 해수면 온도 (Sea Surface Temperature, SST)는 관측기간 동안 약 70년에 걸친 변동을 보여주고 있는 바, 이를 대서양 수십 년 주기 진동 (Atlantic Multi-decadal Oscillation, AMO: Kerr, 2000)이라 칭한다. 1930-1960년 동안에는 해수면 온도는 온난 상태가 유지되었고 1905-1925년과 1970-1990년 동안은 한냉 상태가 유지되었으며 (Schlesinger and Ramankutty, 1994), AMO는 1990년대 중반부터 다시 온난 상태로 돌아왔다. AMO는 해양에서의 열염 순환 (thermohaline circulation)의 강도 변화에 관계가 있으며 (Delworth and Mann, 2000; Latif, 2001; Sutton and Hodson, 2003; Knight et al., 2005), 또한, 북미지역의 다년(multi-year)간의 강수량의 정상치 대비 편차 (precipitation anomalies)와 직결되어 있는 것으로 알려져 있다. 또한, AMO는 ENSO Teleconnections을 조절하는 것으로 보이며(Enfield et al., 2001; McCabe et al., 2004; Shabbar and Skinner, 2004), 대서양에서의 허리케인 생성에도 역할을 한다. 뿐만 아니라, AMO는 Sahel 한발과 카리브해역에서의 강수량, 북미와 유럽의 여름철 기후, 그린란드 해역에서의 해빙 (sea-ice)의 염도, 미국 남부 지역과 북대서양 및 유럽 남부 지역에서의 해수면 압력 등의 10년 단위 장기 변동성을 일으키는 주요 원인이 되는 것으로 믿어지고 있다 (Venegas and Mysak, 2000; Goldenberg et al., 2001; Sutton and Hodson, 2005; Trenberth and Shea, 2006). [WGI 3.6.6]

2.2 수문학적 변화가 기후에 미치는 영향과 피드백

지구상의 여러 지역에서 기온과 강수사이에는 대단히 밀접한 상관성이 있음이 관측되어 왔으며, 이는 수문 순환과 기온을 지배하는 과정이 밀접하게 연관되어 있다는 증거이기도 하다. 전 지구 규모에서 보면, 대기 중의 수증기와 구름, 얼음 등의 존재에 변화가 생기면 지구상으로 방사되는 열의 평형에 변화가 생기게 되어서 온실가스의 증가에 대한 기후학적 반응을 결정하는데 큰 역할을 하게 된다. 이러한 과정이 기온의 반응에

미치는 전 지구적인 영향은 WGI AR4의 Section 8.6에 상세히 토론되어 있다. 본 절에서는 수문학적 변량에 생기는 변화가 지역의 기후 혹은 주요 온실가스의 대기 수치 (atmospheric budget)에 피드백 영향 (feedback effects)을 미치는 물리 과정에 대해서 살펴보고자 한다. 이 절에서의 목적은 그러한 물리 과정을 상세하게, 종합적으로 살펴보고자 하는 것이 아니라 물 순환 과정이 전반적인 기후 시스템과 얼마나 긴밀하게 연계되어 있는가를 설명하고자 하는 것이다.

2.2.1 지표면 영향

지표수 수지는 물과 에너지의 부존을 반영하는 것으로 물 부존량이 많은 지역에서는 증발산량은 대기 경계층과 지표면 식생피복의 성질에 의해 조절된다. 지표면 물 수지에 변화가 생기면 그 변화는 물을 경계층으로 재순환시킴으로서 기후 시스템에 피드백 영향을 미칠 수 있으며, 이러한 영향의 크기는 국지적인 세부 환경 조건에 따라 크게 다를 수 있다. 따라서, 어떤 경우 이들 피드백 효과는 전 지구적으로 보면 상당히 작을 수도 있으나 공간 및 시간 스케일을 작게 잡으면 국지적으로는 대단히 중요한 수도 있어서 기후 변동성이나 극한 사상에 있어서의 지역적 혹은 국지적 변화를 일으키는 원인이 되기도 한다. [WGI 7.2]

삼림벌채(deforestation)가 기후에 미치는 영향은 피드백 영향의 복잡성을 간접적으로 설명해준다. 여러 연구결과에 의하면 삼림벌채는 낮 동안의 기온을 감소시키며, 증가하는 알베도(albedo)와 증산 및 잠재열 손실로 인해 지표면 경계층의 구름량을 증가시키게 되는 것으로 보고되고 있다. 그러나, 이들 영향은 삼림 및 식생의 종류와 지표 토양의 성질에 크게 관계가 있으며, 어떤 경우에는 정반대되는 영향이 있는 것으로 주장되기도 한다. 삼림벌채가 강수 현상에 미치는 영향 또한 복잡하여 지표면과 식생피복의 특성에 따라 긍정적인 효과를 줄 수도 있고, 반대로 부정적인 효과가 발생할 수도 있는 것으로 보고 있다. [WGI 7.2, 7.5]

Sahel 지역과 같은 반 건조 지역에서는 식생이 토양 수분을 대기 중으로 재순환시켜 다시 강수를 발생시킴으로서 식생의 성장을 활성화시킬 수 있다는 연구 결과도 다수 있으며, 이는 이들 지역에 복합적인 평형을 유지시키는 결과를 가져올 뿐 아니라 현재세(現世統, Holocene)의 중기 조건으로부터 현재의 조건에 이르는 변화처럼 급격한 체계 전환 (regime transition)의 가능성을 제시하기도 한다. [WGI, Chapter 6, 7.2]

토양 수분은 그의 열용량과 증발에 필요한 잠재열량을 가지는 열원으로 볼 수 있어서 토양 수분은 여름철 기온과 강수량을 조절하는 중요한 인자로 보아왔다. 토양 수분과 강수량 및 기온 사이의 피드백은 건조 지역과 습윤 지역의 경계 지역에서 특히 중요하다. 그러나, 토양 수분과 강수량 사이의 상관성의 정도는 기후 모델의 종류에 따라 그 크기가 크게 상이하며, 관측의 한계성 때문에 이러한 불확정성을 완화시키는 것은 현재로서는 어렵다. [WGI 7.2, 8.2]

강수 현상에 미치는 또 다른 하나의 현상은 대기 중 CO₂ 농도의 증가에 따른 식생의 기공(氣孔) 막힘 현상이며, 이로 인해 증발산량의 대규모 감소 (제2.3.4절)로 유출량이 증가하는 경향을 보이게 되며, 어떤 지역에서는

강수량의 상당한 감소를 초래하는 경우도 있다. [WGI 7.2]

지역적인 온난화 현상으로 인한 적설지표면 면적의 감소는 알베도의 변화로 인해 대기온도에 피드백 된다. 이 피드백의 규모는 사용된 모델의 종류에 따라 크게 변하며, 최근 연구에 따르면 봄철의 융설률은 이 피드백 효과의 강도를 추정하는 좋은 지표가 되며, 눈이 덮인 지역에서의 기온 변화를 예측함에 있어서의 불확실성을 감소시키는데 효과적일 것으로 보고 있다. [WGI 8.6]

2.2.2 해양 순환에 있어서의 변화를 통한 피드백

바다로 담수가 유입하게 되면 바닷물의 염도가 변화하게 되면서 밀도도 변화하게 된다. 따라서, 수문 순환에서의 변화는 밀도류에 의한 해양 순환을 변화시키게 되어 기후에 거꾸로 영향을 미치게 된다. 대표적인 예로서 북대서양에서의 자오선 순환(Meridional Overturning Circulation, MOC)을 들 수 있다. 이 순환은 지표면 온도와 강수량 및 대서양 주변 지역의 해수면에 큰 영향을 미치며 21세기 기간 동안 상당히 약화될 것으로 추정되고 있으며, 이와 같은 MOC의 약화는 전반적인 기후 변화에 대한 반응을 조절하는데 대단히 중요하다. 일반적으로 약화되는 MOC는 북부의 중위도 지역에서의 온난화율을 완화시킬 것으로 예측하고 있으나 극지방에서는 온난화율을 증가시킬 것이라는 연구 결과도 있다. 이들 반응은 대서양의 저위도 및 중위도 지역으로부터의 증발량의 변화를 통해 대규모의 강수 현상에 피드백 될 수 있다. 많은 모델에서는 MOC 약화의 가장 큰 요인은 지표면의 온난화이지만 깊은 수권 지역에서는 수문학적 변화가 큰 역할을 하며, 담수 입력(freshwater input)에 있어서의 불확실성은 MOC 반응을 추정하는 대규모 모델의 변동성에 중요한 영향을 미치게 된다. 최근 수십 년간 관측된 해수 염도의 변화는 담수 입력에 있어서의 변화를 설명하고 있다. 거의 모든 대기-해양 GCM (Atmospheric-Oceanic General Circulation Model, AOGCM)에 의한 해석은 21세기에는 MOC가 약화될 것으로 해석하고 있으며 MOC의 급작스러운 변화는 없을 것으로 보고 있다. 그러나, 장기적인 측면에서 그러한 현상이 계속될 것이라고 평가하기는 어렵다. [WGI 10.3.4]

강수량과 증발량 및 유출량의 변화와 MOC에 미치는 그들의 영향은 현재 가능한 기후 전망을 위한 모델에 의해 모의되고 있다. 그러나, 바다로의 추가적인 담수 입력이 될 수 있는 그린란드와 남극 지방 빙상의 질량 수지에 있어서의 변화를 상세하게 해석할 수 있는 기후 모델은 현재로서는 아주 드물다. 그린란드로부터의 담수 입력의 영향을 상세하게 모형화 하는 내용의 연구는 흔치 않으나 이들 담수 입력이 위에서 언급한 결론을 뒤집기에는 부족한 것으로 보고되고 있다. [WGI 5.2, 8.7, 10.3, Box 10.1]

2.2.3 수문학적 과정이나 생물·지질·화학적 피드백에 의한 발생원과 흡수원

수문순환 과정에 있어서의 변화는 이산화탄소나 메탄 및 기타 생물권에 의해 조절되는 열방사성이 강한 화학물질의 대기 중 수지에 있어서의 변화를 통해 기후에 피드백 영향을 미칠 수 있으며, 이들 과정은 대단히 복잡하다. 예를 들면, 기온 상승에 대한 CO₂ 공급원의 반응은 토양 수분량에 크게 영향을 받으며, 차세대

기후 모델 중의 하나에서는 식생과 탄소 사이클(carbon cycle)이 변화하는 기후에 반응하는 것으로 보고 있다. 모든 모델들은 전 지구적인 탄소 사이클에 기후 변화의 피드백 영향이 미치며 온난화된 기후 하에서 인간 활동으로 인해 생성된 CO₂ 배출량의 상당 부분이 대기 중에 남아있는 것으로 해석하였다. 그러나, 전반적인 피드백 영향의 크기는 사용된 모델에 따라 크게 다르며 지역적 강수 현상의 변화에 대한 추정에 한계가 있기 때문에 육지의 주요 생산성에 있어서의 변화를 추정하는 것은 불확실하다. 습지라든지, 영구 동토, 논, 그리고 토양과 같은 메탄가스의 발생원(sources)과 흡수원(sinks)의 존재는 수문학적 변화에 대단히 민감하다. 오존과 같은 다른 주요 화학성분들도 역시 복잡한 생물·지질·화학적 메커니즘을 통해 기후 변화에 대단히 민감한 것으로 밝혀져 있다. 대기 중의 에어러솔 수지는 강수량에 직접적으로 민감하며 에어러솔은 강수 형성에 필요한 응결핵의 역할을 하여 구름이 강수가 되도록 하는 등 강수량에 피드백 영향을 미치게 된다. 이들 피드백의 규모는 아직 확실하지 않으며 현존하는 기후 모델에 간단한 방법으로 포함되어 해석되고 있을 뿐이다. [WGI 7.4]

2.3 물과 관련하여 전망된 기후의 변화

IPCC의 제3차 평가 보고서(TAR)에서 고려된 내용과 비교할 때 제4차 평가 보고서에서의 기후 변화 전망에 있어서의 주된 발전은 광범위한 종류의 기후모델을 사용하여 수많은 모의를 하였을 뿐 아니라, 다양한 온실가스 배출 시나리오에 대한 모의를 하였다는 것이다. 기후 모델에 의한 최적 산정치의 추정에 의하면 2030년 까지 인간이 살고 있는 대륙에서의 10년 단위의 평균적인 온난화 속도는 SRES (Special Report on Emission Scenarios) 시나리오의 종류에 민감하지 않으며, 또한 20세기 동안 동일한 모델에 의해 산정된 자연적인 변동성보다 최소한 2배 이상(10년당 약 0.2°C 정도) 커질 가능성이 아주 높다고 지적하고 있다. SRES의 비 완화 시나리오(Non-mitigation scenarios)에서 온실가스 배출이 현재의 배출률 혹은 그 이상의 배출률로 계속되면 21세기 동안 온난화는 더 심해질 것이고 전 지구의 기후 시스템에는 여러 가지 변화가 발생할 것이며, 이와 같은 변화는 20세기 동안 관측된 것보다 훨씬 크게 나타날 가능성이 대단히 크다. SRES 시나리오의 경우 1980년~1999년 대비 2090년~2099년의 전 지구적 평균 기온 변화 예측치는 시나리오 B1일 경우의 1.8°C (변동 범위는 1.1°C~2.9°C)에서 시나리오 A1FI일 경우의 4°C (변동 범위 2.4°C~6.4°C) 정도이다. 온난화 현상은 북반구의 위도가 가장 높은 육지지역에서 가장 활발한 반면, 남해양(Southern Ocean)과 북대서양의 일부 지역에서 가장 미약할 것으로 전망되고 있으며, 극한적인 온난화(hot extreme)와 열파(heat waves) 현상이 보다 자주 지속적으로 일어날 것으로 예측된다. [WGI SPM, Chapter 10]

수문학적 전망에 있어서의 불확실성

수문 시스템에서 발생할 각종 변화에 대한 예측은 기후 시스템 내부의 변동성과 장래의 온실가스 및 에어러솔 배출에 있어서의 불확실성, 이들 온실가스 배출을 기후 모델을 사용하여 기후 변화에 반영하는 방법, 그리고

수문학적 분석을 위한 모델들이 가지고 있는 불확실성 등 때문에 여러 가지 불확실성을 내포하고 있다. A1B 시나리오 하에서 21세기 후반부까지 기후 모델로 전망한 강수량들 사이의 차이는 기후 시스템 내부의 변동성보다는 불확실성의 문제 때문이며, 많은 경우 모델에 의해 모의된 연평균 강수량은 기후 시스템의 내부 변동성의 모의에 의한 값을 초과함을 뜻한다. 강수량의 전망 결과는 공간적인 스케일을 작게 잡을수록 모형들에 의해 추정되는 크기가 일관성을 잃게 되는 것이 보통이다. [WGI 10.5.4.3] 위도가 높은 지역과 열대 지역의 일부에서는 대부분의 모델들이 강수량이 증가하는 결과를 보이는 반면, 아열대 지역과 중위도 아래 지역에서는 거의 모든 모형에서 강수량이 감소하는 것으로 추정된다. 강수량이 증가하거나 감소하는 이들 지역사이에는 현재 사용되고 있는 모든 모형에서 강수량 변동의 부호가 일관성이 없다. [WGI 10.3.2.3, 10.5.4.3] 증발량의 변화라든지 토양 수분과 유출 등의 수문순환 관련 다른 변량의 추정에서 있어서의 상대적 분산은 강수량 변화의 경우와 거의 비슷하거나 일반적으로 더 큰 것으로 보고되고 있다. [WGI 10.3.2.3]

수문학적 전망에 있어서의 불확실성의 또 다른 원인들은 현재에 사용되고 있는 기후모델의 구조 때문이라 할 수 있다. 기후 모델에 아주 간단하게 반영되어 있는 여러 가지 수문성분 과정들은 이미 제2.2절에서 언급한 바 있다. 현재의 모델들은 대체로 기후 변화에 따른 식생 변화로부터의 피드백 영향을 포함시키지 못하고 있으며, 기후 전망을 위한 대부분의 모델들은 지표면에 미치는 인간 활동의 영향도 고려하지 못하고 있다. 또한, 인간 활동과 관련 있는 에어러솔의 영향에 대한 고려도 대부분의 모형에서는 너무 간단하게 다루고 있다. 일부 모형들은 인간 활동으로 생성되는 에어러솔의 여러 종류들을 보다 광범위하게 고려하고 있으나 검댕(Black carbon)과 같은 잠재적으로 대단히 중요한 유형의 에어러솔은 AR4에 사용된 대부분의 모의에서 고려하지 않았다. AR4에서 사용된 모형들의 절반 이상은 구름에 미치는 에어러솔의 간접적인 영향을 제외시켰다. 또한 현재 사용되고 있는 기후모형의 해상도(resolution) 또한 열대성 사이클론(tropical cyclones)이나 고강도 강우의 적절한 영향 분석을 하는데 한계가 되고 있다. [WGI 8.2.1, 8.2.2, 8.5.2, 8.5.3, 10.2.1]

일반적으로 2가지 이유 때문에 기후모델에 의한 결과를 담수 해석에 연계 사용할 경우 불확실성 문제가 발생한다. 그 중 한 가지는 전 지구적 기후 모델과 수문 모델의 공간적 스케일이 상이한 것이고, 다른 한 가지는 현재의 기후에 대하여 기후모델로 계산한 장기간 동안의 평균 강수량에 내재하는 편의(biases)로 인한 것이다. 스케일의 차이로 인한 문제를 해결하기 위해서 기후 모델에 의한 결과의 단순 내삽 혹은 동역학적 및 통계학적(혹은 경험적) 축소화(downscaling) 기법 등이 사용되어 왔으나 이러한 방법들은 모두 기후 변화 영향의 전망에 있어서 불확실성을 배제할 수 없다. 모의된 평균 강수량에 내재하는 편이는 수문 모델에 입력할 자료 세트를 확보하기 위해 관측된 강수량 값에 모델로 모의한 이상편차(異狀偏差, anomalies)를 더하기 때문에 발생한다. 따라서, 기후 관련 매개변수의 경년별 혹은 매일의 변동성에 있어서의 변화는 대부분의 수문학적 영향분석에서 고려되지 않으며, 이로 인해 장래에 발생할 홍수나 가뭄, 관개용수 수요량 등이 과소 추정되는 경우가 많다. [WGII 3.3.1]

수자원 가용량과 가뭄, 홍수 등에 미치는 기후변화 영향의 불확실성은 경제 개발이나, 온실가스 배출 시나리오, 그리고 기후 및 수문 모델링 방법의 차이 때문에 항상 발생하기 마련이다. 그러나 여러 개의 다른 수문 모형들이 어떤 특정 기후변화 현상에 어떻게 반응하는지를 평가해 본 연구는 아직까지 없었다. [WGII 3.3.1] TAR 이래로 담수 평가를 위한 기후 모델에 의한 전망의 불확실성을 복합 모델 앙상블(multi-model ensembles) 기법을 사용하여 해결하기도 하며, 확률론적 평가는 아직 어려운 것이 현실이다. [WGII 3.3.1, 3.4]

이와 같은 불확실성에도 불구하고 지금까지 상당한 연구 결과가 축적되어 있으며, 이하의 절에서는 AR4에서의 평가를 기초로 하여 전망된 변화들에 있어서의 불확실성에 관해 토론하기로 한다.

2.3.1 강수량과 수증기량

2.3.1.1 평균 강수량

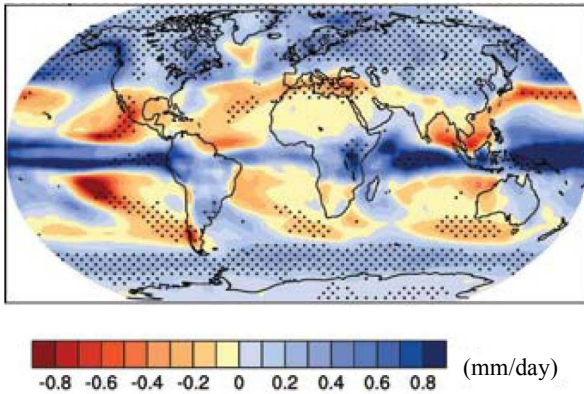
복합 모델 앙상블을 사용한 기후 전망에서는 21세기 동안 전 지구적으로 평균한 연평균 수증기량이나 증발량 및 강수량이 증가할 것으로 보고 있다. 기후모델에 의한 분석 결과에 따르면 평균 강수량은 몬순기후대라든지 열대 태평양 기후대와 같은 다우 지역과 고위도 지역에서는 일반적으로 증가하는 반면, 아열대 지역에서는 감소할 것으로 보고 있다. [WGI SPM, 10.ES, 10.3.1, 10.3.2]

고위도 지역에서의 겨울철 및 여름철 강수량의 증가는 그림 2.7에서 보는바와 같이 추정에 사용된 여러 가지 모형에서 높은 일관성을 가진다. 강수량은 열대 해양 지역과 몬순기후대에 있는 일부 지역에서 증가하며, 몬순기후의 경우 여름에는 남아시아 몬순(6월~8월), 겨울에는 오스트레일리아 몬순(12월~2월)이 대표적이다. 반면에, 동아시아 지역에서의 강수량의 일부 증가를 제외하면 중위도 지역에서의 여름철 강수량은 광범위한 지역에 걸쳐 감소한다. 또한 아열대 지역의 상당 부분에서의 강수량의 감소는 복합 모델 앙상블에 의한 평균값에서 분명히 나타나고 있으며, 특히 열대 중앙아메리카와 카리브해 및 지중해 지역에서는 사용된 모델들에 의해 전망된 변화의 부호(증가 혹은 감소)에도 일관성이 높게 나타났다. [WGI 10.3.2] 강수량의 지역적 변화에 대한 전망에 관해서는 제5절에서 추가적으로 다루기로 한다.

SRES A1B 시나리오에 대한 2080년~2099년 동안의 연강수량 변화의 전 지구적 분포는 15개 기후 모델로부터 얻어진 다른 수문 변량 값과 함께 그림 2.8에 표시되어 있다. 20%를 초과하는 연평균 강수량의 증가가 아프리카 동부지역과 중앙아시아의 북부지역, 태평양의 적도지역 등 뿐 아니라 위도가 가장 높은 지역 등에서 발생할 것으로 보고 있으며, 반대로, 최대 20%까지의 큰 감소가 지중해와 카리브해 지역, 그리고 아열대의 대륙별 서부 지역에서 발생할 것으로 보이며, 전 지구적으로 보면 육지 지역에서는 약 5%정도 증가하는 반면, 바다 지역에서는 약 4%정도 증가할 것으로 보인다. 육지 지역에서의 강수량의 순 변화량은 전 지구에 걸친 강수량의 평균 증가량의 약 24%를 차지한다. [WGI 10.3.2]

기후 모델에 의한 21세기 전망에서 전 지구적인 평균 증발량의 변화는 강수량의 변화와 거의 비슷한 균형을

강수량 (12, 1, 2월), A1B 시나리오, 2080-2099



강수량 (6, 7, 8월), A1B 시나리오, 2080-2099

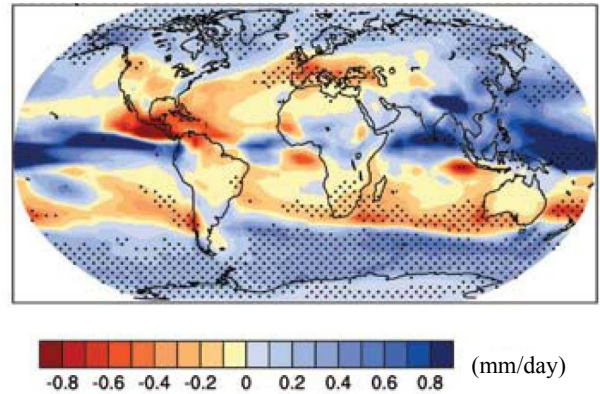


그림 2.7: 15개 기후 모델에 의한 12, 1, 2월(왼쪽 그림)과 6, 7, 8월(오른쪽 그림) 강수량의 평균 변화량(mm/day). 변화량은 SRES A1B 시나리오 조건에서 1980~1999년 값에 대비한 2080~2099년 값의 변화를 표시한 것이다. 그림에서 점을 찍은 부분은 복합 모델 앙상블(multi-model ensemble)의 평균값의 크기가 내부 모델(inter-model)의 표준편차 값을 초과하는 지역을 표시한다. [WGI Fig. 10.9]

이루지만, 국지적으로는 수증기의 대기 중 이송에 있어서의 변화 때문에 이 관계는 분명하지 않다. 연평균 증발량은 대부분의 경우 바다 지역에서 증가하며, 공간적인 변화는 지구 표면의 온난화의 변동에 관계가 있어 보인다. 대기 수분의 수렴(convergence)은 적도 지방의 바다와 고위도 지역에서 증가하는 현상을 보이며, 육지 지역에서는 강우량의 변화가 증발량과 유출량에 의해 균형을 유지하는 경향을 보인다. 전 지구적으로 보면 대기 중의 수분 함량은 기온이 따뜻해짐에 따라 증가하며, 상대 습도는 대체로 일정하게 유지되는 것으로 추정되고 있다. 수증기는 일종의 온실 가스로 볼 수 있으므로, 이와 같은 수증기의 증가는 기후 온난화를 가속시키는 일종의 피드백 현상으로 인한 것으로 볼 수 있다. 이와 관련하여 대기온도의 연직 방향 체감률(lapse rate)은 부분적으로 위에서 설명한 피드백 효과를 상쇄하는 것으로 볼 수 있다. 여러 기후 모델들과 관측 자료로부터 관찰된 최근의 각종 증거들은 기후 관련 GCM에서 밝혀진 것과 비교할 수 있을 정도의 강도로 기후에 미치는 수증기와 체감률이 조합된 피드백 효과를 간접적으로 설명해주고 있다. [WGI 8.6, 10.ES, 10.3.2]

2.3.1.2 극한 강수량

큰 규모의 강수 사상(heavy precipitation events)이 발생할 빈도가 매우 커질 가능성은 대단히 높을 것으로(very likely) 보고되고 있다. 강수 사상의 강도는 연평균 강수량이 증가할 것으로 보이는 열대 지역 및 고위도 지역에서 특히 증가할 것으로 전망되고 있다. 반면에, 대륙의 내륙 지역에서는 여름철의 건조한 기후 조건 형성으로 가뭄 발생의 위험성이 클 것으로 전망된다. 대부분의 열대 지역과 중위도 및 고위도 지역에서 극한 강수량(extreme precipitation)은 평균 강수량보다 더 증가할 것이다. [WGI 10.3.5, 10.3.6]

IPCC의 제3차 평가보고서(TAR)에서 설명된 기후-수문 연계 모델로부터의 결과에 따르면 중위도 지역에서는 여름철 건조 기후의 영향으로 인한 심한 가뭄이 전망되고 있다(그림 2.8). 최근의 15개 대기-해양 일반 순환

모델(AOGCM)을 장래의 온난 기후 조건에 대해 적용한 결과 아열대 지역의 북부와 중위도 지역의 대부분의 지역에서 여름철 건조 기후로 인한 가뭄이 발생하며, 이로 인한 지역적인 식생의 고사와 가뭄을 겪게 될 육지 지역의 비율이 크게 증가할 수 있을 것으로 전망되고 있다. 예를 들면, A2 시나리오에서는 현 육지 지역의 1%에 걸친 극한 가뭄이 2100년에는 30%로 증가할 수도 있다는 것이다. 또한, 건조한 토양 조건에서는 더 극심한 열파(heatwaves) 피해를 입을 수도 있다. [WGI 10.3.6]

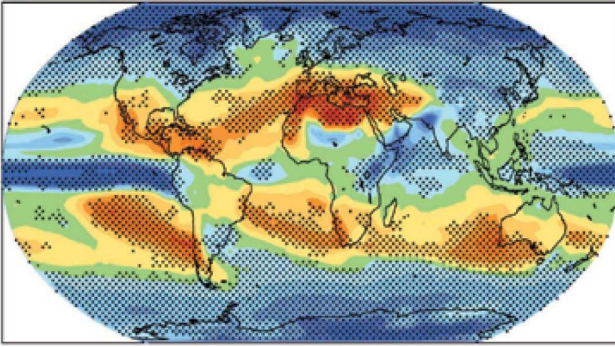
21세기 기간 동안에 대한 복합모델(multi-model)에 의한 기후 전망에서는 그림 2.9에서 보는 것처럼 강수 강도와 연속 건조일수는 많은 지역에서 증가할 것으로 보고 있다. 강수 강도는 거의 모든 곳에서 증가하며, 평균 강수량도 증가하는 중위도 혹은 고위도 지역에서 특히 증가가 심하다.

그러나, 그림 2.9의 아래 그림에서 보는 바와 같이 아열대 지역과 중위도 지역의 하부 지역에서의 강수 사상들 사이에는 건조일수의 기간이 증가하는 지역이 존재한다. 그러나, 평균 강수량이 증가하는 중위도 지역의 상부 지역과 고위도 지역에서는 건조일수 기간의 길이가 감소한다. [WGI 10.3.6.1]

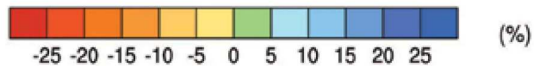
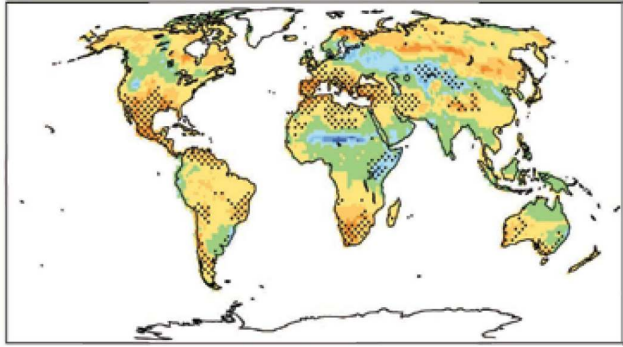
복합 모델 연구로부터의 평균값을 기준으로 볼 때 강수 사상들 사이의 연속적인 건조일수는 증가하는 지역도 있고 감소하는 지역도 있기 때문에 사용 모델의 종류에 따른 전 지구적인 평균값의 변동 성향은 그리 크지 않으며 일관성 또한 미약하다. 어떤 특수 물리 모델에 의한 연구 결과에 의하면 7월에 습윤일수의 발생 빈도가 증가하는 지역은 극히 제한적이며 극한 강수량의 변화폭도 대단히 큰 것으로 나타났으며, 이는 극한 기온의 발생과 비교할 때 극한 강수량의 발생은 일관성이 비교적 적다는 것을 의미한다. [WGI 10.3.6, FAQ 10.1]

일련의 기후 모델에 의한 연구 결과에 따르면, 장래의

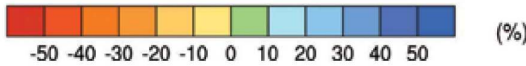
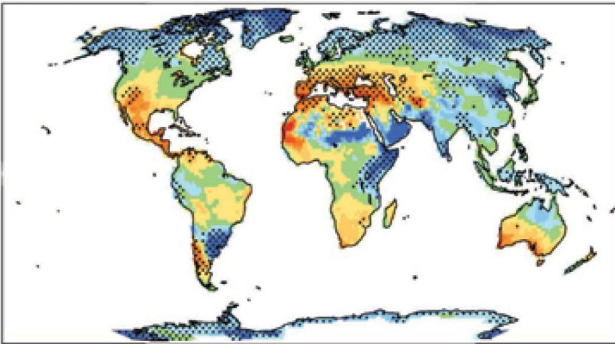
a) 강수량



b) 토양수분



c) 유출량



d) 증발량

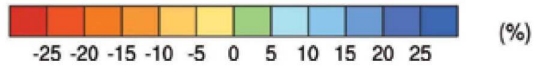
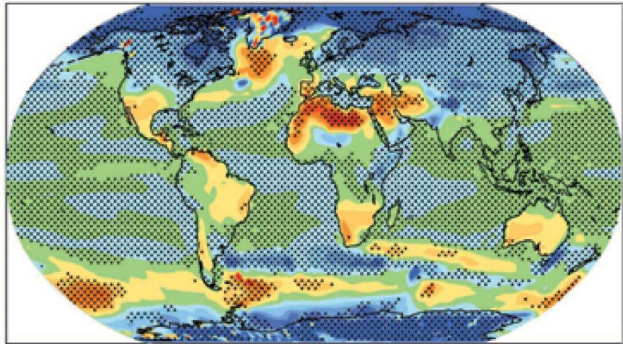


그림 2.8: 15개 기후 모델로 추정된 수문변량들의 평균 변화량 (%): (a) 강수량 (b) 토양수분, (c) 유출량, (d) 증발량. 추정된 평균 변화량의 부호가 일관성을 갖도록 하기 위해서 15개 모델의 80%가 동일한 부호를 가지는 지역은 그림에서 점을 찍어(stippling) 표시하였다. 여기서 변화량은 SRES A1B 시나리오 조건에서 1980~1999년 값에 대비한 2080~2099년 값의 연 평균치이다. 토양 수분과 유출량의 변화량은 최소 10개 모델로 추정된 것이며 그림상의 해당 위치에 표시하였다.

열대성 사이클론은 보다 강도가 높을 것이며, 열대 해수면 온도의 상승으로 인해 보다 큰 최대 풍속을 동반하는 보다 많은 강수량을 발생시킬 가능성이 클 것으로 보고 있다. 그러나, 열대성 사이클론의 발생 횟수가 전 지구적으로 감소할 것이라는 전망의 신뢰도는 높지 않다. [WGI SPM]

2.3.2 눈과 육지상의 얼음

기후가 온난해짐에 따라 적설 지표면의 면적은 감소할 것으로 전망되며 겨울동안의 강설량의 증가보다 여름 동안의 용설량이 더 커지기 때문에 빙하의 체적과 만년설의 범위는 감소할 것이다. 영구 동토 지역의 많은 부분에서 온난화 현상 때문에 해동 깊이가 점점 증가할 것으로 전망되고 있다. [WGI SPM, 10.3.3]

2.3.2.1 적설 지표면, 동토, 호수 및 하천의 얼음에 있어서의 변화

적설 지표면(snow cover)의 변화는 기온뿐만 아니라 강수량에 의해 직접적으로 영향을 받으며, 계절적인 적설 지표면을 가지는 대부분의 지역에서는 대기온도와 강한 음(-)의 상관(negative correlation)을 나타낸다. 이러한 적설 지표면과 기온간의 관계 때문에 모형의 모의 결과에서는 일부 고위도 지역에서의 적설 지표면 증가가 예측되기도 하지만 21세기동안 광범위한 적설 지표면 영역 감소가 있을 것으로 전망되고 있다. 예를 들면, 극지방의 기후 영향 평가(Arctic Climate Impact Assessment, ACIA)에서 사용된 기후 모델들은 21세기 말까지 B2 시나리오 하에서의 북반구의 연평균 적설 지표면의 면적 감소는 약 9~17%가 될 것으로 추정하고 있으며, 일반적으로 적설 시점은 더 늦어지고, 용해 시점은 더

빨라질 것이며, 강설기간 동안의 적설면적의 증가속도는 낮아질 것으로 추정하고 있다. [WGI 10.3.3.2, Chapter 11]

IPCC의 일련의 기후 변화 시나리오를 가정한 모델 연구에서는 21세기 중반까지 북반구에서의 영구 동토의 면적은 약 20~35%정도 감소할 가능성이 있는 것으로 보고 있다. 추정된 영구 동토의 계절적 해동 깊이는 공간적으로나 시간적으로 균등하지 않으며, 앞으로 30년여 기간 동안 영구 동 토층의 유효 두께는 현재 두께의 약 10~15%에 불과할 것이며, 21세기 중반까지는 계절적 해동 깊이가 평균적으로는 15~25% 증가하며, 최 북부 지역에서는 50% 또는 그 이상이 될 것으로 추정하고 있다. 또한, 2080년까지는 영구 동토지역 전반에 걸쳐 해동 깊이는 약 30~50%정도 증가할 가능성이 있는 것으로 보고되고 있다. [WGII 15.3.4]

온난화는 하천과 호수에 있는 얼음을 감소시키는 것으로 예보되고 있다. 그러나, 남쪽에서 북쪽으로의 지역적 기온 감소와 그로 인한 수문학적 및 물리적 변화 때문에 북쪽 방향으로 흐르는 큰 규모의 하천에서는 이와 같은 효과가 상쇄될 것으로 예상되고 있다. [WGII 15.4.1.2]

2.3.2.2 빙하와 만년설

21세기 동안의 기후 온난화로 인해 빙하 (glaciers)와 만년설(ice caps)은 겨울철 강수량의 증가보다 여름철 융해가 더 지배적이기 때문에 그 체적이 감소할 것으로 추정되고 있다. 세계 여러 지역에 흩어져 있는 11개 빙하들에 대한 모델에 의한 모의 결과에 따르면 2050년까지 이들 빙하의 체적이 약 60%가 감소할 것으로 추정되고 있다 (Schneeberger et al., 2003). 2CO₂ 조건에서 7 가지 GCM으로 모의한 결과의 비교분석은 평형선 고도 (equilibrium-line altitude)의 증가에 따라 많은 빙하들이 완전히 사라지고 말 것으로 예측하고 있다 (Bradley et al., 2004). 이들 빙하가 사라지는 속도는 수세기에 걸친 빙하의 잠재적인 재출현 보다 훨씬 빨라서 대부분의 지역에서는 되돌릴 수 없는 현상이 될 것이라고 보고 있다. [WGI 10.7.4.2, Box 10.1] 21세기 동안의 전 지구적 전망에 의하면 현재의 빙하 및 만년설 체적의 상당 해수면 (Sea Level Equivalent, SLE) 추정치인 0.15~0.37m 중 0.07~0.17m가 줄어들어 해수면의 상승을 초래할 것으로 보고 있다. [WGI Chapter 4, Table 4.1, Table 10.7]

2.3.3 해수면

해수면 상승을 일으키는 중요한 원인에 대한 현재까지의 이해는 대단히 제한적이기 때문에 AR4는 앞으로의 해수면 상승 전망은 물론이고 해수면 상승의 상한계가 어디까지일지에 대한 평가를 못하고 있다. 해수면 상승에 대한 각종 전망은 기후-탄소 사이클의 피드백 효과에 있어서의 불확실성을 고려하지 못하고 있을 뿐 아니라, 얼음의 융해로 인한 영향도 완전히 고려하지 못하고 있다. 따라서, 해수면 변동폭의 상한치가 바로 해수면 상승의 상한계라고는 할 수 없다. 20세기 후반부 (1980~1999년)와 21세기 말 (2090~2099년) 사이의 전 지구적인 평균 해수면 상승에 대한 모형에서의 추정치는 대략 0.18~0.59m 정도일 것으로 전망하고 있으며, 이는 여러 가지 SRES 시나리오 하에 AOGCM 모형에 의한 추정치들의 분산을 고려하여 산정한 것이나 위에서 언급한 각종 불확실성에 대한 고려는 하지 않은 것이다. 시나리오 B1을 제외한 모든 SRES 시나리오의 경우 21세기 동안의 평균 해수면

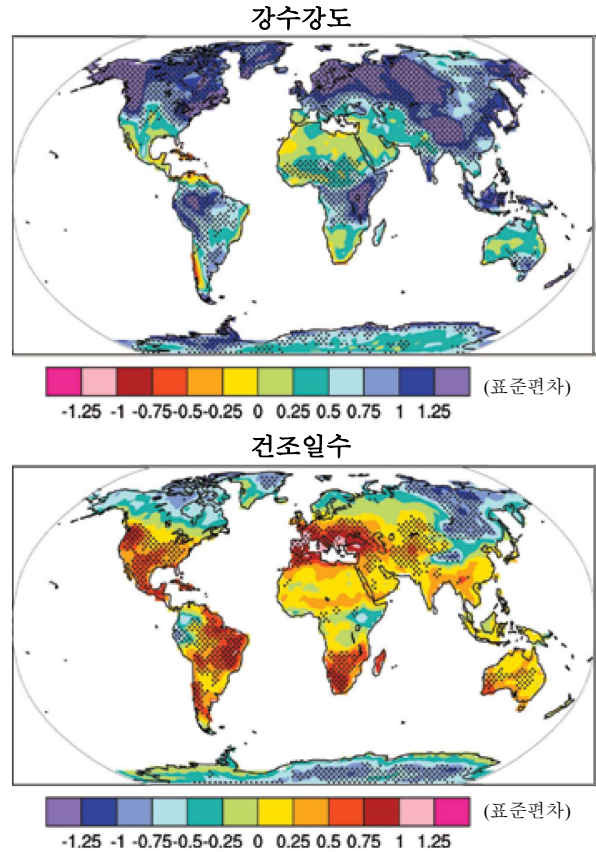


그림 2.9: A1B 시나리오 하에서 9개 기후 모델로 1980~1999년 값에 대비한 2080~2099년 값을 복합 모델 모의 기법으로 추정한 극한치의 변화량. 강수 강도 (연 중 강수량을 강우일수로 나눈 값)의 공간적 패턴의 변화 (위의 그림); 건조일수 (연중 최대 연속 무 강우일수)의 공간적 패턴의 변화 (아래 그림). 그림에 점을 찍어 처리한 부분은 9개 모델 중 최소 5개 모델에서 변화의 통계학적 유의성이 인정되는 지역을 표시한 것이다. 극한값 관련 지표는 육지 지역에 극한하여 표시했으며 변화량의 단위는 수문변량 자료 계열들의 표준 편차의 향으로 표시하였다.

상승률은 1961년~2003년간의 연평균 상승률인 1.8 ± 0.5 mm/year를 초과할 가능성이 대단히 크다. 열팽창 (thermal expansion)은 모든 온난화 시나리오에서 이들 추정치의 약 70~75%를 차지하는 제일 중요한 성분이며, 빙하와 만년설, 그리고 그린랜드의 빙상도 해수면 상승을 조장하는 역할을 할 것으로 보고 있다. GCM들은 전반적으로 보면 남극지방의 빙상은 크게 녹지 않고 증가된 강설량을 받게 되어 체적이 커짐에 따라 해수면 상승에 부정적인 영향을 미치게 될 것이라고 전망하고 있다. 21세기 동안의 해수면 상승은 지리적인 변동성이 대단히 클 것으로 보고 있다. [SYR 3.2.1; WGI SPM, 10.6.5, T.S 5.2] 그린랜드 혹은 남극지방의 빙봉(ice sheets)의 일부 손실은 수 미터의 해수면 상승을 초래할 수 있으며, 이로 인해 해안지역에 결정적인 변화를 일으켜 저지대에서 범람 피해를 일으킬 수 있으며, 가장 심각한 영향은 하천의 델타 지역과 표고가 낮은 섬 지역 등이 될 것이다. 현재의 모델링은 1000년 시간 스케일로 볼 때 그린랜드 지역에서 위에서 설명한 변화들이 발생할 가능성이 있다고 볼 수 있으나,

빙봉에서의 동역학적 빙류(ice flow) 과정에 대한 이해가 아직은 부족하기 때문에 100년 시간 스케일로 볼 때의 해수면 상승은 더 빨라질 수도 있다는 가설을 부정하기 힘들다. [WGI SPM; WGII 19.3]

2.3.4 증발산

잠재 증발량(potential evaporation)은 어느 곳에서는 증가하는 것으로 전망되었다. 이는 기온이 상승함에 따라 대기의 수분 함유 능력이 증가하기 때문이지만 상대 습도는 크게 변화하지는 않는 것으로 전망되고 있다. 따라서, 대기 중에서의 수증기 부족량은 증발량이 증가함에 따라 증가하게 된다(Trenberth et al., 2003). [WGI Fig. 10.9, 10.12; WGII 3.2, 3.3.1] 바다 [WGI Fig. 10.12]나 호수의 거의 모든 수표면으로부터의 실제 증발량은 증가하며, 공간적인 변동은 지표면 온난화의 공간적 분포와 관계를 가지는 것으로 추정되고 있다. [WGI 10.3.2.3, Fig. 10.8] 육지지역으로부터의 증발산량의 변화는 강수량과 복사 강제력의 변화에 의해 조절되며, 이들 증발산량의 변화는 다시 유출이라든지 토양 수분, 저수지나 저류수, 지하수면, 해안지역의 얇은 지하 대수층의 염수화 등의 물 수지에 영향을 미치게 된다. [WGII 3.4.2]

대기 중의 이산화탄소(CO₂) 증가는 식생으로부터의 증발산 측면에서 보면 2가지의 상반된 영향을 나타낸다. 첫째로, CO₂ 농도가 커지면 증산량(transpiration, 蒸散量)은 감소하게 된다. 왜냐하면, 증산 현상은 식물의 엽면(葉面)으로부터 발생하며 대기 중의 CO₂ 농도가 크면 탄소 동화 작용을 통한 광합성(photosynthesis)에 동일량의 CO₂를 취하기 위해 엽면의 기공(氣孔, 스투마)은 덜 열려도 된다(Gedney et al., 2006). 다른 한편으로는, CO₂ 농도의 증가는 식물 성장을 활발하게 하여 엽면의 면적을 증가시킴으로서 증산량을 증가시키게 된다. 이와 같이 CO₂ 농도 증가가 증산 현상에 미치는 2가지 상반된 영향의 상대적 인 크기는 식물의 종류뿐만 아니라 식물의 영양물질의 양, 기온 변화 및 가용 수분량의 영향 등의 여러 요인에 대한 전체적인 영향에 따라 상당한 변동을 보이게 된다. 따라서, 증발산에 미치는 CO₂ 농도 증가의 영향을 고려하기 위해서는 동역학적 식생 모델(dynamic vegetation model)에 의한 모의가 필요하다. 이를 위해 사용되고 있는 아주 작은 수의 모델(Rosenberg et al., 2003; Gerten et al., 2004; Gordon and Famiglietti, 2004; Betts et al., 2007)이 있으나 일반적으로 유역 단위가 아닌 전 지구적 스케일로 다루는 모형들이다. 평형 식생 모델(equilibrium vegetation models)에 의한 연구에 의하면 식생의 엽면 면적 증가는 엽면 기공의 막힘으로 인한 영향을 상쇄하는 것으로 보고 있으나(Betts et al., 1997; Kergoat et al., 2002), 동역학적 전 지구 식생 모델(dynamic global vegetation models) 연구에서는 기공 막힘의 영향이 엽면 면적 증가로 인한 영향보다 더 큰 것으로 보고 있다. CO₂로 인한 식생에 있어서의 변화를 고려하면 2 × CO₂ 기후 조건 하에서의 전 지구적 평균 유출량은 CO₂ 농도 증가만으로 인한 증발산량의 감소 때문에 약 5% 정도의 증가를 보이는 것으로 모의되었다(Leipprand and Gerten, 2006; Betts et al., 2007). [WGII 3.4.1]

2.3.5 토양 수분

토양 수분의 변화는 강수의 양과 발생 기간의 변화에 밀접하게 관련되어 있으며 식생의 변화에 의해 영향을 받는 증발산 현상과도 관계가 있다. 따라서, 토양 수분

변화의 지리적 분포는 강수량 변화의 분포와는 약간의 차이가 있으며, 증발산량이 커지면 강수량의 증가를 더 크게 상쇄할 수 있다. 현재의 모델들은 여러 가지 방법으로 육지지역으로부터 수 미터 두께 층에서의 토양 수분을 모의하고 있으나, 토양 수분 함량을 정확하게 평가하는 것은 아직 쉽지 않다. 연평균 토양 수분 함량에 대한 전망(그림 2.8b) 결과는 아열대 지역과 지중해 지역에서는 대체로 감소하는 것으로 나타났으나 동아프리카, 중앙아세아, 그리고 강수량이 증가한 일부 지역에서의 연평균 토양 수분 함량은 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 토양수분의 감소는 적설 지표면이 감소하는(제2.3.2절) 고위도 지역에서도 일어나고 있는 현상이며, 이들 변화의 규모는 아직 분명하지 않으나 이들 지역에서의 변화 징후에는 일관성이 존재하고 있으며, 계절적인 결과에서도 비슷한 변화 성향이 나타나고 있다.

2.3.6 유출과 하천 유량

기후변화로 인한 호수나 습지의 수위뿐만 아니라 하천 유량에 있어서의 변화는 주로 강수량의 크기와 발생 시간에 관계가 있으나 특히, 강수가 눈인지, 혹은 비인지에 따라 좌우되며, 증발량의 변화 또한 하천 유량에 영향을 미친다. 하천 유량에 대한 기후변화 영향에 관한 수많은 연구들은 과학 전문 저널에 수없이 많이 발표되었으며, 내부 보고서로 출판된 연구 결과도 대단히 많다. 이들 연구는 주로 유럽과 북미, 호주 등에서 이루어졌으며 아시아 지역에서의 연구는 일부 있지만 많지는 않다. 이들 연구를 위해서는 주로 기후모델에 의한 모의를 기반으로 하여 온난화 시나리오별로 유역 단위 규모의 수문 모델이 사용되고 있다. 기후모델 [WGI 10.3.2.3]과 수문모델들 [WGII 3.4]로 직접 모의된 소수의 지구규모 연구 결과에서 유출량은 고위도 지역과 습윤 열대 지역에서는 증가하는 반면, 중위도 지역과 건조 열대 지역의 일부 지역에서는 감소하는 것으로 나타났다. 그림 2.8c는 A1B 시나리오 조건에서의 앙상블 평균 유출량의 전 지구적 분포를 표시하고 있는 것으로 유출량은 남유럽 지역에서는 현저히 감소하며, 동남 아시아 지역과 고위도 지역에서는 증가하는 것으로 나타났고, 유출량 변화의 방향(+ 혹은 -)은 대부분의 모형에서 일관성을 나타내었다. 모의된 1980~1999년 유출량 값 중 큰 변화량은 20% 혹은 그 이상을 보이고 있는데, 이는 습윤지역에서는 1~5mm/day, 건조한 사막 지역에서는 0.2mm/day 미만에 해당한다. 고위도에 위치한 하천의 유량은 대체로 증가하는 반면, 중동 지역이나 유럽, 중앙아메리카 지역에 위치한 주요 하천에서의 유량은 감소하는 경향을 나타낸다. [WGI 10.3.2.3] 그러나, 유출량 변화의 크기는 사용되는 모델의 종류에 따라 어느 정도 변화하며 남 아시아 지역 등에서는 유출은 증가할 수도 있고 감소할 수도 있다. 제2.2.1절에서 지적한 바와 같이 대기 중 CO₂의 증가 영향은 증발량을 감소시킬 수 있어서 유출의 체적을 크게 증가시킬 수도 있고 거꾸로 약간 감소시킬 수도 있다. [WGII 7.2]

그림 2.10은 1980~1999년과 비교한 2090~2099년의 연평균 유출량의 변화를 비교하고 있다. 표시된 값들은 SRES의 A1B 시나리오를 사용한 12개 기후모델로 산정한 값의 중앙 값을 사용하여 계산한 변화율을 나타낸 것으로 사선 친 부분(hatching)은 모형들의 유출량 변화 부호(+, -)가 일치하는 지역을 표시하는 반면, 흰색으로 표시된 부분(whitening)은 일치하지 아니하는 지역을 각각 표시하고 있다. 그림 2.10으로부터 유출량 변화의 부호가 확실하지 않은 지역이 많음을 알 수 있다. 연

유출의 변화를 표시하는 이 지도는 유출량의 변화를 큰 스케일로 설명해주기 위한 것이지 짧은 시간 스케일로 유출량 변화를 해석하고자 하는 것은 아니다. 사막지역과 같이 강수량과 유출량이 아주 적은 지역에서는 유출량의 작은 변화가 큰 변화율을 결과시킬 수도 있다. 또한, 어떤 지역에서는 유출량의 변화 부호가 최근에 관측된 경향과 다르게 나타날 수도 있으며 (제2.1.6절 참조), 유출의 증가가 추정된 지역에서 증가된 습윤 계절 유출량과 감소된 건조 계절 유출량의 발생등과 같은 상이한 계절적 영향이 나타날 수도 있다. [WGII 3.4.1]

온난화 현상은 현재에 겨울철 강수량이 주로 눈으로 내리는 지역에서의 하천 유량의 계절성에 변화를 가져올 수 있는 것으로 밝혀져 있다. 즉, 봄철 유량은 조기 융설이나 융설량의 감소로 인해 감소하고 겨울철 유량은 증가하는 현상을 보인다는 것이다. 이와 같은 현상은 유럽 알프스 지역, 스칸디나비아 지역과 발틱해 지역, 러시아, 히말라야, 북미의 서부, 중부 및 동부 지역 등에서 확인되었으며, 이러한 영향은 강설의 가능성이 높지 않은 낮은 표고 지역에서 가장 크고, 21세기 중반까지 침투유량은 많은 경우 최소 1개월 빨리 발생할 것으로 보고 있다. 눈이 거의 오지 않거나 강설량이 아주 적은 지역에서의 유출량의 변화는 기온의 변화보다는 강우량의

변화에 훨씬 더 밀접하게 관계될 것이라고 본다. 이들 지역에 대한 대부분의 연구에서는 침투유량이 발생하는 계절에 큰 유량이 발생하며 갈수유량이 발생하는 조기에 저수 유량이 발생하는 등 하천 유량의 계절성이 더 커지는 것으로 전망하고 있다. [WGII 3.4.1]

아시아의 높은 산맥 지역이나 남아메리카의 안데스 산맥 지역에 위치한 빙하 지역으로 배수하는 많은 하천들은 따뜻하고 건조한 기간 동안에 빙하가 녹아서 하천이 형성되며, 전 지구적 온난화로 인해 이들 빙하가 차차 녹게 되면 하천 유량은 아주 짧은 기간에 크게 증가하게 될 것이다. 그러나 빙하가 녹아서 하천 유량이 크게 증가되는 현상은 다가오는 수십 년에 걸쳐 차차 감소할 것으로 보고 있다. [WGII 3.4.1]

호수의 수위 변화는 호수로 유입하는 하천 유량과 지역의 강수량 및 증발량의 계절적 분포에 있어서의 변화를 반영하게 된다. 따라서, 호수는 호수로 흘러들어오는 선형 입력 (linear input)에 대하여 비선형적으로 반응한다고 볼 수 있다. 북아메리카의 5대호와 카스피아해 등에 관한 연구 결과에서는 21세기 말까지 호수에서의 수면 변화도 수십 센티미터에서 수 미터에 달할 것으로 보고 있다. [WGII 3.4.1]

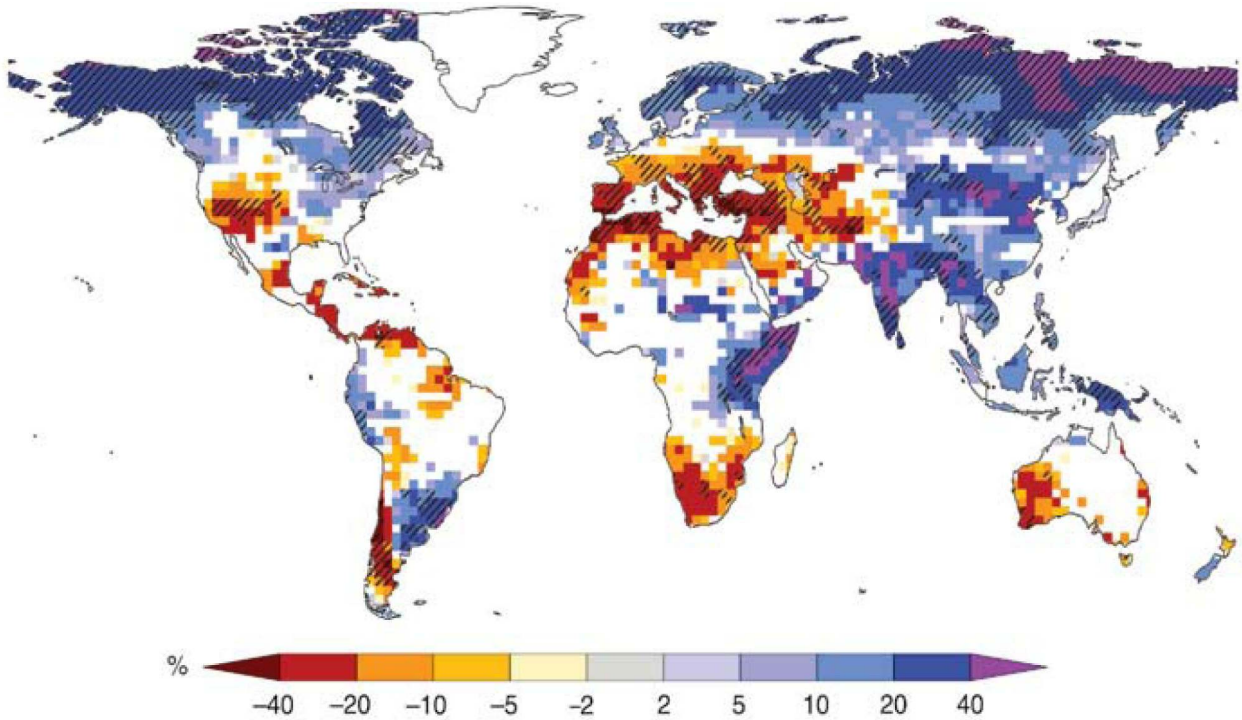


그림 2.10: 1980~1999년 기간에 대비한 2090~2099년 기간 동안의 연 유출량의 대규모 상대적 변화량. 그림에서 흰색 부분은 사용된 12개 모형의 앙상블 중 66% 이하가 변화량의 부호가 일치하는 지역을 나타내며, 사선으로 표시된 부분은 사용된 모형 중 90% 이상이 변화량의 부호가 일치하는 지역을 나타낸다 (Milly et al., 2005). [종합보고서 Fig. 3.5 및 WGII Fig. 3.4 참조]

2.3.7 대규모 변동성의 패턴

AR4에서 평가된 전 지구 기후모델에 의하면 해수면 기압은 아열대 지역과 중위도 지역에서는 증가하고, 고위도 지역에 걸쳐서는 감소하는 것으로 전망되며, 이들 변화는 해들리 순환 (Hadley Circulation)의 확장과 북반구 극진동/북대서양 진동 (Northern Annular Mode/North Atlantic Oscillation, NAM/NAO), 그리고 남반구 극진동 (Southern Annular Mode, SAM)의 양성 변화 성향 (positive trends)과 연관되어 있다. 이와 같은 변화로 인해 폭풍경로는 극지방쪽으로 이동하게 되어 열대권 밖에서의 바람이나 강수 및 기온 패턴에 변화를 주어 왔으며, 지난 반세기 동안 이들 성향이 계속 관측되어 왔다. [WGI TS, 10.3.5.6, 10.3.6.4]

장래의 열대 사이클론은 현재 진행되고 있는 열대 지역 해수면 온도 (Sea Surface Temperature, SST)의 상승으로 대단히 큰 풍속과 대규모 강수량을 동반하게 되어 보다 강도가 높아질 가능성이 있다. [WGI SPM, 10.3.6.3]

태평양의 중부 및 동부 적도 지역에서의 해수면 온도는

서부 지역에서 보다는 따뜻하기 때문에 강수는 동쪽으로 전이될 것으로 전망되고 있다. 모든 기후 모델들은 장래에 엘니뇨-남방 진동 (ENSO)이 연차적인 변동성을 계속 보일 것으로 예측하고 있으나, 사용되는 모델에 따라서는 엘니뇨의 진폭 변화 추정에 상당한 차이를 보이고 있고, 엘니뇨의 수십 년간에 걸친 시간 스케일의 변동성 때문에 ENSO의 변동성에 대한 전망을 확정적으로 한다는 것은 현재로서는 어렵다. [WGI TS, 10.3.5.3, 10.3.5.4]

월 평균 지표면 대기 온도의 경년적 변동은 북반구의 극열대 지역에서 추운 계절에는 감소하나 저위도와 중위도 지역에서 따뜻한 계절에는 증가하는 것으로 전망되고 있다. 전자는 아마도 증가하는 기온으로 인해 바다 얼음과 적설량이 감소하기 때문인 것으로 보이며, 후자는 중위도 지역 지표면의 토양 수분이 여름철에 감소하기 때문일 것으로 보고 있다. 대부분의 지역에서 월 평균 강수량은 절대값 (표준편차) 뿐만 아니라 상대값 (변동 계수)에 있어서 증가를 보일 것으로 전망되고 있으나 이 변동성 전망의 유의 수준은 낮은 편이다. [WGI 10.3.5.1]

3

기후변화와 수자원의 연계:
영향과 반응

**Linking Climate Change and Water
Resources: Impacts and Responses**

3.1 관측된 기후변화의 영향

3.1.1 빙권의 변화로 인해 관측된 영향

빙권(氷圈, cryosphere)의 변화로 인한 영향은 빙권을 형성하는 모든 구성요소가 지구 온난화의 가속으로 인해 눈과 얼음이 감소되어 가는 현상에 반응하고 있다는 확실한 증거들로 잘 설명되어 왔다.

3.1.1.1 산지 빙하와 만년설, 빙상 및 부유 빙상

산지 빙하(mountain glaciers)와 만년설(ice caps)의 기후 변화로 인한 영향은 유출(Kaser et al., 2003; Box et al., 2006)과 변화하는 재해 위험 조건(Haeblerli and Burn, 2002), 그리고 해양 freshening(Bindoff et al., 2007) 등의 측면에서 잘 정리되어 있다. 또한, 최근 알라스카 지역에서의 빙하 용해로 인한 지각 융기(crustal uplift)의 징후가 가시화 되고 있다(Larsen et al., 2005). 빙하의 용해 기간이 길어질 뿐만 아니라 용해 속도도 빨라짐에 따라 하천 유출 체적과 침투유출량은 증가하는 반면에, 빙하 유출은 장기적(10년 혹은 100년 스케일)으로 볼 때 감소할 것으로 예측되고 있다(Janson et al., 2003). 가속화된 빙하 용해로 인한 최근 수십 년간의 하천 유출량의 증가 징후는 열대 안데스 지역과 알프스 지역에서 이미 탐색된 바 있다.[WGI 4.6.2; WGII 1.3.1.1]

히말라야 산맥(Box 5.4참조)이나 안데스, 알프스 산맥 등을 포함하는 여러 급경사 산악 지역에서는 Little Ice Age(LIA)의 퇴석(堆石, moraine)으로부터 빙하가 밀려져 나가게 되어 자연 호수들이 형성되고(Box 5.4 참조) 있으며, 두꺼운 층의 얼음 용해 또한 LIA 퇴석의 안정성을 위협하고 있다. 그래서 이들 호수들은 빙하 호수 붕괴로 인한 대규모 홍수(Glacial Lake Outburst Floods, GLOFs)를 발생시킬 잠재성이 크다. 여러 국가에서는 많은 국가 기관들이 이들 호수의 안전유지를 위한 광범위한 사업을 시행하였으며, 몇몇 호수들은 견고한 댐 및 방류 구조물 등을 시공한 예도 있으나, 히말라야 산맥(Yamada, 1998)이나 안데스 산맥(Ames, 1998)과 기타 세계 여러 산맥 지역에 위치하고 있는 수십여 개의 빙하 호수의 붕괴 위험성이 여전히 존재하므로 지속적인 경계가 필요하다.[WGII 1.3.1.1]

빙하의 후퇴는 지표면의 풍경에 엄청난 변화를 가져와서 전 세계의 많은 산악 지역에서의 생활 조건과 지역 관광에 큰 영향을 미치게 된다(Watson and Haeblerli, 2004; Mölg et al., 2005). 그림 5.10은 Chacaltaya 빙하의 후퇴가 지역의 풍경과 스키산업에 미치는 영향을 보여주고 있다. 온난화 현상은 특히 삭마(削磨) 지역에서 봄과 여름철 빙하의 용해를 가속화시키며, 이로 인한 계절적 적설의 손실을 가져와 빙하의 표면에 균열이 생기게 되어 남극 반도(Antarctic Peninsula)에 대하여 보고된 바와 같이(Rivera et al., 2005) 눈이 해양으로 녹아버리는 결과를 초래하게 된다.[WGII 1.3.1.1]

3.1.1.2 적설 지표면과 동토

적설 지표면(snow cover)이 공간적으로 감소하고 시간적으로도 빨리 감소함에 따라 북미와 북유라시아 지역

에서의 봄철 침투 하천 유출량은 지난 65년여 동안 약 1~2주 빨리 발생해 왔다. 또한 북유라시아 지역과 북미 지역에서의 겨울철 기저유출량이 증가하는 징후를 보이고 있을 뿐 아니라, 저 위도 지역에서는 강설량이 감소하는 성향을 보여 스키 위락지구에 영향을 미치는 것으로 밝혀지고 있다.[WGII 1.3.1.1]

계절적인 동토 지역과 영구 동토 지역의 범위가 축소됨으로서 다음과 같은 결과가 초래되고 있다.

- 알라스카(Yoshikawa and Hinzman, 2003)와 시베리아(Smith et al., 2005, Fig. 5.12 참조) 지역에서 탐지된 바와 같이 영구 동토 지역 내에서의 배수(排水)로 인한 호수의 소멸
- 알라스카 지역에서 얼어붙은 도로를 통한 차량 통행 일수의 감소
- 북극 지방에서의 해안 침식의 증가(Beaulieu and Allard, 2003) 등

[WGII 1.3.1.1 Chapter 15]

3.1.2 수문과 수자원

3.1.2.1 지표수와 지하수 시스템에 있어서의 변화

IPCC의 제3차 평가 보고서(TAR)가 출간된 이후 유역 단위에서부터 전 지구적 규모에 걸쳐 20세기 동안의 하천 유출의 성향과 관련된 여러 연구가 수행되어 왔다. 이들 연구 중 일부 연구는 하천 유출의 특성에 중요한 변화가 일어나고 있음을 밝힌바 있으며, 어떤 연구는 하천 유출을 기온이나 강수량의 변화 성향과 중요한 연계성이 있음을 통계학적으로 증명하려고 노력한 바도 있으나, 전 지구적 차원에서 동질의 성향을 밝혀내는 데는 성공하지 못하고 있다. 그러나, 많은 연구들은 변화 성향을 찾을 수 없거나, 혹은 기온과 강수량의 변동 영향을 토지 이용 변화라든지 저수지 건설 등과 같은 하천 유역에서의 인간 활동으로 인한 영향으로부터 분리시키는데 실패해 왔다. 또한, 어떤 지역에서는 경년별 하천 유출의 변동은 ENSO, NAO, 그리고 10년 주기 혹은 수십 년 주기를 가지는 기후 변동 시스템과 연관되는 대규모 대기 순환 패턴에 의해 대단히 크게 영향을 받는다.[WGII 1.3.2.1]

전 지구적인 규모에서 보면, 연 유출량의 변화는 상당히 일관성 있는 패턴을 보이고 있다는 증거가 있다. 어떤 지역, 특히 고위도 지역에서는 연 유출량의 증가(Tao et al., 2003a, b, 중국; Hyvarinen, 2003, 핀란드; Walter et al., 2004, 미국)를 보이는 반면에, 서아프리카, 남부 유럽 및 남부 라틴아메리카 지역(Milly et al., 2005)의 상당 부분 지역에서는 감소하고 있는 것으로 알려지고 있다. Labat et al. (2004)은 20세기 동안 기온 1°C 상승에 따른 지구 전체 총 유출량의 증가는 지역적 변동은 있으나 약 4% 정도라고 주장하였으나 유출에 미치는 비기후적인 동인(non-climatic drivers)과 충분하지 못한 유출량 자료 때문에 비판을 받고 있다(Legates et al., 2005). Gedney et al. (2006)은 이산화탄소 강제력(CO₂ forcing)은 식물 생리 현상에 따른 CO₂ 농도의 증가 영향으로 유출량을 증가시킨다는 임시적인 증거를 제시한 바도 있다. 유출량의 증가 성향을 밝혀내기 위해 사용되는 방법들은 하천 유역간의 교차 상관성(cross-correlation)의 영향을 고려하지 않으면 중요한 유출량 증가 성향을 보이는 유역의 수를 과대 추정하게 될 수도 있기 때문에 결과에 상당한 영향을 줄 수가 있다(Douglas et al., 2000). [WGII 1.3.2.1]

얕은 대수층내의 지하수는 수문순환 과정의 한 부분이며 기후 변동성과 지하수 함양 과정 (Chen et al., 2002)을 통한 변화는 물론 각종 인간 활동의 영향 (Petheram et al., 2001)을 받게 된다. [WGII 1.3.2.1] 전 세계의 수많은 대수층 내 지하수위는 지난 수십 년 동안 대체로 감소하는 경향을 보이고 있으나 [WGII 3.2, 10.4.2], 이는 일반적으로 지하수 함양률을 초과하는 지하수의 채취로 인한 것이지 기후변화와 관련된 지하수 함양량의 감소로 인한 것은 아니다. 그러나, 호주의 남서부와 같은 지역에서의 지하수 채취량의 큰 증가는 용수 수요의 증가뿐만 아니라 지표수 공급원으로 부터의 기후 변화 관련 함양량의 감소로 인한 것으로 보고되고 있다 (Government of Western Australia, 2003). 캐나다의 Winnipeg 부근의 상층부 탄산염 대수층에서 관측된 얕은 우물의 수위 변동은 뚜렷한 경향을 보이지는 않으나 연평균 기온 및 강수량의 변화와 연관시켜 볼 때 3~4년의 변동을 나타내고 있다 (Ferguson and George, 2003). 자료의 부족과 지하수 함양 조건의 변화에 대한 지하수 시스템의 아주 느린 반응 때문에 지하수 함양의 기후 관련 변화는 아직 관측되어 밝혀진 바는 없다. [WGII 1.3.2, 3.2]

현재로서는 전 지구적으로 자연 호수의 수위에 대한 일관성 있는 변동 성향은 밝혀져 있지 않다. 몽고나 중국 (Xinjiang)에 있는 호수들의 수위는 눈이나 얼음의 용해가 가속화되어 상승되어 온 반면에, 중국 (Qinghai), 호주, 아프리카 (Zimbabwe, Zambia and Malawi), 북미 (North Dakota), 유럽 (Central Italy) 등지의 호수 수위는 가뭄이나 온난화 현상 및 인간 활동의 영향으로 강하되어 왔다. 북극 지방의 영구 동토 지역에서는 최근의 온난화로 인해 동토의 일부가 녹아서 유출이 이루어짐에 따라 여러 호수들이 일시적으로 형성되어 온 것으로 보고되고 있다 (Smith et al., 2005). 이와 유사하게 북극 지방의 빙봉 (氷棚, ice shelf) 지역에 호수가 일시적으로 형성되었다가 (epishelf lake라 부름)¹¹⁾ 빙봉이 붕괴되면 호수가 없어져버리는 현상이 발생하는 것으로 보고되고 있다 (Mueller et al., 2003). 영구 동토 지역과 빙봉부에 형성되는 이들 호수들에 관해서는 Le Treut et al. (2007)가 상세하게 취급하고 있다. [WGII 1.3.2.1]

3.1.2.2 수질

호수나 하천에 대한 기후 관련 온난화 영향은 최근 수십 년간 관측되어 왔다. [WGII 1.3.2] 이들 관측을 통해 담수 생태계에는 종 (種)의 구성이나 생물 다양성과 생산성, 그리고 생물 기후학적 변이 특성 등에 변화가 발생하고 있음이 확인되어 왔다. [WGII 1.3.4] 또한, 온난화로 인하여 많은 호수들의 성층화 (成層化, stratification) 기간이 길어져서 호수의 표층부의 영양물질 농도가 감소하고 [WGII 1.3.2] 심층부의 산소가 희박해지는 기간이 길어지는 등의 현상이 관찰되었다. [WGII Box 4.1] 기후 변화와는 관계가 없는 인간 활동 영향이 워낙 크기 때문에 호수와 하천 및 지하수에 있어서의 다른 수질변량 (염도, 병원균, 영양물질 등)에 일관성 있는 기후 관련 경향이 발견된 증거는 없다. [WGII 3.2]

1) 호수의 열역학적 구조

온난화 현상으로 인해 호수의 수온은 표 3.1에서 보는 바와 같이 계속 증가해 왔다. 결빙기간의 단축과 하천과

호수의 얼음 두께 감소에 대해서는 제2.1.2절과 Le Treut et al. (2007)에서 취급하고 있다. 식물성 플랑크톤의 동역학 및 1차 생산성은 호수 물리학적 변화로 인해 과거와는 달라졌다. [WGII 1.3.4.4, Fig 1.2, Table 1.6] 1960년대 이후 유럽과 미국 및 아시아 지역에서의 호수와 하천에서의 수표면 온도는 약 0.2°C~2.0°C 정도 증가하였으며, 이와 같은 수표면 온도의 증가와 함께 동부 아프리카 지역의 대형 호수 (Edward, Albert, Kivu, Victoria, Tanganyika and Malawi)에서의 심층부 수온도 1900년대 이후 약 0.2°C~0.7°C 정도 증가하였다. 이와 같은 수온의 증가와 얼음이 얼지 않는 기간이 길어짐에 따라 호수의 열 성층화와 동수역학적 특성은 상당한 영향을 받게 되어, 기온이 상대적으로 따뜻한 연도에는 수표면 온도가 높아져서 증발 손실이 증가하게 되고, 여름철 성층화는 계절의 초기에 발생한다. 유럽과 북미 지역의 몇몇 호수에서는 호수의 성층화 기간이 20여일 빨라졌고 길이는 2~3주 정도 길어졌다. [WGII 1.3.2.3]

2) 물의 화학적 성질

증가된 성층화 현상은 등수온선을 가로지르는 물의 이동성을 감소시켜 수중 생물에 필수적으로 필요한 영양분을 공급하는데 필요한 물의 혼합 작용을 저해하게 된다. 유럽과 동부 아프리카 지역의 호수들은 호수 내에서의 연직 방향 혼합이 약해져서 호수 표면부에서는 영양분의 농도가 감소하고 심층부에서는 증가하는 것으로 밝혀져 있다. 많은 호수와 하천들은 각각의 유역 내에서의 규산염, 칼슘염과 마그네슘 황산염 및 탄산염의 풍화가 가속됨으로 인한 알칼리성과 전도율이 증가하게 되어 황산염과 규토 (silica)의 농도가 증가하였다. 반대로, 따뜻한 기온이 고도가 높은 지역의 생태계에서 식생의 성장과 토양의 성질을 개선하게 되면 증가되는 산성 유기 물질 때문에 알칼리성은 둔화된다 (Karst-Riddoch et al., 2005). 빙하의 해동은 캐나다의 고산 지대에 있는 호수로의 유기 염소 성분 유입을 크게 증가시킨 것으로 보고되고 있다 (Blais et al., 2001). [WGII 1.3.2.3]

기온이 상승하게 되면 호수 내 화학적 과정에도 여러 가지 영향을 주게 된다 (표 3.1; WGII Table SM 1.3 참조). Sommaruga-Woggrath et al. (1997)과 Rogora et al. (2003)에 의하면 식물 플랑크톤의 생산성이 크게 증가함에 따라 용존 무기질소의 감소가 초래되었으며, 호수 내 알칼리성 물질의 발생도 많아졌고 pH도 크게 증가하였다 (Psenner and Schmidt, 1992). 뜨거운 기온으로 인해 감소된 호수 내 물의 가용성 (可溶性)은 알루미늄 농도를 11~13% 정도 떨어뜨리는 주요 원인이 되었던 반면 (Vesely et al., 2003), 따뜻한 수온의 호수들은 수온 메틸렌 함량이 증가하고 물고기 생체 내 수은 함유 수준이 높아지는 것으로 보고되고 있다 (Bodaly et al., 1993). 지역적인 온난화와 관련된 호수 내 실리콘 함량의 감소는 러시아의 바이칼 호의 경우 잘 밝혀져 있다. 일본 내 27개 하천으로부터 수집한 하천수의 수질 자료에 의하면 대기 온도 증가로 인한 물의 화학적 및 생물학적 성질은 악화되고 있음이 밝혀졌다. [WGII 1.3.2.3]

3) 침식과 유사이동

물에 의한 침식 현상은 주로 인간이 각종 토지 이용으로

11) 빙봉 뒤에 갇히게 되는 담수체 (淡水體, water body)

인한 변화 때문에 세계의 많은 지역에서 증가해왔다. 그러나, 자료 부족으로 침식이나 하천 내 토사 이동이 기후 변화로 인해 가속화 되는지, 혹은 아닌지에 대한 분명한 증거는 아직 없다. [WGII 3.2]

3.1.2.3 홍수

여러 가지 기후적 및 비 기후적 과정들은 홍수 발생 과정에 영향을 미치게 되어 자연 하천에서의 홍수, 돌발 홍수, 도시 홍수, 하수관거 홍수, 빙하호의 범람으로 인한 홍수 (GLOFs, Box 5.4 참조), 그리고 해안 홍수들을 발생시킨다. 이들 홍수를 발생시키는 과정들은 통상 강한 강도와 오랜 지속 기간을 가지는 강수와 융설, 댐 파괴, 얼음의 충돌과 사면 붕괴 등으로 인한 홍수 소통 능력의 감소 등을 동반한다. 홍수의 규모는 강수의 강도와 총체적, 발생 시간, 강수의 종류 (눈 혹은 비), 유역의 토양 특성과 선행 강수 조건 및 습윤 상태, 도시화 정도, 댐 및 저수지의 유무 등 여러 가지 변수의 영향을 받게 된다. 인간에 의한 홍수터의 토지 이용과 홍수 방어를 위한 계획의 부실은 홍수 피해 잠재성을 증가시키게 된다. [WGII 3.4.3] 관측된 강수 강도의 증가와 유럽지역의 겨울철에 대규모 홍수를 발생시키는 저기압성 호우의 원인이 되는 서향(西向, westerly) 일기 패턴의 증가 성향과 같은 관측된 기후 변화들은 (Kron and Berz, 2007) 기후 변화가 이미 홍수의 강도와 발생빈도에 영향을 미쳐왔음을 암시하고 있다. [WGII 3.2] AR4의 WGI이 발간한 “정책 결정자를 위한 요약보고서 (Summary for Policymakers)”는 20세기 후반 동안 큰 규모의 강수(heavy precipitation)의 발생빈도는 세계 많은 지역에서 증가해왔을 가능성이 있다고(likely) 결론지었으며, 이와 같은 증가 경향은 인간 활동으로 인한 것일 가능성이 없지는 않다고 (more likely

than not) 결론 내리고 있다. [WGI Table SPM-2]

전 지구적으로 보면 최근 10년 (1996~2005)간의 육지 지역의 대규모 홍수 재앙의 발생 횟수는 매10년마다 1950~1980년에 비해 약 2배에 달하며 관련 경제적 손실은 약 5배 정도로 증가하였다 (Kron and Berz, 2007). 이와 같은 홍수 피해의 증가 성향의 지배적인 원인은 경제 성장이라든지 인구와 홍수 취약 지역에 집중된 재산의 증가, 그리고 토지 이용의 변화 등이다. 홍수는 세계 많은 지역에서 가장 많이 발생하는 자연 재해로서 매년 평균 약 1억 4천만 명이 영향을 받은 것으로 보고되고 있다 (WDR, 2003, 2004). 방글라데시에서는 1998년 홍수 기간 동안 전 국토의 약 70% (세계 평균은 약 20~25%)가 홍수 범람 피해를 입은 바 있다 (Mirza, 2003; Clarke and King, 2004). [WGII 3.2]

홍수 피해는 인구나 경제 성장률보다 급속하게 증가해 왔기 때문에 기후 변화 영향을 포함하여 여타 인자들도 고려되어야 한다 (Mills, 2005). 관측된 여러 증거들을 보면 물 순환 사이클의 가속화가 진행되고 있는 것으로 보인다 (Huntington, 2006). [WGII 3.4.3] 온난화와 관측된 대기 내 수증기의 증가 성향과 일관성을 보이는 대규모 강수 사상의 발생 빈도는 증가하였다. [WGI SPM 3.8, 3.9] 그러나, 하천유량이 크게 증가하고 있다는 경향에 대한 결정적인 단서는 아직 문헌에서 찾아볼 수는 없다. Milly et al. (2002)은 세계 여러 지역에 걸쳐 대하천 유역의 자료 분석으로부터 큰 홍수 (재현기간 100년 이상)의 발생 빈도는 증가하고 있다고 주장하였으나, 그 이후의 연구에서 이와 같은 결론이 주장된 사례는 적다. Kundzewicz et al. (2005)는 전 세계적으로 195개 하천 유역의 하천 유량을 분석한 결과, 27개 유역 내에서는 하천 유량이

표 3.1: 유출/하천 유량, 호수의 수위, 홍수/가뭄 등의 관측된 변화들 [WGII Table 1.3]

환경인자	관측된 변화	관측 기간	관측 위치
유출/하천 유량	연간 증가율 5%, 겨울철 증가율 25~90%, 증가된 융해와 영구 동토의 해동으로 인한 겨울철 기저유량의 증가	1935~1999	북극의 배수유역: Ob, Lena, Yenisey, Mackenzie
	온난화로 인한 이른 융설로 인해 침투 하천 유량이 1~2주 빨리 발생	1936~2000	북미의 서부지역, 뉴잉글랜드, 캐나다, 북 유라시아
홍수	하천에서의 이른 해빙과 호우 발생으로 인해 발생 확률 0.5~1.0% (200년 및 100년 빈도)의 재앙에 가까운 홍수 발생	최근 수년간	북극의 러시아 하천 유역
가뭄	강수량의 변동이 없는 상태에서 기온 상승과 증발량 증가로 인한 하천의 연 최대 일 유량이 29% 정도 감소	1847~1996	캐나다 남부 지역
	최근 몇 년 동안 서부 열대 태평양 지역과 인도양 지역의 온난화와 관련된 건조하고 비정상적으로 온난한 여름 기후로 인해 가뭄 발생	1998~2004	미국 서부 지역
수온	홍수 표면의 수온이 0.1~1.5℃ 상승	40년간	유럽, 북미, 아시아 (100개 관측소)
	홍수의 심층부 수온이 0.2~0.7℃ 상승	100년간	아프리카 동부 지역 (6개 관측소)
물의 화학적 성질	홍수와 하천에서의 증가된 성층화 현상 또는 길어진 성수기로 인한 영양 물질의 감소	100년간	북미, 유럽, 유럽 동부, 아프리카 동부 지역 (8개 관측소)
	홍수와 하천 유역 풍화 현상 및 내부 화학적 반응 과정의 증가	10~20년간	북미, 유럽 (88개 관측소)

증가하고, 31개 유역에서는 감소하며, 나머지 137개 유역에서는 경향성을 발견할 수가 없었다. [WGII 1.3.2.2]

3.1.2.4 가뭄

“가뭄”이란 용어는 강수량이 평균값보다 훨씬 적은 경우의 기상학적 가뭄 (meteorological drought), 하천이나 호수, 지하수의 유량이 적고 수위가 낮은 경우의 수문학적 가뭄(hydrological drought), 토양수분 함유량이 적은 경우의 농업 가뭄(agricultural drought), 및 이들 가뭄 발생요소가 복합적으로 나타날 경우의 환경적 가뭄 (environmental drought)등을 가리킨다. 가뭄의 사회·경제적 영향은 자연 조건과 토지이용 및 식생피복의 변화라든지, 물의 수요와 이용 등과 같은 인간 활동과 관련되는 조건간의 상호 관계로부터 발생하게 된다. 물의 과다 취수는 가뭄의 영향을 악화시킬 수 있다고 보고되고 있다. [WGII 3.4.3]

1970년대 이래 가뭄은 특히 열대 지역과 아열대 지역에서 자주 발생하여 왔다. AR4의 “정책 결정자를 위한 요약 보고서(SPM)”는 1970년대 이래 가뭄의 영향을 받은 지역의 면적은 증가하였으며, 이러한 경향에는 인간 활동의 영향 가능성이 없지 않다고 주장하고 있다. [WGI Table SPM-2] 증발산을 가속시키고 토양 수분을 감소시키는 기온의 상승과 강수량의 감소는 Palmer의 가뭄 심도 지수 (Palmer Drought Severity Index, PDSI)에 의해 측정되는 바와 같은 가뭄을 겪게 되는 많은 지역에 영향을 미치는 중요한 인자가 된다 (Dai et al., 2004b) [WGII 3.3.4]

가뭄이 발생했던 지역들은, 특히 열대 지역에서, 주로 대기 순환 및 강수 현상의 관련 변화를 통한 해수면 온도의 변화에 의해 결정되는 것으로 보인다. 서부 미국의 경우는 적설량의 감소와 이로 인한 토양 수분의 감소가 가뭄의 주된 원인인 것으로 보이며, 호주와 유럽에서는 최근의 여러 가뭄을 동반한 고온 및 열파 (heatwaves)와 같은 극한적인 자연 현상의 원인을 지구 온난화와 직접 연결 시켜서 풀이하고 있다. [WGI 3.ES, 3.3.4]

전술한 PDSI를 사용하여 Dai et al. (2004b)은 1950년대 중반 이래 유라시아의 많은 부분과 북부 아프리카, 캐나다 및 알래스카 등 (그림 3.1) 북반구의 육지지역은 크게 건조해지고 있음을 발견하였다. 남반구의 경우, 1970년대에는 육지표면이 습윤했었고, 1960년대와 1990년대에는 상대적으로 건조했으며, 1974년~1998년 기간에는 건조 성향을 보였으나, 1948년~2002년 전 기간 동안의 건조 성향은 미미하였다고 볼 수 있다. 최근 수십 년간의 육지 지역 강수량의 감소는 이들 건조 성향의 주된 이유로 볼 수 있으나, 지난 20~30년간의 육지표면의 온난화가 육지지역의 건조 성향에 원인이 되었을 가능성이 있다. 전 지구적으로 보면, 1970년대 이래 대단히 건조한 지역 (PDSI < -3.0인 지역)은 2배 이상 (12%~30%)으로 늘어났으며, 1980년대에는 ENSO와 관련된 강수량의 감소로 인해 1980년대 초반에는 건조 지역이 크게 늘어났었고, 그 이후에는 주로 지구표면의 온난화로 인해 건조 지역이 증가하였을 것으로 보고되고 있다 (Dai et al., 2004b). [WGI 3.3.4]

가뭄은 가정용수와 공업용수 및 농업용수의 공급뿐만 아니라 천수담 관계에도 영향을 미친다. 호주 [WGII 11.2.1] 라든지 미국 서부와 캐나다 남부 [WGII 14.2.1], 그리고 사헬 (Nicholson, 2005) 지역과 같은 반 건조지역 혹은

아 습윤지역 (sub-humid regions)들은 여러 해 동안 계속된 심한 가뭄을 겪어 왔다. [WGII 3.2]

지구 온난화로 인해 발생했던 것으로 볼 수 있는 유럽에서의 2003년 열파 (熱波, heatwave) (Schär et al., 2004)는 300mm에 달하는 연강수량의 부족을 가져왔으며, 이로 인한 유럽 지역 생태계의 총 생산량의 감소는 약 30%에 달했던 것으로 보고되고 있다 (Ciais et al., 2005). 많은 주요 하천 (Po, Rhine, Loire, Danube 강 등)들은 기록적인 낮은 수위가 되어 내륙 주운이나 관개, 발전소 냉각 용수 공급 등이 어려웠었다 (Beniston and Diaz, 2004; Zebisch et al., 2005). 알프스 산맥 지역에서의 대대적인 빙하 용해에도 불구하고 Danube와 Rhine 강의 유량 저하를 막을 수 없었다고 보고되고 있다 (Fink et al., 2004) [WGII 12.6.1]

3.2 기후변화로 인한 물의 가용성 및 물 수요의 미래 변화

3.2.1 미래의 담수 시스템에 대한 기후관련 동인

물의 가용성에 대한 가장 지배적인 동인은 강수와 기온, 그리고 지표면에 도달하는 순 복사열량과 대기의 습도, 풍속 및 기온에 의해 결정되는 증발 수요 (evaporative demand)이다. 기온은 눈이 지배적인 하천 유역과 해안 지역에서 특히 중요한 인자이며, 후자는 해수면 표고에 미치는 기온의 영향 때문에 중요하다 (물의 열팽창으로 인한 해수면 상승). [WGII 3.3.1]

이들 물 수지의 여러 성분에 있어서의 전망된 변화들은 제2.3절에서 설명된 바 있다. 요약하면, 하천 유출량은 상당한 증가나 감소를 보일수도 있겠으나, 전 지구적으로 보면 육지 상의 연간 총 유출량은 증가할 것으로 추정되고 있다. 그러나, 증가되는 유출은 잉여수를 포집하여 저류할 수 있는 적절한 기반 시설을 갖추지 않으면 이용할 수가 없게 된다. 해양 지역에서는 “증발량에서 강수량을 뺀” 향으로 순 증가량이 전망된다.

3.2.1.1 지하수

기후변화는 지하수 함양률 (즉, 재생가능한 지하수 자원)과 지하수면의 깊이에 영향을 준다. 그러나, 지하수 함양과 지하수위에 대한 현재의 지식은 개발도상국이나 기 개발 국가 모두의 경우 충분하지 못하다. 즉, 지금까지 지하수나 지하수와 지표수의 상호작용에 미치는 미래 기후변화의 영향에 대한 연구는 대단히 부진하였다 할 수 있다. 고위도 지역에서의 영구 동토의 해동은 지표수간의 연계가 더 강화되기 때문에 지하수의 수위와 수질에 여러 가지 변화를 가져오게 된다. [WGII 15.4.1] 지하수가 지표수 쪽으로 이동할 뿐 아니라 지표수에 의해 함양되기 때문에 지표수 흐름 체계의 영향은 지하수에 여러 가지 영향을 미치며, 보다 잦은 대규모 강수 사상 발생은 토양의 침투능을 보다 자주 초과토록 하게 되어 증가된 강수의 변동성은 습윤 지역에서의 지하수 함양을 감소시킬 수 있다. 그러나, 반 건조 지역과 건조 지역에서는 고강도로 내리는 강수가 증발하기 전에 빨리 침투할 수 있고, 충격층 대수층이 홍수로 인한 범람에 의해 주로 함양되기 때문에 증가된 강수의 변동성은 지하수 함양을 촉진시킬 수 있다. [WGII 3.4.2]

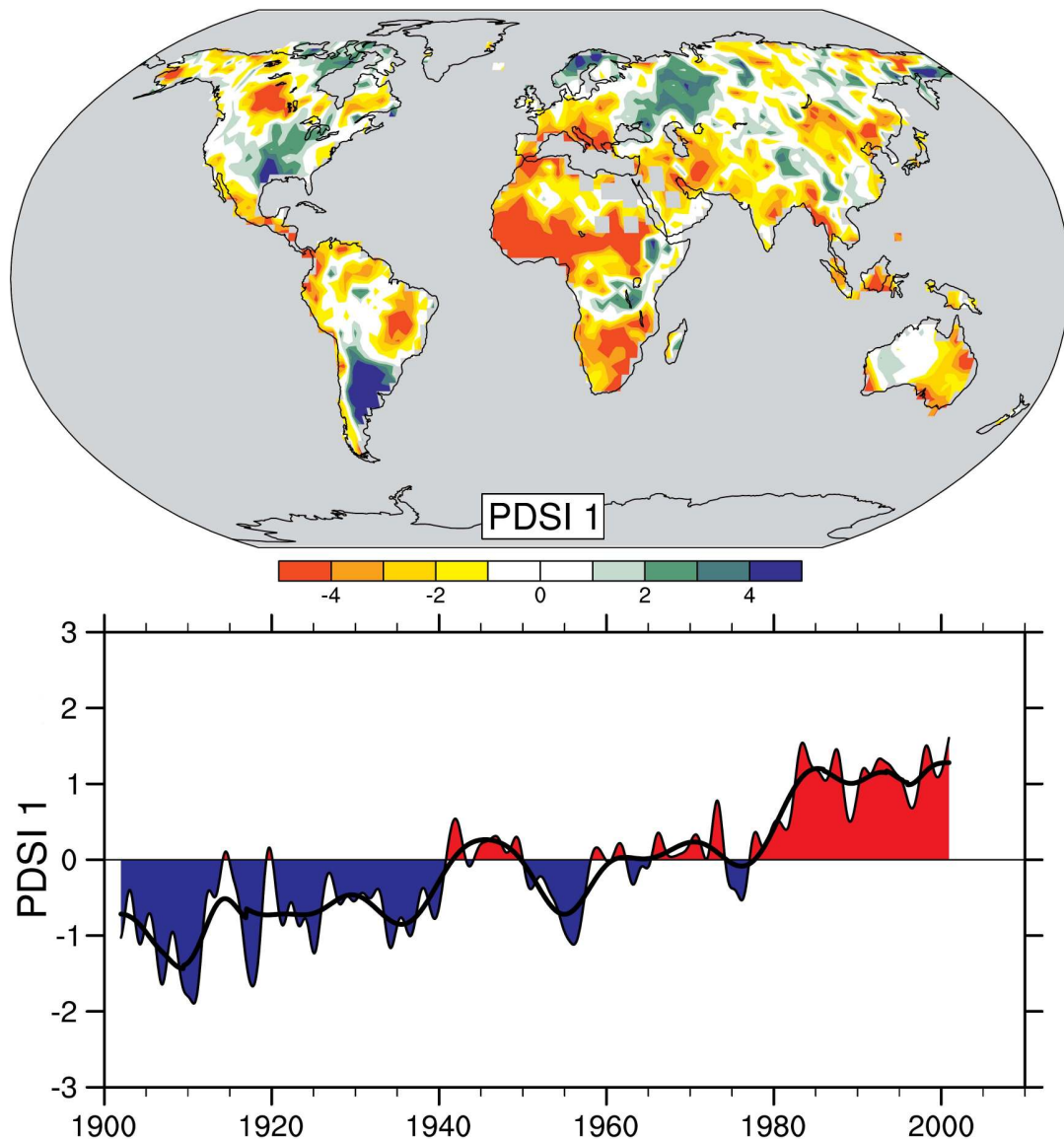


그림 3.1: 위의 그림은 1900-2002년의 Palmer 월 가뭄지수 (PDSI)의 가장 중요한 공간적 분포 패턴을 표시한다. PDSI⁽²⁾는 가뭄 정도를 표시하는 중요한 지표이며, 선형 강수량과 수문학적 수지 계산 시스템으로의 누적 대기 수분을 고려하여 지표면의 누적 수분 미흡량 (지역 평균값 기준)을 측정하는 것이다. 아래 그림은 1900년 이래 PDSI의 부호와 크기가 어떻게 변해왔는지를 보이고 있다. 아래 그림에 표시된 값이 양 (혹은 음)이면 위의 그림 (지도)에 적색과 오렌지 색깔로 표시된 곳은 더 건조 (혹은 더 습윤)하고, 청색이나 녹색으로 표시된 곳은 평균값보다 더 습윤 (혹은 더 건조)하다. 매끈하게 검은색으로 그린 곡선은 10년 이동 평균을 표시한다. 이 시계열은 전 지구 육지 지역에서의 1900-2002년 기간의 PDSI의 변동 경향을 개략적으로 표시하며 PDSI의 선형적 변동 성향의 약 67%를 설명해 준다. 위의 그림에서 보는 것처럼 사헬 (Sahel) 지역과 같은 아프리카 지역의 가뭄은 광범위한 영역에 걸쳐 증가되고 있으며, 북미 및 남미의 동부 지역과 북부 유라시아 지역은 더 습윤한 지역임을 알 수 있다.

12) 극 지역처럼 강수가 눈덮힘 (snow pack)위에 떨어지는 지역에서는 PDSI는 가뭄을 제대로 모델링하지 못한다.

전 지구적인 수문 모델에 의한 분석에 따르면 (그림 3.2 참조), 지하수 함양은 전 지구적인 평균으로 보면 총 유출량 보다는 덜 증가하는 것으로 보고되고 있다 (SRES A2 시나리오에 상응하는 ECHAM4 기후변화 모델에 의한 2050년대까지의 9%에 비해 2% 증가; Döll and Flörke, 2005). 조사된 4가지 기후변화 시나리오 (ECHAM4와 HadCM3 기후모델의 SRES A2 및 B2 시나리오¹³⁾)의 경우 지하수 함양량은 2050년대까지 브라질의 북동지역과 아프리카의 남서지역, 지중해의 남부지역 주변에서 70% 이상 감소할 것으로 계산되었다. 그러나, 이 연구에서는 일 강수량의 변동성 증가 예측이 고려되지 않아 지하수 함양량의 감소가 어느 정도 과대 산정되었을 수도 있다. 지하대수층의 두께가 증가하는 곳에서 지하수 함양량이 감소하는 곳에서는 지하대수층에 의존하는 습지는 위태롭게 되며, 건조한 계절 동안의 하천에서의 기저유출은 감소하게 된다. 지하수 함양량이 2050년대

까지 30% 이상 증가할 것으로 계산된 지역은 사헬 (Sahel) 지역과 근동 지역, 중국 북부지역, 시베리아와 미국 서부 지역 등이다. 지하수위가 이미 높은 지역에서는 지하수 함양량이 증가하면 토양의 염수화와 습윤화로 인해 도시지역과 농경지역에 각종 문제를 일으킬 수도 있다. [WGII 3.4.2]

개별 대수층에서의 지하수에 미치는 기후변화 영향에 관한 일부 연구들은 지점별 및 기후변화 모델별로 구체적인 결과를 제시하고 있다 (예를 들면, Eckhardt and Ulbrich, 2003의 중앙 유럽 지역의 저지대 산악지역 연구, Brouyere et al., 2004의 벨지움의 백악 대수층 연구 등). 예를 들면, Ogallala 대수층 지역에 대하여 전망된 자연 지하수 함양량은 기온이 2.5°C 혹은 그보다 크게 상승할 경우 모든 모델 모의에서 20% 이상 감소하는 것으로 보고되었다 (Rosenberg et al., 1999). [WGII

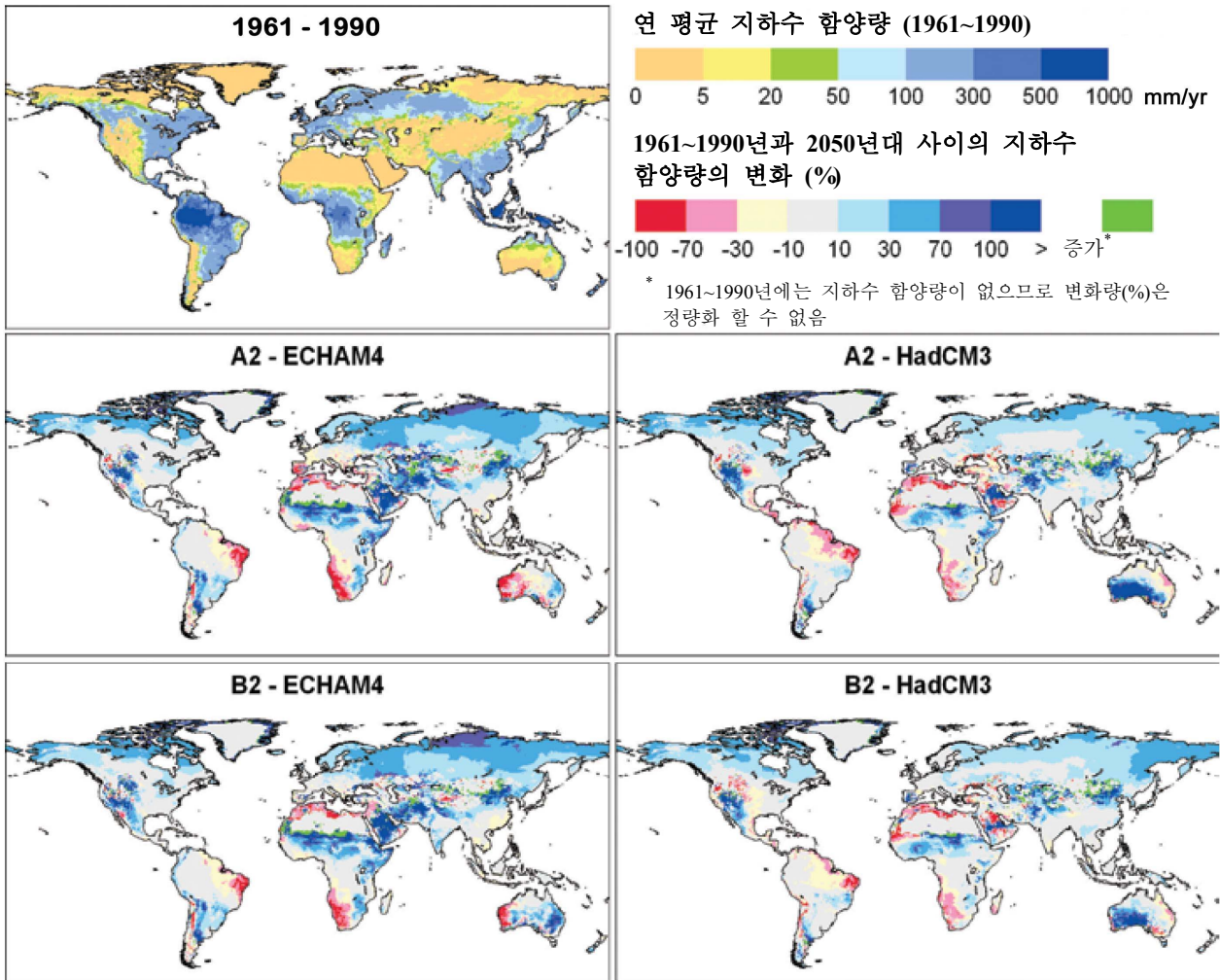


그림 3.2: 장기 연평균 지하수 함양량에 미치는 기후변화의 영향 모의. 현재 (1961~1990)와 2050년대 (2041~2070) 사이의 30년간 평균 지하수 함양량의 변화 (%). 4가지 기후변화 시나리오 (ECHAM4 및 HadCM3 기후 모델과 SRES A2 및 B2 배출 시나리오)를 적용하여 전 지구 수문 모델 WGHM에 의해 계산되었음.

13) 모델 설명에 대해서는 부록 I 참조

14.4] 기후변화의 결과로 세계 각지의 많은 대수층에서 봄철 지하수 함양이 겨울철 혹은 여름철 지하수 함양 쪽으로 전이하는 경향은 감소하고 있다. [WGII 3.4.2]

3.2.1.2 홍수

제2.3.1절에서 논의된 바와 같이 대규모 강수 사상은 21세기 기간 동안 대부분의 지역에서 보다 자주 발생할 것으로 추정되고 있으며, 이로 인해 돌발 홍수나 도시 홍수로 인한 피해 위험성은 증가하고 있다. [WGI 10.3.5, 10.3.6; WGII 3.4.3] 이들 홍수로 인한 잠재적인 각종 영향은 표 3.2에 요약되어 있다.

Palmer and Räisänen (2002)은 복합 모델 해석을 통해 중위도 지역에서의 호우와 관련된 강도높은 강수현상의 발생이 증가함에 따라 중부 및 북부 유럽 지역의 많은 곳에서 대단히 습윤한 겨울이 될 위험성이 크게 증가할 것으로 전망하였다. 정상치 (正常値) 보다 표준편차의 2 배를 초과하는 폭력으로 부터의 겨울 강수량의 발생 확률은 유럽의 여러 지역에서 CO₂ 농도가 2 배 증가할 경우 크게 증가할 것으로 전망되었으며, 이로 인한 겨울철 홍수 재해의 발생 가능성이 있을 것으로 보고 있다. 또한, 아시아 지역에서는 대단히 습윤한 몬순 계절의 위험성이

클 것으로 전망되었다 (Palmer and Räisänen, 2002). Milly et al. (2002)에 의하면 전 세계의 16개 대하천 유역에 대해 연구한 결과 15개 유역에서 CO₂ 농도가 4배가 될 경우 조절된 100년 빈도의 월 침투 하천유출 체적은 대단히 빈번하게 초과될 것으로 전망하고 있다. 일부 지역에서는 비록 전망의 불확실성이 크지만 현재의 100년 빈도 홍수량이 훨씬 더 자주 (매 2~5년 마다) 발생할 것으로 전망되고 있다. 또한, 많은 온난 지역에서는 봄철 홍수에 대한 용설의 영향은 감소할 가능성이 있는 것으로 보고되고 있다 (Zhang et al., 2005). [WGII 3.4.3]

기후 모델을 사용한 분석에 의하면 방글라데시에서의 침수 면적은 전 지구적인 기온이 2°C 상승하면 최소 23~29%가 증가할 것으로 전망되고 있다 (Mirza, 2003). [WGII 3.4.3]

빙하의 상층부 투수가능층 (fim)¹⁴⁾의 두께가 온난화로 인해 감소됨에 따라 녹은 물이 흘러서 유출량을 증가시키게 되어 빙하의 용해로 인해 흐르는 하천에서 큰 홍수가 발생할 수도 있다. [WGII 3.4.3]

영국에서의 장래 홍수 발생 빈도에 대한 전망에는 상당한 불확실성이 내제한다. 어떤 기후모델을 사용하느냐에 따라

표 3.2: 21세기 중반에서 후반까지의 전망을 기준으로 한 극한 강수 관련 일기와 기후 사상에 있어서의 각종 변화로 인해 발생 가능한 기후 변화 영향의 예. 여기서는 기후변화 적응 능력의 변화나 방어 수단의 동원이 고려되지 않았음. 표 3.2의 두 번째 칼럼의 가능성 추정은 첫 번째 칼럼에 적시된 현상과 관계가 있으며, 각종 현상의 발생 경향과 가능성의 방향은 기후변화에 대한 IPCC의 SRES 전망을 위한 것임. [WGI Table SPM-2; WGII Table SPM-2]

현상 ^{a)} 및 경향의 방향	SRES 시나리오를 사용한 21세기에 대한 전망을 기준으로 한 미래 경향의 가능성	부문별로 전망된 주요 영향의 예시			
		농업, 임업, 생태계 [4.4, 5.4]	수자원 [3.4]	인류의 보건 [8.2]	산업, 주거 및 사회 [7.4]
대규모 강수사상: 대부분의 지역에서 발생 빈도 증가	가능성 높음 (Very Likely)	곡물의 피해, 토양 침식, 토양 침수로 인한 재배효율 저하	지표수/지하수의 수질 악화, 용수공급의 문제, 물의 회소성은 작아질 가능성	사망하거나 다치거나 전염병, 호흡기 관련 질병, 피부병에 걸릴 위험성의 증가	홍수로 인한 주거와 상업, 교통 및 사회 활동의 저해, 사회 기반시설에 대한 압력, 재산피해
가뭄 영향 지역 증가	가능성 있음 (Likely)	토지의 황폐화, 작물 수확량 감소, 가축 폐사율 증가, 산불 위험성 증가	보다 광범위한 물 스트레스 지역 발생	식량과 물 부족 위험성 증가, 영양부족 위험성 증가, 수인성 및 식량 영향 전염병 증가 위험성	주거 및 산업을 위한 물 부족, 수력 발전 포텐셜 감소, 인구이동 포텐셜 감소
강한 열대성 사이클론 발생 증가	가능성 있음 (Likely)	곡물의 피해, 큰 나무의 뽑힘, 산호초의 피해	전력생산에 지장, 공공 용수공급에 장애 발생	사망하거나 다치거나 수인성 혹은 식량 영향 전염병의 발생 위험성 증가, 외상으로 인한 스트레스 위험성 증가	홍수와 강풍 피해, 개인 보험회사의 취약지역 보험가입 기피, 인구이동 포텐셜 감소, 재산피해

14) Fim: 빙하 얼음 (불투수성)이 되기 이전의 중간 단계에 있는 오래된 적설 (여전히 투수성 있음).

a) AR4 WGI의 Table 3.7 참조.

그리고 홍수에 미치는 용설 영향의 중요성과 유역 특성 및 위치 등에 따라 홍수의 크기와 발생 빈도에 미치는 기후 변화 영향은 긍정적일 수도 있고 부정적일 수도 있어서 홍수에 미치는 기후 변화 영향에는 상당한 불확실성이 있음이 보고된 바 있다 (Reynard et al., 2004). [WGII 3.4.3]

3.2.1.3 가뭄

가뭄에 의해 영향을 받는 지역은 앞으로 증가할 가능성이 있다. [WGI SPM] 여름철 동안 각 대륙의 중앙부가 건조해지는 경향이 있으며, 이로 인해 이들 지역에 가뭄의 발생 위험성이 더욱 커질 수 있다. [WGI 10.ES] 전 지구적인 가뭄 빈도에 대한 단일 모델 연구에서 SRES A2 시나리오를 적용하는 경우 2090년대까지 한때라도 극심한 가뭄을 겪게 되는 지표면의 구성비(%)와 극심 가뭄 사상의 발생 빈도, 그리고, 평균 가뭄 계속 기간

등은 각각 10~30배, 2배, 6배 정도 증가할 것으로 전망하였다 (Burke et al., 2006). [WGI 10.3.6; WGII 3.4.3] 증발수요를 증가시키는 기온상승으로 인해 유럽의 남부 및 중부 지역에서의 여름철 강수량의 감소는 여름철 토양 수분 감소(Douville et al., 2002; Christensen et al., 2007)와 더 큰 빈도와 심도의 가뭄을 불가피하게 발생시킬 것이다. [WGII 3.4.3] 그림 3.3에 나타내어 보인 바와 같이 2070년대까지는 현재 기준의 100년 빈도 가뭄¹⁶⁾이 스페인과 포르투갈의 여러 지역과 프랑스 서부 지역, 폴란드의 Vistula 유역, 터키 서부 지역 등에서 매 10년에 1회 이상 발생할 것으로 추정하고 있다 (Lehner et al., 2005). [WGII 3.4.3]

가뭄 발생 지역의 증가로 인한 영향은 표 3.2에 표시한 바 있다. 용설의 경우, 눈이 녹는 시기가 빨라지고 용설량은 감소할 것으로 전망되고 있으며, 이로 인해 여름과 가을 등 유출이 적은 계절에 용설에 의해 유지되는 하천

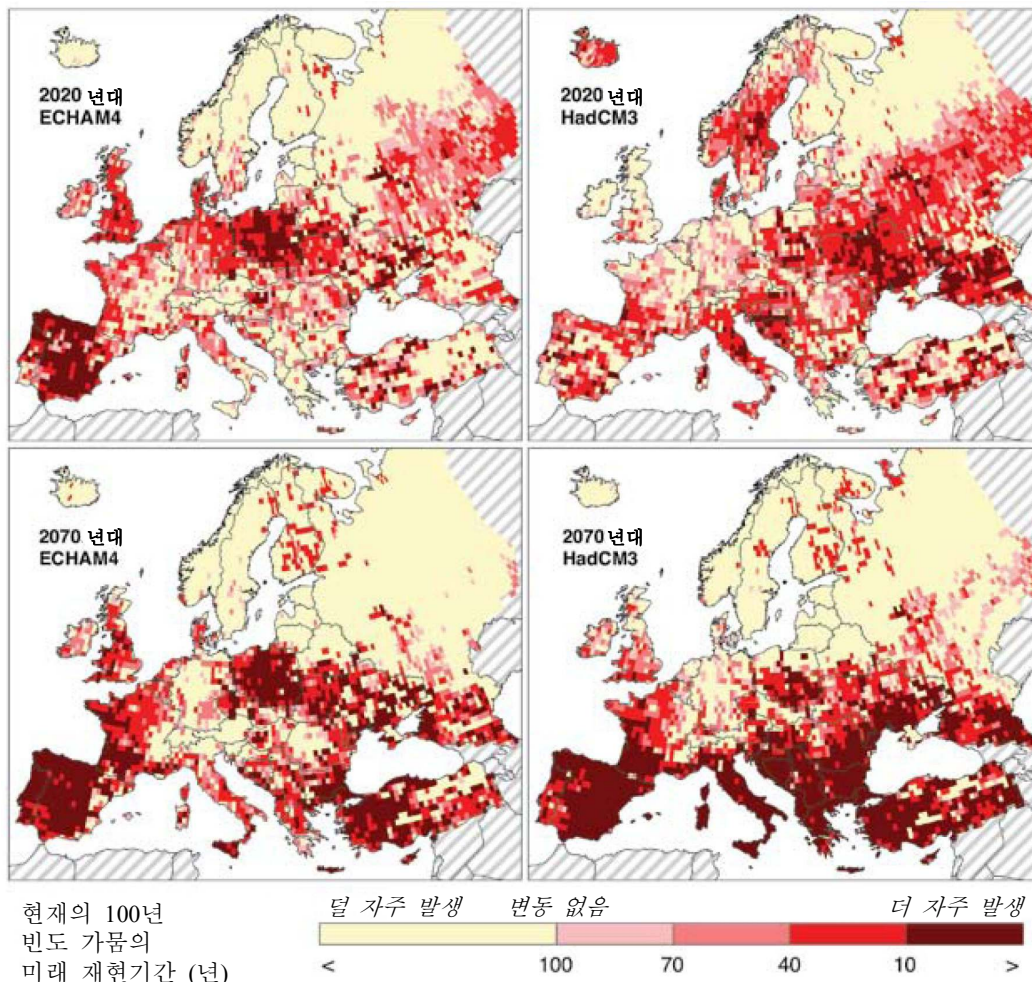


그림 3.3: 1961~1990년의 기후와 물 이용간의 비교를 기초로 한 100년 빈도 가뭄의 미래 재현 기간의 변화 (Lehner et al., 2005). [WGII Fig. 3.6]

16) 매년 100년 빈도 홍수가 초과될 확률은 1%, 반면에 매년 10년 빈도 홍수가 초과될 확률은 10%.

유역의 가뭄 발생 위험성이 증가될 수 있다. 가뭄 발생 위험성은 건조기간 동안의 용수공급을 빙하의 해빙수에 주로 의존하는 지역에서 더 커질 것이다 (Barnett et al., 2005). 안데스 산맥 지역에서는 빙하 해빙수 (glacial melt water)가 하천유량의 공급원이 되며 긴 건조기간 동안에는 수천만 명의 용수 공급원이 되기도 한다. 볼리비아와 에콰도르, 페루 등지의 수많은 소규모 빙하들은 (Ramirez et al., 2001; Box 5.5) 향후 수십 년 이내에 모두 없어질 것으로 예측되고 있다. 중국과 파키스탄, 인도의 수천만 명 인구들이 의존하고 있는 Hindu Kush 와 히말라야 산맥 지역으로부터 녹아내리는 빙하와 눈에 의한 용수 공급은 가뭄으로 인해 심각한 영향을 받을 것으로 보인다 (Barnett et al., 2005). [WGII 3.4.3]

3.2.1.4 수질

높은 수온과 강수 강도의 증가, 저수유출 (low flow) 지속 기간의 증가 등은 유사라든지, 영양 물질, 용존 유기 탄소물, 병원균, 농약, 소금, 열 오염 등을 포함하는 여러 가지 형태의 수질 오염을 더 악화시킬 것으로 전망되고 있다. 이와 같은 수질 오염은 적조현상 (algal bloom)을 촉진시키며 (Hall et al., 2002; Kumagai et al., 2003), 박테리아와 세균성 함량을 증가 (Environment Canada, 2001)시켜 생태계와 인간의 건강과 물 이용 시스템의 신뢰도와 운영 경비 등에 나쁜 영향을 미치게 된다. [WGII 3.ES]

수온이 상승하면 증가된 열 안정성(thermal stability)과 혼합 패턴의 변화로 인해 호수내의 수질은 나빠질 가능성이 있으며, 이로 인해 산소 농도는 감소하고 유사로부터 인의 방출량이 증가하게 된다. 예를 들면, 온타리오 호수의 연안에서 이미 크게 증가해 있는 여름 동안의 인의 농도는 3°C~4°C의 수온 증가로 약 2 배가 될 수 있는 것으로 보고되고 있다 (Nicholls, 1999). 그러나, 상승하는 수온은 과거보다 빨리 시작되는 해빙으로 인해 겨울과 봄의 수질을 개선해주며 그로 인해 용존 산소가 증가하여 겨울철 물고기 폐사가 줄어들게 된다. [WGII 4.4.8, 14.4.1]

보다 강한 강도의 강우는 하천의 토양 침식작용 (Leemans and Kleidon, 2002)으로 인한 호수와 저수지의 부유물질 농도(탁도, turbidity)를 증가시키게 되어 오염물질을 발생 시키게 된다(Mimikou et al., 2000; Neff et al., 2000; Bouraoui et al., 2004). 추정된 강수 강도의 증가는 병원균이나 농약과 같은 다른 용존 오염물질을 지표수와 지하수로 운반하는 것을 촉진시키고, 침식을 증가시켜 인이나 중금속과 같은 흡착성 오염물질을 이동시킴으로서 수질 악화를 가져올 것으로 예측하고 있다. 뿐만 아니라, 보다 자주 발생하는 대규모 호우 사상은 우수 배제 시스템과 정수처리 및 하수처리 시스템의 설계 용량을 보다 더 자주 초과시킬 것이다. [WGII 3.4.4] 하천 유량이 더욱 적어지면 오염 물질의 농도는 증가하고 만다. [WGII 3.4.4, 14.4.1] 여러 반 건조 지역에서와 같이 유출량이 전체적으로 감소하는 지역에서는 수질 악화가 더욱 더 심할 수밖에 없다.

반 건조 지역이나 건조 지역의 경우 기후변화는 증가 되는 증발산량으로 인해 천층 (淺層, shallow) 지하수의

염수화를 악화시킬 가능성이 있다. [WGII 3.4.2] 하천 유량은 여러 반 건조지역에서 감소할 것으로 전망되기 때문에 하천과 하구에서의 염도 (salinity)가 증가할 것이다. [WGII 3.4.4] 예를 들면, 호주의 Murray-Darling 강 유역의 수위부에서의 염도 수준은 2050년까지 약 13%~19% 정도 증가할 것으로 보고되고 있다 (Pittock, 2003). 일반적으로, 지하의 염분 이동을 감소시키는 지하수 함양의 감소는 하천과 하구에서의 감소된 염분 희석효과와 균형을 이룰 수 있다. [WGII 11.4]

해안 지역에서의 해수면 상승은 우수 및 하수 배제 시스템에 부정적인 영향을 가져올 것이며 [WGII 3.4.4], 해안 지하대수층에 있는 깨끗한 지하수에 염수가 침입할 잠재성을 증가시켜 전반적으로 지하수 자원에 부정적인 영향을 미치게 된다. [WGII 3.4.2] 인도의 해안으로부터 떨어져 있는 2개의 작고 평편한 산호섬에 대하여 담수 렌즈 (freshwater lenses)의 두께를 계산한 결과 0.1m의 해수면 상승이 있을 경우 각각 25m에서 10m로, 그리고 36m에서 28m로 감소하는 것으로 나타났다(Bobba et al., 2000). 해안 지역에서의 지하수 함양량의 감소는 해수면 상승 영향을 가속시키며, 내륙의 지하 대수층에서의 지하수 함양의 감소는 인접한 염수 대수층으로부터 염수 침입을 유발시킬 수 있다 (Chen et al., 2004). [WGII 3.4.2]

3.2.1.5 물에 의한 침식과 유사이동

토양 침식에 대한 여러 연구는 강수 강도가 증가하면 토양 침식률도 증가하는 것으로 예측하고 있다. [WGII 3.4.5] 뿐만 아니라, 겨울철 강수가 침식성이 상대적으로 약한 눈으로부터 겨울 기온의 상승에 따라 보다 침식성이 강한 강우로 바뀌게 되면 침식을 가속화시켜 농경 지역에서의 수질을 오염시킬 수 있다. [WGII 3.4.5, 14.4.1]

영구 동토의 용해는 완전히 동결된 상태에서는 침식이 일어나지 않았지만 토양 표면의 용해로 인해 토양은 침식 가능한 상태에 있게 된다. [WGII 3.4.5] 침식에 미치는 또 다른 간접적인 기후변화의 영향은 기후변화 및 관련 적응 대책 (adaptation actions)에 의해 야기된 토양과 식생의 변화와 관련이 있다. [WGII 3.4.5] 유사 이동에 미치는 기후변화의 영향에 대한 연구 결과는 거의 찾아보기 힘들지만 몇몇 연구들은 특히 유출이 증가하는 지역에서의 증가되는 침식으로 인해 유사 이동도 활발해지는 것으로 주장하고 있다. [WGII 3.4.5]

3.2.2 미래의 담수 시스템에 영향을 미치는 비기후적 동인

여러 가지 비 기후적 동인 (non-climatic drivers)이 전 지구 규모로 담수 자원에 영향을 미친다(UN, 2003). 수자원의 양과 질 모두 비 기후적 동인에 속하는 토지 이용 변화라든지, 저수지의 건설 및 관리, 오염 물질의 배출과 정수 및 폐수처리 등에 의해 영향을 받는다. 물 이용은 인구의 변화, 식량의 소비, 용수의 가격을 포함하는 수경제, 기술, 생활 양식과 담수 생태계의 가치에 대한 사회적 인식 등에 의해 좌우된다. 기후 변화에 대한 담수 시스템의 취약성은 국가 차원 및 국제적 차원의 물 관리에도 관계가 깊다. “통합 수자원 관리 (Integrated Water Resources Management, IWRM)¹⁷⁾의

17) 물 관리에 관해 최근에 받아들여지고 있는 개념. IWRM은 1992년 Dublin에서 개최된 International Conference on Water and Environment에서 제안된 4가지 원칙에 기초하고 있다. (1) 담수는 유한하고 취약한 자원이며, 생명 유지를 위해 필수적이며, 개발과 환경 보전을 위해서도 필수적이다. (2) 물의 개발과 관리는 각급의 물 사용자와 계획자, 정책 결정자들이 함께 참여하여 해결하는 접근 방법에 기초하여야 한다.

