

제1차년도
최종보고서

BSPN 00294-919-7

지구환경변화의 해양요인 규명기술
협력정보조사 연구

Current Technological Status
on the Oceanic Aspects of the Global Change

1996. 7.

연구기관
한국해양연구소

과학기술처

제 출 문

과학기술처장관귀하

본 보고서를 “지구환경변화의 해양요인 규명기술 협력정보조사연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

1996년 7월 15일

주관연구기관 : 한국해양연구소

총괄연구책임자 : 박 병 권

참여연구원 : 홍 기 훈, 임 장 근

김 채 수, 석 문 식

최 상 화, 도 가 영

이 동 섭 (부산대)

이 동 규 (부산대)

박 필 성 (수원대)

송 환 빈 (서울대)

황 진 택 (삼성환경연구소)

박 종 식 (삼성환경연구소)

연구조원 : 김 영 주

이 상 룡 (한양대)

정 미 희 (한양대)

요 약 문

1. 제 목

지구환경변화의 해양요인 규명기술 협력정보조사 연구

2. 연구개발의 목적 및 중요성

지구변화는 전지구적 문제로 전세계적으로 지구환경 관련 국제협약이 130여개 체결되어 있으며 그중 18개는 무역규제조치에 관한 것이다

최근 논의대상이 되고 있는 기후변화협약 몬트리얼 의정서, 바젤협약, 런던덤핑협약, 생물다양성협약 등이 발효될 시에는 보다 더 무역규제 조치가 강화될 것으로 보이고 이러한 국제협약들은 UR보다 더 큰 영향을 국내 제반 산업계에 미치게 될것이다.

그러나 지구변화에 관한 원인과 과정에 관하여 자연과학적으로 완전하게 이해되어 있지 못하고 있다. 따라서, 그 변화를 이해하고 예측하는 데는 많은 불확실성이 존재되어 있으며 아울러 지구변화의 실체를 장기간에 걸쳐 지속적으로 모니터링하는 일이 중요하다.

세계 각국과 국제기구에서는 지구변화를 이해하기 위한 연구사업들이 추진중에 있으나 아직 정확한 접근방법을 찾지 못하고 있으며, 지구변화 대응기술에 관한 논란만이 활발히 진행되고 있는 실정이다 한편, 우리나라의 경우 IPCC(정부간기후변화패널) 제2차 보고서 초안에 대한 각국별 검토시 우리나라의 전문인력 및 재원의 부족으로 우리나라의 입장 개진이 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 선진 각국과 국제기구 등에서 추진중인 지구변화 연구내용과 추진방법, 그리고 관련기술들에 관한 정보를 총정리하여 우리나라의 지구환경 대응기술에 관한 전략을 수립과 우리나라 국가전략 수립에 필요한 정보를 제공하고자 한다.

이를 위해 선진국(미국, 일본, 독일, 불란서 등)과 UN과 산하기관 및 비정부간 조직인 ICSU 및 산하기관에서 추진중인 지구환경변화요인 규명기술의 세부핵심기술을 도출하고 그 기술에 대한 연구개발동향, 기술발전전망 예측을 실시하였다

또한 각국 및 국제기구의 기술개발 프로젝트 현황을 파악 분석하였고 지구환경변화요인 규명기술과 관련된 국내기술수준,등을 파악하여 우리나라의 지구환경 대응기술에 관한 전략을 수립하고 우리나라 국가산업전략 수립에 필요한 기초적인 정보를 제공하는 것을 본 연구의 목표로 설정하였다

3. 연구내용 및 범위

제 1장은 정책적 측면, 경제적 측면, 과학·기술적 측면에서 연구배경을 논의하였고, 연구결과를 요약하여 지구환경변화에 관한 12항목의 정책을 건의하였다.

제 2장 지구환경변화의 요인과 실태연구는 지구환경 즉, 기후, 해양, 대기화학, 그리고 생태계를 변화시키는 요인으로 대두되는 온실가스, 방사원동력 등에 관해 분석하였고, 미래의 기후변화예보 모델에 의한 기후변화를 예측하였다

제 3장, 지구환경변화의 해양요인 규명기술 동향 분야는 지구기후변화에 대한 해양의 역할을 규명하기위한 국제기구 연구프로그램을 분석하고 전망하였다 아울러 미국을 비롯한 일본, 유럽지역의 독일, 프랑스 등 선진국들의 연구동향을 분석하고 우리나라의 연구현황을 조사하여 우리나라의 연구추진 전략방안을 도출하였다.

제 4장, 산업적 측면의 국가적 대응전략연구는 지구환경보호에 관련된 국제환경 규범과 협약의 실체와 주요 논의 내용을 분석하여 우리나라 산업에 미치는 영향을 파악하였다 또한 우리산업의 현황과 나아갈 길을 제시하였으며, 전기·전자, 석유화학, 자동차사업등 6개 주요 업종별 대응 방안과 전략을 제시하였다

마지막으로, 부록에 기후변화연구(CLIVAR), 전지구적 해양관측 시스템(GOOS), 남·북반구의 고기후연구(PANISH), 미국의 지구환경 연구사업(USGCRP)에 관한 연구내용과 핵심기술부문을 분석 기술하여 우리나라 지구환경변화 연구전략에 필요한 기초자료를 제공하였다

SUMMARY

1. Title

Current Technological Status on the Oceanic Aspects of the Global Change

2. Significance and Goal of the Study

Due to the rapid climate and environmental change of the Earth during the last decades resulted in more than 130 international agreements or protocols to counter measure the ongoing and possible adverse effects of the global change. Of which 18 are related to the international trade. If the International Frame Work on the Climate Change will be effective, the domestic industry will be significantly impacted.

However, the nature of the climate and environmental change on the surface of the Earth are not well understood, therefore, a large uncertainty remains in the assessment of the climate change and its consequences. In order to predict the climate change in the future, it is necessary to monitor the climate and environmental change for the longer term.

A large effort is very actively undergoing to study the cause and consequences of the past and current and future possible climate change in the advance countries and international bodies of earth sciences. However, periodic evaluation of technical reports of Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) were carried out properly due to the lack of specialists and resources in our country

Therefore we have reviewed the climate research programs in the advance countries (US, Japan, Germany and France) and international bodies (UN, ICSU) and provide basis and recommendations to our national plan on climate research with emphasis on oceanic aspects. These results will also be utilized for the domestic industry

3. Scope of the Study

Chapter 1. Oceanic scientific aspects of the climate change are reviewed in terms of economic and political consequences. Policy recommendations were made.

Chapter 2. Causes and consequences of climate change of the Earth are reviewed. Current status of the knowledge and art on the Climate, Ocean, Atmospheric Chemistry, Radiation forcings and Climate Prediction Model are reviewed.

Chapter 3. Oceanic aspects of the global climate change are reviewed in terms of research, technical counter measures. Our national research plan on the oceanic aspects of the global change are formulated based on the research programs in the advanced countries and leading international bodies.

Chapter 4. Response strategies of the domestic industries to the global climate change are made especially for electric, electronic, petrochemical, and automobile industries.

In appendix, the world wide leading programs on climate research, Climate Variability (CLIVAR), Global Ocean Observing System (GOOS), Paleoclimate of the Northern and Southern Hemisphere (PANASH), US Global Change Research Program (USGCRP) are listed for further reference.

Contents

Chapter I. Background and Result	9
Section 1. Background	11
1. Policy implications	11
2. Economic aspects	12
3. Science and technical aspects	12
Section 2. Synthesis and policy recommendation	13
1. Major finding	13
2. Policy recommendation	21
Chapter II. The causes of the global change	25
Section 1. Preface	26
Section 2. Earth's changing climate	30
1. Factor of climate change	31
2. Greenhouse gases	35
3. Radioactive forcing of Climate	83
4. Processes and Modelling	111
5. Patterns of Climate change	138
6. Predictions of future climate	145
Chapter III. Major international programs on the Ocean's role in global change	153
Section 1. Preface	154
Section 2. Ocean's role in global change	157
1. Contemporary system	157
2. Geological system	175
3. Crosscutting issues	190

Section 3. Global change Research Programs	194
1. Cooperation in international research programs	194
2. Research program in the advanced countries	200
3. National perspective	234
Chapter IV. Strategies for the domestic Industry	239
Section 1. What is the Greenround?	241
1. Concepts and Realities	241
2. Trade restrictive measures	242
3. International trends	244
4. Key issues	246
Section 2. The effects of green round in national economy	247
1. Effects on national economy	249
2. Findings from industry	250
Section 3. Status quo of our industry	256
1. Lessons from the advanced countries	256
2. Problems and difficulties	258
3. Strategies	263
Section 4. Industrial Policies	270
1. Electronics	270
2. Petrochemical	272
3. Automobile	274
4. Textile	278
5. Steel	279
6. Paper	280
Appendixes	283
1. Climate Variability (CLIVAR)	285
2. Global ocean observing system (GOOS)	337
3. Paleoclimate of the northern and southern hemisphere (PANASH)	349
4. U.S. Global change research program (USGCRP)	385

목 차

제 1장 연구배경 및 결과	9
제 1절 연구배경	11
1. 정책적 측면	11
2. 경제적 측면	12
3. 과학·기술적 측면	12
제 2절 연구결과와 정책건의	13
1. 연구결과	13
2. 정책건의	21
제 2장 지구환경변호의 요인과 실태	25
제 1절 서론	26
제 2절 지구기후변화	30
1. 기후변화 요인	31
2. 온실가스	35
3. 방사원동력	83
4. 지구온난화, 기작 및 기후예보 모델화	111
5. 기후변화의 실태	138
6. 미래의 기후예측	145
제 3장 지구환경변화의 해양요인 규명 기술 동향	153
제 1절 개요	154
제 2절 지구기후변화에 대한 해양의 역할	157
1. 현재 시스템에 대한 연구	157
2. 지질학적 기간에 대한 연구	175
3. 공통적인 연구주제	190
제 3절 지구환경에 관한 연구동향	194
1. 국제공동연구	194
2. 선진국의 연구동향	200
3. 국내연구 현황	234

제 4장 산업적 측면의 국가적 대응전략	239
제 1절 GR의 실체와 주요 논의내용	241
1. GR의 개념 및 실체	241
2. GR관련 무역규제 수단	242
3. GR관련 국제기구 동향	244
4. 주요 논의내용과 쟁점사항	246
제 2절 우리산업에 미치는 영향	247
1. 경제에 미치는 영향	249
2. 산업에 미치는 영향	250
제 3절 우리산업의 현황과 나아갈 방향	256
1. 선진국의 동향	256
2. 우리산업의 현황과 문제점	258
3. 우리산업의 나아갈 방향	263
제 4절 주요 업종별 대응방안	270
1. 전기·전자	270
2. 석유화학	272
3. 자동차	274
4. 섬유	278
5. 철강	279
6. 제지	280
부 록	283
1. 세계기후연구 프로그램(WCRP)의 기획사업 기후변화 연구 (CLIVAR)	285
2. 전지구적 해양관측 시스템 (GOOS)	337
3. 남·북반구의 고기후연구 (PANASH)	349
4. 미국의 지구환경 연구사업 (USGCRP) 변화하는 지구	385

그림 목 차

그림 1.	지구의 열수지	32
그림 2.	남극 빙하 주상시료중 이산화탄소와 메탄 농도	34
그림 3.	이산화 탄소와 메탄의 농도증가 (18세기 이후 인류활동에 의한 증가추세)	36
그림 4.	화석연료에 의한 이산화 탄소 방출과 대기중 농도와의 관계	38
그림 5.	18세기 이후 방사원동력의 증가	40
그림 6.	인류활동 기원의 온실가스에 의한 방사원동력의 변화	41
그림 7.	IPCC 시나리오에 근거한 대기중 이산화 탄소, 메탄, 염화불화 탄소의 농도	45
그림 8.	탄소 저장과 플럭스	48
그림 9.	두가지 모델에 의한 대기중 이산화 탄소 농도	49
그림 10.	250년간의 대기중 이산화 탄소 농도 변화	50
그림 11.	하와이 Manna Loa의 월 평균 이산화 탄소의 농도	50
그림 12.	화석연료에 의한 이산화 탄소 농도의 연간 변화	52
그림 13.	남극 빙하 주상시료를 이용한 과거 160,000년의 이산화 탄소 농도의 변화	55
그림 14.	시나리오에 의한 미래의 대기중 이산화 탄소의 농도 변화	61
그림 15.	1990년 이후 기록에 의한 미래의 대기중 이산화 탄소 농도의 변화율	61
그림 16.	남극 빙하 시료를 이용한 기온 변화와 메탄 농도 변화	65
그림 17.	대기중 메탄 농도 변화	66
그림 18.	GMCC Network에 의한 메탄 농도의 분포와 변화 양상	66
그림 19.	1978-1989동안의 Cape Grim, Tasmania에서 측정된 Holocarbon 농도	71
그림 20.	NOAA / GMCC Network에 의해 측정된 대기중 아산화 질소의 농도	74
그림 21.	빙하 시료로 측정된 아산화 질소의 농도	74
그림 22.	오존 표층의 계절변이	78
그림 23.	흑체 (Black body)와 중위도에서 방출되는 파장 분포	87
그림 24.	온실가스로 인한 방사력의 변화	96
그림 25.	온실가스로 인한 10년단위의 방사력의 변화	96

그림 26.	4가지 시나리오에 의한 온실가스에 대한 방사력의 변화	98
그림 27.	방사력에 영향을 미치는 요소	108
그림 28.	기후계 도식	112
그림 29.	지구 방사 균형에 대한 도식	118
그림 30.	관측된 지구 평균온도 변화	135
그림 31.	지구 평균온도의 변이도	136
그림 32.	온실가스에 의한 지구 평균기온 상승 (IPCC의 현상유지 시나리오에 근거)	139
그림 33.	온실가스에 의한 지구 평균기온 상승 (IPCC의 B, C, D 시나리오에 근거)	140
그림 34.	IPCC가 선정한 5개 지역	141
그림 35.	현상유지 (Business as usual) 시나리오에 의한 해수면 상승 예측	146
그림 36.	2030년의 해수면 상승 양상	147
그림 37.	IPCC 시나리오에 의한 해수면 상승 모델	152
그림 38.	전자제품의 환경부하 및 대책	271
그림 39.	자동차 산업의 환경문제와 관련 국제환경규제	275

표 목 차

표 1. 인류활동으로 인한 온실가스의 변화	35
표 2. 대기의 안정화	39
표 3. 지구 온난화 잠재력	42
표 4. 1990년 인류 활동에 의한 온실가스 배출의 영향	43
표 5. 온실가스의 특성	43
표 6. 인류활동으로 인한 온실가스의 변화	47
표 7. 메탄의 기원과 제거	67
표 8. Holocarbon의 농도와 양상 (1990)	72
표 9. 아산화 질소의 기원과 제거	75
표 10. 기후변화에 대한 방사원동력의 직접적인 영향과 대기중 미량 기체들간의 화학적 상호작용	88
표 11. 시나리오에 의한 미래 온실가스 농도 변화와 방사원동력의 양상	91
표 12. 대기중 단위분자, 단위부피 변화에 따른 이산화 탄소에 대한 상대적 방사원동력의 변화	93
표 13. CFCs의 방사원동력	94
표 14. 1765~1990의 미량가스 농도	95
표 15. 미량가스 농도의 변화에 기인한 방사력	95
표 16. 4가지 정책적인 시나리오에 관한 방사원동력의 변화	99
표 17. 이산화 탄소에 대한 각 미량원소 1kg 주입에 따른 지구 온난화의 잠재력	102
표 18. 잠재적 지구 온난화(Global Warming Potential) 이용의 예	103
표 19. 적외선, 태양열과 순 구름의 방사원동력	110
표 20. 지구환경변화에 관련된 해양연구 프로그램	158
표 21. TOGA의 주요 연구내용	160
표 22. WOCE의 주요성과	162
표 23. JGOPS의 주요성과	164
표 24. GLOBEC의 핵심 연구내용	166
표 25. ACCP의 핵심 연구내용	169
표 26. ACRSS의 주요성과	171

표 27.	ATOC의 주요성과	172
표 28.	ODP의 주요성과	180
표 29.	RIDGE의 주요성과	182
표 30.	USGS 프로그램의 성과 및 계획	187
표 31.	미국의 '94~'95년도 지구환경연구 투자내역	201
표 32.	미국의 '94~'95년도 지구환경연구사업의 기본 특별예산	202
표 33.	미국의 '95년도 지구환경연구사업의 지원기관 및 분야별 투자내역	202
표 34.	미과학재단이 지원하는 '94, '95년도 USGCRP	203
표 35.	일본의 부처별 주요활동	205
표 36.	일본의 지구환경연구사업 예산	205
표 37.	분야별 지구환경연구사업 예산	206
표 38.	국내 해양연구인력 현황	235
표 39.	우리나라 해양조사선 현황	236
표 40.	주요 외국의 해양조사선 현황	236
표 41.	GR 관련 직접 규제수단 형태	243
표 42.	GR이 우리나라의 무역 및 산업경쟁력에 미치는 영향	248
표 43.	상계관계 부과시 산업별 수출감소율	249
표 44.	국제환경협약이 국내산업에 미치는 영향	251
표 45.	선진국의 개별적 규제내용 및 영향	254
표 46.	ISO 14000의 파급효과	255
표 47.	에너지 다소비 오염 유발업종의 년도별 비중	259
표 48.	년도별 오염방지 설비투자 비율	260
표 49.	선진국의 국내환경기술 수준 비교	262
표 50.	환경외교 및 협상능력 배양방안	264
표 51.	GR체제하의 전자산업의 대응방안	271
표 52.	GR체제하의 석유화학산업의 대응방안	274
표 53.	GR체제하의 자동차산업의 대응방안	277
표 54.	GR체제하의 섬유산업의 대응방안	279
표 55.	GR체제하의 철강산업의 대응방안	280
표 56.	공정별 오락 성분	281
표 57.	GR체제하의 제지산업의 대응방안	281

제 1 장

연구배경 및 결과

여 백

제 1장 연구배경 및 결과

제 1절 연구배경

1. 정책적 측면

산업혁명 이래로 인류는 개발위주의 경제성장과 산업화의 지속으로 지구 생태계의 자정능력이 악화되어 근래에 와서는 인류의 생존마저 위협을 받을 것이라는 위기 의식을 느끼게 되었다. 이에 따라 환경보전과 경제개발을 동시에 조화시키면서 지속 가능한 경제성장을 위한 국제적 논의가 시작되었다.

1972년 “세계자연헌장” 제정과 1983년 “세계환경개발위원회” 구성에 이어 1992년에는 세계 각국의 정상급 대표단이 참가하여 유엔환경개발회의(UNCED)를 개최하여 한 국가에 한정되지 않고 다른 국가나 지구전체에 영향을 미치는 지구환경문제에 관해 국제적인 대응방안을 모색하기 위한 다각적인 논의를 하였다. 즉, 지구온난화, 오존층의 파괴, 산성비, 해양오염 등 광범위한 환경변화의 영향에 대해 협조체제를 강화하는 방안을 모색하였다.

이러한 지구환경보전에 관한 국제적인 이해와 대응방안이 필요하다는 공통적인 인식에도 불구하고 개도국은 과학기술의 역량부족으로 자체 해결능력이 부족하여 선진국의 재정지원과 기술이전이 없이는 현재의 환경파괴를 간과할 수밖에 없다는 입장을 유지하고 있으며, 선진국들은 현재 후진국과 개도국의 공해 산업을 지구환경파괴의 원인으로 규명짓고 후진국과 개도국의 공해산업규제를 위한 환경보호과 관련된 협약이나 규약들을 강화하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 지구변화에 관련된 우리나라의 국가 전략을 수립하고 국제적 의사결정기구 및 정부간 기후변화패널에서 우리나라의 확실하고 근거있는 입장을 개선하기 위한 과학적인 근거자료를 제공하고자 하였다.

2. 경제적 측면

선진국들을 중심으로 한 지구환경보전 규제는 이미 오래전 부터 예측되었으나, 우리나라는 관심결여로 단기적인 수출, 생산, 원자재 확보, 물가 등 우리경제 전반에 걸쳐 상당히 부담요인으로 작용할 수 있다 따라서 중·장기적으로 환경산업성장, 새로운 기술투자기회 창출, 산업구조 조성을 통해 국가 경쟁력 강화 노력을 펼쳐나가야 한다 선진국의 규제의 한 예로서 미국은 1990년 신대기정확법을 제정하여 자동차의 배출가스 규제 및 연료효율의 기준을 강화하여 우리나라 자동차 수출을 간접적으로 규제하고 있으며, 독일, 일본, 캐나다는 현실적으로 개도국은 획득이 곤란한 환경마크를 부착한 상품을 우선 구매하는 무역정책을 실시하고 있다.

따라서 본 연구에서는 지구환경관련 협약 및 규제에 의한 우리나라 산업·경제적 영향을 분석하고 이에 효율적으로 대체할 수 있는 국가적 대응전략을 수립하는데 필요한 기초자료를 제공하고자 하였다.

3. 과학·기술적 측면

지구변화의 원인과 과정의 규명은 지구계에 관한 자연현상의 정확한 이해를 통해서만 가능하다 지구계의 정확한 이해는 지구규모의 자연현상에 대한 자료의 수집, 분석 및 해석을 통해서 가능함으로 지금까지 전통적인 연구의 규모와 수준으로는 불가능하며 대용량의 컴퓨터, 인공위성을 이용한 장기적 관측 등 최첨단의 과학기술이 필요하다

지구규모의 변화를 이해하기 위해서 공간적으로는 지구규모의 연구단위가 되어 해양에서는 최신의 잠수정을 이용한 심해연구, 해저에서는 심해저 굴착사업과 같이 고체지구의 내부연구, 또한 최첨단의 지구물리적 기법을 이용하여 아직까지 접근하지 못했던 부분을 연구대상으로 하고 있다

이와같이 지구환경변화를 이해하고 대응해 나가는데는 많은 첨단과학기술이 동원되므로 지구변화에 대한 선진국과 국제기구들의 연구계획의 분석을 통해 우리나라 해양과 지구과학분야의 연구에 큰 도움이 될 것이다

한편, 현재와 같은 환경기술을 보유하고 있는 선진국 주도의 국제환경규제는 우리나라와 같은 개도국 내지 중진국의 기술종속, 교역신장 저해 등으로 선진국과의 경제력 격차가 항구화될 것이라는 우려가 크다

따라서 지구환경변화에 관한 선진국의 연구내용 파악은 우리나라 산업정책 및 무역정책 수립에 중요한 자료가 될 뿐만 아니라 국제간의 협상 및 협약체결에 필요한 기초자료가 될 것이고 또한, 지구환경변화의 원인을 규명하고 대응하는 기술은 인류의 문제 뿐만 아니라 우리나라의 교육, 환경 보건 등 우리나라 사회정책 수립에 필요한 자료로 활용될 수 있을 것이다

제 2절 연구결과와 정책건의

1. 연구 결과

가 지구환경변화에 관한 국내·외 연구동향

(1) 국제기구 연구프로그램의 동향

지구 기후변화가 인류의 생존을 위협하는 심각한 문제로 인식되면서 UN을 비롯한 선진 각국들의 주도하에 국제적이고 학제적인 연구 프로그램들이 계획되었으며, 현재 연구활동이 활발하게 이루어지고 있다 지구환경변화는 몇몇 나라가 해결할 수 없는 방대한 연구이기 때문에 UN 산하의 정부 또는 비정부기구에 의해 지구환경변화에 대한 연구가 수행되고 있다 그 대표적인 기구로는 UN 산하 기구(UNDP, UNEP, UNESCO), 국제과학연맹(ICSU), 다정부간 기후패널(IPCC), 세계 기상기구 (WMO), 정부간 해양위원회(IOC), 국제사회과학위원회(ISSC)등이 있다

지구환경변화에 관련하여 진행중인 중요한 국제공동연구는 세계기후연구계획(WCRP)과 국제지권-생물권계획 (IGBP)의 연구계획이며, 이 프로그램들은 세계기상기구(WMO)와 국제과학연맹 (ICSU)에 의해 기획된다

(가) 국제지권-생물권 연구 (The International Geosphere-Biosphere Program : IGBP)

IGBP는 국제과학연맹이사회(International Council of Scientific Unions, ICSU)가 주관하며 주요 연구목적은 전체 지구계를 통제하는 물리, 화학, 생물 과정들의 상호작용과 지구 전체계에서 일어나는 변화, 인간활동에 의하여 영향을 받는 지구변화 양상들을 이해하고 기술하려는 데 있다, 이 연구계획은 십년 혹은 백년 정도 시간 규모에서의 주요 지구환경변화를 대상으로 하며 자연적이나 인위적인 지구환경변화 중에서도 생물권에 영향을 미치는 것으로서 실제적으로 접근할 수 있고 예측할 수 있는 것들을 그 주 대상으로 삼는다

IGBP의 주요 연구프로그램으로는;

- ① 대기의 화학조성연구(IGAC, International Global Atmospheric Chemistry Project)
 - ② 지구해양물질 플럭스 연구(JGOFS, Joint Global Ocean Flux Study)
 - ③ 고기후변화 재현 연구(PAGES, Past Global Changes)
 - ④ 수리순환 및 생물권 연구(BAHC, Biological Aspects of the Hydrological Cycle)
 - ⑤ 지구변화와 육상생태계 연구(GCTE, Global Change and Terrestrial Ecosystems)
 - ⑥ 육지개발 및 지표면 변화 연구(LUCC; Land Use/Land Change)
 - ⑦ 자료분석, 해석 및 모델연구(GAIM, Global Analysis, Interpretation and Modelling)
 - ⑧ 연안역의 육지-해양 상호작용 연구(LOICZ; Land-Ocean Interactions in the Coastal Zones)
 - ⑨ 자료 및 정보 시스템 구축(IGBP-DIS, Data and Information System)
 - ⑩ 분석, 연구 및 교육 시스템 구축(START, System for Analysis, Research and Training)
- 등이 있다.

(나) 세계기후연구계획(World Climate Research Program, WCRP)

WCRP는 세계기상기구(World Meteorological Organization)와 국제과학연맹 이사회가 주관 기관이며 주요 연구목표는 지구기후시스템의 이해와 기후변화 예측이다

주요 연구프로그램으로는

- ① TOGA(Tropical Ocean and Global Atmosphere)
- ② CLIVAR(Climate Variability)
- ② ISCCP(International Satellite and Climatology Project)
- ③ ISCCP(International Satellite Cloud Climatology Project)
- ④ WOCE(World Ocean Circulation Experiment)
- ⑤ GEWEX(Global Energy and Water Cycle Experiment) 등이 있다

(2) 선진국의 연구동향

(가) 미 국

미국은 전지구 기후변화와 관련된 국내 및 국제적인 정책의 수립을 위한 과학적 토대를 마련하기 위하여 USGCRP(U.S. Global Change Research Program)를 수행하고 있다. USGCRP는 과학, 공학 및 기술을 위한 연방공동위원회(FCCSET; Federal Coordinating Council for Science, Engineering, and Technology)의 지구환경과학위원회 (CEES; Committee on Earth and Environmental Sciences)가 주관하고 있다

지구환경과학위원회(CEES)는 USGCRP의 이러한 목적을 달성하기 위해서 다음과 같은 세부적인 목표를 설정하였다 첫째, 전지구적 규모로 지구계의 변화를 기록하는 통합적이고 포괄적인 장기간의 계획 수립, 둘째, 전지구 및 지역적 규모에서 지구계에 영향을 미치는 물리적, 지질학적, 화학적, 생물학적 그리고 사회적 과정에 대한 지식을 개선하기 위한 집중적인 연구계획 수행, 셋째, 정확한 예측을 위한 지구계 모델 개발이다 미국의 지구환경연구 투자규모는 '94년의 경우 1,444백만 달러이며, '95년도에는 1,815백만 달러에 이르고 있다

(나) 일 본

일본은 지구환경보전에 관한 조사연구를 종합적으로 추진하기 위하여 1989년 10월 이후 환경처의 주관하에 “지구환경보전에 관한 관계 각료회의”를 정기적으로 개최하고 있으며, 1990년 6월에는 과학기술청 주관하에 “지구과학기술에 관한 연구개발의 기본계획”을 수립 전지구적 연구사업에 박차를 가하고 있다.

일본이 지구환경연구에 관련하여 중점적으로 계획하고 있는 지구과학 기술의 범위는 지구의 모든 현상의 이해를 위한 기초 과학 기술, 기후변동, 지진, 화산분화 등 돌발적인 변화에 대한 예측, 예지를 위한 과학 기술, 지구규모의 자원 조사나 자연 에너지의 이용 추진에 관한 과학 기술 등 과학적 지식을 응용하여 인간사회의 지속적 발전을 가능하게 하는 과학기술, 온난화 대책 기술 등 지구 환경을 보전 개선하는 과학기술, 지구과학기술의 추진에 있어서 공통기술 또는 기반기술이 되는 관측 기술 및 정보시스템 등이다

일본의 지구환경문제 관련 조사연구는 과학기술청, 환경청, 문부성 등 17개 성청과 연관, 각기 조사연구, 관측 감시 및 기술개발을 수행중인데, 과학기술청, 환경청, 문부성은 소관업무의 범위내에서 지구환경연구를 종합적으로 추진하고 있으며, 운수성 등 기타 관계성 청에서는 광공업, 에너지, 국토보전, 보건위생, 통신 분야 등 지구환경에 관한 소관 분야에 대해 개별 조사 연구를 수행하고 있다

일본의 지구환경연구 관련 총예산은 '91년도의 경우 4,808억엔이며, '92년도에는 4,980억엔에 이르고 있다.

(다) 유럽연합

유럽 연합은 지구환경에 대한 책임을 느끼고 지구 변화 연구를 포함한 활동 계획을 세웠다 유럽 연합 환경 정책의 주된 목적-지속적 발전의 개념에 기초한-중의 하나는 환경의 질을 보존(preserve)하고, 보호(protect)하며 발전(improve)시킨다는 것이다 연구사업은 연구비 분담체제에 의해 유럽연합(EU)회원국 내의 다양한 학술·연구기관의 지원을 받는다 유럽 위원회에서는 환경연구가 이루어져야 한다고 강조되고 있으며, 유럽 안팎에서 Joint Research Center와 국제 협력등의 협동연구가 활발히 장려되고 있다 지구 변화 프로그램 현재 연구와 기술개발에 관한 기본계획(Framework Programme for Research and Technological Development)에 속하며, 이 분야에서의 앞으로의 사업계획이 준비되어있다. 이 연구 제안서들은 현존하는 연구소들의 능력과 설비들을 바탕으로 IGBP, WCRP 등과 함께 운영될 European Network for Research in Global Change(ENRICH)의 연구사업을 포함하고 있다.

EU 환경 프로그램(1991-1994)은 총 예산이 2억 6,140만 ecu(1 ecu는 현재 약 1.2 us\$)이며, 이중 약 1억 ecu가 '지구변화 프로그램에 참여'에 쓰였다 이 활동의 목적은 환경 변화를 주도하는 과정들을 이해하고 인간활동의 영향을 평가하는 것이다

(2) 국내

우리나라의 지구환경변화에 관한 연구는 아직 소규모의 연구가 대학과 연구소에서 산발적으로 실시하고 있으나, 국가차원에서 체계적이고 통합적인 계획에 의한 연구가 수행되고 있지 못하고 있는 상황이다 현재 정부의 선도기술 과제중 지구환경변화에 관한 과제는 기후변동 모형을 만드는 사업에 국한되어 있는 실정으로 세계수

준에 비해서는 비교가 되지 못할 실정이며, 우리나라는 세계 연구프로그램중의 대표적인 WCRP에도 참여하지 못하고 있고, IGBP는 이제 학술원에서 형식적인 참여절차를 마친 단계이다. IPCC(정부간기후변화패널) 제2차 보고서 초안에 대한 각국별 검토 시에도 우리나라의 전문인력 및 재원의 부족으로 우리나라의 입장 개진이 미흡한 실정이다

우리나라는 해양에 대한 인식부족에 따른 투자 미흡으로 해양학관련 학과가 설치된 12개 대학을 포함한 23개 연구기관에 1300여 명의 해양연구인력이 있다. 그러나 조사된 해양연구인력의 전공분야가 수산 내지 양식에 치우쳐 있는 반면, 해양환경연구에 관련된 전문인력은 매우 부족한 형편이다

해양연구능력을 가늠하는 중요한 지표인 해양조사선의 보유현황은 총 9개 기관이 27척을 보유하고 있어 숫적인 면에서는 해양선진국 수준이라 볼 수 있으나, 총 톤수는 1만3천여 톤에 불과한 소형선박들로 구성되어 있으며, 그나마 조사선의 기능면에 살펴보면 전용해양조사선은 6척에 지나지 않아 선진국에 비하여 상당히 뒤떨어져 있는 실정이다. 한편 심해잠수정, 쇄빙선, 과학용 시추선 등 특수기능 선박은 보유하고 있지 못하고, 원양항해용 조사선은 단 2척에 불과하다 따라서 현재 보유하고 있는 선박을 효율적으로 활용하여야 할 것이다

지구환경에 관한 연구경험이 부족한 우리나라의 입장에서는 선진 각국과 국제기구 등에서 추진중인 지구변화 연구내용과 추진방법, 그리고 관련기술들에 관한 정보를 지속적으로 수집 및 분석하여 효율적인 연구분야를 도출하여 연구에 필요한 기반 기술을 습득하고 핵심기술을 개발하여야 한다. 이를 위해서 국제학회 및 심포지엄의 참가, 외국 전문가 초청 및 자문을 통한 국제동향을 분석하고, 해외연수 및 국제공동연구에 적극적으로 참여하여 신기술을 습득을 위한 제도적 장치가 마련되어야 한다

국내의 해양연구능력과 기술개발경험을 감안하고, 국가산업발전의 기여도를 제고하여 볼 때, 지구환경변화에 관한 해양연구는 모든 것을 다하겠다는 전략보다는 국제환경 관련 협약과 규범 등 국제여론의 정세분석을 통해 우선되는 연구분야를 선정하여 선택적으로 추진해 추진해 나가야 할 것이며, 추진방향은 독자적인 연구보다는 선진국들이 수행하고 있는 국제공동연구에 참여하는 것이 효율적일 것이다

나. 지구환경변화의 요인과 실태

지구환경은 태양에너지의 방출량의 변동, 지구궤도의 변화, 화산폭발 등 대규모의 자연변동에 의해 변화되고, 또한 인간활동에 의해 방출된 이산화탄소, 메탄, 이산화질소 등 온실가스 및 에어로졸의 농도증가, 열대우림파괴, 산업폐기물의 투기 등 인위적인 교란에 의해 변화가 가속된다

산업혁명 이래로 증가된 온실가스 방출로 인한 방사원동력의 증가에 대한 가장 큰 기여는 CO₂(61%)이며, 그 다음으로 CH₄ (17%), CFCs (12%), N₂O (4%) 등이다. CH₄의 배출로 야기되는 성층권의 수증기 증가는 방사원동력 증가에 대해 6% 가량 기여한다. 대류권과 성층권 오존의 변화로 인한 기여도는 계산하기 어려우나, 대류권의 증가된 O₃ 농도는 산업혁명 이래로 총 방사원동력의 10%증가에 기여했을 것으로 사료되고, 하부 성층권의 O₃ 농도 감소는 최근 수십년 동안 방사원동력을 오히려 감소시킨 것으로 추정된다

정부간 기상변동(IPCC)에 의해 제시된 미래 배출량에 대한 시나리오 A(business-as-usual)에 의하면, 산업혁명부터 2025년까지 방사원동력의 변화를 다음과 같이 예상하고 있다 즉, CO₂ 63%, CH₄: 15%, N₂O· 4%, CFCs와 HCFCs 11%, 성층권 수증기: 5% 그리고, 2025년까지의 총 방사원동력은 산업혁명 이전 CO₂ 양의 2배 이상이 될 것이다

온실가스별 잠재력(global warming potential GWP)은 기체의 흡광대역과 세기, 대기중 기체의 수명, 기체의 분자량에 따라 좌우된다 GWP는 CO₂에 대한 상대적인 값으로 500년 동안 각 기체들의 동일 질량의 배출량에 대한 GWP는, CO₂를 1로 할때 CH₄는 9, N₂O는 190, CFC-11은 1500, CFC-12는 4500, HCFC-22는 510이다

비록 CFC를 대체함으로써 오존층의 손실을 줄일 수 있다 하더라도 대체 기체의 GWP는 여전히 크다 그러나, 20년 이상 장기간에 걸친 영향을 살펴보면, 대부분의 대체품은 동일한 배출량을 기준으로 할 때 기존 CFC보다는 지구온난화에 미치는 영향은 훨씬 적다.

지난 세기 동안 온실가스 증가로 인한 기후원동력의 변화는 태양에너지 증가에 의한 것보다 훨씬 더 큰 것으로 보인다 비록 10여년 주기의 태양에너지 방사량의 변화는 온실가스원동력과 대등하다 하더라도 장기간 지속되지 않고 그 방향 또한 변동한다. 대조적으로 강화된 온실효과는 지속적으로 기후변화를 초래한다.

다 산업적측면의 국가적 대응전략

전자산업의 환경문제를 해결하기 위해서는 특정 공정이나 어느 한 단계만을 고려한 해결책은 근본적인 문제를 해결 할 수 없다 제품(혹은 부품)의 전과정(원료 선정에서부터 폐기에 이르기까지)에서 일관된 정책을 수립하여 단계별로 문제를 해결해야 한다 또한, 전자업계의 힘으로만 해결 할 수 없는 분야는 관련산업과의 긴밀한 협조체제하에서 공동으로 해결하는 협력관계를 정립해야 한다. 특히 소재산업과의 협력으로 환경친화적인 소재(플라스틱 등)의 개발은 필수적이라 할 수 있다 자동차 제조공정에서 발생하는 폐철판을 가전산업에서 이용하고, 가전제품의 제조공정에서 발생하는 폐플라스틱을 생활용품의 원재료로 사용하는 등의 협력관계는 자원의 적절한 이용을 통해 산업폐기물 발생량을 줄이는 좋은 방법이라 할 수 있다

석유를 원료로 하는 석유화학산업에 있어 대체원료를 위한 기술개발은 대체에너지 기술개발 못지 않게 오염의 사전예방을 위해 중요하다 한편, 화학물질의 개발에서 폐기에 이르기까지 환경, 안전, 보건부문을 지속적으로 개선해 나가며 관련된 내용을 공개적으로 다룰 것을 천명하고 실행하는 자발적인 환경개선 참여 프로그램인 Responsible Care Program을 적극 도입하여 실천하여야 한다

자동차산업은 제조공장의 규모가 크고 다단계의 제조공정을 거쳐 생산되는데 제조공장에서는 금속슬래그, 도료가스, 주물폐사, 폐플라스틱, 먼지 등을 발생시키고, 이용과정에서는 배출가스, 잡음 등에 의한 환경오염을 발생시키며, 폐차시에는 다양한 재질로 구성된 많은 부품 그리고 윤활유 등을 통해 환경을 오염시키는 등 제조, 이용, 폐기처리의 각 단계에서 대기오염, 소음문제, 폐기물 등 다양한 환경문제를 야기시킨다

이를 해결하기위한 환경대책으로는 배기가스 및 연비규제, 재활용기술, 특정물질 사용규제, 자동차관련 환경기술개발 등을 들 수 있다.

섬유산업의 환경문제는 염색, 가공, 섬유처리 등 습식공정을 수반하는 생산공정에 있어서의 수질오염에 있다 특히 염색가공업에 집중되어 있는 것으로써 섬유산업전체의 환경문제를 일으키는 주요인이기도 하다 또한 섬유제품의 습식처리과정에서 많은 물의 사용과 함께 에너지 소비도 수반하므로 폐수처리와 에너지 절약이란 두가지 문제를 동시에 해결해야 한다 한편 면직물 원단 제조공정에서 발생하는 공정별 공해 부담율을 보면 호발공정, 정련공정, 염색공정, 가공공정 등의 순으로 오염부담을 안고 있으며, 특히 제직준비에서 사용된 호제의 제거과정인 호발공정이 절대적인 오염부담을 안고 있다

섬유산업의 경우 단편적인 환경문제 해결로써가 아니라 경쟁력을 확보하기 위하여 보다 차원 높은 개선방안이 제시되어야 한다. 그것은 섬유산업의 종합화, 전문화, 집중화를 위한 섬유전문단지 조성을 확대하여 수익을 최대화하고 자원 소비 및 환경문제를 최소화하여야 한다.

철강산업은 철강생산시 다량의 에너지를 사용하고 있을 뿐만 아니라 최근에는 에너지가 더 많은 초강력강 등 고품질철강의 생산비중이 높아지고 있어 차후 철강산업의 단위당 에너지 소비량은 늘어날 추세이다. 따라서 신제강공정의 개발이 철강산업을 환경친화적 산업구조로 전환하는 근본적인 대책이라 할 수 있다. 환경친화적인 제강공정으로는 용융환원제철법 등이 있는데 현재 국내에서도 이 기술을 개발중에 있으며 2000년이후에나 실용화될 것으로 전망되고 있는 바 그 이전에는 에너지사용의 효율화를 기하고 폐열을 최대한 이용하는데 주력해야 할 것이다. 오염방지시설의 도입 및 연료전환에 있어서는 소결배연집진, 탈황설비, 함유폐수처리 설비 등의 도입과 저유황연료에의 전환 등의 조업개선이나 NOx 연소기술의 개발 등을 들 수 있다.

제지산업의 환경문제는 폐수, 배기가스, 원료와 폐수처리과정에서 발생하는 폐기물과 소음이다. 특성상 사용 용수량이 많고 폐지를 다량 조달해야 하는 제조업이므로 폐수처리에 가장 많은 관심을 가지고 있다. 특히 증해공정에서 발생하는 리그닌 용출로 나타나는 화학적 산소요구량(COD)의 수치가 높다. 또한 표백공정에서 발생하는 염소 역시 수질오염의 유발인자이다. 최근에는 종래의 염소계 표백제의 사용대신 산소표백을 채용하여 COD의 부하량을 대폭 감소시키고 있다.

2. 정책건의

2-1 냉전체제 붕괴이후 최근 국제사회는 지구환경보전이라는 명분하에 새로운 국제경제·정치질서의 패권을 확보하려는 선진국들을 중심으로 환경보호차원의 국제여론 조성 및 환경협약 등이 활발히 이루어지고 있다. 즉, 환경기술을 보유하고 있는 선진국 주도의 국제환경규제는 개도국의 기술종속, 교역신장저해 등으로 선진국과 개도국간 경제력 격차의 항구화를 초래할 우려가 있다 따라서 GATT/WTO의 「자유무역원칙」과의 조화 및 개도국들의 수용여부 등 국제신경제질서에 대한 지속적인 정세분석이 필요하다

2-2 지구환경문제는 환경오염의 피해 및 영향이 한 국가에 한정되지 않고 다른 국가나 지구전체에 영향을 미치게 되므로 어느 한 국가만의 노력으로 해결할 수 없고, 모든 국가의 공동 대응노력이 필요하므로 우리나라도 개별적인 대응노력과 함께 주변국 및 타 선진국이 공동참여하는 국제적인 협력체제에 적극 참여하여야 한다

2-3 해양은 지구표면의 3/4을 점유하고 있으며 해수의 열용량은 매우 커서 중요한 지구기후조절자이며 지구구성물질의 물질순환중 수일에서 수천 만년의 시간규모에서 중요한 순환과정에서의 대기, 암석권과 해양, 빙상, 생물권의 5가지 저장고중 해양이 차지하는 비중이 매우 크다 국제과학기구에서 추진하고 있는 지구환경관련 해양연구계획은 해양자체에 대한 연구나 지구환경변화에 있어 커다란 조절자로 보는 두가지 시각에서 수행되고 있으며 전자의 예가 WMO에서 기획한 WOCE와 TOGA, CLIVAR 등이며, 후자의 예가 IGBP의 여러가지 연구계획들이다. 따라서 이러한 국제공동연구계획에 적극 참여하여 지구환경변화의 해양관련 첨단기반기술 습득과 핵심기술을 개발하는 것이 필요하다

2-4. 미국, 일본, 프랑스 등 외국의 경우 수천억원의 국가예산을 투입하여 지구온난화에 대한 연구를 본격적으로 수행하고 있다. 그러나 우리나라의 경우 R&D 투자에 대한 정부지원이 미흡하여 본격적이고 체계적인 연구가 제대로 수행되지 못하고

있는 실정이므로 R&D투자의 확대가 요망된다 또한 지구환경변화연구는 특성상 장기적 지속적인 연구가 필요하므로 10개년 규모의 장기 프로젝트에 의해 추진되어야 할 것이다

2-5. 현재 우리나라의 과학기술분야의 국제 Program은 주로 과학기술처에서 지원하고 있으나 주로 정상급 회담에서 논의된 사항이나 관계부처 장관간 합의과제 중심으로 지원하고 있는 현실이다 그러나, 지구환경분야에 대한 지원은 아주 미미한 실정이므로 UN산하기관인 WMO, UNESCO, UNEP, IOC 등 국제기관에서 추진하는 국제공동 Program에 적극 참여할 수 있도록 관계부처별로 지원되어야 한다

2-6 지구환경변화연구는 관측자료의 수집부터 시작되어야 한다 이를 수집하기 위해서는 대기·해양 및 극지방에 체계적 관측망을 설치·운영하여야 할 것이다 또한 관측자료를 수집·보관하고 배포하는 기능을 담당한 조사자료센터 설치가 조속히 필요하다 data center의 설치에 해양과학조사법 및 동 시행령에 따라 관리기관을 지정하고 관리기관간 Net work체제를 확립하면 될 것이다

2-7. 국제공동연구에 능동적으로 참여하기 위해서는 우리나라 주변해역에서 행해지는 각종 해양탐사자료를 국제사양에 맞추는 노력이 필요하다.

2-8. 기후에 대한 해양의 역할은 대단히 중요하나 불확실한 영역중의 하나이다. 해양의 역할을 규명하기 위해서는 심해연구가 필수적이고 이를 위해서 심해탐사용 잠수정, 무인해저탐사장비의 개발 등 심해탐사기술의 개발도 병행되어야 할 것이다.

2-9. 해양, 대기 연계 대순환모델의 예측력을 제고하기 위해서는 생지화학적 순환 모델이 연구되어야 하며 이를 위한 지원이 요구된다

2-10 지구환경변화에 대한 가장 근본적인 대응책은 이를 국민이 인식하는데 있다. 그러나 아직 일반대중들은 피부로 느끼지 못하고 있으므로 일반대중을 계몽, 홍보할 수 있는 국가적 노력이 요망된다.

2-11. 우리나라의 산업구조를 환경친화적으로 전환하기 위해서는 환경관련 사회 기반구축, 환경기술개발 및 환경산업의 육성이 시급하며 에너지 사용효율 제고 및 청정에너지 이용확대, 제품 전 과정에 걸친 환경친화적 산업활동의 추진, 산업간의 공동 협력체제 구축 등이 요구된다

2-12 산업계의 자발적인 환경보전 노력이 강조되어야 하며 각 기업에서는 지속적인 성장을 위해 환경친화적 사업구조로의 전환이 이루어져야 하고, 경제운영체제의 효율화를 위해서 환경규제는 강화하는 반면 행정절차는 간소화함으로써 기업의 자율성을 최대한 보장할 수 있도록 해야 한다

여 백

제 2 장

지구환경변화의 요인과 실태

여 백

제 2장 지구환경변화의 요인과 실태

제 1절 서 론

지구는 생성이래 45억년동안 그 겉모습과 내부 구조가 지속적으로 변화하는 과정을 겪어왔다. 이러한 과정에서 지구의 자기장은 반전을 거듭했으며, 빙하의 전진과 후퇴가 진행되었고, 화산의 활동과 휴식이 반복되었으며, 대륙이 이동하고 바다의 열림과 닫힘이 반복되어져 왔다. 한편, 다양한 생물들이 출현하여 번성하거나 멸종되었으나, 자연 생태계의 끊임없는 생존 과정은 현재까지도 이어져오고 있다.

지구환경은 태양에너지 방출량의 변동, 지구궤도의 변화, 화산폭발 등 대규모의 자연변동에 의해 변화되고, 또한 인간활동에 의해 방출된 이산화탄소, 메탄, 아산화질소 등 온실가스의 농도증가, 열대우림의 파괴, 산업폐기물의 투기 등 인위적인 교란에 의해 변화된다. 과거 지질학적 시간 동안 일어난 변화는 주로 지구내부의 에너지 순환과 태양 복사열의 변화에 의해 이루어진 자연변동적 현상들이었다. 반면 현재 인류가 살아가고 있는 지구환경은 자연적 변동과 더불어 지구표면에서 이루어지는 인류활동에 의해 변화되고 있으며, 이러한 변화는 과거의 자연변동적 변화에 비해 변화속도가 가속되고 있으며 변화방향 또한 극단적인 상황으로 치우쳐 가고 있다.

인류는 약 200만년 전에 지구상에 등장하였으며, 일만년전까지만 해도 다른 생물과 유사하게 자연의 일부로서 지구변화에 순응하며 자연과 조화를 이루며 살아왔다. 그러나 인간이 정착생활을 시작하면서 경작지를 개간하고, 물의 흐름을 바꾸고, 잡초와 해충을 구제하는 등 보다 많은 농작물을 생산하기 위한 활동이 활발해짐에 따라 인간은 더 이상 자연에 순응하는 생물이 아닌 자연변화를 주도하는 역할자가 되었다.

또한 지속적인 인구증가로 인해 1987년에는 1900년 초기 인구의 3배를 초과하여 50억을 돌파하였고, 현재는 매년 9천 만명씩 증가하고 2050년에 이르러서는 120억을 넘어서리라 전망된다. 이러한 인류의 숫적 증가는 지구변화 속도를 가속화하는 요인으로 대두되었다.

인구증가로 인해 인류는 보다 많은 식량 및 에너지자원과 주거공간이 필요하게 되었고, 이에 따라 산림지대를 개간하고 많은 자원을 소모하게 되었다. 아울러 안락한 생활을 영위하려는 욕구충족을 위해 산업화, 공업화에 박차를 가하여 지난 1백년사이

소비재 생산량이 1백배가 증가하였다 이러한 산업화, 공업화로 인해 대기중 이산화탄소 농도가 지속적으로 증가하여 1990년에는 산업혁명 이전에 비해 25%가 증가하였으며, 현재 연간 증가율은 1.5ppmv/yr로서 21세기 내에 100%가 증가할 것으로 예측된다. 현행 추세대로 이산화탄소 배출량이 증가 할 경우 2030년에는 지구 평균기온이 약 3.5℃ 상승하게되고, 이로 인해 극지방의 빙하가 녹아 해수면이 20~110cm 가량 상승되리라 전망된다

과학적 연구결과들은 자연생태계의 자정능력을 급속히 악화시키는 개발위주의 경제성장과 환경파괴를 무시한 산업화의 지속에 대해 경종을 울리고 있으며, 근래에 와서는 인류는 생존이 위협을 받을 것이라는 위기의식을 느끼게 되었다. 이에 따라 환경보전과 경제개발을 동시에 조화시키면서 지속가능한 경제성장을 달성하기 위한 국제적 논의가 시작되게 되어 1972년 “세계자연헌장” 제정과 1983년 “세계환경개발위원회” 구성에 이어 1992년에는 세계 각국의 정상급 대표단이 참가한 유엔환경개발회의(UNCED)가 개최되는 등 지구환경문제는 동서 냉전체제의 붕괴후 국제사회의 정치, 경제적 질서를 규율하는 새로운 과제로 등장하고 있는 상황이다

지구환경문제는 원인과 영향이 한 국가에 한정되지 않고 다른 국가나 지구전체에 영향을 미치게 되는 범국가적 문제로 대두된다 즉 지구온난화, 오존층의 파괴, 산성비, 해양오염 등은 범위가 광범위하여 환경변화의 영향범위와 대응방식이 국지적인 오염문제 처리와는 큰 차이가 있다 또한 국지적 환경오염에 비해 피해 및 영향이 즉시 나타나지 않으며, 대응방책 적용에도 산업구조 조정 등 상당한 시간이 필요한 실정이나 개도국은 과학기술의 역량부족으로 자체 해결능력이 부족하여 선진국의 재정 지원과 기술이전을 통해서만 지구변화에 대응할 수 있다. 따라서 지구환경문제 해결은 각 국가의 개별적 대응노력과 함께 선진국과 개도국이 공동참여하는 지구차원의 협조체제를 형성하는 것이 불가피하다 그러므로 지구환경연구는 국제간의 공동연구를 통하거나 국제협력을 통해서 지역적이고, 한시적인 위협이 아닌 전지구적 규모의 인류생존 문제로 다루어져야 한다

이러한 공통적인 인식에도 불구하고 지구환경보전에 대한 이해와 해결노력은 각 국가들간의 견해 차이로 대립되고 있다. 현재 선진국에 살고 있는 인구는 총 인구의 1/4에 불과하나 이들은 전세계 부의 80%를 차지하고 있으며, 거의 모든 에너지를 소비하고 있으며 거의 모든 폐기물을 생산하고 있다 반면 나머지 3/4는 후진국에 살고

있으며 세계 인구증가율의 95%를 차지하고 있다. 후진국들은 빈곤을 극복하기 위해 과거 선진국의 산업화 과정을 모방하여 산업화 추진에 전력을 다하고 있다. 그러나 과거 선진국들의 산업화를 답습하는 식의 후진국들의 산업화는 생태계를 회복 불가능한 상태로 파괴할 수 있는 상황에 이르게 할 수 있다는 우려가 제기되었다. 이런 상황에서 선진국들은 후진국의 산업화를 환경파괴로 간주하게 되었고, 후진국들은 선진국들의 환경보호 협약들이 지구환경파괴의 책임을 후진국들에게 전가하려는 술책으로 여기는 대립 상황이 이어져오고 있다.

국가간의 첨예한 입장차이에서 기인한 대립 상황하에서도 선진 각국들은 지구환경보전이라는 대명제를 앞세워 다각적인 무역규제를 강화하고 있다. 미국의 경우 1990년 신대기정화법을 제정하여 자동차의 배출가스 규제 및 연료효율의 기준을 강화하여 우리나라 자동차 수출을 간접 규제하고 있으며, 독일, 일본, 캐나다는 현실적으로 개도국은 획득하기 곤란한 환경마크를 부착한 상품을 우선 구매하는 무역정책을 실시하고 있다. 위와 같이 선진국들은 제품생산 및 수출에 대한 새로운 부담을 가하고 있거나, 환경오염 유발요인이 되는 특정물질의 사용이나, 생산공정을 제한하거나, 주로 해외수입에 의존하는 원자재 확보에 제약을 가하고 있다.

이러한 지구변화에 관련된 국제환경 조약들과 무역규제의 확대는 국제사회의 경제질서에 커다란 변화를 가져오고 있다. 이에따라 국제 신경제질서에 대응하는 국가적인 전략을 수립하고 국제 의사결정기구 및 정부간 기상변동 패널(IPCC)에서 우리나라의 확실하고 근거있는 입장을 개진하기 위한 과학적인 근거자료 마련이 시급한 실정이다.

지구환경변화에 대한 효과적인 과학자료를 획득하기 위해서는 지구변화의 원인과 과정을 규명하고 지구계를 구성하는 대기, 육상, 해양에 관한 자연현상을 정확히 이해해야 한다. 특히, 지구표면의 70% 이상을 점유하고 있으며, 지구온실가스인 이산화탄소의 흡수 역할을 하는 해양에 대한 연구는 매우 중요하다. 이러한 관점에서 현재 국제연구프로그램의 핵심사업들중 해양에 대한 연구가 큰 비중을 차지하고 있는것은 당연하다.

지구계의 정확한 이해는 지구규모의 자연현상에 대한 자료의 수집, 분석 및 해석을 통해서 가능하므로 지금까지 전통적인 연구의 규모와 수준으로는 불가능하며 최첨단의 연구방법과 연구기기가 필요하다. 진행중인 해양에 대한 국제연구는 위성을 이

용하거나 장기간의 지상 및 해양관측이 활용되고 있으며, 최신의 잠수정을 이용한 심해연구, 심해저 굴착사업과 같은 고체지구의 내부연구, 또한 최첨단의 지구물리적 기법을 이용하여 아직까지 접근하지 못했던 부분을 연구대상으로 하고 있다.

이와 같이 지구환경변화를 이해하고 대응해 나가는데는 많은 첨단과학기술이 동원되므로 지구변화에 대한 선진국과 국제기구들의 연구계획의 분석은 우리나라 해양과 지구과학분야의 연구에 큰 도움이 될 것이며, 지구환경변화의 원인을 규명하고 대응하는 기술은 인류의 문제뿐만 아니라 우리나라의 교육, 환경, 보건 등 우리나라 사회정책 수립의 필수적 자료를 제공할 것이며, 지구변화의 조사·연구내용 및 결과는 해양을 대상으로 하는 해양자원산업, 해양공간 이용산업 등의 기술개발면에서 뿐만 아니라 우리나라 산업정책 및 무역정책 수립에 중요한 자료가 될 뿐만 아니라 국제간의 협상 및 협약체결에 필요한 기초자료가 될 것이다

제 2절 지구기후 변화

지구 변화는 지구환경의 자연적 및 인간에 의한 모든 변화를 망라한다 즉, 지구 변화는 생물을 유지하게 하는 지구의 능력을 변화시킬 수 있는 기후, 해양, 대기 화학, 그리고 생태계의 변화이다. 이러한 지구변화로 인해 지구 곳곳에서는 가뭄, 홍수, 태풍과 같은 재해에 의해 매년 중대한 경제적 손실이 발생하고 있다.

지구환경변화에 대한 연구는 이러한 사건을 예측하여 대응하는 능력을 증진시키는데 일조하는 한편 농·수산물의 수확량, 수자원의 공급에 영향을 미치는 온도와 강수의 변화를 규명함으로써 수십년 내지 수백년내에 발생할 수 있는 피해를 감지하여 미래의 기후변화에 더욱 잘 대비할 수 있게 한다 또한 오존 고갈, 생물 다양성의 변화, 그리고 육상 및 수자원의 생산성 변화와 관련된 증가된 자외선 조사에 관한 과학적 지식도 인류에게 안정된 생활을 제공해줄 것은 명백하다.

지구 변화와 관련하여 현재 진행중인 국제연구들은 계절간 혹은 연간 기후 변동, 향후 수십년간의 기후 변화, 성층권의 오존 고갈 및 증가된 자외선, 육상 및 해양 생태계의 변화등을 밝히는데 주력하고 있다. 궁극적으로 지구변화에 대한 과학적 연구 결과는 환경 변화에 대한 인간과 생태계의 취약성을 감소시킬 수 있다 즉, 인간 건강 증진 및 장수, 경제 성장과 번영, 그리고 식량자원 및 담수의 충분한 공급과 그 질의

보장에 있어서의 지속적인 발전을 통하여 건강한 사회를 건설하는 초석을 제공하고 있다.

이 장에 소개되는 과학적 연구결과들의 내용은 정부간 기상변동에 관한 패널(Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC)의 보고서를 요약한 것으로, 이 보고서는 지구 기후변화에 대한 과학적 정보를 충실히 언급하고 있다. 저자들은 향후의 연구는 새로운 정보를 제공할 것이지만, 강화된 온실화 효과 (enhanced greenhouse effect)의 실체나 이에 의한 지구 기후변화에 대한 원초적 결론을 크게 변화시키지 않을 것으로 전망하였다.

그러나 다음 장들에서 소개되는 이후의 논문에서 이미 많은 불확실성이 제거되고 결론 또한 일부 변하고 있음을 알 수 있다. 따라서 여기서 인용된 이전 연구 결과는 새로운 과학적 발견에 의해 일부는 바뀔 수 있다는 점을 염두에 두어야 할 것이다.

정책입안자들이 실제로 요구하는 질문에 대한 과학자들의 답변에는 많은 불확실성이 내재한다. 그럼에도 불구하고 정책입안자들에게 최선의 예상치를 제공함과 동시에 이에 결부된 불확실성도 함께 평가하는 것은 과학자들의 의무이다.

1. 지구 기후변화의 요인

지구 기후변화는 자연적이고 인위적인 많은 요인들에 의해 결정된다. 먼저 자연적인 요인들을 살펴보고 그 다음 인류활동에 의한 요인을 살펴 보기로 한다.

가 자연적 요인

기상과 기후를 변화시키는 에너지는 궁극적으로 태양으로부터 온다. 지구는 태양의 광선에너지(단파인 자외선, 가시광선 포함)를 받는데, 이 중 약 1/3은 반사되고 나머지는 기후계의 다른 성분들(대기, 해양, 얼음, 육지 그리고 생물체)에 의해 흡수된다 (그림 1).

태양광선으로부터 흡수된 에너지는 지구와 대기로부터 복사되는 에너지에 의해 균형을 이루고 있다. 복사에너지는 장파인 적외선인데, 그 세기는 지구와 대기의 온도에 의해 결정된다.

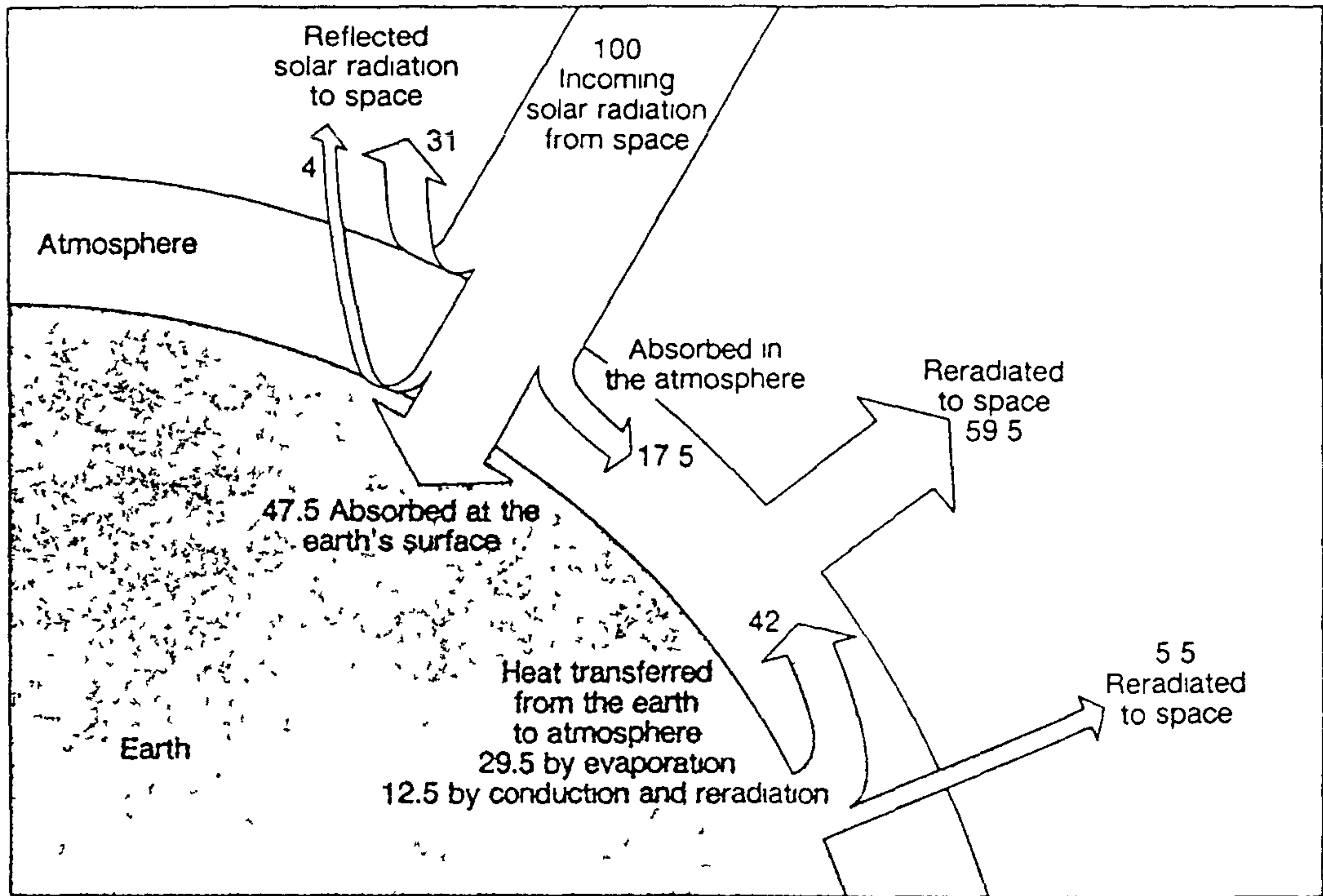


Figure 1 The earth's heat budget

지구에 흡수된 에너지와 방출되는 에너지간의 균형을 변화시킬 수 있는 자연적인 요인들이 기후변화에 대한 방사원동력(radiative forcing)이 된다 이들 중 가장 명백한 것은 태양으로부터 방출되는 에너지의 변화이다 이러한 변화에 대한 직접적인 증거는 11년의 태양주기 동안 관찰되었으며, 더욱 장기간의 변화도 일어날 수 있다 지구궤도의 느린 변화는 태양에너지의 계절적, 위도별 분포에 영향을 미친다. 이 현상은 앞에서 언급한 것처럼 빙하기의 시작과 관련되었을 것이다.

가장 중요한 요인들 중 하나는 온실효과(greenhouse effect)이다 이를 간단하게 설명하면 다음과 같다 단파의 태양방사에너지는 청명한 대기를 쉽게 통과한다 그러나 따뜻한 지표에서 복사되는 장파의 에너지(적외선)는 지표상부의 보다 차가운 대기중의 수 많은 미량기체들에 의해 부분적으로 흡수되고 지구쪽으로 재방출된다 평균적으로 방출되는 장파의 복사에너지는 유입되는 태양의 복사에너지와 균형을 이루기 때문에 대기와 지표 모두는 온실가스가 없다고 가정할 때보다 더욱 따뜻하다.

중요한 온실가스들은 질소와 산소같은 대기의 주요 성분이 아니라 수증기(가장 기여도가 크다), 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 대류권과 성층권의 오존(O₃) 등이다

대기중의 에어로졸은 복사에너지를 반사하고 흡수할 수 있기 때문에 기후에 영향을 미칠 수 있다 가장 중요한 자연적인 교란요인으로는 성층권 하부까지 영향력을 미치는 화산폭발을 들 수 있다 마지막으로 기후는 모든 시간규모에 걸쳐 그 자체적으로 자연변동(natural variability)이 가능하며 이러한 변동은 외부의 영향없이도 일어난다

온실효과는 과학적 원리를 기초로 하여 잘 알려진 사실이다 온실효과가 사실이라는 것을 뒷받침하는 몇가지 증거를 들 수 있다

첫째, 현재의 평균온도는 천연 온실가스가 존재하지 않을 경우보다 약 33°C 더 높다 지표와 대기로부터 방출된 복사에너지의 위성관측 자료는 온실효과의 영향을 잘 보여주고 있다

둘째, 금성, 지구, 그리고 화성의 대기성분이 매우 다르다는 것을 알고 있으며 화성의 표면온도는 대략 온실이론과 일치한다

세째, 얼음시추물의 분석 결과, 최근 160,000년 동안의 지표온도는 대기중 CO₂와 CH₄ 농도와 상관관계가 매우 큰 것으로 나타났다 (그림 2)

비록 원인과 결과를 자세히 모른다고 할지라도, 빙하기와 간빙기의 커다란 지구 온도변화(5-7°C) 원인의 일부는 온실가스의 변화라고 볼 수 있다

나 인류활동에 의한 인위적 요인

자연적으로 존재하는 온실가스는 생물들이 살 수 있을 정도로 지구를 따뜻하게 유지시킨다 인간은 온실가스의 농도를 증가시키고, 염화불화탄소(CFC)와 같은 새로운 온실가스를 첨가시켜 정도는 불확실하지만 연평균지표-대기온도(지구 평균)를 상승시킬 수 있다 엄밀히 말해 이것은 자연 온실효과에 부과된 “강화된(enhanced)” 온실효과이다 “강화된”이라는 용어는 보통 생략하지만 기억해 두어야 할 필요가 있다 기온변화에 수반되는 기후변화의 다른 예로는 강수량의 변화, 해수면 상승 등을 들 수 있다

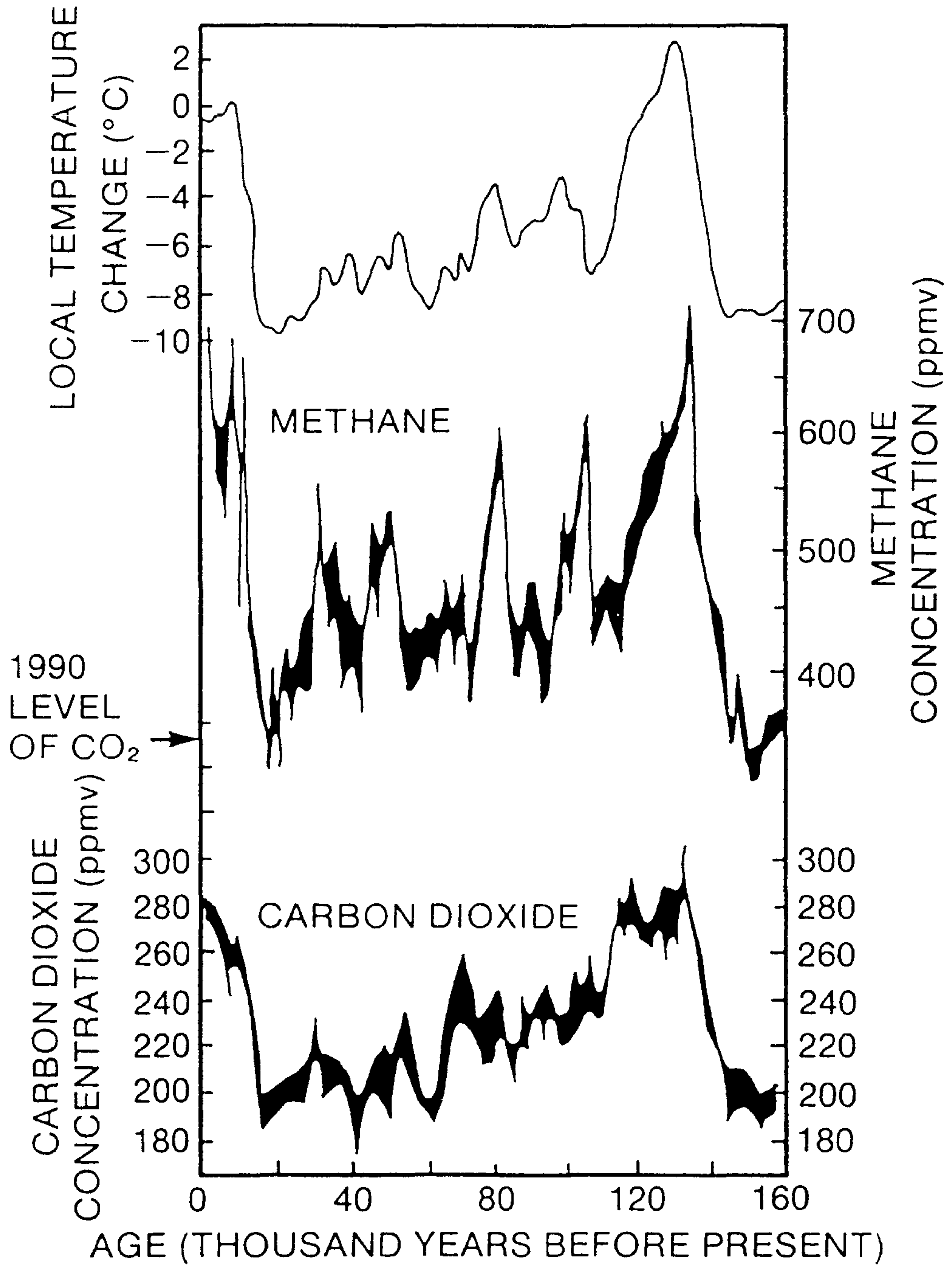


Figure 2 Analysis of air trapped in Antarctic ice cores shows that methane and carbon dioxide concentrations were closely correlated with the local temperature over the last 160,000 years

기후에 영향을 미칠 가능성이 있는 또 다른 인류활동이 있다 그것은 사막화(desertification)와 산림파괴(deforestation)로, 이들은 육지의 광반사율(albedo)을 변화시켜 지표에 의해 흡수되는 태양에너지의 양에 영향을 미친다 주로 화석연료의 소비로 배출되는 황화합물로부터 만들어지는 에어로졸은 구름을 형성하여 기온을 저하시킨다 마지막으로, CFC에 의한 성층권 오존의 변화 또한 기후에 영향을 미칠 수 있다.

2. 온실가스(Greenhouse gases)

대기중 온실가스 농도는 빙하기에는 자연적으로 변하였으나, 산업혁명 이래로는 인류활동으로 인해 계속 증가하고 있다고 확신되고 있다 표 1은 현재와 산업혁명 이전의 온실가스의 양, 인류활동에 의해 영향을 받는 온실가스의 현재 대기중 수명과 변화율을 요약한 것이다

표 1 인류 활동으로 인한 온실가스의 변화

	Carbon Dioxide	Methane	CFC-11	CFC-12	Nitrous Oxide
Atmospheric concentration	ppmv	ppmv	pptv	pptv	ppbv
Pre industrial (1750-1800)	280	0.8	0	0	288
Present day (1990)	353	1.72	280	484	310
Current rate of change per year	1.8 (0.5%)	0.015 (0.9%)	9.5 (4%)	17 (4%)	0.8 (0.25%)
Atmospheric lifetime (years)	(50-200)†	10	65	130	150

ppmv = parts per million by volume,

ppbv = parts per billion (thousand million) by volume,

pptv = parts per trillion (million million) by volume

† The way in which CO₂ is absorbed by the oceans and biosphere is not simple and a single value cannot be given, refer to the main report for further discussion

두가지 중요한 온실가스인 수증기와 오존은 표 1에 포함되지 않았다. 수증기는 가장 큰 온실효과를 갖고 있지만 대류권내의 수증기 농도는 기후계 내부적으로 결정되고, 지구 규모로 보면 인류활동에 의한 증감에 의해 영향을 받지 않지만 수증기는 지구온난화에 따라 증가될 것이며, 온난화를 더욱 가속시킬 것이다 오존의 농도는 인간의 활동에 의해 변화되지만, 현재 관측 수준으로서는 그 변화를 정량화하기 어렵다.