패러다임은 전 세계에 걸쳐 점점 확대될 것으로 예상되며(UN, 2002; World Bank, 2004a; World Water Council, 2006), 이러한 움직임은 정책 결정에 있어서 자원과 생태계 둘 다를 고려하는 물 관련 문제의 핵심을 설정하는 역할을 한다고 볼 수 있으며, 이로 인해 기후변화에 따른 담수 시스템의 취약성은 감소될 가능성이 있는 것이다. 환경 유량의 수요를 고려해 주기 위해서는 저수지의 운영방법을 개선해야 할 필요가 있으며, 이를 위해서는 인간에 의한 수자원 이용이 제한되어야 할 경우도 있을 것이다. [WGII 3.3.2]

3.2.3 미래의 담수 가용량에 미치는 기후변화의 영향

용수 공급 측면에서 보면 기후변화에 따른 비용은 전 지구적으로 볼 때 편익보다 클 가능성이 높다. 이에 대한 1가지 이유는 제2.1.6절과 2.3.1절에서 언급한 바와 같이 강수의 변동성이 계속 증가할 가능성이 높고, 홍수와 가뭄이 보다 자주 발생할 것으로 예상된다. 제3.2.1절에서 살펴본 바와 같이 용설에 의해 유량이 공급되는 하천 유역에서 저수(低水) 기간 동안 발생하는 가뭄의 위험성은 증가할 것이다. 홍수와 가뭄의 영향은 적절한 기반 시설 투자와 물과 토지 이용의 관리에 적절한 변화를 줌으로써 완화시킬 수 있을 것이나, 이들 수단을 실행에 옮기기 위해서는 상당한 비용의 지출이 요구된다 (US Global Change Research Program, 2000). 물 관련 기반시설이라든지 이들 시설의 이용 행태, 관리 조직들은 현재의 조건에 맞게 개발되어 있으므로 홍수나 가뭄의 빈도나 수량과 수질, 그리고, 계절적인 물의 이용 가능량 등이 기후 변화로 인해 상당한 규모로 변화하게 될 것이다. 따라서, 현재 조건의 각종 조정이 필요하게 되어 화폐가치로 뿐만 아니라 사회적 및 생태적 영향의 관점에서 많은 비용을 치러야 할 것이다. 또한 이해관계가 다른 물 관련 그룹 사이에 있을 수도 있는 잠재적 갈등도 관리할 필요가 있게 된다 (Miller et al., 1997). [WGII 3.5]

기후변화로 인한 수문학적 변화는 어떤 측면에서는 긍정적이거나, 또 다른 측면에서는 부정적일 수도 있다. 예를 들면, 증가되는 연 유출량은 재생 가능한 수자원의 양을 증가시킴으로서 다양한 하천 내 및 하천 밖의 물 이용자들에게 각종 편익을 제공할 수 있을 것이나, 동시에 홍수 위험을 증가시킴으로서 피해를 발생시킬 수도 있다. 최근 수십 년 동안 남미의 남부 일부 지역에서는 습윤 조건이 심화되는 경향이 있어서 홍수로 인한 침수 지역이 증가해 왔으나, 아르헨티나의 Pampas 지역에서는 농작물 생산량이 증가하였고, 또한 새로운 상업 어로 (commercial fishing)의 기회가 증진되었다 (Magrin et al., 2005). [WGII 13.2.4] 증가된 유출은 또한 천층 지하수위가 형성되는 지역에 피해를 입힐 수도 있다. 이러한 지역에서는 지하수위 상승이 영농에 지장을 주게 되며, 도시 지역에서의 건물에 손상을 끼칠 수도 있다. 예를 들면, 러시아에서는 얕은 지하수위로 인한 현재의 연간 피해액은 약 50억~60억불에 달하는 것으로 보고되고 있으며 (Kharkina, 2004), 장래에는 피해가 더 증가할 가능성이 있다. 또한, 연유출량의 증가는 만약 추가적인 유출이 고수유량 기간 동안에 집중될 경우에는 유익한 가용 수자원의 확보에 도움이 되지 않을 수도 있다. [WGII 3.5]

증가된 강수강도는 하천내의 탁도 증가와 영양물질 및 병원균 부하량의 증가를 가져올 수도 있다. 뉴욕시를 위한 물 공급 시설의 운영에서 큰 강수사상은 뉴욕시의 주요 저수지 일부에서 저수의 탁도를 취수구 입구에서의 법적 탁도 한계치보다 약 100배까지 증가시켜 상당히 많은 추가적인 처리 및 모니터링 비용의 지출을 가져오고 있는 것으로 보고되고 있다 (Miller and Yates, 2006). [WGII 3.5.1]

3.2.4 미래의 담수 수요량에 미치는 기후변화의 영향

기온이 상승하고 강수의 변동성이 증가하면 성수기(盛水期, growing season)동안 총 강수량이 그대로 동일하더라도 관개용수 수요는 일반적으로 증가하게 된다. 농작물의 최적 성장 기간과 최대 수확을 위한 관개용수 사용에 미치는 기후변화의 영향은 관개지역의 면적이거나 기후 변동성에 변화가 없다는 전제 하에 모델화하여 연구된바 있다 (Döll, 2002; Döll et al., 2003). IPCC의 SRES A2와 B2 시나리오를 적용하여 분석한 결과, 전 세계적으로 관개면적이 가장 큰 중국과 인도에서의 순 관개 수요는 2020년도까지 온실가스 배출 시나리오와 사용되는 기후모델의 종류에 따라 중국의 경우는 +2%~+15% 만큼 변화하고, 인도의 경우는 -6%~+5% 정도 변화될 것으로 보고되고 있다 (Döll, 2002; Döll et al., 2003). 기후 모델의 종류에 따라 전 세계적인 순 관개 수요의 변화를 다르게 추정하고 있는데 2020년대까지는 1%~3% 정도 증가하고, 2070년까지는 2%~7% 증가하는 것으로 전망하고 있다. 순 관개 수요에 있어서의 전 지구 규모의 최대 증가는 B2 온실가스 배출 시나리오에 따른 기후 모델 모의에 의한 결과이다. [WGII 3.5.1]

미국 일리노이주에서 이익 극대화 조건 (profit-maximizing condition)하에서의 옥수수 밭 관개에 관한 연구에서 연 강수량의 25% 감소는 일강수량의 표준편차가 2 배될 때의 15% 연 강수량의 감소와 동일한 효과를 가지는 것으로 보고되고 있다 (Eheart and Tornil, 1999). 이 연구는 이익 극대화를 목표로 하는 관개용수는 수확량 극대화를 목표로 하는 관개용수보다 강수량의 변화에 보다 밀접하게 반응하며, 대기 중의 CO₂가 배가 되더라도 그 영향은 크지 않음을 설명해 주고 있다. [WGII 3.5.1]

기후변화로 인한 가정용수와 공업용수 수요의 증가는 거의 미미할 가능성이 있다. 예를 들면, 선별된 몇몇 지점에서 2050년대까지는 약 5% 이하의 수요 증가가 있을 것으로 보고 있다 (Mote et al., 1999; Downing et al., 2003). 사소하지만 1가지 간접적인 부차적 기후변화 영향으로 건물의 냉방을 위한 전력수요의 증가를 들 수 있으며, 이를 위해서는 화력 발전소의 냉각수 공급을 위한 물 수요의 증가를 초래하게 될 것이다. 미국 뉴욕시에서의 물 사용량 자료의 통계 분석에 의하면 일평균 기온이 25°C 이상 되는 날의 인구 1인당 물 사용량은 기온 1°C 증가에 따라 약 11리터의 물이 추가로 사용되는 것으로 (현재의 인구 1인당 1일 물 사용량의 약 2%) 보고되고 있다 (Protopapas et al., 2000). [WGII 3.5.1]

3.2.5 미래의 물 스트레스에 미치는 기후변화의 영향

물 스트레스 (water stress)를 가지는 지역에 살고 있는

(3) 물을 획득하고, 관리하고, 보전함에 있어서는 여성이 중추적인 역할을 하여야 한다. (4) 물은 경쟁 관계에 있는 모든 목적의 물 사용에 있어서 경제적인 가치를 가지며, 따라서, 물은 경제재로 인식되어야 한다.

인구수에 대한 전 지구적 추산은 연구에 따라 상당히 많이 다르다 (Vörösmarty et al., 2000; Alcamo et al., 2003a, b, 2007; Oki et al., 2003; Arnell, 2004). 아무튼, 기후 변화는 장차의 물 스트레스에 영향을 미치게 될 많은 요인들 중 하나일 뿐이다. 인구라든지 사회·경제적 및 기술적 측면에서의 변화가 시간적 및 공간적 차원에서 물 스트레스와 관련하여 가장 중요한 역할을 할 것으로 보고 있다. 2050년대에는 IPCC SRES의 4가지 시나리오에서의 인구 추정치의 차이가 기후변화 시나리오의 차이보다 물 스트레스를 받고 있는 하천 유역에 살고 있는 인구수에 더 큰 영향을 미칠 것으로 보고 있다 (Arnell, 2004). 물 스트레스를 받는 하천 유역에 사는 인구수는 표3.3에서 보는 바와 같이 상당히 늘어날 것이다. 2050년대 이후 물 스트레스를 받으며 사는 인구수의 변화는 채택되는 SRES의 시나리오에 따라 크게 좌우된다. SRES A2 시나리오 하에서는 상당한 증가가 예상되는 반면, 시나리오 A1와 B1의 경우는 전 지구적인 재생 가능 담수 자원의 증가와 약간의 인구 감소 때문에 물 스트레스를 받고 사는 인구수의 증가율을 약간 감소할 것으로 전망되고 있다 (Oki and Kanai, 2006). 인구 1인당 물 가용량 지표를 사용하면 기후변화는 전 지구 차원의 물 스트레스를 전반적으로 감소시킬 것으로 보이며, 이는 유출량의 증가가 세계에서 인구가 가장 많은 아시아의 동부와 남동부 지역에 크게 집중되어 있기 때문이다. 그러나, 이들 유출량의 증가가 고수유량이 발생하는 기간 동안에 주로 발생하기 때문에 (Arnell, 2004) 초과유량을 저류하여 저장해두지 않으면 건조 기간 동안의 물 문제 해결이 어려워져 지역에 따라서는 물 스트레스의 해소가 용이하지 않을 수도 있다. 극한 수문사상의 계절적 발생 특성과 증가하는 발생 확률의 변화는 증가하는 연 가용 담수 자원의 양과 인구변화의 영향을 상쇄할 수도 있다. [WGII 3.5.1]

만약 물 스트레스가 인구와 기후변화의 함수뿐만 아니라 변화하는 물 이용의 함수로 평가된다면, 비기후적인 동인 (가계 수입, 물 이용 효율, 물의 생산성 및 산업 생산성 등)의 중요성은 증가할 것이다 (Alcamo et al., 2007). 가계 수입의 증가는 물 이용과 물 스트레스를 증가시키는데 있어서 인구 증가보다 더 큰 영향을 주게 될 수도 있다. 2개의 기후 모델과 SRES의 시나리오 A2와

표 3.3: 인구 팽창과 기후변화가 물 스트레스를 받고 있는 하천 유역에 살고 있는 인구수에 미치는 영향 (2050년경). [WGII Table 3.2]

추정 연도 및 배출 시나리오	2050년에 물 스트레스를 받는 하천 유역의 인구 추정치 (10억명)	
	Arnell (2004)	Alcamo et al. (2007)
1995년: 기준년	1.4	1.6
2050년: A2배출 시나리오	4.4-5.7	6.4-6.9
2050년: B2배출 시나리오	2.8-4.0	4.9-5.2

- (주)
- 1: “물 스트레스를 받고 있는 하천 유역”은 인구 1인당 연간 확보 가능한 재생 가능 수자원량이 1,000m³ 이하인 하천 유역.
 - 2: 표의 추정치는 각종 온실가스 배출 시나리오와 여러 가지 기후 모델을 사용하여 계산된 것이며, 이로 인해 추정 인구수는 범위 (range)를 가지는 것으로 나타났음.

B2를 사용할 경우 2050년대까지 물 스트레스는 전 지구의 육지 지역의 20~29%에서는 감소하고, 62~76%에서는 증가하는 것으로 모의되었다. 증가되는 강수량으로 인한 물 가용량의 증가는 물 스트레스 감소의 주요 원인이 되는 반면, 증가하는 취수량은 물 스트레스를 가중시키는 주요 원인이 된다. 수입의 증가로 인한 가정 용수 사용량의 증가는 크지 않고 거의 무시할 정도인 것으로 밝혀졌다 (Alcamo et al., 2007). [WGII 3.5.1]

3.2.6 담수의 비용과 기타 사회·경제적 측면에 미치는 기후변화의 영향

취수가 가능한 물의 양은 유출량과 지하수 함양량, 대수층의 여러 가지 조건 (두께, 깊이, 경계조건 등), 수질, 용수 공급용 기반시설 (저수지, 양수정, 물 배분 네트워크 등) 등의 함수이다. 음용수의 안전한 채수는 유출의 양보다는 용수공급용 기반시설의 수준에 의해 더 좌우된다. 그러나, 음용수를 안전하게 확보하기 위한 목표는 기후 변화로 인해 지표수 유출과 지하수 함양량이 감소하는 지역에서는 달성하기가 더 어려워질 것이다. 뿐만 아니라, 기후변화는 용수공급용 기반시설에 영향을 주는 수위의 변동 때문에 용수공급 부문에 추가적인 비용을 초래할 것이고, 이로 인해 보다 많은 사람들에게 용수공급 서비스를 확대하는데 어려움을 줄 것이다. 따라서, 이와 같은 사실로 인해 기후변화의 결과 때문에 물 스트레스가 크게 증가한 지역에서는 사회·경제적 영향과 그에 따른 비용이 훨씬 더 커질 것이다. [WGII 3.5.1]

기후변화로 인한 계절 유출 체계와 경년 유출 변동성의 변화는 장기간에 걸친 평균 연유출량의 변화만큼 물 가용량의 규모에 아주 중요한 영향을 미친다 (US Global Change Research Program, 2000). 겨울철에 적설량이 감소하면서 눈이 녹아 유출이 형성되는 하천 유역에 사는 사람들은 여름과 가을철에 감소된 하천 유량에 의해 부정적인 영향을 받을 수가 있다 (Barnett et al., 2005). 예를 들면, 독일의 라인강에서는 2050년대까지 여름철 저수유량이 약 5%~12% 정도 감소할 것이며, 이로 인해 용수공급, 특히 화력 발전소의 냉각용수 공급에 부정적인 영향을 미치게 될 것이다 (Middelkoop et al., 2001). 엘베강 유역에 대한 연구는 실제 증발산량이 2050년까지 증가하는 것으로 추정되고 있으며, 하천 유량과 지하수 함양량, 농작물 수확량, 그리고 확산형 오염 부하량 등은 감소할 가능성이 있는 것으로 밝히고 있다 (Krysanova et al., 2005). [WGII 3.5.1]

중국의 서부 지역에서는 더 빨라진 봄철 용설과 빙하의 해빙으로 관개 영농을 위한 물 가용량이 감소될 가능성이 있다. 기후변화에 대비하여 신뢰성 있는 용수공급을 보장하는데 필요한 추가적인 우물과 저수지를 위한 시설 투자 및 운영비를 중국 전역에 대하여 산정해 본 결과 현재의 물 스트레스가 낮은 지역 (예: Changjiang)에서는 비용 역시 작고, 물 스트레스가 높은 지역 (예: Huanghe River)에서는 비용이 큰 것으로 나타났다 (Kirshen et al., 2005a). 더 나아가, 앞으로 기후변화가 더 심해질 뿐 아니라 용수수요가 증가할 것이기 때문에 용수공급에 소요되는 비용에 미치는 기후변화의 영향은 미래에는 더 커질 것이다. [WGII 3.5.1]

텍사스에 있는 한 지하 대수층의 경우 감소되는 관개 용수 공급과 증가되는 관개용수 수요로 인하여 농민들의 순 수입이 2030년대까지는 16~30%, 2090년대까지는 30~45% 정도 감소할 것으로 추정하고 있다. 도시 및 공업

용수가 지배적인 물 이용인 경우 순 편익은 동일 기간 동안 2% 이하의 감소를 보일 것으로 추정하였다 (Chen et al., 2001). [WGII 3.5.1]

만약, 기후변화로 인해 담수공급이 해수를 담수화한 물로 대체해야만 할 경우 기후변화로 인한 비용은 평균적인 담수화 비용이 될 것이며, 현재의 해수 담수화 비용은 US\$1.00/m³ 이고, 반염수 (잡용수, brackish water)의 담수화 비용은 US\$0.60/m³ 정도이며 (Zhou and Tol, 2005), 담수의 염소 소독에 드는 비용은 약 US\$0.02/m³이다. 이집트나 중국, 방글라데시, 인도, 아시아 남동부 지역의 인구 밀도가 아주 높은 해안 지역에서는 담수화 비용은 감당하지 못할 정도로 높다. 이들 지역 중 특히 이집트에서는 담수화 비용을 줄이기 위해 새로운 담수화 기술 개발을 위한 연구가 꼭 필요하며, 특히 온실가스 배출을 크게 감소시킬 수 있도록 지금까지의 전통적인 에너지를 사용하는 것이 아니라 대체 에너지의 사용을 고려해야 할 것이다. 추가로 언급하면, 반염수의 담수화는 이러한 사업의 경제성을 크게 개선하게 될 것이다 (제4.4.4 절 참조). [WGII 3.5.1]

앞으로의 홍수 피해는 정주 (定住) 패턴이나 토지이용 계획, 홍수 예보 및 경보와 재난 대응 시스템의 질, 그리고 취약지역에 설치되어 있는 구조물과 기타 자산의 가치 등에 의해 크게 좌우될 것이며 (Mileti, 1999; Pielke and Downton, 2000; Changnon, 2005), 또한 열대 사이클론의 발생 빈도의 변화와 같은 기후변화에도 영향을 받게 될 것이다 (Schriermeier, 2006). [WGII 3.5.2]

홍수 피해에 미치는 기후변화 영향은 피해 현장에서의 수위-유량 관계 자료와 재산 집적 현황 자료를 사용하여 결정한 현재 상태에서의 홍수사상으로부터 산정한 홍수 피해와 연계하여 현재의 재현기간 20년, 혹은 100년 등의 홍수에 상응하는 기후변화를 고려한 재현기간을 모델에 의해 추정된 값을 근거로 하여 추정할 수 있다. 이와 같은 방법으로 호주의 3개 하천유역에 대하여 추정할 연평균 직접 홍수 피해액은 CO₂ 농도가 2배로 늘어날 때 현재보다 4~10배 정도 늘어날 것으로 전망하였다 (Schreider et al., 2000) [WGII 3.5.2]

Choi and Fisher (2003)는 2 가지 기후변화 시나리오에 대하여 미국 내에 선정된 몇 개 지역에서의 홍수 피해의 예상되는 변화를 산정하였다. 이 산정에서는 연평균 강수량이 각각 13.5%와 21.5% 정도 증가하고 표준편차는 변화하지 않거나 평균 강수량에 비례하여 증가하는 것으로 가정하였다. 홍수 피해와 인구에 대한 시계열 자료와 재산 지표 (wealth indicator) 및 연강수량을 예측자 (predictors)로 하는 구조적 수리 경제 모델 (structural econometric model)을 사용하여 분석한 결과 만약 연강수량의 평균과 표준편차가 13.5% 만큼 증가하면 홍수 피해의 평균과 표준편차는 140% 이상 증가할 것으로 산정하였다. 이 산정치는 인구와 재산 지표를 포함하는 모델의 해석력은 82% 정도 이고, 강수량의 증가를 분석에 추가하면 모델의 해석력은 89% 정도가 되므로 홍수 피해는 사회 기반 시설의 부족으로 인해서 자연 재해 위험에 사람들이 노출되기 때문에 주로 발생하는 것임을 암시하고 있다. [WGII 3.5.2]

다른 한 연구에서는 미국 북동부 지역에 위치한 보스턴 광역권에 대하여 Canadian Climate Center 모델과 IS92a 시나리오를 사용하여 극한 강수 사상의 변화로 인한 잠재적인 홍수피해가 분석되었다 (Kirshen et al., 2005b).

이 연구에서는 기후변화에 적응하기 위한 투자가 없으면 기후변화가 없을 경우에 예상되는 피해와 비교할 때 홍수로 인해 피해를 받는 자산의 규모나 전반적인 홍수 피해손실은 2100년까지 약 2배가 될 것으로 전망되었으며, 또한 홍수와 관련된 교통장에는 금세기 동안 점점 커져서 골칫거리가 될 것으로 분석되었다. 이 연구는 이들 홍수로 인해 발생 가능한 경제적 손실의 규모는 홍수터에 전반적인 내 홍수 (flood-proofing) 대책을 강구하는 등의 기후변화에 대한 적응전략에 광범위한 지출을 충분히 타당화시킬 수 있다고 결론짓고 있다. [WGII 3.5.2]

이와 같은 사실은 SRES에서 제시된 체계에서의 사회·경제적 변화의 4가지 시나리오와 4가지 온실가스 배출 시나리오와 연계하여 2080년대에 영국과 웨일즈 지역에서의 하천과 해안 지역 홍수 범람으로 인한 피해에 대한 시나리오 연구에 의해서도 확인되고 있다. 모든 시나리오의 경우, 현재의 홍수 관리 정책이나 실무 및 기반 시설이 변화되지 않는 한 홍수 피해는 계속 증가할 것으로 전망되었다. 2080년대까지는 연간 홍수 피해는 현재의 10억 파운드와 비교할 때 시나리오 B1의 경우 50억 파운드가 될 것으로 전망되는 반면에, 동일 규모의 기후변화가 발생한다고 가정할 때, B2 시나리오의 기후변화 조건에서는 연간 홍수 피해가 약 15억 파운드가 될 것으로 전망되었다. 총 국내 생산으로 이들 홍수 피해액을 표준화하면 B1 및 B2 시나리오 둘 다 거의 비슷한 결과를 준다. A1 시나리오의 경우 연 홍수 피해액은 2050년대까지는 150억 파운드에 달할 것이고, 2080년대까지는 210억 파운드가 될 것으로 보고 있다 (Evans et al., 2004; Hall et al., 2005). [WGII 3.5.2]

장래에 예상되는 증가하는 홍수기간은 주운에 더 많은 지장을 주게 될 것이고, 선박의 하역을 제한하게 되는 저유량 조건도 더 심해질 것이다. 예를 들면, 라인강에서의 하역 제한 기간은 현재의 기후 조건 아래에서는 약 19일이나 2050년대에는 26일~34일로 증가할 것으로 보고 있다 (Middelkoop et al., 2001). [WGII 3.5.1]

기후변화는 하천의 유출량 (discharge)에 변화를 가져오게 되어, 하천 내에서의 물 사용, 특히 수력 발전 등을 위한 물 가용량에 중요한 영향을 미치게 된다. 유럽 지역에 대하여 대권역 수문 모델을 사용하여 기후변화가 수력발전에 미치는 영향을 평가해본 적이 있다. 이 평가의 결과를 보면, 2070년대까지는 20세기 말의 기존 수력 발전소의 잠재 발전량은 IS92a 배출 시나리오를 가정할 경우 현재의 수력발전이 차지하는 비중이 스칸디나비아 및 러시아 북부지역에서의 현 19% (핀란드)와 100% (노르웨이)에서 평균 15~30%로 증가할 것이고 (Lehner et al., 2005), 포르투갈, 스페인, 우크라이나, 불가리아 등에서는 현재의 수력발전 비율이 10% (우크라이나, 불가리아) 내지 39%이지만 2070년대에는 현재의 약 20%~50% 이상이 감소할 것으로 보고 있다 (Lehner et al., 2005). 유럽 지역 전체의 경우, 현재의 평균 수력발전 비율 20%에서 2070년대에는 7~12%로 감소할 것으로 전망되고 있다. [WGII 3.5.1]

북미지역 5대호 (Great Lakes)로부터의 유출량의 잠재적 감소에 따른 나이아가라와 St. Lawrence 강에서의 수력발전량의 감소는 상당한 경제적 손실을 초래할 수 있을 것으로 보고 있다 (Lofgren et al., 2002). 지구 온난화로 2°C가 상승하는 경우에 대하여 CGCM1 모델로 추정된 결과에 의하면 온타리오의 나이아가라와 St. Lawrence 강으로 부터의 수력 발전량은 25~35% 만큼 감소하게

될 것이며, 이로 인한 연간 경제적 손실은 2002년도 가격으로 약 2.4~3.5억 캐나다 달러에 달할 것으로 보고 있다 (Buttle et al., 2004). 반면에 HadCM2¹⁸⁾ 기후모델 (부록 I 참조)을 적용하여 분석한 결과에 의하면 연간 약 2,500만 캐나다 달러에 상응하는 약간의 수력 포텐셜 증가(+3%)가 있는 것으로 나타났다. 또한, 여러 가지 기후 모델 시나리오를 사용하여 분석한 한 연구에서는 2°C의 기온 상승은 St. Lawrence 강에서의 수력발전 용량을 1~17% 정도 감소시킬 수 있을 것으로 판단하고 있다 (LOSLR, 2006). [WGII 3.5.1]

3.2.7 기후변화에 대단히 취약한 담수 지역과 부문

지구상의 많은 지역에서 담수 자원에 미치는 기후변화 영향은 지속가능한 개발에 영향을 미칠 수 있으며 가난과 아동 사망자수의 감소를 위협할 수 있다. 최적 물 관리를 한다하더라도 지속가능한 개발에 미치는 기후변화의 부정적 영향은 피하기 어려울 것이라는 사실은 높은 가능성을 가진다. 그림 3.4는 담수 관련 기후변화 영향의 대표적인 사례를 표시하고 있다. 지속가능한 수자원 개발은 일반적으로 통합 수자원 관리 (Integrated Water Resources Management, IWRM; Footnote 17 참조)에 의해

달성될 수 있는 것으로 보고 있다. 그러나, “통합 수자원 관리”라는 용어에 대한 해석에는 여러 가지가 있어서 한마디로 정의할 수는 없으나, 모든 유사한 정의에는 자연 환경을 유지하고 개선하는 개념이 광범위하게 포함되어 있다. 특히, 경쟁 관계에 있는 여러 물 사용자와 담수역 내의 생태계 및 습지를 전부 고려한 물 환경을 잘 유지하고 개선한다는 개념이 그 바탕이 되고 있다. 또한, IWRM은 토지 관리에 대한 물 관리 정책의 의미와 같은 물 관리 정책의 환경적 의미를 폭넓게 고려할 뿐 아니라, 거꾸로, 물 환경에 대한 토지관리 정책의 의미도 고려하게 된다. 물 거버넌스 (water governance)는 광범위한 정치적, 사회·경제적 및 행정적 시스템을 위한 지속 가능한 수자원 관리 목표 달성을 위한 물 관리에 가장 중요한 구성요소 중의 하나이다 (GWP, 2002; Eakin and Lemos, 2006). [WGII 3.7]

3.2.8 담수 시스템에 미치는 기후변화 영향에 대한 전망의 불확실성

수자원에 미치는 기후변화 영향의 불확실성은 주로 강수 입력에 있어서의 불확실성으로 인한 것이며, 부차적으로 온실가스 배출의 불확실성 (Döll et al., 2003; Arnell, 2004),

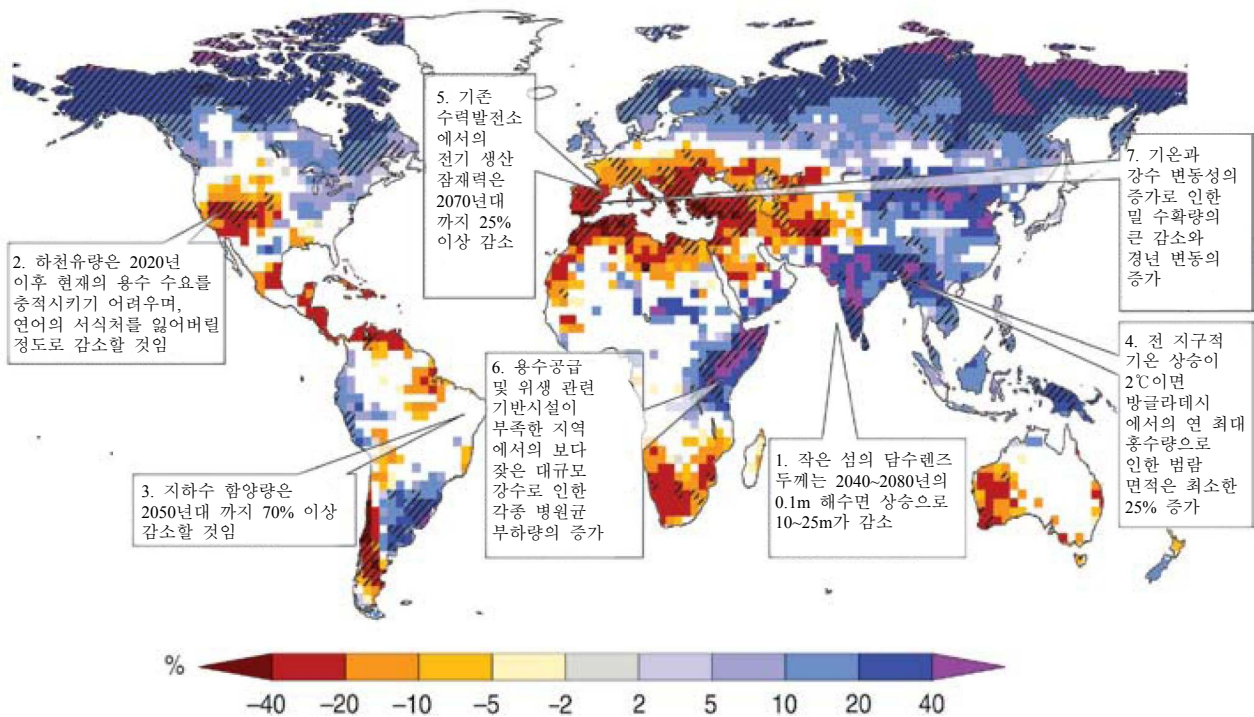


그림 3.4: 기후변화 영향을 받는 지역의 지속가능한 개발을 위협하는 담수와 관련된 미래 영향을 예시하는 지도: 1. Bobba et al. (2000), 2. Barnett et al. (2004), 3. Döll and Flörke (2005), 4. Mirza et al. (2003), 5. Lehner et al. (2005), 6. Kistemann et al. (2002), 7. Porter and Semenov (2005). 이 그림의 배경 지도는 그림 2.10이며, SRES A1B 배출 시나리오에 대한 현재 (1980~1999)와 2090~2099년 사이의 연유출량의 양승불 평균 변화(%) (Milly et al., 2005 참조). 청색 (적색)으로 표시한 부분은 연유출량의 증가(감소)를 표시함. [WGII Fig. 3.8, SYR Fig. 3.5 참조]

18) 부록 I: 「기후모델에 대한 설명」 참조.

기후의 민감도 (Prudhomme et al., 2003), 혹은 수문 모델 (Kaspar, 2003) 자체에 내재하고 있는 불확실성 등으로 인한 것이다. 담수 시스템에 미치는 기후 변화 영향의 추정에 관련되는 다른 원인들에는 기후변화에 적응하고 영향 완화를 위해 계획되는 여러 가지 수단들의 성격과 범위와 상대적인 성공 여부 등이 있다. 그림 3.4에 예시된 영향들은 인간이 어떠한 적응 수단을 동원하느냐에 따라 실제로는 다르게 나타날 것이다. 적응 수단으로부터 기후 변화로의 피드백 (feedbacks) 효과는 증가되는 저수지의 저류량에 따른 농작물 성장 기간의 연장이라든지 하천 유량 조절의 개선 등과 같은 현재의 미래에 대한 전망에 충분히 고려되지 않는다. 영국의 2개 하천 유역에 대한 홍수량 통계치에 내재하는 불확실성의 여러 가지 원인 비교 (Kay et al., 2006a)에서 불확실성의 가장 큰 원인은 GCM의 구조와 온실가스 배출 시나리오, 그리고 수문 모델링이라는 결론이 내려졌다. Prudhomme and Davies (2006)도 영국에서의 월평균 유량과 저수유량 자료 계열의 통계치와 관련하여 비슷한 결론을 내린바 있다. [WGII 3.3.1]

수자원에 미치는 기후변화 영향의 불확실성을 평가할 때에는 복합 모델 (multi-model)에 의한 확률론적 접근 방법이 단일 기후모델에 의한 분석 결과를 사용하는 방법보다 선호된다. TAR (IPCC의 제3차 평가보고서) 이후 몇 가지 수문학적 영향의 분석 연구에서 기후자료를 입력으로 하는 복합 모델 (Arnell, 2004은 전 지구 규모, Jasper et al., 2004는 하천 유역 규모)을 사용한 바 있으나, 확률론적 평가 기법을 도입한 경우는 드물다. [WGII 3.3.1]

여러 기후변화 영향 분석 연구에서 관측된 기후 변량의 시계열들은 현재의 조건과 일관성을 가지는 시나리오를 유지하기 위해 계산된 기후 변량의 변화를 사용하여 조정된다. 이러한 조정은 기후 모델링에 있어서의 편향 (biases)가 현재와 미래 시간 기준으로 볼 때 비슷한 규모일 것이라는 가정 하에 GCM에 의한 기후 모델링의 오차 영향을 최소화하는데 목적이 있다. 이는 관측치와 기후 모델에 의한 계산치 사이의 편차가 상당히 클 때 강수량을 추정하는데 있어서 특히 중요하다. [WGII 3.3.1]

기후 변량들의 경년간 혹은 일간 변동성의 변화는 수문학적 영향 분석 연구에서는 통상 고려되지 않는 것이 보통이며, 이로 인해 미래의 물 가용량이나 관개용수 수요량뿐만 아니라 홍수 및 가뭄의 크기를 과소 추정하게 된다. [WGII 3.3.1] 담수 자원에 미치는 기후변화 영향을 정량화하기 위한 지표나 한계치를 선택하는 것도 불확실성의 한 원인이 될 수 있다.

GCM과 수문 모델에서 사용하는 공간적 크기의 차이로 인한 문제점을 극복하기 위하여 축소 GCM 출력을 더 세밀한 공간적 및 시간적 해상도로 바꾸는 기법이 개발되어 왔다. [WGI TAR Chapter 10] 이들 기법에 있어서의 기본 가정은 현 기후 조건에서 밝혀진 통계학적 관계가 미래 기후 조건의 변화에도 불구하고 성립할 것이라는 것이다. 축소 기법 (downscaling techniques)을 사용하면 미래 변화에 있어서의 일 변동성을 고려할 수 있으며 (Diaz-Nieto and Wilby, 2005), 수자원 계획을 위한 미래 하천 유량에 대한 정보를 생산하기 위한 확률론적 해석 기법을 적용할 수도 있다 (Wilby and Harris, 2006). 이들 접근 방법들은 미래 수자원에 대한 전망에 영향을 미치는 불확실성의 원인들을 비교하는데 도움이 된다. [WGII 3.3.1]

수자원에 있어서의 기후 관련 변화의 경제적 영향을 정량화하기 위한 노력은 관련 자료의 부족과 정량화되는 값이 계산 방법과 여러 가지 물 이용 (농업 용수, 도시 용수, 하천 내 이용 등)에 걸친 물 가용량 변화의 배분 방법에 관해 전제되는 각종 가정에 대단히 민감할 수밖에 없다는 사실 때문에 그동안 큰 성과를 이루지 못하였다 (Changnon, 2005; Schlenker et al., 2005; Young, 2005). [WGII 3.5]

3.3 기후변화에 대한 물 관련 적응: 개요

물 관리자들은 오랜 기간 수자원의 변화하는 수요에 대처해 왔다. 오늘날까지 물 관리자들은 자연 자원이 중기간 동안에는 대체로 일정하게 유지되어 과거의 수문학적 경험이 미래 조건에 대한 좋은 지침을 제공할 수 있을 것이라고 가정해왔다. 기후변화는 이와 같은 전통적인 가정에 도전하게 되어 기존 물 관리 시스템의 신뢰도를 떨어뜨릴 수 있게 되었다. [WGII 3.6.1] 기후변화에 대한 물 관리 측면에서의 반응에는 물 관리 시스템의 평가 및 설계와 EU의 Water Framework Directive와 같은 메커니즘을 통한 비구조적 방법 등에 대한 새로운 접근 방법을 개발하는 등이다. [WGII 12.2.2]

표 3.4는 평균적인 조건과 가뭄 조건하에서 물 공급을 보장하기 위한 공급 측면과 수요 측면에서의 적응 대안을 요약하고 있다. 공급 측면에서의 대안들은 일반적으로 물의 저수 능력 혹은 수자원으로 부터의 취수 능력을 증가시키는 것으로서 환경에 부정적인 결과를 초래시킬 수도 있다. 한편, 수요 측면에서의 대안들은 개개인의 물 절약 행동이 누적되어 그 효과가 나타나는 것이므로 실질적 효과를 얻지 못할 수도 있다. 일부 대안들은 담수화라든지 펌핑과 같이 큰 에너지 소모를 동반하므로 기후변화 영향의 완화 수단 (mitigation measures)과 일관성을 갖지 못할 수도 있다.

기후 변화에 대한 물 관련 적응 대안은 자율적인 적응 대안 (autonomous adaptations)과 계획된 적응 대안 (planned adaptations)으로 구분할 수 있으며, 이들 2가지 유형의 대안은 차별화 된다. 자율적인 적응 대안은 기후변화 영향에 의식적인 반응을 하기 보다는 비록 기후변화에 대응하기 위해 적극적으로 계획된 것은 아니지만, 기후변화로 인해 발생하는 영향을 감소시킬 수 있는 변경된 물 수요량이라든지, 목적 및 전망을 만족시키기 위해 취해야 할 변화로부터 발생하게 되는 대안을 가리킨다. 그러한 적응 대안들은 기후변화에 대처함에 있어서 효율성 정도에 서로 차이가 있지만 물 분야에서 널리 사용되고 있다 (표 3.5 참조). [WGII 3.6.1] 라틴 아메리카에서는 유역간 물 이동을 관리하고 물 사용을 최적화하는 등의 자율적 적응 대안이 사용되어 왔으며 [WGII 13.5.1.3], 아프리카에서는 지방 정부와 농민들이 축적된 경험을 이용하여 강우 예보를 통한 적응 기법을 개발하였고, 사헬 (Sahel) 지역의 농부들은 관개 시설을 보완하기 위하여 전통적인 빗물 저류 시스템을 사용하고 있다. [WGII 9.6.2.1, 9.5.1, Table 9.2]

계획된 적응 대안은 신중한 정책 결정에 의해 마련되는 대안으로, 기후변화와 변동성을 구체적으로 고려하며 지금까지는 드물게 사용되어 왔다 할 수 있다. 네덜란드, 호주, 영국, 독일, 미국, 방글라데시 등 소수의 국가에서의

표 3.4: 용수공급과 수요 측면에서의 적응 대안의 예 (모든 대안을 포함하는 완벽한 것은 아님). [WGII Table 3.5]

용수공급 측면	용수 수요 측면
<ul style="list-style-type: none"> - 지하수의 시굴(試掘) 및 채취 - 댐 및 저수지의 건설에 의한 저수량의 증가 - 해수의 담수화 - 빗물 저류의 확대 - 하천 연변 지역으로부터 외래종 식물의 제거 - 물의 유역 변경 (water transfer) 	<ul style="list-style-type: none"> - 물의 재순환에 의한 물 사용 효율의 개선 - 농작물 경작 주기나 작물의 혼합, 관개 방법, 식재 지역을 변화시켜 관개용수 수요량을 감소 - 농업 생산품을 수입함으로써 관개용수 수요를 감소 (물 수요의 원천적인 감소) - 지속 가능한 물 사용을 위한 토착적 실무 관행의 증진 - 고부가 가치 물 사용에 용수를 재 배분하기 위한 물 시장 (water markets)의 확대 운영 - 물 보존 (water conservation)을 장려하기 위한 물 계량 (metering)이나 용수 가격 정책 등을 포함하는 경제적 인센티브 제도의 확대 시행

물 관리자들은 홍수나 용수공급 관리 분야의 표준 실무 처리에서 기후변화의 영향을 직접 고려해 왔다. [WGII 3.2, 3.6.5, 17.2.2] 이들 적응 수단들은 설계 표준이라든지 기후변화 영향의 고려 한계 등과 같이 설계방법과 절차를 변경시키는 형식을 취해왔다. 예를 들면, 위에서 언급한 적응 수단들은 영국과 네덜란드에서는 홍수 대비를 위해 (Klijn et al., 2001; Richardson, 2002), 영국에서는 용수 공급을 위해 (Arnell and Delaney, 2006), 그리고 방글라데시에서는 일반적인 수자원 계획을 위해 실행된 바 있다. [WGII 3.6.5, 17.2.2] 변화하는 기후에 특별히, 그리고 단독적으로 적응하기 위한 수자원 부문의 구체적인 조치 (actions)의 예는 대단히 드물다. 이는 기후변화가 적응 전략과 투자 계획에 영향을 주는 여러 가지 동인 중의 하나에 지나지 않으며, 단기 계획 차원에서 가장 중요한 것이 아닐 뿐 아니라 부분적으로는 미래 수문학적 변화에 대한 전망에 있어서의 불확실성 때문일 수 있다.

물의 가용성과 수질에 있어서의 변화에 대한 적응은 물 관리 기관뿐만 아니라 물 환경의 개별 사용자에게 의해 이루어져야 하며, 이는 산업 부문의 기업과 농민 (특히 관개 농업 부문), 그리고 개별 소비자들도 포함된다. 변화하는 수요와 관련 법률에의 적응에 많은 경험이 축적되어 있지만 관련 조직이나 개인이 기후변화에 어떻게 적응해 나갈 수 있을 것인가에 대해서는 잘 알려져 있지 않다.

표 3.5는 WGII AR4의 지역에 관한 장 (regional chapters)에서 제시된 바와 같이 전 세계적으로 현재 사용되고 있는 자율적 적응 수단과 계획된 적응 수단에 속하는 일부 수단들에 대해 개요를 정리 수록하고 있다. 이 표는 완벽한 것은 아니며, 이 표에 수록된 적응 수단 이외에도 여러 가지 개별적인 수단들이 여러 곳에서 사용될 수 있을 것이다. 기후 변화에 대한 적응 수단들이 특히 단기간에 걸쳐 취약성을 감소시킬 수 있다는 데 대해서는 높은 신뢰성 (high confidence)이 인정된다. [WGII 17.2, 18.1, 18.5, 20.3, 20.8] 그러나, 적응 능력 (혹은 용량)은 사회적 및 경제적 개발 정도에 긴밀하게 연결되어 있으며, 사회 전반에 걸쳐 균등하게 분포되어 있지 못해서 특히 빈곤층이나 노인층, 여자, 병든 자, 토착민 등의 경우 대체로 적응 능력이 부족한 것이 보통이다. [WGII 7.1, 7.2, 7.4, 17.3]

기후변화의 영향에 적응함에 있어서 다음과 같은 5가지 다른 유형의 한계를 정의하는 것이 가능하다.

- (a) 물리적 혹은 생태학적 한계: 기술적 수단이나 조직 변경을 통해 기후변화로 인한 부작용을 방지하는 것은 가능하지 않다. 예를 들면, 하천이 완전히 건천화 되고 있는 곳에 적응수단을 동원한다는 것은 불가능하다. [WGII 3.6.4]
- (b) 기술적, 정치적 혹은 사회적 한계: 예를 들면, 신규 저수지를 위해 수용 가능한 지점을 찾기 어려울 수도 있고, 혹은 물 사용자가 물을 덜 소모하도록 하는 것이 어려울 수도 있다. [WGII 3.6.4]
- (c) 경제적 한계: 특정 적응 전략이 전략의 실현에 의해 성취될 편익에 비해 지나치게 비용이 더 많이 소요 되는 경우도 있을 수 있다.
- (d) 문화적 및 조직 기구적 한계: 여기에는 물 관리를 담당하는 조직 기구의 문제라든지, 물 관리에 주어진 낮은 우선권, 관계 기관간의 협력 부족, 조직 규모의 크기에 따른 조직간 갈등, 비효과적인 거버넌스, 미래 기후변화에 대한 불확실성 등이 포함되며 (Ivey et al., 2004; Naess et al., 2005; Crabbe and Robin, 2006), 이들 모든 것이 적응에 미치는 조직 기구상의 제약으로 작용하게 된다. [WGII 3.6.4]
- (e) 인식력과 정보력 상의 한계: 예를 들면, 물 관리자는 기후변화의 도전을 인식하지 못할 수도 있고, 또한 다른 도전에 비해 기후변화에 낮은 우선권을 부여 할 수도 있다. 주요 정보 상의 장벽은 기후 변화에 일관성 있고 엄격하게 대처하기 위한 각종 방법론에 충분히 잘 접근하지 못하고 있는 것이다. [WGII 17.4.2.4]

기후변화는 미래의 수문학적 조건에 불확실성을 개입 시킴으로서 물 관리자에게 개념적인 도전을 주고 있으며, 수문학적 조건의 변화 성향을 알아낸다는 것도 대단히 어렵다. 즉, 수문학적 체계가 실제로 어떻게 변화하게 될 것인가가 분명해지기 전에 적응을 위한 의사 결정이 내려져야 함을 의미한다. 따라서, 기후변화를 직면하고 있는 입장에서 물 관리를 위해서는 시나리오에 근거한 접근 방법을 채택할 필요가 있다 (Beuhler, 2003; Simonovic and Li, 2003). 이와 같은 방법은 영국 (Arnell and Delaney, 2006) 및 호주 (Dessai et al., 2005)와 같은 나라에서 실무에 적용되고 있다. 그러나, 여기에는 2가지 문제점이 있다.

표 3.5: 실무에서 적용되는 적응 수단의 예

지역	적응 수단	문헌
아프리카	<ul style="list-style-type: none"> - 계절별 예보, 예보 발령, 전파, 모델 기반의 의사 결정 지원 시스템에 통합 - 물 관리 기반 시설의 개량을 통한 현재의 농경 시스템의 개선으로 미래의 가뭄 스트레스에 탄력적 대응 능력 제고: 빗물 저류 시스템, 댐 건설, 물 보존 및 관개 기법 개선, 물방울 관개 (drip irrigation), 작물 개량, 윤번 농작물 경작 등 활용 	WGII 9.5, Table 9.2
아시아	<p>다음과 같은 농업 기반 시설의 개량 수단 활용:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 목초지 용수 공급 - 관개 시스템과 그의 효율성 제고 - 빗물의 사용 및 저장 - 국가적, 지역적, 국제적 차원의 신기술에 대한 정보 교류 시스템 - 축산가, 어부, 농부를 위한 적시의 일기예보 (강우 및 기온) - 도시 하수의 재순환 및 재이용 (싱가포르) - 물 낭비 및 누수의 감소, 낭비적 물 사용을 감소시키기 위한 시장 중심 접근 방법의 사용 	WGII 10.5, Table 10.8 WGII 10.5.2
호주와 뉴질랜드	<ul style="list-style-type: none"> - 국가 물 이니셔티브 (initiative) - 재 순환수 공급을 위한 처리시설 - 수로 침투 손실 감소 및 물 보존 수단 - 관개 개수로를 관수로로 대체 - 물 사용 효율 및 수질의 개선 - 가뭄 대비, 새로운 물 가격 정책 - 빗물 저장 시설의 설치 - 해수 담수화 	WGII 11.2, Table 11.2, Box 11.2; 표 5.2 (본 기술 보고서)
유럽	<ul style="list-style-type: none"> - 고지대의 도시용수 및 관개용수 공급용 저수지와 저지대의 저류지로부터의 누수 손실 감소를 위한 시설 개량으로 생·공·농업 용수 보존 등과 같은 수요 측면의 전략 수립 추진 - 홍수터 지역, 비상용 홍수 조절용 저수지, 홍수 범람용 저류지, 돌발 홍수의 예경보 - 하천 내 저수지 형성을 위한 하천 저류 등과 같은 공급 측면의 수단 동원과 하수의 재이용, 담수화 시스템, 용수 가격 정책 등 - 통합 수자원 관리 계획에 기후변화 영향에의 적응을 위한 지역 단위 및 하천 유역 단위 전략을 포함 	WGII 12.5.1
라틴 아메리카	<ul style="list-style-type: none"> - 빗물 포집 및 저류 시스템 - 빈촌에서의 용수 공급 시스템 개량을 위한 “자율조직” 프로그램 - 물 보존을 위한 실무 관행, 물의 재이용, 물의 재순환 	WGII 13.2.5.3 Box 13.2, 13.5.1
북미	<ul style="list-style-type: none"> - 개선된 물 보존책과 보존 경작 (conservation tillage) - 물 보존 시스템과 새로운 물 공급 및 배분 시설에의 투자 - 복합 홍수 피해 보상 청구 위험도 감소를 위한 US National Flood Insurance 정책의 변경 - 2회 이상의 홍수 관련 보상 청구가 된 주택은 100년 빈도 홍수위 보다 2.5cm 높이거나 타 지역으로 이주해야 - 5년 빈도 홍수 기준보다 더 큰 홍수에 대비하기 위해 내 배수 시스템을 플라싱하고 주 하수 관거를 교체 - 침투를 늘리기 위해 지붕에 떨어지는 빗물을 잔디로 직접 떨어지게 하고 도로상의 요면 저류량을 증가시킴 	WGII 14.2.4 WGII 14.5.1
극 지역	<ul style="list-style-type: none"> - 델타 지역 연못의 건천화 방지를 위해 저수지로 부터의 방류를 관리하여 ice-jam이 형성되어 홍수를 발생시킬 확률을 감소 - 수력발전을 위한 유량 조절, 음용수 확보를 위한 빗물 저류, - 증가/혹은 감소되는 담수로 인한 재해 관리 전략 (홍수 위험을 감소시킬 수 있는 방어용 구조물의 설치 등) 	WGII 15.6.2 WGII 15.2.2.2
균소 도서 지역	<ul style="list-style-type: none"> - 담수화 공장 - 대규모 저수지 건설 및 빗물 포집 및 저장 시스템의 개량 - 지하수의 보호, 빗물 확보 및 저장 시스템의 대형화, 태양광 증류법의 사용, 우수 유출의 관리 및 지하수 함양 지역의 확대 	WGII 16.4.1 Box 16.5

첫째로, 전제되는 시나리오에 따라 기후 변화로 인한 영향의 정도에 큰 차이가 있어서 여러 개의 다른 시나리오를 가정하여 해석해야 하며, 둘째로는, 어떤 나라에서는 물 관리자들이 위험도 기준의 의사 결정을 내리기 위해 실제로 발생할 어떤 크기의 결과가 발생할 가능성에 대한 정보를 요구하기도 한다 (Jones and Page, 2001). 따라서, 특정 결과가 발생할 확률 분포를 작성하기 위한 기법들이 개발되고 있으며, 이를 위해서는 기후 변화 영향의 불확실성의 주요 동인에 대한 확률 분포의 결정을 위한 가정이 필요하다. [WGII 3.6.4]

“적응성 있는 관리” (Stakhiv, 1998)라 불리는 불확실성에 대처하기 위한 두 번째 접근방법은 불확실성에 상대적으로 강한 여러 가지 물 관리 수단을 더 많이 사용하는 것이다. 그러한 수단들에는 물 수요를 감소시키는 방법들이 포함되며, 이들 수단들은 물 관리 시스템이 기후 변화에 노출되는 것을 최소화하는 도구라는 주장이 있어 왔다 (Beuhler, 2003). 마찬가지로, 하천 범람을 임시적으로 허용하고 홍수 피해에 대한 노출을 감소시키는 등의 홍수 관리를 위한 탄력성 있는 전략의 실행은 전통적인 홍수방어 수단들 보다는 불확실성에 보다 강한 조치가 될 수 있다 (Klijn et al., 2004; Olsen, 2006). [WGII 3.6.4]

3.3.1 통합 수자원 관리

통합 수자원 관리(IWRM: Footnote 17 참조)는 기후변화에 대한 적응수단을 찾아내는 하나의 방법임에 틀림이

없으나, 아직까지는 초기 단계에 있다. 성공적인 통합 수자원 관리 전략에는 다음의 여러 가지가 포함된다. 즉, 사회적 여론을 모으고, 계획 과정을 재구성하며, 토지 관리와 물 관리의 조율, 수량과 수질의 연계 관리, 지표수와 지하수의 연계 사용, 자연 시스템의 보호 및 복원, 기후변화에 대한 고려 등이 포함된다. 또한, 통합 전략은 정보의 흐름에 직접적인 장애가 되기도 한다. 완전히 통합된 접근 방법이 항상 필요한 것은 아니지만 통합을 위한 적절한 규모는 특수한 필요성을 충족시키기 위해 효과적인 조치를 취하는 정도에 의해 결정되는 것이다 (Moench et al., 2003). 특히, 물 관리를 위한 통합 접근 방법은 서로 경쟁 관계에 있는 물 사용자들 간의 갈등 해소에 도움을 줄 수 있다. 미국 서부 지역의 여러 곳에서는 물 관리자들과 여러 이해 당사자 그룹이 여론에 기반한 의사결정을 촉진시키는 방법을 실험하여 왔으며, 이러한 노력에는 지방의 하천유역 관리 업무에의 참여라든지 주정부나 연방정부가 물 관리 계획 수립 과정에 이해당사자를 참여시키기 위해 지원하는 노력 등이 포함된다 (US Department of Interior, 2005). 이와 같은 이니셔티브는 서로 경쟁 관계에 있는 이해 당사자들이 광범위하게 얽혀있는 영향 인자들을 고려하여 서로가 만족할 수 있는 문제 해결을 할 수 있도록 서로 타협하는데 도움을 주게 된다. 미국의 콜로라도 강 유역과 같은 대하천 유역의 경우 이들 영향 인자들은 수없이 많으며, 이들은 여러 개의 시간 스케일과 공간 스케일에 걸쳐서 있다고 할 수 있다 (표 3.6 참조). [WGII 3.6.1, Box 14.2]

표 3.6: 미국 콜로라도 강 유역의 통합 수자원 관리에 있어서의 시·공간적 스케일의 문제점 (Pulwarty and Melis, 2001). [WGII Table 3.4]

시간 스케일	문제점
무한대 (indeterminate)	- 멸종 위기 동식물의 보호에 필요한 유량
장기간 (long-term)	- 유역간 물 배분과 주별 유역간 물 배분
10년 기간 (decadal)	- 상류 유역으로 부터의 물 공급 의무
연간 (year)	- Lake Mead 저류량과의 균형을 위한 Lake Powell의 담수 의무
계절 (seasonal)	- 침투 난방 및 냉방이 계속되는 개월 수
일에서 월까지 (daily to monthly)	- 홍수 조절 운영
시간 (hourly)	- 수력 발전 (Western Area Power Administration)
공간 스케일	문제점
전 지구적 (global)	- 기후 영향 (Grand Canyon National Park)
지역적 (regional)	- 물의 선점권 (예: Upper Colorado River Commission)
주 (state)	- 주별 물 관리 단위 지역 내외에서의 물 매매 시장 관련 협약
시·군 (municipal and communities)	- 물 공급 스케줄, 수 처리, 가정 용수 공급

4

각종 시스템과 부문에 있어서의
기후변화와 수자원

**Climate Change and Water Resources
in Systems and Sectors**

4.1 생태계와 생물 다양성

4.1.1 개관

기온과 수분 체계는 식물과 동물의 분포와 성장 및 생산성, 그리고 재생산을 결정하는 중요한 변수에 속한다. 수문현상에 있어서의 여러 변화는 여러 가지 방법으로 종(種, species)에 영향을 미칠 수 있다. 그러나, 가장 완벽하게 이해되고 있는 과정은 신진대사와 재생산 과정을 지배하는 고유의 한계치와 수분의 가용성을 연결시키는 것이라 할 수 있다 (Burkett et al., 2005). 다가오는 수십 년 동안 예상되는 기후의 변화는 하천 유량의 발생시점과 체적의 변동에서부터 수많은 습지에서 수위 저하, 북극 지방의 열화석회암(thermokarst) 호수의 확대, 열대우림 지역에서의 연무(煙霧) 가용량의 감소 등에 이르기까지 수분 가용량(moisture availability)에 여러 가지 영향을 미칠 것이다.

지난 세기에 걸친 강수량과 습도, 가뭄과 유출 등의 관측된 전 지구적 변동 성향은 WGI AR4, Chapter 3에 요약되어 있다. 지난 세기동안의 강수량의 변화는 상당한 지역적 변동 성향을 보이지만 [WGI Fig. 3.14] 매우 중요하면서도 의미 있는 경향성을 보이고 있다. 강수량은 1900년부터 2005년까지 북반구에서는 일반적으로 증가하였으나 열대 지방이나 남반구의 여러 대규모 지역, 특히 아프리카의 사헬(Sahel) 지역과 남부지역, 중앙 아메리카, 아시아 남부 지역, 호주의 동부 지역 등에서는 광범위한 지역에 걸친 가뭄 발생이 증가하는 성향을 보였다. [WGI 3.3.5]

4.1.2 수문현상의 전망된 변화와 전 지구적 생물 다양성과의 관계

IPCC 4차 평가 보고서에서의 지구온난화 정도의 전망 결과를 보면 SRES 시나리오 B1, A1, B2의 경우 2030년까지 남반구에서의 0.5°C에서부터 북극 지방의 2°C까지의 기온 상승이 예측되며, B1 시나리오의 경우가 가장 큰 기온 상승을 보일 것으로 전망하고 있다. 기후 모델들은 전 지구적 평균 강수량의 증가를 모의하고 있으나 상당한 공간적 및 시간적 변동성이 있음을 확인하고 있다. GCM은 고위도 지역에 대해서는 강수량의 증가를 전망하고 있으나 증가의 정도는 모델에 따라 다르며, 아열대 지역의 많은 곳과 남반구와 북반구의 중위도 지역에서는 강수량의 감소를 전망하고 있다. [WGI Fig. 10.8 및 10.12] 다가오는 수십 년 동안의 강수는 보다 강도가 강한 사상 사이에 집중될 것으로 전망되고 있으며 강한 강수 사상 사이에 발생하는 저 강도 강수의 발생 기간은 길어질 것으로 보고 있다. [WGI 10.3.6.1] 연속되는 건조일수의 증가는 북미 및 중미 지역, 카리브해 지역, 남미의 북동 지역 및 남서 지역과 호주의 서부지역에서 가장 심할 것으로 전망되고 있다. [WGI Fig. 10.18] 온난화와 열대 및 아열대 지역에서의 강수 패턴의 변화로 인한 영향은 일반적으로 종 다양성이 적도로부터의 거리에 비례하여 감소하므로 전 지구적 생물 다양성에 아주 중요한 관련이 있다.

WGI AR4가 21세기(제2절 참조)에 대하여 전망한 수문 현상의 변화는 모든 대륙에서 생물 다양성에 영향을 미치게 될 가능성이 대단히 크다. 종에 미치는 영향은 세계의 모든 지역에서 이미 감지되었다. [WGII 1.3, 4.2]

Root et al. (2003)이 143편의 출간된 연구 결과를 검토한 결과에서 동물이나 식물들은 20세기 동안의 기후 변화 경향과 일관성을 가지는 분명한 변화를 이미 보이고 있다고 주장하고 있다. 이들 변화의 약 80%는 관측된 기온 변화와 일관성을 보였다. 그러나, 기온이 수분 가용량의 변화를 통해 종에 그 영향을 미칠 수 있다는 점이 인식되어야 한다. [WGII 1.4.1]

수문현상의 변화에 대한 생태계의 반응은 생물학적 및 비 생물학적 과정들의 복잡한 상호작용을 동반하는 것이 보통이다. 생태 군집(ecological communities)에서의 종의 집합은 이들 상호작용과 반응이 비선형적이어서 특정 생태학적 결과를 추정하는데 어려움을 가중시킨다는 사실을 반영하게 된다. 이들 반응의 시기는 분류학적으로 다른 군집으로부터의 종에 따라 항상 동시적이지는 않기 때문에 먹이 원천으로부터의 종의 단절이라든지, 종들 간의 공생적 혹은 촉진적 관계의 저해, 그리고 종들 간의 경쟁 관계의 변화 등이 있을 수 있다. 종들 간의 각각 상이한 반응의 조합과 먹이사슬에서 언제든 이론적으로 발생할 수 있는 상호작용으로 인하여 오늘날 존재하는 생태학적 군집중의 일부는 앞으로 쉽게 분해되어 없어질 수도 있다. [WGII 1.3.5.5, 4.2.2, 4.4]

기온과 물 스트레스의 복합적인 영향 때문에 일부 양서류와 수중에 서식하는 종들이 코스타리카, 스페인, 호주 등지에서 멸종될 것으로 추정되고 있다 (Pounds et al., 2006). [WGII Table 4.1] 사헬 지역에서의 습지가 말라 버리면, 조류가 북반구의 번식지로 이동하는 도중에 잠시 동안 머물러가는 장소로 사헬 지역 습지를 사용하는 조류의 성공적인 이동에 나쁜 영향을 미치게 될 것이다. 아프리카의 남부 지역에서는 식물과 동물 종이 전례 없는 수준의 멸종 사태에 직면하게 되었다. [WGII Table 9.1] 삼림 지역에서는 많은 종들이 수원(水源)으로 안개에 의존하고 있으나, 지구 온난화 현상은 구름 생성을 증가시키게 되어 이들 안개 수원에 의존하는 종들에 영향을 주게 된다. [WGII 13.4.1] 아무튼, 모든 생태계 중에서 담수 생태계는 기후변화로 인해 멸종 위협을 받고 있는 종들 중 가장 많은 비율을 차지하는 것으로 보인다 (Millennium Ecosystem Assessment, 2005b). [WGII 3.5.1]

4.1.3 주요 유형의 생태계에 미치는 수문현상의 변화 영향

4.1.3.1 호수와 하천

호수에 미치는 지구 온난화의 영향에는 고위도 지역에서의 성수기(盛水期, growing periods) 기간의 연장, 성층화(stratification)의 심화와 그로 인한 표면수로부터의 영양물질 손실, 깊고 성층화된 호수에서의 호수 표면 아래의 산소량 감소, 그리고 많은 외래 수생 잡초지역의 범위 확대 등이 포함된다. 고위도 지역에 있는 호수에서는 수위가 증가하며, 기후모델에 의하면 강수량이 증가하는 것으로 되어있는 반면, 중간 위도 및 저위도 지역에서는 수위가 감소하는 것으로 전망되고 있다. 폐합 호수(closed lakes)는 호수의 유입량과 증발량간의 수지 변화에 대단히 민감하기 때문에 기후변화에 가장 취약하다. 그와 같은 호수로의 유입량 변화는 대단히 큰 영향을 가질 수 있으며, 어떤 기후 조건하에서는 호수가 완전히 사라져버릴 수도 있다. 예를 들면, 아랄 해(Aral Sea)는 상류에서의 관계

용수 과다 채취로 수위가 크게 저하되어 왔으며, 중국의 Qinghai 호수는 유역 강수량의 감소로 인해 그 크기가 줄어들었다. [WGII TAR 4.3.7]

북반구에서는 지난 세기 동안 중위도 및 고위도 지역의 호수 및 하천을 덮는 얼음판의 지속기간이 약 2주 정도 짧아졌다. [WGI TAR SPM] 여름 동안의 수온 증가는 성층화된 호수에서의 무 산소층 (anoxia)을 증가시킬 수 있고, 호수 바닥의 유사로부터 인 성분의 방출 농도를 증가시킬 수 있으며, 수중 먹이 기반의 구조를 바꾸는 적조현상을 가속화시킬 수 있다. [WGII 4.4.8] 열대 지역 호수의 단위 온도 상승은 상대적으로 기온이 높은 온대 지역 호수에 비하여 밀도 차이를 비례적으로 크게 한다. 따라서, 전망되는 열대 지역 온도는 열 성층화를 더욱 크게 하여 [WGI Chapter 10 and 11] 호수 심층부에서의 무 산소층 현상을 일으키며 호수의 얇은 층에서의 영양 물질을 감소시키게 된다. 감소된 산소 농도는 일반적으로 수중의 종 다양성을 감소시키며, 특히 부영양화로 수질이 나빠지는 곳에서의 종 다양성 감소는 더욱 심하다. [CCB 4.4]

호수에서의 산소 농도 감소는 생물학적 집합 및 생물·지질·화학적 특성과 호수와 하천에서의 전반적인 생산성을 변화시킨다. 중위도에서 고 위도에 걸친 많은 냉수 생물에 대한 최적 온도는 20°C 보다 낮다. 여름철 따뜻한 수온과 무산소층 현상이 심층부의 냉수 생물 서식처를 위협하게 되면 종의 멸종이 예상된다. 미국의 남부 대평원 지역에서의 수온은 이미 수중에 있는 많은 토종 물고기들의 치사 한계에 도달하고 있다. 유기물질의 분해율은 수온에 따라 증가하므로 암설 (岩屑)이 수중 무척추 동물에 필요한 기간을 단축시킨다. [CCB 6.2] 공격적인 외래종은 수중 생태계에서의 토종 생물 다양성을 위협하는 주요 종이라 할 수 있다. [WGII 4.2.2] 전 지구적인 기온 상승은 Eichhornia와 Salvinia와 같은 여러 공격적인 수중식물의 서식 범위를 극지방으로 확대시키는 경향을 보일 것이다. [RICC 2.3.6]

하천 시스템에 미치는 온난화 영향은 유량의 변동성이 적고 생물학적 상호 작용이 생물의 다양성을 지배하는 습윤 지역에서 가장 강하다. 하상 (河床)과 호수가 장기간 동안 메말라있으면 수중 서식 생물에 미치는 제약과 증가된 산소 부족 및 오염물질 농도로 인해 수질이 저하되기 때문에 생태계의 생산성이 저하하게 된다. 지구상의 반 건조 지역에서의 계절 하천 유량의 감소와 호수 (아프리카의 사헬지역처럼)의 완전 건조는 생물 다양성의 유지를 포함하여 생태계에 엄청난 영향을 미칠 수 있다. [CCB 6.7]

현재로서는 담수 시스템에서의 종의 풍부성은 유럽 중부 지역에서 가장 높고, 주기적인 가뭄과 염수화의 영향으로 북쪽이나 남쪽으로 가면서 점점 감소한다 (Declerck et al., 2005). IPCC AR4를 위한 GCM에 의한 모의 계산은 강수량의 크기에 있어서 북쪽 지역에서는 증가하고, 남쪽 지역에서는 감소하는 등 대조를 보인다. [WGI 11.3.3.2] 전망된 유출의 증가와 가뭄 발생 위험성의 감소는 북부 유럽 지역에 있어서의 수중 동물상 (fauna)에게 유리하나, 남쪽 지역에서의 물 가용량의 감소는 반대의 영향을 미칠 수 있다 (Álvarez Cobelas et al., 2005). [WGII 12.4.6]

4.1.3.2 담수 습지

습지 시스템 구조가 크게 변동하는 것은 주로 습지 별 수문 특성 때문이다. 즉, 습지의 수문 특성은 고위도의 북녘 삼림 지역에 위치하는 토탄 (土炭, peat) 늪지로부터 열대 몬순형 습지 (예: 호주의 Kakadu 습지) 및 티베트와 안데스 산악 지역의 고위도 습지에 이르기 까지 광범위하게 변한다. 기후변화는 강수 특성과 가뭄, 홍수, 홍수 등 극한 사상의 강도와 발생 빈도를 변화시킴으로서 내륙의 담수 습지에 가장 심각한 영향을 미치게 될 것이다. 강수량의 변동성이 상대적으로 약간 증가하더라도 습지의 동식물은 그들의 생명 주기 (life cycle)에 상당한 영향을 받게 된다 (Keddy, 2000). [WGII 4.4.8] 일반적으로, 기후가 온난화되면 습지 생태계에는 건조화 경향이 일어나기 시작하는 것으로 예상되고 있다. 습지의 수위에 변화를 가져오는 이와 같은 기후변화의 간접적인 영향은 습지 생태계의 변화의 주된 매개체가 될 것이며, 또한 북녘의 아 북극 (sub-Arctic) 토탄 지역에서의 기온 상승과 성수기 기간의 연장 영향을 무색하게 할 것이다 (Gorham, 1991). 몬순 기후 지역은 짧은 우기동안 보다 강한 강도를 가지는 강우 사상에 의해 영향을 받을 가능성이 더욱 많아서 하천 유역과 습지 지역에서의 홍수 범람과 침식을 악화시키게 될 것이다. [WGII TAR 5.8.3]

대부분의 습지 형성 과정은 유역 차원의 수문 (水文)에 의존하며, 수문과정은 지표 수자원의 관리 실무 관행뿐만 아니라 토지 이용 변화에 따라 변화 될 수 있다. [WGII TAR 5.ES] 또한, 국지적 및 지역적 수자원 시스템의 함양과 지역의 지형과 상관된 습지의 위치, 대규모의 지역 지하수 시스템의 동수 경사 등은 강수량이 증발량을 크게 초과하지 않는 기후역에서의 습지의 수문 저류량의 변동성과 안정성을 결정하는데 가장 중요한 인자들이다 (Winter and Woo, 1990). 습지 자체로의 직접 강수량과 습지로부터의 직접 증발량의 변화처럼 습지로의 외부 함양량의 변화는 변화하는 기후 조건하에서의 습지의 생존 여부에 대단히 중요할 수 있다 (Woo et al., 1993). [WGII TAR 5.8.2.1] 따라서, 물의 가용성에 대해 전망된 변화 결과에 적응하는 것은 불가능하지는 않지만 대단히 어려울 수 있다. [WGII TAR 5.8.4] 부분적으로는, 적응을 위한 한정된 습지의 용량 때문에 습지는 기후변화에 가장 취약한 생태계 중의 하나에 속하는 것으로 인식되고 있다. [WGII 4.4.8]

습지는 생물 다양성이 대단히 풍부한 곳이며, 많은 습지들이 전 세계적인 보존 지구로 지정되어 있다 (Ramsar sites, World Heritage sites). 습지가 손실되면 특히, 양서류와 수중 파충류의 심각한 사멸을 불러올 수 있다. [WGII 4.4.8] TAR은 북극과 북극에 가까운 (sub-Arctic) 구름 덮인 늪지와 아주 작은 유역 면적을 가지는 함몰된 습지를 기후 변화에 가장 취약한 수중 시스템으로 분류한 바 있다. [WGII TAR 5.8.5] 그러나, 최근의 AR4는 인도와 호주의 몬순형 습지와 북녘의 토탄 (土炭) 습지 (boreal peatlands), 북미 대평원의 단지 구멍형 습지 (pothole wetland), 아프리카의 Great Lake 습지 등과 같은 많은 추가적인 유형의 습지들이 기후 변화에 대단히 취약하다고 주장하고 있다. [WGII 4.4.8, 4.4.10] 습지 내에 서식하는 수많은 종들의 계절 이동 패턴과 행로는 변화해야 할 것이다. 그러하지 못할 경우, 일부 종들은 사멸의 위협에 처할 것이며 [WGII 4.4.8], 만약 습지에 충분한 물이 있으면 주요 서식 종의 경우 소규모의 복원도 가능할 수 있다. [WGII TAR 5.8.4]

대기 온난화와 관련된 수문과정의 변화로 인하여 습지 서식지의 면적은 일부 지역에서 증가하였으며, 북극 지역에서는 영구 동토의 용해로 인해 새로운 습지가 생성되고 있다. [WGII 1.3] 영구 동토 지역의 표면 얼음이 녹아서 형성되는 열화 석회암 지대 (thermokarst)의 형성은 과포화나 과건조로 인해 북극의 생물상을 바꾸어 놓을 수 있다 (Hinzman et al., 2005; Walsh et al., 2005). 광범위한 열화 석회암 지대의 형성이 알라스카의 Council 지역 부근을 중심으로 한 북미지역(Yoshikawa and Hinzman, 2003)과 중앙 Yakutia 지역(Gavriliyev and Efremov, 2003)에서 발견된 바 있다. [WGI 4.7.2.3] 초기에는 영구동토가 녹아서 새로운 습지와 연못이 되는 함몰부가 형성되며 이들이 새로운 배수 체계에 따라 서로 연결된다. 영구 동토가 계속해서 녹음에 따라 표면수는 지하수 시스템으로 스며들게 되어 담수 서식처의 손실을 가져오게 된다. [WGII 15.4.1.3] Yukon 델타의 호수들이 지난 세기 동안 확대됨에 따라 온난화는 이미 습지의 감소를 초래하였음이 분명해졌다고 볼 수 있다 (Coleman and Huh, 2004). [WGII 15.6.2]

강수 현상의 변동성이 약간만 커지더라도 습지의 동식물에 큰 영향을 미치게 되며 (Keddy, 2000; Burkett and Kusler, 2000), 봄철에 생기는 용덩이와 같은 계절성 습지에 있어서의 생물 다양성은 강수량과 토양 수분의 변화에 의해 큰 영향을 받을 수가 있다 (Bauder, 2005). 몬순 지역에서는 Keoladeo 국립공원에서 확인된 바와 같이 건조기간이 길어지면 습지의 육지화가 촉진된다 (Chauhan and Gopal, 2001). [WGII 4.4.8]

4.1.3.3 해안과 하구

담수 유출의 시기와 체적에 있어서의 변화는 해안 생태계의 염도와 유사 및 영양 물질의 가용성, 그리고 수분 체계에 영향을 미칠 것이다. 기후변화는 강수와 국지적인 유출, 혹은 더 중요하게는 해안 지역으로 배수되는 유역으로부터의 유출을 변화시키므로 이들 변형의 각각에 영향을 미칠 수 있다. [WGII 6.4.1.3] 수문현상은 전형적으로 내륙 지역을 염수성 종으로부터 반염수성 혹은 담수성 종에 이르기까지 분류하는 해안 습지의 식물군 분포에 큰 영향을 미치게 된다. [WGII 6.4.1.4]

해수면의 상승률이 공간적으로 균등하지 않고 [WGI 5.5.2], 어떤 해안 지역들은 기후변화와는 독립적인 과정으로 인해 용기되거나 침하되기 때문에 해안의 지형에 미치는 해수면 상승의 영향은 해안 지역의 특성에 따라 다르다. 이와 같은 독립적인 과정에는 지하수의 채취, 오일이나 가스의 추출, 지각 균형 (isostasy) 과정 (지구 표면의 질량 변화에 대한 지질학적 시간 스케일에서의 지구 표면의 조정 과정) 등이 포함된다. 해안을 따르는 표고의 변화에 추가하여 내륙 지역에서의 여러 가지 인자들은 해안 생태계에 미치는 해수면 상승의 순 효과에 영향을 미칠 수 있다. 유역 내의 자연 생태계는 서서히 훼손되어 왔으며, 해안으로의 물과 유사, 영양물질의 하류 방향 흐름에 대해서는 논란이 있어왔다 (Nilsson et al., 2005). 토지이용의 변화와 수문학적 특성의 변화는 국지적인 영향뿐 아니라 해안 지역에 대한 인간의 개발을 포함하여 하류 지역에 영향을 미쳐왔다. 침식은 해안에 도달하는 유사량을 증가시켜 왔다. 예를 들면, 중국 황하에서의 부유사 부하량은 과거 200년 동안 약 2~10배 정도 증가하였다 (Jiongxin, 2003). 반대로, 댐이나 수로의

건설은 유사와 댐 및 수로 내 저류로 인해 다른 하천의 해안부에 토사 공급을 크게 감소시켜왔으며 (Syvitski et al., 2005), 이와 같은 영향은 아마도 21세기 동안 지배적인 영향이 될 것이다. [WGII 6.4]

Milly et al. (2005)에 의한 기후 모델 실행 결과는 향후 50~100년 동안의 기후변화는 북극과 아르헨티나 북부, 브라질 남부, 인도 및 중국 일부 지역 등의 해안 지역으로의 유량을 증가시킬 것이라고 주장하고 있는 반면, 아르헨티나 남부와 칠레, 호주의 서부, 아프리카의 서부와 남부, 그리고 지중해 지역의 하천 유역에서는 해안 지역으로의 유량이 감소할 것으로 보고 있다. [WGII 6.3.2; Fig 2.10 참조] 만약, 하천 유량이 감소하면, 해안 지역 하구와 습지에 있어서의 염도는 증가할 것으로 예측되며 해안으로 운송되는 토사와 영양물질의 양은 감소할 것이다. 하천 유량이 감소하는 해안 지역에서는 염수 영향권은 상류쪽으로 올라가게 되어, 인간의 사용을 위한 담수의 가용량 뿐만 아니라 식물과 동물 종의 분포대에 변화를 가져오게 될 것이다. 1950년 이래 해안 지역에서의 물의 염도가 증가하는 미국 플로리다 지역의 양배추 영농 (Williams et al., 1999)과 루이지아나 지역의 낙엽송 재배 (Krauss et al., 2000)의 쇠퇴를 불러왔다. 증가하는 염도는 지난 50년 동안 플로리다 주와 Everglades 주변의 늪지 지역 (Ross et al., 2000)과 호주의 남동부 지역에 걸쳐 (Saintilan and Williams, 1999) 망그로브 (mangrove) 수림지의 확대에 결정적인 역할을 하였다. [WGII 6.4.1.4] 해수면의 상승과 하천 유량의 감소 및 증가된 가뭄 빈도로 인한 복합적인 영향으로 발생한 염수의 침입은 아프리카와 호주 및 아시아 지역 일부에서 급세기 동안 하구 지역 해안 어업에 변화를 줄 것으로 예측된다. [WGII 6.4.1.3, 9.4.4, 10.4.1, 11.4.2]

델타 지역의 해안은 유출과 유사 이송 특성의 변화에 특히 취약하며, 이는 기후변화의 물리적 영향에 적응할 수 있는 델타의 능력에 영향을 미친다. 과거에 인간 활동으로 인해 주요 하천의 유사량이 증가해 왔던 아시아 지역에서는 하천 상류의 댐 건설이 여러 델타 지역으로의 토사 공급량을 감소시키고 있어서 해안 침식은 광범위한 지역에 걸쳐 확대되고 있다 (Li et al., 2004; Syvitski et al., 2005; Ericson et al., 2006). [WGII 6.2.3, 6.4.1] 미국 루이지아나 남동 지역의 침하하는 미시시피강 삼각주 평원에서는 델타 형성 과정에서의 인간 활동 개입과 그로인한 염도 및 해안 늪지의 수위 상승으로 인해 토사의 공급 부족이 급속하게 진행되어 1,565km²에 달하는 해안 늪지와 인접한 해안 저지대가 1978-2000년 사이에 습지가 아닌 호수로 변화되었다 (Barras et al., 2003). [WGII 6.4.1]

하구 지역에 미치는 기후변화의 가장 큰 잠재적 영향 중 일부 영향은 담수 유출의 변화로 인해 발생하는 물리적 혼합 특성의 변화라 할 수 있다 (Scavia et al., 2002). 하구 지역으로의 담수 유입은 물의 체류 시간과 영양 물질의 공급률, 연직 방향 성층화, 염도, 식물성 플랑크톤의 성장률의 조절 (Moore et al., 1997) 등에 영향을 미친다. 수심이 얕은 해안 부근의 해양 환경으로 유입되는 하천 유량의 변화는 탁도와 염도, 성층화, 그리고 영양 물질의 가용량 등에 변화를 초래하게 될 것이다 (Justic et al., 2005). [WGII 6.4.1.3]

4.1.3.4 산지 생태계

산지 경사를 따르는 생태계의 지역 구분은 기온과 토양 수분에 의한다. 최근의 연구 (Williams et al., 2003; Pounds and Puschendorf, 2004; Andreone et al., 2005; Pounds et al., 2006)는 산지 생태계, 특히 지방 특유종의 반비례적 쇠퇴 위험성을 밝힌바 있다. [WGII 4.4.7] 양서동물이나 작은 포유동물, 어류, 새, 그리고 식물 등의 여러 종들은 이들 중 고유의 산지 적소(適所)에 변화를 가져오는 진행 중인, 혹은 전망되는 기후의 변화에 대단히 취약한 것으로 보고되고 있다. [WGII 1.3.5.2, 4.4.7, 9.4.5]

융설 (snowmelt)이 지배적인 여러 하천 유역에서 기온의 상승은 각종 수문 사상들의 크기와 발생 시기를 변화시켰다. 북미와 유라시아 지역에서는 봄철 철두 유출량의 발생 시기가 더 빨라지고 겨울철 기저유량이 증가하는 것으로 관측되었다. [WGII 1.3.2] 1949년-2004년 기간 동안 미국의 서부 산지 지역에서 조사된 기상 관측소 중의 74%에서 연강수량의 보다 큰 비율이 눈 보다는 비의 형태로 발생하고 있는 것으로 보고되고 있다 (Knowles et al., 2006). 1970년대 이래 겨울철 적설심과 봄철 적설 지표면은 대기 온도가 지속적으로 증가해왔던 캐나다 지역, 특히 캐나다 서부 지역에서 감소하였다 (Brown and Braaten, 1998). 봄철과 여름철의 적설 지표면의 면적은 미국의 서부 지역에서도 감소하고 있다 (Groisman et al., 2004). 4월 1일의 눈의 물 상당량 (snow water equivalent, SWE)은 강수량의 변화 보다는 주로 온난화 때문에, 특히 봄철에 표고가 낮은 북미의 서부 산지 지역에서 1950년대 이래 15~30% 정도 감소하였다 (Mote et al., 2005). 융설이 지배적인 미국의 서부 산지 지역 하천에서의 철두유량은 1948년의 경우보다 2002년에는 1~4주 정도 빨리 발생하였다 (Stewart et al., 2005). [WGII 14.2.1]

흔히 평균 기온 및 강수량과 상관시키게 되는 적설의 기간과 깊이는 높은 산지 생태계에 있어서 중요한 인자이다 (Körner, 2006). 적설이 제거되면 식물과 동물은 서리에 노출되고 여름철 용수공급에 영향을 미치게 된다 (Keller et al., 2005). 콜로라도 지역에서 밝혀졌던 바와 같이 (Inouye et al., 2000) 만약 눈의 패딩 변화로 동물의 활동이 제약을 받으면 야생 동물과 환경간의 조화가 깨어져서 야생 동물의 사망률이 증가하게 된다. [WGII 4.4.7] 기온이 1°C 만큼 상승할 때 마다 적설 기간은 유럽 지역 알프스 산지의 중간 고도에서 몇 주일씩 짧아질 것으로 예상하고 있다. 유럽산지의 식물상은 기후변화에 반응하여 중요한 변화 과정을 거치게 될 것이며, 동물의 신진대사에 미치는 직접적인 영향보다는 적설 기간의 변화가 더 중요한 동인이 될 것임이 거의 확실하다. [WGII 12.4.3]

빙하의 해동으로 인해 변화하는 유출은 생태계에 대한 서비스에 중요한 영향을 미치게 되며, 빙하가 녹은 물로 유지되는 소유역 하천의 생물상은 절멸 (extirpation)에 대단히 취약하다. [WGII 1.3.1, 3.2, 3.4.3]

4.1.3.5 삼림, 대초원, 그리고 목초지

기후가 온난화됨에 따라 물의 가용성은 삼림과 초지 시스템의 재구성에 있어서 주요 인자중의 하나가 된다. 기후변화는 산불의 크기와 발생 빈도의 증가 가능성에

변화를 주는 것으로 알려져 왔으며, 반면에 나무에 스트레스를 유발시켜 간접적으로 이들 산불 발생 효과를 악화시킨다. 열대 지역의 고위도와 높은 고도 지역에 위치하는 많은 삼림 생태계는 가뭄과 산불 및 페스트 등 질병과 관련되는 여러 변화에 점점 취약해져가고 있다. [WGII Chapter 4, 5.1.2, 13.4] 강수량이 조금만 감소하더라도 아마존의 삼림의 40%까지 영향을 받을 것으로 전망되어 왔다 (Rowell and Moore, 2000). 향후 100년 동안 남미 전역에 걸친 강수량의 변화를 복합 모델 GCM으로 모의해본 결과, 아마존 강 유역의 6월, 7월, 8월 강수량은 20% 혹은 그 이상 감소할 것으로 전망되고 있으나 12월, 1월 및 2월에는 약 5% 정도의 강수량 증가가 예측된다. [WGI 11.6.3.2] 상승하는 기온과 연계되어 이와 같이 전망된 강수량의 변화는 기온 상승과 가뭄 및 산불로 인한 복합적인 스트레스에 보다 더 저항력을 가지는 생태계에 의해 아마존 삼림 지역의 일부가 대체될 것이라는 예고를 하고 있다. [WGII 13.4.2]

유럽과 라틴 아메리카의 일부 등 여러 지역에서의 성수기 동안의 가뭄 상태의 악화는 여름철 기온의 상승과 강수량의 감소를 동반하며 삼림의 순 생태계 생산성에 광범위한 영향을 줄 것으로 전망되고 있다. 삼림에 미치는 가뭄의 영향에는 각종 병으로 인한 고사, 가뭄 스트레스, 그리고 해충 피해 등과 회복력의 감소, 지역에 따라 변화하는 생물학적 피드백 현상 등이 있다. [WGII 4.4.5] 어떤 지역에서는 툰드라(凍土帶) 지역이나 초지와 같이 삼림이 다른 식생형을 대체하게 될 것이라고 전망되고 있으며, 물의 가용성은 기온과 광합성에 미치는 이산화탄소 (CO₂)의 영향 만큼이나 중요할 수 있다. [WGII 4.4.3, 4.4.5]

많은 연구에서 지배적인 삼림과 초지의 유형에 미치는 직접적인 이산화탄소의 시비효과(CO₂ fertilisation effect)와 온난화 효과가 평가되어 왔다. 광범위한 나무와 풀의 종에 대한 연구는 앞으로 전망되는 CO₂ 농도 증가에 따른 광합성의 촉진은 물의 가용성에 의존하게 될 것이라고 주장하고 있다. [WGII 4.4.3] 삼림이나 대초원에서의 CO₂ 농도 증가의 고차원적 영향은 수자원에 중요한 피드백 효과를 가져 올 수 있다. 예를 들면, 대기 중의 CO₂ 농도의 증가는 하천 내 찌꺼기 (쓰레기)의 영양 가치에 역 효과를 줄 수 있으며 (Tuchman et al., 2003), 토양수의 수지는 대부분의 초지에서 증가된 CO₂에 의해 크게 영향을 받을 수 있다. [WGII 4.4.10] 목초지와 대초원의 생산성은 강수량의 변동성에 대단히 민감하다. 예를 들면, 키가 큰 풀로 구성된 초원의 생산성에 대한 평가에서 증가된 강우의 변동성은 강수량 보다 더 중요하여 건조 기간 동안의 50% 증가가 기본적인 순 생산성의 약 10% 감소를 가져오는 것으로 보고되고 있다 (Fay et al., 2003a). [WGII 4.4.3]

4.2 농업과 식량 안보, 토지 이용과 임업

4.2.1 개관

농업과 임업 및 어업 관련 시스템의 생산성은 강수량과 증발량의 시간적 및 공간적 분포에 결정적으로 의존하며, 특히 농작물의 경우 관개를 위한 담수 자원의 가용량이

중요하다. [WGII 5.2.1] 물의 공급이 어려운 불모지에서의 생산 시스템은 토양 침식으로 인한 토지자원의 황폐화와 지하수의 과잉 취수 및 그로 인한 염수화, 그리고 건조지의 파잉 방목 등의 요인 때문에 기후 측면에서의 취약성 증가와 기후변화로 인한 위험성에 직면하게 된다 (FAO, 2003). [WGII 5.2.2] 그와 같은 불모지에서의 소작농은 특히 기후변화 및 변동성에 취약하며, 사회·경제적 스트레스가 이미 어려운 환경 여건을 더 복잡하게 만드는 경우가 통상이다. [WGII 5.2.2 Table 5.2, Box 5.3] 삼림 지역에서는 극한 기후 사상의 발생 횟수에 연관되어 있는 산불이나 곤충의 창궐이 기후학적 취약성을 증가시키는 것으로 확인되었다. 어업에 있어서는 수질오염과 수자원에 있어서의 변화가 상기한 취약성과 위험성을 증가시키게 된다. [WGII 5.2.2]

4.2.1.1 농업과 식량 안보

물은 지역적으로나 전 세계적으로 식량 생산에 있어서 결정적인 역할을 한다. 한편으로는, 전 지구의 농업용 토지의 80% 이상이 천수답이며, 이들 지역에서의 농작물 생산성은 증발 수요와 관련 토양 수분 분포에 필요한 충분한 강수량에만 의존하게 된다 (FAO, 2003). [WGII 5.4.1.2] 이들 변량들이 열대와 아열대 지역에 있는 건조 지역 및 반 건조지역과 유럽의 지중해성 기후 지역, 호주, 그리고 남미에서와 같이 기후에 의해 제약을 받는 곳에서의 농업 생산은 기후변화에 대단히 취약하다 (FAO 2003). 다른 한편으로는, 전 지구적인 식량 생산은 강수량에 의해서 뿐만 아니라 관개를 위해 확보되는 여러 가지 형태의 가용 수자원에 의존하게 된다. 실제로 전 지구의 농업용 토지의 18%에 지나지 않는 관개되는 토지는 연간 10억 톤의 농작물, 혹은 전 세계 연간 총 공급량의 약 절반을 생산한다. 이는 관개에 의해 생산되는 농작물은 천수답으로부터의 생산량보다 평균적으로 약 2~3배 정도 많이 생산되기 때문이다¹⁹⁾ (FAO, 2003).

물이 너무 부족하면 농작물 생산이 취약해지는 반면 물이 너무 많으면 직접적으로는 토양의 성질에 영향을 주거나 식물의 성장에 피해를 줌으로서, 그리고 간접적으로는 필요한 경작 스케줄에 지장을 주거나 지체를 시킴으로서 농작물의 생산성에 해로운 영향을 줄 수 있다. 큰 (heavy) 강수 사상과 과도한 토양 수분, 그리고 홍수 범람 등은 전 세계적으로 식량 생산과 농촌 생활에 지장을 주고 있다 (Rosenzweig et al., 2000). [WGII 5.4.2.1]

식량 준비 과정에 있어서 필수적일 뿐 아니라, 농작물의 생산성과 식량 생산에 결정적인 영향을 미침으로서 물은 식량 안보 측면에서 중대한 역할을 한다. 현재 전 세계의 8억 5,000만 명에 달하는 사람들은 여전히 충분한 영양 섭취를 못하고 있다 (FAO, 2003). [WGII 5.3.2.1, 5.6.5] 다가오는 수십 년 동안의 사회·경제적 압력으로 인해 관개의 필요성과 비 농업 부문으로부터의 수요 사이의 경쟁은 심화될 것이어서 식량을 위한 수자원의 가용량은 줄어들고 수질은 나빠질 잠재성이 있다. [WGII 3.3.2]

최근의 연구는 배고픔을 해결하기 위한 새천년 개발 목표(Millennium Development Goal, MDG)가 2015년까지 달성되기 힘들 것이라고 지적하고 있다. [WGII 5.6.5]

뿐만 아니라, 기온과 강수 현상에 관해 전망된 평균적인 변화와 가뭄 및 홍수와 같은 극한 사상의 발생 빈도 증가의 전망으로 인해 금세기 동안 기후 변화는 전 지구의 식량 생산을 위한 물의 가용량을 현재보다 더 감소시킬 수 있다 (Rosenzweig et al., 2002). [WGII 5.6.5]

식량 생산에 미치는 기후 영향의 평가는 일반적으로 강수량 추정에 사용된 GCM의 상세 내용에 의해 주로 좌우된다. [WGII 5.4.1.2] 광범위한 강수 시나리오들이 현재 사용되고 있으며, 일반적으로 지역 강수량이 감소하는 시나리오를 사용하여 평가하면 대체로 농작물 생산량은 줄어들고, 반대의 경우에는 늘어난다. 건조 및 반 건조 열대 지역 (특히 아프리카의 사하라 지역) 뿐만 아니라 지중해성 환경을 가지는 유럽, 호주, 남미 등 지역에서의 증가되는 건조성에 대한 전망은 여러 모형에 의한 검토에서 확실한 것으로 보고 있으며, 이들 지역은 그림 4.1에 표시된 바와 같이 기후변화로 인한 취약성의 증가에 직면하게 될 것으로 보고 있다. [WGII 5.3.1]

4.2.1.2 토지 이용과 삼림 생태계

삼림 생태계는 농작물과 목초를 위해 사용되고 있는 토지와 비교될 수 있는 크기인 약 40억 헥타의 토지를 점유하고 있다. 이중 약 2억 헥타 정도만이 전 지구의 상업적인 임업 생산을 위해 사용되고 있다 (FAO, 2003). [WGII 4.4.5, 5.1.1, 5.4.5]

삼림은 개발도상국과 기 개발국 모두에서 질과 양을 갖춘 용수의 공급을 보장해주는 주요 인자이다. 담수 자원은 특히 개발도상국에서 점차 희소 자원이 되어가고 있어서 다가오는 수십 년 동안에는 하천 유역의 구성요소로서의 삼림의 중요성은 크게 증가할 수 있다 (Mountain Agenda, 1997; Liniger and Weingartner, 1998). [LULUCF 2.5.1.1.4; WGII 4.1.1]

삼림은 토지 이용 변화가 국지적 및 지역적 기후에 잠재적으로 큰 영향을 미치게 되어 지역의 물 순환에 기여하게 된다 (Harding, 1992; Lean et al., 1996). 다른 한편으로는, 삼림의 보호는 특히 열대 지역에서 가뭄과 홍수 경감 편익을 가져올 수 있다 (Kramer et al., 1997; Pattanayak and Kramer, 2000). [LULUCF 2.5.1.1.6]

조림 (afforestation)과 재조림 (reforestation)은 영향을 받는 지역 내에서의 습도를 증가시키고, 기온을 저하시키며 강우량을 증가시킬 수 있으며 (Harding, 1992; Blythe et al., 1994), 반대로, 삼림벌채 (deforestation)는 국지적으로 강우량을 감소시키고 기온을 상승시킬 수 있다. 아마존과 아시아 지역에서의 삼림벌채는 열대 다우림 종의 성공적인 재생산에 적합하지 않은 새로운 기후 조건을 생성시킬 수도 있다 (Chan, 1986; Gash and Shuttleworth, 1991; Meher-Homji, 1992). [LULUCF 2.5.1.1.6]

삼림 생태계는 기후 변화에 차별적으로 민감하다 (Kirschbaum and Fischlin, 1996; Sala et al., 2000; Gitay et al., 2001). 즉, 기온에 의해 제약을 받는 생물군은 온난화 영향에 민감한 반면, 물에 의해 제약을 받는 생물군은 가뭄의 심도에 민감하다. 산불의 영향을 많이

19) 관개와 기후변화, 지하수 함양 사이의 상관관계에 대한 토론을 위해서는 제1.3절 참조. 이에 관해서는 제5.1.3절 (아프리카), 제5.2.3절 (아시아)에서도 설명되어 있다.

받는 일부 생태계는 기후변화와 기타 환경적 변화에 반응하여 급격하게 변화할 수도 있다 (Scheffer et al., 2001; Sankaran et al., 2005). [WGII 4.1, 4.4.5]

삼림 생태계와 그와 관련된 생물 다양성은 사회·경제적 압력과 토지 이용, 그리고 기후 변화 인자들의 복합적 영향으로 아프리카 지역에서 특히 위험에 처할 수도 있다. [WGII 4.2] 2100년까지 아프리카 지역 (특히 남부 및 서부 아프리카)의 약 25%에 걸친 부정적 영향은 수질과 생태계 관련 생산품과 서비스의 질을 저하시킬 수 있다. [WGII 4.ES, 4.4.8] 다양한 생태계에서 일어나는 변화는 이미 탐지되고 정보 자료로 제공되고 있으며, 특히 남부 아프리카 지역에서 분명해지고 있다. [WGII 9.2.1.4]

4.2.2 관측 현황

4.2.2.1 기후 영향과 물

농업과 임업은 기후에 크게 의존하는 것으로 알려져 있지만 지역적인 기후변화, 특히 물과 관련하여 관측된 변화의 증거는 현재로서는 찾기가 어렵다. 농업과 임업은 비 기후적 인자, 특히 국지적 혹은 지역적 규모에서의 관리 실무 관행과 관련 기술의 변화 (Easterling, 2003), 그리고 재정 지원과 관련된 시장 가격 및 정책 등에 의해 크게 영향을 받는다. [WGII 1.3.6]

최근의 기후 변화에 대한 반응은 여러 가지 비 기후적 동인과 동원되는 완화 수단 (mitigation measures) 때문에 인간 시스템에서 판별하기가 어렵지만 여러 가지 영향들이 임업 시스템에서 탐지되었고, 일부 농업 시스템에서도 밝혀진 바 있다. 인간의 건강 관련 시스템의 여러 측면에서의 변화는 최근의 온난화와 연관시켜졌으며, 최근 온난화에의 적응 (adaptation) 방법은 체계적으로 기록되기 시작하고 있다. 다른 인자와 비교하면 최근의 온난화는 농업과 임업에 있어서는 제한적인 영향을 주었다고 할 수 있다. 그러나, 북반구의 많은 부분에서 농업과 임업에 대한 생물 기후학의 획기적 발전이 있었음이 확인되었으나 작물 관리를 위한 적응은 제한적이었다. 성수기 기간의 연장은 많은 지역에서의 삼림의 생산성을 높이는 데 기여하였음이 확인되었으며, 반면에 더 따뜻하고 건조한 조건은 북미 지역과 지중해 지역의 유역에서 삼림 생산성의 감소와 산불의 증가의 원인이 되었다. 또한, 농업과 임업 둘 다 최근의 열파 (heatwaves)와 가뭄 및 홍수의 발생 경향에 취약성을 보였다. [WGII 1.3.6, 1.3.9, 5.2]

4.2.2.2 대기 중 이산화탄소와 물의 동역학

대기 중의 CO₂ 농도가 증가하면 현재의 CO₂ 농도와 비교할 때 식물 엽면의 기공 (氣孔)의 저항 증가로 인해 엽면에서의 물 이용 효율은 증가하게 되므로 식물의 기능에 미치는 대기 중 CO₂ 농도 증가의 영향은 수자원에 중요한 영향을 미칠 수 있다. 대부분의 식량용 농작물을 포함하여 C₃ 식물종의 경우 잘 관개된 농작물에 비교하면 수분이 부족한 농작물이 CO₂의 영향을 상대적으로 많이 받을 수 있다. [WGII TAR 5.3.3.1]

그러나, 이산화탄소와 물간의 상호작용 (수림 지역, 유역 및 지역 차원에서)의 큰 스케일에서의 의미는 분명하지

못하다. 일반적으로, 식물-수분 관계에 미치는 CO₂의 증가 영향은 더 따뜻한 기온 하에서의 증가된 증발 수요에 의해 상쇄될 것으로 예측되고 있다. [WGII TAR 5.3.3.1]

수많은 최근의 연구들은 장래 수십 년 동안의 기온과 강수량의 변화는 식물에 미치는 CO₂의 직접적인 영향을 수정하거나 혹은 제한할 것이라는 TAR에서의 발견을 확인하고 있으며, 또한 연장시키고 있다. 예를 들면, 꽃이 피는 기간 동안의 높은 기온은 곡식의 수와 크기 및 질을 감소시킴으로써 CO₂의 영향을 저하시킨다 (Thomas et al., 2003; Baker et al., 2004; Caldwell et al., 2005). 마찬가지로, 온난화 상태에서의 물 수요의 증가는 예상한 CO₂의 긍정적 효과를 감소시킬 수도 있다. 450ppm의 CO₂ 농도 조건 하에 천수답에서 자란 밀 (wheat)은 0.8°C 만큼의 기온 상승으로 곡물 수확량의 증가를 보여주나 1.5°C 보다 더 큰 기온상승이 있으면 수확량은 오히려 감소하게 되므로 이와 같은 부정적인 효과에 대응하기 위해 추가적인 관개가 필요한 것으로 보고되고 있다. [WGII 5.4.1.2]

끝으로, 식물 생리학자들과 농작물 모델링을 하는 전문가들은 공히 실험실 환경에서 측정되고 모델링에서 구현된 CO₂의 증가 영향은 실제 농경지나 농가 차원에서의 영향을 과다 추정할 수도 있는 것으로 인식하고 있다. 이는 해충이라든지, 잡초, 자원 간 경쟁, 토양 수분, 대기질 등과 같이 농경지 현장에서 작동되는 여러 가지 제한적 인자의 영향 때문이다. 이러한 영향 인자들은 대규모의 실험실 환경에서의 조사 연구가 미흡하여 선도적인 식물 성장 모델이 잘 고려되지 못하고 있는 것이 현실이다. 기후와 토양 및 수질, 해충, 잡초, 각종 식물 관련 병, 기후의 변동성, 생태계의 취약성 등과 CO₂ 증가와의 상호작용을 특정 지워주는 핵심적인 동역학 (dynamics)에 대한 이해는 잘 관리된 시스템에 미치는 미래의 기후변화 영향을 이해하기 위한 선결 과제라 할 수 있다. [WGII 5.4.1, 5.8.2]

4.2.3 전망

기후변화 하에서의 물 수요와 물 가용량에 있어서의 변화는 21세기 동안의 농업 활동과 식량 확보, 임업과 어업에 상당한 영향을 미칠 것이다. 한편으로는, 증발량과 강수량의 비의 변화는 기후변화가 없을 때의 식물의 기본 물 수요와 비교할 때 물 수요량을 변경시킬 것이다. 다른 한편으로는, 유역 규모에서의 강수량과 저류 사이클의 수정된 패턴은 지상 및 수중 농업 생태계를 위한 계절별, 연도별 및 경년별 물 가용량을 변화시킬 것이다 (FAO, 2003). 기후변화는 증가된 기온으로 인해 증가된 증발량과 감소된 강우량의 복합적인 효과 때문에 세계 대부분의 지역에서 관개용수의 수요를 증가시키게 된다. [WGII 5.8.1]

열 스트레스나 가뭄과 홍수 범람의 발생 빈도 증가와 같은 극한 기후 사상의 강도와 발생 빈도에 있어서의 전망된 변화는 식량과 임업 (산불의 위험도 포함), 기타 농업 생태계의 생산성에 중요한 결과를 초래하게 될 것이다. [WGII 5.ES] 특히, 모델에 의한 모의연구 결과의 90% 이상이 21세기 말까지 아열대 지역에서 가뭄이 증가할 것으로 예측하고 있으며 [WGI SPM], 아시아의 남부와 동부 지역, 호주의 동부 지역, 그리고 유럽 북부 지역의 주요 농업 생산 지역에서는 극한 강수량의 증가가 전망

되고 있다. [WGI 11.3, 11.4, 11.7] 식량과 임업 생산품, 섬유질 등에 대한 기후 변화 영향의 모델링에는 아직 강수량 변화를 추정할 패턴에 대한 최근의 발견을 포함하고 있지 않다. 만약, 생산성에 미치는 극한치의 영향이 포함된다면 부정적인 영향은 현재에 계산된 것보다 더 심해질 것이라고 추정되고 있다. [WGII 5.4.1, 5.4.2]

연평균 유출량 변화의 백분율은 식생피복에 대한 평균적인 물 가용량을 대표하는 지표이다. 현재와 2100년 사이에 대해 전망된 변화는 대체로 일관성 있는 패턴을 보인다. [WGII Chapter 3] 즉, 고위도 지역과 습윤한 열대 지역에서는 증가하는 반면에 중위도와 건조 열대 지역(그림 4.1b)에서는 감소한다. 물 가용량의 저하는 물 스트레스 증가의 지표가 되며, 특히, 생산을 위한 물이 이미 희소한 생필품이 되어버린 지역에서 물 스트레스는 더 심해질 수밖에 없음을 암시한다(지중해 지역의 유럽, 중앙 아메리카, 아프리카와 호주의 아열대 지역 등, 그림 4.1b 참조). [WGII 5.3.1]

마지막으로, 생산 시스템과 수자원은 사회·경제적 동인과 기후학적 동인이 동시에 상호 작용하여 다가오는 수십 년 동안에 확실한 모양새를 갖추게 될 것이다. 예를 들면, 농업 부문에서의 관개용수의 수요 증가는 변화된 기후 조건뿐만 아니라 증가하는 인구를 위한 식량 수요의 증가에 의존할 것이다. 또한, 삼림의 생산성을 위한 물 가용량은 기후학적 동인과 결정적인 인간 활동의 영향, 특히 열대 지역에서의 삼림벌채 등에 의해 결정될 것이다. 예를 들면, 아마존 강 유역에서 삼림벌채가 계속 증가되면 심각한 가뭄을 유발할 수 있고 중국에는 산불의 위험을 증가시킬 수 있다. [WGII 5.3.2.2]

4.2.3.1 농작물

일반적으로, 고위도 지역에서의 알맞은 기온 상승(온난

화)은 농작물과 목초의 수확에 유의할 수 있으나, 저위도 지역에서 기온이 약간 상승하거나, 혹은 계절적으로 건조한 지역들에서는 수확량에 불리한 영향을 줄 수 있다. 광범위한 지점에 대한 모델링 결과에 의하면 고위도 지역에서는 국지 기온이 1~3°C 상승하면 그에 따라 CO₂ 양이 증가하고 강우량도 증가하여 농작물 수확량에 작지만 유의한 영향을 미칠 수 있는 것으로 보고되고 있다. 그러나, 저위도 지역에서는 기온이 1~2°C 상승하면 주요 농작물의 수확에 부정적인 영향을 미칠 가능성이 있다. 뿐만 아니라, 온난화는 모든 지역에서 점점 부정적인 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다. [WGII 5.ES]

척박한 토양과 물 부족, 가난한 생활상 등으로 인해 농업이 현재로서는 한계 산업 (marginal enterprise)인 지역들은 물에 미치는 기후변화 영향의 결과로 점점 어려움에 처해질 수 있다. 따라서, 기후에 아주 작은 변화가 생기더라도 기아 인구수는 증가할 위험성이 있으며, 이 영향은 아프리카 사하라 사막 부근 지역에서 특히 클 것이다. [WGII 5.ES]

극한 기후 사상의 발생 빈도가 증가하면 평균적인 기후 변화 영향을 추월하게 되어 농작물 수확량이 감소할 수 있다. TAR 이후의 모의 연구에서는 기후변화 시나리오 내에서 기후 변동성의 증가를 구체적으로 고려했었다. Rosenzweig et al. (2002)는 증가된 대규모 강수가 발생하는 시나리오 하에서 과도한 토양 수분으로 인한 생산 손실은 2030년에 미국에서는 2배가 되어 연간 30억 불에 달할 것으로 계산하였다. 방글라데시에서는 농작물 손실의 위험은 기후변화 하에서의 높은 홍수 빈도로 인해 증가할 것으로 전망되고 있다. 마지막으로, 강한 강우 강도를 고려하는 기후변화 영향에 대한 연구는 토양 침식의 위험성이 커지고 건조지역과 반 건조지역에서는 강한 강우 강도는 농작물의 뿌리 지대를 통과하는 증가된

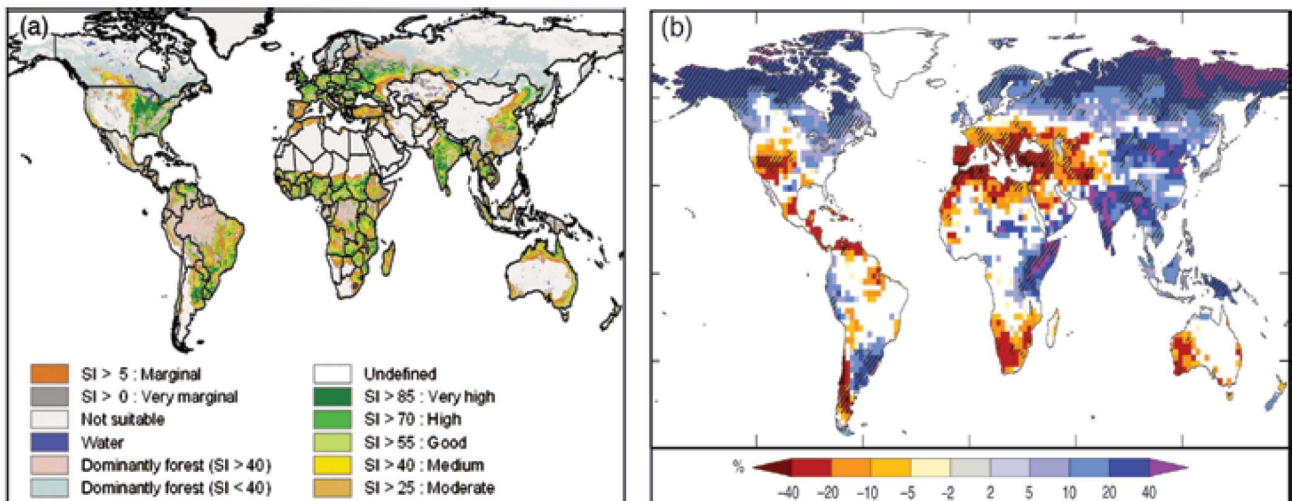


그림 4.1: (a) 천수답 농작물 경작을 위한 현재의 적합도(삼림 생태계 제외), (Fischer et al., 2006b). SI (Suitability Index)는 적합도 지표를 표시함. [WGII Fig. 5.1a]; (b) 현재(1980~1999)와 2090~2099년 기간 사이의 연평균 유출량의 양상률 평균 변화량의 전망치(%)

물 손실 때문에 염수화의 높은 가능성과 관계가 있을 수 있다고 주장하고 있다. [WGII 5.4.2.1]

관개용수 수요량에 미치는 기후변화의 영향은 클 수 있다. 몇 가지 새로운 연구는 농작물의 물 사용 효율성에 미치는 CO₂의 긍정적 영향에 관계없이 지역적 혹은 전 지구에 걸친 관개용수 수요량에 미치는 기후변화 영향을 정량화 해 보았다. CO₂의 영향은 없는 것으로 하여 농작물의 증발 수요에 미치는 기후변화의 직접적인 영향을 포함시켜 Döll (2002)은 2070년까지 전 지구적으로 5%에서 8%에 달하는 농작물의 순 관개수요량(순 증산 손실량)의 증가를 산정하였으며, 동남 아시아 지역에서의 증가율(+15%)이 가장 큼을 밝힌 바 있다. [WGII 5.4.2.1]

Fischer et al. (2006)은 농작물의 물 이용 효율에 미치는 긍정적인 CO₂ 영향을 밝힌 한 연구에서 기후변화 아래에서의 증가된 증발 수요와 더 길어진 성수기로 인해 2080년까지 전 지구적인 순 관개용수 수요량이 20% 정도 증가하는 것으로 산정하였으며, 개발 선진국에서의 영향이 개발도상국에서 더 클 것임을 밝혔다. Fischer et al. (2006)과 Arnell et al. (2004)은 또한 중동과 남동 아시아에서의 물 스트레스(재생가능 수자원량에 대한 관개용 취수량의 비로 측정)가 증가할 것으로 전망하였다. 마찬가지로, 최근의 여러 지역 연구들은 북아프리카(관개용수 수요량의 증가; Abou-Hadid et al., 2003)와 중국(관개용수 수요량의 감소; Tao et al., 2003a) 등 주요 관개지역에서의 핵심적인 기후변화와 물역학 간의 관계를 밝힌 바 있다. [WGII 5.4.2.1]

국가 차원에서의 통합적인 연구들은 많이 있다. 미국에서는 기후변화에 대한 농업 부문의 적응에 관한 2가지 모델링 연구는 여러 가지 기후변화 시나리오 아래에서 2030년 이후까지 관개면적과 관개용수 취수량 둘 다 감소할 것으로 내다보고 있다(Reilly et al., 2003; Thomson et al., 2005a). 이것은 높아진 기온으로 인한 관개 농작물의 수확량 감소에 의하거나, 혹은 증가한 강수량으로 인한 천수답 농작물의 수확량 증가에 의해 발생한 관개답과 천수답 농사 사이의 수확량 차이가 작아진 것과 관계가 있다. 이들 연구에서는 일 강수량의 변동성 증가가 고려되지 않았으며, 따라서 천수답으로 부터의 수확량은 아마도 과대 산정되었을 가능성이 있다. [WGII 3.5.1]

개발도상국에 대한 FAO의 연구에서 2030년까지 약 14%의 관개용수 취수량의 증가가 있을 것으로 내다보았으며, 이 연구에서는 기후변화 영향을 고려하지 않았다(Bruinsma, 2003). 그러나, 4가지의 Millennium Ecosystem Assessment 시나리오에서는 관개지역이 2030년까지는 0~6%, 2050년까지는 0~10% 밖에 증가하지 않을 것으로 가정하였기 때문에 전 지구 규모의 관개용수 취수량이 훨씬 적게 증가할 것으로 전망하고 있다. [WGII 3.5.1]

압도적인 물 사용량의 증가는 가정용수 및 공업용수 부문에서 발생할 가능성이 있으며, 취수량은 2050년까지 14~83%가 증가할 것으로 보고 있다(Millennium Ecosystem Assessment, 2005a, b). 이는 물의 가치가 가정용수와 공업용수에 대해서는 훨씬 높은 것이라는 생각에 근거하고 있으며, 이러한 생각은 물 스트레스 조건 아래에서는 특히 틀림이 없다. [WGII 3.5.1]

국지적으로는, 관개 농업은 하천 유량의 공간적 및 시간적 분포에 연관된 새로운 문제점에 직면할 수도 있다. 예를 들면, 저 위도 지역, 특히 동남아시아 지역에서의 조기 용설은 봄철 홍수 범람을 일으킬 수 있으며, 또한 여름철 관개용수 부족 문제를 야기할 수도 있다. [WGII 5.8.2]

4.2.3.2 목초 및 가축

세계의 많은 목장 지역들은 반 건조 지역에 위치하고 있어서 물 부족을 겪게 되며, 수자원 양이 크게 감소하면 하천의 유하 능력에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서, 증가된 기후의 변동성과 가뭄으로 인해 가축의 손실을 입게 된다. 구체적으로는, 일기 패턴의 변동성이 커짐에 따른 동물의 생산성에 대한 영향은 평균적인 기후 조건의 변화와 관련된 영향보다 훨씬 커질 가능성이 있다. 일기 사상에 사전에 적응하지 못해서 가장 자주 발생하는 재앙에 가까운 손실은 가축 사육장에서 발생하며 가축의 생산적 활동이 줄어들게 되어 발생하는 경제적 손실은 가축의 사망과 관련된 손실보다 몇 배씩 커진다. [WGII 5.4.3.1]

세계의 많은 목장 지역들은 엘니뇨 남방 진동(El Niño-Southern Oscillation, ENSO) 사상의 영향을 받는다. 건조 지역에서의 ENSO 관련 가뭄 사상 발생 시에는 토양과 식생의 퇴폐와 강우량의 감소 사이의 긍정적인 피드백 위험성이 있어서 목축지 및 농경지의 손실을 가져오게 된다. [WGII 5.4.3.1] 그러나, WGI TAR은 기후변화 하에서의 ENSO의 발생 빈도가 증가할 가능성을 시사한 반면, WGI AR4는 ENSO와 기후변화 사이의 상관성을 발견하지 못하였다. [WGI TAR SPM; WGI 10.3.5.4]

전 세계에 걸친 실험 자료의 조사에 의하면 가벼운 온난화는 일반적으로 초지의 생산성을 증가시키며 고위도 지역에서 가장 강한 긍정적인 반응을 하게 되고, 목장지에서의 식물 종들의 생산성과 구성은 강수량과 높은 상관성을 가지는 것으로 밝혀져 있다. 뿐만 아니라, 최근의 발견(그림 4.1 참조)에서는 주요 초지와 목장 지역들에서는 강수량이 감소하는 것으로 추정되고 있다(남미, 아프리카의 남부 및 북부, 아시아의 서부, 유럽의 남부 지역 등). [WGII 5.4.3.2]

대기 중의 CO₂ 증가는 여러 토종 및 반 토종의 온대성 및 지중해성 초지에서의 토양 수분 저하를 감소시킬 수 있다. 그러나, 기후변화와 관련하여 강우량의 변동성이 증가하고 기온이 더 따뜻해지면 더 심하게 토양 수분을 제한하게 되어 생산성을 떨어뜨릴 수도 있고 CO₂의 유익한 효과를 상쇄할 수도 있다. 가축에 미치는 기타 영향들은 열 부하의 증가를 통해 직접 발생하게 된다. [WGII 5.4.3.2]

4.2.3.3 어업

어류 양식과 담수 어업에 미치는 기후변화의 부정적 영향에는 증가된 기온 및 산소 요구량과 감소된 pH로 인한 스트레스, 불확실한 미래의 수질과 수량, 극한 일기 사상, 어류 관련 각종 질병과 독성 사상의 발생 빈도 증가, 해수면의 상승과 해안 보호 필요성에 대한 관심과의

Box 4.1: 기후변화와 메콩 강 하류부에서의 어업 - 거대 델타지역의 어업 시스템에 미치는 인간 활동의 영향으로 인한 복합적인 스트레스의 예. [WGII Box 5.3]

어업 활동은 메콩 강 하류 지역에서 생활하는 사람들 (특히, 시골에서 사는 가난한 사람들)의 생존에 대단히 중요하다. 메콩 강 유역의 6,000만 명 인구의 2/3는 어떤 형태로든 어업 활동에 참여하고 있으며, 캄보디아와 라오스 공화국 GDP의 약 10%를 차지한다. 메콩 강에서 발견되는 어종은 약 1,000여개에 달하며 해양성 어류도 대단히 많아서 전 세계에서 가장 다산(多産)의, 그리고 다양한 어류군 서식처 중의 하나가 되어있다 (MRC, 2003). 포획 어업 (capture fisheries)만으로 부터의 최근 연간 어로 수확량은 250만 톤을 초과하는 것으로 추정되고 있으며, 이중 약 30%는 델타 지역에서의 수확량이다.

기후변화의 직접적인 영향은 유역의 수문과 수질에 영향을 미치는 강수와 용설, 해수면 상승 등의 패턴 변화로 인해 발생할 것이며, 간접적인 영향은 먹이사슬을 변화시키고 토양 침식을 증가시키는 식생 패턴의 변화 때문에 생길 것이다. 어업 활동에 미치는 인간의 영향 (인구 증가, 홍수 경감, 취수량의 증가, 토지이용의 변화, 과도한 어획 등)은 기후의 영향보다 클 것이나 이들 2가지 종류의 영향은 서로 깊이 관련되어 있다.

메콩 강을 흐르는 유량에 미치는 기후변화 시나리오별 영향 분석 (Hoanh et al., 2004)에서 유역의 최대 월 유량의 증가폭은 35~41%이고 델타 지역에서는 16~19%인 것으로 추정되었다 (하한치는 2010~2038년에 대한 것이고, 상한치는 2070~2099년에 대한 것임. 비교 기준 년도는 1961~1990년임). 최소 월 유량은 유역에서는 17~24% 감소하며, 델타 지역에서는 26~29% 감소하는 것으로 추정되었다. 홍수 범람의 증가는 어류 수확량에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 보고 있으나 건조 기간 동안 서식하는 종의 감소는 일부 종의 회복을 감소시킬 수 있다. 그러나, 댐 등을 포함하여 물 관리 계획을 잘 세워서 운영하면 유역의 수문에 반대의 영향을 미치게 할 수도 있다. 즉, 우기의 하천 유량을 최적 수준으로 감소시키고 건기의 유량을 적절한 수준으로 증가시키는 등의 물 관리가 가능할 수 있다 (World Bank, 2004b).

모델에 의한 분석에 의하면 해수면 상승이 그렇게 크지 않는 20cm 정도만 되더라도 메콩 강 델타 지역에서의 등수위 곡선이 홍수기 동안에는 25km 정도 내륙 지역으로 이동하며, 건기 동안에 염수는 인공 수로 내에 갇히기는 하지만 더 상류 방향으로 침입하게 된다 (Wassmann et al., 2004). 내륙 지역으로의 염수의 이동은 어업 측면에서의 종의 구성에 큰 변화를 줄 것이나 전반적인 어획량에는 크게 불리하지는 않을 수도 있다.

갈등, 그리고 포획한 물고기로 부터의 어분 (fishmeal)과 어유 (fish oil)의 불확실한 미래 공급 가능성 등이 포함된다. 개발도상국에서의 어업에 미칠 수 있는 복합적인 스트레스에 대한 한 가지 사례 연구 결과가 Box 4.1에 정리되어 있다. [WGII 5.4.6.1]

긍정적인 영향에는 성장물과 식량으로의 가공 효율의 증가, 성수기 기간의 증가, 범위의 확대, 그리고 얼음의 용해에 따른 어로 활동 면적의 증가 등이 포함된다.

4.2.4 적응, 취약성, 그리고 지속 가능한 개발

물 관리는 다가오는 수십 년 동안 기후와 사회·경제적 압력에 직면하여 적응 (adaptation)해 나갈 필요가 있는 결정적인 요소라 아니할 수 없다. 물 사용에 있어서의 변화는 물 가용량의 변화, 토지와 도시 지역을 포함하는 기타 경쟁 관계에 있는 다른 부문으로부터의 물 수요의 변화, 그리고 물 관리에 있어서의 변화 등의 영향이 포함되어 나타날 것이다.

관개용수 사용의 생산성 (단위 물 사용량 당 농작물 생산량으로 정의)을 증가시키는 여러 가지 실무 대책들은 장래 기후 변화 하의 모든 토지 생산 시스템을 위한 중요한 적응 잠재력을 제공할 수 있다. 동시에, 관개 효율의 개선은 식량 생산과, 서로 경쟁하는 관계에 있는 인간과 환경의 요구 둘 다를 위한 물의 가용성을 보장해 주는데 필수적이다. [WGII 3.5.1]

몇 가지 모델에 의한 모의 연구는 아주 낮거나 온화한 온난화 (moderate warming)가 진행될 경우 토지 부문에 있어서의 적응책의 상대적 편익 가능성이 있음을 주장하고 있다. 그러나, 온난화가 더 심해지면 여러 반응 전략들은 물과 기타 환경 자원에 추가적인 스트레스를 줄 수도 있다. *자율적인 적응 (autonomous adaptation)*이란 다가오는 수십 년 동안에 감지되거나 실제로 일어나는 기후변화에 지역적, 국가적, 그리고 국제 협약 등을 통한 협력이나 간섭 없이 개개 농부나 마을 혹은 농민 조직들에 의해 이루어질 수 있는 반응이라 정의될 수 있다. 이 때문에 불모지를 경작하거나 수확량이 떨어질 때 지속 가능하지 못한 경작 방법을 채택하는 등의 부적응(否適應, maladaptation) 조치는 토지의 황폐화를 가속시키고 야생하는 종과 사육하는 종들의 생물 다양성을 위협하게 되어 급세기 후반에 예상되는 기후변화로 인한 위험성의 증가에 대응할 능력을 위태롭게 할 가능성이 있다. 따라서, 정책의 변화와 조직 및 필수 기반시설을 포함하는 *계획된 적응 (planned adaptation)* 조치는 기후변화에 대한 적응 조치의 장기 편익을 촉진시키고 극대화시키기 위해 꼭 필요할 것이다. [WGII 5.5]

4.2.4.1 자율적인 적응

자율적인 적응을 위한 대안들은 크게 보면 기존하는 위험 관리와 생산 증진을 위한 활동의 연장 혹은 강화라 할 수 있으므로 농민들이나 지역사회에 이미 잘 알려져 있다고 볼 수 있다. 물과 관련한 이들 대안들을 열거하면 다음과 같다.