산업혁명이전 1천년 동안, 온실가스의 양은 비교적 일정하였다 그러나, 세계가 더욱 산업화되고 농업이 발달함에 따라 인구가 증가하고 온실가스의 양은 현저하게 증가하였다 그림 3은 CO₂, CH₄, N₂O 그리고 CFC 11의 농도 변화를 나타낸 것이다

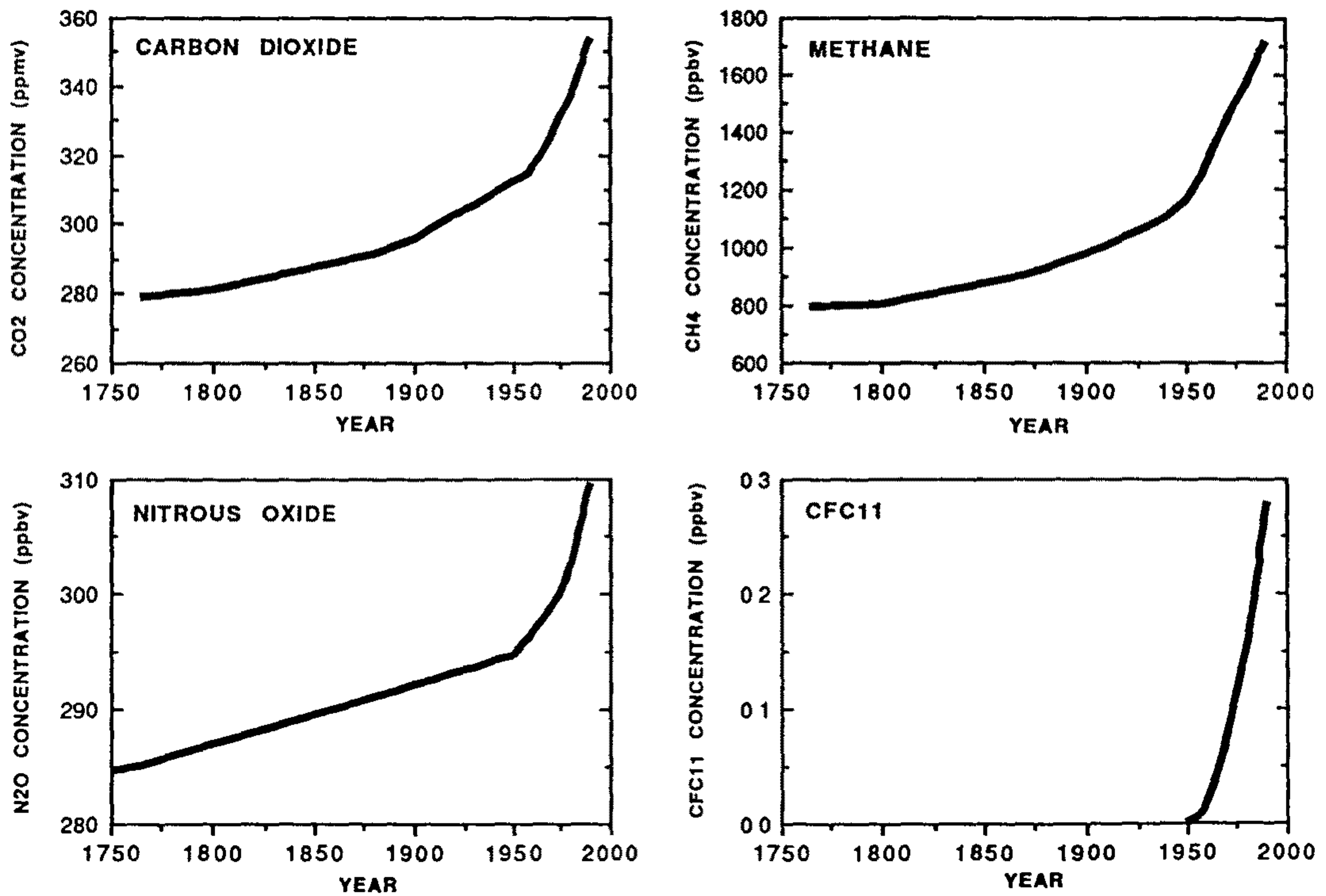


Figure 3 Concentrations of carbon dioxide and methane after remaining relatively constant up to the 18th century, have risen sharply since then due to man's activities

산업혁명 이래, 화석연료의 소비와 산림의 파괴는 대기중 CO₂농도를 26%나 증가시켰다 오늘날 화석연료로부터 기원된 CO₂의 양은 알고 있지만 산림파괴로부터 유입된 양은 정확하게 계산할 수 없다 더욱이 배출된 CO₂의 약 절반이 대기중에 머물러 있다 할지라도 우리는 그 나머지의 어느 정도가 해양과 육상생물에 의해 흡수되는지 모르고 있다 먼지 제거, 용제, 냉각제 및 거품발생제로 사용된 CFC의 배출량은 잘 알 수 있는데, 특히 1930년대 이것이 발명되기 전에는 대기중에 존재하지 않았다

메탄(CH₄)과 아산화질소(N₂O)의 기원은 잘 알려져 있지 않다 CH₄ 농도는 벼재배, 가축사육, 생물체의 연소, 석탄 채광 및 천연가스의 배출때문에 2배 이상으로 증가되었으며, N₂O는 인류활동으로 인해 산업혁명 이래로 약 8%가 증가되었다 또한, 화석연료의 연소는 CH₄의 자연제거율을 감소시키는 방향으로 기여했음은지도 모른다 N₂O의 기원을 명확히 밝힐 수는 없지만 농업이 기여했을 것으로 생각된다

기후에 대한 오존의 영향은 대류권의 상부와 성층권의 하부에서 가장 크다 모델 계산에 의하면, 성층권 상부의 오존은 인류에 의한 N₂O, 탄화수소, 일산화탄소(CO) 배출때문에 증가했음을 보여주고 있다 지구표면에서의 오존은 북반구에서는 배출에 비례하여 증가하였지만 대류권 상부에서의 증가량을 확인하기에는 관측이 불충분하다

남반구 고위도의 성층권 하부에서의 오존은 CFC 때문에 상당히 감소되었으며 또한 잘 알려져 있지는 않지만 CFC 때문인 것으로 측정되는 지구 규모의 오존 감소현상이 나타나고 있다 이러한 감소현상은 지표온도를 냉각시켜 다른 온실가스에 의해 초래된 온난화를 다소 쇄감시키는 역할을 한다 다음 수십년 동안은 대기중 CFC의 농도가 계속 증가함에 따라 성층권 하부에서 오존의 감소현상이 지속될 것이다 온실가스들의 농도, 체류시간, 그리고 안정성, 인간에 의한 배출로 초래되는 대기중 CO₂ 농도를 계산하기 위하여 자세한 배출량과 대기·해양과 육상생물권 사이의 CO₂ 이동을 포함하고 있는 컴퓨터모델이 쓰이고 있다 다른 온실가스들의 경우 대기중 화학반응의 영향을 혼합한 모델이 사용된다.

대기중 기체들의 체류시간은 해양, 대기 및 생물권으로부터의 배출과 제거 및 흡수에 의해 결정된다 CO₂, CFC, 그리고 N₂O는 대기로부터 느리게 제거되는데, 배출량의 변화가 이들의 대기중 농도에 반영되기까지는 수십년에서 수 세기가

소요된다. 인간에 의한 CO₂배출이 1990년에 정지되더라도 2100년까지는 여전히 대기중 CO₂ 농도는 뚜렷하게 증가할 것이다. 반면, 일부 CFC 대체품과 CH₄는 비교적 짧은 대기중 체류시간으로 인해 이들의 대기중 농도는 배출량 변화를 수십년 이내에 완전히 반영하게 된다.

배출량과 농도간의 관계를 명백히 설명하기 위해서 화석연료에 의한 CO₂ 배출량의 가상적인 변화를 그림 4에 나타내었다

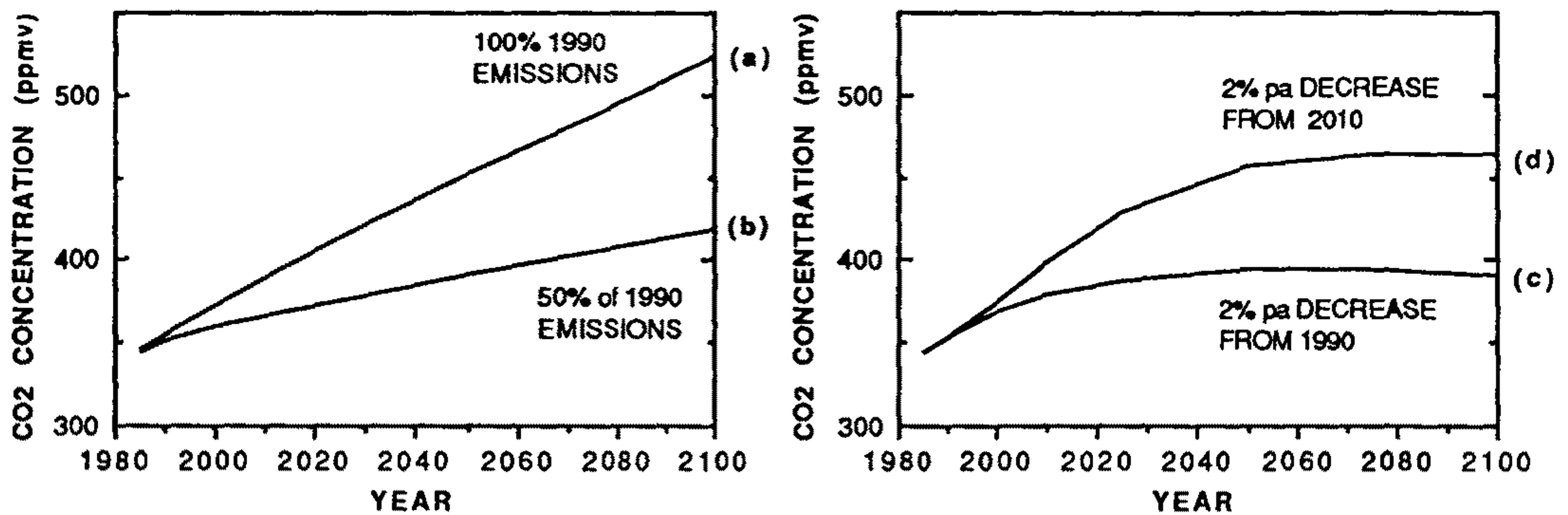


Figure 4 The relationship between hypothetical fossil fuel emissions of carbon dioxide and its concentration in the atmosphere is shown in the case where (a) emissions continue at 1990 levels, (b) emissions are reduced by 50% in 1990 and continue at that level, (c) emissions are reduced by 2% pa from 1990, and (d) emissions, after increasing by 2% pa until 2010, are then reduced by 2% pa thereafter

그림 4는 ①1990년 수준으로 배출을 지속시키는 경우, ②1990년 배출량의 절반으로 줄이는 경우, ③1990년 부터 매년 2%씩 배출량을 감소시키는 경우, ④1990-2010년 사이에는 매년 2%씩의 증가가 허용되고, 2010년부터는 매년 2%씩 감소가 뒤따르는 경우의 CO₂ 농도를 나타내고 있다

현 수준의 배출이 허용되는 기간이 길수록 적정수준으로 농도를 안정시키기 위해서는 향후 더 많은 양을 감소시켜야 한다 임계농도가 존재한다면 보다 조기에 배출량을 감소시키는 것이 더욱 효과적일 것이다

“대기의 안정화”라는 용어는 대기중 온실가스의 농도를 어느 수준으로 제한할때 사용되는 것으로, 표 2는 1990년 농도로 안정화시키기 위해서 감소시켜야 할 온실가스의 양을 보여주고 있으며 대부분의 기체에서 상당량의 감소가 필요함을 알 수 있다

표 2 대기의 안정화

Greenhouse Gas	Reduction Required
Carbon Dioxide	>60%
Methane	15 - 20%
Nitrous Oxide	70 - 80%
CFC-11	70 - 75%
CFC-12	75 - 85%
HCFC-22	40 - 50%

Note that the stabilisation of each of these gases would have different effects on climate, as explained in the next section

가 온실가스의 상대적 중요성

오늘날 대기중 각 기체의 농도 증가는 기후에 대한 절대적 효과와 CO₂에 대한 상대적 효과를 통해서 계산할 수 있다 분자대 분자로 생각할 때 이 상대적인 효과는 CH₄의 경우 CO₂의 약 21배, CFC는 약 12,000배 더 크다 질량대비로 보면 CH₄의 경우 58배, CFC-11의 경우 4,000배 더 효과적이다

온실가스 농도가 증가하면 방사원동력(radiative forcing)이 증가될 것이 확실하다 온실가스에 의한 방사원동력 계산은 기후변화를 추정하는 것보다 더욱 정확하게 할 수 있다 그 이유는 전자의 경우에는 아직 잘 이해되지 않은 대기의 반응을 고려할 필요가 없기 때문이다 어느 주어진 시간에서 총 방사원동력은 각 온실가스들의 방사원동력의 합으로 표현된다 그림 5는 방사원동력의 값이 과거에 어떻게 변화해 왔으며 (온실가스의 관측을 통해서), 미래에는 IPCC 배출 시나리오를 기초로 하여 어떻게 변화할 것인지를 보여주고 있다

총 방사원동력은 CO₂양, 즉 당량 CO₂ 농도(equivalent CO₂ concentration)로 표현할 수 있다. 온실가스는 산업혁명(18세기 중엽) 이전의 CO₂로 환산하면 약 50% 증가하였고, 이 중 CO₂ 자체는 26%만 증가하였으며, 다른 기체들이 그 나머지를 차지한다.

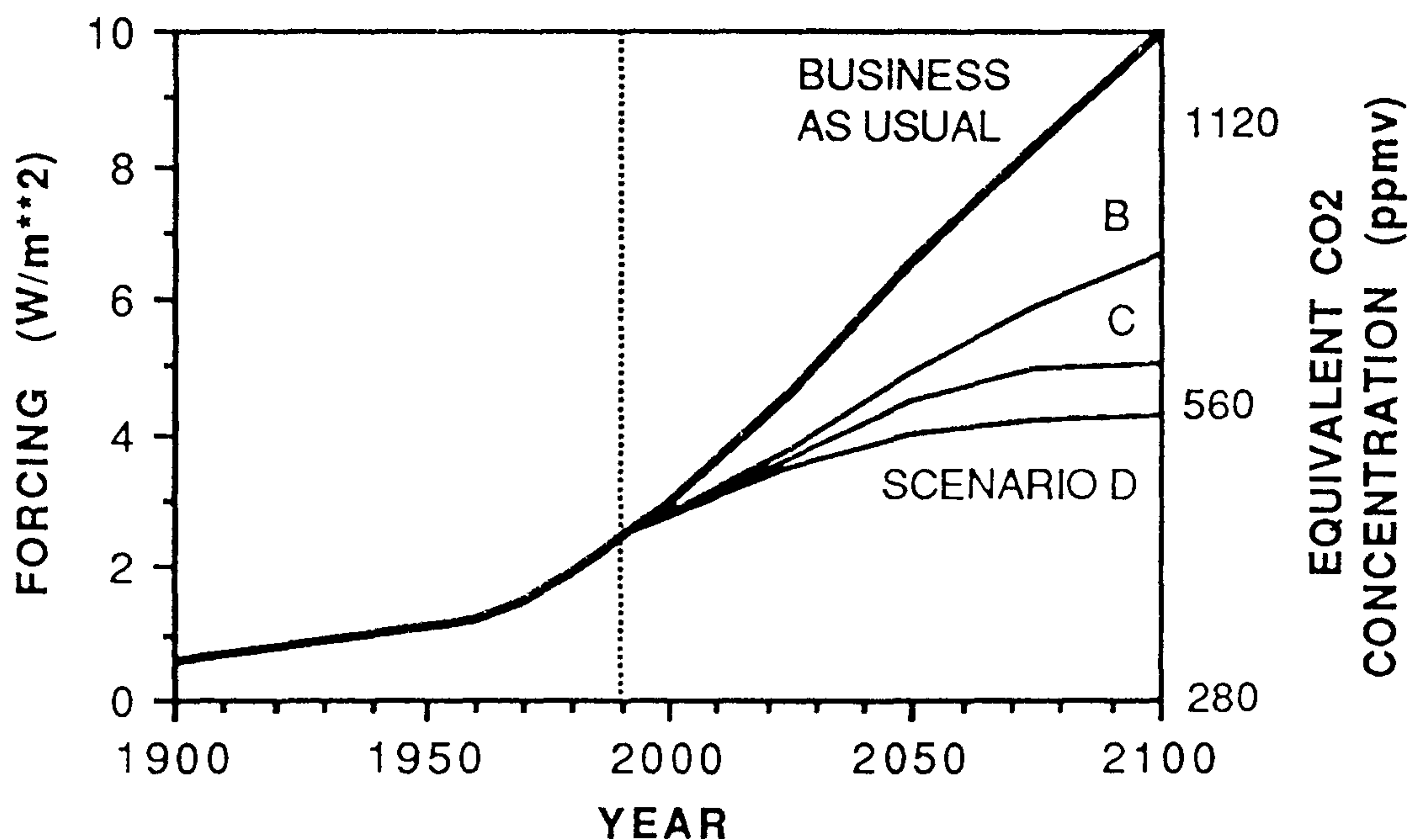


Figure 5 Increase in radiative forcing since the mid-18th century, and predicted to result from the four IPCC emissions scenarios, also expressed as equivalent carbon dioxide concentrations

1980년 이후, 온실가스들의 총 방사원동력 증가에 대한 기여도가 그림 6에 나타나 있는데, CO₂는 지난 10년간 증가분의 약 절반을 차지하고 있다. 그러나, 중요한 영향을 미치는 오존은 이에 포함되어 있지 않다.

선택가능한 정책방안을 평가하기 위해서 동일 배출량에 대한 각 온실가스의 상대적인 방사효과를 아는 것이 유용하다. 상대적인 지구온난화 잠재력(global warming potentials, GWP)의 개념은 기체들이 대기중에 체류하는 정도를 고려하기 위해 도입되었다.

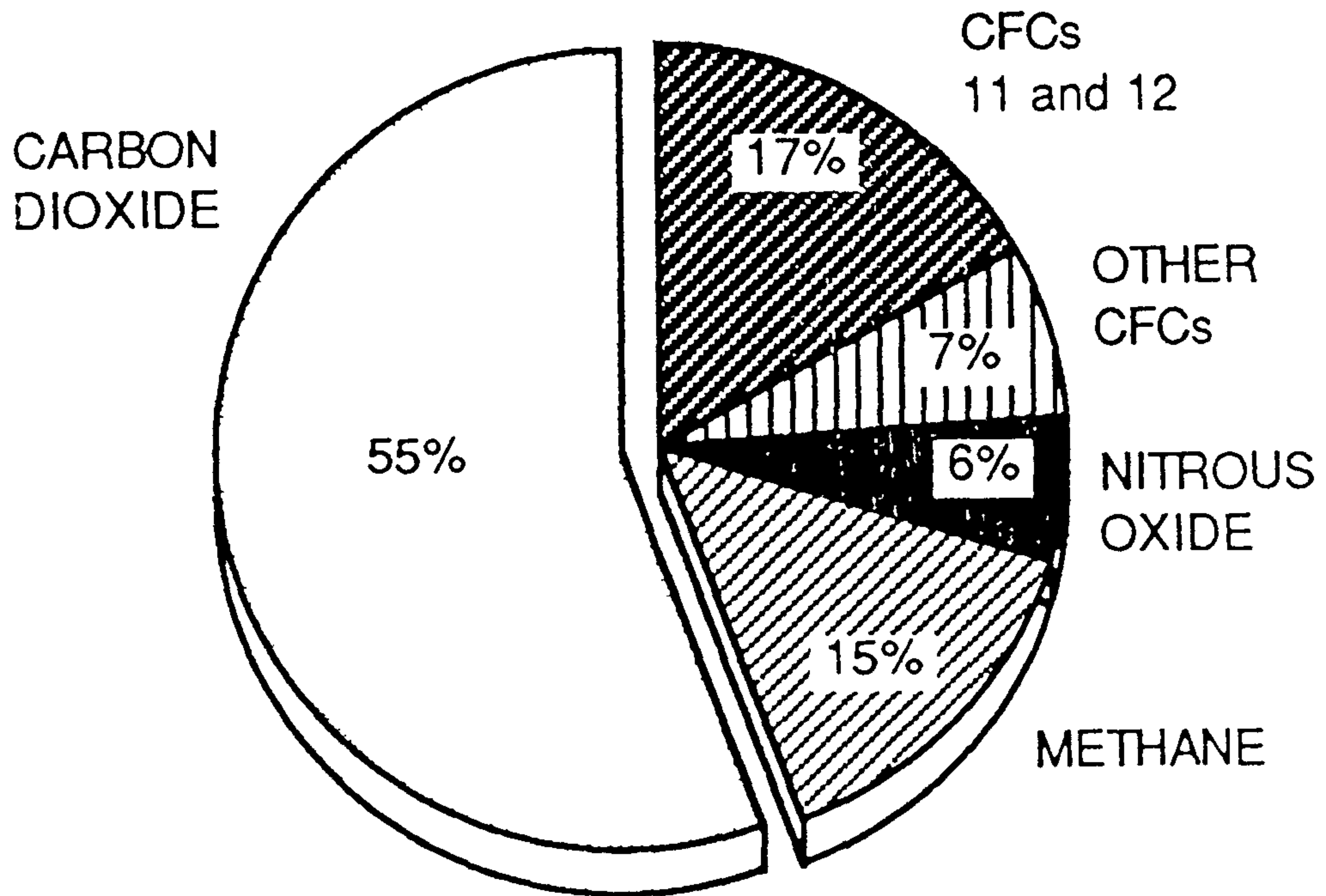


Figure 6 The contribution from each of the human-made greenhouse gases to the change in radiative forcing from 1980 to 1990

이 지표는 오늘날 대기중의 각 온실가스가 순간적으로 단위 질량 (1 kg) 만큼 배출되었을때 CO₂단위 질량에 대비한 시간에 대해 적분된 온난화효과(time-integrated warming effect)로 정의된다 상대적인 중요성은 미래의 대기 성분이 변함에 따라 장차 변하게 될 것이다 왜냐하면 방사원동력은 CFC 농도와는 정비례하여 증가하지만 다른 온실가스(특히, CO₂)는 훨씬 적은 비율로 증가하기 때문이다.

표 3의 GWP는 세가지 시간범위에 대해 나타낸 것으로서, 다양한 시간범위 동안 기후에 대한 누적영향을 고려해야 함을 반영하고 있다

표 3 지구 온난화 잠재력

	TIME HORIZON		
	20 yr	100 yr	500 yr
Carbon dioxide	1	1	1
Methane (including indirect)	63	21	9
Nitrous oxide	270	290	190
CFC 11	4500	3500	1500
CFC 12	7100	7300	4500
HCFC 22	4100	1500	510

Global Warming Potentials for a range of CFCs and potential replacements are given in the full text

긴 시간범위는 누적영향을 파악하는데 적당한 반면, 짧은 시간규모는 배출 변화에 대한 대기의 즉각적인 반응을 파악하는데 도움을 줄 것이다 GWP 계산법을 고안하고 계산 하는데에는 많은 어려움이 있으며 여기에 주어진 값은 잠정적인 것으로 이해되어야 한다 인간에 의한 배출의 직접적인 영향 외에도 기체의 여러 성분들 사이의 화학반응으로 발생하는 간접적인 영향이 있다 성층권 수증기, CO₂와 대류권 오존에 대한 간접적인 영향은 이미 계산에 고려되어 있다

예를 들어, 표 3은 배출된 후 처음 수십년내에 CH₄의 효과가 가장 큰 반면 체류시간이 긴 N₂O의 배출은 훨씬 장기간 동안 기후에 영향을 미치게 됨을 보여주고 있다. CFC대체품의 체류시간은 1-40년의 범위를 갖는다. 대체품은 체류시간이 길수록 기후변화 매개체로서의 잠재력이 큰 것이다 한가지 예로서 HCFC-22(체류시간, 15년)는 20년의 시간 규모에서는 CFC-11과 유사한 효과를 갖지만 500년의 시간규모에서 보면 동일한 양이 배출되었을때 훨씬 적은 효과를 나타낸다.

표 4는 CO₂가 온실가스중 kg당 최소의 효율을 갖는다는 것을 보여주고 있지만, 배출된 양과 GWP의 곱에 의해 결정되는 지구온난화에 대한 기여도는 가장 크다

표 4 1990년 인류 활동에 의한 온실가스의 배출의 영향

	GWP (100yr horizon)	1990 emissions (Tg)	Relative contribution over 100yr
Carbon dioxide	1	26000†	61%
Methane*	21	300	15%
Nitrous oxide	290	6	4%
CFCs	Various	0.9	11%
HCFC-22	1500	0.1	0.5%
Others*	Various		8.5%

* These values include the indirect effect of these emissions on other greenhouse gases via chemical reactions in the atmosphere. Such estimates are highly model dependent and should be considered preliminary and subject to change. The estimated effect of ozone is included under "others". The gases included under "others" are given in the full report.

† 26 000 Tg (teragrams) of carbon dioxide = 7 000 Tg (=7 Gt) of carbon

표 4에서 1990년의 온실가스 배출량에 대한 향후 100년간의 영향을 CO₂를 기준으로 나타내었다.

표 5는 배출량을 감소해야 할 필요가 있을 경우, 어느 기체에 우선권을 부여할 것인지를 선정할 때 고려되어야 할 요인을 설명하고 있다.

표 5 온실가스의 특성

GAS	MAJOR CONTRIBUTOR?	LONG LIFETIME?	SOURCES KNOWN?
Carbon dioxide	yes	yes	yes
Methane	yes	no	semi-quantitatively
Nitrous oxide	not at present	yes	qualitatively
CFCs	yes	yes	yes
HCFCs, etc	not at present	mainly no	yes
Ozone	possibly	no	qualitatively

즉, 이 기체는 현재와 미래 기후원동력에 어떠한 방법으로 기여하는가, 수명은 어느 정도이며, 조기 배출량 감소가 나중의 감소보다 더 효과적인가, 그리고 그 기체의 배출원과 제거기작은 잘 알려져 있는가 등이다

나. 온실가스의 증가

(1) 미래의 온실가스 농도

미래의 기후변화를 계산하기 위해서는 미래의 온실가스 농도를 알아야 한다 다음에 언급될 이들 농도는 인간에 의한 배출량과 기후변화와 다른 환경조건들이 자연 온실가스(CO₂와 CH₄ 포함)의 대기, 해양 및 육상 생물권 사이의 교환을 조절하는 생물권 작용, 즉 온실가스 “되물림고리 (feedback)”에 어떻게 영향을 미치는지에 따라 좌우된다

미래의 인류기원 배출량에 대한 네개의 시나리오가 IPCC에 의해 개발되었다. 이들 중 첫번째는 온실가스 배출의 규제를 위한 조치가 거의 혹은 전혀 취해지지 않은 것을 가정한 것으로 흔히 “현상유지 (Business-as-Usual BaU)”라는 용어로 표현된다. 여기서 2025년까지 세계 각국의 예상 자료를 취합하면 CO₂와 CH₄의 배출량은 BaU 시나리오보다 10~20% 더 높다는 점에 주목할 필요가 있다 나머지 세가지 시나리오는 온실가스 배출의 규제 정도를 점점 증가시킴으로써 배출량 증가를 감소시킨다는 것을 가정하고 있다 이하에서는 이들을 각기 시나리오 B, C, D라 칭하기로 한다 (그림 7)

(2) 온실가스의 되물림(feedback) 작용

온도상승으로 인해 광합성 작용보다 호흡이 더 빠르게 증가되는 경우, 또는 식물군집 (특히, 대규모 산림)이 기후변화에 충분히 빠르게 적응할 수 없는 경우에 육상 생태계로부터 CO₂의 순 배출량은 증가할 것이다

동토대와 아한대는 현재 탄소의 대규모 저장소로서 기온이 상승하면 대기로의 CO₂배출이 뚜렷하게 나타날 것이다 증가된 CO₂ 농도가 자연 생태계의 생산력을 증가시키거나 건조지역의 생태계에서 식물의 성장을 자극하고 툰드라의 이탄(peat)내의 탄소 저장량을 증가시킬 것으로 기대되는 토양의 수분함량이 증가할 경우 그 반대 현상이 나타날 것이다

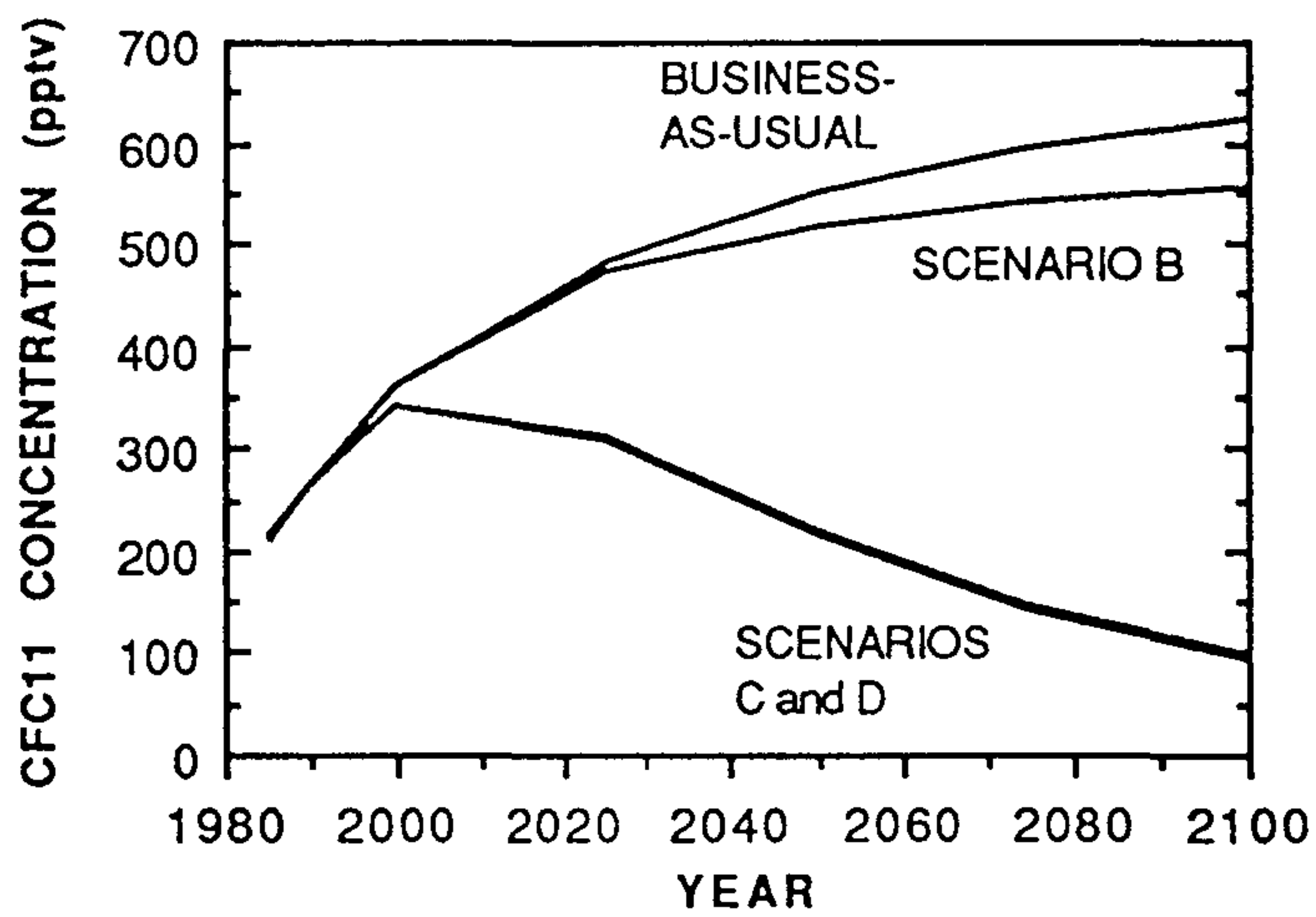
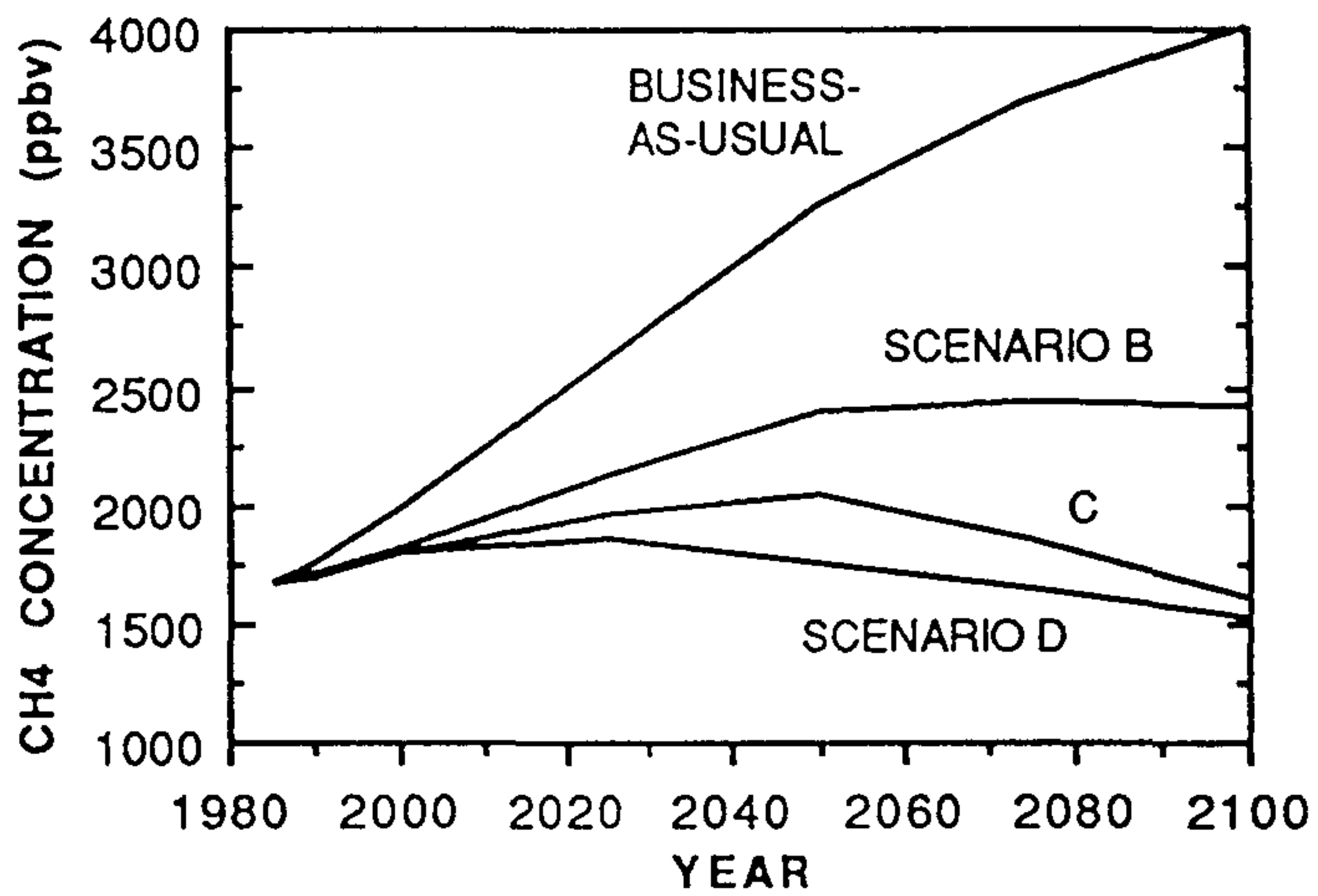
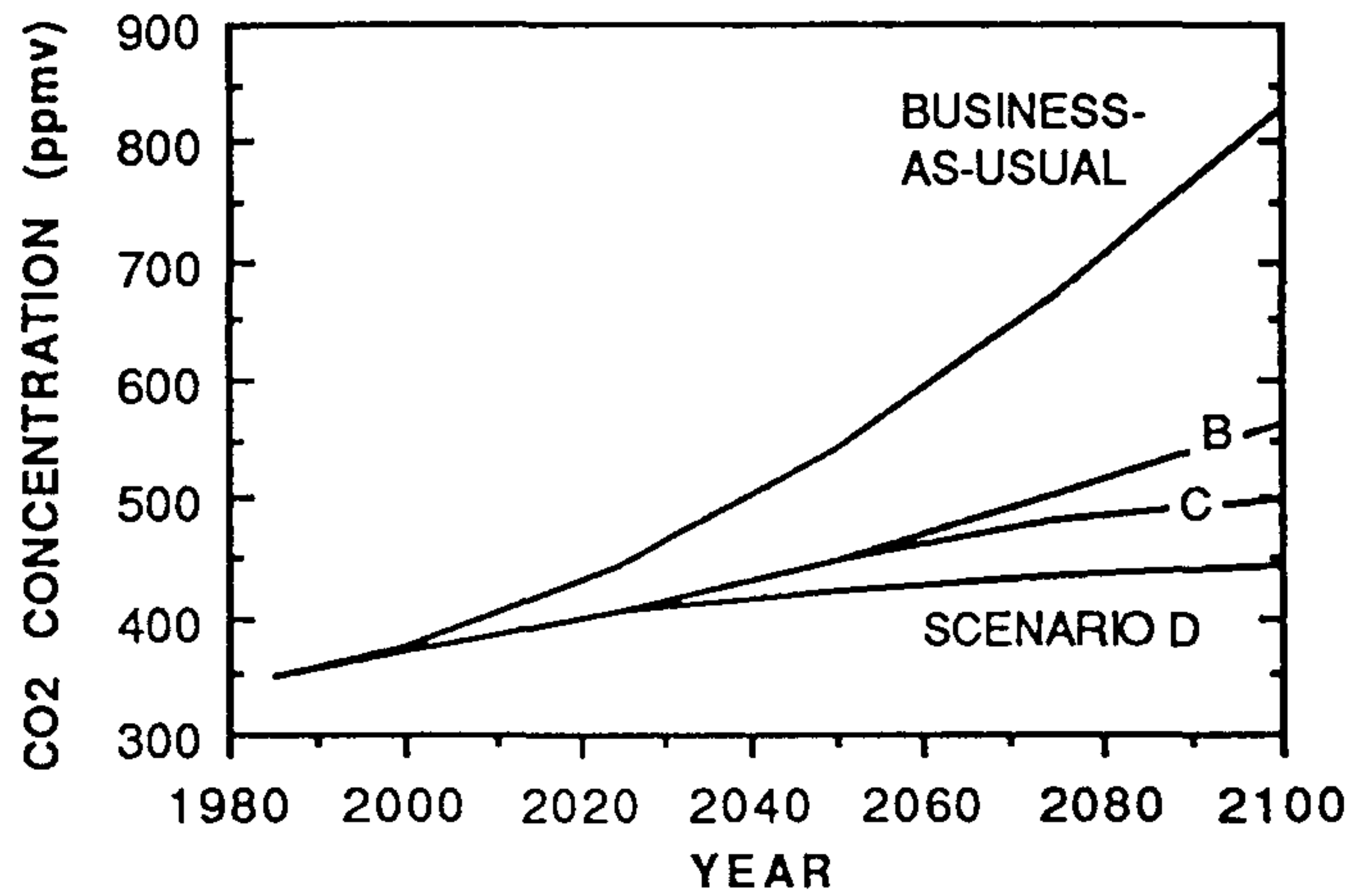


Figure 7 Atmospheric concentrations of carbon dioxide, methane and CFC-11 resulting from the four IPCC emissions scenarios

해양이 온난화 되면, 해양의 순 탄소 흡수량은 감소하게 된다 그 이유는 ① 해수중 CO₂화학의 변화, ② 표층수내 생물활동의 변화, 그리고 ③ 표층과 심층수간의 CO₂ 교환률의 변화 때문이다

자연 습지와 논으로부터 CH₄의 배출은 온도와 토양습도에 특히 민감하다. 배출량은 고온과 토양습기가 많은 곳에서 특히 더 커진다. 반대로 토양습도가 줄면 배출량은 줄어든다 온실화는 북반구 고위도에서 영구동결대에 포획된 분해가능한 유기물과 수화메탄(methane hydrate)으로부터 CH₄의 배출량을 증가시키게 된다

이전에 언급한 것처럼, 빙하시추물(ice core)의 기록은 CH₄과 CO₂ 농도가 빙하기와 간빙기 사이의 온도 변화에 비례함을 나타낸다

많은 퇴물림고리 과정이 아직 잘 이해되지 않았다하더라도 온난화는 온실가스 농도를 더욱 증가시키는 쪽으로 작용할 것으로 예상된다

다 온실가스와 에어로졸

지구의 기후는 대기의 방사균형에 의해 지배되며, 이 균형은 일사량, 온실가스, 구름, 에어로졸의 양에 의해 좌우된다 따라서 이러한 기후 방사원동력 매체들이 자연적으로 어떻게 변하며 인간 활동에 의해 어느 정도 영향을 받는지 아는 것이 중요하다 대기의 화학조성은 항상 변하고 있으며, 특히 인간의 활동이 주요 요인으로 작용한다 (표 6)

남극대륙과 그린랜드의 빙상에 포획된 공기 분석결과는 산업혁명 이래로 이산화탄소, 메탄 및 아산화질소 등 온실가스의 농도가 현저하게 증가했음을 나타낸다 더욱이 최근 산업 활동 기원인 염화불화탄소(chlorofluorocarbon)가 대기중에 상당량 존재하게 되었고 지역에 따라서는 에어로졸과 대류권 오존(O₃)의 양도 증가하였다 대기중 온실가스의 농도는 최근에 그 증가율이 더욱 높아지고 있다 대부분의 온실가스는 대기중 체류시간이 수 십년에서 수 세기 정도로 길기 때문에, 대기중 온실가스의 농도는 배출량 변화에 대해 서서히 반응할 것이다

지구 방사수지에 영향을 미치는 온실가스의 효율은 이들의 대기중 농도와 지표로부터 방출되는 복사에너지를 흡수하는 능력에 좌우된다 대류권의 수증기는 가장 중요한 온실가스이지만 이의 대기중 농도는 인간 활동에 의한 배출에 크게 좌우되지 않는다

표 6 인류 활동으로 인한 온실가스의 변화

Parameter	CO ₂	CH ₄	CFC-11	CFC-12	N ₂ O
Pre-industrial atmospheric concentration (1750-1800)	280 ppmv ²	0.8 ppmv	0	0	288 ppbv ²
Current atmospheric concentration (1990) ³	353 ppmv	1.72 ppmv	280 pptv ²	484 pptv	310 ppbv
Current rate of annual atmospheric accumulation	1.8 ppmv (0.5%)	0.015 ppmv (0.9%)	9.5 pptv (4%)	17 pptv (4%)	0.8 ppbv (0.25%)
Atmospheric lifetime ⁴ (years)	(50-200)	10	65	130	150

- 1 Ozone has not been included in the table because of lack of precise data
- 2 ppmv = parts per million by volume, ppbv = parts per billion by volume
pptv = parts per trillion by volume
- 3 The current (1990) concentrations have been estimated based upon an extrapolation of measurements reported for earlier years, assuming that the recent trends remained approximately constant
- 4 For each gas in the table, except CO₂, the 'lifetime' is defined here as the ratio of the atmospheric content to the total rate of removal. This time scale also characterizes the rate of adjustment of the atmospheric concentrations if the emission rates are changed abruptly. CO₂ is a special case since it has no real sinks but is merely circulated between various reservoirs (atmosphere, ocean, biota). The lifetime of CO₂ given in the table is a rough indication of the time it would take for the CO₂ concentration to adjust to changes in the emissions (see section 1.2.1 for further details)

인류기원 온실가스들 중 CO₂가 가장 온실효과가 크며, 그 다음은 염화불화탄소, 메탄, 오존, 아산화질소의 순이다. 1990년에는 대기중 이산화탄소 농도의 증가율이 염화불화탄소의 증가율보다 70,000배, 메탄보다 120배 크다. 그리고 80년대에 방사원동력에 대한 이산화탄소의 기여도는 약 55%, 염화불화탄소(CFCs-11, 12)는 17%, 메탄은 15%이었다. 나머지 염화불화탄소와 아산화질소는 각각 약 8%와 5%씩 차지하였다. 대류권에서의 오존의 역할도 중요하지만 이에 대한 관측자료가 불충분하여 오존의 기여도를 정량화하기 어렵다. 온실가스마다 방사원동력에 대한 기여도가 다른 것은 이들이 지구 복사에너지를 흡수하는 효율이 각기 다르기 때문이다.

에어로졸은 직접적으로 태양광 및 지구 복사에너지를 흡수·분산시키거나 간접적으로 구름형성에 관계하여 빛투과에 영향을 미침으로써 기후계 내에서 중요한 역할을 한다.

지구온난화의 과학적 규명을 위해서는 대기중 온실가스 농도의 역사적 기록과 온도변화를 일으키는 물리적, 생물학적, 화학적, 지질학적 그리고 사회학적인 과정을 이해해야 한다. 대기중 온실가스를 정량적으로 이해하기 위해서는 대기, 육상 생태계, 해양, 퇴적물 등의 시스템 내부 또는 각 시스템들 사이에서 탄소, 질소 및 다른 중요한 영양소의 순환작용과 분포를 이해하고, 이에 대한 인간 활동의 영향을 이해하는 것이 필요하다. 대기중 온실가스의 과거 및 현재의 변화를 초래하는 과정을 이해하지 못하면, 미래의 대기중 온실가스의 변화와 그 결과로 비롯되는 대기중 방사원동력의 변화를 예측할 수 없다.

(1) 이산화탄소 (CO₂)

(가) 자연계의 이산화탄소 순환

탄소는 이산화탄소, 탄산염, 유기화합물 등의 형태로 대기, 해양, 육상생물과 해양생물, 그리고 지질학적인 시간규모에서의 퇴적물과 암석 등 여러 저장소들 사이를 순환한다 (그림 8)

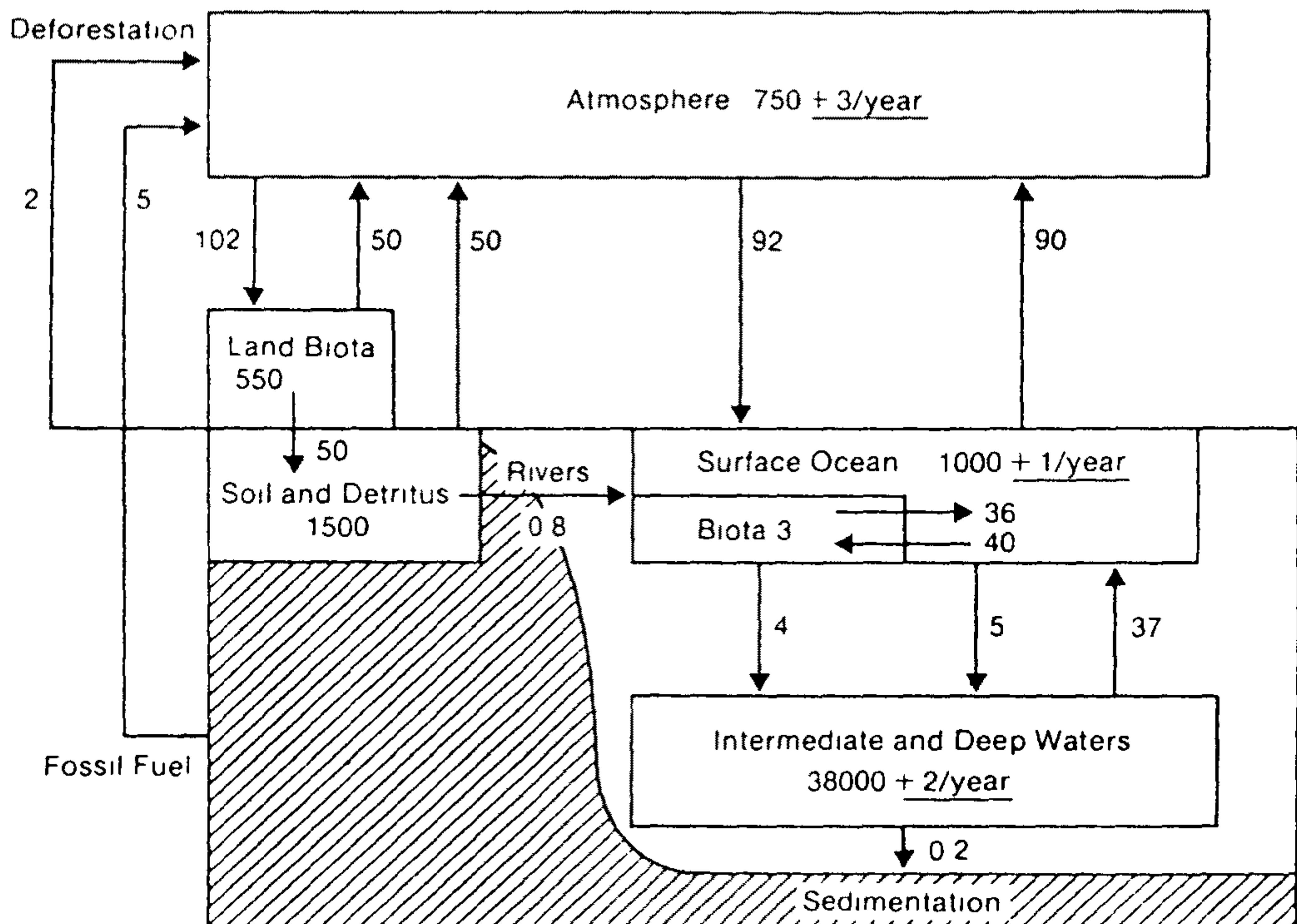


Figure 8 Global carbon reservoirs and fluxes

탄소의 가장 커다란 자연교환작용은 대기와 육상 생물, 대기와 해양 표층수 사이에서 일어난다. 화석연료 연소와 산림파괴로부터 대기 중으로 들어오는 탄소의 순 유입량은 위 두작용에 비교하면 매우 작지만 자연균형을 파괴하기에는 충분하다

대기 중의 이산화탄소 총량과 유동량의 비로 계산된 대기 중 탄소의 갱신시간(turnover time)은 약 4년이다 이것은 대기 중의 이산화탄소 분자가 식물에 의해 흡수되거나 해양에 용존되는데 수년 정도 밖에 소요되지 않음을 의미하는 것이다 그러나 갱신시간이 짧다는 것이 이산화탄소의 배출과 제거기작이 변할 경우 대기 중 이산화탄소 농도가 새로운 평형상태에 도달하는데 소요되는 시간이 짧다는 것을 의미하는 것은 아니다

탄소의 복잡한 순환과정 때문에 대기 중 잉여 CO₂는 단순히 지수함수적으로 감소하지는 않는다 따라서 단기간의 조사로는 새로운 평형상태로 이행하는 과정을 제대로 밝힐 수 없다 그림 9에 나타낸 두 곡선은 대기-해양 연계 모델인 상자 모델과 일반 대순환모델로부터 순간적으로 CO₂가 유입되었을 때 시간 경과에 따른 대기 중 CO₂농도변화를 나타낸 것인데, 초기반응(해수 표층과의 교환)이 후기 반응(해수 표층과 심층의 순환)에 비해 현저하게 빠름을 알 수 있다

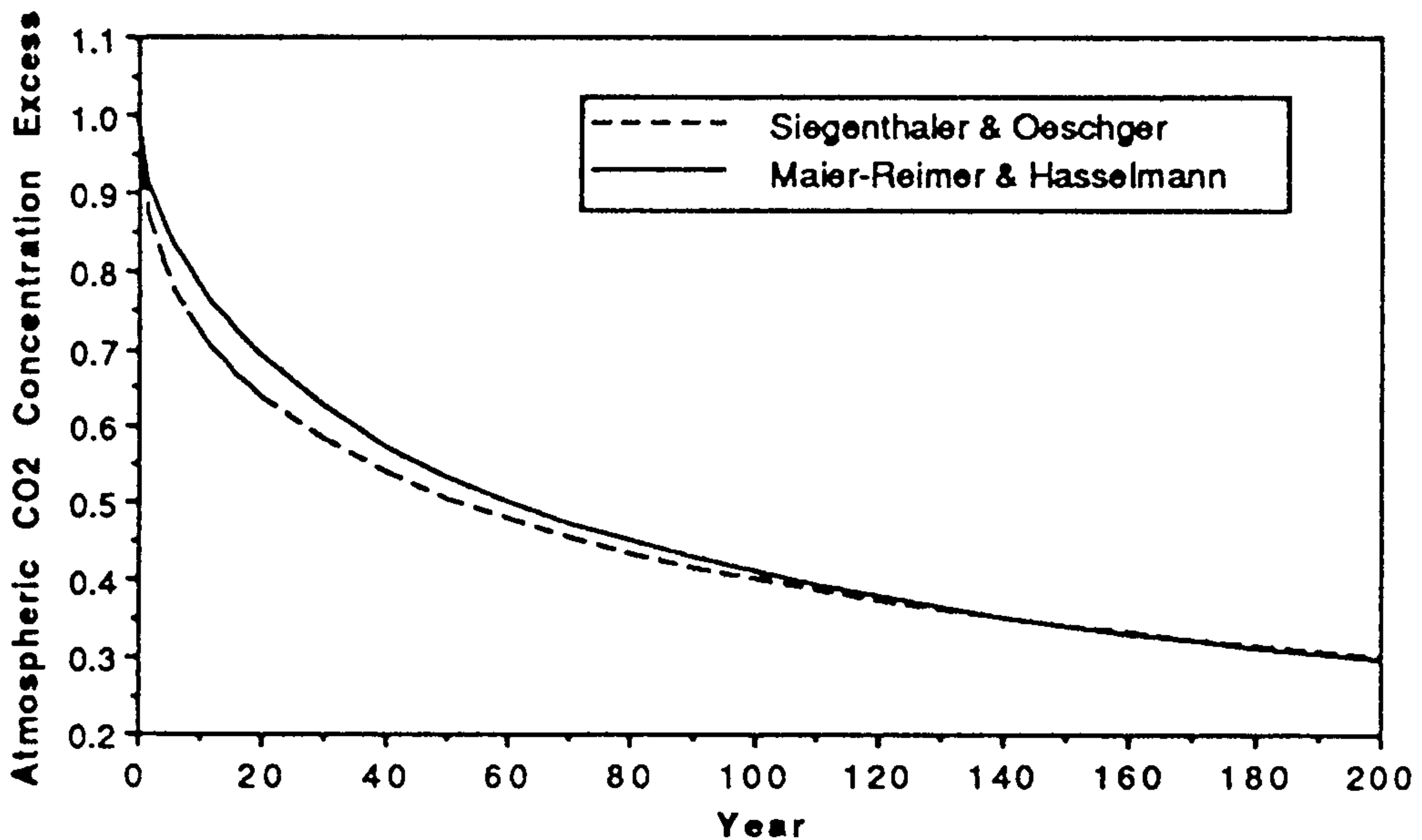


Figure 9 Atmospheric CO₂ concentration excess after a pulse input at time 0 (initially doubling the atmospheric CO₂ concentration), as calculated with two ocean-atmosphere models

연평균 이산화탄소 농도는 대류권에서 비교적 일정한데, 그 이유는 대류권이 약 1년의 시간규모로 혼합되기 때문이다. 얼음시추물의 분석결과 산업혁명 이전의 대기중 이산화탄소 농도는 280 ppmv로 대기중에 594 Gt의 탄소($1\text{Gt} = 10^9\text{t} = 10^{15}\text{g}$, 전지구 대기중 1ppmv CO_2 는 2.12GtC 또는 7.8Gt CO_2 에 해당하는 양임)가 존재 하였으나, 오늘날에는 약 353ppmv의 이산화탄소가 대기중에 존재한다 (그림 10, 11)

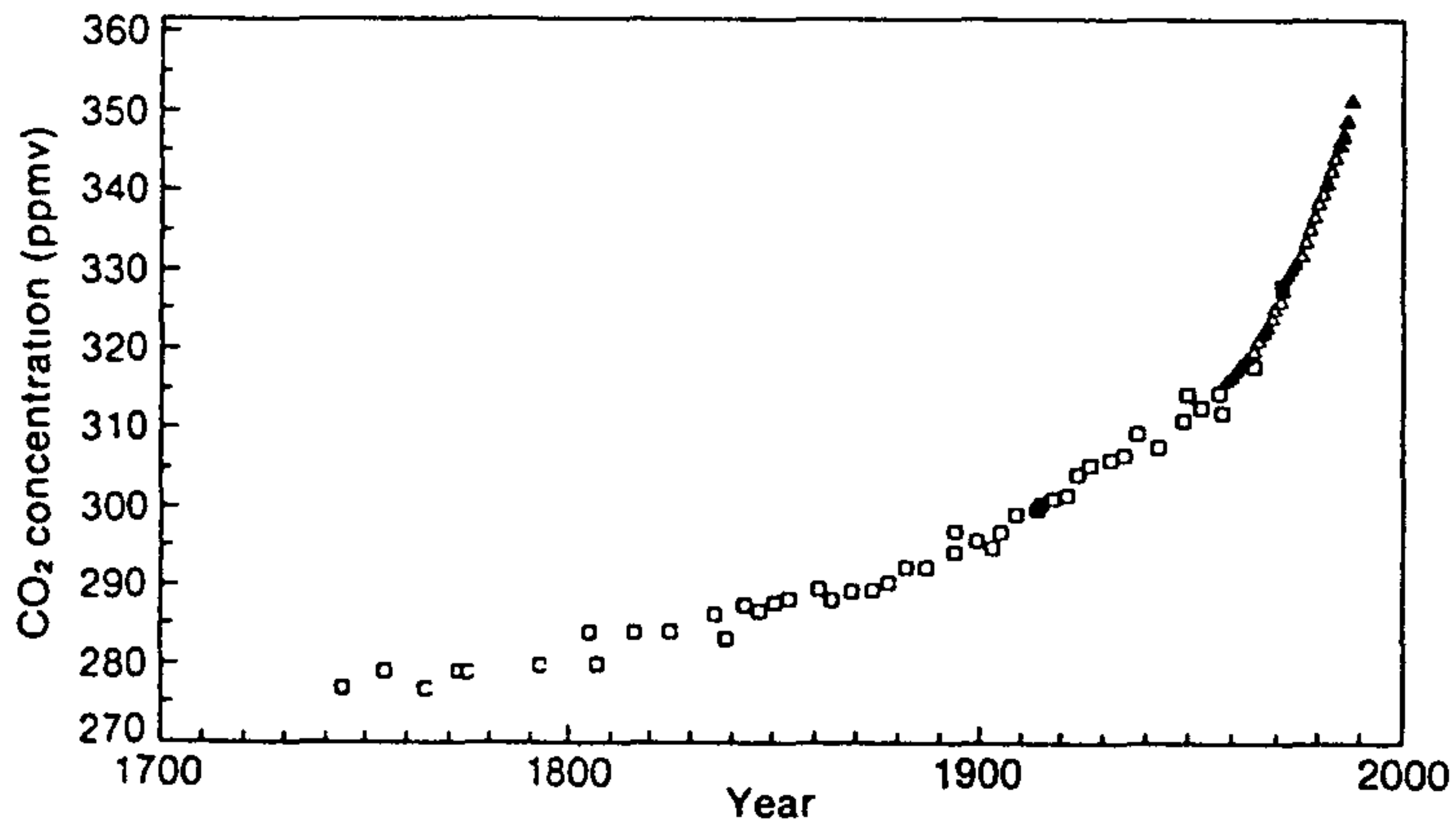


Figure 10 Atmospheric CO_2 increase in the past 250 years, as indicated by measurements on air trapped in ice from Siple Station, Antarctica and by direct atmospheric measurements at Mauna Loa, Hawaii

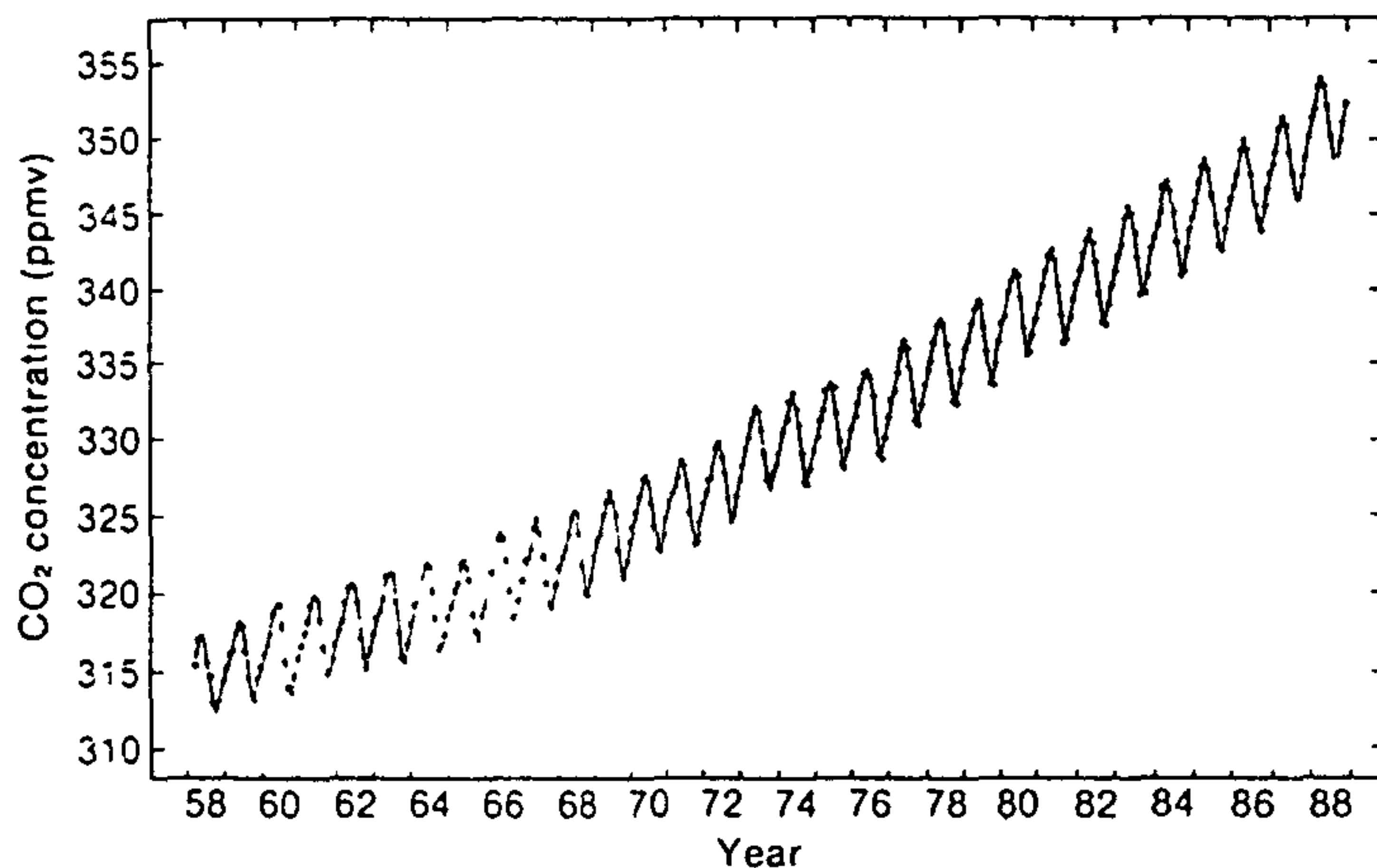


Figure 11 Monthly average CO_2 concentration in parts per million of dry air, observed continuously at Mauna Loa, Hawaii (Keeling et al, 1989a)

수십 년의 시간규모에서 보면, 교란을 받지 않은 대기중 이산화탄소의 농도는 주로 대기와 해양간의 교환작용에 의해 좌우된다 왜냐하면 해양은 이산화탄소의 가장 큰 저장고이기 때문이다 대기와 해양 사이의 이산화탄소 교환작용은 양쪽 방향으로 모두 일어난다 이산화탄소 이동방향과 양은 대기의 이산화탄소 분압($p\text{CO}_2$)과 해양 표층수의 이산화탄소 분압의 차이에 의해 결정된다

해양의 표층수와 심층수 사이의 탄소 교환작용은 주로 해수의 이동에 의해 이루어진다 대략 상층 해양 1 km 이내에 있는 수온약층(thermocline)을 통한 환수는 인류기원 이산화탄소를 심층으로 전달시키는데 특히 중요하다 해양 심해수의 순환은 100~1000년의 시간규모에서 볼 때 이산화탄소 교환에 중요한 역할을 담당한다

해양에서 이산화탄소 분압에 의한 탄소의 자연적 교환은 생물과정에 의해 크게 영향을 받는다 해양 생물은 유기탄소를 연간 4Gt 씩 쇄설물(detritus)의 형태로 표층수에서 심층수로 이동시키는 생물학적 펌프(biological pump)로 작용한다 생물학적 펌프는 해양 표층수의 이산화탄소 분압($p\text{CO}_2$)을 감소시키는 역할을 한다 따라서 해양의 생물학적 펌프가 없었다면 산업혁명 이전의 대기중 이산화탄소 농도는 280 ppmv 보다 훨씬 높은 450 ppmv이었을 것이다 그러므로 기후변화로 인해 해양생물 조성이 변화되면 미래의 CO_2 농도에 실질적인 영향을 미칠 수 있다 여기서 한가지 주목할 점은 생물학적 펌프는 인간이 배출한 CO_2 를 제거하는 데에는 관여하지 않는다는 점이다

생물권의 탄소 교환작용에서 가장 중요한 과정은 광합성과 호흡(식물 자신에 의한 자가호흡(autotrophic respiration)과 사후 미생물에 의한 타가호흡(heterotrophic respiration))이다 순일차생산(net primary production)은 식물에 의한 이산화탄소의 연간 순흡수량이다 그러므로 순일차생산은 총일차생산에서 자가호흡을 뺀 것이다 교란 받지 않은 환경에서 순일차생산과 타가 호흡에 의한 분해는 대략 균형을 이루고 있으며, 토양과 토탄(peat)의 형성은 비교적 적은 부분이지만 초과 순일차생산과 일치한다.

탄소의 균형은 인류활동(토지이용, 특히 산림파괴), 기후변화, 다른 환경변화(예를 들면, 대기조성 변화)에 의해 상당히 변할 수 있는데, 육상 식물계의 탄소 보유량과 유동량이 매우 크기 때문에(순일차생산은 50 - 60 GtC/yr, 총일차생산은 90 ~ 120 GtC/yr), 인류에 의한 약간의 생물계 교란도 대기중 CO_2 농도 변화에 커다란 영향을 미칠 수 있는 것이다.

(나) 인간활동에 의한 교란

대기중 이산화탄소의 농도는 두가지의 인간활동(화석연료의 연소, 산림파괴와 같은 토지이용)에 의해 주로 영향을 받는다

① 과거의 화석연료 연소에 의한 유입

화석연료의 연소 등 산업활동에 의한 이산화탄소 배출은 1860년 이래 연간 약 4%씩 지수함수적으로 증가해 왔다 그림 12에서 나타나듯이 두번의 세계 대전과 1930년대의 경제 공황 당시에는 증가 현상이 중지되었었다

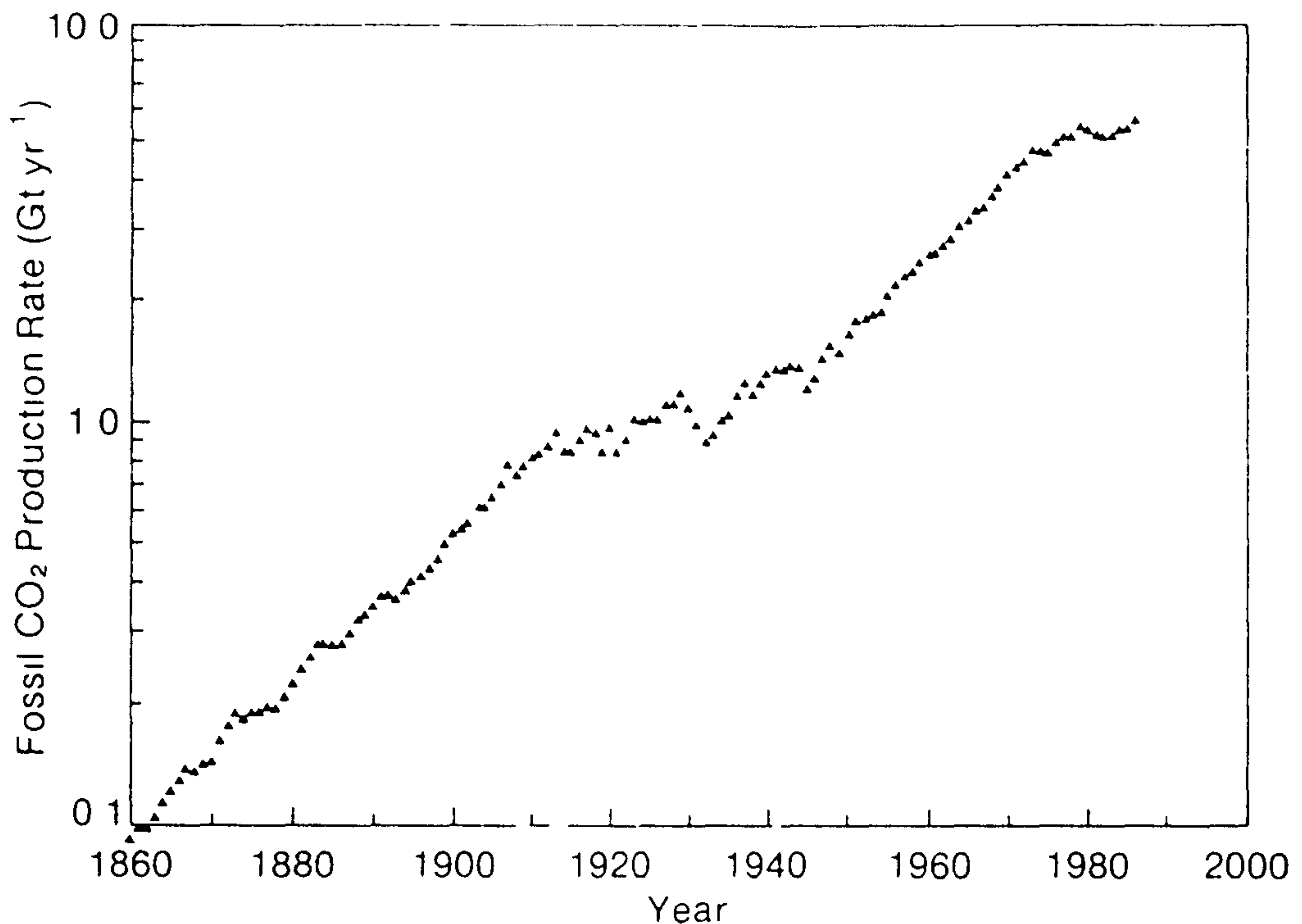


Figure 12 Global annual emissions of CO₂ from fossil fuel combustion and cement manufacturing, expressed in GtC yr⁻¹ (Rotty and Marland, 1986, Marland, 1989)

1973년 석유 파동이 일어난 후 이산화탄소 배출 증가현상은 처음으로 연간 약 2%의 비율로 감소하였고, 1979년 이후 전지구 이산화탄소 배출량은 1985년까지 연간 5.3 GtC으로 거의 일정했다가 1985년 부터 증가하여 1987년에는 연간 5.7 GtC을 기록했다. 1850년부터 1987년까지 화석연료 사용과 시멘트 생산에 의한 이산화탄소의 누적 배출량은 200 GtC(오차 10%)로 추산된다

산업활동에 의한 이산화탄소 배출량의 95%는 선진국이 집중되어 있는 북반구에 편중되어 있으며 개인당 연간 배출량은 최고 5 tC에 이르고 있다 반면, 대부분의 개발도상국에서 개인당 이산화탄소 배출량은 연간 0.2~0.6 tC 수준이다 그러나 개발도상국에서 이산화탄소 배출량의 상대적 증가는 연간 약 6%로 선진국을 훨씬 웃돈다 서유럽과 북미에서는 1973년 이후부터 이산화탄소 배출 증가율이 서서히 감소하고 있는데, 1945~1972년 사이에는 연간 약 3%였던 것이 1973~1984년에는 약 1% 미만으로 증가율이 둔화되었다

② 과거의 토지이용의 변화

잘 보존된 산림의 식물과 토양은 경작지보다 탄소를 20~100배 이상 많이 저장하고 있다 토지를 이용할 때 토지에 저장되어 있던 탄소가 대기로 배출되는 양은 생물체와 토양에 저장된 탄소의 양, 목재의 산화율 토양내에서 유기물의 분해율, 작물을 수확한 후 또는 영농을 중지한 경작지에서의 산림 성장률 등에 의해 좌우되지만, 육상 생태계의 이질성 때문에 전지구적인 재고량(inventory)과 이산화탄소 전송량(flux)을 계산하기는 매우 어렵다.

1980~1985년 사이 토지이용으로 인해 대기로 배출된 총 탄소의 양은 115 ± 35 GtC으로 추산된다 대기로 이산화탄소를 배출하는 요인으로는 ㉠ 토지이용 변화와 관련된 연소 과정, ㉡ 생물체의 분해, ㉢ 목제품(종이, 목재 등)의 산화, ㉣ 토양탄소의 산화 등을 들 수 있고, 산림의 재성장과 벌목후 토양내 유기물 증가와 같은 제거 요인도 있다 19세기와 20세기초까지 탄소의 최대 배출량(연간 최고 0.5 GtC)은 온대의 육지로부터 이루어졌으나, 과거 수십년 동안 탄소의 주요 기원은 1950년 이래로 행해진 열대지역의 산림파괴에 의한 것이다 최근 135년간 열대에서 배출된 탄소량은 그외 지역의 탄소량을 합친것의 2-3배에 이르는 것으로 추산되었다 1980년의 산림파괴에 의한 탄소 배출량은 0.6-2.5 GtC인데, 거의 대부분은

열대지역에서 배출되었고, 1990년대에는 더욱 늘어날 것으로 보인다.

(다) 대기중 이산화탄소의 변화

대기중 이산화탄소에 대한 믿을만한 자료는 극지의 빙상시추물을 분석함으로써 얻을 수 있다. 얼음에 의한 공기의 흡수는 지역에 따라, 약 10년에서 최장 1000년까지 지속되기 때문에, 오래된 얼음안에 포획된 공기를 분석함으로써 특정기간 동안의 대기의 평균 조성을 알 수 있다

그린랜드와 남극에서 약 18,000년 전의 마지막 빙하기에 해당하는 얼음시추물을 분석한 결과, 그 당시 이산화탄소의 대기중 농도는 현재 대기중 농도의 약 70%에 해당하는 180~200 ppmv인 것으로 밝혀졌다 남극의 소련 과학기지가 있는 Vostok에서 획득한 얼음시추물을 분석한 결과 빙하기와 간빙기를 망라하는 기간 동안 중수소(deuterium)로부터 유추한 극지역의 온도와 이산화탄소 농도변화 사이에는 높은 상관관계가 있는 것으로 나타났다 (그림 13) 빙하기와 간빙기 사이의 이산화탄소 농도변화는 해양의 순환과 생물학적, 화학적, 물리학적 과정의 상호작용이 대규모 변화한 것과 관계가 있을 것으로 생각되나 상세한 기작은 아직까지 밝혀져 있지 않다. 이 시기의 이산화탄소 농도 변화에 따른 온실효과는 빙하기-간빙기 동안의 기후변화에 어느 정도 기여한 것으로 나타났다.