- 열에 의한 충격이나 가뭄에 저항력이 큰 종의 채택
- 양(量)이나 시기 혹은 기술을 포함한 관개 기법의 개량
- 물을 획득하고, 토양 수분을 보존하며, 토사 침전과 염수 침입을 감소시키는 물의 효율적 관리 기술의 채택
- 워터로깅(waterlogging)이나 토양의 침식과 여과 등을 방지하기 위한 물 관리의 개선
- 농작물 율력(crop calendars), 즉 경작 활동의 시기와 위치 등의 수정
- 계절 기후 예보의 실행

추가적인 적응 전략으로는 수정된 농업 기후 조건의 이점을 활용하는 토지 이용의 변화를 들 수 있다. [WGII 5.5.1]

몇몇 모의 연구들은 기후변화 영향을 감소시키기 위한 적응 기법 중의 하나로서 관개용수의 중요성을 강조한다. 그러나, 일반적으로 적응 조치로부터의 가장 큰 편익은 온난화가 작거나 온화한(low to moderate) 조건에서 얻어지며, 관개용수의 사용을 늘리는 적응 대책을 사용하게 되면 온난화가 심해지고 증발수요가 증가함에 따라 물과 환경 자원에 추가적인 스트레스를 줄 수도 있을 것으로 전망하고 있다. [WGII 5.8.1]

물 문제에 직접적인 초점을 맞추지는 않았지만 농작물 생산이 아닌 주요 생산 부문에서 여러 적응 전략들이 탐색된 바 있다. 어떤 형태로든 물의 사용에 영향을 줄 수 있는 적응전략들에는 여러 가지가 있다. 가축 시스템에 대한 적응전략에는 목초의 윤번 경작, 방목의 시기 변경, 마초(forage)와 동물 종의 변경, 가축-농작물 혼합 시스템의 통합 등이 있으며, 적응된 먹이 농산물의 사용이라든지

적절한 물 공급을 보장하기 위한 관심, 보조적인 사료의 사용등도 이에 포함된다. 반 건조 및 건조지역에 위치한 케냐(Kenya)와 에티오피아(Ethiopia)에서의 목축민들의 적응 전략에 관해서는 Box 4.2에 요약 정리되어 있다. [WGII 5.4.7]

임업 분야의 적응 전략은 삼림 관리 강도와 수림 종의 혼합, 윤번 경작 기간 등의 변화와 달라진 나무의 크기 및 질에 대한 적응, 산불 관리 시스템의 조정 등을 포함한다. [WGII 5.5.1]

양식 및 담수 어업을 제외한 해양 생태계에 관해서는 자연산 어류군의 개척은 농작물이라든지, 가축 및 삼림 부문에 대하여 제안되는 기후변화 적응 대책들이 해당되지 않는다. 따라서, 적응 대안은 물고기의 포획 규모와 노력을 변경시키는 것을 중점 목표로 한다. 어업과 해양 생태계의 개척을 지배하는 새로운 규정들이 제정되어 적용되고 있어서 자율적 적응의 범위는 점점 제약을 받고 있다. [WGII 5.5.1]

만약 광범위하게 채택된다면, 생산 시스템에 있어서의 적응전략은 부정적인 기후변화 영향을 상쇄하고 긍정적인 영향을 얻을 수 있는 상당한 잠재력을 가진다. 그러나, 의사결정의 복잡한 성격이라든지, 여러 지역에 걸친 기후변화 대응의 다양성, 실행에 있어서의 시간 지체, 기후변화에 대한 경제적, 조직 기구상 및 문화적 장벽 등 때문에 이들 적응 조치들이 얼마나 효과적으로 널리 채택될 수 있는지에 대한 평가는 별로 되어오지 못했다. 예를 들면, 가난한 생계형 농경사회의 실현 가능한 적응 능력은 대체로 대단히 낮은 것으로 생각된다. 마찬가지로, 삼림의 많은 부분은 인간의 직접적인 관리를 최소한으로

Box 4.2: 케냐의 북부 및 에티오피아 남부 지역에서의 목축민의 적응 전략 [WGII Box 5.5]

아프리카의 목농주의(牧農主義, pastoralism)는 대단히 심한 강우의 공간적 및 시간적 변동성을 가진 거친 환경에 적응하려는 데서 태생되었다(Ellis, 1995). 최근의 몇 가지 연구(Ndikumana et al., 2000; Hendy and Morton, 2001; Oba, 2001; McPeak and Barrett, 2001; Morton, 2006)는 케냐의 북부 지역과 에티오피아의 남부 지역에서 발생한 최근의 가뭄기간 동안 목농주의자들에 의해 사용된 대응 전략과 이에 근거한 장기 적응 방안에 초점을 맞추어 연구하였다.

- **기동성(mobility)**은 강우의 공간적 및 시간적 변동성에 대한 목농주의자들의 가장 중요한 적응 방안이며, 가뭄년에는 여러 마을들이 거리가 멀거나, 토지 소유의 제한, 동물 관련 질병 혹은 갈등 때문에 정상적인 건조 기간 동안에는 사용하지 않는 방목지를 사용하게 된다. 그러나, 공공 방목지의 접근·사용과 인간의 서비스와 식량 보급을 받기 위해 정착하려는 욕망은 목농주의자들의 기동성을 심각하게 제한해 왔다.
- 목농주의자들은 **소떼의 방목(herd accumulation)**에 중사하며 현재의 여러 정황들에 의하면 이것은 가뭄에 대비하는 일종의 보험인 것이다.
- 목농주의자들 중 일부는 그들의 부(富)를 은행계좌에 축적하고 있으며, 다른 일부는 점포 보유를 통해 비공식적인 저축이나 신용 메커니즘을 사용한다.
- 목농주의자들은 적응 전략으로서 나무를 베어서 가축을 위한 보조적인 사료로 사용하며, 고유한 과학적 기법을 사용하여 **동물의 질병 관리(animal disease management)**를 강화하며, 지하수공으로부터 물을 획득하기도 한다.
- 이 지역에서 목농주의로부터 탈피하는 **생계의 다양화(livelihood diversification)**는 이전의 취약성을 감소시키기 위한 적응 전략 보다는 숲의 생산과 같은 저소득의, 혹은 환경적으로 지속 가능하지 못한 직업으로의 전직의 형태를 대부분 취한다.
- 다수의 **지역 사회 내부의 메커니즘(intra-community mechanism)**은 가축의 생산품과 빈곤자들에게 살아있는 동물을 이용하는 일을 분배하게 되나, 이와 같은 일들은 지역 사회 내의 높은 위험도 때문에 실패하고 마는 것으로 보인다.

만 받기 때문에 적응 기회 또한 제한된다. 적응 활동을 보다 더 실행할 수 있는 보다 강도 높게 관리되는 삼림 지역에서 조차 식목과 벌채간의 긴 시간 지체로 인해 효과적인 적응 전략의 채택을 복잡하게 할 수도 있다. [WGII 5.1.1]

4.2.4.2 계획된 적응

계획된 적응 방안은 새로운 관리 및 토지 이용에 의한 편익을 확보하고, 조정하며, 극대화 할 수 있는 새로운 기반 시설과 정책, 그리고 조직을 개발하는데 초점을 맞추어야 한다. 이는 각종 개발 계획에서 기후변화를 고려하고, 관개용 기반시설과 효율적인 물 사용 기술에의 투자를 늘리며, 적절한 수송 및 저류용 기반 시설을 확보하며, 토지 보유 제도를 개정하며 (잘 정의된 재산권에 대한 관심 포함), 생산품과 입력 및 보험을 포함하는 재정적 서비스에 대하여 효과적으로 기능을 발휘하는 시장의 형성 (물 가격 시스템 포함)등을 포함하는 개선된 지배 구조(governance)를 통하여 성취될 수 있다. [WGII 5.5]

특히, 수확량의 감소가 토지의 황폐화와 물을 포함하는 자원의 사용을 증가시키는 불모지의 경작과 지속 가능하지 못한 경작 방법을 채택하도록 압력을 가하는 곳에서는 계획된 적응 방안과 여러 기관 간 정책 협조는 기후 변화에의 적응을 손쉽게 하는데 필요할 수 있다. [WGII 5.4.7]

전 지구적, 국가적 그리고 유역규모의 수많은 적응 방안에 대한 평가에 따르면, 일반적으로 반 건조 및 건조지역의 유역이 물 스트레스와 관련하여 가장 취약한 것으로 밝혀져 있다. 강수량이 감소할 경우, 관개용수 수요를 충족시키려면 다른 목적의 모든 물 수요를 충족시키는 것이 불가능해진다. 미국 캘리포니아 주의 Sacramento-Joquin과 Colorado 강 유역에 대하여 전망된 하천 유량의 변화를 보면 현재의 물 수요는 적응 관리 방안이 강구된다더라도 2020년까지는 충족될 수 없을 것으로 보인다. 증가되는 관개용수의 사용은 유출 총량과 하류하천으로의 유량을 감소시킬 것이다 (Eheart and Tornil, 1999). [WGII 3.5.1]

시장 메커니즘이나 각종 규정과 개선된 거버넌스를 통해 관개의 효율성을 획기적으로 개선하기 위한 정책들은 지역 단위 규모에서 적응 능력을 증진하는 데에는 대단히 중요한 수단이 된다. 바람직하지 못한 결과 중의 하나는 하천 상류에서의 소비 수량의 증가일 수 있으며, 이는 회수수의 형태로 하천으로 되돌아갔을 물을 하류의 물 사용자들로부터 박탈하는 결과를 초래하게 되는 것이다 (Huffaker, 2005). [WGII 3.5.1]

오늘날 농민들과 토지 관리자들이 이미 사용 가능한 기법에 추가하여 향후 수십 년 동안의 기후 변화에 반응할 수 있는 전반적인 능력을 보완하기 위해서는 오늘날 농민들과 토지 관리자들이 이미 사용 가능한 기법에 추가하여 새로운 기술적 대안들이 각별한 연구·개발 노력을 통해 실무에 계획되고 적용될 수 있도록 되어야 한다. 진보된 R&D를 위한 기술적 대안에는 전통적인 번식 방법과 농작물, 마초 (forage), 가축, 삼림, 어류종 등이 가뭄과 홍수와 같은 기후학적 스트레스에 보다 잘 저항할 수 있도록 하는 생물공학 (biotechnology) 등이 포함된다 (Box 4.3).

Box 4.3: 생물공학이 농업 및 임업 측면에서의 기후변화 적응을 도울 것인가? [WGII Box 5.6]

생물공학과 전통적인 재배방법은 기후변화 조건에 보다 더 잘 적응할 수 있는 필요한 개량된 특성을 가지는 새로운 재배종의 개발을 도울 수 있다. 이들 특성에는 가뭄이나 기온으로 인한 스트레스에의 저항력, 해충과 질병, 염분 등에 대한 저항력 등이 있다. 새로운 재배종을 위한 추가적인 기회에는 생물 기후학이나 증가된 CO₂에 대한 개선된 반응 방법이 있어서의 변화 등이 포함된다. 물과 관련하여, 비록 다른 농작물에 광범위하게 확대 적용하기는 힘들지만 물 부족 허용오차를 증가시킨 주요 농작물 중 (옥수수과 콩 등)에 대한 유전학적 변형에 관한 연구들 (Drennen et al., 1993; Kishor et al., 1995; Pilon-Smits et al., 1995; Cheikh et al., 2000)이 다수 있어 왔으며 관련 이론도 정립되어 있다. 그러나, 유전학적 변형에 의해 성취하고자 하는 종의 특성이 실제의 농업이나 임업 활동에서 어떻게 나타날 것인지에 대해서는 알려진 것이 현재로서는 너무나 적은 것이 사실이다 (Sinclair and Purcell, 2005).

4.2.4.3 식량 안보와 취약성

식량의 가용성 (생산 및 거래), 식량의 확보, 식량공급의 안정성, 식량의 활용 (식량의 확보와 소비에 포함되는 실제의 여러 과정)등 식량 안보의 4가지 측면은 모두 기후변화의 영향을 받을 가능성이 있다. 중요하게도 식량 안보는 식량 생산에 미치는 기후와 사회·경제적 영향에만 의존하는 것이 아니라 식량의 거래 흐름 (trade flow)이나 비축량과 식량 원조 정책 등에 의해서도 영향을 받는다. 특히, 기후변화는 식량의 생산과 확보에 있어서 지역에 따라 크게 다른 영향을 미치게 된다. 척박한 토지와 수자원 조건 때문에 이미 심각한 식량 안보 문제에 직면하고 있는 열대 지역에 있는 많은 개발도상국들은 기후변화에 특히 취약할 수 있다. [WGII 5.6.5]

가뭄과 홍수의 발생 빈도와 강도에 있어서의 변화는 결정적인 식량 공급의 안정성과 식량 확보에 영향을 미치게 될 것이다. 강우량 부족은 반 건조 지역에서의 농작물 수확량과 가축 두수를 크게 감소시킬 수 있으며, 저지대에서의 홍수 범람과 해안 침식으로 인한 경작 토지와 해안 어장의 손실로 인해 식량 확보의 불안과 생계의 손실은 크게 악화될 것이다. [WGII 5.6.5]

기후변화는 환경 자원에 미치는 영향을 통해서 식량의 활용에도 영향을 미칠 수 있어서 중대한 추가적인 건강 문제를 야기하게 된다. [WGII Chapter 8] 예를 들면, 이미 물이 부족한 지역, 특히 아열대 지역에서의 물 가용량의 감소는 식량의 처리공정과 소비에 직접적으로 부정적인 문제를 일으키게 된다. 반대로, 해수면 상승과 증가된 강한 강수로 인한 해안 지역의 주거 지역에 대한 홍수 범람 위험성의 증가는 식량의 오염과 질병의 발생 우려를 높일 수 있어서 식량의 소비 패턴을 감소시키게 된다. [WGII 5.6.5]

4.2.4.4 수질의 문제

개발도상국에서의 물의 미생물학적 질은 위생처리의 미흡과 적절한 물 처리 방법의 부족, 열악한 건강조건 등으로 인해 대체로 나쁘다 (Lipp, et al., 2001; Jiménez, 2003; Maya et al., 2003; WHO, 2004). 기후변화는 특히 개발도상국에서 수질에 추가적인 스트레스를 가할 수도 있다 (Magadza, 2000; Kashyap, 2004; Pachauri, 2004). 그러나, 아직까지는 관개를 위해 사용되는 제대로 처리되지 않은 폐수의 영향과 그의 전염성 기생충병 (helminthiasis)과의 연관성 등에 초점이 맞추어져야 할 문제 등을 포함하여, 기후변화 하에서의 개발도상국과 관계가 있는 미생물의 라이프 사이클 (life cycle)에 관한 연구는 별로 없다 (WHO/UNICEF, 2000). [WGII 3.4.4]

세계 인구의 약 10%는 전혀 처리되지 않았거나 제대로 처리되지 못한 폐수로 관개된 농작물을 소비하고 있으며 이들은 주로 아프리카, 아시아, 라틴 아메리카의 개발도상국에서 살고 있다. 이와 같은 10%라는 숫자는 인구와 식량 수요가 증가함에 따라 커질 것으로 전망되고 있다. 따라서, 관개를 위해 제대로 처리되는 폐수의 사용량 증가는 물 부족과 이와 관련된 인간의 건강문제와 싸우는 한 가지 전략이라 할 수 있다. [WGII 3.4.4]

4.2.4.5 농촌 마을, 지속 가능한 개발과 물 갈등

유역간의 물 관련 협력은 동일한 자원을 공유하고 있는 넓은 지역에 걸친 물 관리를 개선하기 위한 효과적인 정책이며 관리 수단으로 인식되고 있다. 다가오는 수십 년 동안의 기후변화와 용수 수요의 증가는 그와 같은 협약에서는 추가적인 도전이 될 것이며, 국지적으로는 물 갈등의 잠재성을 증가시킬 것이다. 예를 들면, 기후변화 관련 물 부족에 적응하기 위한 일방적인 수단들은 수자원에 대한 경쟁을 심화시킬 수 있을 뿐만 아니라, 토지의 생산성의 변화는 생산을 유지하는데 필요한 일련의 새로운, 혹은 수정된 농업 시스템의 등장을 가져올 수 있으며, 이는 추가적인 환경적 압력을 낳을 수 있어서 서식처의 손실과 생물 다양성의 손실, 침전, 토양 침식 및 토양의 황폐화 등을 가져올 수 있다. [WGII 5.7]

무역이나 경제적 및 환경적 개발과 토지 이용에 미치는 영향은 European Biomass Action Plan에 의하는 것처럼 바이오 연료 (biofuel)로 화석 연료 (fossil fuel)를 대체하기 위해 사용된 여러 가지 수단으로부터 예상될 수도 있다. 대규모 바이오 연료의 생산은 비료와 농약에 대한 수요 라든지, 영양물질의 순환, 에너지 균형, 생물 다양성 영향, 수문 및 침식, 식량 생산과의 갈등, 요구되는 재정 지원의 정도 등을 포함하는 여러 가지 문제점에 대한 의문을 제기하고 있다. 사실상 다가오는 수십 년 동안 직면하게 될 도전에는 식량과 임업과 에너지 부문을 위한 토지와 원자재에 대한 경쟁에서 균형을 찾는 일이 포함된다. 예를 들면, 에너지와 기후변화 영향의 완화 필요성을 극대화하면서 식량과 지방의 개발 권리를 보장해 줄 수 있는 해결책을 강구해주는 등의 일이다. [LULUCF 4.5.1]

북미에서는 대륙 내부에서 가뭄이 심해질 수 있으며, 생산 지역은 북쪽으로 옮겨갈 수 있고 (Mills, 1994), 특히 옥수수과 콩의 생산이 북쪽으로 올라갈 것으로 보고 있다 (Brklacich et al., 1997). [WGII TAR 15.2.3.1] 멕시코에서는 옥수수 재배에 적당한 농업·생태 지대 (agro-

ecological zones)가 감소함에 따라 생산 손실은 가뭄에 의해 지배될 수 있다 (Conde et al., 1997). [WGII TAR 14.2.2.1] 가뭄은 사회적, 정치적, 지리적 및 환경적 이유로 호주 전역에 걸쳐 대단히 중요한 문제가 되고 있다. 강우량의 부족과 증발 수요의 증가 때문에 유발되는 건조 상태로의 기후변화는 현재의 호주의 가뭄정책 기초 아래에서는 보다 빈번하게 긴 기간의 가뭄이 선포될 것으로 보고 있다. [WGII TAR 12.5.6]

아프리카 지역에서의 가정용수나 공업용수 공급에 있어 수자원은 가장 큰 취약성을 가진다. 공유 하천 유역에서는 서로간의 나쁜 영향이나 갈등의 잠재성을 최소화하기 위하여 지역 간 협약 체결이 필요하다. 예를 들면, Lake Chad의 수표면의 면적은 건조기의 20,000km²에서 습윤기의 50,000km²로 변동한다. Chad와 Nigeria, Cameroon, Niger간에는 정확한 경계가 설정되어 있으나, Lake Chad로 흘러들어가는 하천에 위치한 이들 경계에 의한 지역 구분은 결정된 바가 없어서 홍수 범람이나 호수 수위가 급격히 강하했을 때에는 추가적으로 복잡한 문제가 발생했다. Botswana와 Namibia 사이에 흐르는 Kovango 강에서의 위와 유사한 문제는 군사적 대치에 이르기까지 한 바도 있다. [WGII TAR 10.2.1.2]

여러 나라가 관련되는 광대한 지역에 걸쳐 분포된 줄어드는 자연 자원에 대한 국가 간 경쟁과 심해져가고 있는 물의 희소성, 증가하는 인구, 공유 담수 생태계의 황폐화 등은 양국 간 혹은 다국 간 갈등을 일으킬 잠재성을 가진다. 아프리카의 반 건조 지역에서는 새로운 계절 방목지를 찾기 위한 국가 간 이주자를 포함하는 목농 마을을 중심으로 목농주의는 주된 경제 활동이 되고 있다. 가뭄이 심각해지면 이러한 목농주의자들은 정착되어 있는 토지 시스템과 갈등 관계에 빠질 수도 있다. [WGII TAR 10.2.1.2]

아시아 지역은 전 세계의 어류 양식업을 지배하고 있으며, 중국에서만 전 세계의 생선, 새우, 조개 종류 생산량의 약 70%를 생산하고 있다 (FAO, 2006). 식용 단백질의 한 중요한 원천인 어류는 아시아의 많은 국가에서의, 특히 해안 지역의 가난한 마을에서, 식량 안보에 대단히 중요하다. 어류의 양식은 토지와 물을 필요로 하며, 이들 두 자원은 아시아의 많은 지역에서 이미 공급 부족 상태에 있다. 새우 양식용 호수로의 지하수의 양수 공급은 태국의 해안 지역에서의 지하 수위를 크게 강하시킨 바 있다. [WGII TAR 11.2.4.4]

아시아 지역에서는 최소한 14개의 주요 국제 하천유역들이 존재한다. 유역 관리는 인구 밀도가 높은 나라에서는 대단히 도전적인 어려운 일이다. 왜냐하면, 높은 인구 밀도는 농작물 경작이라든지 주택 등 기타 강도 높은 인간 활동을 위해 유역 내의 가장 허약하고 부적당한 지역을 개발·사용하게 하는 주원인이 되기 때문이다. 따라서, 많은 국가들, 특히 방글라데시, 네팔, 필리핀, 인도네시아, 베트남 등의 국가에서 많은 하천 유역들은 삼림 벌채, 무차별 토지 전용, 과도한 토양 침식과 그로 인한 토지의 생산성 저하를 심각하게 겪고 있다. 만약, 적절한 적응 전략이 강구되지 않는다면 이들 유역은 기후 변화에 대단히 취약할 수밖에 없게 될 것이다. [WGII TAR 11.2.3.2]

4.2.4.6 완화

기후변화 영향에 적응하기 위한 반응과 기후변화 영향을 완화(mitigation)시킬 수 있는 작용은 농업이나 어업 부문에서는 동시에 일어날 수 있으며, 그의 효능은 다가오는 수십 년 동안의 기후변화가 어떤 형상으로 나타나는가에 달려있다. 이들 인자들(기후변화와 적응, 그리고 완화) 간의 상호작용은 종종 수자원과 밀접한 관계를 가지게 될 것이다. [WGIII 8.5, Table 8.9]

적응과 완화 전략은 적응과 완화의 두 작용이 서로 보완적인 관계를 가지거나 혹은 서로 반생산적이면 시너지 효과가 나타날 수 있다. 물과 관련하여 완화 대안을 감소시키는 적응 전략의 사례들은 물을 공급하는데 들어가는 에너지 비용과 변경된 재배방법에 관련될 수 있는 추가적인 온실가스 방출과 관련하여 관계와 크게 관계가 있다. 그러나, 물의 채취와 공급을 위한 재생 가능한 수단을 사용하면 이와 같은 갈등은 제거할 수 있다. 마찬가지로, 어떤 완화 전략은 물 확보를 위해 경쟁하고, 생물 다양성을 감소시켜 극한 기후에 대한 취약성을 증가시킬 수 있는 에너지성 농작물(energy crops)에 의존성을 높이는 것과 같은 부정적인 적응 결과를 낳을 수도 있다. [WGIII 12.1.4]

다른 한편으로는, 경작지의 감소라든지, 농작물 경작 밀도의 증가, 윤번 경작 시스템의 개선 등을 포함하는 여러 가지 탄소 저감 관리 방법들은 원래 효율적인 농업 및 임업 실무를 위해 개발되었었으며, 이들 방법들은 기후 변동성에 보다 탄력적으로 적응할 수 있는 생산 시스템으로의 개선을 유도하게 되어, 물과 토지 자원에 미치는 증가되는 압력 아래에서도 훌륭한 적응을 할 수 있도록 한다(Rosenzweig and Tubiello, 2007). [WGII 5.4.2; WGIII 8.5]

4.3 인간의 건강

4.3.1 개관

물리적, 사회적 및 심리적 행복을 가져다주는 인간의 건강은 적절한 음용수의 공급과 안전한 환경에 의존한다. 인간은 일기 패턴(보다 강한, 그리고 자주 발생하는 극한 사상)을 통해 직접적으로 기후변화에 노출되어 있으며, 간접적으로는 물과 공기, 식량의 질과 양, 생태계, 농업, 생계 및 생활 기반시설 등에 있어서의 변화를 통해 기후변화에 노출되어 있다. [WGII 8.1.1] 기후변화의 영향을 받을 수도 있는 사람들의 수가 너무나 많기 때문에 영양 불량과 물 부족은 기후변화로 인해 생길 수 있는 가장 중요한 건강 관련 문제일 수 있다(제 4.2 및 4.4절 참조). [WGII 8.4.2.3]

인간의 건강은 지난 50년 동안 현저하게 개선되어 왔으나 국가 간, 그리고 국내에서도 건강의 불평등성은 대단히 심해져왔던 것이 사실이다. 5세 미만 아동의 사망률을 2015년까지 현재의 2/3로 감소시키겠다는 새천년 개발목표(Millennium Development Goal, MDG)는 개발도상에 있는 많은 나라에서 달성될 가능성이 없다. 부실한 건강은 취약성을 증가시키고, 개인과 그룹이 기후변화에 적응할 수 있는 능력을 저하시키게 된다.

높은 질병률과 무능한 사람들은 기후변화에 관련되는 여러 가지를 포함하여 모든 종류의 스트레스에 성공적으로 적응하기가 상대적으로 어렵다. [WGII 8.1.1]

세계 보건 기구(World Health Organization, WHO)와 UNICEF의 Joint Monitoring Programme은 현재 11억 명(전 지구 인구의 17%)이 수자원의 부족을 겪고 있는 것으로 추정하고 있다. 여기서, 수자원의 부족이란 1km의 거리 이내의 적절한 수원으로부터 하루에 1인당 최소 20 리터의 물 사용이 가능하지 못하는 경우로 정의되며, 적절한 수원이란 가정 용수 공급용 송수관 혹은 지하수 관정에 연결되어 안전한 물을 제공하는 수원을 뜻한다. 이들 적절한 수원에의 접근이 어려운 인구의 약 2/3는 아시아 지역에 있으며, 아프리카의 사하라 사막 아래 지역에서는 인구의 42%가 적절한 질의 물을 공급받지 못하고 있다. WHO는 부적절한 용수공급과 열악한 공중위생 및 섭생 때문에 발생하는 질병으로 인한 사망자수는 연간 170만 명에 달하는 것으로 추산하고 있다. 용수공급 및 공중위생과 관련한 건강 조건은 많은 국가에서의 기후 변화에 대한 관심의 초점이 되고 있다. 취약한 지역에서는 식량과 물 확보의 불안정위험이 집중되면 영향을 받는 가정에 홍수 및 가뭄과 같은 극한 기상의 영향을 특히 심하게 미칠 수 있다. [WGII 9.2.2]

기후 극한치에 있어서의 변화는 인간의 건강에 심각한 영향을 미칠 잠재성을 가진다. 홍수 범람은 기후변화와 함께 더 심각해질 것으로 예상되며, 이는 인간의 건강에 영향을 미치게 될 것이다. 홍수 범람에의 취약성은 고품 폐기물을 제거하고, 폐수를 관리하며, 음용수를 공급하기 위한 각종 기반시설이 갖추어질 때 감소하게 된다. [WGII 8.2.2]

위생(sanitation)의 유지를 위한 물의 부족은 전 세계적으로 질병 발생 부담의 원인이 되고 있다. 이와 같은 질병 발생 부담 중 정량화하기 어려운 일부는 기후의 변동성과 기후 극한치에 그 원인이 있다 할 수 있다. 물의 회소성은 배설물이나 기타 해로운 물질(예를 들면, 기생충 등)로 인해 오염된 물과 관련되는 질병을 포함하는 여러 가지의 건강에 위해가 되는 결과들과 관련되어 있다.

저소득 국가, 특히 아프리카 사하라 사막의 아래 지역에서 설사로 인한 아동 사망률과 질병 발생률은 크게 개선된 치료방법에도 불구하고 아직 대단히 높은 수준에 머물러 있다. 기후변화는 물의 회소성을 더 크게 할 것으로 예상되고 있으나, 이것이 개개 가정의 입장에서 물의 가용 정도(따라서 건강과 위생)에 무엇을 의미하는지를 평가하는 것은 쉽지 않다. 기후변화와 관련된 대규모 모델링 결과를 사람들 혹은 가정 차원에서의 소규모 영향들과 연계시킬 수 있는 정보는 아직 부족하다. 뿐만 아니라, 물의 가용 정도에서의 변화가 건강에 미치는 앞으로의 영향에 대한 어떠한 평가에서도 안전한(safe) 물의 확보 방법에 대한 개선을 고려할 필요가 있다. [WGII 8.2.5, 8.4.2.2]

4.3.1.1 음용수의 수질을 위한 고려

관수로를 통한 용수공급이나 지표수의 직접 취수와 관련하여 아래에 설명된 바와 같이 강우량과 하천 유량, 용수공급 과정에서의 오염 사이의 관계는 대단히 복잡

하다. 만약, 강우량의 감소로 인해 하천 유량이 감소하게 되면 오염 배출량을 희석시키는 능력 또한 감소하게 되어 병원균이나 화학적 부하량이 증가하게 되어 관수로로 용수를 공급하는 지역에서는 물 처리 공장에 보다 큰 도전이 될 수 있다. 2003년도의 건조한 여름 기간 동안 네델란드에서의 저 유량으로 인해 하천 수질에 분명한 변화가 생겼다 (Senhorst and Zwolsman, 2005).

아마존 강 지역에서는, 콜레라 발생의 분명한 계절성은 건조기간 동안의 저 유량과 관계가 있었으며 (Gerolomo and Penna, 1999), 콜레라의 발생은 아마도 하천수에 포함된 높은 병원균 농도로 인한 것이었을 것으로 추정된다. [WGII 8.2.5]

내수 배제와 우수유출 관리는 하수관이 막히면 홍수 범람과 곤충이 매개하는 질병의 전파를 심화시키므로 저소득의 도시 지역에서는 대단히 중요하다 (Parkinson and Butler, 2005). 합류식 하수 관거 시스템을 가지고 있는 도시들은 홍수기간 동안 하수 시스템으로부터 하천으로의 하수 방류로 인해 하수오염의 증가 영향을 받게 된다. [WGII 8.2.5]

고소득 국가의 경우, 강우와 유출 사상들은 하천과 음용수용 저수지에서의 미생물학적 총 부하량을 증가시킬 수도 있으나, 오염 물질의 농도가 희석에 의해 낮아지기 때문에 인간 질병의 여러 경우와의 연계는 분명하지 않다. 북미와 유럽 지역에서의 이른 봄철 지표수의 계절적 오염은 Cryptosporidiosis 및 Campylobacteriosis와 같은 수인성 질병이 때때로 발생하게 되는 계절성을 설명해줄 수도 있다. 잘 알려져 있는 수인성 질병 발생 중 상당한 부분은 하수 처리 시설의 고장과 관련된 강한 강수 사상과 관계가 있다. [WGII 14.2.5, 8.2.5]

담수에서의 해로운 적조현상 (Harmful Algal Blooms, HABs)은 인간 질병을 일으킬 수 있는 독소를 생산한다. 지표수 (하천과 호수)에서의 이러한 적조현상의 발생은 기온이 높아지면 증가할 수도 있으나, 적조와의 직접 접촉이 대체로 제한되기 때문에 사람의 건강에 대한 위협의 정도는 대단히 낮다. 조류 독소로 인한 용수공급 과정에서의 오염 위험성은 낮으나 사람의 건강에 미치는 영향은 확실하지 않다. [WGII 8.2.4, 3.4.4]

용수공급용 기반시설이 빈약한 지역에서는 장내 병원균의 전파는 우기 동안에 절정에 달한다. 뿐만 아니라, 높은 기온은 설사병의 전염을 촉진시키는 작용을 하는 것으로 밝혀져 있다 (Checkley et al., 2000; Singh et al., 2001; Vasilev, 2003; Lama et al., 2004). 이와 같은 질병의 발생은 열악한 위생처리와 안전한 물의 확보 실패와 관계가 있다. [WGII 8.2.5]

4.3.1.2 폭풍우와 홍수를 포함하는 재해

전 절들에서는 빙하호로부터 쏟아지는 홍수 (Glacial Lake Outburst Floods, GLOFs)와 증가하는 호수의 강도, 그리고 돌발 홍수와 도시 홍수로 인한 범람을 포함하는 홍수 위협의 변화 (제3.2절 참조), 봄철 융설로 인한 홍수의 감소 등 물 관련 재해의 위험성에 기후변화가

어떻게 영향을 미칠 것인가에 대해 기술하였다. [WGII 3.4.3] 홍수는 사망자수와 질병 부담 측면과, 그리고 건강 관련 기반 시설에 대한 피해액 측면에서 사람들의 건강에 상당한 영향을 미친다. [WGII 8.2.2] 홍수 범람 후에 발생하는 전염성 질병의 위험성은 고수입 국가에서는 일반적으로 낮은 반면, 열악한 기반 시설과 전염성 질병의 부담을 크게 받고 있는 사람들은 홍수 사상이 지나간 후에 발생률이 높은 설사병 등을 겪는 수가 많다. 기후 관련 재해가 사람의 정신 건강에 미치는 영향에 대한 증거는 늘어나고 있으며, 홍수의 영향을 겪어 본 사람들은 장기간 동안 불안과 우울증을 경험하게 된다. [WGII 8.2.2, 16.4.5]

홍수 범람과 호우는 저장소로부터 혹은 자연 환경 속에 이미 존재하는 화학 물질로부터 나오는 화학성분, 중금속 혹은 기타 해로운 물질로 인한 물의 오염을 유발시킬 수 있다. 자연 재해에 노출되어 있는 지역에서의 인구 밀도와 산업 개발이 증가하면 미래의 재해발생과 재해기간 동안 사람들이 해로운 물질에 노출될 잠재성의 발생 확률은 분명히 증가하게 된다. [WGII 8.2.2]

4.3.1.3 가뭄과 전염성 질병

몇몇 전염성 질병은 음용수 (수량 및 수질)의 소비와 절족 (絶足) 곤충 (arthropod vectors)에 관련되지 않고 강우와 특정 관계를 가지고 있다. 아프리카의 사헬지역에서 발생하는 유행성 뇌막염 (meningitis)의 공간적 분포와 강도 및 계절성은 그 원인이 되는 메커니즘이 잘 알려져 있지 않지만 기후학적 및 환경학적 인자들 특히 가뭄과 관련이 있는 것으로 알려져 있다. 뇌막염의 지리적 분포는 최근 몇 년 동안 서부 아프리카 지역에 확대되었으며, 이는 토지 이용 변화와 지역적 기후 변화로 인한 환경 변화에 그 원인이 있을 수 있다. [WGII 8.2.3.1]

4.3.1.4 모래바람

아프리카, 아라비아 반도, 몽고, 중앙 아시아, 중국 등의 사막 지역으로부터 바람이 불어서 모래를 운반하는 모래바람 (dust storms)은 먼 지역까지 대기질과 사람의 건강에 영향을 줄 수 있다. 먼지가 없는 일기 조건과 비교하면 먼지는 호흡기로 흡입 가능한 큰 농도의 입자들과 사람의 건강을 해칠 수 있는 추적자 (trace element), 세균성 포자 (fungal spores), 그리고 박테리아 등을 운반할 수 있다. [WGII 8.2.6.4]

4.3.1.5 곤충이 매개하는 질병

기후는 각종 곤충 (예: 말라리아)과 수중 달팽이가 중간 매개체가 되는 질병 (주혈흡충병, schistosomiasis) 등에 의해 전염되는 각종 질병의 공간적 분포와 전염 속도, 계절성 등에 영향을 미친다. [WGII 8.2.8] 가뭄기간 동안 모기의 활동은 감소되지만, 만약 전염속도가 크게 떨어지면 면역성이 없는 개체의 수는 증가할 수도 있다. 만약 적절한 기후 조건이 형성되면 전염병은 언제라도 발생할 수 있지만, 장기간에 걸쳐서는 말라리아와 같은 모기로 인한 질병 사고는 모기수가 줄어들어 따라 감소하게 된다. [WGII 8.2.3.1]

수중 달팽이를 중간 매개체로 하는 물 관련 기생체질

질병인 주혈협충병의 분포는 해당 지역의 기후 인자에 의해 영향을 받는다. 예를 들면, 지난 10년 동안 중국에서 발생한 주혈협충병의 관측된 분포 변화는 최근의 온난화 경향을 부분적으로 반영하는 것으로 볼 수 있다. 또한, 적절한 통제 수단이 강구되지 않으면 관개 영농도 주혈협충병 사고를 증가시키는 것으로 증명된 바 있다. [WGII 8.2.8.3]

4.3.2 관측 현황

인간의 건강에 미치는 기후변화의 충격에 영향을 미치고, 또한 수정할 수 있는 광범위한 동인들이 존재한다. 기후 인자와 질병 간 관계의 복잡성 때문에 특정 질병 패턴의 변화를 관측된 기후변화의 원인으로 항상 해석할 수는 없다. 뿐만 아니라, 충분한 질과 기간을 가지는 건강 관련 자료 계열을 각종 연구를 위해 확보하기는 대체로 어렵다.

관측된 기후변화에 분명히 기인한다고 볼 수 있는 질병의 패턴을 설명해주는 건강에 미치는 물 관련 영향에 대한 연구는 발간된 바가 거의 없다. 그러나, 기후변화 영향을 감소시키기 위해 마련된 물 부문의 적응 대안에 관해서는 몇몇 보고서들이 이를 소개하고 있다. [WGII Chapter 7]

물 관련 재해 (홍수, 폭풍우 등)와 기후변화의 역할에 대하여 관측으로부터 얻은 일반적인 경향에 대해서는 AR4에 일부 기술되어 있다. [WGII 1.3]

4.3.3 전망

물과 위생 관련 기반시설이 국지적인 필요를 만족시키기에 부적절한 곳에 사는 사람들에게 기후변화는 일련의 부정적 영향을 줄 것으로 예측되고 있다. 안전한 물을 확보하는 것은 전 지구적 건강 문제 해결에 있어서 극히 중요한 일이라 할 수 있다. 전 세계의 건조 지역에는 20억 이상의 인구가 살고 있으며, 이들은 영양실조, 유아 사망률, 오염된 물이나 물 부족과 관련되는 각종 질병 등의 고통을 타 지역에 사는 사람들보다 더 많이 겪고 있다. 물 부족은 지속 가능한 개발에 심각한 제약이 되고 있다 (Rockstrom, 2003). [WGII 8.2.5, 8.4.2.2]

4.3.4 적응, 취약성, 그리고 지속 가능한 개발

취약한 공공 보건 시스템과 한정된 기초 건강 관리 서비스는 수억 명의 인구에 대한 높은 수준의 취약성과 낮은 적응 능력의 원인이 되고 있다. [WGII 8.6] 국민의 건강이 물이나 농업, 교통, 에너지, 주택 등 부문에서의 각종 개선에 의존하게 될 저소득 국가에서는 여러 가지 기본적인 제약 사항이 있다. 가난과 허약한 지배구조는 기후 변화 영향에의 효율적 적응에 가장 심각한 장애 요소가 된다. 경제 성장에도 불구하고 저소득 국가들은 기후 변화에 적응함에 있어서 고소득 국가보다는 미흡하고 적은 수의 대안을 사용할 수밖에 없으므로 한동안은 취약한 상태에 머무를 수밖에 없을 가능성이 있다. 따라서, 적응 전략이 효율적이기 위해서는 목표 지역에 있어서의 개발과 환경과 보건 정책 차원에서 적응 전략이 면밀하게 계획되어야 한다. 미래의 각종 취약성을 감소 시키는데 사용될 수 있는 여러 대안들은 현재의 기후에 적응하는데 가치가 있을 뿐 아니라 기타 환경적 및 사회적 목적을 달성하는데도 사용될 수 있다. [WGII 8.6.3]

어떤 적응 정책이 건강에 반하는 잠재적인 영향을 주게 되는지에 대해 그 정책이 실행에 옮겨지기 전에 평가하여야 한다. 예를 들면, 소규모 댐과 관개 프로그램은 지역적으로 말라리아 질병으로 인한 사망률을 높이는 것으로 알려져 있다. [WGII 8.6.4] 관개를 위한 처리되지 않았거나 부분적으로 처리된 하수의 재이용과 같이 물 부족에 대처하기 위한 수단들은 사람의 건강과 관련이 있다. 관개는 현재 말라리아나 주혈협충병과 같은 전염성 질병 확산의 중요한 결정인자가 되고 있다 (Sutherst, 2004). 폐수를 이용하는 관개에 대한 엄격한 수질 기준은 각종 병원균으로부터 건강의 위험성을 방지하고 농작물의 질을 보증할 수 있도록 철저히 계획되어야 한다 (Steenvoorden and Endreny, 2004). 기생충병(helminthiasis)과 같은 몇 가지 질병들은 오염된 물이나 폐수로 관개된 농작물을 소비함으로써 전파되며, 대부분의 저소득 국가의 시골이나 도시 주변 지역에서 통상적인 관행인 관개를 위한 하수와 폐수의 사용은 faecal-oral 질병전파의 원인이 된다. 현재로 전 세계 인구 중 최소 10%는 폐수로 관개된 농작물을 소비하고 있다. 그러나, 증가되는 물 부족 및 식량 수요는 열악한 위생 서비스와 더불어 저질의 물을 사용하게 되는 경우가 늘어날 것이다. 만약, 이러한 문제들을 통제 하려면 폐수 처리와 처리된 폐수의 재이용을 위한 잘 계획된 프로그램이 개발될 필요가 있다. [WGII 8.6.4, 3.4.4]

4.4 용수공급과 위생 서비스

수자원의 양과 질에 미치는 기후변화로 인한 관측된 영향들은 제4.2 및 4.3절에서 상세하게 살펴보았다. 이 절에서는 용수 공급과 위생 서비스에 관한 주요 사항을 요약하고, 관련 내용에 대해 기술하기로 한다.

4.4.1 개관

오늘날의 안전한 물 확보에 관련된 통계치들은 제4.3.1절에 이미 제공된 바 있다. 안전한 물의 확보는 오늘날 인간의 보편적인 권리로 간주된다. 그러나, 세계는 물 서비스를 제공함에 있어서, 특히 개발도상국에서, 점점 어려운 문제에 직면하고 있다. 여기에는 몇 가지 이유가 있으며, 이들 문제들은 반드시 기후변화와 관련되어 있지는 않다. 가용한 물의 부족과 밀집 지역에서의 인구 증가로 인한 보다 불 균질한 물 수요, 도시화의 가속, 일반적인 복지 개선을 위한 물의 과다 사용, 그리고 물 거버넌스를 개선하기 위한 도전 등은 이미 만족스러운 물 서비스를 제공하는데 엄청난 도전이 되고 있다. 이러한 관점에서 보면 기후변화는 물 관련 시설이나 물 서비스를 제공하는 다른 조직으로 하여금 고객의 욕구를 충족시키는데 있어서 추가적인 부담을 지우는 것이라 할 수 있다. 국지적인 차원에서 기후변화 영향의 실체를 확인하는 것은 어려우나, 전망과 함께 관측된 영향들은 미래를 위해 준비할 수 있는 유용한 기초를 제공한다.

4.4.2 관측 현황

표 4.1은 기후변화와 물 서비스간의 가능한 연계성을 요약하고 있다.

표 4.1: 관측된 기후변화로 인한 효과와 물 서비스에 미치는 관측된/가능한 영향 [WGII Chaper 3]

관측된 효과	관측된 / 가능한 영향
대기 온도의 증가	<ul style="list-style-type: none"> 남미의 안데스 산맥을 따라 위치하고 있는 도시들에서 관측된 바와 같이 축소되고 있는 빙하가 물을 공급하고 있는 유역에서의 물의 가용량은 감소 (Ames, 1998; Kaser and Osmaston, 2002)
지표수 온도의 증가	<ul style="list-style-type: none"> 용존 산소량, 혼합 패턴, 자정 능력의 감소 적조현상의 증가
해수면 상승	<ul style="list-style-type: none"> 해안 지하수 대수층의 염수화 범위 확대
강수 패턴의 변화	<ul style="list-style-type: none"> 강수량의 변화와 기타 관련된 현상들 (예: 지하수 함양, 증발산)
경년적인 강수량 변동성의 증가	<ul style="list-style-type: none"> 홍수가 발생하는 계절 동안 홍수 조절과 저수지 운영의 어려움 증가
증발산량의 증가	<ul style="list-style-type: none"> 물 가용량의 감소 수자원의 염수화 가속 지하수위의 저하
극한 기후 사상의 발생 빈도 및 강도의 증가	<ul style="list-style-type: none"> 홍수는 수질과 물 관련 기반 시설의 보전에 영향을 주고, 하천 침식을 증가시켜 수자원에 여러 가지 종류의 오염 물질을 발생시킴 가뭄은 물 가용량과 수질에 영향을 미침

4.4.3 전망

다음과 같은 원인으로 물의 가용량 (water availability)은 감소될 수 있다.

- 축소되는 빙하에 의해 물이 공급되는 유역의 유량 감소와 건조한 계절의 발생 빈도와 길이가 증가
- 여름철 강수량이 감소하여 계절 하천이 물을 공급하는 저수지의 저수량이 감소 (du Plessis et al., 2003)
- 강수량의 경년적 변동성이 커지고 하천 유량의 계절적 크기에 변화 발생
- 내륙의 지하수위 저하
- 증가된 대기 온도로 인한 증발산량의 증가와 성수기 기간의 연장 및 관개용수 사용량의 증가
- 염수화 (Chen et al., 2004)

전망에 따르면 물 스트레스의 증가 위험에 처하게 되는 사람의 수는 2020년대까지는 약 4억~17억 명, 2050년대까지는 약 10억~20억 명, 그리고 2080년대까지는 약 11억~32억 명에 달할 것이며 (Arnell, 2004), 이들 사람 수에 상당한 범위가 있는 것은 여러 가지의 SRES 시나리오를 고려하였기 때문이다.

어떤 지역에서는 물 가용량의 감소로 인해 지하수의 과다 채취가 불가피해질 것이며, 이로 인해 보다 멀리 떨어져있고 깊은 지하 대수층으로부터 물을 양수해야 하기 때문에 여러 가지 목적의 용수를 공급하는 비용이 증가하게 될 것이다. 또한, 어떤 경우에는 지하수의 과다 채취가 지하수 수질을 악화시킬 수도 있다. 인도, 방글라데시, 중국, 아프리카 북부, 멕시코, 아르헨티나의 일부 지역에서는 1억 명 이상의 사람들이 비소와 불소의 과다 섭취로 인한 질병에 시달린바 있다 (UN, 2003). 만약, 믿을만한 지표수 자원의 부족으로 사람들이 지하 대수층

으로부터 보다 많은 물을 사용하지 않으면 안 될 처지에 이르면 보다 심각한 입장에 처해질 수도 있다. [WGII 3.4.4]

기온의 상승으로 인한 관개용수 사용량과 식량 수요의 증가와 함께 물 부족의 증가 성향은 물의 재이용을 강요할 것으로 보인다. 위생시설이 잘 갖추어지지 못한 지역에서는 잘 통제되지 못한 물의 재이용 관행 (오염된 물이나 심지어는 하수를 사용하여 재이용 하는 등)이 실행될 가능성도 있다 [WGII 3.3.2, 8.6.4]

유량의 변동으로 인한 수질의 악화

수자원의 감소가 예상되는 지역에서는 수질오염 농도가 증가하면 희석 능력이 저하되고 [WGII 3.4.4, 14.4.1], 동시에 하천 유량이 증가하면 하천의 침식 작용에 의해 토양으로부터 다양한 혼합물질이 이탈하여 하천으로 운반될 것이다. [WGII 3.4]

마찬가지로, 음용수의 불충분한 공급 (Kovats et al., 2005; Ebi et al., 2006)과 극한 강수기간 동안의 큰 유량으로 인해 운반되는 다량의 병원균으로 인해 보다 습윤한 조건과 건조한 조건의 시나리오에서 수인성 질병으로 인한 환자율과 사망률은 증가할 것으로 예상된다. 또한, 강수량의 증가는 물속의 탁도와 영양 물질 부하량을 증가시킬 수 있다. 뉴욕시의 물 관련 시설 관리 기구는 강한 강수 사상을 주요 기후 변화 관련 관심 사안 중의 하나로 설정하였다. 왜냐하면, 강한 강수 사상은 뉴욕시의 주요 저수지들 중 일부에서의 탁도를 물 관련 시설 유입구에서의 법적 원수 수질 기준치 보다 100배까지 높임으로서 상당한 추가 처리 및 모니터링 비용을 발생시킬 수 있기 때문이다 (Miller and Yates, 2000).

[WGII 3.5.1]

유출량의 증가

현재의 전 지구적 물 사정을 고려하면 일부 지역에서는 보다 많은 물이 가용할 것이며, 이는 대체로 유익한 효과를 나타낼 것이나, 이 물을 유익하게 활용하기 위한 방안이 마련될 필요가 있다. 예를 들면, 아시아의 동부 및 남부 지역에서는 기후변화 결과로 인하여 유출량의 증가가 예상되는 반면, 추가적인 물을 저류하여 건조 기간 동안 사용하는데 필요한 새로운 저류 용량 확보에 투자할 자원이 부족할 경우 이들 지역에서의 물 부족은 대응하기 어려울 수도 있다. [WGII 3.5.1]

도시에서의 증가한 강수량은 하수도 시스템의 성능에 영향을 줄 수 있다. 조절되지 못하는 과잉 수량은 재래식의 음용수 처리과정으로는 처리가 되지 않는 미생물학적 및 화학적 오염 물질을 하천으로 운반하게 된다. 몇몇 연구들은 *Cryptosporidium*과 같이 염소 처리에 저항력이 있는 장티푸스 병원균의 하천 유입은 우기 동안에 상당히 큰 정도로 밝힌 바 있다 (Nchito et al., 1998; Kang et al., 2001). 이와 같은 현상은 건강 수준이 상대적으로 낮고 폐수에 포함된 병원균의 양이 큰 개발도상국에서 더욱 확대 발생할 수 있다 (Jiménez, 2003). 또한, 홍수를 유발하는 극한 강수는 물 관련 기반시설들을 위협에 빠지게 하므로 홍수가 발생하는 기간 동안 정수 처리 및 하수 처리 시설들은 종종 고장이 나서 사람들이 위생 처리 서비스를 받지 못하게 된다. [WGII 3.2, 3.4.4, 8.2.5]

고온으로 인한 수질의 손상

호수와 저수지에서의 높은 인 농도와 더불어 따뜻해진 온도는 바람직하지 못한 색깔과 냄새 및 맛, 그리고 사람과 가축과 야생동물에 독성을 줌으로서 수질을 손상시키는 적조현상을 촉진하게 된다. 이와 같이 오염되는 물을 취급하는 데는 개발 선진국의 처리시설에 대한 가용한 기술들을 사용하더라도 대단히 큰 비용이 들어간다 (Environment Canada, 2001). 또한, 높은 수온은 물과 폐수로부터 대기 중으로 휘발성 및 반 휘발성 오염 물질 (암모니아, 수은, 폴리염화비페닐 (polychlorinated biphenyls, PCBs), 다이옥신, 살충제)의 전파를 촉진할 것이다. [WGII 3.4.4]

증가된 염수화

세계 인구의 약 1/4이 일반적으로 물이 희소하고 급속한 인구 성장이 이루어지고 있는 해안 지역에 살고 있기 때문에 해수면 상승으로 인한 해안 지하 대수층으로부터 공급되는 물의 염수화는 중요한 문제 중의 하나가 된다 (Small and Nicholls, 2003; Millennium Ecosystem Assessment 2005b). 또한 염수화는 지하수 함양량의 감소로 내륙 지역의 지하 대수층에 영향을 줄 수 있다 (Chen et al., 2004). [WGII 3.2, 3.4.2]

물 서비스와 관련하여 기후변화에 의해 가장 크게 영향을 받게 될 사람들은 아프리카, 지중해 지역, 근동 지역, 아시아 남부, 중국의 북부, 호주, 미국, 멕시코의 중부 및 북부, 브라질의 북동부, 남미의 서부 해안 지역 등에 위치한 이미 물 스트레스를 받고 있는 유역에 살고 있는 사람들이다. 특히 위협에 처한 사람들은 거대 도시와 지하수에 크게 의존하고 있는 농촌 지역, 작은 섬, 빙하나 융설이 물을 공급해주는 유역 (전 세계

인구의 1/6 이상이 이들 유역에 거주) 등에 살고 있는 사람들일 것이다. 물 스트레스가 사회·경제적 인자에 의해 더 커질 경제적으로 침체된 지역에서는 이들 문제들이 더욱 더 치명적이 될 것이다 (Alcamo and Henrichs, 2002; Ragab and Prudhomme, 2002). [WGII 3.3.2, 3.5.1]

4.4.4 적응, 취약성, 그리고 지속 가능한 개발

위에서 살펴본 문제점들을 충분히 고려하여 위협에 처해있는 지역에 설치되어 있는 각종 물 관련 시설물들을 계획하는 것은 대단히 중요하다. 평균 기온과 강수량의 변화로 인하여 시설물들의 시스템 설계나 적용 기술에 변화가 필요한 곳을 제외하고는 (강수량이 감소하면 추가적인 저수지 필요), 대부분의 용수공급 시스템들은 앞으로 수십 년 동안 발생할 것으로 전망되는 비교적 작은 평균 기온과 강수량의 변화에는 잘 적응할 수 있으나, 강수량이 상당 수준 감소하면 추가적인 물 저류를 위한 저수지 등의 물 관련 시설물이 필요하거나 (Harman et al., 2005), 혹은 하천의 하류부로 염수가 침입하기 때문에 염분을 제거하기 위한 새로운 정수 처리 시스템을 필요로 한다. 이러한 문제점에 대한 적응 대책의 한 예로 남아프리카의 모잠비크에 있는 Beira 시를 들 수 있다. Beira 시는 염수가 아닌 담수의 채취를 확신하기 위하여 이미 50km에 달하는 주 송수관로를 내륙 쪽으로 5km 정도 이동시키고 있다. [WGII 7.4.2.3.1]

물 서비스는 통상 공학적으로 설계된 시스템을 사용하여 제공되며, 이들 시스템은 안전 계수를 사용하여 여유 있게 설계되며 예상 수명연한은 약 20년~50년 정도이다 (저류용 저수지의 경우는 50년 보다 클 수 있음). 용수공급의 적정성과 물 관련 기반시설의 운영 실적에 대한 검토 분석은 전형적으로 관측된 조건만을 사용하여 이루어지고 있으나 앞으로는 기후변화 전망 결과가 반드시 고려되어야 하며, 특히 홍수나 가뭄과 같은 극한 기후 사상을 취급하는 시스템이 포함될 경우에는 더욱 그러하다.

물 가용량의 감소

소수의 산업화된 국가들을 제외하고는 인구 및 경제의 성장과 생활양식의 변화, 확장된 용수공급 시스템으로 인해 물의 사용은 전 세계적으로 점차 증가하고 있다. [WGII 3.3] 새로운 저류용 저수지를 건설한다든지 혹은 대체 수자원을 사용함으로써 적절한 용수공급을 보장하기 위해서는 대규모의 투자가 필요할 수도 있으므로, 물의 가용량이 감소할 가능성이 있는 지역에 대한 효율적인 물 이용 프로그램을 수집하고 실행하는 것은 대단히 중요하다. 물 사용의 감소는 추가적인 물 관련 기반 시설에 대한 필요성을 지연시키거나 혹은 제거하게 된다. 물의 가용량을 증가시킬 수 있는 가장 빠른 방법 중의 하나는 도시 상수도 시스템과 관계 시스템에서의 물 손실을 최소화하는 것이다. 새로운 용수 공급에 대한 수요를 감소시키기 위한 기타 대안에는 빗물저류 (rainwater harvesting) 와 처리수의 재이용 등이 있다. [WGII 3.5, 3.6]

유량의 변동성으로 인한 수질 저하

수자원의 보호는 수질과 관련되는 미래 문제에 대처하기 위한 중요하고도 비용 효율적인 전략이라 할 수 있으며, 이것은 여러 국가에서 통상적인 실무 관행이지만

수질 관리에 대한 새롭고 혁신적인 여러 접근 방법들이 전 세계적으로 요구되고 있다. 이 중 한 가지 접근 방법은 세계 보건 기구 (WHO, 2005)가 제안한 바와 같이 유역으로부터 고객에게 주는 위협성에 대하여 종합적인 평가와 관리를 해주기 위한 물 안전 계획 (Water Safety Plan, WSP)의 수립 및 실행이다. 또한, 물과 폐수의 처리장 설계와 운영은 특히 취약지역에서, 불확실한 유량 변화에 적응할 수 있는 능력과 신뢰도를 확보하거나 증가시키기 위하여 주기적으로 검토되어야 한다.

담수화

담수화 처리 방법들은 염수의 침입에 민감한 지하대수층에 의존하는 심하게 도시화된 해안 지역과 같이 염수화 위험이 있는 곳에서 증가하는 염분 함유량을 처리하기 위해 사용하는 대안이라 할 수 있다. 현재에 가용한 기술들은 대부분이 멤브레인 (얇은 막, membranes)을 기초로 하고 있으며, 담수 공급을 위한 전통적인 처리 방법보다 값비싼 방법이다. 해수 (seawater)의 담수화 비용은 US\$1.00/m³ 이고, 소금기가 있는 물 (brackish water)의 경우는 US\$0.6/m³ (Zhou and Tol, 2005), 그리고 담수의 염소 소독비는 US\$0.02/m³ 이다. 다행히도 담수화 비용은 계속 떨어져 왔지만 담수화에는 아직도 큰 에너지 수요가 따른다. 담수화 비용은 담수를 확보하기 위해 기존의 관로를 연장하고 처리시설을 재 설치하는데 소요되는 비용과 비교될 필요가 있다. 개략적으로 보면, 도시 주거 시설에 대한 용수 공급을 위한 취수와 처리, 그리고 중앙수 시설의 건설에 소요되는 비용은 전체 시스템의 약 절반을 차지한다. [WGII 7.5] 그러나, 이집트나 중국, 방글라데시, 인도, 남동 아시아 등의 인구가 밀집한 해안 지역에서도 담수화 비용은 감당하기 어려울 정도로 크다. [WGII 3.5.1] 만약, 장래에 담수화에 의한 물 확보가 늘어나면 담수화 공장에 의해 해양생물 (유기체)이 침해를 받거나 생물학적 사이클의 변경이 초래되고, 다른 화학 물질을 함유할 수 있는 고농도의 소금물을 안전하게 처리해야 하는 등의 환경적 부작용에 대처할 필요가 있게 될 것이다. [WGII 3.3.2]

폐수에 대처하기 위한 더 많은 각종 접근 방법

하수도 시설과 폐수 처리 공장에 대해서는 보다 크고 변동성이 많은 유량에 대처할 수 있는 전략이 필요할 것이며, 여기에는 분산형 시스템의 사용이라든지, 분리식 하수도의 건설, 합류식 하수도의 초과 유량 (도시 지역의 폐수와 우수 유출의 혼합체)의 처리, 토양 속으로의 우수 주입 등과 같은 새로운 접근방법들이 포함되어야 한다. 도시 하수 처리장의 용량 증가에 소요되는 비용이 클 경우에는 지역의 조건을 고려하기 위해 적절하게 재원이 조달될 수 있는 계획이 수립되어야 한다. 농촌 지역에 대해서는 위생시설이 일반적으로 너무 빈약하므로 지역에 따라 저 비용이 소요되는 기술을 사용하여 지역 실행 계획이 수립될 필요가 있다. [WGII 7.4.2.3]

수자원을 위한 보다 나은 행정

지금까지 토의된 적응 방법의 고려뿐만 아니라 기후 변화를 추가적인 변수로 하는 통합 물 관리가 효율적인 수단으로 고려되어야 한다. 물의 가용량의 감소, 증가 혹은 변동성 증가는 물 사용자 (농업용, 공업용, 생태계용, 주거용 등)간의 갈등을 조성하게 될 것이다. 물 배분 기능을 가진 조직 기구 (기관)는 사회의 각 부문에 걸친 이득과 손실의 분포뿐만 아니라 물 가용량의 변화로

인한 전반적인 사회적 영향을 결정하는데 주된 역할을 할 것이다. 관련 기관은 정치적으로는 실무에서 실행하기 어려울지도 모르는 “공평성과 효율성” 등과 같은 적절한 원칙을 사용하여 물을 각종 수요에 할당하는 보다 나은 방법을 찾아야 할 필요가 있으며, 또한, 국제 하천 유역이나 지표수 및 지하수 유역의 적절한 관리도 고려해야 할 필요가 있다. [WGII 3.5.1]

기후 변화로 인해 유발되는 추가적인 스트레스에 대처하기 위해 수자원 계획에의 공공 참여는 필요하게 될 것이다. 특히 물의 가치에 대한 견해의 변화라든지, 물의 재이용이 앞으로 가지게 될 중요성과 역할, 우리 사회가 물 관련 영향의 완화를 위해 해야 할 공헌 등과 관련하여 공공 참여는 대단히 중요하다 할 수 있다.

통합 수자원 관리원칙을 기반으로 정책을 실행해 나가기 위해서는 정부 내 여러 기관들 간의 보다 긴밀한 협조가 이루어져야 하며, 조직 및 법적 체계가 기후변화 영향에 대한 적응 방안들의 실행을 용이하게 할 수 있도록 되어 있는지를 검토해야만 한다. 기후변화는 물 사용자를 포함하여 물 관리 과정에 관계되는 모든 이해 당사자들에 의해 실감될 것이다. 따라서, 우리 모두는 적절한 의사 결정을 하고 영향을 인지하여야만 한다. 예를 들면, 폐수 처리기준의 경우 온난화로 인한 기온 상승으로 인해 감소될 지표수의 자정 용량에 기초하는 한 사용되는 전반적인 전략은 가능한 범위 내에서 검토될 필요가 있을 것이다. [WGII 3.4.4]

개발된 선진국

개발된 선진국에서는 음용수는 소비자에게 공급되기 전에 엄정한 처리 공정을 거치게 되며 사용된 하수 및 폐수의 처리 수준 또한 높다. 적절한 수원의 보호뿐만 아니라 비록 추가적인 수 처리 과정을 포함시킴으로서 추가적인 비용이 발생하더라도 미래의 기후 변화 아래에서 그러한 편익은 계속 유지될 필요가 있다. 소규모 도시나 농촌 지역에서 고려되어야 할 방법들에는 수원 보호를 하나의 훌륭한 비용-편익 대안으로 포함시키는 것이다.

개발도상국

불행하게도, 많은 나라들은 기후변화로 인한 여러 가지 도전을 헤쳐나갈 충분한 경제적 자원을 가지지 못할 수 있으며, 빈곤국들은 이미 충분하지 못한 기반 시설로 문제를 극복하기 위해 추가적인 자원을 필요로 하고 있다. 따라서, 이들 국가들은 저비용 대안이나 감당할만한 재정 대안이 없을 경우 수질이나 수량에 대해 전망된 영향에 보다 더 취약해질 수 있다.

이미 검토된 적응 대안이나 완화 대안들 중 몇 가지는 단순히 받아들이기에 부담이 되기 때문에 개발도상국들은 지하수의 과다 채취라든지, 처리되지 않은 폐수의 과다 재이용 등과 같은 지속 가능하지 못한 방법들을 사용하여 기후변화 영향에 적응해야만 할 수도 있다. 이와 같은 해결책들은 개인 차원에서 쉽게 실행될 수 있기 때문에 대단히 매력적이다. 따라서, 반드시 재래식 해결방법을 의미하는 것이 아닌 저 비용의 안전한 대안들이 많은 경우 정식의 물 관련 시설을 가지지 못하는 빈곤한 마을에 물 서비스를 제공할 수 있도록 개발될 필요가 있다. 불행하게도 이와 같은 문제점에 관한 연구 결과는 별로 없다.

[WGII 3.4.3, 8.6.4]

요약하면, 기후변화는 물 서비스에 긍정적인 영향을 미치기도 하고 부정적인 영향을 미치기도 한다. 따라서, 국지적인 차원에서 기후변화로 인해 발생할 수 있는 결과를 인식하고 그에 따라 계획을 세우는 것이 중요하다. 현재로서는, 네덜란드라든지 영국, 캐나다, 미국 등 소수 국가의 일부 물 관련 시설에 대해서만 홍수 조절이나 용수공급 관리 측면에서 기후변화의 의미(영향)를 고려하기 시작했다고 볼 수 있다. [WGII 3.6]

4.5 주거와 기반 시설

물 가용량, 수질, 강수 특성, 홍수 사상의 발생 가능성과 규모에 있어서의 변화는 인간의 주거(住居, settlement) 및 기반시설에 미치는 기후 변화 영향을 일으키게 하는 주된 역할을 하게 된다 (Shepherd et al., 2002; Klein et al., 2003; London Climate Change Partnership, 2004; Sherbinin et al., 2006). 이들 영향은 지역에 따라 변동할 것이며, 또한, 지구 물리학적 조건이나 사회·경제적 개발 수준, 물 분배 담당 조직, 지역적 경제 기반의 성격, 기반 시설의 특성, 그리고 기타 물 스트레스 등에 따라 크게 다를 것이다. 여기에는 오염이라든지, 생태계 훼손, 지반 침하, 그리고 인구 성장 등이 포함된다 (UNWWAP, 2003, 2006; Faruqui et al., 2001; UNDP, 2006). 전 지구적으로 보면, 기후변화로 인해 담수 공급 문제의 위험이 가장 많은 지역의 위치는 작은 섬이라든지, 건조 혹은 반 건조 지역의 개발도상국, 빙하의 용해나 계절적인 용설로 유지되는 하천으로부터 담수가 공급되는 지역, 구성비가 높은 해안 저지대, 특히 아시아-태평양 지역에 위치한 해안의 거대 도시들을 가지는 국가들이다 (Alcamo and Henrichs, 2002; Ragab and Prudhomme, 2002). [WGII 6.4.2, 20.3]

해안 지역이나 하천 연안 지역과 같이 위험성이 큰 위치에서의 증가하는 인구 밀도는 홍수와 호우로 인한 피해와 염수 침입으로 인한 수질 저하를 포함하는 물과 관련된 기후변화 영향에 대한 취약성을 증가시킬 가능성이 대단히 크다. [WGII 6.4.2, 7.4.2.4] 인간의 정주와 관계되는 경제는 관개농업이라든지 물 관련 관광, 스키산업과 같은 기후에 민감한 물 관련 활동과 밀접하게 연결되어 있어서 기후변화가 수자원에 미치는 영향에 특히 취약할 가능성이 있다 (Elsasser and Burki, 2002; Hayhoe et al., 2004). [WGII 7.4.3, 12.4.9]

주거와 관련된 기반 시설에는 건물, 교통망, 해안 시설, 용수공급과 폐수처리 기반시설, 에너지 시설 등이 포함된다. 기반시설이 입게 되는 영향은 홍수 사상의 발생과 강우로 인한 침식이나 지하수위의 변화로 인해 발생하는 구조물의 불안정성 등으로 인해 발생하는 직접 피해와 미래에 발생할 것으로 추정되는 기후조건에 대하여 설계되지 못한 시설들의 운영성이나 비용 및 적정성 등에 미치는 영향 등이 있다. [WGII 3.4.3, 3.5, 7.4.2.3]

4.5.1 주거

현재로서는 인간의 주거를 위한 적절하고 안전한 물의 공급이 부족한 경우가 대단히 많다. 세계보건기구 (WHO)는 전 세계의 약 11억 명의 인구가 안전한 음용수 공급을 받지 못하고 있으며, 24억 명의 인구는 적절한 위생 서비스를 받지 못하고 있는 것으로 추산하고 있다(WHO/UNICEF, 2000). 빈곤한 도시 가정들은 급수 관망 시스템에 연결되지 못하여 상승하는 음용수 가격에 특히 취약하다 (UN-HABITAT, 2003; UNCHS, 2003, 2006; UNDP, 2006). 예를 들면, 인도네시아의 자카르타에서는, 정수 물 서비스를 받지 못하는 일부 가정의 경우 그들의 수입 중물에 소비하는 비율이 25% 까지 달하는 것으로 보고되고 있고, 요르단의 암만 (Amman)시에서는 1998년 뜨거운 여름 동안 도시 급수망에 연결되지 못했던 피난 캠프 주거민들은 다른 가정에 비해 물 값으로 훨씬 높은 가격을 지불했던 것으로 보고되고 있다 (Faruqui et al., 2001). 물의 가용량과 원수의 수질에 미치는 기후변화 영향은 특히 증가하는 인구와 연계되는 감소하는 유출량 때문에 물 스트레스가 점차 증가할 것으로 추정되는 지역에서 이들 문제들을 해결한다는 것은 점차 어려워질 가능성이 대단히 크다. [WGII 3.5.1] 개발도상국의 반 건조지역에서 급격하게 증가하고 있는, 특히 제한적인 적응 능력만을 가지고 있는 빈곤 마을 정주자들은, 물 가용량의 감소와 그에 따른 신뢰성 있는 물 공급 확보를 위한 비용 증가에 특히 취약해질 수밖에 없다(Millennium Ecosystem Assessment, 2005b). [WGII 7.4]

개발된 선진국이나 개발도상국 모두의 해안 도시에서는 예상되는 지속적이고 급속한 인구 증가로 홍수 범람과 허리케인이나 기타 해안 호우로 인한 피해에의 노출이 증가하게 될 것이다. [WGII 7.4.2.4] 이들 지역에서의 개발은 호우의 영향을 일부 완화시킬 수도 있는 델타 지역 습지의 손실을 가져오게 된다. [WGII 6.4.1.2] 또한, 대부분의 경우 인구 증가가 상대적으로 물이 희소한 해안 지역에서 발생하고 있으므로 물 수요와 물 가용량 사이의 불균형은 더 악화되고 있다 (Small and Nicholls, 2003; Millennium Ecosystem Assessment, 2005b).

4.5.2 기반 시설

4.5.2.1 교통망

해수면 상승과 극한 일기 사상(호우 및 허리케인 등)의 발생 강도 증가로 인해 발생하는 홍수 범람은 일부 지역에서 교통망에 큰 위협을 주고 있다. 국지적인 길거리 침수, 지하철 시스템의 홍수 범람, 홍수나 지반 침하로 인한 교량, 도로, 철도의 피해 등이 이에 속한다. 예를 들면, 세계에서 가장 오래된 지하철 시스템을 가지고 있는 런던에서는 보다 강한 강도의 강우 사상이 고속 도로와 지하도로에 대한 홍수 범람 위험을 증가시킬 것으로 전망되고 있으므로 이들 시설에 대한 배수 시스템의 개선이 필요할 것이다 (Arkell and Darch, 2006). 마찬가지로, 미국 Boston Metropolitan Area의 육지 교통 시스템에 대한 최근의 연구는 증가된 홍수 범람이 교통의 운행 지연과 운행 취소를 증가시킬 것이고, 이로 인해 직원의 근무 일수와 판매량 및 생산량이 줄어들게 될 것이다 (Suarez et al., 2005). 그러나, 이러한 비용은 보스턴 시의 교통 기반시설에 대한 홍수 관련 피해에 비교하면 아주 작을 것이다 (Kirshen et al., 2006).

[WGII 7.4.2.3.3] 강수량의 발생 강도 증가로 인해 악화될 수 있는 현재의 취약성에 대한 예로는 인도의 Konkan Railway가 우기 동안의 산사태로 인해 매년 약 US\$100만의 피해를 입고 있다는 사실을 들 수 있다 (Shukla et al., 2005). [WGII 7.4.2.3.3]

4.5.2.2 건축 환경

주택 및 기타 자산들은 점점 해안 지역이나, 경사 지역, 하천변 및 기타 위험이 내재하는 지역에 위치하므로 홍수 범람이나 산사태, 허리케인과 같은 폭풍우 등은 개발선진국이든 개발도상국이든 간에 건물에 가장 큰 위험을 준다 (Bigio, 2003; UN-HABITAT, 2003). 개발도상국의 도시 지역에 조성되는 비공식적인 주거 지역들은 홍수나 산사태 및 기타 기후 관련 재해에 민감한, 상대적으로 위험성이 높은 곳에 위치하게 되므로 특히 취약하다 (Cross, 2001; UN-HABITAT, 2003). [WGII 7.4.2.4]

건물에 미치는 다른 영향들에는 증가하는 강수량의 규모와 호우의 발생 빈도 (Graves and Phillipson, 2000)로 인한 가속화되는 풍화 잠재성과 지하수위 저하와 지반 침하 (Sanders and Phillipson, 2003), 그리고 지하수위 상승 영향으로 인한 구조적 피해의 증가 등이 포함된다 (Kharkina, 2004). [WGII 3.5]

또 다른 하나의 관심 분야는 우수 배제 시스템의 미래 작동 (performance)이 원만할 것인가이다. 강우 강도가 점점 증가하는 영향을 받는 지역에서는 국지적인 침수로 인한 건물이나 기타 기반시설 피해를 방지하기 위해 이들 우수 배제 시스템의 용량을 증가시켜야 할 필요가 있을 것이다 (UK Water Industry Research, 2004). [WGII 7.6.4]

4.5.2.3 해안 기반 시설

저지대에 위치한 해안 지역의 기반시설은 해수면 상승, 홍수 범람, 허리케인 및 기타 형태의 호우 등으로 인한 피해에 취약하다. 해안 도시들의 지속적인 성장과 카리브 해안 같은 지역에서의 관광 산업의 확대 등으로 인하여 위험에 처한 해안 기반 시설물군은 급속한 속도로 늘어나고 있다 (Hareau et al., 1999; Lewsey et al., 2004; Kumar, 2006). 일부 지역에서는 해수면 상승으로 인한 피해 비용이 추산된 바 있으며, 상당한 규모에 달하는 것으로 알려져 있다. 예를 들면, 폴란드에서는 2100년까지 해수면의 1m 상승으로 인한 피해 비용의 추산치는 도시지역 침수와 하수도, 항구 및 기타 기반시설에 미치는 영향 때문에 약 US\$300억 정도이다 (Zeidler, 1997). 이와 유사한 연구는 베트남에서 1m의 해수면 상승이 있으면 1,700만 명을 홍수 범람에 처하게 하여 최대 US\$170억의 피해를 발생시킬 것이며, 이로 인한 상당한 영향이 해안 지대로부터 내륙 지역으로 침투해 들어갈 것으로 전망하고 있다. [WGII 6.3, 6.4, 6.5]

4.5.2.4 에너지 기반 시설

기후변화로 인한 수문학적 변화는 기존 및 장래에 계획되는 수력 발전 시설의 잠재적인 출력 규모에 직접적인 영향을 미칠 것이다. 수력 개발의 정도는 지역에 따라

대단히 많이 다르다. 아프리카에서는 대륙의 포장 수력이 아직은 거의 개발되지 않은 상태에 있으며, Zambezi River 상의 Batoka Gorge 수력 발전 사업에 대한 기후변화 영향의 모의 결과는 하천 유량의 상당한 감소 (평균 월유량이 $3.21 \times 10^9 \text{m}^3$ 으로부터 $2.07 \times 10^9 \text{m}^3$ 로 감소)가 있어서 전력 생산량도 감소 (월평균 전력 생산량이 780 GWh에서 613 GWh로 감소)하는 것으로 전망하고 있다 (Harrison and Whittington, 2002). 다른 일부 지역에서는 수력 발전은 증가할 것으로 추정하기도 한다. 예를 들면, IS92a 온실가스 배출 시나리오 하에서 2070년대에 대한 추정치를 보면, 20세기 말의 기존 수력 발전소의 전기 생산 잠재력은 스칸디나비아와 러시아 북부 지역에서 약 15~30% 증가할 것이며, 이들 지역에서는 총 생산전력의 19% (핀란드)와 거의 100% (노르웨이)까지 수력 발전으로 전기가 생산되고 있다 (Lehner et al., 2005). [WGII 3.5] 동력 전달 전선이라든지, 해양 굴삭 시설들은 홍수 범람이라든가 보다 강도 높은 호우 사상으로 인한 피해에 취약할 수 있다. [WGII 7.5] 또한, 냉각용수의 가용량과 관련되는 문제점 (가용량의 감소 혹은 수원의 증가 등)들이 화력 발전소나 원자력 발전소에서 에너지 생산에 나쁜 영향을 줌으로서 에너지 공급을 저해할 수도 있게 된다 (EEA, 2005).

4.5.3 적응

홍수나 가뭄의 발생 빈도나 물 가용량의 규모와 질, 혹은 계절적 가용시간 등에 있어서의 변화 영향은 적절한 기반시설 투자와 물과 토지 이용 관리에 있어서의 변화에 의해 다스려질 수 있다. 다양한 기반시설에 미치는 기후변화 영향들은 상호 작용하는 것이기 때문에 잘 협조된 계획의 수립 추진이 바람직하다. 예를 들면, 홍수 방어가 실패하면 전력 공급이 어려워지고 중국에는 정수 처리 시설과 하수 처리 시설의 작동이 멈추게 된다.

현재의 기후 변동성을 물 관련 관리 업무에 잘 반영하게 되면 미래의 기후변화에 대한 적응이 훨씬 쉬워질 수도 있다 (신뢰도 대단히 높음). [WGII 3.6] 예를 들면, 도시 지역의 하천 주변에 녹지와 자연적인 완충 지대를 조성하여 기존의 홍수 위험을 관리하면 장래에 닥칠 더 큰 호우로 인한 홍수의 영향을 감소하는데 도움이 될 수 있을 것이다. 그러나, 이와 같은 반응들을 하기 위해서는 각각의 반응은 화폐의 향으로 뿐만 아니라 사회적 영향의 향으로도 표시되는 비용을 수반할 것이며, 여러 다른 이해 당사자들 간에 있을 수 있는 갈등을 관리할 필요도 있다. [WGII 3.5]

4.6 경제: 보험, 관광, 산업, 교통 등

4.6.1 개관

기후와 수자원은 보험이라든지, 산업, 관광, 교통 등과 같은 2차적 혹은 3차적 산업 부문들에 영향을 미치게 된다. 이들 부문에서의 물 관련 기후변화 영향은 긍정적일 수도 있고 부정적일 수도 있으나, 극한 기후 사상들과 기타 급진적인 변화는 적응하는데 필요한 시간이 짧아서 인간의 각종 시스템에 점진적인 영향이 아니라 급격한 영향을 주는 성향이 있다. [WGII 7.1.3]

1970년대 이후 전 지구적인 손실은 일기와 관련한 극한 사상으로 인해 급격하게 상승하는 비용 때문인 것으로 이해되고 있다. 어떤 연구에 의하면, 위험에 처해 있는 자산의 증가가 지배적이면 재해로 인한 손실의 상승 경향은 여전히 계속 될 것이다. 대규모 하천의 일부에 발생한 극한 홍수를 포함하여 특정 지역이나 위험 지역에서 홍수 발생 횟수는 점점 증가하고 있다는 확실한 증거가 있다. [WGII 1.3.8.5]

보험 손실에 미치는 기후 변동성의 큰 영향을 살펴보면 홍수 범람은 전 지구적으로 일기 관련 보험 손실의 약 10%에 상당하는 책임이 있다. 가뭄 또한 영향을 미치는 바, 영국으로부터의 자료에 의하면 지반 침하에 관련된 보험금 청구 비용과 여름철 과소 우량 사이에는 지체되는 (lagged) 관계가 있음이 알려져 있다. 그러나, 개발도상국에서는 극한 사상으로 인한 손실은 보험금의 항으로가 아니라 인간 생명의 항으로 측정되는 경우가 많다. 예를 들면, 사헬 지역에서의 가뭄은, 그의 높은 가뭄 심도에도 불구하고, 보험 가입이 아주 적기 때문에 공식적인 재정 부문에는 아주 작은 영향을 미칠 뿐이다. [WGII TAR 8.2.3]

4.6.2 사회·경제적 비용, 완화, 적응, 취약성, 그리고 지속 가능한 개발

교통에 미칠 수 있는 물 관련 영향들 중 가장 큰 비용을 치르게 하는 것은 홍수 범람이다. 기반 시설이나 기타 재산에 대한 피해와 비교하면 계획된 여행을 못 가게 된다거나 여행이 지연되는 등으로 인한 비용은 상대적으로 대단히 작다(Kirshen et al., 2006). 지난 10년 동안 도시 지하철 시스템의 홍수 범람이 €1,000만 (US\$1,300만)의 피해를 발생시킨 바 있는 4가지 사례가 있었으며, 이보다 작은 피해를 유발시킨 사례는 수없이 많다 (Compton et al., 2002). [WGII 7.4.2.3.3]

일반적으로, 산업 부문은 농업과 같은 부문보다는 기후 변화 영향에 덜 취약한 것으로 생각되고 있다. 주요 예외에 속하는 것으로는 홍수터와 같이 기후에 예민한 지역에 위치한 산업 시설들과 (Ruth et al., 2004) 식품 처리 공장과 같은 기후에 예민한 생필품에 관계되는 것

들이 있다. [WGII 7.4.2.1]

한 나라에서 현재에 적용할 구체적인 보험 위험 보상 한도는 과거에 경험한 재앙의 영향을 감안하여 결정될 수 있을 것이다. 재앙에 가까운 홍수 범람으로 인한 막대한 집중적인 손실 때문에 민간 부문 홍수 보험은 일반적으로 제한적이어서 몇몇 국가에서는 정부가 국가 지원 홍수 보험 제도를 개발하여 적용하고 있다 (Swiss Re, 1998). [WGII 7.4.2.2.4]

재무 부문에 있어서 기후변화 관련 위험성은 수력 발전 사업이라든지, 관개 및 농업, 그리고 관광업 등과 같이 구체적으로 민감한 부문에 대하여 계속 증가하는 배려가 있어야 한다 (UNEP/GRID-Arendal, 2002). [WGII 7.4.2.2]

관광업에 미치는 기후변화 영향에는 물 가용량의 변화가 포함되며, 이는 긍정적인 영향이 될 수도 있고, 또한 부정적인 영향이 될 수도 있다 (Braun et al., 1999; Uyarra et al., 2005). 따뜻한 기후는 이국적인 환경 (서부 유럽의 야자나무와 같은)을 확대할 가능성이 있으며, 이러한 환경을 어떤 관광객은 긍정적으로 생각할 수도 있으나, 물 관련 질병, 혹은 곤충 관련 질병의 발생 공간을 확대하고 증폭시킬 수도 있다. 가뭄과 극한 일기 사상의 영향으로 인한 건조한 환경의 확대는 비록 관광객들이 수용하기 불편한 것들이 무엇인지를 알지는 못하지만 관광객들을 실망시킬 수 있다. [WGII 7.4.2.2.3] 겨울 관광을 위해 눈의 가용량에 의존하는 지역들은 전 지구적 온난화에 가장 취약한 지역에 속한다. [WGII 11.4.9, 12.4.9, 14.4.7]

라인 강에서와 같이 내륙 수로에 의한 대규모 화물의 운송은 홍수나 가뭄 기간 동안에는 지장을 받는다. [WGII 7.4.2.2.2]

보험은 위험을 분산시키고 적응을 도와주며, 보험 펀드를 관리하는 것은 완화를 위한 조치로 볼 수 있다. [WGII 18.5] 적응에 따른 비용과 편익을 다소 제한된 방법이긴 하지만 교통 기반시설의 경우에 대하여 평가된 바 있다 (Dore and Burton, 2001). [WGII 17.2.3]

5

기후변화와 수자원간 관계의
지역적 측면에 대한 분석

**Analysing Regional Aspects of Climate
Change and Water Resources**

5.1 아프리카

5.1.1 개관

물은 아프리카가 현재와 미래에 직면하게 될 몇 가지 결정적인 문제점들 중의 하나이다. 강과 호수, 그리고 강우로부터의 용수 공급은 각각 상이한 자연 상태의 지리적 분포와 접근성, 그리고 지속 가능하지 못한 물의 이용으로 특성지어진다. 기후 변화는 물의 가용성과 물에의 접근성에 추가적인 압력을 가하는 잠재성을 가진다. Arnell (2004)은 HadCM3²⁰⁾ 기후 모델을 사용하여 2050년의 하천 유출량을 전망하기 위한 IPCC의 SRES 시나리오들의 적용 의미에 관해 기술하였다. 이들 시나리오에 의한 실험들은 아프리카의 북부와 남부 지역에서는 유출의 상당한 감소를 나타내는 반면, 아프리카의 동부 지역과 반건조 sub-Saharan Africa 지역 일부에서는 유출량이 증가하는 것으로 전망되고 있다. 그러나, 복합 모델 결과 (그림 2.8 및 2.9)들은 모형에 따라 상당한 변동을 보이며, 아프리카 북부 지역에서는 감소를, 동부 지역에서는 증가를 보인다. Sub-Saharan Africa에서의 강수량의 전망은 어떤 모형에 의하면 증가가 전망되나, 다른 모형의 경우는 감소가 전망되는 등 상당한 분산을 보인다. 전망된 영향들은 이와 같은 실질적인 불확실성의 관계에서 검토되어야 할 것이다. [WGI 11.2, Table 11.1; WGII 9.4.1]

2050년까지 주로 동부 및 남부 아프리카 지역에 있는 9개국²¹⁾에서의 물 가용량은 인구 1인당 1,000m³/yr 보다 작을 것으로 전망하고 있다. 12개국²²⁾은 인구 1인당 1,000~1,700m³/yr 으로 제한될 것이며, 물 스트레스의 위험에 처해지는 인구는 약 4.6억 명에 달할 것이고, 대부분 서부 아프리카 지역이 될 것이다 (UNEP/GRID-Arendal, 2002).²³⁾ 이와 같은 산정치는 인구 증가율에만 기초한 것으로 기후 변화로 인한 수자원의 변동은 고려되지 않은 것이다. 뿐만 아니라, 물 스트레스와 물 부족 위험에 처해있는 아프리카 지역 인구의 비율은 2000년의 47%에서 2025년의 65%로 증가할 것이라는 전망도 있다 (Ashton, 2002). 이와 같은 현실은 특히 건조 및 반건조 지역에서 물을 둘러싼 갈등을 야기할 수 있다. [WGII 9.2, 9.4]

한 가지 구체적인 예로서, 남아프리카의 South-West Cape 를 들 수 있다. 이 지역에 관한 한 가지 연구에서는 강수량이 감소하거나 혹은 잠재 증발량이 증가함에 따라 용수 공급 능력이 감소함을 밝히고 있다. 이 연구 결과에 따르면 2020년까지 용수 공급량의 감소는 연간 0.32%로 전망하고 있는 한편, 지구 온난화와 관련된 기후 변화는 Cape Metro-politan 지역에서의 용수 수요를 매년 0.6% 증가시킬 것으로 전망하고 있다 (New, 2002).

나일 강 유역과 관련하여 Conway (2005)는 유역에서의 전망되는 강수 패턴의 불확실성과 복잡한 물 관리 방법 및

물 관리 지배구조 때문에 나일 강의 유량이 기후변화로 인해 어떻게 영향을 받을 것인가에 대해서는 분명한 증거가 없음을 확인하였다. [WGII 9.4.2]

강우 발생 시기의 변동에 대한 반응은 육지상의 많은 수원에서 이미 관측되고 있으며, 이는 기후 변동과 연계된 앞으로의 물 스트레스의 지표로 고려될 수 있다. 아프리카 대륙의 동부 지역에서 관측된 호수 수위의 경년 변화를 보면 1993~1997년에는 낮은 수위를 보였고, 1997~1998년에는 높은 수위 (예: Tanganyika, Victoria, Turkana 호수 등)를 보였으며, 후자의 경우는 인도양에서의 대규모 기후 변동과 연계된 1997년 말의 초과 강우와 관련이 있는 것으로 보인다 (Mercier et al., 2002). 온난 조건에 반응하여 호수의 수온도 높아지는 것으로 보고되어 왔다 (그림 5.1 참조) [WGII 9.2.1.1, 1.3.2.3]

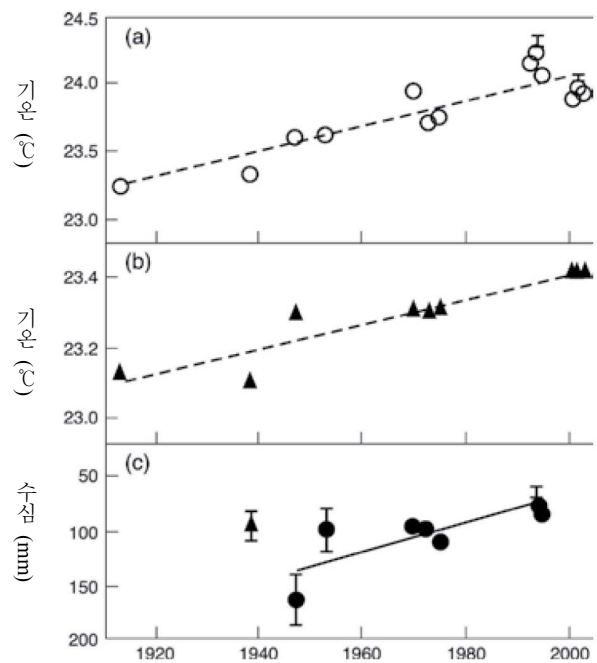


그림 5.1: 아프리카 동부지역의 Tanganyika 호수로부터의 과거 및 최근 측정치: (a) 호수의 상층부 혼합층 (표층부)의 온도, (b) 심층부 (600m) 온도, (c) 상층부 혼합층의 수심. 그림(c)의 3각형 표시는 다른 방법으로 수집된 자료를 표시하며 오차범위 표시는 표준편차를 대표함. Macmillan Publishers Ltd.[Nature] (O'Reilly et al., 2003). [WGII Fig. 1.2]

5.1.2 현재의 관측

5.1.2.1 기후의 변동성

서부 아프리카의 사헬 (Sahel)지역은 강우량에 있어서 수십 년 주기의 변동성을 경험하고 있으며 (예: Dai et al.,

20) 모형에 관한 설명은 부록I 참조

21) Djibouti, Cape Verde, Kenya, Burundi, Rwanda, Malawi, Somalia, Egypt, South Africa 등

22) Mauritius, Lesotho, Ethiopia, Zimbabwe, Tanzania, Burkina Faso, Mozambique, Ghana, Togo, Nigeria, Uganda, Madagascar 등

23) 1990년 자료 기준 아프리카의 5 개국만이 인구 1인당 1,000m³/yr보다 작은 양의 물을 확보함. 이들 국가에는 Rwanda, Burundi, Kenya, Cape Verde, Djibouti 등이 포함됨.

2004a), 이는 태평양과 인도양 및 대서양 지역에 위치한 유역에서의 대기 순환의 변화와 그와 관련된 열대 해수면 온도 패턴의 변화(예: ENSO, AMO)와 관련이 있다. 1950년대와 1960년대의 습윤 기간 이후 1970년대에서 1990년대까지는 대단히 건조한 상태가 계속되었다. 강우량의 부족은 몬순 기간(7월~9월) 동안에 북위 9° 남쪽의 첫 번째 강우 기간 동안에 발생하는 주요 강우 사상의 수가 감소하는 것과 주로 관계가 있었다. 20세기의 마지막 30년간의 사헬 지역에서의 강우량 감소와 파괴적인 가뭄(그림 5.2)은 전 지구적으로 관측된 기후변화 중에서도 가장 극심한 것이었다. 사헬 지역의 강우량은 1982~1983년의 엘니뇨 사상 발생 이후 최소치를 기록하였다. [WGI 3.7.4] 모델링 연구들은 사헬 지역 강우량은 국지적인 토지 이용 변화 보다는 대규모 기후 변동(인간 활동으로 인해 생성된 에어러솔의 변화와도 연결될 수 있음)에 의해 더 영향을 받았다고 주장하고 있다. [WGI 9.5.4]

5.1.2.2 수자원

현 아프리카 인구의 약 25%는 물 스트레스를 받고있으며, 약 69%는 상대적으로 나은 물 환경 조건에서 살고 있다(Vörösmarty et al., 2005). 그러나, 여기서 말하는 상대적으로 나은 조건은 물의 음용 가능성과 접근 가능성, 그리고 위생 서비스의 수혜 등을 고려해 넣은 조건은 아니다. 1990년대에 들어와서 물의 확보에 상당한 개선이 이루어졌음에도 불구하고 2000년 현재로 아프리카 인구의 약 62%만이 개선된 용수 공급을 받았다(WHO/UNICEF, 2000). [WGII 9.2.1]

아프리카 인구의 약 1/3은 상습 가뭄지역에 살고 있고, 가뭄의 영향에 대단히 취약하며(World Water Forum, 2000), 이로 인해 다른 지역으로의 이주와 문화적 분리, 인구의 이동, 고대 문화의 붕괴 등이 초래되었다. 여러 차례의 가뭄은 Sahel 지역과 The Horn of Africa, 아프리카의 남부 지역 등에, 특히 1960년대 말 이후에, 주로 영향을 주었으며, 식량 안보에 심각한 영향을 주어 결국은 굶주림을 가져오게 되었다. 서부 아프리카에서는

연강우량의 감소는 1960년대 말 이후 관측되어 왔으며, 1931~1960년의 30년간과 비교할 때 1968~1990년 기간 동안에는 약 20~40%의 강우량 감소를 보였다(Nicholson et al., 2000; Chappell and Agnew, 2004; Dai et al., 2004a). ENSO의 10년 변동의 영향은 아프리카의 남서지역에서 인식되었으며, 부분적으로는 북대서양 진동(North Atlantic Oscillation, NAO)에 의해 영향을 받은 것으로 보고되고 있다(Nicholson and Selato, 2000). [WGII 9.2.1]

5.1.2.3 에너지

대부분의 아프리카 국가에서의 전력 공급은 수력 발전에 의존한다. 아프리카에서의 에너지 사용에 미치는 기후 변화의 영향을 조사한 연구들은 많지 않다(Warren et al., 2006). [WGII 9.4.2] 그럼에도 불구하고, 아프리카 대륙은 농촌 지역에서의 주 에너지원으로 화목(火木, fuelwoods)에 크게 의존하는 것으로 특징지어지며, 총 에너지 소비량 중 약 70%가 화목에 의한 에너지이다. 바이오매스(biomass) 생산에 미치는 어떠한 기후변화 영향도 바로 화목에 의한 에너지 가용성에 영향을 미치게 될 것이다. 에너지의 확보는 sub-Saharan Africa에서는 심한 제약을 받아 도시 인구의 경우는 약 51%, 농촌 인구의 경우는 약 8%로 추정되는 인구만이 전기 공급을 받고 있으며, 이는 아프리카 북부 지역에서 전기 공급을 받고 있는 도시 지역의 99% 인구나 농촌 지역의 80% 인구나 비교될 수 있다. 도시화라든지, 증가하는 에너지 수요, 변동스러운 오일 가격 등은 아프리카에서의 에너지 문제를 더 복잡하게 만들고 있다. [WGII 9.2.2.8]

5.1.2.4 보건

말라리아

말라리아 질병의 공간적 분포와 전염 강도, 계절성 등은 sub-Saharan Africa에서의 기후에 의해 영향을 받으며, 사회·경제적 개발은 말라리아 질병의 전파를 줄이는데 제한적인 영향을 미칠 뿐이다(Hay et al., 2002a; Craig et al., 2004). [WGII 8.2.8.2]

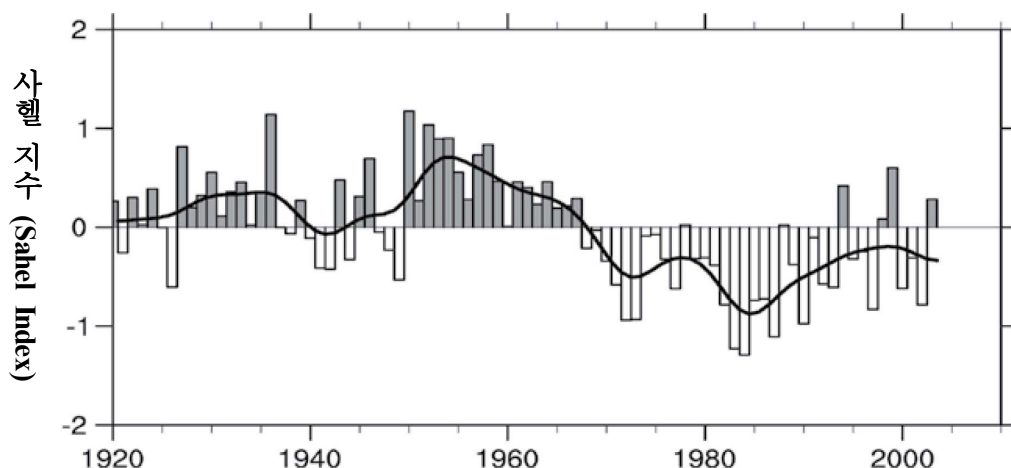


그림 5.2: 관측점 별 연강우량의 정상치 대비 편차를 면적 가중 평균하여 산정한 1920~2003년 동안의 Sahel (10N-20N, 18W-20E) 지역의 강우량(4월~10월)의 사헬 지수(Dai et al., 2004a 참조). 양(+)의 값(음영 처리된 막대그림)은 장기간 동안의 평균값보다 더 습윤한 상태를 표시하며, 음(-)의 값(음영 처리가 되지 않은 막대그림)은 장기간 평균값보다 더 건조한 상태를 표시한다. 매끈하게 그려진 곡선은 10년 단위의 변동성(dacadal variations)을 표시한다. [WGI Figure 3.37]

강우 현상은 모기의 개체수를 제한하는 인자일 수 있으며, 수십 년간에 걸친 강우량의 감소와 관련된 질병의 전파가 감소된 증거도 있다. 해수면 온도 (Thomson et al., 2005b)와 Botswana에서의 복합 모델 앙상블 계절 기후 예보로부터의 비정상적으로 높거나 낮은 말라리아 편차 (변칙)에 대한 예측 가능성의 증거는 아프리카 남부 지역에서의 말라리아 퇴치를 위한 실질적이고 일상적인 계절 예보의 활용을 지원하게 된다 (DaSilva et al., 2004). [WGII 8.2.8.2]

말라리아의 지리적 분포와 고산 지대에서의 전파 속도에 미치는 관측된 기후 변화의 영향은 아직 논쟁거리로 남아 있다. 동 아프리카 지역의 어떤 지점에 대한 시계열 자료 분석 결과는 말라리아 질병 발생이 기후변화 경향이 없는 경우에도 증가해 왔음을 밝히고 있다 (Hay et al., 2002a, b; Shanks et al., 2002). 말라리아 질병의 확산 원인으로는 말라리아 기생물의 약에 대한 저항력 증가와 해충 구제활동의 약화 등을 들고 있으나, 이러한 결론은 기후 자료의 부적절한 사용으로부터 나왔을 수도 있기 때문에 그 타당성은 의문시되어 왔다 (Patz, 2002). 이들 지역에 대한 최신의 기온 자료 분석은 1970년대 말 이후 상당한 온난화 경향이 계속되었음을 밝혔으며, 변화의 규모는 말라리아의 전염 잠재력에 영향을 미칠 정도이다 (Pascual et al., 2006). 아프리카의 남부 지역에서는 비록 계절적 변화가 여러 기후 변수들과 상당히 관련되어 있지만 말라리아의 장기간에 걸친 경향은 기후와는 크게 관련되어 있지 않았다 (Craig et al., 2004). 약에 대한 저항력과 HIV (Human Immunodeficiency Virus, 면역 결핍증 바이러스) 감염은 이들 지역에서의 장기간 말라리아 경향들과 관련되었다 (Craig et al., 2004). [WGII 8.2.8.2]

후속되는 여러 연구들은 아프리카 고산지대에서의 기온의 경년적 변동과 말라리아 전파 사이의 관련성에 대해 보고한 바 있다. 마다가스카르에서의 말라리아 관련 시자료 계열을 분석한 결과는 인간과 해충 간 접촉이 가장 많은 기간에 해당하는 말라리아 전파 시즌 초기의 최저 기온이 대부분의 연도 간 변동성을 설명해 준다 (Bouma, 2003). 케냐의 고산 지역에서의 말라리아 질병 발생은 3~4개월 전의 강우량 및 비정상적으로 높은 최고 기온과 연관시켜 분석된 바 있다 (Githeko and Ndegwa, 2001). 에티오피아 전역에 걸친 50개 지점으로부터 1980년대 말부터 1990년대 초에 이르는 기간 동안의 말라리아 질병의 발생률을 분석한 결과 전염병은 지나간 기간 동안의 월 최저 기온들과 관련되어 있음을 발견하였다 (Abeku et al., 2003). 동 아프리카 고산 지대의 7개 지점으로부터 얻은 자료를 분석한 결과, 말라리아 전염병을 발생시킴에 있어서 단기간 동안의 기후 변동성은 장기간의 기후 변동 성향보다 더 중요하다고 보고하였다 (Zhou et al., 2004, 2005). 그러나, 이 가설을 테스트하는데 사용된 방법에 대해서는 논란이 많다 (Hay et al., 2005). [WGII 8.2.8.2]

기타 물 관련 질병

콜레라와 같은 전염성 질병들은 세계의 여타 지역에서는 박멸되어 가고 있으나, 아프리카에서는 다시 발생하고 있다. 저소득 국가, 특히 sub-Saharan Africa 지역에서 설사로 인한 아동 사망률은 치료 방법의 개선에도 불구하고 아직도 대단히 높다 (Kosek et al., 2003). 아이들은 병이 걸린 후 낫더라도 계속되는 설사로 영양실조가 되어 사망하게 된다. 몇몇 연구들은 장내 병원균의 전파는 우기

동안에 훨씬 활발함을 밝힌 바 있다 (Nchito et al., 1998; Kang et al., 2001). [WGII 8.2.5, 9.2.2.6]

5.1.2.5 농업 부문

농업 부문은 아프리카의 많은 나라에서 지역사회의 생계와 국가 GDP를 위한 주요 생업이라 할 수 있다. 국가 GDP에 기여하는 농업부문의 생산은 나라에 따라 다르나, 일부 평가에 의하면 평균적으로 약 21% (10%로부터 70%까지) 정도로 보고 있다 (Mendelsohn et al., 2000b). GDP에 대한 농업 부문의 기여가 낮은 지역일지라도 농업 부문은 전체 인구의 대단히 큰 부분의 생계를 지탱해줄 수도 있기 때문에 농업생산의 일부 감소는 가난과 식량 안보에 영향을 미치게 될 것이다. 농업부문은 기후 변동 기간을 포함하여 기후에 특히 민감하다. 아프리카의 많은 부분에서 농부 및 목축민들은 토양의 적막함과 해충, 농작물 질병, 씨앗의 개량 등과 같은 자연적인 도전과 제약 사항들과 끊임없이 싸우지 않으면 안 된다. 이와 같은 도전은 오래 계속되는 가뭄과 홍수 발생 기간에 의해 더욱 악화되는 것이 보통이다 (Mendelsohn et al., 2000a, b; Stige et al., 2006). [WGII 9.2.1.3]

5.1.2.6 생태계와 생물 다양성

생태계와 그의 생물 다양성은 아프리카에 사는 인간의 복리에 상당한 기여를 하게 된다. [WGII Chapter 9] 공식적인 보존 지역 밖에서 주로 일어나는 아프리카의 풍부한 생물 다양성은 기후 변동과 변화, 그리고 기타 스트레스로부터 위협 받고 있다 (예: Box 5.1 참조). 아프리카의 사회적 및 경제적 개발은 대륙의 풍부하지만 연약한 생태계의 완전성을 해칠 위험이 있는 기후변화라든지, 생태 서식처의 손실, 선택된 종의 과다 수확, 외래종의 확장, 사냥이나 벌목과 같은 활동 등에 의해 제약을 받고 있다 (UNEP/GRID-Arendal, 2002). 예를 들면, 아프리카의 남부지역에 있는 아 습윤 (sub-humid) 및 반 건조 지역의 약 절반이 사막화될 위험이 상당 수준이거나 혹은 큰 수준에 있다. 서부 아프리카 지역에서의 1970년대부터 1990년대까지의 장기간에 걸친 강우량 감소는 20세기 후반부에 Sahel, Sudan 및 Guinea의 생태학적 구역 (Zone)을 25~35km 정도 남쪽으로 이동시켰으며 (Gonzalez, 2001), 이로 인해 초지와 아카시아가 손실되고, 생물군과 동물군을 잃게 되었으며, 사헬 지역에서는 모래 둔덕 (sand dune)의 이동이 생기는 등 이미 관측되고 있는 영향들이 발생하였다 (ECF and Potsdam Institute, 2004). [WGII 9.2.1.4]

5.1.3 전망되는 변화들

5.1.3.1 수자원

아프리카에서 증가된 인구는 2025년 이전에 즉, 이 보고서가 출판된 날로부터 20년이 채 되지도 전에, 주로 증가되는 물 수요 때문에 물 스트레스를 겪게 될 것으로 예상되고 있다. [WGII 9.4.1] 기후변화는 이러한 조건을 더 악화시킬 것으로 예상된다. SRES의 모든 시나리오에 대하여 평가한 일부 연구에서는 아프리카에서 물 스트레스 증가 위험에 처해있는 인구수는 2020년대와 2050년대까지 각각 0.75~2.5억 명과 3.5~6.0억 명이 될 것으로 전망되고 있다 (Arnell, 2004). 그러나, 아프리카 대륙 전체에 걸친

Box 5.1: 킬리만자로 (Kilimanjaro) 산에서의 환경 변화 [WGII Box 9.1로부터 채택]

기후변화는 킬리만자로 산에서의 자연 생태계를 변경시키고 있다는 증거가 있다. 예를 들면, 건조한 기후 조건의 결과로 킬리만자로 산의 경사지에서 발생하는 산불의 발생 빈도와 강도의 증가는 20세기 동안 최상부의 삼림 서식선 (forest line)을 수백 미터 정도 아래 방향으로 이동시켰다 (그림 5.3, 표 5.1). 이로 인한 1976년 이래의 150 km²에 달하는 삼림 면적의 감소는 안개의 제거와 빗물의 임시적 저장에 주된 영향을 미치게 되어 산악 지역의 물 수지에도 영향을 미쳤다 (Hemp, 2005).

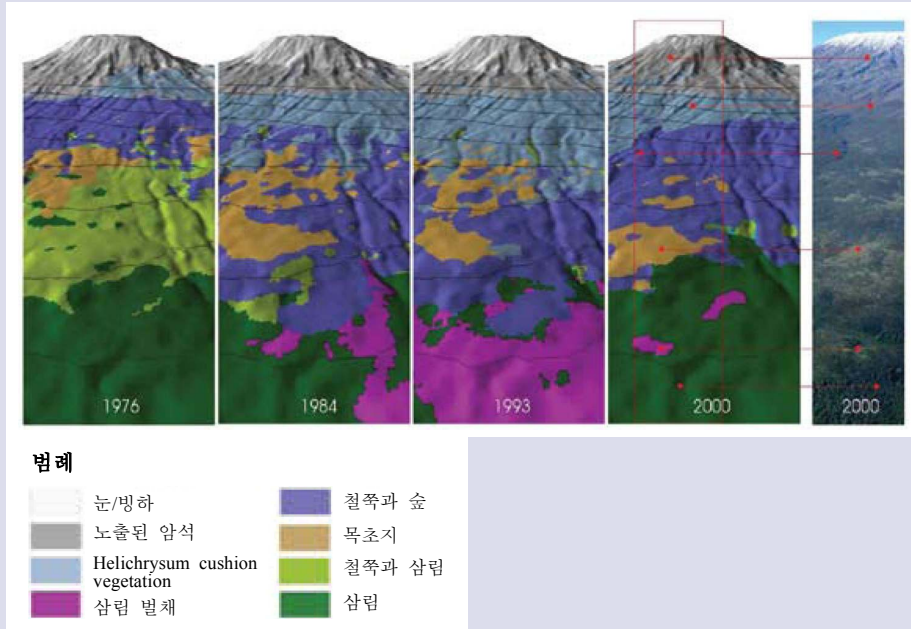


그림 5.3: 킬리만자로에서의 복잡한 토지 이용과 기후 간 상호작용으로 인해 유발된 토지 피복의 변화 (Hemp, 2005). Blackwell Publishing Ltd로부터의 허가에 의해 재 인쇄되었음.

표 5.1: 킬리만자로 산의 상부 지역에서의 토지 피복의 변화 (Hemp, 2005)

식생의 종류	면적 (km ²)		변화율 (%)
	1976년	2000년	
산악 지역 삼림 (Montane forest)	1066	974	-9
아 고산 지대 삼림 (Subalpine forest)	187	32	-83
철쭉과 숲 (Erica bush)	202	257	+27
Helichrysum cushion vegetation	69	218	+216
목초지 (Grassland)	90	44	-51

수자원에 미치는 기후변화의 영향은 균등하지 않다. 6가지 기후 모델을 사용한 분석 (Arnell, 2004)은 아프리카의 북부 및 남부 지역에서 2055년까지 물 스트레스를 경험할 수 있는 사람의 수가 증가할 가능성을 보여주고 있다 (그림 5.4 참조). 반대로, 아프리카의 동부 및 서부 지역에 사는 더 많은 사람들은 물 스트레스의 증가보다는 감소를 경험하게 될 가능성이 더 있을 것이다 (Arnell, 2006a). [WGII 3.2, Fig. 3.2, Fig. 3.4, 9.4.1, Fig. 9.3]

아프리카에 있어서의 지하수는 특히 낮은 비용으로 굴착할 수 있는 우물과 굴착정에 의존하는 농촌 지역에서는 가장 보편적으로 음용수로 사용되는 수자원의 원천이 된다. 지하수의 함양은 강수량과 유출량의 감소로 인해 감소할 것으로 전망되며, 이로 인해 건조기간 동안 농업 용수와 가정용수를 위한 물 수요를 지하수가 보충하는

지역에서는 물 스트레스를 증가시키게 된다. Maghreb 지역의 한 유역에서 실시한 기온 1°C 상승에 따른 영향에 관한 연구에서 강수량이 일정하다고 가정할 경우 유출량의 부족은 약 10%에 달할 것으로 전망하고 있다 (Agoumi, 2003). [WGII 9.4.1, 3.2, 3.4.2]

5.1.3.2 에너지

아프리카에 대한 에너지 연구는 그렇게 많이 되어 있지는 않지만 Zambezi 유역에 대하여 장래 유출의 전망과 함께 실시된 수력발전에 관한 연구에서 특히 아 습윤 지역 (sub-humid regions)에 위치한 하천 유역에서의 수력 발전은 기후변화에 의해 부정적인 영향을 받게 될 것이라고 지적하고 있다 (Riebsame et al., 1995; Salewicz, 1995). [WGII TAR 10.2.11, Table 10.1]

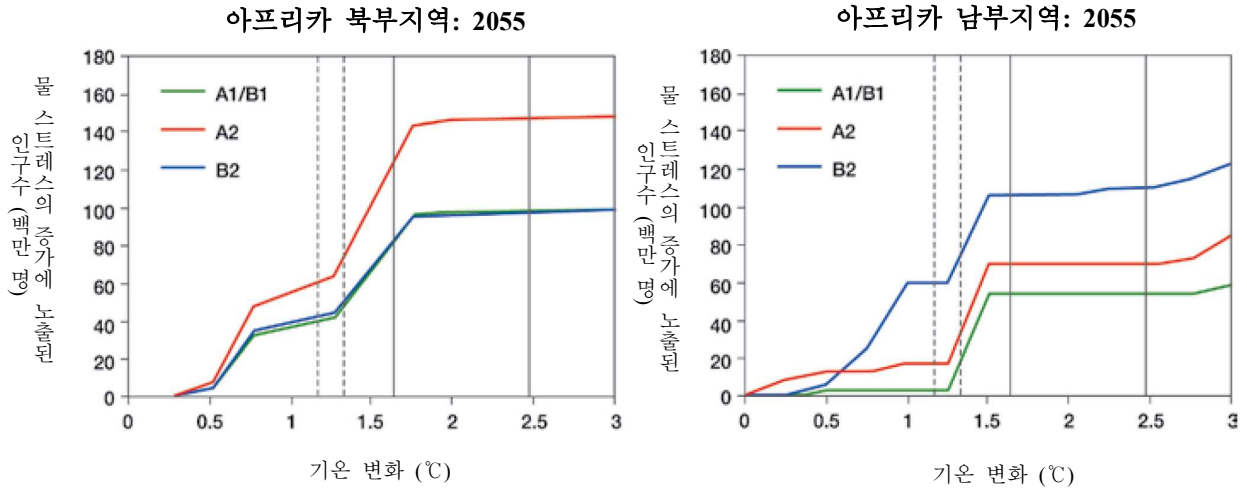


그림 5.4: 1961~1990년과 비교하여 물 스트레스의 증가에 노출된 유역에 살고 있는 인구수 (백만 명) (Arnell, 2006b). 물 스트레스를 받고 있는 유역은 인구 1인당 1,000m³/yr 보다 작은 유출량을 가지며, 기후변화로 인해 유출이 상당 정도 감소할 때 유역 내 인구는 물 스트레스의 증가에 노출된다. 온실가스 배출 시나리오들은 HadCM3로부터 유도 되었으며, 적색, 녹색 및 청색 선들은 각기 다른 인구 전망치와 관계가 있다. 전망된 수문학적 변화는 일부 지역에서 사용된 기후 모델의 종류에 따라 상당히 변화가 크을 주의할 필요가 있다. 보다 많은 유역이 상당한 유출 감소를 겪게 되면 그림에서처럼 단차(steps)가 생기게 된다.

5.1.3.3 보건

상당한 수의 연구들은 기후 변화를 아프리카 대륙에서의 인간 건강 문제와 결부시켜 왔다. 예를 들면, The Mapping Malaria Risk in Africa 프로젝트 (MARA/ARMA)로부터의 결과는 기후 측면에서 2020년, 2050년, 2080년까지의 말라리아 발생에 적합한 지역의 분포 변화를 예측하고 있다 (Thomas et al., 2004). 2050년까지, 그리고 2080년까지도 계속해서 서부 사헬지역과 아프리카 남중부 지역의 많은 부분은 말라리아의 전파에 부적합하게 될 가능성이 있는 것으로 증명되고 있다. 16가지 기후 변화 시나리오를 사용한 기타 평가들 (Hartmann et al., 2002)은 2100년까지 기온과 강수량의 변화가 짐바브웨에서의 말라리아의 지리적 분포를 바꿀 수 있음을 보여주었으며, 이전에 인구 밀도가 높은 부적합한 지역이 말라리아 전파에 적당한 지역이 될 것임을 보였다. [WGII 9.4.3]

기후 변동과 변화로 인해 발생하는 동물 건강의 가능한 미래 변화에 대해서는 상대적으로 아주 적은 평가만이 이루어졌다. 질병의 분포와 범위, 확산, 그리고 계절성에 있어서의 변화들이 예상될 수 있으나, 변화의 정도는 확실하지 않다. 동 아프리카에서 1997~1998년 엘니뇨 사상 발생 기간 동안에 분명하였고, 홍수 범람과 관련된 열곡(裂谷) 열 전염병 (Rift Valley Fever epidemics)은 홍수 범람이 많이 일어나는 지역에서 더 많이 발생할 수 있다 (제3.2.1.2절). 동 아프리카에서 비가 극히 많이 오는 계절의 수는 증가할 것으로 전망되고 있다. 마지막으로, 열 스트레스와 가뭄은 동물의 건강과 낙농품의 생산에 부정적인 영향을 미칠 가능성이 있다 (이러한 현상은 이미 미국에서 관측되고 있다, Warren et al., 2006). [WGI Table 11.1, 11.2.3; WGII 9.4.3, 5.4.3.1]

5.1.3.4 농업

농작물의 성장 기간과 농경 시스템 및 생계 관련 사항에

미치는 기후변화의 영향은 깊이 조사된 바 있다 (Thornton et al., 2006). 세 가지 시나리오에 기초한 최근의 한 연구는 농작물 생산에 의한 순수입은 2100년까지 최대 90% 만큼 떨어질 가능성이 있으며, 소규모 농장이 가장 심각한 영향을 받을 것으로 분석하고 있다. 그러나, 적응대책을 사용하면 이들 부정적인 영향을 감소시킬 수 있는 가능성이 있다 (Benhin, 2006). [WGII 9.4.4]

이집트에서의 기후변화와 물의 가용성, 그리고 농업에 대한 표본 연구 중의 하나가 Box 5.2에 소개되어 있다.

그러나, 기후변화나 기후의 변동성이 모두 무조건 농업에 부정적일 것이라 할 수는 없다. 에티오피아의 고원 지대 부근과 같은 일부 지역에서의 작물 성장기간은 기후 변화 조건 하에서는 길어질 수도 있다. 기온의 증가와 강수량 변화의 조합으로 인해 농작물의 성장기간이 고산 지대에 있는 일부 지역에서 연장될 수도 있다 (Thornton et al., 2006). 예를 들면, 케냐 산(山)과 킬리만자로 산(山)의 고원 지대에서의 서리 (frost)의 감소 결과로 인해 보다 온난 지역에 적합한 농작물인 사과, 배, 보리, 밀 등을 재배하는 것이 가능해질 수도 있다 (Parry et al., 2004). [WGII 9.4.4]

어업은 수입 (revenue)과 고용과 단백질 생산을 위한 또 하나의 중요한 부문이다. 주요 늪지(lagoon)과 호수 시스템이 산재해 있는 해안 지역에서는 담수 흐름의 변화와 늪지로의 염수 침입이 많아지면 내수면 어업과 양식의 기초가 되는 종(種)들이 영향을 받게 될 것이다 (Cury and Shannon, 2004). [WGII 9.4.4]

아프리카에서의 가축에 미치는 기후변화 영향도 조사된 바 있다 (Seo and Mendelsohn, 2006). 14%의 강수량 감소는 가축 두수와 소유 가축 1 마리당 순수입의 감소로 인해 큰 가축 농장의 수입을 약 9% (US\$50억)정도 감소시킬 가능성이 있다. [WGII 9.4.4]

Box 5.2: 이집트에서의 기후, 물의 가용성, 그리고 농업 [WGII Box 9.2]

이집트는 기후변화 아래에서 물 스트레스에 취약할 수 있는 아프리카 국가들 중의 하나이다. 2000년도에 사용된 물의 양은 약 70km³ (700억 m³)로 추정되었으며, 이는 이미 가용한 수자원을 훨씬 초과하는 양이다 (Gueye et al., 2005). 주된 도전은 제한되어 있는 물의 가용량과 여러 가지 경제 부문으로부터의 증가하는 용수 수요량 사이의 격차 (gap)가 급속도로 커지는 것을 막는 것이다. 이집트에서의 물 이용률은 이미 최고치에 도달하였으며, 기후 변화는 이러한 취약성을 더 악화시킬 것이다.

농업은 이집트의 연간 총 수자원의 약 85%를 소비하고 있으며, 국가 경제에 아주 중요한 역할을 하고 있고, GDP의 약 20%에 기여하고 있다. 경작 면적의 70% 이상이 저효율의 지표 관개 시스템에 의존하고 있어서 물의 손실률이 높고, 토지의 생산성이 떨어지며, 침수 및 염도 문제가 발생한다 (El-Gindy et al., 2001). 뿐만 아니라, 지속 가능하지 못한 농경 방법과 부적절한 관개 관리는 수자원의 질에 영향을 미치고 있으며, 이와 같은 관개용수의 수질 저하는 관개되는 토양과 농작물에 해로운 영향을 주게 된다.

이집트의 물 관련 조직기구들은 국가 개량 계획 (National Improvement Plan)을 통해서 2017년까지 다음과 같은 목표를 달성하기 위해 노력하고 있다 (EPIQ, 2002; ICID, 2005)

- 도시 및 농촌 지역에 대한 물 위생 (water sanitation) 서비스의 개선
- 폐수의 관리
- 관개 효율과 농경지 배수 및 물의 재 이용률을 개선함으로써 수자원 이용을 최적화

그러나, 기후 변화로 인하여 다음과 같은 일련의 심각한 위협이 닥칠 것이 분명하다.

- 해수면 상승은 나일 강의 델타 지역과 그 지역에 사는 사람들과 기타 해안 지역에 영향을 미칠 수 있다 (Wahab, 2005).
- 기온의 상승은 주요 농작물의 생산성을 감소시키고, 용수 수요를 증가시킴으로서 농작물의 물 이용 효율을 직접 감소시킬 가능성이 있다 (Abou-Hadid, 2006; Eid et al., 2006).
- 관개 수요는 아마도 일반적인 증가 성향을 가질 것이다 (Attaher et al., 2006)
- 나일 강의 유량에 대해서는 불확실성의 정도가 대단히 높은 수준이 될 것이다.
- SRES 시나리오에 기초하면, 이집트는 전망된 강수량의 감소와 2050년까지의 1.15억~1.79억 명에 달하는 추정 인구로 인해 물 스트레스의 증가를 경험하게 될 가능성이 있으며, 이로 인해 모든 부문 (sectors)에서의 물 스트레스는 증가하게 될 것이다.
- 현재 진행 중인 관개 면적의 확장은 이집트가 하천유량의 추후 변동에 대해 대처할 수 있는 능력을 감소시킬 것이다 (Conway, 2005)

5.1.3.5 생물 다양성

강수량의 변화로 인한 토양 수분의 감소는 여러 가지 측면에서 자연적인 시스템에 영향을 미칠 수 있다. 식물과 동물 종들 다에 주요 멸종이 있을 것이라는 전망들이 있다. 5,000 가지가 넘는 식물 종들은 주로 적절한 서식처의 상실로 인해 기후변화의 영향을 받을 수 있다. 2050년까지 Fynbos Biome (*Ericaceae*-남아프리카의 지배적인 생태계를 형성하고 있는 철쭉과 식물, IUCN/International Union for Conservation of Nature and Natural Resources이 주장하는 뜨거운 감자)은 겨울 강수량의 감소로 그의 생육 영역이 51~61% 정도 손실될 것으로 전망되고 있다. 멸종 위험이 증가하고 있는 2,800여 식물 종을 포함하는 즙이 많은 (succulent) Karoo Biome은 남동쪽으로 확대될 것으로 추정되고 있으며, 약 2%의 *Proteaceae* 종은 바로 멸종될 것으로 전망되고 있다. 이들 식물들은 그들을 먹고사는 새 (조류)들과 밀접하게 관련되어 있다. 가뭄 시 먹이 확보에 취약한 것으로 밝혀져 있는 얼룩말과 니알라 (nyala)와 같은 포유동물 종들은 많은 손실을 입게 될 것으로 전망된다. Kruger라든지 Hwange National Parks와 같은 야생동물 관리 지역에서 야생 동물들은 이미 굴착 관정에 의해 보로 공급되는 용수에 의존하고 있는 실정이다 (Box 5.3 참조). [WGII 4.4, 9.4.5, Table 9.1]

Box 5.3: 남아프리카 Kruger 국립공원에서의 멸종동물에 대한 전망 [WGII Table 4.1]

남아프리카의 Kruger 국립공원에서 1990년 수준 대비 전 지구적 평균기온 상승이 2.5~3.0°C 이상일 때 동물 종류별 멸종률은 다음과 같다.

- 포유 동물: 24~59%
- 조류 (새): 28~40%
- 나비: 13~70%
- 무척추 동물: 18~80%
- 파충류 동물: 21~45%

전체적으로는 동물 종의 약 66%가 멸종될 것으로 보고 있다.

많은 조류 종들은 유럽과 고 (古)북극 (Palaeo-Arctic) 지역으로부터 날라서 이동한다. 어떤 종들은 사하라 사막을 횡단하기에 앞서 거쳐 가는 지역으로 사헬의 남부 지역을 이용하기도 한다. 가뭄으로 인한 이들 지역에서의 식량 부족은 새들의 성공적인 이동을 망칠 수도 있다. 앞에서 살펴 본 바와 같이 사헬 지역에 대한 강수 모델들은 분명

하지 못하다. [WGII 9.3.1] 만약, 습윤 시나리오가 구체화 되면, 사헬 지역의 생물 다양성은 물 스트레스 관련 영향으로 인한 절박한 위협으로부터 자유롭다. 다른 한편으로는 건조 시나리오는 자연 시스템과 인간의 욕구 사이의 경쟁이 심화될 것이기 때문에 더욱 광범위한 멸종 위기를 초래할 것으로 보인다. [WGII 9.4.5]

강수를 주요 환경 인자로 하여 아프리카 남부 지역의 맹금류에 대해 모의해본 결과, 현재보다 기후가 더 건조해짐에 따라 맹금류의 서식 범위는 상당히 감소할 것으로 보고 있다. [WGII 4.4.3] 전체적으로 보면, 보존 지역에 있는 sub-Saharan 지역 동물 종의 약 25~40%는 생존 위협에 처해질 것으로 예측된다. [WGII 9.4.5]

5.1.4 적응과 취약성

아프리카에서의 최근의 많은 연구들은 기본적으로 생계를 자연 자원에 의존하고 있는 지역 주민 그룹의 취약성에 관해 밝히고 있으며, 이는 그들 자원의 기반이 이미 심하게 압력을 받고 있고, 과다 이용으로 인해 질적으로 저하되는 상태에 있으며, 앞으로 기후 변화에 의해 더 큰 영향을 받을 것으로 예상되고 있다 (Leary et al., 2006). [WGII 17.1]

기후의 변화와 변동성은 아프리카에서의 물의 가용성과 물에의 접근성, 공급과 수요 등에 추가적인 압력을 가할 잠재성을 가진다. [WGII 9.4.1] 아프리카 전체 인구의 약 25%인 2억 명 정도가 현재 물 스트레스를 받고 있으며, 더 많은 나라들이 미래에 큰 위협에 직면하게 될 것으로 추측되고 있다 (제5.1.3.1절 참조). [WGII 9.ES] 뿐만 아니라, 특히 아프리카의 북부지역에 있는 여러 국가들은 기후 변화가 발생하지 않더라도 2025년 이전에 그들 국가가 경제적으로 사용 가능한 토지를 기반으로 하는 수자원은 한계 수위에 도달할 것이라고 내다 보아왔다. [WGII 9.4.1] 가뭄과 홍수 등 자주 발생하는 자연 재해들은 아프리카에서 강우에 크게 의존하는 농업의 발전을 크게 제한해 왔으며, 일련의 거시 구조적 및 미시 구조적 문제에 추가하여 식량 안보를 위협하게 되었다. [WGII 9.5.2]

엘니뇨 남방 진동 (ENSO)은 아프리카에서의 경년 스케일에서의 강우에 중요한 영향을 미치며, 장래 기후의 변동성에도 영향을 미칠 수 있다. [WGI 3.7.4, 3.6.4, 11.2] 그러나, 여러 가지 장벽들이 ENSO의 변동에 대한 효과적인 적응 방안을 방해하고 있으며, 이들 장벽으로는 지역 기후의 예보와 관련된 공간적 및 시간적 불확실성과 엘니뇨의 국지적 및 지역적 영향에 대한 의사 결정자들의 낮은 인식 수준, 기후 모니터링과 예보에 있어서의 국가역량의 한계, 대응 전략 수립에 있어서의 협력 부족 등을 들 수 있다 (Glantz, 2001). [WGII 17.2.2]

많은 아프리카 국가들이 (특히, 아프리카의 북부 지역) 지하수에 의존하고 있음에도 불구하고 지하수에 미치는 기후 변동이나 기후변화의 영향에 관해서는 정보가 거의 없다. [WGII 9.2.1]

기후변화가 물에 미치는 영향에 대한 지금까지의 평가는 미래의 다목적 물 이용과 예상되는 물 스트레스 (Agoumi, 2003; Conway, 2005)를 적절하게 취급하지 못하였으므로 수문 현상이라든지, 배수, 기후변화 등에 대한 보다 많은 구체적인 연구가 필요한 것으로 보인다. 낮은 차수 (lower

-order)의 지표수 하천으로부터 취수되는 농촌 지역에서의 장래 물 확보 문제는 하천유역을 공유하는 국가들에 의해 해결될 필요가 있다 (de Wit and Stankiewicz, 2006). [WGII 9.4.1]

수자원에 관련되는 적응 역량과 적응 방법은 아프리카 대륙에는 대단히 중요한 것으로 고려된다. 역사적으로, 가뭄과 홍수에 직면할 경우 이주(migration)는 적응 옵션들 중의 하나로 고려되어 왔으며, 이주는 이주하는 사람들에게 노동을 통한 수입의 원천을 제공하는 것으로 알려져 있다. 기후 변화에의 적응에 기여하는 다른 대책에는 전통적인 혹은 현대적인 빗물 수확 기법 (water-harvesting techniques), 물의 보존 및 저류, 가뭄에 저항하고 조기 수확이 가능한 농작물의 식재 등이 있다. 빗물 수확 및 사용과 관련된 전통적인 지식의 중요성은 가장 중요한 적응 수단 중의 하나로 받아들여져 왔으며 (Osman-Elasha et al., 2006), 이는 비용-효과적이고 참여적이며, 지속 가능한 효율적인 적응 전략의 개발을 보장하기 위한 기후 변화 정책에 이를 포함시켜야 할 필요성을 적시하는 것이라 할 수 있다. [WGII 9.5.1, Table 17.1]

아프리카에서의 수자원에 대한 기후 변화의 영향과 적응 대책의 실행에 드는 비용에 관해서는 정보가 거의 없다. 그러나, 남아프리카 Berg 강 유역에서의 적응 대책 실행에 드는 비용에 대한 초기 평가는, 적응 대책을 사용하지 않을 경우에 드는 비용이 탄력성 있고 효율적인 접근 방법이 기후 변화의 관리 옵션에 포함될 경우에 드는 비용보다 훨씬 클 수 있음을 보여주고 있다 (Stern, 2007). [WGII 9.5.2]

5.2 아시아

5.2.1 개관

아시아는 물의 지역적 분포가 고르지 못하며, 많은 곳에서 물 스트레스를 받고 있는 지역이라 할 수 있다. 아시아의 43개 국가 중 20개국은 인구 1인당 재생 가능한 연간 수자원량이 3,000m³ 이상이고, 11개국은 1,000~3,000m³, 6개국은 1,000m³ 미만이다 (나머지 6개국에 대해서는 관련 자료 없음) (FAO, 2004a, b, c). [WGII Table 10.1] 중국의 서부와 몽고로부터 아시아의 서부에 이르기까지 대단히 넓은 건조 및 반 건조 지역들이 존재한다. [WGII 10.2] 아시아의 습윤 지역 혹은 아 습윤 지역에서도 물의 회소성으로 인한 물 스트레스는 이들 지역의 지속 가능한 개발에 대한 제약 조건들 중의 하나이다. 다른 측면에서 보면, 아시아는 급속도로 늘어나는 많은 인구를 가지며, 경제 개발 수준이 낮고, 기후변화에 적응할 수 있는 능력이 부족하다. 기후 변화는 여러 가지 사회·경제적 스트레스와 함께 아시아 지역에서의 물 부족 문제를 더욱 더 악화시킬 것으로 예측되고 있다. [WGII 10.2]

5.2.2 물에 미치는 관측된 기후변화의 영향

5.2.2.1 담수 자원

강우 현상의 계절적, 경년적 및 공간적 변동성은 아시아 전 지역에 걸쳐 지난 수십 년 동안 관측되어 왔다. 연평균 강우량의 감소 경향은 러시아와 중국의 북동 및 북부

지역, 파키스탄의 해안 지대 및 건조 평원 지대, 인도의 북동부 일부 지역, 인도네시아, 필리핀, 그리고 일본의 일부 지역 등에서 관측된 바 있다. 한편, 중국의 서부 지역, 양자강 유역, 중국의 남동부 지역, 아라비아 반도, 방글라데시와 필리핀의 서해안 선을 따른 지역 등지에서는 연평균 강수량이 증가하는 성향을 보이고 있다. 동남 아시아에서는 엘니뇨와 관련한 극한 일기 사상이 지난 20년 동안 보다 자주, 그리고 더 강하게 발행한 것으로 보고되고 있다 (Trenberth and Hoar, 1997; Aldhous, 2004). 인도 및 동아시아 문순 기후대에 있어서의 10년 단위 기후 변동성은 상당히 크다는 사실을 인지하는 것은 대단히 중요하다. [WGI 3.3.2, 3.7.1; WGII 10.2.2, 10.2.3]

아시아의 여러 지역에서 보다 강한 강우 사상의 발생 빈도는 일반적으로 증가하였으며, 이로 인해 심한 홍수와 산사태, 토석류 등이 발생한 반면, 강우 일수와 연간 총 강수량은 감소하였다 (Zhai et al., 1999; Khan et al., 2000; Shrestha et al., 2000; Izrael and Anokhin, 2001; Mirza, 2002; Kajiwara et al., 2003; Lal, 2003; Min et al., 2003; Ruosteenoja et al., 2003; Zhai and Pan, 2003; Gruza and Rankova, 2004; Zhai, 2004). 그러나, 일부 국가에서는 극한 강우의 발생 빈도가 오히려 감소하는 경향을 보인다는 보고도 있다 (Manton et al., 2001; Kanai et al., 2004). [WGII 10.2.3]

아시아의 여러 지역에서 가뭄의 발생 빈도와 심도가 증가하고 있는 것은 대부분 상승하는 기온에 기인한다고 볼 수 있으며, 이러한 기온 상승은 특히 여름철 건조한 달에, 그리고 ENSO 사상 발생기간 동안에 일어나는 것이 보통이다 (Webster et al., 1998; Duong, 2000; PAGASA, 2001; Lal, 2002, 2003; Batima, 2003; Gruza and Rankova, 2004; Natsagdorj et al., 2005). [WGI Box 3.6; WGII 10.2.3]

주로 온난화로 인한 영구동토의 급격한 해동과 그로 인한 얼어붙은 토양의 깊이 감소 [WGI 4.7.2]는 많은 도시들과 인간의 정주 (human settlement)를 위협해 왔으며, 보다 잦은 산사태와 일부 삼림 생태계의 훼손을 가져왔고, 아시아의 영구동토 지역에 위치하는 호수들의 수위를 증가시켰다 (Osterkamp et al., 2000; Guo et al., 2001; Izrael and Anokhin, 2001; Jorgenson et al., 2001; Izrael et al., 2002; Fedorov and Konstantinov, 2003; Gavriliev and Efremov, 2003; Melnikov and Revson, 2003; Nelson, 2003; Tumerbaatar, 2003; ACIA, 2005). [WGII 10.2.4.2]

평균적으로 보면, 아시아 지역의 빙하는 최소한 1960년대 이후 일정한 비율로 녹아가고 있다 (그림 2.6). [WGI 4.5.2] 그러나, 개개 빙하들은 이러한 패턴과는 달라질 수 있으며, 어떤 빙하는 강수량의 증가로 인하여 더 두꺼워질 수도 있다 (중앙 Karakorum 지역 등에서처럼) (Hewitt, 2005). [WGI 4.5.3] 현재 진행되고 있는 빙하의 융해로 인하여 빙하 유출과 흙탕물 및 눈사태를 발생시키는 빙하호의 월류 빈도는 계속 증가해 왔다 (Bhadra, 2002; WWF, 2005). [WGII 10.2.4.2]

그림 5.5는 인도의 Uttarakhand에 위치한 갠지스 강의 수원부인 Gangotri Glacier가 1780년 이래에 하류 방향으로 어떻게 이동해 왔는지를 보여주고 있다. 이와 같은 빙하의 이동은 인간 활동으로 인한 기후변화와 연계시켜 왔지만 공식적으로는 이에 관한 연구가 수행된 바는 없다. 그림 5.5의 빙하의 혀 (tongue)부분은 대체로 평편하며 많은

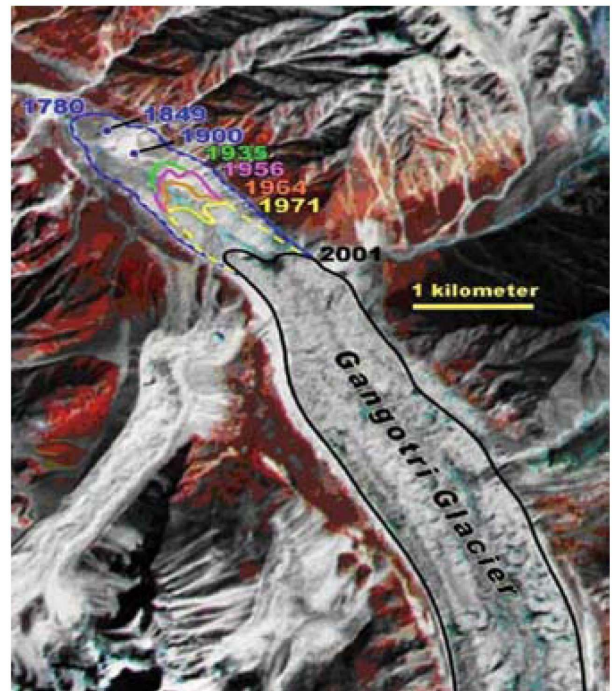


그림 5.5: Gangotri Glacier (Uttarakhand, India)에 위치한 갠지스 강의 수원부의 시발점이 1780년 이래에 어떻게 수축되어 왔는지를 표시하는 복합 위성 영상 (NASA EROS Data Center, Sept. 9, 2001). [WGII Fig. 10.6]

얼음 덩어리로 덮여 있음을 주시할 필요가 있다. 이러한 특성을 가지는 쪼그라든 혀는 토석류가 어떠한 기후 신호든지 지연시키게 되므로 특정 기후 신호와 관련시키기가 어렵다. 평편한 혀는 상대적으로 별 면적 변화 없이 수십 년 동안에 걸쳐 얇아진 후에 급격한 면적의 변화로 갑작스럽게 무너지는 경향이 있다. [WGII 10.6.2]

중국의 일부 지역에서는 증가하는 물 사용과 함께 기온의 상승과 강수량의 감소는 물 부족 현상을 초래했으며, 이로 인해 하천과 호수들이 말라버리는 결과가 발생하였다. 인도, 파키스탄, 네팔, 방글라데시 등에서는 물 부족을 급속한 도시화라든지, 산업화, 인구 증가, 비효율적인 물 사용과 같은 문제점들 때문으로 보아왔으며, 이들 문제점들은 변화하는 기후와 그로 인한 물 수요와 공급 및 수질에 미치는 영향들에 의해 더 악화될 것이다. Brahmaputra-Ganges-Meghna 지역과 인더스 강 유역에 위치한 국가에서는 물 부족은 상류의 하천변에 거주하는 사람들과 하천의 물을 과도하게 저장하기 때문에 발생한다. 아시아의 중부 및 서부 지역에 위치한 건조 지역 및 반건조 지역에서는 기후와 그의 변동성에 있어서의 변화는 증가하는 물 수요를 충족시키기 위한 국가들의 능력에 계속 도전하게 될 것이다 (Abu-Taleb, 2000; Ragab and Prudhomme, 2002; Bou-Zeid and El-Fadel, 2002; UNEP/GRID-Arendal, 2002). 통상적으로 ENSO와 관련되는 강수량의 감소와 기온의 상승은 증가하는 용수 수요와 비효율적인 물 사용으로 인해 이미 물 스트레스를 받고 있는 아시아의 여러 지역에서 물 부족을 더욱 심화시키고 있는 것으로 보고되고 있다 (Manton et al., 2001). [WGII 10.2.4.2]

5.2.2.2 농업

지난 수십 년 동안 쌀, 옥수수, 밀 등의 생산은 상승하는 기온, 엘니뇨 사상의 발생 빈도 증가, 강우 일수의 감소 등 일부 원인으로 인한 물 스트레스의 증가 때문에 아시아의 여러 지역에서 감소해 왔다 (Wijeratne, 1996; Agarwal et al., 2000; Jin et al., 2001; Fischer et al., 2002a; Tao et al., 2003a, 2004). [WGII 10.2.4.1]

5.2.2.3 생물 다양성

성수기 동안 풀의 성장에 필요한 강우량의 점진적 감소와 함께 아시아의 중부 및 서부 지역에 있어서의 건조도는 최근 몇 년 동안 더욱 높아졌으며, 이로 인해 초지의 성장은 감소하였고, 맨 땅으로 남아있는 지표면은 늘어났다 (Bou-Zeid and El-Fadel, 2002). 이와 같이 보다 많은 지표면이 맨땅으로 남으면 태양 방사열의 반사율이 증가하게 되어 토양 수분의 증발이 심화되고, 피드백 현상으로 지표면은 더욱 더 건조해져서, 결국에는 초지의 황폐화를 가져오게 된다 (Zhang et al., 2003). [WGII 10.2.4.4]

파키스탄, 방글라데시, 인도, 중국 등의 델타 지역 대부분에서의 감소된 강수량과 그로 인한 가뭄은 습지를 메마르게 하고 생태계를 심각하게 훼손시켰다. 하천 상류부에서의 저수지 건설과 지하수의 부적절한 사용뿐만 아니라, 1999년부터 2001년까지 반복된 가뭄은 중국 북동 지역의 Songnen 평원에 위치한 Momoge 습지를 완전히 말라버리게 하였다 (Pan et al., 2003). [WGII 10.2.4.4]

5.2.3 물과 주요 취약성에 미치는 전망된 기후 변화의 영향

5.2.3.1 담수 자원

하천 시스템을 통한 물 흐름의 계절성과 물의 양에 있어서의 변화는 기후 변화로 인해 예상되는 일이다. 러시아의 일부 지역에서는 기후 변화가 하천 유출의 변동성에 중대한 변화를 주게 되어 러시아 남서부의 농작물 재배 지역에서 극히 작은 유출 사상들이 훨씬 빈번하게 발생할 수도 있을 것으로 보고 있다 (Peterson et al., 2002). 유프라테스 강이나 티그리스 강과 같은 주요 하천 유역으로부터의 지표수 가용량은 하천 유량의 변동에 따라 큰 영향을 받게 될 것이다. 레바논에서는 연간 순 사용 가능한 수 자원량은 이산화탄소 배증 ($2 \times \text{CO}_2$) 조건 하에서 평균적으로 기온 1.2°C 증가 시 GCM으로 산정한 값보다 약 15% 감소하는 반면에, 하천에서의 유량은 겨울에는 증가하고 봄에는 감소할 것으로 전망하고 있다 (Bou-Zeid and El-Fadel, 2002). 메콩 강의 최대 월 유량은 1961~1990년 수준과 비교할 때 유역 내에서는 35~41%, 델타 지역에서는 16~19% 증가할 것으로 전망되고 있으며, 이들 값 중 하한치는 2010~2038년에 대한 것이고 상한치는 2070~2099년에 대한 추정치이다. 반대로, 최소 월유량은 유역 내에서는 17~24%, 델타 지역에서는 26~29% 정도 감소할 것으로 전망 (Hoanh et al., 2004) [WGII Box 5.3] 하고 있어서, 우기 동안에는 홍수 범람 위험이 증가하고 건기 동안에는 물 부족이 심화 될 가능성이 큼을 시사하고 있다. [WGII 10.4.2.1]

홍수 범람은 염수 어종의 서식지를 증가시킬 수 있으나, 특히, 인구밀도가 대단히 높은 거대 델타 지역에서는 각종 양식업과 어업 관련 기반시설에 심각한 영향을 미칠 수도

있다.

건기 동안 하천 유량이 감소하면 일부 어종들은 감소하게 된다. 중앙 아시아의 일부 지역에서는 기온의 지역적 상승이 인간의 정주에 악영향을 미칠 수 있는 진흙탕 흐름이나 눈사태와 같은 사상들의 발생 가능성을 증가시킬 것으로 보고 있다 (Iafiazova, 1997). [WGII 10.4.2.1]

하천 유출량의 감소로 인한 하구부에서의 염수 침입은 해수면 상승에 따라 내륙 방향으로 10~20km 씩 밀려서 올라가게 된다 (Shen et al., 2003; Yin et al., 2003; Thanh et al., 2004). Zhujiang과 Changjiang 하구부에서의 수온과 부영양화의 증가는 하구부 바닥에 산소 부족층을 형성시켰으며, “red tides”의 강도와 발생 빈도를 증가시키는 결과를 초래했다 (Hu et al., 2001). 해수면 상승량이 0.4~1.0m 이면 Zhujiang 하구에서의 내륙방향 염수 침입거리는 약 1~3km 정도 상류로 이동하게 된다 (Huang and Xie, 2000). 또한, 유역 내에서 발생하는 가뭄의 발생 빈도와 심도가 증가하면 하구 지역에서의 염수 침입의 정도와 발생 빈도는 훨씬 더 커지게 되어서 지표수 및 지하수의 수질을 저하시키게 될 것이다. [WGII 10.4.2.1, 10.4.3.2]

눈이 내리는 위도가 올라가고 눈과 빙하가 더 빨리 녹아 내리면, 남부 및 중앙 아시아 지역의 여러 나라에서의 하류 지대 농업에 유리하지 못할 것이다. 봄철의 용설량과 용설물은 중국의 북서 지역과 몽고의 서부 지역에서 더욱 더 증가될 것이며, 용설의 시기가 앞당겨져서 수량을 증가시켜 봄철에 홍수 범람을 일으킬 수도 있으나, 금세기 말까지는 가축을 위한 물 가용량이 상당히 부족할 것으로 전망되고 있다 (Batima et al., 2004, 2005). [WGII 10.4.2, 10.6]

중기적으로 보면, 기후 변화로 인해 커지고 있는 눈과 빙하의 용해는 홍수 범람을 유발시킬 것이다. 또한, 그러한 홍수는 부유 상태에 있는 얼음덩어리가 수로를 막게 되어 하천 수위를 상승시킴으로써 발생하는 경우가 많다. [WGII 10.4.2, 10.6]

관측된 변화의 선형적 외삽에 의하면 중국 북서부 지역의 전망된 지표면 대기온도의 증가는 1961~1990년과 비교할 때 2050년까지는 빙하면적을 약 27% 감소시키고, 동토 지역의 면적을 약 10~15% 감소시키며, 홍수와 토석류를 증가시킬 뿐 아니라 보다 심한 물 부족을 가져올 것으로 예측하였다 (Qin, 2002). 티베트 고원이란지 Xinjiang, 내몽고 등과 같은 고산지역에서의 계절성 적설 (snow cover)의 기간은 짧아질 것으로 예상되며, 이로 인해 수량은 부족해지고 봄 가뭄은 극심해질 것이다. 21세기 말까지는 Ningxia, Xinjiang, Qinghai 등의 도에서의 인구 1인당 연간 유출량의 감소는 20%~40%가 될 가능성이 있다 (Tao et al., 2005). 그러나, 증가하는 인구와 사회·경제적 개발로 인해 수자원에 대한 압력은 점점 더 커질 가능성이 있다. Higashi et al. (2006)은 SRES A1B 시나리오 하에서의 2050년과 2300년 사이의 일본 동경에서의 홍수 위험은 현재 조건에서 보다 1.1~1.2배 더 높아질 가능성이 있는 것으로 전망하고 있다. [WGII 10.4.2.3]

인도에서의 인구 1인당 총 물 가용량은 인구 증가로 인해 (Gupta and Deshpande, 2004) 2001년의 약 $1,820\text{m}^3/\text{yr}$ 으로부터 2050년의 $1,140\text{m}^3/\text{yr}$ 까지 크게 감소할 것으로 전망되고 있다. 또 다른 한 연구는 인도의 인구 1인당 물 가용량이 $1,000\text{m}^3/\text{yr}$ 이하로 떨어질 것으로 전망되는

2025년 이전에 물 스트레스를 받게 될 것이라고 지적하고 있다 (CWC, 2001). 이들 변화는 기후학적 및 인구 통계학적인 인자들로 인한 것이나 이들 인자들의 상대적인 비중은 알 수가 없다. 인도 대륙에 걸쳐 전망되고 있는 겨울철 강수량의 감소는 메마른 몬순 기간 동안 물 저장량의 부족과 더 많은 물 스트레스를 의미하게 될 것이다. 몬순 기간 동안 강한 강도의 강우 발생 일수가 줄어들면 홍수의 발생 빈도가 증가하는 결과가 초래되므로 유역의 지하수 함양 잠재력이 약화될 수도 있다. 아시아의 남부 및 남동부 지역에는 심각한 물 스트레스를 받으면서 살고 있는 사람들의 수가 크게 증가할 가능성이 있으므로 심각한 물 스트레스 아래에 있는 면적의 확대는 예측 가능한 미래에 이들 지역에서의 가장 도전적인 환경 문제들 중의 하나가 될 것이다. SRES의 모든 시나리오를 다 고려하면 2020년대까지는 1억 2,000만~12억 명, 2050년대까지는 1억 8,500만~9억 8,100만 명이 증가된 물 스트레스를 경험하게 될 것이라고 보고되고 있다 (Arnell, 2004). 21세기 말까지 Red River의 연간 유출량 감소는 13~19%, 메콩 강의 경우는 16~24%가 될 것으로 전망되고 있으며, 이는 물 스트레스를 심화시키는 원인이 될 것이다 (ADB, 1994). [WGII 10.4.2]

5.2.3.2 에너지

유출량의 변화는 전 세계에서 3번째로 큰 수력 발전국인 Tajikistan과 같은 나라의 전력생산에 중요한 영향을 미칠 수 있다 (World Bank, 2002). [WGII 10.4.2]

5.2.3.3 농업

아시아의 건조 지역과 반 건조 지역에서의 관개 농업에 대한 수요는 기온 1°C 상승에 따라 최소 10%는 증가할 것으로 추산되고 있다 (Fischer et al., 2002a, Liu, 2002). Tao et al. (2003b)의 연구를 기초로 하면, 중국의 북부 및 북동부 평원지역의 천수답 작물 (rain-fed crops)은 각종 용수 수요의 증가와 전망되고 있는 강수량의 감소와 관련된 되는 토양 수분 미흡량의 증가 때문에 앞으로 몇 십년간 물과 관련된 도전에 직면하게 될 수 있다. 그러나, 그림 2.8과 2.10의 결과 도시에 사용된 모델 중 2/3 이상의 모델들이 이 지역에서의 강수량과 유출량이 증가하는 것을 보여주고 있다. 중국의 북부지역에서는 지표수와 지하수 수원으로부터의 관개는 기후변화 영향과 증가하는 용수 수요 때문에 농산물 생산을 위한 전체 물 수요량의 70% 밖에 충족시키지 못하는 것으로 전망되고 있다 (Liu et al., 2001; Qin, 2002). [WGII 10.4.1] 점점 커지고 있는 수문학적 특성들의 변동성은 아시아의 많은 나라에서 농작물 공급과 식량안보에 계속적인 영향을 미치게 될 가능성이 있다.

5.2.4 적응과 취약성

아시아 국가들의 현재의 물 관련 취약성은 국가에 따라 각각 다르다. 물과 관련하여 현재로서는 큰 위협에 직면하지 않고 있는 일부 국가들은 적응을 위한 여러 가지 능력을 갖추어 미래의 물 스트레스 위협에 대처할 것으로 예상된다. 아시아의 남부, 동부, 그리고 남동부의 인구 밀도가 특히 높은 거대 델타 지역인 해안 지역들은 하천 및 해안 홍수의 증가로 인한 범람 위험성에 가장 크게 노출될 것으로 예측된다. 아시아의 남부 및 동부 지역에서는 기후변화 영향과 급격한 경제 및 인구 성장간의 상호작용과 농촌으로부터 도시 지역으로의 이주가 개발에 영향을

미칠 것으로 예상된다. [WGII 10.2.4, 10.4, 10.6]

한 사회의 취약성은 그 사회의 개발과정과 물리적 여건, 자원의 분포, 과거로부터 이어지는 여러 가지의 스트레스, 그리고 사회적 및 정부의 조직구조 등에 의해 영향을 받게 된다. 어떠한 사회든 기후의 어떤 변동에 대처할 수 있는 타고난 능력을 일부 가지게 되나, 적응할 수 있는 용량은 나라에 따라, 그리고 사회의 성격에 따라 균등하게 분포되어 있지는 않다. 빈곤 계층과 소외 계층은 역사적으로 각종 위협에 가장 심하게 빠져있어 왔으며, 기후변화 영향에 가장 취약하다. 아시아에서의 최근의 몇몇 연구는 사회적으로 무시되고, 기초 자원에만 의존하는 생계 그룹은 그들의 자연 자원 기반이 심하게 스트레스를 받거나 과사용으로 인해 나빠질 경우, 혹은 그들의 지배구조가 효율적으로 반응할 수 있는 능력을 상실할 때에는 기후변화 영향에 특히 취약해진다고 주장하고 있다 (Leary et al., 2006). [WGII 17.1] 적응 (adaptation)은 관측되거나 혹은 예상되는 기후 변화에 대한 반응으로 나타나는 것으로 확인되고 있다. 예를 들면, 기후변화는 Maldives에서의 해안선 방어와 네팔에서의 빙하호의 범람으로 인한 홍수의 방지 등을 위한 기반시설 프로젝트의 설계 고려사항 중의 한 부분을 형성하는 것으로 볼 수 있다 (Box 5.4 참조). [WGII 17.2, 17.5, 16.5]

아시아 일부 지역에서의 농작물 재배지의 삼림 (혹은 초지)으로의 전환이라든지, 식생지의 복원 혹은 재조성, 수목이나 각종 목초의 개량, 그리고 가뭄에 강한 새로운 여러 가지 농작물 및 수종의 선택 재배는 기후변화로 인한 물 부족에 적응할 수 있는 효율적인 수단이 될 수 있다. 관개용수의 절약 방법은 이미 물 스트레스를 받고 있는 지역에서의 물 부족 문제를 해소하기 위해 사용될 수 있다 (Wang, 2003). 아시아 북부 지역에서는 도시 폐수의 재순환과 재이용 (Frolov et al., 2004)과 관개용수 및 기타 용수 사용의 효율성 제고 (Alcamo et al., 2004) 등은 물 부족 해소에 도움이 될 가능성이 있을 것이다. [WGII 10.5.2]

하천 유량이 감소할 것으로 전망되고 있는 메콩 강과 같은 하천에서 댐 및 저수지 등과 같은 계획된 물 관리 시설들은 우기의 하천 유량을 가능한 범위까지 감소시킬 수 있을 뿐 아니라 건기의 하천 유량을 상당한 수준으로 증가시킬 수도 있다. [WGII 10.5.2, 10.5.7]

수자원에 미치는 기후변화 영향을 최소화하기 위해 아시아의 여러 지역에 적용될 수 있는 적응 수단에는 여러 가지가 있으며, 이중 몇 가지는 물의 이용에 있어서의 기존의 비효율성에 초점을 맞추고 있다.

- 기존 관개시설의 현대화와 물 스트레스를 받고 있는 국가에서의 수자원 및 재순환된 물의 이용에 있어서 물리적 및 경제적 효율성을 최적화하기 위한 용수 수요의 관리
- 가용한 수자원의 활용도를 높이고, 통합 물 관리로 지향하며, 환경을 보호하고, 농업을 위한 물 이용 관련 실무 관행을 개선할 수 있도록 하는 공공 투자 정책의 구현
- 비 음용수 수요의 충족을 위한 물의 이용방법으로 하수나 폐수를 처리한 후 재순환시킨 물로 습지나 하천 연안 서식처를 조성하고 환경 개선을 위해 사용 [WGII 10.5.2]

특히, 아시아의 개발도상국에서의 효율적인 적응방법과 적응 능력 (용량)은 여러 가지 생태학적, 사회적 및 경제적, 기술적, 조직상의, 혹은 정치적인 압박으로 계속 제한을

Box 5.4: 관측된 예방 차원의 적응 방안으로서의 네팔의 Tsho Rolpa 위험 감소 프로젝트. [WGII Box 17.1]

Tsho Rolpa는 네팔 왕국의 고도 약 4,580m에 위치하고 있는 빙하호이다. 빙하가 녹아서 축소됨에 따라 Tsho Rolpa 빙하호의 수 면적 크기는 1957/58년의 0.23km²에서 1997년의 1.65km²로 증가하였으며 (그림 5.6), 이 시기에 이 호수에 담겨있던 9,000만~1억m³의 물은 단 한 개의 퇴석 (堆石, moraine)담에 의해 지탱되고 있었다. 따라서, 이와 같은 상태는 재앙에 가까운 빙하호 범람 홍수 (glacial lake outburst flood, GLOF)의 위험성을 내포하고 있었으므로 감소를 위한 긴급한 조치를 취해야만 할 형편이었다.

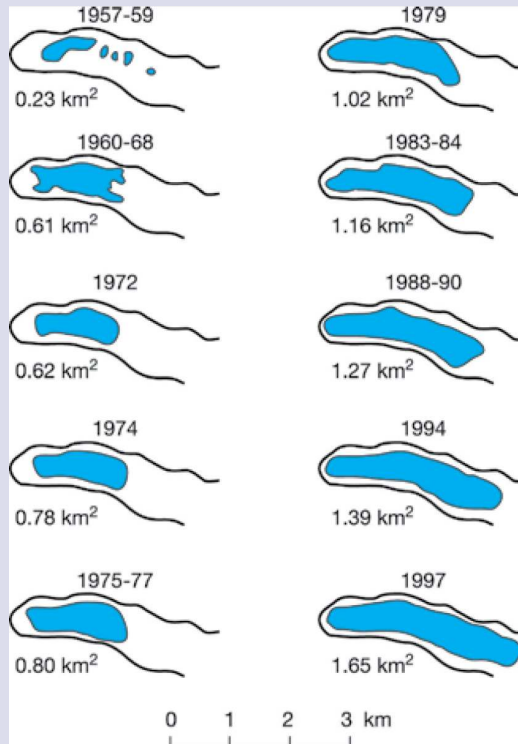


그림 5.6: Tsho Rolpa 빙하호의 기간별 수표면 면적의 변화

만약 그 댐이 파괴되었다면 호수 내 물의 1/3 혹은 그 이상이 하류 하천을 홍수로 쓸어버렸을 것이며, 기타 다른 고려사항으로는 호수의 하류에 건설 중이었던 Khimti 수력 발전소에 대한 주요 위협이었다. 이러한 문제 때문에 네팔 정부는 국제기구로부터 재정 지원을 받아 호수로부터 물을 배제시켜 호수 수위를 낮추기 위한 프로젝트를 1998년에 시작하였다. 한 전문가 그룹은 GLOF의 위험을 감소시키기 위해서는 퇴석에 수로를 굴착하여 배수함으로써 호수의 수위를 3m 만큼 낮출 것을 추천하였다. 호수로부터의 물 방류를 조절할 수 있도록 수문이 설치되었고, 이와 같은 노력에도 불구하고 Tsho Rolpa 호의 빙하호 범람 홍수 (GLOF)가 발생할 경우를 대비하여 하류의 19개 마을에 조기 경보 시스템을 설치하였었다. 지역 주민들은 이 시스템의 설계에 활발하게 참여했으며, 주기적으로 안전훈련이 실시되었다. 2002년에는 US\$320만의 건설비용으로 4년간의 건설 프로젝트를 완공하였다. GLOF를 완전히 방지하려면 호수의 수위를 더 낮출 수 있도록 추가적인 배수를 해야 하므로 GLOF의 위험을 감소시키는 데는 분명히 엄청난 비용과 시간이 소요된다 하겠다.

Tsho Rolpa 호의 사례는 좀 더 넓은 관점에서 보아야 한다. 네팔과 부탄 (Bhutan), 티베트 등 국가가 위치한 히말라야 산맥 지역에서 발생하는 GLOF의 발생 빈도는 1950년대의 연간 0.38회에서 1990년대의 연간 0.54회로 증가한 것으로 보고되고 있다. [WGII 1.3.1.1]

자료원: Mool et al. (2001), OECD (2003), Shrestha and Shrestha (2004).

받게 될 것이다. 물의 재순환은 기후 변화에 적응하는 방향으로의 지속 가능한 접근 방법이며 장기적으로 비용 효율적일 수 있다. 그러나, 현재 싱가포르에서 실제로 시행하고 있는 물의 재사용을 위한 폐수의 처리와 송수 시스템의 설치에 투입된 물이나 지하수의 사용과 같은 용수공급 대안들과 비교하면 시행 초기에는 비용이 더 많이 들어갈 수 있다. 그럼에도 불구하고 이들 방법은 아시아의 여러 나라에서 잠재적으로 중요한 적응 대안들이라 할 수 있다. 기온의 상승과 강수량의 감소로 인한 용수공급 가능량의 감소 영향을 완화시키기 위해 물의 낭비와 누수량을 감소시키기 위한 수단들이 동원될 필요가 있다. 낭비성 물 사용을 감소시키기 위한 시장 지향 접근 방법의 사용은 수자원에 미치는 기후변화의 부정적 영향을 감소시키는데 효과적일 수 있다. 우기의 하천 유량은 증가하고, 건기의 하천 유량은 감소할 것으로 전망되는 메콩 강과 같은 하천에서 댐 및 저수지와 같은 계획된 물 관리시설은 우기의 하천 유량을 최적으로 감소시키고 건기에는 상당히 증가시킬 수 있게 된다.

5.3 호주와 뉴질랜드

5.3.1 개관

호주와 뉴질랜드는 수문학적으로, 그리고 지질학적으로 크게 다르나 두 나라 모두 기후의 자연적 변동성과 인간 활동으로 인해 최근의 기후변화로 인한 용수공급 영향을 이미 경험하고 있다. 자연적 기후 변동성의 가장 강한 지역적 동인은 ENSO (제2.1.7절 참조)이다. 2002년 이래 호주의 거의 모든 동부의 주들과 남서부 지역은 가뭄을 겪어 왔다. 이 가뭄은 최소한 1895년과 1902년에 발생했던 소위 “연방의 가뭄 (Federation Drought)”에 비교되는 심각한 가뭄으로 기후변화와 그로 인한 수자원의 지속 가능한 물 관리에의 영향에 관한 상당한 논쟁을 유발해 왔다. [WGII 11.2.1, 11.2.4]

용수 수요의 증가는 관개나 도시, 공업, 그리고 환경에 필요한 유량의 공급 가능 용량에 스트레스를 가해왔다. 1980년대 이래로 뉴질랜드에서 증가된 물 수요는 농업 생산 증대 (Woods and Howard-Williams, 2004) 때문이었다. 뉴질랜드의 관개 면적은 1960년대 이래로 매 10년마다 약 55%씩 증가하였으며 (Lincoln Environmental, 2000), 1985년부터 1996년까지 호주의 용수 수요는 65%씩 증가하였다 (NLWRA, 2001). 호주에서는 건조지역 땅의 높은 염도와 하천유량의 변동, 수자원의 과다 할당 및 비효율적 사용, 토지의 청소, 농업생산의 증대, 생태계의 훼손 등이 환경적 스트레스의 주요 원천이 된다 (SOE, 2001; Cullen, 2002). 기후변화가 전망되고 있는 입장에서 보면 용수공급은 호주에서 가장 취약한 부문 중의 하나이며, 뉴질랜드의 여러 지역에서도 주요 문제점 중의 하나가 될 것으로 예상된다. [WGII 11.ES, 11.2.4, 11.7]

5.3.2 관측된 변화들

서부 호주의 남서부에 위치한 겨울비가 지배적인 지역은 20세기 중반 이후 5월~7월 강우량의 상당한 감소를 경험하였다. 자연 유출에 미친 강우량 감소의 영향은 Perth 시에 용수를 공급하는 저수지들로의 연간 유입량이 50% 정도 감소한 사실이 증명한 바와 같이 대단히 심각하였다 (그림 5.7). 유사한 압력은 국지적인 지하수와 습지에도 가해졌으며, 이러한 현상으로 인해 20년간 가정 용수 사용량은 20%가 증가하였고 연간 1.7%의 인구 증가가 있었다 (IOCI, 2002). AR4 출간 시점에서는 공식적인 원인 구명 연구가 이루어지지 않았었지만 기후 모의 결과들은 관측된 건조화(drying) 양상의 원인 중 일부를 온실가스의 증가와 상관시켰다 (IOCI, 2002). 최근 몇 년 동안, 아주 심한 다년간 계속된 가뭄이 호주의 동부 및 남부 일부 지역에서 발생하였다. 예를 들면, 2006년 직전 5년간에 걸친 Murray 강으로의 유입량은 5년 기간 유량 중에서는 기록상 제일 작은 값이었다. [WGII 11.6]

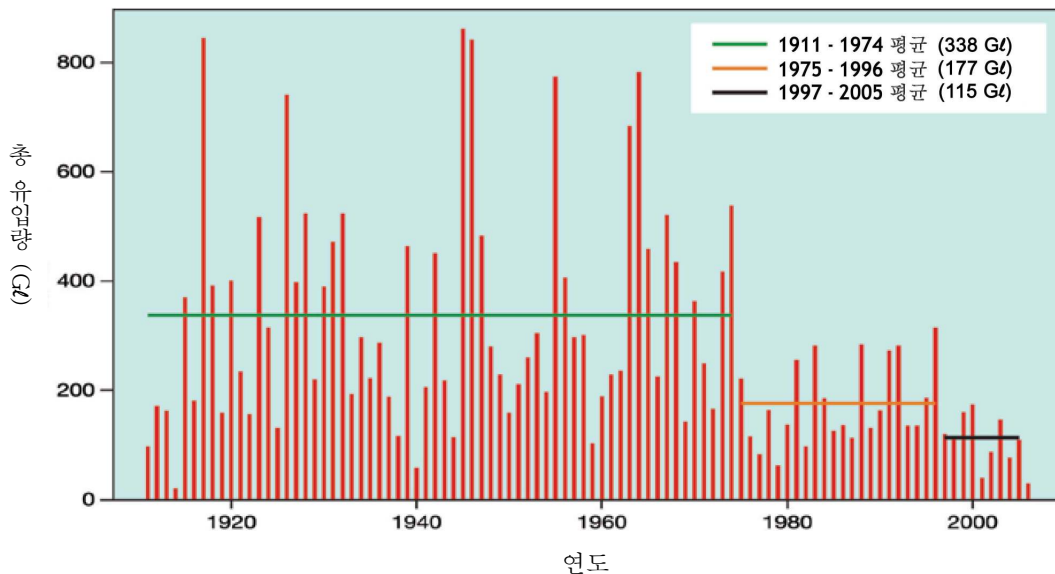


그림 5.7: 1911~2006년 동안의 Perth 시의 물 공급 시스템으로의 연평균 유입량 (Giga Litre, Gt=10⁶m³). 수평으로 그은 직선들은 기간 평균치임. 자료원: http://www.watercorporation.com.au/D/dams_streamflow.cfm (Water Corporation of Western Australia 제공) [WGII Fig. 11.3]

5.3.3 전망되는 변화들

5.3.3.1 물

현재 진행되고 있는 물 안보 문제는 호주의 남부 및 동부 지역과 주요 하천으로부터 멀리 떨어져 있는 뉴질랜드의 동부 일부 지역에서 2030년까지는 점점 커질 가능성이 대단히 크다. [WGII 11.ES] Murray-Darling 유역은 호주의 가장 큰 하천 유역으로서 관개된 농작물과 목초의 약 70%를 차지한다 (MDBC, 2006). SRES A1과 B1 배출 시나리오와 광범위한 여러 GCM을 사용하여 유역에서의 연 하천 유출량을 전망해 본 결과 2050년까지는 10~25% 감소하고, 2100년까지는 16~48% 감소하며, 이에 해당하는 염도의 변화 범위는 각각 -8~+19%와 -25~+72%로 전망된다 (Beare and Heaney, 2002). [WGII Table 11.5] 빅토리아 주에 있는 29개 유역에서의 유출은 0~45%까지 감소하는 것으로 전망된다 (Jones and Durack, 2005). A2 시나리오에 대한 전망에 의하면, 호주 동부의 여러 지역에서의 연 유출량은 6~8% 감소하며, 호주의 남서부 지역에서는 1961-1990년 기간에 대비할 때 2021~2050년 기간 동안에는 14% 정도가 감소할 것으로 보고 있다 (Chiew et al., 2003). 10개의 기후 모델 (SRES B1, A1B, A1F 시나리오 등을 가정)을 사용하여 벨버른 시에 대한 위험도 평가를 한 결과 평균 하천유량은 2020년까지는 3~11%, 2050년까지는 7~35%가 감소하는 것으로 나타났으나, 수요와 공급 측의 조치 계획을 수립하면 2020년까지는 물 부족을 겪지 않을 수도 있다 (Howe et al., 2005). 호주에 있어서의 지하수에 대한 기후변화 영향에 대해서는 알려져 있는 것이 별로 없다. [WGII 11.4.1]

뉴질랜드에서는 South Island 강으로부터 겨울에 상대적으로 더 많은 유출이 발생하고 여름에는 적은 유출이 발생할 가능성이 대단히 크다 (Howard-Williams, 2004). 이는 겨울철 철두 전력 수요 기간 동안 수력발전을 위한 보다 많은 물을 제공하고, 발전 용량을 다음해 겨울로 이전하기 위하여 물을 저류하는 호수에 덜 의존할 가능성이 대단히 크다. 그러나, 관개에 의존하는 농업 (낙농업, 농작물 생산업, 과수업 등)은 물 수요가 가장 큰 시기인 봄과 여름에 가용한 물이 풍부하지 못해서 부정적인 영향을 경험하게 될 가능성이 있다. 관개되지 않은 농지로부터의 농업 생산에 잠재적인 손실을 초래하게 되는 가뭄 발생 빈도의 증가는 동부 지역에서 있을 가능성이 대단히 크다 (Mullan et al., 2005). 홍수와 가뭄의 발생 빈도에 미치는 기후변화의 영향은 ENSO와 IPO (Inter-decadal Pacific Oscillation)의 위상에 의해 조절되는 것이 사실상 확실하다 (Mckerchar and Henderson, 2003). 오클랜드 시를 위한 지하 대수층은 검토된 모든 시나리오 하에서 지하수 함양을 위한 여유 용량을 가지고 있다 (Namjou et al., 2006). 주요 하천과 샘 (springs)의 기저 유량은 가뭄년이 여러 해에 걸쳐 연속해서 발생하지 않는 한 떨어질 가능성이 매우 낮다. [WGII 11.4.1.1]

5.3.3.2 에너지

호주와 뉴질랜드에서 기후변화는 기후로 인한 용수 공급량의 감소가 수력 터빈을 돌릴 물과 화력 발전소를 위한 냉각수를 감소시키는 지역에서의 에너지 생산에 영향을 미칠 수 있다. 뉴질랜드에서는 서풍의 풍속 증가가 South Island의 주요 유역에서 바람의 발생과 강수 현상을

촉진시키고 Waikato 유역에서의 겨울철 강우를 증가시킬 가능성이 매우 크다 (Ministry for the Environment, 2004). 온난화가 용설과, 강설량에 대한 강우량의 비, 겨울과 이른 봄의 하천유량 등을 증가시키는 것은 사실상 확실하며, 이는 난방을 위한 에너지 수요가 최대에 달하는 시기에 수력 발전을 할 수 있도록 지원해 줄 가능성이 매우 크다. [WGII 11.4.10]

5.3.3.3 보건

Ross River 질병이라든지, 뎅그 열병 (dengue, 뎅, 근육이 아픈 열병), 말라리아 등과 같은 모기로 인해 발생하는 전염성 질병의 지리적 발생 범위와 발생 시기에 변화가 생길 가능성이 있다. 발생 횟수는 작지만 더 강하게 내리는 강우 사상들은 모기 번식에 영향을 주며, 특히 온난 지역이나 반 건조지역에서 Ross River 질병의 연간 발생률의 변동성을 증가시킬 가능성이 있다 (Woodruff et al., 2002, 2006). 뎅그 열병은 호주에서 대단히 위협적인 질병이다. 호주의 극북 지역 기후는 *Aedes aegypti* (뎅그 열병 바이러스의 주요 모기 곤충)의 서식에 적합하며, 뎅그 열병은 지난 10여년에 걸쳐 호주의 극북 지역에서 발생 규모와 빈도가 증가하면서 발생해 왔다. 말라리아는 공공 보건 상태가 극단적으로 나빠지지 않는 한 발생할 가능성이 거의 없다 (McMichael et al., 2003). [WGII 11.4.11]

부영양화는 주요 수질 문제의 원인 중의 하나이다 (Davis, 1997; SOE, 2001). 독성의 적조는 기후변화로 인해 더 자주 나타나며, 더 오랫동안 계속될 가능성이 있으며, 리크리에이션과 소비적인 물 사용 둘 다를 위한 인간 건강에 위협이 될 수도 있고, 또한 물고기와 가축을 죽게 할 수도 있다 (Falconer, 1997). 플라싱 (flushing)용 유량과 같은 간단한 적응 관리 전략은 영양분이 풍부하고 열이 성숙화된 물속에서의 부영양화의 발생과 발생 기간을 크게 감소시킬 수 있다 (Viney et al., 2003). [WGII 11.4.1]

5.3.3.4 농업

농업의 지리적 분포와 농업 서비스에 있어서의 큰 변화가 있을 가능성이 대단히 크다. 건조한 지역에서 불모지의 경작은 물 부족과 새로운 생물학적 위해, 환경질의 저하 및 사회적 혼란 등으로 인해 지속 가능하지 못하게 될 가능성이 있다. [WGII 11.7] 관개에 의존하는 농작물 재배와 기타 농업 관련 산업들은 관개용수의 가용량이 줄어들면 위협을 받을 가능성이 있다. 뉴질랜드에서의 옥수수의 경우 성장기간의 감소는 농작물의 물 소모량을 감소시켜서, 계절적인 기후 조건에 따른 개발의 동시성을 제공하게 된다 (Sorensen et al., 2000). 호주와 뉴질랜드 두 나라에서의 포도 재배지의 분포는 고수확 목초와 식립에 비교한 적합성과 관개용수 가용량 및 비용에 따라 변화할 가능성이 있다 (Hood et al., 2002; Miller and Veltman, 2004; Jenkins, 2006). [WGII 11.4.3]

5.3.3.5 생물 다양성

수많은 자연 생태계의 구조와 기능, 종의 구성 등에 미치는 기후변화 영향들은 2020년까지 중요할 것으로 보이며, 외래 침입 종이나 서식처 상실 (예: 이주성 조류)과 같은 기존 스트레스를 더 악화시키고, 종의 멸종 확률을 높이며, 여러 자연 시스템의 질을 떨어뜨리고, 용수공급을 위한 생태계 서비스를 감소시키게 될 것은

사실상 확실하다. 수자원에 미치는 기후변화의 영향은 외래 침입 종이나 서식처 파괴와 같은 다른 스트레스 요인들과 상호 작용하게 된다. 해수면의 상승 결과로 생기는 염수 침입은 하천에 물이 흐를 때에는 감소하고, 증가한 가뭄 발생빈도는 담수 서식지의 종 구성을 변화시키고, 하구와 해안의 어업에 영향을 미치게 될 가능성이 매우 크다 (Bunn and Arthington, 2002; Hall and Burns, 2002; Herron et al., 2002; Schallenberg et al., 2003). [WGII 11.ES, 11.4.2]

5.3.4 적응과 취약성

계획된 적응 대책은 취약성을 크게 감소시킬 수 있으며, 공급 측면은 물론이고 수요에 미치는 기후변화 영향으로 인한 위험을 포함시킬 기회는 항상 있다 (Allen Consulting Group, 2005). Perth, Brisbane, Sydney, Melbourne, Adelaide, Canberra, 그리고 Auckland와 같은 주요 도시에서 인구 압력이나, 호주의 남부와 동부에서 진행되고 있는 가뭄, 그리고 기후 변화의 영향 등에 대한 관심은 수자원 계획자로 하여금 일련의 적응 옵션을 고려하게 만든다. 어떤 적응 옵션은 관측된 기후변화에 반응하여 이미 사용된 반면에 (예: 진행 중인 물 관련 제약, 물의 재순환, 해수의 담수화 등, 표 5.2 참조) [WGII Table 11.2, 11.6], 호주와 뉴질랜드 두 국가는 연구와 지식 개발에 대한 지원을 증가시키고, 의사 결정자들을 위한 기후변화 위험에

대한 평가를 확대하며, 기후변화를 각종 정책과 계획에 반영하고, 인식을 재고함은 물론, 기후 관련 문제점들을 보다 효율적으로 다룸으로서 기후변화에의 적응 역량을 구축하는데 주목할 만한 성과를 이룩하였다. 그러나, 이들 적응 역량을 실현하는 데에는 아직 환경적, 경제적, 사회적, 정보 측면 및 태도 측면, 그리고 정치적 장벽들이 그대로 남아 있다. [WGII 11.5]

도시 구역에서는 비록 물 분배를 위한 기존의 조직 체계나 기술 시스템이 실현에 제약을 주기는 하지만 빗물과 재순환된 물은 용수공급을 보완하기 위해 사용될 수 있다. 뿐만 아니라, 재순환된 물을 인간의 물 소비를 위해 사용하는데 대한 지역 사회의 저항이 없지 않다 (예: Queensland의 Toowoomba 시와 New South Wales 주의 Goulburn 시 등) 빗물 탱크의 설치는 또 하나의 적응 방안이며, 현재에는 장려 정책이나 리베이트 부여 등을 통해 활발하게 추진되고 있다. 농촌지역 활동으로는 물 매매를 통해 물 이용 효율을 증가시킬 수 있는 물 시장의 확대를 통해 보다 융통성 있는 물 할당 방법을 찾을 필요가 있다 (Beare and Heaney, 2002). 이러한 측면에서 보면, 실질적인 개선이 현재 이루어지고 있다. National Water Initiative 정책에 따라 주정부와 중앙정부는 물 값 징수의 일관성 유지를 위해 최적의 물 가격 결정 체계와 조직 체계의 구축을 위해 노력하고 있다. [WGII 11.5]

표 5.2: 호주에서의 물 부족에 대처하기 위한 정부의 적응 전략 예 [WGII Table 11.2] 표에 기록된 투자금액은 2007년 4차 평가 보고서 (AR4)가 출간될 당시는 정확한 금액이었으나, 그 이후의 물가 변동은 고려되지 않았음.

정부	전략	투자액	자료원
호주	농촌 마을에 대한 가뭄 원조	US\$7억 (2001~2006)	DAFF, 2006b
호주	National Water Initiative (호주의 Water Fund에 의해 지원)	US\$15억 (2004~2009)	DAFF, 2006a
호주	Murray-Darling Basin Water Agreement	US\$4억 (2004~2009)	DPMC, 2004
Victoria	Melbourne's Eastern Treatment Plant (재순환 용수의 공급)	US\$2.25억 (2012까지)	Melbourne Water, 2006
Victoria	Bendigo-Ballarat간 신규 파이프라인 (물 재순환, 댐 간 연결, 수로의 누수 감소, 물 보존 수단)	US\$1.53억 (2015까지)	Premier of Victoria, 2006
Victoria	Wimmera Mallee 파이프 라인 (관개 개수로 대체용)	US\$3.76억 (2010까지)	Victoria DSE, 2006
New South Wales (NSW)	NSW Water Savigns Fund (Sydney 에서의 물 절약 및 재순환 프로젝트 지원)	US\$0.98억 (Round 3), US\$0.25억 (68개 프로젝트)	DEUS, 2006
Queensland	Queensland Water Plan (2005~2010) (물 사용 효율성 및 수질의 개선, 물의 재순환, 가뭄 대비, 신규 용수 가격 책정 등)	US\$1.82억 (서남부 지역 물 기반시설), US\$3.02억 (기타 기반시설)	Queensland Government, 2005
S.Australia	Water Proofing Adelaide Project (2025년까지 Adelaide의 수자원 관리, 보존 및 개발을 위한 청사진 계획)	N/A	S.Australia Government, 2005
W.Australia	State Water Strategy (2003) 및 State Water Plan (proposed) WA Water Corporation는 1990~2006년 사이에 공급을 2배로 확대	US\$5억 (1996~2006) US\$2.9억 (Perth의 담수화 공장)	W.Australia Government, 2003, 2006; Water Corporation, 2006

기후변화 영향이 다른 비 기후적인 경향과 결합될 때 호주와 뉴질랜드에서는 지속 가능성을 위한 심각한 문제들이 있을 수 있다. 증가하는 도시 및 농촌의 물 수요가 이미 지속 가능한 공급 수준을 초과한 어떤 하천유역에서는 진행 중이거나 제안되어 있는 적응 전략들 [WGII 11.2.5]은 약간의 시간을 벌 가능성이 있다. 해안 지역의 계속적인 개발물은 그러한 개발이 지속 가능하기를 기대하는 한 보다 빈틈없는 계획과 규제를 요구할 가능성이 있다. [WGII 11.7]

5.4 유럽

5.4.1 개관

유럽은 수많은 하천으로 물이 풍부하며, 많은 하천들은 대륙의 중앙부로부터 바깥쪽으로 흐르고 있고 기복이 낮은 광활한 면적을 가지고 있다. 유럽의 주된 기후 형식은 해양성, 전이성 (transitional), 대륙성, 극지성 및 지중해성 기후이다. 주요 식생 피복형은 동토대(tundra), 침엽수림대, 낙엽성의 혼합 수림대, 대초원 지대 및 지중해성 지대 등이다. 상대적으로 큰 비율의 유럽 지역에서 농사를 짓고 있는데 전체 면적의 약 1/3이 경작할 수 있는 땅으로 분류되며, 곡물이 가장 지배적인 농작물이다. [WGII TAR 13.1.2.1]

기후변화에 대한 유럽 대륙의 민감도는 분명한 북-남 경사를 가지고 있으며, 여러 연구 결과는 유럽 남부 지역이 가장 심하게 영향을 받을 것이라고 지적하고 있다 (EEA, 2004). 이미 뜨겁고 반 건조성의 유럽 남부 지역의 기후는 역시 더 덥고 더 건조해질 것으로 예상되며, 지역의 내륙 수로와 수력 발전, 농업 생산, 목재 생산 등을 위협할 것으로 예상되고 있다. 유럽의 중부와 동부에서는 여름철 강수량은 감소할 것으로 추정되고 있으며, 이로 인해 물 스트레스를 증가시킬 것이다. 유럽 북부 지역에 있는 국가들 또한 온난화 초기 단계에는 농작물 수확량이나 삼림 생산의 확대 등의 측면에서 일부 편익을 얻을 수도 있을 것이나, 기후 변화에는 대체로 취약하다. [WGII

12.2.3, SPM]

환경 측면에서의 중요한 압력은 생물 다양성이라든지, 경관, 토양과 토지의 질 저하, 삼림의 황폐화, 자연 재해, 물 관리, 그리고 위락 환경 등과 관계를 가진다. 유럽의 대부분의 생태계는 완전 관리되거나 절반 관리되고 있으며, 오염과 다른 인간 활동의 영향으로 훼손되고 있거나 많은 스트레스 아래에 있다. [WGII TAR 13.1.2.1]

5.4.2 관측된 변화들

대부분의 대서양쪽 및 북부 유럽 지역에 걸친 겨울철 평균 강수량은 1946~1999년 기간 동안 증가하였으며 (Klein Tank et al., 2002), 이는 부분적으로 겨울철 NAO의 변화와 관련하여 해석되어야 한다 (Scaife et al., 2005). 지중해 지역에서는 1950~2000년 기간에 걸친 매년의 강우량의 변동 성향은 동부 지역에서는 부정적이었다 (Norrant and Douguédroit, 2006). 강수일 당 평균 강수량의 증가는 유럽 대륙의 모든 지역에서 관측되었으며, 심지어는 점점 더 건조해지는 일부 지역에서도 관측된 바 있다 (Frich et al., 2002; Klein Tank et al., 2002; Alexander et al., 2006). 수문학적 및 열역학적 체계에 있어서의 이들과 기타 변화의 결과 (Auer et al., 2007)로 관측된 영향들은 정보 자료화되어 있으며, 이들 중 일부가 표 5.3에 정리되어 있다. [WGI Chapter 3; WGII 12.2.1]

5.4.3 전망되는 변화들

5.4.3.1 물

일반적으로, 모든 시나리오의 경우 유럽의 북부지역에서는 연평균 강수량이 증가하나, 남부 지역으로 내려오면 감소하는 것으로 전망되고 있다. 그러나, 강수량의 변화는 대규모 대기 순환과 수증기 부하량의 변화에 반응하여 계절에 따라, 그리고 지역에 걸쳐 상당한 변화를 보인다. Räisänen et al. (2004)에 의하면 여름철 강수량은 유럽의 남부 및 중부 지역에서 상당히 감소할 것이고 (SRES A2 시나리오의 경우 일부 지역에서는 70%까지 감소), 스칸

표 5.3: 자연 생태계 및 인공 (관리된) 생태계에 있어서의 최근 변화를 최근의 기온과 강수량 경향에 연관시킨 내용 [WGII Table 12.1로부터 발췌]

지역	관측된 변화들	참고문헌
지상 생태계		
Fennoscandian mountain 및 아북극 (sub-Arctic) 지역	Lapland (스칸디나비아 반도의 최 북부 지역)에 있는 몇몇 종류의 습지 소멸, 식물의 한계 고도에서의 종 다양성의 증가	Klanderud and Birks, 2003; Luoto et al., 2004
농업		
유럽의 북부 일부 지역	덥고 건조한 여름 동안의 농작물 스트레스의 증가 우박으로 인한 농작물 위협의 증가	Viner et al., 2006
빙권 (氷圈)		
러시아	영구 동토의 두께 및 지역적 범위의 감소와 기반시설 피해	Frauenfeld et al., 2004 Mazhitova et al., 2004
알프스	고도가 낮은 지역에서의 계절적인 적설의 감소	Laternser and Schneebeli, 2003; Martin and Etchevers, 2005
유럽	빙하의 체적 및 면적의 감소 (노르웨이의 일부 빙하는 예외)	Hoelzle et al., 2003

디나비아 반도의 중부 지역까지는 약간 덜 감소할 것이다. Giorgi et al. (2004)는 여름철에 대서양의 북동부에 걸쳐 반 선풍형 순환 (anticyclonic circulation)이 강화될 것임을 밝혔으며, 이는 서부 유럽에는 산마루를, 동부 유럽에는 계곡을 이루도록 유도한다. 이와 같은 차단 구조는 호우를 북쪽으로 돌려 유럽의 서부 및 중부 지역은 물론, 지중해 지역의 광범위한 유역에 걸쳐 강수량의 상당한 감소를 초래하게 된다. [WGI Table 11.1; WGII 12.3.1.1]

기후 변화는 수자원에 일련의 영향을 미칠 것으로 전망되고 있다 (표 5.3). 연 유출량은 대서양과 유럽 북부지역에서 증가하고 (Werritty, 2001; Andréasson et al., 2004), 유럽의 중부와 동부 지역, 그리고 지중해 지역에서는 감소할 것으로 전망되고 있다 (Chang et al., 2002; Etchevers et al., 2002; Menzel and Bürger, 2002; Iglesias et al., 2005). SRES의 A2와 B2 시나리오와 2개의 다른 기후 모델로부터의 기후 시나리오를 따를 경우 연평균 유출량은 유럽의 북부지역 (북위 47 이북)에서 2020년대까지는 약 5~15%, 2070년대까지는 약 9~22% 정도 증가할 것으로 전망된다 (Alcamo et al., 2007). 그런데, 유럽의 남부지역 (북위 47 이남)에서는 유출량은 2020년대까지는 0~23% 정도 감소하고, 2070년대까지는 6~36% 정도 감소하는 것으로 전망된다 (동일한 가정 하에). 지하수 함양은 유럽의 중부 및 동부 지역에서 감소할 가능성이 있으며 (Eitzinger et al., 2003), 계곡부 (Krüger et al., 2002)와 헝가리의 초원 지대와 같은 저지대에서는 상당히 크게 감소할 것이다 (Somlyódy, 2002). [WGII 12.4.1, Fig. 12.1]

침투 유량이 발생하는 계절에는 하천 유량은 커지고, 저유량 계절에는 작은 유량이나 혹은 건조 기간이 길어지는 등 하천 유량의 계절성은 점점 증가하고 있다 (Arnell, 2003, 2004). [WGII 3.4.1] 라인 강 (Middelkoop and Kwadijk, 2001)과 슬로바키아 강 (Szolgay et al., 2004), 볼가 강과 유럽의 중부 및 동부 지역 (Oltchev et al., 2002)에서는 겨울철 하천 유량은 증가하나 여름철 유량은 감소한다는 연구 결과들이 있다. 초기에는 빙하의 후퇴가 알프스 지역 하천의 여름철 유량을 증가시킬 것으로 전망되나 빙하가 일단 수축되고 나면 여름철 유량은 약 50% 까지 (Zierl

and Bugmann, 2005) 감소될 것으로 전망된다 (Hock et al., 2005). 여름철 저유량은 유럽의 중부 지역에서 약 50% 까지 감소할 것으로 전망되고 있으며 (Eckhardt and Ulbrich, 2003), 유럽 남부지역의 일부 하천에서는 80% 까지 감소할 것으로 보고 있다 (Santos et al., 2002). [WGII 12.4.1]

가뭄 위험이 증가할 우려가 가장 큰 지역들은 지중해 지역과 유럽의 중부 및 동부 일부 지역들이며, 이들 지역에서는 관개용수 수요가 크게 증가할 것으로 추정되고 있으며 (Döll, 2002; Donevska and Dodeva, 2004), 이는 지속 가능한 토지 이용 계획의 개발 필요성을 암시하고 있다. 관개의 필요성은 현재 관개가 이루어지지 않고 있는 국가들 (예: 아일랜드 등)에서 상당히 커질 가능성이 있다 (Holden et al., 2003). 기후변화와 각종 용수 목적의 이용량 증가로 인해 심각한 물 스트레스를 받게 될 지역 (수자원의 가용량에 대한 이용량의 비가 40% 이상인 지역)은 증가할 것이며, 가용한 수자원의 확보를 위한 경쟁은 더욱 심각해질 가능성이 있다 (Alcamo et al., 2003b; Schröter et al., 2005). [WGII 12.4.1]

표 5.4에는 유럽에서의 장래 가뭄과 홍수에 미치게 될 기후변화의 영향을 연대별로 요약하고 있다. 홍수 위험은 대륙 전체에 걸쳐 증가될 것으로 전망되고 있으며, 홍수 발생 빈도가 가장 커지기 쉬운 지역들은 유럽 동부지역 이고, 그 다음은 유럽 북부 지역, 대서양의 해안 지역, 유럽 중부 지역 등의 순이며, 유럽 대륙의 남부와 남동부 지역에 대한 전망에 의하면 가뭄 발생 빈도가 크게 증가할 것으로 보고 있다. 또한, 일부 지역에서는 홍수와 가뭄의 발생 위험이 모두 동시에 증가될 것으로 전망되고 있다. [WGII Table 12.4]

Christensen과 Christensen (2003), Giorgi et al. (2004), Kjellström (2004), Kundzewicz et al. (2006) 등은 모두 일 강수 사상의 강도가 엄청나게 증가하는 현상을 발견하였으며, 이는 유럽 중부 지역이나 지중해 지역과 같이 평균 강수량이 감소하는 지역에도 해당된다. 여름 동안 지중해 지역에 걸쳐 발생하는 이러한 기후변화의 영향은 강한 대류형 강우 성분과 그의 대단히 큰 공간적 변동성 때문에 분명하지는 않다 (Llasat, 2001). [WGII 12.3.1.2]

표 5.4: 유럽에서의 연대별 가뭄과 홍수 발생에 미치는 기후 변화의 영향 (ECHAM4와 HadCM3 모형을 기초로 한 여러 가지 시나리오 조건 사용), [WGII Table 12.2]

연대별	물 가용량 및 가뭄	홍수
2020년대	<ul style="list-style-type: none"> - 북부 유럽에서는 연 유출량이 15% 까지 증가. - 남부 유럽에서는 23%^(a) 까지 감소. - 여름철 유량의 감소^(d). 	<ul style="list-style-type: none"> - 북부 유럽에서는 겨울철 홍수 위험 증가. - 유럽 모든 지역에서 돌발 홍수 위험 증가. - 융설로 인한 홍수의 위험은 봄철로부터 겨울철^(e)로 이동.
2050년대	<ul style="list-style-type: none"> - 유럽의 남동부 지역^(b)에서는 연 유출량이 20~30%까지 감소. 	
2070년대	<ul style="list-style-type: none"> - 유럽 북부 지역에서는 연 유출량이 30% 까지 증가하고, 남부지역^(a)에서는 36% 까지 감소. - 여름철 저유량은 80% 까지^{(b),(d)} 감소. - 유럽 북부 지역에서는 가뭄 위험이 감소하고, 서부 및 남부 지역에서는 증가함. - 2070년대까지는 현재의 100년 빈도 가뭄은 스페인과 포르투갈의 많은 지역과 프랑스의 서부 지역, 폴란드의 Vistula 유역, 터키의 서부지역^(c) 등에서 평균 매 10년에 1회 정도 재현할 것으로 추정됨. 	<ul style="list-style-type: none"> - 현재의 100년 빈도 홍수량은 유럽의 북부 및 북동부 지역 (스웨덴, 핀란드, 북 러시아), 아일랜드, 중부 및 동부 유럽 (폴란드, 알프스 강 지역), 남부 유럽의 대서양 쪽 지역 (스페인, 포르투갈)등에서 더 자주 발생할 것으로 추정됨. 유럽의 남부의 광범위한 지역에서는 큰 홍수의 발생이 드물 것으로 추정됨.

^(a) Alcamo et al., 2007, ^(b) Arnell, 2004, ^(c) Lehner et al., 2006, ^(d) Santos et al., 2002.

기온 상승과 여름철 평균 강수량 감소의 복합적 효과는 열파(熱波, heatwave)와 가뭄의 발생을 촉진시킬 것이다. Schär et al. (2004)은 미래의 여름철 유럽 기후는 경년적 변동성의 확연한 증가를 경험하게 될 것이므로 열파와 가뭄의 발생 빈도는 커질 것이라고 결론짓고 있다. 지중해 지역과 심지어는 유럽 동부의 많은 지역에서는 21세기 후반부까지 건조한 기간이 길어지게 될 수도 있다(Polemio and Casarano, 2004). Good et al. (2006)에 의하면 연중 가장 긴 건조기간(dry spell)은 50% 까지 증가할 수 있다(특히, 프랑스와 유럽 중부 지역). 그러나, 가뭄과 열파에 대한 이들 전망 중의 일부는 지역 기후 모델에서의 토양 수분 관련 매개 변수 결정의 불확실성으로 인해 약간 과다 산정될 수도 있다는 최근의 연구 결과가 있다(Lenderink et al., 2007). 증발 수요를 촉진시키는 기온의 상승에 따른 유럽 남부 지역에서의 여름철 강수량 감소는 불가피하게 토양 수분의 감소를 가져올 수밖에 없게 되어서(Douville et al., 2002), 결국에는 보다 잦은, 그리고 보다 심한 가뭄이 발생하게 될 것이다. [WGII 3.4.3, 12.3.1]

2080년대까지는 영국의 여러 지역에서는 용설로 인한 침투 홍수량이 감소할 것이라는 연구 결과들이 있다(Kay et al., 2006b). 그러나, 홍수 발생 체계에 미치는 기후변화의 영향은 긍정적인 수도 있고 부정적인 수도 있으며, 기후변화 영향의 전망에 아직도 남아 있는 불확실성에 대한 지적이 있다(Reynard et al., 2004). Palmer와 Räisänen (2002)은 control run과 CO₂를 점진적으로 증가시키는 앙상블 run에 의해 모델링된 겨울철 강수량의 차이를 분석하여 CO₂가 2배가 되는 시기를 계산한 바 있다. 유럽 전역에 걸쳐 대단히 습윤한 겨울(겨울철 강수량이 많음)이 될 위험성이 크게 증가하고 있음이 밝혀졌으며, 정상 강수량보다 표준편차의 2배를 초과하는 겨울철 총 강수량의 발생 확률은 유럽의 넓은 지역에 걸쳐 크게(심지어는 5~7배 정도) 증가하며, 그로 인해 겨울철 홍수 재해가 발생할 가능성이 있는 것으로 밝혀졌다. [WGII 3.4.3]

5.4.3.2 에너지

수력은 유럽에서 핵심적인 재생 가능한 에너지원 중의 하나이다(전기 생산량의 약 19.8%를 차지). 2070년까지 유럽 전체의 수력 포텐셜은 6% 정도 감소할 것으로 예측되고 있으며, 지역적인 내용을 보면, 지중해 지역에서는 20~50%의 감소가 예상되고, 유럽 북부와 동부 지역에서는 15~30%의 증가, 그리고 서부 및 중부 지역에서는 대체로 안정적인 것으로 보고 있다(Lehner et al., 2005). 바이오연료(biofuel)는 주로 수분의 공급과 식물 성장 기간의 길이에 따라 결정된다. [WGII 12.4.8.1]

5.4.3.3 보건

기후변화는 또한 유럽에서의 물의 질과 양에 영향을 미칠 가능성이 있어서 공공 및 민간에 의한 용수 공급을 오염시킬 위험이 있다(Miettinen et al., 2001; Hunter, 2003; Elpiner, 2004; Kovats and Tirado, 2006). 극한 강우와 가뭄 둘 다 담수에서의 미생물 부하량을 증가시키며, 각종 질병의 발생과 수질 모니터링 등의 문제와 관계가 있다(Howe et al., 2002; Kistemann et al., 2002; Opopol et al., 2003; Knight et al., 2004; Schijven and de Roda Husman, 2005). [WGII 12.4.11]

5.4.3.4 농업

예측된 극한 일기 사상(예: 높은 기온과 가뭄이 계속되는 기간)의 발생 횟수 증가(Meehl and Tebaldi, 2004; Schär et al., 2004; Beniston et al., 2007)는 농업 수확량의 변동성(Jones et al., 2003b)을 증가시키고 평균 수확량을 감소시킬 것으로 전망되고 있다(Trnka et al., 2004). 특히, 유럽 측 지중해 지역에서는 특정 농작물의 발육 단계에서는(꽃이 피는 시기의 열로 인한 스트레스, 씨앗 뿌리는 시기에 내리는 비 등) 강한 강우 강도와 긴 건조기간의 계속과 함께 극한 기후 사상의 발생 빈도 증가는 여름철 농작물(예: 해바라기)의 수확을 감소시킬 가능성이 있다. [WGII 12.4.7.1]

5.4.3.5 생물 다양성

북극의 영구 동토 지역의 여러 가지 생태계와 지중해 지역의 간헐성 수 생태계 등은 없어질 것으로 추정되고 있다. [WGII 12.4.3]

북극에서의 영구 동토의 손실(ACIA, 2004)은 현재 영구 동토 지역에 있는 여러 형태의 습지를 감소시킬 가능성이 있다(Ivanov and Maximov, 2003). 온난화의 결과로 호수에서의 조류 번식과 독성 시안화 박테리아의 번식 위험을 증가시킬 수 있다(Moss et al., 2003; Straile et al., 2003; Briers et al., 2004; Eisenreich, 2005). 강수량이 증가하고 서리가 감소하면 경작지로부터의 영양분 손실이 커질 수도 있어서 유출수 속의 영양물질 부하량은 증가하게 되며(Bourroui et al., 2004; Kaste et al., 2004; Eisenreich, 2005), 이로 인해 호수나 습지는 심한 부영양화를 겪게 된다(Jepesen et al., 2003). 또한, 높은 기온은 용존 산소의 포화 수준을 감소시켜 산소 부족 위험을 증가시킬 것이다(Sand-Jensen and Pedersen, 2005). [WGII 12.4.5]

기온의 상승은 유럽의 북부 지역에서는 담수 생태계에 중의 풍요성을 증가시킬 가능성이 있는 반면, 남서부 지역의 여러 곳에서는 감소시킬 가능성이 있는 것으로 보고되고 있다(Gutierrez Teira, 2003). [WGII 12.4.6]

5.4.4 적응과 취약성

기후변화는 유럽에서 물 관리 부문에 있어서의 2가지 중요한 도전을 불러올 것이다. 즉, 유럽의 남동부 지역에서의 물 스트레스의 증가와 유럽 대륙 전체에 걸친 홍수 발생의 위험 증가가 바로 2가지 도전이다. 이와 같은 도전에 대처하기 위한 적응 옵션들은 정보 자료화가 잘 되어 있다(IPCC, 2001b). 저수지와 제방들은 각각 높은 지대와 낮은 지대에서 홍수로부터 보호받기 위한 주된 구조적 수단의 역할을 계속하게 될 가능성이 있다(Hooijer et al., 2004). 그러나, 홍수터의 확장이라든지(Helms et al., 2002), 비상 홍수 조절용 저수지(Somlyódy, 2002), 홍수 저류를 위한 보존 공간(Silander et al., 2006), 홍수 예보 및 경보 시스템(특히, 돌발 홍수의 예경보) 등과 같은 비구조적인 계획된 적응 옵션들이 더 많은 인기를 끌고 있다. 또한, 다목적 댐들은 홍수와 가뭄 둘 다를 위한 적응 수단으로서의 역할을 하고 있다. [WGII 12.5.1]

증가하는 물 스트레스에 대응하기 위한 가장 보편적이고 계획적인 전략은 하천을 가로막아 저수지를 형성하는 등의 용수공급 측면에서의 수단을 사용하는 것이다(Santos et

al., 2002; Iglesias et al., 2005). 그러나, 신규 저수지의 건설은 환경 관련 규제 (Barreira, 2004)와 투자비의 상승 (Schröter et al., 2005)으로 인해 유럽에서는 점진적으로 제약을 크게 받고 있다. 폐수의 재이용과 해수 담수화와 같은 공급 측면의 다른 수단들이 보다 광범위하게 고려되고 있으나, 이들 수단들은 폐수를 이용한다는 데 대한 건강상의 우려와 담수화에 필요한 높은 에너지 비용으로 점점 인기가 떨어지고 있다 (Geres, 2004). 가정용수나 공업용수, 농업용수의 보존이라든지 도시용수와 농업용수 공급 시스템에서의 누수 감소 (Donevska and Dodeva, 2004; Geres, 2004), 용수 가격 책정 (Iglesias et al., 2005) 등 용수 수요 측면에서의 여러 전략들도 고려해 볼 수 있다 (AEMA, 2002). 관개용수 수요는 기후변화에 보다 잘 적응할 수 있는 농작물을 선택 재배함으로써 감소시킬 수 있다. 물 스트레스에 적응하기 위한 독특한 유럽식 접근 방법의 1 가지 예는 기후변화에 적응하기 위한 지역적 및 유역 차원의 전략들이 통합 수자원 관리 계획에 포함되고 있다는 것이며 (Kabat et al., 2002; Cosgrove et al., 2004; Kashyap, 2004), 국가 전략은 기존의 지배 구조에 맞아들어 가도록 설계되어지고 있다 (Donevska and Dodeva, 2004). [WGII 12.5.1]

물 부문에 대한 적응 절차와 위험 관리 대책들은 전망되는 수문학적 변화의 불확실성을 잘 인식하고 있는 몇몇 국가와 지역 (예: 네덜란드, 영국, 독일 등)에서 개발이 이루어지고 있다. [WGII 3.ES, 3.2, 3.6]

5.5 라틴 아메리카

5.5.1 개관

인구 증가는 계속되고 있고 그 결과로 식량 수요 또한 늘어나고 있다. 대부분의 라틴 아메리카 국가들의 경제는 농업 생산에 의존하고 있으므로 농작물 수확에 있어서의 지역적 변동은 대단히 신경 쓰이는 문제이다. 라틴 아메리카는 지리적인 배치 때문에 대단히 다양한 기후를 가지고 있으며, 넓은 건조지역과 반 건조지역도 가지고 있다. 기후 스펙트럼은 추고 얼음이 어는 높은 표고 지역의 기후에서부터 온난화 기후와 열대 기후에 이르기까지 넓은 범위에 걸쳐있고, 빙하는 대체로 지난 수십 년 동안 녹아서 쇠퇴해 왔으며, 대단히 작은 빙하들은 이미 사라지고 말았다.

아마존 강과 파라나-플라타 (Parana-Plata)강, 오리노코 (Orinoco) 강 등은 전 세계의 재생 가능한 담수 자원의 30% 이상을 대서양으로 옮겨놓고 있다. 그러나, 이들 수자원은 지리적으로 잘못 분포되어 있어서 광범위한 지역에서 수자원의 부족량이 대단히 제한적이다 (Mata et al., 2001). 강수량이 적거나 기온이 높은 곳에서는 물의 가용성과 수질 때문에 많은 스트레스를 받고 있다. 통계학적으로 ENSO 사상과 결부되어 있는 가뭄은 라틴 아메리카에서 많은 지역의 수자원에 엄격한 제약을 유발시킨다.

5.5.2 관측된 변화들

5.5.2.1 물

지난 30여년에 걸쳐 라틴 아메리카는 기후 관련 영향을 입어 왔으며, 이들 영향 중 일부는 ENSO 사상에 연관되어

있다.

- 홍수와 가뭄 및 산사태 등의 극한 기후 발생의 증가가 뚜렷하다 (1995/2005년 베네수엘라에서의 큰 강수, 2000/2002년 아르헨티나 Pampas에서의 대 홍수, 2005년 아마존 강 유역의 가뭄, 2002년 볼리비아와 2006년 부에노스아이레스에서의 파괴적인 우박을 동반한 호우, 2004년 남대서양에서의 사이클론 Catarina, 2005년 카리브 해 지역에서의 기록적인 허리케인 등). 기후 관련 재해의 발생은 1970~1999년 기간과 2000~2005년 기간 사이에 2.4배 정도 증가하였으며, 1990년대 동안 관측된 경향을 계속되고 있다. 2000~2005년 기간 발생한 사상들의 19%만이 경제적으로 정량화되었으며, 전체 피해액은 거의 US\$200억에 달하였다 (Nagy et al., 2006). [WGII 13.2.2]
- 물의 가용성에 대한 스트레스 측면을 살펴보면, 라니냐 (La Niña)에 관련된 가뭄은 아르헨티나의 중서부 지역과 칠레의 중부 지역에서의 용수공급과 관개 수요에 심각한 제약을 주었으며, 엘니뇨 (El Niño)에 관련된 가뭄은 콜롬비아의 Cauca 강의 하천 유량을 감소시켰다. [WGII 13.2.2]
- 강수량의 증가가 라틴 아메리카의 여러 국가에서 관측되었다. 이들 국가들에는 브라질 (서부 지역), 파라과이, 우루과이, 아르헨티나 (Pampas, 북동 지역), 볼리비아 (일부 지역), 페루 (북서 지역), 에콰도르, 멕시코 (북서 지역) 등이 포함된다. 강수량의 증가는 아마존 강의 Obidos 지점에서 홍수 빈도를 10% 상승시켰으며, 우루과이, 파라과이, 브라질 등의 하천에서의 유량을 50% 상승시켰고, 볼리비아에 있는 아마존 강의 Mamore 강 유역의 홍수량을 증가시켰다. 강한 강도의 강우 사상 발생과 계속되는 건조 일수의 증가 현상도 이들 지역에서 관측되었다. 이와 반대로, 칠레와 아르헨티나의 남서부 지역, 브라질의 북동부 지역, 페루의 남부 지역, 중앙아메리카의 서부 지역 (예: 나카라쿠아) 등지에서는 강수량의 감소 추세가 관측되었다. [WGII 13.2.4.1]
- 남미의 남동부 지역에서는 지난 10~20년 동안 매년 2~3mm의 해수면 상승이 있었다. [WGII 13.2.4.1]
- 볼리비아의 열대 안데스 산맥 지역과 페루, 에콰도르, 콜롬비아에서의 빙하는 Little Ice Age의 말 이후에 생긴 전 지구적 변화와 비슷한 크기만큼 그 면적이 감소하였다 (그림 5.9 참조). 가장 작은 빙하들이 가장 많이 영향을 받았으며 (Box 5.5 참조), 이와 같은 변화의 원인은 중위도나 고위도 지역에서의 변화와 동일하지 않으며, 높은 기온과 대기 중 수분 함량 변화간의 복잡하고 공간적으로 변화하는 조합에 관계가 있다. [WGI 4.5.3]

여러 가지 수문학적 변량들의 관측된 경향에 대해서는 표 5.5와 그림 5.8에 각각 요약되고, 표시되어 있다.

5.5.2.2 에너지

수력 발전은 라틴 아메리카에 있는 대부분 국가들의 주요 전기 에너지원이며, 아르헨티나, 콜롬비아, 브라질, 칠레, 페루, 우루과이, 베네수엘라 등의 국가에서 관측된 바와 같이 엘니뇨나 라니냐로 인한 대규모로 지속되는 강우의 비정상성에는 취약하다. 에너지 수요의 증가와 가뭄이 복합적으로 발생하여 2001년에는 브라질의 거의 모든 지역에서 수력발전이 실질적으로 중단되어 GDP의 큰 손실을 입었다 (Kane, 2002). 빙하의 후퇴는 La Paz와 Lima 시에서 관측된 바와 같이 수력발전에 영향을 미치게 된다. [WGII 13.2.2, 13.2.4]

표 5.5: 여러 가지 수문학적 변량의 최근 변동 경향 [WGII Table 13.1, 13.2, 13.3]

강수량의 현재 경향 (WGII Table 13.2)		
강수량	기간	변화량(%)
아마존 강의 북부/남부 지역 (Marengo, 2004)	1949~1999	-11 ~ -17 / -23 ~ +18
볼리비아의 아마존 강 지역 (Ronchail et al., 2005)	1970년 이후	+15
아르헨티나의 중부, 북동부 지역 (Pen alba and Vergas, 2004)	1900~2000	+1 SD ~ +2 SD ^(g)
우루과이 (Bodegaom et a;., 2005)	1961~2002	+20
칠레의 중부 지역 (Camillon, 2005)	최근 50년	-50
콜롬비아 (Pabón, 2003)	1961~1990	-4 ~ +6
선택된 수문학적 극한치와 그로 인한 영향, 2004~2006 (WGII Table 13.1)		
호우 (2005.9)	콜롬비아: 사망 70명, 부상 86명, 실종 6명, 이재민 140,000명 (NOAA, 2005)	
호우 (2005.2)	베네수엘라: 사망 63명, 부상 175,000명, 재산 피해 US\$0.52억 - 안데스 산맥 지역과 중부 해안 지역에 호우 발생, 심한 홍수 및 산사태 발생 (UCV, 2005; DNPC, 2005/2006)	
가뭄 (2004~2006)	아르헨티나 - Chaco: 재산 피해 US\$3.6억, 가축 손실 120,000마리, 이재민 10,000명 / 2004년 (SRA, 2005), 볼리비아와 파라과이에도 이재민 발생 / 2004~2005년 브라질 - 아마존 강 지역: 심한 가뭄이 아마존 지역의 중부 및 남서부에서 발생 열대 북 대서양에서의 따뜻한 해수면 온도로 인한 (http://www.ibge.gov.br/english/)	
빙하의 후퇴 경향 (WGII Table 13.3)		
빙하	기간	변화 / 영향
페루 ^{(a), (b)}	최근 35년	빙하의 총 면적이 22% 감소 (Fig. 5.9 참조), 해안지대 (전체 인구의 60% 거주)에서는 담수의 12% 감소, 물 손실량 산정치 70억m ³
페루 ^(c)	최근 30년	아주 작은 빙하의 표면적은 80% 까지 감소, 최근 50년간의 물 손실량 산정치 1.88억m ³
에콰도르 ^(e)	1990~2000	빙하의 80% 감소, 현재의 기후변화 영향이 계속되면 향후 100년 이내에 콜롬비아 내 빙하는 완전 소멸
볼리비아 ^(f)	1956~1998	빙하의 길이가 점차적으로 감소해 왔음, 관개용수와 Quito 시의 용수 공급량 감소
	1990년대 중반 이후	볼리비아에서 추정된 빙하 수축은 La Paz 시를 위한 용수공급과 수력 발전에 부정적인 결과를 가져옴 (Box 5.5 참조)

주: ^(a) Vásquez, 2004, ^(b) Monk and Seltzer, 2003, ^(c) NC-Perú, 2001, ^(d) NC-Columbia, 2001, ^(e) NC-Ecuador 2000, ^(f) Francou et al., 2003, ^(g) 표준편차 SD (Standard Deviation).

5.5.2.3 보건

라틴 아메리카에서는 기후 관련 극한 사상과 인간의 건강 사이에 연결고리가 있다. 가뭄은 콜롬비아와 Guyana에서 전염병을 발생시키는 반면에, 홍수는 페루의 건조한 북부 해안지역에서 전염병을 유발시킨다 (Gagnon et al., 2002). 혼두라스와 나카라쿠아에서 뎅그 열병 (dengue fever)의 연간 변동은 기후 요인에 의한 해충의 밀도 변동성 (기온, 습도, 태양 방사 열량, 강수량 등)에 관련되어 있는 것으로 보인다 (Patz et al., 2005). 홍수 범람은 브라질에서 특히, 인구밀도가 높고 배수시설이 없는 지역에서, Leptospirosis 병을 발생시켰다 (Ko et al., 1999; Kupek et al., 2000). Schistosomiasis의 분포는 아마도 기후 인자와 연관되어 있는 것으로 보인다. 설치류 동물에 의해 전파되는 질병에 관해서 보면 인간과 병원균과 설치류 동물간의 접촉 패턴이 변하기 때문에 강한 강우나 홍수 발생 시 질병의 발생 속도가 빨라지는 것으로 관측된 흔적이 있다. 멕시코 만의 해안 일부 지역에서의 해수면 온도와 강수량의 증가를 뎅그 열병의 전파 사이클의 증가와 상관시켜 본 연구도 있다 (Hurtado-Díaz et al., 2006). [WGII 13.2.2, 8.2.8.3]

5.5.2.4 농업

엘니뇨로 인한 많은 강우량과 높은 습도 때문에 옥수수과 감자, 밀, 콩 등에 몇 가지 갑자기 생기는 병 (fungal disease) 이 페루에서 관측되었다. 한편, 아르헨티나의 Pampas 지역에서는 여러 가지 긍정적인 영향들이 보고되었다. 즉, 이 지역에서는 강수량의 증가가 농작물 수확량을 증가시켜 콩의 경우 38%, 옥수수 18%, 밀 13%, 해바라기 꽃 12%의 수확량 증가를 가져왔다. 마찬가지로, 목초의 생산성도 아르헨티나와 우루과이에서 약 7% 증가하였다. [WGII 13.2.2, 13.2.4]

5.5.2.5 생물 다양성

생물 다양성에 미치는 기후변화 영향을 평가한 연구들은 제법 있으나 이들 연구에서 다른 여러 가지 인자로 인해 생기는 영향으로부터 기후변화로 인해 생기는 영향을 차별화 해내는 것은 어렵다. 라틴 아메리카의 열대 삼림, 특히 아마존 지역의 삼림은 엘니뇨와 관련된 가뭄 발생 횟수의 증가와 토지이용 변화 (삼림 개간, 간벌, 삼림 벌채 등)로 인해 산불 발생의 우려가 크게 증가하고 있다. [WGII 13.2.2]

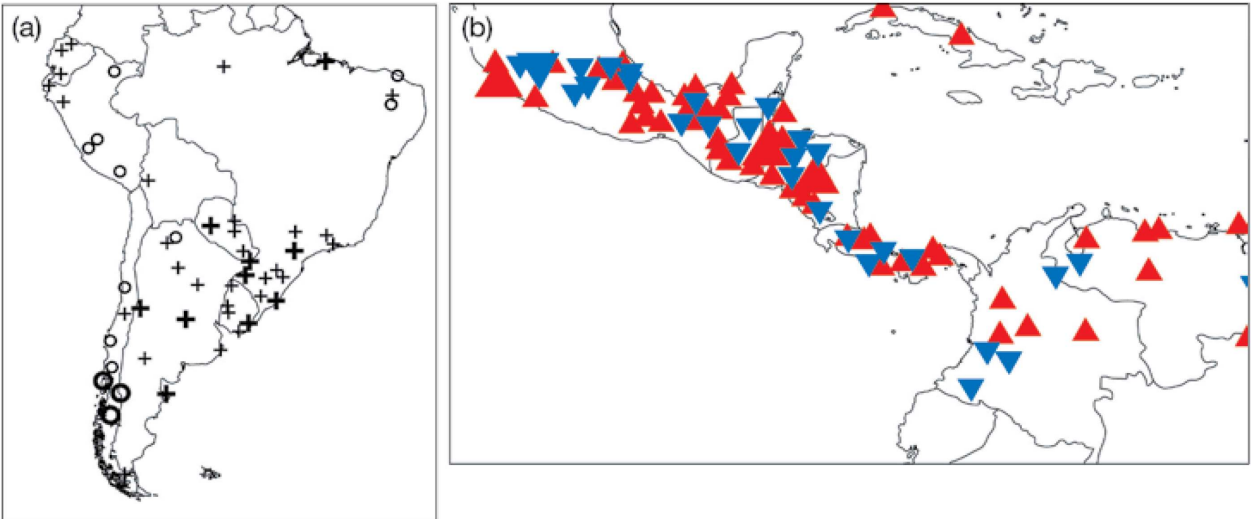


그림 5.8: 연 강우량의 변동 성향. (a) 남미 (1960~2000). 증가 성향은 + 부호로 표시하였고, 감소 성향은 동그라미로 표시하였음. (b) 중미 및 남미의 북부 지역 (1961~2003). 빨간색의 큰 삼각형 표시는 긍정적인 중요 성향을, 빨간색의 작은 삼각형 표시는 긍정적이지만 중요하지 않은 성향을 표시하며, 파란색의 큰 역삼각형은 부정적인 중요 성향을, 파란색의 작은 역삼각형은 부정적이면서 중요하지 않은 성향을 표시함 (Aguilar et al., 2005, AGU로부터 허가). [WGII Fig. 13.1]

생물 다양성과 관련하여 우거진 삼림 속에서의 두꺼비와 개구리 군집은 수년간의 작은 강수량으로 인해 영향을 받는 것으로 확인되었다. 중미 혹은 남미에서는 높은 기온과 피부병 (*Batrachochytrium dendrobatidis*)으로 인한 개구리의 멸종 사이에 관계가 있는 것으로 알려져 있다. 1977~2001년간의 자료를 분석한 한 연구는 카리브 해의 모래톱을 덮고 있는 산호초가 허리케인이 발생한 이듬해 평균 17% 정도 감소하였으며, 이와 같은 영향을 받은 후 최소 8년 동안은 산호초의 회복 증거가 없었음을 보여주었다. [WGII 13.2.2]

5.5.3 전망되는 변화들

5.5.3.1 물과 기후

다양한 기후 모델들에 의하면 라틴 아메리카에 대하여 전망된 2100년도의 평균 온난화 수준은 SRES B2 배출 시나리오에 대해서는 1°C~4°C, A2 배출 시나리오의 경우는 2°C~6°C가 상승할 것이라는 주장은 중간 정도의 신뢰도를 가진다 할 수 있다. 대부분의 GCM에 의한 전망들은 열대 지역에 대해서는 강수량의 더 큰 (+/-) 비정상성 (anomalies)을, 그리고 남미의 초열대 지역에 대해서는 더 작은 비정상성을 나타낸다. 또한, 모든 계절에 걸쳐 극히 건조한 계절들이 중앙 아메리카에서 보다 자주 발생할 것으로 전망되고 있다. 이러한 결과들 이외에, 강수량이 극히 많은 계절의 발생 빈도의 변화를 분석하는 모델들 사이에는 상대적으로 대단히 부족한 일치성을 보인다. 2가지 AOGCM에 기초하여 일 강수량 극치에 대해 분석한 한 연구에서 남아메리카의 남동부와 아마존의 중부 여러 지역에서는 비오는 날의 수가 증가하고, 브라질의 북동부 해안 지역에 걸쳐서는 일 강수량 극치가 작아지는 것으로 보고되었다. [WGI Table 11.1, 11.6; WGII 13.ES, 13.3.1]

기후변화 없이도 이미 물 스트레스를 받고 있는 유역 (연간 인구 1인당 1,000m³ 보다 적은 물 공급을 받고 있는

유역)에 살고 있는 인구수는 1995년 현재 약 0.222억 명으로 추정하고 있다. SRES 시나리오들을 가정하면 이 숫자는 2020년대에는 0.12억 명~0.81억 명, 2050년대에는 0.79억 명~1.78억 명으로 증가할 것으로 전망된다 (Arnell, 2004). 이러한 산정치에는 표 5.6에 표시된 바와 같이 물 스트레스에서 탈피하는 인구수는 고려대상에 넣지 않고 있다. 용수공급과 관계를 위한 인구 증가율과 여러 유역에서 앞으로 예상되는 더 건조한 조건 등으로 인한 용수 수요의 증가 영향 때문에 라틴 아메리카 국가의 많은 지역에서 관측된 현재의 취약성은 증가하게 될 것이다. 따라서, 감소된 물 스트레스를 받고 있는 인구수를 고려하면 물 스트레스를 받게 될 인구수의 순증가는 여전히 있게 된다. [WGII 13.4.3]

5.5.3.2 에너지

예상되고 있는 빙하의 더 많은 후퇴는 콜롬비아나 페루와 같은 나라에서의 수력 발전에 영향을 미칠 것으로 전망된다 (UNMSM, 2004). 일부 작은 규모의 열대 지방 빙하들은 이미 소멸되었으며, 다른 빙하들도 다가오는 수십 년 이내에 소멸될 가능성이 있어서 수력 발전에 잠재적인 영향을 미칠 것이다 (Ramirez et al., 2001). [WGI 4.5.3; WGII 13.2.4]

5.5.3.3 보건

라틴 아메리카 전 인구의 약 31%에 해당하는 약 2억 6,200만 명이 말라리아 발생 위험 지역 (열대 및 아열대 지역)에 살고 있다 (PAHO, 2003). SRES 배출 시나리오와 사회·경제적 시나리오에 기초한 일부 전망은 아마존 강 지역이나 중앙 아메리카와 같이 강수량의 감소가 전망되고 있는 지역에서 말라리아의 전과 시즌의 길이가 감소할 것으로 보고 있다. 전망된 결과들은 남미에서의 말라리아 질병 분포 지역의 남쪽 한계선 부근 지역에서 위험에 처해있는 추가적인 인구수에 대해 보고하고 있다

Box 5.5: 남미 지역 빙하의 변화 [WGII Box 1.1]

열대 안데스 산맥 지역에서의 빙하의 축소는 일반적으로 관측되어 왔으며, 다른 산맥 지역에서처럼 가장 작은 빙하들이 가장 큰 영향을 받아서 [WGI 4.5.3] 여러 빙하들이 지난 세기 동안 이미 사라져 버렸다. 페루의 Cordillera Blanca와 볼리비아의 Cordillera Real과 같은 대부분의 빙하로 덮인 산맥들의 경우 빙하의 총 면적은 Little Ice Age 때의 규모와 비교할 때 약 1/3만큼 축소되었다 (그림 5.9 참조)

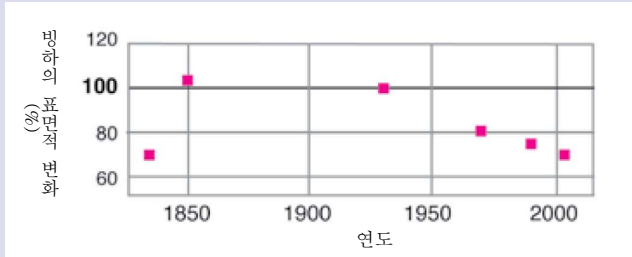


그림 5.9: 페루의 Cordillera Blanca 열대 지역 총 빙하 면적의 1925년 총 표면적 (Georges, 2004) 대비 백분율 (%). 1990년 Cordillera Blanca의 빙하 표면적은 620km² [WGI Fig. 4.16으로부터 발췌]

볼리비아의 Chacaltaya 빙하 (16°S)는 분해되어 사라질 가능성이 가장 많은 소규모 빙하로 1940년의 표면적은 0.22km²이었는데 현재 (2005년)에는 0.01km² (그림 5.10 참조)로 줄어들었다 (Ramirez et al., 2001; Francou et al., 2003; Berger et al., 2005). 1992~2005년 기간 동안 이 빙하는 표면적의 90%, 얼음 체적의 97%의 손실을 보았다 (Berger et al., 2005). 이와 같이 관측된 숫자로부터 선형 외삽을 해보면, 2010년 이전에 이 빙하는 완전히 사라지고 말 것으로 보고 있다 (Coudrain et al., 2005). 열대 지역에서는 빙하의 질량 평형이 강수량과 습도 [WGI 4.5.3]의 변화에 민감하게 반응하지만, Chacaltaya 빙하의 축소는 1980년대 이후 열대 안데스 지역에서 0°C 등온선이 10년에 약 50m만큼 상승해온 것과 일관성이 있다 (Vulle et al., 2003).

해발 5,260m의 평균 고도에 있는 이 빙하는 불과 수년전까지만 하더라도 세계에서 가장 높은 스키장이 있는 곳이었다. 1990년대에 진행되어온 빙하의 축소는 거의 소멸될 지경에 이르렀으며, 볼리비아는 유일한 스키 휴양지를 잃어버리게 되었다 (그림 5.10 참조)



그림 5.10: 1940~2005년 기간 동안 볼리비아의 Chacaltaya Glacier 표면적의 범위. 2005년까지 빙하는 3개의 작은 빙하로 쪼개졌다. 스키장 휴게시설 (Ski hut)은 1940년에는 설치되지 않았으나 그림에는 빨간색 십자(+)로 표시되어 있다. 스키 리프트 (lift)의 길이는 1940년에는 800m, 1996년에는 600m 이었고 (1940년의 경우는 실선으로 표시되어 있으나, 기타 3개년의 경우는 점선으로 표시되어 있음), 통상 강수 기간 동안에는 설치되어 있었다. 2004년 이후의 스키잉은 불가능하였다. 사진은 Francou and Vincent (2006) and Jordan (1991)으로부터 허가. [WGII Fig. 1.1]

표 5.6: 라틴 아메리카에서 물 스트레스를 받고 사는 인구수의 증가 (HadCM3 GCM 기준, Arnell, 2004) [WGII Table 13.6]

(단위: 100만 명)

SRES 시나리오	1995년	2025년		2055년	
		기후변화 없을 시	기후변화 있을 시	기후변화 없을 시	기후변화 있을 시
A1	22.2	35.7	21	54	60
A2	22.2	55.9	37-66	149.3	60-150
B1	22.2	35.7	22	54	74
B2	22.2	47.3	7-77	59.4	62

(Lieshout et al., 2004). 니카라과와 볼리비아는 2010년에 말라리아 발생이 증가할 수 있다고 전망하였으며, 계절적 변화가 있을 것임도 보고되고 있다 (Aparicio, 2000; NC-Nicaragua, 2001). 말라리아와 위험에 처해있는 인구의 증가는 질병치료와 사회보장 지출을 포함하는 보건 서비스 비용에 영향을 미칠 수 있다. [WGII 13.4.5]

다른 모델들은 멕시코와 브라질, 페루, 에콰도르 등 국가에서의 질병의 지리적 전파 한계의 변화로 인한 뎅기 열병 (dengue fever)의 위험에 처해있는 인구수의 상당한 증가가 있을 것으로 전망하고 있다 (Hales et al., 2002). 어떤 모델들은 페루, 브라질, 파라과이, 우루과이, 아르헨티나, 볼리비아 등에서의 cutaneous leishmaniasis vector (해충, 곤충)의 공간적 분포 (확산)의 변화를 전망하고 있으며 (Aparicio, 2000; Peterson and Shaw, 2003), 또한 뎅기 해충의 월간 분포에 대해서도 전망하고 있다 (Peterson et al., 2005). [WGII 13.4.5]

5.5.3.4 농업

기후변화 조건하에 상업용 농작물을 대상으로 하여 농작물 모의 모형을 라틴 아메리카 지역에 걸쳐 실행해 본 몇 가지 연구들이 있다. SRES A2 배출 시나리오를 적용할 경우 기아에 처해질 위험이 있는 인구수는 2020년에 약 100만 명까지 증가할 것으로 전망된 반면에, 그 이후 2050년까지는 변화가 없고, 2080년에는 약 400만 명 정도가 감소할 것으로 전망하고 있다. [WGII Table 13.5, 13.4.2]

5.5.3.5 생물 다양성

강수와 유출의 특성 변화로 인한 복잡한 구조적 변화를 통해 열대 삼림지역을 대초원 지역으로 바꾸는 작업이 아마존 동부 지역과 중부 및 남부 멕시코 지역의 열대 삼림 지역에서 예상되고 있으며, 토지이용과 기후변화의 시너지 효과 때문에 브라질 북동부의 여러 지역과 멕시코의 중부 및 북부 대부분 지역에서 반 건조 지역 식생을 건조 지역 식생으로 바꾸는 작업 또한 예상되고 있다. 2050년대까지는 농경지의 약 50%가 사막화되고 일부 지역에서는 염수화 될 가능성이 대단히 크다. [WGII 13.ES, 13.4.1, 13.4.2]

5.5.4 적응과 취약성

5.5.4.1 과거와 현재의 적응

라틴 아메리카의 여러 국가에서의 홍수와 가뭄의 위험에 대처하기 위한 적절한 적응 전략의 미흡은 낮은 국민 총생산 (GNP)과 홍수와 가뭄, 산사태 상습 지역 등 취약 지역에서의 정주 인구의 증가, 적절한 정치적, 조직적 및 기술적 체계의 부재 등으로 인한 것이다 (Solanes and Jouravlev, 2006). 그럼에도 불구하고, 일부 시·군 등은 스스로 조직화하여 재해 방지에 활발한 움직임을 보인다 (Fay et al., 2003b). 많은 빈곤층 주민들은 수해 승습지로부터 안전한 곳으로 이주할 것을 권고 받아왔다. IRDB와 IDFB 차관의 지원을 받아 이들 주민들은 새로운 집을 지었다. 예를 들면, 1992년 대홍수 후에 아르헨티나의 Paraná 강 유역에 재정착한 사례를 들 수 있다 (IRDB, 2000). 어떤 경우에는 Pampas의 전형적인 경제에 영향을 주는 환경 조건의 변화로 인해 Pejerrey (Odontesthes bonariensis)와 같은 지역 어류종 (fish species)의 양식과 같은 새로운 생산 활동이 도입되기도 하였다 (La Nación, 2002). 또 하나의 다른 예는 물 스트레스를 받고 있는 사람의 적응 능력에 관계되는 것으로, 대단히 빈곤한 마을의 용수 공급 시스템을 개선하기 위해 자구적인 조직을 구성 운영하는 것이다. Business Partners for Development Water and Sanitation Clusters라는 조직은 라틴 아메리카에서 4가지 핵심 계획 ("focus" plans)의 실행을 위해 일해오고 있다. 즉, Cartagena (콜롬비아), La Paz와 El Alto (볼리비아), Gran Buenos Aires의 비수해 지구 (아르헨티나) 등에 대한 계획이다 (The Water Page, 2001; Water 21, 2002). 빗물 수확과 저류 시스템은 반 건조 열대 지역에서의 지속 가능한 개발을 위해 꼭 필요하다. 특히, Articulação no Semi-Árido (ASA) Project라는 NGO Network에 의해 브라질에서는 민관 연합 프로젝트가 개발되었으며, 이를 P1MC 프로젝트라 부른다. 이 프로젝트는 시민 사회가 100만 개의 물 탱크를 중앙 집중식이 아닌 지역 중심식으로 설치하는 사업이다. 이 계획은 브라질의 반 건조 열대지역 (BSATs)의 상습 가뭄 지역에 있는 100만여 가정에 음용수를 공급하기 위한 것이다. 이 사업의 첫 단계에는 12,400개의 물 탱크가 ASA와 브라질 환경부에 의해 설치되었고, 2004년 말까지 추가적인 21,000개의 물 탱크가 계획되었었다 (Gnadlinger, 2003). 아르헨티나에서는 Santiago del Estero Province의 건조지역에 위치한 지역 마을들을 위한 정부의 안전한 물 공급 프로그램에 의해 2000년~2002년에 10개의 빗물 수확 유역 및 저류 시스템을 설치한 바 있다 (Basán Nickisch, 2002). [WGII 13.2.5]

5.5.4.2 적응: 실무 관행, 옵션 그리고 제약

라틴 아메리카에서의 물 관리 정책은 적응기준(adaptation criteria)과 관련되어야 하며, 적응 기준을 위한 핵심적인 사항으로 포함될 필요가 있다. 이렇게 함으로서 가용한 수자원의 관리를 개선할 수 있는 지역의 능력을 향상시킬 것이다. 라틴 아메리카 지역의 약 60%에서의 건조 조건에 적응하기 위해서는 용수공급 시스템에 대규모 투자를 할 필요가 있다. 유역간 물 이동 사업의 관리는 여러 지역에서 해결책이 되어왔다 (예를 들면, 베네수엘라의 Yacambu 유역, 페루의 Alto Piura와 Mantaro 유역 등). 물 스트레스를 받고 있는 기간 동안에는 수자원의 보존 대책이나 물의 재순환, 물 소비의 최적화를 위한 대책 등이 추진 되어 왔다 (COHIFE, 2003) (Box 5.6 참조), [WGII 13.5]

Box 5.6: 남미 고산 지대의 선사 콜롬비아 마을들의 적응 역량 [WGII Box 13.2]

아메리카 토착 문명의 존재는 그들의 정주 지역 부근의 기후 조건에서 농작물을 경작하여 얻은 자원에 의존하였다. 오늘날의 라틴 아메리카 고원 지대에서 개발에 영향을 미치는 가장 결정적인 한계 중의 하나는 물의 불규칙한 분포이었고, 현재에도 그러하며, 이는 대기 순환 과정과 극한 사상의 특이성과 깊은 계곡에서의 빠른 속도의 유출, 변화하는 토양 조건 등으로 인한 것이다. 빙하의 용해는 건조한 계절 동안에는 믿을만한 물의 원천이었고 아직도 그러하다. 그러나, 하천들은 경계가 설정되어 있는 물길을 따라 계곡으로 흘러서 물을 특정 지점으로 흘러 보냈다. 강우의 계절성은 강하므로 빙하로부터의 유출은 건조 기간에는 의존할만한 주요 수원이다. 따라서, 선사 콜롬비아 (pre-Colombian) 마을들은 그들의 필요를 충족시키기 위해 독특한 적응 대책을 개발하였다. 오늘날, 물의 가용량과 물 수요량 사이에 필요한 평형(수지)을 맞추는 문제는 비록 그 규모는 다를 수도 있겠으나 실질적으로는 동일하다.

이와 같은 제약 조건 아래 오늘날의 멕시코로부터 칠레의 북부와 아르헨티나까지 선사 콜롬비아 문명은 국지적인 환경 조건에 적응하기 위해 필요한 역량을 개발하였다. 그와 같은 역량에는 수리학적 문제를 해결하는 능력이라든지, 기후변화와 계절별 강우 기간을 예견하는 능력 등이 포함된다. 공학적인 측면에서 보면 그들의 개발에는 농작물 경작을 위한 포집된 빗물의 사용이라든지, 여과와 저류, 지표면 혹은 지하 관개 수도의 건설, 저류된 물의 양을 측정할 수 있는 기구(그림 5.11) 등이 포함된다(Treacy, 1994; Wright and Valencia Zegarra, 2000; Caran and Nelly, 2006). 또한, 그들은 태평양과 대서양 유역으로부터 Cumbe 계곡과 Cajamarca로 하천 유역을 서로 연결할 수 있었다(Burger, 1992).



그림 5.11: 지하수도 혹은 지하대수층으로의 물 주입을 위한 Nasca (페루의 남부 해안지역) 지역의 빗물 수확 시스템

기후의 변동과 계절 강우 기간을 예견하고, 파종 스케줄을 짜며, 수확량을 계획하는 등의 각종 역량들이 개발되었다(Orlove et al., 2000). 이와 같은 노력이 마을들의 생존을 가능하게 하였으며, 이들 마을들은 잉카 문명의 전성기에는 오늘날의 페루와 에콰도르 지역에 1,000만여 명의 인구를 가졌었다.

또한, 그들의 공학적 역량은 Urubamba 강의 경우처럼 하천의 물길을 변경시킬 수 있었고, 현수교나 하상에 교각을 놓아 교량을 건설할 수 있었다. 또한, 그들은 오늘날 Baño del Inca (잉카 온천)에서와 같이 흐르는 물을 여과와 승배 목적으로 사용하였으며, 지열원으로부터 온천수가 공급되었고, Cusco 부근의 Tampumacchay에 있는 음악 정원의 유적들도 순례지로 사용되었다(Cortazer, 1968). Chavin 문화 시대의 승려들은 그들의 신중의 하나인 아메리카 표범의 포효 소리와 같은 소리를 내기 위해서 사원 구조물에 구멍을 내어 튜브와 연결하여 물을 흘리기 위해 흐르는 물을 사용하였다(Burger, 1992). 물은 건축물 건설을 위해 큰 석재를 자르는데도 사용하였다. 마추 피추(Machu Picchu)로 가는 길에 있는 Ollantaytambo에서 볼 수 있는 바와 같이 이들 돌은 일정한 기하학적 모양으로 잘라지는데, 누수되는 물이 틈새로 흘러들어가 영하 온도로 기온이 내려갈 때 얼게 되어 돌이 잘라지게 된다. 또한, 그들은 엘니뇨로부터 기후 변동을 예측하는 것처럼(Canziani and Mata, 2004) 기후변화를 예측할 능력을 가졌었으며, 그들의 음식물 생산을 위한 가장 편리한 조직을 가능하게 하였다. 요약하면, 그들은 불리한 지역 조건에 적응하고 지속 가능한 개발을 정의하기 위해 선구자적 노력을 다하였다고 할 수 있다.

변덕스러운 일기와 기후 하에 증가하는 온실가스과 빙하의 축소(Carey, 2005; Bradley et al., 2006)로 인해 악화되어가고 있는 오늘날, 위에서 살펴본 적응 수단들을 재조명하고 개선하는 것은 대단히 유용한 일이라 할 수 있다. 현 사회의 멤버들에게 그들의 선조들의 지식과 기술력에 대해 교육하고 훈련시키는 것은 앞으로 계속 되어야 할 일이다. 남미의 고산 지대에서의 극한 기후 조건을 관리할 필요성을 고려할 때 지속 가능한 개발의 관리(Dourojeanni, 2000)를 위한 ECLAC의 절차들은 선사 콜롬비아의 관개 전략을 돌이켜 참고하게 된다.

5.6 북미

5.6.1 개관 및 관측된 변화들

기후변화는 북미 지역에서 이미 과도하게 할당된 수자원에 여러 가지 제약을 주게 될 것이며 따라서, 농업용수와 도시용수, 공업용수, 그리고 환경용수들 사이의 경쟁은 증가할 것임이 거의 틀림없다 (*very high confidence*). 이 지역에서 예상되는 기후변화의 가장 중요한 사회적 및 생태적 영향중의 일부는 지표수와 지하수의 수문학적 특성 변화에서 비롯된다. 표 5.7은 지난 수세기동안 북미에서 관측된 변화를 요약하고 있는 것으로서, 수자원에 미치는 광범위한 기후 온난화 영향을 설명하고 있다. [WGII 14.ES]

다가오는 수십 년 동안에 온난화율이 가속됨에 따라 북미의 모든 지역에서 인간의 정주와 농업 및 공업 목적의 물 사용자를 위해 가용한 담수의 시기와 체적, 수질, 지역적 분포에는 여러 가지 변화가 올 것으로 예상될 수 있다. 위에서 언급한 수자원의 변화 중 일부는 북미 대부분의 지역에서 사실이지만 20세기의 경향은 유출과 하천 유량 및 지하수 함양에 미치는 기후변화 영향의 지역적 변동성이 엄청나게 크다는 것이다. 부(富)의 축적과 지리적 입지의 변동 또한 캐나다와 미국에서의 영향과 취약성 그리고 적응 역량의 불평등한 분포에 영향을 미친다. [WGII 14.ES, 14.1]

5.6.2 전망되는 변화와 변화로 인한 결과

5.6.2.1 담수 자원

대기 대순환 모델 (GCM)과 온실가스 배출 시나리오에 의해 모의된 북미 지역 유역의 장래 연 유출량은 지역적으로 변화한다. 연평균 강수량은 미국 남서부 지역에서는 감소하나 북미의 나머지 대부분의 지역에 걸쳐서는 2100년까지 증가하는 것으로 전망되고 있다. [WGI 11.5.3.2; WGII 14.3.1] 캐나다에서의 강수량의 증가는 SRES A1B 시나리오 아래서는 연평균에 대해서는 +20%의 범위 내에 있고, 겨울에 대해서는 +30%내에 있는 것으로 전망되고 있다. 일부 연구들은 극한 강수량의 광범위한 증가를 전망하고 있으나 [WGI 11.5.3.3; WGII 14.3.1], 가뭄도 강수량의 큰 시간적 변동성에 관계되어 있는 것으로 전망하고 있다. 일반적으로, 극한 강수량의 전망된 변화는 평균 강수량의 변화보다는 더 큰 것이 사실이다. [WGI 10.3.6.1; WGII 14.3.1]

온난화와 강수의 형과 시기, 그리고 양에 있어서의 변화는 21세기 중반까지 서부 산악 지역에서의 적설의 빠른 용해와 중요한 감소를 가져올 가능성이 매우 클 것이다. 산악 지역의 용설이 유출을 지배하는 유역에 대한 전망에서 용설에 의한 유출이 진행되어 겨울과 초봄의 유량이 증가됨에 따라 홍수 잠재력을 키우며, 여름철 유량은 실질적으로 크게 감소한다. [WGII 14.4] 따라서, 용설로 인한 유출에 의존하고 있는 미국 서부 지역과 캐나다의 과다 할당된 물 공급 시스템은 빙하로부터의 유출에 의존하는 물 공급 시스템과 같이 특히 취약할 수 있다.