그린랜드 빙하의 시추물 분석결과에서는 마지막 빙하기말에 5°C의 온도 상승이 있었을 때 이산화탄소 농도가 100년 이내에 약 50 ppmv 규모로 증가하였지만, 남극의 빙상시추물에서는 이러한 갑작스러운 이산화탄소 농도변화가 관측되지 않았다. 따라서, 이러한 고기록의 사실여부는 아직 불분명하다고 할 수 있다

(라) 현재의 이산화탄소 관측 기록 및 해석

① 최초의 이산화탄소 농도의 증가

남극의 얼음시추물로부터 얻어진 최근 1,000년간의 대기중 이산화탄소 농도에 대한 자세한 자료에 의하면 서기 1,000~1,800년 동안 대기중 이산화탄소 농도는 270 - 290 ppmv였다

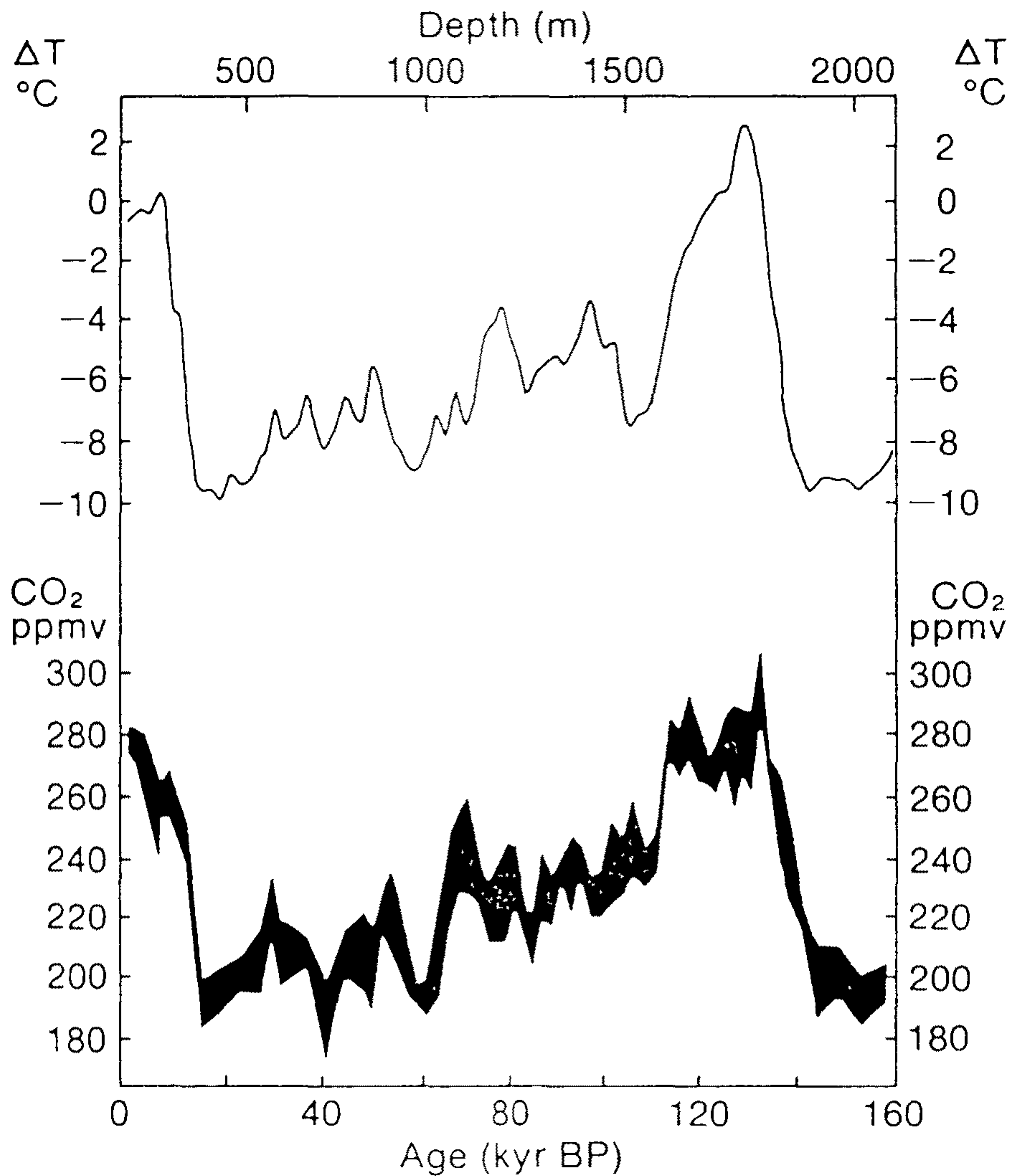


Figure 13 CO₂ concentrations (bottom) and estimated temperature changes (top) during the past 160,000 years, as determined on the ice core from Vostok, Antarctica (Barnola et al, 1987)

대기가 해양 및 생물권과 매년 대기중 이산화탄소의 약 30%를 교환한다는 점으로 미루어 볼 때, 이처럼 일정한 농도를 보이는 것은 놀라운 사실이다 이것은 지난 16세기 말엽, 19세기 중엽에 있었던 전지구 온도를 약 1 °C 감소시킨 소빙하기(Little Ice Age)와 같은 소규모 기후변화에 대한 대기중 이산화탄소 농도의 민감도가 작다는 것을 의미한다

또한 지난 200년 동안의 이산화탄소 농도증가는 남극의 Siple Station에서 시추한 빙상으로부터 재구성되었다 (그림 10). 이 결과에 의하면, 이산화탄소 농도가 1800년경에 증가하기 시작해서 1900년에 15 ppmv 정도 증가했다. 최근 대기중 이산화탄소의 정밀한 농도측정은 1958년에 시작되었는데, 그 당시 이산화탄소의 농도는 315 ppmv였으며, 연간 0.6 ppmv씩 증가하는 추세였다. 현재 대기중 이산화탄소 농도는 353 ppmv이며, 연간 1.8 ppmv씩 증가하고 있다.

② 해양에 의한 흡수

해양은 인간활동에 의한 CO₂의 중요한 저장고로서, 해수에 용존된 CO₂ 농도의 증가는 2~3% 정도로 대기에 비해 매우 작다.

해양에 의한 CO₂ 흡수(배출)는 기체교환상수에 대기와 해양의 CO₂ 분압차를 곱하여 얻어진다. 기체교환상수는 풍속과 수온의 함수이다. 따라서, 전해양의 CO₂ 흡수를 계산하기 위해서는 대기와 표층해수의 이산화탄소 분압과 해상의 바람에 대한 풍속자료가 필요하다. 가장 최근의 자료에 의하면 해양의 이산화탄소 흡수량은 1.6 GtC/yr이다.

과거나 미래에서 해양에 의한 이산화탄소 흡수량을 알아내기 위해서는 전 지구규모의 탄소순환모델이 요구되며, 여기에는 대기-해양의 기체교환, 탄산염화학과 표층에서 심해로 전달되는 탄소의 양이 고려되어야 한다. 현재 해양의 탄산염 체계는 대기에서 이산화탄소가 10% 증가하면 단지 1%만 해수로 용해되도록 형성되어 있기 때문에 해양 자체는 하나의 커다란 탄소 저장고이지만, 별로 효과적인 이산화탄소 흡수원은 아니다.

인간에 기인한 CO₂가 표층에서 심해로 전달되는 속도는 해수의 수직적 교환에 달려 있는데, ¹⁴C 측정결과 표층해수가 수온약층 하부로 침투하는데 수백-천년이 걸리는 것으로 알려져 있다. 현재에는 표층 수백m의 해수만 인간에 의해 배출된 CO₂를 흡수하고 있다.

생물기원 쇠설물의 침강은 그 자체로 중요한 자연순환의 구성원이지만 해양생물이 이산화탄소 증가에 직접 반응하지 않기 때문에 인류에 의해 배출된 이산화탄소의 제거에는 큰 역할을 하지 못한다. 해양생물은 빛과 영양소(질소, 인, 규소) 등에 의해 제한되고 있다. 따라서, 해양에 비료를 공급하면 생물체의 침강을

통한 부가적인 이산화탄소 제거가 가능하며, 현재 부가적인 유기탄소의 제거는 0.04-0.3 GtC 범위일 것으로 추정되고 있다

탄소순환모델은 단지 몇 개의 저장고(상자)만을 이용하는 매우 단순화된 것이지만 해양내의 이산화탄소 전송량을 결정하는 여러 과정들의 기여도를 추적할 수 있는 강력한 도구이다. 모델의 결과는 해양의 순환이 크게 변모하지 않는 한 유용할 것으로 보인다. 현재 3차원 일반 대순환 모델이 속속 개발되고 있는데, 가장 최근의 결과는 80년대에 해양이 약 1.2 GtC/yr로 CO₂를 흡수하는 것으로 알려지고 있다. 한편, Sarmiento 등의 3차원 수치모델은 동기간에 1.9 GtC/yr로 추정하고 있다. 반면, 각종 탄소순환모델로 측정한 해양의 이산화탄소 흡수량은 1980년대에 2.0 ± 0.8 GtC/yr의 범위이다.

③ 인류기원 이산화탄소의 재분포

1850년부터 1986년 동안의 배출량은 312 ± 40 GtC로서, 그 중 195 ± 20 GtC은 화석연료에 의해 배출되었고, 117 ± 35 GtC이 산림파괴를 위시한 토지이용 변화에 의해 배출되었다. 이 기간의 CO₂ 농도는 288 ppmv에서 348 ppmv로 누적유입량의 41 ± 6%를 나타내었다. 이 백분율은 '대기분(airborne fraction)'이라 불리는데, 대기분 CO₂는 화석연료연소에 의한 유입량만을 말한다. 그 까닭은 이 양만 정확히 알려져 있기 때문이다. 그러나, 대기중 CO₂ 증가는 기타 배출에 의한 모든 것을 반영하기 때문에 이 개념은 부정확하다. 따라서, '대기분'을 총 배출량 중 대기에 존재하는 양이라 하면 1980~1989년 기간 대기분은 총 배출량의 48 ± 8%에 해당된다(계산 참조). 화석연료 사용량과 산림파괴를 고려하여 과거의 CO₂ 농도 증가를 복원해 보면 계산 결과는 일반적으로 실제 관측값보다 크다.

1980-1989년의 추정값은 :

	GtC yr ⁻¹
화석연료연소	5.4 ± 0.5
산림파괴와 토지 이용	1.6 ± 1.0
대기 중 증가량	3.4 ± 0.2
해양의 흡수량	2.0 ± 0.8
<hr/>	
순수지 불균형	1.6 ± 1.5

로 나타났다. 즉 배출량과 대기중 증가량 및 모델계산에 의한 해양의 흡수량 사이에는 커다란 불균형이 있다. 따라서 중요한 기작이 누락되었는지 추적하고

있으나 현재까지 해양에서 이러한 '누락된 제거기작'을 찾아내지 못하고 있다. 하나의 가능성으로 지난 수십년 동안 해양의 탄산염 체계가 변화해서 대기의 기저농도를 낮추지 않았을까 추측해 볼 수 있는데, 이것은 산업혁명 이전의 기저농도가 일정했던 점으로 보아 현실성이 부족하다 육지 과정이 '누락된 CO₂'를 흡수해 버렸을 가능성은 충분하지만, 증거가 제시되지 못하고 있다. 그 가능성으로는 CO₂ 다산화(fertilization effect), 온난화에 따른 성장촉진과 비료 및 질소계 화합물 배출로 인한 직접적 성장촉진을 들 수 있다 Melillo의 미발표 자료에 의하면 질소계 화합물의 대기중 배출이 연간 1 GtC을 제거할 수 있다 또한 육림 방식의 변화도 북반구 중위도 수림에 상당량의 탄소를 저장하게 할 수 있다 현재 이 수림이 완전히 성숙되기 전까지 얼마나 많은 양의 탄소를 저장할 능력을 가지고 있는지 알지 못하고 있다. 일단 수림이 성숙하면 더 이상 탄소를 제거하지 않으므로 대기중 CO₂ 농도가 증가될 것이다

전지구 표면에서 CO₂의 배출과 제거 및 흡수의 분포를 알기 위해 대기중 CO₂ 농도와 탄소 동위원소비를 측정하는 한편, 대기 전달 모델을 사용하여 시 공간 분포를 유추하고 있다 두 반구 사이의 대기중 CO₂ 농도의 차이는 3 ppm인데(1990 현재), 화석연료의 연소가 북반구에 집중되어 있는 사실을 고려하면 이것은 매우 작은 수치이다. 이러한 결과는 북반구에서의 CO₂ 배출량의 반 정도를 제거할 수 있는 예기치 못한 커다란 제거기작이 존재함을 시사한다 그리고 모델계산에 따르면 해양의 CO₂ 흡수 능력이 연간 1 GtC에 불과하기 때문에 이 또한 중요한 육상 제거 기작의 존재 가능성을 뒷받침한다

④ 계절 변동

대기의 CO₂ 농도는 육상 식물의 계절에 따른 흡수 및 배출을 잘 반영한다 계절에 따른 농도 변화는 남반구에서는 12 ppmv로 작고 북반구 아한대 수림대(55-65° N)에서 15 ppmv로 최대값을 보인다

계절적 변동폭은 점차 증대되고 있는데, 예를 들어 하와이의 Mauna Loa 자료는 1958년에 비해 20% 증가된 변동폭을 나타낸다 이 추이는 통계적으로 유의하지만, 단순 증가를 보이지는 않는다 만일 생체량의 증가가 호흡으로 전부 쓰이지 않는다면 이것은 육상 생태계의 순 일차생산의 증가를, 곧 성장을 통한 더 많은 양의 탄소 제거를 의미한다 그러나 이것은 반드시 생산력의 증가나 탄소 저장량의 증가로 해석될 수 없다 그것은 비슷한 양상이 겨울철 토양 내의 호흡증가에 의해서도 가능하기 때문이다.

⑤ 경년 변동

자연적 교환에 있어 작은 변동은 1~2년 사이에 1 ppmv 정도의 연간 변동으로 나타난다. 이러한 변동은 ENSO(El Nino Southern Oscillation) 기간 동안 적도 태평양(정상시는 용승으로 인해 다량의 CO₂를 대기로 배출하는 해역임)에서의 변화와 관련되어 있다고 보고되었다.

⑥ 탄소 동위원소의 변화

생물권이나 화석연료에서 배출된 CO₂의 ¹³C/¹²C 비는 원래 대기중 CO₂의 값보다 작기 때문에 대기의 비를 1‰ 가량 낮추었다. ¹⁴C이 없는 화석연료연소에 의한 CO₂의 배출 또한 대기중의 ¹⁴C농도(나무의 나이테로부터 측정됨)를 1800년 이래(1950까지) 약 2% 정도 낮추었다. 이 두 가지 동위원소 자료는 인류가 배출한 CO₂의 역사를 복원하는 데 기여한다. 빙상시추물에 포획된 공기에서 측정한 ¹³C의 감소와 나이테의 ¹⁴C는 (실험오차 내에서) 현재 쓰이고 있는 CO₂ 모델로부터 유추한 값과 유사하다.

⑦ 현재의 CO₂ 증가가 인류기원이라는 증거

19세기 이후 대기에서 25% 증가한 CO₂가 인간활동에 의해 배출되었다는 것을 어떻게 알 수 있는가? 이것이 장기에 걸친 자연 변동의 일부이지 않을까 하는 생각을 할 수 있지만, 다음의 증거에 의해서 인위적인 증가임을 알 수 있다.

첫째, 정확한 연대 측정이 가능한 얼음시추물로부터 밝혀진 지난 1000년간 평균값(280 ppmv)의 변동은 매우 작다(10 ppmv/100yr) 즉, 최근 150년간의 증가분에 1/10 밖에 해당되지 않는다. 또한 지난 16만년 기록을 통털어 보아도 현재 농도(353 ppmv)와 같은 고농도가 발견되지 않는다. 최대값은 12만년 전의 300 ppmv이었다.

둘째, 대기의 CO₂ 농도 증가는 화석연료연소와 토지 이용으로부터 유추한 값과 평행을 이룬다. 1958년 대기측정소가 설립된 뒤 수집된 자료를 보면 화석연료 연소에 의한 배출량에 비해 대기에 존재하는 양이 작다. 따라서, 해양과 육상생물들은 배출원이 아니라 제거원으로 작용하고 있다. 또한 다른 증거로 지구의 남북간 CO₂ 농도 차이가 1960년에 1 ppmv에서 1985년 3 ppmv로 증가하였는데 이것은 북반구의 산업 발전율과 같다.

셋째, 탄소 동위원소 ¹³C와 ¹⁴C의 동위원소비 추이는 화석연료에 의한 배출로 기대되는 영향과 정성적으로 부합되며 탄소순환 모델로 예측한 값과도 정량적으로 일치한다.

⑧ 미래의 CO₂농도에 대한 기후민감도 분석

미래 대기의 CO₂농도는 주로 에너지 소비와 관련된 배출, 산림파괴와 해양 및 육상 생물의 CO₂제거에 달려 있다. 그림 14, 15에 각 시나리오의 예를 도식화하였다. 그림 14는 1990년 이후 배출량이 정해진 경우의 예이고, 그림 15는 대기의 농도가 정해졌을 경우 이에 상응하는 배출량을 나타낸 것이다. 결과는 상자-확산 모델을 사용하여 산출되었으며 여기에 해양의 난류확산계수는 $5350 \text{ m}^2\text{yr}^{-1}$, 그리고 대기-해양간 기체교환계수로 0.12 yr^{-1} 를 사용하였다. 그리고 생물권과 대기의 되물림 작용은 제외되었고, 1990년 이후 생물권에서의 순 CO₂ 유입량을 무시, 즉 열대 우림의 파괴로 비롯된 CO₂의 유입은 육상 생태계에 의해 제거되어 균형을 맞추는 것으로 가정되었다.

CO₂배출이 중단되었을 때 (그림 14(a)), 대기의 CO₂ 농도는 매우 느리게 감소한다. 그 까닭은 기 배출된 CO₂가 해양 심층으로 전달되는 과정이 느리기 때문이다. 배출량이 1990년 이후 2%씩 감소되더라도 (그림 14(b)), 수십년간 대기의 CO₂ 농도는 계속 증가한다. 배출량을 1990년 수준으로 동결하면 (그림 14(c)), CO₂ 농도는 2050년에 450 ppmv, 2100년에는 510 ppmv로 증가한다. 만일 배출량을 매년 2%씩 증가시킨다면, 2050년에는 575 ppmv, 2100년에는 무려 1330 ppmv로 증가한다. 이 예들은 CO₂ 배출 규제로 대기의 CO₂ 농도를 조절할 수 있음을 나타낸다.

다른 예로 만일 산업혁명 이전 값의 50% 증가분이(420 ppmv) 최후저지농도라면 (그림 15(e)), 허용되는 배출량은 현 수준 대비로 2050년까지 50%, 2100년까지는 30%로 감축해야 한다. 만일 1990년 수준으로 동결하자면 (그림 15(f)), 배출량은 즉각 30%로 줄여야 하며, 2050년까지는 20%로 더욱 감소시켜야 한다.

(마) 기후변화가 CO₂ 순환에 미치는 되물림 효과

온실가스 농도 증가는 지구의 기후를 변화시키고, 변화된 기후와 환경조건은 탄소순환과 대기의 CO₂ 순환에 영향을 미친다. 근래에 변화된 기후는 여전히 자연 변동 크기보다 작으며, 따라서 인간 활동에 기인한 기후변화도 상대적으로 작다. 그러나, 앞으로 기후변화 폭이 커지기 시작하면 되물림의 크기 또한 커져서 상당한

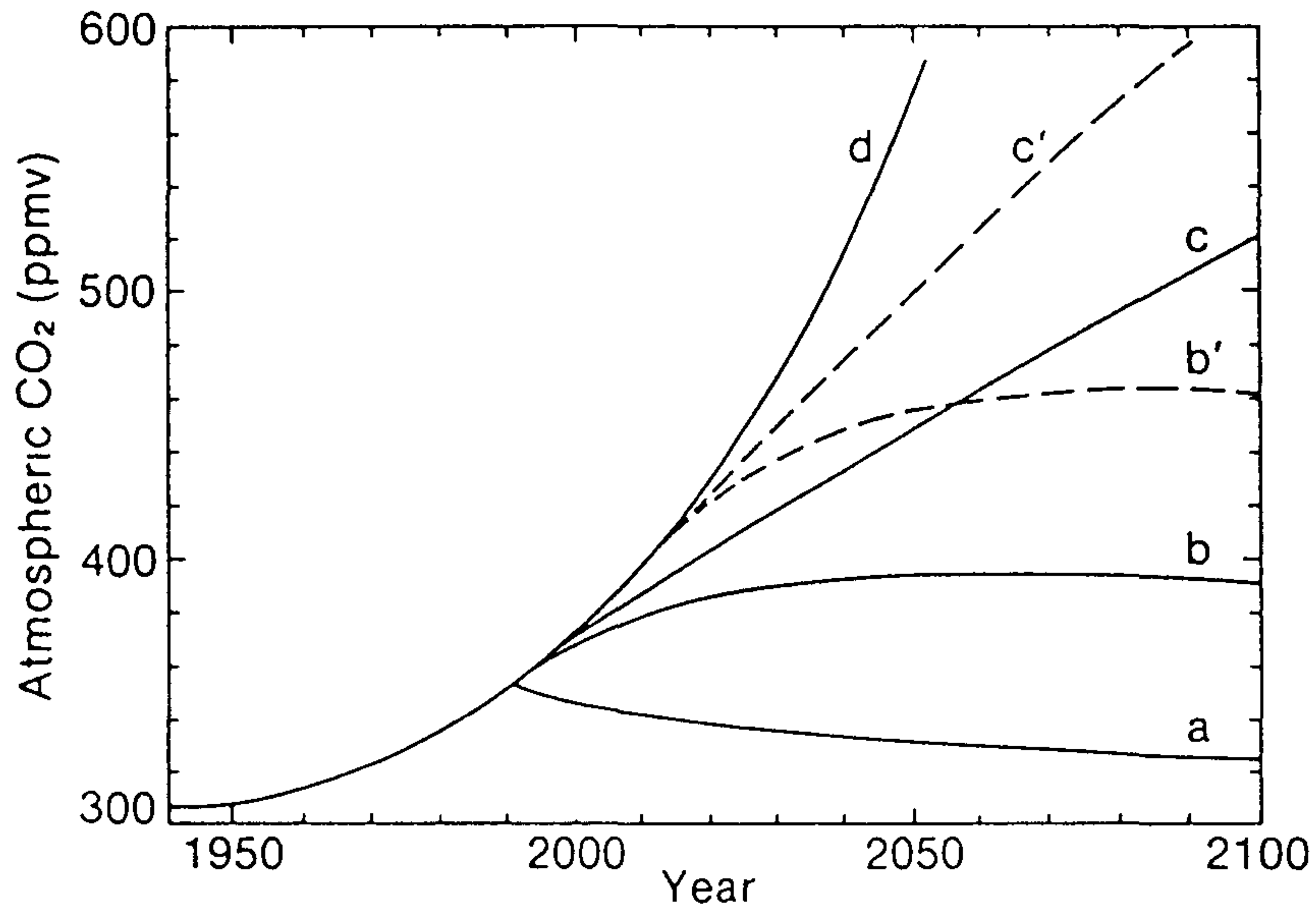


Figure 14 Future atmospheric CO₂ concentrations as simulated by means of a box-diffusion carbon cycle model (Enting and Pearman, 1982, 1987) for the following scenarios

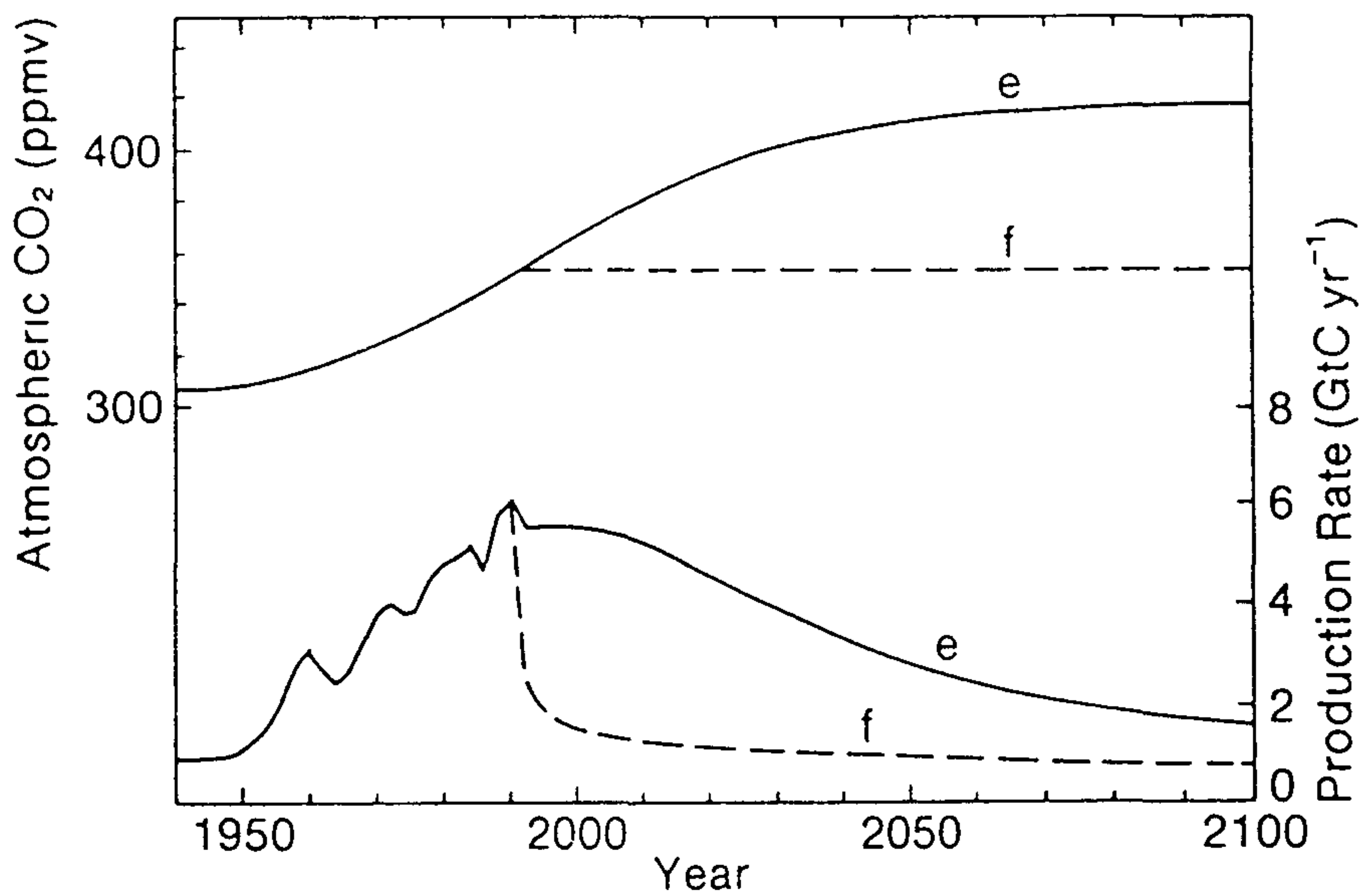


Figure 15 Future CO₂ production rates calculated by means of a box-diffusion carbon cycle model (Enting and Pearman, 1982, 1987) so as to yield the prescribed atmospheric CO₂ concentrations after 1990

효과를 나타낼 것이다 그런데, 되물림 효과는 변화를 증가시킬 수도 있고 감소시킬 수도 있는 양면성을 지니고 있다

① 해양으로부터의 되물림

다음 요인들이 해양-대기의 탄소 체계에 영향을 미칠만한 되물림 작용을 구성한다

㉞ 수온 · 해양 수온의 변화는 해수의 이산화탄소 화학작용에 영향을 준다 온도가 상승하면 표층해수의 이산화탄소 분압은 증가하여 CO₂가 해수로 용해되는 양을 줄인다 미래의 대기중 CO₂ 농도는 이로 인해 5% 가량 증가될 수 있다

㉟ 해수순환 기후변화로 인해 해수순환이 바뀔 수 있다. 표층해수의 온도가 증가되면 수온약층이 강화되어 그 결과 대류 혼합을 어렵게하므로 인간에 의해 배출된 CO₂의 흡수를 억제한다 또한 대기순환이 바뀌면 해수순환에 영향을 준다. 그러나 전반적인 해양의 역학과 CO₂흡수는 단순하지 않기 때문에 동적 해양 모델(dynamic ocean model)이 필요하다 그린랜드의 빙하 시추 연구결과는 마지막 빙하기의 100년이란 짧은 기간 동안 상당한 CO₂ 농도변화가 있었는데 이는 아마도 대규모 해수순환의 급격한 변화 때문인 것으로 추측된다 따라서 기후변화로 인해 자연계의 탄소 체제에 예기지 못한 사건이 발생할 가능성을 전혀 배제할 수는 없다

㊱ 기체교환율 지구규모의 바람 양상의 변화는 대기로부터 해양으로 이동되는 기체의 양에 영향을 준다 탄소순환 모델 결과를 보면, 해양의 CO₂흡수는 기체교환율보다는 수직혼합에 의하기 때문에 이에 의한 효과는 미미할 것으로 기대된다

㊲ 해양의 생지화학적 순환의 변화 해양에서 생물의 사체가 가라앉는 것은 해수표층으로부터 탄소와 기타 영양소의 송출을 의미하며, 교란되지 않는 조건에서 동등한 양의 용존 탄소 및 영양소 용승에 의해 균형이 이루어진다 극지 및 강한 용승 해역에서는 질산 및 인산 이온에 의한 기초생산에 대한 제한이 없지만, 해양은 동역학적 변화에 의해 그 체계가 교란되어 궁극적으로 대기의 CO₂에 영향을 준다 기후변화가 일어나면 해양 생태계의 분포 및 종 조성의 변화가 가능하며, 이것은 표층해수의 이산화탄소 분압의 변화를 초래할 수 있다 현 수준으로는 이 영향의

크기와 방향을 예측할 수 없다. 또, 해수가 온난해지면 유기물의 분해속도가 증가해서 CO₂ 양이 증가하게 되고, 이것이 대기중 CO₂ 증가 요인이 된다

㉞ UV-B 성층권 오존의 감소는 지표로 입사하는 UV-B의 강도를 크게 할 것이다 이 자외선은 해양생물에는 저해 요인으로 작용하여 생산력을 감소시키고, 나아가 생물학적 펌프를 약화시킬 것이다 이 효과로 인해 대기의 CO₂ 농도가 증가될 것이다.

㉟ 육상 생태계로부터의 되물림

다음 요인들이 육상 생태계로부터 대기로의 되물림을 구성하는 가능한 것들이다.

㉠ CO₂ 다산화 CO₂를 증가시킨 조건에서 일년생 및 다년생 식물을 단기간 재배해 본 결과, 광합성과 성장의 증가가 확인되었다 만일 CO₂ 농도 증가가 자연 생태계의 생산력을 증가시킨다면 더 많은 양의 탄소가 식물체와 토양의 유기물로 인해 제거될 것이다. 따라서, 이 효과는 감소 되물림을 나타낸 것이다 만일 수림이 전지구 광합성의 2/3를 차지한다면(반은 잎, 나머지 반은 목질), 수림의 반응은 특히 중요하다 그러나 성장촉진이 꾸준히 지속될지, 그리고 실제 육상 생태계의 탄소 저장에 어느 정도 기여할지는 더 연구해 보아야 한다

㉡ 부영양화와 독성 인, 질소와 같은 주요 영양소가 비료사용과 화석연료연소로 인해 증가되어 식물의 성장을 촉진할 가능성이 크다 앞서 지적한 바와 같이 이 요인이 매년 1 GtC을 제거할 만큼 중요한 역할을 할 수 있다 그러나, 영양소 공급이 산성비(acid rain)와도 결부되어 있는 만큼 산성비가 육상생물의 성장을 저해하는 요인도 고려되어야 한다.

㉢ 기온 열대의 경우를 제외하면 기온의 증가는 광합성과 호흡의 증가를 초래하며 호흡이 기온에 더 민감하기 때문에 온도가 증가되면 초기에는 대기로의 순 CO₂ 배출이 예상된다 이에 대한 예측값은 매우 커서 연간 1 GtC 또는 그 이상이다 따라서 기온은 증폭 되물림의 주 요인이다

㉣ 물 토양의 함수율은 탄소 고정 및 저장에 영향을 미친다 건조한 생태계에서 함수율 증가는 식물의 성장을 촉진하고 툰드라의 이탄 내의 탄소 저장을 증가시킨다

대기중 CO₂ 농도 증가는 기후변화로 초래되는 생태계의 부담을 줄일 수도 있다 그런데 현 수준에서 토양의 함수율 변화의 지리적 분포와 각기 다른 생태계에서 이것에 대한 탄소 고정 및 저장의 변화를 믿을만하게 예측하기는 어렵다 단지 CO₂ 변화보다는 기후변화가 생태계의 여러 과정에 더욱 중요할 것으로 믿어진다

㉞ 식생의 지리적 분포 변화 환경이 변함으로 인해 식생의 구조와 서식지가 변하기 쉽다 환경의 변화율이 느리다면 식물이 적응해 나갈 것이다 그러나 그 반대 경우라면 많은 면적의 수림이 빠른 변화에 적응하지 못하고 도태되어 CO₂ 농도를 증가시키게 될 것이다

㉟ UV-B 성층권 오존 감소는 UV-B의 세기를 증가시킨다 자외선이 세어지면 식물이 해를 입게 되므로 육지에서 생물권에 의한 CO₂ 제거를 약화시킨다

(2) 메탄 (CH₄)

메탄은 화학적·방사적으로 활발한 온실가스로서 다양한 혐기적 과정을 통해 생성되며, 대류권의 수산기(OH)와의 반응으로 주로 제거된다. 성층권에 있는 수산기에 의해 메탄이 산화되면 상당량의 수증기가 생성되는데, 이 수증기는 성층권에서 중요한 온실가스로 작용한다

(가) 대기중 메탄의 분포

① 과거 대기중 메탄의 농도

과거 10,000-160,000년 전의 대기중 메탄 농도 (그림 16)가 남극과 그린랜드의 얼음시추물에서 명확히 밝혀졌다 약 20,000년과 150,000년전 빙하기 동안 메탄의 최소 농도는 약 0.35 ppmv였으며, 약 15,000년과 130,000년 전의 빙하기-간빙하기의 전이기간 동안 메탄의 농도는 약 0.65 ppmv까지 급격히 증가했다 10,000 - 11,000년 전의 마지막 빙하 후퇴기(Yonger Dryas)에 그린랜드와 북유럽의 기온이 급강하였을 당시 대기중 메탄의 농도 또한 급격히 감소했으며, 그 이후에는 급격히 증가했다

얼음시추물이 푸석푸석한 성질 때문에 홀로세(최근 일만년)의 대기중 메탄 농도에 관한 자료는 최근 2,000년 동안의 것만 신빙성이 높게 활용될 수 있다

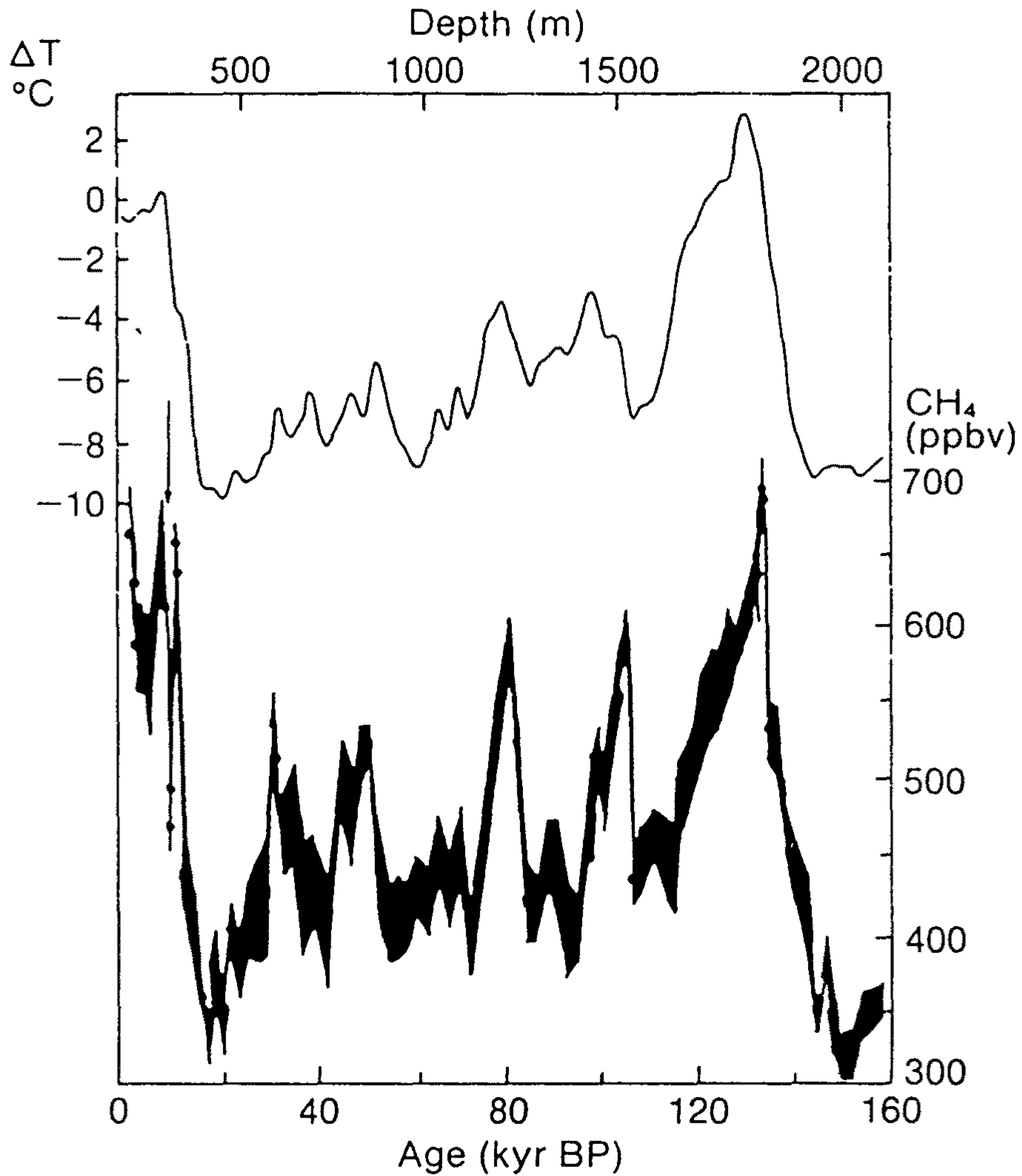


Figure 16 Methane concentrations (bottom) and estimated temperature changes (top) during the past 160,000 years as determined on the ice core from Vostok, Antarctica (Chappelaz et al, 1990)

② 현재 메탄 농도의 변화

얼음시추물 연구에 의하면(그림 17), 대기중 메탄 농도는 2000년전부터 200년전 동안 평균 0.8 ppmv이며, 100년전까지 0.9 ppmv로 증가하였다. 그 이후로 대기중 메탄 농도는 현재까지 꾸준히 증가하였으며 전세계 인구증가와 높은 상관관계를 보였다. 태양광의 적외선 분광(infrared solar spectrum) 분석결과에 의하면 대기중 메탄 농도는 지난 40년 동안 약 30% 증가하였다.

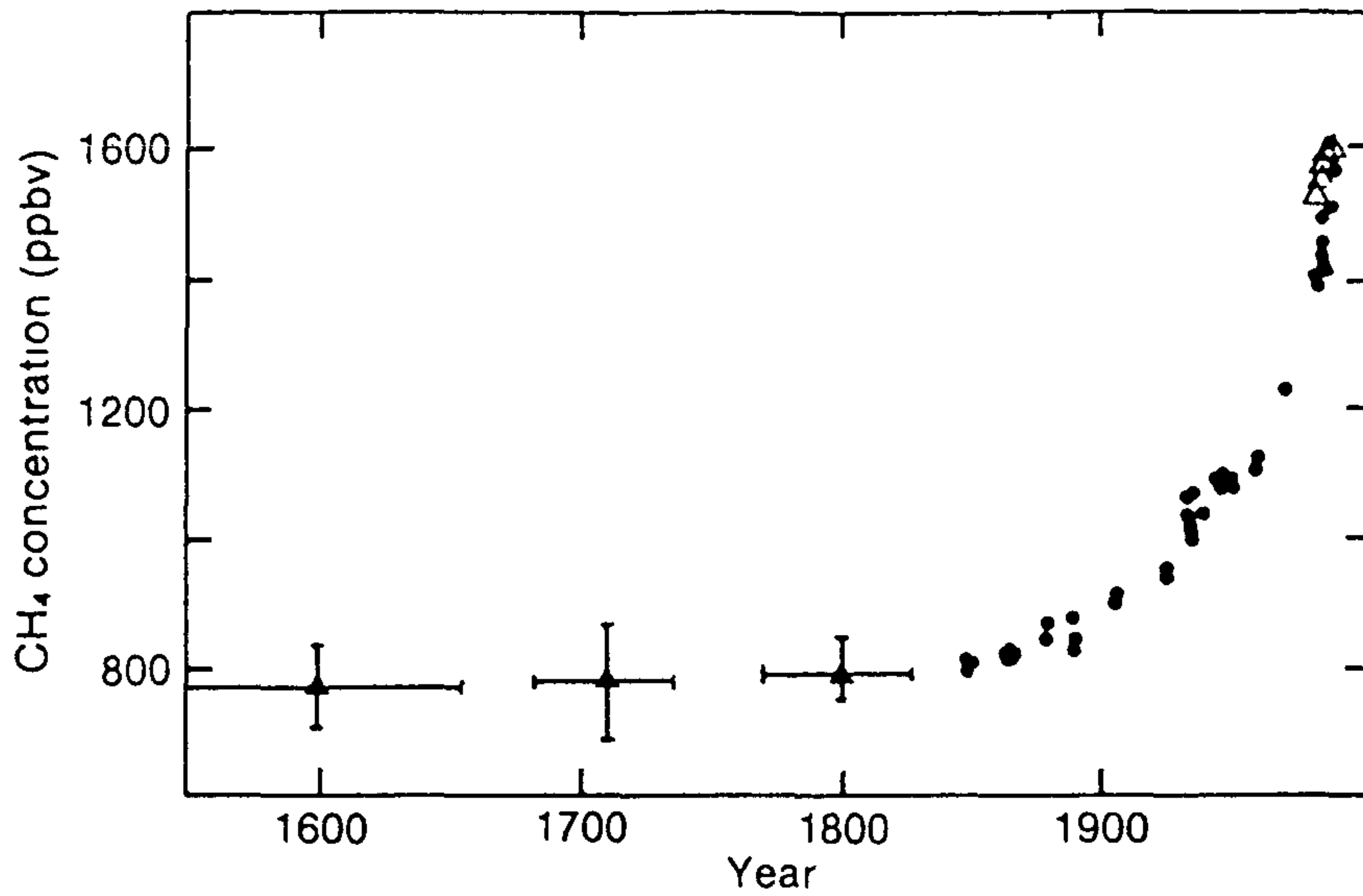


Figure 17 Atmospheric methane variations in the past few centuries measured from air in dated ice cores (Etheridge et al, 1988 Pearman and Fraser, 1990)

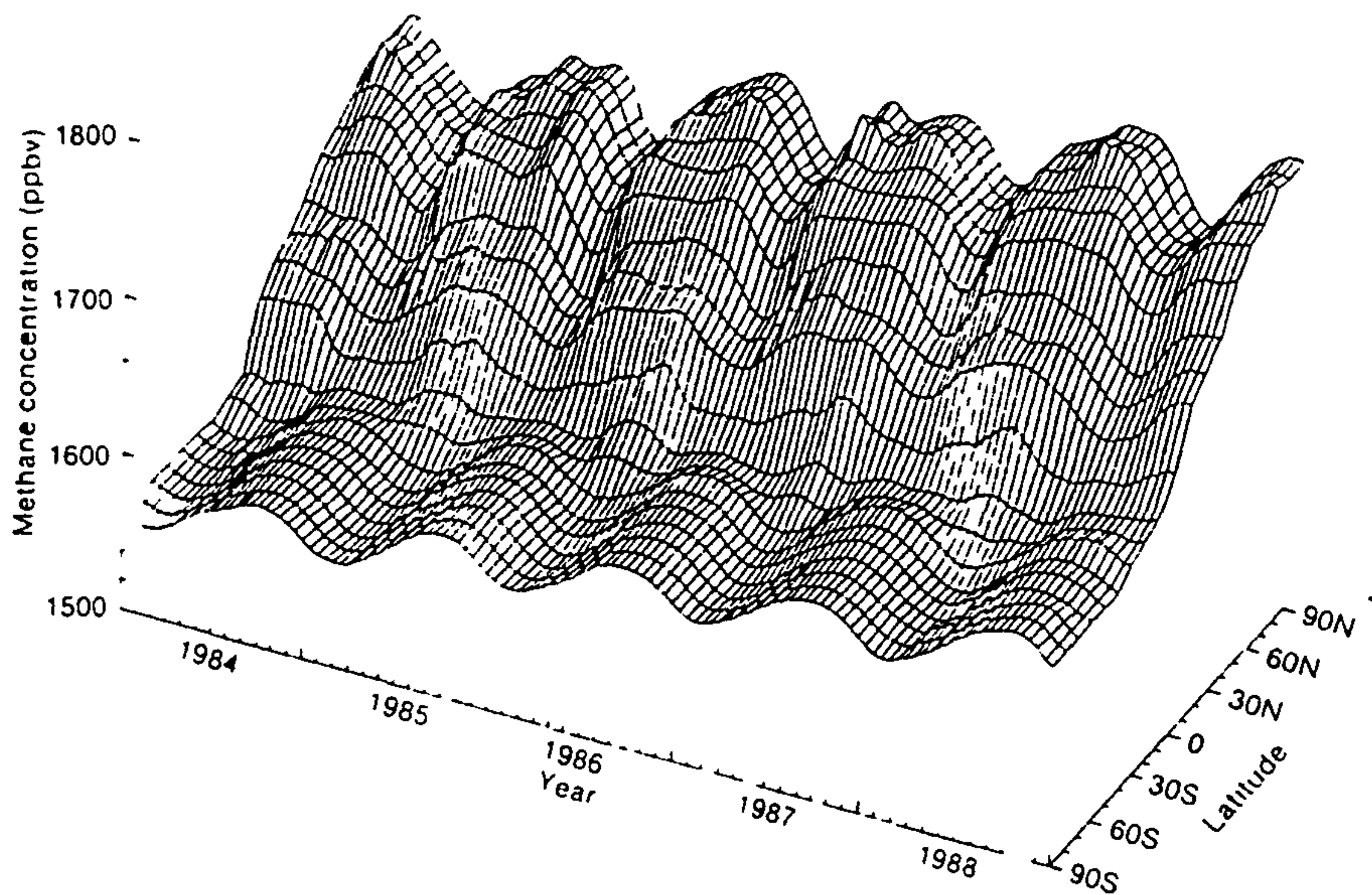


Figure 18 The global distribution, seasonality, and trend of methane from the GMCC network (Steele et al, 1987, and unpublished data)

대기중 메탄 농도는 1978년 이래 대기에서 직접 측정되었는데, 그 당시 전지구 평균 메탄 농도는 151 ppmv 였다. 1990년의 대기중 메탄 농도는 172 ppmv 이며, 매년 14 - 17 ppbv씩(즉, 매년 0.8 - 1.0%) 증가하였다 북반구에서는 대기중 메탄 농도가 176 ppmv인 반면, 남반구에서는 1.68 ppmv로 북반구보다 다소 낮게 나타난다 (그림 18) 메탄 농도의 계절적 변동은 위도에 따라 변하며, 배출량과 수산기의 대기중 농도의 시간적 변동에 의해 좌우된다

(나) 메탄의 기원

메탄은 여러가지 혐기적 과정을 통해 생성된다. 메탄 생성의 중요한 두 과정으로는 ㉞ 이산화탄소가 수소(수소의 공급자로서 지방산과 알콜)와의 반응으로 환원되는 경우, ㉜ 초산이나 메틸 알콜이 메탄 생성 박테리아에 의해 transmethylation 되는 경우 등이 있다 표 7은 배출량 순으로 메탄의 기원을 요약한 것이다.

메탄의 각 기원에 대한 최선산정치에 기초한 연간 총 메탄 배출량은 525 Tg CH₄ 이며 연간 40-48 Tg의 메탄이 대기에 누적된다 현재 메탄에 대한 연구가 진행되고 있어 더 정확한 수치가 곧 밝혀질 것이다

표 7 메탄의 기원과 제거

	Annual Release (Tg CH ₄)	Range (Tg CH ₄)
Source		
Natural Wetlands (bogs, swamps, tundra, etc)	115	100 - 200
Rice Paddies	110	25 - 170
Enteric Fermentation (animals)	80	65 - 100
Gas Drilling, venting, transmission	45	25 - 50
Biomass Burning	40	20 - 80
Termites	40	10 - 100
Landfills	40	20 - 70
Coal Mining	35	19 - 50
Oceans	10	5 - 20
Freshwaters	5	1 - 25
CH ₄ Hydrate Destabilization	5	0 - 100
Sink		
Removal by soils	30	15 - 45
Reaction with OH in the atmosphere	500	400 - 600
Atmospheric Increase	44	40 - 48

① 자연 습지(natural wetlands) 자연습지는 메탄의 가장 중요한 기원이며, 이 기원의 정량화를 위해 많은 연구가 있어 왔다. 최근의 연구는 메탄의 전지구적 유동량이 110~115 Tg라는 이전의 연구결과를 지지하고 있지만, 열대지역과 고위도지역의 상대적인 중요성에 대해서는 상반된 의견을 제시하고 있다 Bartlett 등에 의하면, 열대지역의 습지로부터 55 Tg의 메탄이, 고위도의 습지에서는 39 Tg의 메탄이 매년 배출되는 것으로 집계하였다.

② 논(rice paddies) 논은 메탄의 기원으로 중요하며, 전지구 평균 배출량은 연간 25 - 170 Tg CH₄ 범위이다 논으로부터의 메탄 배출량은 다음의 몇가지 요인들에 의해 결정된다 ㉠ 영농법 (비료, 관개, 벼의 밀도, 2부작), ㉡ 토양/벼의 특징 (토양의 조직과 산성도, 산화-환원 전위, 혐기적 환경의 변화), ㉢ 계절.

상기의 요인들에 대한 기여도를 정확히 계산하는데는 한 가지 어려움에 봉착하게 된다 그 이유는 전세계 벼수확량의 거의 90% 이상이 아시아에서 수확되며, 그 중 중국과 인도가 차지하는 부분이 약 60%에 해당하지만 이들 국가의 벼수확량에 대한 자세한 자료가 없기 때문이다 1940년 이래 연간 쌀 생산량은 2부작의 영농기법과 경작지 증가로 인해 거의 2배로 증가하였다 그러므로 메탄의 배출량도 이와 더불어 증가하였을 것이다

③ 생물체 연소(biomass burning) 열대와 아열대 지역에서 생물체연소는 대기중 메탄의 중요한 기원으로 생각되고 있으며, 연간 20-80 Tg의 메탄을 전지구적으로 배출한다 생물체연소에 대한 산정치를 향상시키기 위해서는 ㉠ 메탄의 배출요인들, ㉡ 특정 지역에서 매년 연소된 식물의 양과 종류, ㉢ 생물체 연소의 형태(smouldering and flaming)와 같은 내용을 이해하는 것이 필요하다

④ 동물 장내 세균에 의한 발효(enteric fermentation) 소, 양 등 반추동물의 장내 세균에 의한 발효는 연간 65 - 100Tg의 메탄을 배출한다 이것에 의한 메탄의 배출량은 반추동물들이 섭취하는 먹이의 종류 뿐만 아니라 동물의 수에 의해 좌우된다. 지난 세기 동안 이 기원의 변화를 정확하게 계산하는 것은 쉽지않다

⑤ 흰개미(termites) 흰개미에 의한 메탄의 배출량은 연간 10 - 100 Tg CH₄ 로 그 범위가 크다. 상기의 추정치는 실험실 및 현장에서의 실험결과를 불확실한 전 지구의 흰개미 군집과 흰개미가 소비하는 생체량에 적용한 것이다. 흰개미에 의한 메탄의 기원을 정확히 계산하기 위해서는 전지구적으로 흰개미의 군집이 증가하고 있는지와 흰개미가 기후변화에 기여하는지의 여부를 결정하는 것이 중요하다

⑥ 육상 매립장(landfills) 육상 매립장에서 유기폐기물의 혐기적 분해작용은 인간에 의한 메탄의 중요한 기원이며, 연간 20-70 Tg의 메탄을 대기로 배출한다 그러나 이 기원의 크기를 더욱 정확하게 계산하기 위해서는 쓰레기의 양, 추세(trend) 및 종류, 그리고 쓰레기 매립 등에 대한 연구가 필요하다

⑦ 해수와 육수(oceans and freshwaters) 해수와 육수 또한 대기중 메탄의 중요한 기원이다. 해양의 메탄 배출량은 1960년대 후반에서 1970년대 초반의 극히 제한된 자료를 기초로 계산되었는데, 그 당시의 대기중 메탄 농도는 현재보다 약 20% 정도 낮았었다

⑧ 석탄채광(coal mining) 메탄은 석탄채광 및 소비지로의 석탄 운반 과정에서 석탄으로부터 대기로 배출된다 석탄채광에 의한 전지구적인 메탄의 배출량은 연간 10-50 Tg CH₄의 범위를 보인다

⑨ 천연기체의 시추 배기 및 수송(Gas drilling, venting and transmission) 메탄은 천연기체의 주요 성분이기 때문에 석유와 천연기체를 시추하고 운송하는 과정에서 메탄이 배출될 수 있다 이것은 대기중 메탄의 중요한 기원으로 작용한다 이들에 의한 대기중 메탄의 전지구 배출량은 25 - 50 Tg CH₄ 으로 추정된다

그러나, 이 값을 추정할때 사용된 자료의 질이 의문시 되기 때문에 이들에 의한 메탄의 배출량을 정확하게 계산하기 위해서는 더욱 자세한 연구가 필요하다

(다) 메탄의 제거

대기중 메탄의 주요 제거작용은 대류권에 있는 수산기(OH)와의 반응이다 수산기의 농도는 메탄, 일산화탄소, NMHC, NO_x 대류권 오존들의 복잡한 반응에 의해 조절된다 메탄과 수산기의 반응계수와 대류권의 수산기 농도를 기초로 하여 계산한 결과 대기중 메탄의 수명은 8-11.8년이다 메탄과 수산기의 반응에 의해 매년 400-600 Tg(1Tg=10¹²g)의 메탄이 제거된다 그러나 이 제거효율은 지난 세기 동안 감소되었을 것으로 예상되는데, 그 이유는 대류권의 수산기 농도가 감소하였고 CO, NMHC와 메탄의 농도가 증가하였기 때문이다.

그 결과 대기중 메탄의 수명은 길어졌을 것으로 여겨진다 토양도 또한 메탄을 제거하는 작용을 한다. 토양은 연간 30 ± 15 Tg의 메탄을 대기로 부터 제거하리라고 추정된다

(라) 기후변화가 메탄 순환에 미치는 되물림

미래의 대기 중 메탄 농도는 그 기원과 제거에 달려 있는데, 이들은 정치, 경제, 사회 및 환경요인과 기후의 변화에 의존한다 습지로부터 배출되는 메탄의 양은 기온과 토양 습도에 민감하기 때문에 자연 습지와 논으로부터의 배출은 장차 크게 변화되기 쉽다 대기에서 메탄을 제거하는 대류권 수산기의 양은 몇가지 요인, 즉 UV-B의 세기, 주변의 수증기, 일산화탄소, 메탄, 산화질소와 대류권 오존의 농도 등에 지배된다

① 열대 지역의 메탄 배출 열대역의 주 메탄 배출지인 자연 습지와 논은 토양 습도에 민감하게 반응한다 따라서, 기온과 강수량 변화로 예상되는 토양 습도의 변화는 대기의 메탄 농도에 커다란 영향을 미칠 수 있다 토양 습도가 증가하면 메탄의 배출량도 증가한다

② 고위도 지역의 메탄 배출 평지의 툰드라 지역에서 배출되는 메탄의 양은 지하수면 깊이에 민감하다 지하수면이 몇 cm만 상승해도 건조시보다 100배 이상의 많은 메탄이 배출된다 온도가 상승하면 토양 표층의 유기물 분해를 담당하는 미생물의 활동이 가속화되어 메탄 배출이 증가된다 따라서, 고위도의 습지에서는 기온이 높아지고 습해지면 메탄의 배출이 증가하는 반면, 덥지만 건조기후가 되면 배출량은 줄게 된다. 고(북)위도 지방이 온난화되면 ㉠ 영구동결대에 갇힌 메탄 ㉡ 영구동결대의 분해가능한 유기물 ㉢ 수화메탄(methane hydrate)의 분해 등으로 메탄 배출이 증가한다 이러한 증폭 되물림의 크기를 정량화하기는 어렵다 지표 수 cm에서 수 m 밀의 영구동결대가 녹는 데는 수십년에서 수백년이 걸리고, 비록 1세기 내에 연간 메탄 수화물의 분해로 인한 메탄 배출량이 $100 \text{ Tg CH}_4 \text{ yr}^{-1}$ 에 이를 것이라는 연구 결과도 있지만 수화메탄이 녹기까지 더욱 긴 시간이 필요하다.

(3) 염화불화탄소 (CFC)

염소(Cl)와 브롬(Br)을 함유한 할로겐화탄소(halocarbon)는 성층권의 오존을 파괴하는 중요한 온실가스이다 많은 국가들은 CFC의 환경에 대한 유해성을 인정하여 염화불화탄소의 생산규제와 소비억제를 목적으로 1987년에 “오존층 파괴 물질에 관한 몬트리올 의정서”를 작성하였다 몬트리올 의정서에 의하면, 선진국에 대해서는 1990년부터 CFC의 생산과 소비량을 1986년 수준으로 동결하며, 1993년부터는 1986년 수준의 80%로, 1998년부터는 1986년의 50%로 감소하며, 1986년 당시에 1인당 0.3 Kg 이하의 CFC를 소비하는 개발도상국에 대해서는 2000년까지 1인당 0.3 Kg 한도내에서 CFC의 사용을 허용하고 있다

(가) 할로겐화탄소(Halocarbon)의 대기중 분포

1990년의 대기중 CFC 11, 12, 113의 농도는 각각 약 280 pptv, 484 pptv 60 pptv로서, 다른 온실가스보다 훨씬 빠르게 증가하고 있다 (그림 19)

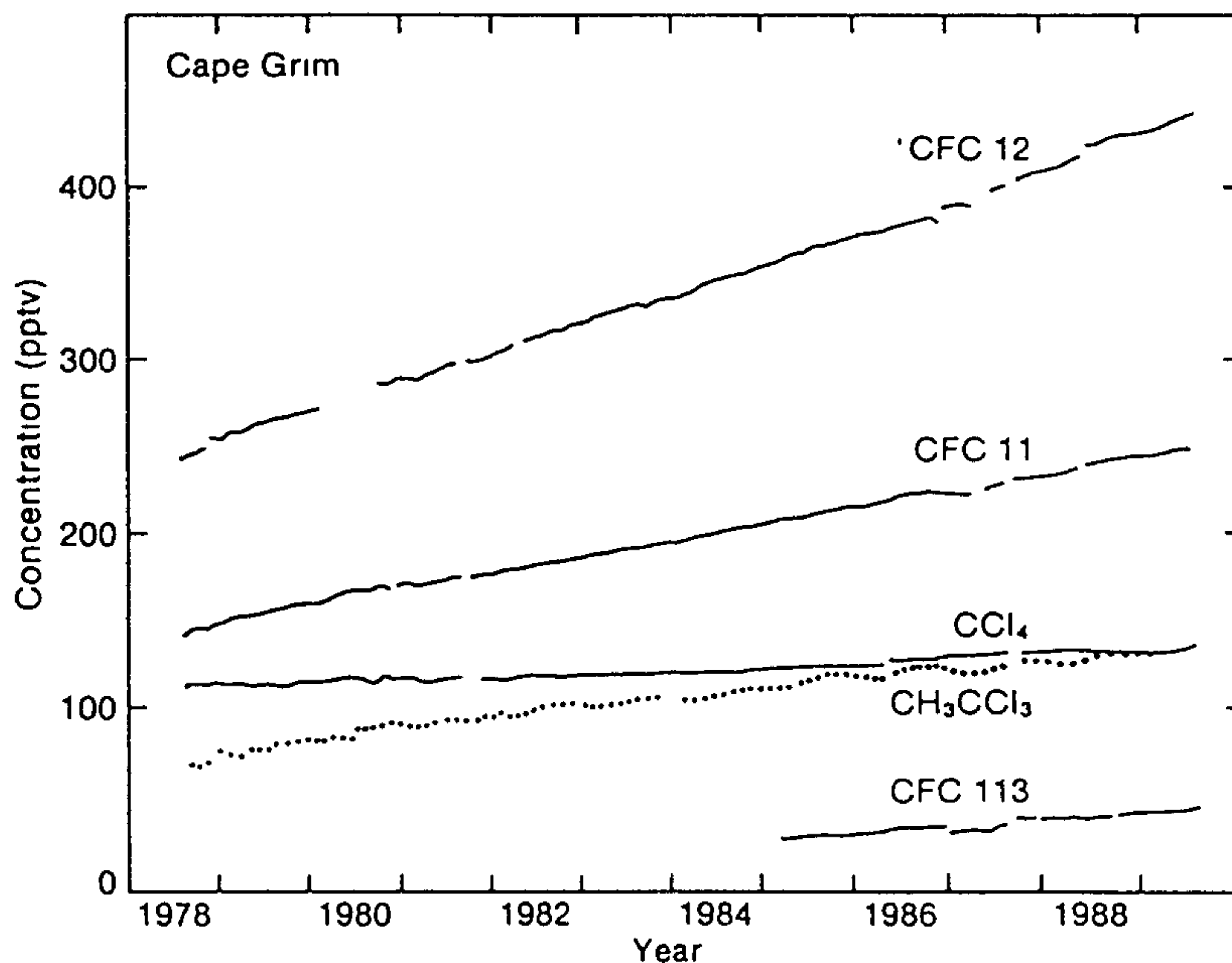


Figure 19 Halocarbon concentrations measured at Cape Grim Tasmania during the period 1978-1989 (Fraser and Derek, 1989, and unpublished data)

CFC 농도는 남반구보다 북반구에서 약간 더 높으며, 90% 이상을 선진국에서 배출하고 있다 남북 45도의 위도 안에서 CFC의 혼합 시간은 약 1년이 소요되며, CFC의 대기중 수명은 매우 길다 (표 8)

표 8 Halocarbon의 농도와 양상 (1990)

Halocarbon		Mixing Ratio pptv	Annual Rate of Increase pptv	%	Lifetime Years
CCl ₃ F	(CFC-11)	280	9.5	4	65
CCl ₂ F ₂	(CFC-12)	484	16.5	4	130
CClF ₃	(CFC-13)	5			400
C ₂ Cl ₃ F ₃	(CFC-113)	60	4-5	10	90
C ₂ Cl ₂ F ₄	(CFC-114)	15			200
C ₂ ClF ₅	(CFC-115)	5			400
CCl ₄		146	2.0	1.5	50
CHClF ₂	(HCFC-22)	122	7	7	15
CH ₃ Cl		600			1.5
CH ₃ CCl ₃		158	6.0	4	7
CBrClF ₂	(halon 1211)	1.7	0.2	12	25
CBrF ₃	(halon 1301)	2.0	0.3	15	110
CH ₃ Br		10-15			1.5

† There are a few minor differences between the lifetimes reported in this table and the equivalent table in WMO 1989b. These differences are well within the uncertainty limits. The 1990 mixing ratios have been estimated based upon an extrapolation of measurements reported in 1987 or 1988, assuming that the recent trends remained approximately constant.

(나) 할로겐화탄소의 제거

대류권에서 CFC 같은 할로겐화탄소의 제거 기작은 미미하다. CFC는 대기중에서 수십년에서 수 세기의 수명을 가지고 있으며, 중층과 상층 성층권에서 광분해작용에 의해 소멸된다. 대기중 CFC 농도는 최근들어 급격히 증가했기 때문에 기원과 제거 사이에 커다란 불균형이 발생한다. CFC 11, 12, 113의 농도를 1990년의 수준으로 안정화시키기 위해서는 현 배출량을 각각 약 70-75%, 75-85%, 85-95%로 격감시켜야 한다.

(다) 할로겐화탄소의 기원

CH₃Cl을 제외한 대부분의 할로겐화탄소는 산업활동에 의해 생성된다. 할로겐화탄소는 주로 분무제(CFC 11, 12, 114), 냉매제(CFC 12와 114, HCFC-22), 발포제(CFC 11과 12), 용매(CFC 113, CH₃CCl₃와 CCl₄), 진화제(chalon 1211과 1310)로 사용된다. 1990년, 대기로의 연간 CFC 배출량은 CFC-11은 350 Gg, CFC-12는 450 Gg, CFC-113은 150 Gg이며 HCFC-22는 1400 Gg이다. CFC 배출 규제를 강화하는 국제협약의 실행으로 CFC 배출량은 가까운 미래에 아마도 대폭적으로 감소될 것이다. 그러나 대기중 CFC 11, 12 와 113의 농도는 이들 기체가 대기중에 머무르는 시간이 길기 때문에 적어도 다음 세기까지 1990년의 30-40%에 해당하는 양이 잔류하게 될 것이다.

(4) 아산화질소 (Nitrous oxide N₂O)

아산화질소는 화학적으로 방사적으로 활발한 온실가스로서, 토양과 물속의 다양한 생물작용에 의해 배출되며, 성층권에서 광분해 작용과 전기적으로 여기된 (excited) 산소원자와의 반응으로 제거된다.

(가) 대기중 아산화질소의 분포

1990년의 N₂O의 대기중 평균농도는 약 310 ppbv로서 약 1,500 TgN이 존재하며, 매년 0.2-0.3%씩 증가하고 있다 (그림 20). 대기중 N₂O의 농도는 남반구보다 북반구에서 약 1 ppbv 정도 더 높다. 얼음시추물의 분석결과에 의하면 산업혁명 이전의 N₂O의 농도는 과거 2,000년 동안 285 ppbv로 거의 일정했으나 1700년 경부터 증가하기 시작했다 (그림 21). 그림 21은 대기중 N₂O의 농도가 "Little Ice Age" 기간 동안 수 ppbv 정도 감소했음을 보여주고 있다.

(나) 아산화질소의 제거

대기중 N₂O의 주요 제거기작은 성층권에서의 광분해 작용으로, 연간 10±3 Tg의 질소를 제거한다 (표 9). 대기중 N₂O의 수명은 약 150년이다.

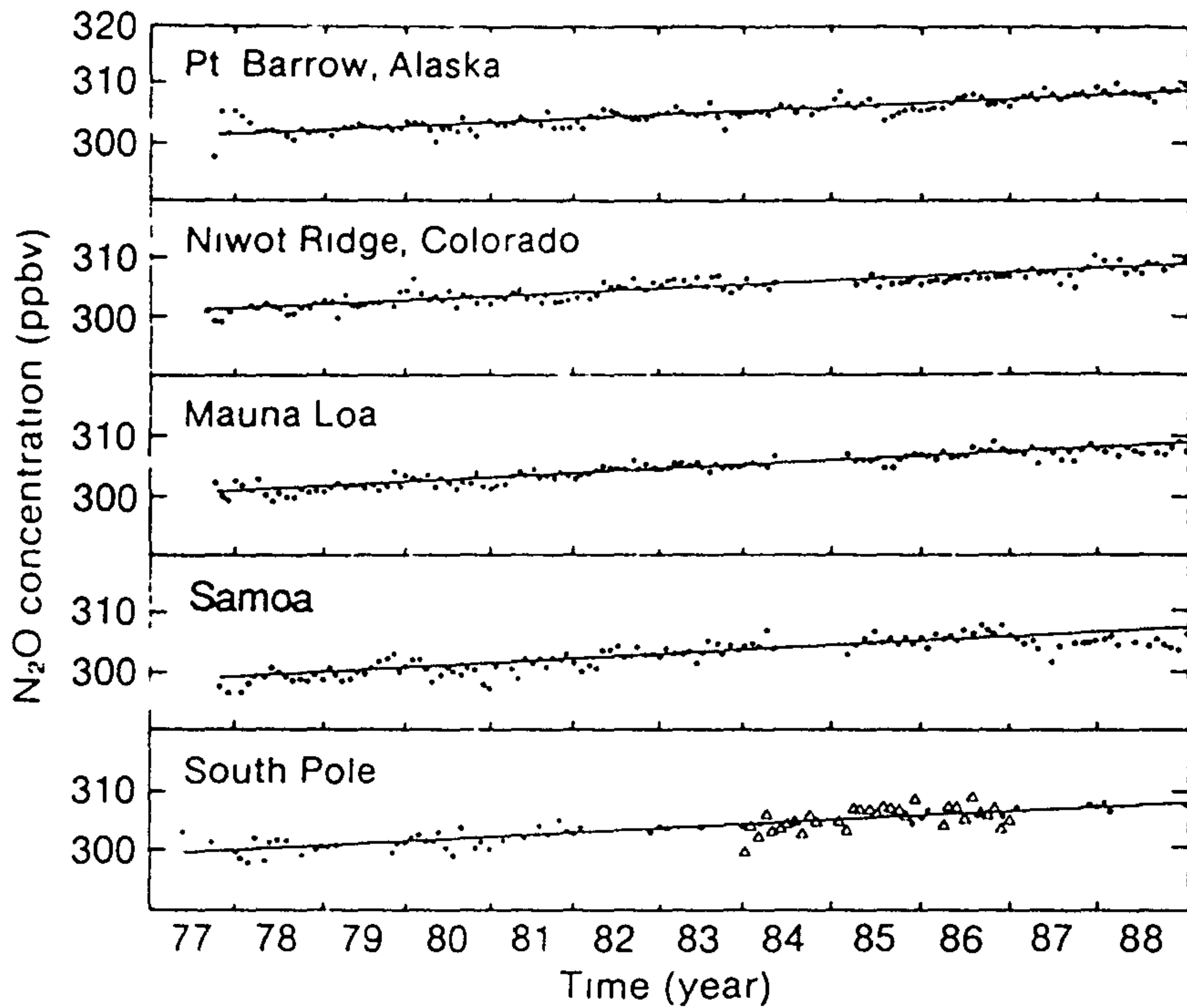


Figure 20 Atmospheric measurements of nitrous oxide from the NOAA/GMCC network (Elkins and Rossen, 1989)

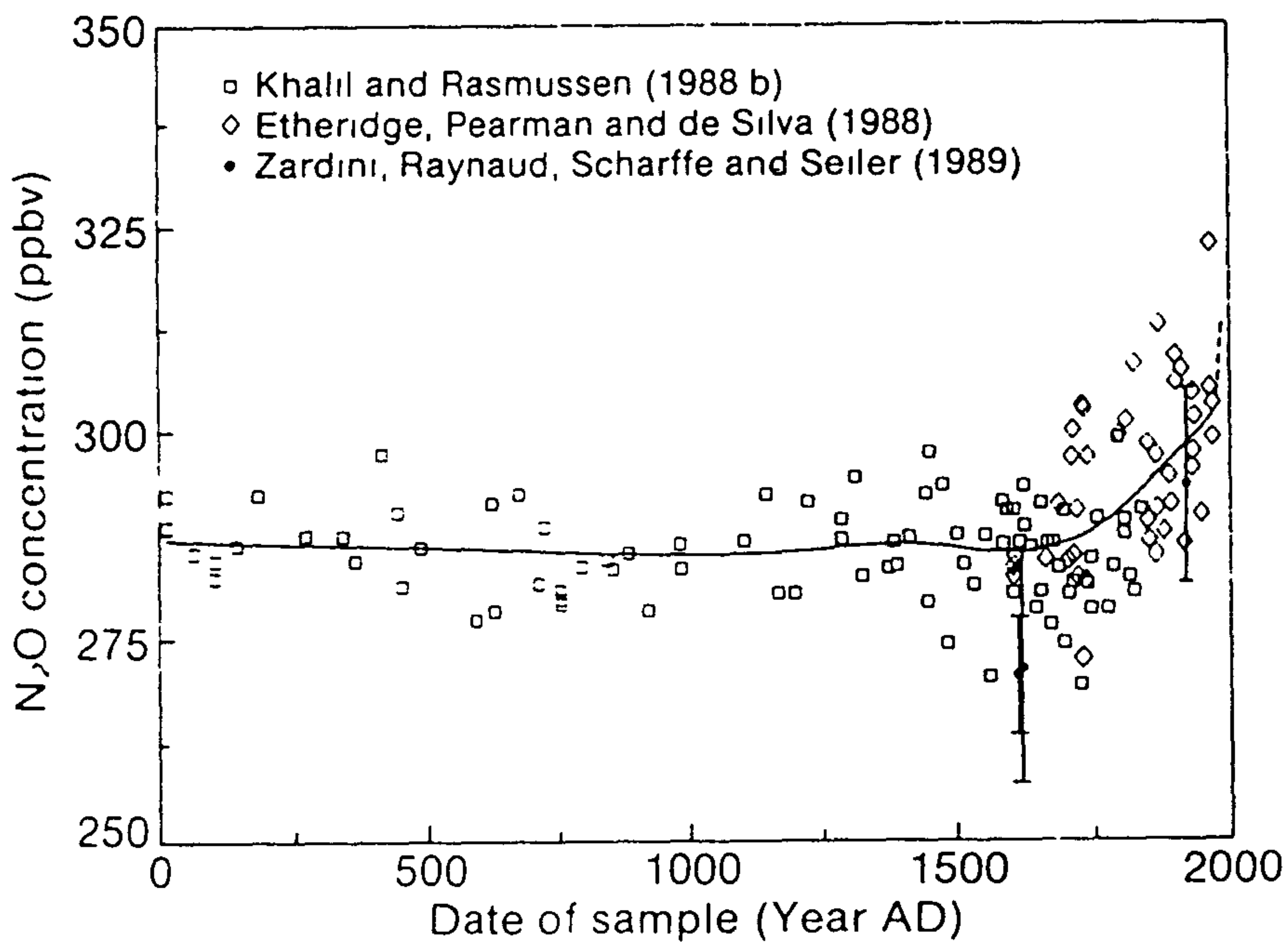


Figure 21 Nitrous oxide measurements from ice-core samples

현재에는 N₂O의 배출과 제거 사이에 30%의 불균형이 초래되어 있다
 대류권에서 N₂O의 제거 기작은 물과 토양 표면으로의 흡수인데, 그 크기는
 작으리라고 여겨지고 있다

표 9 두가지 모델에 의한 대기중 이산화 탄소 농도

	Range (TgN per year)
Source	
Oceans	1.4 - 2.6
Soils (tropical forests)	2.2 - 3.7
(temperate forests)	0.7 - 1.5
Combustion	0.1 - 0.3
Biomass burning	0.02 - 0.2
Fertilizer (including ground-water)	0.01 - 2.2
Total:	4.4 - 10.5
Sink	
Removal by soils	?
Photolysis in the stratosphere	7 - 13
Atmospheric Increase	3 - 4.5

(다) 아산화질소의 기원

① 해양 : 해양은 중요하지만 N₂O의 주 기원은 아니다 1990년 해양에 의한 N₂O의 배출량은 1.4-2.6 TgN이다 해양에서 전지구 규모의 연간 N₂O 배출량을 계산하는 것은 어렵다

그 이유는 기체교환률의 정량화와 관련된 불확실성과 표층수에서의 N_2O 분압이 시·공간적으로 변화하기 때문이다. 표층수에서 N_2O 의 분압은 용승해역에서 최고 40%까지 과포화되어 있는 반면, 남극 주변해역과 순환대에서는 수 %까지 불포화되어 있다. Cline 등과 Butler 등에 의하면, El Nino 기간 동안 태평양해역에서 용승이 억제되면 해양의 N_2O 배출량은 상당히 감소한다. N_2O 는 표층수 부근에서 질산화(nitrification)에 의해 주로 생성되는 것인지 또는 산소가 고갈된 심층수에서 탈질산화(denitrification)에 의해 생성되는 것인지는 명백하게 알려져 있지 않다. 해양에는 900-1,100 Tg의 N_2O 가 저장되어 있는데, 이는 대기중 N_2O 의 양과 동등한 수준이다. 그러므로 해양과 대기 사이의 N_2O 교환율은 대기중 N_2O 농도 변화에 커다란 영향을 미치게 될 것이다.

② 토양(soils) 호기성 토양에서 탈질산화는 중요한 대기중 N_2O 의 기원이다. 그러나 혐기성 토양에서의 질산화는 단위 면적당 더 많은 N_2O 를 배출할 수 있다. 토양으로부터 배출되는 N_2O 의 전지구적인 배출량을 계산하는 것은 육상 생태계의 이질성과 N_2O 의 배출량을 조절하는 환경의 변동 때문에 매우 어렵다.

열대우림지역에서의 N_2O 배출량은 매년 2.2-3.7 TgN이다. 온대산림 토양의 연간 N_2O 배출량은 0.7-1.5 TgN이다. 열대우림과 온대산림 지역의 황폐화는 N_2O 의 배출량을 증가시킨다는 연구 결과가 있으나 자료의 부족으로 명확한 결론을 내릴 수 없는 실정이다.

③ 생물체 연소(biomass burning) . 현재 생물체 연소에 의한 대기중 N_2O 의 배출량은 작은 것으로 여겨지고 있으며, 그 배출량은 연간 0.2 TgN 이하이다.

④ 화석연료연소(combustion) 최근까지 화석연료의 연소는 중요한 대기중 N_2O 의 기원으로 생각되었다. 그러나 최근의 연구에 의하면, 이전의 연구가 연소기원으로부터 N_2O 를 수집하는 플라스크내에서 N_2O 가 인위적으로 생성되기 때문에 부정확하다고 지적하고 있다. 가장 최근의 화석연료 연소에 의한 N_2O 의 배출량은 연간 0.1-0.3 TgN으로, 이전의 3.2 TgN보다 훨씬 적다.

⑤ 비료와 지하수(fertilizer/ground-water) . 농경지에서 질소 비료의 사용은 토양에서 N_2O 의 배출을 증가시킨다. 비료사용에 의한 N_2O 배출량은 비료의 종류,

토양의 형태, 토양의 온도, 기상조건 등에 의해 좌우된다. 비료의 질소가 N_2O 로 전환되는 비율은 0.01-2.0%인데, 1980년 전지구 총비료생산량을 55 TgN으로 기준할 때 총 N_2O 배출량은 0.01-1.1 TgN이다. 토양내의 질소비료가 지하수로 스며들어 생기는 N_2O 의 양은 연간 1.1 TgN수준이다. 따라서, 연간 0.01-2.2 TgN이 비료 사용에 의해 대기로 N_2O 를 배출시킨다.

(5) 오존 (ozone)

O_3 는 대류권의 중층과 상층 그리고 성층권의 하층에서 중요한 온실가스이며, 유해한 자외선을 차단하여 지구상의 생물을 보호하는 역할도 한다. 여기서는 오존을 성층권 오존과 대류권 오존으로 구분하여 논의하였다.

(가) 성층권 오존 (stratospheric ozone)

성층권 오존은 지구 대기의 중요한 성분이다. 오존은 유해한 자외선으로부터 지표면을 보호하며, 입사된 자외선과 배출되는 지표 복사에너지를 모두 흡수하여 성층권의 온도 구조를 조절하는 역할을 한다. 오존에 의해 흡수된 지표 복사에너지의 일부는 지표-대류권으로 재방사된다. 성층권 오존이 감소하면 ① 더 많은 태양방사에너지를 통과시켜 지표면-대류권을 온난화시키며, ② 태양방사에너지와 지표복사에너지의 흡수량 감소로 대류권으로 재배출되는 에너지양이 감소되어 지표를 냉각시키는 역할의 두 가지 상반된 작용이 일어난다.

1970년대 중반에서 후반 사이에 형성된 남극의 오존 구멍(ozone hole)은 봄마다 반복적으로 나타난다. 오존 분포에 관한 자료는 북위 30-64도의 일부 지역에 국한되어 있다. 그러므로, 이들 자료를 이용하여 북극, 열대역, 아열대역 또는 남극 등과 같이 멀리 떨어져 있는 남반구에서의 오존 분포변화를 알기에는 불충분하다. WMO(1989)에 의하면 1969-1988년 사이 겨울(12월과 3월) 동안 북위 30-64도 지역에서 3.4-5.1%의 오존이 감소하였으며, 고위도에서는 더 많은 오존이 감소되었다. 성층권에서 오존의 수직 분포를 살펴보면, 1979년 2월-1981년 11월, 1984년 10월-1988년 12월의 두 기간 동안 인공위성 SAGE I과 II에 의해 수집된 자료분석 결과, 남 북위 각각 20-50도 지역의 상공 40 km에서 오존이 최고 3+2% 감소하였다. 성층권에서 오존의 농도와 분포는 역학적, 방사적, 광화학적 과정에 의해 조절된다.

(나) 대류권 오존 (tropospheric ozone)

대류권 오존은 열대와 아열대역의 상부 대류권에서 특히 중요한 온실가스로서, 대류권의 오존 분포는 화학적, 방사적, 동역학적인 과정들 사이의 복잡한 상호작용에 의해 조절된다. 대류권 오존은 ① 성층권으로부터 이동되며, ② 식생지표(vegetative surfaces)에서 파괴되고, ③ NO_x 가 존재할 때 CO , CH_4 , NMHC의 광-산화작용(photo-oxidation)에 의해 생산되며, ④ 자외선 광분해와 OH와의 반응에 의해 파괴된다. 또한 구름 내부에서의 화학작용은 오존의 생성과 파괴에 중요한 역할을 한다.

대류권 오존의 수명은 약 수 주일 이내이기 때문에 위도, 고도, 계절에 따라 매우 변화가 심한 분포를 보인다. 북반구 중위도의 봄과 여름동안 지표 근처에서의 월평균 오존 농도는 30-50 ppbv이며 (그림 22),

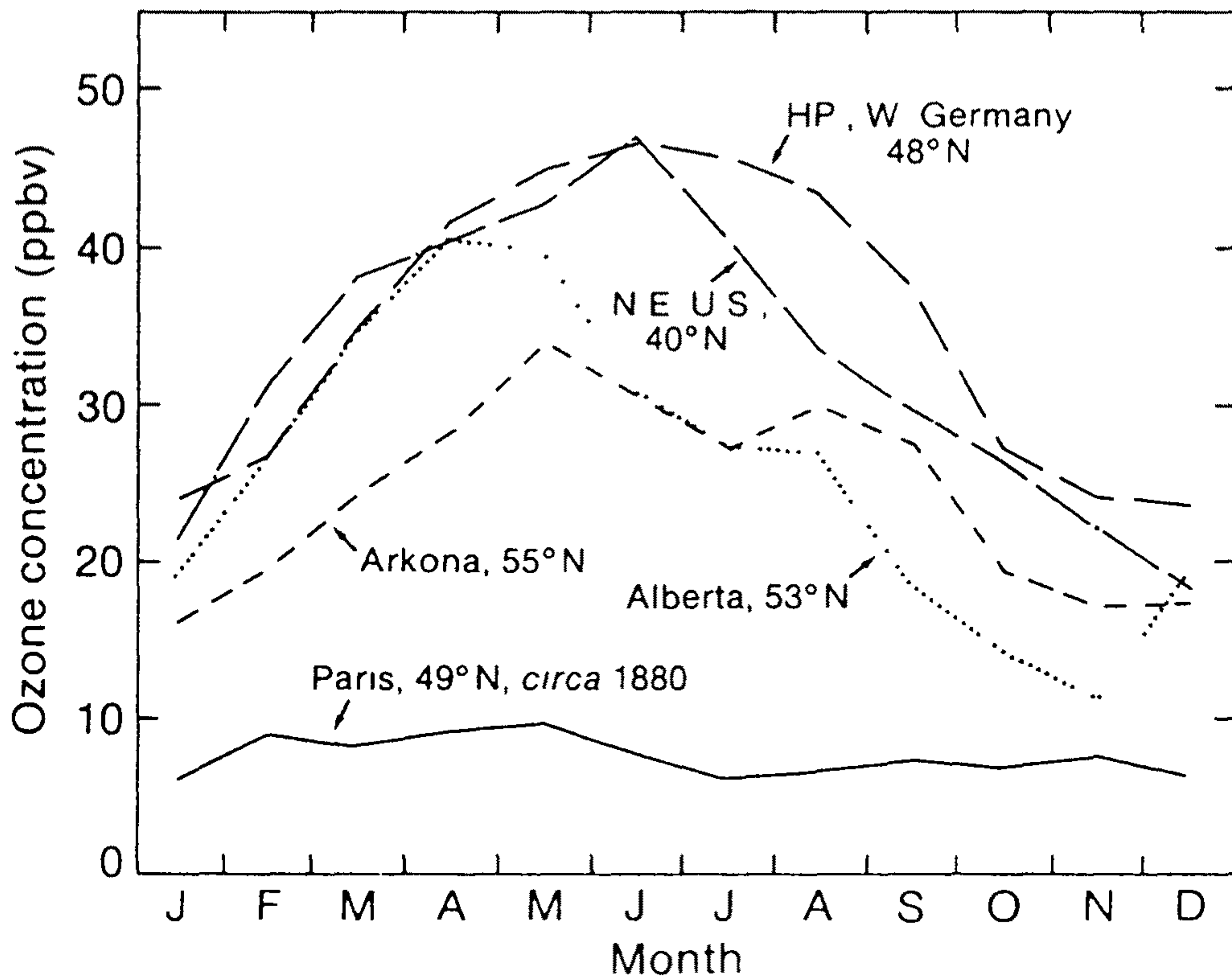


Figure 22 The seasonal variation of surface ozone

북반구 중위도와 북쪽 대류권 중층의 봄과 여름 동안 오존 농도는 60-65 ppbv이다 여름에 최고 농도를 보이는 것은 화석연료 연소와 산업활동에 의한 오존의 전구물질이 광산화 작용에 의해 생산되기 때문이다. 다른 위도에서는 겨울과 봄 동안 가장 높은 오존 농도를 보이는데, 그것은 성층권으로부터의 오존 유입량이 그 시기에 가장 크기 때문이다. 북위 40도 사이의 대류권 중간층에는 남위 40도보다 오존이 35% 정도 더 풍부하다.

오존 농도는 생물연소에 의해 방출된 전구물질로부터 오존이 광화학적으로 다량 생성되는 건기(dry season)를 제외하면 중위도 지역보다 열대 지역에서 더 낮은 경향을 보인다 남미의 봄철 오존 농도는 여름철 중위도의 공업지대에서 나타나는 농도와 거의 같은 수준으로 높다. 넓은 열대지역의 대류권은 생물연소로 발생하는 오존에 의해 영향을 받는 것 같다 우기(wet season) 동안 원지성 해양대기와 대륙대기는 열대지역에서 오존의 광화학적 제거 요인으로 작용한다. 따라서, 열대 지표면에서의 오존 농도는 4-12 ppbv로 낮게 나타난다

오존 농도에 대한 장기 자료는 대부분 북반구 중위도지역에 국한되어 있다 1970년대 이전의 오존 농도는 단기간 동안 획득된 자료 뿐이다. 1876-1910년에 파리에서 측정된 오존 농도와 오늘날 유럽과 북미의 교외에서 측정된 농도를 비교해 보면 평균값이 약 2-3배 증가했으며, 그 증가폭은 여름의 경우 4-6 배로 가장 크게 나타났다 (그림 22). 1970년대 유럽에서의 오존 농도는 1930-1950년의 수준보다 약 2배로 증가하였다. 유럽에서 측정된 오존 자료에 의하면, 1950년대 중반부터 1980년대 초반까지 연간 1-2%씩 증가하였고, 1970년대 중반 이래 알래스카와 하와이와 같이 산업지역과 멀리 떨어진 지역에서는 연간 0.8%씩 증가했다 한편 사모아에서는 연간 농도의 변화가 없었으며, 남극에서는 매년 0.5%씩 감소하였다 1965-1986년 사이의 북반구 중위도의 오존 농도는 주로 북유럽과 일본 상공 8 km 이내에서 연간 1%씩 증가했으나, 대류권 상층부에서는 뚜렷한 경향이 나타나지 않았다. 성층권 하부(25 km 이내)에서는 오존 농도가 감소하고 있다. 증가와 감소의 변화는 대략 권계면과 일치한다 남반구 중위도에 있는 한 개의 오존 관측기지에서는 어떠한 농도변화의 경향도 발견하지 못했으며, 열대지역에서는 장기간에 걸친 오존 관측자료가 없다

대류권 오존의 농도는 대기중 오존 전구물질의(CO, CH₄ NMHC와 NO_x) 농도와 비선형적인 관계를 보이고 있다 질소산화물(NO와 NO₂)의 농도와 경향은 오존의 농도를 조절한다 일반적으로 NO_x의 농도가 낮을 때 CO, CH₄, NMHC의 농도 증가는 오존 농도의 감소를 초래하는 반면, NO_x의 농도가 높고 CO, CH₄, NMHC의 농도

또한 높을 경우에는 오존의 농도가 상당히 증가한다

오존과 전구물질 사이의 되물림을 아는 것은 대기중 CH₄와 NMHC의 수명을 조절하는 대류권의 OH를 이해하는 데 필수적이다. 대류권에서 산화력을 결정하는 OH의 전지구적 농도는 대류권의 오존, NO_x 또는 수증기의 농도 증가에 따라 증가하거나 CH₄, CO 와 NMHC의 증가로 감소하게 된다. 한가지 주목할 점은 일산화탄소의 증가는 전지구 OH 농도의 감소를 초래한다는 것이다. 왜냐하면 NO_x의 대기중 수명이 너무 짧아 CO에 대한 효과를 상쇄시킬 수 없기 때문이다. 결과적으로 이 현상은 메탄의 대기중 수명을 연장시킬 것이다

(6) 요약

지구의 기후는 대기의 방사균형에 따라 좌우되는데 이 균형은 태양방사에너지의 입사량과 방사적으로 활동적인 미량기체(즉, 온실가스), 구름 및 에어로졸의 대기중 농도에 의해 영향을 받는다

산업혁명 이래로 대기중 몇몇 온실가스(CO₂, CFC, N₂O 그리고 대류권의 O₃)의 농도는 주로 인간활동으로 인해 증가해 왔다. 이들 온실가스의 일부는 대기중에서 수십년에서 수 세기의 긴 수명을 갖는데, 이것은 배출률 변화에 대한 온실가스의 대기중 농도의 반응이 느리다는 것을 의미한다. 이 밖에도 대류권의 에어로졸 농도가 적어도 지역적으로 증가하고 있다는 증거가 있다

(가) 이산화탄소 (CO₂)

1990년에 353ppmv를 나타내는 대기중 CO₂ 농도는 280 ppmv이었던 산업혁명 이전(1750-1800년)보다 약 25% 정도 더 높으며, 지난 160,000년 이래 가장 높게 나타났다. CO₂는 인간활동에 기인한 배출량의 증가로 인해 매년 약 1.8 ppmv(0.5%)씩 증가하고 있다. 인간활동에 기인한 CO₂의 배출량은 화석연료의 연소에 의한 것이 5.7±0.5 GtC(1987년)이며, 산림파괴에 의한 것이 0.6-1.2 GtC(1980년)인 것으로 추정된다. 지난 10년간 대기중의 CO₂ 증가는 동일 기간 동안 총 배출량의 48±8%에 해당하며, 나머지는 해양과 육지에 의해 흡수되었다

비록 기작에 대해서는 잘 이해되고 있지 않지만 간접적인 증거를 통해 볼 때, 육지와 해양은 거의 동일한 양의 CO₂를 흡수하는 것으로 보인다. 대기의 CO₂가 배출과 제거의 변화에 대해 반응하는데 소요되는 시간은 50~200년으로, 이것은

해양의 표층수와 심층수 사이의 느린 탄소 교환작용에 의해 결정된다 따라서, 오늘날 대기중 배출된 CO₂는 수세기 동안 미래의 대기중 CO₂ 농도에 영향을 미칠 것이다

인간활동에 기인한 CO₂의 배출량을 세가지 모델에 의해 계산한 결과를 통해서 대기중의 CO₂는 오늘날의 배출률로 유지된다 하더라도 2050년까지 415-480 ppmv, 2100년까지 460-560 ppmv로 상승할 것으로 예상된다. 오늘날의 수준으로 CO₂ 농도를 안정시키기 위해서는 인간에 의한 전지구적인 배출량을 현 수준의 60-80%까지 즉각 감소시켜야 한다

(나) 메 탄 (CH₄)

현재의 대기중 CH₄ 농도는 1 72 ppmv로서 0.8 ppmv였던 산업혁명이전보다 2배 높으며, 매년 약 0.015 ppmv(0.9%)씩 증가하고 있다 대류권에 있는 수산기(OH)와의 반응으로 인해 - CH₄의 주요 제거 반응 - 대기중의 CH₄ 수명은 비교적 짧은 약 10년이다

벼 재배(rice cultivation), 가축 사육(domestic ruminant rearing), 생물체 연소(biomass burning), 석탄 채광(coal mining), 그리고 천연가스 분출(natural gas venting)과 같은 인류활동은 대기중 CH₄의 유입량을 증가시키며, 대류권 OH 농도의 감소와 연계되어 전지구의 CH₄ 증가를 초래한다. 그러나 관측된 증가에 기여하고 있는 각 요인들의 정량적인 중요성은 현재 잘 알려져 있지 않다. 현재 수준으로 CH₄ 농도를 안정시키기 위해서는 전지구적으로 인류기원 CH₄ 배출을 15-20% 정도 즉각 감소시켜야 한다.

(다) 염화불화탄소 (chlorofluorocarbons, CFCs)

현재 인류기원에 의해 생산된 할로겐화탄소(halocarbon), CCl₃F(CFC-11), CCl₂F₂(CFC-12), C₂Cl₃F₃(CFC-113)과 CCl₄(carbon tetrachloride)의 대기중 농도는 각각 약 280 pptv, 60 pptv 그리고 146 pptv 이다 과거 수십년에 걸쳐 CCl₄를 제외한 CFC의 농도는 현재 적어도 매년 4%의 비율로 다른 온실가스보다 훨씬 빠르게 증가하고 있다 완전히 할로겐화된 CFC와 CCl₄는 주로 성층권의 광분해 작용에 의해 제거되며 대기중에서 50년 이상의 수명을 갖는다 CFC에 대한 규정을 강화하려는 국제협의로 인해 미래의 CFC 배출은 아마도 중단되거나 오늘날보다 상당히 줄어들 것이다. 그러나 대기중 CFC11, 12, 와 113의 농도는 그들의 대기중 수명이 길기 때문에 적어도 다음 세기 동안 여전히 상당량(현재의 30 - 40%) 존재할 것이다.

(라) 아산화질소 (N_2O)

현재 310 ppbv인 대기중 N_2O 농도는 산업혁명 이전보다 약 8% 증가했으며, 매년 0.8 ppbv(0.25%)씩 증가하고 있다. N_2O 의 주요 제거 기작인 성층권에서의 광분해 작용으로 대기중에서 비교적 긴 약 150년의 수명을 나타낸다. 현재 대기중의 N_2O 농도를 증가시키는 원인을 정량적으로 설명하기는 어렵지만 아마도 인류활동 때문인 것으로 사료된다.

최근의 자료를 보면 화석연료 연소와 생물체 연소(biomass burning)로 부터 발생하는 N_2O 의 양은 이전에 발표된 것보다 훨씬 적은 것으로 나타났다. 영농활동(agricultural practices)은 토양으로부터 N_2O 의 배출량을 증가시킬 수 있으며 중요한 역할을 한다. 현 수준으로 N_2O 농도를 안정시키기 위해서는 산업혁명 이래로 대기에 첨가된 N_2O 의 70-80%를 즉각적으로 감소시키는 것이 필요하다.

(마) 오존 (ozone· O_3)

오존은 대류권의 중층과 상층 그리고 성층권의 하층에서 특히 중요한 온실가스이다. 대류권에서 O_3 의 농도는 대기중에서 짧은 수명 때문에 변동이 매우 심하다. O_3 는 CO, CH_4 , non-methane hydrocarbons(NMHC)와 산화질소기(NO_x)를 포함하는 일련의 복합반응으로 현장에서 생산되며, 성층권으로부터 아래로 이동된다.

한정된 관측자료는 북반구의 8 km 상공 아래에서 O_3 의 경우 매년 약 1%의 증가경향을 나타내지만, 남반구에서는 거의 변화가 없다. 또한 성층권의 하부(25 km 아래)에서 지난 10여 년 동안 전지구적으로 수 %의 O_3 가 감소했다는 증거도 있다. 아직 권계면(tropopause) 부근에서의 장기간에 걸친 믿을만한 자료는 없다.

(바) 에어로졸 입자(aerosol particles)

에어로졸 입자는 대류권에서 기껏해야 수 주일의 수명을 가지며 농도의 변화가 매우 심하다. 구름작용과 방사균형에 영향을 미치는 대부분의 입자들은 황(S)의 배출로부터 발생한다. 화석연료의 연소로 인한 이들 입자의 배출량은 유럽과 북미의 산업화된 지역 주변에서 에어로졸 황산이온(sulfate)의 커다란 농도의 증가를 초래하였고, 전지구적으로도 2배 이상으로 증가하였다.

미래의 에어로졸 sulfate의 농도는 인간에 의한 온실가스의 배출량에 비례하여 변할 것이다. 자연 배출(생물학적)로 인한 에어로졸 입자는 기후의 되물림 과정에 기여할 수 있다. 대규모의 화산분출 후 수 년 동안 성층권의 자연적 에어로졸 입자의 농도는 매우 증가될 것이다.

3. 방사원동력 (Radiative Forcing of Climate)

지구로 들어오는 짧은 파장의 태양광선은 대기에서 산란되고 흡수되며, 지구에서 복사된 긴 파장(적외선)의 열은 대기에서 흡수된 뒤 재방출된다. 우리가 일상 경험하고 있는 것처럼 대기는 매우 동적으로 변화를 거듭하기 때문에 지구의 기후는 어떤 시간 규모에서도 변화 가능한 잠재적 요인을 갖추고 있다. 만일 기후계가 평형상태에 있다면 지구가 흡수한 태양에너지의 양과 지구가 외계로 방출한 에너지의 양은 정확하게 일치하여야 한다. 기후계에서 이들 에너지간의 균형을 교란하는 (즉, 잠정적으로 기후 변화를 일으킬 수 있는) 요인들을 방사원동력 매체라 하며, 여기에는 온실가스, 수증기, 태양방사에너지, 에어로졸 등이 있다.

방사원동력 매체중에 가장 관심의 대상이 되는 것은 방사학적 특성이 활발한 미량기체들(온실가스)이다. 이 기체들의 배출 또는 제거 기작이 변한다면, 대기중에서 이들의 농도는 곧 평형상태에서 이탈되어 기후변화를 초래하게 될 것이다. 현재 인류는 대기 중 농도가 증가하고 있는 온실가스(이산화탄소, 메탄, CFC와 산화질소 등)에 의한 지구온난화를 크게 우려하고 있다. 이밖에 온실가스는 아니지만 대기에서의 화학반응을 통해 온실가스를 간접적으로 생성하는 기체도 있다.

수증기는 단일 기체로는 가장 중요한 온실가스이지만 대류권에서 구름을 형성함으로써 직접적이기보다는 되물림 작용을 통해 간접적으로 기후변화에 영향을 미친다. 디메틸황(dimethyl sulfide, DMS)도 구름의 응축핵이 되는 황 에어로졸의 양에 영향을 주기 때문에 되물림 고리를 통해 간접적으로 기후에 주는 영향이 더 중요하다.

방사균형에 영향을 주는 다른 요인들 중 가장 명백한 것은 지구에 도달하는 태양에너지의 양이다. 지구와 대기가 흡수하는 태양에너지의 양은 광반사율(albedo)과 대기에 포함된 오존이나 수증기의 양에 의존한다. 지구의 광반사는 사막화와 같은 지표 변화에 크게 영향을 받는다. 지구의 광반사(planetary albedo)는 대류권의 수증기와 먼지 함량, 성층권의 화산재의 양 등에 지배를 받는다. 지구의 일광반사는 또한 인위적으로 배출한 먼지, 에어로졸 등의 구름 결정 응축핵으로 인해 추가로 형성된 구름의 양에 영향을 받는다. 에어로졸은 그 자체가 적외선을 흡수하는 능력을 갖고 있기 때문에 방사원동력에도 영향을 준다.

방사원동력 매체는 뒷부분에 자세히 언급될 것이지만, 향후 수십년 동안 온실가스에 의한 기후변화가 다른 어떤 매체보다도 중요하기 때문에 온실가스를 더욱 자세하게 다루기로 한다 특히 온실가스는 정책적으로 배출의 조절이 가능한 반면, 태양의 자체 변화라든지 화산의 폭발 따위는 전혀 인간이 통제할 수 없는 요인이다

이 장에서는 방사원동력 매체들이 과거에 어떻게 변화하여 왔는지 살펴보고, 후속 장에서는 몇가지 배출 시나리오를 이용하여 미래에 미칠 영향력을 알아보기로 하겠다. 이후의 논의는 기후변화 자체가 아니라 주로 온실가스의 상대적인 기여도에 대해 언급하게 될 것인데, 그 까닭은 세부적으로 원동력을 계산하는 편이 훨씬 정확한 근사값을 제공하기 때문이다 정책 입안에 있어서 가능한 전략을 평가하기 위해서는 각 온실가스의 상대적 중요성과, 이들의 배출을 감소시켰을 경우 각기 어느 정도 온난화를 감소시킬 것인가를 파악하는 것이 중요하다 이를 바탕으로 선택가능한 대안들의 경제성이 산출될 것이다 (예를 들면, CO₂를 줄일 것인지 아니면 CH₄를 줄일 것인지 등) 아직까지는 지구온난화 잠재력(global warming potential) 이외에 각 온실가스에 대한 이상적인 지표가 작성된 바 없다

가 온실가스(greenhouse gases)

전형적인 지구 평균에너지 수지를 보면 태양에너지중 약 절반 (0.2-0.4 μm 사이의 파장)은 지표면에 흡수되어 지표면을 가열시킨다 가열된 지표면은 열적외선(thermal infrared region, 4-100 μm) 방출하는데 이 에너지를 지구의 대기성분이 흡수하여 우주와 지표면으로 재방출한다 지표면으로 재방출된 에너지는 지표면을 추가로 온난화시키는데, 이러한 온난화를 온실효과라고 한다

온실효과의 세기(강도)는 외계에서 측정한 지구가 방출하는 복사에너지의 온도(255K)와 지구 표면 평균 온도 (285K) 의 차이로 측정할 수 있다 온실효과의 주성분은 대기중 온실가스들이며, 구름과 에어로졸 또한 적외선을 흡수하고 방출하여 지구의 광반사율을 증가시키기도 하지만, 이들의 순 효과는 지표면의 온도를 냉각시키는 것으로 믿어진다 대기의 기체중 가장 중요한 온실가스는 수증기이다 수증기가 현존하는 유일한 온실가스라고 가정할때 청명한 하늘의 중위도에서의 온실효과는 현재 온실효과의 약 60-70%에 해당한다. 같은 경우에 CO₂만 대기중에 존재한다면 그 크기는 현재 온실효과의 약 25% 정도에 해당된다

여기서는 여러 온실효과매체 가운데 온실가스 농도 변화에 의한 영향에 대해 주로 다루고자 한다 어떤 기체 분자의 적외선 흡수 세기와 파장 특성은 온실효과매체로서의 중요성을 파악하는데 매우 중요하다 이 밖에 온실가스의 대기중 농도의 증가도 매우 중요한데, 이것은 그 기체의 배출량과 대기중에서의 수명에 의해 좌우된다 더우기 온실효과가 작은 기체라도 기체간의 상호 화학작용을 통한 부산물로서 온실가스가 생성되어 지구온난화에 간접적으로 영향을 미치기 때문에 온실가스보다 중요성을 갖는 경우도 있다 게다가 온실가스의 상대적인 세기는 고려해야 하는 기간에 따라 그 영향도 다르다 예를 들어 강한 온실효과를 갖는 짧은 수명의 기체들은 단기적으로 중요하지만, 장기적으로는 온실효과가 약하더라도 수명이 긴 온실가스의 총 효과는 더욱 클 수 있다

따라서 방사원동력에 영향을 미치는 온실가스들의 세기를 평가하는 것은 그 세기를 어떻게 측정하는가에 따라 좌우된다 이에 대한 여러가지 접근방법들이 있으며 각 접근방법들을 구별하는 것이 중요하다 온실가스에 의한 방사원동력의 세기를 측정하는데 사용되는 중요한 지표는 다음과 같이 네가지가 있다

① 분자대비 상대적 방사원동력(relative molecular forcing)

이것은 서로 다른 온실가스의 분자 대 분자의 상대적 방사원동력으로서 일반적으로 CO₂를 기준으로 해서 나타낸다 대기중 일부 온실가스(CO₂, CH₄, N₂O)의 방사원동력은 적외선 흡수량이 농도에 따라 뚜렷한 비선형을 보이기 때문에 온실가스의 상대적 방사원동력의 세기는 계산에 쓰인 기체의 농도변화에 따라 좌우된다 그러나, 방사원동력에 대한 각 온실가스들의 기여도는 농도만으로 평가되어서는 안된다

② 질량대비 상대적 방사원동력(relative mass forcing)

이것은 분자대비 개념과 유사하지만 무게를 기준으로 한 상대값이다

③ 온실가스의 과거, 현재 및 미래에 대한 기여도

온실가스의 방사원동력에 대한 기여도는 상대적 또는 절대적일 수 있으며, 과거 또는 현재의 관측치 또는 미래에 대한 시나리오에서 주어진 기간 동안 방사원동력에 대한 온실가스의 기여도를 나타낸 것이다 상대적 측정방법인 ①과 ②는 분자나

질량을 기초로 한 것으로, CO₂의 방사원동력은 분자/분자 또는 kg/kg을 기초로 할 때 다른 온실가스들보다 비교적 약하기 때문에 CO₂의 영향이 경시될 수 있다 이 방법을 사용하면 CO₂의 농도변화가 다른 주요 온실가스의 농도변화보다 방사원동력에 미치는 영향이 100 - 10,000배 더 크다는 것을 알 수 있다. 이 방법으로 얻어진 결과를 해석할 때 주의를 기울여야 한다. 그 이유는 산업혁명이후의 방사원동력의 총변화로서 또는 10-50년의 단기간 동안의 방사원동력 변화에 대하여 고려한 시간이 각기 다르기 때문이다

④ 지구온난화 잠재력(global warming potential)

상기의 측정방법들은 배출량이 아니라 대기중의 농도변화를 기초로 하고 있다 그러나 정책적인 관점에서는 미래에서 온실가스 배출로 초래되는 영향을 평가하는 것이 훨씬 더 중요할지 모른다 본 측정방법은 어떤 온실가스 분자의 적외선 흡수력과 대기중에서 그 분자의 수명을 함께 고려하여 계산하는 것이다 또한 기체간의 화학반응으로 비롯된 간접적인 온실효과도 포함한다

(1) 온실가스의 직접 효과

대기중에 3개 이상의 원자로 구성된 기체분자들은 적외선(4-100 μm)을 흡수하고 방출하는 능력을 지니고 있다. 이러한 기체에는 수증기, CO₂ 및 오존이 포함되며 이들 기체의 흡수특성으로 인해 온실효과가 발생한다

온실효과의 세기를 결정하는 것은 지표면으로부터의 열적외선의 전송량 변화가 아니다 지표면 즉 지구경계층(planetary boundary layer)과 자유 대류권(free troposphere)은 대기의 운동을 통해 연결되어 있다 따라서 이들은 단일 열·동역학적 시스템으로 간주된다 결과적으로 온실가스의 방사원동력 변화는 지표면이 아닌 권계면(tropopause)에서의 방사에너지 변화를 의미한다

특히 흑체(black body) 복사에너지의 스펙트럼에 대한 온실가스 분자의 열흡수를 결정하는 데는 많은 요인들이 작용한다 중위도에서 청명한 날에 흑체에 의해 방출된 방사에너지의 파장 분포는 그림 23과 같으며 만약 어떤 온실가스가 지구가 방출하는 스펙트럼중 강한 방출 파장역에서 강력한 흡수대를 갖지 않는다면, 그 기체는 순 방사에너지 수지에 거의 영향을 미치지 못한다

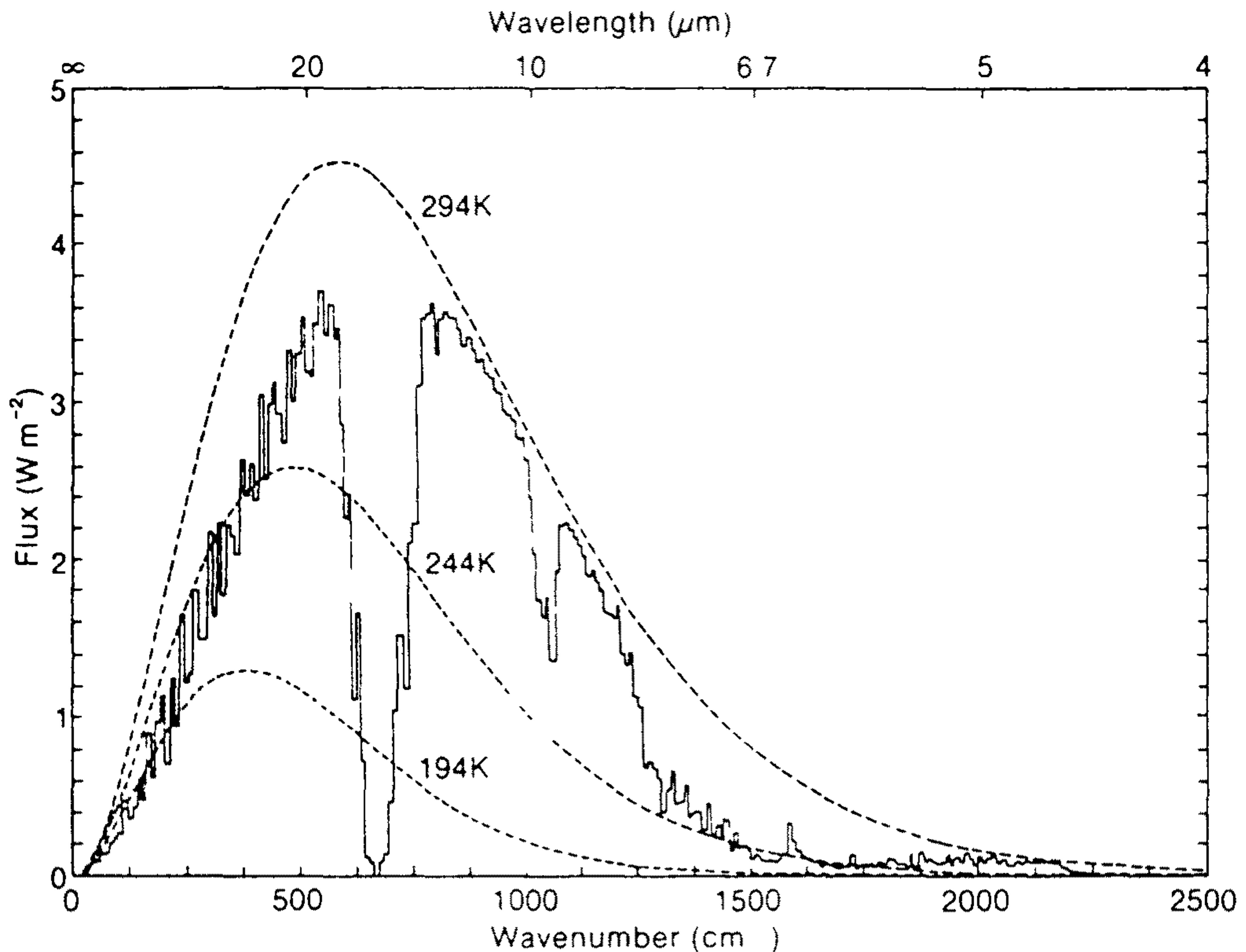


Figure 23 The dashed lines show the emission from a black body (Wm^{-2} per 10cm^{-1} spectral interval) across the thermal infrared for temperatures of 294K, 244K and 194K. The solid line shows the net flux at the tropopause (Wm^{-2}) in each 10cm^{-1} interval, using a standard narrow-band radiation scheme and a clear-sky mid-latitude summer atmosphere with a surface temperature of 294K (Shine pers comm)

그림 23은 청명한 중위도의 권계면에서 순방사에너지 전송량의 스펙트럼 변화를 나타낸 것이다. 예를 들면, 천연 CO_2 양은 많아서 $15\ \mu\text{m}$ 파장대 부근에서 대기는 매우 불투명하다. 이 파장역의 방사에너지를 흡수할 수 있는 소량의 온실가스의 첨가는 권계면에서 순 방사에너지 전송량에 거의 영향을 미치지 못한다. 그러나 대기에 대해 투명한 파장역(예를 들면 $10\text{-}12\ \mu\text{m}$ 의 파장역)에서는, 이 대역으로 방출되는 복사에너지가 권계면 상부의 성층권으로부터 유입되는 방사에너지와 균형을 이루지 못한다. 이런 투명한 스펙트럼 대역을 흡수할 수 있는 기체는 방사원동력에 훨씬 큰 영향을 미친다.

그 이유는 첨가된 오존이 지표면으로 입사되는 태양방사에너지의 일부를 흡수해 버리기 때문이다

표 10 기후 변화에 대한 방사원동력의 직접적인 영향과 대기중 미량 기체들간의 화학적 상호 작용

Gas	Greenhouse Gas	Is its tropospheric concentration affected by chemistry?	Effects on tropospheric chemistry? *	Effects on * stratospheric chemistry?
CO ₂	Yes	No	No	Yes, affects O ₃ (see text)
CH ₄	Yes	Yes reacts with OH	Yes affects OH, O ₃ and CO ₂	Yes, affects O ₃ and H ₂ O
CO	Yes, but weak	Yes reacts with OH	Yes affects OH, O ₃ and CO ₂	Not significantly
N ₂ O	Yes	No	No	Yes, affects O ₃
NO _x	Yes	Yes reacts with OH	Yes affects OH and O ₃	Yes, affects O ₃
CFC 11	Yes	No	No	Yes, affects O ₃
CFC-12	Yes	No	No	Yes, affects O ₃
CFC 113	Yes	No	No	Yes, affects O ₃
HCFC-22	Yes	Yes reacts with OH	No	Yes, affects O ₃
CH ₃ CCl ₃	Yes	Yes reacts with OH	No	Yes affects O ₃
CF ₂ ClBr	Yes	Yes photolysis	No	Yes, affects O ₃
CF ₃ Br	Yes	No	No	Yes, affects O ₃
SO ₂	Yes, but weak	Yes reacts with OH	Yes increases aerosols	Yes, increases aerosols
CH ₃ SCH ₃	Yes, but weak	Yes, reacts with OH	Source of SO ₂	Not significantly
CS ₂	Yes, but weak	Yes, reacts with OH	Source of COS	Yes, increases aerosols
COS	Yes, but weak	Yes, reacts with OH	Not significant	Yes, increases aerosols
O ₃	Yes	Yes	Yes	Yes

* - Effects on atmospheric chemistry are limited to effects on constituents having a significant influence on climate

성층권의 수증기는 중요한 온실가스이다 성층권 수증기의 주요 기원은 CH₄의 산화로서, 대기중의 CH₄ 농도가 증가하면 성층권의 수증기 농도 또한 증가할 것으로 기대된다 비록 기후변화가 성층권 수증기에 미치는 순 영향은 불명확하지만, 기후변화로 인해 수증기가 대류권으로부터 성층권으로 이동될 가능성이 있다

대기중에서 화석연료에 갇혀 있던 CH₄와 CO가 산화되면 CO₂가 추가로 생성된다

특정 온실가스의 대기중 현재 농도는 미래에 첨가될 기체의 분자가 가질 영향력을 지배한다. 자연적인 생성이 전혀 없거나 극히 적은 할로겐화탄소(halocarbons)와 같은 기체의 경우, 이 기체의 방사원동력은 현재 대기중 농도와 선형 관계를 갖는다. CH₄와 N₂O와 같은 온실가스는 대기중에서 이미 상당량의 방사에너지 흡수를 일으키고 있으리라고 추측되며, 이들의 방사원동력은 대략 농도의 제곱근에 비례하는 것으로 알려져 있다. 더우기 CH₄와 N₂O의 적외선 흡수대가 중첩되므로 이들 기체의 방사원동력을 계산하는 데 주의를 기울여야 한다. 이미 언급한 것처럼 CO₂의 경우 스펙트럼의 많은 부분이 이미 너무 불투명하여 추가로 첨가될 CO₂ 분자에 의한 방사원동력은 덜 효과적이며, 방사원동력은 농도에 대해 로그함수의 관계를 보인다.

또한 온실가스 분자들의 적외선 흡수 세기를 나타내는 분광세기(spectroscopic strength)를 고려하여야 한다. 할로겐화탄소(halocarbons)와 같은 분자들은 상대적 분자대비 상대적 원동력을 기초로 할 때 15 μm 파장을 흡수하는 CO₂보다 10배 이상 큰 세기를 갖는다. 그러나, 어떤 파장역의 실제 방사에너지 흡수력은 온실가스의 농도와 각 기체들의 분광세기의 복합함수이다.

(2) 온실가스의 간접 효과

많은 온실가스는 방사원동력에 대해 직접 효과와 더불어 대기중 기체들간의 상호 화학작용을 통해 기후에 간접적인 영향을 미친다. 대기중에서 이들 기체의 상호 화학작용은 표 10과 같다. 예를 들면 실측치나 이론치 모두 기체간의 상호작용에 의해 전리층과 대류권의 오존 농도를 변화시킨다고 지적하고 있다.

오존은 기후에 대해 두가지 측면에서 중요한 역할을 한다. 기후에 대한 오존의 영향은 대기중 오존의 총량 뿐만 아니라, 대기중에서 잘 혼합되는 CO₂나 다른 온실가스와는 달리 대류권과 성층권내에서 오존의 수직분포에 따라 크게 좌우된다.

기후에 대한 오존의 순 영향을 결정하는 것은 위 두가지 작용들 사이의 균형이다. 대류권 상부와 성층권 하부에서 오존 농도의 변화는 방사원동력을 결정하는데 가장 효과적이며, 오존의 농도가 증가하면 지표면을 온난화시키는 방사원동력도 증가한다. 지표면에서 약 30km 이상의 상공에 첨가된 오존은 지표면의 온도를 감소시킨다.

비록 대류권 또는 성층권에서 CO₂의 화학적 상호작용의 결과는 알려져 있지 않지만, 성층권에서 CO₂ 농도의 증가는 성층권 냉각작용을 통해 성층권 오존 농도에 영향을 미친다. 성층권 상부의 냉각은 촉매작용을 통한 오존의 파괴를 느리게 하여, 오존의 순 증가를 초래한다. 반면 오존 파괴기작이 다른 남극 성층권 하부에서의 냉각은 오존 파괴를 오히려 가속시킨다 (UNEP, 1989). 온실가스의 직접적인 영향과 더불어 간접적인 영향은 온실가스에 의해 초래되는 방사원동력의 실질적인 변화를 결정한다.

OH-라디칼은 그 자체로는 온실가스가 아니지만, 대류권에서 화학적 청소부로서 (chemical scavenger)의 역할이 매우 중요하다. OH와 대기중 온실가스의 반응은 주로 대기중 기체들의 수명을 결정함으로써 기후변화를 결정하는 많은 기체들의 농도를 조절한다. OH에 영향을 받는 기체로는 CH₄, CO, NMHCs, HCFCs, HFCs, CH₃CCl₃, H₂S, SO₂와 DMS 등이 있다. 이들 기체와 OH-라디칼과의 반응은 성층권에 도달하는 기체의 양을 결정할 뿐 아니라 대류권 오존의 생성에 영향을 미친다. 지구온난화의 결과로 기대되는 대류권의 수증기 농도 증가는 광화학적 반응을 통해 OH 라디칼을 증가시킨다. OH 라디칼과 온실가스 사이의 상호작용은 미래의 기후변화를 예측하는 데 중요하다.

(3) 방사원동력과 온실가스 농도와의 관계

간단한 에너지 균형 기후모델을 사용하여 기후변화와 과거, 현재 및 미래의 대기중 온실가스의 상대적인 중요성을 계산하기 위해서는 각 기체들의 방사원동력을 온실가스의 농도변화로 표현하는 것이 필요하다. 이것은 권계면에서 순 방사에너지 전송량 변화의 관점에서 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta F = f(C, C_0)$$

여기서 ΔF 는 온실가스의 부피 농도(volumetric concentration)가 C_0 에서 C 로 변할 때의 순 방사에너지 전송량(W/m²) 변화이다.

방사원동력은 권계면에서의 순 방사에너지 전송량 변화에 의해 결정된다. 그러나 Ramanathan 등과 Hansen 등에 의해 제시된 것처럼, 이들 변화를 평가하기 위해서는 매우 주의를 기울여야 한다. 빛에너지를 흡수하는 기체의 농도가 변하면 권계면에

뿐만 아니라 성층권에서도 방사에너지 전송량은 더 이상 평형상태를 유지하지 못한다. 몇몇 기체(특히, CO₂)의 경우 농도의 증가는 성층권을 냉각시킨다 그러나 다른 기체(특히, CFC)의 경우에는 농도의 증가가 성층권을 더욱 가열시킨다 (표 11)

표 11 시나리오에 의한 미래 온실가스 농도 변화와 방사원동력의 양상

TRACE GAS	RADIATIVE FORCING APPROXIMATION GIVING ΔF IN Wm ⁻²	COMMENTS
Carbon dioxide	$\Delta F = 6.3 \ln (C/C_0)$ where C is CO ₂ in ppmv for C < 1000 ppmv	Functional form from Wigley (1987), coefficient derived from Hansen et al (1988)
Methane	$\Delta F = 0.036 (\sqrt{M} - \sqrt{M_0})$ (f(M, N ₀) - f(M ₀ , N ₀)) where M is CH ₄ in ppbv and N is N ₂ O in ppbv Valid for M < 5ppmv	Functional form from Wigley (1987), coefficient derived from Hansen et al (1988) Overlap term, f(M, N) from Hansen et al (1988)*
Nitrous Oxide	$\Delta F = 0.14 (\sqrt{N} - \sqrt{N_0})$ (f(M ₀ , N) - f(M ₀ , N ₀)) with M and N as above Valid for N < 5ppmv	Functional form from Wigley (1987) coefficient derived from Hansen et al (1988) Overlap term from Hansen et al (1988)*
CFC-11	$\Delta F = 0.22 (X - X_0)$ where X is CFC 11 in ppbv Valid for X < 2ppbv	Based on Hansen et al (1988)
CFC-12	$\Delta F = 0.28 (Y - Y_0)$ where Y is CFC-12 in ppbv Valid for Y < 2ppbv	Based on Hansen et al (1988)
Stratospheric water vapour	$\Delta F = 0.011 (\sqrt{M} - \sqrt{M_0})$ where M is CH ₄ in ppbv	Stratospheric water vapour forcing taken to be 0.3 of methane forcing without overlap based on Wuebbles et al (1989)
Tropospheric ozone	$\Delta F = 0.02 (O - O_0)$ where O is ozone in ppbv	Very tentative illustrative parameterization based on value from Hansen et al (1988)
Other CFCs, HCFCs and HFCs	$\Delta F = A (Z - Z_0)$ where A based on forcing relative to CFC-11 in Table 2.4 and Z is constituent in ppbv	Coefficients A derived from Fisher et al (1990)

* Methane-Nitrous Oxide overlap term

$$f(M, N) = 0.47 \ln [1 + 2.01 \times 10^{-5} (MN)^{0.75} + 5.31 \times 10^{-15} M (MN)^{1.52}]$$

M and N are in ppbv
Note typographical error on page 9360 of Hansen et al (1988) 0.014 should be 0.14

권계면에서 방사원동력이 변하면 대류권의 온도는 일정하게 유지되는 반면, 성층권은 변화된 방사에너지 전송량에 맞추어 새로운 평형상태로 이동하게 된다. 그 결과 성층권 온도가 변화하고, 이로 인해 권계면으로의 방사에너지 방출량이 변해서 방사원동력이 변화된다

ΔF 와 ΔC 의 관계는 주로 온실가스의 농도에 의해 좌우된다. 온실가스가 저/중/고 농도인 경우, ΔF 는 각 기체들의 농도변화(ΔC)에 대해 선형/제곱근/로그함수 관계를 보인다. 오존의 경우 ΔF 와 ΔC 의 관계는 농도에 대한 상기의 어떠한 관계도 갖지 않는다. 그 이유는 빛에너지의 흡수작용과 기체 농도가 수직적으로 변하기 때문이다.

모델로부터 도출된 온실가스 농도와 방사원동력의 관계는 아래 연산을 하는데 쉽게 쓰일 수 있는 단순한 수식을 개발하는데 쓰이고 있다. 이러한 값들과 인용된 문헌이 표 11에 정리되어 있다

ΔF 는 주어진 ΔC 의 값이 가정된 온도와 수증기의 수직분포에 의존하기 때문에 커다란 공간적 차이가 존재할 것이다. ΔF 의 공간적 변화는 평균 운량의 공간적 분포변화에 의해서도 생길 수 있다. 이러한 요인들은 서로 다른 지역에서 총 방사원동력에 대한 각 온실가스의 상대적인 방사원동력의 차이를 유발할 수 있다.

위의 ΔF 와 ΔC 의 관계는 실제 오차가 포함되어 있다. 그 오차는 온실가스(특히, CFCs, HFCs 및 HCFCs)의 분광학적 자료(spectroscopic data)가 여전히 불확실하고, 특히 방사전이 모델(radiative transfer model)을 실행할 수치적 오차와 방사모델의 입력 자료 자체의 오차, 즉 온도와 수증기의 고도에 따른 농도변화 등이 가지는 불확실성 때문이다. 청명한 하늘의 ΔF 는 실제 구름이 있는 하늘보다 일반적으로 20% 더 크다.

서로 다른 온실가스의 직접적인 영향은 ΔF 와 ΔC 관계를 비교하면 쉽게 이해할 수 있다. 비교하는 방법에는 두가지가 있는데, 하나는 단위 부피에 대한 농도변화로 비교하는 것이고 나머지 하나는 단위질량에 대한 농도변화로 비교하는 것이다. 주요 온실가스에 대한 직접적인 방사원동력의 변화는 표 12와 같다. CFC-11에 대한 CFCs, HFCs 및 HCFCs의 상대적 방사원동력의 세기는 표 13과 같다. 표 13에 의하면 많은 CFC 대체물들도 강력한 적외선 흡광기체임을 알 수 있다.

표 12 대기중 단위 분자, 단위 부피 변화에 따른 이산화 탄소에 대한 상대적 방사원동력의 변화

TRACE GAS	ΔF for ΔC per molecule relative to CO_2	ΔF for ΔC per unit mass relative to CO_2
CO_2	1	1
CH_4	21	58
N_2O	206	206
CFC-11	12400	3970
CFC-12	15800	5750
CFC-113	15800	3710
CFC-114	18300	4710
CFC-115	14500	4130
HCFC-22	10700	5440
CCl_4	5720	1640
CH_3CCl_3	2730	900
CF_3Br	16000	4730
Possible CFC substitutes		
HCFC-123	9940	2860
HCFC-124	10800	3480
HFC-125	13400	4920
HFC-134a	9570	4130
HCFC-141b	7710	2900
HCFC-142b	10200	4470
HFC-143a	7830	4100
HFC-152a	6590	4390

표 13 CFCs의 방사원동력

TRACE GAS	$\Delta F / \Delta C$ per molecule relative to CFC11	$\Delta F / \Delta C$ per unit mass relative to CFC11
CFC-11	1.00	1.00
CFC-12	1.27	1.45
CFC-113	1.27	0.93
CFC-114	1.47	1.18
CFC-115	1.17	1.04
HCFC-22	0.86	1.36
HCFC-123	0.80	0.72
HCFC-124	0.87	0.88
HFC-125	1.08	1.24
HFC-134a	0.77	1.04
HCFC-141b	0.62	0.73
HCFC-142b	0.82	1.12
HFC-143a	0.63	1.03
HFC-152a	0.53	1.10
CCl ₄	0.46	0.45
CH ₃ CCl ₃	0.22	0.23
CF ₃ Br	1.29	1.19

(4) 과거 및 현재의 방사원동력의 변화

관측된 온실가스 농도(표 14)와 표 11의 값을 이용하면, 1765년-1990년의 방사원동력을 계산할 수 있다 (표 15) 표 14 중 1990년도 값은 최근 자료를 외삽하여 얻은 것이다 표 15는 메탄의 증가로 인한 성층권 수증기 증가에 의한 영향을 반영하고 있다

표 14 1765~1990의 미량가스 농도

YEAR	CO ₂ (ppmv)	CH ₄ (ppbv)	N ₂ O (ppbv)	CFC-11 (ppbv)	CFC-12 (ppbv)
1765	279.00	790.0	285.00	0	0
1900	295.72	974.1	292.02	0	0
1960	316.24	1272.0	296.62	0.0175	0.0303
1970	324.76	1420.9	298.82	0.0700	0.1211
1980	337.32	1569.0	302.62	0.1575	0.2725
1990	353.93	1717.0	309.68	0.2800	0.4844

표 15 미량가스 농도의 변화에 기인한 방사력

YEAR	SUM	CO ₂	CH ₄ direct	Strat H ₂ O	N ₂ O	CFC 11	CFC-12	Other CFCs
1765-1900	0.53	0.37	0.10	0.034	0.027	0.0	0.0	0.0
1765-1960	1.17	0.79	0.24	0.082	0.045	0.004	0.008	0.005
1765-1970	1.48	0.96	0.30	0.10	0.054	0.014	0.034	0.021
1765-1980	1.91	1.20	0.36	0.12	0.065	0.035	0.076	0.048
1765-1990	2.45	1.50	0.42	0.14	0.10	0.062	0.14	0.085

표 15는 기간별 온실가스의 방사원동력에 대한 기여도를 나타낸 것이다 이것을 그림으로 나타내면 그림 24와 같으며, 그림 25는 10년 단위로 방사원동력의 변화를 나타낸 것이다

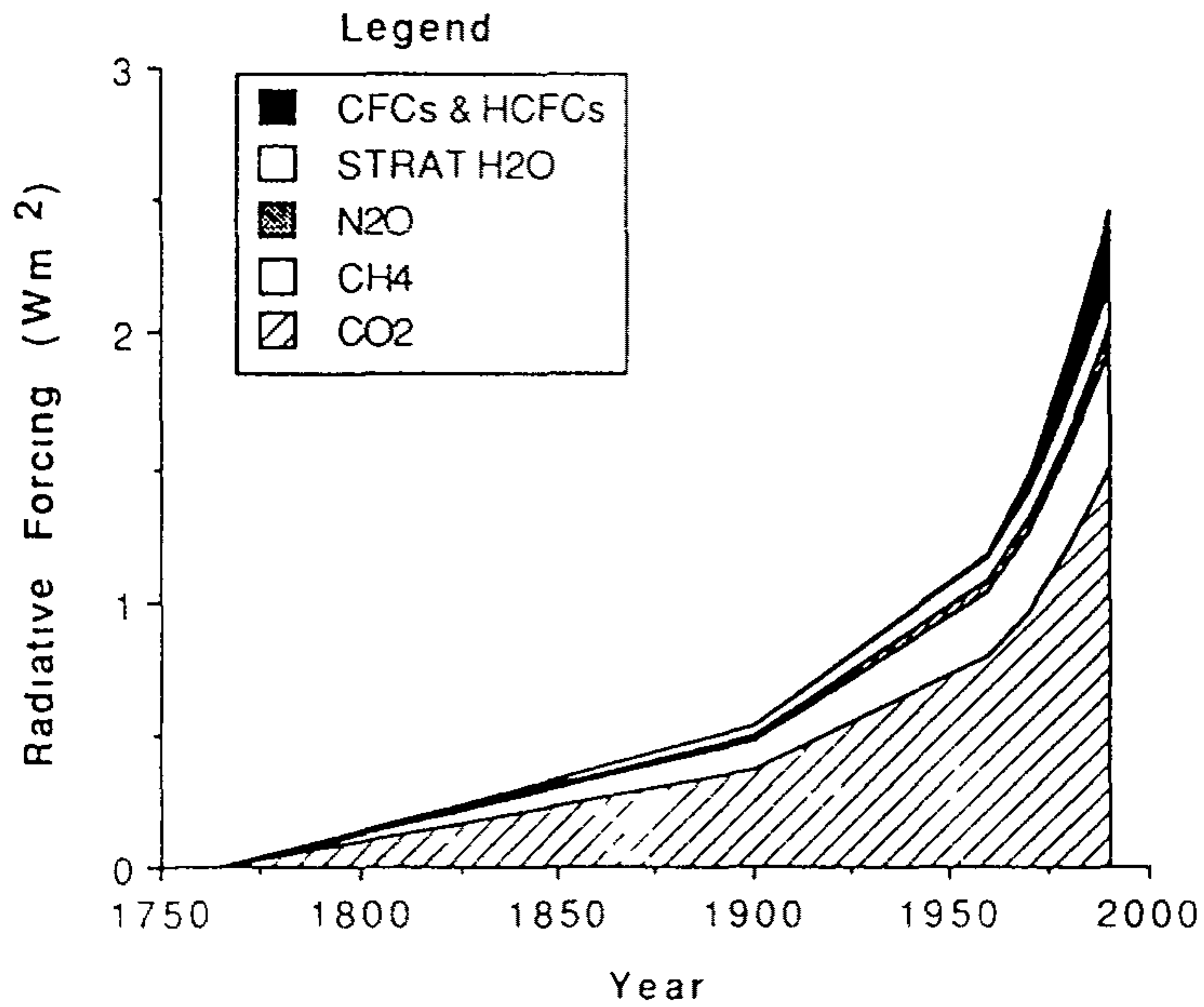


Figure 24 Changes in radiative forcing (Wm^{-2}) due to increases in greenhouse gas concentrations between 1765 and 1990

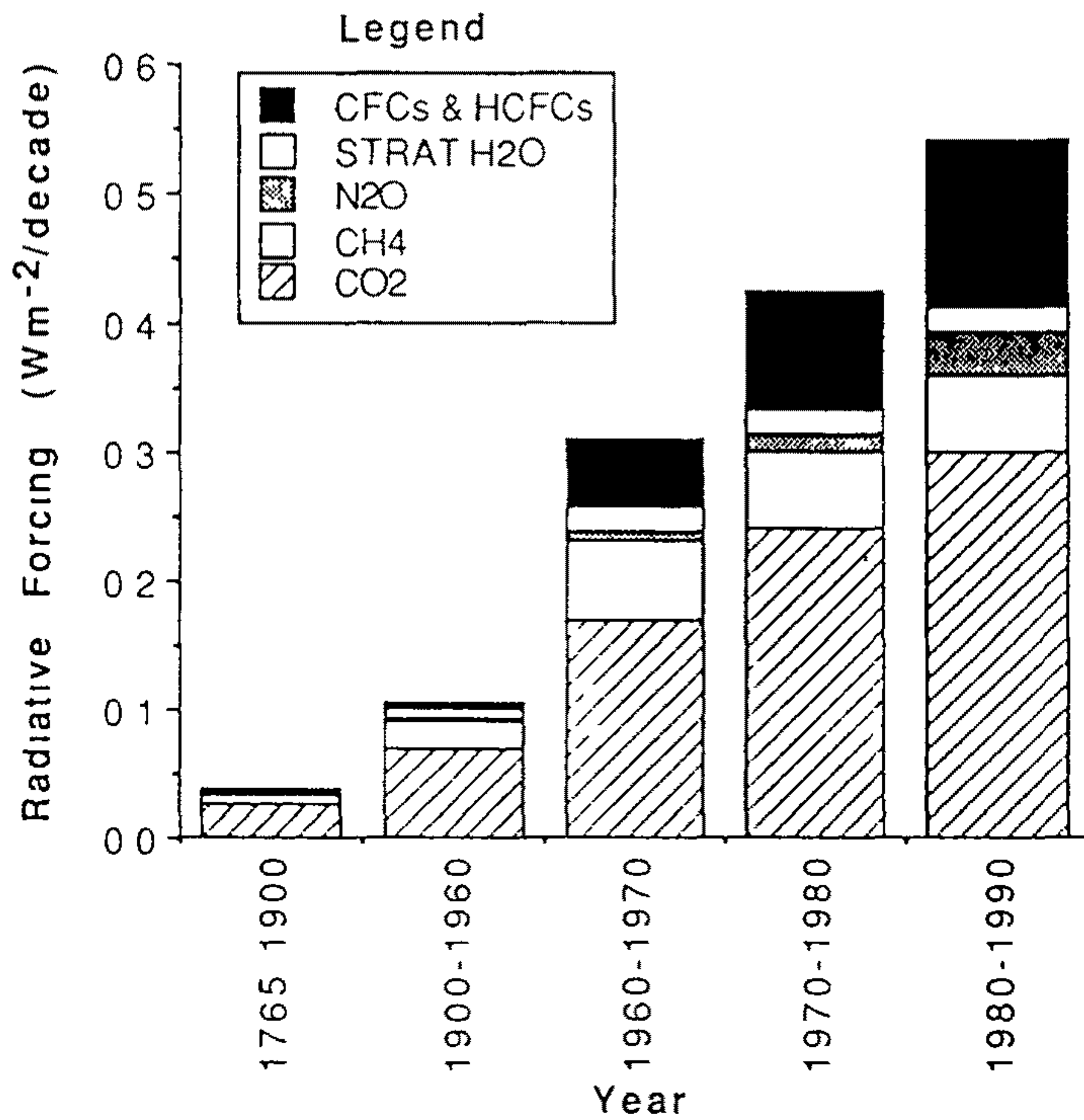


Figure 25 Decadal contributions to radiative forcing (Wm^{-2}) due to increases in greenhouse gas concentrations for periods between 1765 and 1990

CFC-11과 CFC-12 이외의 CFCs(HCFC-22, CFC-113 등)의 방사원동력에 대한 기여도는 243절의 농도변화와 표 11, 13으로부터 산출되었다. 이들은 CFC-11과 CFCs-12의 총 기여도의 43%에 해당하는 별도의 기여도를 가지는 것으로 추산된다

1765-1990년, CO₂는 총 방사원동력의 약 61%, CH₄는 17%, 성층권 수증기는 7%, N₂O는 4%, CFCs의 경우에는 12% 정도 기여했을 것으로 보인다. 1980-1990년 동안 CO₂ 농도변화는 방사원동력의 약 56% 정도 기여했으며, CH₄의 직접 기여도는 11%, 성층권 수증기는 4%, N₂O는 6%, CFCs는 24%이다

이 기간 동안 대류권 오존의 분포는 확실하게 변했으며 방사원동력에도 영향을 미쳤을 것으로 예상된다 그러나, 지구전체규모의 오존량 변화와 이에 따른 방사원동력 계산의 어려움 때문에 오존의 실제 효과는 확실하지 않다. 대류권 오존의 산업혁명 이전 농도와 표 11의 값을 이용하여 계산해 보면, 대류권 오존은 산업혁명 이래 총 방사원동력의 약 10%를 기여했다

70년대 중반 이후 성층권 하부에서 오존의 감소는 방사원동력의 감소를 초래했으며 이것은 대류권 오존에 의한 영향을 보상했을 가능성도 있다. 대류권과 성층권 오존 농도에 영향을 미치는 기작은 다소 다르기 때문에 이 보상작용은 우연히 발생된 것으로 보는 것이 좋다

(5) 미래의 방사원동력 계산

앞서 기술한 방사원동력과 IPCC의 4가지 시나리오로써 다음 세기 동안 가능한 방사원동력의 변화를 예측할 수 있다 이들 시나리오에는 성층권 수증기를 통한 CH₄의 간접적인 방사원동력에 대한 효과는 포함되어 있는 반면, 오존 농도변화에 의한 효과는 고려되지 않았다

각 시나리오에서 모든 CFC 대체물은 HCFC-22로서 나타내었다. HCFCs와 HFCs의 방사원동력의 세기는 분자대비로 볼 때 비슷하기 때문에 다른 CFC 대체물의 대리자로서 HCFC-22를 사용할 경우 오차는 작다 그러나 시나리오에서 고려된 CFC 대체물의 농도는 HCFC-22의 수명과 분자량을 가정하여 계산되었기 때문에 방사원동력에 대한 상당한 오차가 농도의 차이에 의해 발생한다. 일부 CFC 대체물은 HCFC-22보다 수명이 길고, 일부는 짧기 때문에 사용된 대체물의 정확한 혼합율을 모르면 오차를 계산할 수 없다

그림 26은 4가지 시나리오로부터 각 온실가스에 대한 방사원동력의 변화를 산업혁명 이전에 대비하여 나타낸 것이며, 그 결과는 표 16과 같다

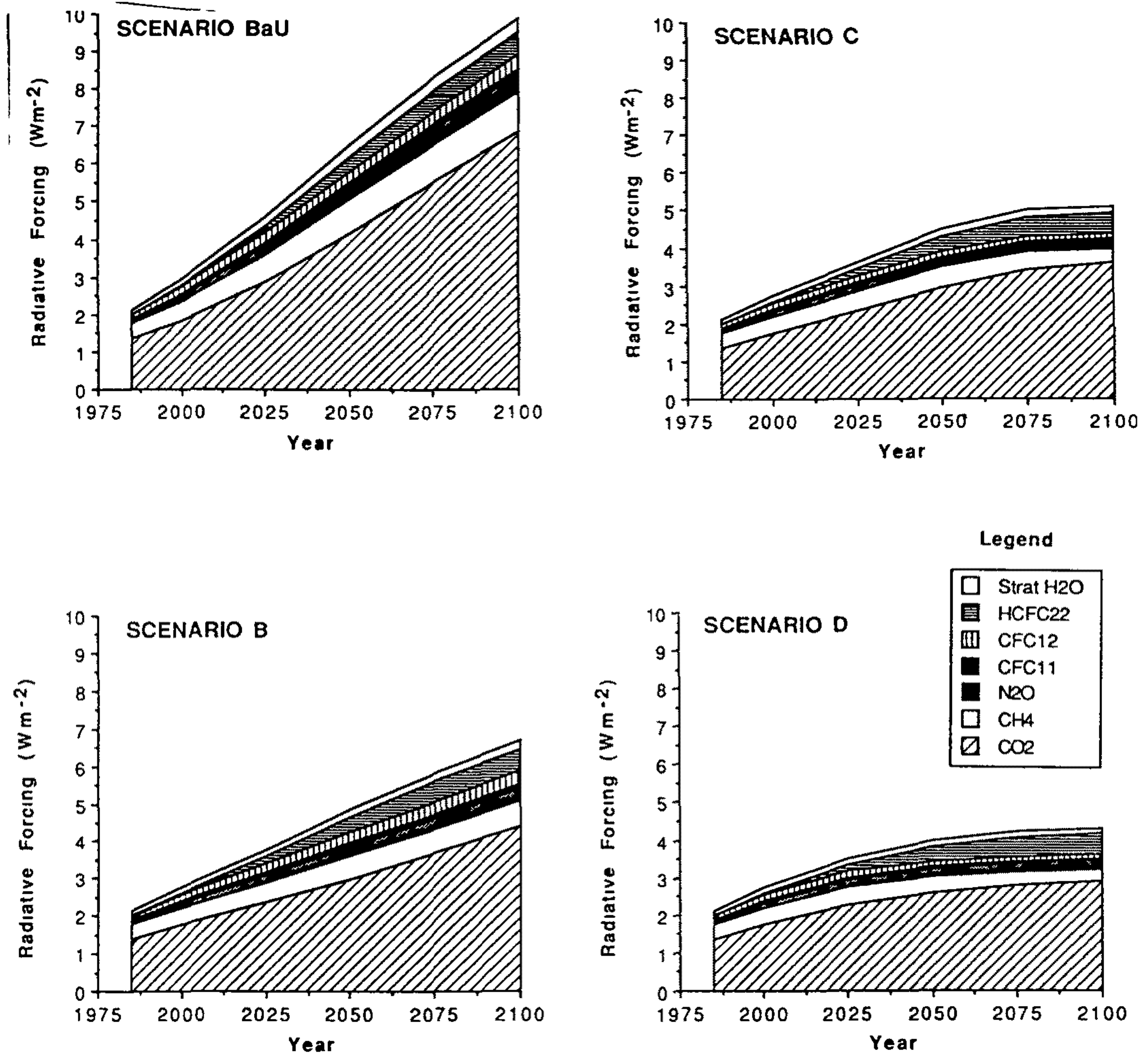


Figure 26 Possible future changes in radiative forcing (Wm^{-2}) due to increases in greenhouse gas concentrations between 1985 and 100 using the four policy scenarios

각 시나리오에서 선정된 기간 동안 CO₂는 방사원동력 변화에 가장 중요한 기여자로 나타났다 예를 들면, business-as-usual 시나리오에서 방사원동력 변화에 대한 CO₂의 기여도는 항상 60%를 초과한다

표 16 4가지 정책적인 시나리오에 관한 방사원동력의 변화

SCENARIO A (Business-as-Usual)

YEAR	SUM	CO ₂	CH ₄ direct	Strat H ₂ O	N ₂ O	CFC-11	CFC-12	HCFC- 22
1765-2000	2.95	1.85	0.51	0.18	0.12	0.08	0.17	0.04
1765-2025	4.59	2.88	0.72	0.25	0.21	0.11	0.25	0.17
1765-2050	6.49	4.15	0.90	0.31	0.31	0.12	0.30	0.39
1765-2075	8.28	5.49	1.02	0.35	0.40	0.13	0.35	0.55
1765-2100	9.90	6.84	1.09	0.38	0.47	0.14	0.39	0.59

SCENARIO B (Low Emissions)

YEAR	SUM	CO ₂	CH ₄ direct	Strat H ₂ O	N ₂ O	CFC-11	CFC-12	HCFC- 22
1765-2000	2.77	1.75	0.45	0.16	0.11	0.08	0.17	0.04
1765-2025	3.80	2.35	0.56	0.19	0.18	0.10	0.24	0.17
1765-2050	4.87	2.97	0.65	0.22	0.23	0.11	0.29	0.39
1765-2075	5.84	3.69	0.66	0.23	0.28	0.12	0.33	0.53
1765-2100	6.68	4.43	0.66	0.23	0.33	0.12	0.36	0.56

SCENARIO C (Control Policies)

YEAR	SUM	CO ₂	CH ₄ direct	Strat H ₂ O	N ₂ O	CFC-11	CFC-12	HCFC- 22
1765-2000	2.74	1.75	0.44	0.15	0.11	0.08	0.17	0.05
1765-2025	3.63	2.34	0.51	0.17	0.17	0.07	0.17	0.20
1765-2050	4.49	2.96	0.53	0.18	0.22	0.05	0.14	0.41
1765-2075	5.00	3.42	0.47	0.16	0.25	0.03	0.12	0.55
1765-2100	5.07	3.62	0.37	0.13	0.27	0.02	0.10	0.57

SCENARIO D (Accelerated Policies)

YEAR	SUM	CO ₂	CH ₄ direct	Strat H ₂ O	N ₂ O	CFC-11	CFC-12	HCFC- 22
1765-2000	2.74	1.75	0.44	0.15	0.11	0.08	0.17	0.04
1765-2025	3.52	2.29	0.47	0.16	0.17	0.07	0.17	0.20
1765-2050	3.99	2.60	0.43	0.15	0.21	0.05	0.14	0.40
1765-2075	4.22	2.77	0.39	0.13	0.24	0.03	0.12	0.53
1765-2100	4.30	2.90	0.34	0.12	0.26	0.02	0.10	0.56

2025 - 2050년의 25년간 HCFC-22의 기여도는 business-as-usual 시나리오의 경우 11%, 시나리오 B의 경우 18%의 기여도를 보인다

염소(CI)는 적어도 다음 10년 동안 성층권에서 증가할 것으로 기대되기 때문에, 성층권 오존은 더욱 감소될 것이다. 성층권 상부의 오존이 감소하게 되면 소규모 지구온난화가 초래되는 반면, 성층권 하부의 오존이 감소하면 냉각효과가 초래된다

성층권 하부의 오존의 1% 감소는 방사원동력을 0.05 W/m^2 로 변화시키며 이 정도의 변화는 10년 정도 시간규모에 있어 중요하다. 국제협약의 결과로 염소 농도가 감소하면, 수십년 동안 성층권 오존은 느리게 회복될 것이며 이 기간 동안 방사원동력이 소규모 더 추가될 것이다

(6) 온실가스의 온난화 잠재력 개념

온난화에 대응하기 위한 정책방안을 선택할 때 방사원동력에(즉, 기후변화)에 미치는 각 온실가스의 상대적인 기여를 표현하는 방법이 필요하다. 이때 유용한 방법의 하나는 주 온실가스인 CO₂에 대한 다른 기체들의 상대적인 값을 사용하는 것이다

몇가지 온실가스는 수명이 매우 길어서 지금부터 수십년 또는 수백년간 영향력을 행사하게 될 것이므로 '잠재력'이란 단어를 부가하였다. 정책입안자들에게 가장 큰 관심거리는 각 온실가스 배출에 따른 상대적인 방사원동력의 변화이다. 현재로서는 이에 관련된 모든 요인을 종합적으로 반영하는 지구온난화 잠재력(global warming potential: GWP)을 계산하는 방법이 없다. 따라서, 아래에 소개하는 방법이 현재 많은 불확실성, 불일치, 오차 등의 문제를 포함하고 있음에도 불구하고 지구온난화 잠재력의 개념 자체가 매우 중요하기 때문에 일차적인 계산을 시도해 본다

온실가스의 온난화 잠재력은 온실가스 1 kg을 순간적으로 배출했을때 부가되는 기후원동력을 시간에 대해 적분하고 이를 CO₂ 1 kg 배출에 대한 상대값으로 표현한다

$$GWP = \frac{\int_0^n a_i c_i dt}{\int_0^n a_{CO_2} c_{CO_2} dt}$$

여기서 a_i 는 온실가스(i)의 단위 농도에 대한 방사원동력이며, c_i 는 온실가스가 배출된 후 t 시간에 남아 있는 기체(i)의 농도이다 n은 계산이 행해진 기간을 나타낸다 이에 상응하는 CO₂의 값은 분모에 있다

지구온난화 잠재력의 개념은 특정 온실가스가 순간적으로 대기로 배출되는 경우를 고려했다 온실가스의 농도는 시간에 따라 감소하며, 그 기체가 대기중에 존재하는 동안 온난화를 일으킨다 만일 온실가스의 농도 감소가 대기중에서 화학작용에 의한 것이라면, 이 반응의 부산물은 또다른 온난화를 일으킬 것이다 현실적인 온실가스 배출 시나리오는 시간에 따른 배출량 크기의 변화와 배출량이 감소하는 경우도 함께 고려해야 할 것이다

현재의 GWP를 계산하는 과정에서 앞으로는 온실가스(특히 CO₂)의 대기중 수명과 미래의 기체들의 수명 변화, 어떤 온실가스의 방사원동력이 그 기체 농도와 흡광스펙트럼 상에서 중복되는 흡수대를 갖는 또다른 기체 농도에 의존하는 경우, 배출된 온실가스의 간접적인 효과 등을 고려하여야 한다

환경영향평가는 평가대상별로 온실가스가 일시에 배출된 후 적절한 시간 동안에 걸쳐 누적된 온난화를 평가하는 것이 중요하다 해수면 상승의 경우, 100년 또는 그 이상 동안의 온난화를 평가하는 것이 적당하다 예를 들면, 육지에서의 변화를 평가하기 위하여 수십년의 기간을 설정할 수도 있다

이러한 이유 때문에 표 17은 20, 100, 500년의 시간규모에 대한 각 온실가스의 GWP를 나타내었다 표 17의 수치는 아직 예비적인 것들이다 대류권 화학에 대한 모델화가 어렵기 때문에 메탄과 많은 CFC의 수명은 불확실하다

많은 불확실성을 염두에 두더라도, 표 17로부터 중요한 결과를 많이 얻을 수 있다 첫째, 20년 동안 CFC(수명이 짧은 HCFC-123과 HFC-152a은 제외) 1 kg은 CO₂ 1 kg보다 1000배 더 큰 온난화 세기를 가진다 그러나 CFC 대체물(HCFC)의 경우(CFC-11, 12, 113, 114, 115는 제외) 적분시간이 증가함에 따라 GWP는 급격히 감소한다 이것은 동일량이 배출될 경우 장기간에 걸친 CFC 대체품(HCFC)의 지구온난화 효과는 CFC보다 훨씬 적음을 의미한다 더우기 온실가스의 수명이 짧다는 것은 총 배출량에 갑작스러운 변화가 있을 때 이 기체가 실제 지구온난화에 비교적 빠르게 영향을 미친다는 것을 의미한다

표 17 이산화 탄소에 대한 각 미량위소 1kg 주입에 따른 지구 온난화의 잠재력

Trace Gas	Estimated Lifetime, years	Global Warming Potential		
		Integration Time Horizon, Years		
		20	100	500
Carbon Dioxide	*	1	1	1
Methane - inc indirect	10	63	21	9
Nitrous Oxide	150	270	290	190
CFC 11	60	4500	3500	1500
CFC 12	130	7100	7300	4500
HCFC 22	15	4100	1500	510
CFC 113	90	4500	4200	2100
CFC 114	200	6000	6900	5500
CFC 115	400	5500	6900	7400
HCFC 123	16	310	85	29
HCFC-124	66	1500	430	150
HFC 125	28	4700	2500	860
HFC 134a	16	3200	1200	420
HCFC 141b	8	1500	440	150
HCFC 142b	19	3700	1600	540
HFC 143a	41	4500	2900	1000
HFC 152a	17	510	140	47
CCl ₄	50	1900	1300	460
CH ₃ CCl ₃	6	350	100	34
CF ₃ Br	110	5800	5800	3200
INDIRECT EFFECTS				
Source Gas	Greenhouse Gas Affected			
CH ₄	Tropospheric O ₃	24	8	3
CH ₄	CO ₂	3	3	3
CH ₄	Stratospheric H ₂ O	10	4	1
CO	Tropospheric O ₃	5	1	0
CO	CO ₂	2	2	2
NO _x	Tropospheric O ₃	150	40	14
NMHC	Tropospheric O ₃	28	8	3
NMHC	CO ₂	3	3	3

CFCs and other gases do not include effect through depletion of stratospheric ozone
 Changes in lifetime and variations of radiative forcing with concentration are neglected The effects of N₂O forcing due to changes in CH₄ (because of overlapping absorption) and vice versa are neglected

* The persistence of carbon dioxide has been estimated by explicitly integrating the box diffusion model of Siegenthaler (1983) an approximate lifetime is 120 years

표 17에 기록된 간접적인 온난화는 잠재적으로 매우 중요하다. CH₄의 배출결과로 인한 CO₂, 성층권의 수증기, 대류권 오존의 생성은 100년 이상의 기간에서는 직접효과와 거의 같은 크기의 간접효과가 있다. 지구온난화에 간접적으로 기여하는 CO, NO_x, non-methane hydrocarbon(NMHC)와 같은 기체의 잠재력 또한 중요하다. 이들 온실가스의 간접효과는 모델에 따라 매우 다르게 계산되므로 앞으로 많은 개선과 평가가 요구된다.