표 5.7: 지난 세기 동안의 북미 지역 수자원의 관측된 변화 (↑ = 증가, ↓ = 감소)

수자원의 변화	AR4로 부터의 예
온난화로 빨라진 용설로 인해 1~4주 빨라진 침투 하천 유량	미국의 서부 지역과 뉴잉글랜드 지역, 캐나다 지역 [WGII 1.3, 14.2]
↓ 눈으로 내리는 강수량의 비율	캐나다의 서부 지역 및 평원 지역, 미국의 서부 지역 [WGII 14.2, WGI 4.2]
↓ 눈덮임 기간 및 범위	북미의 대부분 지역 [WGI 4.2]
↑ 연강수량	북미의 대부분 지역 [WGI 3.3]
↓ 산악 지역 눈의 상당수량 (snow water equivalent)	북미의 서부 지역 [WGI 4.2]
↓ 연강수량	록키산맥 중부 지역, 미국의 남서부 지역, 캐나다 평원 지역, 북극 동부 지역
↑ 강한 강수 사상의 발생 빈도	미국의 대부분 지역 [WGII 14.2]
↓ 유출과 하천 유량	콜로라도와 콜롬비아 하천 유역 [WGII 14.2]
영구 동토의 광범위한 용해	캐나다 북부 대부분 지역과 알래스카 [WGII 14.4, 15.7]
↑ 호수의 수온 (0.1~1.5°C)	북미의 대부분 지역 [WGII 1.3]
↑ 하천 유량	미국 동부의 대부분 지역 [WGII 14.2]
빙하의 축소	미국 서부 산악 지역, 알래스카, 캐나다 [WGI 4.ES, 4.5]
↓ 빙상 (ice cover)	5 대호 지역, St. Lawrence 지역 [WGII 4.4, 14.2]
해안 지역 지표수의 염수화	플로리다, 루이지아나 [WGII 6.4]
↑ 가뭄의 계속 기간	미국 서부 지역, 캐나다 남부 지역 [WGII 14.2]

British Columbia에서 전망된 영향에는 겨울철 강수량의 증가, 해안 지역과 내륙 지역의 보다 심한 봄철 홍수, 남부 해안과 내륙 지역을 따른 보다 많은 여름철 가뭄 등이 포함되며, 이들 영향으로 인해 이 지역에서의 하천 유량은 감소할 것이고, 수요가 가장 클 때인 여름 동안의 여름 생존과 용수공급에 영향을 미치게 될 것이다. 5대호에서 낮은 호수 수위와 관련하여 전망된 영향들은 수질과 주운, 위락 활동, 수력 발전, 국가 간 물 운송 등과 관련된 도전을 더 악화시킬 가능성이 있다. [WGII 14.2, 14.4] 전부는 아니지만 많은 평가 결과들이 5대호와 St. Lawrence 유역에 대한 낮은 수준의 순 유역 공급량과 수위를 전망하고 있다. [WGII 14.ES, 14.2]

기후변화로 인해 지하수의 가용량은 3가지 주요 인자에 의해 영향을 받을 가능성이 있다. 즉, 지하수 채수(개발, 수요, 기타 자원의 가용성 등을 반영)와 증발산(기온에 비례하여 증가), 그리고 지하수 함양(기온과 강수의 시기와 양, 지표수와 상호 작용에 의해 결정) 등이 바로 그것이다. 모의된 연 지하수 기저유량과 대수층 내 수위는 기온과 강수량 및 펌핑량에 따라 반응하며, 건조 시나리오의 경우 대수층 내 수위는 감소하나 습윤 시나리오의 경우에는 증가한다. 어떤 경우에는 기저유량의 이동이 생겨서 겨울에는 증가하고, 봄과 초여름에는 감소한다. [WGII 14.4.1] 북미의 반 건조 및 건조 지역에서의 증발산량의 증가 혹은 지하수의 펌핑은 얇은 대수층의 염수화를 가져올 수도 있다. [WGII 3.4] 또한, 기후변화는 해수면이 상승함에 따라 해안 지역 대수층에 염수 침입 발생을 증가시킬 가능성이 있다. [WGII 3.4.2]

5.6.2.2 에너지

수력의 생산은 터빈을 돌리는 총 유량과 저수지의 수위, 그리고 발전의 시기에 민감한 것으로 알려져 있다. 예를 들면, 1990년대에는 5대호의 수위는 오래 계속되었던 가뭄 때문에 떨어졌으며, 1999년 수력 생산은 나이아가라와 Sault St. Marie 두 곳 모두에서 크게 줄었다(CCME, 2003). [WGII 4.2] 콜롬비아 강 유역과 British Columbia Hydro 서비스 지역에서 2~3°C의 온난화가 발생하면 겨울철 침투 전력 수요를 위한 최악의 발전 수량 조건 하에서의 수력 전기 공급은 증가할 가능성이 있다 (*high confidence*). 마찬가지로, 콜로라도 강의 수력 생산량은 5대호 지역에서의 수력 생산량처럼 (Moulton and Cuthbert, 2000; Lofgren et al., 2002; Mirza, 2004) 크게 감소할 가능성이 있다 (Christensen et al., 2004). Lower Great Lakes의 수위는 큰 경제적 손실(캐나다 \$4.37~6.60억/yr)을 가져올 수 있으며, 수위가 증가하면 추가 이익(캐나다 \$0.28~0.42억/yr)을 얻을 수 있다(Buttle et al., 2004; Ouranos, 2004). Northern Québec의 수력 생산은 보다 많은 강수량과 수량 조건 때문에 편익이 좋아질 가능성이 있으나, 남부 Québec의 수력 발전소들은 저수지의 낮은 수위 때문에 영향을 받을 가능성이 있을 것이다. 유량의 계절적 분포와 얼음이 어는 시기의 변화로 인한 결과는 아직 확실하지 않다 (Ouranos, 2004). [WGII 3.5, 14.4.8]

태양열 자원은 흐린 날씨의 장래 변화 특성에 의해 영향을 받을 수 있으며, 흐린 날씨는 북위 60 이남의 북미 지역에서의 태양 에너지의 잠재력을 약간 증가시킬 수 있다(1980~1999년 기간과 비교한 2080~2099년 기간에 대한 각종 모델과 배출 시나리오 A1B에 기초한 결과임). [WGI Fig. 10.10] 그러나, Pan et al. (2004)의 전망은 이와 반대였다. 즉, 흐린 날씨의 증가는 잠재적인 태양광 발전 출력을 0~20% 정도 감소시킬 것이라는 것이다(CO₂ 증가에 대한 이상적인 시나리오를 가정한 HadCM2와 RegCM2²⁴)를 기초로 한 결과임. [WGII 14.4.8] 바이오 에너지(Bio energy)의 잠재력은 농작물의 성장에 미치는 직접적인 영향과 관개용수의 가용 정도에 따라 결정되며 대체로 기후에 민감하다. 바이오 에너지 생산을 위한 농작물은 US\$33/10⁶g 혹은 US\$1.83/10⁹joules 정도의 개략적 가격으로 농업 생산의 가치와 비교할 수 있는 경쟁력을 가질 것으로 전망되고 있다(Walsh et al., 2003). 온난화와 강수량의 증가는 바이오 에너지 작물이 미국

중부 지역에서의 식량을 위한 전통적인 농작물과 효율적으로 경쟁할 수 있을 것으로 예상하고 있다(RegCM2 기후 모델과 2×CO₂ 농도 시나리오 기준) (Brown et al., 2000). [WGII 14.4.8]

5.6.2.3 보건

여러 가지 원인으로 발생하는 수인성 전염병은 북미 지역에서는 분명한 계절성을 가지며, 주요 유역에 집중적으로 발생할 뿐 아니라 강한 강수 사상이나(미국의 경우: Curriero et al., 2001), 혹은 극한 강수 및 온난화 기온(캐나다의 경우: Thomas et al., 2006)과 관련되는 것이 보통이다. 강한 강우 후에 발생하는 강도 높은 유출은 위락용수의 수질을 오염시키고 물속의 박테리아 수를 증가시켜 인간에게 발병 위험을 증가시키며 (Schuster et al., 2005), 이와 같은 현상은 하천에 가까운 하안부에서 가장 많이 일어난다(Dwight et al., 2002). 수인성 질병과 수질 저하는 보다 강한 강수가 발생하면 더 악화될 가능성이 매우 크다. 음식물로 인해 발생하는 질병도 기온과 모종의 관계를 가지는 것으로 보고 있다. Alberta에서는 주변 기온이 장 계통의 병원균(enteric pathogens) 발생과 강하게, 그러나 비선형적으로, 관련되어 있는 것으로 보고되고 있다(Fleury et al., 2006). [WGII 14.ES, 14.2.5]

강한 열대 사이클론 활동은 점점 심화될 가능성이 있으며 [WGI SPM], 호우로 인한 해일 홍수는 이미 멕시코 만과 북미의 남대서양 해안 지역을 따라 문제가 되고 있다. 2005년에 발생한 허리케인 Katrina로 인한 사망자 수는 1,800명으로 추산되었으며, 공급된 용수의 오염과 관련된 사망과 설사병의 발병은 심각하였다(CDC, 2005; Manuel, 2006). [WGII 8.2.2; riverline flooding에 대해서는 제4.5절 참조]

5.6.2.4 농업

TAR 발간 이후의 연구 결과들은 온건한 기후변화는 북미의 관개 농업 수확량을 증가시키게 될 가능성이 있음을 확인하고는 있으나 이전의 전망에서 보다는 증가량은 적게, 공간적 변동성은 크게 전망하고 있다 (*high confidence*) (Reilly, 2002). 그러나, 현재 기후적으로 한계에 도달하고 있는 많은 농작물들은 비록 아주 약한 온난화가 오더라도 수확량과 질의 감소, 혹은 둘 다의 감소를 겪게 될 것으로 전망되고 있다 (*medium confidence*) (Hayhoe et al., 2004; White et al., 2006). [WGII 14.4.4]

기후변화에 대한 북미 농업의 취약성은 다 차원적이며, 기존하는 조건과 기후변화로 인해 나타나는 간접적인 스트레스(예: 해충의 경쟁과 물 가용성에 있어서의 변화 등), 여러 가지 상호 작용하는 인자들에 대처할 수 있는 부분별 역량, 그리고 농작물 경작 및 농장 관리의 개선 뿐만 아니라 다른 지역과의 경제적 경쟁 등을 포함하여 이들 간의 상호작용에 의해 결정된다(Parson et al., 2003). 물의 가용성은 아리조나 주 남동부 지역에서의 농업을 제한하는 중요한 인자이나 그 지역 농민들은 기술이나 농작물 보험 같은 적응 방안이 최근에 취약성을 감소시켜 왔음을 잘 알고 있다. 재정적으로나 지원 측면에서 수혜 받은 것이 적은 지역(예: 미국의 북부 평원)은 기후변화에

24) 부록I의 기후 모델 설명 참조

특히 취약하다 (Antle et al., 2004). 지속 가능하지 못한 토지 이용 실무 관행은 기후변화에 대한 미국 대평원 지역에서의 농업의 취약성을 증가시키는 경향을 가져올 것이다 (Polsky and Easterling, 2001). [WGII 14.4.4; Section 4.2.2도 참조] 미국 남서부 지역에서 과도하게 사용되고 있는 지하수 이용 시스템들은 지하수 함양량을 감소시키게 될 기후변화로 인해 발생하는 추가적인 스트레스를 경험하게 되고, 따라서 농업 생산성에 영향을 미칠 가능성이 있다. [WGII 14.4.1]

작물의 감소와 맨땅에 내리는 보다 많은 겨울철 강우는 토양 침식 기간을 연장시키고, 침식량을 증가시켜 농경 지역에서의 수질에 영향을 미칠 잠재성을 증가시킬 가능성이 있다. 북미 곡창 지대에서의 토양 관리 대책은 장래의 강한 강수와 그로 인한 유출에 저항하는 충분한 토양 침식 보호를 제공하지 못할 수도 있다 (Hatfield and Pruger, 2004; Nearing et al., 2004). [WGII 14.4.1]

5.6.2.5 생물 다양성

광범위한 종(種)과 생물군계(生物群系)는 다가오는 수십 년 동안 북미 지역에서의 강우와 토양 수분, 지표수 수위, 하천 유량에 있어서의 전망된 변화에 의해 영향을 받을 수 있다. 예를 들면, 호수나 늪지의 수위를 저하시키면 양서류나 물고기의 재생산을 어렵게 할 수 있으며, 종들의 각각 다른 반응은 수 생태계의 구성과 영양분의 흐름을 변경시킬 수 있다. 강우 패턴과 가뭄 메커니즘의 변화는 산불(Smith et al., 2000)이나 생물학적 침범(Zavaleta and Hulvey, 2004)을 포함하여 여러 가지 형식의 생태계 교란을 가져올 수 있다. [WGII 14.4.2] 풀이 우거진 담수 습지가 염수에 견딜 수 있는 망가로브(mangrove)에 의해 육지 방향으로 옮겨지는 것은(예: 1940년대 이래의 미국 플로리다 주 남동부 지역의 Everglades 습지) 해수면 상승과 물 관리의 결합된 효과로 인한 것이며, 그 결과로 지하수 수위는 저하하게 된다(Ross et al., 2000). [WGII 1.3.3.2] 해안 쪽으로의 담수 유출의 변화는 식물과 동물계의 생산성과 분포를 결정하는 염도와 탁도, 그리고 수질의 기타 성질을 변화시킬 수 있다. [WGII 6.4]

위도가 높은 지역에서는 여러 모델들은 삼림 지역이 동토대(tundra)로 확장되고, 성장 계절(성수기)이 길어짐에 따라(Berthelot et al.) 북미 지역 생태계의 주요 생산성은 증가되는 것으로 모의하고 있으며, 이는 따뜻해진 기후로 인한 증발산량의 증가를 상쇄할 수 있는 충분한 강수량의 증가가 있느냐에 주로 달려있다. 삼림의 성장은 나무의 생육이 역사적으로 낮은 온도와 짧은 성장 기간에 의해 제한되었던 지역에서 서서히 가속되는 것으로 보이며, 가뭄의 우려가 있는 지역에서의 성장 속도는 아주 느리다. 알라스카의 건조 지역 남향 경사지의 흰 색깔 전나무(spruce)의 방사상 방향 성장은 가뭄 스트레스의 증가로 인해 지난 90년간에 걸쳐 감소한 것으로 보고되고 있다(Barber et al., 2000). Bachelet et al. (2001)의 모델링에 의한 실험들은 미 대륙에서 온난화 정도 1°C당 가뭄으로 제한되는 생태계의 지역적 범위는 약 11% 정도 상승할 것으로 전망하고 있다. [WGII 14.4] 북미의 Prairie Pothole 지역에서는 모델들은 3°C의 지역적 기온 상승과 상이하게 변화하는 강수량으로 인한 가뭄의 증가를 전망하였으며, 이로 인해 많은 습지가 없어지고 물 새폐의 번식이 줄어들 것으로 보고되고 있다(Johnson et al., 2005). [WGII 4.4.10]

물고기와 어업 생산성의 생태학적 지속 가능성은 물의 공급과 수온에 밀접히 연관되어 있다. 냉수형 어업(cold-water fisheries)은 기후변화로 인해 부정적인 영향을 받을 것이나, 온수형 어업(warm-water fisheries)은 일반적으로 이득을 볼 것이고, 냉수형 어업은 해당 지역의 북쪽에서는 이득을, 남쪽에서는 손실을 보게 될 것이다. 차갑고 깨끗한 물을 좋아하는 연어과의 물고기들은 기후변화로 인해 가장 부정적인 영향을 경험하게 될 가능성이 있다(Gallagher and Wood, 2003). 북극은 가장 큰 온난화를 경험하게 될 것이므로 북극의 담수 어업은 가장 많은 영향을 받을 가능성이 있다(Wrona et al., 2005). 에리호(Lake Erie)에서는 강에서 알을 낳는 눈이 큰 물고기(Walleye)의 새끼들은 수온과 유량 변화에 의존하게 될 것이나 호수에서 알을 낳는 물고기 떼는 온난화 현상과 호수 수위의 저하로 인하여 감소할 가능성이 있다(Joens et al., 2006). 온수형 종의 범위는 수온의 변화에 반응하여 북쪽 방향으로, 혹은 고도가 높은 지역(Clank et al., 2001; Mohseni et al., 2003)으로 이동할 가능성이 있다. [WGII 14.4]

5.6.2.6 북미의 대규모 유역에서의 기후변화 영향에 대한 사례 연구

Box 5.7과 5.8은 북미 서부 지역(콜로라도 강과 콜롬비아 강 유역)의 “물이 희소한” 환경과 “물이 풍부한” 환경의 2가지 다른 환경에서 기후변화에 의해 제기되는 잠재적인 영향과 이의 관리를 위한 도전을 설명하는 2가지 사례에 대해 기술하고 있다.

5.6.3 적응

북미는 기후변화로 인한 물 관련 측면의 여러 가지 문제들에 적응할 수 있는 역량을 상당히 가지고 있지만, 실제의 적응 대책은 홍수나 가뭄, 호우, 기타 극한 일기 사상의 악영향으로부터 인명과 재산을 항상 보호해 주지는 못했었다. 특히, 취약한 그룹에는 토착민과 사회적으로나 경제적으로 불리한 입장에 처해있는 사람들이 포함된다. 북미의 전통과 조직은 중앙 집중식이 아닌 분산적인 대응 체계를 장려해왔으며, 적응 방법은 기후변화에 반응하며, 불균등하게 분포되고, 문제를 방지하는 것이 아니라 문제에 대처하는데 초점이 맞추어져 있다. 기후변화에 대한 전망과 수자원에 미치는 그의 영향에 의해 예외 없이, 혹은 지배적으로 영향을 받은 적응 대책들에 관한 예들은 대부분 문헌으로 남아있지 않다. [WGII 14.5.2] 북미에 있어서의 지속 가능성을 위한 핵심적인 전체 조건은 기후 문제를 의사 결정에 있어서의 주안점으로 삼는 것이다. [WGII 14.7]

북미의 취약성은 적응의 효율성과 대처 역량의 분포에 달려있다고 볼 수 있으며, 이들 둘 다 균등하지 못하며 기후 변동성과 극한 일기 사상의 악영향으로부터 취약한 그룹을 보호해내지 못하였다. [WGII 14.7] 미국과 캐나다는 중요한 지역적 및 사회·경제적 다양성을 가지고 있으며, 방대한 기반시설과 성숙된 조직 체계를 가지고 있는 잘 개발된 경제 대국들이다(NAST, 2000; Lemmen and Warren, 2004). 이러한 능력이 광범위한 역사적 조건들을 가로질러 적응과 대처 전략을 찾으려 하였으며, 때로는 성공하기도 하고, 때로는 실패하기도 하였다. 적응 전략에 관한 대부분의 연구들은 과거의 경험을 기반으로 한 실행을 고려하고 있다(Paavola and Adger, 2002), [WGII 14.5]

Box 5.7: 콜로라도 강 유역에서의 가뭄과 기후변화

콜로라도 강은 미국의 7개 주와 멕시코의 2개 주, 그리고 34개의 미국 원주민 종족들 (Pulwarty et al., 2005)의 물 수요 중 많은 부분을 공급하고 있다. 이들은 현재의 약 2,500만 명의 주민을 대표하고 있으며, 2020년까지는 약 3,800만 명이 될 것으로 전망되고 있다. 지나간 100년에 걸쳐 미국에서 발생한 극심한 기후학적 가뭄으로 인해 영향을 받은 총 면적은 평균적으로 매년 약 14% 이었으며, 1934년에는 가장 큰 65%에 달했다.

인구와 경제 활동의 서쪽 방향으로의 확대와 그로인한 가뭄 사상에의 대응은 주요 구조물적 적응 방안에 의존하게 되었으며, 이들 구조물에는 반 건조지역에서 개발되어 온 수 많은 저수지와 관개 프로젝트, 지하수 취수 시설 등이 포함된다. 널리 정보 자료화되어 있는 바와 같이, 콜로라도 강 유역에 소속되는 주들에 대한 할당은 400년이 넘는 기간 동안에 가장 비가 많이 온 기간 (1905~1925년)에 이루어졌다. 최근에는 미국 서부 지역이 지속적인 가뭄을 겪어서 1999년 이후 지역의 약 30~40%가 심각한 가뭄을 겪었으며, 2000~2004년 기간은 콜로라도 강의 유량이 기록상 가장 작은 5년이 되었다. 동시에, 미국 남서부의 여러 주들은 수자원에 대한 사회적, 경제적 및 환경적 수요와 함께 미국 내에서 가장 급속하게 성장하고 있으며, 그에 따른 법적인 갈등이 동반되고도 있다 (Pulwarty et al., 2005).

콜로라도 강 유역의 전체 면적 중 아주 작은 부분 (약 15%)만이 가장 많은 유량 (85%)을 공급하고 있다. 기후적 온난화와 증발의 증가로 인해 유출 감소는 전망된 취수량과 함께 그러한 조건 아래에서는 콜로라도 강 협약 조건들은 2025년까지 약 60~75% 정도의 시간에 걸쳐서만 지켜질 수 있다 (Christensen et al., 2004). 일부 연구들은 2050년까지 미국 남서부의 평균 수분 조건은 1950년대에 관측된 조건들과 같아질 것이라고 전망되고 있다. 이러한 변화는 강수량 수준이 거의 일정하게 유지되더라도 기온 상승으로 인해 (승화 작용의 증가, 증발량과 토양 수분의 감소 등을 통한) 발생할 수 있을 것이다. 일부 연구자들은 이와 같은 평가들이 모형의 선택 문제 때문에 실제로는 추후의 감소를 과소 평가할 수도 있다고 주장하고 있다.

콜로라도 강의 Lees Ferry (콜로라도 강의 상류와 하류 유역의 분기점) 지점에서의 유량에 관한 대부분의 시나리오들은 20년 이내에 유량은 현재의 소비성 물 수요를 충족시키기에는 부족할 수도 있음을 암시하고 있다. 최근의 경험은 위험한 상태가 이미 유역에 존재하고 있음을 시사하고 있다 (Pulwarty et al., 2005). 기후 변동성과 기후 변화는 증가하는 개발 압력과 함께 가뭄 영향을 가져오게 될 것이고, 이는 이 지역에서의 조직에 의한 해결의 범위를 넘게 될 것이며, 또한 물 사용자들 간의 갈등을 더욱 악화시키게 될 것이다.

북미의 농업은 지난 10년 동안 여러 차례의 심한 일기 사상에 노출되어 왔다. 농촌 지역으로부터 도시로의 이주 및 경제적 스트레스와 더불어 과거 보다 변화무쌍한 일기는 농업 부문의 취약성을 전반적으로 증가시켜 미래의 보다 변동성이 큰 기후에 대처할 수 있는 능력에 관한 걱정을 크게 하였다 (Senate Canada, 2003; Wheaton et al., 2005). 그러나, 북미의 농업은 대단히 역동적이다. 시장과 일기의 변화를 포함하여 여러 가지 스트레스와 기회에 대한 적응은 이 부문을 위한 정상적인 과정이라 할 수 있다. 토양과 수자원의 보존뿐만 아니라, 농작물과 기업의 다양화는 종종 일기와 관련된 위험을 경감시키기 위해 사용된다 (Wall and Smit, 2005). [WGII 12.2.4]

북미에 있는 많은 도시들은 역사적 경험에 기초하여 “후회 없는 행동 계획”(no-regrets actions)을 수립·시행해 왔다 (MWD, 2005). [WGII Box 14.3] 캐나다와 미국의 많은 기업들은 수자원의 변화에 관계되는 적응 대책들에 투자를 하고 있으나, 이들 중 미래의 기후변화 전망을 기반으로 하여 투자하는 경우는 아주 드문 것으로 보인다. [WGII 14.5.1] 이와 같은 형식의 적응 대책의 예에는 다음과 같은 것들이 포함된다.

- 보험회사들은 보험에 가입된 재산에 대한 장래의 위험으로 인한 피해를 방지하고 보험료 책정 모델을 보완하기 위한 연구에 투자하고 있다.
- 스키 휴양지 운영자는 보다 높은 고도를 올라갈 수 있게

하는 리프트(lifts)와 감소하는 적설을 보살할 수 있는 장비의 개발을 위해 투자하고 있다 (Elsasser et al., 2003; Census Bureau, 2004; Scott, 2005; Jones and Scott, 2006; Socott and Jones, 2006). [WGII 14.2.4]

- 뉴욕 시는 1980년대 초부터 연간 총 물 소비량을 27% 만큼 감소시켰으며, 1인당 소비량은 34% 만큼 감소시켰다 (City of New York, 2005). [WGII 14.2.4]

- 로스앤젤레스 지역에서는 지역 물 관리 사무소의 보상 및 정보 프로그램을 통해 수자원 보존을 장려하고 있다 (MWD, 2005). [WGII Box 14.3]

- 농민들은 기후조건에 대한 대단히 상세한 정보를 통해 경작할 농작물의 종류를 선택하고 관개 전략 및 농약 살포 등에 대한 계획을 수립한다 (Smit and Wall, 2003). [WGII 14.2.4]

- 캐나다의 Peterborough 시는 3년에 2번의 100년 빈도 홍수를 경험하였으며, 시는 내배수 시스템을 전반적으로 플러싱(flushing)하였고 주 하수 관개 시스템을 5년 빈도를 상회하는 계획 홍수량에 맞추어 대체하는 등의 대응책을 강구하였다 (Hunt, 2005). [WGII 14.5.1]

- 뉴욕과 로스앤젤레스를 포함하는 미국의 주요 6대 도시에 발생한 최근의 가뭄들은 물 보존 시스템과 새로운 물 공급/분배 시스템에의 투자를 포함하는 적응 수단들을 강구하게 하였다 (Changnon and Changnon, 2000). [WGII 14.5.1]

- 큰 강수량의 15% 증가에 대처하기 위하여 캐나다 온타

Box 5.8: 기후변화는 콜롬비아 강의 관리에 도전을 추가함 [WGII Box 14.2]

콜롬비아 강 유역의 현재 물 관리는 수력 발전, 주운, 홍수 조절, 관개, 도시용수, 몇 가지 생존을 위협받고 있는 종 (예: 연어)들의 유지 등 복잡한, 때로는 경쟁 관계에 있는 복잡한 용수 수요들 간의 균형을 찾아주는 것이라 할 수 있다. 이와 같은 여러 가지 물 이용 목적을 위한 현재 및 전망된 필요량은 기존의 공급량을 초과하고 있다. 콜롬비아 유역 내에서의 물 관리는 복잡한 조직 체계로 운영되고 있는데, 2개의 지배 국가 (Columbia River Treaty, 1964년에 비준)와 정의된 조약권을 가진 토착민 (Boldt Decision in U.S. vs Washington in 1974), 그리고 수많은 연방, 주, 지방 정부들과 행정기관들을 포함한다 (Miles et al., 2000; Hamlet, 2003). 오염 (주로 비점 오염원)은 많은 지류 하천에서 중요한 문제가 되어가고 있다. 콜로라도 강 유역의 미국 측 부분에서 적용되는 “먼저 온 자에게 먼저 권리를 주는” 서양 수법은 물 관리를 복잡하게 하며, 새로운 물 사용자들에게는 가용한 물을 감소시킨다 (Gray, 1999; Scott et al., 2004). 하천 유량이 클 때와 하천 유량이 작거나 혹은 보호 종이 지류나 본류 혹은 바다에 존재할 때에는 복잡성은 각각 다른 사법적인 책임으로 확대되게 된다.

기후변화가 발생하면 콜롬비아 강의 추정된 연 유량은 상대적으로 적게 변화할 것이나 계절 유량의 경우 겨울과 봄 유량은 더 커지고, 여름과 가을의 유량은 더 작아지는 방향으로 현저하게 바뀌게 될 것이다 (Hamlet and Lettenmaier, 1999; Mote et al., 1999). 유량의 이러한 변화는 기본적으로는 지역의 성장뿐만 아니라 기후변화로 인한 물 수요의 증가와 일치하기 위한 것일 가능성이 있다. 여름철의 물 가용량의 손실은 저유량이 발생하는 해에 이미 발생하고 있는 물 관련 갈등을 더 악화시킬 것이다 (Miles et al., 2000). 기후변화는 유역내의 도시용수 공급에도 영향을 미칠 것으로 전망되고 있다. 예를 들면, 2040년대에 대해 전망된 2°C 정도의 온난화는 오리건 주 포틀랜드 시의 물 수요를 인구 증가에 따른 연간 2,080만 m³의 추가 용수 수요와 함께 연간 570만 m³를 증가시키게 될 것이고, 용수공급은 연간 490 m³ 정도 감소시키게 될 것이다 (Hamlet et al., 2003). 선행 시간이 긴 기후예보는 점차적으로 하천의 관리를 위해 고려되고 있으나 아직은 제한적인 방법으로 고려되고 있다 (Hamlet et al., 2002; Lettenmaier and Hamlet, 2003; Gamble et al., 2004; Payne et al., 2004). 콜롬비아 강 시스템의 43개 소유역 각각은 물고기와 야생 동물을 위한 소유역 관리 계획을 가지고 있으며, 이들 중 어떠한 것도 기후변화로 인해 감소된 여름철 유량을 종합적으로 관리하지 못하고 있다 (ISRP/ISAB, 2004)

콜롬비아 강 유역에서의 물 관리를 위한 도전은 적설과 계절 유량의 변화로 인하여 기후변화와 함께 확대될 가능성이 있다 (Miles et al., 2000; Parson et al., 2001; Cohen et al., 2003). 운영 목표를 충족시킬 수 있는 관리자의 신뢰도 (reliability)는 기후변화 조건 하에서는 상당히 떨어질 가능성이 있다 (IPCC IS92a 배출 시나리오 하에서 2020년대와 2090년대에 대하여 HadCM2 및 ECHAM4/OPYC3 AOGCM을 사용하여 전망된 바와 같음) (Hamlet and Lettenmaier, 1999). 신뢰도의 손실은 21세기 말까지 25%에 달하며 (Mote et al., 1999), 운영률 요건과 상호 작용할 것으로 전망되었다. 예를 들면, “물고기 우선” 원칙은 기저 출력의 신뢰도를 현 기후 하에서는 10% 만큼, Pacific Decadal Oscillation (PDO)의 온난국면 동안에는 17% 만큼 감소하게 될 것이다. 적응 수단들은 4월 적설량의 감소 영향을 완화시킬 잠재력을 가지지만 기저 수력의 10-20%를 감소시키고 어류를 위한 현재의 여름철 하천 유량을 줄일 수 있다 (Payne et al., 2004). 기후변화에의 적응 대책을 지역 계획 과정에 통합시키는 일은 개발의 초기 단계에 있다 (Cohen et al., 2006).

리오 주의 Burlingiton 시와 Ottawa 시는 침투를 촉진시키기 위해 건물 지붕의 배수통을 잔디에 직접 연결시키고, 또한 요면 저류와 도로면의 저류 용량을 증가시키기 위한 시설 등을 포함하여 각종 구조적 및 비구조적 수단을 사용하였다 (Waters et al., 2003). [WGII 14.5.1]

· 1970년 이후 35%를 넘는 인구 증가 (거의 100만 명)는 주로 물 절약 대책에 힘입어 로스앤젤레스 시에서의 물 사용량을 7% 정도 밖에 증가시키지 않았다 (California Regional Assessment Group, 2002). [WGII Box 14.3]

· 캐나다 British Columbia 주의 Central Okanagan 지역 사무소는 Trepanier Landscape Unit로 알려진 계획 도시 지역에 대하여 2004년도에 물 관리 계획을 만들었으며, 이 계획에서는 기후 시나리오들과 용수공급 및 수요의 변화 추정, 적응 옵션 등을 구체적으로 다루고 있다 (Cohen et al., 2004; Summit Environmental Consultants, 2004). [WGII Box 3.1, 20.8.2]

5.7 극 지역

5.7.1 개관

극 지역 (polar regions)은 기후변화로 인한 가장 커다란 영향을 가장 빨리 경험하게 될 것으로 예상되는 지구상의 지역이라 할 수 있으며, 이는 주로 극 지역의 수문학적 과정과 수자원을 지배하는 빙권 (氷圈)의 여러 구성요소로 인한 것이다. 극 지역의 수자원에 미치는 변화하는 기후의 영향에 대한 대부분의 관심은 북극 지역에 대해 표현되어 왔다. 남극 지역에 대해서는 주요 빙상 (氷床)의 질량 평형과 빙상이 해수면 수위에 미치는 영향, 그리고 적게는 수 생태계에 유발된 변화 등에 초점이 맞추어져 왔다. 북극 지역은 세계에서 가장 큰 하천들 중 여러 하천 (Lena, Ob, Mackenzie, Yenisey 강 등)들과 거대 델타 (Lena, Meckenzie

등), 큰 호수 (Great Bear), 광활한 빙하와 만년설, 넓은 습지 등을 포함하여 거대하고 다양한 종류의 수자원을 보유하고 있다. 비교적 작은 인구 (약 4백만 명: Bogoyavlenskiy and Siggner, 2004)와 혹독하게 추운 기후 때문에 농업이나 임업과 같은 수자원 관련 산업은 아주 작은 규모인 반면에, 상업적 혹은 생존 차원의 어로 활동은 활발하다. 일부 유목민들은 북극의 일부 지역에서 아직도 중요한 역할을 하고 있지만, 많은 인구들은 점점 보다 큰 지역 (전체 인구의 약 2/3가 5,000명 이상의 주민을 가지고 있는 정주 지역에 현재 살고 있음)에 집중되고 있으며, 이들 지역들 중의 대부분은 주요 수로상에 가깝게 위치하고 있고 수로를 이용한 교통에 의존하고 있다. 보다 더 큰 지역으로의 이주는 결국 잘 처리된 용수의 공급과 현대식 하수 처리를 위한 시설에의 접근성을 높였다 (Hild and Stordhal, 2004). [WGI 10.6.4; WGII 15.2.1]

북극의 수자원 중 상당한 부분은 북극의 북쪽 지역을 통해 북극해로 물을 흘려보내는 대하천의 수원부 유역에서 발원하고 있다. 이들 하천의 유량은 주요 수력발전 개발의 초점이 되어 왔고, 지금도 세계에서 가장 큰 미개발된 수력 포텐셜로 남아 있다 (Shiklomanov et al., 2000; Prowse et al., 2004). 열과 유사, 영양 물질, 오염 물질, 그리고 생물상을 북쪽으로 운반하는 이들 하천의 역할이 주어진 상태에서 북극보다 낮은 위도에서의 기후로 인해 발생한 변화는 북극 지역에 아주 강한 영향을 미치게 된다. 뿐만 아니라, 북극해의 담수 수지라든지, 바다 얼음의 생성, 그리고 궁극적으로는 열염순환 (thermohaline circulation)과 전 지구적 기후에 미치는 잠재적 영향 등에 대단히 중요한 것으로 밝혀진 것은 바로 북극 지역에 위치한 모든 유역들로부터의 복잡한 하천 흐름의 변화이다. [WGI 10.3.4; WGII 15.4.1]

5.7.2 관측된 변화들

북극 지역의 수자원에 생긴 가장 중요한 관측된 변화는 1930년대 이래의 6대 Eurasia 강 (약 7%: Peterson et al., 2002)으로부터의 합쳐진 유량의 증가이었다. 극 지역 주변의 빙하와 만년설, 그린랜드의 빙상 등으로부터 북극해로 흘러들어가는 유량의 증가는 20세기 말경에 이미 인지되었으며, 북극 지방의 가장 큰 하천들로부터의 합쳐진 하천으로부터의 유입량의 증가와 비교할 정도로 크다는 사실로 알려져 있다 (Dyurgerov and Canter, 2004). 얼음 질량의 평형에 있어서의 변화는 강수량과 기온의 변화에 대한 복잡한 반응과 관계되어 있어서 그린랜드 빙상의 외곽부와 내심부 사이에서 발견된 바와 같은 지역적 경향에 반하는 결과가 발생하게 된다 (Abdalati and Stetten, 2001; Jonannessen et al., 2005; Walsh et al., 2005). Eurasia 강들의 유량 증가의 경우 영구동토로부터의 얼음 용해라든지, 산불 영향, 댐 저류량의 변동 등과 같은 잠재적인 지배 인자들은 유량 증가의 원인이 아님이 밝혀졌으며 (McClelland et al., 2004), 어떤 모델링 연구는 인간 활동으로 인한 기후 강제력 인자들이 역할을 했을 것으로 보고 있다. 북미에서 북극 지역으로 흐르는 가장 큰 하천인 Mackenzie 강에 미치는 기후와 다른 인자들의 영향에 대한 평가는 자연 저류 및 방류 영향을 받아 형성된 하천 유량에 미치는 주요 호수와 저수지들의 큰 감소 효과 때문에 특히 어렵다는 사실이 증명된 바 있다 (Gibson et al., 2006; Peters et al., 2006). [WGI 9.5.4; WGII 15.4.1]

북극 지역의 강수 예측망이 충분하지 못하여 유출에 미치는 강수의 영향은 확신하기가 어려우나, 유출은 10년에 약 1% 정도로 서서히 증가해온 것으로 믿어지고 있다 (Mcbean et al., 2005; Walsh et al., 2005). 북극 지역의 주요 하천에서의 겨울철 유량의 크기 변화는 실제로 관측되어 왔으며, Lena 강의 경우 증가하는 온난화 및 겨울철 강수량과도 상관시킨 바 있다 (Yang et al., 2002; Berezovskaya et al., 2005). 그러나, 이와 같은 유량의 크기 변화는 과거에는 기후로 인한 것으로 생각되었지만, 실제로는 Ob 강과 Yenisey 강에서의 수력발전을 통한 유량 조절로 인한 것일 뿐이다 (Yang et al., 2004a, b). 북극 지역 하천에 있어서의 지배적인 흐름 사상인 봄철 홍수의 발생 시기에 변화가 발생하였으나, 이들 변화는 지난 60년 동안 공간적으로 일관성이 있는 것은 아니었으며, 인접한 시베리아 하천들은 홍수 발생시기가 빨라지거나 (Lena 강, Yang et al., 2002), 혹은 느려지는 (Yenisei 강, Yang et al., 2004b) 경향을 보인다. 물 위에 떠도는 담수 얼음 또한, 북극의 하천과 호수들의 계절적 역동성, 특히 홍수를 조절하게 되며, 비록 얼음으로 인한 홍수 발생 빈도나 홍수 크기에 보고된 변화는 없었으나 얼음이 덮여있는 기간은 아 북극 지역의 많은 곳에서 감소하였다 (Walsh et al., 2005). [WGII 15.2.1, 15.4.1]

지나간 반세기 동안 북극 지역에서는 영구 동토 지역에 상당한 변화가 발생하였으며 (Walsh et al., 2005), 물의 흐름 경로를 조절함에 있어서의 얼어붙은 땅의 역할이 주어지면 녹아내리는 영구 동토는 계절적인 강수량-유출량 관계에 영향을 미칠 수 있다 (Serreze et al., 2003; Berezovskaya et al., 2005; Zhang et al., 2005). 영구 동토의 용해와 그와 관련된 기층의 침투능 증가는 20세기 말의 30여년 기간 동안 시베리아 일부 지역의 호수에서 모종의 변화를 일으키는 것으로 짐작되어 왔다 (Smith et al., 2005; 그림 5.12 참조). 위도가 더 높은 지역에서는 영구 동토의 초기 용해가 지표면의 웅덩이와 호수의 생성을 증가시키는 것으로 생각되었으나, 더 낮은 위도 지역에서 보다 광범위하고 더 깊게 용해가 발생하여 생성된 웅덩이의 물이 지하 흐름 시스템으로 배수됨에 따라 호수의 숫자가 감소하게 되었다. 북극의 보다 광범위한 지역에서 호수와 웅덩이의 수 생태계의 생물학적 구성은 연평균 및 여름철 기온의 상승 시기의 이동과 이와 관련된 호수 내 열성층화/안정성과 얼음으로 덮이는 기간의 변화에 잘 반응해 온 것으로 증명되었다 (Korhola et al., 2002; Ruhland et al., 2003; Pienitz et al., 2004; Smol et al., 2005; Prowse et al., 2006). [WGII Chapter 4; WGII 15.4.1.1]

남극 지역의 담수 생태계는 비록 변화하는 경향이 지역에 걸쳐 다양하지만 기후의 변동, 특히 기온의 변동에 대단히 민감하게 반응하는 것으로 확인되었다. 예를 들면, Dry Valleys에 있는 호수들의 생산성은 감소하는 대기 온도에 따라 감소하는 것으로 관측되었다 (Doran et al., 2002). 이와 대조적으로, 해양성의 아 남극 지방의 Signy Island에서의 대기온도 상승은 남반구에서 지금까지 기록된 호수 온도에 있어서의 가장 빠르고 가장 증폭된 반응을 낳았었다 (Quayle et al., 2002). 뿐만 아니라, 적설과 빙상에 미치는 온난화 영향은 다양한 유형의 생태계 훼손을 가져왔다 (Quayle et al., 2003). [WGII 15.2.2.2]

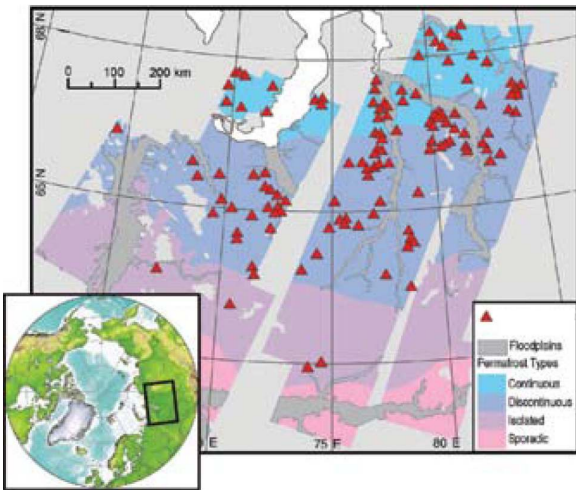


그림 5.12: 여러 영구동토 유형에 걸쳐진 30년 기간 동안의 토양 및 대기 온도 상승 후에 사라져 버린 시베리아 호수들의 위치 (변화들은 1970년대 초부터 1997~2004년에 이르기까지 위성 영상 자료로 기록되어 있음). 사라져 버린 호수들의 공간적 분포는 영구동토의 용해가 관측된 호수 손실의 원인이었을 것임을 시사하고 있다.

5.7.3 전망되는 변화들

북극 지역의 수문학적 특성의 변화, 따라서 수자원의 변화를 전망하는 것은 GCM 모델들에 의한 모의에서의 강수의 계절성과 공간적 패턴의 강한 변동성 때문에 문제가 없지 않다. 대부분의 경우 증가가 전망되지만 강수 입력으로부터의 유출 예측은 지역이 온난화됨에 따라, 혹은 바다 얼음이 녹음에 따라 추가적인 수분이 가용해져서 비와 눈을 배분하는 문제 때문에 혼돈스러워진다. 그러나, 일반적으로, 북극의 주요 하천 유역으로부터의 유출에 대한 최근의 전망들은 10~30% 범위의 전반적인 증가를 가리키고 있다. 그러나, 그러한 전망에 포함되지 않은 한 가지 인자는 증산 능력이 없는 동토대의 지면 상태로부터 각종 나무 종으로 육지상 식생이 대체됨에 따른 증발산량의 증가이다 (Callaghan et al., 2005). 그러나, 이와 같은 증발산량의 증가는 기후변화에 따라 증가된 CO₂로 인한 증산량의 감소와 상쇄될 수도 있다 (Gedney et al., 2006). 이와 비슷하게, 현재의 유출의 전망에 고려되지 않은 인자들은 미래의 영구동토 용해와 용해 토층의 깊이가 깊어지는 것이며 (Anisimov and Belolutskaia, 2004; Instanes et al., 2005), 이는 지표수와 지하수 흐름 체계를 점차 연결시켜서, 계절 수문곡선에 중대한 변화를 가져올 것이다. 동토대가 습윤해지고 혹은 건조해지는 것은 온난화와 활동 중인 토층 깊이의 증가와 연동되어 탄소와 메탄가스를 위한 소스 (source) 혹은 싱크 (sink)를 결정하게 된다. 영구동토의 용해와 유량의 증가는 하천에서의 유사량 증가 (Syvitski, 2002)와 하천 유로망에 중요한 변화를 가져올 것으로 예상된다 (Bogaart Chapter 10; WGII 15.4.2.3, 15.4.1.2)

두 극 지역에서의 유출은 빙하의 용해와 만년설, 그린랜드 및 남극의 빙상 등에 의해 보충될 것이나 만년설과 빙상이 녹은 물 중 상당한 부분은 인접한 바다로 직접 흘러가게 된다. 육지 지역의 수자원에 보다 중요한 것은 북극의 전 지역에 흩어져 있는 빙하들이며, 이들 빙하는 시간이 경과함에 따라 크게 후퇴하게 될 것으로 전망된다. 초기에는 하천 유량이 증가하나 빙하가 점차적으로 소멸되면 결국 유량은 작아지게 되며, 특히 북극의 수생 식물에 위험 기간이라 할 수 있는 건조한 늦은 여름 기간 동안에는 하천 유량이 아주 작은 상태에 있게 된다. [WGI Chapter 10; WGII 15.4.1.3]

전망된 온난화는 하천과 호수의 얼음이 늦게 얼어붙고 빨리 깨어져서 얼음 두께가 감소하는 최근의 경향이 계속 될 것을 의미하며, 이로 인해 호수내의 열 구조라든지 얼음 아래 서식처의 수량과 수질, 하천에서의 깨어진 얼음들의 충돌 (jamming)과 그로 인한 홍수 범람 등에 변화가 생기게 될 것이다 (Beltaos et al., 2006; Prowse et al., 2006). 이러한 홍수 범람은 하천을 근거로 하는 북쪽 지역의 정주 (settlements)에는 위험이 되지만, 봄철에 하천의 물과 토사, 영양 물질 등의 범람에 의존하는 하천변 생태계의 생태학적 건강을 유지하는데 결정적인 역할을 한다 (Prowse et al., 2006). [WGII 15.4.1.2, 15.6.2]

이상에서 설명한 북극의 한랭 지역 수문 특성의 주요 변화는 주요 물고기 군집을 포함하여 수중 생물 다양성과 생산성, 계절적 서식처의 가용성, 종의 지리적 분포 등에 변화를 가져오게 될 것이다 (Prowse et al., 2006; Reist et al., 2006a, b, c; Wrona et al., 2006). 생존을 위해 상업적인 경제 활동을 하고 있는 북극 주민들은 담수 생태계 (수확 가능한 생물체들)로부터 많은 서비스를 획득하며, 그러한 자원의 풍요함과 재생 가능성, 가용성 및 접근성 등에 변화가 생기면 지역적인 자원 이용과 전통적인 생활 양식에 변화를 가져오게 될 것이다 (Nuttall et al., 2005; Reist et al., 2006a). [WGII 15.4.1.3]

북극이 장래에 대체로 더 습윤해질 것으로 전망된다면 여러 가지 수문학적 과정들은 여러 경로에 영향을 미쳐서 북극의 수 생태계에 오염 부하량 (지속적인 유기질 오염 물질과 수은 등)의 증가를 가져오게 될 것이다 (MacDonald, et al., 2003). 수생 동물의 영양 구조와 먹이 사슬 (Wrona et al., 2006)은 생물학적으로 확대하는 화학물질의 축적을 변경시키는 잠재력을 가지며, 이것은 전통적인 지역 음식에 의존하고 있는 북쪽 주민들에게는 특별한 건강상의 관심 (우려)이기도 하다. 하천 유량의 계절적 시기 및 크기와 가용 지표수에 생기는 변화는 처리되지 않은 지표수와 지하수를 음용수로 사용하는 이 지역의 많은 지역 사회에는 관심의 대상이 될 것이다 (U.S. Environmental Protection Agency, 1997; Martin et al., 2005). 중들의 북쪽 방향 이동과 관련 질병, 그리고 해안 지역에서의 해수면 상승으로 인한 지하대수층의 해수로 인한 오염 등 각종 오염의 위험 또한 증가할 수도 있다 (Warren et al., 2005). [WGII 15.4.1]

북극 지역의 담수 시스템 부근에 집중되는 경향이 있는 대규모의 개발과 기반시설들은 북극의 수문학적 체계에 생기는 변화 때문에 크게 영향을 받을 것이다. 중요한

예로는 장비의 운반이나 북쪽 지역 마을에의 접근을 위한 얼음 도로(ice road)의 감소, 마을과 각종 산업에 사용되는 지표수 및 지하수 가용량의 변화, 영구동토로 덮인 북쪽 호수로의 광산 폐기물의 투기, 하천으로부터의 취수 시설과 수력 발전용 저수지 시설에 대한 증가된 유량 및 얼음으로 인한 위험성 등을 들 수 있다(World Commission on Dams, 2000; Prowse et al., 2004; Instanes et al., 2005). 북극 지역 전체의 장래 전기 생산에 대해서는 평가가 되어 있지 않지만 IS92a 배출 시나리오를 가정할 경우 20세기 말에 가동된 수력 발전소의 잠재 발전량은 스칸디나비아 반도와 북부 러시아에서 15~30% 정도 증가할 것으로 전망되었다. [WGI 3.5.1; WGII 15.4.1.4]

5.7.4 적응과 취약성

기후변화에 대한 북극지역 담수 자원의 여러 가지 취약성들은 빙권(氷圈, cryosphere)에서의 여러 가지 수문 시스템에서 일어나게 될 고체 상태에서 액체 상태로의 물상 변화와 관련된 갑작스러운 변화와 관계가 있다. 북극의 담수 생태계는 역사적으로 기후의 많은 변동에 적응해 올 수 있었다(Ruhland et al., 2003). 그러나, 다가오는 세기에 걸친 급속한 변화율은 일부 식물계가 적응할 수 있는 능력을 초과할 것으로 전망되고 있으며(Wrona et al., 2006), 담수 생태계에는 보다 긍정적인 영향보다는 부정적인 영향을 줄 것으로 전망되고 있다(Wrona et al., 2005). [WGII 15.2.2.2]

인간의 사용 견지에서 보면, 잠재적인 적응 수단들은 수자원의 이용을 쉽게 고려하고자 하는 수단들(예: 얼음 도로 건설에 있어서의 변화, 수상 운송의 증가, 수력 발전을 위한 유량 조절, 수확을 위한 전략, 음용수 확보 방법 등)에서부터 증가된 담수 위험(예: 홍수 위험을 감소시키거나 수중 시스템을 위해 유량을 증가시키기 위한 구조물; Prowse and Beltaos, 2002)을 다루기 위한 적응 전략들에 이르기까지 대단히 다양하다. 그러나, 북부 주민들에 의한 전통적인 물 사용에 대한 강한 문화적 및 사회적 연대는 많은 경우 적응 전략의 선택을 복잡하게 할 수 있다(Mcbean et al., 2005; Nuttall et al., 2005). [WGII 15.2.2.2]

5.8 군소 도서 국가

5.8.1 개관

IPCC의 제3차 평가 보고서, TAR (Chapter 17; IPCC, 2001b)는 군소 도서 국가(Small Island States)들은 여러 가지 유사성(예: 물리적 크기, 자연 재해와 극한 기후 발생 가능성, 경제의 극한적 개방, 적응 능력 등)을 가지며, 취약성을 증가시키고, 기후의 변동성과 변화에 대한 탄력성을 감소시키는 것으로 지적하고 있다. 각기 다른 섬에서 강조되는 사항과 부문별 우선권의 차이점에도 불구하고 공통적인 3개 주안점을 다음과 같이 정리할 수 있다. [WGII TAR Chapter 17]

1. 모든 군소 도서 국가들의 “국가 통신”(National Communications)²⁵⁾은 적응 활동의 시급성과 그러한 활동을 지원하기 위한 재정적 지원 확보를 강조한다.
2. 담수는 군소 도서 국가에서 수질과 수량의 견지에서 보면 하나의 핵심적인 문제점으로 취급된다.
3. 개발도상의 모든 군소 도서 국가(Small Island Developing States, SIDS)를 포함하는 많은 군소 도서 국가들은 보다 더 훌륭한 통합 유역 계획 및 관리의 필요성을 인정한다.

물은 안보를 포함하여 인간의 생명과 생계의 모든 측면에 연결되어 있는 다 부문의 자원이라 할 수 있다. 용수 공급의 신뢰도는 현재 많은 섬에서 해결해야 할 핵심적인 문제로 인식되고 있으며, 문제 해결의 시급성은 장래에 더 증가할 것이다. 모든 기후변화 시나리오 아래에서 작은 섬에서의 수자원은 심각하게 타협되어야 할 가능성이 있다는 강한 증거들이 있다(very high confidence). 대부분의 작은 섬들에서의 용수공급은 제한적이며, 이들 섬에서의 수자원은 특히 미래의 변화와 강우의 분포에 취약하다. 고려된 적응 수단의 범위가 부여된 우선권은 각국의 주요 사회·경제 부문과 환경적 관심, 해수면 상승과 같은 기후변화 영향에 가장 위험한 지역과 밀접하게 연관되어 있다. [WGII 16.ES, 16.5.2]

5.8.2 관측된 기후적 경향과 도서 지역에 대한 전망

군소 도서에서의 수문학적 조건과 용수공급, 그리고 물의 이용 등은 대륙의 경우와 비교하면 연구 측면이나 적응 방법론 측면에서 많이 다르다. 이와 같은 차이점들은 지질, 지형, 토지 피복, 그리고 가장 최근의 기후변화 시나리오 및 전망 측면 등을 포괄하는 일련의 다른 유형의 섬들에 대해 조사하고 모델화함으로써 밝힐 필요가 있다. [WGII 16.7.1] TAR 이후 육지와 해양면에 걸쳐 평균한 기온에 대한 새로운 관측과 재분석은 1901~2004년 기간에 걸쳐 모든 군소 도서 지역에서 일관성 있게 온난화 되어가고 있는 경향을 보였다. 그러나, 그 경향은 선형적이 아니며, 역사적인 기록 보존에 결함이 있어서 경향 분석을 심하게 방해하고 있다. [WGII 16.2.2.2]

최근의 연구들은 해양면과 섬 지역에서의 연간 및 계절 대기 온도는 1910년 이래에 남태평양의 많은 부분과 South Pacific Convergence Zone (SPCZ)²⁶⁾에 걸쳐 약 0.6~1.0°C 정도 증가한 것으로 보고하고 있다. 반면에, 1940년대 이후의 어떤 냉각 후에 연평균 기온의 10년간 증가치 0.3~0.5°C는 SPCZ의 북동쪽 지역에서 기록이 시작된 1970년대 이후에 널리 확인되었다(Salinger, 2001; Folland et al., 2003). 카리브 해와 인도양, 지중해 지역 등에 대한 분석들은 1971~2004년 기간 동안 매 10년 동안의 온난화는 0.24°C~0.5°C의 범위를 가지는 것으로 보고 있다. 캐나다 북극 군도(Canadian Arctic Archipelago)의 서쪽 지역을 위도가 높은 일부 지역들은 전 지구적인 평균 보다 훨씬 빠른 속도로 온난화가 진행되었다(McBean et al., 2005). [WGII 16.2.2.2]

25) 유엔 기후변화 협약(U.N. Framework Convention for Climate Change, UNFCCC)에 의하면, 회원국들은 온실가스 배출량의 저감이라든지, 관련 정책 및 수단의 제정, 평가 필요성 등에 관한 진척 상황에 대한 주기적인 국가 차원의 통신을 제공하도록 요구받고 있다.

26) SPCZ(남 태평양 수렴대)는 서 태평양의 온난 풀(pool)로부터 프랑스령 Polynesia 쪽으로 남동향 방향으로 확장되는 구름과 강수를 동반하는 낮은 수준의 수렴대(a band of low-level convergence)

1961~2003년 기간에 있어서 남태평양 지역에 걸친 극한 일 강우량의 경향을 보면, 연간 무더운 낮과 따뜻한 밤의 일수는 증가한 반면, 시원한 낮과 추운 밤의 일수는 감소를 보이며, 특히, 엘니뇨가 발생한 후 다음해에는 극한 강우량의 발생 경향은 극한 기온의 발생 경향 보다는 공간적으로 상관성을 덜 가지는 것으로 밝혀져 있다 (Mant-on et al., 2000; Griffiths et al., 2003). 카리브 해에서는 대단히 따뜻한 기온을 가진 날의 비율은 1950년대 이후 크게 증가하였으나 차가운 기온을 가진 날의 비율은 감소한 것으로 보고되고 있다 (Petersen et al., 2002). [WGII 16.2.2.2]

카리브 해 지역에 있어서는 전 지구적인 대기 온도의 1.5°C~2°C 상승은 다음과 같은 현상을 통하여 이 지역에 영향을 줄 것으로 전망되고 있다.

- 증발 손실량의 증가
- 강수량의 감소 (이 지역의 일부에서 관측된 강우량의 감소 경향의 계속)
- 강우 계절의 길이 단축 (2050년까지 7~8%정도 단축)
- 건조 계절의 길이 연장 (2050년까지 6~8%정도 연장)
- 강한 강우의 발생 빈도 증가 (2050년까지 약 20% 증가)
- 해안 지역의 침식과 오염 증가

수많은 군소 도서 지역에서의 열대 및 초열대 사이클론과 허리케인, 태풍 등의 변화는 ENSO와 10년간의 기후 변동성에 의해 지배되며, 이러한 현상으로 인해 어떤 유역에서의 증가는 다른 한 유역에서의 감소에 의해 보상되도록 열대 호우와 그의 진로를 재 분포시키는 결과를 가져오게 된다. 예를 들면, 엘니뇨 발생 기간 동안은 허리케인 발생은 대서양과 태평양의 극서 지역과 호주 지역에서 전형적으로 감소하나, 태평양의 중부, 북부 및 남부 지역과 특히 북 태평양의 태풍 발생 지역에서는 증가한다. 약 1970년 이후에는 열대 해수면 온도 (Sea Surface Temperature, SST)의 증가와 상관되어 북 대서양에 있어서의 강한 열대 사이클론 활동이 증가한 사실에 대한 관측된 증거가 있다. 또한, 자료의 질에 문제가 큰 또 다른 지역에서의 강한 열대 사이클론 활동의 증가에 대한 보고들이 있다. 수십 년 간의 기후 변동성과 약 1970년 이전 자료의 질은 기후의 장기 변동 성향을 밝혀내는데 어려움을 준다. 열대 사이클론의 잠재적인 파괴력에 대한 추정은 1970년대 중반 이후 엄청나게 상향되는 경향을 보인다. [WGI TS, 3.8.3; WGII 16.2.2.2]

태평양 유역에 설치된 관측소로부터 측정된 최소 25년간의 시간 자료로 구성된 해수면 기록에 대한 분석 결과에 의하면, 전반적으로 평균 해수면의 상승률은 연간 0.7 mm 정도이다 (Mitchell et al., 2001). 50년 이상의 자료를 가진 섬 지역의 4개 관측소만을 대상으로 하면 평균 해수면 상승률은 연간 약 1.6 mm 정도이다. [WGI 5.5.2]

5.8.2.1 물

표 5.8은 7개 대기 대순환 모델 (GCM)을 기반으로 SRES의 일련의 배출 시나리오를 가정하여 지역별로 작은 섬들에 대해 추정된 강수량의 변화를 비교하고 있다. 카리브 해 지역에서는 많은 섬들이 기후변화로 인해 증가된 물 스트레스를 경험할 것으로 예상되고 있으며, SRES의 모든

시나리오들은 지역 전체에 걸쳐 여름철 강수량이 감소될 것으로 전망하고 있다. 강수량이 적은 기간 동안에는 용수 수요가 충족되지 못할 것으로 보이며, 북반구의 겨울철에 증가된 강수량은 호우 기간 동안의 물 저류 용량의 부족과 과도한 유출량 때문에 물 부족을 보충하기는 힘들 것으로 보인다. [WGII 16.3.1]

표 5.8: 지역별 군소 도서 지역에서의 강수량 변화에 대한 추정 (%), 변화의 범위는 7개 AOGCM과 SRES의 배출 시나리오 B1, B2, A2, A1FI 시나리오로 산정되었음. [WGII Table 16.2]

지역별	2010~2039년	2040~2069년	2070~2099년
지중해	-35.6~+55.1	-52.6~+38.3	-61.0~+6.2
카리브해	-14.2~+13.7	-36.3~+34.2	-49.3~+28.9
인도양	-5.4~+6.0	-6.9~+12.4	-9.8~+14.7
북태평양	-6.3~+9.1	-19.2~+21.3	-2.7~+25.8
남태평양	-3.9~+3.4	-8.23~+6.7	-14.0~+14.6

태평양 지역에서는 2050년까지의 평균 강수량의 10% 감소는 Tarawa Atoll, Kiribati의 담수 렌즈 크기의 20% 감소를 초래할 것이며, 해수면 상승과 연계된 감소된 강수량은 용수공급의 신뢰도에 대한 위험성을 복잡하게 만들 것이다. [WGII 16.4.1]

많은 작은 섬들은 담수화 사업을 포함하여 장래에 전망된 물 부족량을 보충하기 위한 적응 전략의 실행에 투자를 하기 시작하였다. 그러나, 담수화 공장 자체가 환경적 경관에 미치는 영향과 환경 용수 수요 문제를 완전히 해결하기 위한 대책 등은 아직 완전히 고려되지 못하였다. [WGII 16.4.1]

허리케인은 시각적으로 인지할 수 있고 그 영향도 눈으로 볼 수 있으나, 가뭄은 연구자나 계획 입안자들의 주의를 크게 끌지 못하였다. 그러나, 이들 가뭄은 취수량을 증가시키게 되어 해안에 가까운 지하 대수층으로 염수가 침입하는 결과를 초래할 수도 있다. 예를 들면, Bahama에서는 담수 렌즈가 유일하게 개발 가능한 지하수 자원이며, 이들 렌즈들은 과다 펌핑과 과도한 증발산으로 인한 대수층 내로의 염수 침입 때문에 주기적으로 영향을 받게 된다. 대부분의 경우 지하수는 천천히 흐르며, 따라서, 지하수량의 심각한 감소는 쉽게 회복되지 못한다. 연간 가용 지하수의 체적의 변동성은 일반적으로 지표수의 경우에 비해 그리 크지는 않으며, 수질의 저하와 오염은 장기적인 영향을 가지기 때문에 빨리 치유되기 어렵다. [WGII 16.4.1]

Malta (MRAE, 2004)와 같은 일부 섬 국가들은 발전이라든지 운송, 폐기물 관리 등을 포함하여 적응 대책을 필요로 하는 잠재력이 있는 부문에 역점을 두고 있다. 반면에, Comoros (GDE, 2002), Vanuatu (Republic of Vanuatu, 1999), St. Vincent and Grenadines (NEAB, 2000) 등은 농업과 국민 보건, 통신 등에 집중하고 있다. 이와 같은 경우 Kiribati, Turalu, Manshall 군도, Maldives 등의 섬과 같이 낮은 표고에 위치한 환초국가 (고리 모양의 산호섬 국가, atoll states)이지만 해수면 상승은 가장 심각한 문제로 받아들여지지 않고 있다. [WGII 16.4.2]

5.8.2.2 에너지

신뢰도 높고 여유 있는 에너지의 확보는 높은 에너지 비용이 지속 가능한 발전을 이룩하는 목표에 장애가 되는 것으로 알려져 있는 대부분의 작은 섬에 있어서는 결정적인 요소이다. 카리브 해 지역에 있는 Dominica와 같은 섬들은 섬의 에너지 공급의 상당한 부분을 수력에 의존하고 있다. 태양열이나 바람과 같이 작은 섬에 적절한 에너지 효율과 옵션들에 관한 연구와 개발은 적응 대책 뿐만 아니라 완화 전략 수립에 도움이 될 수 있으며, 또한 지속 가능한 성장에 대한 전망을 밝게 할 수 있다. [WGII 16.4.6, 16.4.7]

5.8.2.3 보건

많은 작은 섬들은 말라리아라든지 뎅그 (dengue) 열병, 필라리아 병(filariasis), 주혈흡충병(schistosomiasis), 그리고 음식물이나 물로 인해 발생하는 질병 등의 전염이 용이한 일기가 계속되는 열대 혹은 아열대 지역에 위치하고 있다. 이들 질병들 중 많은 질병의 발생율은 몇 가지 이유로 작은 섬에서 증가하고 있다. 즉, 열악한 공공 보건 대책, 부적절한 기반 시설, 좋지 못한 폐기물 관리 대책, 여행 거리의 증가, 변화하는 기후 조건 (WHO, 2003) 등이 바로 그 이유들이다. 카리브 해 지역에서는 ENSO 사이클의 따뜻한 해에는 뎅그 열병의 발생이 증가한다 (Rawlins et al., 2005). 뎅그 열병의 전염 위험이 가장 큰 시기는 매년 우기 동안이므로 해충 구제 프로그램은 질병 우려를 감소시키기 위해 이 기간을 목표로 삼아서 세워야 한다. 설사병의 발생은 매년의 평균 기온과 관계가 있으며 (Sin호 et al., 2001) [WGII 8.2, 8.4], 태평양 지역에서의 물의 가용성에는 부정적으로 관계된다 (Sin호 et al., 2001). 따라서, 기후변화로 인한 기온의 증가와 물의 가용성의 감소는 여러 작은 섬 국가에서의 설사와 기타 전염병 발생의 부담을 증가시킬 수도 있다. [WGII 16.4.5]

5.8.2.4 농업

기후변화의 전망된 영향에는 가뭄 기간의 연장, 토양 비옥도의 저하, 증가된 강수로 인한 토양의 질 저하 등이 포함되며, 이들은 농업과 식량 안보에 부정적인 영향을 미칠 것이다. 선택된 일부 태평양 지역의 섬에 대한 기후 변화와 기후 변동성의 경제적 및 사회적 의미에 관한 연구에서 세계은행 (World Bank, 2000)은 적응 대책을 쓰지 않을 경우, SRES의 배출 시나리오 A2와 B2 하에서 Viti Levu 나 Fiji 같은 높은 섬은 2050년까지 매년 US \$0.23~0.52억의 피해를 경험할 수 있는 반면에 (2002년도의 Fiji의 GDP의 약 2~3%에 상당함), Tarawa 나 Kiribati 와 같은 낮은 섬들은 매년 US\$800만~1,600만 (2002년도의 Kiribati의 GDP의 17~18%에 상당함) 보다 많은 피해를 입을 수 있음을 밝혔다. 카리브 해 지역의 많은 섬들에서 수입 농산물에의 의존도는 전체 식량 공급의 약 50% 까지 차지한다. [WGII 16.4.3]

5.8.2.5 생물 다양성

Bunke et al. (2002)과 Bunke and Maidens (2004)는 남동아시아의 모래톱(암초)의 약 50%와 카리브 해 모래톱의 약 45%는 높은 위험 (high risk)과 대단히 높은 위험 (very high risk)이 있는 것으로 분류하고 있다 (Graham et al., 2006). 그러나, 대륙의 경우와 작은 섬의 경우 산호초에

대한 위협의 규모와 형식에는 중요한 국지적 및 지역적 차이가 있는 것이다. [WGII 16.4.4]

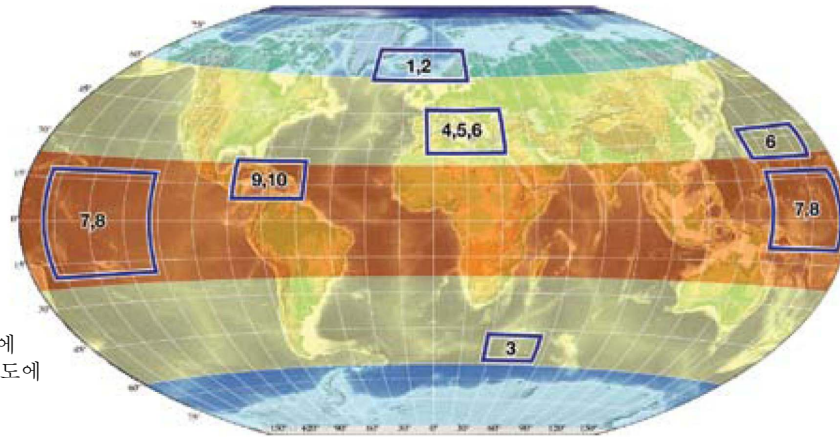
큰 섬의 육지상 생태계와 대부분 섬에서의 해안 생태계는 둘 다 최근 수십 년 동안 가속화된 훼손과 파괴에 부딪혀 왔다. 예를 들면, 30년 동안에 걸친 산호초 조사 자료의 분석 결과를 보면, 카리브 해 모래톱을 덮고 있는 산호들은 주로 오염이나 유사, 해양 질병, 과도한 낚시 행위 등으로 인해 30년 동안 약 80% 까지 감소하였다 (Gardner et al., 2003). 강한 강우 사상을 통해 직접 입력된 담수와 함께 육지 지역으로부터의 유출은 모래톱의 질과 질병에 대한 민감도에 중요한 역할을 미칠 수 있다. [WGII 16.4.4]

5.8.3 적응, 취약성, 그리고 지속 가능성

지속 가능한 개발은 종종 작은 섬의 관리 전략의 목표라고 일컬어진다. 기후변화 측면에서 지속 가능한 개발이 무엇을 의미하는지에 관하여 구체적으로 검토해 볼 일은 별로 없다 (Kerr, 2005). 오랜 기간 동안 소규모의 독립적인, 그리고 특화된 경제나 세계화 및 지역화 움직임에 반대하는 등의 문제들은 작은 섬들에서의 현재의 개발이 장기적으로는 지속 가능하지 못하게 됨을 의미한다. [WGII 16.6] 기후로 인한 잠재적인 물리적 영향들의 불확실성 하에 기후변화로 인해 예상되는 영향들에 적응 옵션을 좁게 적용하려 하는 데에는 위험이 있다. 표 5.9는 현재부터 2100년까지 섬 환경에 대한 몇 가지 시나리오를 기반으로 한 영향 분석 결과를 요약하고 있으며, 이는 일부 영향들이 이미 발생하고 있음을 의미한다. 이 표는 물 관련 스트레스를 악화시킬 수도 있는 다른 잠재적인 기후 영향에 대한 정황을 제공하기도 한다. 한계선은 환경적 과정뿐만 아니라 사회적 과정으로부터 올 수도 있다. 뿐만 아니라, 과거에 채택되었던 적응 전략과 미래의 계획과 실행을 위한 이들 전략이 가져올 수 있는 편익과 한계점들을 이해하는 것이 바로 도전이다. [WGII 16.5]

TAR의 발간 이후 해수면은 지역적 전망에는 상당한 진전이 있었던 반면, 그러한 전망들은 전 지구적인 전망과 잘 일치하지 않고 지역적인 전망치가 가지는 큰 불확실성 때문에 작은 섬들에 대해서는 충분히 사용되지 못하였다. 국지적인 자료와 함께 좀 더 정밀한 해상도를 가지는 결과를 기반으로 하는 신뢰도 높은 전망은 작은 섬들에 대한 믿을 만한 기후변화 시나리오의 개발을 알리기 위해 꼭 필요하다. 이러한 접근 방법은 개선된 취약성의 평가와 섬의 규모에서 모든 기후변화 관련 시간 규모에 걸친 보다 적절한 적응 옵션의 확인에 사용될 수 있다. [WGII 16.7.1]

선택된 일부 작은 섬들에 대한 취약성 연구 (Nurse et al., 2001)는 기반 시설과 거주 관련 비용이 GDP의 상당한 부분을 차지하게 되어 종종 대부분의 작은 섬 국가들의 재정 능력을 초과하게 된다고 보고하고 있다. 보다 최근의 연구들은 적응 대책의 수립이 필요한 주요 분야를 골라 내었으며, 여기에 포함되는 내용에는 수자원의 유역관리, 모래톱(암초)의 보존, 농경지 및 삼림의 관리, 생물 다양성의 보존, 에너지 안보, 재생 가능 에너지 개발의 촉진 및 에너지 소비의 최적화 등이 있다. 현재와 미래에 지역 사회가 겪게 될 취약성을 고려하고 기후 과학과 사회 과학, 그리고 통신을 통합하는 방법론들을 포함하는 체계의 구축은 적응 역량을 축적하기 위한 기초를 제공하게 된다. [WGII Box 16.7] 이러한 접근 방법을 위해서는 지역 사회 구성원들이 그들에 관련된 기후 조건을 확인



(주) 표 5.9의 “지역”란에 붙여진 숫자는 위의 지도에 표시된 지역임

표 5.9: 군소 도서에서의 미래 영향과 취약성의 범위 [WGII Box 6.1]

지역 (위험에 처한 시스템)	배출 시나리오 (참고 문헌)	변화된 매개변수	영향과 취약성
1. 아이슬란드와 Svalbard의 북극섬과 Faroe 섬: 해양 생태계와 식물 종	SRES A1, B2 (ACIA, 2005)	추정된 기온의 상승	<ul style="list-style-type: none"> 종의 손실과 대체의 불균형으로 초기에는 생물학적 다양성에 손실. 키 작은 관목과 나무가 지배적인 식생 피복의 토종 지역으로의 북쪽 확장은 손실됨. 아이슬란드의 작은 물고기 (capelin)의 많은 손실 혹은 멸종은 고래나 해조 (바다 새)와 같은 상업성 어류에 부정적 영향을 미침.
2. 고위도에 있는 섬 (Faroe 섬): 식물 종	Scenario I/II 기온 2°C 정도 증가 혹은 감소 (Fosaa et al., 2004)	토양의 온도, 적설, 유효적산온도 (GDD, Growing degree days)의 변화	<ul style="list-style-type: none"> Scenario I: 온난화 영향을 가장 많이 받은 중은 산악의 최 정점부로 제한됨. 기타 종의 경우, 영향은 높은 지역 쪽으로 이동. Scenario II: 냉각으로 영향을 받은 중은 저 위도 지역에 있는 종임.
3. 아 남극의 Marion 섬: 생태계	Own Scenarios (Smith, 2002)	기온과 강수량의 추정된 변화	<ul style="list-style-type: none"> 변화들은 토착 생물상에 직접 영향을 미칠 것임. 온난화되는 기후는 섬이 외래종의 침범을 받을 위험성을 증가시킴.
4. 지중해의 5개 섬: 생태계	SRES A1F1 and B1 (Gritti et al., 2006)	기후 및 훼손 시나리오 아래에서의 외래 식물 침범	<ul style="list-style-type: none"> 기후변화 영향은 여러 가지 모의된 해안 생태계에서 무시할 정도. 도서 생태계로의 외래종 침입은 심각한 문제가 되고 있다. 장기적으로 보면 생태계는 교란물에 관계없이 외래 식물에 의해 완전히 지배될 것이다.
5. 지중해의 철새: 딱새 (Pied flycatchers - <i>Ficedula hypoleuca</i>)	GLM/STATISTICA Model (Sanz et al., 2003)	기온 상승, 수위 및 식생 지표의 변화	<ul style="list-style-type: none"> 얼룩 딱새 (Pied flycatchers)들은 기후변화 영향을 받으며, 딱새의 번식에 부정적인 결과를 발생.
6. 태평양 및 지중해 지역: Siam Weed (<i>Chromolaena odorata</i>)	Climex model (Kriticos et al., 2005)	수분과 스트레스의 증가	<ul style="list-style-type: none"> 태평양 지역 섬들이 Siam Weed의 침입을 받을 위험. 지중해 지역의 반 건조 및 온난 기후는 외래종의 침입에 부적절한 것으로 추정.
7. 태평양의 작은 섬 지역: 해안 침식, 수자원, 인간의 주거	SRES A2, B2 (World Bank, 2000)	기온, 강수량, 해수면 상승의 변화	<ul style="list-style-type: none"> 해안 침식 가속, 담수층으로의 염수 침입, 인간 주거 시설에 대한 홍수 범람 위험 가증. 가속화된 해수면 상승과 연계된 강수량 감소로 수자원의 감소 (2050년까지 강우량이 10% 감소하면 Tarawa Atoll, Kiribati 지역의 담수 렌즈의 크기가 20% 감소.
8. 미국령 Samoa 및 15개 태평양 지역 작은 섬, 망그로브 (Mangrove)	2100년까지 해수면 상승 0.88m (Gilman et al., 2006)	추정된 해수면의 상승	<ul style="list-style-type: none"> 미국령 사모아에서의 망그로브 면적은 50% 감소. 15개 작은 섬에서는 15% 감소.
9. 카리브 해 지역: 해안 침식, 바다 거북 서식처	SRES A1, A1F1, B1, A2, B2 (Fish et al., 2005)	추정된 해수면의 상승	<ul style="list-style-type: none"> 0.5m의 해수면 상승 시 현재 해안의 38% 까지 ($\pm 24\%$ 표준편차) 손실. 바다거북 서식처의 1/3 손실 예상.
10. 카리브 해 지역 (Bonaire, Barbados): 관광 산업	없음 (Uyarra et al., 2005)	해양 야생 동물, 보건, 육지 상황, 바다 조건	<ul style="list-style-type: none"> Barbados에서의 해변 관광산업과 Bonaire 에서의 해양 생태 관광은 해변 침식과 산호초의 침식으로 인해 부정적인 기후변화 영향을 받음.

하고 현재와 미래의 잠재적 적응 전략을 평가할 필요가 있다. 이런 방법 중의 한 가지는 Samoa에서 시험된 바 있으며, 한 마을로부터 얻은 결론도 보고되고 있다 (Saolufata 마을: Sutherland et al., 2005). 이 경우에는 지역 주민들이 해안벽의 설치, 배수 시스템, 물 탱크, 타 지역으로의 이주, 기존 기반 시설의 보수 등을 포함하여 여러 가지 적응 수단을 골라내어 확인하였다. [WGII 16.5]

IPCC 제4차 평가 보고서 (AR4)는 몇 가지 주요 분야와 작은 섬 지역에 미치는 기후변화의 영향에 관한 현대적 연구에서 취급되고 있는 내용간의 차이 (gap)를 확인하였으며 [WGII 16.7], 여기에는 다음과 같은 내용이 포함된다.

- 망그로브 (mangroves), 산호초, 해수면 상승과 호수에 저항하여 자연적인 방어 능력을 제공하는 해변 등과 같은 해안 생태계의 역할
- 육지 지역의 고지 지역과 내륙 지역 생태계의 평균 기온-강우량과 기온-극한강우량의 변화에 대한 반응을 파악

- 생존형 농업이나 낚시 및 식량 안보뿐만 아니라 산업성 농업, 임업 및 어업들이 기후변화와 비 기후관련 인자들의 조합에 의해 어떻게 영향을 받을 것인가를 고려
- 국가적 혹은 지역적 연구를 통한 작은 섬 지역에서의 기후에 민감한 질병에 대한 지식의 확대. 해충으로 인한 질병뿐만 아니라 피부 질환, 호흡기 질환 및 수인성 질병도 포함
- 섬의 유형의 다양성과 위치 등을 고려하여 섬의 유형 별로 가장 취약한 시스템과 부문을 밝혀냄

이와 같은 평가에 있어서 다른 지역과는 대조적으로 작은 섬 지역의 경우에는 믿을만한 인구 통계학적 및 사회·경제학적 시나리오와 전망이 잘 되어있지 못하여 작은 섬 지역에서의 사회·경제적 조건들의 장래 변화가 기존의 평가에서는 잘 대표되지 못하였다. 예를 들면, 적응 대책이나 완화 대책이 없으면 해수면 상승과 보다 강한 호우, 기타 기후변화 [WGII 6.3.2] 등의 영향은 엄청나게 커져서 일부 섬들과 저지대에서는 2100년까지 더 이상 살수 없게 될 수도 있다. [WGII 16.5]

6

기후변화의 완화 수단과 물

**Climate Change Mitigation Measures
and Water**

6.1 서론

기후변화의 완화(경감) 수단과 물 사이의 관계는 서로 상반되는 관계이다. 완화 수단들은 수자원과 그의 관리에 영향을 주게 되며, 완화를 위한 대안들을 개발하고 평가할 때 이러한 영향을 인식하는 것은 중요하다. 다른 한편으로는, 물 관리 정책과 수단들은 온실가스 배출에 영향을 미칠 수 있으므로, 각 분야의 완화 수단에도 영향을 미칠 수 있다. 또한, 기후변화의 완화 측면에서 평가한다면 물 관련 시스템에 대한 인간의 간섭은 반 생산적일 수도 있다.

기후변화의 완화 문제는 IPCC의 제4차 평가보고서(AR4)의 WGIII 완화(Mitigation)에서 다루고 있으며, 에너지 공급, 교통과 교통 관련 기반시설, 주거용 및 상업용 건물, 공업, 농업, 임업, 폐기물 관리 등 7개 부문에 걸쳐 자세히 검토되어 있다. 물 문제는 AR4(Mitigation)의 초점 사항이 아니었으므로 기후변화의 완화와 관련되는 일반적인 사항에 국한하여 언급되었다. 그러나, IPCC의 제3차 평가보고서(TAR)도 물 문제에 관한 정보를 포함하고 있다.

부문별 고유의 완화 수단들은 물에 여러 가지 영향을 미칠 수 있으며, 이에 관해서는 제6절의 본문 뒤에 따르는 절에 설명되어 있다(표 6.1 참조). 소절(sub-sections)의 제목 다음의 괄호 속에 붙어있는 숫자는 표 6.1에 표시된 실무 관행(practices) 혹은 부문별 고유의 완화 대안에 해당한다.

6.2 부문별 고유의 완화 수단

6.2.1 이산화탄소 포집 및 저장(CCS) (표 6.1의 (1) 참조)

이산화탄소 포집 및 저장(Carbon Dioxide Capture and Storage, CCS, 표 6.1의 (1) 참조)은 산업이나 에너지 관련 원천으로부터 이산화탄소(CO₂)를 분리시킨 후 저장 장소로 이동시켜 대기로부터 장기간에 걸쳐 격리시키는 과정을 말한다. CO₂를 투수성 지층내의 간극이나 파쇄부로 주입(注入)하면 지층내의 현장 유체(in situ fluid)를 밀어내거나, CO₂가 유체내로 용해되거나 혹은 혼합될 수 있고, 또한 지층내 광물 입자와 반응할 수도 있다. 뿐만 아니라, 이와 같은 현상들을 조합한 과정이 발생할 수도 있다. CO₂가 지층을 따라 이동하는 과정에서 일부는 지층내의 물에 용해되어 그 지역의 지하수 흐름에 의해 이동된다. 누수성 주입정(leaking injection well)과 폐기된 우물로부터의 누수와 파쇄대 및 비효율적인 피압 대수층으로부터의 누수는 지하수의 수질을 저하시킬 우려가 있으며, CO₂를 대기 중으로 방출시키면 지역적으로 건강 및 안전 문제를 유발시킬 수 있다. [CCS SPM. 5.ES]

현재로서는 위에서 언급한 탄소 포집 개념의 실질적인 효과와 예상되는 문제점 등에 대한 완전한 이해는 가능하지 못하다는 사실은 중요하다. 기후변화 영향을 피하거나 혹은 완화시키기 위해서는 탄소 포집 위치를 조심스럽게 선정하고, 효율적인 규제와 적절한 모니터링 프로그램, 그리고 CO₂ 방출을 중지시키거나 조절할 수 있는 교정 방법의 실행 등을 필요로 한다.

6.2.2 바이오 에너지용 농작물 (2)

바이오 에너지(Bio-energy) (혹은 생물학적 에너지)는 화석 연료 사용을 대체함으로써 완화 편익을 주게 된다. [LULUCF 4.5.1] 그러나, 대규모 생물학적 연료(bio-fuel)의 생산은 비료와 살충제에 대한 수요라든지, 영양물질의 순환, 에너지 평형, 생물 다양성에 대한 영향, 수문 및 침식, 식량 생산과의 갈등, 소요되는 재정적 보조금의 수준 등을 포함하는 여러 가지 문제에 대한 질문을 낳게 된다. [LULUCF 4.5.1] 에너지의 생산과 에너지용 농작물의 온실가스 완화 잠재력은 자연보호라든지 토양과 물의 지속 가능한 관리, 그리고 기타 지속 가능성 관련 기준들뿐만 아니라 식량에 대한 수요를 충족시킬 수 있는 토지의 가용 여부에 달려있다. 수많은 연구를 통해 바이오 매스(biomass)가 미래의 전 지구적 에너지 공급에 기여하게 될 잠재성에 대한 통계치는 큰 진폭이 있는 것으로 알려져 있으며, 2050년 기준으로 하한치는 약 100EJ/yr이고 상한치는 약 400EJ/yr 정도로 알려져 있다 (Hoogwijk, 2004; Hoogwijk et al., 2005; Sims et al., 2006). Smeets et al. (2007)은 농업 및 축산업 부문의 기술 발전에 대한 현재의 전망을 고려할 때 현 농지에서의 에너지용 농작물의 경작에 의한 에너지 생산의 기술적 잠재력은 약 800EJ/yr를 상회할 것으로 보고 있으며, 이렇게 하더라도 전 세계의 식량 공급을 위태롭게 하지는 않을 것이라고 주장하고 있다. 기존하는 연구들의 결과에 차이가 나는 것은 주로 토지의 가용성이라든지, 에너지용 농작물의 수확량, 농업 효율의 변화에 관한 가정 등에 있어서의 불확실성 때문이다. 가장 크게 전망된 잠재력에 해당하는 에너지 생산량(800EJ/yr)은 잉여 토지가 사용되었을 뿐 아니라 목초지를 포함하여 현재 식량 생산에 사용되고 있는 토지도 사용된다는 전제를 깔고 있다 (Smeets et al., 2007). [WGIII 8.4.4.2]

온실가스의 완화를 위한 농경 실무 관행은 때때로 물 사용을 크게 늘릴 수 있으며, 그로 인해 하천 유량이나 지하수 저장량을 감소시킬 수 있다(Unkovich, 2003; Dias de Oliveira et al., 2005). 예를 들면, 높은 생산성을 가지며, 뿌리가 깊고 상록의 생물학적 에너지용 농원은 일반적으로 원래의 토지보다 더 많은 물을 사용하게 된다(Berndes and Börjesson, 2002; Jackson et al., 2005). 어떤 농경 관행을 사용하면 살충제와 영양물질의 용해를 증가시킴으로서 수질에 영향을 미칠 수도 있다(Machado and Silva, 2001; Freibauer et al., 2004). [WGIII 8.8]

농산물을 생물학적 에너지용 농작물과 같은 대안 사용으로 바꾸는 완화 대책을 사용할 경우 삼림을 농작물 재배지로 바꾸게 될 경우가 생긴다. 반대로, 기존의 농작물 재배지에서의 생산성이 증가하면 삼림이나 초지를 어느 정도 유보할 수 있다(West and Maland, 2003; Balmford et al., 2005; Mooney et al., 2005). 생물 다양성과 기타 생태계 서비스에 대한 그러한 협상의 순 효과는 아직까지 정량적으로 평가되지 못하고 있다(Huston and Marland, 2003; Green et al., 2005). [WGIII 8.8]

만약 생물학적 에너지 농원(bio-energy plantations)이 적절한 위치에 잘 설계되고 관리되면 영양물질의 용해와 토양 침식을 감소시킬 수 있을 뿐 아니라 토양속의 탄소 축적, 토양의 비옥도 개선, 토양이나 기타 폐기물로부터 카드뮴(cadmium)이나 기타 중금속 물질의 제거 등과 같은 추가적인 환경 서비스를 해낼 수도 있다. 이들

표 6.1: 수질, 수량 및 수종(水種)에 미치는 부문별 고유 완화책의 영향. 물에 미치는 긍정적인 영향은 [+], 부정적 영향은 [-], 불확실한 영향은 [?]로 표기. ()안의 숫자는 표 6.1 아래의 주기(Notes)를 가리키며, 6.2절의 소절 번호를 가리킴.

물 관련 인자	에너지	건물	공업	농업	임업	폐기물 관리
수질						
화학적/생물학적 인자	CCS ⁽¹⁾ [?] Bio-fuels ⁽²⁾ [+/-] Geothermal energy ⁽⁵⁾ [-] Unconventional oil ⁽¹³⁾ [-]		CCS ⁽¹⁾ [?] Waste Water treatment ⁽¹²⁾ [-] Biomass electricity ⁽³⁾ [-/?]	Land-use change and management ⁽⁷⁾ [+/-] Cropland management (water) ⁽⁸⁾ [+/-]	Afforestation (sinks) ⁽¹⁰⁾ [+]	Solid waste management; Wastewater treatment ⁽¹²⁾ [+/-]
수온	Biomass electricity ⁽³⁾ [+]			Cropland management (reduced tillage) ⁽⁹⁾ [+/-]		
수량						
가용량 및 수요	Hydropower ⁽⁴⁾ [+/-] Unconventional oil ⁽¹³⁾ [-] Geothermal energy ⁽⁵⁾ [-]	Energy use in buildings ⁽⁶⁾ [+/-]		Land-use change and management ⁽⁷⁾ [+/-] Cropland management (water) ⁽⁸⁾ [-]	Afforestation ⁽¹⁰⁾ [+/-] Avoided/reduced deforestation ⁽¹¹⁾ [+]	Wastewater treatment ⁽¹²⁾ [+]
유량/유출/지하수 함양	Bio-fuels ⁽²⁾ [+/-] Hydropower ⁽⁴⁾ [+/-]			Cropland management (reduced tillage) ⁽⁹⁾ [+]		
수종						
지표수	Hydropower ⁽⁴⁾ [+/-]			Land-use change and management ⁽⁷⁾ [+/-]		
지하수	Geothermal energy ⁽⁵⁾ [-]			Land-use change and management ⁽⁷⁾ [+/-]	Afforestation ⁽¹⁰⁾ [-]	

주기(Notes):

- (1) 지하로의 탄소 포집 및 저장 (CCS)은 지하수의 수질에 잠재적인 위험을 준다. 심해 저장(수심 3,000m 아래)이 가장 안전한 대안이다.
- (2) 바이오 연료원 (Bio-fuel source)인 바이오 에너지 농작물과 삼림을 확대하면 용수 수요의 증가, 지하수의 오염, 토지 이용 변화의 촉진 등과 같은 부정적인 영향을 일으켜 수자원에 간접적인 영향을 미치는 한편, 영양 물질의 용해와 토양 침식, 유출 및 토사 퇴적 등의 감소를 통해 긍정적인 영향을 미치기도 한다.
- (3) 바이오 매스 전기 (Biomass electricity)에 의한 재생 가능 에너지(화석 연료를 사용하는 발전소와 비교할 때)의 기여도 제고는 지표수원 으로의 냉각수 방류를 감소시키는 것을 의미한다.
- (4) 특정 개발 사업에 있어서 수력 발전(Hydropower)의 환경적 영향과 여러 가지 편익이 고려될 필요가 있으며, 이들 영향은 긍정적일수도 있고 부정적일수도 있다.
- (5) 지열 에너지(Geothermal energy)의 사용은 오염이나 지반 침하를 가져올 수 있으며, 경우에 따라서는 가용 수자원에 좋지 못한 영향을 미칠 수도 있다.
- (6) 건물에서의 에너지 사용 (Energy use in buildings)은 여러 가지 다른 접근방법과 수단에 의해 감소시킬 수 있으며 긍정적인 혹은 부정적인 영향을 미칠 수 있다.
- (7) 토지 이용 변화와 관리 (Land-use change and management)는 지표수 및 지하수의 수질에 영향을 미칠 수(영양 물질과 살충제의 용해를 촉진시키거나 감소시킴으로써)있을 뿐 아니라 국지적인 물 순환 사이클에도 영향을 미칠 수 있다.
- (8) 기후변화의 완화를 위한 농업 실무 (agricultural practices)는 수자원과 수질의 보존에 긍정적인, 혹은 부정적인 영향을 미칠 수 있다.
- (9) 경작지의 감소 (reduced tillage)는 물 사용 효율의 개선을 촉진시킨다.
- (10) 조림 (Afforestation)은 일반적으로 지하수의 수질을 개선하고 토양 침식을 저감시키며, 하천 유역 및 지역의 물 순환 사이클에 영향 (유출과 홍수 범람을 저감시킴)을 준다. 또한, 조림은 일반적으로 유역의 보호에 도움이 되나 지표수의 소모와 지하대수층의 함양을 대가로 지불해야하는데, 이는 건조 지역 혹은 반 건조 지역에서는 위험할 수 있다.
- (11) 삼림 벌채 (Deforestation)를 중단하거나 지연하는 것은 수자원을 보존하고, 홍수 범람을 방지하며, 유출을 감소시켜 토양 침식을 줄이고 저수지 퇴사도 감소시킨다.
- (12) 여러 가지 폐기물 관리 (Waste management)와 폐수 통제 (Wastewater control) 및 처리 기술은 온실 가스 배출을 감소시킬 수 있고 환경에 긍정적인 영향을 줄 수 있다. 그러나, 처리 시설이 잘못 설계되고 운영될 경우에는 수질 오염을 일으킬 수도 있다.
- (13) 재래식 연료 공급이 드물어지고 연료 추출 비용이 증가하고 있기 때문에 비 재래식 액체 연료가 경제적으로 더 선호될 것이다. 그러나, 이는 더 많은 환경 비용에 의해 상쇄될 수 있다.

농원은 영양물질의 재순환도 증가시킬 수 있으며, 영양물질은 풍부한 폐수와 슬러지의 처리에 도움이 되며, 농경 지역에서의 생물 다양성을 위한 서식처를 제공하게 된다 (Berndes and Börjesson, 2002; Berndes et al., 2004; Börjesson and Berndes, 2006). [WGIII 8.8] 생물학적 연료를 획득하기 위한 삼림 농원의 경우 부정적인 환경 영향은 사업의 설계를 잘 함으로서 피할 수 있다. 환경적 편익에는 여러 가지가 있지만, 대표적인 것은 토양의 질 저하와 유출, 그리고 하류부 퇴적 등의 감소와 농경지로부터의 유출을 오염시키는 물질의 포집 등이다.

6.2.3 바이오 매스 전기 (3)

태양열, 풍력, 지열, 생물체 (biomass) 등과 같은 수력이 아닌 재생 가능 에너지의 공급 기술은 현재로서는 전 지구적 열과 전기의 공급에 있어서 아주 작은 기여를 하고 있을 뿐이지만, 가장 빠르게 발전하고 있다. 바이오 매스 전기 (biomass electricity)의 성장은 사회적 및 환경적 장벽뿐 아니라 생산 비용 때문에 여러 가지 제약을 받는다. [WGIII 4.ES] 바이오 매스 전기의 특별한 경우로서 농경지 또는 삼림지의 잔류물로부터 가용한 양보다 더 필요한 생물체의 양 [WGIII Chapter 8 and 9]은 특별한 목표를 세워 생산할 필요가 있을 것이므로 토지와 물 가용량에 의해 제약을 받게 될 수 있다. 불확실성이 크기는 하나, 2030년 까지는 바이오 에너지로부터 432TWh/yr의 추가 전력을 생산하기 위하여 모든 지역에서 충분한 생물체 생산이 가능할 것이다. [WGIII 4.4.4] 일반적으로 보면, 전기 생산을 위해 화석 연료를 바이오 매스로 대체하게 되면 지표면의 하천으로 방류하는 냉각수의 양을 줄이게 된다.

6.2.4 수력 (4)

수력 발전과 같은 재생 가능한 에너지 시스템은 에너지 공급 안보와 자연 환경의 보호에 기여한다. 그러나, 수력 발전소의 건설은 기존의 하천 생태계와 어업 활동에 생태학적 영향을 미칠 수도 있다. 이들 영향은 발전소 건설로 인한 하천 유황의 변화와 댐/저수지로 부더의 증발 손실 때문에 발생하게 된다. 또한, 발생할 수도 있는 사회적 혼란도 영향 인자 중의 하나일 수 있다. 마지막으로, 수심 유지를 위한 물의 가용 여부는 문제를 일으킬 수도 있다. 긍정적인 영향으로는 하천 유황의 조절, 홍수의 통제, 건기 동안 관개를 위한 물의 공급 가능성 등이다. 뿐만 아니라, 수력 발전에 있어서는 화력 발전소의 경우처럼 냉각수를 필요로 하는 것은 아니며, 바이오 연료의 경우처럼 농작물의 성장을 위한 물을 필요로 하지 않는다. 전 세계 저수지의 약 75%는 관개와 홍수 조절, 도시 용수 공급 시설 등을 위해 건설되었으며, 많은 저수지의 경우 추가적인 환경 영향 없이 소규모의 수력 발전 시설을 추가할 수 있을 것이다. [WGIII 4.3.3]

10 메가와트(MW) 보다 큰 수력 발전 시스템들은 2004년에 소비된 총 에너지 중 2,800 TWh 이상을 생산하였으며 전 지구적 전기 생산량 (이중 90%는 재생 가능 에너지)의 16% 정도를 제공하였다. 건설 중인 수력 개발 사업들은 준공되고 나면 수력 발전에 의한 전기 생산의 분담량을 약 4.5% 정도 증가시킬 수 있으며, 주로 개발도상국에서 6,000TWh/yr 혹은 그 이상의 전기를 경제적으로 제공하기 위해 신규 사업들이 펼쳐질 수 있다. 기존의 수력 발전소를

보다 강력하고 효율성 높은 터빈 설계의 도움을 받아 재개발하는 것은 발전소의 규모에 관계없이 비용 효율적일 수 있다.

시설 용량이 10MW 이하인 소규모 (small) 수력 발전 시스템과 1MW 이하인 미소규모 (micro) 수력 발전 시스템 들은 보통의 경우 댐/저수지 없이 하천 흐름을 그대로 이용하여 (run-of-river schemes) 네팔 등과 같은 개발도상국의 많은 시골 마을에 전기를 제공해 왔다. 이와 같은 유형의 수력 발전 출력이 현재에 얼마나 큰지는 확실하지 않으나 추정에 의하면 그 범위는 최소 4TWh/yr 로부터 총 수력 발전 생산 출력의 9%에 해당하는 최대 250TWh/yr 정도이다. 전 지구의 기술적으로 개발이 가능한 소규모 및 미소규모 수력의 포장량은 약 150-200GW 정도이며, 아직은 개발 가능 지점이 도처에 많이 남아 있다. 수력 발전의 부정적인 측면뿐 아니라 관개와 용수공급 자원의 확보, 침투 부하로 인한 전력 수요 변동에의 신속한 반응, 위락용 저수지, 홍수 조절 등 수력 발전의 여러 가지 편익들은 어떠한 수력 개발 사업이든 간에 면밀하게 평가 분석될 필요가 있다.

6.2.5 지열 에너지 (5)

지열 자원 (Geothermal resources)은 도시의 지역 난방이라든지 공업용 공정 처리, 가정 용수 및 공간의 난방, 여가 및 온천 요법 등을 위해 열을 직접 뽑아내는데 오랜 기간 동안 사용되어 왔다. [WGIII 4.3.3.4]

자연 하천 자체가 지열 영역 (geothermal fields)을 형성하는 경우는 드물다. 대부분의 경우 하천수와 온천수가 혼합되어 존재하며 하천수가 지열 영역으로 주입되면 일정 압력이 유지되어 지열 영역의 수명은 길어지고 환경 영향에 대한 우려는 감소된다. [WGIII 4.3.3.4]

지반 침하라든지, 자연의 재충전 능력을 초과하는 열 채취율 (Bromley and Currie, 2003), 비소 (arsenic) 등과 같은 화학 물질에 의한 수로의 오염과 그로 인한 CO₂의 배출 등에 관련되는 지속 가능성의 고려가 문제되어 지열 발전소의 허가가 취소된 경우가 여러 번 있어 왔다. 이와 같은 문제들은 재 주입 기법 (re-injection techniques)으로 해소될 수 있다. 심층 굴착 기술을 사용하면 광범위한 영역에 걸쳐 풍부한 뜨거운 암반층을 개발할 수 있고 암반의 파쇄부에 물을 주입시켜 온천수를 발생시켜 열을 채취할 수 있으나 이것 역시 가용한 물을 필요로 하는 것이다. [WGIII 4.3.3.4]

6.2.6 건물에서의 에너지 사용 (6)

1가지 완화 수단으로서의 증발에 의한 냉각 (evaporative cooling)은 주택용의 연간 냉각 에너지 사용의 엄청난 절감을 가져온다. 그러나, 이런 유형의 냉각은 가용 수자원에 추가적인 압력을 주게 된다. 건물에서의 냉각 에너지 사용은 여러 가지 수단에 의해 감소시킬 수 있다. 예를 들면, 건물의 모양이나 방향성에 의해 냉각 부하를 감소시키는 등의 방법이다. 냉각을 위해 물을 사용하는 경우 이러한 에너지 감소는 물의 수요를 감소시키는 것이라 할 수 있다.

6.2.7 토지 이용 변화 및 관리 (7)

IPCC의 LULUCF를 위한 Good Practice Guidance에 따르면 넓은 의미의 토지이용은 삼림지 (forest land), 농경지 (crop land), 초지 (grass land), 습지 (wetlands), 주거지 (settlements) 및 기타 (other)의 6가지로 분류할 수 있다. 토지 이용에 있어서의 변화 (예: 농경지를 초지로 전환)는 토양의 탄소 축적량과 물에 미치는 여러 가지 영향에 변화를 가져온다. 삼림으로 전환된 토지 (제6.2.10절 참조) 이외의 토지 이용 변화에 대해 지금까지의 IPCC 문헌들은 물에 미치는 영향과 관련하여 참고 자료를 거의 제공하지 못하고 있다. 농업 부문에 있어서의 주된 완화 대책 중의 하나인 습지 복원 [WGIII 8.4.1.3]은 수질의 개선과 홍수 피해의 감소를 가져온다. [LULUCF Table 4.10] 실무그룹 III (WGIII)가 제시한 또 하나의 완화 대책은 물의 보존과 수질 둘 다에 긍정적인 영향을 미칠 수도 있다. [WGIII Table 8.12]

기후변화의 완화를 위해 실행되는 토지 관리 대책들은 물에 각각 상이한 영향을 미칠 수도 있다. 토양의 탄소 보존을 옹호하는 여러 가지 대책들 (경작지의 축소, 식생 피복의 증가, 다년생 작물의 경작 확대 등)은 침식을 방지하고자 하여 수질과 대기질을 개선하는 편익을 가져올 수도 있다 (Cole et al., 1993). 이와 같은 대책들은 최소한 어떤 지역에서는 조건 하에서 잠재적인 역 효과를 가져올 가능성도 있다. 가능한 영향에는 감소된 경작지로 인해 녹아있는 영양 물질 혹은 살충제에 의한 지하수 오염이 더 심해지는 것 등이 포함된다 (Cole et al., 1993; Isensee and Sadeghi, 1996). 그러나, 이와 같은 발생 가능한 부정적 영향들은 광범위하게 확인되거나 정량화되지는 못하였으며, 이들 부정적 영향이 탄소 격리에 의한 환경 편익을 상쇄시킬 수 있는 범위는 아직 확실하지 않다. [WGIII TAR 4.4.2]

생산을 증진시키고 식물로부터 발생하는 잔류물의 토양 투입 (농작물의 윤번 경작, 휴경지의 감소, 적면 경작 농작물, 고 수확 농작물, 통합 해충 관리, 적절한 비료 사용, 관개, 지하수위 관리 등)을 포함하는 농업 생산성 강화로 알려져 있는 일련의 대책 (practices)들은 여러 가지 보조적인 편익을 가져온다. 이중 가장 중요한 편익은 식량 생산의 증가와 유지이다. 환경 편익으로는 침식 방지, 수자원 보존, 수질 개선, 저수지나 하도에서의 토사 침전 감소 등을 들 수 있다. 토양과 수질은 농업용 부품 (agricultural inputs)과 관계용수의 무분별한 사용으로 인해 부작용을 받을 수도 있다. [LULUCF Fact Sheet 4.1]

비료의 효율적인 사용을 위한 영양물질 관리는 수질에 긍정적인 영향을 미친다. [WGIII Table 8.12] 또한, 아산화질소 (N_2O)의 배출을 감소시키는 대책들은 종종 이들 비료로부터 질소 이용의 효율을 증진시켜 비료 공정으로부터의 온실가스 배출을 감소시키고, 물과 공기에 미치는 질소 오염물질의 해로운 영향을 피할 수 있게 한다 (Dalal et al., 2003; Paustian et al., 2004; Oenema et al., 2005; Olesen et al., 2006). [WGIII 8.8]

Agro-Forestry System (농작물 재배 지역에 조성된 나무 농원)은 지속 가능 개발과 온실가스 완화 사이의 시너지 효과를 가지고 시골 마을에 에너지를 공급하는 등 다양한 편익을 제공할 수 있으나, [LULUCF 4.5.1] 수자원 보존에는 부정적인 영향을 미칠 수도 있다. [WGIII Table 8.12]

6.2.8 농작물 경작지의 관리 (물) (8)

온실가스의 배출 완화를 촉진시키는 각종 영농 방법들은 수자원의 양과 질의 보존에 부정적인 영향과 긍정적인 영향 둘 다를 줄 수 있다. 영농 방법이 (경작지의 감소 등으로 인한) 물 사용 효율을 증가시킬 경우, 잠재적인 편익을 제공하나, 영농 방법들이 물 사용을 더 심화시킬 수도 있어서 하천 유량과 지하수 저장량을 감소시킬 수도 있다 (Unkovich, 2003; Dias de Oliveira et al., 2005). 논에서의 벼 관리는 논으로부터 배수되는 물속의 화학 오염 물질의 양을 감소시킴으로서 수질에 긍정적인 영향을 준다. [WGIII Table 8.12]

6.2.9 농작물 경작지의 관리 (경작지의 감소) (9)

보존성 경작 (conservation tillage)은 광범위한 영역의 경작 실무를 포함하는 포괄적인 용어이며, 여기에는 chisel plough, ridge till, strip till, mulch till, 그리고 no till 등이 포함된다 (CTIC, 1998). 보존성 경작을 채택하면 여러 가지 보조적 편익을 얻게 된다. 이들 편익 중 중요한 것들은 물과 바람에 의한 침식의 통제, 물의 보존, 수분 지탱 능력의 증가, 압밀의 감소, 화학물질 투입에 대한 토양의 탄성 증가, 토양과 대기질의 개선, 토양의 생물 다양성 개선, 에너지 사용의 감소, 수질의 개선, 저수지와 하도에서의 토사 퇴적 감소, 2모작의 가능성 등이 포함된다. 어떤 지역 (예: 호주)에서는 보존성 경작에 따른 수분 저류능이 커져서 용해가 가속화되어 하류 경사 방향으로의 염수화가 발생할 수도 있다. [LULUCF Fact Sheet 4.3] 보존성 경작을 채택할 경우의 주요 부차적 편익에는 토양 침식의 감소, 수질의 향상, 연료 효율의 증가, 농작물의 생산성 증가 등이 포함된다. [LULUCF 4.4.2.4] 경작지 및 잔류물의 관리는 수자원의 보존에 긍정적인 영향을 미치게 된다. [WGIII Table 8.12]

6.2.10 조림 및 재 조림 (10)

삼림은 일반적으로 농작물이라든지 풀 등과 같이 키 작은 식물보다는 더 많은 물을 소비하는 것으로 추정되고 있다. 조림 지역이나 재 조림 지역에서 일어나는 이러한 효과는 특히, 식물의 엽면이 연중 오랜 기간 동안 습윤 상태에 있는 지역에서의 증가된 차단 손실에 관계가 있을 수 있다 (Calder, 1990). 혹은 건조 지역에서는 오래 계속되는 건조기간 동안 물을 흡수하여 사용할 수 있도록 해주는 보다 튼튼한 뿌리 시스템의 개발과 관련성이 있을 수 있다. [LULUCF 2.5.1.1.4]

차단 손실은 연중 큰 잎사귀 면적을 가지는 삼림의 경우가 가장 크다. 따라서, 차단 손실은 낙엽성의 삼림보다 상록성 삼림의 경우가 더 큰 경향을 보이며 (Hibbert, 1967; Dchulze, 1982), 성장 속도가 느린 삼림보다는 탄소 저장률이 높고 성장 속도가 빠른 삼림의 경우가 더 클 것으로 예측되고 있다. 결과적으로, 성장 속도가 빠른 침엽수로 삼림이 없는 토지에 조림을 하면 유역으로부터의 유출이 감소하게 되어 가뭄 기간 동안에는 물 부족을 초래할 수도 있다 (Hibbert, 1967; Swank and Douglass, 1974). 예를 들면, Vincent (1995)는 태국의 황폐화된 유역을 복원하기 위해 다량의 물을 필요로 하는 소나무 종 단지를 조성한 결과 원래의 낙엽성

삼림에 비해 건기의 하천 유량을 크게 감소시킴을 발견하였다. 삼림은 하천의 평균 유량을 감소시키지만 삼림으로 조성한 토지는 침투능이 크고 물을 함유할 수 있는 능력이 크기 때문에 침투 유량을 감소시키고 건조 기간 동안에는 유량을 증가시킨다 (Jones and Grant, 1996). 삼림은 또한 수질을 개선하는데도 아주 중요한 역할을 한다. [LULUCF 2.5.1.1.4]

세계의 여러 지역에서 삼림이 아주 얇은 염수 대수층 위에서 성장하고 있다. 만약 벌채 (deforestation)로 이들 삼림이 사라지면, 물의 소비량이 감소되어 지하수위가 상승할 것이고 이로 인해 염분이 지표면으로 올라올 수도 있다 (Morris and Thomson, 1983). 이와 같은 경우, 조립이나 재 조립으로 삼림에 의한 물 소비량이 커지면 오히려 편익이 될 수 있을 것이다 (Schofield, 1992). [LULUCF 2.5.1.1.4]

건조한 열대 지역에서 나무는 더 깊이 있는 물을 빨아 올려 더 많은 양의 물을 증발시키므로 삼림 농원은 키가 작은 식생 보다는 더 많은 물을 소비한다. 새로이 조성된 삼림은 증산과 차단 작용을 통해 저장된 물을 고갈시킴으로서 연강수량보다 더 많은 물을 소비할 수도 있다 (Greenwood et al., 1985). 따라서, 건조한 열대 지역에서의 광범위한 조립이나 재 조립은 지하수나 하천 유량의 공급에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 그러나, 자연 삼림을 인공적인 농원으로 바꿀 경우 나무종의 뿌리 깊이나 생리학적 거동에 변화가 없을 때 물의 소비가 증가하는지에 대해서는 아직 분명하지 않다. 인도의 건조 지역에서는 유우칼리 나무 (Eucalyptus, 호주산의 거목) 농원에 의한 물 소비는 토착의 낙엽성 삼림의 물 소비와 거의 비슷하며, 2가지 유형의 삼림 모두 연강수량의 그의 전부를 소비하게 되는 것으로 보고되고 있다 (Calder, 1992). [LULUCF 2.5.1.1.4]

삼림 보호처럼 조립과 재 조립은 유익한 여러 가지 수문학적 효과를 낼 수 있다. 습윤한 지역에 조립 사업이 시행되면 직접 유출량은 초기에는 급격히 감소하다가 점차 일정하게 되고 기저유출은 나무들의 연령이 성숙기를 향해 높아짐에 따라 서서히 증가하게 되며 (Fukushima, 1987; Kobayashi, 1987), 이는 재 조립과 조립이 홍수 범람을 감소시키고 수자원 보전에 도움이 됨을 뜻한다. 물이 제한되어 있는 지역에서는 조립, 특히 물 수요가 많은 나무 종들로 조성된 농원은 하천 유량의 상당한 감소를 가져와 유역 주민에게 영향을 줄 수도 있고 (Le Maitre and Versfeld, 1997), 다른 생태계와 하천으로의 유량을 감소시켜 지하대수층과 지하수 함양에 영향을 줄 수도 있다 (Jackson et al., 2005). 또한, 토양의 성질에 생길 수 있는 일부 변화는 대부분 유역의 수문에 생기는 변화에 따라 좌우된다. 조립의 수문학적 편익은 개개 조립 지역에서 개별적으로 평가될 필요가 있다. [WGIII TAR 4.4.1]

부의 축적이라든지 일자리 창출 등과 같이 긍정적인 사회·경제적 편익은 가용 수자원이나 목초, 자연 자원, 농경지 등의 감소에 따른 복지의 손실과 형평이 이루어져야 한다. 전에 침식되었었거나 혹은 황폐화된 토지의 조립은 순수하게 긍정적인 환경 영향을 줄 수도 있다. 즉, 수량이 풍부하거나 물이 많이 소비되지 않은 유역

에서는 하천 유량의 감소는 문제가 되지 않을 수도 있다. [LULUCF 4.7.2.4]

6.2.11 삼림 벌채의 기피 혹은 감소 (11)

삼림 벌채와 삼림 퇴화 (forest degradation, 탄소 밀도의 손실)를 방지하거나 둔화시키고 삼림을 지속 가능하게 관리하면 온실가스 배출을 피하는데 크게 기여할 수 있으며, 수자원의 보존, 홍수 범람의 방지, 유출의 감소, 침식의 방지, 하천에서의 토사 퇴적 감소, 어업의 보호, 수력 발전 시설에의 투자, 그리고 생물 다양성의 보존 등을 기할 수 있다 (Parrotta, 2002). [WGIII 9.7.2]

삼림을 보전하는 것은 수자원을 보존하고 홍수 범람을 방지하는 것이다. 예를 들면, 허리케인 "Mitch" 발생 이후 중앙 아메리카에서의 홍수 피해는 삼림 덮개 (forest cover)의 손실로 인해 분명히 더 커졌다. 삼림은 유출을 감소시킴으로서 토양 침식과 염도를 조절한다. 따라서, 결과적으로, 삼림 덮개를 유지하는 것은 하도내의 토사 퇴적을 감소시키고, 어업과 수력 발전소 시설에의 투자를 보호하게 된다 (Chomitz and Kumari, 1996). [WGIII TAR 4.4.1]

삼림 벌채와 유역 상류부의 황폐화는 수문 시스템을 저해하여 하류 지역에서의 연중 하천 흐름을 홍수와 가뭄 상태로 바꾸어 놓을 수 있다 (Myers, 1997). 조립이나 재 조립을 통한 탄소 저장량의 증가와 삼림 벌채 활동 및 기타 관련 영향 사이에는 시너지 효과가 있지만 일반적인 규칙이 반드시 적용되는 것은 아니다. 관련 영향들은 특정 케이스마다 개별적으로 평가되어야 하며 이들 영향들은 가끔 중요할 수도 있고, 조립, 재 조립, 삼림 벌채 활동의 전반적인 선호도는 관련 영향에 의해 크게 지배될 수 있다. [LULUCF 3.6.2]

6.2.12 고품 폐기물의 관리 : 폐수의 처리 (12)

잘 조절된 토지 매립 (가스의 회수 및 이용을 할 경우와 하지 않을 경우)은 온실가스 배출을 조절하고 감소시키지만 잘못 관리된 지점에서는 수질에 부정적인 영향을 미칠 수도 있다. 이는 호기성 생물학적 처리와 혐기성 생물학적 처리 둘 다에 적용된다. 재순환과 재이용, 폐기물 최소화는 폐기 장소로부터 폐기물을 청소하는 데는 부정적일 수 있으며, 수질 오염을 초래할 잠재성이 있다. [WGIII Table 10.7]

효율적으로 적용될 경우 폐수의 이송 및 처리 기술은 온실가스의 발생 및 배출을 감소시키거나 제거한다. 뿐만 아니라, 폐수의 관리는 처리되지 않은 폐수로부터 지표수나 지하수, 토양 속, 해안 지역 등으로 오염되는 것을 방지함으로써 수자원의 보존을 증진시키며, 이로 인해 오염물질의 양을 줄여 처리되어야 할 폐수의 양을 감소시키게 된다. [WGIII 10.4.6]

처리된 폐수는 재사용될 수도 있고 하천으로 방류될 수도 있다. 그러나, 재사용은 관개 농업이나 원예업, 어류 양식, 지하수의 인공 함양 혹은 기타 공업용 목적을 위해 가장 바람직한 선택이라 할 수 있다. [WGIII 10.4.6]

6.2.13 비 전통적인 오일 (13)

전통적인 원유 공급이 부족해지고 원유 채취 비용이 증가함에 따라 비전통적인 액체 연료 (unconventional oil)는 관련 환경 비용이 워낙 크지만 앞으로 경제적으로 매력적이 더 커질 것이다 (Williams et al., 2006). 오일 셰일 (oil shale)과 오일 샌드 (oil sand)를 채굴하고 품질을 개선하는 데는 다량의 물이 필요하다. 타아르 샌드 (tar sand)를 회수하는 기술에는 Open cast mining이 있으며, 이 방법의 경우 원유 퇴적물 층은 충분히 얇거나 혹은 채굴 전에 오일의 점성을 감소시키기 위해 관정 현장에 스팀을 주입시킨다. 채굴 과정에서 1리터의 오일 채취를 위해 4리터의 물을 사용하며, 정제 가능한 생산품을 생산한다. 현장 과정에서는 1리터의 오일을 위해 약 2리터의 물을 사용한다. 그러나, 무거운 생산품은 정유 공장에서 회석이 필요하거나, 혹은 약 75%의 에너지 효율을 가지는 중간 오일 제품을 확보하기 위해 품질 개선 과정을 거치도록 할 필요가 있다 (NEB, 2006). 오일 샌드의 품질 개선을 위한 에너지 효율은 약 75%이며, 오일 샌드의 채굴은 많은 양의 오염 물질과 시달린 넓은 면적을 남기게 된다. [WGIII 4.3.1.4]

6.3 온실가스 배출과 완화에 미치는 물 관리 정책 및 수단의 영향

전 절에서 설명된 바와 같이 여러 부문에 있어서의 기후변화를 완화시키기 위한 대책들은 수자원에 영향을 미칠 수 있다. 다른 한편으로는, 물 관리 정책과 수단들은 여러 부문과 관련된 온실가스 배출에 영향을 미칠 수 있으므로 그들 각각의 완화 수단에도 영향을 미칠 수 있다 할 수 있다 (표 6.2 참조).

6.3.1 수력 댐 (1)

현재까지 전 세계에 건설되어 있는 저수지의 약 75%는 관개, 홍수 조절, 도시 용수공급 등을 위해 건설되었다. 온실가스 배출은 저수지의 위치, 동력의 밀도 (단위 저수면적당 발전되는 동력), 발전 유량, 그리고 발전소가 댐식으로 작동하는지 혹은 하천식 (run-of river type)으로 작동하는지에 따라 달라진다. 최근에 와서 수력 발전용 저수지로부터 온실가스의 일부 배출 가능성에 대한 문제 제기가 있어 왔다. 일부 저수지들은 저수지 표면에서 CO₂를 흡수하는 것으로 증명되었으나, 대부분의 경우 물이 흡수된 탄소를 자연 탄소 순환 과정으로 이송시키는 과정에서 작은 양의 온실가스가 배출되는 것으로 알려져 있다. 메탄가스의 대규모 배출은 자연 탄소 순환 과정이 가장 활발한 열대 고원 지역의 수심이 얇은 저수지에서 기록되었다. 반면에, 수심이 깊은 대규모 저수지에서의 메탄가스 배출은 상대적으로 미미하다. 신규 저수지에 의해 자연 홍수터와 습지가 수몰되면 메탄이 저수지내 물을 통해 수면으로 올라오는 동안 산화되기 때문에 자연 상태에 있는 홍수터와 습지로부터 생성되는 메탄가스의 농도는 크게 약화된다. 담수계에서의 메탄가스 형성은 함유된 탄소를 효율적으로 격리시키는 부산물인 탄소 복합물 (석탄산 등)을 포함한다. 열대 지역의 수심이 얇은 저수지에 대해서는 메탄가스 배출을 증가시키게 될 범위를 설정하는 데에는 추가적인 연구가 필요하다. [WGIII 4.3.3.1]

유역으로부터의 부패한 식생과 탄소의 유입으로 인한 저수지로부터의 온실가스 배출은 최근에 와서 댐에 의한 생태계 영향으로 지적되고 있으며, 이는 전통적인 동력 발생 원천과 비교할 때 수력 발전은 오로지 긍정적인 대기 영향 (이산화탄소와 아산화질소 배출의 감소)만을 준다는 전통적인 지혜에 도전하는 것이라 할 수 있다 (World Commission on Dams, 2000).

AR4 출간 당시에 추진되고 있는 수력 발전 사업의 생명주기 평가는 대체로 낮은 온실가스의 순 배출을 보여주고 있다. 담수 저수지로부터의 인간 활동 관련 배출량의 증분 측정이 아직 확실하지 못한 상태에서 UNFCCC의 집행부는 상당한 저수량을 가지는 대규모 수력 발전 프로젝트를 Clean Development Mechanism (CDM)으로 부터 제외시켰다. [WGIII 4.3.3.1]

6.3.2 관개 (2)

전 세계 농작물 경작지의 약 18%는 현재 관개를 통해 보조적인 물 공급을 받는다 (Millennium Ecosystem Assessment, 2005a, b). 이들 경작지 면적을 확대하거나 보다 효율적인 관개 방법을 사용하면 수확량의 증산과 잔류물 회귀를 통해 토양속의 탄소 저장량을 증가시킬 수 있다 (Follett, 2001; Lal, 2004). 그러나, 이와 같은 이득의 일부는 물을 공급하는데 사용된 에너지로 인해 발생하는 이산화탄소 (Schlesinger, 1999; Mosier et al., 2005), 혹은 고습윤 조건 하에서의 질소 비료로부터 나오는 아산화질소에 의해 상쇄된다 (Liebig et al., 2005). 그러나, 아산화질소의 영향은 광범위하게 측정된 바는 없다. [WGIII 8.4.1.1.d] 습지에서의 쌀 생산 지역 확장은 토양으로부터의 메탄가스 배출량을 증가시킬 수도 있다 (Yan et al., 2003).

6.3.3 잔류물의 회귀 (3)

물을 위한 잡초의 경쟁은 전 세계적으로 농작물 수확량 감소의 중요한 원인이 된다. 잡초의 제거 방법과 농기계 발달은 오늘날 최소의 경작지에서도 많은 농작물을 경작할 수 있도록 해주고 있다. 지표면의 토양 표면에 농작물의 잔류물 (residues)을 유지시킴으로써 증발에 의한 물 손실을 방지할 수 있는 이러한 경작 방법은 현재 전 세계적으로 활발하게 사용되고 있다 (Ceri et al., 2004). 토양의 교란은 분해와 침식 (Madari et al., 2005)을 가속화시켜 토양 탄소의 손실을 가져오는 경향을 초래하므로 항상 그러한 것은 아니지만 경작지의 감소는 토양 탄소의 증가를 가져온다 (West and Post, 2002; Alvarez, 2005; Gregorich et al., 2005; Ogle et al., 2005). 감소된 경작지를 채택하거나 혹은 경작지를 채택하지 않으면 아산화질소 (N₂O)의 배출에 영향을 미칠 수 있으나 순 효과는 일관성이 없고, 전체적으로 정량적인 평가가 어렵다 (Cassman et al., 2003; Smith and Conen, 2004; Helgason et al., 2005; Li et al., 2005). 감소된 경작지가 N₂O의 배출에 미치는 영향은 토양이나 기후 조건에 좌우될 수 있다. 어떤 지역에서는 감소된 경작지가 N₂O 배출을 촉진시키며, 또 다른 지역에서는 배출량을 줄이거나, 혹은 측정하기 힘들 정도의 영향 밖에 미치지 못한다 (Marland et al., 2001). 더 나아가서, 경작지가 없는 시스템 (no-tillage system)은 에너지 사용으로부터 CO₂ 배출량을 줄일 수 있다 (Marland et al., 2003; Koga et al., 2006). 농작물의 잔류물을 견지하는 시스템은 이들 잔류물이 토양속의

표 6.2: 부문별 온실가스 (Green House Gas, GHG) 배출에 미치는 물 관리의 영향. 증가된 GHG 배출은 부정적 (Negative) 영향이므로 [-]로 표시하였고, 감소된 GHG 배출은 [+]로 표시하였음. ()안의 숫자는 표 아래의 주기 (Notes)와 제6.3 절의 소절 번호를 가리킨.