GWP 계산의 한가지 예로 표 18은 1990년 인간에 의해 배출된 온실가스에 대해 앞으로 100년 동안의 GWP를 나타낸 것이다.

표 18 잠재적 지구 온난화 (Global Warming Potential) 이용의 예

TRACE GAS	Curret Man Made Emissions Tg yr ⁻¹	Proportion of total sffects %
CO ₂	26000	61
CH ₄	300	15
N ₂ O	6	4
CFC-11	0.3	2
CFC-12	0.4	7
HCFC-22	0.1	0.4
CFC-113	0.15	1.5
CFC-114	0.015	0.2
CFC-115	0.005	0.1
CCl ₄	0.09	0.3
CH ₃ CCl ₃	0.81	0.2
CO	200	1
NO _x	66	6
NMHC _s	20	0.5

Carbon dioxide emissions given on CO₂ basis
equivalent to 7Gtc yr⁻¹ Nitrous oxide
emissions given on N₂O basis equoalent to 4
Mtn yr⁻¹ NO_x emissions given on NO₂ basis
equivalent to 20 Mtn yr⁻¹

1990년 배출물과 GWP 값을 곱하여 구한 값은 이 기간 동안 CO₂는 총 방사원동력의 약 61%를 기여할 것이며, 전적으로 간접 효과만을 갖는 NO_x는 6% 정도를 기여할 것으로 나타났다

나 기타 방사원동력 매체

(1) 태양방사에너지

태양은 지구 기후계에 대한 가장 중요한 에너지원이다 지구가 받는 태양에너지 양의 변화는 기후에 영향을 미치며, 두가지 원인에 의해 결정된다 첫째는 거의 모든 시간규모에 걸쳐 나타나는 태양 자체의 물리적인 변화(총 일사량 변화)이며, 둘째는 약 10,000-100,000 년의 시간규모를 갖는 지구-태양 궤도의 변화이다

(가) 태양의 총 일사량 변화

기후변화에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 바로 태양에너지 그 자체이다 태양에너지의 변화는 태양표면의 활동변화에 의해 일어나며, 그 대표적인 것으로 11년 주기의 태양흑점 활동이 있다

태양상수(solar constant)는 전 파장역을 적분한 값(총 일사량)이다 1978년 이래로 총 일사량을 인공위성에서 연속적으로 관측하고 있는데, 관측자료를 보면 수일에서 10년의 시간규모에 걸쳐 태양외층에서 광구(photosphere), 태양흑점 및 흰반점(faculae)의 활동과 관련되어 일사량에 변화가 나타나고 있다 고주파역의 태양에너지는 변화가 너무 빨라 기후변화에 별다른 영향을 미치지 못하는 것으로 평가되고 있다. 그러나 11년 주기의 태양흑점 활동과 관련된 저주파대 태양에너지는 기후에 영향을 미칠 수 있다 연구 결과에 따르면 태양흑점이 많을 때 일사량은 오히려 증가한다

1980-1986년 동안 고층대기(TOA top of atmosphere)에서 0.2 W·m²의 전지구 평균 방사원동력 감소에 해당되는 약 1 W·m²의 일사량이 감소하였다. 이것은 동기간 약 0.3 W·m² 증가한 온실효과에 의한 방사원동력과 비교될 크기이다. 그러나 Wigley와 Raper에 의하면 해양의 열 관성(thermal inertia)이 매우 큰데 반해 태양흑점주기가 너무 짧아 방사원동력의 극히 일부만이 기온변화로 나타날 수 있다고 주장하였다

즉 짧은 주기로 증감을 반복하는 총 일사량에 의한 영향은 장기적인 관점에서 볼 때 꾸준히 지속적인 영향을 미치는 온실효과에 비해 효력이 훨씬 작다고 인식되고 있다

(나) 태양-지구궤도 변화

신생대 제 4기 동안 10,000-100,000년 시간 규모에서의 지구 기후변화(특히 빙하기의 시작과 후퇴)는 지구 궤도 변화 주기와 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다. 장주기를 갖는 지구 궤도의 변화로는 세가지 현상이 잘 알려져 있다. 약 92,000년 주기를 갖는 지구 공전궤도의 이심률(eccentricity) 변화, 약 41,000년 주기를 갖는 황도 경사(지구의 적도면과 공전면과의 각도)의 변화 (obliquity), 약 22,000년 주기의 지구 자전축과 공전축의 세차운동(precession)이 계절적, 위도 별로 입사되는 태양 에너지 분포에 변화를 수반한다(이를 미란코비치 효과라 한다). 특히, 이심률의 변화는 세차운동이나 황도경사 변화와는 달리 고층대기에 도달하는 태양에너지의 양에 변화를 초래한다는 점에 주목할 필요가 있다.

미란코비치 효과와 강화된 온실효과에 의한 방사원동력의 크기를 비교해 보기 위해 미란코비치 효과에 의한 방사원동력을 특정 시기의 특정 위도에 대해 계산해 보면 과거 10,000년 동안 북위 60도, 7월에 입사된 태양에너지는 $35 \text{ W}\cdot\text{m}^2 (= -0.035 \text{ W}\cdot\text{m}^2/10 \text{ years})$ 정도 감소되었다. 그런데 이 값은 가장 최근 10년 동안 온실효과에 의한 방사원동력이 $0.6 \text{ W}\cdot\text{m}^2$ 증가한 것과 비교해 볼 때 미란코비치 효과에 의한 방사원동력 감소량이 1/15 이하로서 태양방사에 의한 효과는 온실효과에 훨씬 못 미침을 알 수 있다.

(2) 에어로졸

대기중에 떠 있는 $0.001-10\mu\text{m}$ 크기의 액상 및 고체상 에어로졸은 입사되는 태양빛과 지구로부터 복사되는 적외선을 산란시키고 흡수하며 구름의 물리적 광학특성을 변화시켜 결과적으로 기후계 방사균형에 커다란 변수로 작용한다. 그럼에도 불구하고 에어로졸에 의한 영향을 평가하기는 성분 및 크기의 다양성, 시공간적 분포 파악의 어려움 및 잦은 변화로 매우 어렵다.

그 한 예로 바다위의 에어로졸은 광반사를 증가시키는 반면 사막위의 것은 광반사를 감소시킨다

화산분화에 의해 성층권(stratosphere)에 도달한 에어로졸은 상당한 크기의 방사원동력을 가진다. 이들에 의한 태양에너지 감소는 총 일사량의 5-10%에 이를 것으로 평가된다 특히, 대규모 화산 폭발(예를 들면, 엘 치촌(Chichon) 분화)은 최근 10년(1980-1990) 평균 온실효과에 의한 방사원동력의 1/3에 해당되는 위력을 가진다. 더우기 지역적이고 단기간에 걸친 화산의 효과는 훨씬 심각하다 일반적으로 대규모 화산 폭발후 1-2년간 0.1-0.2°C의 냉각 효과가 나타나며, Ramanathan의 계산에 의하면 화산 1개의 방사원동력은 0.2-0.4 W·m²로서 적어도 10년 단위 기후변화에 있어 상당한 영향을 미치는 것으로 인정된다 (참고로 금세기에는 다섯 번의 대규모 화산 폭발이 있었다) 그런데, 화산분출시 온실가스도 대기로 공급되며, 성층권에서 만들어진 에어로졸에 의한 냉각은 시간에 따라 축소될 것이므로, 실제 장기적인 관점에서 화산의 방사원동력에 의한 기후 변화의 증거가 제시된 바 없다

에어로졸은 구름 결정의 응축핵으로 작용한다 실제 대도시위에서 형성되는 구름의 입자수는 바다위에서 형성된 구름에 비해 밀도가 열 배 가량 높음이 알려졌다 그리고 대기오염이 심한 곳에서 만들어진 구름의 광반사율이 더 높다는 것이 발견되었다 북반구에서 지난 1세기 동안 증가해 온 인위적인 황(아황산, SO₂)의 배출은, 황이 에어로졸을 형성하여 방사원동력에 영향을 미치고 또한 구름의 광반사 특성을 변화시켜 지구를 냉각시키는 데 일익을 담당한 것으로 보인다. Wigley는 20세기 초반에 북반구에서 남반구에 비해 온난화가 서서히 진행된 것은 산업화로 배출이 증가된 황에 의해 형성된 구름의 효과 때문이라고 제시하였다 황 배출에 의한 방사원동력은 정확하게 제시할 수는 없지만 아마도 금세기 초 온실효과 크기를쇄감할 수 있는 정도로서 그 크기는 -0.03~-0.15 W·m²/10년 범위로 추정된다 현재 황의 배출은 감소 추세에 있으며, 황이 대기에 머무르는 시간이 짧기 때문에 황의 영향은 전 세계적이라기 보다는 지역규모에서 효과가 더욱 클 것이다 미래에 황 배출로 인한 효과가 온난화를 가중시킬지 아니면 억제하는 방향으로 작용할지는 알 수 없으며, 황 배출 자체도 증가될지 감소될지는 미지수이다

(3) 지표면 특성

Sagan 등과 Henderson-Seller와 Gornitz는 각기 사막화(desertification), 토양염화(salinization), 온대와 열대의 산림파괴와 도시화가 광반사율의 절대값에 미치는 영향이 지난 천년간은 6×10^{-3} 그리고 최근 25-30년간에 최대 $3.3-6.4 \times 10^{-3}$ 범위였다고 보고하였다. Hensen 등이 제안한 식에 따르면 방사원동력은 $\Delta F = -43 \Delta x$, ($\Delta x \leq 0.1$) 로서 산출되며 이때 Δx 는 광반사율의 변화이다. 이로부터 산출된 최근 수십년간의 방사원동력 증가는 최대 $0.03 \text{ W} \cdot \text{m}^2$ 로 지표면 변화로 비롯된 온난화는 별로 크지 않다. 그러나 국지적으로 물의 수지 변화 및 지표면 거칠기 변화로 인한 영향은 훨씬 큰 의미를 가질 수 있다.

다 미래의 방사원동력 매체의 상대적 중요성

온실가스 농도의 과거 경향과 미래에 대한 예측 분석은 앞으로 수십년 동안 10년당 $0.4-0.6 \text{ W} \cdot \text{m}^2$ 정도로 방사원동력이 증가할 것으로 내다보고 있다. 10년 기간의 변화에는 태양흑점주기 및 화산 활동이 중요한 자연요인으로 작용한다. 그 외 인위적인 것으로는 황 배출로 인한 저층 대기중 에어로졸 양의 증가를 들 수 있다. 이러한 기타 요인이 10년 및 더 큰 시간규모에서 온실가스의 영향을 어떻게 변모시킬 수 있는지를 아는 것 또한 중요할 것이다. 왜냐하면 이들은 온실효과를 증감시킬 수도 있으며 완전히 소멸시킬 가능성도 있기 때문이다. 그림 27은 태양, 화산분출과 인류에 의한 황 배출에 의해 가능한 방사원동력의 변화를 다음 10년간 네가지 시나리오상의 온실가스의 방사원동력 $0.41-0.56 \text{ W} \cdot \text{m}^2$ 과 비교한 것이다. 10년간 일사량 변동의 크기는 $\pm 0.1 \text{ W} \cdot \text{m}^2$, 화산분출은 $-0.2 \text{ W} \cdot \text{m}^2$ 로 추정되었다. 황 배출은 광반사율 증가를 통해 $-0.15 \text{ W} \cdot \text{m}^2$ 정도의 영향을 미치리라고 예상되나 나머지 요인에 대해서는 전혀 알지 못하고 있다. 화산분출과 황 배출은 지역규모에서 그 영향이 더욱 클 것으로 예상되며, 남반구에서는 황 배출에 의한 효과가 미미할 것으로 전망된다.

기타 방사원동력은 10년 규모에서 온실가스 원동력에 비해 더 클 수도 있지만 장기적 관점에서는 훨씬 작을 것으로 예상된다. 그림 27b는 50년 규모에서 각 크기를 나타낸 것이다.

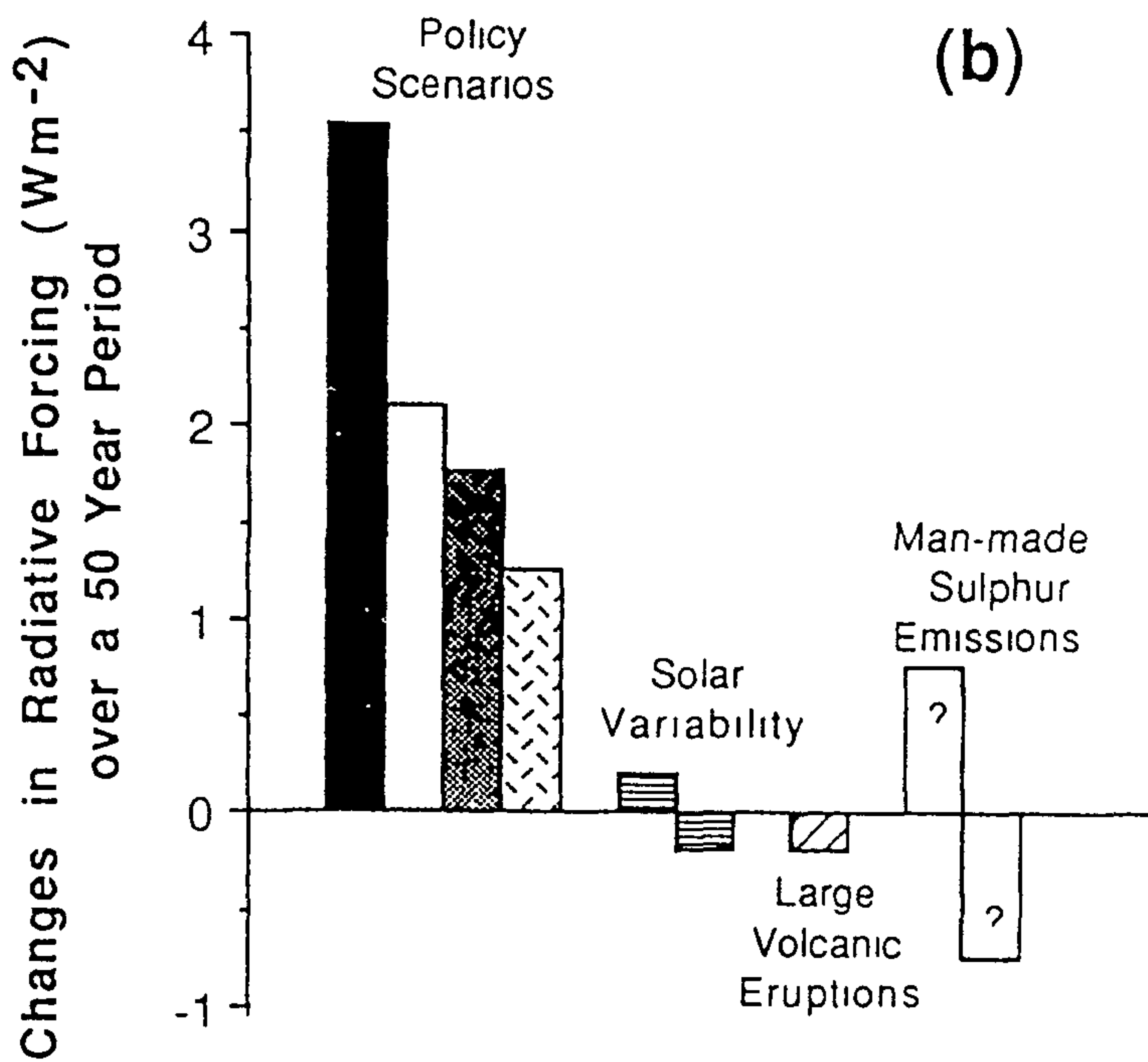
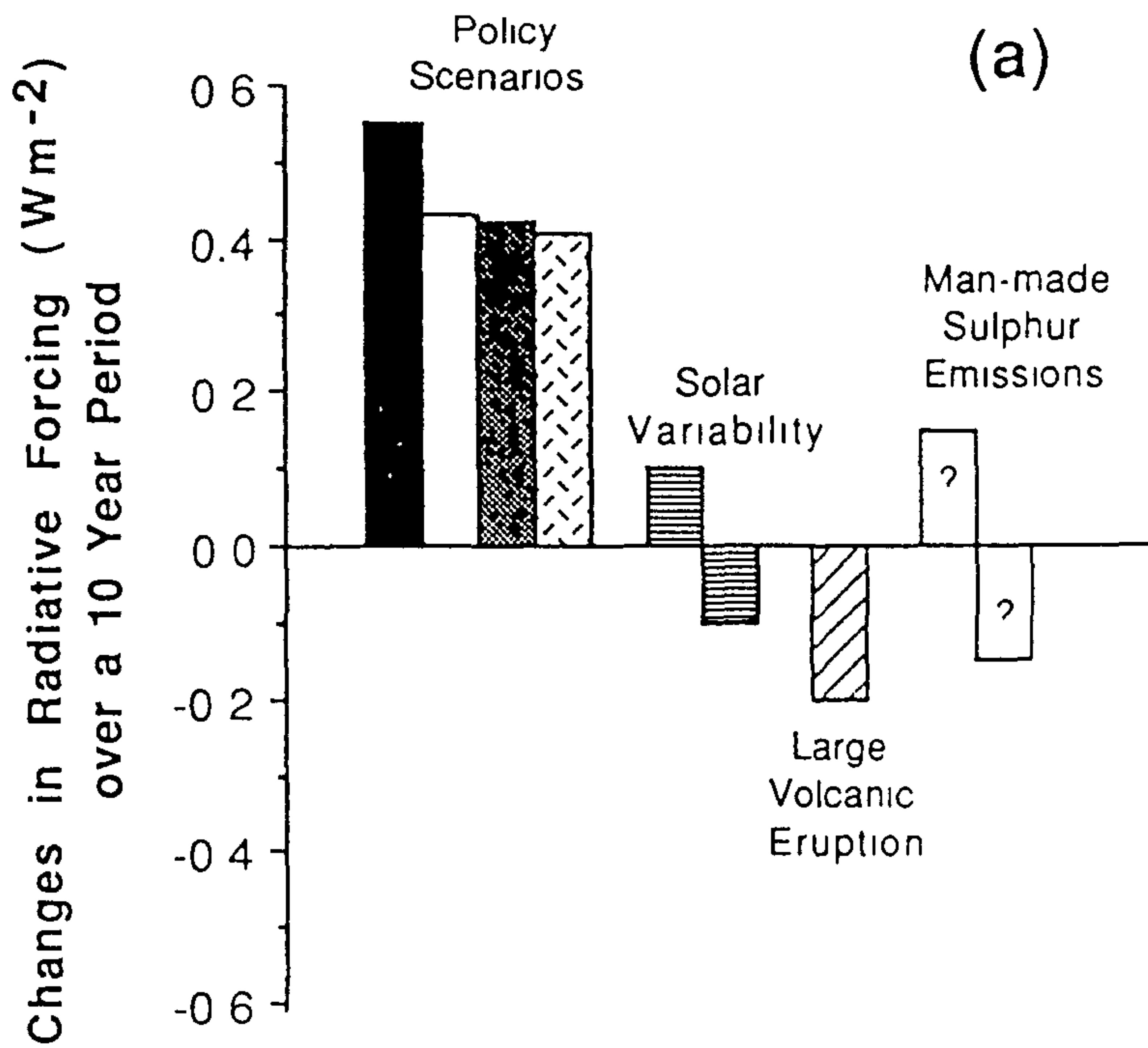


Figure 27 Comparison of different radiative forcing mechanisms for (a) a 10-year period, and (b) a 50-year period in the future

네가지 배출 시나리오는 2,000-2,050년 사이에 $1.3-3.5 \text{ W}\cdot\text{m}^2$ 의 방사원동력 증가를 예상하고 있다. 이때 태양변동, 화산분출 및 황의 배출에 의한 크기는 $0.2, -0.2 \text{ W}\cdot\text{m}^2$ 이고, 인류에 의한 황 배출에 의한 것은 $0.75 \text{ W}\cdot\text{m}^2$ 정도로 예측되나 증가 또는 감소할 것인지조차 확실치 않다. 지표면 변화로 야기될 방사원동력의 크기는 $0.1 \text{ W}\cdot\text{m}^2$ 를 초과하지 않을 것으로 예측된다.

방사원동력 변화를 통한 기후변화 외에도 10년 규모에서 방사원동력에 전혀 변화를 주지 않으면서 기후변화를 초래하는 요인이 있다. 지구-해양-대기 시스템은 외부에서 힘이 가해지지 않더라도 기후변동을 일으킬 수 있다. 이와같이 기후에 대해 강요되거나 강요되지 않는 효과가 합쳐지면 기온상승 추세에 예상키 어려운 증감의 변동이 부가될 것이다.

라 요약

(1) 지구의 기후는 방사원동력의 매체로 알려진 몇가지 요인 때문에 변화되는 방사원동력에 의해 영향을 받는다. 이들 방사원동력 매체로는 온실가스의 농도, 입사되는 태양에너지, 에어로졸, 그리고 광반사율이 있다. 이들은 기후에 대한 직접 효과 외에도 간접적으로 영향을 미친다.

(2) 산업혁명 이래로 증가된 온실가스의 농도로 인한 방사원동력의 증가에 대한 가장 큰 기여는 CO_2 (61%)이며, 그 다음으로 CH_4 (17%), CFCs (12%), N_2O (4%) 등이다. CH_4 의 배출로 야기되는 성층권의 수증기 증가는 방사원동력 변화에 대해 6% 가량 기여한다. 대류권과 성층권 오존의 변화로 인한 기여도는 계산하기 어렵다. 대류권의 증가된 O_3 농도는 산업혁명 이래로 총 원동력의 10%를 기여했을 것 같고, 하부 성층권의 O_3 농도 감소는 최근 수십년 동안 방사원동력을 감소시킨 것으로 추정되기 때문이다.

(3) 가장 최근의 10년간 방사원동력의 증가는 CO_2 (56%), CH_4 (11%), N_2O (6%), 그리고 CFC (24%)에 의한 것이다. 성층권의 수증기는 4% 정도 기여한 것으로 계산된다.

(4) IPCC에 의해 제시된 미래 배출량에 대한 시나리오 A(business-as-usual)에 의하면, 산업혁명부터 2025년까지 방사원동력의 변화를 다음과 같이 예상하고 있다 즉, CO₂ 63%, CH₄ 15%, N₂O 4%, CFCs와 HCFCs 11%, 성층권 수증기 5% 그리고, 2025년까지의 총 방사원동력은 산업혁명 이전 CO₂ 양의 2배 이상이 될 것이다

온실가스의 방사원동력에의 기여도 (%)

	산업혁명 - 1980	1980 -1990	1990 - 2025
CO ₂	61	56	63
CH ₄	17	11	15
N ₂ O	12	6	4
CFCs, HCFCs	4	24	11

(5) 온실가스의 배출량에 의한 기후영향을 비교할 수 있는 지표(index)로 지구온난화 잠재력(global warming potential GWP)이 개발되었다 GWP는 기체의 흡광대역과 세기, 대기중 기체의 수명, 기체의 분자량과 기후에 영향을 미칠 수 있는 기간에 따라 좌우된다 GWP는 CO₂에 대한 상대적인 값으로 인용되었는데, 500년 동안 각 기체들의 동일 질량의 배출량에 대한 GWP는, CO₂를 1로 할때 CH₄는 9, N₂O는 190, CFC-11은 1500, CFC-12는 4500, HCFC-22는 510이다.

다른 기체들에 대한 값은 앞에서 기술한 바와 같다 이 분석과 관련해서 많은 불확실성이 존재한다 예를 들면, CO₂의 대기중 수명은 잘 알려져 있지 않다 GWP는 실제 온실가스의 배출량에 적용할 수 있다 예로서, 1990년에 모든 인류기원 기체배출에 의한 향후 100년 동안 효과를 산출한 결과, 온실가스의 배출로 인한 온실원동력의 60%는 CO₂에 의한 것으로 나타났다

(6) 비록 CFC를 대체함으로써 오존층에 손상을 줄일 수 있다 하더라도 대체품중 일부의 GWP는 여전히 크다. 그러나, 20년 이상 장기간에 걸친 영향을 살펴보면, 대부분의 대체품은 동일한 배출량을 기준으로 할 때 기존 CFC보다 지구온난화에 미치는 영향은 훨씬 적다

(7) 지난 세기 동안 온실가스 증가로 인한 기후원동력의 변화는 태양에너지 증가에 의한 것보다 훨씬 더 큰 것 같다 비록 10여년 주기의 태양에너지 방사량의 변화는 온실원동력에 비하여 대등하다 하더라도 장기간 지속되지 않고 그 방향 또한 변동한다 대조적으로 강화된 온실효과는 지속적인 기후변화를 초래한다

(8) 화산분출에 의한 성층권의 에어로졸 생성은 상당한 방사원동력을 초래할 수 있다 El Chichon과 같은 대규모 분출은 1980-1990년 사이의 약 10년 동안 온실가스 원동력의 약 1/3에 해당하는(냉각방향의) 방사원동력을 초래할 수 있다 화산분출의 지역적이고 단기간에 걸친 효과는 훨씬 클 수 있다

(9) 지난 세기 동안 북반구에서 증가되어 온 인간에 의한 황 배출은 에어로졸을 생성하고 구름의 방사특성에 영향을 줌으로써 방사원동력에 영향을 미쳐 지구를 냉각시킨다 이 효과의 크기를 정확하게 계산하는 것은 매우 어렵지만, 이 방사원동력이 금세기 초의 온실가스 원동력과 비교할 수 있을 만한 크기이다 미래의 황 배출량으로 인한 기후원동력의 변화는 배출량이 증가할지 감소할지 예측하기 어렵다

4. 지구온난화의 기작 및 기후예보 모델화

기후계는 대기권, 수권, 빙설권, 생물권 및 지권 등의 성분으로 구성되어 있다 지구의 기후계를 조절하는 기본적인 작용은 지구로 입사되는 단파의 태양방사에너지에 의한 가열작용과 우주로 방출되는 장파의 적외복사에너지에 의한 냉각작용이다 가열작용의 위도별 차이는 대기와 해양의 대규모 순환을 초래하여 열의 이동이 일어난다

기후계의 여러측면은 잘 이해되어 있지 않으며, 상호작용하는 되물림 작용에 대한 지식이 불충분하기 때문에 대기, 빙설권 및 해양의 상호작용을 모델화하는 데 많은 불확실성이 내포되어 있다 이러한 되물림 작용은 기후에 대한 방사원동력의 변화 때문에 비롯되는 기후의 반응을 증폭시키거나 감소시킨다

가. 기후계

이미 언급한 것처럼 기후계는 다섯개의 성분인 대기, 해양, 빙설권, 생물권 및 지권으로 구성되어 있다 (그림 28)

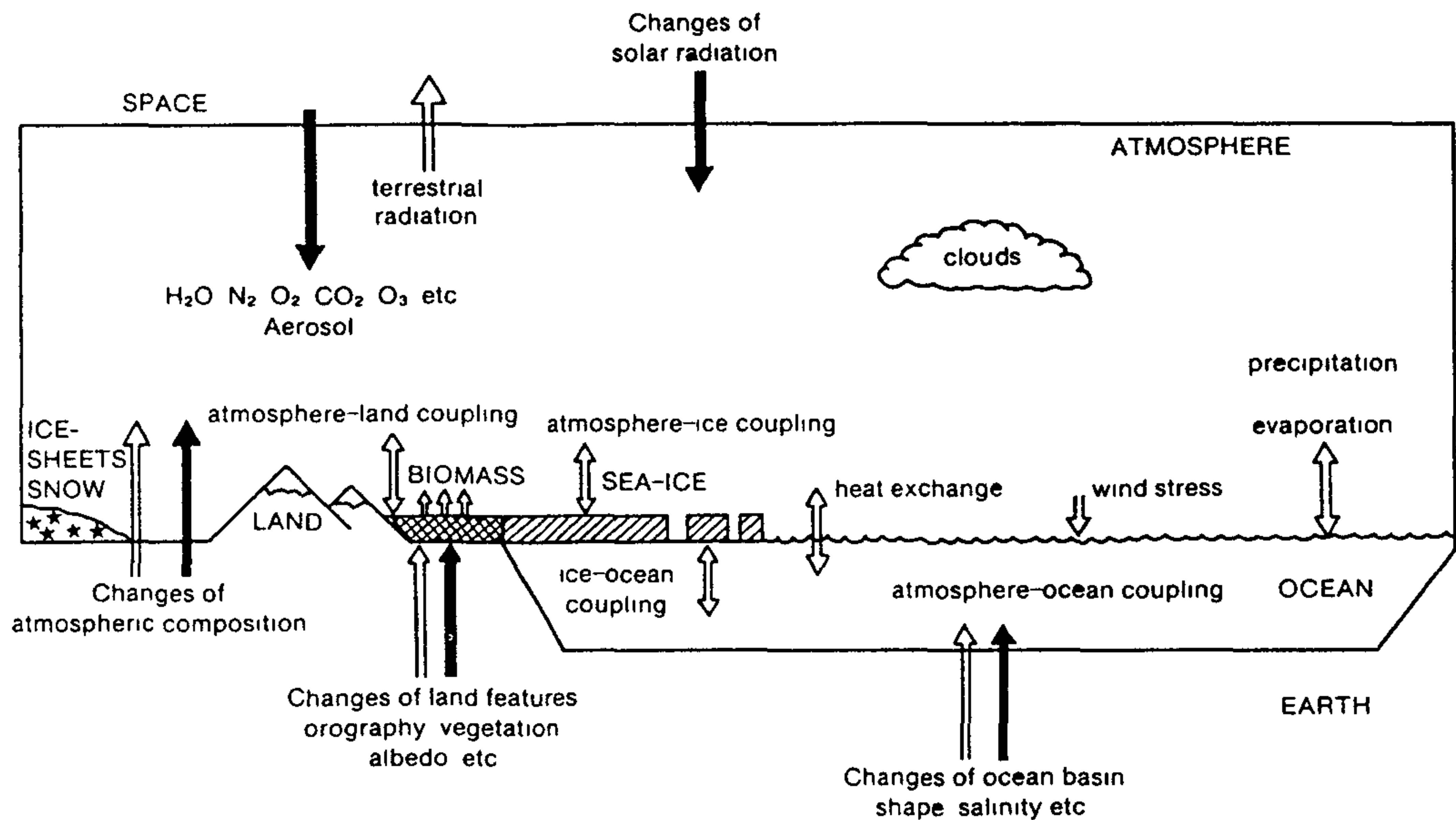


Figure 28 Schematic illustration of the components of the coupled atmosphere-ocean-ice-land climatic system

지구의 기후계를 조절하는 근본적인 작용은 단파인 태양방사에너지의 입사에 의한 가열작용과 장파인 지구 복사에너지의 우주로의 방출에 의한 냉각작용이다 가열작용은 적도 지역에서 가장 큰 반면, 냉각작용은 각 반구의 겨울 동안 극 지역에서 가장 크다 가열작용은 위도에 따라 다르게 나타나기 때문에 대기와 해양의 순환을 일으키며, 해양과 대기 시스템의 균형에 필요한 열의 이동을 일으킨다

(1) 대기권

지구로 입사된 태양방사에너지의 대부분은 대기가 아니라 지표면(토양, 해양, 얼음)에 의해 흡수된다. 지표면으로부터 대기로의 열의 이동은 증발과 지표면의 직접 가열을 통해 잠열과 감지열(sensible heat)의 형태로 이루어진다. 대기는 이 열을 수일의 시간규모를 갖는 일시적인 기상계를 통해 고위도 쪽으로 전달한다.

기후계 중 대기의 역할을 결정하는 데 중요한 역할을 하는 요인들은 다음과 같다.

- ① 지표면에서 열, 운동량 및 습기의 난류형 이동(turbulent transfer)
- ② 입사된 태양방사에너지와 반사된 양의 비율을 결정하는 지표면의 형태
- ③ 수증기가 응축될 때 방출되는 잠열 (구름은 단파의 태양방사 에너지를 반사하고 장파의 복사에너지를 흡수하는 데 크게 기여함)
- ④ 이산화탄소(CO₂), 수증기, 오존(O₃) 및 기타 미량 온실가스들에 의한 대기의 냉각 및 가열
- ⑤ 기타 화산먼지와 같은 에어로졸, 지구 궤도의 변수, 산맥, 그리고 육지와 해양의 분포

(2) 해 양

지표면에 도달하는 태양방사에너지의 절반 이상은 먼저 해양에 의해 흡수되어 해양에 저장된다. 저장된 에너지는 해류에 의해 재분포된 후 주로 기화잠열과 장파의 복사에너지로서 대기로 방출된다. 해류는 해양과 대기 사이의 운동량, 열 그리고 물의 교환작용에 의해 야기된다. 해류는 바다, 바람의 양상 및 대륙과 해저산맥의 분포에 의해 결정되며 복잡한 수평적, 수직적 구조를 갖는다. 해양의 수직적 구조는 세가지 층으로 구성되어 있다.

- ① 표층과 매년 혼합을 일으키는 계절적 표층혼합층은 열대지역에서 100m 이하, 북대서양을 제외한 아극역해(sub-polar sea)에서는 수백 m, 극역해(polar sea)의 매우 국한된 일부지역에서는 일년의 대부분 기간 동안 수 km의 깊이까지 나타난다.

② 계절적 경계층으로부터 환수가 가능한 곳, 즉, 열과 기체가 교환되는 온수권(warm water sphere)은 순환대에서는 취송 표층해류의 수렴으로 수백 m 깊이에 이른다.

③ 전 해양의 80%를 차지하고 있는 냉수권(cold water sphere, 심해)은 극해역에서만 계절적 경계층으로부터 물교환이 가능하다.

해양의 화학적 및 생물학적 기작은 기후계의 이산화탄소량을 조절하는데 매우 중요하다. 이산화탄소는 해양-대기 경계면에서의 이산화탄소의 분압차에 의해 대기로부터 해양 내부로 전달된다 이것을 물리학적 펌프(physical pump)라 칭하며 이에 반해 해양 플랑크톤이 표층혼합층으로부터 용존 이산화탄소를 입자성 탄소로 전환하여 심해로 침강시키는 것을 생물학적 펌프(biological pump)라 한다 이 두가지 펌프는 100년 이상의 시간규모에서 전지구 탄소순환계로부터 이산화탄소를 제거하는 주된 역할을 담당하고 있다 표층혼합층의 이산화탄소 분압이 대기의 분압보다 낮은 곳에서는 대기로부터 해양으로 이산화탄소의 전송이 이루어지며, 대기의 이산화탄소 분압이 해양의 분압보다 높은 곳에서는 반대 현상이 일어난다. 혼합층의 이산화탄소 분압은 냉수에서의 용해도 증가, 그리고 봄철에 식물플랑크톤의 대번식(blooming) 등에 의해 감소된다 이산화탄소의 교환률은 대기과 해양간의 이산화탄소 분압차와 풍속에 따라 그 크기가 증가하는 기체교환상수에 의해 좌우된다

다음의 작용들은 해양의 기후에 대한 반응을 조절한다

㉠ 해양에서 일시적인 소규모(50 km)의 와류(eddy)는 대순환대(gyre)의 구조, 물의 흐름 및 해저산맥과의 상호작용에 영향을 준다 와류는 또한 해수에 용존되어 있는 이산화탄소와 같은 화학물질의 수평확산을 조절한다

㉡ 극역해와 북대서양의 최북단에서 겨울철의 수십 km 크기의 심층 대류현상은 냉수권인 심해로 열과 용존 이산화탄소를 이동시킨다. 느린 심층 해류는 새롭게 형성된 물을 전세계 해양으로 천천히 순환시킨다

㉢ 표층혼합층의 일부 수괴는 강력한 수온약층 환수가 있을 경우 계절적 경계층으로부터 수백 m 밑의 온수권까지도 유입이 가능하다

㉣ 해류는 열, 담수 및 용존 화학물질을 전지구적으로 이동시키며, 온도, 염분, 해빙 그리고 표층에서 화학물질의 전지구적인 분포를 결정한다 대규모 해류순환의 변동은 수 년-수십년 동안 상기 해양의 특성을 변화시키며, 또한

지역적인 표층해수 특성의 변화를 초래하여 그 지역의 기후에 영향을 미친다

㉞ 부유생물(플랑크톤)에 의한 생물학적 펌프는 계절적 혼합층에서 해수중에 용존된 이산화탄소의 일부를 소비하고 심해로 전달하여 탄소를 해양과 대기의 단기간(최고 100년) 상호작용으로부터 격리시킨다.

(3) 빙설권

빙설권은 크게 계절설, 해빙, 육상빙상, 산악빙하, 영구동결대 등으로 구분할 수 있다

① 계절설(seasonal snow)로 덮힌 지역은 수 일 이상 시간규모의 대기역학에 빠르게 반응한다 전지구적인 측면에서 눈 자체의 계절적인 열저장 능력은 적다 빙설권의 주요 영향은 눈으로 덮힌 지표면의 높은 광반사율에 의한다

② 해빙은 계절보다 긴 시간규모로 기후에 영향력을 미치며, 지표면의 열균형에 대해 육상의 눈과 동일한 효과를 갖는다 해빙은 해양과 대기 사이의 습기와 운동량의 교환을 방해하기 때문에 해양과 대기를 격리시키는 역할을 한다 일부 지역에서는 결빙기 동안의 염의 배출과 용융기간 동안의 담수의 배출을 통해 심층 수괴의 형성에 영향을 미친다

③ 그린랜드와 남극의 빙상은 준영구지형학적 특징(quasi-permanent topographic features)을 갖는 이 빙상의 수량은 전지구 담수의 80%에 해당하는 것으로 수리순환(hydrological cycle)에서 물의 장기적인 저장소이다 이들 빙상의 약간의 크기변화는 전지구 해수면 변화에 영향을 미칠 것이다

④ 산악 빙하는 빙설권의 작은 부분을 차지한다 이들 또한 담수의 저장소이며, 해수면에 영향을 미칠 수 있다 이들은 환경변화에 빠르게 반응하기 때문에 기후변화를 진단하는 중요한 도구이다

⑤ 영구동결대(permafrost)는 지표면 생태계와 담수 유입량에 영향을 미친다 또한 해양의 열염분 대류에도 영향을 미친다

(4) 생물권

육상과 해양의 생물권은 대기, 해양과 육지사이에서 이산화탄소, 메탄을 포함하는 일부 온실가스들의 전송량(flux)을 조절한다 이와 관련된 작용들은 기후 및 환경조건에 민감하므로 기후 또는 환경의 변화(즉, 대기중 CO₂ 농도의 증가)는 이들 온실가스의 대기중 농도에 영향을 미칠 것이다

(5) 지 권

육지에서의 여러 과정은 수리순환에 중요한 역할을 한다 이러한 과정은 지표에서는 토양습기의 형태, 지하에서는 담수의 저장, 그리고 지표면에서는 하천을 통한 물의 이동 등이다(특히 고위도에서 하천은 해양순환에 까지 영향을 미침) 토양은 대기와 기체, 에어로졸과 습기를 교환하는데, 이 교환은 토양의 종류와 식생에 의해 영향을 받는 반면, 식생은 토양에 함유된 습기에 지배를 받는 등 그 상호작용이 복잡하다 이러한 상호작용에 대한 현재의 지식은 불충분하므로 미래에 있어서의 연구과제라 하겠다

각 기후계 구성원은 상기 특성외에도 기후변화 요인에 대해 반응하는 시간규모가 다르다 대기는 외부요인에 대해 시간 또는 일 단위로 빠르게 반응하는 데 비해 해양은 표층에서 수 일, 심층에서는 1천년 규모로 매우 느리게 반응한다. 얼음의 경우도 해빙은 수 일 이내에 반응을 보일 수도 있으나 빙상은 훨씬 느려서 수천년을 요한다. 육지과정은 수 일 또는 수 개월이면 기후변화에 반응하나 생물권이 적응하는 데에는 수 시간부터 수 세기까지 걸리게 된다

나 방사 되물림 작용 (Radiative feedback mechanism)

기후계의 많은 단면들은 잘 이해되어 있지 않다 대기권, 빙설권, 그리고 해양의 상호작용을 모델화하는데 있어서의 불확실성은 상호작용하는 기후의 되물림 작용에 의해 야기된다. 되물림 작용에 의해 기후반응이 증폭 또는 억제된다 이 절에서는 전지구 평균량(global-mean quantities)을 중심으로 기후변화를 간단하게 두 단계 작용(원동력과 반응)으로 해석하고자 한다 이 방법은 일반 대순환모델(global circulation model)에서 기후의 되물림 작용을 해석하는데 유용하다.

지표-대기계의 방사원동력(ΔQ)은 다른 모든 기후변수를 상수로 취급하고 대기중 CO_2 농도가 순간적으로 2배가 될 때 $G = 4 \text{ W/m}^2$ 로 계산하고 있다 지구 지표면 평균온도의 변화(ΔT_s)로 표현된 지표면의 기후변화는 방사원동력과 관련이 있으며 $\Delta T_s = \lambda \times \Delta Q$ 로 표현된다 (Cess et al, 1989) 여기서 기후의 민감도 변수(λ)는 다음과 같이 정의된다

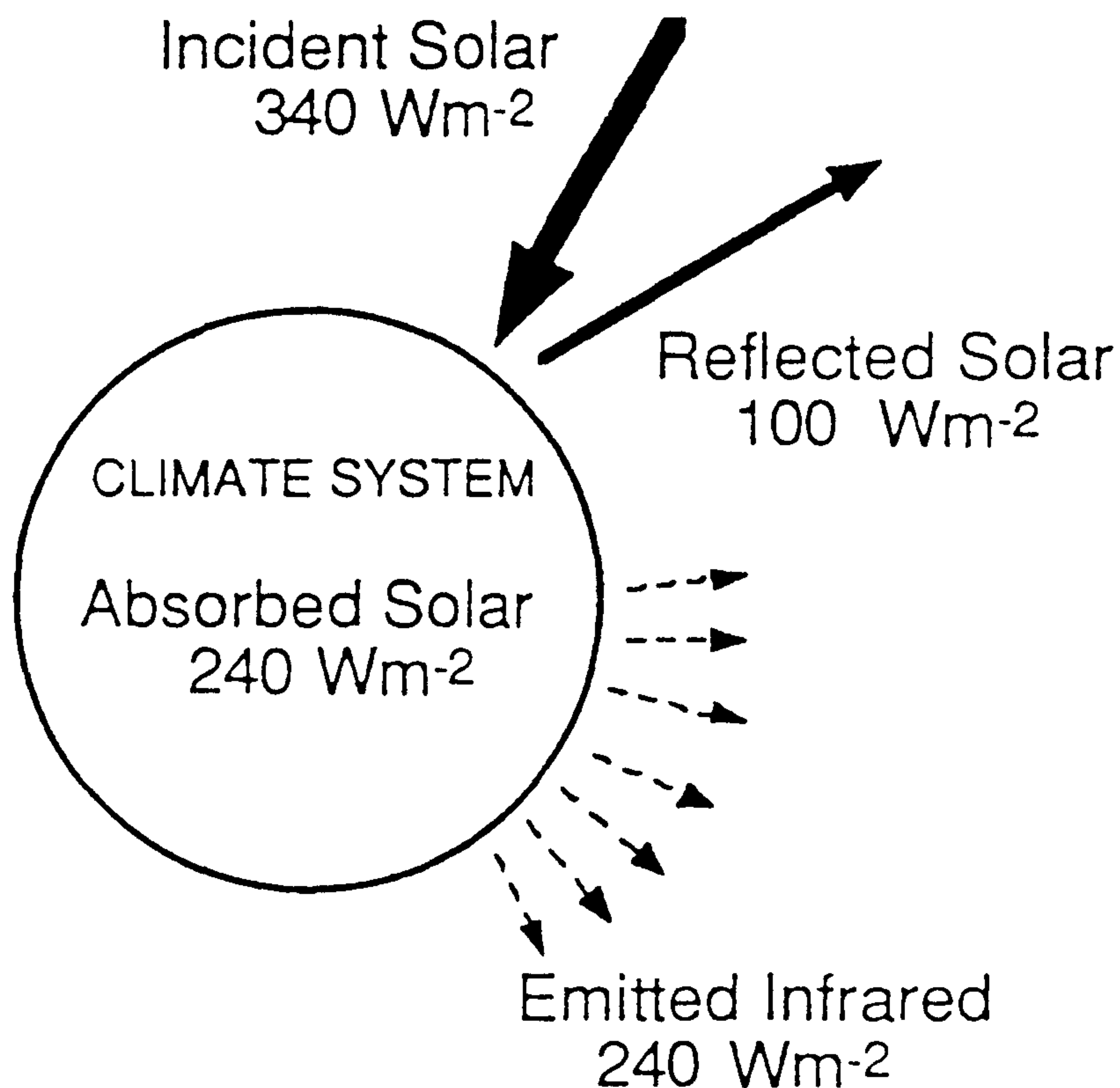
$$\lambda = \frac{1}{(\Delta F / \Delta T_s - \Delta S / \Delta T_s)}$$

여기서 F와 S는 각각 고층대기(top of atmosphere: TOA)에서 방출된 전지구 평균 적외선량과 지표면으로 입사되는 순 태양전송량(net solar flux)을 나타낸다 따라서 ΔF 와 ΔS 는 방사원동력(ΔQ)에 대한 TOA의 기후변화 반응을 나타낸다 λ 가 증가한다는 것은 주어진 방사원동력 $\Delta Q(= \Delta F - \Delta S)$ 로 인한 기후변화가 증가함을 의미하는 것이다.

방사원동력은 권계면에서 지구쪽으로 입사되는 순 방사량의 변화로 정의된다 따라서 대기중 CO_2 농도가 2배로 될 경우 이에 의한 방사원동력은 약 4 W/m^2 로 계산되며, 이것은 지표와 대류권의 가열에 쓰이게 된다 만일 성층권이 이 원동력에 반응한다고 하면, 이 때 4 W/m^2 의 전송량 변화는 TOA에서도 일부 쓰이게 되는데 본 절에서는 이와같은 개념을 사용하였음을 밝혀둔다

대기중 CO_2 농도가 2배로 증가되었을 경우를 예로 들면 되물림 작용을 평가하기 위한 λ 의 용도가 명확히 들어난다 그림 29는 전지구 방사균형을 체계적으로 나타낸 것이다 전지구 평균으로 볼 때 연간 TOA로 입사되는 태양방사량은 340 W/m^2 이다 이중 약 30%인 100 W/m^2 는 지표-대기계에서 반사된다 결과적으로 기후계는 태양방사에너지 중 240 W/m^2 를 흡수하기 때문에, 기후계는 평형상태에서 240 W/m^2 의 적외선을 방출해야 한다 이 때 4 W/m^2 의 CO_2 방사원동력이 기후계를 가열시킨다는 것은 실제로는 같은 양의 적외선 복사 방출량의 감소를 의미한다 그래서 기후계는 대기중 CO_2 농도가 2배가 되면 방출량 보다 4 W/m^2 더 많은 양의 에너지를 흡수하므로 지구의 방사균형을 유지하기 위해 지구온난화가 일어난다 기후계는 흡수 및 방출 에너지가 모두 240 W/m^2 인 방사균형으로 되돌아 갈 것이다 기후계에 되물림 작용이 없다면 $\Delta F / \Delta T_s = 3.3 \text{ W/m}^2/\text{K}$ (Cess et al, 1989), $\Delta S / \Delta T_s = 0$ 이기 때문에 $\lambda = 0.3 \text{ K/W}$ 가 된다.

Global Radiation Budget



	Absorbed	Emitted
Instantaneous CO ₂ doubling	240 Wm ⁻²	236 Wm ⁻²
New Equilibrium with no other change	240 Wm ⁻²	240 Wm ⁻²

Figure 29 Schematic illustration of the global radiation budget at the top of the atmosphere

다시 말해서 $\Delta T_s = \lambda \times \Delta Q = 1.2^\circ\text{C}$ 로 나타난다 이러한 온난화는 상호작용하는 많은 되물림 작용이 없다면 전지구적 온도증가 $\Delta T_s = 1.2^\circ\text{C}$ 는 틀림없는 값이 되지만, 여러가지 되물림 작용들은 ΔT_s 를 계산하는데 상당수의 불확실성을 초래한다 아래에 되물림 작용 중 세가지를 소개하였다

(1) 수증기의 되물림 작용

현재까지 가장 잘 알려진 되물림 작용은 수증기에 의한 것으로 이것은 직관적으로 이해하기 쉽다 대기중의 CO_2 농도가 2배로 증가하면, 일단 온실가스인 CO_2 에 의해 지구온난화가 나타날 것이다. 그러나 이러한 온난화는 상호작용을 수반한다 즉 온도가 상승할수록 대기는 그 자체로 온실가스인 수증기를 더 많이 포함하게 된다 결과적으로 한가지 온실가스(CO_2)의 증가는 또 다른 온실가스(수증기)의 증가를 초래하여 증폭 되물림 작용(positive feedback)을 유발한다

Raval과 Ramanathan은 최근 인공위성 자료를 이용해서 수증기의 온도에 대한 의존도를 정량화했다 이들의 결과에 의하면, 수증기의 되물림 작용은 $\Delta F/\Delta T_s$ 를 $3.3 \text{ W/m}^2/\text{K}$ 에서 $2.3 \text{ W/m}^2/\text{K}$ 로 감소시킨다고 한다. 다시 말하면, 이것은 λ 가 $0.3 \text{ km}^2/\text{W}$ 에서 $0.43 \text{ km}^2/\text{W}$ 로 증가되어 $\Delta T_s = 1.2^\circ\text{C}$ 에서 $\Delta T_s = 1.7^\circ\text{C}$ 로 지구온난화를 증폭시킨다는 것이다 결과적으로, 수증기의 증가는 더욱 커다란 온난화를 초래할 것이다. 수증기는 또한 태양광을 흡수하기 때문에 수증기의 되물림 작용은 태양광의 흡수를 증가시킴으로써 기후계를 추가로 가열시킨다. 그 결과 $\Delta S/\Delta T$ 는 $0.2 \text{ W/m}^2/\text{K}$ 로 되며, λ 는 $0.48 \text{ km}^2/\text{W}$, $\Delta T_s = 1.9^\circ\text{C}$ 까지 증가한다 여기서 중요한 사항은 수증기의 되물림 작용이 초기의 지구온난화를 1.2°C 에서 1.9°C 까지 증폭시켰다는 점이다 즉 증폭 인자(amplification factor)가 1.6이나 된다

(2) 눈-얼음의 일광반사 되물림 작용

온난화된 지구에는 눈과 얼음으로 덮힌 면적은 줄어들 것이고 이 때문에 빛의 반사가 줄게 됨으로 지구는 점점 더 많은 태양방사에너지를 흡수하게 될 것이다 대기중의 CO_2 농도를 증가시킨 모의실험에서 일반 대순환모델은 겨울철에 극지방의 온난화가 증폭될 것으로 예측하였는데, 이는 부분적으로 눈-얼음의 광반사 되물림

작용에 기인한 것으로 보여진다 그러나 실제 상황은 이보다 더욱 복잡할 것으로 보인다

(3) 구름의 되물림 작용

구름과 관련된 되물림 작용은 매우 복잡하다 우선 현 기후에 대한 구름의 영향을 예로 보자 표 19는 전지구 기후계에 대한 구름의 영향을 연평균 값으로 나타낸 것이다. 이 값들은 “청명한 하늘”에 대한 구름의 상대적인 효과이다

구름은 고층대기에서의 적외선 방출을 감소시켜 31 W/m^2 의 기후계 가열 요인을 갖는다 그러나 구름은 동시에 태양광을 반사시키고 흡수함으로써 냉각효과를 초래한다. 표 19에 나타난 것처럼 구름의 냉각효과는 온실화 효과를 능가한다 따라서 연간 전지구 기후계에 대한 구름의 순 효과는 13 W/m^2 의 냉각효과를 갖는다 구름의 방사원동력은 구름의 양, 구름의 수직분포, 구름의 광학적 깊이 그리고 구름방울의 분포에 의해 좌우되는 총체적인 결과이다

비록 구름이 기후계를 냉각시킨다 하더라도, 이것을 온실가스로 인해 지구온난화가 감소된 것으로 해석해서는 안된다. Cess 등이 지적한 것처럼, 구름의 되물림 작용은 기후변화와 관련된 순 구름의 방사원동력(net cloud radiative forcing, net CRF)의 변화이다 가상적인 예로서 대기중의 CO_2 농도가 2배로 증가하여 순 CRF가 -13 W/m^2 에서 -11 W/m^2 로 증가한다면, 2 W/m^2 의 순 CRF 증가는 본래 CO_2 방사원동력인 4 W/m^2 에 첨가되어 증폭되물림으로 작용할 것이다 이것은 어디까지나 가상적인 예일 뿐이며, 구름의 되물림 작용에 대한 방향(+/- sign)을 결정할만한 실험적인 방법이 없다는 것을 명심해야 한다 구름의 되물림 작용이 복잡하다는 점을 강조하기 위해서 이에 기여하는 세가지 기작을 요약하면 다음과 같다

(가) 구름의 양

일반 대순환모델이 예측한 대로 지구온난화에 따라 구름의 양이 감소한다면, 구름에 의해 야기되는 적외선 온실효과는 감소될 것이다 그러므로 지구는 온난화됨에 따라 더욱 효과적으로 적외선을 방출하여 온난화가 둔화되므로 구름은 감쇄 되물림으로 작용할 수 있다. 그러나 상대적인 증폭 되물림 작용도 가능하다

즉, 구름의 양이 감소하면 대기에 의한 태양방사에너지의 반사가 감소하기 때문에 기후계에 의한 태양방사에너지의 흡수량은 증가되기 때문이다

(나) 구름의 고도

구름의 수직적인 재분포 역시 되물림 작용을 초래할 것이다 예를 들어, 지구온난화로 인해 어떤 구름층이 더 높고 기온이 낮은 대기로 이동한다면, 냉각된 구름은 적외선을 적게 방출하여 온실효과를 부양하는 증폭되물림 작용을 일으킨다

(다) 구름의 수분함량

지구가 온난해지면 구름의 수분함량이 증가하여 감쇄 되물림이 일어날 것이라는 예상이 최근에 많이 제시되고 있다 그러나, 최근에 Cess 등은 이러한 설명은 지나치게 단순화된 것이라고 반박했다 한가지 예를 들면, 구름의 수분함량 변화에 의한 감쇄 되물림 작용은 적외선 방사에 의한 증폭 되물림 작용으로 보상될 수 있다고 주장했다 더욱 최근 연구에서 그들은 일부 모델을 이용해서 상기의 순 효과는 오히려 증폭 되물림 작용에서 나타난다고 주장하였다

기후계를 이해하기 위해서 기후계의 각 성분들 사이의 상호작용과 서로 다른 되물림 작용을 시뮬레이션할 수 있는 모델이 개발되고 있다

지금까지 대부분의 기후 시뮬레이션은 기후 예측모델로부터 개발된 대기 대순환모델 (AGCM)을 이용하여 행해졌다 증가된 온실가스에 의한 기후변화 연구의 경우 AGCM은 해양의 상부층을 연계하여 운용하였으며, 일부의 경우 해양의 전 수심을 고려한 상세하지만 해상력이 낮은 역학모델을 운용하였다 또한 상호작용에 지표면의 온도와 토양습기도 포함되었다 그러나 기후계의 다른 요소들은(육빙, 생물권) 일반적으로 비상호작용 성분으로 고려되었다 이들 모델의 해상력은 너무 낮아서 국지적인 해석을 할 경우 어려움이 따른다

불행하게도 기후계의 모든 성분을 고려한 모델은 겨우 몇 개밖에 개발되어 있지 않다. 그 이유는 주로 컴퓨터 자원이 부족하기 때문이다. 즉, 연계된 계(coupled system)는 서로 다른 시간규모의 아계(sub-system)를 다루어야 하기 때문이다

불완전한 모델을 이용한 현 기후변화 시뮬레이션은 앞으로 기후계의 각 성분을 더욱 많이 고려한 모델로 대체되어 기후변화예측의 신뢰도를 높일 것으로 기대된다

수치모델 시뮬레이션 이외에 고기후(paleoclimate)를 재건하는 방법이 있다. 비록 기후예측에 이 방법을 사용하는 것은 자료영역과 미래의 시나리오와 비교할 때 과거 기후원동력의 신빙성 때문에 의문이 많지만 기후변화 스펙트럼에 대한 가치 있는 정보를 제공하며, 서로 다른 기후체계(climate regime)에서 대기순환모델의 보정에 필요한 정보를 제공할 것이다.

다 기후모델의 검증

(1)기후모델의 신뢰도

일반 대순환모델(general circulation model, GCM)에 의거한 기후모델들은 대기, 해양과 지표면 과정을 고전 물리학 원리에 입각해 수식화한 것이다. 이 모델은 이산화탄소나 다른 온실가스의 증가로 비롯된 기후변화를 연구하는데 강력한 도구이다. 이러한 모델들은 기후계를 특징짓는 상호작용을 하는 물리과정을 동시에 광범위하게 다룰 수 있는 유일한 방법이며, 여러가지 다른 조건 하에서 과거와 미래의 기후를 시험할 수 있는 기회를 부여한다. 그러나, 모델의 결과를 적절히 해석하기 위해서는 결과를 현장 관측과 비교해 보아야 하며, 이를 통해 체계적인 오류(특히, 여러 모델의 공통인 오류)를 찾아내야 한다. 이러한 오류 또는 편기(biases)는 미래의 기후변화를 평가하는 데 반드시 고려되어야 한다. 그 밖에 현 GCM들이 해양과정을 상세하게 고려하고 있지 못한 점과 고층대기와 대기화학 및 지표 생물과정 등도 제대로 반영되고 있지 않은 점에도 유의해야 한다. GCM은 서서히 발전되어 갈 것이지만 결과에는 항상 불확실성이 따를 것이다.

다음은 현 GCM에 근거하여 전문가가 진단한 기후모델의 정확성을 요약한 것이다. 모델이 평균 기후와 계절변동의 평균을 어느 정도 재현할 수 있는가를 살펴보고, 이들이 기상 이변과 극단적인 기후를 얼마나 제대로 묘사할 수 있는지를 다룰 것이다. 또한 모델의 신뢰도를 증진시킬 수 있는 가능성(기후모델의 기상 예보 능력, 모델의 빈도가 낮은 변동과 고기후에 대한 대기-해양 연계 성능)을 살펴 보기로 하겠다.

- ① 현재 대기 대순환모델을 운용하여 얻은 결과는 대규모의 기압, 기온, 바람 및 강수량의 분포를 상당히 잘 묘사한다. 그러나, 이러한 결과를 얻기 위해서는

해수면 온도와 해빙에 불필요한 제한을 가해야만 하는 단점이 있다

② 어떤 종류의 모델이던 국지적인 규모에서는(대륙규모 이하) 그 오차의 범위가 매우 크다 예를 들면, 평균 표층대기온도의 계절적 변화가 15°C인 지역을 대상으로 5개 모델의 예측치와 현장 관측치를 비교하면 그 차이는 2-3°C에 이른다 강수량에 대한 예보도 대륙보다 작은 규모(1000-2000 km)에서 보면 모델에 따라 예상 강수지역에 상이하다 또한 강수량도 20-50%의 오차를 가지고 예측하고 있다

③ 제한된 수의 토양 습기 자료와 모델 예측치를 비교해 보면, 중위도 여름과 겨울의 경우, 모델이 대규모의 분포특성을 정성적으로는 제대로 반영하고 있다

④ 겨울의 적설지대는 기온이 제대로 예측되지 못한 지역에서도 비교적 작은 오차를 가지고 모델화 할 수 있다 그 외 계절에서는 지역에 따라 큰 오차가 있지만 넓은 의미에서 계절 변동이 모델에 반영되고 있다고 여겨진다

⑤ 몇 개의 모델에서는 구름의 영향을 수식화하는 연구가 상당히 진척되었다 자오선을 한 바퀴 돌며 얻은 관측치와 모델 결과를 비교해 보면 오차는 20 $W \cdot m^2$ 이하로 평균 오차는 5 $W \cdot m^2$ 정도(교란되지 않은 상태의 2%)로 낮다 그러나 광반사율(albedo)에 대해서는 중·고위도 지역에서 많은 편차가 나고 있으며, 이는 광반사를 수식화하는 데 문제가 있음을 의미한다.

⑥ 모델의 오차는 해상력의 증가, 대기 순환의 변수화, 구름 형성 및 지표에서의 과정에 대한 수식화와 중력파(gravity wave)에 의한 마찰의 도입 등으로 현저하게 줄어들고 있다

⑦ 매일 또는 연간 기온 및 강수량의 변동폭은 검증 결과 많은 모델이, 특히 여름철에 과대치를 예측함이 알려졌다 해수면에서의 기압에 대한 일주기 변동은 잘 모사되고 있으나 상층 대류권에서의 난류에너지(eddy kinetic energy)는 과소예측되고 있다

⑧ 현수준에서 낮은 빈도(장주기)를 갖는 기상 변동 현상은 제대로 모델화되고 있다. 그 예로 엘니뇨(El Niño)에 의해 발생하는 해수면 온도 이상(anomaly)에

대한 대기의 반응이나 사헬(Sahel)의 우기와 건기시 대기 반응을 들 수 있다. 또한 지난 18,000년 동안 몇몇 기간의 기후도 매우 만족스럽게 모사할 수 있다

9) 해양의 일반 대순환모델은 대규모 해황을 모사할 수 있으며, 특히 저위도에서 만족스러운 결과가 나온다 그러나 모델은 해상도와 격자내 과정, 예를 들면, 해수의 혼합이나 수직이동을 수식화하는 방법에 매우 민감하다

10) 대기모델은 단순한 해수혼합층을 갖는 해양모델과 연계되었다 그런데, 해류에 의한 열이동 등 모델에서 제외된 요인을 보상시키기 위해 인위적으로 시스템으로 들어오는 양들을 조절하고 있다 이 접속모델은 마지막 빙하기의 기후모사를 통하여 신뢰도가 증가되고 있다

11) 대기모델과 다층구조의 해양을 갖는 일반 해양 대순환모델과도 접속이 시도되었다 이 모델은 가끔 표층에서의 열과 염(salt)의 수지를 조정해야 한다 지금까지는 단지 저해상도 모델만 운용되어 왔으나, 이로서도 해양과 대기의 대규모 구조를 적절히 모사되고 있다

12) 전지구 및 지역적 규모의 관측자료가 모델의 검증을 위해 절실히 요구되고 있다 이것은 현재 시행되고 있는 기상예보를 위해서 또한 필요하다.

(2) 평형 기후변화

기후가 방사원동력과 균형을 이루고 있을 때에는 평형상태에 있다 따라서, 온실가스가 계속 증가하는 한 기후는 평형에 도달하지 못한다 심지어 온실가스의 농도가 안정되어 일정 농도에서 유지된다 하더라도 완전히 평형에 도달하기까지 수십년이 걸릴 것이다 따라서, 평형을 가정한 시뮬레이션은 예보에 직접 쓰일 수 없다 그런데, 왜 평형상태에 대한 연구가 필요한 것일까 ?

첫째, 대략 대기와 해양혼합층을 연계한 모델은 심해나 해류변화를 고려하지 않기 때문에, 이를 고려해야 하는 시간 종속 모델에 비해 컴퓨터 연산시간이 짧다

둘째, 평형상태 실험은 시간 종속 실험에 비해 결과를 비교하기 쉽다 이것과 비교적 비용이 덜 드는 장점이 있으며 방사원동력 매체의 - 예를 들면, 구름 - 변수화에 따른 민감도를 비교, 측정하기에 이상적이다

세째, 북대서양과 고위도 남반구 지역과 같이 연관성이 매우 큰 지역을 제외하면 평형상태 가정에서 얻어진 해답은 시간별로 보면 시간 종속 반응의 해답과 유사한 것으로 이용될 수 있다

대부분의 평형상태 실험은 다른 온실가스의 영향을 CO₂에 대비해서 나타낼 수 있으므로, CO₂가 배가된 경우의 효과로서 고려된다. 이 실험에 온실가스의 직접적인 방사원동력만이 고려되고, 그 외에 산림파괴나 황 배출에 의한 광반사율 변화 등 간접적인 요인들은 배제되고 있음에 유의하여야 한다. 결과로 얻어지는 기후변화는 교란 이전의 기후를 어떻게 모사하였는지에 따라 변화한다

그러나, 평형상태 기후 연구에는 다수의 모델은 해류변화가 제외되어 있고, 설령 이를 고려한다 해도 일조량의 계절적 변동을 무시하고 단순화시켜 모델에서 입력시키고 있다. 그리고, 지역에 따라 온실가스의 점증적 증가에 따라 반응속도가 다르기 때문에 제한적이다. 해양 위의 대기는 대부분 방열에너지에 따라 빠르게 반응하므로 기온이 올라가게 되는데, 이는 여열(extra heat)이 500m 부근 수심의 수온약층 아래로 침투하는 양이 매우 적기 때문이다. 반면, 북대서양과 고위도 남반구 대양에서는(특히 겨울철에) 여열이 수 km 깊이까지 혼합된다. 이 때문에 온도의 상승이 어느 시기를 막론하고 현저하게 저지된다. 다시 말해서, 평형상태의 온난화는 시간 종속 변화양상과 지리적으로 매우 다르다. 이러한 특징은 모델 시뮬레이션과 고기후 모사에 모두 적용된다

평형상태 실험은 대기 일반 대순환모델을 혼합층 해양과 연계시킨 기후 평형 모델이 9 그룹의 학자군에 의해 20번 이상 운용되었다. 이들은 모두 실제적인 지형과 일사량의 계절변동과 해수혼합층을 고려한 것이다. 더욱 최근의 모델은 미리 정해진 해양의 계절적 가열도 포함하고 있다. 평형상태 조절의 시행 결과는 다음과 같다

- ① 비록 모델에 따라 기후변화의 정도는 다르지만, 대기중 CO₂ 농도가 2배로 증가할 때 모든 모델은 실질적인 기후변화를 겪게 된다
- ② CO₂ 농도가 2배로 증가함으로써 야기되는 평형상태로의 기후변화(equilibrium changes)는 다음과 같다. *의 수는 모델에 대한 신뢰도를 나타낸 것으로, 5*는 거의 확실한 결과이며 1*은 신뢰도가 낮은 결과를 나타낸다.

㉞ 온도

대기의 하부와 지표면은 온난화된다 (5^{*})

성층권의 온도는 하강한다 (5^{*})

지표면 부근에서 전지구 평균온난화는 +1.5°C에서 +4.5°C 사이이며,

최선추정치는 +2.5°C이다 (3^{*})

고위도에서 지표면의 온난화는 겨울철에는 전지구 평균 온난화보다 크지만 여름철 전지구 평균 온난화보다는 작다 심해를 고려하여 시간에 따른(time dependent) 시뮬레이션을 해본 결과 고위도의 남반구 대양에는 온난화가 거의 일어나지 않는다 (3^{*})

지표면의 온난화와 계절적 변동은 열대지역에서 최소이다 (3^{*})

㉟ 강수량

전지구 평균 강수량(증발량)은 온난화에 비례하여 증가한다 (4^{*})

강수량은 고위도에서 연중 증가한다 (3^{*})

강수량(증발량)은 전지구적으로 3-15% 까지 증가한다 (3^{*})

강수량은 겨울철 중위도에서 증가한다 (2^{*})

비록 감소하는 지역도 있지만 위도 평균 강수량(zonal mean value)은 적도지역에서 증가한다 적도지역의 주요 강우대(rain bands)의 이동은 모델에 따라 다르기 때문에 지역적인 강수량 변화를 시뮬레이션한 모델들 사이에 일관성이 거의 없다 (2^{*})

아열대 건조지역에서 강수량의 변화는 거의 없다 (2^{*})

㊱ 토양 습기(soil moisture)

겨울철 고위도에서 증가한다 (3^{*}).

여름철 북반구의 중위도 대륙에서 감소한다 (2^{*})

㊲ 눈과 해빙(sea-ice)

해빙과 계절설로 덮힌 면적은 감소한다 (4^{*})

③ 기상의 일변동은 불확실하다 그러나, 고온은 미래에 전지구 평균온도 상승 때문에 더욱 빈번해질 것이다 그리고 현지 형성 구름에 의한 강수량의 증가에 대한 몇가지 증거가 있다

④ 전지구 평균 기후에 대한 산림파괴(deforestation)의 직접적인 영향은 작다. 그러나, CO₂ 제거에 변화를 일으키는 간접적인 영향은 중요하다 열대산림파괴로 인한 지역적인 변화는 심각하다 일례로 강수량의 약 20%가 감소될 것으로 보인다

⑤ 전지구 기후변화예측을 향상시키기 위해서는 구름의 분포 및 특성, 해양-대기의 상호작용, 대류현상, 해빙, 그리고 육지 표면으로부터 열과 습기의 이동에 영향을 미치는 작용 등을 고려해야 한다. 모델의 해상력 증가는 전지구규모의 기후변화를 보다 현실적으로 예측할 수 있게 하며, 지역적인 기후변화예측도 향상시킬 것이다.

(3) 온실가스와 시간에 따른 기후변화

앞에서 소개된 기후 반응은 방사원동력이 수년간 일정한 경우로, 일시에 변화가 초래된 뒤 대기과 해수 표층의 새로운 평형상태가 이루어진 다음에야 나타나는 것이다. 대기 모델은 세세한 부분까지 잘 개발되었음에도 불구하고 해양의 역할은 아직 초보적인 단계로 취급되고 있다. 그러나 온실가스가 서서히 증가하는 경우라면 해양의 막대한 열용량은 예측되는 기후변화를 효과적으로 지연시킬 것이다. 어느 시기에 실제 관측되는 지구 평균온도는 일시에 가해진 방사원동력에 의한 평형 변화의 단지 일부에 해당될 것이다. 나머지 중 일부는 안정하게 성층화된 표층 해수에 저장되어 수십년 또는 1백년 가량 지연된 후 나타날 것이며, 또 다른 일부는 심해수의 가열이 표층 해수에 영향을 미치기 시작할 때까지 수 세기 이상 지연된 후 그 효과가 나타날 것이다. 이외에, 해류는 온난화 요인을 지리적으로 재분포시켜 평형상태에 의한 예측치를 지역에 따라 변모시킬 것이다. 또한 방사원동력의 변화 없이도 대기과 해양의 상호작용은 1년 또는 10년 주기의 변동을 가능케 하여 당분간 장주기 기후변화를 일으킨다.

이러한 영향을 산정하고 현실적인 방사원동력 증가 시나리오를 사용하여 신뢰도가 큰 기후변화 예측을 하기 위해서는 대기과 해양이 연계된 일반 대순환모델이 필수적이다. 이러한 모델들은 대기과 해양의 기본적인 변수들이 시간과 공간의 함수로서 표시되고, 이들을 조절하는 물리 과정들은 1년 주기의 변화가 수십년간 지역규모에서 충분한 신뢰도와 해상력을 가지고 제대로 모사되도록 기획되어야 한다. 이때 모델간의 다른 결과도 물론 이해될 수 있는 것이라야 한다.

해류는 기류에 비해 제대로 관측되지 못했기 때문에 조절 작용을 모사하는 능력에 한계가 커서 신뢰도가 비교적 낮다. 그 결과, 지구온난화를 연구하는 데에 개념이 서로 다른 몇가지 모델이 사용되고 있다.

이들 모델 중 해양을 가장 단순하게 반영한 모델에서는 해양을 단지 열용량을 지닌 물체로 고려하며, 열용량은 표층혼합층 이하에서는 하향 확산에 의해, 표층혼합층에서는 열의 수평 이류에 의해 변화되는 것으로 전제하고 있다. 열용량은 지리적 위치에 따라 변화하지만, 모델에서는 현 기후 조건에서 운용되는 대기 모델과 연계되어 연평균 해수면온도 관측 평균값과 이 평균값의 연간 주기에 맞추도록 미리 정해진 값이다. 이러한 해양 모델을 사용하면 수평 해류는 기후변화를 조절하는 데 기여하지 않는다.

보다 개선된 모델에서는 온실가스로 비롯된 부가된 열을 수동적인 추적자로 보아 해류에 따라 삼차원적으로 이동하며 주어진 확산계수에 의해 혼합되어 격자내 과정을 반영할 수 있게끔 허용하는 것을 전제로 한다. 해류와 혼합계수는 현 기후와 해수 순환을 역학적 개념에서 부합되도록 모사하는 GCM을 운용하여 산출할 수 있다. 적절한 자료들을 사용하면 일시적인 또는 기타 추적자들의 분포는 온도-염분 관계, ^{14}C , 삼중수소나 CFC들, 비교적 적은 컴퓨터 사용비로서, 개별적·단계적으로 정보를 유추할 수 있으며 현장관측과도 비교할 수 있다. 수평 및 수직 확산계수와 같이 잘 알려져 있지 못한 인자들은 현장관측과 일치하도록 조정하는 것이 상례이다. 일반적으로 해상력이 낮은 상자 확산 모델(box-diffusion model)에서는 해류와 혼합은 추적자 분포로부터 직접 산출하거나 좀 더 상세한 GCM에서 나타나는 운반에 의한 집적을 표현할 수 있도록 선정된다. 비록 온위(potential temperature)는 - 단위 부피당 열용량을 나타냄 - 해수의 부양에 영향을 미치는 역학적으로 능동적인 변수이나 몇몇 연구에서는 열에 의한 작은 교란은 GCM 내에서 수동적인 추적자처럼 집적되는 행동을 보인다고 시사하였다. 이러한 접근 방법은 현재 기후에서 소규모 변화를 예측하는 데 유용하게 쓰일 수 있다. 여기서 해류나 혼합계수는 심각하게 변화되는 변수들이 아닌 것으로 취급되고 있다. 현재 심각한 변화가 어느 정도를 의미하는 것인지에 대한 평가는 이루어지지 않고 있다.

해양의 역할을 제대로 표현하기 위해서는 해수면에 대한 적절한 경계 조건을 - 풍속, 순 열수지(net heat flux), 순 담수유입 - 갖춘 고해상력의 해양 대순환모델이 요구된다. 중규모 와류(eddies)에 의한 혼합을 모사하는 것은 가능하며 바람직하나, 이를 공간적으로 고해상력에서 100년 뒤까지 운용해 보는 것은 현 컴퓨터 용량으로는 불가능하다. 현재의 모델에는 해빙의 역학도 추가되어야 한다. 정확한 기후 예측을

위해서는 역학적으로 완전 일치하며 현장관측에 대해 철저한 검증을 거친 수식이 필요하다

해양-대기 연계모델 연구는 이미 수년간 연구되었음에도 불구하고 해상력이 낮고 혼합계수로 미리 정해진 잠정적인 값을 사용하며 해양과 대기를 조합하기 위해 많은 비물리학적 공식들을 쓰고 있다 이러한 제약에도 불구하고 그 결과는 우리가 알고 있는 해수 순환과 대체로 일치하며, 현 해수 순환이 크게 변화하지 않는 한 평형상태 가정하의 기후변화를 시간에 따른 기후변화로 연장해석할 만하다 해양-대기 연계 대순환모델을 운용하는 데 있어 시간과 경비가 많이 들기 때문에 미래의 기후변화 동향에 대한 많은 결론은 관측한 값과 상호관계를 무시한 모델에서 유추한 관계식을 사용하는 단순화된 모델로부터 얻은 것이다 대기의 에너지 균형 모델을 1차원적 용승-확산 해양 모델에 연계시키고 추적자로서 GCM의 결과를 이해하면 기후변화 시나리오에 대한 빠른 진단이 가능할 뿐더러, 전 체계에 대한 확실한 개념을 구축하는 데 유용하다

일반 대순환모델의 낮은 해상력에 관련되어 해결되지 못하고 있는 부분은 해수혼합과 해류가 각기 다른 시간 규모에서 어느 정도까지 열저장에 영향을 주어 평형상태 가정에서 얻어진 지구 평균온도 상승의 어느 정도가 수십년 후에 나타날 것인가 하는 것이다 문제는 수치계산 격자 이하의 크기의 혼합을 제어하는 과정이 모델에 제대로 반영되고 있는가에 달려 있다

다른 제약은 관측자료의 부족 때문이다 이러한 문제가 해양학자들 사이에 실제 순환이 어떻게 일어나는가에 대한 개념부터 다른 몇가지 의견이 생겨나도록 한다

현존하는 수온, 염분 및 기타 지화학적 추적자(예를 들면, 삼중수소, ^{14}C)들의 대규모 분포에 대한 관측결과로부터 표층해수가 영구 수온약층 이하로 침강하는 것은 북대서양과 남극 대륙 주변의 제한된 해역에서만 일어난다고 보고 있다 이 지역과 결부되어, 꼭 동일 장소에서 일어나지는 않지만, 매우 국지적이고 단속적인 심해수 대류나 중력 불안정에 의해 난류적으로 해수가 뒤섞이는 현상이 일어난다 이러한 현상은 수온보다는 염분의 변화에 의한 것이 많지만 심층수 대류는 신속하게 열을 수직적으로 전달할 수 있다

명백하지 않은 점은 심해수가 중력적으로 안정한 표층으로 어떻게 뚫고 올라오는가 하는 것이다 가장 중요한 과정이 수평적 기울기를 가진 등밀도면

(isopycnal surfaces)을 따라 - 즉, 수온약층의 수평 환기 - 일어나는 것인가 하는 논쟁이 있다 이러한 견해를 따르면 등밀도면이 혼합층과 교차되어 표층에서의 바람, 열 및 담수의 혼합이 일어날 때만 등밀도면을 거슬러 혼합이 가능하다는 것이다 (Woods, 1984) 아직 몇몇 학자가 지지하는 다른 견해는 중력적으로 안정한 환경에서 외부 요인에 의한 현장 혼합으로 이것은 지역적 집단(bulk) 확산률로 표현가능하다. 현재 실제 해양 순환을 더 정확히 밝히기 위한 현장관측과 기후 측면에서 모델하는 능력을 확충하기 위해 세계 대양순환실험(World Ocean Circulation Experiment: WOCE)이 수행중이다

온실가스의 점진적인 농도 증가에 대해 서서히 반응하는 기후는 전해양 과정을 고려한 해양-대기 일반 대순환모델로서만 예측될 수 있다 이는 온실가스 농도가 꾸준히 증가하더라도 해양의 열용량 때문에 기후반응은 지연되고 효과적으로 감소되기 때문이다 특정시간에 감지되는 전지구평균온도의(realized global average temperature) 상승은 동일한 방사원동력이 순간적으로 가해졌을 때의 평형상태 온도의 일부에 지나지 않는다 평형상태 온도의 나머지 중에서 일부는 성층화된 해양의 상층부에 저장되어 수십년에서 1백년 가량 지연되며, 그 나머지는 심해로 이동되어 심층수를 가열시키는데, 표층해수 온도에 영향을 미치기까지 수세기 또는 그 이상의 시간이 소요된다. 또한 해류는 온난화를 공간적으로 재분포시켜 평형상태 온도를 지역적으로 일부 수정한다 더우기 방사원동력의 변화가 없을 경우에도 해양과 대기 사이의 상호작용은 연간 또는 수십년에 걸쳐 변동되어 장기간의 기후변화를 초래할 수 있다. 따라서 믿을만하게 기후변화를 예측하기 위해서는 방사원동력 증가를 현실적으로 고려한, 대기와 해양이 연계된 일반 대순환모델이 필수적이다

이전에 이용된 대기 모델은 자세하며 고도로 발달된 것이지만 해양을 취급하는데 있어서는 초보단계에 머물러 있다 또한 지금까지의 기후변화 모델은 일부 학자들에 의해서만 가능하였는데 해상력이 낮고 1백년까지만 예측할 수 있었다 그 결과는 다음과 같다

① 방사원동력이 꾸준히 증가하는 경우, 전지구 온도 상승은 그 이전 어느 시기에 가상의 순간적인(instantaneous) 방사원동력이 가해졌을 때 이루어질 새로운 평형 온도의 일정 부분에 해당된다 CO₂가 2배로 증가될때 온도 민감도가 4°C인

대기모델에서 가상 시기는 11년 전이고 일정 부분은 약 66%이다 대략 온실가스의 증가로 인한 전지구온도의 반응은 현재 평형 온도의 약 60%이다 (만약 온도 민감도가 4°C가 아니라 1.5°C라면 위 값들은 6년, 85% 그리고 80%로 바뀐다)

② 온도와 강수량 변화의 지역적인 양상은 대기모델의 평형상태 시뮬레이션에서 얻어진 결과와 유사하다. 예외인 지역으로는 온난화가 다른 지역보다 훨씬 적은 남극 주변과 북대서양 북부 해역이 있다

③ 예측 결과는 지화학적 및 기타 추적자에 의해 밝혀진 것처럼 현재 해양순환에 대한 우리의 지식과 일반적으로 일치한다 그러나, 컴퓨터의 용량이 모델을 실행하는데 있어 여전히 한계를 보이고 있으며, 기존의 관측자료로는 다양한 해수의 혼합작용의 상대적인 역할에 대한 근본적인 문제를 해결하기 어렵다 따라서 예측값의 신뢰구간에 커다란 영향을 미친다

④ 전지구 평균에 대한 결론은 CO₂ 흡수에 사용된 모델과 유사한 에너지 균형기후모델 (energy-balance climate model)을 사용함으로써 확대 해석이 가능하다 만약 증가하는 온실가스의 방사원동력이 어느날 갑자기 안정화되어 인정한 수준으로 유지된다해도 전지구 온도는 약 10-20년 동안 전과 동일한 비율로 계속 증가할 것이며, 그 이후에는 증가가 느려져 수 세기가 경과한 후 평형상태에 도달할 것이다

⑤ IPCC의 현상유지(business-as-usual) 시나리오를 기초로 할 때 에너지균형 용승확산모델 (energy-balance upwelling diffusion model)은 산업혁명(1765년으로 간주)부터 2030년까지 1.3°C-2.8°C의 지구온난화가 발생할 것으로 예측하고 있으며, 이 값의 최선추정치는 2.0°C이다 1990년 이후 증가분은 0.7-1.5°C(최선추정치는 1.1°C)에 해당된다 산업혁명부터 2070년까지 온도의 증가는 2.2-4.8°C이며 최선추정치는 3.3°C이고, 1990년 이후 증가분은 1.6°C-3.5°C이며 최선추정치는 2.4°C이다

(4) 기후변화의 증거

근대 기후 기록에서의 변화와 변동에 초점을 맞추고 있다 더 장기적 안목과 고기후에 대한 예측을 위해 고기후변동에 대해서도 언급한다. 기후 기록 분석은 기후의 자연 변화 및 변동에 중요한 정보를 제공한다. 기후 기록으로부터 최근 증가하고 있는 온실가스에 의한 부분을 연역하는 데 있어 어려움은 자연적인 기후변화 요인들이 이 부분을 증가 또는 감소시킬 수 있다는 데 있다

기상을 관측하고 이 자료를 기후에 대한 정보로 변환시키는 것은 매우 복잡하고 힘든 일이다. 현 기후에 대한 거의 모든 정보는 기상 자료에서 구한 것이다. 더 큰 어려움은 유사정보(기후에 민감한 자연적인 기록들(꽃가루, 호수 퇴적물의 교호, 해양 퇴적물, 곤충이나 동물의 잔해, 빙하의 종점)) 취급에 있으며, 이들을 사용해야만 현대의 측정기가 도입되기 이전의 기상을 유추할 수 있다. 따라서, 자료의 질에 대해 특히 주의해야 한다. 다음의 증거가 존재하며 그 신뢰도는 *로 나타내었다.

19세기 후반 이래 전지구 지표면의 온도는 불규칙하지만 실질적으로 증가해 왔다 (5*)

동 기간 동안 대부분의 산악빙하는 불규칙하나 명백하게 감소되었다 (5*)

강수량은 수십년 동안 사하라 사막 부근에서 크게 변했다 (5*)

지난 세기 동안 강수량은 소련에서 점진적으로 증가했다 (3*)

1950년 이래 수 %의 수준으로 구름량 증가현상이 미국에서 관측되었다 (3*)

운량은 확실하게 증가하지 않았지만 더 대규모이며, 갑작스러운 구름 형성 현상이 호주에서 관찰되었다 (1*)

관찰 결과와 고기후변화에 대한 증거는 지구의 기후가 수백만년에서 수년의 시간 규모 동안 변화하고 있음을 나타내고 있다. 지난 2백만년 동안 10만년 주기의 빙하기-간빙기의 교번이 있었고 이때마다 대규모의 해빙의 면적과 해수면의 변화가 동반되었다. 이 기간 동안 전지구 평균온도는 약 5-7°C까지 변했다. 마지막 빙하기가 끝난 약 10,000년전 이래로 전지구 표면온도는 수 세기 또는 그 이상의 시간 규모에 걸쳐 최고 2°C의 범위로 변동했다. 이러한 변동에는 약 5,000-6,000년전 경의 Holocene optimum, 약 1000 A.D.의 중세 온난기(Medieval warm period) - 아마도 전지구적인 것은 아님 - 그리고 19세기 중엽에 끝난 소빙하기(Little Ice Age)가 포함된다. 그러므로 통상 19세기말 이후부터 전지구 표면온도의 경향에 중점을 두어 논의하고 있다. 기록에 의하면 19세기 후반 이래로 전지구 평균온난화는 $0.45 \pm 0.15^\circ\text{C}$ 이며, 이 값에는 육지에서 도시화에 의한 온난화(0.05°C) 효과도 포함되어 있다. 전지구 온도 증가의 대부분은 1940년대 중반 이전에 관측되었다. 지구온난화는 ① 육지 위의 대기온도, ② 해양 위의 대기온도, ③ 해수표면온도의 세가지 독립된 자료에서 일률적으로 나타났다. 마지막 두가지 온도변화는 육지 위의 대기 온도에 비해 매우 짧은 시간적 지연 후에 나타난다.

19세기 말엽 이래로 전세계적으로 산악빙하의 뚜렷한 감소는 지구온난화의 또 다른 좋은 증거로 제시된다.

지난 100년 동안의 온도 기록은 북반구와 남반구 사이에서 뚜렷한 차이를 보인다. 1940년대와 1970년대 초반에 북반구의 온도는 하강한 반면, 남반구의 온도는 거의 일정했다. 남반구에서 1970년 그리고 북반구에서 1975년 이래로 더욱 일반적인 온난화가 일어났는데, 1975-1982년 동안 온난화는 강화되었으나 1982-1989년 사이에는 지구온난화는 거의 일어나지 않았다. 그러나, 남·북반구의 서로 다른 지역에서 지표면 온도변화는 지난 세기의 수십년 동안 상당한 차이를 보였는데 특히 북반구에서 그 차이는 더욱 뚜렷했다.

수 년의 짧은 기간 동안, 전지구적으로 또는 각 반구별로 10분의 수 °C의 온도 변동은 흔히 일어난다. 이러한 단기간의 온도변화의 일부는 적도 태평양에서 엘니뇨 남부진동 현상(ENSO)과 관련있다. 그리고 기후변화에 중요한 요인인 해양순환과 심해수의 열용량의 수십년 규모의 변동 또한 온도변화를 일으킬 수 있다.

강수량의 변화는 전지구적으로는 물론, 반구규모(hemispheric scales)로도 예측할 수 없다. 그러나 일부 지역은 과거 수십년 동안 확실한 강수량의 변화가 있었다. 1950년대 이래로 사하라사막 연변 지역에서 여름철 강수량이 감소한 반면 지난 세기 동안 소련에서는 강수량이 꾸준히 증가해 왔다.

해빙과 눈에 대한 신뢰성 있는 기록은 너무 짧아서 장기간의 변화를 예측하기 어렵다. 비록 태풍의 빈도가 수십년의 시간규모에 걸쳐 변화하였지만, 열대지역의 태풍의 수와 강도에 대한 체계적인 변화는 뚜렷하지 않다. 그리고 아직까지 전지구 규모의 흑서의 빈도 변화에 대한 뚜렷한 증거는 없다. 구름의 증가현상이 해양과 일부 육지(미국과 오스트레일리아)에서 보고되었으나 불확실성이 너무 커서 결론을 유도하기 매우 어렵다.

과거 온도기록이 정량적, 정성적으로 커다란 한계가 있음에도 불구하고 지난 세기 동안 불규칙하지만 실제로 온난화는 일어났다고 결론지을 수 있다.

(5) 온실효과의 감지

이 절에서 다루고자 하는 것은 ‘온실효과를 실제 발견하였는가?’ 하는 것이다. 강화된 온실효과를 찾게 되면 지구 기후체제에 대한 모델을 직접 증빙해 보일 수 있기 때문에 중요하다. 관측된 기후의 기록에서 온실가스에 의한 변화를 밝혀 내기 전까지는 모델의 신빙성과 미래의 기후변화에 대한 가장 일반적인 예측마저 항시 회의에 부딪히게 된다.

예전에도 온실화효과 감지여부에 대한 논란이 있었다 지금까지는 강화된 온실효과가 관측기록에서 명백히 밝혀지지 않은 것으로 보고 있으나, 지난 100년간 지구 평균온도의 변화는 온실가스 농도변화와 잘 일치하며, 현재 모델들이 예측하고 있는 기후 민감도값(1.5-4.5°C/CO₂ 배가)이 틀리다고 주장할만한 관측된 증거도 없다 따라서, 여기서는 보다 최근의 자료로서 과거에 내려졌던 결론을 간략히 재평가해 본다

이 감지 문제는 신호(signal)와 잡음(noise)의 개념으로 쉽게 서술할 수 있다 여기서 신호는 강화된 온실효과에 의해 미리 예측된 시간에 따른 기후의 반응이다 잡음은 그 나머지 강화된 온실효과에 의하지 않은 기후변화이다 감지를 위해서는 신호가 잡음에 비해서 충분히 커야 한다 그리고, 신호가 강화된 온난화에 의한 것이라 탐하기 위해서는 어느 원인에 대해 특정한 것이어야 한다 예로서, 전지구 평균기온의 온난화는 이러한 의미에서 좋은 신호라고 보기 어렵다 왜냐하면, 온난화를 일으킬 수 있는 원인이 산재하기 때문이다

지구 평균온도는 지난 80-100년 사이에 0.3-0.6°C 상승했다 이때 온실가스 또한 상당히 증가했다 온도 상승과 온실가스 증가는 서로 일치하는가? 이에 답변하기 위해서는 온실가스 변화에 의한 영향을 모델화해서 결과를 실측값과 비교해야만 한다 전산의 한계와 연계된 해양-대기 대순환모델의 경직성 때문에 이런 모델을 사용할 수는 없다 대신 용승-확산 기후 모델을 사용하여 해양에 의한 축소 또는 지연 효과를 고려해야 한다 모델의 반응은 주로 기후 민감도(ΔT_{2x}), 해수 혼합의 정도(확산계수로서 지정됨), 지구 평균변화에 대한 해수 침강 지역의 온도변화(π) 등에 의해 결정된다. 불확실성은 이들 인자의 범위로서 나타낸다 모델은 이전에 주어진 값과 관계식으로 1765년부터 1990년까지를 재현시켜 보도록 운용된다.

몇가지 모델에 각기 다른 인수값을 넣어 운용한 결과가 1861-1989년의 관측결과와 비교되었다 (그림 30) 모델의 결과는 1세기 시간규모에서 관측값과 정성적으로는 일치한다 사람들은 더 긴 시간규모에서도 일치하기를 기대할 것이다 짧은 시간규모에서 기후계는 시스템 내적 변동과 외부로부터의 강요 때문에 온난화에 대한 반응이 모호해질 것이다. 비록 관측된 짧은 시간규모의 변동을 상세히 설명하지는 못하지만, 이 크기는 우리가 자연적인 기후변동으로 알고 있는 크기에 상응한다 이들은 필시 우리가 찾고자 하는 온실화 신호에 대한 잡음이다.

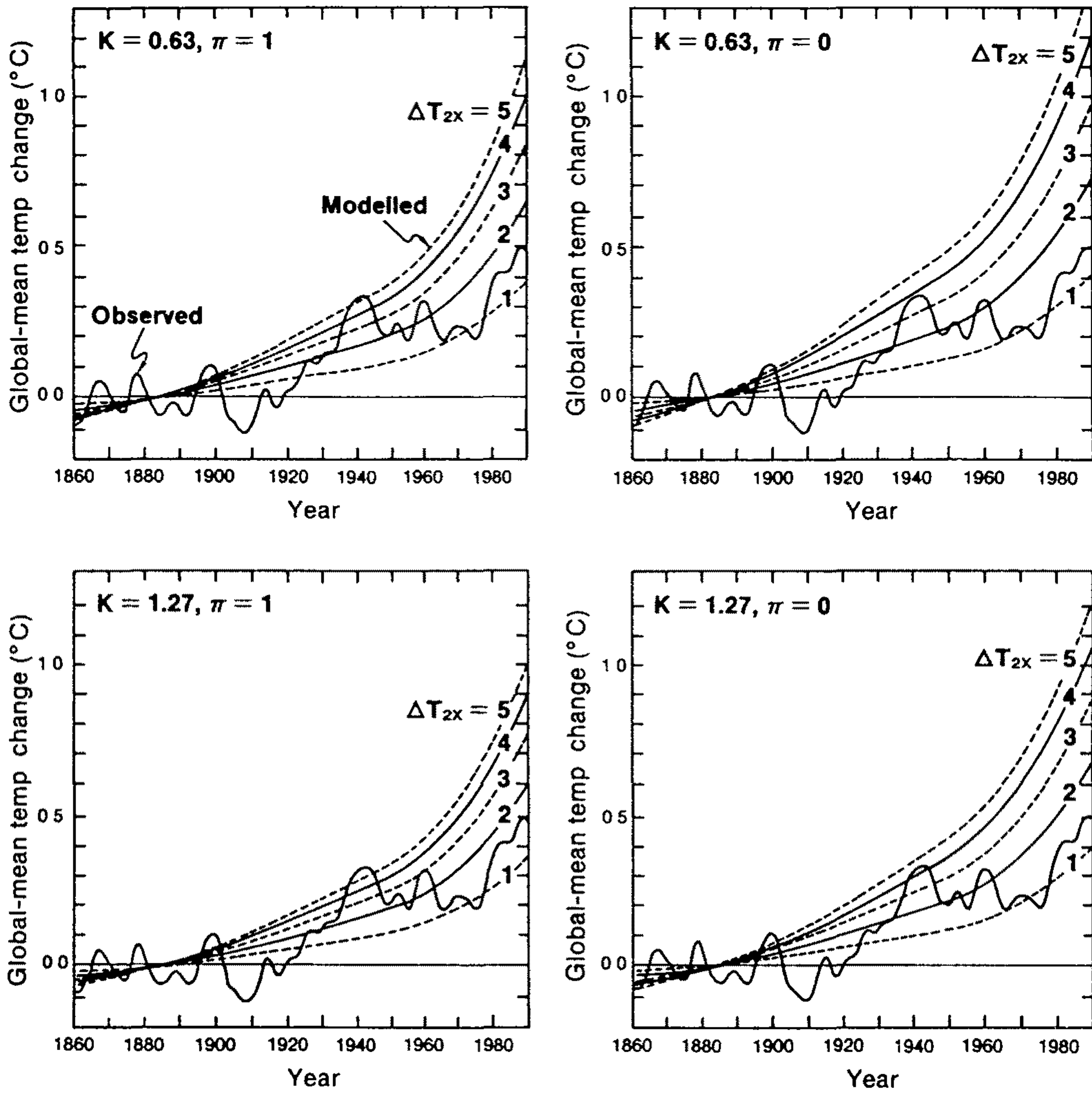


Figure 30 Observed global-mean temperature changes (1861-1989) compared with predicted values

10여년 주기의 잡음은 명백하지만 100년 주기의 잡음 또한 상당하다 이들 잡음은 그림 30에서 기후 민감도값을 알아내기 어렵게 한다

해양에 의해 무작위적으로 대기가 교란되는 것에 의해 비롯되는 내적 변동 (Hasselmann, 1976)은 1세기 동안 0.3°C 가량 가열 또는 냉각 작용을 발생시킬 수 있다 (Wigley and Raper, 1990, 그림 31)

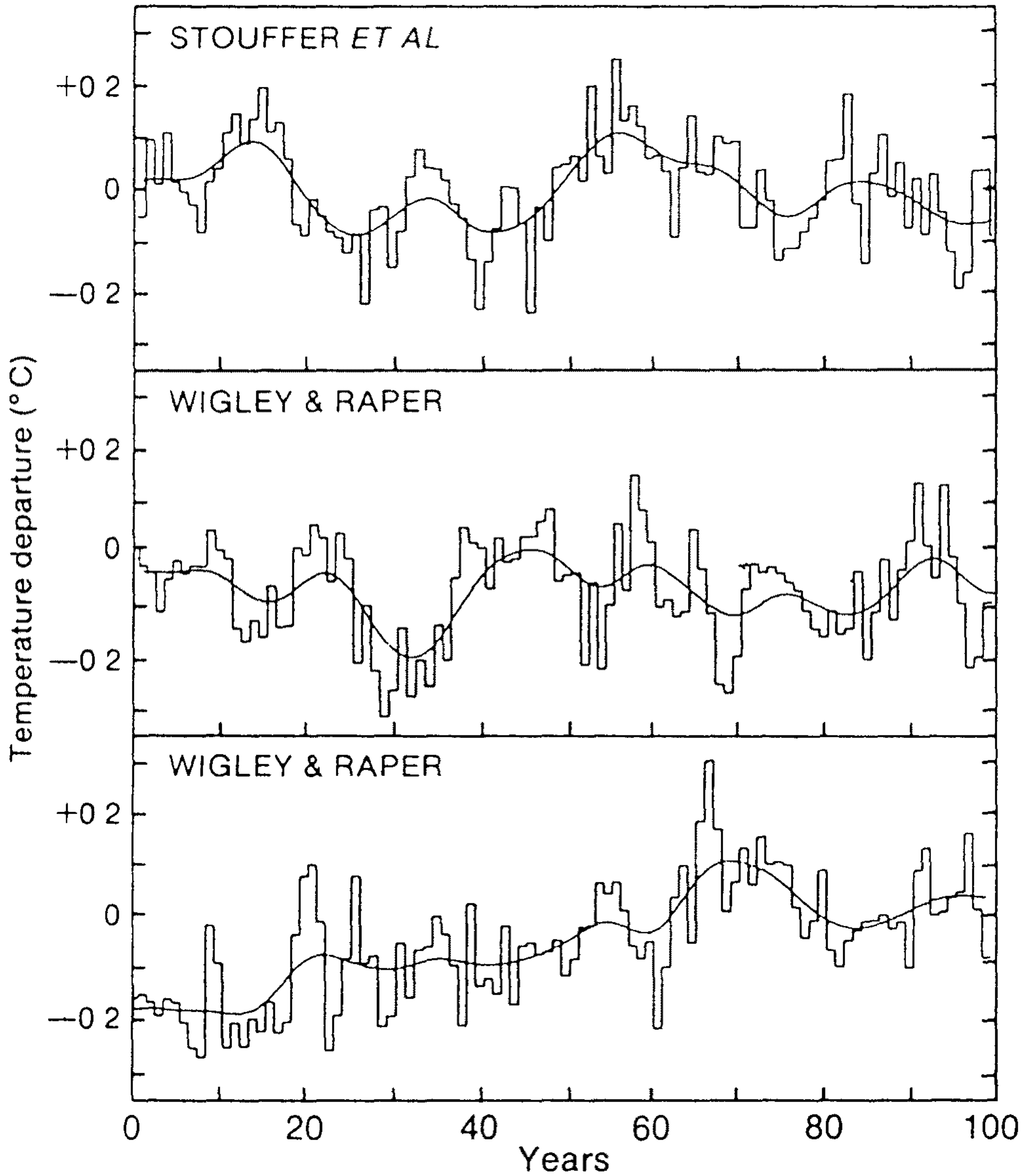


Figure 31 Simulation of the increase in global mean temperature

반면, 화산 폭발이나 일사량 변화, 인류 활동에 의한 외부로부터의 강요는 거의 비슷한 크기의 변화를 일으킬 수 있다 10년 정도의 시간규모에서 몇몇 외부 요인은 - 화산 분화, 황 에어로졸 - 명백히 냉각효과를 가지나, 나머지는 어느 쪽으로 작용할지 불분명하다

만일, 일세기 규모에서 온난화 이외의 모든 요인의 합이 영이라면 그림 30에서 기후 민감도는 1-2°C 수준이다 이와 달리 모든 기타 요인의 합이 양의 값이면 기후 민감도는 1°C 이하이고, 이와 반대로 음의 값인 경우에 기후 민감도는 4°C 이상으로 클 수도 있다 만일, 관측자료의 불확실성도 함께 고려한다면 기후 민감도값의 불확실성은 더욱 커진다 따라서, 현재 감지 작업은 다변수 지문 분석방법(multivariate fingerprint method)에 초점을 맞추고 있다 이 방법은 본시 모델을 확인하는 것으로서, 이때 모델을 시험하기 위한 교란실험은 현재와 같이 배출이 조절되지 않고 대기중으로 온실가스의 배출하는 경우이다

지난 100년 동안 전지구 평균 온도는 0.3-0.6°C 가량 증가했다 이러한 기온 상승 크기는 기후모델예측치와 대략 일치하지만 어느 정도가 온실효과에 의한 것인지 모른다

지구온난화가 오로지 인간활동에 의한 온실효과로 비롯된다면 기후민감도는 기후예측 모델의 온도범위에서 최소값 부근에 있을 것이다 기후계의 자연변동은 지금까지 관찰된 기후변화만큼 클 수 있지만 자연변동의 크기나 그 방향을 추정할 만한 자료가 충분치 못하다 만약 자연적 온난화가 어느 정도 포함되어 있다고 가정하면 기후 민감도는 더욱 작은 값으로 계산된다 그러나, 더 큰 규모의 온실화가 자연변동과 다른 요인들에 의해 부분적으로 감소되어 나타날 수도 있다. 이렇게 인간에 의해 증가된 온실효과 이외의 다른 요인들을 고려할 경우 기후민감도는 모델예측치의 최대값 부근에 있을 것이다

지구 평균온도만으로는 온실가스에 의한 기후변화를 나타내기에 불충분하다 지구 평균 온도변화의 원인을 알기 위해서 변화하는 기후의 다른 측면, 특히 기후변화의 시·공간적 특징을 조사하는 것이 필요하다 현재 모델 예측치와 관측 자료는 일부만이 일치하고 있는데, 그 이유는 기후모델이 여전히 개발의 초기 단계에 있으며, 자연변동과 기후에 대한 또 다른 인류기원 영향에 대한 지식의 불충분, 그리고 적절한 관측자료(특히, 장기자료)의 결핍 때문이다 또다른 중요한 문제는

지금까지 알려진 과거의 온실가스 농도의 변화를 포함하는 전지구 기후계의 현실적인 모델이 여전히 실행되지 못하고 있다는 것이다.

온실효과를 감지하기 위해서는 전지구 기후계와 잠재적인 기후 방사원동력 요인들을 폭넓게 관측하고 모델의 불확실성을 감소시키려는 장기간의 노력이 필요하다 곧 온실효과를 감지하기 위해 사용될 통계방법의 개선이 필요하다 그러므로, 온실효과의 감지를 개선하기 위해서 폭넓은 감지전략(detection strategy)이 공식화되고 실행되어야 한다 온난화 감지는 모델 실험과 자료수집 노력을 병행하기 위한 통합된 국제기후변화감시위원회를 설립함으로써 용이해질 것이다.

객관적인 방법을 사용하여 가중된 온실효과를 정량적으로 감지하는 연구가 핵심 분야이다 그 이유는 정량적인 감지가 온실효과의 크기에 대한 불확실성을 감소시키며, 모델 예측의 신뢰도를 증가시키기 때문이다 오늘날 온난화 방향조차 신빙성있게 감지하지 못한다 하더라도 온실효과 이론이 틀렸다거나 온실효과가 앞으로 수십년 내에 인류에게 심각한 문제를 일으키지 않을 것이라는 것을 의미하지는 않는다

5. 기후변화의 실태

온실가스의 증가로 인해 증가된 방사원동력의 직접적인 영향을 결정하는 것은 비교적 쉽다 그러나 기후가 온난화됨에 따라 여러 과정들이 작용하여 온난화는 증폭 되물림(positive feedback)되기도 하고 쇄감 되물림(negative feedback)되기도 한다 지금까지 알려진 주요 되물림고리는 수증기, 해빙면, 구름 및 해양의 변화 때문에 비롯되는 것이다

상기 되물림고리를 설명하기 위해 현재 보유하고 있는 최상의 도구는(그러나 온실가스의 되물림고리는 포함되어 있지 않다) 일반 대순환모델(general circulation models, GCMs)이라 알려진 3차원 수치모델이다 GCM은 전반적인 체제내의 물리적이고 동역학적인 과정에 대한 지식을 종합하고 여러 성분들 사이의 복잡한 상호작용을 고려하도록 구성되어 있으나, 현재 수준에서 볼 때 복잡한 많은 과정을 충실히 반영하지 못하고 있다 따라서, 기후변화를 예측하는데 상당한 불확실성들이 포함된다

여기에 기술한 기후변화의 예측은 다음을 기초로 한 것이다 ① 모델 시뮬레이션 (simulation), 되물림고리 분석 및 관측자료로부터 얻어진 평형기후민감도 (대기중 CO₂가 2배가 될때의 평형온도변화)의 “최선 추정치(best-estimates)”, ② 미리 정해진 기후민감도를 사용하여 온실화 원동력을 온도 변화로 환산하는 해양-대기간의 “확산-용승 상자모델 (box-diffusion-upwelling)” 기후모델

가 기후변화 속도

온실가스 배출이 IPCC의 현상유지 시나리오(Senario A)를 따른다면 다음 세기 동안 지구 평균온도의 평균 상승률은 10년당 약 0.3℃ (0.2-0.5℃ 범위) 증가할 것이다

그림 32는 2100년까지의 예측 온도를 최고, 최저 및 최선추정치의 기후반응별로 나타내고 있다 기후에 영향을 미치는 다른 요인들때문에 온도상승은 일정하지 않지만, 2025년에는 현재의 지구 평균온도보다 1℃, 21세기 말에는 3℃(이는 산업혁명 이전에 비해 4℃ 높음) 정도 높아질 것으로 예측된다

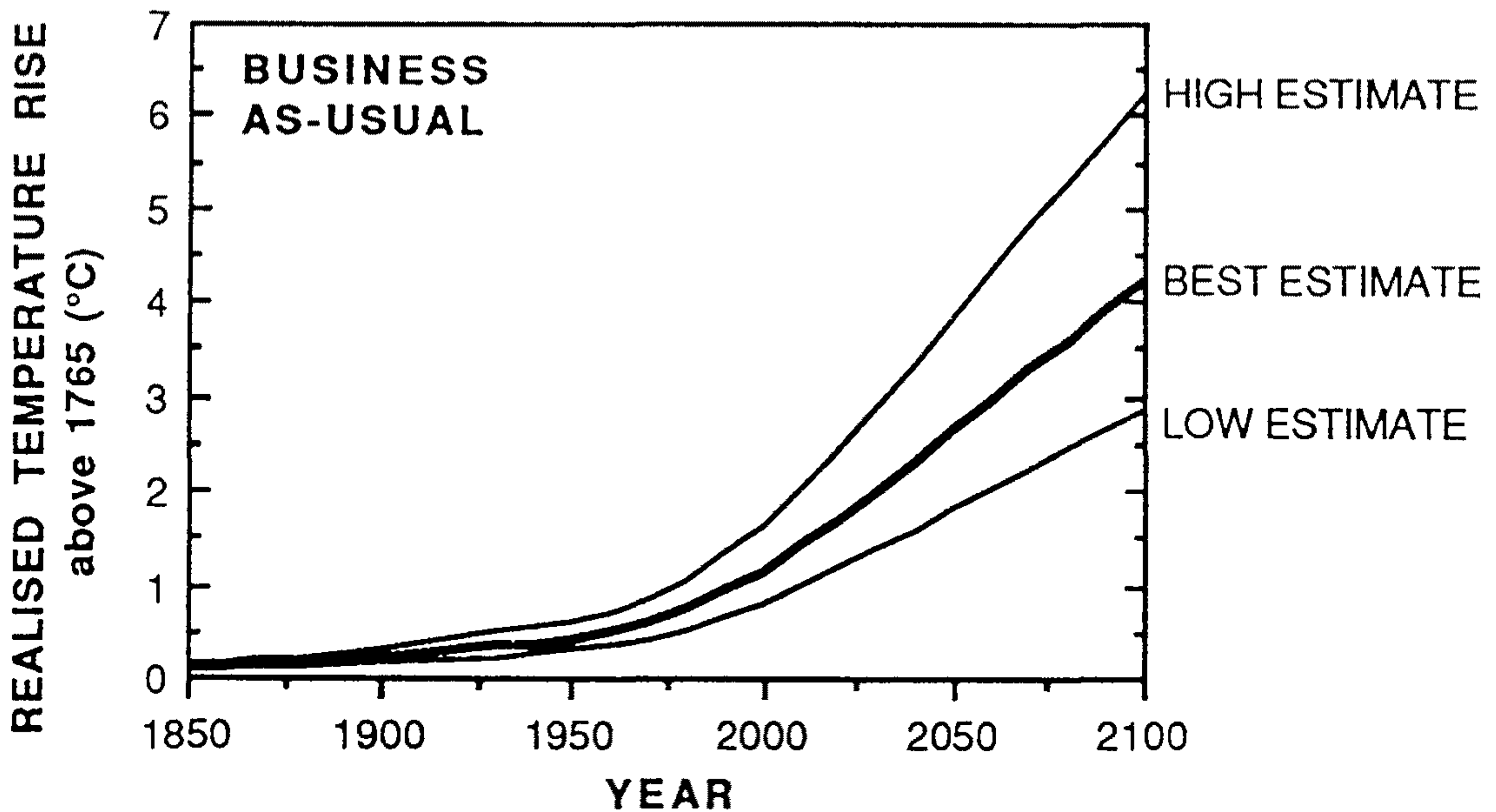


Figure 32 Simulation of the increase in global mean temperature from 1850-1990 due to observed increases in greenhouse gases, and predictions of the rise between 1990 and 2100 resulting from the Business-as-Usual emissions

상기의 온도상승은 감지된 온도(realized temperature)이다. 인간은 언제 어느때건 온실가스 배출로 인한 평형온도 상승을 유발시켜 미래의 어느 시기에서의 온도상승 요인을 유발시킬 수 있다 예를 들면, BaU에 따른 “최선 추정치”에 의하면, 이 시기에 0.9℃ 상승 요인이 유발되나, 이 중 약 0.2℃만 2050년까지 감지될 것이고 나머지는 이후 수십년 또는 수세기내에 걸쳐 일어나게 될 것이다.

각 온실가스의 배출량을 1990년 수준으로 안정화시킬 수 있다 하더라도 온도는 처음 수십년 동안 10년마다 약 0.2℃ 정도 상승할 것으로 기대된다 배출량의 규제가 점차 강화되는 IPCC 배출 시나리오의 경우, 다음 세기 동안 지구 평균온도의 평균상승율은 10년마다 약 0.2℃ (시나리오 B), 0.1℃를 약간 상회하는 경우 (시나리오 C), 그리고 약 0.1℃ (시나리오 D)이다 (그림 33)

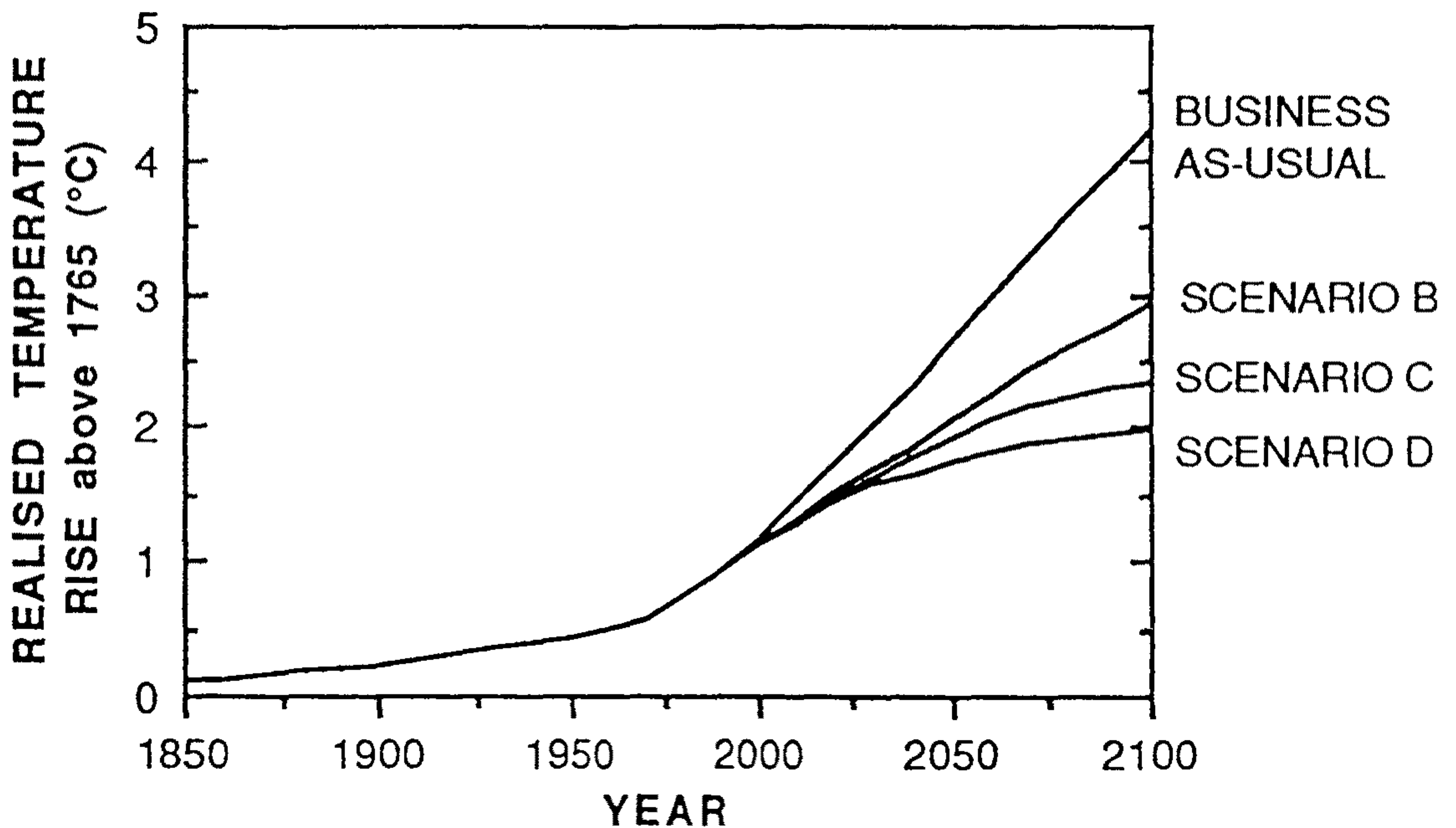


Figure 33 Simulations of the increase in global mean temperature from 1850-1990 due to observed increases in greenhouse gases, and predictions of the rise between 1990 and 2100 resulting from the IPCC Scenario B, C and D emissions with the Business-as-Usual case for comparison

나. 기후변화 양상

지구 평균온난화와 강수량 변화에 대한 지식은 기후변화의 영향을 결정할 때 제한적인 가치를 가질 뿐이다 예를 들면, 농업의 경우 지역적이고 계절적인 변화를 알 필요가 있다

모델은 해양보다 육지위의 대기가 더 빨리 온난화되며 최소의 온난화는 남극주변과 북대서양 북부에서 발생할 것임을 예측하고 있다

고도의 해상력을 갖는 모델들은 대륙규모의 변화에 대해 일관성있는 예측결과를 나타내며, 이에 대한 물리학적 원인도 이미 알려져 있다 온난화는 겨울철의 북반구 고위도에서는 지구 평균보다 50-100% 더 크며, 여름철의 해빙지역에서 지구 평균보다 미약할 것으로 예측된다 강수량은 겨울철 중·고위도 대륙에서 평균적으로 증가할 것으로 예측된다 (35-55°N에 걸쳐 약 5-10% 정도)

지역권별 연구를 위해 IPCC는 서로 다른 기후조건을 대표하고 있는 수백만 km²의 면적을 갖는 다섯 지역을 선정했다 그림 34는 선정된 다섯 지역에서 현상유지 시나리오의 경우에 대해 2030년까지의 온도, 강수량 및 토양습도의 평균값 변화를 보여준다

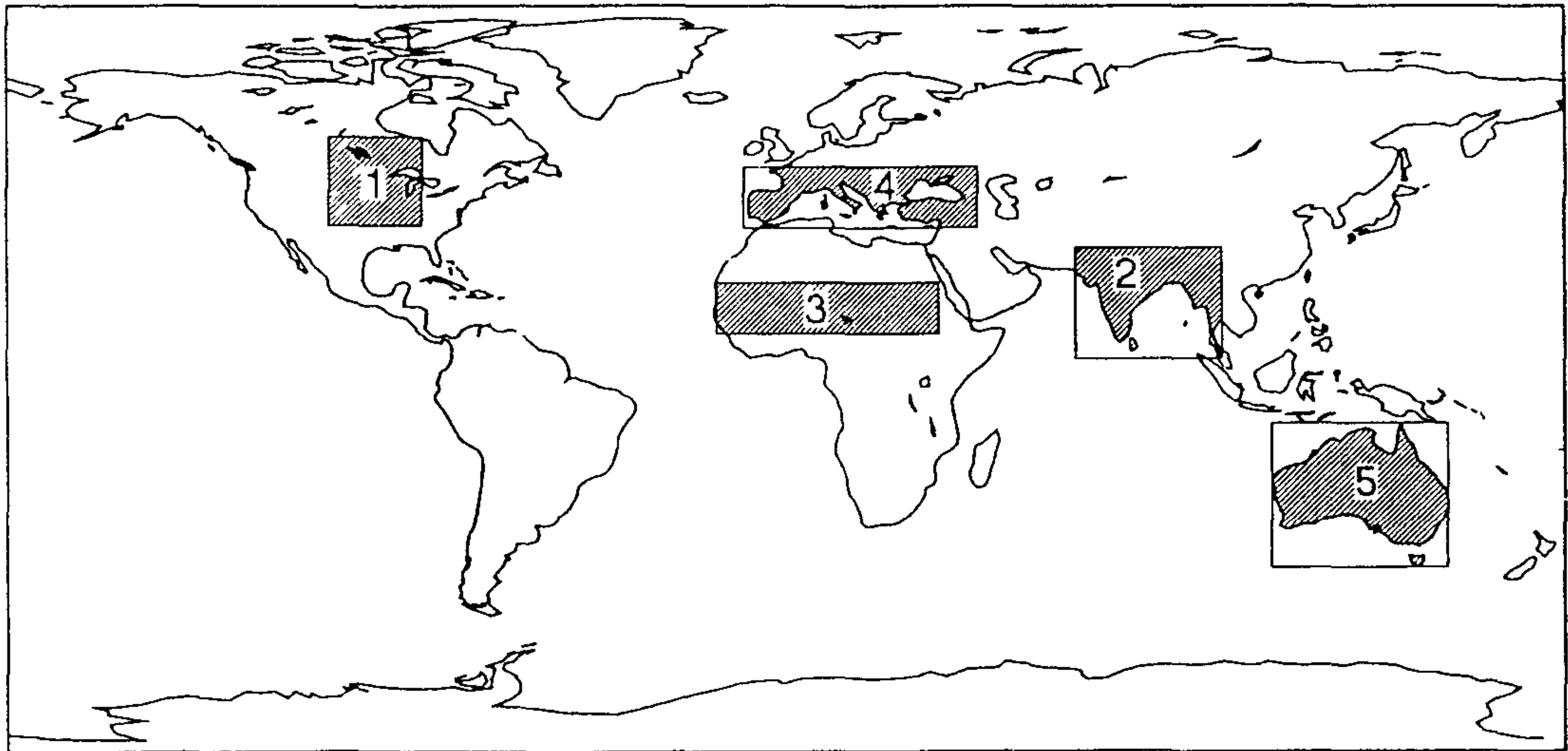


Figure 34 Map showing the locations and extents of the five areas selected by IPCC

그런데, 이들 지역내에서도 상당한 변화가 있을 수 있다 일반적으로 이들 지역적인 산정치의 정확도는 낮으며, 특히 강수량과 토양습도의 경우 정확도는 낮지만, 최선추정치를 구해 본 것에 불과하다 아직까지 영향평가에 필요한 소규모의 지역적 예측은 불가능하다

다. 극단적 기후변화

날씨의 변동과 극단적인 기상의 빈도가 국지적으로는 평균기후의 변화보다 더욱 큰 영향을 미칠 것이다 집중 호우의 증가외에 다른 기상변동이 미래에 있을 것이라는 명백한 증거는 없다 온도의 경우, 변동폭의 변화는 없지만 평균값에서 얼마간의 증가가 있다고 가정하면 온도 분포에서 최고점으로 주어진 값보다 높은 온도를 나타내는 날의 수는 실제로 현저히 증가할 것이다 동일한 가정을 기초로 하여, 온도 분포에서 최저점의 온도를 나타내는 날의 수는 감소할 것이다. 그렇다면 폭염 또는 혹한인 날의 숫자는 기상변동 없이도 변할 수 있다는 것을 알 수 있다 토양습도의 임계량을 나타내는 날의 수는(예를 들면 어떤 식물의 생존에 직결되는) 평균 강수량과 증발량의 변화에 더욱 민감하다

대규모 기압대의 위치이동은 특정 지역에서 날씨의 변동성과 극단적인 날씨에 심각한 영향을 미칠 것이다 그러나, 이러한 효과가 실제 나타날지, 나타난다면 어떤 방식으로 나타날지에 대해서는 현재까지 알려져 있지 않다.

라 태풍의 양상

태풍은 사회에 커다란 영향을 미칠 수 있다 지구가 온난화되면 태풍의 빈도, 강도는 증가되고 위치는 변할 것인가?

태풍과 허리케인 같은 “열대역 폭풍”은 수온이 약 26℃ 이상인 바다에서만 발달한다. 이 임계값 이상의 온도를 나타내는 바다의 면적이 지구가 더워짐에 따라 증가하더라도, 임계온도 자체는 더 온난화된 세계에서 증가할 수 있다 따라서, 이론적인 최대 강도는 온도에 따라 증가할 것으로 기대되지만, 기후모델을 통해서 기후가 변함에 따라 열대역 폭풍의 빈도 또는 강도가 증가하거나 감소한다고 단정적으로 판단할 수는 없다 과거 수십년 동안 이러한 현상이 일어났다는 증거도 없다

북대서양과 북태평양을 가로지르며 나타나는 “중위도의 폭풍”은 적도와 극사이의 온도차이에 의해 발생한다 지구가 온난화되면 이 온도차이는 아마도 약화되거나 궤도를 바꿀 것이라고 예상되며 모델에 따라 변화양상이 다름에도 불구하고 모델결과는 겨울철 중위도 태풍의 일간 궤도 변동이 감소할 것이라는 지적이 있다 현재의 모델은 소규모의 교란을 풀 수 없다 따라서, 고해상 모델로부터 좋은 결과를 얻을 수 있는 다음 수십년까지는 태풍의 변화를 평가하는 것은 사실상 불가능하다

마. 기후변화의 기타 요인

“태양 에너지” 배출량의 변화 또한 기후에 영향을 미칠 수 있다 10년 규모의 태양 변화와 온실가스 농도의 변화는 엇비슷한 규모의 영향력을 갖는다 그러나 장기적으로 보면 태양활동도는 증감을 반복하기 때문에 온실가스의 증가에 비해 훨씬 영향력이 작다 화산 분출로 배출되는 분무입자는 수 년 동안 온난화에 반대로 작용하여 지표층을 냉각시킬 수 있다 그러나 장기적으로는 온난화가 역시 지배적일 것이다.

인간은 주로 황의 배출을 통해 저층 대기의 에어로졸을 증가시키고 있는데, 에어로졸은 국지적으로 중요한 두가지 영향을 미치고 있다 첫째는 대기에 의해 산란되고 흡수되는 빛에 대한 직접적인 영향이고, 두번째는 구름의 반사도를 증가시켜 구름의 미세물리적 성질에 영향을 미치는 간접적인 영향이다 이들 두가지 영향은 모두 국지적 냉각에 중요한 역할을 하기 때문에, 황의 배출량 감소는 지구 온도를 상승시킬 것으로 기대된다

해양과 대기처럼 기후계의 서로 다른 구성원 사이의 상호작용 역시 장기적인 면이 있기 때문에 지구의 기후는 외적인 교란에 의하지 않고도 변화한다 이러한 자연적인 변화는 인류에 의한 온난화를 증가시키거나 감소시키는 작용을 한다 1세기 시간 규모로 볼때 자연변동은 온실가스의 증가로 기대되는 변화보다 훨씬 미약할 것이다

바 기후예보의 신빙성

기후예보는 미래의 인류기원 기체의 배출량, 대기중 온실가스 농도의 변화, 변화된 대기 기체 농도에 대한 기후의 반응등에 대한 지식의 불확실성으로 인하여 확실한 결론은 내릴 수 없다

기후가 변하는 정도는 온실가스가 배출되는 비율에 따라 좌우된다는 것이 명백하다 즉, 경제·사회적인 다양한 요인들에 의해 결정될 것이다. 또한 온실가스의 배출 기원과 제거 원인을 완전하게 이해하지 못하고 있기 때문에 주어진 배출 시나리오로부터 계산되는 미래 농도에 많은 불확실성이 존재한다 농도를 계산하기 위해 많은 모델을 이용하여 각각 기체에 대한 최선 추정치를 선정했다. 예를 들면, CO₂의 경우 1990-2070년 사이의 농도증가는 최고치와 최저치 사이에 심지어 거의 2배의 차이가 나타난다 이는 방사원동력 측면에서 50%의 차이에 해당한다 더우기 온실가스의 자연적인 기원과 제거는 기후변화에 민감하기 때문에 이들은 실제 미래의 기체농도를 변화시킬 수 있다 기후가 온난화됨에 따라 이 “온실가스 되물림”(greenhouse gas feedback)는 자연 온실가스를 감소시키기 보다 오히려 증가를 초래할 것으로 보인다 이러한 이유때문에 기후변화는 아마도 산정치보다 더 클 것으로 전망된다

세째, 기후모델은 여러 과정에 대한 인간의 지식 한도 내에서 유용한 것이며 아직 완전한 것은 아니다 위에서 기술된 기후예측의 범위는 모델의 불완전성으로 인한 불확실성을 반영하고 있다 이들 불확실성 중 가장 큰 것은 구름의 되물림 작용으로(구름의 양과 분포 및 태양과 육지의 복사에너지와 구름과의 상호작용에 영향을 미치는 요인), 온난화의 크기에 대해 200% 정도의 불확실성을 초래한다 기타 불확실성은 대기과 해양, 대기과 지표면, 그리고 상층해양과 심층해양간의 에너지 이동에 의해 비롯된다. 또한 기후모델에서는 해빙과 대류에 대해 충분히 고려하지 못하고 있다 그럼에도 불구하고 기후모델들은 폭넓은 규모의 기후변화 특성들을 예측할 수 있다는 확신을 갖게 한다

결론적으로, 기후과정(그리고 기후를 모델할 수 있는 능력)에 대한 불완전한 지식이 취약성을 내포하고 있다는 것을 인식해야만 한다 인간에 의해 생긴 남극 상공의 오존구멍을 전혀 예측하지 못했던 것처럼, 마지막 빙하기말의 비교적 빠른 기후변화를 초래했던 것으로 여겨지는 해양순환은 아직 잘 관측되거나, 이해 또는 모델화되지 않고 있다

6. 미래의 기후 예측

미래의 기후변화를 예견하려면 과거의 기후변화 기록을 살펴보는 것이 필수적이다. 과거의 기후변화 기록으로부터 자연적인 기후변화의 범위에 대해 알 수 있고, 미래 예측치와 과거의 기록을 어떻게 비교할 것인가를 알 수 있으며, 인류활동으로 인한 최근의 기후변화에 대한 증거도 찾을 수 있다.

기후는 수백만년에서 그 이상의 오랜 세월까지 모든 시간규모에 걸쳐 자연적으로 변한다. 10만년 주기의 빙하기-간빙기 순환은 지구역사에 있어서 뚜렷한 사건이었다. 지구 표면온도는 빙하주기 동안 전형적으로 5-7°C 변했으며, 얼음의 부피와 해수면의 변화는 심하였고, 북반구의 일부 중·고위도 지역에서는 10-15°C의 온도변화를 동반하였다. 약 10,000년 전의 마지막 빙하기말 이래로 지구 표면온도는 약 1°C를 상회한 정도로 변동했던 것으로 보인다. 일부 변동은 수 세기 동안 지속되었는데, 19세기에 끝났으며 범위가 전지구적인 것으로 사료되는 소빙하기(Little Ice Age)가 이에 포함된다.

현상유지(Business-as-Usual) 배출 시나리오에 따르면, 온실가스 농도의 증가로 인해 다음 세기의 중엽까지 일어날 것으로 기대되는 기온변화는 지난 15만년 이래 가장 높은 지구 평균온도를 나타낼 것으로 예상된다. 이 시나리오에 의해 예측된 지구 온도변화율은 지난 10,000년 동안 지구상에 자연적으로 일어났던 온도변화율보다 큰 것이며, 해수면 상승은 지난 100년 이상 동안 관찰된 것보다 3-6배 더 가속화된 것이다.

가 해수면 상승

지구 온도가 상승하고 있다는 결론은 19세기 말엽 이래로 전세계 산악 빙하의 후퇴와 동시에 해수면이 매년 1-2 mm씩 상승하였다는 사실에 의해 강력히 제시되고 있다. 해양의 열팽창과 지난 세기 동안 서부 그린란드 주변 얼음과 산악 빙하의 용융이 증가한 것을 고려하면 해수면 상승이 주로 지구온난화와 관련된 것으로 보인다. 해수면 상승과 지구온난화 사이의 뚜렷한 연관성은 미래의 온난화가 해수면 상승을 가속화시킬 것이라는 이론적 근거를 제공한다.

지난 세기 동안 온난화의 크기는 기후 모델의 예측치와 대략 유사하나, 이는 또한 자연적인 기후변동의 크기와도 유사하다. 온난화의 유일한 원인이 인간에 의한

온실효과라면 이를 통해 추산된 기후민감도는 모델 추정 범위의 하한치에 해당된다 따라서, 관측된 지구온난화는 주로 자연적인 변동때문이다 그러나 반대 경우도 가능하다 즉 자연 변동이 인류에 의한 온난화 요인들을 상쇄시켜 실제 인류에 의한 커다란 온난화를 미미하게 느껴지게 작용할 수도 있다 인간을 통해 배출된 온실가스에 의한 뚜렷한 온난화는 수십년 뒤에야 확실하게 나타날 수 있다.

또한, 지구 평균온도만으로는 온실가스에 의한 기후변화를 나타내기에 불충분하다 지구 평균온도 변화의 원인을 밝히기 위해서는 기후를 변화시키는 시·공간적인 다른 측면에 대한 조사가 필요하다. 남반구보다는 북반구에서, 해양에서보다 육지에서 온난화가 더 빠르게 나타날 것이라는 모델의 예측을 지지하는 기후변화 양상은 지금까지 뚜렷하게 관찰된 바 없다 그러나 기후변화 양상을 예측하는 데 있어서의 불확실성때문에 기후변화에 대한 상세한 "신호"가 어떻게 나타날런지는 아직 모르고 있다 더우기 지금까지의 변화는 자연 변동과, 다른 (아마도 인간에 의한) 요인들에 의해 가려질 수 있으며 이들 요인에 대한 뚜렷한 정체는 알려져 있지 않다

IPCC의 현상유지 (Business-as-Usual) 배출 시나리오에 의한 1990-2100년 사이에 기대되는 해수면 상승은 그림 35와 같다

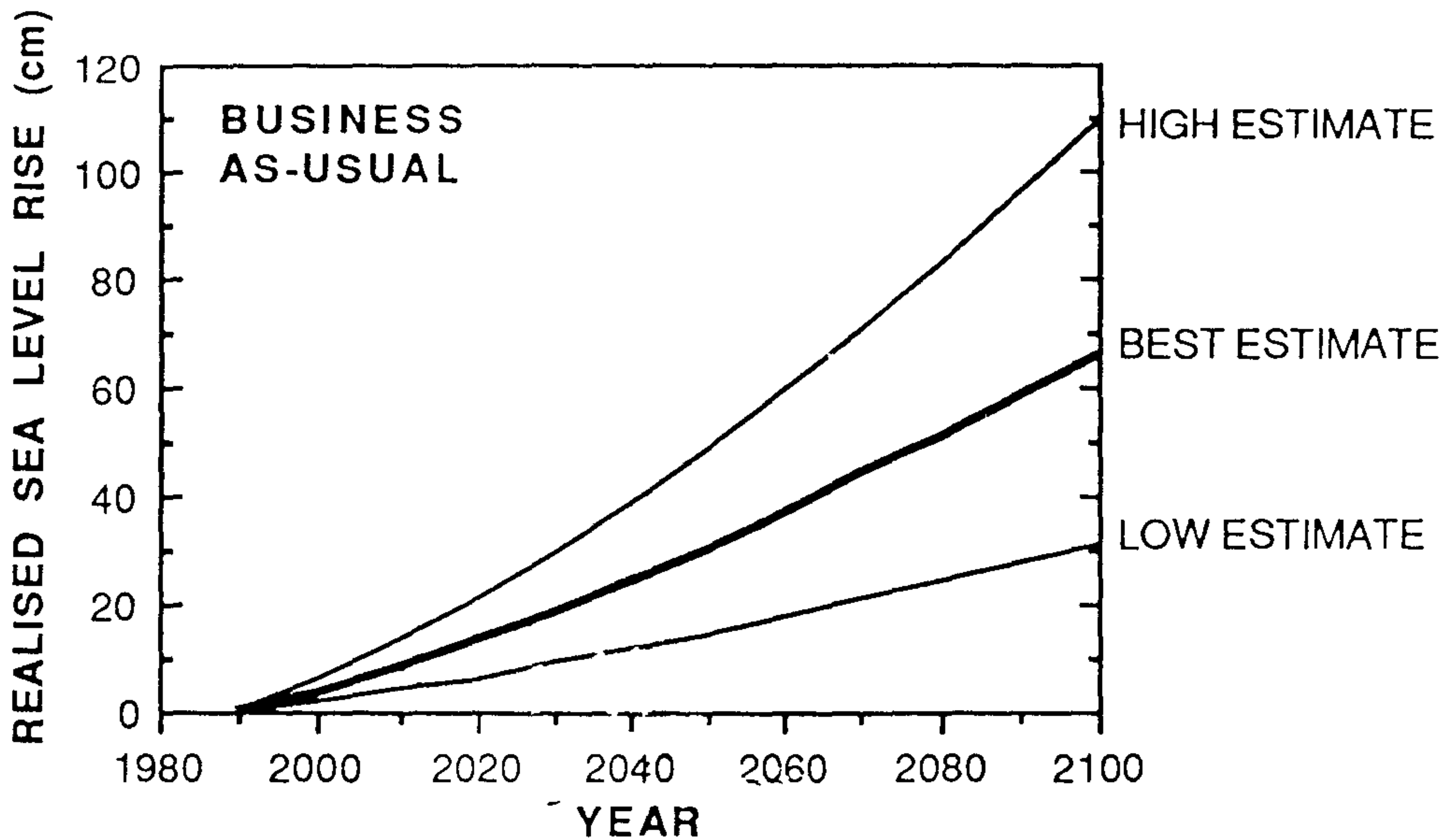


Figure 35 Sea level rise predicted to result from Business-as-Usual emissions, showing the best-estimate and range

지구 평균해수면 상승률은 다음 세기 동안 10년 마다 약 6cm 정도 증가한다 이 예측오차는 10년당 3-10 cm이다 예측된 지구 평균해수면 상승치는 2030년까지 약 20 cm이고 다음 세기 말까지는 65 cm이다. 이 수치는 지역에 따라 상당한 변동이 있을 것이다

각 경우에 있어 최선추정치에 해양의 열팽창과 빙하의 용융이 주 요인으로 작용한다. 다음 100년 동안 남극과 그린랜드 빙상의 영향은 작을 것으로 기대되지만, 이들이 기후예보에 있어 불확실성의 주범이다

온실화 원동력이 미래에 증가하지 않는다 하더라도, 기후, 해양 및 빙괴의 반응이 느리기 때문에 해수면 상승은 수 세기 동안 계속될 것이다 온실가스 농도의 증가가 2030년에 갑자기 멈춘다면 그림 36에 나타난 것처럼 해수면은 2100년까지 1990-2030년의 수준으로 계속 상승할 것이다

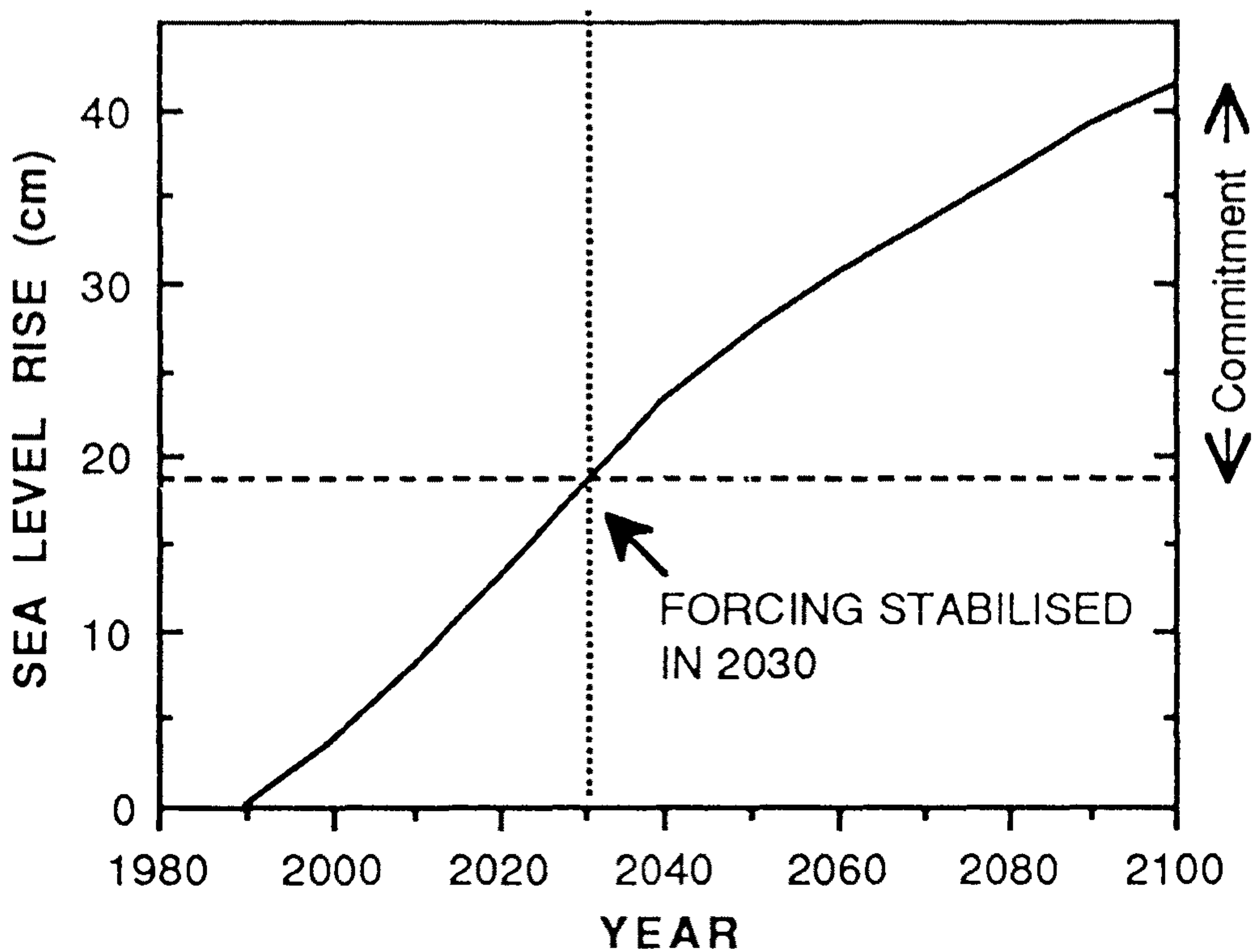


Figure 36 Commitment to sea level rise in the year 2030

지구온난화로 인해 얼음이 갑작스럽게 녹을 수 있으며 빠른 속도로 해수면이 상승될 수 있다 최근의 연구에 따르면 각각의 빙류(ice streams)는 십년에서 수 세기의 시간규모에서 빠르게 변화한다. 그러나 이것은 반드시 기후변화와 관련된 것은 아니다 다음 세기에서의 지구온난화의 직접적인 영향 때문에 남극 서부로부터 얼음의 유출이 있을 것 같지는 않다

해수면의 상승은 전지구에서 균일하게 나타나리라고 기대되지 않는다 열팽창, 해양순환의 변화, 그리고 표층 대기압은 지구가 온난화됨에 따라 각 지역별로 다르게 변할 것이지만 그 양상에 대해서는 아직 잘 알 수 없다 이러한 지역적인 문제는 더욱 현실적으로 해양과 대기를 연계할 모델의 개발을 촉구한다 더우기 육괴의 수직운동은 지역적 해수면 변동에 더욱 중요하기 때문에 해수면의 지역적인 변화를 예측할때 반드시 고려되어야 한다 해수면 상승의 가장 큰 영향은 극단적인 이상기후 사건들(예, 태풍)로부터 초래될 수 있으며 이들은 온난화에 의해 영향을 받을 수 있다

나 생태계의 변화

광합성 및 호흡과 같은 생태계 작용은 단기간의 기후 요인들과 CO₂ 농도에 영향을 받는다 장기적으로 볼 때, 기후와 CO₂는 적응력이 약한 종들의 사망률을 직접적으로 증가시킴으로써, 혹은 종들간의 경쟁을 간접적으로 조정함으로써 생태계 구조, 즉 종 조성(species composition)을 조절하는 요인으로 작용한다 생태계는 온도, 토양 습도, 극단적인 기후의 국지적 변화 등에 반응할 것이다

식물은 광합성을 통해 대기중의 CO₂와 물, 그리고 태양에너지를 흡수하여 자신, 동물 또는 토양 내의 미생물의 성장을 위해 차후에 이용되는 유기화합물의 형태로 물질을 저장한다 모든 생물은 호흡 작용을 통해 CO₂를 대기로 배출한다 대부분의 육상식물들은 증가된 대기중 CO₂ 농도 증가에 상응하는 광합성 작용을 하지만, 그 반응은 식물의 종에 따라 다양하다 이것을 “CO₂ 다산화 효과(CO₂ fertilization effect)”라고 하며 영양염의 충족도와 같은 생태학적 요인들에 의해 제한되면 시간이 지남에 따라 그 효과가 감소한다.

CO₂가 증가함에 따라 식물은 물, 빛 그리고 질소를 더욱 잘 이용하게 되는데, 이러한 효율의 증가는 가뭄 기간 동안과 건조, 아건조 및 불모지에서 특히 중요할 수 있다.

종에 따라 기후변화에 다르게 반응하기 때문에 감소하는 종들이 있는 반면 증가하는 종들도 있을 것이다 이 결과 생태계의 구조 및 조성이 변하며, 일부 종들은 더욱 고위도 및 고지대로 이동될 수도 있고, 분포가 더욱 국지적으로 제약되기도 하며, 심지어는 멸종될 수도 있다

다 예측에 대한 불확실성의 감소를 위한 조치

온도, 강수와 같은 지구 기후 특성을 예측하는 데는 많은 불확실성이 존재하며, 특히 국지적인 기후변화 그리고 차후의 해수면 및 생태계에 미치는 결과를 예측하는 데는 더욱 많은 불확실성이 존재한다 불확실성의 주요 영역들은 다음과 같다

- ① 구름 : 주로 구름의 형성, 빛의 분산, 방사 특성 등으로, 온실효과력에 대한 대기의 반응에 영향을 미친다.
- ② 해양 · 해양과 대기 사이의 에너지 교환, 해양의 상층부와 심층부 사이의 에너지 교환, 그리고 해양 내부에서의 에너지 이동 등으로, 이들 모두는 지구 기후변화율과 국지적인 기후변화의 양상에 커다란 영향을 미친다
- ③ 온실가스 . 온실가스의 흡수량 및 배출량의 정량화, 온실가스들의 화학적 반응, 그리고 온실가스가 기후변화에 의해 받는 영향의 정도
- ④ 극빙상(polar ice sheets) 해수면 상승을 예측하는 데 영향을 미치며, 육지의 수권에 대한 연구와 생태계에 미칠 영향에 관한 연구 또한 중요하다.

이들 각 영역에서 현재의 과학적 불확실성을 감소시키기 위해서 국제적인 공동연구가 필요하며, 이들 연구의 목적은 지구 기후계를 관측하고, 예측하며, 이해하는 능력을 향상시키려는 데 있다 이러한 연구계획은 과학적 불확실성을 감소시킬 것이며, 국가 및 국제적인 대응전략을 수립하는 데 도움이 될 것이다

지구 기후계에 대한 체계적이고 장기적인 관측은, 이의 자연 변동을 이해하고 인간의 활동이 지구 기후계를 변화시키는지의 여부를 감시하며, 모델에 있어서 중요 작용들을 변수화하고, 모델의 시뮬레이션을 실증하는데 매우 중요하다 이를 위해 많은 관측 자료의 정확도와 대상범위를 증가시킬 필요가 있다. 관측자료의 증가와

관련해서 자료를 빠르고 효율적으로 이용하기 위해 적절한 지구 데이터 베이스를 개발할 필요가 있다 관측에 있어 중요한 필요사항들은 다음과 같다

- ㉠ WMO의 세계 기상감시계획 (World Weather Watch Programme)에 의해 제공된 관측자료의 유지 및 개선
- ㉡ 인공위성 및 지표에 설치된 기기를 총동원해서 주요 대기성분의 분포, 구름, 지구의 방사수지, 강수량, 바람, 해수면의 온도 그리고 육지 생태계의 범위, 형태 및 생산력과 같이 계속적으로 정확한 관측이 요구되는 주요 기후요소들의 감시체계의 유지 및 개선
- ㉢ 해수면의 형태 (topography), 순환, 열과 화학물질의 이동 그리고 해빙의 면적 및 두께와 같은 변수들의 변화를 측정하기 위한 지구 해양 관측체계의 확립
- ㉣ 인공위성 및 지표에 설치된 측정 장비, 해양의 자동화된 기계가 설치된 선박, 부표, 그리고 항공기와 기구에 설치된 기기들을 이용하여 해양, 대기 및 육상 생태계에 대한 자료를 얻기 위한 새로운 정보체제의 구축
- ㉤ 기후계의 자연 변동 및 변화 그리고 이에 수반된 환경 반응을 밝히기 위한 고기상학적, 역사적 기록의 이용

기후변화를 모델화하기 위해서는 대기, 육지, 해양 그리고 얼음에 관한 모델이 모두 연계된 지구 모델의 개발이 필요하며, 이를 위해 서로 다른 성분들 사이에 관련된 과정 및 상호작용을 더욱 현실적으로 공식화하여야 한다 육지와 해양의 생물권에 대한 작용도 포함될 필요가 있다 만약 지역적인 예측을 하려면 현재 일반적으로 사용되는 모델보다 공간적으로 더욱 고해상력이 있는 모델이 필요하다

기후계를 이해하는 것은 관측자료와 모델의 실행으로부터 얻어진 결과를 분석함으로써 발전될 것이다 더우기 특정 작용의 상세한 연구를 위해서는 대대적인 관측사업을 펴는 것이 필요하다. 이러한 현장관측사업의 예로 서로 다른 지역에서의 구름의 형성, 확산, 방사역학 및 미세물리적 특성에 대한 실측과 소규모 모델을 조합한 연구, 특정 생태계로부터 온실가스의 배출량에 대한 지표 및 항공기에서의 관측을 들 수 있다 특히 현장실험은 모델의 격자보다 작은 지역규모(sub grid-scale)의 변수화를 개발하고 향상시키는 데 도움이 될만한 것에 중점을 두어야 한다.