부문별	수질		수량		수종	
	화학적/생물학적 인자	수온	평균수요	토양수분	지표수	지하수
에너지		지열에너지 ⁽⁷⁾ [+]	수력댐 ⁽¹⁾ [+/-] 관개 ⁽²⁾ [-] 지열에너지 ⁽⁷⁾ [+] 해수담수화 ⁽⁶⁾ [-]			수력댐 ⁽¹⁾ [+/-]
농업			수력댐 ⁽¹⁾ [-]	관개 ⁽²⁾ [+/-] 잔류물 회귀 ⁽³⁾ [+]		농작물 재배지의 배수 ⁽⁴⁾ [+/-]
폐기물	폐수처리 ⁽⁵⁾ [+/-]					

주기(Notes):

- (1) 수력 발전에는 화석 연료를 필요로 하지 않아서 중요한 재생 가능한 에너지원이라 할 수 있다. 그러나, 최근에 와서 수력 댐/저수지로부터 온실가스 중의 하나인 메탄가스 (methane gas)가 발생하는 것으로 의문시 되어 왔다.
- (2) 보다 효율적인 관개 방법을 적용하면 농작물 수확량의 증산과 잔류물의 회귀를 통해 토양속의 탄소 저장량을 늘릴 수 있다. 그러나, 이와 같은 긍정적 효과의 일부는 관개용수를 공급하는데 사용된 에너지를 위해 배출된 CO₂에 의해 상쇄되고 만다. 또한, 관개는 경우에 따라서 메탄가스 (CH₄)와 아산화질소 (N₂O) 배출의 원인이 되기도 한다.
- (3) 경작지의 수분 함유 능력을 개선하기 위해 회귀되는 잔류물 (residues)은 농작물 생산성의 증가와 토양의 호흡 작용 감쇄를 통하여 탄소 성분을 격리시키게 될 것이다.
- (4) 습윤 지역에 위치한 농경지의 배수는 생산성을 향상시킬 수 있으며 (따라서, 토양 탄소도 증가시킴), 또한 토양 속으로의 통기를 개선함으로써 아산화질소의 배출을 억제할 수 있다. 그러나, 배수를 통하여 상실되는 질소 성분은 N₂O로 손실되는 것으로 볼 수 있다.
- (5) 하수처리장의 설계와 관리 및 하수 처리 기술에 따라 폐수로 부터의 주된 온실가스인 CH₄와 N₂O의 배출은 오염원에서부터 폐기 지점까지의 모든 단계에서 발생한다. 그러나, 실제로 가장 많은 배출은 처리 시설의 상류에서 일어난다.
- (6) 해수 담수화에는 에너지 사용이 필요하다. 따라서 온실가스가 배출된다.
- (7) 난방 목적으로 지열 에너지를 사용하면 다른 에너지 생산 방법의 경우에서와 같이 온실 가스는 배출되지 않는다.

중요한 탄소 저장 성분인 토양 유기질의 역할을 하기 때문에 토양속의 탄소량을 증가시키는 경향이 있다. 잔류물을 제거하기 위해 불태우지 않으면 (사탕수수)의 수확을 기계화 하고, 수확 전 예비 소각의 필요성 제거 등: Cerri et al., 2004) 비록 연료 사용으로 인한 CO₂ 배출량은 증가할 수도 있으나 잔류물을 불태움으로서 발생하는 에어러솔과 온실가스의 배출을 피할 수 있다. [WGIII 8.4.1.1.c]

6.3.4 농작물 경작지의 배수 (4)

습윤 지역에서의 농작물 경작지의 배수는 생산성을 높여 토양 내 산소량을 증가시킬 수 있을 뿐 아니라, 토양 공극을 통한 통기 (通氣, aeration)를 활발하게 해 줌으로서 N₂O 배출을 억제할 수도 있다 (Montey et al., 2006). 그러나, 배수를 통해 손실되는 질소는 N₂O의 형태로 손실되기 쉽다 (Reay et al., 2003). [WGIII 8.4.1.1.d]

6.3.5 폐수의 처리 (5)

토지 매립에 있어서 폐기물 부문에서 가장 큰 온실가스 배출원인 메탄가스 (CH₄)의 배출은 폐기물 처리 후 수십 년 동안 계속된다. 따라서, 배출 성향에 대한 예측을 위해서는 시간적 경향성 분석이 가능한 모형이 사용되어야 한다. 또한, CH₄는 폐수의 이송 과정이나 하수 처리 과정, 폐기물이나 폐수 슬러지의 혐기성 분해시의 누수 등을

통해서도 배출된다. N₂O의 주요 발생원은 인분 (human sewage)과 폐수의 처리이다. [WGIII 10.3.1]

폐수 자체에서 메탄가스 배출은 1990~2020년 사이에 거의 50% 정도 증가할 것으로 예상되고 있으며, 특히 동남 아시아의 고속 성장하고 있는 개발도상국에서 그러할 것으로 보고 있다. 폐수로부터의 전 지구적 N₂O 배출량에 대한 예측은 불완전하며 가정 하수 처리만을 기준으로 하고 있으나 1990~2020년 사이에 약 25%의 증가가 있을 것으로 보고 있다. 그러나, 이러한 예측은 business-as-usual 시나리오에 의한 것이며, 만약 추가적인 완화 수단이 강구 된다면 실제의 N₂O 배출량은 훨씬 낮아질 것임을 강조할 필요가 있다. 폐기물 부문에서의 미래 배출량 감소는 CDM (Clean Development Mechanism)과 같은 2012년 이후에 가용한 교토의정서 규약 사항에 의해 좌우될 것이다. [WGIII 10.3.1]

개발도상국에서는 급속한 인구 증가와 도시화에 동시에 따라가지 못하는 폐수 처리 관련 기반시설의 개발로 인해 폐수로부터의 CH₄와 N₂O 배출은 일반적으로 개발 선진국에서 보다 훨씬 많다. 이러한 사실은 1990년에 산정된 CH₄와 N₂O 배출량과 폐수의 가정 하수로부터 전망된 2020년의 배출량을 비교 검토함으로써 알 수 있다. [WGIII 10.3.3]

비록 폐수로부터의 현재의 온실가스 배출량은 폐기물로부터의 배출량보다 적지만, 현재의 산정방법에서 정량화 되지 않은 배출량, 특히 개발도상국에서의 정화조나

재래식 변소, 조절되지 않은 오염물질 배출량 등이 상당히 많다는 사실을 인식할 필요가 있다. 개발도상국 중 특히, 중국, 인도, 인도네시아 등에서는 분산된 자연 폐수 처리 과정과 정화조는 상대적으로 많은 CH₄와 N₂O를 배출한다. 개발도상국에서의 개수로식 하수도 혹은 비공식적인 폐수 저류지들은 하천이나 호수로 처리되지 않은 채 방류되어 경제 개발과 함께 폐수의 양이 급격하게 늘어나는 결과를 초래한다. 다른 한편으로는, 물을 적게 사용하는 변기 (low-water-use toilets, 3~5 liter)와 생태학적 위생 접근 방법이 멕시코, 짐바브웨, 중국, 스웨덴 등의 국가에서 사용되고 있다. 이러한 방법들은 물이 부족하고, 물 공급이 불규칙적이며, 수자원 보존을 위한 추가적인 수단이 필요한 개발도상국 및 개발선진국 모두에 적용될 수 있다. 이들 모든 수단들은 영양 물질 부하량이 적고 온실가스 배출량이 비례적으로 적은 보다 작은 규모의 폐수 처리장을 권장하고 있다. [WGIII 10.6.2] 여하튼 간에, 음용수의 수질을 유지 개선하고 기타 공공 건강 및 환경 보호 편익을 확보하기 위한 노력 때문에 수집되어 처리된 폐수의 양은 여러 나라에서 점점 증가해 가고 있다. 현재로서는, 폐수로 부터의 온실가스는 폐수의 수집 및 처리량의 미래 증가에 대비하면 감소할 것으로 보고 있다. [WGIII 10.6.2]

6.3.6 해수의 담수화 (6)

물이 희소한 지역의 경우 용수의 일부 공급이 염수의 담수화 (desalination)에 의한 것으로, 이 담수화 과정에는 에너지가 필요하다. 만약, 필요한 에너지를 화석 연료로부터 얻는다면 온실가스가 배출되고 말 것임을 알 수 있다. [WGII 3.3.2]

6.3.7 지열 에너지 (7)

난방 목적으로 지열 에너지를 사용하면 다른 에너지 발생 방법들의 경우 (제6.2.5절 참조)에서처럼 온실가스를 발생하지 않는다.

6.4 적응과 완화 사이의 잠재적 수자원 갈등

기후변화 영향에의 적응과 완화 사이에 일어날 수 있는 갈등은 수자원 문제에서 발생할 수 있다. 기존의 일부 연구들 (Dang et al., 2003)에서는 적응을 위한 완화로부터의 반발이나 완화를 위한 적응으로부터의 반발은 지역 규모에서는 중요하나, 전 지구 규모에서는 가장 보잘 것 없는 것임을 지적하였다. 기후변화가 수문학적 체계 (regime)에 중요한 변화를 가져올 것이지만 수력 발전 잠재력이 여전히 있을 것으로 보이는 지역에서는 특히, 만약 여러 부문의 기후변화 적응 노력이 실행될 경우 (농업 부문의 기후변화 영향에 적응하기 위한 관개와 음용수를 위한 물 수요의 증가, 발전 부문을 위한 냉각수의 수요 증가 사이의 지표수 자원 확보를 위한 경쟁 등) 물 확보를 위한 경쟁은 뜨거워질 것이다. 이는 토지와 물처럼 희귀한 자연 자원의 최적 할당 (배분)을 보장하기 위한 하천 유역의 통합적인 토지 및 물 자원 관리 전략의 중요성을 확인해주는 것이다. 또한, 완화와 적응은 지속 가능한 개발을 목표로 하면서 경제적 투자를 최적화하기 위하여 명백한 흥정 하에 둘 다 동시에 평가되지 않으면 안 된다. [WGII 18.8, 18.4.3]

몇몇 연구들은 변화하는 기후 및 수문 조건 아래에서 용수 공급과 홍수 조절, 수력 발전, 생태학적 및 수질 목적으로 필요한 최소 하천 유량들 사이에는 충돌 가능성이 있음을 확인하고 있다 (Christensen et al., 2004; Van Rheenen et al., 2004). [WGII 18.4.3]

변화하는 수문학적 체계와 물 가용성에 적응하려면 추가 에너지의 지속적인 공급을 필요로 한다. 물이 희소한 지역에서는 폐수의 재이용 증가와 이와 관련되는 물 처리, 심정 (deep-well) 펌핑, 그리고 특히 대규모 해수 담수화 등은 물 부문에서 에너지 사용을 크게 증가시키게 되고 (Boukan and Stikker, 2004), 이로 인해 필요한 에너지를 생산하기 위해서 청정 에너지를 사용하지 않을 경우 온실가스를 발생시키게 될 것이다. [WGII 18.4.3]

7

정책과 지속 가능한 개발에
관련되는 사항들

**Implications for Policy and Sustainable
Development**

과거의 기후 조건이나 수문 조건이 장래에도 계속될 것이라 가정하는 것은 더 이상 적절하지 않기 때문에 기후변화는 정책 결정자들뿐만 아니라 수자원 관리자, 물 이용자들에게도 주요 개념적 도전이 되고 있다. 수자원 관리는 에너지라든지, 건강, 식량 안보, 자연 보존 등 많은 타 정책 분야에 영향을 미칠 것이 분명하다. 따라서, 적응과 완화 옵션에 대한 평가는 여러 물 관련 분야를 교차해서 수행할 필요가 있다.

최근 수십 년 동안 수많은 물 관련 변수들에 엄청난 변화가 관측되어 왔으나, 관측된 변화들을 자연적 혹은 인위적 원인과 공식적으로 결부시키는 것은 현재로서는 가능하지 않은 것이 현실이다. 지역 규모에서 미래의 강수량이나 토양 수분량, 유출량 등을 추정하는 것은 상당한 불확실성이 개입될 수밖에 없다. 많은 지역에서 사용된 모델들은 전망된 변화의 부호에서조차 일치하지 않고 있다. 그러나, 기후 모델에 의한 추정치들은 일종의 뚜렷한 패턴을 보이고 있는 것으로 인식되고 있다. 고 위도 지역과 동 아시아와 동남아시아의 인구 밀집 지역을 포함하는 습윤 열대 지역의 일부에서는 강수량이 증가 (따라서, 하천 유량이 증가)할 가능성이 매우 크며, 중위도에 있는 많은 지역과 건조 열대 지역에서는 강수량과 하천 유출량의 감소가 있을 가능성이 크다. [WGII Fig. 3.4] 불확실성의 해석과 정량화 방법은 최근에 와서 크게 개선되어 앙상블을 기반으로 하는 접근 방법 (ensemble-based approaches) 등 새로운 방법들이 불확실성의 특성화를 위해 개발되고 있다. [WGII 3.4, 3.5] 그럼에도 불구하고, 하천 유역 규모에서의 강수량과 하천 유량, 하천 수위에 있어서의 미래 변화에 대한 정량적 추정치는 아직도 불확실하다. 따라서, 이와 같은 불확실성을 충분히 감안하여 기후변화를 고려한 계획 수립 및 의사 결정이 이루어져야 한다. [WGII TS, 3.3.1, 3.4]

기후변화에 대한 효율적인 적응은 기후의 변동성에 대한 반응으로부터 얻은 교훈을 장기간 동안의 취약성의 감소 노력과 지역 사회와 하천 유역으로부터 국제적인 협의에 이르는 지배 구조 내에 통합시키는 것을 포함하여 시간적 및 공간적 스케일에 걸쳐 발생하게 된다. 변동성과 변화 모두를 포함하게 될 전망된 미래의 조건 보다는 역사적인 경험에만 반응하는 적응방법에의 지속적인 투자는 기후변화에 대한 여러 분야의 취약성을 증가시킬 가능성이 있다. [WGII TS, 14.5]

7.1 부문별 정책에 관련되는 사항들

수자원 관리 부문

- 계절적으로 내리는 눈이 수문현상을 지배하는 하천 유역들은 이미 봄철에 침투 유량을 빨리 경험하고 있으며, 이와 같은 변화는 온난화되고 있는 기후 아래에서는 계속될 것으로 예상된다. 저위도 지역에서는 겨울철 강수는 점차 눈 보다는 비의 형태로 내리게 될 것이다. 빙하가 심하게 건조한 계절에 주된 유출량을 제공하는 열대 안데스 산맥 지역이나 기타 아시아의 여러 산악 지역 등과 같은 산지 지역에서는 빙하와 적설에 저장되어 있는 물의 체적은 점점 감소될 것으로 전망되고 있다. 따뜻하고 건조한 계절 동안의 유출은 증가하게 되나, 빙하는 그 크기가 점점 작아져서 중국에는 사라지고 말 것이다. [WGII 3.4.1]

- 가뭄의 영향을 받는 지역은 점점 넓어질 가능성이 있으며, 발생 빈도와 강도가 클 가능성이 높은 극한 강우 사상들은 홍수 위험을 증가시킬 것이다. 2080년 대까지는 기후변화 과정에서 전 세계 인구의 20% 까지 가뭄 위험이 더 커질 가능성이 있는 하천 유역에서 살게 될 것이다. [WGII 3.4.3]
- 반 건조 및 건조 지역들은 담수에 미치는 기후변화 영향에 특히 크게 노출되어 있다. 이들 많은 지역들 (지중해 지역, 미국의 서부, 아프리카의 남부, 브라질의 북동부, 호주의 남부와 동부 지역 등)은 기후변화로 인해 수자원의 감소를 겪게 될 것이다. [WGII Box TS.5, 3.4, 3.7] 증가하는 강수량의 변동성으로 인한 지표수 가용량의 감소를 상쇄시키려는 노력은 물 스트레스를 받고 있는 여러 지역에서 지하수 함양이 상당히 감소할 것으로 전망되고 있는 사실 때문에 지장을 받게 될 것이며 [WGII 3.4.2], 용수 수요의 증가로 인해 더 악화될 것으로 보인다. [WGII 3.5.1]
- 수온의 증가와 강수 강도의 증가, 저수 (低水) 유량 기간의 연장 등은 여러 가지 형태의 수질 오염 문제를 악화시켜 생태계와 인간의 건강, 물 관련 시스템의 신뢰도와 운영 경비에 많은 영향을 미친다. [WGII 3.2, 3.4.4, 3.4.5]
- 유출량이 감소할 것으로 전망되는 지역에서는 물에 의해 제공되는 각종 서비스의 가치가 떨어지게 될 것이다. 다른 지역에서 연유출량의 증가로 인해 얻게 되는 편익적 영향은 강수량 변동성의 증가와 용수공급이나 수질, 홍수 위험 등에 미치는 계절 유출의 시기 변동 등의 부정적 영향 때문에 경감되고 말 것이다. [WGII 3.4, 3.5]
- 전 지구적인 차원에서 보면, 담수 시스템에 미치는 기후변화의 부정적 영향은 얻게 되는 편익보다는 크다. [WGII 3.4, 3.5]
- 담수 시스템에 미치는 기후변화의 역효과는 인구 증가 라든지 토지이용 변화, 도시화 등과 같은 여타 스트레스의 영향을 증폭시킨다. [WGII 3.3.2, 3.5] 전 지구적으로 보면, 물 수요는 주로 인구 증가와 삶의 질 향상으로 인해 다가오는 수십 년간 점차 증가할 것이다. [WGII 3.5.1]
- 기후변화는 물 관리 실무 관행 (water management practices) 뿐만 아니라 기존 물 관련 기반시설의 기능과 운영에도 영향을 미치게 된다. 현재의 물 관리 실무 관행들은 용수공급의 신뢰도, 홍수 위험, 건강, 에너지, 수 생태계 등에 미치는 기후변화의 부정적 영향을 감소시키기에는 부적절한 수단이 되어버릴 가능성이 대단히 크다. [WGII TS, 3.4, 3.5, 3.6]
- 물 부문에 대한 적응 절차와 위험 관리 실무 대책들은 전망되는 수문학적 변화의 불확실성을 인식하고 있는 여러 나라와 지역 (카리브 해 지역, 캐나다, 호주, 네델란드, 영국, 미국, 독일 등)에서 개발되고 있으나 이들 대책들의 효율성에 대한 평가 기준이 개발될 필요가 있다. [WGII 3.6]

생태계 부문

- 여러 가지 생태계의 저항력과 자연에 스스로 적응하는 능력은 2100년경까지 기후의 전례 없는 변화 조합과 그로 인한 재해 (홍수, 가뭄, 산불 등), 그리고 기타 전 지구적인 변화 동인 (토지 이용 변화, 오염, 자원의 과대 개발 이용 등)으로 인해 초과되어 버릴 가능성이 있다. [WGII TS]

- 강우의 변동성 증가는 습지 내 수심의 크기와 발생 시기, 및 계속 기간 등에 변동을 가져옴으로서 습지의 기능을 손상시킬 가능성이 있다. [WGII 4.4.8]
- 모든 생태계중 담수 생태계는 기후변화로 인해 멸종 위협을 받는 종(種)의 비율이 가장 큰 생태계가 될 것이다. [WGII 4.4.8]
- 현재의 보존 대책들은 대체로 다가오는 수십 년 동안 전망되는 수자원 부문에서의 변화에 잘 적응할 수 있도록 준비되어 있지 않다. [WGII 4.ES]
- 생물 다양성과 기타 생태계 서비스를 보존할 효과적인 적응 방안들은 실행하는데 많은 비용이 들 가능성이 있으나, 생태계 보존을 위한 용수의 확보가 적을 전략에 반영되어있지 않으면 수많은 자연 생태계와 종들은 감소하고 말 것이다. [WGII 4.ES, 4.4.11, Table 4.1, 4.6.1, 4.6.2]

농업 및 임업 부문

- 가뭄과 홍수의 발생 빈도 증가는 평균적인 변수 값만의 변화를 사용하여 전망된 것보다 더 커지고, 또한 더 빨라지는 영향을 보이게 되면서 농작물 수확이나 가축 사육에 부정적인 영향을 미치게 된다. [WGII 5.4.1, 5.4.2] 가뭄과 홍수의 발생 빈도 증가는 국지적인 생산, 특히 저위도 지역에서의 자족 농업 부문에서의 생산에 부정적인 영향을 미친다. [WGII SPM]
- 관개용수 필요량에 미치는 기후변화의 영향은 대단히 클 수도 있다. [WGII 5.4] 지표수와 지하수를 새롭게 저류하여 확보함으로써 물 부족을 해소할 수 있으나 항상 가능한 것은 아니다. [WGII 5.5.2]
- 농부들은 매년의 농작물 식재 시기를 변화시키거나 다른 전략을 채택함으로써 부분적인 적응을 할 수 있다. 물 수요가 더 커질 잠재성을 새로운 관개용수 공급 시스템의 설계나 기존 시스템의 재개발 시 고려하지 않으면 안 된다. [WGII 5.5.1]
- 농업을 위한 폐수의 재이용과 같은 물 부족을 극복하기 위한 수단들은 건강과 식량 안전에 미치는 부정적 영향을 피할 수 있도록 조심스럽게 관리될 필요가 있다. [WGII 8.6.4]
- 기후변화로 인한 물 부족을 해결하기 위한 일방적인 수단들은 물 확보를 위한 경쟁을 일으킬 수 있다. 따라서, 공동의 해결 방법 도출을 위해서는 국제적 혹은 지역적 접근 방법이 필요하다. [WGII 5.7]

해안 시스템과 저지대 지역

- 해수면 상승은 지하수와 하구부의 염수화 지역을 확대함으로써 담수의 가용량을 감소시킬 것이다. [WGII 3.2, 3.4.2]
- 낮은 적응 능력과 취약성에의 노출이 큰 저지대 해안 지역에서의 거주는 홍수와 해수면 상승으로 인한 위험성을 증가시키며, 이러한 지역에는 하천의 하구부 델타 지역, 특히 아시아의 거대 델타 지역 (예: 방글라데시의 Ganges-Brahmaputra 및 서부 Bengal 등)과 저지대 해안 도시 지역, 특히 자연적 혹은 인위적인 지반 침하와 열대 호우로 인한 산사태 등이 자주 발생하는 지역들 (예: 뉴올리언TM, 상해)이 포함된다. [WGII 6.3, 6.4]

공업, 주거와 사회

- 도시 용수공급 시스템과 같은 물 관련 기반 시설은 특히 해안 지역에서, 해수면 상승과 지역 강수량의 감소에 취약하다. [WGII 7.4.3, 7.5]

- 장래에 전망 되는 극한 강수 사상 발생의 증가는 물 관련 기반시설과 여러 가지 중요한 관계를 가지게 된다. 예를 들면, 홍수 조절용 조절지의 규모 결정을 포함하여 우배수 시스템이나 도로 암거 및 교량, 하천 제방과 홍수 조절 시설물 등의 설계가 이에 속한다. [WGII 7.4.3.2]
- 계획 입안 시 각종 규제 장치를 둠으로서 주택 단지 라든지 공업 단지 개발과 성토 지역의 선정을 포함하여 홍수 위험이 큰 지역 (홍수터 등)에서의 개발 행위를 방지할 수 있다. [WGII 7.6]
- 긴 선행 시간과 많은 투자비가 투입되는 기반시설의 개발은 기후변화에 관한 정보를 개발 계획에 미리 반영함으로써 더 큰 편익을 얻을 수 있다. [WGII 14.5.3, Fig. 14.3]

위생과 인간의 건강

- 기후변화로 유발된 물에 미치는 영향들은 수질이나 물의 가용량에 있어서의 변화를 통해 인간의 건강에 위협을 가하고 있다. 용수공급이나 위생 서비스는 비 기후적인 인자에 의해 주로 결정되는 것이지만, 기후변화는 일부 인구 밀집 지역에서 개개 가정 차원에서 용수 확보와 위생 서비스를 받는 문제를 더 악화시킬 것으로 예상되고 있다. [WGII 8.2.5]
- 기후변화로 인한 홍수 범람 위험의 증가에 대처하고 인간 건강과 건강 시스템에 미치는 영향을 감소시키기 위해 적절한 재해 관리 계획의 수립 및 재해 대비책이 개발될 필요가 있다. [WGII 8.2.2]

기후 정보의 필요성

- 물 순환에 미치는 기후 영향을 보다 더 잘 이해하기 위해서는 관련 자료의 가용성을 높이는 것이 중요하다. 상대적으로 짧은 수문 관측 기록으로 인해 기후의 자연적 변동성 범위가 과소평가 될 수 있다. 양과 질의 향으로 물 관련 변수들을 종합적으로 모니터링하게 되면 의사 결정에 도움이 되며, 이는 기후변화 조건 아래에서 요구되는 적응적 관리를 위한 전제 조건이라 할 수 있다. [WGII 3.8]

7.2 지역별 주요 물 관련 영향에 대한 전망

아프리카 지역

- 아프리카에서의 기후변화 영향은 광범위한 다른 유형의 스트레스들과 함께 발생하므로 타 지역과 비교할 때 가장 클 가능성이 있다. 다른 유형의 스트레스에는 인구 팽창, 각종 자원에서의 불평등 접근성, 물과 위생 서비스에의 부적절한 접근성 [WGII 9.4.1]과 식량 안보의 미확보 [WGII 9.6], 허술한 보건 시스템 [WGII 9.2.2, 9.4.3] 등이 포함된다. 이들 스트레스와 기후변화는 아프리카의 많은 사람들이 당면하게 될 취약성을 증가시킬 것이다. [WGII 9.4]
- 아프리카의 건조지역 및 반 건조지역의 면적 중 2080년 까지 광범위한 기후변화 시나리오 아래에 놓이게 될 추가적인 면적은 약 5~8% (약 6~9천만 ha) 정도 증가할 것으로 전망되고 있다. [WGII 9.4.4]
- 특히, 메마른 지역에서의 가뭄과 토양 훼손으로 인해 농업 수확량은 줄어들 가능성이 있다. 사헬(Sahel) 지역에서의 혼합 천수답 시스템 (mixed rain-fed system)은

기후변화로 인해 크게 영향을 받을 것이다. 미국의 5대호 지역과 동 아프리카의 일부 지역에서의 혼합 천수담 시스템과 고산 지대의 상시 경작 시스템들도 크게 영향을 받게 될 것이다. [WGII 9.4.4, Box TS.6]

- 아프리카에서 현재 겪고 있는 물 스트레스는 기후 변화로 인해 악화될 가능성이 있으나, 물 거버넌스와 하천 유역 관리가 아프리카에서의 미래 물 스트레스 평가에 고려되어야 할 것이다. 2050년대까지는 동 아프리카 지역에서의 유출량 증가(홍수 사상의 발생 위험성 증가)와 남부 아프리카와 같은 타 지역에서의 유출량 감소(가뭄 발생 위험성 증가)가 있을 것으로 전망되고 있다. [WGII 9.4.1, 9.4.2, 9.4.8]
- 대규모 호수의 주요 생산 기능의 변화는 그 지역의 식량 공급에 지대한 영향을 미치게 된다. Tanganyika 호수는 호수 주변에 사는 주민들이 필요로 하는 동물성 단백질 섭취량의 약 25~40%를 제공하고 있으며, 기후변화는 1차 생산을 감소시켜 어류 수확량을 대략 30% 정도 감소시킬 가능성이 있다. [WGII 9.4.5, 3.4.7, 5.4.5]. 과도한 어류 포획을 포함하여 인간의 서투른 어업 관리 결정으로 인해 호수로 부터의 어획량도 감소하게 될 가능성이 있다. [WGII 9.2.2, Box TS.6]

아시아 지역

- 인도의 인구 1인당 연평균 담수 가용량은 인구 증가와 기후변화의 조합된 영향으로 인해 현재의 약 1,820m³에서 2025년까지 1,000m³ 이하로 감소될 것으로 예측되고 있다. [WGII 10.4.2.3]
- 몬순 기간 동안 강도가 더 큰 강우와 더 잦은 돌발 홍수들이 발생하여 유출되는 비율은 커지게 될 것이나 지하 대수층으로 유입하는 비율은 감소하게 될 것이다. [WGII 10.4.2]
- 동 아시아의 건조 및 반 건조 지역에서의 농업용 관개 수요는 기온 1°C 상승에 대하여 10% 정도 증가하는 것으로 예상하고 있다. [WGII 10.4.1]
- 해안 지역, 특히 인구 밀도가 높은 아시아의 거대 델타 지역들은 바다로 부터의 홍수 범람, 혹은 하천으로 부터의 홍수 범람으로 인해 가장 큰 위협에 직면하게 될 것이다. [WGII 6.4, 10.4.3]
- 히말라야 산맥에서의 설선(雪線, 만년설의 최저 경계선, snowlines)의 위도 상승은 물론이고, 눈과 빙하 용해에 있어서의 변화는 유출의 계절적 변동에 영향을 주어 건조한 여름 수개월 동안 물 부족을 발생시키게 된다. 중국 전체 인구의 1/4과 인도의 수억 명 인구가 이러한 영향을 받게 될 것이다 (Stern, 2007). [WGII 3.4.1, 10.4.2.1]

호주와 뉴질랜드

- 현재에 진행되고 있는 물 안보 문제는 호주의 남부 및 동부 지역에서 심각해질 가능성이 대단히 크다 (예: 2030년까지 Victoria 주에서 0~45%의 유출량 감소와 호주의 Murray-Darling 하천 유역에서 2050년까지 10~25%의 하천 유량 감소가 예상된다). 또한, 뉴질랜드에서는 북도(Northland)와 동부 지역의 일부에서 물 안보 문제가 심각해질 가능성이 대단히 크다. [WGII 11.4.1]
- 주요 기반시설에 대한 위험성은 기후변화로 인해 커질 가능성이 있다. 극한 기후 사상에 대한 설계 기준치는 2030년까지는 훨씬 더 자주 초과될 가능성이 대단히 크다. 기반 시설들이 입을 가능성 있는 위험에는 홍수터 제방이라든지, 도시 배수 시스템의 파괴,

하천에 연해있는 해안 도시의 홍수 범람 등이 있다. [WGII 11.ES, 11.4.5, 11.4.7]

- 2030년까지 농업과 임업 부문의 생산은 여러 가지 원인 중에서도 특히 가뭄의 증가 때문에 호주의 남부와 동부에 있는 많은 지역과 뉴질랜드의 동부 여러 지역에 걸쳐 감소할 것으로 전망되고 있다. 그러나, 뉴질랜드에서는 서부 및 남부 지역과 주요 하천에 가까운 지역에서 강우량의 증가 덕분에 초기 편익이 발생할 것으로 전망되고 있다.

유럽 지역

- CO₂ 농도가 배가되면 (2×CO₂), 겨울철 극한 강수량이 정상치(normal value) 보다 표준편차의 3배를 초과할 확률은 영국의 여러 지역과 북 유럽 지역에서 2080년까지 약 5배까지 증가할 것으로 예상되고 있다. [WGII 12.3.1]
- IS92a 시나리오에 의하면 2070년대까지 연 평균 유출량은 북부 유럽에서는 증가하고, 남부 유럽에서는 36% 까지 감소하며, 여름철 저수 유량은 80% 까지 감소하는 것으로 전망되고 있다. [WGII 12.4.1, T12.2]
- 심각한 물 스트레스 지역(수자원 부족량에 대한 이용량의 비가 40% 이상인 지역)으로 분류되는 하천 유역의 백분율은 현재의 19%에서 2070년대까지는 34~36%로 증가할 것으로 예상되고 있다. [WGII 12.4.1]
- 서부 유럽의 17개국 내 물 스트레스를 받고 있는 유역에 추가로 살게 될 인구수는 2080년까지 1,600만 명~4,400만 명 (HadCM3 기후 모델 적용 결과) 정도 증가할 가능성이 있다. [WGII 12.4.1]
- 2070년대까지는 유럽 전체의 수력 발전 잠재력은 약 6%만큼 감소할 것으로 예상되며, 지중해 지역에서는 20~50% 감소하고, 유럽 북부 및 동부 지역에서는 15~30% 증가하는 등 심한 지역적 변동성을 보일 것이다. [WGII 12.4.8]
- 여러 지역에 산재해 있는 소규모의 산악 빙하는 사라지게 될 것이고, 반면에 대규모 빙하는 여러 가지 온실가스 배출 시나리오에 따라 2050년까지 30%~70%의 체적 감소를 겪게 되어 봄과 여름철 하천 유량이 크게 감소하게 될 것이다. [WGII 12.4.3]

라틴 아메리카 지역

- 아르헨티나, 칠레, 브라질 등 국가의 건조지역과 반 건조지역의 강우량이 장래에 감소하게 되면 이들 지역에 심각한 물 부족이 발생할 가능성이 있다. [WGII 13.4.3]
- SRES A2 시나리오에 따르면 기후변화와 인구 증가로 인해 물 스트레스를 받고 있는 유역에 살고 있는 인구수는 2020년대까지 3,700만 명~6,600만 명에 달할 것으로 전망되고 있다. [WGII 13.4.3]
- 심각한 물 스트레스를 받고 있는 라틴아메리카의 지역들에는 중앙아메리카의 동부 지역과 평야 지역, 과테말라의 Motagua Valley와 태평양 쪽 경사지, 엘살바도르의 동부 및 서부 지역, 코스타리카의 중부 계곡과 태평양 지역, 온두라스의 북부, 중부, 서부 산악 지역, 그리고 파나마의 Azuero 반도 지역 등이 포함된다. 이들 지역에서는 용수공급과 수력 발전이 기후변화에 의해 심각한 영향을 받게 될 수 있다. [WGII 13.4.3]
- 빙하의 크기 수축은 온난 기후 하에 건기 동안의 물

부족 현상을 심화시켜 볼리비아, 페루, 콜롬비아, 에콰도르 등의 국가에서 물의 가용량과 수력 발전에 부정적인 영향을 미칠 것으로 예상되고 있다.

북미 지역

- 21세기 중반까지 서부 산악 지역에서의 전망된 온난화는 적설량의 큰 감소와 조기 용설 (earlier snowmelt), 겨울철 강우 사상 발생 도수의 증가, 겨울철 침투 유량의 증가와 홍수 범람, 그리고 여름철 유량의 감소 등을 발생시킬 가능성이 대단히 크다. [WGII 14.4.1]
- 용수 수요의 증가와 연계된 용수공급의 감소는 초과 할당된 수자원에 대한 경쟁을 더 악화시킬 가능성이 있다. [WG 14.2.1, Box 14.2]
- 금세기의 초기 수십 년 동안의 완만한 기후변화는 천수담 경작에 의한 총 수확량을 약 5~20% 증가시킬 것으로 전망되고 있으나 지역에 따라서 상당한 변동성을 보일 것이다. 주된 도전은 적당한 영역의 따뜻한 쪽 끝 부근에 있거나, 혹은 물을 많이 소모하는 농작물에 있을 것으로 전망된다. [WGII 14.4.4]
- 기후변화에의 취약성은 토착민과 제한된 자원에 의존하는 사람들, 그리고 도시의 극빈자 및 고연령자를 포함하여 특수 그룹과 지역에 집중될 가능성이 있다. [WGII 14.2.6, 14.4.6]

극 지역

- 북반구의 영구동토 지역의 범위는 2050년까지 약 20~35% 정도 감소할 가능성이 있다. SRES의 모든 범위의 시나리오를 다 상정할 경우 영구동토의 계절적 융해 깊이는 2050년까지 대부분의 지역에서 15~25% 만큼 증가할 것으로 전망되고 있으며, 북반구의 가장 북쪽 지역에서는 50% 혹은 그 이상이 증가할 것으로 보인다. [WGII 15.3.4] 북극에서는 이와 같은 영구동토의 융해로 생태계의 교란이 전망되고 있다. [WGII 15.4.1]
- 호수와 하천의 얼음판이 더 감소할 것으로 예측되며, 이로 인해 열 순환 구조와 얼음 아래의 서식처의 질과 양, 그리고 북극에서는 얼음판 충돌 (ice jamming)의 시기 및 강도와 그와 관련된 홍수 범람 등이 영향을 받게 된다. 담수의 온난화는 수종의 종 (species), 특히 물고기의 생산성과 분포에 영향을 미칠 것으로 예상되며, 이로 인해 어종에 변화를 일으키고 찬물을 선호하는 종들이 감소하게 된다. [WGII 15.4.1]
- 홍수 범람의 빈도와 강도의 증가, 침식, 그리고 영구동토의 파괴는 북극 지방의 마을들과 공업 기반시설, 용수공급 시설 등을 위협하고 있다. [WGII 15.4.6]

군소 도서 지역

- 모든 기후변화 시나리오 아래에서 군소 도서 지역에서 수자원은 심하게 타협될 가능성이 있다는 강한 증거가 있다. [WGII 16.ES] 대부분의 군소 도서들은 제한된 용수공급만을 얻으며, 이들 섬에서의 수자원은 강우량의 장래 변화와 분포에 특히 취약하다. 카리브 해 상의 많은 섬들은 기후변화의 결과로 증가된 물 스트레스를 겪게 될 가능성이 있다. SRES의 모든 시나리오 아래에서 여름철 강우량의 감소가 이들 지역에 전망되고 있어서 강우량이 적은 기간 동안 용수 수요가 충족될 가능성은 없어 보인다. 겨울 동안의 증가된 강우량은 저류량의 부족과 호수 기간 동안의 큰 유출로 인하여 보상될 가능성이 없다. [WGII 16.4.1]

- 평균 강우량의 감소는 담수 렌즈의 크기에 감소를 가져올 것이다. 태평양 지역에서는 2050년까지 평균 강우량의 10% 감소는 Tarawa, Atoll, Kiribati에서의 담수 렌즈의 크기에 20% 감소를 가져오게 될 것이다. 증가된 채수와 연계된 강우량의 감소와 해수면 상승과 그로 인한 염수 침입은 이러한 위협을 복잡하게 만들 것이다. [WGII 16.4.1]
- 여러 개의 군소 도서 국가들(예: Barbados, Maldives, Seychelles, Tuvalu 등)은 현재와 전망된 물 부족을 상쇄하기 위하여 담수화를 포함하여 적응 전략의 실행에 투자를 이미 시작하였다. [WGII 16.4.1]

7.3 기후변화의 완화 정책에 관련되는 사항들

조림 (造林)이라든지 수력 및 바이오 연료 (bio-fuels) 등과 같은 중요한 완화 옵션 사용을 실행하면 적용되는 지역-고유 (site-specific)의 사정에 따라 담수 자원에 미치는 영향은 긍정적일 수도 있고, 부정적일 수도 있다. 따라서, 완화 수단의 효율성과 물 관련 영향에 대한 특정 지역에 알맞은 평가 및 최적화가 필요하다.

관개 면적과 댐에 의한 수력 발전의 확대는 관련 완화 잠재력의 효율성을 저감시킬 수 있다. 관개의 경우, 양수를 위한 에너지 소비로 인한 이산화탄소 (CO₂)의 배출과 경작지에서의 메탄가스 (CH₃)의 배출은 완화 효과를 서로 상쇄시킬 수도 있다. 수력 발전을 위한 담수 저수지는 모종의 온실가스를 발생시킬 수도 있으므로 온실가스의 궁극적인 수치 (收支)에 대한 케이스 별 전반적인 평가가 필요하다. [WGIII 4.3.3.1, 8.4.1.1]

7.4 지속 가능한 발전에 관한 사항들

저소득 국가나 지역들은 기후변화에 적응함에 있어서 고소득 국가들보다는 상대적으로 작은 옵션을 가지고 상당한 기간 동안 기후변화에 취약한 상태로 머물러 있을 것으로 예상된다. 따라서, 적응 전략들은 개발과 환경, 그리고 국민 건강을 위하는 측면에서 설계되어야 한다. 미래의 취약성을 감소시키는데 사용될 수 있는 많은 옵션들은 현재의 기후에 적응하는데 가치가 있으며, 다른 환경적 및 사회적 목적을 달성하는데 사용될 수 있다.

지구상의 수많은 지역에서 담수 자원에 미치는 기후 변화 영향은 지속 가능한 개발에 영향을 미칠 수도 있으며, 가난과 아동 사망률 감소에 위협을 줄 수도 있다 (표 7.1 참조). 홍수와 가뭄의 강도와 발생 빈도의 증가가 지속 가능한 개발에 미치는 부정적인 영향은 피할 수 없을 가능성은 대단히 크다. [WGII 3.7] 그러나, 주요 극한 사상의 경우를 제외하면, 기후변화는 지속 가능성에 스트레스를 부과하는 주 인자가 되는 경우는 드물다. 기후 변화의 중요성은 기후변화가 여타의 변화 및 스트레스와 어떻게 상호 작용하는가에 있으며, 기후 변화로 인한 영향들은 복합적인 원인 규명 차원에서 고려되어야 한다. [WGII 7.1.3, 7.2, 7.4]

표 7.1: 천년 개발 목표 달성을 위한 물 부문의 잠재적 기여 [WGII Table 3.6]

목표	물과의 직접적 관계	물과의 간접적 관계
목표 1: 극한 빈곤 및 굶주림 해소	<ul style="list-style-type: none"> - 물은 여러 가지 생산 활동에서 하나의 필수인자 (예: 농업, 동물 사육, 가내공업 등) - 물고기, 농작물, 기타 식량의 지속 가능한 생산 	<ul style="list-style-type: none"> - 생태계 훼손이 감소되면 지역 차원의 지속 가능한 개발을 개선 - 보다 신뢰성 있는 용수공급으로 값싼 식량에 의해 도시의 굶주림을 감소
목표 2: 보편적인 교육의 달성		<ul style="list-style-type: none"> - 보건의 개선과 물의 휴대 책임 감소를 통해 학교 출석률 향상 (특히, 소녀들의 경우)
목표 3: 성(姓) 평등의 촉진과 여성에게 권한 부여	<ul style="list-style-type: none"> - 성(姓)에 민감한 물 관리 프로그램의 개발 	<ul style="list-style-type: none"> - 물 서비스의 개선으로 시간 낭비와 건강 부담을 감소시켜 수입 증가를 위한 더 많은 시간 확보 및 보다 균형 있는 여성 역할 보장
목표 4: 아동 사망률의 감소	<ul style="list-style-type: none"> - 질병의 주요 원인과 어린 아이들의 사망률을 감소시키기 위하여 보다 적절한 양과 좋은 질의 음용수에의 접근을 개선하고, 위생 서비스를 개선 	
목표 6: HIV/AIDS, 말라리아, 기타 질병의 퇴치	<ul style="list-style-type: none"> - 물과 위생 서비스의 개선은 에이즈에 감염된 가정을 지원하는 결과를 주며 건강관리 프로그램의 영향을 개선할 수도 있음 - 보다 나은 물 관리는 모기의 서식처와 말라리아 병의 전염 위험성을 감소시킴 	
목표 7: 환경적 지속 가능성을 보장	<ul style="list-style-type: none"> - 개선된 물 관리는 물 소비를 줄이고 영양물질과 유기 물질을 재순환시킴 - 가난한 가정에 보다 개선되고 생산적인 생태학적 위생 서비스를 제공해 주기 위한 대책의 강구 - 빈곤한 마을에 용수공급과 위생 서비스를 개선해주기 위한 대책의 강구 - 폐수 방류를 줄이고 빈민가에서의 환경적 건강을 개선하기 위한 대책의 강구 	<ul style="list-style-type: none"> - 서비스 제공의 지속 가능성을 확실히 하기 위해 운영, 유지관리 및 비용 회수 시스템을 개발

8

지식의 부족과 추후 연구를 위한 제안
**Gaps in Knowledge and
Suggestions for Further Work**

담수 자원은 취약하며 기후변화에 의해 크게 영향을 받을 잠재성이 있다는 여러 가지 증거가 관측된 기록과 기후 전망으로부터 확인되고 있다. 그러나, 수문학적 변수들의 장래 변화를 정량화하고 이들 변화가 여러 가지 시스템과 부문에 미치는 영향을 정량화할 수 있는 능력은 평가 과정의 모든 단계에서 직면하게 되는 불확실성 때문에 제한을 받고 있다. 이러한 불확실성은 일련의 사회·경제 개발 시나리오라든지, 주어진 시나리오에 대한 일련의 기후모델에 의한 전망, 기후 영향의 국지적 혹은 지역적 규모로의 축소 (downscaling), 영향 평가, 그리고 각종 적응과 완화 활동으로부터의 피드백 등으로 오게 된다. 관측과 이해에 있어서의 한계가 이와 같은 불확실성을 감소시킬 수 있는 현재의 능력을 제한하고 있다. 따라서, 의사 결정은 이러한 불확실성을 충분히 고려하여 이루어져야 한다. 또한, 이와 같은 불확실성을 기초로 한 위험성을 평가하기 위한 분명한 방법들은 이제 겨우 개발 초기 단계에 있다고 볼 수 있다.

기후변화의 완화 (mitigation)와 기후변화 영향에의 적응 (adaptation)을 위한 능력은 적절한 기술의 가용성 여부 및 경제적 타당성과 여러 이해 당사자 간의 의사 결정과 관리 기준을 위한 확실한 협의 조정 과정에 의해 제한된다. 특정 적응 옵션을 위한 비용과 연계 되는 편익 (기피된 피해 포함)에 대한 지식은 많지 않다. 기후변화에 적응하기 위한 관리 전략들을 위해서는 기후변화를 인지할 수 있는 적절한 관측망을 필요로 한다. 물 관련 취약성을 감소시키기 위해 개발 계획에 적응 방향을 포함시키는데 필요한 법적 및 조직적 체계와 수요 측면의 통계치들에 대한 이해는 대체로 제한적이며, 적응을 위한 투자로 물 부문에 재정적 투자를 할 수 있는 적절한 통로에 대한 이해 또한 극히 제한적이다.

본 절에서는 이와 같은 필요성과 관련된 몇 가지 주요 지식의 부족함에 대해 살펴보기로 한다.

8.1 관측의 필요성

양질의 충분한 관측 자료와 이들 자료의 손쉬운 획득은 진행되고 있는 기후변화에 대한 이해를 촉진하고, 모델에 의한 전망을 개선하는데 꼭 필요하며, 기후변화 조건 아래에서 요구되는 적응 관리를 위한 전체 조건이기도 하다. 지식의 발전은 개선된 자료의 가용성에 의존한다고 할 수 있다. 일부 관측망의 축소가 현재에 진행되고 있는 것이 사실이나, 상대적으로 짧은 기록은 자연적인 변동성의 전 범위를 나타낼 수 없을 뿐 아니라 탐색 연구를 하는데 어려움을 주는 반면에, 장기간 자료의 재구성은 최근의 경향과 극한치들을 보다 광범위한 측면에서 포함시킬 수 있다. 담수와 수문순환에 관련된 기후변화의 관측에 있어서의 부족한 점 (gaps)으로는 다음과 같은 것들이 지적 되고 있다. [WGI TS.6; WGII 3.8]

- 강수량 측정에 있어서의 어려움은 전 지구적 및 지역적 경향을 정량화함에 있어서 하나의 관심 영역으로 남아있다. 위성으로부터 바다 지역의 강수량을 측정하는 것은 아직 개발 단계에 있으며, 현재 진행 중인 위성에 의한 모니터링과 관측된 강수량 자료에 대한 신뢰성 있는 통계 자료의 구축을 확실히 할 필요성이 있다. [WGI 3.3.2.5]
- 여러 가지 수문 기상학적 변수들 (예: 하천 유량, 토양 수분, 실제 증발산량 등)은 부적절하게 측정되고 있다.

잠재 증발산량은 일반적으로 태양 복사열이라든지, 상대 습도, 풍속 등과 같은 변수들을 사용하여 계산되고 있다. 관측 기록들은 많은 경우 대단히 짧으며, 몇몇 지역에 국한하여 자료가 있을 뿐이어서 가뭄의 변화를 완전하게 분석하는 것을 어렵게 하고 있다. [WGI 3.3.3, 3.3.4]

- 어떤 지역에서는 하천 유량 자료의 구제 가능성이 있을 수도 있다. 관측 자료가 없는 곳에는 새로운 관측망 구축이 고려되어야 한다. [WGI 3.3.4]
- 지하수는 일반적으로 모니터링이 잘 되지 못하고 있으며, 지하수의 감수 (groundwater depletion)와 함양 (recharge)은 많은 지역에서 잘 못 모델링되고 있다. [WGI 3.3.4]
- 수질과 물의 사용 및 유사 이송에 관한 모니터링은 꼭 필요하다.
- 눈과 얼음, 동토 등에 대한 현황 조사 (inventory)는 불완전하며, 변화에 대한 모니터링은 공간적 및 시간적으로 불균등하게 분포되어 있다. 남반구로부터의 자료가 일반적으로 부족하다. [WGI TS 6.2, 4.2.2, 4.3]
- 대기 중의 CO₂ 증가의 직접 영향과 수문순환에 있어서의 변화 사이의 관계를 보다 잘 이해하기 위해서는 증가하는 대기 중 CO₂와 상승하는 기온, 증가하는 대기 중 수증기 농도 등의 조합 효과에 대한 식물의 증발산을 통한 반응에 대한 보다 많은 정보가 필요하다. [WGI 7.2]
- 각각 다른 여러 기관들이나 국가들이 한 지역 혹은 유역 내에서 모니터링을 유지할 경우에는 자료군의 품질 보장이나 동질성 유지, 모니터링 방법 및 절차의 검증 (calibration) 등이 매우 중요할 수 있다.

8.2 기후의 전망과 그 영향들에 대한 이해

8.2.1 기후변화에 대한 이해와 전망

수문 순환과 관련하여 기후변화를 이해하고 모델링 하는데 있어서의 주된 불확실성에는 다음과 같은 것들이 포함된다. [SYR; WGI TS.6]

- 기후에 미치는 태양 복사열 관련 여러 가지 동인들이 있어서의 변화들은 아직 완전히 정량화되어 이해되지 못하고 있다. (예: 구름의 특성과 메탄, 오존, 성층권 내 수증기, 토지이용 변화, 과거 태양 복사열의 변동)
- 일부 관측된 기후변화 현상을 인간 활동으로 인한 현상, 혹은 자연 현상에 귀속시킴에 있어서의 확신은 인위적 또는 자연적 과정과 관측에 있어서의 불확실성에 의해서 뿐만 아니라 복사 강제력 (radiative forcing)에 있어서의 불확실성 때문에 제한적이라 할 수 있다. 이와 같은 귀속시킴은 공간적 및 시간적 규모가 작을수록 더 어려워지며, 기온의 변화보다는 강수량의 변화에 대한 이해의 신뢰도는 더 떨어진다. 극한 사상의 변화에 대한 원인 귀속 연구 (attribution studies)는 대단히 드물다.
- 기후 변동성과 강한 강수 사상과 약한 강수 사상 간의 분포에 관한 어떤 특성을 모델링함에 있어서의 불확실성은 대체로 상당히 크다. 많은 지역에서 평균 강수량의 변화에 대한 추정 또한 사용하는 모델에 따라 광범위하게 변화하며, 때로는 변화의 부호까지 바뀌게 된다.

- 기후에 있어서의 아주 세밀한 공간적 스케일이 지형으로 인해 결정되는 여러 지역에서는 기후변화가 이러한 공간 스케일에서 어떻게 표현될 것인가에 대한 정보가 일반적으로 충분하지 않다.
- 기후 모델들은 현재의 컴퓨터 자원으로 성취될 수 있는 공간적 해상도와 앙상블 사이즈에 의해 제한을 받으며, 또한, 모델에 어떤 추가적인 과정을 포함시킬 필요성에 의하거나, 혹은 어떤 피드백 현상(예: 구름과 탄소 사이클로부터)을 모델링할 때 포함되는 큰 불확실성에 의해 제한을 받게 된다.
- 빙상(氷床, ice sheet)에 관한 제한된 지식은 장래의 빙상의 질량 평형 추정에 있어서의 비 정량화된 불확실성을 낳게 하며, 이로 인해 해수면 상승을 전망함에 있어서의 불확실성을 낳게 된다.

8.2.2 물 관련 영향 [WGII 3.5.1, 3.8]

- 여러 가지 내재해 있는 불확실성 때문에 물 관리자들이 기후변화 아래에서의 위험도를 분석할 수 있도록 하기 위해서는 확률론적 접근방법이 필요하다. 특정 결과의 확률분포를 정하기 위해 여러 가지 기법들이 개발되고 있으며, 이들 기법의 사용자들에 의한 지역 사회에의 작용뿐만 아니라 그 결과를 서로 통신하기 위해 이러한 연구와 기법에 관해 지속적인 개발이 요구된다.
- 오늘날의 수문학적 변화에 대한 탐구와 원인 귀속에 관해 더 많은 연구가 필요하며, 특히 수자원에 있어서의 변화와 극한 사상의 발생에 대하여 더 많은 연구가 필요하다. 이러한 노력의 일환으로 담수 자원과 이를 모니터링 하기위한 운영 시스템에 미치는 기후변화 영향을 표시하는 것이 필요하다.
- 아직까지는 큰 규모의 기후 모델과 물 관리에 가장 중요한 규모인 유역 규모 사이에는 스케일의 불일치가 있다. 따라서, 고해상도의 기후 모델들은 보다 나은 지표면 특성과 상호 작용으로 물 관리를 위한 보다 적절한 정보를 제공할 수 있도록 요청을 받고 있다. 이를 위해서는 통계학적 및 물리적인 축소 기법이 기여할 수 있을 것으로 본다.
- 물 스트레스를 받고 있는 나라에서의 대부분의 기후변화 영향에 관한 연구는 1년 기준으로 물의 수요와 공급을 평가하고 있으나, 월 혹은 더 짧은 기간에 대한 해석이 더 바람직하다. 왜냐하면, 계절적인 패턴의 변화와 극한 사상의 발생 확률의 변화는 수자원의 가용량이 증가되는 긍정적인 효과를 상쇄할 수도 있기 때문이다.
- 물 순환에 있어서 아주 민감한 저류량 변수인 눈과 얼음, 그리고 동토에 미치는 기후변화 영향은 대단히 비선형적이므로 구체적인 대기 축소 기법(atmospheric downscaling)은 물론이고 보다 물리적으로 그리고, 과정을 중심으로 하는 모델링이 요구된다.
- 각각 다른 기후 지역에서의 변화하는 빙하와 적설, 비와 눈 사이의 변환, 동토 등으로 인해 생기는 유출 변화에 대한 상세한 지식은 아직 결여되어 있다.
- 담수 자원에 미치는 변화하는 기후 변동성의 영향에 대한 평가를 가능케 하는 여러 가지 방법들이 개선될 필요가 있다. 특히, 장래의 기후 전망을 둘러싼 불확실성의 범위 내에서 물 관리자가 기후변화 영향을 평가하고 그들의 시스템의 기능과 탄력성을 평가할 수 있도록 해주는 국지 규모의 자료군(sets)과 간단하게 기후와 연계시킨 유역 단위 컴퓨터 모델은 개발할 필요가 있다.
- 토지 이용과 기후변화(식생변화와 관개, 저수지 건설 등과 같은 인간 활동 포함)간의 피드백은 기후와 토지 이용에 연계된 모델링 등에 의해 보다 광범위하게 해석되어야 한다.
- 다양한 기후 정책과 개발 경로에 따른 물 관련 결과들에 대한 평가를 개선할 필요가 있다.
- 수질에 미치는 기후변화 영향은 개발도상국이나 개발선진국의 경우 둘 다 충분히 이해되지 못하고 있다.
- 물 수요에 미치는 기후변화의 영향을 포함하여 수자원과 관련된 기후변화 영향 중 사회·경제적 측면의 영향에 대한 결과는 상대적으로 대단히 빈약하다.
- 수 생태계에 미치는 기후변화 영향(기온뿐만 아니라 바꾸어진 유량 구조, 수위 및 얼음 등)은 아직 적절히 이해되지 못하고 있다.
- 지하수는 그의 중요성에도 불구하고 지표수 자원에 비해 기후변화 영향 평가에 있어서 거의 관심을 받지 못해 왔다.

8.3 적응과 완화

- 수자원 관리는 여러 가지 다른 정책 분야에 분명한 영향을 미친다(예: 에너지 수요 전망, 토지 이용, 식량 안보, 자연 보존 등). 효율적인 물 관련 기술과 실무 관행의 채택을 포함하여 여러 물 관련 부문에 걸쳐 적응과 완화 옵션의 평가를 용이하게 하는 적절한 수단들이 그리 많지는 않다.
- 수문학적 변수들의 장래 변화에 대한 신뢰성 있는 전망이 없는 상태에서, 정확한 전망 없이도 효과적으로 실행에 옮길 수 있는 물 사용 효율 및 물 수요 관리의 개선과 같은 적응 과정 및 방법들은 기후변화에 대처하기 위한 후회 없는 옵션을 제공하게 된다. [WGII 3.8]
- **생물 다양성:** 특히 델타 지역의 생태계와 습지, 그리고 적절한 하천 내 유량과 관련하여 환경 가치와 서비스의 유지를 위한 수자원의 필요성을 확인한다.
- **탄소 포집 및 저장:** 지하수 수질의 잠재적인 저하 때문에 누수 과정에 대한 이해가 개선될 필요가 있다. 이를 위해서는 지질학적으로 확장된 이산화탄소(CO₂)의 거동을 모니터링 하고 확인하는 능력을 개선할 필요가 있다. [CCS, TS, Chapter 10]
- **수력 발전 담의 건설:** 다양한 이해관계가 주어진 상태에서(홍수 조절, 수력 발전, 관개, 도시용수 공급, 생태계, 어업, 주운 등) 지속 가능한 해결 방법에도달하기 위해서는 통합적인 접근 방법이 필요하다. 메탄가스 배출량이 추정되어야 하며, 영향을 받은 지역에서의 탄소 수지에 미치는 순 영향에 대해서도 평가가 필요하다.
- **바이오 에너지:** 물 수요와 그로 인한 결과, 상업용 바이오 에너지 농작물의 재배를 위한 대규모 농장 등에 대한 통찰이 필요하다.
- **농업:** 온실가스 수지(GHG budget)에 미치는 보다 효율적인 관개 방법의 순 효과에 대한 이해가 더 필요하다(수확량 증가 및 잔류물 회귀를 통한 토양속 탄소 저류량의 증가와 물을 공급하기 위한 에너지 시스템으로부터의 CO₂ 배출에 의하거나, 혹은 보다

- 많은 수분과 비료 사용으로부터의 아산화질소 (N_2O)의 배출에 의한 탄소 저류량의 상쇄). [WGIII 8.4.1.1]

 - *임업*: 강우, 증발산, 유출, 침투, 지하수 함양 등과 같은 수문순환을 형성하는 여러 과정에 미치는 대규모 조림(造林)의 효과에 대한 보다 깊은 이해가 필요하다. [WGIII 9.7.3]
 - *폐수와 물의 재이용*: 개발도상국에서의 중앙 집중형이 아닌 분리형 처리 공정으로 부터의 배출과 조절되지 않은 폐수의 방류에 대한 더 깊은 통찰이 필요하다. 기후변화 영향의 완화와 적응 전략에 미치는 적절히 처리된 폐수의 재이용 영향은 이해되고 정량화될 필요가 있다.

참고문헌 (References)

- Abdalati, W. and K. Steffen, 2001: Greenland ice sheet melt extent: 1979–1999. *J. Geophys. Res.*, **106**(D24), 33983–33988.
- Abeku, T.A., G.J. van Oortmarssen, G. Borsboom, S.J. de Vlas and J.D.F. Habbema, 2003: Spatial and temporal variations of malaria epidemic risk in Ethiopia: factors involved and implications. *Acta Trop.*, **87**, 331–340.
- Abou-Hadid, A.F., 2006: *Assessment of Impacts: Adaptation and Vulnerability to Climate Change in North Africa: Food Production and Water Resources*. Washington, DC, 127 pp. http://www.aiaccproject.org/Final%20Reports/Final%20Reports/FinalRept_AIACC_AF90.pdf.
- Abou-Hadid, A.F., R. Mougou, A. Mokssit and A. Iglesias, 2003: *Assessment of Impacts, Adaptation, and Vulnerability to Climate Change in North Africa: Food Production and Water Resources*. AIACC AF90 Semi-Annual Progress Report, 37 pp.
- Abu-Taleb, M.F., 2000: Impacts of global climate change scenarios on water supply and demand in Jordan. *Water International*, **25**(3), 457–463.
- ACIA (Arctic Climate Impact Assessment), 2004: *Impacts of a Warming Arctic: Synthesis Report of the Arctic Climate Impact Assessment*, Policy Document prepared by the Arctic Council and presented at the Fourth Arctic Council Ministerial Meeting, Reykjavik, 24 November 2004, 140 pp.
- ACIA (Arctic Climate Impact Assessment), 2005: *Arctic Climate Impact Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge, 1042 pp.
- ADB (Asia Development Bank), 1994: *Climate Change in Asia: Vietnam Country Report*. Asia Development Bank, Manila, 103 pp.
- Adler, R.F. and Co-authors, 2003: The version 2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979–present). *J. Hydrometeorol.*, **4**, 1147–1167.
- AEMA, 2002: *Uso sostenible del agua en Europa. Gestión de la demanda*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 94 pp.
- Agarwal, P.K., S.K. Bandyopadhyay, H. Pathak, N. Kalra, S. Chander and S. Kumar, 2000: Analysis of yield trends of the rice–wheat system in north-western India. *Outlook on Agriculture*, **29**(4), 259–268.
- Agoumi, A., 2003: *Vulnerability of North African Countries to Climatic Changes: Adaptation and Implementation Strategies for Climatic Change*, IISD. http://www.cckn.net/pdf/north_africa.pdf.
- Aguilar, E., T.C. Peterson, P. Ramírez Obando, R. Frutos, J.A. Retana, M. Solera, J. Soley, I. González García and co-authors, 2005: Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961–2003. *J. Geophys. Res.*, **110**, D23107, doi:10.1029/2005JD006119.
- Alcamo, J. and T. Henrichs, 2002: Critical regions: a model-based estimation of world water resources sensitive to global changes. *Aquat. Sci.*, **64**, 352–362.
- Alcamo, J., P. Döll, T. Henrichs, F. Kaspar, B. Lehner, T. Rösch and S. Siebert, 2003a: Development and testing of the WaterGAP 2 global model of water use and availability. *Hydrol. Sci. J.*, **48**, 317–338.
- Alcamo, J., P. Döll, T. Henrichs, F. Kaspar, B. Lehner, T. Rösch and S. Siebert, 2003b: Global estimates of water withdrawals and availability under current and future “business-as-usual” conditions. *Hydrol. Sci. J.*, **48**, 339–348.
- Alcamo, J. and Co-authors, 2004: A new perspective on the impacts of climate change on Russian agriculture and water resources. *Proc. World Climate Change Conference*, 29 September–3 October, 2003, Moscow, 324–335.
- Alcamo, J., M. Flörke and M. Marker, 2007: Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic change. *Hydrol. Sci. J.*, **52**, 247–275.
- Aldous, P., 2004: Borneo is burning. *Nature*, **432**, 144–146.
- Alexander, L.V., X. Zhang, T.C. Peterson, J. Caesar, B. Gleason, A.M.G. Klein Tank, M. Haylock, D. Collins, B. Trewin, F. Rahimzadeh, A. Tagipour, K. Rupa Kumar, J. Revadekar, G. Griffiths, L. Vincent, D.B. Stephenson, J. Burn, E. Aguilar, M. Brunet, M. Taylor, M. New, P. Zhai, M. Rusticucci and J.L. Vazquez-Aguirre, 2006: Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J. Geophys. Res.*, **111**, D05109, doi:10.1029/2005JD006290.
- Allen Consulting Group, 2005: *Climate Change Risk and Vulnerability: Promoting an Efficient Adaptation Response in Australia*. Report to the Australian Greenhouse Office by the Allen Consulting Group, 159 pp. <http://www.greenhouse.gov.au/impacts/publications/risk-vulnerability.html>.
- Alvarez, R., 2005: A review of nitrogen fertilizer and conservative tillage effects on soil organic storage. *Soil Use Manage.*, **21**, 38–52.
- Álvarez Cobelas, M., J. Catalán and D. García de Jalón, 2005: Impactos sobre los ecosistemas acuáticos continentales. *Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático*, J.M. Moreno, Ed., Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 113–146.
- Ames, A., 1998: A documentation of glacier tongue variations and lake development in the Cordillera Blanca, Peru. *Z. Glet. Glazialgeol.*, **34**(1), 1–26.
- Andréasson, J., S. Bergström, B. Carlsson, L.P. Graham and G. Lindström, 2004: Hydrological change: climate impact simulations for Sweden. *Ambio*, **33**(4–5), 228–234.
- Andreone, F., J.E. Cadle, N. Cox, F. Glaw, R.A. Nussbaum, C.J. Raxworthy, S.N. Stuart and D. Vallan, 2005: Species review of amphibian extinction risks in Madagascar: conclusions from the Global Amphibian Assessment. *Conserv. Biol.*, **19**, 1790–1802.
- Anisimov, O.A. and M.A. Belolutskaia, 2004: Predictive modelling of climate change impacts on permafrost: effects of vegetation. *Meteorol. Hydrol.*, **11**, 73–81.
- Antle, J.M., S.M. Capalbo, E.T. Elliott and K.H. Paustian, 2004: Adaptation, spatial heterogeneity, and the vulnerability of agricultural systems to climate change and CO₂ fertilization: an integrated assessment approach. *Climatic Change*, **64**, 289–315.
- Aparicio, M., 2000: *Vulnerabilidad y Adaptación a la Salud Humana ante los Efectos del Cambio Climático en Bolivia*. Ministerio de Desarrollo Sostenible y Planificación. Viceministerio de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Desarrollo Forestal. Programa Nacional de Cambios Climáticos. PNUD/GEF.

- Arkell, B.P. and Darch, G.J.C., 2006: Impact of climate change on London's transport network. *Proc. Institution of Civil Engineers-Municipal Engineer*, **159**(4), 231–237.
- Arnell, N.W., 2003: Relative effects of multi-decadal climatic variability and changes in the mean and variability of climate due to global warming: future streamflows in Britain. *J. Hydrol.*, **270**, 195–213.
- Arnell, N.W., 2004: Climate change and global water resources: SRES emissions and socio economic scenarios. *Global Environmen. Chang.*, **14**, 31–52.
- Arnell, N.W., 2006a: Global impacts of abrupt climate change: an initial assessment. Working Paper 99, Tyndall Centre for Climate Change Research, University of East Anglia, Norwich, 37 pp.
- Arnell, N.W., 2006b: Climate change and water resources: a global perspective. *Avoiding Dangerous Climate Change*, H.J. Schellnhuber, W. Cramer, N. Nakićenović, T. Wigley and G. Yohe, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 167–175.
- Arnell, N.W. and E.K. Delaney, 2006: Adapting to climate change: public water supply in England and Wales. *Climatic Change*, **78**, 227–255.
- Arnell, N.W., M.J.L. Livermore, S. Kovats, P.E. Levy, R. Nicholls, M.L. Parry and S.R. Gaffin, 2004: Climate and socio-economic scenarios for global-scale climate change impacts assessments: characterising the SRES storylines. *Global Environ. Chang.*, **14**, 3–20.
- Ashton, P.J., 2002: Avoiding conflicts over Africa's water resources. *Ambio*, **31**(3), 236–242.
- Attaher, S., M.A. Medany, A.A. Abdel Aziz and A. El-Gindy, 2006: Irrigation-water demands under current and future climate conditions in Egypt. *Misr. Journal of Agricultural Engineering*, **23**, 1077–1089.
- Auer, I. and Co-authors, 2007: Histalp - historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region 1760–2003. *Int. J. Climatol.*, **27**, 17–46.
- Bachelet, D., R.P. Neilson, J.M. Lenihan and R.J. Drapek, 2001: Climate change effects on vegetation distribution and carbon budget in the United States. *Ecosystems*, **4**, 164–185.
- Baker, T.R., O.L. Phillips, Y. Malhi, S. Almeida, L. Arroyo, A. Di Fiore, T. Erwin, N. Higuchi, and Co-authors, 2004: Increasing biomass in Amazonian forest plots. *Philos. T. Roy. Soc. Lond. B*, **359**, 353–365.
- Balmford, A., P. Crane, A. Dobson, R.E. Green and G.M. Mace, 2005: The 2010 challenge: data availability, information needs and extraterrestrial insights. *Philos. T. Roy. Soc. Lond. B*, **360**, 221–228.
- Barber, V.A., G.P. Juday and B.P. Finney, 2000: Reduced growth of Alaskan white spruce in the twentieth century from temperature-induced drought stress. *Nature*, **405**, 668–673.
- Barnett, T.P., R. Malone, W. Pennell, D. Stammer, B. Semtner and W. Washington, 2004: The effects of climate change on water resources in the West: introduction and overview. *Climatic Change*, **62**, 1–11.
- Barnett, T.P., J.C. Adam and D.P. Lettenmaier, 2005: Potential impacts of warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, **438**, 303–309.
- Barras, J., S. Beville, D. Britsch, S. Hartley, S. Hawes, J. Johnston, P. Kemp, Q. Kinler, A. Martucci, J. Porthouse, D. Reed, K. Roy, S. Sapkota and J. Suhayda, 2003: *Historical and Projected Coastal Louisiana Land Changes: 1978–2050*. Open File Report 03-334. U.S. Geological Survey, 39 pp.
- Barreira, A., 2004: *Dams in Europe. The Water Framework Directive and the World Commission on Dam Recommendations: A Legal and Policy Analysis*. <http://assets.panda.org/downloads/wfddamsineurope.pdf>
- Basán Nickisch, M., 2002: Sistemas de captación y manejo de agua. Estación Experimental Santiago del Estero. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. http://www.inta.gov.ar/santiago/info/documentos/agua/0001res_sistemas.htm.
- Batima, P., 2003: Climate change: pasture–livestock. Synthesis Report. *Potential Impacts of Climate Change, Vulnerability and Adaptation Assessment for Grassland Ecosystem and Livestock Sector in Mongolia*. Admon Publishing, Ulaanbaatar, 36–47.
- Batima, P., Batnasan N. and Lehner B., 2004: *The Freshwater Systems of Western Mongolia's Great Lakes Basin: Opportunities and Challenges in the Face of Climate Change*. Admon Publishing, Ulaanbaatar, 95 pp.
- Batima, P., T. Ganbaatar, D. Tumerbaatar, B. Erdenetsetseg, B. Bolortsetseg, B. Gantsetseg, G. Sanjid and S. Khudulmur, 2005: Climate change impacts on environment. *Climate Change Impacts*, P. Batima and B. Bayasgalan, Eds., Admon Publishing, Ulaanbaatar, 59–115.
- Bationo, A., S.P. Wani, C.L. Bielders, P.L.G. Velk and A.U. Mokwunye, 2000: Crop residues and fertilizer management to improve soil organic carbon content, soil quality and productivity in the desert margins of West Africa. *Global Climate Change and Tropical Ecosystems*, R. Lal, J.M. Kimble and B.A. Stewart, Eds., CRC-Lewis Publishers, Boca Raton, FL, 117–146.
- Bauder, E.T., 2005: The effects of an unpredictable precipitation regime on vernal pool hydrology. *Freshw. Biol.*, **50**, 2129–2135.
- Beare, S. and A. Heaney, 2002: *Climate change and water resources in the Murray Darling Basin, Australia; impacts and adaptation*. Conference Paper 02.11, Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics, 33 pp. <http://www.abarepublications.com/product.asp?prodid=12389>.
- Beaulieu, N. and M. Allard, 2003: The impact of climate change on an emerging coastline affected by discontinuous permafrost: Manitousuk Strait, northern Quebec. *Can. J. Earth Sci.*, **40**, 1393–1404.
- Beck, C., J. Grieser and B. Rudolph, 2005: A New Monthly Precipitation Climatology for the Global Land Areas for the Period 1951 to 2000. DWD, *Klimastatusbericht 2004*, 181–190.
- Beltaos, S. and Co-authors, 2006: Climatic effects on ice-jam flooding of the Peace-Athabasca Delta. *Hydrol. Process.*, **20**(19), 4031–4050.
- Benhin, J.K.A., 2006: *Climate change and South African agriculture: impacts and adaptation options*. CEEPA Discussion Paper No.21. Special Series on Climate Change and Agriculture in Africa. The Centre for Environmental Economics and Policy in Africa, University of Pretoria, Pretoria, 78 pp.
- Beniston, M. and H.F. Díaz, 2004: The 2003 heatwave as an example of summers in a greenhouse climate? Observations and climate model simulations for Basel, Switzerland. *Global Planet. Change*, **44**, 73–81.
- Beniston, M., D.B. Stephenson, O.B. Christensen, C.A.T. Ferro, C. Frei, S. Goyette, K. Halsnaes, T. Holt, K. Jylhä, B. Koffi, J. Palutikof, R. Schöll, T. Semmler and K. Woth, 2007: Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Climatic Change*, **81**(Suppl. 1), 71–95.
- Berezovskaya, S., D.Q. Yang and L. Hinzman, 2005: Long-term annual water balance analysis of the Lena River. *Global Planet. Change*, **48**(1–3), 84–95.
- Berger, T., J. Mendoza, B. Francou, F. Rojas, R. Fuertes, M. Flores, L. Noriega, C. Ramallo, E. Ramírez and H. Baldivieso, 2005: Glaciares Zongo – Chacaltaya – Charquini Sur – Bolivia 16°S. Mediciones Glaciológicas, Hidrológicas y Meteorológicas, Año Hidrológico 2004–2005. *Informe Great Ice Bolivia, IRD-IHH-SENMAHI-COBEE*, 171.
- Berndes, G. and P. Börjesson, 2002: Multi-functional biomass production systems. <http://www.brdisolutions.com/pdfs/bcota/abstracts/6/70.pdf>.
- Berndes, G., F. Fredrikson, and P. Borjesson, 2004: Cadmium accumulation and Salix-based phytoextraction on arable land in

- Sweden. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **103**, 207-223.
- Berthelot, M., P. Friedlingstein, P. Ciais, P. Monfray, J.L. Dufresen, H.L. Treut and L. Fairhead, 2002: Global response of the terrestrial biosphere and CO₂ and climate change using a coupled climate-carbon cycle model. *Global Biogeochem. Cy.*, **16**, doi:10.1029/2001GB001827.
- Betts, R.A., P.M. Cox, S.E. Lee and F.I. Woodward, 1997: Contrasting physiological and structural vegetation feedbacks in climate change simulations. *Nature*, **387**, 796-799.
- Betts, R.A., O. Boucher, M. Collins, P.M. Cox, P.D. Falloon, N. Gedney, D.L. Hemming, C. Huntingford, C.D. Jones, D. Sexton and M. Webb, 2007: Projected increase in continental runoff due to plant responses to increasing carbon dioxide. *Nature*, **448**, 1037-1041.
- Beuhler, M., 2003: Potential impacts of global warming on water resources in southern California. *Water Sci. Technol.*, **47**(7-8), 165-168.
- Bhadra, B., 2002: Regional cooperation for sustainable development of Hindu Kush Himalaya region: opportunities and challenges. Keynote paper presented at *The Alpine Experience – An Approach for other Mountain Regions*, Berchtesgaden, Germany, June 26-29.
- Bidegain, M., R.M. Cafferla, F. Blixen, V.P. Shennikov, L.L. Lagomarsino, E.A. Forbes and G.J. Nagy, 2005: Tendencias climáticas, hidrológicas y oceanográficas en el Río de la Plata y costa Uruguaya. *El Cambio Climático en el Río de la Plata*, V. Barros A. Menéndez and G.J. Nagy, Eds., Proyectos AIACC, 137-143.
- Bigio, A., 2003: Cities and climate change. *Building Safer Cities: The Future of Disaster Risk*, A. Kreimer, M. Arnold and A. Carlin, Eds., World Bank, Washington, DC, 91-100.
- Bindoff, N., J. Willebrand, V. Artale, A. Cazenave, J. Gregory, S. Gulev, K. Hanawa, C.L. Quéré, S. Levitus, Y. Nojiri, C.K. Shum, L. Talley and A. Unnikrishnan, 2007: Observations: oceanic climate change and sea level. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report*, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 385-432.
- Blais, J.M., D.W. Schindler, D.C.G. Muir, M. Sharp, D. Donald, M. Lafreniere, E. Braekevelt and W. M.J. Strachan, 2001: Melting glaciers: a major source of persistent organochlorines to subalpine Bow Lake in Banff National Park, Canada. *Ambio*, **30**, 410-415.
- Blythe, E.M., A.J. Dolman and J. Noilhan, 1994: The effect of forest on mesoscale rainfall: an example from HAPEX-MOBILHY. *J. Appl. Meteorol.*, **33**, 445-454.
- Bobba, A., V. Singh, R. Berndtsson and L. Bengtsson, 2000: Numerical simulation of saltwater intrusion into Laccadive Island aquifers due to climate change. *J. Geol. Soc. India*, **55**, 589-612.
- Bodaly, R.A., J.W.M. Rudd, R.J.P. Fudge and C.A. Kelly, 1993: Mercury concentrations in fish related to size of remote Canadian shield lakes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **50**, 980-987.
- Bogaart, P.W. and R.T. van Balen, 2000: Numerical modeling of the response of alluvial rivers to Quaternary climatic change. *Global Planet. Change*, **27**, 124-141.
- Bogoyavlenskiy, D. and A. Siggner, 2004: Arctic demography. *Arctic Human Development Report (AHDR)*, N. Einarsson, J.N. Larsen, A. Nilsson and O.R. Young, Eds., Steffanson Arctic Institute, Akureyri, 27-41.
- Börjesson, P. and G. Berndes, 2006: The prospects for willow plantations for wastewater treatment in Sweden. *Biomass and Bioenergy*, **30**, 428-438.
- Bouma, M.J., 2003: Methodological problems and amendments to demonstrate effects of temperature on the epidemiology of malaria: a new perspective on the highland epidemics in Madagascar, 1972-1989. *Trans. Roy. Soc. Trop. Med. Hyg.*, **97**, 133-139.
- Bouraoui, F., B. Grizzetti, K. Granlund, S. Rekolainen and G. Bidoglio, 2004: Impact of climate change on the water cycle and nutrient losses in a Finnish catchment. *Climatic Change*, **66**, 109-126.
- Boutkan, E. and A. Stikker, 2004: Enhanced water resource base for sustainable integrated water resource management. *Nat. Resour. Forum*, **28**, 150-154.
- Bou-Zeid, E. and El-Fadel, M., 2002: Climate change and water resources in Lebanon and the Middle East. *J. Water Res. Pl.-ASCE*, **128**(5), 343-355.
- Box, J.E. and Co-authors, 2006: Greenland ice-sheet surface mass balance variability (1988-2004) from calibrated polar MM5 output. *J. Clim.*, **19**(12), 2783-2800.
- Bradley, R.S., F.T. Keimig and H.F. Diaz, 2004: Projected temperature changes along the American cordillera and the planned GCOS network. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L16210, doi:10.1029/2004GL020229.
- Bradley, R.S., M. Vuille, H. Diaz and W. Vergara, 2006: Threats to water supplies in the tropical Andes. *Science*, **312**, 1755-1756.
- Braun, O., M. Lohmann, O. Maksimovic, M. Meyer, A. Merkovic, E. Messerschmidt, A. Reidel and M. Turner, 1999: Potential impact of climate change effects on preferences for tourism destinations: a psychological pilot study. *Clim. Res.*, **11**, 2477-2504.
- Briers, R.A., J.H.R. Gee and R. Geoghegan, 2004: Effects of North Atlantic oscillation on growth and phenology of stream insects. *Ecography*, **27**, 811-817.
- Brklacich, M., C. Bryant, B. Veenhof and A. Beauchesne, 1997: Implications of global climatic change for Canadian agriculture: a review and appraisal of research from 1984-1997. *Canada Country Study: Climate Impacts and Adaptation*, Environment Canada, Toronto, ON, 220-256.
- Bromley, C.J. and S. Currie, 2003: Analysis of subsidence at Crown Road, Taupo: a consequence of declining groundwater. *Proc. 25th New Zealand Geothermal Workshop*, Auckland University, 113-120.
- Brouyere, S., G. Carabin and A. Dassargues, 2004: Climate change impacts on groundwater resources: modelled deficits in a chalky aquifer, Geer basin, Belgium. *Hydrogeol. J.*, **12**(2), 123-134.
- Brown, R.A., N.J. Rosenberg, C.J. Hays, W.E. Easterling and L.O. Mearns, 2000: Potential production and environmental effects of switchgrass and traditional crops under current and greenhouse-altered climate in the central United States: a simulation study. *Agric. Ecosyst. Environ.*, **78**, 31-47.
- Brown, R.D. and R.O. Braaten, 1998: Spatial and temporal variability of Canadian monthly snow depths. *Atmos.-Ocean*, **36**, 37-54.
- Bruinsma, J., 2003: *World Agriculture: Towards 2015/2030. An FAO Perspective*. Earthscan, London, 444 pp.
- Brutsaert, W. and M.B. Parlange, 1998: Hydrologic cycle explains the evaporation paradox. *Nature*, **396**, 30.
- Bunn, S.E. and Arthington, A.H., 2002: Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environ. Manage.*, **30**, 492-507.
- Burger, R.L., 1992: *Chavin and the Origins of Andean Civilization*. Thames and Hudson, London, 240 pp.
- Burke, E.J., S.J. Brown, and N. Christidis, 2006: Modelling the recent evolution of global drought and projections for the 21 st century with the Hadley Centre climate model. *J. Hydrometeorol.*, **7**, 1113-1125.
- Burke, L. and J. Maidens, 2004: *Reefs at Risk in the Caribbean*. World Resources Institute, Washington, DC, 81 pp. http://archive.wri.org/publication_detail.cfm?pubid=3944.
- Burke, L., E. Selig and M. Spalding, 2002: *Reefs at Risk in Southeast Asia*. World Resources Institute, Washington DC, 37 pp. http://www.wri.org/biodiv/pubs_description.cfm?PubID=3144.
- Burkett, V.R. and J. Kusler, 2000: Climate change: potential impacts and interactions in wetlands of the United States. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, **36**, 313-320.

- Burkett, V.R., D.A. Wilcox, R. Stottlemeyer, W. Barrow, D. Fagre, J. Baron, J. Price, J. Nielsen, C.D. Allen, D.L. Peterson, G. Ruggerson and T. Doyle, 2005: Nonlinear dynamics in ecosystem response to climate change: case studies and policy implications. *Ecological Complexity*, **2**, 357–394.
- Buttle, J., J.T. Muir and J. Frain, 2004: Economic impacts of climate change on the Canadian Great Lakes hydro-electric power producers: a supply analysis. *Can. Water Resour. J.*, **29**, 89–109.
- Calder, I.R., 1990: *Evaporation in the Uplands*. John Wiley and Sons, Chichester, 148 pp.
- Calder, I.R., 1992: Water use of eucalyptus – a review. *Growth and Water Use of Forest Plantations*, I.R. Calder, R.L. Hall and P.G. Adlard, Eds., John Wiley and Sons, Chichester, 167–179.
- Caldwell, C.R., S.J. Britz and R.M. Mirecki, 2005: Effect of temperature, elevated carbon dioxide, and drought during seed development on the isoflavone content of dwarf soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] grown in controlled environments. *J. Agr. Food Chem.*, **53**(4), 1125–1129.
- California Regional Assessment Group, 2002: *The Potential Consequences of Climate Variability and Change for California: The California Regional Assessment*. National Center for Ecological Analysis and Synthesis, University of California Santa Barbara, Santa Barbara, California, 432 pp. http://www.ncgia.ucsb.edu/pubs/CA_Report.pdf.
- Callaghan, T.V., L.O. Björn, F.S. Chapin III, Y. Chernov, T.R. Christensen, B. Huntley, R. Ims, M. Johansson, D.J. Riedlinger, S. Jonasson, N. Matveyeva, W. Oechel, N. Panikov and G. Shaver, 2005: Arctic tundra and polar desert ecosystems. *Arctic Climate Impact Assessment (ACIA): Scientific Report*, C. Symon, L. Arris and B. Heal, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 243–352.
- Camilloni, I., 2005: Tendencias climáticas. *El Cambio Climático en el Río de la Plata*, V. Barros, A. Menéndez and G.J. Nagy, Eds., CIMA/CONICET-UBA, Buenos Aires, 13–19.
- Canziani, O.F. and L.J. Mata, 2004: The fate of indigenous communities under climate change. UNFCCC Workshop on impacts of, and vulnerability and adaptation to, climate change. *Tenth Session of the Conference of Parties (COP-10)*, Buenos Aires, 3 pp.
- Caran, S.C. and J.A. Nelly, 2006: Hydraulic engineering in prehistoric Mexico. *Sci. Am. Mag.*, **October**, 8 pp.
- Carey, M., 2005: Living and dying with glaciers: people's historical vulnerability to avalanches and outburst floods in Peru. *Global Planet. Change*, **47**, 122–134.
- Cassman, K.G., A. Dobermann, D.T. Walters and H. Yang, 2003: Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, **28**, 315–358.
- CCME, 2003: *Climate, Nature, People: Indicators of Canada's Changing Climate*. Climate Change Indicators Task Group of the Canadian Council of Ministers of the Environment, Canadian Council of Ministers of the Environment Inc., Winnipeg, Canada, 51 pp.
- CDC (Centers for Disease Control), 2005: Vibrio illnesses after Hurricane Katrina: multiple states, August–September 2005. *MMWR–Morb. Mortal. Wkly. Rep.*, **54**, 928–931.
- Census Bureau, 2004: (*U. S. Census Bureau*), *NP-T1. Annual Projections of the Total Resident Population as of July 1: Middle, Lowest, Highest, and Zero International Migration Series, 1999 to 2100*. Population Division, U.S. Census Bureau, Washington, D.C. 20233, Washington DC. <http://www.census.gov/population/projections/nation/summary/np-t1.txt>.
- Cerri, C.C., M. Bernoux, C.E.P. Cerri and C. Feller, 2004: Carbon cycling and sequestration opportunities in South America: the case of Brazil. *Soil Use Manage.*, **20**, 248–254.
- Chan, N.W., 1986: Drought trends in northwestern peninsular Malaysia: is less rain falling? *Wallaceana*, **4**, 8–9.
- Chang, H., C.G. Knight, M.P. Staneva and D. Kostov, 2002: Water resource impacts of climate change in southwestern Bulgaria. *GeoJournal*, **57**, 159–168.
- Changnon, S.A., 2005: Economic impacts of climate conditions in the United States: past, present, and future – an editorial essay. *Climatic Change*, **68**, 1–9.
- Changnon, S.A. and D. Changnon, 2000: Long-term fluctuations in hail incidences in the United States. *J. Climate*, **13**, 658–664.
- Chappell, A. and C.T. Agnew 2004: Modelling climate change in West African Sahel rainfall (1931–90) as an artifact of changing station locations. *Int. J. Clim.*, **24**(5), 547–554.
- Chattopadhyay, N. and M. Hulme, 1997: Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change. *Agric. For. Meteorol.*, **87**, 55–73.
- Chauhan, M. and B. Gopal, 2001: Biodiversity and management of Keoladeo National Park (India): a wetland of international importance. *Biodiversity in Wetlands: Assessment, Function and Conservation*. Volume 2. Backhuys Publishers, Leiden, 217–256.
- Checkley, W., L.D. Epstein, R.H. Gilman, D. Figueroa, R.I. Cama, J.A. Patz and R.E. Black, 2000: Effects of El Niño and ambient temperature on hospital admissions for diarrhoeal diseases in Peruvian children. *Lancet*, **355**, 442–450.
- Cheikh, N., P.W. Miller and G. Kishore, 2000: Role of biotechnology in crop productivity in a changing environment. *Global Change and Crop Productivity*, K.R. Reddy and H.F. Hodges, Eds., CAP International, New York, 425–436.
- Chen, C., D. Gillig and B.A. McCarl, 2001: Effects of climatic change on a water dependent regional economy: a study of the Texas Edwards Aquifer. *Climatic Change*, **49**, 397–409.
- Chen, M., P. Xie, and J.E. Janowiak, 2002: Global land precipitation: a 50-yr monthly analysis based on gauge observations. *J. Hydrometeorol.*, **3**, 249–266.
- Chen, Z., S. Grasby and K. Osadetz, 2004: Relation between climate variability and groundwater levels in the upper carbonate aquifer, southern Manitoba, Canada. *J. Hydrol.*, **290**(1–2), 43–62.
- Chiew, F.H.S., T.I. Harrold, L. Sirivardeneena, R.N. Jones and R. Srikanthan, 2003: Simulation of climate change impact on runoff using rainfall scenarios that consider daily patterns of change from GCMs. *MODSIM 2003: Proc. International Congress on Modelling and Simulation*, D.A. Post, Ed., Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, Canberra ACT, Townsville, 154–159.
- Choi, O. and A. Fisher, 2003: The impacts of socioeconomic development and climate change on severe weather catastrophe losses: Mid-Atlantic Region MAR and the U.S. *Climatic Change*, **58**(1–2), 149–170.
- Chomitz, K.M. and K. Kumari, 1996: *The domestic benefits of tropical forests: a critical review emphasizing hydrological functions*. Policy Research Working Paper, World-Bank, No. WPS1601, 41 pp.
- Christensen, J.H. and O.B. Christensen, 2003: Severe summertime flooding in Europe. *Nature*, **421**, 805.
- Christensen, J.H., B. Hewitson, A. Busuioc, A. Chen, X. Gao, I. Held, R. Jones, R.K. Koli, W.-T. Kwon, R. Laprise, V.M. Rueda, L. Mearns, C.G. Menéndez, J. Räisänen, A. Rinke, A. Sarr and P. Whetton, 2007: Regional climate projections. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 847–940.
- Christensen, N.S., A.W. Wood, N. Voisin, D.P. Lettenmaier and R.N. Palmer, 2004: The effects of climate change on the hydrology and water resources of the Colorado River basin. *Climatic Change*, **62**(1–3), 337–363.

- Ciais, P., M. Reichstein, N. Viovy, A. Granier, J. Ogee, V. Allard, M. Aubinet, N. Buchmann, et al., 2005: Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, **437**, 529–533.
- City of New York, 2005: New York City's Water Supply System. The City of New York Department of Environmental Protection, New York, New York. <http://www.ci.nyc.ny.us/html/dep/html/watersup.html>.
- Clark, M.E., K.A. Rose, D.A. Levine and W.W. Hargrove, 2001: Predicting climate change effects on Appalachian trout: combining GIS and individual-based modeling. *Ecol. Appl.*, **11**, 161–178.
- Clarke, R. and J. King, 2004: *The Atlas of Water*. Earthscan, London, 128 pp.
- Cohen, S., D. Neilsen and R. Welbourn, Eds., 2004: *Expanding the dialogue on climate change and water management in the Okanagan Basin, British Columbia*. Final Report 1 January 2002 to 30 June 2004. <http://www.ires.ubc.ca/aird/documents/Okanagan2004-final.pdf>.
- Cohen, S.J., R. de Loë, A. Hamlet, R. Herrington, L.D. Mortsch and D. Shrubsole, 2003: *Integrated and cumulative threats to water availability. Threats to Water Availability in Canada*. National Water Research Institute, Burlington, Ontario, 117–127. http://www.nwri.ca/threats2full/ThreatsEN_03web.pdf.
- COHIFE, 2003: Principios rectores de Política Hídrica de la República Argentina. *Acuerdo Federal del Agua, Consejo Hídrico Federal*, COHIFE 8, August 2003, Argentina.
- Cole, C.V., K. Flach, J. Lee, D. Sauerbeck and B. Stewart, 1993: Agricultural sources and sinks of carbon. *Water Air Soil Poll.*, **70**, 111–122.
- Coleman, J.M. and O.K. Huh, 2004: *Major World Deltas: A Perspective from Space*. Coastal Studies Institute, Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana. <http://www.geol.lsu.edu/WDD/PUBLICATIONS/introduction.htm>
- Compton, K., T. Ermolieva, and J.C. Linnerooth-Bayer, 2002: Integrated Disaster Risk Management: Megacity Vulnerability and Resilience. *Proc. Second Annual IIASA-DPRI Meeting*, IIASA Laxenburg, 20 pp.
- Conde, C., D. Liverman, M. Flores, R. Ferrer, R. Araujo, E. Betancourt, G. Villareal and C. Gay, 1997: Vulnerability of rainfed maize crops in Mexico to climate change. *Clim. Res.*, **9**, 17–23.
- Conway, D., 2005: From headwater tributaries to international river: observing and adapting to climate variability and change in the Nile basin. *Global Environ. Chang.*, **15**, 99–114.
- Cook, E.R., R.D. D'Arrigo and M.E. Mann, 2002: A well-verified, multiproxy reconstruction of the winter North Atlantic Oscillation index since A.D. 1400. *J. Clim.*, **15**, 1754–1764.
- Cortazar, P.F., 1968: Documental del Perú, Departamento del Cusco, S.A. Ioppe. Ed., February 1968.
- Cosgrove, W., R. Connor and J. Kuylenstierna, 2004: Workshop 3 (synthesis): climate variability, water systems and management options. *Water Sci. Techn.*, **7**, 129–132.
- Coudrain, A., B. Francou and Z.W. Kundzewicz, 2005: Glacier shrinkage in the Andes and consequences for water resources: Editorial. *Hydrol. Sci. J.*, **50**(6), 925–932.
- Crabbe, P. and M. Robin, 2006: Institutional adaptation of water resource infrastructures to climate change in Eastern Ontario. *Climatic Change*, **78**(1), 103–133.
- Craig, M.H., I. Kleinschmidt, D. Le Sueur and B.L. Sharp, 2004: Exploring thirty years of malaria case data in KwaZulu-Natal, South Africa. Part II. The impact of non-climatic factors. *Trop. Med. Int. Health*, **9**, 1258–1266.
- Cross, J., 2001: Megacities and small towns: different perspectives on hazard vulnerability. *Environmental Hazards*, **3**, 63–80.
- CTIC, 1998: *17th Annual Crop Residue Management Survey Report*. Conservation Technology Information Center, West Lafayette, IN. <http://www.ctic.purdue.edu>.
- Cullen, P., 2002: Living with water: sustainability in a dry land. *Adelaide Festival of Arts, Getting it Right Symposium, 1–12 March, 2002*.
- Curriero, F., J.A. Patz, J.B. Rose and S. Lele, 2001: The association between extreme precipitation and waterborne disease outbreaks in the United States, 1948–1994. *Am. J. Public Health*, **91**, 1194–1199.
- Cury, P. and L. Shannon, 2004: Regime shifts in upwelling ecosystems: observed changes and possible mechanisms in the northern and southern Benguela. *Prog. Oceanogr.*, **60**, 223–243.
- CWC (Central Water Commission), 2001: *Water and related statistics*, Report of the Ministry of Water Resources, New Delhi.
- DAFF, 2006a: *National Water Initiative*. Department of Agriculture, Forestry and Fisheries, Australia. http://www.pmc.gov.au/water_reform/nwi.cfm.
- DAFF, 2006b: *Contours*. Department of Agriculture, Fisheries and Forestry, Australia, 24 pp. http://www.daff.gov.au/__data/assets/pdf_file/0020/98201/contours-dec-06.pdf.
- Dai, A. and K.E. Trenberth, 2002: Estimates of freshwater discharge from continents: Latitudinal and seasonal variations. *J. Hydrometeorol.*, **3**, 660–687.
- Dai, A., P.J. Lamb, K.E. Trenberth, M. Hulme, P.D. Jones and P. Xie, 2004a: The recent Sahel drought is real. *Int. J. Climatol.*, **24**, 1323–1331.
- Dai, A., K.E. Trenberth and T. Qian, 2004b: A global data set of Palmer Drought Severity Index for 1870–2002: relationship with soil moisture and effects of surface warming. *J. Hydrometeorol.*, **5**, 1117–1130.
- Dalal, R.C., W. Wang, G.P. Robertson and W.J. Parton, 2003: Nitrous oxide emission from Australian agricultural lands and mitigation options: a review. *Australian J. Soil Res.*, **41**, 165–195.
- Dang, H.H., A. Michaelowa and D.D. Tuan, 2003: Synergy of adaptation and mitigation strategies in the context of sustainable development: the case of Vietnam. *Clim. Policy*, **3**, S81–S96.
- DaSilva, J., B. Garanganga, V. Teveredzi, S. Marx, S. Mason and S. Connor, 2004: Improving epidemic malaria planning, preparedness and response in Southern Africa. *Malaria J.*, **3**, 37.
- Davis, J.R., Ed., 1997: *Managing Algal Blooms. Outcomes from CSIRO's Multi-Divisional Blue-Green Algae Program*. CSIRO Land and Water, Canberra, 113 pp.
- de Wit, M. and J. Stankiewicz, 2006: Changes in surface water supply across Africa with predicted climate change. *Science Express*, doi:10.1126/science.1119929. <http://www.scienceexpress.org>.
- Declerck, S., J. Vandekerkhove, L.S. Johansson, K. Muylaert, J.M. Conde-Porcuna, K. van der Gucht, C. Pérez-Martínez, T.L. Lauridsen, K. Schwenk, G. Zwart, W. Rommens, J. López-Ramos, E. Jeppesen, W. Vyverman, L. Brendonck and L. de Meester, 2005: Multi-group biodiversity in shallow lakes along gradients of phosphorus and water plant cover. *Ecology*, **86**, 1905–1915.
- Delworth, T.L. and M.E. Mann, 2000: Observed and simulated multidecadal variability in the Northern Hemisphere. *Clim. Dyn.*, **16**, 661–676.
- Dessai, S., X. Lu and J.S. Risbey, 2005: On the role of climate scenarios for adaptation planning. *Global Environ. Chang.*, **15**, 87–97.
- DEUS, 2006: *NSW Government Water Savings Fund*. Department of Energy, Utilities and Sustainability, 17 pp. <http://www.deus.nsw.gov.au/Publications/WaterSavingsFundR3Guide.pdf>.
- Dias de Oliveira, M.E., B.E. Vaughan, and E.J. Rykiel, Jr., 2005: Ethanol as fuel: energy, carbon dioxide balances, and ecological footprint. *BioScience*, **55**, 593–602.
- Diaz-Nieto, J. and R. Wilby, 2005: A comparison of statistical downscaling and climate change factor methods: impact on low flows in the river Thames, United Kingdom. *Climatic Change*, **69**, 245–268.
- Dinesh Kumar, P.K., 2006: Potential vulnerability implications of sea level rise for the coastal zones of Cochin, southwest coast of India. *Environ. Monit. Assess.*, **123**, 333–344.

- DNPC, 2005/2006: Informe de las lluvias caídas en Venezuela en los meses de Febrero y marzo de 2005 y Febrero 2006. Dirección Nacional de Protección Civil, República Bolivariana de Venezuela.
- Döll, P., 2002: Impact of climate change and variability on irrigation requirements: a global perspective. *Climatic Change*, **54**, 269–293.
- Döll, P. and M. Flörke, 2005: Global-scale estimation of diffuse groundwater recharge. *Frankfurt Hydrology Paper 03*, Institute of Physical Geography, Frankfurt University, Frankfurt.
- Döll, P., M. Flörke, M. Mörker and S. Vassolo, 2003: Einfluss des Klimawandels auf Wasserressourcen und Bewässerungswasserbedarf: eine globale Analyse unter Berücksichtigung neuer Klimaszenarien (Impact of climate change on water resources and irrigation water requirements: a global analysis using new climate change scenarios). *Klima-Wasser-Flussgebietsmanagement – im Lichte der Flut*, H.-B. Kleeberg, Ed., *Proc. Tag der Hydrologie 2003 in Freiburg, Germany, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 11–14.
- Donevska, K. and S. Dodeva, 2004: Adaptation measures for water resources management in case of drought periods. *Proc. XXIInd Conference of the Danubian Countries on the Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management*. Brno, 30 August–2 September 2004, CD-edition.
- Doran, P.T. and Co-authors, 2002: Antarctic climate cooling and terrestrial ecosystem response. *Nature*, **415**, 517–520.
- Dore, M. and I. Burton, 2001: *The Costs of Adaptation to Climate Change in Canada: A Stratified Estimate by Sectors and Regions – Social Infrastructure*. Climate Change Laboratory, Brock University, St Catharines, ON, 117 pp.
- Douglas, E.M., R.M. Vogel and C.N. Kroll, 2000: Trends in floods and low flows in the United States: impact of spatial correlation. *J. Hydrol.*, **240**(1–2), 90–105.
- Dourojeanni, A., 2000: *Procedimientos de Gestión para el Desarrollo Sustentable*. ECLAC, Santiago, 376 pp.
- Douville, H., F. Chauvin, S. Planton, J.F. Royer, D. Salas-Melia and S. Tyteca, 2002: Sensitivity of the hydrological cycle to increasing amounts of greenhouse gases and aerosols. *Clim. Dyn.*, **20**, 45–68.
- Downing, T.E., R.E. Butterfield, B. Edmonds, J.W. Knox, S. Moss, B.S. Piper, E.K. Weatherhead and the CCDeW Project Team, 2003: *Climate change and the demand for water, Research Report*. Stockholm Environment Institute, Oxford Office, Oxford.
- DPMC, 2004: *Water Reform*. Department of Prime Minister and Cabinet, Australia. <http://www.dPMC.gov.au/nwi/index.cfm>.
- Drennen, P.M., M. Smith, D. Goldsworthy and J. van Staten, 1993: The occurrence of tracheolysis in the leaves of the desiccation-tolerant angiosperm *Myronthamnus flabellifolius* Welw. *J. Plant Physiol.*, **142**, 493–496.
- du Plessis, C., D.K. Irurah and R.J. Scholes, 2003: The built environment and climate change in South Africa. *Build. Res. Inf.*, **31**(3–4), 240–256.
- Duguay, C.R. and Co-authors, 2003: Ice-cover variability on shallow lakes at high latitudes: model simulations and observations. *Hydrol. Process.*, **17**, 3465–3483.
- Duong, L.C., 2000: Lessons from severe tropical storm Linda, Workshop Report: “The Impact of El Niño and La Niña on Southeast Asia”, 21–23 February, Hanoi.
- Dwight, R.H., J.C. Semenza, D.B. Baker and B.H. Olson, 2002: Association of urban runoff with coastal water quality in Orange County, California. *Water Environ. Res.*, **74**, 82–90.
- Dyurgerov, M. and M.F. Meier, 2005: *Glaciers and Changing Earth System: A 2004 Snapshot*. 58, INSTAAR, Boulder, CO.
- Dyurgerov, M.B. and C.L. Carter, 2004: Observational evidence of increases in freshwater inflow to the Arctic Ocean. *Arct. Antarct. Alp. Res.*, **36**(1), 117–122.
- Eakin, H. and M.C. Lemos, 2006: Adaptation and the state: Latin America and the challenge of capacity – building under globalization. *Global Environ. Chang.*, **16**, 7–18.
- Easterling, W.E., 2003: Observed impact of climate change in agriculture and forestry. *IPCC Workshop on the Detection and Attribution of the Effects of Climate Change*, GISS, New York, 54–55.
- Ebi, K.L., D.M. Mills, J.B. Smith and A. Grambsch, 2006: Climate change and human health impacts in the United States: an update on the results of the US National Assessment. *Environ. Health Persp.*, **114**(9), 1318–1324.
- ECF (European Climate Forum) and Potsdam Institute, 2004: *Report on the Beijing Symposium on Article 2*, September, 2004.
- Eckhardt, K. and U. Ulbrich, 2003: Potential impacts of climate change on groundwater recharge and streamflow in a central European low mountain range. *J. Hydrol.*, **284**(1–4), 244–252.
- EEA, 2004: *Impacts of Europe's changing climate: an indicator-based assessment*. EEA Report No 2/2004, European Environment Agency, Copenhagen, Denmark (or: Luxembourg, Office for Official Publications of the EC), 107 pp.
- EEA, 2005: *Vulnerability and adaptation to climate change in Europe*. EEA Technical Report No. 7/2005, European Environment Agency, Copenhagen, Denmark (or: Luxembourg, Office for Official Publications of the EC).
- Eheart, J.W. and D.W. Tornil, 1999: Low-flow frequency exacerbation by irrigation withdrawals in the agricultural Midwest under various climate change scenarios. *Water Resour. Res.*, **35**, 2237–2246.
- Eid, H.M., S.M. El-Marsafawy and S.A. Ouda, 2006: *Assessing the Impacts of Climate Change on Agriculture in Egypt: a Ricardian Approach*. Centre for Environmental Economics and Policy in Africa (CEPA) Discussion Paper No. 16, Special Series on Climate Change and Agriculture in Africa, University of Pretoria, Pretoria, 1–33.
- Eisenreich, S.J., Ed., 2005: *Climate Change and the European Water Dimension*. Report to the European Water Directors. European Commission-Joint Research Centre, Ispra, 253 pp.
- Eitzinger, J., M. Stastna, Z. Zalud and M. Dubrovsky, 2003: A simulation study of the effect of soil water balance and water stress in winter wheat production under different climate change scenarios. *Agric. Water Manage.*, **61**, 195–217.
- El-Gindy, A., A.A. Abdel Azziz and E.A. El-Sahaar, 2001: *Design of Irrigation and Drainage Networks*. Faculty of Agriculture lectures, Ain Shams University, 28 pp (in Arabic).
- Ellis, J., 1995: Climate variability and complex ecosystem dynamics; implications for pastoral development. *Living with Uncertainty: New Directions in Pastoral Development in Africa*, I. Scoones, Ed., Intermediate Technology Publications, London, 37–46.
- Elpiner, L.I., 2004: Scenarios of human health changes under global hydroclimatic transformations. *Proc. Climate Change and Public Health in Russia in the XXI Century*. April 5–6, 2004, Publishing Company “Adamant”, Moscow, 195–199 (in Russian).
- Elsasser, H. and R. Burki, 2002: Climate change as a threat to tourism in the Alps. *Clim. Res.*, **20**, 253–257.
- Elsasser, H., R. Bürki and B. Abegg, 2003: *Fifth World Conference on Sport and the Environment*, IOC/UNEP, Turin. http://www.unep.org/sport_env/Documents/torinobuerki.doc.
- Enfield, D.B., A.M. Mestas-Núñez and P.J. Trimble, 2001: The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental US. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 2077–2080.
- Environment Canada, 2001: *Threats to sources of drinking water and aquatic ecosystems health in Canada. National Water Research Report No.1*. National Water Resources Research Institute, Burlington, Ontario, 72 pp.
- EPIQ (Environmental Policy and Institutional Strengthening Indefinite

- Quantity, Water Policy Reform Activity, Agricultural Policy Reform Programme and Market-Based Incentives Team), 2002: Economic Instruments for Improved Water Resources Management in Egypt, Prepared for the United States Agency for International Development/Egypt, No. PCE-I-00-96-00002-00, 173 pp.
- Ericson, J.P., C.J. Vorosmarty, S.L. Dingman, L.G. Ward and M. Meybeck, 2006: Effective sea-level rise and deltas: causes of change and human dimension implications. *Global Planet. Change*, **50**, 63–82.
- Etchevers, P., C. Golaz, F. Habets and J. Noilhan, 2002: Impact of a climate change on the Rhone river catchment hydrology. *J. Geophys. Res.*, **107**, 4293, doi:10.1029/2001JD000490.
- Evans, E., R. Ashley, J. Hall, E. Penning-Rowsell, A. Saul, P. Sayers, C. Thorne and A. Watkinson, 2004: *Foresight. Future Flooding. Scientific Summary: Volume 1. Future Risks and their Drivers*. Office of Science and Technology, London.
- Falconer, I.R., 1997: Blue-green algae in lakes and rivers: their harmful effects on human health. *Australian Biologist*, **10**(2), 107–110.
- FAO (Food and Agriculture Organization), 2003: *World Agriculture Towards 2015/2030*. http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=/docrep/004/y3557e/y3557e00.htm.
- FAO (Food and Agriculture Organization), 2004a: *Yearbook of Fishery Statistics 2002*. Capture Production, Vol. 94/1, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 654 pp.
- FAO (Food and Agriculture Organization), 2004b: *Yearbook of Fishery Statistics 2002*, Aquaculture production, Vol. 94/2, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 206 pp.
- FAO (Food and Agriculture Organization), 2004c: *Data Base*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- FAO (Food and Agriculture Organization), 2006: Third Session of the Sub-Committee on Aquaculture: Committee on Fisheries (COFI). Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), New Delhi, India, 4–8 September.
- Faruqui, N.I., A.K. Biswas and M.J. Bino, Eds., 2001: *Water Management in Islam*. United Nations University Press, Tokyo, 149 pp.
- Fay, M., F. Ghesquiere and T. Solo, 2003b: Natural disasters and the urban poor. *IRDB En Breve*, **32**, The World Bank, 4 pp.
- Fay, P.A., J.D. Carlisle, A.K. Knapp, J.M. Blair and S.L. Collins, 2003a: Productivity responses to altered rainfall patterns in a C-4 dominated grassland. *Oecologia*, **137**(2), 245–251.
- Fedorov, A. and P. Konstantinov, 2003: Observations of surface dynamics with thermokarst initiation, Yukechi site, Central Yakutia. *Proc. VII International Permafrost Conference*, Switzerland, 21–25 July, 139–243.
- Feng, S. and Q. Hu, 2004: Changes in agro-meteorological indicators in the contiguous United States: 1951–2000. *Theor. Appl. Climatol.*, **78**, 247–264.
- Ferguson, G. and S.S. George, 2003: Historical and estimated ground water levels near Winnipeg, Canada and their sensitivity to climatic variability. *J. Am. Water Resour. As.*, **39**, 1249–1259.
- Fink, A.H., T. Brücher, A. Krüger, G.C. Leckebusch, J.G. Pinto, and U. Ulbrich, 2004: The 2003 European summer heatwaves and drought: synoptic diagnosis and impacts. *Weather*, **59**, 209–216.
- Fischer, G., M. Shah and H.V. Velthuis, 2002a: *Climate Change and Agricultural Vulnerability*. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, 152 pp.
- Fischer, G., H. van Velthuis, M. Shah and F.O. Nachtergaele, 2002b: *Global Agro-ecological Assessment for Agriculture in the 21st Century: Methodology and Results*. Research Report RR-02-02. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, 119 pp and CD-Rom.
- Fischer, G., F.N. Tubiello, H. van Velthuis and D. Wiberg, 2006: Climate change impacts on irrigation water requirements: global and regional effects of mitigation, 1990–2080. *Tech. Forecasting Soc. Ch.*, **74**, doi:10.1016/j.techfore.2006.05.021.
- Fish, M.R., I.M. Cote, J.A. Gill, A.P. Jones, S. Renshoff and A. Watkinson, 2005: Predicting the impact of sea level rise on Caribbean sea turtle nesting habitat. *Conserv. Biol.*, **19**(2), 482–491.
- Fleury, M.D., D. Charron, J. Holt, B. Allen and A. Maarouf, 2006: The role of ambient temperature in foodborne disease in Canada using time series methods *Int. J. Biometeorol.*, **50**, doi:10.1007/s00484-00006-00028-00489.
- Folland, C. K., J.A. Renwick, M.J. Salinger, N. Jiang and N.A. Rayner, 2003: Trends and variations in South Pacific islands and ocean surface temperatures. *J. Climate*, **16**, 2859–2874.
- Follett, R.F., 2001: Organic carbon pools in grazing land soils. *The Potential of U.S. Grazing Lands to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect*. R.F. Follett, J.M. Kimble and R. Lal, Eds., Lewis Publishers, Boca Raton, FL, 65–86.
- Fosaa, A.M., M.T. Sykes, J.E. Lawesson and M. Gaard, 2004: Potential effects of climate change on plant species in the Faroe Islands, *Global Ecol. Biogeogr.*, **13**, 427–437.
- Francou, B. and C. Vincent, 2006: Les glaciers à l'épreuve du climat. IRD/BELIN, Paris, 274 pp.
- Francou, B., M. Vuille, P. Wagnon, J. Mendoza and J.-E. Sicart, 2003: Tropical climate change recorded by a glacier in the central Andes during the last decades of the twentieth century: Chacaltaya, Bolivia, 16°S. *J. Geophys. Res.*, **108**, doi:10.1029/2002JD002959.
- Frauenfeld, O.W., T. Zhang, R.G. Barry and D. Gilichinsky, 2004: Interdecadal changes in seasonal freeze and thaw depths in Russia. *J. Geophys. Res.*, **109**, doi:10.1029/2003JD004245.
- Freibauer, A., M. Rounsevell, P. Smith and A. Verhagen, 2004: Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe. *Geoderma*, **122**, 1–23.
- Frich, P., L.V. Alexander, P. Della-Marta, B. Gleason, M. Haylock, A.M.G.K. Tank and T. Peterson, 2002: Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Clim. Res.*, **19**, 193–212.
- Frolov, I., G. Alekseev and A. Danilov, 2004: Climate change in polar areas. *Proc. World Climate Change Conference*, Moscow, 29 September–3 October 2003, 484–490.
- Fukushima, Y., 1987: Influence of forestation on mountainside at granite highlands. *Water Sci.*, **177**, 17–34.
- Gagnon, A.S., K.E. Smoyer-Tomic and A. Bush, 2002: The El Niño Southern Oscillation and malaria epidemics in South America. *Int. J. Biometeorol.*, **46**, 81–89.
- Gallagher, P. and L. Wood, 2003: *Proc. World Summit on Salmon*, June 10–13, 2003, Vancouver, British Columbia. <http://www.sfu.ca/cstudies/science/summit.htm>.
- Gardner, T.A., I. Cote, G. Gill, A. Grant and A. Watkinson, 2003: Long-term region-wide declines in Caribbean corals. *Science*, **301**, 958–960.
- Gash, J.H.C. and W.J. Shuttleworth, 1991: Tropical deforestation: albedo and the surface energy balance. *Climatic Change*, **19**, 123–133.
- Gavriliev, P.P. and P.V. Efremov, 2003: Effects of cryogenic processes on Yakutian landscapes under climate warming. *Proc. VII International Permafrost Conference*, Switzerland, 21–25 July, 277–282.
- GDE (General Directorate of Environment, Comoros), 2002: *Initial National Communication on Climate Change*, Union des Comoros, Ministry of Development, Infrastructure, Post and Telecommunications.
- Gedney, N., P.M. Cox, R.A. Betts, O. Boucher, C. Huntingford and P.A. Stott, 2006: Detection of a direct carbon dioxide effect in continental river runoff records. *Nature*, **439**(7078), 835–838.
- Genovese, G., C. Lazar and F. Micale, 2005: Effects of observed climate fluctuation on wheat flowering as simulated by the European

- crop growth monitoring system (CGMS). *Proc. Workshop on Adaptation of Crops and Cropping Systems to Climate Change, 7-8 November 2005, Dalum Landbrugsskole, Odense, Denmark*. Nordic Association of Agricultural Scientists, 12 pp.
- Genthon, C., G. Krinner and M. Sacchetti, 2003: Interannual Antarctic tropospheric circulation and precipitation variability. *Clim. Dyn.*, **21**, 289–307.
- GEO-3, 2003: *Global Environmental Outlook*. United Nations Environmental Program, 279 pp. http://www.unep.org/geo/pdfs/GEO_lac2003English.pdf.
- Georges, C., 2004: The 20th century glacier fluctuations in the Cordillera Blanca (Perú). *Arct. Antarct. Alp. Res.*, **36**(1), 100–107.
- Geres, D., 2004: Analysis of the water demand management. *Proc. XXII Conference of the Danubian Countries on the Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management*. Brno, 30 August–2 September 2004. CD-edition.
- Gerolamo, M. and M.F. Penna, 1999: Os primeiros cinco anos da setima pandemia de cólera no Brasil. *Informe Epid. SUS*, **8**(3), 49–58.
- Gerten, D., S. Schaphoff, U. Haberlandt, W. Lucht and S. Sitch, 2004: Terrestrial vegetation and water balance: hydrological evaluation of a dynamic global vegetation model. *J. Hydrol.*, **286**(1–4), 249–270.
- Gibson, J.J., T.D. Prowse and D.L. Peters, 2006: Partitioning impacts of climate and regulation on water level variability in Great Slave Lake. *J. Hydrol.*, **329**, 196–206.
- Gilman, E., H. Van Lavieren, J. Ellison, V. Jungblut, L. Wilson, F. Ereki, G. Brighthouse, J. Bungitak, E. Dus, M. Henry, I. Sauni, M. Kilman, E. Matthews, N. Teariki-Ruatu, S. Tukia, K. Yuknavage, 2006: Pacific island mangroves in a changing climate and rising sea. *UNEP Regional Sea Reports and Studies*, **179**, United Nations Environment Programme, Regional Sea 44 Programme, Nairobi, 45 pp.
- Giorgi, F., X. Bi and J. Pal, 2004: Mean, interannual variability and trend in a regional climate change experiment over Europe. II: Climate change scenarios 2071–2100. *Clim. Dyn.*, **23**, doi:10.1007/s00382-004-0467-0.
- Gitay, H., S. Brown, W. Easterling and B. Jallow, 2001: Ecosystems and their goods and services. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, J.J. McCarthy, O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken and K.S. White, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 237–342.
- Gitay, H., A. Suárez, R.T. Watson and D.J. Dokken, Eds., 2002: *Climate Change and Biodiversity*. IPCC Technical Paper V, IPCC, Geneva, 85 pp.
- Githeko, A.K. and W. Ndegwa, 2001: Predicting malaria epidemics in Kenyan highlands using climate data: a tool for decision makers. *Global Change Human Health*, **2**, 54–63.
- Glantz, M.H., Ed., 2001: *Once Burned, Twice Shy? Lessons Learned from the 1997–98 El Niño*, United Nations University, 294 pp.
- Gnadlinger, J., 2003: *Captação e Manejo de Água de Chuva e Desenvolvimento Sustentável do Semi-Árido Brasileiro - Uma Visão Integrada*, 4º Simpósio Brasileiro de captação e Manejo de água de chuva. 9-12/07/2003. Juazeiro, BA, 2003.
- Goldenberg, S.B. and Co-authors, 2001: The recent increase in Atlantic hurricane activity: causes and implications. *Science*, **293**, 474–479.
- Golubev, V.S. and Co-authors, 2001: Evaporation changes over the contiguous United States and the former USSR: a reassessment. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 2665–2668.
- Gonzalez, P., 2001. Desertification and a shift of forest species in the West African Sahel. *Clim. Res.*, **17**, 217–228
- Good, P., L. Bärring, C. Giannakopoulos, T. Holt and J. Palutikof, 2006: Non-linear regional relationships between climate extremes and annual mean temperatures in model projections for 1961–2099 over Europe. *Clim. Res.*, **31**, 19–34.
- Gordon, W. and J.S. Famiglietti, 2004: Response of the water balance to climate change in the United States over the 20th and 21st centuries: results from the VEMAP phase 2 model intercomparisons. *Global Biogeochem. Cy.*, **18**(1), GB1030.
- Gorham, E., 1991: Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming. *Ecol. Appl.*, **1**, 182–195.
- Government of South Australia, 2005: *Water Proofing Adelaide: A Thirst for Change 2005–2025*. Government of SA, 64 pp. http://www.waterproofingadelaide.sa.gov.au/pdf/wpa_Strategy.pdf.
- Government of Western Australia, 2003: *Securing our Water Future: A State Water Strategy for Western Australia*. Government of WA, 64 pp. http://dows.lincdigital.com.au/files/State_Water_Strategy_complete_001.pdf.
- Government of Western Australia, 2006: *Draft State Water Plan*. Government of WA, 88 pp. <http://dows.lincdigital.com.au/files/Draft%20State%20Water%20Plan.pdf>.
- Graham, N.A.J., S.K. Wilson, S. Jennings, N.V.C. Polunin, J.P. Bijoux and J. Robinson, 2006: Dynamic fragility of oceanic coral reef ecosystems. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, **103**, 8425–8429.
- Graves, H. M. and M. C. Phillipson, 2000: Potential implications of climate change in the built environment. *FBE Report 2*. Building Research Establishment Press, London, 74 pp.
- Green, R.E., S.J. Cornell, J.P.W. Scharlemann and A. Balmford, 2005: Farming and the fate of wild nature. *Science*, **307**, 550–555.
- Greenwood, E.A.N., L.B. Klein, J.D. Beresford and G.D. Watson, 1985: Differences in annual evaporation between grazed pasture and eucalyptus species in plantation on a saline farm catchment. *J. Hydrol.*, **78**, 261–278.
- Gregorich, E.G., P. Rochette, A.J. van den Bygaart and D.A. Angers, 2005: Greenhouse gas contributions of agricultural soils and potential mitigation practices in Eastern Canada. *Soil and Tillage Res.*, **83**, 53–72.
- Griffiths, G.M., M.J. Salinger and I. Leleu, 2003: Trends in extreme daily rainfall across the South Pacific and relationship to the South Pacific Convergence Zone. *J. Climatol.*, **23**, 847–869.
- Gritti, E.S., B. Smith and M.T. Sykes., 2006: Vulnerability of Mediterranean Basin ecosystems to climate change and invasion by exotic plant species. *J. Biogeogr.*, **33**, 145–157.
- Groisman, P.Y., R.W. Knight, T.R. Karl, D.R. Easterling, B. Sun and J.H. Lawrimore, 2004: Contemporary changes of the hydrological cycle over the contiguous United States: trends derived from *in situ* observations. *J. Hydrometeorol.*, **5**, 64–85.
- Groisman, P.Y. and Co-authors, 2005: Trends in intense precipitation in the climate record. *J. Clim.*, **18**, 1326–1350.
- Gruza, G. and E. Rankova, 2004: Detection of changes in climate state, climate variability and climate extremity, in *Proc. World Climate Change Conference*, 29 September–3 October, 2003, Moscow, 90–93.
- Gueye, L., M. Bzioul and O. Johnson, 2005: Water and sustainable development in the countries of Northern Africa: coping with challenges and scarcity. *Assessing Sustainable Development in Africa*, Africa's Sustainable Development Bulletin, Economic Commission for Africa, Addis Ababa, 24–28.
- Guo, Q.X., J.L. Li, J.X. Liu and Y.M. Zhang, 2001: The scientific significance of the forest vegetation ecotone between Daxing'an and Xiaoxing'an Mountains to global climate change study. *J. Forestry, Northeast University*, **29**(5), 1–4.
- Gupta, S.K. and R.D. Deshpande, 2004: Water for India in 2050: first-order assessment of available options. *Current Sci.*, **86**(9), 1216–1224.
- Gutiérrez Teira, B., 2003: Variaciones de las comunidades y poblaciones de macroinvertebrados del tramo alto del río manzanares a causa de la temperatura. Posibles efectos del cambio climático. *Tesis*

- Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid.
- GWP (Global Water Partnership), 2002: *Dialogue on Effective Water Governance*, GWP, 6 pp.
- Haerberli, W. and C. Burn, 2002: Natural hazards in forests - glacier and permafrost effects as related to climate changes. *Environmental Change and Geomorphic Hazards in Forests*, R.C. Sidle, Ed., IUFRO Research Series, 9, 167-202.
- Hales S., N. de Wett, J. Maindonald and A. Woodward, 2002: Potential effect of population and climates change models on global distribution of dengue fever: an empirical model. *Lancet*, **360**, 830-834.
- Hall, C.J. and C.W. Burns, 2002: Mortality and growth responses of *Daphnia carinata* to increases in temperature and salinity. *Freshw. Biol.*, **47**, 451-458.
- Hall, G., R. D'Souza and M. Kirk, 2002: Foodborne disease in the new millennium: out of the frying pan and into the fire? *Med. J. Australia*, **177**, 614-618.
- Hall, J.W., P.B. Sayers and R.J. Dawson, 2005: National-scale assessment of current and future flood risk in England and Wales. *Nat. Hazards*, **36**, 147-164.
- Hamlet, A.F., 2003: The role of transboundary agreements in the Columbia River Basin: an integrated assessment in the context of historic development, climate, and evolving water policy. *Climate, Water, and Transboundary Challenges in the Americas*, H. Diaz and B. Morehouse, Eds., Kluwer Press, Dordrecht, 263-289.
- Harding, R.J., 1992: The modification of climate by forests. *Growth and Water Use of Forest Plantations*, I.R. Calder, R.L. Hall and P.G. Adlard, Eds., John Wiley and Sons, Chichester, 332-346.
- Hareau, A., R. Hofstadter and A. Saizar, 1999: Vulnerability to climate change in Uruguay: potential impacts on the agricultural and coastal resource sectors and response capabilities. *Clim. Res.*, **12**, 185-193.
- Harman, J., M. Gawith and M. Calley, 2005: Progress on assessing climate impacts through the UK Climate Impacts Programme. *Weather*, **60**, 258-262.
- Harrison, G.P. and H.W. Whittington, 2002: Susceptibility of the Batoka Gorge hydroelectric scheme to climate change. *J. Hydrol.*, **264**(1-4), 230-241.
- Hartmann, J., K. Ebi, J. McConnell, N. Chan and J.P. Weyant, 2002: Stable malaria transmission in Zimbabwe under different climate change scenarios. *Global Change and Human Health*, **3**, 2-14.
- Hatfield, J.L. and J.H. Pruger, 2004: Impacts of changing precipitation patterns on water quality. *J. Soil Water Conserv.*, **59**, 51-58.
- Hay, S.I., D.J. Rogers, S.E. Randolph, D.I. Stern, J. Cox, G.D. Shanks and R.W. Snow, 2002a: Hot topic or hot air? Climate change and malaria resurgence in East African highlands. *Trends Parasitol.*, **18**, 530-534.
- Hay, S.I., J. Cox, D.J. Rogers, S.E. Randolph, D.I. Stern, G.D. Shanks, M.F. Myers and R.W. Snow, 2002b: Climate change and the resurgence of malaria in the East African highlands. *Nature*, **415**, 905-909.
- Hay, S.I., G.D. Shanks, D.I. Stern, R.W. Snow, S.E. Randolph and D.J. Rogers, 2005: Climate variability and malaria epidemics in the highlands of East Africa. *Trends Parasitol.*, **21**, 52-53.
- Hayhoe, K. and Co-authors, J.H., 2004: Emissions pathways, climate change, and impacts on California. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, **101**, 12422-12427.
- Haylock, M.R. and C.M. Goodess, 2004: Interannual variability of extreme European winter rainfall and links with mean large-scale circulation. *Int. J. Climatol.*, **24**, 759-776.
- Haylock, M.R., T. Peterson, L.M. Alves, T. Ambrizzi, Y.M.T. Anunciação, J. Baez, V.R. Barros, M.A. Berlato and Co-authors, 2006: Trends in total and extreme South American rainfall 1960-2000 and links with sea surface temperature. *J. Climate*, **19**, 1490-1512.
- Helgason, B.L., H.H. Janzen, M.H. Chantigny, C.F. Drury, B.H. Ellert, E.G. Gregorich, Lemke, E. Pattey, P. Rochette and C. Wagner-Riddle, 2005: Toward improved coefficients for predicting direct N₂O emissions from soil in Canadian agroecosystems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **71**, 7-99.
- Helms, M., B. Büchele, U. Merkel and J. Ihringer, 2002: Statistical analysis of the flood situation and assessment of the impact of diking measures along the Elbe (Labe) river. *J. Hydrol.*, **267**, 94-114.
- Hemp, A., 2005: Climate change-driven forest fires marginalize the impact of ice cap wasting on Kilimanjaro. *Glob. Change Biol.*, **11**, 1013-1023.
- Hendy, C. and J. Morton, 2001: Drought-time grazing resources in Northern Kenya. *Pastoralism, Drought and Planning: Lessons from Northern Kenya and Elsewhere*, J. Morton, Ed., Natural Resources Institute, Chatham, 139-179.
- Herath, S. and U. Ratnayake, 2004: Monitoring rainfall trends to predict adverse impacts: a case study from Sri Lanka (1964-1993). *Global Environ. Change*, **14**, 71-79.
- Herron, N., R. Davis and R. Jones, 2002: The effects of large-scale afforestation and climate change on water allocation in the Macquarie River catchment, NSW, Australia. *J. Environ. Manage.*, **65**, 369-381.
- Hewitt, K., 2005: The Karakoram anomaly? Glacier expansion and the "elevation effect", Karakoram Himalaya. *Mountain Research and Development*, **25**(4), 332-340.
- Hibbert, A.R., 1967: Forest treatment effects on water yield. *Forest Hydrology. Proc. International Symposium on Forest Hydrology*, W.E. Sopper and H.W. Lull, Eds., Forest hydrology, Pergamon Press, London, 527-543.
- Higashi, H., K. Dairaku and T. Matsuura, 2006: Impacts of global warming on heavy precipitation frequency and flood risk. *Jour. Hydrosience and Hydraulic Engineering*, **50**, 205-210.
- Hild, C. and V. Stordhal, 2004: Human health and well-being. *Arctic Human Development Report (AHDR)*. N. Einarsson, J.N. Larsen, A. Nilsson and O.R. Young, Eds., Steffanson Arctic Institute, Akureyri, 155-168 pp.
- Hinzman, L., N. Bettez, W. Bolton, F. Chapin, M. Dyurgerov, C. Fastie, B. Griffith, R. Hollister and Co-authors., 2005: Evidence and implications of recent climate change in northern Alaska and other Arctic regions. *Climatic Change*, **72**, 251-298.
- Hoanh, C.T., H. Guttman, P. Droogers and J. Aerts, 2004: Will we produce sufficient food under climate change? Mekong Basin (South-east Asia). *Climate Change in Contrasting River Basins: Adaptation Strategies for Water, Food, and Environment*, Aerts, J.C.J.H. Aerts and P. Droogers, Eds., CABI Publishing, Wallingford, 157-180.
- Hobbins, M.T., J.A. Ramirez, and T.C. Brown, 2004: Trends in pan evaporation and actual evapotranspiration across the conterminous U.S.: Paradoxical or complementary? *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L13503, doi:10/10029/2004GL019846.
- Hock, R., P. Jansson and L. Braun, 2005: Modelling the response of mountain glacier discharge to climate warming. *Global Change and Mountain Regions: A State of Knowledge Overview*. Advances in Global Change Series, U.M. Huber, M.A. Reasoner and H. Bugmann, Eds., Springer, Dordrecht, 243-252.
- Hodgkins, G.A., R.W. Dudley and T.G. Huntington, 2003: Changes in the timing of high river flows in New England over the 20th century. *J. Hydrol.*, **278**(1-4), 244-252.
- Hodgkins, G.A., R.W. Dudley and T.G. Huntington, 2005: Summer low flows in New England during the 20th century. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, **41**(2), 403-412.
- Hoelzle, M., W. Haerberli, M. Dischl and W. Peschke, 2003: Secular glacier mass balances derived from cumulative glacier length

- changes. *Global Planet. Change*, **36**, 295–306.
- Holden, N.M., A.J. Brereton, R. Fealy and J. Sweeney, 2003: Possible change in Irish climate and its impact on barley and potato yields. *Agric. For. Meteorol.*, **116**, 181–196.
- Hood, A. and Co-authors, 2002: Options for Victorian Agriculture in a “New” Climate: *A Pilot Study Linking Climate Change Scenario Modelling and Land Suitability Modelling*. Volume One - Concepts and Analysis. 62 pp. Volume Two - Modelling Outputs. Department of Natural Resources and Environment – Victoria, Australia, 83 pp.
- Hoogwijk, M., 2004: *On the Global and Regional Potential of Renewable Energy Sources*. PhD thesis, Copernicus Institute, Utrecht University, Utrecht, 256 pp.
- Hoogwijk, M., A. Faaij, B. Eickhout, B. de Vries and W. Turkenburg, 2005: Potential of biomass energy out to 2100, for four IPCC SRES land-use scenarios. *Biomass and Bioenergy*, **29**, 225–257.
- Hooijer, M., F. Klijn, G.B.M. Pedroli and A.G. van Os, 2004: Towards sustainable flood risk management in the Rhine and Meuse river basins: synopsis of the findings of IRMA-SPONGE. *River Res. Appl.*, **20**, 343–357.
- Hortle, K. and S. Bush, 2003: Consumption in the Lower Mekong Basin as a measure of fish yield. *New Approaches for the Improvement of Inland Capture Fishery Statistics in the Mekong Basin*, T. Clayton, Ed., FAO RAP Publication 2003/01, Bangkok, 76–88.
- Howe, A.D., S. Forster, S. Morton, R. Marshall, K.S. Osborn, P. Wright and P.R. Hunter, 2002: *Cryptosporidium* oocysts in a water supply associated with a cryptosporidiosis outbreak. *Emerg. Infect. Dis.*, **8**, 619–624.
- Howe, C., R.N. Jones, S. Maheepala and B. Rhodes, 2005: *Implications of Potential Climate Change for Melbourne’s Water Resources*. CSIRO Urban Water, CSIRO Atmospheric Research and Melbourne Water, Melbourne, 26 pp.
- Hu, D.X., W.Y. Han and S. Zhang, 2001: *Land–Ocean Interaction in Changjiang and Zhujiang Estuaries and Adjacent Sea Areas*. China Ocean Press, Beijing, 218 pp (in Chinese).
- Huang, H.J., F. Li, J.Z. Pang, K.T. Le and S.G. Li, 2005: *Land–Ocean Interaction between Huanghe Delta and Bohai Gulf and Yellow Sea*. China Science Press, Beijing, 313 pp (in Chinese).
- Huang, Z.G. and Xie X.D., 2000: *Sea Level Changes in Guangdong and its Impacts and Strategies*. Guangdong Science and Technology Press, Guangzhou, 263 pp.
- Huffaker, R., 2005: Finding a modern role for the prior appropriation doctrine in the American West. *Water Institutions: Policies, Performance and Prospects*, C. Gopalakrishnan, C. Tortajada and A.K. Biswas, Eds., Springer, Berlin, 187–200.
- Hunt, M., 2005: *Flood Reduction Master Plan*, Presented to the City of Peterborough City Council, Peterborough, Canada.
- Hunter, P.R., 2003: Climate change and waterborne and vector-borne disease. *J. Appl. Microbiol.*, **94**, 37S–46S.
- Huntington, T.G., 2006: Evidence for intensification of the global water cycle: review and synthesis. *J. Hydrol.*, **319**, 83–95.
- Hurrell, J.W. and Co-authors, 2003: An overview of the North Atlantic Oscillation. *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact*, J.W. Hurrell and Co-authors, Eds., Geophysical Monograph 134, American Geophysical Union, Washington, DC, 1–35.
- Hurtado-Díaz, M., H. Riojas-Rodríguez, S.J. Rothenberg, H. Gomez-Dantés and E. Cifuentes-García, 2006: Impacto de la variabilidad climática sobre la incidencia del dengue en México. *International Conference on Environmental Epidemiology and Exposure*, Paris.
- Huston, M.A. and G. Marland, 2003: Carbon management and biodiversity. *J. Environ. Manage.*, **67**, 77–86.
- Hyvarinen, V., 2003: Trend and characteristics of hydrological time series in Finland. *Nordic Hydrol.*, **34**, 71–91.
- Iafiazova, R.K., 1997: Climate change impact on mud flow formation in Trans-Ili Alatau mountains. *Hydrometeorology and Ecology*, **3**, 12–23 (in Russian).
- ICID (International Commission on Irrigation and Drainage, New Delhi), 2005: *Water Policy Issues of Egypt*, Country Policy Support Programme, 36 pp.
- Iglesias, A., T. Estrela and F. Gallart, 2005: Impactos sobre los recursos hídricos. *Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático*, J.M. Moreno, Ed., Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 303–353.
- Inouye, D.W., B. Barr, K.B. Armitage and B.D. Inouye, 2000: Climate change is affecting altitudinal migrants and hibernating species. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, **97**(4), 1630–1633.
- Instanes, A. and Co-authors, 2005: Infrastructure: buildings, support systems, and industrial facilities. *Arctic Climate Impact Assessment, ACIA*. C. Symon, L. Arris and B. Heal, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 907–944.
- IOCI, 2002: *Climate Variability and Change in SouthWest Western Australia*. Indian Ocean Climate Initiative. Perth, Australia, 36 pp. http://www.ioci.org.au/publications/pdf/IOCL_CVCSW02.pdf.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2000: *Land Use, Land-Use Change and Forestry*, R. T. Watson, I. R. Noble, B. Bolin, N. H. Ravindranath, D. J. Verardo and D. J. Dokken, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 375 pp.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2001a: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell and C.A. Johnson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 881 pp.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2001b: *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, J.J. McCarthy, O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken and K.S. White, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 1032 pp.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2001c: *Climate Change 2001: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, B. Metz, O. Davidson, R. Swart and J. Pan, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 760 pp.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007a: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 996 pp.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007b: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 976 pp.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007c: *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, B. Metz, O. Davidson, P.Bosch, R. Dave and L. Meyer, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 851 pp.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007d: *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Core Writing Team, R.K. Pachauri and A. Reisinger, Eds., IPCC, Geneva, 102 pp.
- IRDB, 2000: *Gestión de los Recursos Hídricos de Argentina*.