이 연구계획을 위해서는 세계기상기구(WMO)와 국제과학연합위원회(ICSU)의 세계기후연구계획(WCRP)과 ICSU의 국제지권-생물권계획(IGBP)과의 국제적인 공동협력이 필요할 것이다. 이것은 모든 국가, 특히 개발도상국의 참여가 필요한 방대하고 복잡한 노력이다. 기존의, 그리고 고려중인 계획을 수행하기 위해서는 재정 및 인력자원을 증가시킬 필요가 있다 후자의 필요사항은 교육의 모든 분야에 밀접한 관계가 있으며 개발도상국으로부터 더 많은 인원을 참여시키기 위해서 국제과학자회의의 범위를 넓힐 필요가 있다

WCRP와 IGBP는 진행중이거나 계획되어 있는 연구계획을 많이 갖고 있는데, 이것들은 각각 세가지 영역의 과학적 불확실성을 해석하기 위한 것이다

- ① 구름 ; International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP)
Global Energy and Cycle Experiment (GEWEX)
- ② 해양 ; World Ocean Circulation Experiment (WOCE)
Tropical Ocean and Global Atmosphere (TOGA)
- ③ 미량기체 ; Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS)
International Global Atmospheric Chemistry (IGAC)
Past Global Changes (PAGES)

연구가 진전됨에 따라 지식의 증가와 관측자료의 개선으로 인해 더욱 신뢰성 높은 기후 예측이 가능하게 될 것이다 그러나 수행될 과학적 계획의 문제점과 규모의 복잡한 특성을 고려할 때 빠른 결과를 기대할 수는 없을 것이다. 그것은 과학이 진보함에 따라 예측하지 못했던 문제들과 알지 못했던 영역들을 접하게 될 수도 있기 때문이다

불확실성을 줄이기 위한 노력의 시간규모는 아래의 두 영역에서 앞으로 10-15년 사이의 연구진보에 달려 있다

- ① 모델에서 대기와 해양의 상호작용을 설명하고 지역적인 예측을 위한 충분한 해상력을 제공하기 위해 필요한 가장 빠른 컴퓨터의 사용
- ② 다음 세기까지 계속 수행될 관측계획으로부터 얻어진 자료의 분석 결과로 소규모 작용을 기후 모델에 반영시키기 위한 개선된 수식화 기법의 개발

또다른 세가지 배출 시나리오에 의해 예측된 해수면 상승은 그림 37에 나타내었다. 서부 남극 빙상은 특히 관심의 대상이 된다 지구의 해수면을 5 cm 가량 상승시킬 정도의 얼음을 포함하고 있는 이 빙상의 대부분은 해수면 훨씬 아래의 대지에 위치하고 있다

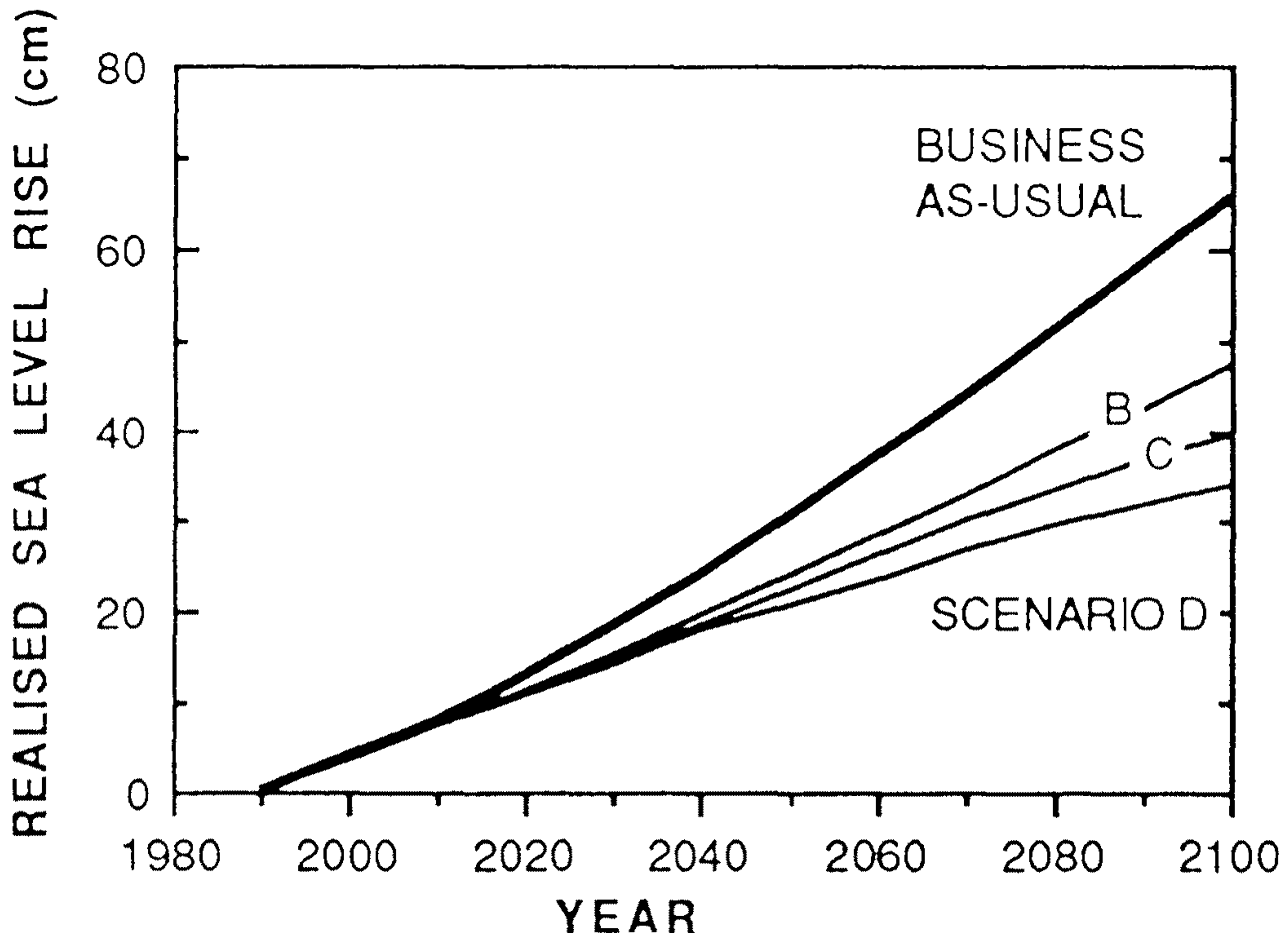


Figure 37 Model estimates of sea-level rise from 1990-2100 due to all four emissions scenarios

제 3 장

지구환경변화의 해양요인 규명기술 동향

여 백

제 3장 지구환경변화의 해양요인 규명 기술 동향

제 1절 개 요

근래에 일어나고 있는 기후변화는 세계의 경제활동, 에너지 이용, 국가안보, 그리고 육상과 해양생태계 뿐만아니라 인류 복지생활과 건강에 직·간접적으로 폭넓은 영향을 미치고 있다 따라서 국가정책입안자들은 기후변화에 의해 파급되는 잠재적인 영향력을 파악하고자 지구기후변화에 대한 과학적 근거를 주시하고 있으며 그 어느때보다 과학계에 많은 투자를 하고있다 국가정책입안자들의 요구에 의해 과학자들은 기후변화의 범위와 시기에 관한 예측과 대응방안을 찾고자 노력하고 있으며, 지구기후변화에서 자연적인 요인에 의한 변화를 제거하여 실질적인 인위적인 요인에 의한 기후변화를 구분할 수 있는 능력을 개발하고 있는 중이다

지구기후변화에 있어서 해양의 역할은 아직까지는 완전하게 이해되고 있지는 않지만, 매우 중요한 역할을 하고 있다는 데는 일반적인 합의가 이루어진 상태이다 예를 들어, 온실가스인 CO₂의 농도는 수십년 동안 증가하여 왔으나 인간활동으로부터 대기에 유입된 CO₂ 가스의 누적량중 60% 미만이 지금 현재 대기중에 남아있다. CO₂ 가스 흡수에 대한 육지생태계와 해양의 기여도는 아직도 논란의 대상이 되고 있으나, CO₂ 가스는 해양에 의해 효과적으로 흡수되고 있는 것으로 보인다

지구표면의 70% 이상을 차지하고 있는 해양을 탐사·관측하고, 이해하기 위해서는 고도의 기술이 필요하다 현재의 기술은 지구규모적인 해양연구 수행을 가능하게 하였고, 해양과 육지, 대기간의 상호작용을 연구할 수 있는 수준까지 발전하였다 이러한 연구들은 인구증가와 산업발전에 따른 대기중의 CO₂와 기타 온실가스의 증가로 인해 영향을 받는 해양 물리, 화학, 생물 그리고 지질학적 과정을 규명하는데 주력하고 있다 이들 과정들간의 상호작용은 해양 동·식물의 분포와 현존량 뿐만아니라 기후변화에 중요한 영향을 미치고 있다

해양은 기후변화에 영향을 미침으로서 육상생태계를 조절하는 중요한 역할을 담당하고 있으며 단기적인 El Niño-Southern Oscillation(ENSO)과 같은 대기-해양간의 변화는 국제경제와 사회질서에 즉각적인 변화를 가져올 수 있다. 기후변화는 농업생산의 변화를 초래하여 국가경제의 기본이 되는 식량공급에 직접적인 영향을 미치고

아울러 해양환경의 변화에 따른 해수면 상승과 하강, 연안 용승류의 변화, 지하수층으로의 해수침투 등으로 인해 심각한 변화를 초래하게 된다 따라서 인류생활에 역효과를 초래하는 변화들을 예측하고 적절한 대응방안을 모색하기 위해서는 기후변화에 대한 해양의 역할을 철저히 이해하여야 한다

해양과 대기에 축적되는 열은 태양복사열로부터 온 것이며 이 열은 적도에서 극지방으로 재분배된다 해양의 열관성(thermal inertia)은 어느 한 기후대로부터 다른 기후대로 확산되는 열의 전이속도를 감소시킨다. 따라서 심해에서 느린 열의 역전도는 해수면에서의 열흡수 및 방출을 감소시킨다 또한 해양은 CO₂, 수증기, 디메틸황과 같은 가스와 화학물질의 주된 근원이자 저장고이다. 해양에서 증발되는 수증기는 지구 수권계 순환에 중요한 역할을 담당하고 있으며, 대기중의 수분은 대기의 운동에 의해 확산되고 강수를 통해 해양으로 직접 유입되거나 또는 육지로부터의 하천수를 통해 간접적으로 해양으로 다시 순환된다 해양의 해수 순환은 극지방의 해수면 변화와 깊은 관련성이 있다. 즉 극지방에서 유입된 저온, 고염분의 특성을 지닌 해수가 침강하여 심해저를 따라 순환한다 심해를 따라 순환하는 저층수는 수백년동안 대기와 접촉되지 않은 상태에서, 해저까지 온실가스와 열을 전달하기 때문에 지구기후에 큰 영향을 미친다 북대서양의 심층수 형성은 십년률 주기로 강약의 변화를 보이기도 한다 몇주동안 미국 전지역에서 일어나는 흑서 또는 흑한은 해수순환과 관계가 있다는 연구보고들이 발표되고 있다

근래의 해양연구는 다양한 해양의 각 요소들 즉, 물리학적, 생물학적, 그리고 지질학적 특성에 대한 조사가 함께 이루어지고 있으며 대부분의 연구프로그램들은 현재의 해양특성과 미래의 예보적인 관계를 밝히기 위해 시도하는 모델링 요소를 포함하고 있다. 이러한 모델들은 모델의 요소들에 타당한 값을 정하고 모델의 실행을 테스트하기 위하여 지질학적인 데이터로부터 얻은 정보를 포함하는 관측과 과정연구에 의존하고 있다 모델링 결과는 예보모델에 있어서 가장 큰 변화의 원인이 되는 해양환경의 다양한 변수들을 확인함으로써 보다 양질의 관측과 연구를 유도하는 통찰력을 제공할 수 있다

환경에 대한 기초적인 이해와 기술발전에 의해 원격조정탐사선(ROV), 인공위성 감지기, 미량 화학물질 측정, 음향기술, 반영구적인 부이와 부체물, 그리고 해저면 지진계 등과 같은 새로운 조사장비와 기술이 개발됨에 따라 보다 정확한 해양탐사 수행

이 가능하게 되었다. 또한, 전자공학의 발전은 자료 처리와 분석, 정교한 모델설정 등을 용이하게 할 수 있는 슈퍼 컴퓨터와 워크스테이션 장비를 제공하였다. 현재 유용한 신기술과 혁신적인 기술개발은 이전에는 이를 수 없었던 대규모의 학제적인 연구 프로그램을 개발하는데 필요한 초석이 되었다.

본 장에서는 기후변화와 관련된 해양에 대한 국제연구프로그램의 핵심내용을 분석하고 획기적으로 시도된 기술들을 도출해 내하고자 한다.

제 2절 지구기후변화에 대한 해양의 역할

본 장에서 소개된 내용은 미국 과학재단의 Ocean Studies Board가 발간한 “The Ocean's Role in Global Change The Contemporary System - An Overview of Major Research Programs”를 요약한 것으로 이 보고서는 기후변화에 있어서 해양의 역할을 연구하기 위해 계획된 주요 연구프로그램들을 면밀히 분석하였다.

지구환경변화에 관련된 대규모 해양 연구프로그램들을 연구내용별로 1) 수일에서 수백년에 걸친 기간동안에 일어나고 있는 과정을 연구하는 프로그램들 - 현재 시스템 (Contemporary system), 2) 수천년에서 수백만년에 걸친 장기간 동안의 변화를 이해하기 위한 연구프로그램들 - 지질학적기간의 고찰(geological prospective) 분야로 나누어 분석하고있다. 각 분야의 연구 핵심내용과 목표를 표 20에 요약 하였다.

1. 현재 시스템에 대한 연구 (The Contemporary System Programs)

가. 전세계 해양 관측체계 (GOOS, Global Ocean Observing System)

GOOS프로그램은 ENSO(El Niño-Southern Oscillation)의 예보에 필요한 강우와 기온의 변화양상을 관측하고 온실효과에 의해 조절되는 해수면과 평균수온 변화 감시를 위한 관측을 지속하고 있다. GOOS는 5개의 응용모듈(기후, 해양생물자원, 해양 기상 및 운영서비스, 해양의 생태적 건강성, 연안역)로 구성되어 있다. 기후모듈은 지구 기후변화관측(GCOS, Global Climate Observing System)의 해양연구분야를 지원하고 전지구적인 장기 기후변화에 관련된 활동을 지원하고 있다.

표 20. 지구환경변화에 관련된 해양연구 프로그램

1 현재 시스템의 연구 (The contemporary system programs)		
프로그램	목 표	핵심 내용
Global Ocean Observing System (GOOS)	지구기후관측시스템의 해양 요인 제공	엘니뇨의 예측과 온실효과에 의한 지구변화의 감시에 필요한 조사
Tropical Ocean--Global Atmosphere (TOGA)	기후변화예측에 활용할 해양-대기시스템의 모델 정립	적도해양과 지구대기, 엘 엘니뇨 변화와의 상호작용을 규명
World Ocean Circulation Experiment (WOCE)	기후변화와 해수순환간의 되물림 작용 이해	전세계 해양의 해수면과 해수면의 순환 파악
Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS)	대기-해양간의 CO ₂ 교환과 심해 탄소 전달과정을 이해	해양생물과 화학이 지구기후변화에 미치는 역할을 규명
Global Ocean Ecosystem Dynamics (GLOBEC) Program	지구환경변화가 해양생물의 생체량과 생산력에 미치는 영향에 대한 예측	기후변화와 관련된 해양의 물리적인 환경 변화와 해양동물 동물플랑크톤 과 어류에게 미치는 영향을 규명
Atlantic Climate Change Program (ACCP)	대서양과 지구대기 사이의 대기-해양 상호작용의 이해	북대서양 중 고위도 해역의 관측 및 모니터링을 이용하는 연구
Acoustic Thermometry of Ocean Climate (ATOC)	지구적 규모의 해수온난화 경향의 특성파악	해수중 전파되는 음향의 속도 측정
Global Ocean-Climate-Land System for Seasonal-to-Interannual Climate Prediction (GOALS) Program	계절간 및 연간 지구기후변화의 변이성에 대한 이해	해수면 온도, 토양수분, 해빙, 강설의 변화를 조절하는 과정 연구
Land-Ocean Interactions in The Coastal Zone (LOICZ) Program	연안역 관리를 위한 장기 및 지속적인 정책입안에 유용한 기후, 해수면, 생태계기능파악	연안역의 플럭스가 탄소순환과 대기중 미량가스 구성에 미치는 영향 파악
Arctic Systems Science (ARCSS) Program	환경변화를 예측하기 위한 북극환경의 과정을 이해	북극의 물리, 화학, 생물, 사회학적 과정을 파악하기 위한 고환경 연구
2 과거 지질학적 기간의 연구 (The geological perspective programs)		
프로그램	목 표	핵심 내용
OCEAN DRILLING PROGRAM (ODP)	고해양학과 기후 및 해양환경 변화를 유도하는 기작의 이해에 대한 기초자료 제공	고기후의 고해양학적 기록과 해양의 환경을 재구성하는데 필요한 전세계의 심해코아샘플의 수집과 분석
Ridge Inter-Disciplinary Global Experiments (RIDGE)	대륙확장과정의 물리, 화학, 생물학적 변화를 예측하고 원인을 이해	지구진화 과정과 과거기후변화 원인 규명을 위한 실험, 이론적 연구
The Global Change and Climate History Program	정부와 학계에 지구기후변화 관련정보의 제공	인간활동과 관련된 환경변화문제를 규명하기위한 기후 과정 연구
Marine Aspects of Earth System History (MESH)	태양복사에너지의 변화에 대한 기후시스템의 민감도 측정	해양 지화학, 기후 변화와 기후변화를 파악하기위한 고해양학적 연구

GOOS는 사회적 요구에 기초한 기본적인 연속적인 관측연구를 수행한다. GOOS는 세계기상기구(WMO), 국제학술연맹(ICSU), UNEP의 협조 하에 정부간 해양 과학위원회(IOC)에 의해 추진되고 있다. GOOS는 TOGA프로그램에서 획득한 부이, 탐사조사선, 이동부이, 도서 조석계, 그리고 인공위성활용등을 이용하여 적도태평양에서 해수면 온도 측정과 해수면 토모그래피 작성을 수행한다. 미래의 장비 시스템은 자동 해류 프로파일러(예, ALACE, Autonomous Lagrangian Circulation Explorer), 음향감지기술에 의한 평균해수온도 감시 등이다. 측정시스템은 인공위성에 의한 원격측정이 보다 보편될 것으로 예상되고, 현재 보다 자료의 질과 처리기술의 발전과 확장이 요구된다. GOOS 프로그램의 계획과 실행은 현재의 연구프로그램 계획된 미래 프로그램, 그리고 연구계와 관리운영 조직간의 긴밀한 협조에 기초를 두고 있다.

나 열대해양-지구대기 연구 (TOGA, Tropical Ocean-Global Atmosphere Program)

TOGA프로그램은 세계기후연구프로그램(WCRP)의 중요한 연구사업으로서, ENSO 순환연구에 주력하고 있다. Southern Oscillation은 남태평양과 서태평양/동인도양간의 기압차로 인해 수년간의 주기로 변화를 보인다. 엘니뇨는 서태평양 고온 해수의 순환에 의해 일어나는 현상으로서 서남부 아메리카의 연안과 적도를 따라 차가운 해수의 용승이 감소하면 강우의 패턴이 호주와 인도네시아에서 태평양쪽으로 가면서 동쪽으로 이동하는 것을 말한다. 엘니뇨와 관련된 남아메리카에서의 폭우와 홍수, 호주에서의 가뭄으로 인한 경제적 손실은 수십억 달러에 이르는 것으로 추정된다.

TOGA 프로그램의 목적은 ① 지구기후시스템을 조절하는 적도해양과 지구대기간의 상호작용을 상세하게 설명하기 위하여, ② 이러한 해양-대기 상호작용의 과정과 원인을 이해하기 위하여, ③ 기후변화를 예보할 목적의 관련시스템을 모델화하기 위하여, ④ 위의 3가지 목적을 달성하기에 충분한 자료수집과 분배시스템을 설계하는데 있다. 이 프로그램은 과정연구 장기간 관측(여러가지 ENSO순환에 관한), 그리고 모델링을 포함하고 있다. 모델링은 해양과 대기의 특성에 관한 많은 자료제공과 이러한 특성들이 시공간에 걸쳐 왜, 어떻게 변하는가를 설명하는 것을 목적으로 하고 있다. 시뮬레이션과 예보에 동시에 사용된 관련 TOGA 모델들은 풍압(해수면의 해류를 밀어내는), 해수면 온도, 상층부 적도 태평양의 열적구조 등에 관한 자료를 요구하고 있다.

현재, 자료들은 ㉑ 표층수를 따라 이동하는 수면풍과 열구조를 측정하기 위해 기기를 통합시키고, 지구원격통신시스템(GTS)를 통해 인공위성에 정보를 즉시 원격송신하는 약 65개의 계류부이들을 배치한 TOGA 열대 대기해양(TAO) 설치, ㉒ 해류의 수직구조를 측정하는 여러개의 적도 무어링 네트워크, ㉓ TOGA 해수면 네트워크 - 태평양과 인도양에서의 해수면 측정, ㉔ 세곳의 열대해양에서 상선으로부터 투하된 기기를 이용하여 표층해수의 온도를 측정하는 관측지원선(VOS), ㉕ 열대 해수면 온도와 해수면 근방의 해류를 측정하는 표류부이 설치, ㉖ 세곳의 열대 남부해양의 해수면 온도와 해수면 압력을 측정하는 표류부이 설치, ㉗ 대기의 풍향을 측정하는 8개의 레이더 기지로 구성된 Trans Pacific Profiler Network로 구성된 TOGA 관측시스템으로부터 정기적으로 수집되고 있다

서태평양의 온난해수와 대기간의 상호작용과정을 파악하기 위해 동태평양에서 수행된 TOGA와 연계된 해양-대기 반응실험(TOGA COARE)이 완료되었다 연구내용을 표 21에 요약하였다.

표 21 TOGA의 핵심연구 내용

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ① XBTs, 표류관측계, TOGA TAO설치, 해류계 설치, 해수면 네트워크, 대기 음파 레이더 세트 등으로 구성된 TOGA관측시스템의 구축과 유지 ② 86-87, 91-92-93년의 온난기, 87-88년의 흑한기를 포함한 '85~'95년 동안의 ENSO에 대한 표층해양과 바람의 온도측정 ③ TOGA 관측에 의해 관측된 통한 해수면 온도(SST), 해류, 해수면 온도, 그리고 해수면풍에 대한 기후학적 기술개발 ④ 현장 표류관측과 원격탐사를 연계시킨 SST 운영기술 개발 ⑤ 적도태평양 해양관측과 예보에 활용하기 위한 해양모델 운영 기술개발 ⑥ TOGA 자료의 관리, 화일관리, 보급을 위한 자료센터 구축
해수면 자료센터(프랑스), 대기상부 자료센터(인도), 해수면 센터(하와이) ⑦ 소규모 과정연구들 (Tropic Heat Experiment, Tropical Instability Wave Experiment, Equatorial Mesoscale Experiment), 태평양과 ENSO에 관한 국제 과정실험(TOGA COARE)의 설계와 수행 ⑧ ENSO을 조기에 예보할 수 있는 기술축적에 따른 단기기후예보 기술개발 ⑨ 기후예보에 필요한 역학적 모델구축 ⑩ 전지구적 대기 자료의 재분석을 위한 프로그램의 육성과 기후예보를 위한 TOGA연계모델들의 활성화 ⑪ ENSO의 예보를 통한 국제 사회적, 경제적 효율성을 최대화하기 위한 다국가가 참여하는 강력한 연구기관, 즉 국제기후예보 연구기관의 설계에 참여 |
|---|

다 세계 해양 순환 실험 (WOCE, World Ocean Circulation Experiment)

해양 순환은 열 전달, 해수유동, 그리고 대기-해양간의 온실가스 순환을 통해 수십-수백 년의 시간에 걸쳐 기후와 상호연관관계를 보이고 있다 따라서, 이러한 시간 규모의 지구 기후변화를 이해하고 예측하기 위해 해양 순환에 대해 보다 폭넓은 이해가 필요하게 되었고 WCRP는 이러한 연구수행을 위해 WOCE 사업을 시작하였다

WOCE는 전 대양의 표층-아표층(Surface-subsurface)순환을 연구한다 현장 프로그램은 1990년에 시작되었고 1997년까지 계속된다 연구종합분석은 2005년까지 지속될 것으로 예상된다 WOCE의 현재의 상태를 모형화하여 해수순환을 이해, 예측하고, 기후 변화와 해양 순환과의 피드백과정을 예측하는 것을 주연구목표로 ① 현재의 해양 순환과 변동성, ② 대기-바다 경계층의 상호작용, ③ 서로 다른 해양 유역간의 교류가 지구 순환에서 차지하는 역할, ④ 해양의 열 저장과 운반이 지구 열평형에 미치는 영향을 파악에 그 목적이 있다

WOCE 프로그램은 몇개의 관련 분야로 구성되어 있으며 그 핵심사업은 표 22에 요약하였다 국제 공동프로젝트는 인공위성, 관측선(VOSs), 계류장치, 부표, 수면 소해선(掃海船), 검조기, 조사선으로부터의 측정 결과들을 종합한다 이러한 조사에서는 ① 해수밀도, ② 염분, 산소, 영양염, ③ 염화불화탄소(CFCs)와 같은 인류활동에 의한 공해물질등을 측정한다 또한 수면하 부표, 유속 계류장치를 이용하여 전대양의 유속을 직접 관찰함으로써 ① 대기 가스가 깊은 바다에 운반되는 물의 하방운동 경로와 해양의 열 운반을 정량화, ② 관찰된 순환유형을 모형화하기 위한 자료를 제공한다 이 프로그램은 해양을 움직이는 대기-해양의 흐름, 대기에 대한 피드백, 해수면 온도의 변화, 열 저장을 일으키는 대기-해양의 흐름에 초점을 맞추고 있다

남빙양에서의 조사(Core Project 2)는 대서양, 태평양, 인도양을 연결하는 남극순환해류(Antarctic Circumpolar Current, ACC)와 ACC의 북쪽과 남쪽해역과의 상호작용에 집중하고 있다 이 프로그램은 수면 표류물로부터 해수면의 온도, 압력, 속도의 측정뿐만 아니라 저온·고밀도 특성을 지닌 고위도 수괴의 형성과 확산에 대한 연구들을 포함하고 있다 인공위성으로부터의 고도 측정과 남미지역, 아프리카, 오스트레일리아 지역에 대한 반복적인 수계 측정은 ACC의 변동성에 대한 통찰력을 가져다주게 될 것이다. 그러나, 불행히도 현재는 비용문제로 인하여 큰 계류장치 세트를 이용한 장기간의 이동을 완전히 측정하는 것은 매우 곤란하다

핵심프로젝트 3은 해양 순환과 모형화에 중요한 특정한 과정에 초점을 맞추고 있다. Subduction Experiment(1991~93)은 표층수의 침강으로 수온약층에서의 수괴 혼합과정을 조사했다. Tracer Release Experiment(1992~93)은 해수중 미량원소 (anthropogenic substance, sulfur hexafluoride)의 유입과 확산에 대한 직접적 측정결과를 최초로 제공했다. Deep Basin Experiment은 브라질만의 심층수순환을 조사하고 있다. 위의 세 가지 연구들은 영국, 프랑스, 독일, 미국에 의해 수행되어 왔다.

WOCE는 ① 조사선과부표로부터 관측된 기상관측기술, ② 방사성 탄소(¹⁴C)를 측정하기 위한 새로운 질량가속 분석계 측정기술, ③ 염화불화탄소와 헬륨/트리튬의 측정기술, ④ 새로운 형태의 저품위 도플러 음파 해류 단면장치(Acoustic Doppler Current Profilers, ADCPs), ⑤ 독립적으로 작동되고 최대 5년동안 몇 주 간격으로 Argos 위성을 통해 위치이 가능한 부표개발, ⑥ 표면 압력 감지기가 장착된 조사선, ⑦ 자동 수온수심측정기(XBT) 분야등에 대한 일련의 기술개선을 연구영역으로 넓혀가고 있다. 한편 WOCE는 자료의 저장과 운영을 위한 새로운 체계들을 개선함으로써 연구결과의 일관성을 유지하고 있다.

표 22 WOCE의 주요 성과

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ① ALACE 부이 개발, 검사, 전대양의 중층 해수순환 측정 ② 도플러 음파 해류 단면장치(ADCPs)를 이용하여 태평양의 저층해류측정 ③ 북대서양 심해수의 형성과 순환속도를 직접적이고, 장기적으로 측정 ④ 수계 측정 결과를 활용하여 태평양과 남대서양의 수괴를 정확하게 설명 ⑤ 염화불화탄소, 헬륨, 트리튬, 이산화탄소의 농도 측정 ⑥ 중앙북대서양에서 여름과 겨울 동안 수직·측면적 확산을 새롭게 측정 ⑦ 상부 수온약층(水溫躍層)에서 해수 혼합과정에 대한 연구 ⑧ 인공위성을 이용한 해표면 풍속자료과 실시간 빙하지역 자료, 층운의 매개변수, 스펙트럼 내삽 분석 시스템등을 이용한 대기-해양간 연구 ⑨ 남태평양, 북대서양, 남대서양 중위도지역의 열 유동을 측정하여 북반구와 남반구 사이의 열이동의 불균형을 파악 ⑩ 자료 관리와 공유를 위한 자료센터의 설립과 관련 자료관리체계 확립 ⑪ 해양 지형 실험(Ocean Topography Experiment, TOPEX/Poseidon)과 유럽 원격 감지(European Remote Sensing, ERS-1) 인공위성 자료를 활용하여 고도계 자료분석에 기여 |
|---|

라. 지구해양물질 플럭스 연구(JGOFS, Joint Global Ocean Flux Study)

산업혁명 이래 인류는 지구 시스템의 탄소 구성비를 변화시킴으로서 생지화학적 순환을 변화시켜 왔다 불행히도 현대 과학자들은 아직까지도 대기 중 이산화탄소의 제거에 대한 육지와 해양의 역할을 정확히 평가하지 못하고 있다

해양의 탄소, 질소, 인과 생물체에 영향을 주는 물질의 생물학적 이용, 재생산, 이동과 침적연구는 70년대와 80년대에 걸쳐서 눈부시게 발전하였다 광역적 인공위성을 이용한 해양색조 측정에 의한 식물 플랑크톤의 정량은 이러한 연구들에 새로운 자극을 제공하였다 또한, 현재의 기술은 극미량의 화학 물질을 매우 정확하게 측정할 수 있는 수준에 이르렀을 뿐만 아니라 수괴중 침강하는 유기성 입자의 양을 직접적으로 측정하는 수준에 까지 이르고 있다 해양생물학과 해양화학에 대한 새로운 이해와 새로운 기술의 발전으로 국가간 지구해양 물질플럭스 공동연구(Joint Global Ocean Flux Study, JGOFS)의 발전을 가져왔다.

JGOFS는 해양의 생지화학적 순환 연구 계획이다 JGOFS의 주요 목적은 이산화탄소의 대기과 해수면간 교환과정과 탄산칼슘과 유기성 입자의 침강에 의한 심해 도달과정을 밝히는 것이다 JGOFS 프로그램의 목적들은 ① 탄소, 질소, 산소, 인, 황의 농도를 조절하는 해양의 교환과정에 대한 이해, ② 기체, 염분과 물이 해양내와 해양과 대기, 해저 침적물, 대륙의 경계 사이에 어떻게 그리고 어떤 비율로 전달되는 지를 이해, ③ 인공위성이나 항공기-투하용 감지기를 이용한 원거리 측정이 얼마나 생산성이 있는가를 결정, ④ 물리, 화학, 생물과정에서 입자의 생산과 침하의 의존성을 결정, ⑤ 해양과 해양 경계 사이의 화합물이동과 이러한 이동이 지구 환경 변화에 미치는 영향을 예측하는 수치 모의실험을 개발하는 것 이러한 연구에는 연구선, 인공위성, 항공기, 심해 계류 장치를 포함한 여러 가지의 자료 수집 접근 방법이 이용되고 있다

1989년 봄과 여름에 북대서양의 식물성 플랑크톤의 대량번식 시기에 맞춰 국제 공동연구집단에 의해 JGOFS 과정연구가 수행되었다 두 번째 연구는 1991년에서 1992년까지 적도 부근의 태평양에서 수행되었다 이 연구는 1994-95년에는 아라비아 해로, 1994-96년에는 남극해로 예정되어 있다. 그 연구에 추가하여 미국의 JGOFS는 하와이와 버뮤다 근처에 위치한 2개의 시계열 분석 지점을 보유하고 있다 JGOFS 과학자들은 이 지역에서 정기선의 탐사와 영구 계류장치로 수집된 자료를 이용하여 해양 환경의 변동성을 알게 될 것이다 JGOFS의 주요 성과는 표 22에 요약하였다.

표 22. JGOFS의 주요 성과

- ① 버뮤다와 하와이 근처에 2개의 빈영양해역의 시계열분석 지점을 계획하고 설치. 빈영양 상태의 대서양이나 태평양 해양 탄소 시스템 매개변수의 계절별, 연도별 변동성에 관한 새로운 정보를 제공하면서, 1988년 이후로 이 지점들에서 일련의 JGOFS의 핵심적인 관측들이 이루어졌다
- ② 1989년 북대서양에서, 1992년 적도 부근의 태평양 동쪽에서 2개의 주된 연구들을 계획하고 시행 북대서양 연구는 외해의 식물성 플랑크톤들이 해표수로부터 탄소를 어떻게 방출하는지에 대한 통찰력을 제공했다. 적도 태평양 연구는 해양내 탄소량을 조절하는데 영향을 미치는 엘니뇨와 정상상태 하에서의 탄소순환 자료를 만들어낸다
- ③ 해양내 용존 유기 탄소의 분포에 대한 이해를 도모
- ④ 이산화탄소의 대기-해양간 교환에 대한 자료들의 대규모 축적.
- ⑤ 철과 같은 미량영양염이 외해의 기초 생산성에서 차지하는 역할을 이해하는 연구를 계속 수행
- ⑥ 안안색도 측정(CZCS) 인공위성 자료와 SeaWiFS 자료에 의한 해양의 기초 생산량의 규모를 밝힘
- ⑦ 개선된 이산화탄소 분포 해양 모형의 개발
- ⑧ 유기물 재생산에서의 미생물의 과정을 밝힘
- ⑨ 탄소 시스템의 매개변수의 계속적인 관찰을 위한 일련의 계측기 개발

마 해양 생태계 역학연구(GLOBEC, Global Ocean Ecosystem Dynamics)

해양 생태계 역학(Global Ocean Ecosystem Dynamics, GLOBEC) 프로그램의 목적은 지구환경의 변화가 해양생물의 총량 변화, 생산성에 미치는 영향을 예측하는 것이다 이 프로그램은 시간과 공간에 따라 변화하는 해양생물의 총량을 연구하고, 기후 변화가 해양의 물리적 환경과 해양생물, 특히 동물 플랑크톤이나 어류에 미치는 영향을 파악하기 위한 물리, 생물학적 구조를 밝히는데 목적을 두고 있다. GLOBEC은 물리, 생물학적인 과정이 생물량에 미치는 영향과 자연적변화나 인류활동이 생물량에 미치는 영향을 파악한다. 또한 대기의 영향과 물리학적이고 생물학적인 과정들 사이의 관계를 밝혀냄으로서 기후변화에 따른 해양 생태계의 변화를 평가하고 예측할 수 있게 한다 이러한 목적은 지구모델 연구, 현장 조사, 자료 분석, 장기간의 관찰 등을 수행할 물리 해양학자, 생물 해양학자, 어류 생물학자를 포함하는 학문간 노력을 통해 이루어질 것이다.

해양생물의 현존량은 인류활동에 의한 영향보다는 다른 요인들과 관계가 있다 예를 들어 정어리, 멸치의 현존량은 인간이 이용하기 훨씬 전인 1700년 부터 지금까지 3~10가지 요인에 의해 변화되어졌다 식물 플랑크톤과 동물 플랑크톤의 현존량이 연간 또는 보다 장기적인 변동을 보임은 물리적인 환경 변화가 생물의 개체 수를 조절함을 암시한다. 예를 들어 북대서양의 북풍은 1950년대부터 1970년대까지 강해졌는데 이는 동물 플랑크톤과 식물 플랑크톤의 생물량 감소와 상호 연관이 있다 식물 플랑크톤의 감소는 강한 바람에 의한 유광대층의 혼합이 발생하면서 야기된 플랑크톤의 이동에 기인한 것으로 보인다 이러한 현상은 동물 플랑크톤과 보다 높은 영양단계의 생물에게 보다 열악한 먹이상태를 야기할 수도 있다 따라서 물리적인 환경에서의 상대적으로 작은 변화가 해양 먹이사슬 전체의 변화를 야기시킬 수 있다

GLOBEC는 동물 플랑크톤의 개체군의 역학적 연구와 변동성에 관련된 기초과학적인 문제에 초점을 맞추고 있다. GLOBEC의 목적은 “물리적 과정이 포식자와 피식자간의 관계와 동물 플랑크톤의 개체군에 미치는 영향을 파악하고 지구 기후시스템과 인류활동에 의한변화의 관점에서 해양 생태계에 대한 물리적 과정의 관계를 이해하는 것”이다. GLOBEC는 ‘해양 연구 과학위원회(Scientific Committee on Ocean Research)’, ‘정부간 해양학 위원회(Intergovernmental Oceanographic Commission)’, ‘해양개발을 위한 국제회의(International Council for the Exploration of the Sea, ICES)’, ‘태평양 개발을 위한 국제회의(Pacific ICES, PICES)’의 지원을 받고 있다

GLOBEC은 GLOBEC 핵심 프로그램(GLOBEC Core Program, GCP)에서 뚜렷하게 밝힌 연구전략을 확립해 왔다 GCP 전략은 물리 생태계 측면에서 동물 플랑크톤의 역할을 이해한다는 공통된 목적을 제시함으로써 국제적 프로그램과 지역적 프로그램이 공동연구를 수행할 수 있도록 권장하고 있다 GCP는 서로 다른 연구부문들을 조율하고 GLOBEC의 완전한 시행을 위한 준비를 위해 지난 수년간 연구그룹 모임과 함께 활동들을 균형있게 조정하고 있다 지금까지는 6개의 과학적인 계획 모임이 완성되었다

GCP는 2가지 보완적인 방향으로 발전하고 있다 일반적인 과학적 연구에 대한 부문은 개체군역학과 물리적 변동성, 수치적 모형, 시료채취와 관측 시스템, GLOBEC 문제에 대한 응용성을 결정하기 위한 자료를 재검토할 GLOBEC 방책의 4개의 연구 그룹에 의해 이루어지고 있다 그 결과는 GLOBEC 조사의 또 다른 부문인 생태계에

대한 연구에 이용될 것이다

국제 GLOBEC의 임무가 두 가지 구성요소를 포함하고 있음은 과학적 접근방법의 발전을 잘 보여주고 있다. 첫번째는 동물 플랑크톤의 개체군역학을 포함하고 있으며 매우 직관적이다. 두번째는 수치적인, 물리적-생물학적 연관모형의 개발과, 중요한 계획노력과 국제적인 협력을 포함하는 관측 시스템을 포함한다. 연관모형과 관측은 현재의 해양상태를 파악하고 미래의 상태를 예측하는 데 있어 중심적인 역할을 한다. 각 부문의 연구결과들이 지구변화와 수산업 경영 문제에 중요하게 응용되고 있다. 모형-관측 시스템은 물리적으로 가변적이면서 생물학적으로 요구되는 것으로 생각되기 때문에 중간규모의 해결책으로 현실적인 물리적이고 생물학적인 영역을 추정하려고 노력할 것이다

표 24. GLOBEC의 핵심연구 내용

- ① 북서대서양 Georges Bank 생태계에 대한 기후, 해양 순환, 해양 구조, 생태계 구조와 동물플랑크톤 개체군역학사이의 관계에 대한 연구
- ② 해류와 해양 구조가 지구온난화와 같은 지구 기후변화에 대한 반응을 연구하고 예측하는 지역 순환 모델을 개발
- ③ 기후와 지역적 기상변화가 2차 생산과 어류 가입량과 같은 생물학적 과정에 미치는 영향을 파악
- ④ 기후 변화가 생물 개체수에 미치는 영향을 분석할 수 있는 자료를 제공할 북서 대서양에서 2개의 장기적으로 지속되는 기록선을 재확립.
- ⑤ 중간 규모로 파악된 캘리포니아 해류 생태계에서의 물리학적, 생물학적 과정의 상호작용을 연구할 GLOBEC에 대한 계획을 일련의 워크샵을 통해 시행.
- ⑥ 국제 GLOBEC에 대한 연구 전략을 수립하고 계획을 완전히 시행.

바. 대서양 기후 변화 연구(ACCP, Atlantic Climate Change Program)

대서양 기후 변화 프로그램(Atlantic Climate Change Program, ACCP)은 대서양의 표층과 대기간의 상호작용을 이해하는 것을 목적으로 하고 있다 초기에는 다음의 몇 가지 이유로 북대서양의 중위도와 고위도에서 ACCP가 많이 강조되었다. 첫째로, 북극해 주변의 북대서양은 십년에서 백년의 시간규모로 지속적인 해수면 온도이상을

만드는 구조를 제공하면서, 해양의 대류가 표층에서 심해로 확산되는 북반부의 유일한 장소이다 둘째로, 전체 북반구의 평균 대기 표면온도와 북서대서양 해수면 온도 사이에는 상당한 상관관계가 있다 예를 들어, 1930년대 미국 대평원 서부의 흄모래 폭우가 휘몰아치는 지역인 먼지바람(dust bowl)은 북대서양 북쪽에 걸쳐 기온상승을 수반하였다 비슷하게, 1960년대 후반과 1970년대 초반의 상대적으로 차가운 기후는 북대서양 북극 주변 서쪽의 매우 낮은 해수면 온도와 관계가 있다 결국, 인류활동에 의한 원인에 기인한 지구 기후변화를 평가한다는 측면에서, 기후의 자연적 변동성은 ‘우리는 오랜 시간에 걸친 자연적인 기후 변화를 인간활동에 의해 유발된 온실효과의 영향과 구별할 수 있을까?’라는 의문에 해답을 구할 수 있게 하였다

이러한 현상을 연구하기 위해, ACCP는 역사적 자료의 분석 및 모델화, 직접적인 관찰과 해양조사라는 세 가지의 접근방법을 채택했다 ACCP의 첫번째 단계는 과거에 모아진 대서양에 관한 기록을 조사하고 취합하는 것이다 프로그램의 두번째 요소는 취합된 자료를 이용하여 대기와 해양 모델의 전체적인 분류체계를 작성하는 것이다 모델의 분류체계는 단순한 개념적 모델에서 지구-해양과 대기를 연결하는 수치모델에 이르는 범위까지 작성하게 된다 이러한 모델들은, 고위도 대기-해양을 더 잘 이해하고 지속적인 온도이상과 관련이 있는 수괴 성질과 열평형에서의 낮은 빈도의 변화를 관찰할 효과적인 시스템 설계를 도와 줄 목적으로 고안되었다 프로그램의 마지막 요소는 바람, 해수면 온도 해빙, 수괴 성질을 조사하는 기구를 검사하고 운용하며, 인공 위성, 표류 기구, 선박에서의 다른 측정과 함께 그 정보를 결합하는 것이다 ACCP는 북대서양 연구에서의 WOCE와 긴밀하게 협력할 것이다

ACCP의 과거 자료분석은 북대서양에 걸친 낮은 빈도의 기후 변동성을 두 가지 유형으로 지적해왔다 첫번째 유형은 약 10년의 기간에 걸쳐 표면 바람, 해빙의 범위, 해수면 온도에 관찰기호(observational signature)를 파악하였고, 두번째 유형은 40년에서 60년의 기간에 걸치며, 북반구 전체에 영향을 미치는 극지방까지 확장된 기후변화와 연관된 것으로 보인다 이것의 관찰기호는 해수면과 심해에서의 염분계, 수온도등을 포함하고 있다

1960년대 후반과 1970년대 초반에 대서양 기후 체계에 갑작스런 변화가 발생했다 이것은 북서대서양의 저염도 해수의 매우 큰 수괴 형성과 관련이 있는 것으로, “거대 염분이상(the Great Salinity Anomaly)”이라 명명되어 왔다 이 수괴는 몇년후에

는 동쪽으로 이동하였다 그러나 라브라도해(the Labrador Sea)에 있는 동안 이것은 심층뿐만 아니라 표층에도 뚜렷한 흔적을 남기며, 겨울시기의 일반적인 해류순환을 중지시켰다 비록 과거의 과학적 보고기록이 불완전하더라도, 비슷한 사건이 1910년의 라브라도해에서도 발생했음을 나타내는 증거가 있다 이러한 극단적인 표면 염분 이상 현상이 십년이나 수 십년의 기후 변화와 관련이 있는 지에 관한 여부는 분명하지 않다

ACCP의 가장 중요한 성과 중의 몇 가지는 모델화 연구 영역이다 대기 모델은 고위도 해수면 온도이상이 적도 부근의 해수면 온도이상 보다 훨씬 더 복잡하며 근본적으로 다르다는 사실을 보여준다 중위도와 고위도 해류는 복잡한 특성 때문에 원인과 영향을 단순한 선형적 반응유델화 하기에는 어려움이 많다. 바로 이러한 이유로, 고위도 해수면 온도양상에 대한 대기 반응의 연구는 미궁에 빠지기도 하였다.

해양 모델들은 해양의 열염분 순환과 고위도 해양순환의 변화가 북대서양의 기후 변동에 영향을 미치는 과정에 관한 단순한 실례를 제공한다 이러한 모델에서 얻어진 초기의 결과를 분석하는 기술이 발전됨에 따라 동일한 경계조건에 두 개의 매우 다른 수괴가 존재할 수 있음을 보여주었다

아마도 모델연구의 가장 중요한 성과는 지구물리 유체역학 연구실(Geophysical Fluid Dynamic Laboratory, GFDL)연구에서 수행된 지구 연관 해양-대기 모형에 의해 수십 년에 걸친 대서양 기후이상에 대한 모의실험을 수행한 것이다(표 25) 약 1000년의 긴 기간을 종합해 볼 때, 열염분력 순환에서의 변화와 관련된 수십 년의 변동성이 분명하게 드러났다. 모델에 의해 밝혀진 해수면 온도이상은 북대서양에서 십년의 시간규모로 관찰된 현상과 일치한다 이 성공적인 모의실험은 앞으로의 ACCP 모델 연구와 대서양의 실험적인 감시 체계 계획을 위해 중요한 토대를 마련해 준다

ACCP를 계획하는 데 있어서, 십년 내지 백년의 시간 규모는 기기에 의한 자료를 적절하게 이용하기에는 너무 짧다고 평가되었다 이러한 이유로 인해 이 프로그램은 육상에 기록되어 있는 해양-빙산에 대한 자료 분석을 시도하고 있다 이러한 모델연구는 기기에 의해 측정된 기후자료중 인류활동에 의해 오인된 부분을 바로잡을 수 있는 정보를 제공한다. 한편 그린란드 빙산은 북대서양 기후 변동성 연구에 좋은 자료를 제공할 것으로 생각된다.

ACCP의 현장 활동에 대한 계획은 자료분석 결과와 프로그램의 모델화 요소에 의해 결정된다 따라서 ACCP 본래의 전략은 북부 북대서양으로의 해양순환에 의한 극지방의 열 이동을 밝히는 것이었다 초기 단계에서 프로그램의 현장 구성요소는 대서양 북위 24 에서 장기간의 감시를 지속하는 것에 초점을 맞추고 있다 WOCE와 협력을 통하여 반복적인 감시체계와 서쪽 경계 부근의 두 개의 더 짧은 평행적 감시 체계를 1992년 북위 24 에 설치하였다 거의 10년에 걸쳐 수행된 측정은 버뮤다와 플로리다 해협 근처의 경계 흐름에 대한 정보를 제공해 준다 ACCP는 북위 24 에서 열 이동을 계속해서 감시하고 고위도 지역으로 감시를 확대하고있다 ACCP에서 가장 가치 있는 자료중의 하나는 버뮤다와 기상관측선으로부터 얻어진 수계측정의 시간별 자료들이다 버뮤다의 시간별 자료들은 계속 유지가 되는 반면에, 기상관측선으로부터의 자료는 얻어지지 않는다 ACCP의 장기 목표 중의 하나는 WOCE와 다른 프로그램들에 의해 수집된 측정자료들을 참고로 하는 북서대서양에 위치한 기상 관측선의 온도와 열염분시계열 자료들을 복구하는 기기를 개발하는 것이다

WCRP의 새로운 프로그램인 '기후 변동과 예측능력의 II단계(Phase II of Climate Variability and Predictability)'는 십년에서 백년 규모의 기후 변동에 초점을 맞추고 있으며, ACCP의 초기 연구 성과 중 상당 부분이 CLIVAR의 초기 계획에서 구체화되었다 CLIVAR는 기후변동과 기후변화에서의 대서양의 역할에 관심을 가지고 있는 보다 큰 국제단체의 노력과 ACCP의 노력을 조정하는 데 있어서 중요한 역할을 할 것으로 기대된다

표 25 ACCP의 핵심연구 내용

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ① 과거에 수집된 대서양 자료를 취합하여 조사 ② 고위도 해수면 온도의 이상치에 대한 반응이 대기 모형을 이용한 열대성 해양의 해수면 이상치에 대한 반응보다 훨씬 더 복잡한 지를, 그리고 근본적으로 차이가 있는 지를 알아냄 ③ GFDL 지구 연관 해양-대기 모형에서 수십 년간의 대서양 기후 변동성에 대한 모의실험 ④ WOCE 프로그램과 보조를 맞추어 대서양 북위 24도에서 장기적인 관측을 계속 ⑤ 대서양의 십년에서 백년 단위의 기후 변동성을 연구하는 데 캐나다의 해양 학자와 긴밀한 작업 관계를 확립 |
|---|

사. 북극권 연구(ARCSS, Arctic Systems Science)

북극지역연구는 지구변화에 관련하여 중대한 역할을 해왔다 북극은 기후와 밀접하게 연관성을 갖은 불균형의 생태계적 모자이크형태로 구성되어 있다 지구 기후모델들은 가장 큰 온도 변화가 북극에서 발생할지도 모른다는 사실을 보여준다. 더군다나, 북극은 지구 온실 가스, 특히 메탄의 잠재적인 핵심 원천으로 인식되어 왔다 지구 환경을 변화시키는 데 있어서 극지역의 중요성과 민감도를 인식하게 됨에 따라 북극 시스템 과학(Arctic Systems Science, ARCSS)연구 프로그램이 만들어졌다.

ARCSS 프로그램은 다음의 두 가지 목표를 두고 있다 ① 전체 지구시스템과 연관되어 지구변화에 기여를 하거나 영향을 받는 북극 시스템의 물리적, 화학적, 생물학적, 사회적 과정들을 이해하는 것 ② 십년에서 백년까지의 시간 규모로 환경변화를 예측하고 이 변화가 인간과 사회구조에 미치는 영향에 대비하는 정책적 대안수립에 도움을 주는 과학적인 기반을 개선시키는 것

해양학 연구는 초기에는 지구와 바다, 대기의 연구에만 이르렀으나, 근래에 와서는 북극 지역의 과학적 연구까지도 수행하게 되었다 북극의 해양환경은 물, 얼음, 생물상, 용존 화학 물질, 침전물등의 구성물들이 서로 상호작용을 주고받는 복잡한 시스템이다 바람이나 태양으로부터의 에너지 교환이 수괴의 온도, 염분, 밀도 분포에 미치는 영향과 대기 중 탄소의 제거, 심해로 이동하는 표층수, 해양식물을 통한 침전물을 포함하여, 몇 개의 핵심 연구영역이 설정되었다 이러한 목표들은 WOCE와 JGOFS가 공유하고 있으며, 그것들이 기후와 서로 연관되어 있는 해양과정의 완전한 평가를 하기 위해 WOCE와 JGOFS는 ARCSS의 선도를 통해 제공될 수 있는 고위도에 관한 정보를 확보한다 북극해의 많은 부분이 인간의 접근이 불가능하기 때문에 위성 감지기가 자료 수집에서 중요한 역할을 한다

ARCSS는 다음의 세 가지 구성요소를 가지고 있다 ① 고생대 환경의 연구, ② 해양-대기-빙하의 상호작용(OAII), 그리고 ③ 육지-대기-빙하의 상호작용(LAII) (표 26) 고생대 환경 연구는 그린란드 빙상 계획(Greenland Ice Sheet Project Two, GISP2)과 북극 호수와 만에 대한 고생대 기후 계획(Paleoclimate of Arctic Lakes and Estuaries, PALE)의 두 가지 활동으로 구성된다

표 26. ACRSS의 주요 성과

- ① GISP2는 빙하코아시료를 채취하여 빙하시대에 대한 가장 오래된 환경 기록과 북반구에서 얻어질 수 있는 가장 오래된 기록을 밝혔다 궁극적으로 이 코아시료는 250,000년간의 기후 역사를 보여주리라 예상된다
- ② 지속적인 빙하코아 시료채취와 아울러 이들의 정확한 연대측정, 정확한 분석은 마지막 빙하기의 기후 변화를 상세하게 밝혀준다 특히 산업혁명 이후 인위적 영향을 분석하고, 마지막 빙하기 동안 일어났던 자연변화도 밝혀낼 수 있다
- ③ PALE의 초기에는 시료 채취가 불량한 지역과 특히 급속한 기후 변동에 민감한 지역에 기지를 설치하여 퇴적물 시료분석을 통해 고생대 기후자료를 연구하는 방법들을 개선하였다
- ④ OAI에 2개 분야의 탐사를 통해 다양한 해양학적 자료를 구축하였다. 북동 비빙결수권 연구사업(the Northeast Water Polynya Project)은 비빙결수권에서의 1차적인 생산성과 생물지구화학에 초점을 맞췄다 2차 연구는 베링해협, 추키 해협, 보퍼트해의 대륙붕을 조사했다
- ⑤ OAI는 미국의 부서간 북극 부표 프로그램(Interagency Arctic Buoy Program)을 지원하며 모형화 노력을 시작했다
- ⑥ LAI는 북부 알래스카에서 다양한 생태계에 걸쳐 횡단하는 이산화탄소와 메탄 유동의 속도와 제어를 측정할 다방면에 걸친 유동 연구에 대한 계획을 자세하게 시행하였다

아. 음향학적 수온측정을 통한 해양기후변화 연구

(ATOC, Acoustic Thermometry of Ocean Climate Project)

음향학적 수온측정을 통한 해양기후변화 프로젝트(ATOC)는 해양에서 전지구적 기후변화양상을 파악하는 것으로서, 장거리 해저수괴를 따라 음속의 변화를 측정하는 것이다 이는 다음 두 가지 원리에 기초를 두고 있다, (i) 온도가 증가하면 음속도 증가한다, 그리고 (ii) 음향투과는 환류와 해분 규모의 감시가 가능하다. 이를 이용하여 수평온도의 평균치를 산출할 수 있는데, 이러한 평균치는 기후변화를 측정하는데 있어서 좋은 자료가 된다 해양을 횡단하면서 측정한 음향이동시간의 적정성을 증명한 1991년의 성공적 실험(the Heard Island Experiment)이후에 ATOC는 1993년 음향의 전달 과정 측정을 위한 태평양 네트워크를 설립하기 위해 재정지원을 지원 받았는데, 이러한 네트워크는 해양의 기후변화 추이를 감시하는 미래의 전지구적 네트워크 구성의 타당성을 검증하기 위한 것이다.

음향측정을 이용하는데 있어서 하나의 장점은 그 규모에 있다. 해양의 해분을 횡단하면서 음향 이동시간을 측정하는 것은 국지적 온도의 소규모 변이를 제거하여 보다 큰 공간적·시간적 규모의 변화를 측정하는 것이다. ATOC는 태평양의 중부 및 동부의 음원들을 심해음향경로(the deep-ocean sound channel)에 설치하는 계획을 수립하였고, 이러한 계획은 캘리포니아에서 뉴질랜드까지의 통로를 찾는 것을 목적으로 한다. 이들 음원들은 저주파수의 신호를 보내서 해군과 ATOC수신기로 정확한 음의 이동시간을 측정한다.

ATOOC는 프로젝트 시작후 6개월 동안 네트워크의 배치형태를 수립하였고, 음원 및 수신기를 설치하기 시작하였으며 음원 및 수신기의 설치 및 작동에 관한 세부계획을 수립하였다(표 27). 1994년초에 북태평양 경로를 연결하기 위해, 초기 네트워크를 가동할 것이다. 지금까지, ATOC는 모든 기술적 기준에 맞추어 이를 실시하였으며 환경이 변화하는 경우에 대비하여 긴급계획을 개발하여 왔다.

음향전파연구들은 음향이동시간(acoustic travel time)에 대한 “해양 기후”의 효과에 새로운 전기를 마련하였는데, 이는 기후변화추이의 방향에 대한 ATOC자료의 처리에 있어서 중요한 역할을 할 것이다. 전지구적 해양변화의 분포 및 규모를 더 연구하기 위해, 프린스턴, 함부르크 및 MIT 연구진의 해양기후모델들을 ATOC와 함께 통합화 작업을 진행하고 있다. 현재 ATOC는 전략적 환경연구 및 개발계획(the Strategic Environmental Research and Development Projects SERDP)의 진보연구계획청(the Advanced Research Projects Agency ARPA)로부터 자금지원을 받고 있는데, 이는 Scripps 해양연구소로의 국가보조금 형태로 이루어지고 있다.

표 27 ATOC의 주요 성과

- | |
|--|
| <ol style="list-style-type: none"> ① ATOC의 네트워크 배치형태의 수립 ② 조사 및 네트워크 경로의 음향 특성 등을 포함한 하드웨어의 개발 및 설치 ③ 수직선 배열 디자인(vertical line array designs)의 설치 ④ 국제적 협력계획에 대한 협정 ⑤ 해저면 측정 항해를 위한 시간계획 수립 |
|--|

차 해양-대기-육상간 기후예보 연구

(GOALS; Global Ocean-Atmosphere-Land System for Seasonal-to-Interannual Climate
- Prediction Program)

GOALS의 궁극적인 목표는 ① 계절간-연간 시간규모에 대한 전지구적 기후변화의 변이정도를 이해하고, ② 시공간적으로 어느 정도의 범위에서 예측가능한지를 결정하고, ③ 만약 가능하다면, 이러한 변이 정도를 예측하는 실측적, 이론적, 계산적 수단을 개발하는 것이다. 미리 계절 및 연간 평균 온도 및 강우량을 기술적으로 예측하는 것은 이미 여러 국가에서 가치 있는 일로 증명되고 있다. 고위도 국가들에서 이러한 예측은 농경계획, 자원 분배, 물가보조정책 및 홍수/가뭄저감대책 등에 대해 막대한 경제적 이익을 안겨주고 있다.

GOALS의 중심되는 가정은 전지구적 경계에서의 해양-표면 기온, 토양 습도, 해빙 및 눈 등의 특성 변이들은 대기순환에서의 계절간-연간변화에 중요한 영향을 미친다는 것이다. 따라서 계절간-연간 시간규모에서의 기후를 예측하고 그 변이를 이해하기 위해 이들 경계조건들을 조절하는 과정들을 이해하는 것이 필요하다. 이들 경계조건의 진화를 예측하는 것은 의심할 바도 없이 기능이 향상된 모델과 관측치가 필요하다.

GOALS의 첫단계는 TOGA의 원칙적인 예측목표를 증대시키는 것인데, 이는 통합된 모델을 발전시키고, TOGA 관측시스템 특히 TAO배열에 의해 생성된 자료를 예측과 통합시키면 가능하다. 전지구적 열대화의 확장은 계절간-연간변화가 주요한 열적 생성원과 소멸원의 위치, 상호작용 및 효과 등과 관련이 있다라는 가정에 기초를 두게 된다. 좀 더 높은 위도로 확장은 극열대지방의 대기, 해양 및 지표면에서의 계절간-연간변화의 연구에서 얻어진 자료에 의해 이끌어 질 것이다.

TOGA프로그램의 성공적인 순행 이후 GOALS는 다음 4가지 주요 프로그램 요소로 구성된다. 모델링, 관측, 경험연구 및 과정연구(process studies). 과정연구는 태평양 동부 및 인도양의 대기 몬순 영향 및 이들이 고위도에 미치는 영향을 파악한다. TOGA의 두가지 주요 진행활동들 즉, TOGA관측시스템 및 계절간-연간예측에 대한 TOGA프로그램(T-POP)은 GOALS프로그램에 의해 지속된다.

GOALS은 프로그램은 계절간-연간 시간규모에 대한 전지구적 기후변이와 예측력의 폭넓은 이해, 기후시스템을 기술하고 예측하기 위해 개발된 관측시스템의 효과성, 계절간-연간 변이에 포함된 과정들을 모델링하는 능력, 그리고 이러한 변화를 예측하는 기법을 이용하여 연구가 진행된다.

카 연안역의 육상-해양간의 상호작용 연구

(LOICZ, Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone)

세계의 연안역은 인류생활의 필요와 자연 생태계의 제한된 완충능력사이에서 경쟁관계에 있는 지역이다 전지구적인 규모(예, 해수면 상승과 기후변화)나 국지적인 규모(토지이용 및 어업과잉)에서도 인간활동은 연안역에 엄청난 영향을 미치고 있다 기존의 전지구적 변화에 관한 연구들에 있어 연안역에 대한 연구가 부족했다는 판단 아래 국제 지질권-생물권 프로그램(the International Geosphere-Biosphere Program)은 연안지역에서의 육지-해양 상호작용(Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone LOICZ) 프로그램을 개발하였다 LOICZ의 연안역 연구 범위는 연안지역에서 대륙붕 까지도 포함한다 LOICZ는 현재 연안역의 이용형태는 미래세대의 이용에 불가피하게 영향을 줄 수밖에 없다는 것을 대전제로 한다 연안관리를 위한 장기적이고 지속가능한 정책의 개발은 기후, 해수면 및 토지이용에서의 변화에 기인된 여러 영향의 이해와 생태계 자체의 기능에 대한 영향을 이해하는 것을 필요로 한다

LOICZ의 목표는 ① 연안역에서 육지/해양/대기사이의 물질이동속도 결정, 입자성 물질 및 용존성 물질의 변이 및 저장하는 생태계의 용량 결정 그리고 전지구적 및 지역적 규모에 대한 연안생태계의 구조 및 기능에 대한 외부압력조건들의 변화 효과 결정 등, ② 토지이용, 기후, 해수면 및 인간활동의 변화가 연안역에서의 입자성물질의 흐름 및 저장 그리고 연안 형태학에 대해 얼마나 영향을 미치는지를 결정, ③ 유기물과 영양염의 육상 및 해양 유입이 변화하면서 나타나는 연안역의 반응 등 연안시스템에서의 변화가 전지구적 탄소순환 및 대기의 미량가스 조성에 얼마나 영향을 미치는지를 결정, ④ 전지구적 변화에 대한 연안역의 반응이 인간의 이용 및 연안역의 서식지에 얼마나 영향을 미치는지를 평가하고 연안환경의 총체적 관리를 위한 과학적 및 사회경제적 측면을 더욱 개발한다

2. 지질학적 기간에 대한 연구 (The Geological Perspective)

해양시스템을 이해하기 위해서는 해양생물학, 화학, 지질학 및 물리학의 상호연관 관계를 밝히고 정량화 하는 것이 필요하다 현재까지는 해양에 관한 전반적인 이해가 이루어지지 않고 있으나 기술적인 진보 그리고 관측 및 과정연구 중심의 접근으로 인하여 해양 상황 및 과정들에 대한 세부적인 정보를 제공하기 시작한다 대기 및 해양의 지질학적 자료는 앞서 언급한 프로그램들에 의해 수집된 자료를 해석하고 예측모형들을 수립하는데 중요한 정보를 제공한다 지질학적 자료들을 이해하기 위해서는 해수중 용존성 및 입자성물질이 해저면에 퇴적되는 전후로 변환되는 생물학적, 화학적, 그리고 물리적 과정들과 관계되는 해양퇴적물 및 지각과 해수간에 이루어지는 과정을 이해하여야 한다

오늘날의 해양을 완전히 이해한다고 하더라도, 현재의 기후 모형 그리고 미래의 기후변화를 예측하는 능력에는 아직도 한계가 있다. 과거, 현재 및 미래의 기후 변화를 완전히 이해하기 위해서는 해양-기후 시스템의 장기적이고 자연적인 변이성, 해양/기후 시스템의 변화, 그리고 기후변화를 예측하는 모델들의 신뢰도 등을 파악하여야 한다 시간에 따른 해양변화를 상세하게 나타내는 지질학적 기록 즉, 고해양학적 기록은 해양의 전반적인 이해를 높이는데 필요한 정보를 제공한다.

과거의 해양 조건들은 고해양학적 기록, 심해저 퇴적물, 빙하 코아시료, 호수 및 만의 퇴적물 그리고 산호로부터 얻어진 자료에 의해 이해될 수 있다 이러한 연구들로부터 자료를 수집·분석하고 해양 및 기후시스템 변화를 파악하는데 이용하는 여러 방법들이 개발되어져 왔다 특히 과학자들은 해양 및 대기의 과거 온도 조건, 화학 조성 및 순환형태, 해수면의 변화, 강우량 및 증발량 그리고 생물학적 생산성 등을 재정립하는 시도를 하였다 이러한 자료들은 여러 시간 규모면에서 과거 환경조건들의 역사적 기록을 제공하여, 현재의 해양 조건들을 조망할 수 있도록 한다

기후 변화에는 여러 잠재적인 원인과 결과가 있다 기후변동의 잠재적인 원인들을 이해하여야만 기후예측을 할 수 있다 이러한 원인에는 천문학적 힘(예, 지구순환 변이에 의해 나타나는 밀란코비치 순환(the Milankovich cycle)), 해양-대기 시스템 내에서의 상호작용, 또는 해분의 개방 및 폐쇄, 지질구조변화 등이 있다 지질학적 기록은 해양-기후시스템을 통제하고 변화시킬 수 있는 과정들을 설명할 수도 있는 고해

상도의 자료를 제공한다. 예를 들면, 과거 해수면의 변화가 여러가지 원인에 기인한다. 그러나 해수면의 상승과 하강은 원천적으로는 지질구조 활동에 의한 해분의 변형에 기인한다라는 것을 지질학적 기록으로서 말할 수 있다. 해양 화학 및 순환에 대한 중앙해령의 영향, 해저의 광물(예, 메탄 수화물(methane hydrates))이 해양-기후 시스템에 대한 기여도, 그리고 대기 기온 및 해수면 변화의 관계 등 부차적인 원인-결과 관계들이 조사될 필요가 있다. 이러한 지식들은 과학자들로 하여금 인간활동에 의해 기후에 영향을 준 효과를 정량화하고, 인간활동에 의한 변화가 과연 조절가능한 것인지 아니면 사소한 원인인지를 결정할 수 있도록 한다.

컴퓨터 기술의 진보로 인해 해양-대기 및 전지구적 기후시스템 모델을 수립하고 자료를 분석하는 과학자의 능력이 진일보되어 왔다. 예를 들면, 1991-92 엘니뇨 사건을 들 수 있는데, 이 사건으로 인해 남부 아프리카에 극심한 가뭄이 그리고 남부 캘리포니아, 텍사스 및 세계 여타 지역에 큰 비를 가져다주었다. 그런데 이 사건은 이미 2년전에 정확하게 예측되었다. 그러나 불행하게도, 이러한 정확성을 가지고 사건을 예측하는 모델은 많지 않다. 고해양학적 기록은 예측력이 있는 수치모델의 신뢰도를 검증하는 하나의 기준이 될 수 있다. 현재의 해양상태를 설명할 수 있는 모델이 과거의 해양 조건들을 정확하게 “과거예측(hindcast)”할 수 있다는 것은 이 모델을 이용하면 미래의 해양 및 기후조건을 예측할 수 있다라는 신뢰를 갖게 할 것이다. 초기의 대기모델들을 검증하기 위해 이미 과거 예측기법이 사용되었다. Climate Long Range Investigation Mapping and Planning(CLIMAP) 프로그램 및 Cooperative Holocene Mapping Project(COHMAP)에 참여한 고해양학자와 모델전문과학자들은 대기 모델들이 과거 기후를 얼마나 잘 예측하는지를 검증하였는데, 이 때 18,000년전에 있었던 빙하기로부터 예측된 조건들에 대한 자료를 이용하였다. 통합된 해양-대기시스템모형에 대해서도 유사한 검증들을 할 수 있는데, 그 개발에 있어서는 대기모델보다는 시기적으로 약간 뒤쳐진다. 전지구적 환경정책에 있어서 기후 예측이 얼마나 신뢰도가 있느냐가 거의 상당히 중요한 역할을 할 것이다. 아래와 같은 4가지 프로그램은 과거 기후 및 해양 조건들을 이해하고 이러한 조건들을 변화시킨 기작들을 이해하기 위한 연구 프로그램들에 중점을 두고 있다.

가. 해양시추프로그램(ODP, Ocean Drilling Program)

기후예측은 얼마나 정확한가? 실제적 사건들에 대해 예측결과를 검토하면 이러한 질문에 대답할 수 있다. 인간활동에 의해 전지구적 시스템이 반응할 수 있는 모든 경우를 이해하기 위해서는 우선 지질학적 기록을 살펴보아야 한다. 가장 전체적으로 전지구적 기후 및 해양의 장기변화를 기록하고 있는 것은 바로 해양 퇴적물이다. 해양시추프로그램(ODP)에 의해 실시되고 있는 전세계의 심해저 시추시료 분석에 의해 지구의 고해양학(the Earth's paleoceanography)이 다시 정립되고 있다. 시추시료로부터 얻어진 정보를 이용하여 과거의 기후 및 해양조건을 재정립할 수 있고 그리고 더욱 중요한 것은 이러한 변화를 일으켰던 기작들을 이해할 수 있다는 것이다. 이 프로그램에 의해 얻어진 성과를 표@@@@@에 요약하였다.

해양시추프로그램은 시추선인 JOIDES로부터의 산물을 이용하는 국제적 프로그램으로서 이를 이용하여 지구의 과거 및 현재의 과정들에 대해 많은 해답을 구한다. 시추는 전과학자들로부터 제안에 기초를 두고 있다. 이 프로그램은 해분에서의 실험으로부터 시추시료 및 자료를 제공할 뿐만 아니라 이들 시료 및 자료를 연구하기 위한 시설들을 개발하였다.

심해환경은 단기 기후변화(large-amplitude, short-term climate change)에 대한 중요한 증거를 제시한다. 서로 다른 해양학적 기원의 시추시료연구를 통하여 위도 및 수심에 따른 물리·화학·생물학적 구배를 연관시키면, 전지구적 기후변화에 따른 해양시스템의 반응 정도를 알아내는 가장 효과적인 방법이 될 수 있다. 1988년이래로 ODP의 목표중 하나는 전세계 해양의 중요지점으로부터 연속적인 퇴적단면을 획득하는 것이었다. 태평양의 서부 및 북부지역 에트루리아해(the Tyrrhenian Sea), 대서양의 적도 동부지역, 페루연안, 마우드 Rise, 남극해, 인도양, 태평양 열대지역, 산타바바라 해분, 그리고 대서양 열대지역, 대서양의 북극해 그리고 노르웨이해로부터 주상시료를 수집하여 왔다. 또한 캘리포니아 해류(the California Current), the Walvis Ridge, 대서양의 서부 적도지역 및 북극해 등에서 시추시료를 채취하기 위한 계획을 세우고 있다.

이러한 연구결과로서, 지구 궤도의 주기적인 변화에 상관관계를 가지는 생물학적·지화학적·퇴적학적 순환들이 해양환경에 영향을 미쳤다는 사실이 알려졌다.

궤도 변화가 공간적으로 변화가 심하고 시간적으로 변화되는 양상을 보일지도 모르지만, 기후변화의 기작들에 대해 중요한 의미를 가지고 있다. ODP의 연구결과에 의하면 Neogene(약 2천4백만년전)시기는 현재와 같은 해양상태가 나타난 시기로 보이며 Neogene의 기후변화를 설명하는 개념적인 구성이 가능하게 되었다 그러나 세부적인 가설들 그리고 전지구적 규모로서의 해석에 대한 검증이 남아 있다 가설을 검증하기 위해서는 퇴적물이 빠른 속도로 퇴적되는 대륙붕 및 폐쇄된 해분지역의 연구와 고위도의 퇴적물 등과 같이 좀 더 넓은 범위에 대한 퇴적물의 복원이 필요할 것이다

ODP는 해양이 지구의 기후변화에 어떻게 대응하였는지를 연구하기 위해 심해 시추시료들을 이용한다 본 프로그램의 중요 초점은 다음과 같다, ① Neogene동안에 해양순환 해양화학 및 생물학적 흐름에서의 변화가 어떻게 기후 및 CO₂의 대기분압(atmospheric pCO₂)에 영향을 미쳤는지에 대한 이해, ② 전지구적 기후가 불규칙적으로 따뜻하게 된 이유의 규명, ③ 반구의(hemispheric) 온도구배 및 순환 강도에서의 변화를 탐구, ④ 대륙의 빙하기 시작에 대한 원인 규명, ⑤ 충분히 산화된 퇴적물 또는 혐기성 퇴적물의 생성에 관한 기작의 연구 등이다

ODP의 연구결과는 현재의 기후이론에 큰 의문점을 던져주고 있다 예를 들면, ODP는 고해양에서의 따뜻하고 염분이 풍부한 저층수의 존재에 대해 납득할 만한 증거를 제시하여 왔다 이것은 수괴의 기원, 분포 및 기작들에 대한 새로운 의문점들을 던져주고 있어 앞으로 더 많은 연구가 필요할 것이다

과거 5년동안 해양학자들은 전지구적 기후에 영향을 주는 요인들중 해양의 생물학적 생산성이 중요한 역할을 한다는 데에 인식이 새로워지고 있다 페루 및 오만 연안, 대서양의 남극해, 아프리카의 북서부 및 태평양/대서양의 적도 부근 해역과 같이 생산성이 높은 지역의 시료는 고해양생태계의 생물생산성 연구에 효과적으로 이용되었다

ODP는 전지구적 해수면변화 양상 및 해수면 변화의 원인을 이해하는데 목적이 있으며, 이는 전지구적 기후변화가 해수면 변화와 밀접한 관련을 가지고 있기 때문이다 그러나, 아직 전지구적 해수면 변화에 대한 지식의 수준이 초보적인 수준에 머물러 있다.