- Elementos de Política para su Desarrollo Sustentable en el siglo XXI. Oficina Regional de América Latina y Caribe. Unidad Departamental de Argentina y los Grupos de Finanzas, Sector Privado y Infraestructura, y Medio Ambiente y Desarrollo Social Sustentable. Informe No. 20.729-AR. August 2000.
- Isensee, A.R. and A.M. Sadeghi, 1996: Effect of tillage reversal on herbicide leaching to groundwater. *Soil Sci.*, **161**, 382-389.
- Ivanov, B. and T. Maximov, Eds., 2003: *Influence of Climate and Ecological Changes on Permafrost Ecosystems*. Yakutsk Scientific Center Publishing House, Yakutsk, 640 pp.
- Ivey, J.L., J. Smithers, R.C. de Loe and R.D. Kreuzwiser, 2004: Community capacity for adaptation to climate-induced water shortages: linking institutional complexity and local actors. *Environ. Manage.*, **33**(1), 36-47.
- Izrael, Y.A. and Y.A. Anokhin, 2001: Climate change impacts on Russia. *Integrated Environmental Monitoring*, Nauka, Moscow, 112-127 (in Russian with an English abstract).
- Izrael, Y.A., Y.A. Anokhin and A.V. Pavlov, 2002: Permafrost evolution and the modern climate change. *Meteorol. Hydrol.*, **1**, 22-34.
- Jackson, R.B., E.G. Jobbágy, R. Avissar, S. Baidya Roy, D. Barrett, C.W. Cook, K.A. Farley, D.C. le Maitre, B.A. McCarl and B.C. Murray, 2005: Trading water for carbon with biological carbon sequestration. *Science*, **310**, 1944-1947.
- Jansson, P., R. Hock and T. Schneider, 2003: The concept of glacier storage: a review. *J. Hydrol.*, **282**, 116-129.
- Jasper, K., P. Calanca, D. Gyalistras and J. Fuhrer, 2004: Differential impacts of climate change on the hydrology of two alpine rivers. *Clim. Res.*, **26**, 113-125.
- Jenkins, B., 2006: Overview of Environment Canterbury water issues. managing drought in a changing climate. *Royal Society of New Zealand Drought Workshop, 10 April 2006*, Christchurch, NZ. http://www.rsnz.org/advisory/nz_climate/workshopApr2006/.
- Jeppesen, E., J.P. Jensen and M. Søndergaard, 2003: Climatic warming and regime shifts in lake food webs: some comments. *Limnol. Oceanogr.*, **48**, 1346-1349.
- Jiménez, B., 2003: Health risks in aquifer recharge with recycle water. *State of the Art Report Health Risk in Aquifer Recharge using Reclaimed Water*, R. Aertgeerts and A. Angelakis, Eds., WHO Regional Office for Europe, 54-172.
- Jin, Z.Q., C.L. Shi, D.K. Ge and W. Gao, 2001: Characteristic of climate change during wheat growing season and the orientation to develop wheat in the lower valley of the Yangtze River. *Jiangsu J. Agric. Sci.*, **17**(4), 193-199.
- Jiongxin, X., 2003: Sediment flux to the sea as influenced by changing human activities and precipitation: example of the Yellow River, China. *Environ. Manage.*, **31**, 328-341.
- Johannessen, O.M., Khvorostovsky, K., Miles, M.W. and Bobylev, L.P., 2005: Recent ice-sheet growth in the interior of Greenland. *Science*, **310**(5750), 1013-1016.
- Johnson, W.C., B.V. Millett, T. Gilmanov, R.A. Voldseth, G.R. Guntenspergen and D.E. Naugle, 2005: Vulnerability of northern prairie wetlands to climate change. *BioScience*, **55**(10), 863-872.
- Jones, B. and D. Scott, 2006: Implications of climate change to Ontario's provincial parks. *Leisure*, **30** (1), 233-261.
- Jones, J.A. and G.E. Grant, 1996: Peak flow response to clear-cutting and roads in small and large basins, western Cascades, Oregon. *Water Resour. Res.*, **32**, 959-974.
- Jones, M.L., B.J. Shuter, Y.M. Zhao and J.D. Stockwell, 2006: Forecasting effects of climate change on Great Lakes fisheries: models that link habitat supply to population dynamics can help. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **63**, 457-468.
- Jones, P.D., T.J. Osborn and K.R. Briffa, 2003a: Pressure-based measures of the North Atlantic Oscillation (NAO): A comparison and an assessment of changes in the strength of the NAO and in its influence on surface climate parameters. *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact*, Hurrell, J.W. and Co-authors, Eds., Geophysical Monograph 134, American Geophysical Union, Washington, DC, 51-62.
- Jones, P.D., D.H. Lister, K.W. Jaggard and J.D. Pidgeon, 2003b: Future climate impact on the productivity of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) in Europe. *Climatic Change*, **58**, 93-108.
- Jones, R. and P. Durack, 2005: *Estimating the Impacts of Climate Change on Victoria's Runoff using a Hydrological Sensitivity Model*. Consultancy Report for the Victorian Department of Sustainability and Environment, 50 pp.
- Jones, R.N. and C.M. Page, 2001: Assessing the risk of climate change on the water resources of the Macquarie River catchment. *Integrating Models for Natural Resources Management Across Disciplines: Issues and Scales*, F. Ghassemi, P.H. Whetton, R. Little and M. Littleboy, Eds., Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, Canberra, 673-678.
- Jordan, E., 1991: *Die gletscher der bolivianischen Anden: eine photogrammetrisch-kartographische Bestandsaufnahme der Gletscher Boliviens als Grundlage für klimatische Deutungen und Potential für die wirtschaftliche Nutzung (The Glaciers of the Bolivian Andes, A Photogrammetric-Cartographical Inventory of the Bolivian Glaciers as a Basis for Climatic Interpretation and Potential for Economic Use)*. Erdwissenschaftliche Forschung 23, Franz Steiner Verlag, Stuttgart, 401 pp.
- Jorgenson, M.T., C.H. Racine, J.C. Walters and T.E. Osterkamp, 2001: Permafrost degradation and ecological changes associated with a warming climate in central Alaska. *Climatic Change*, **48**(4), 551-571.
- Justic, D., N.N. Rabalais and R.E. Turner, 2005: Coupling between climate variability and coastal eutrophication: evidence and outlook for the northern Gulf of Mexico. *J. Sea Res.*, **54**(1), 25-35.
- Kabat, P., R.E. Schulze, M.E. Hellmuth and J.A. Veraart, Eds., 2002: *Coping with Impacts of Climate Variability and Climate Change in Water Management: a Scoping Paper*. DWC Report No. DWCSSO-01(2002), International Secretariat of the Dialogue on Water and Climate, Wageningen.
- Kajiwara, M., T. Oki and J. Matsumoto, 2003: *Inter-annual Variability of the Frequency of Severe Rainfall in the Past 100 Years over Japan*. Extended abstract for a bi-annual meeting of the Meteorological Society of Japan (in Japanese).
- Kanai, S., T. Oki and A. Kashida, 2004: Changes in hourly precipitation at Tokyo from 1890 to 1999. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 241-247.
- Kane, R.P., 2002: Precipitation anomalies in southern America associated with a finer classification of El Niño and La Niña events. *Int. J. Climatol.*, **22**, 357-373.
- Kang, G., B.S. Ramakrishna, J. Daniel, M. Mathan and V. Mathan, 2001: Epidemiological and laboratory investigations of outbreaks of diarrhoea in rural South India: implications for control of disease. *Epidemiol. Infect.*, **127**, 107.
- Karst-Riddoch, T.L., M.F.J. Pisaric and J.P. Smol, 2005: Diatom responses to 20th century climate-related environmental changes in high-elevation mountain lakes of the northern Canadian Cordillera. *J. Paleolimnol.*, **33**, 265-282.
- Kaser, G. and H. Osmaston, 2002: *Tropical Glaciers*. UNESCO International Hydrological Series. Cambridge University Press, Cambridge, 207 pp.
- Kaser, G. and Co-authors, 2003: The impact of glaciers on the runoff and the reconstruction of mass balance history from hydrological data in the tropical Cordillera Blanca, Peru. *J. Hydrol.*, **282**, 130-144.
- Kashyap, A., 2004: Water governance: learning by developing adaptive capacity to incorporate climate variability and change. *Water Sci. Technol.*, **19**(7), 141-146.
- Kaspar, F., 2003: *Entwicklung und Unsicherheitsanalyse eines globalen hydrologischen (Model Development and Uncertainty Analysis of*

- a *Global Hydrological Model*). University of Kassel, Kassel, PhD thesis.
- Kaste, Ø., K. Rankinen and A. Leipistö, 2004: Modelling impacts of climate and deposition changes on nitrogen fluxes in northern catchments of Norway and Finland. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **8**, 778–792.
- Kay, A., V. Bell and H. Davies, 2006a: *Model Quality and Uncertainty for Climate Change Impact*. Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford.
- Kay, A., N.A. Reynard and R.N. Jones, 2006b: RCM rainfall for UK flood frequency estimation. II. Climate change results. *J. Hydrol.*, **318**, 163–172.
- Keddy, P.A., 2000: *Wetland Ecology: Principles and Conservation*. Cambridge University Press, Cambridge, 614 pp.
- Keller, F., S. Goyette and M. Beniston, 2005: Sensitivity analysis of snow cover to climate change scenarios and their impact on plant habitats in alpine terrain. *Climatic Change*, **72**(3), 299–319.
- Kergoat, L., S. Lafont, H. Douville, B. Berthelot, G. Dedieu, S. Planton and J.-F. Royer, 2002: Impact of doubled CO₂ on global-scale leaf area index and evapotranspiration: conflicting stomatal conductance and LAI responses. *J. Geophys. Res.*, **107**(D24), 4808.
- Kerr, R., 2000: A North Atlantic climate pacemaker for the centuries. *Science*, **288**, 1984–1985.
- Kerr, S.A., 2005: What is small island sustainable development about? *Ocean Coast. Manage.*, **48**, 503–524.
- Khan, T.M.A., O.P. Singh and M.S. Rahman, 2000: Recent sea level and sea surface temperature trends along the Bangladesh coast in relation to the frequency of intense cyclones. *Marine Geodesy*, **23**(2), 103–116.
- Kharkina, M.A., 2004: Natural resources in towns. *Energia*, **2**, 44–50.
- Kirschbaum, M. and A. Fischlin, 1996: Climate change impacts on forests. *Climate Change 1995: Impacts; Adaptations and Mitigation of Climate Change. Scientific-Technical Analysis. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change.*, R. Watson, M.C. Zinyowera and R.H. Moss, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 95–129.
- Kirshen, P., M. McCluskey, R. Vogel and K. Strzepek, 2005a: Global analysis of changes in water supply yields and costs under climate change: a case study in China. *Climatic Change*, **68**(3), 303–330.
- Kirshen, P., M. Ruth and W. Anderson, 2005b: Responding to climate change in Metropolitan Boston: the role of adaptation. *New Engl. J. Public Pol.*, **20**(2), 89–104.
- Kirshen, P., M. Ruth and W. Anderson, 2006: Climate's long-term impacts on urban infrastructures and services: the case of Metro Boston. *Regional Climate Change and Variability: Impacts and Responses*, M. Ruth, K. Donaghy and P.H. Kirshen, Eds., Edward Elgar Publishers, Cheltenham, 190–252.
- Kishor, P.B.K., Z. Hong, G. Miao, C. Hu and D. Verma, 1995: Overexpression of $\Delta 1$ -pyrroline-5-carboxylase synthase increases proline production and confers osmotolerance in transgenic plants. *J. Plant Physiol.*, **108**, 1387–1394.
- Kistemann, T., T. Classen, C. Koch, F. Dagendorf, R. Fischeder, J. Gebel, V. Vacata and M. Exner, 2002: Microbial load of drinking water reservoir tributaries during extreme rainfall and runoff. *Appl. Environ. Microbiol.*, **68**(5), 2188–2197.
- Kjellström, E., 2004: Recent and future signatures of climate change in Europe. *Ambio*, **23**, 193–198.
- Klanderud, K. and H.J.B. Birks, 2003: Recent increases in species richness and shifts in altitudinal distributions of Norwegian mountain plants. *Holocene*, **13**(1), 1.
- Klein, R.J., T.J. Nicholls, and J. Thomalla, 2003: The resilience of coastal mega cities to weather-related hazards in building safer cities: *The Future of Climate Change*, A. Kreimer, M. Arnold and A. Karlin, Eds., World Bank, Washington, DC, 101–121.
- Klein Tank, A.M.G., J.B. Wijngaard, G.P. Konnen, R. Bohm, G. Demaree, A. Gocheva, M. Mileta, S. Pashiardis, L. Hejkrlik, C. Kern-Hansen, R. Heino, P. Bessemoulin, G. Muller-Westermeier, M. Tzanakou, S. Szalai, T. Palsdottir, D. Fitzgerald, S. Rubin, M. Capaldo, M. Maugeri, A. Leitass, A. Bukantis, R. Aberfeld, A.F.V. VanEngelen, E. Forland, M. Miletus, F. Coelho, C. Mares, V. Razuvaev, E. Nieplova, T. Cegnar, J.A. López, B. Dahlstrom, A. Moberg, W. Kirchhofer, A. Ceylan, O. Pachaliuk, L.V. Alexander and P. Petrovic, 2002: Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment. *Int. J. Climatol.*, **22**, 1441–1453.
- Klein Tank, A.M.G. and G.P. Können, 2003: Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946–1999. *J. Clim.*, **16**, 3665–3680.
- Klijin, F., J. Dijkman and W. Silva, 2001: *Room for the Rhine in the Netherlands. Summary of Research Results*. RIZA Report 2001.033, Rijkswaterstaat, Utrecht.
- Klijin, F., M. van Buuren and S.A.M. van Rooij, 2004: Flood-risk management strategies for an uncertain future: living with Rhine river floods in the Netherlands? *Ambio*, **33**(3), 141–147.
- Knight, C.G., I. Raev, and M. P. Staneva, Eds., 2004: *Drought in Bulgaria: A Contemporary Analog of Climate Change*. Ashgate, Aldershot, Hampshire 336 pp.
- Knight, J. and Co-authors, 2005: a signature of persistent natural thermohaline circulation cycles in observed climate. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L20708, doi:10.2929/2005GL024233.
- Knowles, N., M.D. Dettinger and D.R. Cayan, 2006: Trends in snowfall versus rainfall for the western United States, 1949–2004. *J. Climate*, **18**, 1136–1155.
- Ko, A., R.M. Galvão, D. Ribeiro, C.M. Dourado, W.D. Johnson Jr. and L.W. Riley, 1999: Urban epidemic of severe leptospirosis in Brazil, Salvador. Leptospirosis Study Group. *Lancet*, **354**, 820–825.
- Kobayashi, K., 1987: Hydrologic effects of rehabilitation treatment for bare mountain slopes. *Bull. Forestry Forest Products Res. Instit.*, **300**, 151–185.
- Koga, N., T. Sawamoto and H. Tsuruta 2006: Life cycle inventory-based analysis of greenhouse gas emissions from arable land farming systems in Hokkaido, northern Japan. *Soil Science and Plant Nutrition*, **52**, 564–574.
- Korhola, A. and Co-authors, 2002: A multi-proxy analysis of climate impacts on recent ontogeny of subarctic Lake Sannajärvi in Finnish Lapland. *J. Paleolimnol.*, **1**, 59–77.
- Körner, C., 1999: *Alpine Plant Life: Functional Plant Ecology of High Mountain Ecosystems*. Springer, Berlin, 343 pp.
- Kosek, M., C. Bern and R.L. Guerrant, 2003: The global burden of diarrhoeal disease, as estimated from studies published between 1992 and 2000. *Bull. World Health Organ.*, **81**, 197–204.
- Kovats, R.S. and C. Tirado, 2006: Climate, weather and enteric disease. *Climate Change and Adaptation Strategies for Human Health*, B. Menne and K.L. Ebi, Eds., Springer, Darmstadt, 269–295.
- Kovats, R.S., Campbell-Lendrum D. and Matthies, F., 2005: Climate change and human health: estimating avoidable deaths and disease. *Risk Analysis*, **25**(6), 1409–1418.
- Kramer, R., D. Richter, S. Pattanayak and N. Sharma, 1997: Economic and ecological analysis of watershed protection in eastern Madagascar. *J. Environ. Manage.*, **49**, 277–295.
- Krauss, K.W., J.L. Chambers, J.A. Allen, D.M. Soileau Jr and A.S. DeBosier, 2000: Growth and nutrition of baldcypress families planted under varying salinity regimes in Louisiana, USA. *J. Coast. Res.*, **16**, 153–163.
- Kriticos, D.J., T. Yonow and R.C. McFadyen, 2005: The potential distribution of *Chromolaena odorata* (Sim weed) in relation to climate. *Weed Research*, **45**, 246–254

- Kron, W. and G. Berz, 2007: Flood disasters and climate change: trends and options – a (re-)insurer's view. *Global Change: Enough Water for All?* J.L. Lozán, H. Graßl, P. Hupfer, L. Menzel and C.-D. Schönwiese, Eds., University of Hamburg, Hamburg, 268-273.
- Krüger, A., U. Ulbrich and P. Speth, 2002: Groundwater recharge in Northrhine-Westfalia by a statistical model for greenhouse gas scenarios. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, **26**, 853–861.
- Krysanova, V. and F. Wechsung, 2002: Impact of climate change and higher CO₂ on hydrological processes and crop productivity in the state of Brandenburg, Germany. *Climatic Change: Implications for the Hydrological Cycle and for Water Management*, M. Beniston, Ed., Kluwer, Dordrecht, 271–300.
- Krysanova, V., F. Hattermann and A. Habeck, 2005: Expected changes in water resources availability and water quality with respect to climate change in the Elbe River basin (Germany). *Nordic Hydrol.*, **36**(4–5), 321–333.
- Kumagai, M., K. Ishikawa and J. Chunmeng, 2003: Dynamics and biogeochemical significance of the physical environment in Lake Biwa. *Lakes Reserv. Res. Manage.*, **7**, 345-348.
- Kumar, P.K., 2006: Potential vulnerability implications of sea level rise for the coastal zones of Cochin, southwest coast of India. *Environ. Monitor. Assess.*, **123**, 333–344.
- Kundzewicz, Z.W., U. Ulbrich, T. Brücher, D. Graczyk, A. Krüger, G. Leckebusch, L. Menzel, I. Pińskwar, M. Radziejewski and M. Szwed, 2005: Summer floods in Central Europe climate change track? *Nat. Hazards*, **36**(1/2), 165–189.
- Kundzewicz, Z.W., M. Radziejewski and I. Pińskwar, 2006: Precipitation extremes in the changing climate of Europe. *Clim. Res.*, **31**, 51–58.
- Kunkel, K.E. and Co-authors, 2003: Temporal variations of extreme precipitation events in the United States: 1895–2000. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1900. doi:10.1029/2003GL018052.
- Kupek, E., M.C. de Sousa Santos Faversoni and J.M. de Souza Philippi, 2000: The relationship between rainfall and human leptospirosis in Florianópolis, Brazil, 1991–1996. *Braz. J. Infect. Dis.*, **4**, 131-134.
- La Nación, 2002: Buenos Aires, 13 March.
- Labat, D. and Co-authors, 2004: Evidence for global runoff increase related to climate warming. *Adv. Water Resources*, **27**, 631–642.
- Lal, M., 2002: *Global climate change: India's monsoon and its variability*, Final Report under "Country Studies Vulnerability and Adaptation" Work Assignment with Stratus Consulting's Contract of the U.S. Environmental Protection Agency, September 2002, 58 pp.
- Lal, R., 2003: Offsetting global CO₂ emissions by restoration of degraded soils and intensification of world agriculture and forestry. *Land Degradation and Dev.*, **14**, 309–322.
- Lal, R., 2004: Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, **304**, 1623-1627.
- Lal, R., J.M. Kimble and R.F. Follett, 1999: Agricultural practices and policies for carbon sequestration in soil. *Recommendation and Conclusions of the International Symposium*, 19-23 July 1999, Columbus, OH, 12 pp.
- Lama, J.R., C.R. Seas, R. León-Barúa, E. Gotuzzo and R.B. Sack, 2004: Environmental temperature, cholera, and acute diarrhoea in adults in Lima, Peru. *J. Health Popul. Nutr.*, **22**, 399–403.
- Larsen, C.F., R.J. Motyka, J.T. Freymueller, K.A. Echelmeyer and E.R. Ivins, 2005: Rapid uplift of southern Alaska caused by recent ice loss. *Geophys. J. Int.*, **158**, 1118-1133.
- Latensner, M. and M. Schneebeli, 2003: Long-term snow climate trends of the Swiss Alps (1931–99). *Int. J. Climatol.*, **23**, 733–750.
- Latif, M., 2001: Tropical Pacific/Atlantic Ocean interactions at multi-decadal time scales. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 539–542.
- Le Maitre, D.C. and D.B. Versfeld, 1997: Forest evaporation models: relationships between stand growth and evaporation. *J. Hydrol.*, **193**, 240-257.
- Le Treut, H., R. Somerville, U. Cubasch, Y. Ding, C. Mauritzen, A. Mokssit, T. Peterson and M. Prather, 2007: Historical overview of climate change science. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 93-128.
- Lean, J., C.B. Bunttoon, C.A. Nobre and P.R. Rowntree, 1996: The simulated impact of Amazonian deforestation on climate using measured ABRACOS vegetation characteristics. *Amazonian Deforestation and Climate*, J.H.C Gash, C.A. Nobre, J.M. Roberts and T.L. Victoria, Eds., John Wiley and Sons, Chicester, 549-576.
- Leary, N., J. Adejuwon, W. Bailey, V. Barros, M. Caffera, S. Chinvano, C. Conde, A. De Comarmond, A. De Sherbinin, T. Downing, H. Eakin, A. Nyong, M. Opondo, B. Osman, R. Payet, F. Pulhin, J. Pulhin, J. Ratnasiri, E. Sanjak, G. von Maltitz, M. Wehbe, Y. Yin and G. Ziervogel, 2006: For whom the bell tolls: vulnerabilities in a changing climate. *AIACC Working Paper No. 30*, International START Secretariat, Washington, DC, 31 pp.
- Leemans, R. and A. Kleidon, 2002: Regional and global assessment of the dimensions of desertification. *Global Desertification: Do Humans Cause Deserts?* J.F. Reynold and D.S. Smith, Eds., Dahlem University Press, Berlin, 215-232.
- Legates, D.R., H.F. Lins and G.J. McCabe, 2005: Comments on "Evidence for global runoff increase related to climate warming" by Labat et al. *Adv. Water Resour.*, **28**, 1310-1315.
- Lehner, B., G. Czisch and S. Vassolo, 2005: The impact of global change on the hydropower potential of Europe: a model-based analysis. *Energ. Policy*, **33**, 839–855.
- Lehner, B., P. Döll, J. Alcamo, T. Henrichs and F. Kaspar, 2006: Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: a continental, integrated analysis. *Climatic Change*, **75**, 273–299.
- Leipprand, A. and D. Gerten, 2006: Global effects of doubled atmospheric CO₂ content on evapotranspiration, soil moisture and runoff under potential natural vegetation. *Hydrol. Sci. J.*, **51**, 171–185.
- Lemmen, D. S. and F. J. Warren, Eds., 2004: *Climate Change Impacts and Adaptation: A Canadian Perspective*. Climate Change Impacts and Adaptation Directorate, Natural Resources Canada, Ottawa, Canada, 201 pp, http://adaptation.nrcan.gc.ca/perspective_e.asp.
- Lenderink, G., A. vanUlden, B. van den Hurk and E. van Meijgaard, 2007: Summertime inter-annual temperature variability in an ensemble of regional model simulations: analysis of the surface energy budget. *Climatic Change*, **81**, S233-S247.
- Lewsey, C., Gonzalo, C. and Kruse, E., 2004: Assessing climate change impacts on coastal infrastructure in the Eastern Caribbean. *Marine Policy*, **28**, 393–409.
- Li, C., S. Frolking and K. Butterbach-Bahl, 2005: Carbon sequestration in arable soils is likely to increase nitrous oxide emissions, offsetting reductions in climate radiative forcing. *Climatic Change*, **72**, 321-338.
- Li, C.X., D.D. Fan, B. Deng and V. Korotaev, 2004: The coasts of China and issues of sea level rise. *J. Coast. Res.*, **43**, 36–47.
- Liebig, M.A., J.A. Morgan, J.D. Reeder, B.H. Ellert, H.T. Gollany and G.E. Schuman, 2005: Greenhouse gas contributions and mitigation potential of agricultural practices in northwestern USA and western Canada. *Soil and Tillage Res.*, **83**, 25-52.
- Lincoln Environmental, 2000: *Information on Water Allocation in New Zealand*. Report No. 4375/1, prepared for Ministry for the Environment by Lincoln Ventures Ltd, Canterbury, New Zealand. <http://www.mfe.govt.nz/publications/water/water-allocation-apr00.pdf>.
- Lindstrom, G. and S. Bergstrom, 2004: Runoff trends in Sweden

- 1807–2002. *Hydrol. Sci. J.*, **49**(1), 69–83.
- Liniger, H. and R. Weingartner, 1998: Mountains and freshwater supply. *Unasylva*, **195**(49), 39–46.
- Lipp, E. and Co-authors, 2001: The effects of seasonal variability and weather on microbial faecal pollution and enteric pathogens in a subtropical estuary. *Estuaries*, **24**, 226–276.
- Liu, B.H. and Co-authors, 2004: A spatial analysis of pan evaporation trends in China, 1955–2000. *J. Geophys. Res.*, **109**, D15102, doi:10.1029/2004JD004511.
- Liu, C.Z., 2002: Suggestion on water resources in China corresponding with global climate change. *China Water Resources*, **2**, 36–37.
- Liu, S.G., Li, C.X., Ding, J., Li, X.Z. and Ivanov, V.V., 2001: The rough balance of progradation and erosion of the Yellow River delta and its geological meaning. *Marine Geology and Quaternary Geology*, **21**(4), 13–17.
- Liu, Y.B. and Y.N. Chen, 2006: Impact of population growth and land-use change on water resources and ecosystems of the arid Tarim River Basin in western China. *Int. J. Sust. Dev. World*, **13**, 295–305.
- Llasat, M.C., 2001: An objective classification of rainfall intensity in the Northeast of Spain. *Int. J. Climatol.*, **21**, 1385–1400.
- Lofgren, B., A. Clites, R. Assel, A. Eberhardt and C. Luukkonen, 2002: Evaluation of potential impacts on Great Lakes water resources based on climate scenarios of two GCMs. *J. Great Lakes Res.*, **28**(4), 537–554.
- London Climate Change Partnership, 2004: *London's Warming: A Climate Change Impacts in London Evaluation Study*, London, 293 pp.
- LOSLR (International Lake Ontario–St. Lawrence River Study Board), 2006: *Options for Managing Lake Ontario and St. Lawrence River Water Levels and Flows*. Final Report to the International Joint Commission. <http://www.loslr.org/reports/finalreport-e.html>.
- Luoto, M., R.K. Heikkinen and T.R. Carter, 2004: Loss of palaeo mires in Europe and biological consequences. *Environ. Conserv.*, **31**, 30–37.
- MacDonald, R., T. Harner, J. Fyfe, H. Loeng and T. Weingartner, 2003: Influence of Global Change on Contaminant Pathways to, within and from the Arctic. *ANAO Assessment 2002*. Arctic Monitoring and Assessment Programme. Oslo, 65 pp.
- Machado, P.L.O.A. and C.A. Silva, 2001: Soil management under no-tillage systems in the tropics with special reference to Brazil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **61**, 119–130.
- Madari, B., P.L.O.A. Machado, E. Torres, A.G. Andrade and L.I.O. Valencia, 2005: No tillage and crop rotation effects on soil aggregation and organic carbon in a Rhodic Ferralsol from southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, **80**, 185–200.
- Magadza, C., 2000: Climate change impacts and human settlements in Africa: prospects for adaptation. *Environ. Monit. Assess.*, **61**(1), 193–205.
- Magrin, G.O., M.I. Travasso and G.R. Rodríguez, 2005: Changes in climate and crops production during the 20th century in Argentina. *Climatic Change*, **72**, 229–249.
- Manton, M.J., P.M. Della-Marta, M.R. Haylock, K.J. Hennessy, N. Nicholls, L.E. Chambers, D.A. Collins, G. Daw, A. Finet, D. Gunawan, K. Inape, H. Isobe, T.S. Kestin, P. Lefale, C.H. Leyu, T. Lwin, L. Maitrepierre, N. Ouprasitwong, C.M. Page, J. Pahalad, N. Plummer, M.J. Salinger, R. Suppiah, V.L. Tran, B. Trewin, I. Tibig and D. Lee, 2001: Trends in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pacific; 1961–1998. *Int. J. Climatol.*, **21**, 269–284.
- Manuel, J., 2006: In Katrina's wake. *Environ. Health Persp.*, **114**, A32–A39.
- Marengo, J.A., 2004: Interdecadal variability and trends of rainfall variability in the Amazon basin. *Theor. Appl. Climatol.*, **78**, 79–96.
- Mark, B.G. and G.O. Seltzer, 2003: Tropical glacier meltwater contribution to stream discharge: a case study in the Cordillera Blanca, Perú. *J. Glaciol.*, **49**, 271–281.
- Marland, G., B.A. McCarl and U.A. Schneider, 2001: Soil carbon: policy and economics. *Climatic Change*, **51**, 101–117.
- Marland, G., T.O. West, B. Schlamadinger and L. Canella, 2003: Managing soil organic carbon in agriculture: the net effect on greenhouse gas emissions. *Tellus*, **55B**, 613–621.
- Martin, D., Belanger, D., Gosselin, P., Brazeau, J., Furgal, C. and Dery, S., 2005: *Climate change, Drinking Water, and Human Health in Nunavik: Adaptation Strategies*. Final Report submitted to the Canadian Climate Change Action Fund, Natural Resources Canada. CHUL Research Institute, Quebec, 111 pp.
- Martin, E. and P. Etchevers, 2005: Impact of climatic change on snow cover and snow hydrology in the French Alps. *Global Change and Mountain Regions (A State of Knowledge Overview)*, U.M. Huber, H. Bugmann, and M.A. Reasoner, Eds., Springer, New York, 235–242.
- Mata, L.J., M. Campos, E. Basso, R. Compagnucci, P. Fearnside, G. Magri, J. Marengo, A.R. Moreno, A. Suaez, S. Solman, A. Villamizar and L. Villers, 2001: Latin America. *Climate Change 2001, Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, J. J. McCarthy, O. Canziani, N. Leary, D. Dokken and K. White, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 691–734.
- Maya, C., N. Beltran, B. Jimenez and P. Bonilla, 2003: Evaluation of the UV disinfection process in bacteria and amphizoic amoebae inactivation. *Water Science and Technology*, **3**(4), 285–291.
- Mazhitova, G., N. Karstkarel, N. Oberman, V. Romanovsky and P. Kuhty, 2004: Permafrost and infrastructure in the Usa Basin (Northern European Russia): possible impacts of global warming. *Ambio*, **3**, 289–294.
- McBean, G. and Co-authors, 2005: Arctic Climate: past and present. *Arctic Climate Impacts Assessment (ACIA)*, C. Symon, L. Arris and B. Heal, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 21–60.
- McCabe, G.J., M. Palecki and J.L. Betancourt, 2004: Pacific and Atlantic Ocean influences on multi-decadal drought frequency in the United States. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, **101**, 4136–4141.
- McClelland, J.W., R.M. Holmes and B.J. Peterson, 2004: Increasing river discharge in the Eurasian Arctic: consideration of dams, permafrost thaw, and fires as potential agents of change. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, **109**, D18102, doi:10.1029/2004JD004583.
- McKerchar, A.I. and R.D. Henderson, 2003: Shifts in flood and low-flow regimes in New Zealand due to inter-decadal climate variations. *Hydrol. Sci. J.*, **48**(4), 637–654.
- McMichael, A. and Co-authors, Eds., 2003: *Climate Change and Human Health: Risks and Responses*. WHO, Geneva, 322 pp.
- McPeak, J.G. and C.B. Barrett, 2001: Differential risk exposure and stochastic poverty traps among East African pastoralists. *Am. J. Agr. Econ.*, **83**, 674–679.
- MDBC, 2006: *Basin Statistics*. Murray Darling Basin Commission. http://www.mdbc.gov.au/about/basin_statistics.
- Meehl, G.A. and C. Tebaldi, 2004: More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, **305**, 994–997.
- Meher-Homji, V.M., 1992: Probable impact of deforestation on hydrological process. *Tropical Forests and Climate*, N. Myers, Ed., Springer, Berlin, 163–174.
- Melbourne Water, 2006: Eastern Treatment plant: treating sewage from Melbourne's south-eastern and eastern suburbs. http://www.melbournewater.com.au/content/sewage/eastern_treatment_plant/eastern_treatment_plant.asp?bhcp=1.
- Melnikov B.V. and A. L. Revson, 2003: Remote sensing of northern regions of West Siberia. *Cryosphere of Earth*, **4**, 37–48 (in Russian).
- Mendelsohn, R., M. Morrison, M. Schlesinger and N. Andronova,

- 2000a: Country-specific market impacts from climate change, *Climatic Change*, **45**, 553–569.
- Mendelsohn, R., A. Dinar and A. Dalfelt, 2000b: *Climate change impacts on African agriculture*. Paper prepared for the World Bank, Washington, DC, 25 pp
- Menzel, A., G. Jakobi, R. Ahas, H. Scheifinger and N. Estrella, 2003: Variations of the climatological growing season (1951–2000) in Germany compared with other countries. *Int. J. Climatol.*, **23**, 793–812.
- Menzel, L. and G. Bürger., 2002: Climate change scenarios and runoff response in the Mulde catchment (Southern Elbe, Germany). *J. Hydrol.*, **267**(1–2), 53–64.
- Mercier, F., A. Cazenave and C. Maheu, 2002: Interannual lake level fluctuations (1993–1999) in Africa from Topex/Poseidon: connections with ocean-atmosphere interactions over the Indian Ocean, *Global Planet. Change*, **32**, 141–163.
- Metz, B., O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos and L. Meyer, Eds., 2005: *Carbon Dioxide Capture and Storage*. Cambridge University Press, Cambridge, 431 pp.
- Middelkoop, H. and J.C.J. Kwadijk, 2001: Towards an integrated assessment of the implications of global change for water management: the Rhine experience. *Phys Chem Earth, Part B Hydrology, Oceans and Atmosphere*, **26**(7–8), 553–560.
- Middelkoop, H., K. Daamen, D. Gellens, W. Grabs, J.C.J. Kwadijk, H. Lang, B.W.A.H. Parmet, B. Schädler, J. Schulla and K. Wilke, 2001: Impact of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine basin. *Climatic Change*, **49**, 105–128.
- Miettinen, I., O. Zacheus, C. von Bonsdorff and T. Vartiainen, 2001: Waterborne epidemics in Finland in 1998–1999. *Water Sci. Technol.*, **43**, 67–71.
- Miles, E.L., A.K. Snover, A. Hamlet, B. Callahan and D. Fluharty, 2000: Pacific Northwest Regional Assessment: the impacts of climate variability and climate change on the water resources of the Columbia River Basin. *J. Amer. Water Resour. Assoc.*, **36**, 399–420.
- Mileti, D., 1999: *Disasters by Design: A Reassessment of Natural Hazards in the United States*. National Academy Press, Washington, DC, 376 pp.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005a: *Ecosystems and Human Well-being: Volume 2 – Scenarios*. Island Press, Washington, DC, 515 pp.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005b: *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC, 155 pp.
- Miller, K.A. and D. Yates, 2006: *Climate Change and Water Resources: A Primer for Municipal Water Providers*. AWWA Research Foundation, Denver, CO, 83 pp.
- Miller, K.A., S.L. Rhodes and L.J. MacDonnell, 1997: Water allocation in a changing climate: institutions and adaptation. *Climatic Change*, **35**, 157–177.
- Miller, M.G. and A. Veltman, 2004: Proposed Canterbury Natural Resources Plan for river and groundwater allocation policies and the implications for irrigation dependent farming in Canterbury. *Proc. New Zealand Grassland Association*, **66**, 11–23.
- Mills, E., 2005: Insurance in a climate of change. *Science*, **309**, 1040–1044.
- Mills, E. and E. Lecomte, 2006: *From Risk to Opportunity: How Insurers Can Proactively and Profitably Manage Climate Change*. Ceres, Boston, MA, 42 pp.
- Mills, P.F., 1994: The agricultural potential of northwestern Canada and Alaska and the impact of climatic change. *Arctic*, **47**(2), 115–123.
- Milly, P.C.D., R.T. Wetherald, K.A. Dunne and T.L. Delworth, 2002: Increasing risk of great floods in a changing climate. *Nature*, **415**, 514–517.
- Milly, P.C.D., K.A. Dunne and A.V. Vecchia, 2005: Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, **438**(7066), 347–350.
- Mimikou, M., E. Blatas, E. Varanaou and K. Pantazis, 2000: Regional impacts of climate change on water resources quantity and quality indicators. *J. Hydrol.*, **234**, 95–109.
- Min, S.K., W.T. Kwon, E.H. Park and Y. Choi, 2003: Spatial and temporal comparisons of droughts over Korea with East Asia. *Int. J. Climatol.*, **23**, 223–233.
- Ministry for the Environment, 2004: *Climate Effects and Impacts Assessment: a Guidance Manual for Local Government in New Zealand*. Prepared by David Wratt, Brett Mullan and Jim Salinger (NIWA), Sylvia Allen and Tania Morgan (MWH New Zealand Ltd.) and Gavun Kenny (Earthwise Consulting). Ministry for the Environment Report ME 513, Wellington, 153 pp.
- Mirza, M.M.Q., 2002: Global warming and changes in the probability of occurrence of floods in Bangladesh and implications. *Global Environ. Chang.*, **12**, 127–138.
- Mirza, M.M.Q., 2003: Three recent extreme floods in Bangladesh: a hydro-meteorological analysis. *Nat. Hazards*, **28**, 35–64.
- Mirza, M.M.Q., 2004: *Climate Change and the Canadian Energy Sector: Report on Vulnerability and Adaptation*. Adaptation and Impacts Research Group, Atmospheric Climate Science Directorate, Meteorological Service of Canada Downsview, Ontario, 52 pp.
- Mirza, M.M.Q., R.A. Warrick and N.J. Ericksen, 2003: The implications of climate change on floods of the Ganges, Brahmaputra and Meghna Rivers in Bangladesh. *Climatic Change*, **57**, 287–318.
- Mitchell, T.D. and P.D. Jones, 2005: An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *Int. J. Climatol.*, **25**, 693–712.
- Mitchell, W., J. Chittleborough, B. Ronai and G.W. Lennon, 2001: Sea level rise in Australia and the Pacific. *Proc. Science Component. Linking Science and Policy*. Pacific Islands Conference on Climate Change, Climate Variability and Sea Level Rise. 3–7 April 2000, Rarotonga, Cook Islands, National Tidal Facility, The Flinders University of South Australia, Adelaide, 47–58.
- Moench, M., A. Dixit, S. Janakarajan, M.S. Rathore and S. Mudrakartha, 2003: *The Fluid Mosaic: Water Governance in the Context of Variability, Uncertainty and Change – A Synthesis Paper*. Nepal Water Conservation Foundation, Kathmandu, 71 pp.
- Mohseni, O., H.G. Stefan and J.G. Eaton, 2003: Global warming and potential changes in fish habitat in U.S. streams. *Climatic Change*, **59**, 389–409.
- Mölg, T., D.R. Hardy, N. Cullen and G. Kaser, 2005: Tropical glaciers in the context of climate change and society: focus on Kilimanjaro (East Africa). *Contribution to Mountain Glaciers and Society Workshop*. California University Press, Wengen, 28 pp.
- Monson, R.K., D.L. Lipson, S.P. Burns, A.A. Turnipseed, A.C. Delany, M.W. Williams and S.K. Schmidt, 2006: Winter forest soil respiration controlled by climate and microbial community composition. *Nature*, **439**(7077), 711–714.
- Monteny, G.-J., A. Bannink and D. Chadwick, 2006: Greenhouse gas abatement strategies for animal husbandry. *Agri. Ecosys. Environ.*, **112**, 163–170.
- Mool, P.K., D. Wangda and S.R. Bajracharya, 2001: *Inventory of Glaciers, Glacial Lakes and Glacial Lake Outburst Floods: Monitoring and Early Warning Systems in the Hindu Kush-Himalayan Region: Bhutan*. ICIMOD, Kathmandu, 227 pp.
- Moonen, A.C., L. Ercoli, M. Mariotti and A. Masoni, 2002: Climate change in Italy indicated by agrometeorological indices over 122 years. *Agr. Forest Meteorol.*, **111**, 13–27.
- Mooney, H., A. Cropper and W. Reid, 2005: Confronting the human dilemma. *Nature*, **434**, 561–562.
- Moore, M.V., M.L. Pace, J.R. Mather, P.S. Murdoch, R.W. Howarth, C.L. Folt, C.Y. Chen, H.F. Hemond, P.A. Flebbe and C.T. Driscoll,

- 1997: Potential effects of climate change on freshwater ecosystems of the New England/Mid-Atlantic region. *Hydrol. Process.*, **11**, 925-947.
- Morris, J.D. and L.A.J. Thomson, 1983: The role of trees in dryland salinity control. *Proc. Roy. Soc. Victoria*, **95**, 123-131.
- Morton, J., 2006: Pastoralist coping strategies and emergency livestock market intervention. *Livestock Marketing in Eastern Africa: Research and Policy Challenges*, J.G. McPeak and P.D. Little, Eds., ITDG Publications, Rugby, 227-246.
- Mosier, A.R., A.D. Halvorson, G.A. Peterson, G.P. Robertson and L. Sherrod, 2005: Measurement of net global warming potential in three agroecosystems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **72**, 67-76.
- Moss, B., D. Mckee, D. Atkinson, S.E. Collings, J.W. Eaton, A.B. Gill, I. Harvey, K. Hatton, T. Heyes and D. Wilson, 2003: How important is climate? Effects of warming, nutrient addition and fish on phytoplankton in shallow lake microcosms. *J. Appl. Ecol.*, **40**, 782-792.
- Mote, P., A.F. Hamlet, M.P. Clark and D.P. Lettenmaier, 2005: Declining mountain snowpack in western North America. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **86**, doi: 10.1175/BAMS-1186-1171-1139.
- Mote, P.W., D.J. Canning, D.L. Fluharty, R.C. Francis, J.F. Franklin, A.F. Hamlet, M. Hershman, M. Holmberg, K.N. Gray-Ideker, W.S. Keeton, D.P. Lettenmaier, L.R. Leung, N.J. Mantua, E.L. Miles, B. Noble, H. Parandvash, D.W. Peterson, A.K. Snover and S.R. Willard, 1999: *Impacts of Climate Variability and Change, Pacific Northwest*, 110 pp. <http://www.usgcrp.gov/usgcrp/Library/nationalassessment/pnw.pdf>.
- Mote, P.W., E.A. Parson, A.F. Hamlet, W.S. Keeton, D. Lettenmaier, N. Mantua, E.L. Miles, D.W. Peterson, D.L. Peterson, R. Slaughter and A.K. Snover, 2003: Preparing for climatic change: the water, salmon, and forests of the Pacific Northwest. *Climatic Change*, **61**, 45-88.
- Moulton, R. and D. Cuthbert, 2000: Cumulative impacts/risk assessment of water removal or loss from the Great Lakes-St. Lawrence River system. *Can. Water Resour. J.*, **25**, 181-208.
- Mountain Agenda, 1997: *Mountains of the World: Challenges of the 21st Century*. Mountain Agenda, Bern, 36 pp.
- MRAE (Ministry of Rural Affairs and the Environment, Malta), 2004: *The First Communication of Malta to the United Nations Framework Convention on Climate Change*, Ministry for Rural Affairs and the Environment, Malta.
- MRC, 2003: *State of the Basin Report: 2003*. Mekong River Commission, Phnom Penh, 300 pp.
- Mueller, D.R., W.F. Vincent and M.O. Jeffries, 2003: Break-up of the largest Arctic ice shelf and associated loss of an epishelf lake. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 2031, doi:10.1029/2003GL017931.
- Mullan, A.B., A. Porteous, D. Wratt and M. Hollis, 2005: *Changes in Drought Risk with Climate Change*. NIWA Report WLG2005. <http://www.mfe.govt.nz/publications/climate/drought-risk-may05/drought-risk-climate-change-may05.pdf>.
- Munich Re, 2004: *Annual Review of Natural Catastrophes 2003*. Munich, 8 pp. http://www.munichre.com/app_resources/pdf/ts/geo_risks/topicsgeo_2003_siebert_en.pdf.
- MWD, 2005: *The Family of Southern California Water Agencies. Metropolitan Water District of Southern California*. <http://www.bewaterwise.com/index.html>.
- Myers, N., 1997: The world's forests and their ecosystem services. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. G.C. Daily, Ed., Island Press, Washington, DC, 215-235.
- Naess, L.O., G. Bang, S. Eriksen and J. Veatne, 2005: Institutional adaptation to climate change: flood responses at the municipal level in Norway. *Global Environ. Chang.*, **15**, 125-138.
- Nagy, G.J., R.M. Caffera, M. Aparicio, P. Barrenechea, M. Bidegain, J.C. Jiménez, E. Lentini, G. Magrin and Co-authors, 2006: *Understanding the Potential Impact of Climate Change and Variability in Latin America and the Caribbean*. Report prepared for the Stern Review on the Economics of Climate Change, 34 pp. <http://www.sternreview.org.uk>.
- Nakićenović, N. and R. Swart, Eds., 2000: *Special Report on Emissions Scenarios*. Cambridge University Press, Cambridge, 599 pp.
- Namjou, P. and Co-authors, 2006: The integrated catchment study of Auckland City (New Zealand): long-term groundwater behaviour and assessment. *Proc. World Environmental and Water Resources Congress 2006*, R. Graham, Ed., May 21-25, 2006, Omaha, Nebraska, doi:10.1061/40856(200)311.
- NAST, 2000: *Climate Change Impacts in the United States, Overview*. Report for the U.S. Global Change Research Program. National Assessment Synthesis Team Members (NAST), 154 pp.
- Natsagdorj, L., P. Gomboluudev and P. Batima, 2005: Climate change in Mongolia. *Climate Change and its Projections*. P. Batima and B. Myagmarjav, Eds., Admon Publishing, Ulaanbaatar, 39-84.
- NC-Colombia, 2001: *1st National Communication to the UNFCCC*, 267 pp. http://unfccc.int/national_reports/non-annex_i_natcom/items/2979.php.
- NC-Ecuador, 2000: *1st National Communication to the UNFCCC*, 128 pp. http://unfccc.int/national_reports/non-annex_i_natcom/items/2979.php.
- NC-Nicaragua, 2001: *Impacto del Cambio Climático en Nicaragua*. Primera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático, PNUD/MARENA, 127 pp.
- NC-Perú, 2001: *1st National Communication to the UNFCCC*, 155 pp. <http://unfccc.int/resource/docs/natc/pernc1.pdf>.
- Nchito, M., P. Kelly, S. Sianongo, N.P. Luo, R. Feldman, M. Farthing and K.S. Baboo, 1998: *Cryptosporidiosis* in urban Zambian children: an analysis of risk factors. *Am. J. Trop. Med. Hyg.*, **59**, 435-437.
- Ndikumana, J., J. Stuth, R. Kamidi, S. Ossiya, R. Marambii and P. Hamlett, 2000: *Coping Mechanisms and their Efficacy in Disaster-prone Pastoral Systems of the Greater Horn of Africa: Effects of the 1995-97 Drought and the 1997-98 El Niño Rains and the Responses of Pastoralists and Livestock*. ILRI Project Report. A-AARNET (ASARECA-Animal Agriculture Research Network), Nairobi, Kenya, GL-CRSPLEWS (Global Livestock- Collaborative Research Support Program Livestock Early Warning System), College Station, Texas, USA, and ILRI (International Livestock Research Institute), Nairobi, 124 pp.
- NEAB (National Environment Advisory Board, St Vincent and the Grenadines), 2000: *Initial National Communication on Climate Change*, National Environment Advisory Board and Ministry of Health and the Environment, 74 pp.
- Nearing, M.A., F.F. Pruski and M.R. O'Neal, 2004: Expected climate change impacts on soil erosion rates: a review. *J. Soil Water Conserv.*, **59**, 43-50.
- NEB, 2006: *Canada's Oil Sands: Opportunities and Challenges to 2015: An Update*. National Energy Board, Calgary, Alberta, 85 pp.
- Neff, R., H. Chang, C. Knight, R. Najjar, B. Yarnal and H. Walker, 2000: Impact of climate variation and change on Mid-Atlantic Region hydrology and water resources. *Climate Res.*, **14**, 207-218.
- Nelson, F.E., 2003: (Un) frozen in time. *Science*, **299**, 1673-1675.
- New, M., 2002: Climate change and water resources in the southwestern Cape, South Africa. *S. Afri. J. Sci.*, **96**, 369-373.
- Nicholls, K.H., 1999: Effects of temperature and other factors on summer phosphorus in the inner Bay of Quinte, Lake Ontario: implications for climate warming. *J. Great Lakes Res.*, **25**(5), 250-262.
- Nicholson, S., 2005: On the question of the "recovery" of the rains in

- the West African Sahel. *J. Arid Environ.*, **63**, 615–641.
- Nicholson, S.E. and J.C. Selato, 2000: The influence of La Niña on African rainfall. *Int. J. Climatol.*, **20**, 1761–1776.
- Nicholson, S.E., B. Some and B. Kone, 2000: An analysis of recent rainfall conditions in West Africa, including the rainy seasons of the 1997 El Niño and the 1998 La Niña years. *J. Clim.*, **13**, 2628–2640.
- Nilsson, C., C.A. Reidy, M. Dynesius and C. Revenga, 2005: Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. *Science*, **308**, 405–408.
- NLWRA, 2001: *Australian Water Resources Assessment 2000*. National Land and Water Resources Audit, Land and Water Australia.
- NOAA, 2005: *Hazards/Climate Extremes*. National Climatic Data Center, U.S. Department of Commerce, <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/research/2005/aug/hazards.html>. Flooding.
- Noone, D. and I. Simmonds, 2002: Annular variations in moisture transport mechanisms and the abundance of $\delta^{18}\text{O}$ in Antarctic snow. *J. Geophys. Res.*, **107**, 4742, doi:10.1029/2002JD002262.
- Norrant, C. and A. Douguédroit, 2006: Monthly and daily precipitation trends in the Mediterranean. *Theor. Appl. Climatol.*, **83**, 89–106.
- Nurse, L. and Co-authors, 2001: Small Island States. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, J.J. McCarthy, O. F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken and K.S. White, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 843–876.
- Nuttall, M., F. Berkes, B. Forbes, G. Kofinas, T. Vlassova and G. Wenzel, 2005: Hunting, herding, fishing and gathering: indigenous peoples and renewable resource use in the Arctic. *Arctic Climate Impacts Assessment*, ACIA, C. Symon, L. Arris and B. Heal, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 649–690.
- O'Reilly, C., S. Alin, P. Plisnier, A. Cohen and B. McKee, 2003: Climate change decreases aquatic ecosystem productivity of Lake Tanganyika, Africa. *Nature*, **424**, 766–768.
- Oba, G., 2001: The importance of pastoralists' indigenous coping strategies for planning drought management in the arid zone of Kenya. *Nomadic Peoples*, **5**, 89–119.
- OECD, 2003: *Development and climate change in Nepal: focus on water resources and hydropower*. COM/ENV/EPOC/DCD/DAC(2003)1/FINAL, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, 64 pp.
- Oenema, O., N. Wrage, G.L. Velthof, J.W. van Groenigen, J. Dolfing and P.J. Kuikman, 2005: Trends in global nitrous oxide emissions from animal production systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **72**, 51–65.
- Ogle, S.M., F.J. Breidt and K. Paustian, 2005: Agricultural management impacts on soil organic carbon storage under moist and dry climatic conditions of temperate and tropical regions. *Biogeochem.*, **72**, 87–121.
- Oki, T. and S. Kanae, 2006: Global hydrological cycles and world water resources. *Science*, **313**, 1068–1072.
- Oki, T., Y. Agata, S. Kanae, T. Saruhashi and K. Musiake, 2003: Global water resources assessment under climatic change in 2050 using TRIP. *Water Resources: Systems Water Availability and Global Change*, S.W. Franks, G. Böschl, M. Kumagai, K. Musiake and D. Rosbjerg, Eds., IAHS Publication, 124–133.
- Olesen, J.E. and M. Bindi, 2002: Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *European J. Agronomy*, **16**, 239–262.
- Olesen, J.E., T.R. Carter, C.H. Díaz-Ambrona, S. Fronzek, T. Heidmann, T. Hickler, T. Holt, M.I. Minguéz, P. Morales, J. Palutikov, M. Quemada, M. Ruiz-Ramos, G. Rubæk, F. Sau, B. Smith, B. and M. Sykes, 2006: Uncertainties in projected impacts of climate change on European agriculture and terrestrial ecosystems based on scenarios from regional climate models. *Climatic Change*, **81**(Suppl. 1), doi: 10.1007/s10584-006-9216-1.
- Olsen, J.R., 2006: Climate change and floodplain management in the United States. *Climatic Change*, **76**, 407–426.
- Oltchev, A., J. Cermak, J. Gurtz, A. Tishenko, G. Kiely, N. Nadezhdina, M. Zappa, N. Lebedeva, T. Vitvar, J.D. Albertson, F. Tatarinov, D. Tishenko, V. Nadezhdin, B. Kozlov, A. Ibrom, N. Vygodskaya and G. Gravenhorst 2002: The response of the water fluxes of the boreal forest region at the Volga source area to climatic and land-use changes. *Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C*, **27**, 675–690.
- Oppol, N., R. Corobov, A. Nicolenco and V. Pantya, 2003: Climate change and potential impacts of its extreme manifestations on health. *Curier Medical*, **5**, 6–9.
- Orlove, B.S., J.C.H. Chiang and M.A. Cane, 2000: Forecasting Andean rainfall and crop yield from the influence of El Niño on Pleiades visibility. *Nature*, **403**, 68–71.
- Osman-Elasha, B., N. Goutbi, E. Spanger-Siegfried, B. Dougherty, A. Hanafi, S. Zakieldein, A. Sanjak, H.A. Atti and H.M. Elhassan, 2006: *Adaptation Strategies to Increase Human Resilience Against Climate Variability and Change: Lessons from the Arid Regions of Sudan*. AIACC Working Paper No. 42, Assessment of Impacts and Adaptation to Climate Change in Multiple Regions and Sectors Programme, 42 pp.
- Osterkamp, T.E., L. Vierek, Y. Shur, M.T. Jorgenson, C. Racine, A. Doyle and R.D. Boone, 2000: Observations of thermokarst and its impact on boreal forests in Alaska, U.S.A. *Arct. Antarct. Alp. Res.*, **32**, 303–315.
- Ouranos, 2004: *Adapting to Climate Change*. Ouranos, Montreal, ON, 91 pp. <http://www.ouranos.ca/cc/climang5.pdf>.
- Paavola, J. and W. Adger, 2002: *Justice and Adaptation to Climate Change*. Tyndall Centre for Climate Change Research, Norwich, 24 pp. http://www.tyndall.ac.uk/publications/working_papers/wp23.pdf.
- Pabón, J.D., 2003: El cambio climático global y su manifestación en Colombia. *Cuadernos Geograf.*, **12**, 111–119.
- Pachauri, R., 2004: Climate change and its implications for development: the role of IPCC assessments. *Inst. Devel. Stud. Bull.*, **35**, 11.
- PAGASA (Philippine Atmospheric, Geophysical and Astronomical Services Administration), 2001: *Documentation and Analysis of Impacts of and Responses to Extreme Climate Events*. Climatology and Agrometeorology Branch Technical Paper No. 2001-2, 55 pp.
- PAHO, 2003: *Status Report on Malaria Programs in the Americas*. 44th Directing Council, 55th Session of the Regional Comité. Pan American Health Organization, Washington, DC.
- Palmer, T.N. and J. Räisänen, 2002: Quantifying the risk of extreme seasonal precipitation events in a changing climate. *Nature*, **415**, 512–514.
- Pan, X.L., W. Deng and D.Y. Zhang, 2003: Classification of hydrological landscapes of typical wetlands in northeast China and their vulnerability to climate change. *Res. Environ. Sci.*, **16**(1), 14–18.
- Pan, Z.T., M. Segal, R.W. Arritt and E.S. Takle, 2004: On the potential change in solar radiation over the US due to increases of atmospheric greenhouse gases. *Renew. Energ.*, **29**, 1923–1928.
- Parkinson, A.J. and J.C. Butler, 2005: Potential impacts of climate change on infectious diseases in the Arctic. *Int. J. Circumpolar Health*, **64**, 478–486.
- Parrotta, J.A., 2002: Restoration and management of degraded tropical forest landscapes. *Modern Trends in Applied Terrestrial Ecology*, R.S. Ambasht and N.K. Ambasht, Eds., Kluwer Academic/Plenum Press, New York, 135–148.
- Parry, M., C.A. Rosenzweig, M. Iglesias, M. Livermore and G. Fisher, 2004: Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socioeconomic scenarios. *Global Environ. Chang.*, **14**(1), 53–67.

- Parry, M.L., Ed., 2000: *Assessment of potential effects and adaptations to climate change in Europe: The Europe Acacia Project*. Report of concerted action of the environment programme of the Research Directorate General of the Commission of the European Communities, Jackson Environmental Institute, University of East Anglia, Norwich, 320 pp.
- Parson, E.A., P.W. Mote, A. Hamlet, N. Mantua, A. Snover, W. Keeton, E. Miles, D. Canning and K.G. Ideker, 2001: Potential consequences of climate variability and change for the Pacific Northwest. *Climate Change Impacts on the United States - The Potential Consequences of Climate Variability and Change-Foundation Report*, National Assessment Synthesis Team, Ed., Cambridge University Press, Cambridge, 247-280.
- Parson, E.A., R.W. Corell, E.J. Barron, V. Burkett, A. Janetos, L. Joyce, T.R. Karl, M. MacCracken, J. Melillo, M.G. Morgan, D.S. Schimel and T. Wilbanks, 2003: Understanding climatic impacts, vulnerabilities and adaptation in the United States: building a capacity for assessment. *Climatic Change*, **57**, 9-42.
- Pascual, M., J.A. Ahumada, L.F. Chaves, X. Rodo and M. Bouma, 2006: Malaria resurgence in the East African highlands: temperature trends revisited. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, **103**, 5829-5834.
- Pattanayak, S. and R. Kramer, 2000: Worth of watersheds: a producer surplus approach for valuing drought control in eastern Indonesia. *Environment and Development Economics*, **6**, 123-146.
- Patz, J.A., 2002: A human disease indicator for the effects of recent global climate change. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, **99**, 12506-12508.
- Patz, J.A., D. Campbell-Lendrum, T. Holloway and J.A.N. Foley, 2005: Impact of regional climate change on human health. *Nature*, **438**, 310-317.
- Paustian, K., B.A. Babcock, J. Hatfield, R. Lal, B.A. McCarl, S. McLaughlin, A. Mosier, C. Rice, G.P. Robertson, N.J. Rosenberg, C. Rosenzweig, W.H. Schlesinger and D. Zilberman, 2004: *Agricultural Mitigation of Greenhouse Gases: Science and Policy Options*. CAST (Council on Agricultural Science and Technology) Report, R141 2004, Ames, Iowa, 120 pp.
- Payne, J.T., A.W. Wood, A.F. Hamlet, R.N. Palmer and D.P. Lettenmaier, 2004: Mitigating the effects of climate change on the water resources of the Columbia River basin. *Climatic Change*, **62**(1-3), 233-256.
- Penalba, O.C. and W.M. Vargas, 2004: Interdecadal and interannual variations of annual and extreme precipitation over central-northeastern Argentina. *Int. J. Climatol.*, **24**, 1565-1580.
- Peters, D.L., T.D. Prowse, A. Pietroniro and R. Leconte, 2006: Establishing the flood hydrology of the Peace-Athabasca Delta, northern Canada. *Hydrol. Process.*, **20**, 4073-4096.
- Petersen, T.C., M.A. Taylor, R. Demeritte, D.L. Duncombe, S. Burton, F. Thompson, A. Porter, M. Mercedes, E. Villegas, R. Semexant Fils, A. Klein Tank, A. Martis, R. Warner, A. Joyette, W. Mills, L. Alexander and B. Gleason, 2002: Recent changes in climate extremes in the Caribbean region. *J. Geophys. Res.*, **107** D21, 4601, doi:10.1029/2002JD002251.
- Peterson, A.T. and J. Shaw, 2003: *Lutzomyia* vectors for cutaneous leishmaniasis in southern Brazil: ecological niche models, predicted geographic distributions, and climate change effects. *Int. J. Parasitol.*, **33**, 919-931.
- Peterson, A.T., C. Martínez-Campos, Y. Nakazawa and E. Martínez-Meyer, 2005: Time-specific ecological niche modeling predicts spatial dynamics of vector insects and human dengue cases. *T. Roy. Soc. Trop. Med. H.*, **99**, 647-655.
- Peterson, B.J., R.M. Holmes, J.W. McClelland, C.J. Vorosmarty, R.B. Lammers, A.I. Shiklomanov, I.A. Shiklomanov and S. Rahmstorf, 2002: Increasing river discharge to the Arctic Ocean. *Science*, **298**, 2172-2173.
- Peterson, T.C. and R.S. Vose, 1997: An overview of the Global Historical Climatology Network temperature database. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **78**, 2837-2848.
- Peterson, T.C., V.S. Golubev and P.Y. Groisman, 1995: Evaporation losing its strength. *Nature*, **377**, 687-688.
- Petheram, C., G. Walker, R. Grayson, T. Thierfelder and L. Zhang, 2001: Towards a framework for predicting impacts of land-use on recharge. *Aust. J. Soil Res.*, **40**, 397-417.
- Pielke, R.A., Jr and M.W. Downton, 2000: Precipitation and damaging floods: trends in the United States, 1932-97. *J. Climate*, **13**, 3625-3637.
- Pienitz, R., M.S.V. Douglas and J.P. Smol, 2004: *Long-term Environmental Change in Arctic and Antarctic Lakes*. Springer Verlag, Berlin, 562 pp.
- Pilon-Smits, E.A.H., M.J. Ebskamp, M. Ebskamp, M. Paul, M. Jeuken, P. Weisbeek and S. Smeekens, 1995: Improved performance of transgenic fructan-accumulating tobacco under drought stress. *Plant Physiol.*, **107**, 125-130.
- Pittock, B., 2003: *Climate Change: An Australian Guide to the Science and Potential Impacts*. Australian Greenhouse Office, Canberra, 239 pp.
- Polemio, M. and D. Casarano, 2004: *Rainfall and Drought in Southern Italy (1821-2001)*. UNESCO/IAHS/IWHA, Pub. 286.
- Polsky, C. and W.E. Easterling, 2001: Adaptation to climate variability and change in the US Great Plains: a multi-scale analysis of Ricardian climate sensitivities. *Agr. Ecosyst. Environ.*, **85**, 133-144.
- Porter, J.R. and M.A. Semenov, 2005: Crop responses to climatic variation. *Philos. Trans. R. Soc. B: Biological Sciences*, **360**, 2021-2035.
- Pounds, J.A. and R. Puschendorf, 2004: Ecology: clouded futures. *Nature*, **427**, 107-109.
- Pounds, J.A., M. R. Bustamante, L.A. Coloma, J.A. Consuegra, M.P.L. Fogden, P.N. Foster, E. La Marca, K.L. Masters, A. Merino-Viteri, R. Puschendorf, S.R. Ron, G.A. Sanchez-Azofeifa, C.J. Still and B. E. Young, 2006: Widespread amphibian extinctions from epidemic disease driven by global warming. *Nature*, **439**(7073), 161-167.
- Premier of Victoria, 2006: Ballarat's future water supplies secured by major Bracks government action plan. Media release, 17 October 2006. http://www.premier.vic.gov.au/newsroom/news_item.asp?id=978.
- Protopapas, L., S. Katchamart and A. Platonova, 2000: Weather effects on daily water use in New York City. *J. Hydrol. Eng.*, **5**, 332-338.
- Prowse, T.D. and S. Beltaos, 2002: Climatic control of river-ice hydrology: a review. *Hydrol. Process.*, **16**, 805-822.
- Prowse, T.D., F.J. Wrona and G. Power, 2004: *Threats to Water Availability in Canada*. Environment Canada, NWRI Scientific Assessment Report No. 3, 9-18.
- Prowse, T.D. and Co-authors, 2006: Historical changes in Arctic freshwater ecosystems. *Ambio*, **35**(7), 339-346.
- Prudhomme, C. and H. Davies, 2006: Comparison of different sources of uncertainty in climate change impact studies in Great Britain. Hydrological Processes: Special Issue of International Workshop "Climatic and Anthropogenic Impacts on Water Resources Variability". *Technical Document in Hydrology No. 80 / Document technique en hydrologie No. 80*, UNESCO, Paris / UMR 5569, HydroSciences Montpellier, 2007, 183-190. <http://unesdoc.unesco.org/images/0015/001502/150251M.pdf>.
- Prudhomme, C., D. Jakob and C. Svensson, 2003: Uncertainty and climate change impact on the flood regime of small UK catchments. *J. Hydrol.*, **277**, 1-23.
- Psenner, R. and R. Schmidt, 1992: Climate-driven pH control of remote Alpine lakes and effects of acid deposition. *Nature*, **356**, 781-783.
- Pulwarty, R., K. Jacobs and R. Dole, 2005: The hardest working river: drought and critical water problems on the Colorado. *Drought and Water Crises: Science, Technology and Management*, D. Wilhite Ed., Taylor and Francis Press, Boca Raton, FL, 249-285.

- Pulwarty, R.S. and T.S. Melis, 2001: Climate extremes and adaptive management on the Colorado River: lessons from the 1997–1998 ENSO event. *J. Environ. Manage.*, **63**, 307–324.
- Qian, T. and Co-authors, 2006a: Simulation of global land surface conditions from 1948–2004. Part I: Forcing data and evaluations. *J. Hydrometeorol.*, **7**, 953–975.
- Qian, Y. and Co-authors, 2006b: More frequent cloud-free sky and less surface solar radiation in China from 1955 to 2000. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L01812, doi:10.1029/2005GL024586.
- Qin, D.H., 2002: *Assessment of Environment Change in Western China, 2nd Volume, Prediction of Environment Change in Western China*. Science Press, Beijing, 64, 73, 115, 132, 145–154, 160–161.
- Quadrelli, R. and J.M. Wallace, 2004: A simplified linear framework for interpreting patterns of Northern Hemisphere wintertime climate variability. *J. Climate*, **17**, 3728–3744.
- Quayle, W.C., L.S. Peck, H. Pet, J.C. Ellis-Evans and P.R. Harrigan, 2002: Extreme responses to climate change in Antarctic lakes. *Science*, **295**(5555), 645–645.
- Quayle, W.C., P. Convey, L.S. Peck, J.C. Ellis-Evans, H.G. Butler and H.J. Peat, 2003: Ecological responses of maritime Antarctic lakes to regional climate change. *Antarctic Peninsula Climate Variability: Historical and Palaeoenvironmental Perspectives*. E. Domack, A. Leventer, A. Burnett, R. Bindshadler, P. Convey and M. Kirby, Eds., American Geophysical Union, Washington, DC, 159–170.
- Queensland Government, 2005: *Queensland Water Plan 2005–2010*. Queensland Government, 27 pp. http://www.nrw.qld.gov.au/water/pdf/qld_water_plan_05_10.pdf.
- Ragab, R. and C. Prudhomme, 2002: Climate change and water resources management in arid and semi-arid regions: prospective and challenges for the 21st century. *Biosys. Engineering*, **81**, 3–34.
- Räsänen, J., Hansson, U., Ullerstieg, A., Döscher, R., Graham, L.P., Jones, C., Meier, H.E.M., Samuelson, P. and Willén, U., 2004: European climate in the late twenty-first century: regional simulations with two driving global models and two forcing scenarios. *Clim. Dyn.*, **22**, 13–31.
- Ramírez, E., B. Francou, P. Ribstein, M. Desclouitres, R. Guérin, J. Mendoza, R. Gallaire, B. Pouyaud and E. Jordan, 2001: Small glaciers disappearing in the tropical Andes: a case study in Bolivia: the Chacaltaya glacier, 16°S. *J. Glaciol.*, **47**, 187–194.
- Rawlins, S. C., A. Chen, M. Ivey, D. Amarakoon and K. Polson, 2005: The impact of climate change/variability events on the occurrence of dengue fever in parts of the Caribbean: a retrospective study for the period 1980–2002. *West Indian Med. J. Suppl.*, **53**(2), 54.
- Reay, D.S., K.A. Smith and A.C. Edwards, 2003: Nitrous oxide emission from agricultural drainage waters. *Global Chang. Biol.*, **9**, 195–203.
- Reilly, J. and Co-authors, 2003: U.S. agriculture and climate change: new results. *Climatic Change*, **57**, 43–69.
- Reilly, J.M., Ed., 2002: *Agriculture: The Potential Consequences of Climate Variability and Change*. Cambridge University Press, Cambridge, 136 pp.
- Reist, J.D. and Co-authors, 2006a: General effects of climate change on arctic fishes and fish populations. *Ambio*, **35**(7), 370–380.
- Reist, J.D. and Co-authors, 2006b: An overview of effects of climate change on selected arctic freshwater and anadromous fishes. *Ambio*, **35**(7), 381–387.
- Reist, J.D. and Co-authors, 2006c: Effects of climate change and UV radiation on fisheries for arctic freshwater and anadromous species. *Ambio*, **35**(7), 402–410.
- Republic of Vanuatu, 1999: *Vanuatu National Communication to the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change*, 55 pp.
- Resck, D.V.S., C.A. Vasconcellos, L. Vilela and M.C.M. Macedo, 2000: Impact of conversion of Brazilian cerrados to cropland and pastureland on soil carbon pool and dynamics. *Global Climate Change and Tropical Ecosystems*, R. Lal, J.M. Kimble and B.A. Stewart, Eds., CRC-Lewis Publishers, Boca Raton, FL, 169–195.
- Reynard, N., S. Crooks, R. Wilby and A. Kay, 2004: Climate Change and Flood Frequency in the UK. *Proc. 39th DEFRA Flood and Coastal Management Conference*, York. Defra, London, 11.1.1–11.1.12.
- Richardson, D., 2002: Flood risk: the impact of climate change. *Proc. Inst. Civil Engineers-Civil Engineering*, **150**, 22–24.
- Riebsame, W.E., K.M. Strzepek, J.L. Wescoat, Jr, R. Perrit, G.L. Graile, J. Jacobs, R. Leichenko, C. Magadza, H. Phien, B.J. Urbiztondo, P. Restrepo, W.R. Rose, M. Saleh, L.H. Ti, C. Tucci and D. Yates, 1995: Complex river basins. *As Climate Changes: International Impacts and Implications*, K.M. Strzepek and J.B. Smith, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 57–91.
- Rivera, A., G. Casassa, R. Thomas, E. Rignot, R. Zamora, D. Antúnez, C. Acuña and F. Ordenes, 2005: Glacier wastage on Southern Adelaide Island and its impact on snow runway operations. *Ann. Glaciol.*, **41**, 57–62.
- Robeson, S.M., 2002: Increasing growing-season length in Illinois during the 20th century. *Climatic Change*, **52**, 219–238.
- Robock, A. and Co-authors, 2000: The global soil moisture data bank. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **81**, 1281–1299.
- Robock, A. and Co-authors, 2005: Forty five years of observed soil moisture in Ukraine: no summer desiccation (yet). *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L03401, doi:10.1029/2004GL021914.
- Rockstrom, J., 2003: Water for food and nature in drought-prone tropics: vapour shift in rain-fed agriculture. *Philos. Trans. Roy. Soc. London - Series B*, **358**, 1997–2009.
- Roderick, M.L. and G.D. Farquhar, 2004: Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002. *Int. J. Climatol.*, **24**, 1077–1090.
- Roderick, M.L. and G.D. Farquhar, 2005: Changes in New Zealand pan evaporation since the 1970s. *Int. J. Climatol.*, **25**, 2031–2039.
- Rogora, M., R. Mosello and S. Arisci, 2003: The effect of climate warming on the hydrochemistry of Alpine lakes. *Water Air Soil Pollut.*, **148**, 347–361.
- Ronchail, J., L. Bourrel, G. Cochonneau, P. Vauchel, L. Phillips, A. Castro, J.L. Guyot and E. Oliveira, 2005: Inundations in the Mamoré Basin (south-western Amazon-Bolivia) and sea-surface temperature in the Pacific and Atlantic Oceans. *J. Hydrol.*, **302**, 223–238.
- Root, T.L. and S.H. Schneider, 2002: Climate change: overview and implications for wildlife. *Wildlife Responses to Climate Change: North American Case Studies*, S.H. Schneider and T.L. Root, Eds., Island Press, Washington, DC, 1–56.
- Root, T.L., J.T. Price, K.R. Hall, S.H. Schneider, C. Rosenzweig and J.A. Pounds, 2003: Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, **421**(6918), 57–60.
- Rosenberg, N.J., D.J. Epstein, D. Wang, L. Vail, R. Srinivasan and J.G. Arnold, 1999: Possible impacts of global warming on the hydrology of the Ogallala aquifer region. *Climatic Change*, **42**, 677–692.
- Rosenberg, N.J., R.A. Brown, C. Izaurralde and A.M. Thomson, 2003: Integrated assessment of Hadley Centre HadCM2 climate change projections on agricultural productivity and irrigation water supply in the conterminous United States. I. Climate change scenarios and impacts on irrigation water supply simulated with the HUMUS model. *Agri. Forest Meteorol.*, **117**(1–2), 73–96.
- Rosenzweig, C. and F.N. Tubiello, 2007: Adaptation and mitigation strategies in agriculture: an analysis of potential synergies. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, **12**, 855–873.
- Rosenzweig, C., F.N. Tubiello, R. Goldberg, E. Mills and J. Bloomfield, 2002: Increased crop damage in the US from excess precipitation

- under climate change. *Global Environ. Chang.*, **12**, 197–202.
- Ross, M.S., J.F. Meeder, J.P. Sah, P.L. Ruiz and G.J. Telesnicki, 2000: The southeast saline Everglades revisited: 50 years of coastal vegetation change. *J. Vegetation Sci.*, **11**, 101–112.
- Rowell, A. and P.F. Moore, 2000: *Global Review of Forest Fires*. WWF/IUCN, Gland, 66 pp. http://www.iucn.org/themes/fcp/publications/files/global_review_forest_fires.pdf.
- Ruhland, K.M., A. Priesnitz and J.P. Smol, 2003: Paleolimnological evidence from diatoms for recent environmental changes in 50 lakes across Canadian Arctic treeline. *Arct. Antarct. Alp. Res.*, **35**, 110–123.
- Ruosteenoja, K., T.R. Carter, K. Jylhä, and H. Tuomenvirta, 2003: *Future Climate in World Regions: An Intercomparison of Model-Based Projections for the New IPCC Emissions Scenarios*. The Finnish Environment **644**, Finnish Environment Institute, Helsinki, 83 pp.
- Ruth, M., B. Davidsdottir and A. Amato, 2004: Climate change policies and capital vintage effects: the case of U.S. pulp and paper, iron and steel, and ethylene. *J. Environ. Manage.*, **70**, 235–252.
- Saintilan, N. and R.J. Williams 1999: Mangrove transgression into saltmarsh environments in south east Australia. *Global Ecol. Biogeogr.*, **8**(2), 117–124.
- Sala, O.A., F.S. Chapin III, J.J. Armesto, E. Berlow, J. Bloomfield, R. Dirzo, E. Huber-Sanwald, L.F. Huenneke, R.B. Jackson, A. Kinzig, R. Leemans, D.M. Lodge, H.A. Mooney, M. Oesterheld, N.L. Poff, M.T. Sykes, B.H. Walker, M. Walker and D.H. Wall, 2000: Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, **287**, 1770–1774.
- Salewicz, A., 1995: Impact of climate change on the operation of Lake Kariba hydropower scheme on the Zambezi River. *Water Resources Management in the Face of Climatic and Hydrologic Uncertainties*, Z. Kaczmarek, Ed., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 395 pp.
- Salinger, M. J., 2001: Climate variation in New Zealand and the Southwest Pacific. *The Physical Environment. A New Zealand Perspective*, A. Sturman and R. Spronken-Smith, Eds., Oxford University Press, Victoria, 35 pp.
- Sanders, C. and M. Phillipson, 2003: UK adaptation strategy and technical measures: the impacts of climate change on buildings. *Build. Res. Inf.*, **31**(3–4), 210–221
- Sand-Jensen, K. and N.L. Pedersen, 2005: Broad-scale differences in temperature, organic carbon and oxygen consumption among lowland streams. *Freshw. Biol.*, **50**, 1927–1937.
- Sankaran, M., N.P. Hanan, R.J. Scholes, J. Ratnam, D.J. Augustine, B.S. Cade, J. Gignoux, S.I. Higgins, X. le Roux, F. Ludwig, J. Ardo, F. Banyikwa, A. Bronn, G. Bucini, K.K. Caylor, M.B. Coughenour, A. Diouf, W. Ekaya, C.J. Feral, E.C. February, P.G.H. Frost, P. Hiernaux, H. Hrabar, K.L. Metzger, H.H.T. Prins, S. Ringrose, W. Sea, J. Tews, J. Worden and N. Zambatis, 2005: Determinants of woody cover in African savannas. *Nature*, **438**, 846–849.
- Santos, F.D., K. Forbes and R. Moita, Eds., 2002: *Climate Change in Portugal: Scenarios, Impacts and Adaptation Measures*. SIAM Project Report, Gradiva, Lisbon, 456 pp.
- Sanz, J.J., T.J. Potti, J. Moreno, S. Merion and O. Frias, 2003: Climate change and fitness components of a migratory bird breeding in the Mediterranean region. *Global Change Biol.*, **9**, 461–472.
- Scaife, A., J. Knight, G. Vallis and C.K. Folland, 2005: A stratospheric influence on the winter NAO and North Atlantic surface climate. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L18715, doi: 10.1029/2005GL023226.
- Scavia, D., J.C. Field, D.F. Boesch, R. Buddemeier, D.R. Cayan, V. Burkett, M. Fogarty, M. Harwell, R. Howarth, C. Mason, D.J. Reed, T.C. Royer, A.H. Sallenger and J.G. Titus, 2002: Climate change impacts on U.S. coastal and marine ecosystems. *Estuaries*, **25**, 149–164.
- Schallenberg, M., C.J. Hall and C.W. Burns, 2003: Consequences of climate-induced salinity increases on zooplankton abundance and diversity in coastal lakes. *Marine Ecol. Prog. Ser.*, **251**, 181–189.
- Schär, C., P.L. Vidale, D. Luthi, C. Frei, C. Haberli, M.A. Liniger and C. Appenzeller, 2004: The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, **427**(6972), 332–336.
- Scheffer, M., S. Carpenter, J.A. Foley, C. Folke and B. Walker, 2001: Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, **413**, 591–596.
- Schiermeier, Q., 2006: Insurers' disaster files suggest climate is culprit. *Nature*, **441**(7094), 674–675.
- Schijven, J.F. and A.M. de Roda Husman, 2005: Effect of climate changes on waterborne disease in the Netherlands. *Water Sci. Technol.*, **51**, 79–87.
- Schlenker, W., W.M. Hanemann and A.C. Fisher, 2005: Will U.S. agriculture really benefit from global warming? Accounting for irrigation in the hedonic approach. *American Economic Review*, **95**, 395–406.
- Schlesinger, M.E. and N. Ramankutty, 1994: An oscillation in the global climate system of period 65–70 years. *Nature*, **367**, 723–726.
- Schlesinger, W.H., 1999: Carbon sequestration in soils. *Science*, **284**, 2095.
- Schneeberger, C., H. Blatter, A. Abe-Ouchi and M. Wild, 2003: Modelling changes in the mass balance of glaciers of the northern hemisphere for a transient 2× CO₂ scenario. *J. Hydrol.*, **282**(1–4), 145–163.
- Schofield, N.J., 1992: Tree planting for dryland salinity control in Australia. *Agroforestry Sys.*, **20**, 1–23.
- Schreider, S.Y., D.I. Smith and A.J. Jakeman, 2000: Climate change impacts on urban flooding. *Climatic Change*, **47**(1–2), 91–115.
- Schröter D., W. Cramer, R. Leemans, I.C. Prentice, M.B. Araújo, N.W. Arnell, A. Bondeau, H. Bugmann, T.R. Carter, C.A. Gracia, A.C. de la Vega-Leinert, M. Erhard, F. Ewert, M. Glendinning, J.I. House, S. Kankaanpää, R.J.T. Klein, S. Lavorell, M. Linder, M.J. Metzger, J. Meyer, T.D. Mitchell, I. Reginster, M. Rounsevell, S. Sabaté, S. Sitch, B. Smith, J. Smith, P. Smith, M.T. Sykes, K. Thonicke, W. Thuiller, G. Tuck, S. Zaehle and B. Zierl, 2005. Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe. *Science*, **310**, 1333–1337.
- Schulze, E.-D., 1982: Plant life forms and their carbon, water and nutrient relations. *Physiology and Plant Ecology II. Water Relations and Carbon Assimilation*, O.L. Lange, C.B. Osmond and H. Ziegler, Eds., Springer-Verlag, Berlin, 615–676.
- Schuster, C.J., A. Ellis, W.J. Robertson, J.J. Aramini, D.F. Charron and B. Marshall, 2005: Drinking water related infectious disease outbreaks in Canada, 1974–2001. *Can. J. Public Health*, **94**, 254–258.
- Scott, D., 2005: Ski industry adaptation to climate change: hard, soft and policy strategies. *Tourism and Global Environmental Change*, S. Gosling and M. Hall, Eds. Routledge, Oxford. 265–285.
- Scott, D. and B. Jones, 2006: *Climate Change and Seasonality in Canadian Outdoor Recreation and Tourism*, Climate Change Action Fund, University of Waterloo, Faculty of Environmental Studies, Waterloo, ON, 33 pp.
- Scudder, T., 2005: *The Future of Large Dams*. Earthscan, London, 408 pp.
- Semenov, S.M., V.V. Yasukevich and E.S. Gel'ver, 2006: *Identification of Climatogenic Changes*. Publishing Centre, Meteorology and Hydrology, Moscow, 325 pp.
- Senate of Canada, 2003: *Climate change: We are at Risk*. Final Report, Standing Senate Committee on Agriculture and Forestry, Ottawa.
- Senhorst, H.A. and J.J. Zwolsman, 2005: Climate change and effects on water quality: a first impression. *Water Sci. Technol.*, **51**, 53–59.
- Seo, S. N. and R. Mendelsohn, 2006: Climate change impacts on animal husbandry in Africa: a Ricardian analysis. *CEPPA Discussion Paper No.9*. Special Series on Climate Change and Agriculture in Africa. The Centre for Environmental Economics and Policy in Africa, University of Pretoria, Pretoria, 42 pp.

- Serreze, M.C. and Co-authors, 2003: Large-scale hydro-climatology of the terrestrial Arctic drainage system. *J. Geophys. Res.*, **108**(D2), 8160.
- Shabbar, A. and W. Skinner, 2004: Summer drought patterns in Canada and the relationship to global sea surface temperatures. *J. Clim.*, **17**, 2866–2880.
- Shanks, G.D., S.I. Hay, D.I. Stern, K. Biomndo and R.W. Snow, 2002: Meteorologic influences on *Plasmodium falciparum* malaria in the highland tea estates of Kericho, western Kenya. *Emerg. Infect. Dis.*, **8**, 1404–1408.
- Shen, X.T., Z.C. Mao and J.R. Zhu, 2003: *Saltwater Intrusion in the Changjiang Estuary*. China Ocean Press, Beijing, 175 pp (in Chinese).
- Sherbinin, A., A. Schiller and A. Pulsipher, 2007: The vulnerability of global cities to climate hazards. *Environ. Urbaniz.*, **12**(2), 93–102.
- Shiklomanov, I.A., Shiklomanov, A.I., Lammers, R.B., Peterson, B.J. and Vorosmarty, C.J., 2000: The dynamics of river water inflow to the Arctic Ocean. *The Freshwater Budget of the Arctic Ocean*, E.L. Lewis, E.P. Jones, T.D. Prowse and P. Wadhams, Eds., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 281–296.
- Shrestha, A.B., C.P. Wake, J.E. Dibb and P.A. Mayewski, 2000: Precipitation fluctuations in the Nepal Himalaya and its vicinity and relationship with some large-scale climatological parameters. *Int. J. Climatol.*, **20**, 317–327.
- Shrestha, M.L. and A.B. Shrestha, 2004: *Recent Trends and Potential Climate Change Impacts on Glacier Retreat/Glacier Lakes in Nepal and Potential Adaptation Measures*. ENV/EPOC/GF/SD/RD(2004)6/FINAL, OECD, Paris, 23 pp.
- Shukla, P.R., M. Kapshe and A. Garg, 2005: Development and climate: impacts and adaptation for infrastructure assets in India. *Proc. OECD Global Forum on Sustainable Development: Development and Climate Change*, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, 38 pp.
- Silander, J., B. Vehviläinen, J. Niemi, A. Arosilta, T. Dubrovin, J. Jormola, V. Keskiarja, A. Keto, A. Lepistö, R. Mäkinen, M. Ollila, H. Pajula, H. Pitkänen, I. Sammalkorpi, M. Suomalainen and N. Veijalainen, 2006: *Climate Change Adaptation for Hydrology and Water Resources*. FINADAPT Working Paper 6, Finnish Environment Institute Mimeographs 336, Helsinki, 54 pp.
- Silvestri, G.E. and C.S. Vera, 2003: Antarctic Oscillation signal on precipitation anomalies over southeastern South America. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 2115, doi:10.1029/2003GL018277.
- Simonovic, S.P. and L.H. Li, 2003: Methodology for assessment of climate change impacts on large-scale flood protection system. *J. Water Res. Pl.-ASCE*, **129**(5), 361–371.
- Sims, R.E.H., A. Hastings, B. Schlamadinger, G. Taylor and P. Smith, 2006: Energy crops: current status and future prospects. *Global Change Biol.*, **12**, 1–23.
- Sinclair, M.R., J.A. Renwick and J.W. Kidson, 1997: Low-frequency variability of Southern Hemisphere sea level pressure and weather system activity. *Mon. Weather Rev.*, **125**, 2531–2543.
- Sinclair, T.R. and L.C. Purcell, 2005: Is a physiological perspective relevant in a 'genocentric' age? *J. Exp. Bot.*, **56**, 2777–2782.
- Singh, R.B.K., S. Hales, N. de Wet, R. Raj, M. Hearnden and P. Weinstein, 2001: The influence of climate variation and change on diarrhoeal disease in the Pacific Islands. *Environ. Health Persp.*, **109**, 155–1594.
- Small, C. and R.J. Nicholls, 2003: A global analysis of human settlement in coastal zones. *J. Coastal Res.*, **19**, 584–599.
- Smeets, E.M.W., A.P.C. Faaij, I.M. Lewandowski and W.C. Turkenburg, 2007: A bottom up quickscan and review of global bio-energy potentials to 2050. *Prog. Energy Comb. Sci.*, **33**, 56–106.
- Smit, B. and E. Wall, 2003: *Adaptation to Climate Change Challenges and Opportunities: Implications and Recommendations for the Canadian Agri-Food Sector*, Senate Standing Committee on Forestry and Agriculture, Ottawa, Canada. <http://www.parl.gc.ca/37/2/parlbus/commbus/senate/Com-e/agri-e/power-e/smith-e.htm>.
- Smith, K.A. and F. Conen, 2004: Impacts of land management on fluxes of trace greenhouse gases. *Soil Use Manage.*, **20**, 255–263.
- Smith, L.C., Y. Sheng, G.M. MacDonald and L.D. Hinzman, 2005: Disappearing Arctic lakes. *Science*, **308**, 1429.
- Smith, S.D., T.E. Huxman, S.F. Zitzer, T.N. Charlet, D.C. Housman, J.S. Coleman, L.K. Fenstermaker, J.R. Seemann and R.S. Nowak, 2000: Elevated CO₂ increases productivity and invasive species success in an arid ecosystem. *Nature*, **408**, 79 - 82.
- Smith, V.R., 2002: Climate change in the sub-Antarctic: an illustration from Marion Island. *Climatic Change*, **52**(3), 345–357.
- Smol, J.P. and Co-authors, 2005: Climate driven regime shifts in the biological communities of arctic lakes. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, **102**(12), 4397–4402.
- SOE, 2001: *Australia State of the Environment 2001*, Independent Report to the Commonwealth Minister for the Environment and Heritage. Australian State of the Environment Committee, CSIRO Publishing on behalf of the Department of the Environment and Heritage, 129 pp. <http://www.ea.gov.au/soe/2001>.
- Solanes, M. and A. Jouravlev, 2006: *Water Governance for Development and Sustainability*. Economic Commission for Latin America and the Caribbean, Santiago, 84 pp.
- Somlyódy, L., 2002: *Strategic Issues of the Hungarian Water Resources Management*. Academy of Science of Hungary, Budapest, 402 pp (in Hungarian).
- Sommaruga-Wogroth, S., K.A. Koinig, R. Schmidt, R. Sommaruga, R. Tessadri and R. Psenner, 1997: Temperature effects on the acidity of remote alpine lakes. *Nature*, **387**, 64–67.
- Sorensen, I., P. Stone and B. Rogers, 2000: Effect of time of sowing on yield of a short and a long-season maize hybrid. *Agronomy New Zealand*, **30**, 63–66.
- SRA, 2005: Sequía en el Chaco genera fuerte pérdidas. Comunicado de prensa de la Sociedad Rural Argentina. <http://www.ruralarg.org.ar/>.
- Stakhiv, E.Z., 1998: Policy implications of climate change impacts on water resource management. *Water Policy*, **1**, 159–175.
- Steenvoorden, J. and T. Endreny, 2004: *Wastewater Re-use and Groundwater Quality*. IAHS Publication 285, 112 pp.
- Stern, N., 2007: *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge University Press, Cambridge, 692 pp.
- Stewart, I.T., D.R. Cayan and M.D. Dettinger, 2005: Changes toward earlier streamflow timing across western North America. *J. Climate*, **18**, 1136–1155.
- Stige, L.C., J. Stave, K.S. Chan, L. Ciannelli, N. Pettorelli, Glantz, P., H.R. Herren and N.C. Stenseth, 2006: The effect of climate variation on agro-pastoral production in Africa. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, **103**, 3049–3053.
- Straile, D., D.M. Livingstone, G.A. Weyhenmeyer and D.G. George, 2003: The response of freshwater ecosystems to climate variability associated with the North Atlantic Oscillation. *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact*, Geophysical Monograph, 134. American Geophysical Union, Washington, DC, 279 pp.
- Suarez, P., W. Anderson, V. Mahal and T.R. Lakshmanan, 2005: Impacts of flooding and climate change on urban transportation: a systemwide performance assessment of the Boston Metro Area. *Transportation Research Part D-Transport and Environment*, **10**(3), 231–244.
- Summit Environmental Consultants, 2004: *Trepanier Landscape Unit (Westside) Water Management Plan*. Regional District of Central Okanagan and British Columbia, Ministry of Sustainable Resource Management, Kelowna, 300 pp.
- Sutherland, K., B. Smit, V. Wulf, and T. Nakalevu, 2005: Vulnerability

- to climate change and adaptive capacity in Samoa: the case of Saoluafata village. *Tiempo*, **54**, 11–15.
- Sutherst, R.W., 2004: Global change and human vulnerability to vector-borne diseases. *Clin. Microb. Rev.*, **17**, 136–173.
- Sutton, R.T. and D.L.R. Hodson, 2003: Influence of the ocean on North Atlantic climate variability 1871–1999. *J. Clim.*, **16**, 3296–3313.
- Sutton, R.T. and D.L.R. Hodson, 2005: Atlantic Ocean forcing of North American and European summer climate. *Science*, **290**, 2133–2137.
- Swank, W.T. and J.E. Douglass, 1974: Streamflow greatly reduced by converting deciduous hardwood stands to pine. *Science*, **185**, 857–859.
- Swarup, A., M.C. Manna and G.B. Singh, 2000: Impact of land use and management practices on organic carbon dynamics in soils of India. *Global Climate Change and Tropical Ecosystems*, R. Lal, J.M. Kimble and B.A. Stewart, Eds., CRC-Lewis Publishers, Boca Raton, FL, 261–282.
- Swiss Re, 1998: *Floods: An Insurable Risk*, Swiss Reinsurance Company, Zurich, 51 pp.
- Syvitski, J.P.M., 2002: Sediment discharge variability in Arctic rivers: implications for a warmer future. *Polar Res.*, **21**(2), 323–330.
- Syvitski, J.P.M., C.J. Vorosmarty, A.J. Kettner and P. Green, 2005: Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science*, **308**, 376–380.
- Szolgay, J., K. Hlavcova, S. Kohnová and R. Danihlik, 2004: Assessing climate change impact on river runoff in Slovakia. *Characterisation of the Runoff Regime and its Stability in the Tisza Catchment. Proc. XXII Conference of the Danubian Countries on the Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management*. Brno, 30 August–2 September 2004. Brno, 2004. CD-edition.
- Tao, F., M. Yokozawa, Y. Hayashi and E. Lin, 2003a: Changes in agricultural water demands and soil moisture in China over the last half-century and their effects on agricultural production. *Agri. Forest Meteorol.*, **118**, 251–261.
- Tao, F., M. Yokozawa, Y. Hayashi and E. Lin, 2003b: Future climate change, the agricultural water cycle, and agricultural production in China. *Agri. Eco. Environ.*, **95**, 203–215.
- Tao, F., M. Yokozawa, Z. Zhang, Y. Hayashi, H. Grassl and C. Fu, 2004: Variability in climatology and agricultural production in China in association with the East Asia summer monsoon and El Niño South Oscillation. *Clim. Res.*, **28**, 23–30.
- Tao, F.L., M. Yokozawa, Y. Hayashi and E. Lin, 2005: A perspective on water resources in China: interactions between climate change and soil degradation. *Climatic Change*, **68**(1–2), 169–197.
- Tebakari, T., J. Yoshitani, and C. Suvanpimol, 2005: Time-space trend analysis in pan evaporation over kingdom of Thailand. *J. Hydrol. Eng.*, **10**, 205–215.
- Thanh, T.D., Y. Saito, D.V. Huy, V.L. Nguyen, T.K.O. Ta and M. Tateishi, 2004: Regimes of human and climate impacts on coastal changes in Vietnam. *Reg. Environ. Change*, **4**, 49–62.
- The Water Page, 2001: BPD business partners for development water and sanitation clusters. <http://www.africanwater.org/bpd.htm>.
- Thomas, C.D., A. Cameron, R.E. Green, M. Bakkenes, L.J. Beaumont, Y.C. Collingham, B.F.N. Erasmus, M.F. de Siqueira and Co-authors, 2004: Extinction from climate change. *Nature*, **427**, 145–148.
- Thomas, J.M.G., K.J. Boote, L.H. Allen Jr., M. Gallo-Meagher and J.M. Davis, 2003: Elevated temperature and carbon dioxide effects on soybean seed composition and transcript abundance. *Crop Science*, **43**(4), 1548–1557.
- Thomas, M.K., D.F. Charron, D. Waltner-Toews, C. Schuster, A.R. Maarouf and J.D. Holt, 2006: A role of high impact weather events in waterborne disease outbreaks in Canada, 1975–2001. *Int. J. Environ. Health Res.*, **16**, 167–180.
- Thomson, A.M., N.J. Rosenberg, R.C. Izaurralde and R.A. Brown, 2005a: Climate change impacts for the conterminous USA: an integrated assessment Part 5. Irrigated agriculture and national grain crop production. *Climatic Change*, **69**, 89–105.
- Thomson, M.C., S.J. Mason, T. Phindela and S.J. Connor, 2005b: Use of rainfall and sea surface temperature monitoring for malaria early warning in Botswana. *Am. J. Trop. Med. Hyg.*, **73**, 214–221.
- Thomson, M.C., F.J. Doblas-Reyes, S.J. Mason, R. Hagedorn, S.J. Connor, T. Phindela, A.P. Morse and T.N. Palmer, 2006: Malaria early warnings based on seasonal climate forecasts from multi-model ensembles. *Nature*, **439**, 576–579.
- Thornton, P.K., P.G. Jones, T.M. Owiyo, R.L. Kruska, M. Herero, P. Kristjanson, A. Notenbaert, N. Bekele and A. Omolo, with contributions from V. Orindi, B. Otiende, A. Ochieng, S. Bhadwal, K. Anantram, S. Nair, V. Kumar and U. Kulkar, 2006: *Mapping Climate Vulnerability and Poverty in Africa*. Report to the Department for International Development, ILRI, Nairobi, 200 pp.
- Treacy, J.M., 1994: *Las Chacras de Copaque: Andenes y Riego en el Valle de Colca*. Instituto de Estudios Peruanos, Lima, 298 pp.
- Trenberth, K.E., 1990: Recent observed interdecadal climate changes in the Northern Hemisphere. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **71**, 988–993.
- Trenberth, K.E. and J.M. Caron, 2000: The Southern Oscillation revisited: sea level pressures, surface temperatures and precipitation. *J. Clim.*, **13**, 4358–4365.
- Trenberth, K.E. and T.J. Hoar, 1997: El Niño and climate change. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 3057–3060.
- Trenberth, K.E., and D.J. Shea, 2006: Atlantic hurricanes and natural variability in 2005. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L12704, doi:10.1029/2006GL026894.
- Trenberth, K.E. and D.P. Stepaniak, 2001: Indices of El Niño evolution. *J. Clim.*, **14**, 1697–1701.
- Trenberth, K.E., A.G. Dai, R.M. Rasmussen and D.B. Parsons, 2003: The changing character of precipitation. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **84**, 1205–1217.
- Trenberth, K.E., D.P. Stepaniak and L. Smith, 2005: Interannual variability of the patterns of atmospheric mass distribution. *J. Clim.*, **18**, 2812–2825.
- Trnka, M., M. Dubrovski and Z. Zalud, 2004: Climate change impacts and adaptation strategies in spring barley production in the Czech Republic. *Climatic Change*, **64**, 227–255.
- Tuchman, N.C., K.A. Wahtera, R.G. Wentzel and J.A. Teeri, 2003: Elevated atmospheric CO₂ alters leaf litter quality for stream ecosystems: an *in situ* leaf decomposition study. *Hydrobiologica*, **495**, 203–211.
- Tumerbaatar, D., 2003: *Annual report on permafrost: potential impacts of climate change, vulnerability and adaptation assessment for grassland ecosystem and livestock sector in Mongolia*, AIACC Project Report.
- UCV, 2005: Análisis de las lluvias diarias y acumuladas durante Febrero de 2005 en la región central capital. Facultad de Ingeniería, Instituto de Mecánica de Fluidos Departamento de Ingeniería Hidrometeorológica, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- UK Water Industry Research, 2004: *Climate Change and the Hydraulic Design of Sewerage Systems: Summary Report*. Report 03/CC/10/0, UKWIR, London.
- UN, 2002: *CEO Briefing on Climate Change and the Financial Services Industry*. Environment Programme Finance Initiatives (UNEP FI).
- UN, 2003: *World Water Development Report: Water for Life, Water for People*. UNESCO, Paris and Berghahn Books, Barcelona, 36 pp.
- UN, 2006: *World Water Development Report 2: Water, a Shared Responsibility*. UNESCO, Paris, 601 pp.
- UNCHS, 2003: *Local Action for Global Goals: Water and Sanitation in the World's Cities 2003*. Earthscan, London.
- UNCHS, 2006: *Meeting Development Goals in Small Urban Centres:*

- Water and Sanitation in the World's Cities 2006*. Earthscan, London, 273 pp.
- UNDP, 2006: *Beyond Scarcity: Power, Poverty, and the Global Water Crisis*. Human Development Report 2006. United Nations Development Program, New York.
- UNEP/GRID-Arendal, 2002: *Vital Climate Graphics*. United Nations Environment Programme. <http://www.grida.no/climate/vital/index.htm>.
- UN-HABITAT, 2003: *The Challenge of Slums: Global Report on Human Settlements 2003*, Earthscan Publications, London, 310 pp.
- United States Environmental Protection Agency, 1997: Need for American Indian and Alaska Native water systems. *Drinking Water Infrastructure Needs Survey First Report to Congress*. EPA 812-R-97-001, UNEPA, Washington, DC, 27-33. http://www.epa.gov/ogwdw/needssurvey/pdfs/1997/report_needssurvey_1997_findings-tribal.pdf
- Unkovich, M., 2003: Water use, competition, and crop production in low rainfall, alley farming systems of south-eastern Australia. *Australian J. Agri. Res.*, **54**, pp. 751-762.
- UNMSM, 2004: Calor intenso y largas sequías. Especiales, Perú. <http://www.unmsm.edu.pe/Destacados/contenido.php?mver=11>.
- UNWWAP (United Nations World Water Assessment Programme), 2003: *Water for People, Water for Life - UN World Water Development Report*, UNESCO, Paris, and Berghahn Books, Oxford, 688 pp.
- UNWWAP (United Nations World Water Assessment Programme), 2006: *Water: A Shared Responsibility*. UNESCO, Paris, and Berghahn Books, Oxford, 600 pp.
- US Department of the Interior, 2005: *Water 2025: Preventing Crises and Conflict in the West*. Water 2025 Status Report, Washington, DC, 36 pp. <http://www.doi.gov/water2025>.
- US Global Change Research Program, 2000: *Water: the Potential Consequences of Climate Variability and Change for the Water Resources of the United States*. National Water Assessment Group, U.S. Global Change Research Program, 160 pp. <http://www.gcrio.org/NationalAssessment/water/water.pdf>.
- Uyarra, M., I. Cote, J. Gill, R. Tinch, D. Viner and A.L. Watkinson, 2005: Island-specific preferences of tourists for environmental features: implications of climate change for tourism-dependent states. *Environ. Cons.*, **32**(1), 11-19.
- van Lieshout, M., R.S. Kovats, M.T.J. Livermore and P. Martens, 2004: Climate change and malaria: analysis of the SRES climate and socio-economic scenarios. *Global Environ. Chang.*, **14**, 87-99.
- Van Rheenen, N.T., A.W. Wood, R.N. Palmer and D.P. Lettenmaier, 2004: Potential implications of PCM climate change scenarios for Sacramento-San Joaquin River Basin hydrology and water resources. *Climatic Change*, **62**, 257-281.
- Vandenbergh, J., 2002: The relation between climate and river processes, landforms and deposits during the Quaternary. *Quaternary Int.*, **91**, 17-23.
- VanRheenen, Vasilev, V., 2003: Variability of *Shigella flexneri* serotypes during a period in Israel, 2000-2001. *Epidemiol. Infect.*, **132**, 51-56.
- Vásquez, O.C., 2004: *El Fenómeno El Niño en Perú y Bolivia: Experiencias en Participación Local*. Memoria del Encuentro Binacional Experiencias de prevención de desastres y manejo de emergencias ante el Fenómeno El Niño, Chiclayo, Peru. ITDG, 209 pp.
- Vasquez-Leon, M., C.T. West, and T.J. Finan, 2003: A comparative assessment of climate vulnerability: agriculture and ranching on both sides of the US-Mexico border. *Global Environ. Chang.*, **13**, 159-173.
- Venegas, S.A. and L.A. Mysak, 2000: Is there a dominant timescale of natural climate variability in the Arctic? *J. Clim.*, **13**, 3412-3434.
- Vesely, J., V. Majer, J. Kopacek and S.A. Norton, 2003: Increasing temperature decreases aluminium concentrations in Central European lakes recovering from acidification. *Limnol. Oceanogr.*, **48**, 2346-2354.
- Vic DSE, 2006: *Wimmera Mallee Pipeline*. Department of Sustainability and Environment, Victoria.
- Villagrán de León, J., J. Scott, C. Cárdenas and S. Thompson, 2003: *Early Warning Systems in the American Hemisphere: Context, Current Status, and Future Trends*. Final Report. Hemispheric Consultation on Early Warning, Antigua, 15 pp.
- Vincent, J.R., 1995: Timber trade, economics and tropical forest management. *Ecology, Conservation and Management of Southeast Asia Rainforests*, B.R. Primack and T.E. Lovejoy, Eds., Yale University Press, New Haven, CN, 241-261.
- Viner, D., M. Sayer, M. Uyarra and N. Hodgson, 2006: *Climate Change and the European Countryside: Impacts on Land Management and Response Strategies*. Report prepared for the Country Land and Business Association, CLA, Norwich, 180 pp.
- Viney, N.R., Bates, B.C., Charles, S.P., Webster, I.T., Bormans, M. and Aryal, S.K., 2003: Impacts of climate variability on riverine algal blooms. *Proc. International Congress on Modelling and Simulation, MODSIM 2003 14-17 July*, Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand Inc., 23-28. <http://mssanz.org.au/modsim03/Media/Articles/Vol%201%20Articles/23-28.pdf>.
- Vörösmarty, C.J., P.J. Green, J. Salisbury and R.B. Lammers, 2000: Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. *Science*, **289**, 284-288.
- Vörösmarty, C.J., E.M. Douglas, A.A. Green and C. Ravenga, 2005: Geospatial indicators of emerging water stress: an application to Africa. *Ambio*, **34**(3), 230-236.
- Vuille, M., R.S. Bradley, M. Werner and F. Keimig, 2003: 20th century climate change in the tropical Andes: observations and model results. *Climatic Change*, **59**, 75-99.
- Wahab, H.M., 2005: The impact of geographical information system on environmental development. *Unpublished MSc Thesis*, Faculty of Agriculture, Al-Azhar University, Cairo, 149 pp.
- Wall, E., and B. Smit, 2005: Climate change adaptation in light of sustainable agriculture. *J. Sustainable Agric.*, **27**, 113-123.
- Walsh, J.E. and Co-authors, 2005: Cryosphere and hydrology. *Arctic Climate Impacts Assessment*, ACIA, C. Symon, L. Arris and B. Heal, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 183-242.
- Walsh, M.E., D.G. de la Torre Ugarte, H. Shapouri and S.P. Slinsky, 2003: Bioenergy crop production in the United States. *Environ. Res. Econ.*, **24**, 313-333.
- Walter, M.T., D.S. Wilks, J.Y. Parlange and B.L. Schneider, 2004: Increasing evapotranspiration from the conterminous United States. *J. Hydrometeorol.*, **5**, 405-408.
- Wang, T., 2003: Study on desertification in China. Contents of desertification research. *J. Desert Res.*, **23**(5), 477-482.
- Warren, J., J. Berner and J. Curtis, 2005: Climate change and human health: infrastructure impacts to small remote communities in the North. *Int. J. Circumpolar Health*, **64**(5), 498.
- Warren, R., N. Arnell, R. Nicholls, P. Levy and J. Price, 2006: *Understanding the Regional Impacts of Climate Change*. Research Report prepared for the Stern Review on the Economics of Climate Change. Tyndall Centre for Climate Change Research, Working Paper 90, UEA, Norwich, 223 pp.
- Wassmann, R., X.H. Nguyen, T.H. Chu and P.T. To, 2004: Sea-level rise affecting the Vietnamese Mekong Delta: water elevation in the flood season and implications for rice production. *Climatic Change*, **66**, 89-107.
- Water 21, 2002: Joining forces. *Magazine of the International Water Association*, **October**, 55-57.

- Water Corporation, 2006: *Planning for New Sources of Water*. West Australian Water Corporation. http://www.watercorporation.com.au/W/water_sources_new.cfm.
- Waters, D., W.E. Watt, J. Marsalek and B.C. Anderson, 2003: Adaptation of a storm drainage system to accommodate increased rainfall resulting from climate change *J. Environ. Plan. Manag.*, **46**, 755–770.
- Watson, R.T. and W. Haerberli, 2004: Environmental threats, mitigation strategies and high mountain areas. Mountain Areas: A Global Resource. *Ambio*, **13**, 2-10.
- Watson, R.T., M.C. Zinyowera and R.H. Moss, Eds., 1997: *The Regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability*. Cambridge University Press, Cambridge, 517 pp.
- WDR, 2003: *World Disaster Report: Focus on Ethics in Aid*. International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, Geneva, 240 pp.
- WDR, 2004: *World Disaster Report: Focus on Community Resilience*. International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, Geneva, 240 pp.
- Webster, P.J., V.O. Magana, T.N. Palmer, J. Shukla, R.A. Tomas, M. Yanagi and T. Yasunari, 1998: Monsoons: processes, predictability and the prospects for prediction. *J. Geophys. Res.*, **103**, 14451–14510.
- Werritty, A., 2001: Living with uncertainty: climate change, river flow and water resources management in Scotland. *Sci. Total Environ.*, **294**, 29–40.
- West, T.O. and G. Marland, 2003: Net carbon flux from agriculture: carbon emissions, carbon sequestration, crop yield, and land-use change. *Biogeochem.*, **63**, 73–83.
- West, T.O. and W.M. Post, 2002: Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **66**, 1930–1946.
- Wheaton, E., V. Wittrock, S. Kulshretha, G. Koshida, C. Grant, A. Chipanshi and B. Bonsal, 2005: *Lessons Learned from the Canadian Drought Years of 2001 and 2002: Synthesis Report*. Saskatchewan Research Council Publication No. 11602-46E03, Saskatoon, Saskatchewan. <http://www.agr.gc.ca/pfra/drought/info/11602-46E03.pdf>.
- White, M.A., N.S. Diffenbaugh, G.V. Jones, J.S. Pal and F. Giorgi, 2006: Extreme heat reduces and shifts United States premium wine production in the 21st century. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, **103**, 11217–11222.
- Whittington, H. and S.W. Gundry, 1998: Global climate change and hydroelectric resources. *Eng. Sci. Ed. J.*, **7**, 29–34.
- WHO (World Health Organization), 2003: *Report of Synthesis Workshop on Climate Change and Health in Small Islands States*, 1-4 December 2003, Republic of the Maldives. World Health Organization, Geneva, 95 pp.
- WHO (World Health Organization), 2004: *Guidelines for Drinking Water Quality. Volume 1: Recommendations*, Third Edition, WHO, Geneva, 366 pp.
- WHO (World Health Organization), 2005: *Water Safety Plans: Managing Drinking Water Quality from Catchment to Consumer*. Prepared by A. Davison and Co-authors, WHO/SDE/WSH/05.06, WHO, Geneva, 235 pp.
- WHO/UNICEF, 2000: *Global water supply and sanitation assessment 2000 report*. World Health Organization with UNICEF, Geneva, 79 pp. http://www.who.int/docstore/water_sanitation_health/Globassessment/GlobalTOC.htm WHO/UNICEF.
- Wijeratne, M.A., 1996: Vulnerability of Sri Lanka tea production to global climate change. *Water Air Soil Poll.*, Historical Archive, 87–94.
- Wilby, R.L., 2006: When and where might climate change be detectable in UK river flows? *Geophys. Res. Lett.*, **33**(19), L19407, doi:10.1029/2006GL027552.
- Wilby R.L. and I. Harris, 2006: A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: low-flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Resour. Res.*, **42**, W02419, doi:10.1029/2005WR004065.
- Williams, K.L., K.C. Ewel, R.P. Stumpf, F.E. Putz and T.W. Workman, 1999: Sea-level rise and coastal forest retreat on the west coast of Florida. *Ecology*, **80**, 2045–2063.
- Williams, R.H., E.D. Larson and H. Jin, 2006: Synthetic fuels in a world of high oil and carbon prices. *Proc. 8th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*, Trondheim, Norway, June.
- Williams, S.E., E.E. Bolitho and S. Fox, 2003: Climate change in Australian tropical rainforests: an impending environmental catastrophe. *P. Roy. Soc. Lond. B Bio.*, **270**, 1887–1892.
- Winter, T.C. and M.K. Woo, 1990: Hydrology of lakes and wetlands. *Surface Water Hydrology*, M.G. Wolman and H.C. Riggs, Eds., Geological Society of America, Boulder, CO, Vol. 0-1, 159–188.
- Woo, M.K., R.D. Rowsell and R.G. Clark, 1993: *Hydrological Classification of Canadian Prairie Wetlands and Prediction of Wetland Inundation in Response to Climatic Variability*. Canadian Wildlife Service, Environment Canada, Ottawa, ON, 23 pp.
- Woodruff, R.E. and Co-authors, 2002: Predicting Ross River virus epidemics from regional weather data. *Epidemiology*, **13**, 384–393.
- Woodruff, R.E., C.S. Guest, M.G. Garner, N. Becker and M. Lindsay, 2006: Early warning of Ross River virus epidemics: combining surveillance data on climate and mosquitoes. *Epidemiology*, **17**(5), 569–575.
- Woods, R.A. and C. Howard-Williams, 2004: Advances in freshwater sciences and management. *Freshwaters of New Zealand*, J.S. Harding, M.P. Mosley, C.P. Pearson and B.K. Sorrell, Eds., New Zealand Hydrological Society Inc. and New Zealand Limnological Society Inc., Christchurch, 764 pp.
- Woodworth, P.L. and D.L. Blackman, 2004: Evidence for systematic changes in extreme high waters since the mid-1970s. *J. Climate*, **17**, 1190–1197.
- World Bank, 2000: *Cities, Seas and Storms: Managing Change in Pacific Island Economies. Vol. IV, Adapting to Climate Change*. The World Bank, Washington, DC, 72 pp.
- World Bank, 2002: *World Development Indicators*, CD-ROM, The World Bank, Washington, DC.
- World Bank, 2004a: *Water Resources Sector Strategy: Strategic Directions for World Bank Engagement*. Pub. No. 28114, The World Bank, Washington, DC, 88 pp.
- World Bank, 2004b: *Modelled Observations on Development Scenarios in the Lower Mekong Basin*. Mekong Regional Water Resources Assistance Strategy, prepared for the World Bank with Mekong River Commission cooperation, Washington, DC and Vientiane, 142 pp. http://www.mrcmekong.org/free_download/report.htm.
- World Commission on Dams, 2000: *Dams and Development: A New Framework for Decision-Making*. Earthscan, London, 442 pp.
- World Water Council, 2006: *Final Report of the 4th World Water Forum*. National Water Commission of Mexico, Mexico City, 262 pp.
- World Water Forum, 2000: *The Africa Water Vision for 2025: Equitable and Sustainable Use of Water for Socioeconomic Development*. World Water Forum, The Hague, 30 pp.
- Wright, K.R. and A. Valencia Zegarra, 2000: *Machu Picchu: A Civil Engineering Marvel*. American Society of Civil Engineers Press, Reston, Virginia, 144 pp.
- Wrona, F.J. and Co-authors, 2005: Freshwater ecosystems and fisheries. *Arctic Climate Impact Assessment, ACIA*, C. Symon, L. Arris and B. Heal, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 353–452.
- Wrona, F.J., T.D. Prowse, J.D. Reist, J.E. Hobbie, L.M.J. Lévesque

- and W.F. Vincent, 2006: Climate change effects on aquatic biota, ecosystem structure and function. *Ambio*, **35**(7), 359–369.
- WWF, 2005: *An Overview of Glaciers, Glacier Retreat, and Subsequent Impacts in Nepal, India and China*. WWF Nepal Programme, 79 pp. <http://assets.panda.org/downloads/himalayaglaciarsreport2005.pdf>.
- Xu, C.X., 2003: *China National Offshore and Coastal Wetlands Conservation Action Plan*. China Ocean Press, Beijing, 116 pp (in Chinese).
- Yamada, T., 1998: *Glacier Lake and its Outburst Flood in the Nepal Himalaya*. Monograph No. 1, March 1998, Data Center for Glacier Research, Japanese Society of Snow and Ice, Tokyo, 96 pp.
- Yan, X., T. Ohara and H. Akimoto, 2003: Development of region-specific emission factors and estimation of methane emission from rice field in East, Southeast and South Asian countries. *Global Change Biology*, **9**, 237–254.
- Yang, D., B. Ye and A. Shiklomanov, 2004a: Discharge characteristics and changes over the Ob River watershed in Siberia. *J. Hydrometeorol.*, **5**, 595–610.
- Yang, D., B. Ye and D.L. Kane, 2004b: Streamflow changes over Siberian Yenisei River basin. *J. Hydrol.*, **296**, 59–80.
- Yang, D.Q., D.L. Kane, L.D. Hinzman, X. Zhang, T. Zhang and H. Ye, 2002: Siberian Lena River hydrologic regime and recent change. *J. Geophys. Res.*, **107**(D23), 4694, doi:10.1029/2002JD002542.
- Yin, Y.Y., Q.L. Miao and G.S. Tian, 2003: *Climate Change and Regional Sustainable Development*. Science Press, Beijing, 224 pp.
- Yoshikawa, K. and L.D. Hinzman, 2003: Shrinking thermokarst ponds and groundwater dynamics in discontinuous permafrost. *Permafrost Periglac. Proc.*, **14**(2), 151–160.
- Young, R.A., 2005: *Determining the Economic Value of Water: Concepts and Methods*. Resources for the Future Press, Washington, DC, 300 pp.
- Zavaleta, E.S. and K.B. Hulvey, 2004: Realistic species losses disproportionately reduce grassland resistance to biological invaders. *Science*, **306**, 1175–1177.
- Zebisch, M., T. Grothmann, D. Schroeter, C. Hasse, U. Fritsch and W. Cramer, 2005: *Climate Change in Germany: Vulnerability and Adaptation of Climate Sensitive Sectors*. Federal Environmental Agency (Umweltbundesamt), Dessau, 205 pp.
- Zeidler, R.B., 1997: Continental shorelines: climate change and integrated coastal management. *Ocean Coast. Manage.*, **37**(1), 41–62.
- Zhai P. and X. Pan, 2003: Trends in temperature extremes during 1951–1999 in China. *Geophys. Res. Lett.*, **30**(17), 1913, doi:10.1029/2003GL018004.
- Zhai, P.M., 2004: Climate change and meteorological disasters. *Sci. Techn. Rev.*, **193**(7), 11–14.
- Zhai, P.M., A. Sun, F. Ren, X. Liu, B. Gao and Q. Zhang, 1999: Changes of climate extremes in China. *Climatic Change*, **42**, 203–218.
- Zhang, T.J., O.W. Frauenfeld, M.C. Serreze, A. Etringer, C. Oelke, J. McCreight, R.G. Barry, D. Gilichinsky, D.Q. Yang, H.C. Ye, F. Ling and S. Chudinova, 2005: Spatial and temporal variability in active layer thickness over the Russian Arctic drainage basin. *J. Geophys. Res.*, **110**(D16), D16101, doi:10.1029/2004JD005642.
- Zhang, Y., W. Chen and J. Cihlar, 2003: A process-based model for quantifying the impact of climate change on permafrost thermal regimes, *J. Geophys. Res.*, **108**(D22), 4695 doi:10.1029/2002JD003354.
- Zhou, G., N. Minakawa, A.K. Githeko and G. Yan, 2004: Association between climate variability and malaria epidemics in the East African highlands. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, **101**, 2375–2380.
- Zhou, Y. and R.S.J. Tol, 2005: Evaluating the costs of desalination and water transport. *Water Resour. Res.*, **41**, 1–10.
- Zierl, B. and H. Bugmann, 2005: Global change impacts on hydrological processes in Alpine catchments. *Water Resour. Res.*, **41**(2), 1–13.

부록 I: 기후모델에 대한 설명 (Climate Model Descriptions)

모델 명칭	모델 개발 기관	해상도 (위도/경도)	모델을 설명하는 참고문헌 (Reference, 참조)
CGCM1	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada	대기성분: $\sim 3.7^\circ \times 3.7^\circ$ 해양성분: $\sim 1.8^\circ \times 1.8^\circ$	Flato et al., 2000
HadCM2	Met Office Hadley Centre, UK	$2.5^\circ \times 3.75^\circ$	Johns et al., 1997
HadCM3	Met Office Hadley Centre, UK	$2.5^\circ \times 3.75^\circ$	Gordon et al., 2000 Pope et al., 2000
RegCM2	National Center for Atmospheric Research, USA	~ 50 km	Giorgi et al., 1993a, b
ECHAM4 (with OPYC3)	Max Planck Institut für Meteorologie (MPI) and the Deutsches Klimarechenzentrum (DKRZ), Germany	$\sim 2.8^\circ \times 2.8^\circ$	Roeckner et al., 1996

참고문헌 (References):

- Flato, G.M., G.J. Boer, W.G. Lee, N.A. McFarlane, D. Ramsden, M.C. Reader and A.J. Weaver, 2000: The Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis global coupled model and its Climate. *Clim. Dyn.*, **16**, 451-467.
- Johns, T.C., R.E. Carnell, J.F. Crossley, J.M. Gregory, J.F.B. Mitchell, C.A. Senior, S.F.B. Tett and R.A. Wood, 1997: The second Hadley Centre coupled ocean-atmosphere GCM: model description, spinup and validation. *Clim. Dyn.*, **13**, 103-134.
- Gordon, C., C. Cooper, C.A. Senior, H.T. Banks, J.M. Gregory, T.C. Johns, J.F.B. Mitchell and R.A. Wood, 2000: The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Clim. Dyn.*, **16**, 147-168
- Pope, V., M.L. Gallani, P.R. Rowntree and R.A. Stratton, 2000: The impact of new physical parameterizations in the Hadley centre climate model: HadAM3. *Clim. Dyn.*, **16**, 123-146
- Giorgi, F., M.R. Marinucci and G.T. Bates, 1993: Development of a second generation regional climate model (RegCM2). Part I Boundary layer and radiative transfer processes. *Mon. Weather Rev.*, **121**, 2794-2813.
- Giorgi, F., M.R. Marinucci, G.T. Bates and G. DeCanio, 1993: Development of a second generation regional climate model (RegCM2). Part II Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions. *Mon. Weather Rev.*, **121**, 2814-2832
- Roeckner, E., K. Arpe, L. Bengtsson, M. Claussen, L. Dümenil, M. Esch, M. Giorgetta, U. Schlese and U. Schulzweida, 1996: *The atmospheric general circulation model ECHAM-4: model description and simulation of present-day climate*. Max-Planck Institute for Meteorology, Report No.218, Hamburg, Germany, 90 pp.

부록 II: 용어 해설 (Glossary)

편집자 : Jean Palutikof (영국)

공동편집자 : Clair Hanson (영국), Bryson Bates (호주)

본 용어풀이는 IPCC 제 4차 평가보고서에서 출판된 용어풀이집에 기초한다.

사용된 이탤릭체는 다음과 같은 의미를 가진다.

용어풀이 단어 참조 : 용어풀이 2차 참조 (즉, IPCC의 AR4에 제출된 실무 그룹 보고서의 용어풀이집에 포함되어 있거나, 본 용어풀이집의 용어설명 부분에 정의되어 있는 용어)

A.

Abrupt climate change (돌발적 기후 변화)

기후계의 비선형성 때문에 돌발적 기후변화가 일어날 수 있다. 이것은 급속한 기후변화, 돌발적 사상, 혹은 놀라움 (surprises)이라고도 불린다. "돌발적 (abrupt)"이라는 용어는 원인 강제력의 전형적인 시간스케일보다 더 급속한 시간스케일을 말한다. 그러나 모든 돌발적 기후변화에 외부 강제력이 필요하지는 않다. 가능한 돌발 현상으로 제안된 것들로는 열염순환 (thermo-haline circulation)의 극적인 재편성, 급속한 융해 (deglaciation), 영구동토 (permafrost)의 대량 해동 혹은 탄소순환의 급속한 변화로 이어지는 토양 호흡작용의 증가 등이 있다. 비선형계의 급속히 변화하는 강한 강제력으로 인한 완전히 예상 밖의 현상도 있을 수 있다.

Active layer (활성층)

영구동토 지역에서 매년 해동과 동결을 반복하는 지표 토층

Adaptation (적응)

실제 혹은 예상 기후변화 영향에 대한 자연계와 인간계의 취약성을 감소시킬 이니셔티브와 대책을 말한다. 예기적 적응 (anticipatory adaptation)과 대응적 적응 (reactive adaptation), 민간 적응과 공공 적응, 자율적 적응 (autonomous adaptation)과 계획된 적응 (planned adaptation)등 다양한 적응유형이 존재한다. 예를 들면, 강과 해안의 독 높이기, 온도 충격에 민감한 식물을 좀 더 강한 식물로 대체하기 등이 있다.

Adaptive capacity (적응 능력)

한 국가나 지역이 효과적인 적응 대책을 이행할 능력, 자원 및 제도의 종합

Aerosols (에어로솔)

공기 중의 고체나 액체 입자들을 말한다. 전형적인 크기는 0.01~10 μ m (1mm의 1/1000)이며, 대기 중에 수 시간 동안 잔류한다. 에어로솔은 자연적으로 발생하거나 인위적으로 발생할 수 있다. 에어로솔은 몇 가지 방식으로 기후에 영향을 줄 수 있다. 직접적으로는 복사를 산란

시키고 흡수하며, 간접적으로는 구름 응결핵으로 작용하거나 구름의 광학적 특성과 수명을 변경시켜 기후에 영향을 준다.

Afforestation (조림)

과거 (최소 50년 간)에 숲이 없었던 토지에 새로이 숲을 조성하는 것을 말한다. 삼림 (forest)과 조림 (afforestation), 재조림 (reforestation), 삼림벌채 (deforestation) 등 관련 용어에 관해서는 "<IPCC 특별 보고서: 토지사용, 토지사용 변화 및 삼림지 (IPCC Special Report on Land Use, Land-Use Change and Forestry)>" (IPCC, 2000)를 참고한다.

Albedo (알베도)

표면이나 물체에 반사되는 태양복사열 (solar radiation)의 구성비이며 %로 표현한다. 눈에 덮인 표면은 알베도가 높고, 토양 표면의 알베도는 높은 곳부터 낮은 곳까지 다양하다. 식생으로 덮인 표면과 해양의 알베도는 낮다. 행성으로서의 지구의 알베도는 주로 구름의 양, 눈, 얼음, 나뭇잎, 토양피복의 변화에 따라 달라진다.

Algal bloom (적조현상)

호수, 강, 바다의 조류 (algae)가 폭발적으로 번식하는 것.

Alpine (고산)

생물 지리학적으로 수목한계선 위는 비탈로 되어 있고, 로제트 (rosette)를 형성하는 초본 식물과 키가 작고 느리게 자라는 목본 식물이 존재하는 것이 특징인 지대.

Annex I countries (부속서 I 국가)

UNFCCC의 부속서 I (1998년에 수정됨)에 포함된 국가들. 1990년의 모든 OECD 국가와 시장경제전환 국가들이 포함되어 있다. UNFCCC의 4.2(a)와 4.2(b) 아래, 부속서 I 국가들은 개별적으로, 혹은 공동으로, 2000년까지는 1990년 온실가스 배출량 수준으로 복귀한다는 목표에 동참하기로 다짐했다. 자동적으로, 다른 국가들은 부속서 I 비 포함국 (non-annex I countries)으로 불린다.

Annex II countries (부속서 II 국가)

UNFCCC의 부속서 II에 포함된 국가들. 1990년 현재의

OECD국가가 포함된다. UNFCCC의 4.2(a)아래, 이 국가들은 국가 보고서 작성 등 그들의 의무를 준수하기 위해 개도국을 도울 재정적 지원을 제공할 것으로 예상된다. 또한 환경적으로 건전한 기술을 활발히 개발하여 개도국으로 이전시킬 것으로 예상된다.

Annex B countries (부속서 B 국가)

교토의정서 부속서 B에 포함된 국가로, 온실가스 배출량 목표에 합의한 국가들이다. 터키와 벨라루스를 제외한 모든 부속서 I 국가 (1998년에 수정됨)가 포함된다. 교토의정서 참고.

Annular modes (극진동)

구역 평균 중위도 편서풍의 변화에 해당하는 대기 순환의 우선적 변화패턴. 북반구 극진동 (Northern Annular Mode)은 북대서양 편향이 있고, 북대서양 진동 (North Atlantic Oscillation)과 높은 상관관계가 있다. 남반구 극진동 (Southern Annular Mode)은 남반구에서 일어난다. 중위도 편서풍의 변동성 역시 동서류 (zonal flow) (또는 바람)인 것으로 알려졌고, 동서지수 (zonal index)가 정의 되어있다.

Anthropogenic (인위적)

인간으로 인해 발생하거나, 인간 활동에 의해 만들어진.

Aquaculture (양식)

수확을 목적으로 수중식물이나 연어나 조개류 등과 같은 수중 동물을 일정한 장소에서 재배하는 것.

Aquifer (대수층)

지하수를 머금고 있는 투수성의 암층. 비 피압 대수층 (unconfined aquifer)은 국지적인 강우나 하천 및 호수 등에 의해 직접 함양되며, 함양물은 대수층 상부의 암반과 토양의 투수성에 의해 영향을 받는다.

Arid region (건조지역)

강수량이 적은 건조한 육지지역. 적은 강수량이란 대체로 연강수량이 250mm미만인 것으로 간주한다.

Atlantic Multi-decadal Oscillation (대서양 수십 년 주기 진동, AMO)

북대서양에서의 수십 년 주기 (65~75년)의 해수면 온도 변화. 해수면 온도는 1860~1880년과 1930~1960년간에는 온난한 상태를 보였으나, 1905~1925년과 1970~1990년간에는 0.4°C 수준의 범위에서 한랭 상태를 보였다.

Atmosphere (대기)

지구를 둘러싸고 있는 기체. 건조 공기는 질소 (78.1% volume mixing ratio)와 산소 (20.9% volume mixing ratio)가 대부분을 차지하고, 나머지는 다수의 미량 가스들, 이를테면 아르곤 (0.93% volume mixing ratio), 헬륨, 복사활성이 있는 CO₂ (0.03% volume mixing ratio)와 오존 등의 온실가스가 차지한다. 실제 대기는 온실가스인 수증기를 포함하고 있다. 수증기량은 매우 가변적이지만 일반적으로 대략 1% volume mixing ratio가 함유되어 있다. 대기에는 구름과 에어로솔도 포함되어 있다.

Atmospheric boundary layer (대기경계층)

지구 표면에 가까운 대기층으로서 경계표면을 통한 마찰이나 혹은 열의 전달 및 기타 변수에 의해 영향을 받는다.

Attribution (원인규명)

탐색과 원인 규명 (Detection and attribution) 참고

B.

Barrier (장벽)

목표, 즉 적응이나 완화 잠재력에 도달하는데 방해가 되는 것. 장벽은 극복되거나 정책, 프로그램, 대책에 의해 완화될 수 있다. 장벽 제거방법으로는 직접적으로 시장 오류를 시정하거나 제도적 능력의 개선, 위험과 불확실성의 축소, 시장 거래 활성화, 규제정책 강화를 통해서 공공 및 민간 분야의 거래 비용을 삭감하는 것 등이 있다.

Baseline (베이스라인, 기준 배출량)

다른 결과를 측정하는데 기준으로 삼을 수 있는 측정 가능한 양. 이 기준으로부터 다른 것의 결과를 측정할 수 있다. 중재 시나리오를 분석할 때 기준 (reference)으로 사용되는 비중재 (non-intervention) 시나리오가 그 예이다.

Basin (유역)

하천, 강, 호수의 배수구역.

Biodiversity (생물다양성)

다양한 공간범위에 있는 모든 유기체와 생태계의 총 다양성 (유전자부터 전체 생물군계까지).

Bioenergy (바이오 에너지)

바이오 매스 (Biomass)로부터 얻어진 에너지. 바이오 매스 (Biomass) 참고.

Biofuel (바이오 연료)

유기물질 혹은 식물이 생성하는 가연성 기름으로 만든 연료. 예를 들면, 알코올, 제지공정에서 나오는 흑액 (black liquor), 목재, 콩기름 등이 있다.

Biomass (바이오 매스)

일정 지역 혹은 부피 안의 유기체의 총 질량. 최근에는 죽은 식물을 바이오 매스 (Biomass)에 포함시키기도 한다. 바이오 매스의 양은 건조중량으로 표현하거나 에너지나 탄소 혹은 질소 함량으로 표현한다.

Biome (생물 군계)

생물권 (biosphere)의 중요하고 독특한 지역적 요소. 일반적으로 몇 개의 생태계 (예: 기후가 비슷한 지역 내의 삼림, 강, 연못, 늪)로 구성된다. 전형적인 동식물 집단이 있는 것이 특징이다.

Biosphere (생물권: 육지 생물권, 해양 생물권)

지구시스템의 대기, 육지 (육지 생물권), 바다 (해양 생물권)에서 모든 생태계와 살아있는 유기체로 이루어진 권역. 찌꺼기, 토양 유기질, 해양의 유기 분해물 같은 파생된 유기물 사체도 포함된다.

Biota (모든 생물)

살아있는 모든 유기체. 식물군과 동물군을 통 털어 하나의 단위로 고려함.

Black carbon (검댕, BC)

빛 흡수특성, 화학 반응성, 열 안정성에 기초하여 편의상 에어로솔의 하나로 정의 된다. 그을음 (soot), 숯 (charcoal),

빛을 흡수하는 난분해성 유기물질로 이루어져 있다.

Bog (소택지, 습지, 늪)

토탄(土炭)이 축적되는 산성의 습지.

Boreal forest (아 한대림)

캐나다 동부해안에서 서쪽으로 알래스카까지 이르고 시베리아에서 서쪽으로 러시아 전체를 지나 유럽 평원까지 계속되는 진소나무, 가문비나무, 전나무, 낙엽송수림 등 아 한대지역의 삼림.

Boundary layer (경계층)

대기경계층 (Atmospheric boundary layer) 참조.

C.

C3 Plants (C3 식물)

여러 가지 나무와 쌀, 밀, 콩, 감자, 채소 등과 같은 농작물을 포함하여 광합성하면서 C3복합물을 생산하는 식물.

C4 Plants (C4 식물)

여러 가지 풀과 옥수수, 사탕수수, 기장 등과 같은 중요한 농작물을 포함하여 광합성 동안 C4 복합물을 생산하는 식물로서, 주로 열대지역에서 재배됨.

CCS (탄소포획저장)

산업 및 에너지 관련 발생원에서 나오는 CO₂를 분리하여 저장 장소로 전달 이동시킴으로서 대기로부터 장기적으로 격리시키는 공정 (Carbon Capture and Storage, CCS).

Carbon cycle (탄소 순환)

대기, 해양, 육지 생물권, 암권 (lithosphere)을 통한 탄소 (CO₂ 등 여러 형태의 탄소)의 순환을 가리킴.

Carbon dioxide (이산화탄소)

자연적으로 발생하는 가스이며, 화석탄소 퇴적물로 된 화석 원료 (예: 오일, 가스, 석탄)의 연소, 바이오 매스 연소, 토지이용 변화, 기타 산업공정에서 부산물로 생성되기도 한다. CO₂는 지구의 복사 균형에 영향을 주는 주요 인위적 온실가스이다. 다른 온실가스를 측정하는데 기준이 되는 가스로, 지구 온난화 지수 (global warming potential)는 1을 갖는다.

CO₂ enrichment (이산화탄소 풍부화)

CO₂ 시비 (fertilization) 참조.

CO₂ fertilization (이산화탄소 시비효과)

대기의 CO₂ 농도가 증가한 경과로 식물성장이 증대되는 것.

식물의 광합성 메커니즘에 따라, 특정 종류의 식물은 대기 CO₂ 농도의 변화에 좀 더 민감하다.

Carbon sequestration (탄소 격리)

탄소를 함유하는 물질의 격리 (특히, 이산화탄소). 격리 (sequestration) 참조.

Catchment (유역)

하천상의 임의 지점으로 우수를 수집하여 흘러보내는 지역의 범위.

Cholera (콜레라)

박테리아 (Vibrio cholerae)에 의해 발생하는 수인성의 위장부위에 생기는 전염병으로 잦은 설사와 경련을 일으키는 등 위 통증을 느끼게 되며, 결국에는 탈수와 쇼크로 사망에 이르게 된다.

Clean Development Mechanism (청정 개발 체제, CDM)

CDM은 교토의정서의 12조에 정의되어 있으며, 다음 2가지 목적을 충족하기 위한 의도이다. (1) 부속서 I에 포함되지 않은 국가들이 지속 가능한 발전을 달성하고 교토의정서의 궁극적 목적에 기여하는데 원조한다. (2) 부속서 I에 포함된 국가들이 그들의 배출량 한도와 감축 약속을 지키는데 원조한다. 온실가스 배출량을 제한하거나 감소시키는 부속서 I 비포함국에서 착수된 CDM 사업에서 발생하는 배출권 (Certified Emission Reduction Units; CER)은 COP/MOP (당사국 회의)에서 지정한 운영 단체의 인증을 받으면 부속서 B 국가들로부터 투자자 (정부 혹은 산업체)에게 나누어 줄 수 있다. 이 사업에서 생긴 수익의 지분은 경영 경비를 충당하는데 사용될 뿐 아니라 기후변화의 악영향에 특별히 취약한 개도국들이 적응 비용을 충당할 수 있도록 돕는 데도 사용된다.

Climate (기후)

좁은 의미로는 평균 기후, 좀 더 엄밀히 말하면, 수개월에서 수천 년 혹은 수백만 년에 걸쳐 기후 관련 변수의 평균과 변동성을 통계적으로 표현한 것이라고 정의된다. 세계기상 기구 (WMO)가 정한 이 변수들의 평균 산출기간은 30년이다. 관련된 변량은 온도, 강수, 바람 같은 지표면 변수들이다. 넓은 의미의 기후는 기후 시스템의 상태를 말하며, 통계학적 서술도 포함된다.

Climate change (기후변화)

기후상태의 변화가 기후 특성의 평균이나 변동성의 변화를 통해 확인되고 (예: 통계분석을 통해) 보통 수십 년 이상 장기간 지속되는 것을 말한다. 기후변화는 자연적 내부 과정 혹은 외부 강제력으로 인해 일어나거나, 혹은 대기 조성이나 토지사용에서 인위적 변화가 지속되어 일어날 수도 있다. UN 기후 변화협약 (United Nations Framework Convention on Climate Change; UNFCCC) 제1조는 기후변화를 “대기조성을 변경시키는 인간 활동에 직·간접적인 원인이 있고, 그에 더해 상당한 기간 동안 관측된 자연적 기후 변동에도 원인이 있는 기후 변화”로 정의한다. 따라서 UNFCCC는 대기 조성을 변경시키는 인간 활동에 원인이 있는 기후변화와 자연적 원인에 의한 기후 변동성을 구분한다. 기후변동성; 탐지와 원인규명 참고.

Climate feedback (기후 피드백)

최초 과정의 결과가 2차 과정에 변화를 일으키고 그것이 다시 초기 과정에 영향을 주는 식의 기후계과정들 간의 상호작용 메커니즘. 양의 피드백은 애초의 과정을 강화하고 음의 피드백은 약화시킨다.

Climate model (기후 모델)

기후계 구성요소들의 물리적, 화학적, 생물학적 특성, 구성요소 간 상호작용 과정과 피드백 과정을 토대로 이미 알려진 특성의 전부나 일부를 고려하여 기후계를 수치로 표시한 것. 기후계는 복잡성을 달린 모델들을 통해 표현될 수 있다. 즉, 구성요소 혹은 복합적 구성

요소에 대해 공간 차원의 개수, 물리적, 화학적, 생물학적 과정을 명확히 표현할 수 있는 정도, 경험적 모수화(parameterization)가 포함되는 수준 등의 특성이 다른 다양한 계층적 모델을 확인할 수 있다. 대기-해양 대순환 모델(AOGCMs)은 현재 유효한 스펙트럼 내에서 최대한 반영할 수 있는 기후계를 표현한다. 화학과 생물학을 대화형으로 모델링하는 것을 포함해 좀 더 복잡한 모델 쪽으로 진화하는 중이다(WG I의 8장 참고). 기후 모델은 기후를 연구하고 시뮬레이션하기 위한 연구도구로 사용되고, 월, 계절 및 경년별 기후예측을 비롯한 운영 목적에 사용된다.

Climate projection (기후 전망)

온실가스와 에어로졸의 배출 혹은 농도 시나리오 또는 복사 강제력 시나리오에 대한 기후계의 반응을 전망한 것. 보통은 기후모델을 통한 시뮬레이션에 기초한다. 기후 전망은 기후예측과는 다르다. 기후전망은 사용된 배출/농도/복사강제력 시나리오에 좌우된다. 이 시나리오들은 미래의 사회경제적, 기술적 발달에 관한 가정들에 기초하는데 이 가정들은 미래에 실현될 수도 있고 실현되지 않을 수도 있으므로 상당히 높은 불확실성을 가진다고 할 수 있다.

Climate scenario (기후 시나리오)

내부적으로 모순 없는 기후학적 관계에 기초해서 미래의 기후를 타당하고 간단하게 표현한 것. 이 관계들은 인위적 기후변화의 잠재적 결과를 연구하기 위해 구성되고 종종 영향모델(impact model)의 입력 자료로 사용된다. 기후전망은 기후 시나리오를 구성할 때 원시 자료로 사용되기도 한다. 그러나 기후 시나리오는 관측된 현재의 기후와 같은 추가 정보를 필요로 하는 경우가 많다. 기후변화 시나리오는 기후 시나리오와 현재 기후의 차이이다.

Climate system (기후계)

기후계는 5가지 주 요소, 즉 대기권(atmosphere), 수권(hydrosphere), 빙권(cryosphere), 육지표면(land surface), 생물권(biosphere), 그리고 이들의 상호작용으로 이루어진 매우 복잡한 시스템이다. 기후계는 그 자체의 내부 동역학의 영향 아래 화산분출, 태양 성질의 변동과 같은 외부 강제력과 대기의 조성변화, 토지이용 변화 같은 인위적 강제력으로 인해 시간이 지나면서 서서히 전개된다.

Climate variability (기후 변동성)

개별 기상현상을 넘어 모든 시공간 범위의 기후에서 평균 상태와 통계수치(표준편차, 이변 발생횟수 등)가 변동하는 것. 변동성은 기후계내의 자연적인 내부 과정(내부 변동성) 때문 일수도 있고, 자연적 혹은 인위적 외부 강제력(외부 변동성)때문일 수도 있다. 기후변화 참고.

Confidence (신뢰성)

어떤 결과의 옳고 그름에 대한 신뢰 수준은 이 기술 보고서의 BOX 1.1에서 정의된 표준 용어를 사용하여 표현되어 있다.

가능성(Likelihood), 불확실성(Uncertainty)참고.

Control run (통제 시산)

각종 기후 변화 실험들을 서로 비교하는데 필요한 기준값을 제공하기 위해 컴퓨터 모델로 시산(試算)하는 것을 말한다. 통제 시산을 위해서는 오늘날의 조건 혹은 산업화 이전 조건에 적절한 온실가스로 인한 복사 강제력을 일정한 값으로 사용한다.

Coral (산호)

몇 가지 의미가 있지만 보통은 경산호목(Order Scleractinia)의 관용명을 이른다. 경산호목의 모든 개체는 딱딱한 석회질 골격을 가지고 있고 이것은 암초(reef)를 형성하는 것과 형성하지 않는 것, 혹은 냉수 산호(cold water corals)와 온수 산호(warm water corals)로 나뉜다. 산호초(Coral reefs) 참고.

Coral reefs (산호초)

산호(Coral)에 의해 바위 같은 석회질 구조물이 해안을 따라(fringing reef) 혹은 얇고 깊은 둑이나 제방에 형성된(barrier reef) 것. 열대 및 아열대 해양에 가장 많이 존재한다.

Cost (비용)

조치의 결과로서 노동시간, 자본, 자재, 연료 등과 같은 자원의 소비. 경제학에서는 모든 자원의 가치를 그것이 기회비용(opportunity cost), 즉, 자원을 다른 식으로 가장 가치 있게 사용할 때의 가치로 산정한다. 비용은 그 가치에 영향을 주는 다양한 가정 하에 여러 방식으로 정의된다. 비용 유형에는 경영비용, 피해 비용(기후변화의 악영향으로 인한 생태계, 사람, 경제에 대한 피해비용), 기존 규칙과 규제, 능력함양 노력, 정보, 교육과 훈련 등의 변경에 관한 이행 비용 등이다. 민간 비용(private costs)은 조치를 착수하는 개인, 회사, 혹은 기타 민간 주체에 의해 들어가는 반면에 사회비용(social costs)에는 전반적으로 환경과 사회에 관한 외적 비용도 포함된다. 비용의 반대는 편익[마이너스 비용(negative costs)으로 부르기도 함]이다. 비용에서 편익을 뺀 것이 순 비용(net costs)이다.

Cryosphere (빙권)

지표의 위아래 및 바다가 온통 눈, 얼음, 동토(영구 동토 포함)로만 구성된 기후계요소. 빙하(Glacier), 빙상(Ice sheet)참고.

D.

Deforestation (삼림벌채)

삼림이 무삼림(non-forest)으로 전환된 것. 삼림(forest)과 조림(afforestation), 재조림(reforestation), 삼림벌채(deforestation) 등 관련 용어에 관해서는 <토지이용, 토지이용 변화 및 삼림에 관한 IPCC 특별보고서(IPCC Special Report on Land Use, Land-Use Change and Forestry)>(IPCC, 2000)를 참고.

Dengue fever (뎅그 열병)

모기에 의해 전파되는 전염성의 비루스성 질병으로, 관절과 등에 심한 통증을 주기 때문에 뼈아픈 열병(breakbone fever)이라고도 부른다. 바이러스 감염이 이어지면 dengue haemorrhagic fever (DHF)와 dengue shock syndrome(DSS)에 걸릴 수 있으며, 이들 질병은 치사율이 높다.

Desert (사막)

대단히 적은 양의 강우가 내리는 지역. “대단히 적은 강우량”은 연간 100 mm 미만의 강우로 간주한다.

Desertification (사막화)

건조, 반 건조 및 건조한 저습지역에서 기후변동과 인간 활동을 비롯한 여러 인자로 인해 토지가 황폐화된 것. UNCCD (United Nations Convention to Combat Desertification; 사막화 방지 UN협약)가 정의한 토지 황폐화는 건조, 반건조 및 건조한 저습 지역에서 생물학적 혹은 경제적 생산성과 천수담 경작지, 관개수 경작지, 방목지, 목초지, 삼림, 숲의 복잡성이 감소되거나 소실되는 것으로서, 토지 사용으로 인해 또는 인간 활동 및 서식지 패턴에서 기인한 과정들을 비롯해 하나 또는 복합적 과정으로 인해 (i) 바람이나 물에 의해 야기된 토양 침식, (ii) 토양의 물리적, 화학적, 생물학적 혹은 경제적 퇴화, (iii) 자연 식생의 장기적 소실이 일어난 것을 말한다.

Detection and attribution (탐지와 원인규명)

기후는 모든 시간 범위에서 계속 변한다. 기후변화 탐지는 기후가 통계적 의미에서 변했다는 것을 그 변화의 근거를 제시 하지는 않은 채 증명하는 과정이다. 기후변화의 원인규명은 탐지된 그 변화의 가장 가능성 있는 원인을 정해진 일정한 신뢰 (confidence) 수준에서 확립하는 과정이다.

Development path or pathway (발전경로)

자연계와 인간계 (human systems)의 상호작용을 결정하는 일련의 기술적, 경제적, 사회적, 제도적, 문화적, 생물물리적 특징에 기초한 발전. 이것은 모든 국가에서 특정 시간 범위 동안의 생산 및 소비 패턴이 포함된다. 대체 발전 경로 (alternative development paths)는 가능한 다른 개발 궤도를 말하며, 현재 경향을 계속하는 것도 여러 경로 중 하나가 된다.

Disturbance regime (재난 체계)

산불이나, 곤충, 해충의 발생, 홍수와 가뭄 등과 같은 재난의 발생빈도, 강도 및 형식 등을 지칭한다.

Downscaling (축소화)

대축척 모델 혹은 자료 분석으로부터 국지, 혹은 지역 규모 축척 (10~100km)의 자료를 도출하는 방법. 축소화 방법에는 동역학적 축소화 기법 (dynamical downscaling)과 경험적, 혹은 통계학적 축소화 기법 (empirical statistical downscaling)이 있으며, 전자는 지역 기후 모델 (climate models), 즉 공간적으로 변하는 해상도를 가지는 전 지구 모델, 혹은 고해상도 모델을 사용하는 것이고, 후자는 대축척 대기 변수들을 국지 혹은 지역 기후 변수들과 연관시키는 통계학적 관계를 개발해 내는 것이다. 2가지 경우 모두 다 축소화된 결과자료의 질은 적용되는 모델의 질에 의해 결정된다.

Drought (가뭄)

일반적 의미의 가뭄은 ‘장기간 동안 강수가 없거나 두드러지게 부족한 것’, ‘강수 부족으로 일부 활동이나 집단에 물 부족이 일어나는 것’, 또는 ‘강수가 없어 수문학적으로 심각한 불균형이 야기될 만큼 오랫동안 기상이 비정상적으로 건조한 기간’이다 (Heim, 2002). 가뭄은 수많은 방식으로 정의되었다. 농업 가뭄 (Agri

-cultural drought)은 농작물에 영향을 주는 표층토양 1 m 정도의 깊이 (뿌리 지점)에 수분이 부족한 것이고, 기상 가뭄 (meteorological drought)은 주로 강수가 장기간 부족한 것이며, 수문학적 가뭄 (hydrologic drought)은 하천, 호수, 지표수의 수위가 정상보다 낮은 것과 관련이 있다. 대 가뭄 (megadrought)은 오래 지속되는 대대적인 가뭄을 말하는데 평소보다 훨씬 더 길게 지속되며, 통상 10년 혹은 그 이상 지속된다.

Dyke or Dike (둑)

저지대 토지의 홍수범람을 방지하기 위해 하천이나 해안의 연변을 따라 인공적으로 설치하는 장벽 혹은 제방.

Dynamic global vegetation model**(동역학적 전지구 식생 모델, DGVM)**

기후와 기타 환경 변화로 인해 유발된 공간적 및 시간적 식생의 개발과 동역학을 모의 하는 모델.

Dynamical ice discharge (동역학적 얼음 배출)

빙상 (ice sheets)이나 만년설 (ice caps)로부터 융해나 유출 (runoff)보다는 동역학 (dynamics)에 의해서 얼음이 배출되는 것.

E.**Ecological community (생태학적 군락)**

전형적인 종의 집합과 풍요함으로 특성지어지는 식물 혹은 동물의 군락.

생태계 (Ecosystem)참고.

Ecosystem (생태계)

살아있는 유기체들이 서로 간에, 그리고 물리적 환경과 상호 작용하는 계. 생태계라고 부를 수 있는 것의 경계는 이해나 연구의 초점에 따라 다소 임의적이다. 그래서 생태계의 범위는 공간적으로 매우 작은 범위부터 궁극적으로 지구 전체까지 포함할 수 있다.

El Niño-Southern Oscillation (엘니뇨-남방진동, ENSO)

엘니뇨란 단어는 에콰도르와 페루 해안을 따라 주기적으로 흐르면서 그 지역의 어업에 피해를 주던 난류를 설명하기 위해 사용되었다. 그 후, 날짜 변경선의 열대 태평양 동부 전 유역이 온난화 되면서 확인되었다. 이 해양 현상은 남방 진동이라 불리는 지구적 규모의 열대 및 아열대 해면기압 패턴과 관련 있다. 대가-해양에 결합된 이 현상은 2년에서 약 7년에 걸쳐 일어나고, 충칭해서 엘니뇨-남방진동이라고 부른다. ENSO는 다윈 (Darwin) 섬과 타히티 (Tahiti) 섬 간의 해면기압 편차 (surface pressure anomaly)와 중부 및 적도 태평양 상의 해수 온도를 통해 측정된다. ENSO가 발생하면 주된 무역풍이 심하게 약화되어 해류의 처오름이 감소되고 해류가 변경되어 해수 온도가 따뜻해지는데 이것이 더욱 무역풍을 약화 시킨다. 이 현상은 열대 태평양의 바람, 해수 온도, 강수 패턴에 큰 영향을 준다. ENSO는 지구적 원격상관 (teleconnection)을 통해 태평양 전 지역과 세계의 여러 지역의 기후에 영향을 준다. ENSO의 한랭 단계를 라니냐 (La Niña)라고 부른다.

Emission scenario (배출 시나리오)

추진동력 (인구통계 및 사회경제적 발전과 기술 변화 같은)과 그것들의 주요 관계에 대한 일관되고 내부 모순

없는 일련의 가정에 기초해서, 잠재적으로 복사 활성이 있는 물질들(예: 온실가스, 에어로솔)의 미래 배출 동향을 가정한 것. **농도 시나리오 (Concentration scenario)**는 배출 시나리오에서 유도된 것으로, 기후 전망을 산출하기 위해 기후 모델의 입력 자료로서 사용된다. IPCC (1992)에서 제시한 배출 시나리오는 IPCC 기후 전망 (1996)의 기초자료로서 사용되었다. 이 배출 시나리오들을 흔히 IS92 시나리오라고 부른다. <배출 시나리오에 관한 IPCC 특별 보고서 (IPCC Special Report on Emission Scenarios)> (Nakicenovic와 Swart, 2000)에서는, 소위 SRES 시나리오라고 하는 새로운 시나리오가 발표되었다. SRES Scenarios 참고.

Endemic (풍토병)

한 지방이나 지역에 국한하여 특이성을 보이는 것. 인간 건강과 관련하여서는 어떤 특정 지역이나 특정 인구에 국한하여 항상 발생 가능한 질병, 즉 풍토병을 지칭함.

Energy (에너지)

전달된 일 혹은 열의 양. 에너지는 다양한 종류로 분류되며, 한 곳에서 다른 곳으로 흐르거나 한 유형에서 다른 유형으로 전환될 때 인간에게 유용해진다. 1차 에너지(에너지원 energy source라고도 부름)는 자연자원(예: 석탄, 원유, 천연가스, 우라늄)에 내재된 채 인위적 변환을 겪지 않는 에너지이다. 이 1차 에너지가 사용 가능한 에너지(예: 빛)가 되기 위해서는 전환되어 전달되어야 한다. 재생가능 에너지(renewable energy)는 자연 환경에서 발생하는 에너지의 지속적 혹은 반복적 흐름에서 얻는다. 이것은 태양에너지, 수력, 바람, 조석, 파도, 지열, 탄소 중화 기술(예: 바이오 매스)이 포함된다. 내재 에너지(embodied energy)는 자재(예: 가공된 금속, 건축자재 등)를 생산하는데 사용된 에너지로서, 제조시설에서 사용된 에너지(0차), 제조시설에서 사용되는 자재를 생산하는데 사용된 에너지(1차) 등을 고려한 에너지다.

Ensemble (앙상블)

기후 전망에 사용되는 병렬 모델 시뮬레이션 집단. 앙상블 모델들의 결과의 차이(variation)를 통해 불확실성을 추정할 수 있다. 같은 모델을 사용하지만 초기 조건을 달리 준 앙상블은 내부 기후변동성에 관련된 불확실성만을 특성화하는 반면에, 몇몇 모델의 시뮬레이션을 포함하는 다중모델 앙상블은 모델의 차이에서 오는 영향도 포함한다. 섭동된 모수 앙상블은 모델 모수를 체계적인 방식으로 변화시켜서 일반적인 다중모델 앙상블보다 더 객관적인 모델링 불확실성의 추정치를 생산한다.

Epidemic (전염성의)

일상적인 예측을 초과하는 사고율로 갑자기 발생하는 것을 말하며, 특히 전염성 질병의 경우를 지칭한다. 또한, 이와 같이 발생하는 여러 종류의 질병과 부상과 건강관련 사건들을 모두 가리킨다.

Equilibrium line (평형선)

빙하에서 얼음질량의 순 연간손실(침식 지역)이 있는 지역과 순 연간증가(축적 지역)가 있는 지역 간의 경계. 이 경계의 고도를 평형선 고도(equilibrium line altitude)라고 부른다.

Erosion (침식)

풍화작용, 질량손실, 하천의 흐름, 빙하, 파랑, 바람, 지하수 등으로 인해 토양과 암석이 움직이고 이송되는 과정.

Eutrophication (부영양화)

하천이나 호수의 물에 자연적 혹은 인위적(오염 등)으로 용존 영양물질이 과다 공급되어 계절적으로 용존 산소가 부족해져서 수질이 오염되는 과정.

Evaporation (증발)

액체 상태에서 기체 상태로 변화하는 과정.

Evapotranspiration (증발산)

지구표면의 물 증발과 식생으로부터의 발산이 복합된 과정.

External forcing (외부 강제력)

기후계 밖에서 기후계에 변화를 야기하는 강제력 요소. 화산분출, 태양 성질의 변동, 대기 조성의 인위적 변화, 토지 이용 변화는 모두 외부 강제력이다.

Extinction (멸종)

하나의 생물 종 전체가 완전히 사라지는 것.

Extirpation (절멸)

하나의 생물 종이 특정 지역으로부터 제한적으로 사라지는 것. 국지적인 멸종을 뜻함.

Extreme weather event (극한 기상현상)

연중 특정 장소와 시기에 보기 드문 기상현상. ‘드물다(rare)’의 정의는 다양하지만 대체로 극한 기상현상은 관측된 확률밀도 함수의 10 백분위수(퍼센타일) 혹은 90 백분위수보다 드물다. 정의상 소위 극한 기상현상의 특징은 절대적 의미에서는 장소마다 다를 수 있다. 단일 극한 기상현상을 간단히 직접적으로 인위적 기후 변화 때문이라고 단정할 수는 없다. 제한적이거나 그 현상이 자연적으로 발생했을 지도 모를 가능성이 있기 때문이다. 극한 기상현상 패턴이 한 계절 등 얼마간 지속되는 경우, 특히 평균이나 총계가 그 자체로 극단적인 경우에는(예: 한 계절 동안 가뭄이나 집중호우) 극한 기후현상(extreme climate event)으로 분류될 수도 있다.

F.

Feed back (피드백)

기후 피드백(Climate feedback)참조.

Food chain (먹이사슬)

몇 가지 종이 서로 먹잇감이 될 경우 영양관계의 사슬을 말한다. 먹이 망(Food web) 참고.

Food security (식량 안보)

사람들이 정상적인 성장, 발육, 활동, 건강 생활을 위한 안전하고 영양 있는 식품을 충분한 양으로 구할 수 있는 상황. 식량안보는 가정 차원의 식량조달 능력, 불충분한 구매력, 부적당한 분배, 혹은 불충분한 식량 사용에 의해 야기될 수 있다.

Food web (먹이 망)

여러 가지 서로 상관되어 있는 먹이사슬을 포함하는 생물학적 군집내의 영양관계를 표시하는 망.

Forcing (강제력)

외부강제력 (External forcing) 참고.

Forest (삼림)

나무가 지배적으로 많은 식생 유형. 삼림에 대해서는 전 세계에서 많은 정의가 사용되고 있어 생물지구 물리적 조건, 사회구조, 경제 사이에 폭넓은 차이가 있음을 반영한다. 특정 기준은 교토의정서 아래 적용된다. 삼림과 조림, 재조림, 삼림벌채 등 관련 용어는 <토지 이용, 토지이용 변화 및 삼림에 관한 IPCC 보고서 (IPCC Report on Land Use, Land-Use Change and Forestry)> (IPCC, 2000)를 참고한다.

Fossil fuels (화석연료)

석탄, 토탄, 오일, 천연가스를 포함한 화석 탄화수소 퇴적물로부터 생긴 탄소 연료.

Framework Convention on Climate Change (기후변화협약)

UN기후변화 협약 참고.

Freshwater lens (담수 렌즈)

바다 속 섬 아래에 위치하고 있는 렌즈 모양의 담수 지하수를 말하며, 염수 아래에 있다.

Frozen ground (동토)

공극수의 일부 혹은 전부가 얼어있는 토양이나 암석 (Van Everdingen, 1998). 동토에는 영구동토 (permafrost)도 포함된다. 해마다 얼었다가 녹는 지면은 계절적 동토 (seasonally frozen ground)라고 부른다.

G.**General Circulation Model (대순환 모델, GCM)**

기후 모델 (Climate model) 참고.

Glacial lake (빙하호)

빙하가 녹은 물로 형성된 호수. 빙하의 앞 (빙하전면 호수 proglacial lake), 빙하표면 (빙하 위 호수, supraglacial lake), 빙하 내부 (내빙 호수, englacial lake), 혹은 빙하 기저부 (빙하 밑 호수, subglacial lake)등에 위치한다.

Glacier (빙하)

중력을 받아 (내부 변형과 기저부의 미끄러짐을 통해) 아래로 흐르고 내부 응력과 기저부 및 측면의 마찰에 의해 제약을 받는 육지 얼음 덩어리. 고도가 높은 곳은 눈이 축적되고 고도가 낮은 곳은 녹거나 바다로 배출되어 균형이 유지된다. 질량수지 (Mass balance) 참고.

Global warming (지구온난화)

인간 활동으로 인한 온실가스 배출 때문에 발생하는 복사 강제력의 결과중 하나로서 지구표면 평균 온도의 관측치 혹은 전망치가 서서히 증가하는 현상.

Globalization (세계화 혹은 전 지구화)

각종 재화와 서비스의 국가 간 교역의 증가와 국제적인 자본의 자유로운 흐름, 보다 빠르고 광범위한 기술과 정보와 문화의 확산 등을 통한 전 세계 여러 국가들 간의 상호 의존성과 통합이 가속화되는 현상.

Governance (거버넌스 혹은 지배구조)

정부가 이해되어온 방법은 최근 수십 년간에 걸친 사회적, 경제적, 기술적 변화에 반응하여 상당히 변화되었다. 국가 조직으로 정의 되어온 정부로부터 각급의

정부 (전 지구적, 국제적, 지역적, 국지적)와 민간부문의 역할, 비정부 기구 및 시민 사회의 역할 등의 기여를 인식하여 보다 포괄적인 개념의 거버넌스로의 전환이 이루어지고 있다.

Greenhouse effect (온실효과)

온실가스는 지표, 대기, 구름에 의해 배출된 열적외 복사를 효과적으로 흡수한다. 대기 복사는 지표 방향을 포함해 사방으로 배출된다. 따라서 온실가스는 지표-대류권시스템 안에 열을 가두게 되는데 이것을 온실효과라고 부른다. 대류권의 열적외 복사는 그 복사가 방출된 고도의 대기 온도와 강한 연관이 있다. 대류권에서는 일반적으로 고도가 높아질수록 기온이 감소한다. 우주로 방출되는 적외복사는 평균 온도가 -19℃인 고도에서 기원하여 태양복사의 순 입사량과 균형을 이루는 반면에, 지표는 그보다 훨씬 높은 온도, 평균적으로 +14℃의 온도를 유지한다. 온실가스 농도가 증가하면 대기의 적외선 불투명도가 증가되고 그리하여 온도가 더 낮은 더 높은 고도에서 유효 복사가 우주로 배출된다. 이것은 온실효과를 강화시키는, 소위 강화된 온실효과 (enhanced greenhouse effect)를 일으키는 복사 강제력을 야기한다.

Greenhouse gas (온실가스, GHG)

온실가스는 지구표면, 대기, 구름에 의해 배출된 열적외 복사 스펙트럼 내 특정 파장의 복사를 흡수하고 배출하는 가스 상태의 대기성분이며, 인위적으로도, 자연적으로도 발생한다. 열적외 복사를 흡수하고 방출하는 이 속성 때문에 온실효과가 생긴다. 대기의 주요 온실 가스는 수증기 (H₂O), 이산화탄소 (CO₂), 아산화질소 (N₂O), 메탄 (CH₄), 오존 (O₃)등이다. 대기에는 할로카본 (halocarbon), 염소 함유물질, 브롬 함유물질 등 전적으로 인위적으로 생성되는 온실가스도 있는데, 이것들은 몬트리올 의정서에 따라 통제된다. CO₂, N₂O, CH₄ 외에도 교토 의정서는 온실가스인 육불화황 (SF₆), HFCs (hydro fluorocarbons), PFCs (perfluorocarbons)도 다룬다.

Gross Domestic Product (국내총생산, GDP)

한 국가에서 연간 생산된 모든 재화와 서비스의 통화 가치.

Gross National Product (국민총생산, GNP)

외국인에 의해 발생된 수입은 제외하고, 자국민에 의해 외국에서 발생된 수입을 포함하여 국가의 경제활동을 통해 연간 생산된 모든 재화와 서비스의 통화 가치.

Gross Primary Production (총 1차 생산량)

광합성(Photosynthesis)을 통해 대기로부터 고정되는 에너지 양.

Groundwater recharge (지하수 함양)

지하대수층내의 물이 아닌 외부의 물이 대수층의 포화대에 추가되는 현상을 말하며, 물은 직접 대수층내로 주입될 수도 있고, 혹은 간접적으로 또 다른 층을 사용할 수도 있다.

H.**Habitat (서식처)**

특정 식물이나 동물 혹은 서로 밀접한 관계를 가지는 유기체들이 살고 있는 지역 혹은 자연적인 안식처.

Hadley Circulation (헤들리 순환)

대기에서 열에 의해 추진되는 직접적 역전 셀이다. 상층 대류권의 극 방향 흐름, 아열대 고기압 속으로 함몰되는 공기, 지표근처 무역풍의 일부로서 회귀 흐름, 열대 수렴대 (Inter-Tropical Convergence Zone)의 적도 근처 공기의 상승이 특징이다.

Herbaceous (풀의, 초본의)

꽃이 피는, 나무가 없는.

Heterotrophic respiration (이 영양 호흡)

식물이 아닌 유기체에 의해 유기물질을 이산화탄소로 전환 하는 것.

Holocene (홀로세)

약 11,600년 전부터 현재까지 연장되는 하나의 지질학적 기원. 지질시대 제 4기 (Quaternary)의 2개의 세 (epoch) 중 뒤의 것.

Human system (인간계)

인간 조직이 중요한 역할을 하는 모든 시스템. 이 용어는 사회 혹은 사회시스템과 동의어로 사용되는 경우가 많다 (언제나 동의어로 사용되는 것은 아니다). 농업 시스템, 정치 시스템, 기술 시스템, 경제 시스템 등이 그 예이다. AR4에 적용된 의미에서는 이 모두가 인간계이다.

Hydrological cycle (수문 순환)

물이 바다와 육지표면에서 증발하여 대기 순환에서 수증기로서 지구 위로 이동, 응결핵을 형성하고, 비나 눈으로서 다시 강하하여, 나무와 식생에 흡수되고, 지하수가 되고, 하천으로 방출되고, 결국에는 바다로 흘러나가 그로부터 결국 다시 증발하게 되는 물의 순환 (AMS, 2000). 수문 순환에 관련된 다양한 시스템을 보통 수문 시스템이라고 부른다.

Hydrological system (수문 시스템)

수문 순환 참고.

Hydrosphere (수권)

기후계에서 지표수와 지하수로 이루어진 부분, 대양, 바다, 강, 담수호, 지하수 등.

Hypolimnetic (하이포 립네틱)

호수의 수온약층 (thermocline) 아래 부분을 지칭하며, 호수의 변온시기를 제외한 기간 동안에는 정체상태에 있어서 수온도 균등한 상태에 있다.

I.**Ice cap (만년설)**

보통 고지 (highland) 지역을 덮고 있는 둥근 지붕 (dome) 모양의 얼음덩어리, 규모는 빙상 (ice sheet)보다 상당히 작다.

Ice sheet (빙상, 氷床)

밑에 있는 기반암 지형의 대부분을 덮기에 충분히 깊어서 모양이 주로 역학 (내부적 변형과 기저부 미끄러짐을 통한 얼음의 흐름)에 의해 결정되는 육빙 덩어리, 중심부의 높고 약간 경사진 얼음지대로부터 바깥쪽으로 흐른다. 보통은 변두리가 좀 경사져 있고, 대부분의 얼음은 빠르게 흐르는 빙류 혹은 배출 빙하를 통해 배출되는데 바다나 바다 위를 떠다니는 빙붕 (氷棚) 속으로 배출되는 경우도 있다. 현재는 3개의 빙상만이 존재하는데 하나는 그린란드 빙상이고, 나머지 2개는 남극대륙에서 남극횡단산맥 (Transantarctic Mountains)에 의해 분리되어 있는 동부 남극빙상과 서부 남극빙상이다.

Ice shelf (빙붕, 氷棚)

해안으로부터 상당히 두껍게 뻗어있는 (보통은 가로로 길게 뻗어 있고 표면은 평평하거나 약간 경사져 있다) 떠다니는 얼음 널판. 빙상 해안의 만 (embayment)을 채우고 있는 경우가 많다. 거의 모든 빙붕은 남극대륙에 있고, 바다 쪽으로 배출된 얼음의 대부분은 빙붕 속으로 흘러간다.

(Climate change) Impact [(기후변화) 영향]

기후변화가 자연계와 인간계에 미치는 효과, 적응을 고려하느냐 여부에 따라 잠재적 영향과 잔류 영향으로 구분할 수 있다.

- **Potential impacts (잠재적 영향):** 적응을 고려하지 않는 경우. 전망된 기후변화가 일어나면 발생할 수 있는 모든 영향.
- **Residual impacts (잔류 영향):** 적응한 후에 발생하게 될 기후변화의 영향. 종합 영향, 시장 영향, 비시장 영향 참고.

Indigenous people (토착민)

토착민에 대해 국제적으로 용인된 정의는 없다. 국제법 및 UN기관들이 토착민을 구분하기 위해 종종 적용하는 공통된 특징으로는 지리적으로 뚜렷이 구분되는 전통적 거주지와 조상 대대로 살아온 영토에 거주하거나 그 자연 자원에 애착하는 것; 문화적, 사회적 정체성과 주류 혹은 지배적인 사회 및 문화와는 별개의 사회적, 경제적, 문화적, 정치적 제도를 유지하는 것; 어느 한 지역에서 현대의 국가 또는 영토가 출현하고 현재의 국경선이 정해지기 전에 존재하던 인구집단의 후손; 자기를 독특한 토속 문화집단의 일부로 동일시하고 그 문화적 정체성을 보존하려고 갈망한다.

Indirect aerosol effect (에어로솔 간접효과)

에어로솔은 구름 응축핵으로서 작용하거나 구름의 광학 특성과 수명을 변경시킴으로써 기후계의 간접적 복사 강제력이 될 수 있다. 에어로솔의 간접효과는 크게 2가지로 나뉜다.

Cloud albedo effect (구름 알베도 효과): 인위적 에어로솔이 증가하여 야기된 복사강제력 때문에 일정한 물 함량에서 물방울 농도는 증가하고 물방울 크기는 감소되어 구름 알베도가 증가하게 되는 효과. 1차 간접효과 (first indirect effect) 혹은 투메이 효과 (Twomey effect)라고도 부른다.

Cloud lifetime effect (구름 수명 효과): 인위적 에어로솔이 증가하여 야기된 복사강제력 때문에 물방울 크기가 감소되어 강수 효율이 감소하고 그로 인해 물 함량, 구름 두께, 구름의 수명이 변경되는 효과. 2차 간접 효과 (second indirect effect) 혹은 알브레히트 효과 (Albrecht effect)라고도 부른다. 이러한 간접효과와는 별개로 에어로솔은 반 직접 효과도 일으킬 수 있다. 반 직접효과란 에어로솔을 흡수함으로써 태양복사를 흡수하는 것을 말한다. 이것은 공기를 가열시키고 지표에 비해 정적 안정도 (static stability)를 증가시키는 경향이 있다. 또한 구름 물방울의 증발도 야기할 수 있다.

Infectious disease (전염병)

미생물에 의해 유발되고 사람과 사람 사이에 옮거나 동물로부터 사람에게 옮을 수 있는 질병. 직접적인 신체접촉이나 전염성 유기체를 집었던 물체를 취급함으로써, 혹은 질병 매개체를 통해, 오염된 물을 통해, 기침이나 호흡으로 공기 중의 병원균의 확산에 의해 전염될 수 있다.

Infrastructure (기반시설)

조직, 도시, 국가의 개발, 운영, 성장에 필수적인 기초적 장비, 시설, 생산업체, 설비 및 서비스.

Integrated water resources management**(통합 수자원 관리, IWRM)**

물 관리에 관한 주도적 개념은 아직 명확히 정의되어 있지 않다. IWRM은 1992년 더블린에서 물과 환경에 관한 국제 컨퍼런스 (International Conference on Water and the Environment)에서 공식화된 다음 4가지 원칙에 기초한다. 1) 담수는 생명과 개발과 환경을 지탱하는데 필수적인 유한하고 취약한 자원이다. 2) 물 개발과 관리는 모든 차원의 사용자, 기획자, 정책결정자를 포함하는 참여적 접근법에 기초해야 한다. 3) 여성은 물의 공급, 관리, 보호에서 중심 역할을 한다. 4) 물은 경쟁 용도에서 경제적 가치가 있으며, 하나의 경제 상품으로 인식되어야 한다.

Interdecadal Pacific Oscillation**(10년 간격의 태평양 진동, IPO)**

Pacific Decadal Oscillation (PDO)로도 알려져 있으며, North Pacific Index를 참고할 것 [WGI BOX 3.4 참고]

Internal variability (내부적 변동성)

기후의 변동성 (Climate variability) 참고.

Irrigation water-use efficiency (관개용수 사용 효율)

적용된 단위 관개용수량 당 생산된 바이오 매스 혹은 농작물의 수확량을 말하며, 사용된 관개용수량 100mm 당 농작물 수확량은 1톤 정도로 보고 있다.

IS92 Scenarios (IS92 시나리오)

배출시나리오 (Emissions scenarios) 참고.

Isostasy (지각의 균형)

지구의 지각과 표토가 지표면에 작용하는 하중의 변화에 점성적 및 탄성적으로 반응하여 균형을 유지하는 것. 즉, 지각 및 표토에 미치는 하중이 얼음이나 바닷물, 퇴적토, 침식, 산지 건물 등의 변화로 인해 달라질 경우 새로운 하중조건하에 균형을 이루기 위한 것이다.

K.**Kyoto Protocol (교토 의정서)**

유엔기후변화협약 (UNFCCC)의 교토 의정서는 1997년에 일본의 교토에서 열린 UNFCCC 당사국 회의 제3 세션 (Third Session of the Conference of the Parties to the UNFCCC)에서 채택되었다. 이것은 UNFCCC에 포함된 약속 외에도 법적 구속력이 있는 약속을 담고 있다. 교토 의정서의 부속서B에 포함된 국가들 (OECD 국가 대부분, 개도국, 시장경제전환 국가)은 의무이행 기간인 2008~2012년 동안 자국의 인위적 온실 가스배출량(CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs, SF₆)을 1990년

수준보다 최소 5%를 감축하기로 합의했다. 교토 의정서는 2005년 2월 16일에 발효되었다.

L.**La Niña (라니냐)**

엘니뇨 남방진동 (El niño-Southern Oscillation, ENSO) 참고.

Land use and land-use change**(토지이용과 토지이용 변화)**

토지이용이란 특정 토지 유형에 취해진 모든 준비, 활동, 투입을 뜻한다 (일련의 인간 활동). 토지이용이란 용어는 토지를 관리하는 사회적, 경제적 목적이라는 의미로도 사용된다 (예: 방목, 목재 벌채, 보존). 토지이용 변화는 인간에 의해 토지의 이용 또는 관리가 변한 것을 말한다. 토지이용 변화는 토지 피복 (Land cover)의 변화로 이어질 수도 있다. 토지 피복과 토지 이용 변화는 지상 알베도, 증발산, 온실가스 발생원과 제거원, 기후계의 기타 특성에 영향을 줄 수도 있으므로 지역적으로 혹은 지구적으로 기후에 복사강제력 내지 기타 영향을 줄 수 있다. 토지이용, 토지이용 변화 및 삼림에 관한 IPCC 보고서 (IPCC, 2000)를 참고한다.

Landfill (폐기물 처리용 매립지)

폐기물을 지표면상 혹은 지표면 아래에 투기하여 매립하는 고정 폐기물 처리장. 폐기물을 잘 조절하여 처리하며 조절되지 않은 폐기물은 매립하지 못한다.

Landslide (산사태)

흙덩어리 등 재료뭉치가 중력에 의해서 비탈면을 따라 미끄러져 흘러내리는 현상. 재료가 물로 포화될 경우에는 토양이나 암석, 기타 부스러기 등이 사면을 따라 빠르게 이동한다.

Lapse rate (체감률)

대기 온도 등 대기 관련 변량들의 고도에 따른 변화율을 뜻하며, 변량의 값이 고도에 따라 감소하면 체감률은 (+)로 간주한다.

Latent heat flux (잠재열 플럭스)

지구표면으로부터 대기 중으로 복사되는 잠재적인 열 플럭스의 크기를 표시하며, 이는 지구표면에서의 증발 현상 및 응축 현상과 관련성이 있고, 지표면 에너지 수지에 영향을 미치는 한 가지 구성요소이다.

Leaching (거르기)

토양 속에 물을 통과시킴으로서 토양입자나 화학 물질 등을 여과하여 제거하는 것을 말한다.

Likelihood (가능성)

확률론적으로 산정이 가능한 경우 어떤 사상의 발생 가능성 혹은 결과는 본 기술보고서의 Box 1.1에 정의된 표준 용어를 사용하여 표시할 수 있다. 신뢰성, 불확실성 참고.

Little Ice Age (작은 얼음시대, LIA)

북반구, 특히 유럽에서의 기온이 일반적으로 오늘날의 기온보다 더 낮았던 AD 1400년과 1900년 사이의 기간.

M.

Malaria (말라리아)

Plasmodium (Protozoa)속의 기생충 중에 의해 유발되는 풍토병 혹은 전염병. *Anopheles*속의 모기에 의해 인간에게 전염되고 발작적인 고열과 진신성 장애를 일으키며, 전 세계에서 매년 약 3억 명이 걸리고 약 2백만 명이 사망한다.

Market impacts (시장 영향)

통화로 정량화할 수 있고 국내총생산 (GDP)에 직접적으로 충격을 주는 영향. 예) 농사 자재 혹은 제화 가격의 변화. 비시장영향 (Non-market impacts)참고.

Mass balance [(빙하, 만년설, 빙상 관련) 질량균형]

얼음덩어리의 질량 획득 (축적)과 질량손실 (침식, 빙산 분열)간의 균형. 질량균형이라는 용어에는 세부적으로 아래와 같은 것들이 있다.

비 질량균형 (Specific mass balance): 빙하표면의 한 지점 에서 수문 순환이 한번 이루어지는 동안의 순 질량 손실 혹은 획득.

총 질량균형 (Total mass balance): 전체 빙하면적에 대해 적분된 비 질량균형. 수문순환이 한번 이루어지는 동안 빙하 한 개가 얻거나 잃는 총 질량.

평균 비 질량균형 (Mean specific mass balance): 빙하의 단위 면적당 총 질량균형. 표면을 지정한 경우 (비표면 질량균형 등) 얼음흐름의 기여는 고려되지 않는다. 다른 경우에는 질량균형에 얼음흐름과 빙산 분해의 기여가 포함된다. 비표면 질량균형은 축적 부분에서는 양(+)이고 침식지역에서는 음(-)이다.

Meningitis (뇌막염)

보통 박테리아와 바이러스 혹은 병원균 등에 의해 뇌막 (뇌를 덮는 부분)에 염증을 발생시키는 질병.

Meridional Overtuning Circulation (자오선 순환, MOC)

대양에서 동-서 방향으로 평균된 대규모 자오선 (남북) 순환을 말한다. 대서양에서 이 순환은 상대적으로 따뜻한 상층수를 북쪽으로, 상대적으로 차가운 심층수를 남쪽으로 수송한다. 멕시코 만류 (gulf stream)는 이 대서양 순환의 일부를 형성한다.

Methane (메탄, CH₄)

메탄은 교토 의정서에 따라 완화되어야 하는 6대 온실가스 중의 하나이며, 천연가스의 주성분이고 모든 탄화수소 연료, 동물 배설물, 농사에서 방출된다. 석탄층 메탄은 탄층에서 발견되는 메탄가스이다.

Millenium Development Goals (천년 개발 목표, MDGs)

빈곤, 기아, 질병, 문맹, 여성 차별, 환경 악화를 퇴치하기 위한 측정 가능하고 시한이 있는 목표로서 2000년에 UN 밀레니엄 정상회의(UN Millenium Summit)에서 합의되었다.

Mires (진흙탕)

토탄 (peat)이 축적되는 습지 (wetland), 늪 (Bog)참고.

Mitigation (완화)

기술 변화 및 대체를 통해 단위 생산 당 투입 자원과 배출량을 줄이는 것, 몇 가지 사회적, 경제적, 기술적 정책들이 배출량 감소 효과를 낳겠지만 기후변화에 관련된 완화는 온실가스 배출을 감소시키고 제거를 강화하는 정책을 이해하는 것을 뜻한다.

Monsoon (몬순, 계절풍)

몬순은 대륙 규모의 육지 덩어리와 주변대양간의 차별적 가열로 인해 열대 및 아열대 지역에서 지상풍과 그로 인한 강수가 계절적으로 바뀌는 현상이다. 몬순 호우는 주로 여름에 육지에서 발생한다.

Montane (저산대, 低山帶)

아 고산지대 (sub-alpine zone) 아래의 비교적 습윤하고 시원한 고지 경사면으로 형성되는 생물 지리학적 지대.

Morbidity (질병률)

한 집단 내에서 연령별 질병 발생률을 고려한 질병이나 기타 건강장애의 발생률. 질병률 지표에는 만성 질환 발생률/유병률, 입원률, 1차 의료기관 상담, 장애일수 (즉, 결근일수), 증상 유병률이 포함된다.

Mortality (사망률)

한 인구집단 내의 사망 발생률. 사망률 계산에는 연령별 사망률이 반영되므로 기대 수명과 조기 사망 범위가 산출된다.

N.

Net Ecosystem Production (순 생태계 생산량, NEP)

동일한 지역에 걸친 순 1차 생산량 (net primary production, NPP)과 이 영양 호흡 (heterotrophic respiration) (대부분 죽은 유기물질의 분해된 잔해)사이의 차.

Net Primary Production (순 1차 생산량, NPP)

총 1차 생산량 (gross primary production)에서 자동영양 호흡 (autotrophic respiration), 즉, 식물의 성장과 유지를 위한 신진대사 과정에 필요한 양을 뺀 값.

N₂O (아산화질소)

교토 의정서에 따라 감축 대상인 6가지 온실가스중의 하나이다. 아산화질소의 주요 인위적 발생원은 농사 (토양, 동물의 배설물 관리)이지만 하수 처리, 화석연료 연소, 화학적 산업 공정에서도 배출된다. 또한 자연적으로도 토양과 물의 매우 다양한 생물학적 발생원, 특히 열대우림의 미생물 작용에 의해서도 발생한다.

No-regrets policy (후회 없는 정책)

인위적 기후변화 (anthropogenic climate change)가 일어나긴, 일어나지 않긴 간에 관계없이 순수한 사회·경제적 편익을 가져올 정책을 말한다.

NGO (비정부 조직)

특별한 사회적, 환경적 목적을 달성하거나 특정 지지 기반에 기여하기 위해 제도권 정치구조 밖에 조직된 비영리 집단 혹은 단체.

Non-linearity (비 선형성)

원인과 결과사이에 단순한 비례관계가 성립하지 않는 과정. 기후계는 여러 가지 그러한 비 선형과정을 포함하고 있어서 잠재적으로 대단히 복잡한 거동을 하는 시스템이라 할 수 있다.

Non-market impacts (비시장 영향)

생태계나 인간복지에 영향을 주고 화폐가치로는 쉽게 표현되지 않는 영향. 예) 조기사망 위험증가, 기아 위험 인구수의 증가 등. 시장영향 (Market impacts)참고.

North Atlantic Oscillation (북대서양 진동, NAO)

북대서양 진동은 서로 반대로 변동하는 아이슬란드 근처기압과 아조레스 (Azores) 근처 기압으로 이뤄져 있다. 그래서 이 진동은 대서양을 건너 유럽으로 불어가는 편서풍의 세기의 변동과 일치하고, 포함된 저기압과 관련 전선계의 변동에도 일치한다. [WGI BOX 3.4 참조]

North Pacific Index (북태평양 지수, NPI)

알래스카만 위의 Aleutian Low (30°N~65°N, 160°E~140°W)에서의 평균 해수면 압력의 정상치로 부터의 편차의 평균. 이것은 Pacific Decadal Oscillation (혹은 Inter-decadal Pacific Oscillation으로 알려져 있음)의 지수이다. [WGI BOX 3.4]를 참조하면 추가정보 입수 가능.

O.**Sand oil and Oil shale (모래 오일과 혈암유)**

채굴하여 액체 연료로 정제할 수 있는 역청질의 물질을 함유하고 있는 압밀되지 않은 다공질 모래나 사암, 혹은 혈암으로부터 채취한 오일.

Ombrotrophic bog (저영양 소택지)

지하수가 아닌 빗물도 채워지며, 특히 영양물질 공급이 빈약한 산성의 목탄 (peat)이 축적되는 습지 (wetland).

Ozone (오존)

3원자 형태의 산소 (O₃). 가스상의 대기 성분이다. 대류권에서 자연적으로도 생성되고 인간활동에서 생긴 가스의 광화학 반응 (스모그)에 의해서도 생성된다. 대류권 (troposphere) 오존은 온실가스로서 작용한다. 성층권에서는 태양 자외 복사와 산소분자 (O₂)의 상호작용에 의해 생성된다. 성층권 (stratosphere)오존은 성층권 복사수지에서 주도적인 역할을 한다. 오존 농도는 오존층 (ozone layer)에서 가장 높다.

P.**Pacific Decadal Oscillation (태평양 10년 단위진동, PDO) North Pacific Index (NPI) 참고. [WGI BOX 3.4]****Pacific-North American (PNA) Pattern (태평양-북아메리카 패턴)**

아열대 서태평양부터 북아메리카 동부해안까지 일련의 대류권 이상 고기압과 이상 저기압을 주 특징으로 하는 대규모 대기 파동 패턴. [WGI BOX 3.4 참조]

Peat (토탄)

토탄 (土炭)은 물이끼 (Sphagnum mosses)와 같은 죽은 식물들로 형성되며, 이들은 영구적으로 물속에 잠겨 있어서 부분적으로만 분해된다.

Peatland (토탄지, 土炭池)

토탄이 서서히 축적되는 습지.

Percentile (백분위수)

어떤 데이터세트에서 그 값보다 작거나 같은 값들의 백분율을 의미하는 백분위수. 백분위수 (퍼센타일)는 종종 분포의 외항 (extreme)을 추정하는데 사용된다. 예를 들어, 90 백분위수와 10 백분위수는 외항의 각각 상한과 하한의 문턱값을 나타내기 위해 사용될 수 있다.

Permafrost (영구동토)

온도가 최소 2년 연속해서 0°C 이하인 지면 (토양, 혹은 암석, 포함된 얼음과 유기물질). 동토 (Frozen ground) 참고.

pH

수소이온 (H⁺) 농도로 물 (혹은 용액) 산성도의 무차원 단위이다. 순수 (pure water)의 pH는 7이다. 산성 용액의 pH는 7보다 작고 알칼리성 용액은 pH가 7보다 크다. pH는 로그 스케일로 측정된다. 따라서 pH가 1 감소하는 것은 산성도가 10배 증가하는 것이다.

Phenology (생물기후학)

생물계에서 주기적으로 일어나는 자연 현상 (예: 발달 단계, 완화)과 그것들의 기후 및 계절 변화와의 관계를 연구하는 학문.

Photosynthesis (광합성)

식물, 녹색식물, 조류, 박테리아 일부가 대기로부터 이산화탄소를 흡수하여 탄수화물을 만드는 과정. 광합성은 대기의 이산화탄소 농도에 반응을 달리하며 몇 가지 경로가 있다. 이산화탄소 시비효과 (Carbon dioxide fertilization) 참고.

Plankton (플랑크톤)

수계의 상층에 서식하는 작은 유기체. 에너지 공급을 광합성에 의존하는 식물성 플랑크톤 (phytoplankton)과 식물성 플랑크톤을 잡아먹고 사는 동물성 플랑크톤으로 분류된다.

Policies (정책)

UN 기후변화협약 (UNFCCC)에서 말하는 정책은 완화 및 적응대책을 가속하기 위해 자국 내 산업이나 다른 국가와 관련해서 정부에 의해 취해지거나 의무화 된다. 정책의 예로는 탄소세 혹은 기타 에너지세, 자동차의 연료효율 표준 등이 있다. 공동 정책 (common policies), 조정 정책(coordinated policies) 혹은 조화 정책(harmonized policies)은 당사국들이 공동으로 채택한 정책을 말한다. 대책 (Measures) 참고.

Primary production (1차 생산)

식물에 의한 모든 형태의 생산을 말하며, 1차 생산자 (primary producers)라고도 부른다. Gross primary production, Net primary production, Net ecosystem production 참고.

Projection (전망)

모델을 사용해 어떤 양이 잠재적으로 미래에 어떻게 전개될 것인가를 계산한 것. 전망은 예측과는 다르다. 전망은 실현될 수도, 실현되지 않을 수도 있는 미래의 사회경제적, 기술적 발달에 관한 가정을 포함하며, 그래서 상당한 불확실성을 갖는다. 기후 전망 (Climate projection), 기후 예측 (Climate prediction) 참고.

Proxy [대리(권)]

대리 기후 (Climate)지표는 기후 관련 변동을 과거시간대에 결합시키기 위하여 물리적 및 생물-물리적 원리를 사용하여 해석하는 국지적인 기록이다. 이렇게 도출된 기후 관련 자료들을 대리자료 (proxy data)라고 부르며, 예를 들면 꽃가루 분석, 나무의 나이테 기록, 산호의 특성, 얼음핵으로부터 도출된 여러 가지 자료 등이 이에 속한다.

R.**Radiative forcing (복사강제력)**

복사강제력은 대류권에서 CO₂ 농도 변화나 태양복사 같은 외부적 기후변화로 인해 생긴 순 복사량 (하향 복사량-상향 복사량)의 변화이다. 복사강제력은 대기의 모든 속성을 섭동되지 않은 값에 고정시키고 성층권의 온도를 감안하여 만약, 섭동된 경우에는 역학적 복사 평형으로 재조정된 후 산출된다. 성층권 온도에 변화가 없다는 것을 고려하여 복사강제력은 순간적 (instantaneous)이라고 한다. 이 보고서를 위해 복사 강제력을 추가로 정의하자면, 달리 언급하지 않는 한 1750년에 비교한 변화량이고, 지구의 연평균 값이다.

Rangeland (방목지)

관리되지 않은 목초지, 관목 지역, 대초원 (savanna), 동토대 (tundra) 등의 지역을 말한다.

Reconstruction (재구성)

기후지표를 사용해서 기후 (일반적으로 과거의 기후)를 분석하는 것.

Reforestation (재조림)

과거에는 삼림이 있었으나 다른 용도로 전환되어 버린 토지에 숲을 다시 조성하는 것. 삼림(forest)이라는 용어와 조림 (afforestation), 재조림 (reforestation), 삼림벌채 (deforestation) 등 관련 용어에 관해서는 “<토지이용, 토지이용 변화 및 삼림에 관한 IPCC 보고서 (IPCC Report on Land Use, Land-Use Change and Forestry)>” (IPCC, 2000)를 참고하도록 한다.

Regime (기후 형태)

기후계의 우선적 상태로서 지배적인 기후 패턴 혹은 기후 변동성의 여러 측면을 대표하는 것.

Region (지역)

특정한 지리적, 기후적 특색으로 특징지어지는 영토. 한 지역의 기후는 지형, 토지 사용 특성, 호수 등 지역적, 국소적 규모의 강제력뿐 아니라 다른 지역으로부터의 원격 영향력에 의해 영향을 받는다.

Reservoir (저수지)

호수나 연못 혹은 지하대수층 (aquifer)과 같이 자연적인 혹은 인공적인 물 저장 장소를 말하며, 관개나 용수 공급 등의 목적을 위해 저수지로부터 물을 취수하여 사용하게 된다.

Resilience (탄성 혹은 복원력)

사회시스템이나 생태 시스템이 기본 구조와 기능방식, 자기 조직화 능력, 스트레스 및 변화 흡수 능력을 보유 하면서 교란을 흡수하는 능력.

Respiration (호흡)

살아있는 유기체가 유기물질을 이산화탄소 (Carbon dioxide)로 변환시키는 과정을 말하며, 이 과정에서 에너지를 방출하고 산소를 소모하게 된다.

Riparian (하천변의)

하천과 같은 자연 수로의 제방에 관계되거나, 살고 있거나, 혹은 위치하고 있는 것을 뜻하며, 때로는 호수나 조석지역의 연변을 포함시키기도 한다.

Runoff (유출수)

강수량 중에서 증발, 증산, 혹은 침투되지 않고 지표 위로 흘러 수계로 돌아가는 부분. 수문순환(Hydrological cycle) 참고.

S.**Salinisation (염류화)**

염분이 토양에 축적되는 것.

Saltwater intrusion (염수 침입)

밀도가 큰 해수가 침입하여 담수 혹은 지하수를 염수화 하는 것. 보통은 해안이나 강어귀 지역에서 육지기반의 영향력이 감소됨으로써 (예: 유출수감소와 그로 인한 지하수 재충전 으로 인해 또는 대수층으로부터 과도한 취수 (water extraction)로 인해) 또는 해양의 영향력이 증가함으로써 (예: 상대적 해수면 상승) 발생한다.

Savanna (대초원)

뜸성뜸성한 관목과 군데군데 흩어져 있는 나무들이 자라는 열대 및 아열대지역의 목초지와 수림지역을 말하며, 모든 것이 건조(건조, 반건조 혹은 반습윤 지역) 기후로 특성 지어진다.

Scenario (시나리오)

추진하는 힘과 주요 관계에 대한 일관되고 내부 모순 없는 가정에 기초해서 미래가 어떻게 전개될 것인가를 간단히 기술한 것. 시나리오는 전망으로부터 도출될 수 있으나 다른 출처의 추가 정보에 기초하기도 하며, 설명적 줄거리 (*narrative storyline*)를 포함하기도 한다. *SRES 시나리오*, *기후 시나리오 (Climate scenario)*, *배출 시나리오 (Emission scenarios)* 참고.

Sea ice (해양빙)

해양에서 해수가 얼어서 생긴 모든 얼음형태. 해양빙에는 바다 위에서 바람에 의해 이동되는 불연속 조각(떠다니는 얼음; 유빙), 즉 바람과 해류에 의해 이동되는 유빙괴 (*pack ice*) 또는 해안에 붙어 움직이지 않는 얼음판(육지에 고정된 얼음)도 있을 수 있다. 생성된 지 1년이 안된 해양빙은 *1년생 얼음 (first-year ice)*이라고 부르고, 적어도 1번의 여름 해동철을 지난 얼음은 *다년생 얼음 (Multi-year ice)*이라고 부른다.

Sea-ice biome (해양빙 생물군계)

극해 (*polar ocean*)의 부유하는 해양빙 (동결된 해수)에 서식하는 모든 해양 유기체의 *생물군계 (biome)*

Sea level change/Sea level rise (해수면 변화/해수면 상승)

해수면은 (i) 해양분지 모양의 변화, (ii) 총 수괴 (*total mass of water*)의 변화, (iii) 해수밀도의 변화로 인해 전 지구적으로도, 지역적으로도 변할 수 있다. 지구 온난화 아래에서 해수면 상승을 일으키는 인자는 육지의 눈과 얼음의 용해로 인한 총 해수량의 증가, 해수온도 상승으로 인한 해수밀도의 변화, 염도 변화이다. 상대적 해수면 상승은 육지에 비해 해수면이 지역적으로 상승하는 곳에서 발생하는데 이것은 바다의 상승 또는 육지면의 하강 때문일 수 있다. *평균 해수면 (Mean Sea Level)*, *열팽창 (Thermal expansion)* 참고.

Sea-level equivalent (상당해수면, SLE)

일정량의 물이나 얼음이 바다에 추가되거나 바다로부터 제거될 때 발생할 전 지구적인 평균 해수면의 변화.

Sea surface temperature (해수면 온도, SST)

대양의 상층 몇 미터 내의 해수 온도. 선박, 부표, 표류물에 의해 측정된다. 선박의 경우, 해수 샘플을 물통에 담아 측정하던 방법은 1040년대에 대부분 엔진을 이용한 샘플링으로 바뀌었다. 위성에서 자외선으로 해양의 피부 온도 (*skin temperature*)(최상층, 1 mm 깊이)를 측정하거나 마이크로파로 최상층 1cm 정도를 측정하는 방법도 사용되는데 해수온도와 호환 되도록 조정해야 한다.

Seasonally frozen ground (계절적인 동토)

동토 (*frozen ground*) 참조.

Semi-arid regions (반 건조지역)

연강수량이 대체로 적은 지역으로 지역의 생산성이 높지 않고 토지는 일반적으로 *목장지역 (rangelands)* 등으로 분류된다. “대체로 적은” 강수량이란 연강수량이 100~250mm정도인 것으로 받아 들여 지고 있다. *건조지역* 참고.

Sensitivity (민감도)

시스템이 *기후변동성 (climate variability)*이나 *기후변화*에 의해 이롭게 혹은 해롭게 영향을 받는 정도. 이 영향은 직접적이거나 (예: 기온의 평균, 범위, 변동성의 변화에 반응하여 작물 생산량의 변화), 혹은 간접적 (예: *해수면 상승*으로 인해 해안 범람 빈도가 증가하여 야기된 피해) 일 수 있다. 이 민감도라는 개념을 *기후민감도 (Climate sensitivity)*와 혼동해서는 안 된다. 기후민감도는 위에서 따로 정의되었다.

Sequestration (탄소 격리)

육지상 혹은 해양상의 저수지에 탄소를 저장하는 것을 말하며, 생물학적 격리 (*Biological sequestration*)는 *토지 이용변화*, *조림*, *제초림* 등을 통한 CO₂의 직접적인 제거와 *매립지 (landfills)*에의 탄소저장, 그리고 농경 활동에서 토양의 탄소 함유를 촉진시킬 수 있는 대책의 실행 등을 포함한다.

Silviculture (식림, 植林)

경작, 개간, 삼림 관리 등을 뜻한다.

Sink (흡수원)

대기로부터 온실가스나 에어로졸 등을 제거하는 모든 과정이나 활동 및 메커니즘을 총칭함.

Snow pack (눈덮힘)

서서히 녹는 눈이 계절적으로 축적된 것.

Snow water equivalent (눈의 물 상당량)

일정체적의 눈이나 얼음이 녹을 때 생산될 수 있을 동등한 체적 혹은 질량의 물의 양.

Soil moisture (토양수분)

토양 속에 저장되어 지표면을 통해 대기 중으로 증발될 수 있는 물.

Source (발생원)

발생원이라고 하면 대부분은 온실가스, 에어로졸, 이들의 전조 물질을 대기로 방출하는 공정, 활동 체제를 일컫는다. 또는 *에너지원 (energy source)*을 뜻할 수도 있다.

Southern Oscillation Index (남방진동지수, SOI)

엘니뇨 남방진동 (El Niño-Southern Oscillation) 참고.

Spatial and temporal scale (공간 및 시간범위)

*기후*는 매우 넓은 시공간 범위에서 달라질 수 있다. 공간 범위는 국지적 (십만 km²) 범위부터 지역적 (십만~천만 km²) 범위를 지나, 대륙 (천만~1억 km²) 범위까지 될 수 있다. 시간범위는 계절부터 지질연대 (수억만 년 전)까지 이를 수 있다.

SRES scenarios (SRES 시나리오)

Nakicenovic와 Swart (2000)에 의해 개발된 배출 시나리오 중 AR4 보고서에서 일부 기후전망의 기초로서 사용한 배출 시나리오. 아래 용어들은 SRES 시나리오 세트의 구조와 용도를 더 잘 이해하기 위한 용어들이다.

- **Scenario family (시나리오 패밀리):** 인구 통계적, 사회적, 경제적, 기술적 변화에 대한 줄거리가 비슷한 시나리오들. SRES 시나리오 세트는 A1, A2, B1, B2의 4가지 시나리오 패밀리로 이뤄져 있다.
- **Illustrative scenario (설명 시나리오):** Nakicenovic와 Swart (2000)의 <정책결정자를 위한 요약문>에 반영된 6개 시나리오를 설명하는 각각의 시나리오. A1B, A2, B1, B2 시나리오군의 수정 ‘시나리오 마커 (revised scenario marker)’와 A1FI, A1T 시나리오군의 각각의 시나리오가 있다. 이 시나리오들은 모두 똑같이 건전하다.
- **Marker Scenario (마커 시나리오):** SRES 웹사이트에 해당 시나리오 패밀리를 대표하여 초안 형태로 맨 처음 게시 되었던 시나리오. 마커 시나리오는 초기 정량화 방법 중 어느 것이 시나리오 줄거리를 가장 잘 반영하는가와 특정 모델의 특징에 기초하여 선택되었다. 마커 시나리오는 다른 시나리오와 마찬가지로 가능성이 없지만, SRES 저술팀은 마커 시나리오가 해당 줄거리를 잘 기술한다고 간주한다. 이것들은 Nakicenovic와 Swart (2000)의 수정 시나리오에 포함되어 있다. 이 시나리오들은 저술팀 전체의 면밀 검증을 받았고 SRES 오픈 프로세스 (open process)를 거쳤다. 시나리오들은 다른 두 시나리오군을 설명하도록 선택되기도 했다.
- **Storyline (줄거리):** 시나리오의 주요 특징, 주요 추진력들의 관계, 그것들의 전개 역학을 강조하면서 시나리오 (혹은 시나리오 패밀리)를 화술적으로 기술한 것이다.

Stakeholder (이해관계자)

사업이나 주체에 합법적 이해관계가 있는, 혹은 특정 조치나 정책에 의해 영향을 받게 되는 사람 혹은 조직.

Storm surge (폭풍 해일)

극한 기상조건 (저기압이나 강풍)으로 인해 특정 지역에서 해수면이 일시적으로 증가한 것. 폭풍 해일은 그 시간과 장소에서 조석 변동만으로 예상되는 것보다 높아지는 것이라고 정의된다.

Storm track (폭풍 경로)

원래는 개별 저기압 기상계의 경로를 칭하는 말이었으나 현재는 온대 저기압 (extratropical cyclone) 교란의 주경로가 저기압과 고기압의 연속으로 발생하는 지역을 칭하는 말로 일반화 되었다.

Storyline (시나리오의 줄거리)

시나리오의 주요 특성과 기후변화 동 인력 간의 관계, 시나리오들의 동역학 관계 등을 요약 설명해주는 시나리오 혹은 일련의 시나리오에 대한 화술적 서술을 뜻한다.

Stratosphere (성층권)

대류권 위의 대기에서 고도로 층을 이루고 있는 지역. 약 10km (평균적으로 고위도에서는 9km, 열대지역에서는 16km)에서 약 50km 사이의 고도에 있다.

Streamflow (하천유량)

강 유역 (river basin)의 유량으로 m³/s로 표시한다. 하천 유량 (river discharge)과 동의어.

Subsidy (국가보조금, 장려금)

정부가 장려하는 대책을 실행에 옮기는 민간부문에 대한 정부로부터의 직접 지원금 혹은 감세액을 말한다. 온실가스 배출량의 감소는 배출량을 증가시키는 효과를 가지는 기존의 보조금 (화석연료 사용에 대한 지원금 등)을 줄이거나, 혹은 배출량을 줄이거나 흡수원 (Sinks)을 증가시키는 대책에 보조금을 제공함으로써 촉진될 수 있다.

Succulent [즙 (汁)이 많은]

물을 저장하는 기능을 가지고 있는 선인장과 같은 즙이 많은 식물들은 가뭄 조건에서도 용이하게 생존할 수 있다.

Sustainable development (지속 가능한 발전)

미래 세대들이 필요로 하는 것을 충족시킬 수 있는 능력을 해침이 없이 현재 세대가 필요로 하는 것을 충족시킬 수 있는 발전.

T.**Taiga (침엽수림지대)**

북극의 동토대 (tundra)에 가까운 가장 북쪽의 북극 삼림지대를 말한다.

Technology (기술)

기술적 인공물 (하드웨어, 장비)과 (사회적) 정보 (“소프트웨어”, 즉 생산 노하우와 인공물 사용)를 활용하여 특정 과제를 해결하기 위해 지식을 실용적으로 적용하는 것.

Teleconnection (원격상관)

서로 멀리 있는 곳들 간에 기후변동이 서로 연결되어 있는 것. 물리적 의미에서 원격상관은 대규모 파동 운동의 결과이며, 그에 의해서 에너지가 발생 지점으로부터 우선 경로를 따라 대기에 전달된다.

Thermal expansion (열팽창)

해수면 상승과 관련해서, 열팽창은 해수 온난화로 인한 해수 부피의 증가 (및 밀도 감소)를 뜻한다. 해양 온난화는 해양 부피의 팽창으로 이어지고 이로 인해 해수면을 상승시킨다. 해수면 변화 (Sea level change) 참고.

Thermocline (수온약층)

해양에서 연직 온도경사가 최대인 층. 해양의 표층과 심층 사이에 있다. 아열대지역에서는 고위도에서 적도 쪽으로 빠져들어 이동한 표층수가 원인이 되어 생긴다. 고위도에서는 수온약층이 없고 대신에 염분 약층 (halocline)이 출현하는 경우가 있다. 염분약층은 연직 염분 경사가 최대인 층이다.

Thermohaline circulation (열염 순환, THC)

저밀도 상층 해수를 고밀도 중간층 및 심층 해수로 변화시키고 그 해수를 다시 상층 해양으로 돌려보내는 대규모 해양 순환. 이 순환은 비대칭적이다. 고밀도 해수로의 전환은 고위도의 제한된 지역에서만 일어 나고, 표층으로의 반환에는 지리적으로 더 넓은 지역에서 느리게 용승하고 확산되는 과정과 관련 있다. 열염순환은 표층이나 표층 근처에서 차가운 온도와 높은 염도에 의해 야기된 고밀도에 의해 추진되지만, 열염 순환이라는 이름에서 예상되는 것과는 달리, 바람이나 조석 같은 기계적 힘에 의해서도 추진된다. 열염순환은 종종 자외선 순환과 같은 의미로 사용되기도 한다.

Thermokarst (열 카르스트)

물로 채워진 얇은 웅덩이와 낮은 언덕, 요면 저류지 로 팍 채워진 험한 지형으로 되어 있으며, 지면의 얼음 이나 영구 동토가 녹아서 형성된다. 열 카르스트 현상 은 온난화로 인해 발생한다.

Threshold (한계선)

갑작스러운, 혹은 빠른 변화가 일어나기 시작하는 어떤 시스템의 크기의 수준을 가리킨다. 생태학적, 경제적 혹은 다른 시스템에서 새로운 성질이 나타나기 시작 하는 점 혹은 수준을 말하며, 이 이하의 수준에서 적용 되는 수학적 관계에 의한 예측은 타당하지 않게 된다.

Transpiration (증산)

식물 엽면의 다공(多孔)을 통해 수증기가 증발하는 현상. 증발산 (evapotranspiration) 참고.

Trend (경향)

어떤 변량의 값이 시간에 따라 단조롭게 변화하는 성향.

Trophic relationship (영양관계)

한 개의 종이 다른 종을 먹고 살 때 두 종 사이에서 이루어지는 생태학적 관계.

Troposphere (대류권)

대기의 최하층 부분으로서 중위도에서는 지표로부터 약 10km 고도까지 (평균적으로 고위도에서는 9km, 열대에서는 16km)이며, 구름과 기상현상이 일어나는 곳이다. 대류권에서는 일반적으로 고도가 높아질수록 기온이 하강한다.

Tundra (동토대)

낮은 기온과 짧은 성장기간으로 특성 지어지는 나무도 없고, 평평하거나 완만한 기복이 있는 평원 특성을 가지는 북극과 아북극 지역.

U.**Uncertainty (불확실성)**

값 (예: 기후계의 미래 상태)이 밝혀지지 않은 정도를 표현한 것. 불확실성은 정보 부재 또는 알려지거나 알 수 있을 만한 것에 대한 의견 불일치에서 생긴다. 불확실성의 원인은 데이터의 정량화 가능한 오류부터 보호하게 정의된 개념이나 용어, 또는 인간활동에 대한 불확실한 전망 등 여러 가지가 있을 수 있다. 따라서 불확실성은 모델을 사용해 계산된 값 (범위)같은 정량적 측정치를 통해, 또는 전문가 팀의 판단을 반영하는

정성적 진술을 통해 표현될 수 있다 (Moss and schneider, 2000; Manning 등, 2004 참고). 가능성(Likelihood), 신뢰도 (Confidence) 참고.

United Nations Framework Convention on Climate Change (UN 기후변화협약, UNFCCC)

이 협약은 1992년 5월 9일 뉴욕에서 채택되었고, 1992년 리오데자이네이로 지구 정상회담에서 150개 이상의 국가 와 EC에 의해 승인하였다. 이 협약의 궁극적 목적은 ‘기후계를 인위적으로 간섭하지 못할 수준으로 대기의 온실가스 농도를 안정화시키는 것’이며, 모든 당사국의 참여를 포함하고 있다. 이 협약의 부속서 I에 포함된 당사국들 (1990년 OECD 회원국 전체와 시장경제전환 국가들)은 몬트리올 의정서의 통제를 받지 않는 온실 가스의 배출량을 이 협약에 따라 2000년까지는 1990년 수준으로 감축할 것을 목적으로 한다. 이 협약은 1994년 3월에 발효 되었다. 교토 의정서 (Kyoto Protocol)참고.

Urbanization (도시화)

자연 상태나 관리되는 자연 상태 (농사 등)의 토지가 도시로 전환되는 것. 시골에서 도시로의 이주를 통해 어느 한 국가나 지역에서 점점 더 많은 인구가 소위 도심지 (urban center)라고 정의되는 주거지에 살게 되는 과정.

V.**Vector (질병 매개체)**

병원균을 한 숙주로부터 다른 숙주에게 옮기는 유기체. (예) 곤충

Vector-borne diseases (질병매개체로 인한 질병)

모기나 진드기 등과 같은 질병 매개체 (Vector)들에 의해 인간이나 동물들 사이에 전파되는 질병을 말하며, 예로서 말라리아, 뎅기 열병 등이 있다.

Vulnerability (취약성)

시스템이 기후 변동성과 기후 이변을 비롯한 기후 변화의 악영향에 약하여 대처하지 못하게 되는 정도. 취약성은 시스템이 노출되는 기후변화 및 기후다양성의 특징, 규모 및 속도, 시스템의 민감도, 시스템의 적응 능력 등의 함수이다.

W.**Water consumption (물 소비량)**

사용하면서 증발과 재화의 생산에 의해 복원 불가능 하게 사라지고 마는 취수량. 취수량에서 회귀량을 뺀 것이 물 소비량이다.

Water security (물 안보)

인간의 보건과 생계, 생산, 그리고 환경을 지속시키기 위해 충분한 양과 질의 물을 신뢰도 높게 확보하는 것을 뜻한다.

Water stress (물 스트레스)

취수량에 비해 이용 가능한 담수 공급량이 개발의 중요한 제약으로 작용하면 국가는 물 스트레스를 겪게 된다. 지구 전체적으로 평가했을 때, 물 스트레스가 있는 유역은 1인당 물 가용량이 1,000m³/yr 보다 작은

것으로 정의한다 (장기 평균 유출량에 기초). 재생 가능한 물 공급량의 20%를 초과하는 취수도 물 스트레스의 지표로 사용되었다. 토양이 이용 가능한 물, 따라서 실제 증발산 양이 잠재적 증발산 수요보다 적으면 작물은 물 스트레스를 겪게 된다.

Water-use efficiency (물 사용 효율)

증발산에서 잃어버린 단위 물의 양당 광합성에서 얻은 탄소의 양의 구성비. 단기간을 기준으로 할 경우는 단위 증산 손실량당 광합성을 통한 탄소 섭취량의 비로 정의되며, 계절을 기준으로 할 경우는 순 주요생산량 (*net primary production*), 혹은 농작물 수확량의 가용 수자원량에 대한 비로 정의 할 수 있다.

Wetland (습지)

배수가 잘되지 않는 토양으로 되어 있어서 물이 항상 고여 있는 지역. 수생태계와 육지 생태계 사이에 놓여 있다고 볼 수 있으며, 습지 공간은 빗물이나 지표수 혹은 지하수로 채워진다. 습지는 완전 포화된 토양조건에 적응된 식생들의 광범위한 확산으로 특성 지어진다.

참고문헌

- AMS, 2000: *AMS Glossary of Meteorology*, 2nd Edition. American Meteorological Society, Boston, MA. <http://amsglossary.allenpress.com/glossary/browse>.
- Heim, R. R., 2002: A review of twentieth century drought indices used in the United States. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **83**, 1149-1165.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2000: *Land Use, Land-Use Change and Forestry*, R. T. Watson, I.R. Noble, B. Bolin, N. H. Ravindranath, D. J. Verardo and D. J. Dokken, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 375 pp.
- IUCN, 1980: *The World Conservation Strategy: living resource conservation for sustainable development*, IUCN/UNEP/WWF, Gland.
- Nakićenović, N. and R. Swart, Eds., 2000: *Special Report on Emissions Scenarios*. Cambridge University Press, 599 pp.

부록 III: 약어, 화학기호, 과학단위 (Acronyms, Chemical Symbols, Scientific Units)

III.1 약어와 화학기호

ACIA	Arctic Climate Impact Assessment	NAO	North Atlantic Oscillation
AIDS	Acquired Immune deficiency syndrome	NASA	National Aeronautics and Space Administration
AMO	Atlantic Multi-decadal Oscillation	NGO	Non-governmental organization
AOGCM	Atmosphere-ocean general circulation model	NH	Northern Hemisphere
AR4	Fourth Assessment Report(of the IPCC)	OECD	Organization for Economic Co-operation and Development
ARD	Afforestation, reforestation and deforestation	PCBs	Polychlorinated biphenyls
CCS	Carbon capture and storage	PDO	Pacific Decadal Oscillation
CDM	Clean Development Mechanism	PDR	People's Democratic Republic
CH ₄	Methane, see Glossary	PDSI	Palmer Drought Severity Index
CO ₂	Carbon dioxide, (용어해설 참조)	pH	용어해설(부록II) 참조
CRU	Climatic Research Unit	PNA	Pacific-North American(pattern)
DJF	December, January, February	ppm	Parts per million, (부록 III.2 참조)
ECLAC	Economic Commission for Latin America and the Caribbean	PREC/L	Precipitation Reconstruction over Land
ENSO	El Niño-Southern Oscillation	PSA	Pacific-South American(pattern)
EROS	Earth Resources Observation and Science	SAM	Southern Annular Mode
ES	Executive Summary	SAR	Second Assessment Report(of the IPCC)
EU	European Union	SD	Standard deviation
FAO	Food and Agriculture Organization	SI	Suitability index
FAQ	Frequently Asked Questions	SIDS	Small Island Developing States
FAR	First Assessment Report(of the IPCC)	SLE	Sea-level equivalent
GCM	General circulation model	SM	Supplementary Material
GDP	Gross domestic product	SOI	Southern Oscillation Index
GHCN	Global Historical Climatology Network	SPCZ	South Pacific Convergence Zone
GHG	Greenhouse gas(es)	SPM	Summary for Policymakers
GLOF	Glacial lake outburst flood	SRES	Special Report on Emissions Scenarios
GNP	Gross national product	SST	Sea surface temperature
GPCC	Global Precipitation Climatology Centre	SWE	Snow water equivalent
GPCP	Global Precipitation Climatology Project	SYR	Synthesis Report(of the IPCC Fourth Assessment)
HAB _s	Harmful algal blooms	TAR	Third Assessment Report(of the IPCC)
HIV	Human immunodeficiency virus	TS	Technical Summary
IASA	International Institute for Applied Systems Analysis	UK	United Kingdom
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	UN	United Nations
IPO	Inter-decadal Pacific Oscillation	UNDP	United Nations Development Programme
IUCN	International Union for the Conservation of Nature and Natural Resources(World Conservation Union)	UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
JJA	June, July, August	UNICEF	United Nations Children's Fund
LIA	Little Ice age	US\$	United States dollar
LULUCF	Land use, land-use change and forestry	USA	United States of America
MARA/ ARMA	Mapping Malaria Risk in Africa/Atlas du Risque de la Malaria en Afrique	WCP	World Climate Programme
MDG	Millennium Development Goal	WG I	Working Group I (of the IPCC)
MOC	Meridional overturning circulation	WG II	Working Group II (of the IPCC)
N ₂ O	Nitrous oxide(용어해설 참조)	WGIII	Working Group III(of the IPCC)
NAM	Northern Annular Mode	WHO	World Health Organization
		WSP	Water safety plan

III.2 과학 단위 (Scientific Units)

(1) 국제 단위제 (SI Units)

물리량 (Physical Quantity)	단위명 (Name of Unit)	기호 (Symbol)
길이	metre	m
질량	kilogram	kg
시간	second	s
열역학적 온도	kelvin	K
에너지	joule	J

(2) 분수 (Fractions)와 배수 (Multiples)

분수 (Fractions)	접두사 (Prefix)	기호 (Symbol)	배수 (Multiple)	접두사 (Prefix)	기호 (Symbol)
10^{-1}	deci	d	10	deca	da
10^{-2}	centi	c	10^2	hecto	h
10^{-3}	milli	m	10^3	kilo	k
10^{-6}	micro	μ	10^6	mega	M
10^{-9}	nano	n	10^9	giga	G
10^{-12}	pico	p	10^{12}	tera	T
10^{-15}	femto	f	10^{15}	peta	P
10^{-18}	atto	a	10^{18}	exa	E

(3) 국제 단위제가 아닌 단위 (Non-SI Units)의 물리량과 관련 약어

$^{\circ}\text{C}$	섭씨온도 ($0^{\circ}\text{C} \approx 273\text{K}$)
ppm	체적 백만분율[parts per million (10^6) by volume] ; 온실 가스 농도 측정 단위 (혼합비)
watt	동력 ; $1 \text{ watt} = 1 \text{ joule} / \text{second} = 1 \text{ kg m}^2 / \text{s}^3$
yr	year

부록 IV: 저자 목록

(List of Authors)

Bates, Bryson
CSIRO
Australia

Kundzewicz, Zbigniew W.
Polish Academy of Sciences, Poland and Potsdam Institute
for Climate Impact Research, Germany

Wu, Shaohong
Institute of Geographical Sciences and Natural Resources
Research
Chinese Academy of Sciences
China

Arnell, Nigel
Walker Institute for Climate System Research at the
University of Reading
UK

Burkett, Virginia
Us Geological survey
USA

Döll, Petra
University of Frankfurt
Germany

Gwary, Daniel
University of Maiduguri
Nigeria

Hanson, Clair
Met Office Hadley Centre
UK

Heij, BertJan
Bergonda Science Communication
The Netherlands

Jiménez, Blanca Elena
Universidad Nacional Autónoma de México
Mexico

Kaser, Georg
University of Innsbruck
Austria

Kitoh, Akio
Japan Meteorological Agency
Japan

Kovats, Sari
London School of Hygiene and Tropical Medicine
UK

Kumar, Pushpam
University of Liverpool
UK

Magadza, Christopher H.D.
University of Zimbabwe
Zimbabwe

Martino, Daniel
Carbosur
Uruguay

Mata, Luis José
Nord-Süd Zentrum für Entwicklungsforschung
Germany/Venezuela

Medany, Mahmoud
The Central Laboratory for Agricultural Climate
Egypt

Miller, Kathleen
National Center for Atmospheric Research
USA

Oki, Taikan
University of Tokyo
Japan

Osman, Balgis
Higher Council for Environment and Natural Resources
Sudan

Palutikof, Jean
Met Office Hadley Centre
UK

Prowse, Terry
Environment Canada and University of Victoria
Canada

Pulwarty, Roger
NOAA/CIRES/Climate Diagnostics Center
Usa/Trinidad and Tobago

Räsänen, Jouni
University of Helsinki
Finland

Renwick, James
National Institute of Water and Atmospheric Research
New Zealand

Tubiello, Francesco Nicola
Columbia University
USA/IIASA/Italy

Wood, Richard
Met Office Hadley Centre
UK

Zhao, Zong-Ci
China Meteorological Administration
China

Arblaster, Julie
National Center for Atmospheric Research, USA and Bureau
of Meteorology, Australia

Betts, Richard
Met Office Hadley Centre
UK

Dai, Aiguo
National Center For Atmospheric Research
USA

Milly, Christopher
US Geological Survey
USA
Mortsh, Linda
Environment Canada
Canada

Nurse, Leonard
University of the West Indies, Cave Hill Campus
Barbados

Payne, Richard
Department of Agriculture and Food Western Australia
Australia

Pinskwar, Iwona
Polish Academy of Sciences
Poland

Wilbanks, Tom
Oak Ridge National Laboratory
USA

부록 V: 감수자 목록

(List of Reviewers)

Andressen, Rigoberto
Universidad de Los Andes
Venezuela

Asanuma, Jun
University of Tsukuba
Japan

Bandyopadhyay, Jayanta
Indian Institute of Management
India

Bayoumi, Attia
Ministry of Water Resources and Irrigation
Egypt

Bergström, Sten
Swedish Meteorological and Hydrological Institute
Sweden

Bernstein Leonard
International Petroleum Industry Environmental
Conservation Association
UK

Bidegain, Mario
Uruguay

Bojariu, Roxana
National Meteorological Administration
Romania

de Loë, Rob
University of Guelph
Canada

Diaz Morejon, Cristobel Felix
Ministry of Science, Technology and the Environment
Cuba

Elgizouli, Ismail
Higher Council for Environment and Natural Resources
Sudan

Fobil, Julius
University of Ghana, Legon
Chana

Folland, Chris
Met Office Hadley Centre
UK

Gallart, Francesc
CSIC
Spain

Gerten, Dieter
Potsdam Institute for Climate Impact Research
Germany

Gillett, Nathan
University of East Anglia
UK

Ginzo, Héctor
Ministerio de Relaciones Exteriores
Argentina

Grabs, Wolfgang
World Meteorological Organization
Switzerland

Hatfield, Jerry
US Department of Agriculture
USA

Jacob, Daniela
Max Planck Institute for Meteorology
Germany

Jacobs, Katharine
Arizona Universities
USA

Jeffrey, Paul
Cranfield University
UK

Jouzel, Jean
Institut Pierre-Simon Laplace
France

Jin, Byung-bok
Environmental management Corporation
Republic of Korea

Kadaja, Jüri
Estonian Research Institute of Ariculture
Estonia

Kaser, Georg
University of Innsbruck
Austria

Kimball, Bruce
US Department of Agriculture
USA

Knutson, Thomas
Princeton University
USA

Komen, Gerbrand
Royal netherlands Meteorological Institute
The Netherlands

Kotwicki, Vincent
Kuwait Institute for Scientific Research
Kuwait

Lal, Murari
CESDAC
India

Lapin, Milan
Comenius University
Slovakia

Leon, Alejandro
Universidad de Chile
Chile

Liu, Chunzhen
Ministry of Water Resources
China

Mares, Constantin
Romanian Academy of Technical Sciences
Romania

Mares, Ileana
Romanian Academy of Technical Sciences
Romania

Mariotti, Annarita
ENEA
Italy

Morgeschweis, Gerd
Water Resources Management
Germany

Müller, Lars
Climate Strategy
European Union (Germany)

Njie, Momodou
Blue Gold Solutions
The Gambia

Noda, Akira
Frontier Research Centre for Global Change
Japan

Parry, Martin
Co-chair IPCC Working Group II
UK

Ragab, Ragab
Centre for Ecology and Hydrology
UK

Ren, Guoyu
National Climate Centre
China

Robock, Alan
Rutgers University
USA

Roy, Rene
Ouranos, Consortium on Climate Change
Canada

Savard, Martine M.
Natural Resources Canada
Canada

Schipper, Lisa
Chulalongkorn University
Thailand

Sen, Zekai
Istanbul Technical University
Turkey

Sherwood, Steve
Yale University
USA

Shim, Kyo-moon
National Institute of Agricultural Science and Technology
South Korea

Sorooshian, Soroosh
University of California, Irvine
USA

Szologay, Jan
Slovak University of Technology
Slovakia

Tabet-Aoul, Mahi
Research Centre on Social and Cultural
Anthropology (CRASC)
Algeria

Trenberth, Kevin
National Center for Atmospheric Research
USA

van Walsum, Paul
Wageningen University and Research Centre
The Netherlands

Wojciech, Majewski
Institute of Meteorology and Water Management
Poland

Wratt, David
National Institute of Water and Atmospheric Research
New Zealand

Wurzler, Sabine
North Rhine Westphalia State Agency for Nature,
Environment and Consumer Protection
Germany

Yabi, Ibouaïma
LECREDE/DGAT/FLASH/UAC
Republic of Benin

Zhao, Zong-Ci
China Meteorological Administration
China

부록 VI: 출판 허가

(Permissions to publish)

본 기술 보고서에 수록된 다음 그림 (Figures)의 출판에 대해서는 아래와 같은 그림별 저작권자로부터 허가를 받았음.

그림 3.2 : Reprinted with kind permissions from Petra Döll.

그림 3.3 : Reprinted from Lehner, B. and Co-authors, 2005: Estimating the impact of global change on Flood and drought risks in Europe: a continental, integrated assessment. *Climatic Change*, 75, 273-299, with kind permission from Springer Science and Business Media.

그림 4.1(a) : From Fischer, G. and Co-authors, 2002: Global agro-ecological assessment for agriculture in the 21st century: methodology and results. Research Report RR-02-02. International Institute for Applied Systems Analysis.(IIASA), Laxenburg, Austria. Reprinted with kind permissions of IIASA.

그림 5.1 : Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd [Nature]: O'Reilly, C.M. and Co-authors, 2003: Climate change decreases aquatic ecosystem productivity of Lake Tanganyika, Africa. *Nature*, 424, 766-768. Copyright 2003.

그림 5.3 : From Hemp, A., 2005: Climate change-driven forest fires marginalize the impact of ice cap wasting on Kilimanjaro. *Glob. Change Biol.*, 11, 1013-1023. Reprinted with permission from Blackwell Publishing Ltd.

그림 5.4 : From Arnell, N.W., 2006b: Climate change and Water resources: a global Perspective. *Avoiding Dangerous Climate Change*, H.J. Schellnhuber, W. Cramer, N. Nakićenović, T. Wigley and G.Yohe, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 167-175. Reprinted with permission from Cambridge University Press.

그림 5.8(a) : From Haylock, M.R. and Co-authors, 2006: Trends in total and extreme South American rainfall 1960-2000 and link with sea surface temperature. *J.Climate*, 19, 1490-1512. Reprinted with permission from American Meteorological Society.

그림 5.8(b) : From Aguilar, E. and Co-authors, 2005: Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961-2003. *J.Geophys. Res.*, 110, D23107, doi: 10.1019/2005JD006119. Copyright (2005) American Geophysical Union. Reproduced by permission of American Geophysical Union.

그림 5.12 : From Smith, L.C. and Co-authors, 2005: Disappearing Arctic Lakes. *Science*, 308, 1429. Reprinted with permission from AAAS.

번역 : **윤용남**

육군사관학교 졸업, 미국 University of Illinois 대학원(공학박사)
수자원 전문가로 활동
고려대학교 교수, 한국건설기술연구원 제2대 원장,
한국수자원학회 회장, 국무총리실 수해방지대책기획단 민간위원장 등 역임
현 (주)삼안 상임고문, 고려대학교 명예교수, 한국방재협회 명예회장

기후변화와 물

Climate Change and Water

- IPCC Technical Paper -VI-

발행 : 국토해양부 · 기상청 공동발행

발행일 : 2009년 6월

편집 : 기상청 기후정책과

서울특별시 동작구 기상청길 45
(신대방 2동 460-18)

- 전화 : (02) 2181-0396

- 전자우편 : cl_pol@kma.go.kr

- 웹사이트 : <http://www.climate.go.kr/>

그 동안의 관측 기록과 기후 전망에 의하면 담수 자원은 매우 취약하며, 기후변화에 의한 영향을 크게 받을 잠재성을 가지고 있어서 인류 사회와 생태계에 광범위한 문제를 일으킬 것이라는 데 대한 충분한 증거들이 제시되고 있다.

“기후 변화에 관한 정부간 협의체 (IPCC)”의 기술 보고서 중의 하나인 “기후변화와 물”(Climate Change and Water)은 수문학적 여러 과정 및 체계와 담수 자원의 가용성과 수질, 그리고 이용 및 관리 등에 미치는 기후 변화의 영향에 관한 IPCC의 평가 보고서와 특별 보고서(Assessment and Special Reports)들에 담긴 정보를 단일 책자에 모아서 평가하고 있다. 이 보고서는 현재와 앞으로 전망되는 지구상의 지역별 주요 취약성과 적응 전망, 기후변화의 완화와 물간의 관계 등을 다루고 있으며, 주요 목적을 살펴보면 다음과 같다.

- 한편으로는, 자연적으로 발생하는 기후 변화와 인위적으로 유발되는 기후 변화간의 연관성과 이들 기후 변화로 인한 영향, 그리고 각종 영향에 대한 적응 및 완화 방안 등과 다른 한편으로는, 기후 변화로 인한 물 관련 문제점들에 대한 이해를 촉진시키고,
- 또한, 촉진된 이해를 정책 결정자들과 이해 당사자들에게 전파하기 위함이다.

이 기술 보고서의 본문 내용은 IPCC의 공식 보고서들, 특히 제 4차 평가 보고서의 내용을 조심스럽게 따르고 있으며, 이들 IPCC 보고서들의 균형과 목표하는 바를 반영하고 있다. 이 기술 보고서의 내용이 IPCC 보고서들의 내용과 약간 다른 부분이 있다면 그것은 IPCC 보고서들이 내린 결론을 지지하고 더 자세히 설명하고자 하는 목적에서이다. 중요한 문단들은 모두 IPCC 보고서에서 그대로 인용하였다.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)는 기후 변화에 관련된 과학적 정보에 대한 권위 있는 국제적 평가를 제공하기 위해 세계기상기구 (World Meteorological Organization, WMO)와 유엔환경계획 (U.N. Environment Programme, UNEP)에 의해 공동으로 창설되었다. “기후변화와 물”은 IPCC가 지금까지 준비해 온 6개 기술 보고서 중의 하나이며, “세계 기후 프로그램-물” (World Climate Programme-Water) 그리고 “물과 기후에 관한 대화를 위한 국제 추진 위원회” (International Steering Committee of the Dialogue on Water and Climate)의 요청에 따라 준비되었다.



Intergovernmental Panel on Climate Change