과거 3천만년동안 빙하에 의한 해수면변화는 수백 m임이 밝혀 졌으나 그 이전 5억년전에 일어난 해수면변화가 기록된 암석에 대한 연구는 미진하다 수십년 혹은 수백만년이후의 해수면변화과정을 예측하기 전에, 해수면변화의 기작을 확실히 이해하여야 한다. ODP는 환초(atoll) 및 대륙붕에 대한 집중적인 연구를 통해 전지구적 해수면 변화의 시기 및 기작을 이해하는데 있어서 상당히 큰 진전을 이루어 왔다.

전지구적 기후변화연구에 대해 ODP가 큰 기여를 하고 있는데 대해 관심을 가지는 과학자 집단들이 크게 늘어나고 있는데, ODP와 다른 지질학적 기후변화 프로그램 즉 U.S. Marine Earth System History(MESH) 프로그램과 국제적 파트너인 MAGES와 연결망이 구성되고 있다 MAGES는 IGBP Past Global Climate(PAGES)프로그램의 PANASH(Paleoclimate of the Northern and southern Hemispheres)와 관련이 있다 이들 모든 프로그램은 과거 5십만년동안의 전지구적 기후변화의 원인과 결과에 대해 관심을 두고 있으나, MESH는Pliocene 및 Eocene초기의 따뜻한 기후에 대한 연구에 관심을 가지고 있다 서로 다른 기후조건에서 기후 및 환경변이성의 장기적인 진화 과정을 연구하기 위해서는 ODP에 의한 계속적인 과학적 시료 채취가 필요하다 이러한 연구들은 과거 해양에서의 조건 및 시간에 따른 기후변화를 좀 더 자세히 이해하도록 하고, 이에 따라 지구환경의 계속적인 진화과정을 좀 더 자세히 이해하도록 한다

ODP에 대한 재정지원은 NSF가 주로 하고 있으며 캐나다/호주 컨소시움, 유럽과 학위원회(European Science Foundation), 독일, 프랑스, 일본 및 영국 등을 포함하는 국제적 파트너도 함께 참가하고 있다 Joint Oceanographic Institutions, Inc (JOI)가 최상위 계약자이다. JOI는 Texas A&M대학과 하도급계약을 체결하였는데, 이 대학은 시추선인 JOIDES를 임대, 작동 및 인원을 고용하고 시추공의 저장 및 연구를 위한 시설들을 유지관리한다 콜럼비아대학교의 Lamont-Doherty Earth Observatory는 시추공 검층 측정을 책임지는 계약자이다

표 28. ODP의 주요 성과

- ① ODP의 leg 151은 1993년 여름에 노르웨이-그린란드해 및 북극해에서 약 3km에 걸쳐 시추를 하였다 이는 전지구적 기후변화에 대한 북극해의 영향과 그린란드 빙하에 대한 정보를 얻기 위해 실시하였다
- ② leg 150은 미국 동부 대륙사면의 4개 지점에서 해수면 변화로 인한 많은 지질학적 경계선들을 발견하였다 이들 지점들은 장래에 대륙붕으로 확장 될 정선 정점들의 일부분이다 대륙붕의 경계가 해수면 변화에 어떻게 반응하는지를 나타내는 모델을 검증하기 위해 이들 정점연구들이 활용될 것이다
- ③ 북대서양의 확정에 대한 Iberia의 passive rifting 및 그린란드의 화산활동의 영향을 조사하기 위해 leg 149 및 152는 Iberia 및 그린란드를 시추하였다
- ④ leg 145는 미국 서부 연안의 Cascadia 연안부에서 시추를 실시하였다 이를 토대로 연안역의 유체 흐름을 조사하고, 퇴적물내에서의 이들 흐름과 가스의 관계를 조사한다 고체상(얼음)과 기체상의 경계면을 관통하였고, 측정은 현장에서 실시되었다.
- ⑤ leg 145는 2백6천만년전의 화산활동 시작에 대한 자료를 수집하였고 이는 또한 북반구에서의 빙하의 시작을 나타내는 것이기도 하다
- ⑥ ODP를 널리 국제화하자는 움직임 속에서, 독일의 브레멘대학에 새로운 시추공 저장소를 설치하였고, 1995년에 JOIDES사무소가 영국으로 이동

나 해령에 대한 학제적 실험

(RIDGE, Ridge Inter-Disciplinary Global Experiments)

RIDGE(Ridge Inter-Disciplinary Global Experiments)는 지구기후변화에 대한 해양의 역할을 연구하는 여러 프로그램들 가운데서도 독특한 연구의 하나이다. 이 연구는 태양 에너지 보다는 육상 기원 에너지에 의해 유발되는 화산주기와 지각변동을 중점적으로 다룬다 해양과 지각은 전세계 해양에 분포하는 해저산맥을 통해 상당량의 에너지와 물질을 교환한다 이러한 교환작용은 해저지각을 통해 해수가 순환되는 열수 활동(hydrothermal activity)에 의해 이루어진다 이러한 과정에서 해수는 신생용암(young lava)을 통과하며 이와 반응함으로써 그 성분이 바뀌게 된다. 해수는 온도가 상승함에 따라 분출하고 이에 따라 해저에서는 고온, 산성의 열수가 분출된다. 이러한 해저온천 주위에는 화학합성을 통해 생활하는 다양한 생물군집이 형성된다.

이러한 열수순환은 아직 그 양은 정확히 밝혀지지 않고 있으나 해양순환, 열전달, 해수화학, 해양 생태계, 해양-대기간 상호작용 등에 중요한 영향을 미치며, 이는 결국 지구기후에 영향을 줄 것이다

RIDGE는 전세계적으로 분포하는 맨틀-기원의 물리적, 화학적, 생물학적 흐름(flux)의 원인과 그 영향을 예측하기 위한 연구이다 또한 이 연구는 관측, 실험 및 이론고찰의 종합적 연구활동을 통해 우리 지구의 물리적 진화과정을 그려보고 지구의 과거 기후변화에 영향을 주었는지 모르는 당시의 장기적인 변동들을 설명하고자 한다 예를 들면, 지질학적 증거로부터 과거 지구생성 초기에는 지금보다 낮은 태양온도와 대기중의 높은 이산화탄소 농도가 온난한 지구기후의 주요 원인이었음을 알 수 있다 따라서 탄소의 지구순환과 기후변화에 있어 해저산맥의 화산활동이 차지하는 역할을 규명하기 위해서는 이로부터 배출되는 이산화탄소의 양과 배출량 변동에 영향을 주는 요인들을 우선적으로 이해해야 한다

단기적 측면에서 보면, 해저산맥에서의 열수 분포와 이의 간헐적 활동 및 변동은 지구기후변화 예측에 두가지 중요한 인자인 해수의 화학적 조성과 순환을 조절하는데 중요한 역할을 담당한다 RIDGE에는 몇가지 주요 과제들이 있는데 이들은 아직까지 탐사되지 않은 해저산맥들을 조사하고, 해저산맥에서 발생하는 자연현상들을 탐지하기 위한 감지방법을 개발하며, 단일 관측지점에서 단기적 변동을 정밀측정하는 연구들이 포함된다

지각과 해양간의 열교환과 물질교환을 중심으로한 해저산맥 연구는 해양-대기 시스템에 관한 연구와 지구기후변화 연구의 핵심적 부분을 차지한다 RIDGE연구는 미국 지구변화 연구 프로그램(U S Global Change Research Program)의 하나이며 NSF로부터 연구비 지원을 받아 왔다 또한 NOAA, 미해군, 미지질연구회(USGS)등은 각각 해저산맥에서의 활동을 연구하는 프로그램들을 진행하고 있다. 최근에 RIDGE는 국제적인 연구로 확장되었으며(InterRIDGE), 몇몇 국가들은 자국내에 이와 관련된 연구활동을 펴고 있다 InterRIDGE에는 SCOR의 후원을 받는 연구집단이 있다

1989년 RIDGE 프로그램의 초기과학계획(Initial Science Plan)이 발간되었는데, 그후 초기 중점분야로 명시되었던 몇몇 연구에서는 상당한 발전이 있었다 (표29). 이 연구 프로그램의 장기 목표중 하나는 지구의 해저산맥들을 공간적, 시간적으로 상세히 규명함으로써 이 해저산맥들의 활동을 정량적으로 예측할 수 있는 모델을 만들어

내는 것이다 이러한 모델은 해저산맥의 변동이 지구기후변화에 미치는 영향을 예측하는데 유용한 도구가 될 수 있을 것이다. 이를 위해서는 지각 형성에 영향을 주는 주요 변수들을 규명하는 것이 필수적이다 RIDGE 프로그램은 초기에 지각확장속도와 마그마 유입의 두가지 일차변수들 간의 상호작용에 초점을 맞추어 왔다 빠른 속도로 팽창하는 지역과 천천히 팽창하는 두지역에서의 광범위하고 대조적인 일련의 데이터들을 수집하는 것을 목표로 하여 1991년에는 우선 천천히 팽창하는 지각중 하나인 대서양 해저산맥(Mid-Atlantic Ridge)에 대한 자료수집에 들어갔다

표 29 RIDGE의 주요 성과

- ① NOAA Vents 프로그램과 공동으로 육상음향관측 시스템(SOSUS)을 응용하여 해저활동 탐지 및 반향기술을 개발하였으며, 1993년 최초로 해저산맥 지각의 화산분출을 성공적으로 관측함
- ② 북부 동태평양용기지대(northern East Pacific Rise)에 신생화산지점을 관측하였으며, 여기서는 해저화산분출 직후 발생하는 화산작용, 지각활동, 열수활동, 생물학적 발달과정등을 최초로 기록하였다
- ③ 불-미 공동 대서양 해저산맥 프로젝트(FARA)의 일환으로 북위 15~40 도에 이르는 대서양 해저산맥의 특성을 조사하였으며, 이 조사에는 연속다중빔 수심측정(continuous multibeam bathymetric mapping), 조밀한 간격의 암석시료 채취, 지화학적 연구 등이 동원되었다. 이 조사를 통해 기존에 알려진 대서양의 열수지점수를 두배로 늘리게 되었다.
- ④ MELT(Mantle Electromagnetic Tomography)실험을 위해 남동태평양해령(southern East Pacific Rise)에서의 현장조사와 파일럿 연구를 완료함 MELT는 지금까지 실시된 해양지구물리실험중 가장 야심찬 연구이며, 이는 해저산맥지각 하부의 용암지역의 규모와 형태를 파악하기 위한 것임
- ⑤ 현재 12개 국가가 참여하는 해저산맥지각 연구를 위한 국제간 공동협력 프로그램인 InterRIDGE를 발족시킴

대서양 해저산맥에 관한 불-미 공동프로젝트(FARA)의 제1단계(1990-93)의 연구 목표는 지각판(plate boundary)의 전반적인 구조와 판구조 특성, 수심분포, 암석학적 특성, 열수 특성을 밝히는 것이었다 이 연구 프로그램은 성공적으로 수행되어 그 결과, 북위 15도 ~ 40도를 연결하는 지대를 대상으로 지구물리학적인 연구가 상시적으로 진행되고 있으며, 지화학적인 연구를 위한 암석시료의 채취도 이루어지고 있다. 또한 물리특성 감지기와 화학특성 감지기, CTD를 장착한 해저탐사선을 동원하여 열수 흐름(hydrothermal plume)을 조사해 왔다 이러한 조사결과, Azores부근 천해지각(shallow crust)에서 한개의 해저 열수지점(hydrothermal site)과 아티란티스 단층지대(Atlantis Fracture Zone)에서 또 다른 하나의 열수지점을 발견함으로써 기존의 밝혀진 지점들과 함께 그 수를 두배로 늘렸다 FARA 프로젝트의 제2단계 기간동안(1993-95)에는 열수지점, 지진조사 등의 특정 분야에 대해 집중적인 연구가 이루어질 전망이다

RIDGE 프로그램이 안고 있는 어려운 과제중 하나는 해저화산분출, 지각활동, 급격한 열수 및 물질분출과 같은 일시적인 해저산맥 지각에서의 활동을 감지하고, 그 위치를 확인하며, 이에 반응할 수 있는 효과적이고 신뢰성 있는 방법을 개발하는 것이다 한편, 하와이와 아이슬란드 지역의 해저분출을 관측하는 과정에서 이 분야에 상당한 진전이 있었으며, 앞으로 지각확장활동이 활발한 해저산맥에서의 관찰을 통해 이와 같은 지각활동의 유형, 발생과정, 지속기간에 관한 이해와 더불어 새로운 지각형성시의 화산활동, 지각활동, 열수 활동, 생물학적 활동 등의 상호관계에 관한 규명도 가능할 것으로 기대된다

지난 수년간 RIDGE 프로그램을 통한 중요한 성과중 하나는 동태평양 해령(East Pacific Rise)의 관측지점에서의 관측결과라고 할 수 있는데, 1991년 잠수정 작업도중 신생 해저화산의 분출이 우연히 발견된 바 있다 당시 화산분출과 함께 상당량의 열수가 광범위한 범위까지 분출되는 것이 확인되었다 이러한 해저분출지점(vent)에서 흔히 관찰되는 퇴적광물과 생물군집은 아직 발달하지는 않았지만 흰박테리아층(white bacterial mats)이 분출되지 얼마되지 않는 유리질 용암 위를 덮고 있었으며, 그 위를 덮고 있는 해수 속에는 흰박테리아 분비물(bacterial matter)이 발견되었다. 1992년 재조사결과, 몇 군데 고온의 분출지점에서 집중적으로 열수분출이 일어나고 있었으며, 분출되는 유체의 온도와 화학적 조성의 변화, 박테리아수의 감소, 최대 30cm 크기의 tubeworm를 포함하여 다양한 생물군집이 발견되는 등 상당한 변화가 일어난 것으로

관찰되었다 향후 몇 년까지 이 지역에서의 용암냉각과 열수계의 발달에 따른 변화들을 지속적으로 관찰할 예정이다 그러나 분출후 1년간의 급속한 변화가 관찰된 것으로 볼 때 해저지각 형성의 초기단계에 관한 연구시 이러한 변화를 조기에 탐지하고 신속히 반응하는 것이 매우 중요하다는 것을 알 수 있다

현재 해저산맥활동을 조기탐지하는 분야에서 상당한 발전이 이루어지고 있다 1991년부터 NOAA의 VENTS 프로그램에서는 미해군이 북태평양 심해저에 영구적으로 설치한 수중음향탐지망(SOSUS)에서 전송되는 수중음향데이터를 지속적으로 기록하기 시작했다 이 복잡한 탐지장치들은 SOFAR(sound fixing and ranging)채널의 음파를 관측하기 위해 고안된 것으로서 Washington과 Oregon 외해역의 spreading center를 따라 일어나는 지각활동의 위치와 내용을 관찰하기 위해 설치되어있다 처음에는 특정한 활동에 대해 그 위치와 내용을 확인하기 위해 기록된 데이터를 NOAA로 전송하여 왔는데, 1993년에 Juan de Fuca Ridge에 실시간 관측이 가능한 시스템이 설치되었으며 설치 4일만에 Axial Seamount부근에서 지진활동이 관측되었다. 그후 같은 지역에서 캐나다 조사선에 의해 열수흐름(hydrothermal plume)이 있는 것이 확인된 바 있었으며, 1993년말에는 한번의 조사항해를 실시하는 등 지금까지 연구가 계속되어 왔다 이와 같은 해저산맥활동의 새로운 관측능력은 가까운 장래에 과학자들이 활용할 수 있게 될 것이며 이를 통해 북대서양에서의 새롭고도 흥미로운 발견으로 이어질 수 있을 것으로 기대된다

앞으로 몇년내에 RIDGE 연구는 몇가지 중요한 현장 연구 및 실험을 실시하게 될 것이다 해저산맥활동에 수반되는 에너지와 물질 흐름(energy and chemical fluxes)을 규명하는 것은 지구기후변화에 대한 영향을 평가하는데 있어 매우 중요하다 그러나 이러한 연구를 위해서는 전지구적인 차원에서 해양저 산맥에서의 판 구조, 지화학적, 생물학적, 에너지 흐름의 특성을 파악하는 것이 필요하다 즉, 이러한 연구는 InterRIDGE를 통한 국제적인 협력을 통해서만 달성될 수 있을 것이다 이러한 연구는 1,000~2,000 km정도의 특성규명이 잘 이루어지지 않고 있는 해저산맥 구간들에 대해 이루어지게 될 것이다 한편, 앞으로 2년내에는 이러한 국제 공동연구의 일환으로 호주-남극간 단층지대(Australia-Antarctic Discordance)부근에 위치한 남동 인도양 해저산맥(Southeast Indian Ridge)에서 RIDGE 현장활동을 실시할 계획이다

중요하지만 아직 제대로 규명되지 않고 있는 다른 하나의 지각팽창 과정으로 해저산맥 축 하부에서의 용융(melting)과 용암이 해양 암석권을 통해 해저면으로 이동하는 기작에 관한 것을 들 수 있다 1989년 이래로 RIDGE과학자들은 용융지대(melting region)와 맨틀류(mantle flow), 해저산맥 하부에서의 용암이동의 규모와 형태를 조사하기 위한 현장실험을 계획해 왔다 MELT(Mantle Electromagnetic and Tomography) 실험으로 불리워 지는 이 프로젝트에서는 해저산맥의 구조가 원거리의 지진 신호에 미치는 영향을 기록하기 위한 약 40개의 해저면 지진계와 1년간의 지각 및 맨틀 상층의 전도도 구조(conductivity structure)를 파악하기 위한 20개 가량의 전자기 장비를 설치할 계획이다 이러한 규모의 실험을 위해서는 미국내의 여러 연구단체들의 면밀한 협조가 있어야 할 것이며, 이용가능한 특수장비들을 거의 모두 동원해야 할 것이다 이 연구를 위한 조사지점으로는 해저산맥중 가장 빠른 속도로 확장하고 있는 곳 중 하나인 Garrett Fracture Zone의 남쪽에 위치한 East Pacific Rise가 선정되었으며, 해양조사 작업은 1995년에 착수될 예정이다

RIDGE 프로그램의 중요한 장기목표중 하나는 수십초에서 수십년에 이르는 시간 규모에서 해저산맥 지각의 활동간의 상호작용을 이해하는데 있다 이를 위해서는 전 세계에 분포하는 해저산맥중 선정된 관측지점에서 용암, 화산, 지각, 열수 활동들을 연속적으로 관찰하는 것이 필요하다 동태평양해령에서의 반향(response)탐지를 시작으로 연구가 착수되었다 그러나 RIDGE프로그램에서 중요한 두번째 연구는 화산-열수계를 장기적으로 관측할 수 있는 해저면 관측소의 설치이다 이 연구를 위해 Juan de Fuca Ridge의 Cleft Segment가 관측지점으로 선정되었으며, 이곳에 화산활동, 지각활동, 열수활동을 관측하기 위해 많은 장비와 부표들이 설치되었다 앞으로 몇년간 이와 같은 연구활동을 통해 많은 지면변형(ground deformation), 미세지진활동, 열수의 흐름과 화학적 조성, 생물분포 등과 같은 주요 변수들에 대한 동시 관측과 측정이 이루어질 수 있을 것이며, 이와 같은 결과는 개별 해저화산에서의 단기적인 에너지와 물질 흐름을 평가하는 것을 가능케 할 수 있을 것으로 기대된다 이는 지구기후변화를 예측하는데 두가지 중요한 요소인 해양화학과 순환을 조절하는 이들 시스템들의 역할을 규명하는데 중요한 단계가 된다

RIDGE내에서 행해지고 있는 연구들은 국가 기술 및 경제개발에 필요한 기초적인 지식을 제공하게 된다 예컨대, 해저열수계에 관한 연구를 통해서도 해저광물이 어떻

게 형성되었는지 알 수 있으며 이는 새로운 탐사기술을 개발하는데 도움이 될 수 있을 것이다. 해저 열수계에 서식하는 호온성 박테리아(thermophilic bacteria)를 이용하여 효소를 축출함으로써 끓는점에서도 유전자 화학실험이 가능한 생물공학분야를 가능케 하였다. 현재 연간 6억달러 규모에 달하는 이러한 효모 시장은 앞으로 십년간 급속도로 성장할 것으로 예상된다. 해저산맥 연구에 수반하여 개발된 해저면 지도작성 및 심해저 잠수기술은 이미 10억달러의 규모의 사업이 되었고 이는 석유탐사에서 어업에 이르기까지 각종의 해양산업에 활용되고 있다.

다. 미국지질조사청(U S Geological Survey)의 지구변화 및 기후역사 프로그램

인간활동으로 인한 환경변화에 대한 국가적, 국제적 관심에 부응하고 정부 및 연구단체들에게 지구기후변화에 관한 적절한 정보를 제공할 목적으로 미지질조사청의 지질부(Geologic Division of U S Geological Survey)에서는 고생대기후와 현재 기후 변화 과정에 관한 연구를 진행하고 있다. 지구변화 및 기후역사 프로그램(Global Change and Climatic History Program)은 고생대 기후, 냉대지역, 건조 및 준건조지역, 생지화학적 과정, 화산분출 등의 다섯가지 요인에 초점을 맞추고 있다

지구기후변화에 있어서 해양의 역할은 다음과 같은 세가지 연구분야에서 주로 다루어지고 있다. (1) Pliocene 기후의 재현, (2) 북극 고생대해양, (3) 서부 북미의 육상 및 해양 기후변화의 종합 이러한 연구분야에 있어 기존의 성과 및 앞으로의 계획은 표 30에 제시되어 있다.

mid-Pliocene기의 온난기간(250~350만년전) 동안의 환경조건을 구성하고 Pliocene기에 있었던 변화를 기록하기 위한 학제간 연구의 일환으로서 해수면온도 및 심해저 해류순환과 같은 해양학적 특성들을 지질학적으로 간접추정하는 방법을 고안하기 위한 연구가 추진중이다 이러한 연구의 결과를 육상 식생에 관한 연구결과와 비교하면 Pliocene기의 온난기를 재현하기 위한 일반적인 순환모델 실험의 결과의 타당성과 한계를 결정하는데 이용될 것이다

Neogene말기(5백만년전) 동안의 북극해양의 역사를 기록하기 위한 또다른 학제적 연구가 진행중이다. 이 연구에는 지진기록, 층서학적 관측 및 퇴적학적 관측, 북극 분지(Arctic Basin)에서 채취된 코어시료의 미고생물학적 분석과 안정-동위원소분석등을 이용한 상세한 기후역사연구 등이 포함된다.

표 30. USGS 프로그램의 성과 및 계획

① Pliocene 기후 재현

Pliocene중기의 북반구 경계조건(해수면 온도 및 식생)에 관한 예비조사가 완료되었으며, GISS 지구순환 모델을 이용한 Pliocene 온난기후 시뮬레이션에 이를 이용하였음. 모델 시뮬레이션 결과, 남위도에서 북위도로의 자오선을 따라 해양 열 이동에 있어서 15 ~ 20%의 변화가 Pliocene기 온난화의 주요 요인인 것으로 추정된다. 경계조건 자료들은 현재 새로운 자료로 추가 및 갱신되고 있는 중이며, 남반구 자료까지 범위를 확장하고 있다. 1994년에는 적어도 2개 이상의 모델을 통해 바뀐 고생대환경 데이터를 이용한 추가적인 모델링과 민감도 실험을 실시할 예정이다

② 북극 고생대해양학적 연구

1992년에 USGS의 후원하에 USGS의 빙하쇄설선 Polar Star를 동원하여 지구물리 및 코어채취 탐사를 실시하여 North Wind Ridge와 북극해 서부의 Canadian Basin 인접지역에서 52개의 피스톤 코아시료와 17상자의 코아를 채취하였다. 1988년 USGS가 동일한 지역에서 채취한 코아시료와 1992년에 채취된 시료의 일차분석결과, North Wind Ridge의 퇴적층에서는 지난 수백만년동안 빙하기가 주기적으로 반복되었음을 알 수 있었다. 암석층서학적 분석, 자기층서학적분석, 화석미생물학분석을 종합해보면 Pliocene기까지의 북극 서부의 기후 및 고생대 해양에 관한 기록을 재구성할 수 있다. 앞으로 기존의 코아시료와 추가로 채취될 시료를 정밀분석할 계획이다

③ 북미 서부의 해양-육상 기록

1992년 USGS는 북태평양 동부의 해양 코아시료에서 얻어진 기후기록과 비교할 수 있는 미국 서부에서의 육상 기후기록을 얻기 위해 코아채취 프로그램에 착수하였다. 지난 2년간 남부 Oregon의 Klamath Lakes지역, 북부 California의 Butte Valley, California의 Owens Lake, 남부 Idaho 지역에서 lacustrine 퇴적층을 채취하였다. 앞으로 Alaska의 Bunnville Basin과 Yukon Basin에서도 시료를 채취할 예정이다. 이러한 코아시료에서 얻어진 기후기록을 분석하여 이를 북태평양 동부와 북극해에서 채취된 해양 코아시료의 기후기록들과 비교할 예정이다

장래 기후예측의 정확성을 향상시키기 위해 지난 13만년간의 북태평양 동부와 미국 서부의 인접한 육상지역에 대한 기후역사를 파악하기 위한 연구가 진행되고 있다. 이 연구의 일차적인 목적은 미국의 서부육상지역에서 태평양 동부에 이르는 지역에서의 해양기후와 육상기후 기록들의 자세한 상관관계를 밝히는데 있다. 이 지역에서의 기후역사를 재현하기 위해 고생물학적, 퇴적학적, 지화학적, 동위원소학적, 연대기학적 연구와 기술들이 총동원되고 있다.

이러한 연구의 결과들은 전세계 해양에 대한 보다 완전한 이해를 도모할 것이며, 미래에 있을지 모를 잠재적인 변화를 예측할 수 있게 할 것이다. USGS의 연구는 지구 및 환경과학 위원회(Committee for Earth and Environmental Sciences)에 의해 주관되는 미국 지구변화 연구 프로그램(U.S. Global Change Research Program)을 통해 미국내 다른 연구기관들과 연대하고 있다. 한편, 북극연구의 경우는 캐나다의 지질조사청(Geological Survey of Canada)와 공식적인 협력을 통해 이루어지고 있다.

라 해양학적 측면에서의 지구역사

MESH(Marine Aspects of Earth System History) 프로그램의 목적은 해양의 지질학적 기록으로부터 지구환경의 장기적인 자연적 변화를 이해하는 것이다. 10년간에 걸쳐 진행될 프로그램에서는 여러 시간스케일에서의 변화에 대한 민감도, 외부적 요인과 내부 변동에 대한 반응 등을 포함한 해양-기후간 연계 시스템의 동력학적 현상을 집중적으로 연구할 것이다. 다양한 형태의 요인(기후시스템에 대한 내부적 및 외부적 변화요인)에 대한 지구의 반응에 관한 데이터를 얻고 이를 분석하며, 지구모델들을 이용한 실험을 통하여 해양화학과 온실효과의 역할 등과 같은 환경의 피드백 기작을 보다 정교히 정량화할 수 있을 것이다. 이는 지구변화과정에 대해 보다 나은 이해와 수십~수천년 동안의 미래 환경변화를 예측하는 보다 정교한 모델을 만드는데 도움이 될 것이다. 또한 이러한 정보는 미래변화에 대한 사회의 적응 또는 미래변화의 영향을 최소화하는 방안 등의 지구변화에 대한 정책적 대안마련에 매우 중요한 역할을 할 것이다.

MESH 자문위원회(Advisory Panel)는 1990년에 처음으로 열린 바 있으며 여기서 지구변화에 있어서 해양지질학적 측면에 중점을 둔 다섯가지의 광범위한 연구과제들이 제안되었다. 이 회의에서 채택된 보고서를 계기로 지구변화의 과정과 기록을 이해

하는데 해양지질학적 기록이 어떻게 이용될 수 있는가에 관한 해양과학단체의 백서를 촉구하게 되었다. 1993년 3월에 개최된 실무회의에서는 이와 같은 백서에 대해 토론을 벌이고, 과학적 우선순위를 규정하였으며, MESH 운영위원회(steering committee)가 선출되었다. 운영위원회는 1993년 9월에 모임을 갖고 3월 회의의 결과를 재정리하고 MESH 프로그램 계획을 작성하였다.

MESH 자문위원회와 운영위원회는 다음과 같은 8가지의 우선 연구과제를 선정하였다. (1) 해양 지구화학과 기후변화 (2) 천년 ~ 십만년 시간 스케일에서의 기후 변동 및 민감도 (3) 극단적인 온난화 (4) 계절적 및 천년 스케일에서의 변동에 관한 해양 기록 (5) 급격한 기후변화 (6) polar cryospheric history와 지구기후변화 (7) 대륙성 기후변화에 관한 해양기록 (8) 기후변화에 대한 생물들의 반응. 위의 8가지 과제들은 개별 과제들의 과학적 목표들에 있어 상당히 중복되는 면이 있다. 예를 들면, polar cryosphere의 상태에 관한 정보는 극단적인 온난화 시기를 파악하는데 필수적이다.

이러한 연구과제들 간의 중복적인 우선순위를 고려하여 MESH는 가장 우선순위가 높은 5가지의 프로그램들을 선정하였다. 이러한 최고 우선순위의 연구과제들은 다음과 같다.

- ① 해양 지구화학과 기후변화. 지난 50만년 동안 해류순환, 해수조성, 생물이동 등이 대기의 CO₂의 관측기록에 미친 영향과 이러한 변화가 해양, 대기, 생물권 시스템에 미친 결과를 이해함.
- ② 천년 ~ 십만년의 시간 스케일에서의 기후 민감도와 변동. 해류순환과 해수조성의 변동에 영향을 주는 작용을 규명하기 위해 직접적이고 강한 외부요인(일사량 및 대기 이산화탄소량의 변화)에 대한 해양의 반응을 연구함; 기후와 관련된 작용들의 민감도와 특성(즉, 의사선형에서 비선형적 내부 피드백)을 규명하기 위해 기후모델과 더불어 고생대해양학적 역사를 이용함.
- ③ 극단적인 온난화. 지난 1억2천만년 동안 단기간의 안정된 온난기를 중심으로 해양과 대기의 화학적 조성 등의 극단적인 기상이변의 특성을 규명하기 위함, 그리고 기후계의 변화를 기록하고 이러한 기상이변의 모델을 개발함으로써 이러한 극단적 기후의 기원을 이해하며, 극단적인 상태에서 지구기후를 유지했던 기후계내의 피드백 작용을 규명하며, 이러한 극단적 조건을 끝나게 했던 기작을 밝혀냄.

- ④ 시간적(계절별~천년동안) 변동에 관한 해양기록 경계조건에서 과거의 변화에 대해 어떻게 반응하는지 등과 같은 계절 또는 수천년 시간단위에서의 기후계 (climate system)의 작용을 이해함, 계절 또는 수천년 시간단위에서 기후의 변동과 민감도를 시뮬레이션하는 수치모델의 예측능력을 평가함
- ⑤ 급격한 기후변화 지구계의 민감도와 안정성에 영향을 주는 과정과 피드백들을 평가하는데 있어 도움이 될만한 지질학적 기록상의 사건 및 변화들의 특성을 규명함

MESH의 운영위원회는 연구계획을 제출중이며, 이는 MESH 보고서와 백서, 그리고 1993년 3월의 논의와 보고서에 규정된 과학적 우선순위가 높은 과제항목들을 실행하는 첫 걸음이 될 것이다 MESH는 부분적으로 IGBP PAGES(International Geosphere-Biosphere Program's Past Global Climate)의 연구범위의 일부분을 담고 있으며, IGBP 국제 프로그램 IMAGES(International Marine Global Changes Study)중 미국측에서 이루어지는 연구이다 MESH는 NSF 해양과학 프로그램의 일환으로 연구비 지원을 받게 될 것이다

3. 공통적인 연구주제

가 관측 및 자료수집

이 보고서에 설명된 프로그램들의 목적을 달성하기 위해서는 데이터와 자료들을 수집하고 분석하는 것이 매우 중요하다 이러한 임무를 수행하기 위해서는 광범위한 기술, 장비 및 조사선박들이 필요하다 위성과 해상부표들도 필요하지만 무엇보다도 해양조사에 있어서는 선박의 필요성은 두말할 필요가 없다. 해상위치확인을 위한 위성, 위치확인 및 회수, 위치보정 및 검증을 위한 해상부표 등과 더불어 광범위한 지역을 대상으로한 수중 샘플채취와 장비개발을 위해서는 선박이 필수적이다 예를 들면, 코아시료 채취(downhole measurement)을 위해서는 정밀장비와 드릴링 선박(drilling vessel)이 필요하다. ODP는 1985년에 드릴선박 Glomar Challenger를 대신하여 해양조사 및 주상시료채취에 적합하도록 개조한 JOIDES Resolution을 사용하고 있다 Resolution호는 Challenger호에 비해 드릴능력과 기록실험(logging experiment) 장비가 우수하다.

해저산맥에서 시료를 채취하기 위해서는 Alvin호와 같은 심해 잠수정이 매우 유용하다 Alvin호는 1977년 갈라파고스 군도 인근 해역의 열수계를 발견할 때 동원되었던 잠수정으로 지금까지 전세계 해저산맥의 열수지점에 대해 이루어진 수백번의 잠수조사에 동원된 경험이 있다 최근에는 해저 관측과 시료채취 활동에 ROV(Remotely Operated Vehicle) 또는 AUV(Autonomous Underwater Vehicle) 등의 무인잠수정이 자주 사용되고 있다 새로운 광학기술과 집적회로기술, 신소재 및 센서기술이 개발됨에 따라 ROV와 AUV는 해양학에서 중요한 도구로 이용되고 있다 새로운 센서가 개발되고 소형화가 가능해짐에 따라 이러한 무인잠수정의 활용도는 크게 향상될 수 있을 것이다 현재 이러한 잠수정의 활용에 있어 단점은 센서의 가격이 비싸다는 것이다

미해군연구소(Office of Naval Research, ONR)는 East Pacific Rise와 Mid-Atlantic Ridge 해저에 장기연구를 위한 현장실험실(laboratory site)을 설치한 바 있다 ONR의 현장실험실은 해저산맥의 spreading center에 위치하고 있으며 유용한 지질학적, 지구물리학적 데이터를 수집하게 될 것이다 앞으로 더욱 다양한 실험과 조사를 실시되면서 현장실험실의 중요성은 증대될 것이다

나 연속적인 장기 관측

해양의 자연적 변화를 파악하기 위해서는 일정한 지점에서 장기간동안(수년에서 수십년간) 해양상태에 대해 연속적 또는 정기적인 관측을 해야한다 해수 표면 인자들(풍속, 수온, 색도, 해수면 빙결 등)은 위성센서를 통하거나, 현장에 센서를 설치하여 측정할 수 있다 위성센서는 일주일에 몇차례정도 관측지점을 비행하면서 관측을 하는데, 구름이 많이 끼는 날씨에는 관측이 불가능하며, 일반적인 센서의 수명은 불과 몇년정도밖에 되지 않는다 센서와 위성을 제작하는데 상당한 기간이 소요될 뿐 아니라 연방 예산 승인절차에 따라 우주선의 계획이 좌우되기 때문에 위성을 이용한 장기 관측은 데이터의 연속성을 유지하기가 어렵다(위성에 대해서는 다음 절에서 좀더 상세히 다루기로 함)

부이를 이용한 해상 측정장치는 말할 것도 없이 위성보다는 측정범위는 적지만 한번에 한 지점에서 수개월동안 해수면에서 해저면까지의 해양조건을 반복적으로 측정할 수 있는 장점이 있다. 장기관측에 해상측정장치를 이용하는데는 거친 해상조건과 전원공급이 장애요인이며 일부 값들은 측정이 불가능하다는 결점이 있다 앞으로

15년내에 센서개발에 획기적인 발전이 있을 것으로 기대되나 현재로서는 해상측정장치의 사용에는 상당한 제약이 따른다

연속장기측정 자료의 상당 부분은 GOOS(Global Ocean Observing System)을 이용하여 얻어지게 될 것이다 이 시스템은 주요 측정값들에 대한 연속관측을 목적으로 만들어진 것이다 여타의 연구 프로그램에서 개발, 운용되고 있는 측정자료(예컨대 TOGA 관측 시스템)들중 일부가 GOOS로 보내지게될 것이다 세계기상측후소(World Weather Watch)가 지구기상연구를 가능케 해주는 백그라운드 자료를 제공해주 듯이 앞으로 GOOS는 해양 및 기후변화 연구를 위한 장기관측자료를 제공하게될 것이다 GOOS는 연구장비개발을 위한 계기를 마련해 줄 수 있을 것이다

다 인공위성

위성은 하루도 채 안되는 기간동안 해양 표면의 많은 자료를 측정할 수 있기 때문에 이 보고서에 소개한 많은 연구 프로그램들에 있어 위성은 매우 중요한 위치를 차지한다 선박을 이용하여 이와 같은 광역적 조사를 한다는 것은 불가능하다 그러나 위성을 통해 원격탐사된 자료와 조사선 또는 플랫폼에서 실측한 해양자료 간의 상관성을 규명하기 위해서는 몇몇 조사지점에서 현장측정을 실시할 필요가 있다 이 보고서에 소개된 몇몇 연구프로그램에서는 조사선을 이용한 측정과 동시에 해양상태를 거시적으로 관측할 수 있도록 위성 탐사를 이용하는 것으로 계획이 잡혀 있다

JGOFS 연구에서는 SeaWiFS(Sea-Viewing, Wide Field Sensor)로 부터 해양 색상자료를 수신 받게 되며, ADEOS(Advanced Observing Satellite)와 ERS-1(European Remote Sensing Satellite)로 부터는 분산도계(scatterometer)자료를 수신 받는다 해양의 색상은 식물성 플랑크톤의 생체량과 관계가 있으며, 분산도는 파도와 풍속에 의한 해수표면에서의 태양광선의 분산작용과 상관성을 갖는다 해양 수표면에서의 열전달, momentum 전달, 이산화탄소 등의 가스전달량을 계산하기 위해서는 풍속과 파고를 추정하는 것이 필수적이다. 풍속(wind stress)은 해양 상층부에서의 순환을 유발하는 주요 요인이 된다. 따라서 해수순환 예측모델을 테스트하고 기후모델에 적용할 입력 데이터를 개선하기 위해서는 분산도계를 통한 풍속관측이 필요하다. 해양 수표면 온도는 ERS-1과 같은 적외선 광도계(radiometer)로 측정할 수 있으며, 풍속측정자료와 결합하여 해양-대기간 열교환을 계산할 수 있다

TOGA 프로그램과 WOCE는 해양 표면상태와 풍속에 대한 위성측정을 필요로 한다. GEOSAT(Geodetic Satellite Mission)은 엘니뇨/남부진동(ENSO)에 의한 열대해양에서의 파고를 관측하며 해수 표면 경사로 인한 해수 표면 해류를 나타낼 수 있는 고도계(altimeter)를 장착하고 있다 한편, TOPEX/Poseidon 고도계는 GEOSAT 또는 ERS-1(ERS-1은 TOPEX/Poseidon보다 고위도에서 측정하기는 하지만)에 비해 해수면 측정의 정확도가 3배가량 높다. 고도계의 정밀도로 인해 TOPEX/Poseidon은 표면 해류와 해양 수평 열이동을 측정하는 중추적인 역할을 할 수 있을 것이다. ADEOS(Advanced Earth Observing Satellite)에 장착될 NSCAT 분산계(NASA scatterometer)는 더 높은 정확도를 가지며 ERS-1분산계보다 더 많은 해양표면측정을 담당하게 될 것이다

NASA는 해양센서, EOS(Earth Observing System), Earth Probes 등을 띄울 크고 작은 위성 플랫폼을 개발중에 있다 이러한 센서들은 운량, 강우량, 수면온도, 대기 입자물질, 강설, 결빙상태 등을 측정하게 될 것이다 최초의 Earth Probe 위성은 SeaWiFS의 해양 색도 탐지를 위해 사용될 것이며, 다음에는 열대지역에서의 증발과 강우에 의한 열전달을 추정하기 위한 데이터 제공을 목적으로 하는 열대강우측정임무(Tropical Rainfall Measuring Mission)에 사용될 예정이다

라. 데이터의 관리 및 이용

GOOS와 GCOS는 공동으로 차세대 대기-해양 데이터 관리 시스템을 개발할 계획이다. GTS(Global Telecommunication System)는 세계기상관측을 위해 개발되었으나 거의 수명이 다되었다 새로 개발될 시스템은 인터넷을 활용하여 여러 곳에 분산된 데이터 베이스들을 한 곳으로 통합하는 체계가 될 것이다 관측 프로그램으로서 GOOS와 GCOS가 추구하는 경향의 주된 특징은 일반인들에게도 데이터가 제공된다는 점이다 대부분의 데이터가 연구목적상 사후에 이용되는 경우도 있으나 실시간(real-time) 또는 실시간에 가깝게 이용되므로 측정과 동시에 데이터를 이용할 수 있어야 하며, 데이터의 배포권에 대한 제한 또는 독점적 이용 등이 있어서는 안된다 즉, 원칙적으로 기술적으로 가능한 범위에서 모든 이용자들에게 데이터가 측정과 동시에 이용 가능해야 한다는 것이다 따라서 이를 위해서는 위성원격측정 시스템의 이용과 높은 수준의 데이터 처리 및 품질관리 체계가 이용되어야 할 것이다

제 3절 지구환경변화에 관한 연구 동향

지구 기후변화가 인류의 생존을 위협하는 심각한 문제로 인식되면서 UN을 비롯한 선진 각국들의 주도하에 국제적이고 학제적인 연구 프로그램들이 계획되었으며, 현재 연구활동이 활발하게 이루어지고 있다 지구환경변화는 몇몇 나라가 해결할 수 없는 방대한 연구이기 때문에 UN 산하의 정부 또는 비정부기구에 의해 지구환경변화에 대한 연구가 수행되고 있다 그 대표적인 기구로는 UN 산하 기구(UNDP, UNEP, UNESCO), 국제과학연맹(ICSU), 다정부간 기후패널(IPCC), 세계 기상기구(WMO), 정부간 해양위원회(IOC), 국제사회과학위원회(ISSC) 등이 있다

여기에서는 세계기상기구(WMO)와 국제과학연맹(ICSU)에 의해 기획되어 현재 진행되고 있는 주요 연구 계획인 세계기후연구계획(WCRP)과 국제지권-생물권계획(IGBP)의 연구들을 파악하고 해양과 관련된 대표적인 연구프로그램들을 살펴보고자 한다.

1. 국제공동연구

가 국제지권-생물권 연구(The International Geosphere-Biosphere Program IGBP)

IGBP는 국제과학연맹이사회(International Council of Scientific Unions, ICSU)이 주관하며 주요 연구목적은 전체 지구계를 통제하는 물리, 화학, 생물 과정들의 상호작용과 지구 전체계에서 일어나는 변화, 인간활동에 의하여 영향을 받는 지구변화 양상들을 이해하고 기술하려는 데 있다, 이 연구계획은 십년 혹은 백년 정도 시간 규모에서의 주요 지구환경변화를 대상으로 하며 자연적이나 인위적인 지구환경변화 중에서도 생물권에 영향을 미치는 것으로서 실제적으로 접근할 수 있고 예측할 수 있는 것들을 그 주 대상으로 삼는다

IGBP 집행위원회는 연구개발 및 실행을 위하여 ① 육상생물권-대기화학 상호작용분야 ② 해양생물권-대기 상호작용분야, ③ 수문학적 순환의 생물권적 분야, ④ 육상생태계 분야 등 4개 조정위원회(Coordinating Pannel)를 설치하고 있다

IGBP의 주요 연구프로그램으로는;

- ① 대기의 화학조성연구(IGAC, International Global Atmospheric Chemistry Project)
- ② 지구해양물질 플럭스 연구(JGOFS, Joint Global Ocean Flux Study)

- ③ 고기후변화 재현 연구(PAGES, Past Global Changes)
- ④ 수리순환 및 생물권 연구(BAHC, Biological Aspects of the Hydrological Cycle)
- ⑤ 지구변화와 육상생태계 연구(GCTE; Global Change and Terrestrial Ecosystems)
- ⑥ 육지개발 및 지표면 변화 연구(LUCC, Land Use/Land Change)
- ⑦ 자료분석, 해석 및 모델연구(GAIM, Global Analysis, Interpretation and Modelling)
- ⑧ 연안역의 육자-해양 상호작용 연구(LOICZ, Land-Ocean Interactions in the Coastal Zones)
- ⑨ 자료 및 정보 시스템 구축(IGBP-DIS; Data and Information System)
- ⑩ 분석, 연구 및 교육 시스템 구축(START, System for Analysis, Research and Training)

등 10여개의 대형 공동 연구프로그램이 진행되었거나 수행중이며 향후 전대양 진광대 연구 (GOEZS; Global Ocean Euphotic Zone Study)가 '98-2000년 기획사업으로 계획중이다.

IGBP 연구계획에 참여하고 있는 국가는 현재 20여개국으로 오스트리아, 오스트레일리아, 방글라데쉬, 캐나다, 칠레, 중국, 콜롬비아, 프랑스, 서독, 헝가리, 인디아, 이스라엘, 일본, 네델란드, 폴란드, 남아프리카, 스웨덴, 스위스, 영국, 미국 등이다.

우리나라는 1993년 대한민국 학술원을 대표기구로 IGBP에 공식가입하였으며 본격적인 연구참여를 위해 IGBP 한국위원회가 1995년 2월에 학술원 산하 특별 위원회로 구성되었다

나. IGBP의 주요 연구프로그램

(1) 대기의 화학조성연구(IGAC; International Global Atmospheric Chemistry Project)

IGAC는 대기라는 복잡한 시스템에서 일어나는 변화양상에 대한 이해를 넓히기 위해 대기의 조성에 영향을 미치는 물리과정, 생태계·기후계와 대기 화학조성의 상호관계, 인위적 또는 자원적 요인이 대기 화학조성에 미치는 영향 예측등을 연구목표로 설정하여 대기 관측, 실험 및 수치모델등에 의한 연구를 추진하고 있다.

IGAC는 대기조성의 종합적인 이해를 돕고자 대기-해양간 상호작용, 해양의 순환, 생태계의 순환과정등을 밝히고자 7개 핵심사업을 진행중이다.

(2) 지구해양물질 플럭스 연구 (Joint Global Ocean Flux Study, JGOFS)

GOFs 프로그램은 해양내에 생물작용에 의해 조절되는 탄소의 유동을 정량화하는데 목적이 있다. 이러한 연구는 지구내 탄소 순환에 대한 해양의 역할을 보다 분명히 밝혀 줄 것이며, 미래의 탄소 시스템을 예측할 수 있는 모델들이 개발 될 것이다 따라서 해양에서의 탄소순환이 지구 온도의 변화에 대해 어떻게 반응하는 지를 이해하는 것은 매우 중요하다. 이러한 과학적 지식은 경제 및 환경 정책을 수립하는 정책 입안자들에게 큰 도움을 줄 것이다 이러한 목적을 수행하기 위해 JGOFS는 지구 전체 규모 해양에서의 탄소와 그 관련 생물기원 화학원소들의 시간에 따라 변하는 플럭스를 결정하는 과정들을 측정하고, 대기, 해저, 그리고 대륙 사이의 경계면에서 탄소와 그 관련 생물기원 물질의 교환속도를 측정하는데 주력하고 있다

JGOFS는 ㉑ 여러가지 시·공간적 규모에서 표층 해양 과정의 기초적인 변수를 측정하기 위한 지구 전체에 관한 연구(Global Studies), ㉒ 생지화학적 순환역학을 결정하는 주요 과정들을 이해하고 개발된 모델을 검증하기 위한 과정연구(Process Studies), ㉓ 대양에 대하여 여러 생물 관련 원자들의 근원(source)과 흡수원(sinks)으로서의 역할을 하고 있는 연안해양연구(Coastal Ocean Studies), ㉔ 현장 관측을 계획하고 시행하는데 필수적인 모델개발(Modelling Requirements) 등 4가지의 계획 아래 연구가 진행되었다

장기적인 시간규모에서 기후 변화와 관련하여 해양 생지화학적 순환에서의 변화를 관측을 목적으로 버뮤다와 하와이에서의 연구들은 해양의 거대한 빈영양 지역에서 진행되는 탄소 순환의 계절적 변동과 연간 변동 범위에 대해 기초적인 지식을 제공하고 있다 또한 해양 색조와 이산화탄소 시스템 매개변수에 대한 대규모 조사는 지구의 대기-해양의 탄소 유동과 유동의 일시적인 변동성을 규명 할 수 있는 자료를 제공하였다.

(3) 고기후변화 재현 연구(PAGES, Past Global Changes)

PAGES는 지구의 자연사에 대한 분명한 정량적 이해와 인간의 활동이 지구 환경에 어떠한 영향을 미치는가를 파악하는데 목적이 있다 이를 위해 PAGES는 초점연구사업으로 PANASH(Paleoclimate of the Northern and Southern Hemispheres) 개발하여 연구를 진행한다 이에관한 자세한 내용은 부록 3에 수록하였다

(4) 수리순환 및 생물권 연구(BAHC, Biological Aspects of the Hydrological Cycle)

지구상의 물순환, 생물계, 물리 기후 시스템 사이의 상호작용은 지속적으로 광범위 지역에서 일어나고 있으며 강우량의 분포는 지역적·공간적으로 아주 다양한 양상을 보인다. 수리순환적 변화양상은 생태학적으로 특성을 결정짓는 중요한 인자이다. 이러한 수리학적-생태학적 상호작용을 밝히기 위해 BAHC 연구가 추진되었다. BAHC 연구사업은 식물체-토양-대기 시스템에서 일어나는 에너지교환 및 물수지 모델을 개발하기 위하여 관측 및 자료분석 연구를 수행하고 식물계와 지구 물리계간의 관계 모델 시뮬레이션을 통하여 제반현상을 검증한다.

BAHC연구사업은 수자원의 효율적인 이용을 통한 공업화, 도시화에 따른 용수 및 식수공급 문제를 해결하고, 식량자원의 공급과 국제무역의 변화 예측에 대한 기초적인 지식을 제공한다는 의미에서 그 중요성이 있다.

(5) 지구변화와 육상생태계 연구(GCTE, Global Change and Terrestrial Ecosystems)

GCTE은 인간활동에 의한 토지와 토양의 변화로 변화하는 대기조성과 기후변화를 구체화 할 수 있고, 예보시스템을 개발하는데 목적이 있다. 즉, 농업, 임업, 토양과 생태계에서 기후, 대기조성, 토지 이용 변화가 육상생태계에 미칠 영향을 예측하고, 이러한 영향이 대기와 물리적 기후체계에 되물림되는지를 파악하는 연구이다.

이 연구는 농업시스템을 포함한 육상생태계에 지구변화의 잠재적 영향을 규정하고자 국제적·국가적 단체가 정책을 수립·이행하는데 정보를 제공하고 해석하는 연구를 수행한다.

(6) 육지개발 및 지표면 변화 연구(LUCC, Land Use/Land Change)

LUCC는 지구 시스템중 육지가 차지하는 부분이 전지구 시스템에 어떤 변화를 초래하는지, 또한 이러한 변화가 생태계에 기후시스템에 되물림되는 현상을 규명하는데 목적이 있다. 이를위해 토지이용 변화에 있어 인위적, 생물리적 역동성과 그 변화가 지표형태에 끼치는 영향 파악, 토지이용/토지변화 모형을 개발, 토지이용 분류체계 개발을 추진하고 있다.

나. 세계기후연구계획(World Climate Research Program, WCRP)

WCRP는 세계기상기구(World Meteorological Organization)와 국제과학연맹 이사회가 주관 기관이며 주요 연구목표는 지구기후시스템의 이해와 기후변화 예측이다

주요 연구프로그램으로는

- ① TOGA(Tropical Ocean and Global Atmosphere)
- ② ISCCP(International Satellite and Climatology Project)
- ③ ISCCP(International Satellite Cloud Climatology Project)
- ④ WOCE(World Ocean Circulation Experiment)
- ⑤ GEWEX(Global Energy and Water Cycle Experiment) 등이 있다

(1) 열대해양-전지구대기 연구 (TOGA)

WCRP의 주된 연구사업인 TOGA 프로그램은 ㉠ 열대 해양과 전지구 대기의 현상을 시간에 따라 기술함으로써 수 개월 내지 수 년의 시간 크기에서 열대 해양과 전지구 대기 시스템을 예측가능한 범위를 정할 수 있고 그 시스템을 예측가능하게 하는 과정과 메커니즘을 이해 ㉡ 수개월 내지 수년의 시간크기에서 해양과 대기가 연계된 시스템의 모델링 타당성을 조사함으로써 그 시스템의 변동을 예측 ㉢ 해양과 대기의 연계된 모델의 가능성이 충분히 입증된다면 현업 운영적 차원에서 현장관측과 자료전송 시스템을 설계하는 과학적 기반을 조성 등의 목적이 있다 TOGA는 사업 시작 초기부터 계절 또는 년간의 시간크기에서 예보 능력을 공급하는 등 성공적으로 수행되었으며, TOGA 관측시스템은 실시간으로 GTS에 해수면 표층과 아표층의 정보를 중개하기 위하여 열대태평양상에 구축되었다. TOGA 관측시스템에 의해 수집된 자료는 ENSO의 시뮬레이션을 위한 대기-해양 결합모델의 개발에 도움이 되었다 이 모델들과 TOGA관측시스템에 의해 수집된 자료를 이용하여 연구자들은 일년 또는 그 이전에 ENSO의 몇가지 양상을 예보하는데 중요한 기술이 있다는 것을 증명하였다. 결합모델을 이용한 첫번째 실시간 ENSO예보는 1986년초에 이루어졌으며, 이러한 능력은 몇개의 결합예보시스템에 의해 증명되었다 오늘날, 실험적인 ENSO예보는 일상적으로 발표되고 있다

TOGA의 결과로, 과학자들은 연관 모형들과 복잡한 자료 동화 시스템을 사용하여 규칙적이고 체계적인 기후 예측 능력을 확보하고 이러한 능력을 지원해 줄 네트워크를 운용하는 수준에 이르고 있다 이러한 연구성과는 미국, 페루, 브라질, 그리고 오스트레일리아를 포함한 많은 나라들의 농업과 수자원 계획 분야에서 유용하게 사용되어 왔다 비록 ENSO에 대한 경제적 영향평가연구는 거의 수행되지 않았고, 적어도 6개월 이전에 60%의 확률로 엘니뇨를 예측할 능력은 없을 지라도 매 사건마다 미국 농업 부문에서 5억불에서 11억불을 절감하는 성과를 이루었다 이는 12년에 걸쳐 연평균 1억 8천 3백만 불을 절감시킨 것이다 예측의 정확도가 계속 개선되면, 미국을 비롯한 다른 나라들에서 기후를 예측하고 기후의 영향을 감소시킬 능력은 결과적으로 경제 부문의 농업, 어업 그리고 수자원 부문에서 훨씬 더 큰 비용 절감을 가져올 것이다.

(2) 세계 해양대순환실험 (World Ocean Circulation Experiment, WOCE)

WOCE은 해양 대순환과 물리적 과정을 설명하는 수치모형을 개발하는 데 사용할 목적으로, 인공위성을 이용하고 수십척의 해양조사선과 수 천의 장비를 동원하여 전지구적이며 포괄적인 전해양의 물리적 특성의 시·공간적인 분포(snapshot)를 얻는다 WOCE는 1990년에 시작하여 1997년에 완수할 예정이다 각 국가의 추가적인 참여가 요망되는 현실이다.

지난 10년 동안 해양의 변화가 수산업이나 농업과 같은 경제적인 활동에 미치는 영향은 알려져 있으나, 기후변화의 정확한 원인은 아직 밝혀지지 않고 있다. WOCE의 목표는 10년 단위의 기후변화를 예측하는 모델을 개발하고 이를 검증하는 데 필요한 자료를 수집하는 것이다 WOCE는 이미 이 분야에서 중요한 발전을 이루어 가고 있다 그러나 자료를 수집하는 현장 프로그램은 주로 태평양과 대서양 남쪽에만 집중되어 왔다

WOCE의 또다른 목표는 특정한 WOCE 자료가 장기간의 해양변화 양상을 예측할 수 있는지를 검토하는 것과 해양순환의 10년간 변화를 자료로 수량화할 수 있는 방법을 찾아내는 것이다. 진행되는 과정들은 심해에서 수직적인 확산, 혼합작용과 같은 작은 규모의 해양학적인 과정에 새로운 관점을 제공해 주고 있다

더욱이 과학자들이 모델화 작업에 대형컴퓨터를 사용하기 시작함에 따라 WOCE 연구는 지구 해양 모형화의 지속적인 발전을 가져오고 있다 해양 순환에 관한 새로운 견해들이 제공되면서, 이러한 자료와 모형들은 지구해양 유동 합동연구 (Joint Global Ocean Flux Study, JGOFS)나 지구 해양 생태계 역학(Global Ocean Ecosystem Dynamics, GLOBEC)과 같은 프로그램을 통해서 물리학적인 체계를 형성하게 될 것이다 WOCE의 현장 프로그램에 뒤따르는 종합 단계는 대규모의 순환에 의한 해양 작업의 방법에 대한 새로운 이해뿐 아니라 전 세계의 해양과 대기의 개선된 활동 모형을 제공하기 위해서 계획되고 있다 다음과 같은 특이한 성과들을 포함하게 될 것이다 ㉠ WOCE 기간의 해양 기후학, ㉡ Ekman수송, 자오선의 열, 질량과 성질의 이동, 중간 퇴적 구조의 이동, 그리고 해수면 유동과 펄과 같은 해양의 변동성 측정, ㉢ 수평 속도 측정치와 같은 수준의 중간 깊이 해양 기준 설정

2. 선진국의 연구동향

가 미 국

(1) 연구배경

미국은 전지구 기후변화와 관련된 국내 및 국제적인 정책의 수립을 위한 과학적 토대를 마련하기 위하여 USGCRP(U.S Global Change Research Program)를 수행하고 있다(부록 4)

USGCRP는 과학, 공학 및 기술을 위한 연방공동위원회(FCCSET; Federal Coordinating Council for Science, Engineering, and Technology)의 지구환경과학위원회 (CEES, Committee on Earth and Environmental Sciences)가 주관하고 있다

지구환경과학위원회(CEES)는 USGCRP의 이러한 목적을 달성하기 위해서 다음과 같은 세부적인 목표를 설정하였다 첫째, 전지구적 규모로 지구계의 변화를 기록하는 통합적이고 포괄적인 장기간의 계획 수립, 둘째, 전지구 및 지역적 규모에서 지구계에 영향을 미치는 물리적, 지질학적, 화학적, 생물학적 그리고 사회적 과정에 대한 지식을 개선하기 위한 집중적인 연구계획 수행, 셋째, 정확한 예측을 위한 지구계 모델 개발이다.

(2) 투자내역

USGCRP는 인류활동이 전지구 기후계를 변화시키고 있거나, 변화시킬 것인지의 여부와 그 정도를 파악하는 것을 최우선 정책과제로 설정하고, 이를 위해 IPCC의 과학 및 영향평가 보고서(Scientific and Impacts Assessments of the Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 제시된 다음과 같은 몇가지의 과학적 불확실성을 감소시키려는 연구를 강화하였다. 첫째, 미래의 대기중 온실화기체 농도 예측에 영향을 미치는 온실화기체의 근원에 대한 불확실성, 둘째, 구름 및 방사 균형이 기후에 미치는 영향, 셋째, 해양이 기후변화의 시기 및 패턴에 미치는 영향, 넷째, 극지역의 빙상이 해수면 변화에 미치는 영향, 마지막은 기후변화에 의해 영향을 받는 동시에 영향을 미치는 생태역학에 대한 불확실성이다 USGCRP에는 미과학재단을 비롯한 정부 또는 민간기구가 참여하고 있으며, 가장 많은 연구예산을 다루는 연구 관리기관은 NASA, NSF, DOD, NOAA순이다 (표 31)

표 31. 미국의 '94~'95 년도 지구환경연구 투자내역

(단위 . 백만달러)

기 관 명	94년	95년
Department of Agriculture (USDA)	49 1	58 4
National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)	63 0	84 0
Department of Defense (DOD)	5 7	6.4
Department of Energy (DOE)	93 1	126.1
Department of Health and Human Services (HHS)	1.2	25.5
Department of the Interior (DOI)	33.4	31.0
Environment Protection Agency (EPA)	27 5	31.8
National Aeronautics and Space Administration (NASA)	1,021 5	1,235 8
National Science Foundation (NSF)	141 9	207 5
Smithsonian Institution (SI)	7 3	7.3
Tennessee Valley Authority (TVA)	0 3	1.0
합 계	\$1,443,9	\$1,814,8

USGCRP의 연구사업별 투자내역은 지구관측이 전체예산의 1/3을 차지하고 있으며, 지구변화규명, 자료정보관리, 기후변화예측, 기후변화의 영향평가 순으로 차지하고 있다(표 32) 연구분야별 각 기관의 투자는 표 33와 같다

표 32 미국의 '94~'95 년도 지구환경연구사업의 기본특별 예산

(단위 백만달러)

FRAMEWORK ELEMENT	94년	95년
Observing the Earth System		
Space-Based Observing and Analysis	579.8	702.7
Ground-Based Augmentations of Operational Systems	25.4	30.5
Managing and Archiving Data and Information	277.4	382.0
Understanding Global Change	456.5	530.7
Predicting Global Change	49.5	67.1
Evaluating the Consequences	38.6	67.1
Developing Tools for Assessing Policies and Options	16.9	34.7
TOTAL BUDGET	\$1,443.9	\$1,814.8

표 33 미국의 '95년도 지구환경연구 사업의 지원기관 및 분야별 투자내역

(단위 백만달러)

지원기관		지구관측		자료 및 정보 관리	과정 이해	변화 예측	영향 평가	정책 및 대응수단 평가
		지상 관측	원격 탐사					
Totals	1,814.8	702.7	30.5	382.0	530.7	67.1	67.1	34.7
DOC/NOAA	84.0		10.4	4.4	46.2	22.4		0.6
DOC	6.4				4.7	1.7		
DOE	126.1			2.1	97.4	20.8		5.8
DO	31.0		2.6	7.4	15.0		6.0	
EPA	31.8		1.6	1.0	10.1	4.3	11.0	3.8
HHS	25.5						25.0	0.5
NASA	1,235.8	702.7		363.8	162.3	7.1		
NSF	207.5		10.0	3.4	151.7	10.8	8.6	23.0
Smithsonian	7.3		2.3		3.8		1.0	0.2
TVA	1.0				0.6		0.4	
USDA	58.4		3.6		38.9		15.1	0.8

NOAA를 비롯한 DOD등도 지구규모의 국제연구사업에 많은 투자를 하고 있으며, NSF는 해양과 관련된 중요한 국제연구프로그램인 WOCE, JGOFS, TOGA등에 집중 지원을 하고 있다 (표 34)

표 34. 미국과학재단이 지원하는 1994-1995 회계년도 USGCRP

(단위 백만달러)

PROGRAM	94년	95년
Antarctic Ecosystems	1.5	1.5
Arctic System Science (ARCSS)	14.4	17.1
Climate Modeling, Analysis & Prediction (CMAP)	3.5	9.2
Earth System History	6.8	12.2
Ecological Rates of Change (EROC)	3.0	3.8
Geodata	1.5	1.7
Global Ocean Ecosystems Dynamics (GLOBEC)	5.2	9.2
Global Tropospheric Chemistry Program (GTCP)	12.4	14.6
Human Dimensions of Global Change (HDP)	11.1	22.4
Institutes/Education	3.1	4.1
Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS)	15.4	18.2
Large-Marine Ecosystems Research (LMER)	2.9	4.2
Polar Ozone Depletion/UV Radiation Effects	5.6	5.6
Ridge Interdisciplinary Global Experiments (RIDGE)	4.1	5.1
Sea Level Changes	6.1	7.8
Solar Influences	5.9	8.5
Tropical Oceans Global Atmosphere (TOGA)	14.2	14.2
Water & Energy Atmospheric, Vegetative & Earth Interactions (WEAVE)	8.1	11.6
World Ocean Circulation Experiment (WOCE)	17.0	18.4
Methods for Integrated Assessments		8.0
Terrestrial Ecology		9.0
Greenhouse Gas Dynamics		0.8
TOTAL	141.9	207.5

나 일본

(1) 연구 배경

일본은 지구환경보전에 관한 조사연구를 종합적으로 추진하기 위하여 1989년 10월 이후 “지구환경보전에 관한 관계 각료회의”를 정기적으로 개최하고 있으며 (환경처 주관), 1990년 6월에는 과학기술청 주관하에 “지구과학기술에 관한 연구개발의 기본계획”을 수립 전지구적 연구사업에 박차를 가하고 있다.

이를 위해 우선적으로, 그리고 중점적으로 계획하고 있는 지구과학 기술의 범위는 ① 지구의 모든 현상의 이해를 위한 기초 과학 기술, ② 기후변동, 지진, 화산분화 등 돌발적인 변화에 대한 예측, 예지를 위한 과학 기술, ③ 지구규모의 자원 조사나 자연에너지의 이용 추진에 관한 과학 기술 등 과학적 지식을 응용하여 인간사회의 지속적 발전을 가능하게 하는 과학기술, ④ 온난화 대책 기술 등 지구 환경을 보전 개선하는 과학기술, ⑤ 지구과학기술의 추진에 있어서 공통기술 또는 기반기술이 되는 관측 기술 및 정보시스템 등이다

또한 “지권-생물 국제 공동계획(IGBP, International Geosphere-Biosphere Program)”, “세계 해양순환 실험계획(WOCE, World Ocean Circulation Experiment)” 등의 국제 공동 연구프로그램에 적극 참여하고 있다

지구환경문제에 관련하는 조사연구 등은 과학기술청, 환경청, 문부성 등 17개 성청과 연관, 각기 조사연구, 관측 감시 및 기술개발을 수행중인데, 과학기술청, 환경청, 문부성은 소관업무의 범위내에서 지구환경연구를 종합적으로 추진하고 있으며, 운수성 등 기타 관계성 청에서는 광공업, 에너지, 국토보전, 보건위생, 통신 분야 등 지구환경에 관한 소관 분야에 대해 개별 조사 연구를 수행하고 있다 (표 35)

일본의 부처별 지구환경예산을 보면 (표 36), 과학기술청과 통상산업청, 문부성의 순으로 많은 연구예산을 집행하고 있다

표 35. 일본의 부처별 주요활동

부 처	주요 활동
환경청	인간의 활동과 지구환경과의 상호작용에 관한 조사연구 및 지구 환경 보전시책에 관한 조사연구를 국립시험연구기관 등과의 연휴 하에서 종합적으로 추진
과학기술청	지구환경문제와 관련하는 지구의 제현상에 관한 조사연구를 국립시험연구기관 등과의 연휴하에서 종합적으로 추진
문부성	대학 등에서 지구환경전반에 걸쳐 필요한 관측을 포함한 기초적 연구 및 지구환경보전에 기여하는 기술개발에 관련된 기초적 연구를 종합적으로 추진
운수성	기후 메카니즘의 해명, 기후의 예측, 해양변동, 해양오염 등에 관한 조사연구를 추진

표 36. 일본의 부처별 지구환경연구 예산

(단위: 백만엔)

구분	1991년	1992년
총 액	480,770	498,389
환경청	3,721	4,841
외무성	6,874	7,496
대장성	3,750	5,650
문부성	37,472	39,350
후생성	1,164	1,147
농림수산청	4,009	4,986
통상산업성	120,203	129,987
우정성	170	222
건설성	193	434
자치성	3	3
경찰청	29	23
북해도 개발청	8	8
경제기획청	109	109
과학기술청	295,963	296,526
국토청	4	4
노동청	22	19
운수성	6,976	7,582

일본의 연구투자는 에너지 대책과 지구환경보전 관계 분야에 큰 비중을 두고 있으며, 기본 방침에 있어서는 기술개발 및 보급과 관측, 감시, 조사연구를 중심으로 하고 있다. 한편, 지구환경보전에 있어서는 지구온난화 대책에 가장 큰 비중을 두고 있으며, 산성비에 대한 대책, 열대림의 감소대책, 해양오염 대책에도 많은 예산을 집중시켜 두고 있다 (표 37)

표 37 분야별 지구환경연구사업 예산

a) 대상분야별 (단위 백만엔)

내역	1991년	1992년
지구환경보전 관계 일반경비	761	880
위생 등 연구개발 관계비	296	245
에너지 대책 관계비	3,736	3,843
기타 관련경비	15	16

b) 기본특별

내역	1991년	1992년
관측, 감시, 조사연구	758	730
기술개발 및 보급	3,898	4,062
환경분야의 정부개발 원조	22	34
환경배려	38	57
지구환경보전형의 사회경제활동 및 보급개발	5	7

c) 주제별

내역	1991년	1992년
지구온난화 대책	3,848	3,967
오존층 파괴대책	25	33
산성비 대책	69	104
해양오염 대책	30	35
유해 폐기물 대책	1	1
열대림의 감소 대책	55	59
야생생물종의 감소 대책	4	6
사막화 대책	5	7
개도국의 공해문제 대책	10	16
기타	761	756

다 유럽지역

(1) 연구배경

지구 변화에 대한 추론적 이해의 성과는 이것이 지금까지 당면했던 과학적 과제들 중 가장 중요하고 어려운 것이란 것을 깨닫게 된 것이다. 유럽위원회는 지구환경에 대한 책임을 느끼고 지구 변화 연구를 포함한 활동 계획을 세웠다. 유럽 연합 환경 정책의 주된 목적-지속적 발전의 개념에 기초한-중의 하나는 환경의 질을 보존(preserve)하고, 보호(protect)하며 발전(improve)시킨다는 것이다. 연구사업은 연구비 분담체제에 의해 유럽연합(EU)회원국 내의 다양한 학술·연구기관의 지원을 받는다. 유럽 위원회에서는 환경연구가 이루어져야 한다고 강조되고 있으며, 유럽 안팎에서 Joint Research Center와 국제 협력등의 협동연구가 활발히 장려되고 있다. 지구 변화 프로그램 현재 연구와 기술개발에 관한 기본계획(Framework Programme for Research and Technological Development)에 속하며, 이 분야에서의 앞으로의 사업계획이 준비되어있다. 이 연구 제안서들은 현존하는 연구소들의 능력과 설비들을 바탕으로 International Geosphere-Biosphere Programme(IGBP), World Climate Research Programme(WCRP), Human Dimensions of Global Environmental Change Programme(HBP)등과 함께 운영될 European Network for Research in Global Change(ENRICH)의 연구사업을 포함하고 있다.

환경과 지속적인 발전에 관한 유럽 연합(EU, 예전에 유럽 공동체(EC)라고 알려졌던)의 기본 전략은 환경 정책을 모든 유럽연합의 정책들과 함께 총괄하는 것이다. 이는 각 지역과 국가들의 활발한 참여에 의해, 또 환경정책을 발전시키고 적용시키는 방법을 더 폭넓고 깊이 있게 함으로써 책임 분담의 기초가 된다. 그런 방법들은 직접적으로 재정 지원과 재정 지원의 구조, 그뿐만 아니라 공공정보와 교육, 훈련, 지역에 따른 계획 수립, 사용 가능한 환경 자료 범위의 개선, 그리고 관심 있는 연구와 기술의 발달을 포함한다.

EU는 지구 환경에 대한 예방과 구제 행위에 많은 노력을 하였다. 한 예로 EU는 몬트리올 의정서 보다 앞서 염화불화탄소(CFCs)와 할론들의 사용을 단계적으로 줄이기로 결의하였다. 이러한 오존층을 파괴하는 온실 기체를 1996년 1월부터 전면 사용 금지하기로 하였다. 또한 EU는 현재 메탄과 N₂O방출량 감소를 주장하였다.

환경과 개발에 관한 국제 연합(UN)회의 (UNCED; 1992년 6월 리우 데자네이로)에서 EU는 이산화 탄소 방출량을 2000년까지 1990년 수준으로 안정화시킨다는 서약과 함께 기후 변화에 관한 기본계획(Framework Convention on Climate Change)에 조인하였다. 그후 1993년 3월 EU는 생물 다양성 협의회(Convention on Biological Diversity)에도 조인 하였다. 환경을 보호하는 더 나은 방책은 EU가 2000년까지 열대의 산림파괴를 중지시키기로 결정하고, 그때까지 현재의 산림파괴 추세를 바꾸어 놓는 것이다.

연구와 기술발달에 관한 프로그램의 세 번째 기본계획안(Third Framework Programme for Research and Technological Development)(1990-1994)은 현재 수행되고 있다. 이는 우리가 직면한 지구변화와 관련된 특정한 도전에 대한 응전으로서의 연구활동을 포함한다. EU가 International Geosphere Biosphere Programme(IGBP), World Climate Research Programme(WCRP)와 Human Dimension of Global Environmental Change Programme(HDP) 등의 지구 변화에 관련된 국제 연구 프로그램에 기여하는 두 개의 기구가 있다. 첫째는 연구 과제의 비용을 분담함으로써, 둘째는 유럽 위원회의 공동 연구 센터(Joint Research Center)의 환경 연구 프로그램을 통해서이다. 게다가 국제 과학 협력기구(ISC)내에서는 EU이외의 국가에서의 연구발표회, 과학자교환, 합동 과제 수행 등의 활동에 대한 재정 지원을 하는 것이다.

(2) 연구동향

(가) 비용분담 프로그램

연구와 기술개발을 위한 비용 분담 프로그램하에서, 유럽위원회는 적어도 둘 이상의 회원국의 유럽 연구소들이 참여한 공동 사업에 재정 지원을 한다. 재정지원의 규모는 총금액의 50%인 경우가 있으며, (대학과 연구센터의 경우에는) 최소 비용의 100%이다. 지구변화 연구 활동은 주로 환경과 기후변화의 기본적인 메커니즘과 이런 사건들의 영향을 이해하고 평가하도록 연구 방향을 설정한다. 재정 지원은 자연 자원 관리(Management of Natural Resource)와 같은 앞에서 언급한 프로그램 구상안 중의 전략 요소들 중 “환경”분야에서 이루어진다. 1991년 5월 EU위원회의 연구장관은 환경 분야에서의 특정한 연구 개발 프로그램을 받아들였다.

프로그램 구상안중 지구 변화와 관련된 주요 연구 활동들은 다음과 같다

① 지구변화 프로그램에 참여

EU 환경 프로그램(1991-1994)은 총 예산이 2억 6,140만 ecu(1 ecu는 현재 약 12 us\$)이며, 이중 약 1억 ecu가 '지구변화 프로그램에 참여'에 쓰였다 이 활동의 목적은 환경 변화를 주도하는 과정들을 이해하고 인간활동의 영향을 평가하는 것이다. 환경 정책에 영향을 끼칠 주제들은 다음과 같다

- 자연적 기후 변화(고기후학을 포함한다)
- 인위적 기후 변화
- 기후 변화의 영향
- 성층권 오존
- 생지화학적 순환의 상호관계
- 생태계 역학

이들중 몇 분야에서는 과제들이 IGBP의 주요과제인 Global Change and Terrestrial Ecosystems(CGTE)로서 유럽 연구 그룹 의해 수행된다 EU Concerted Action on Ecosystem에 참여한 유럽 과학자들은 GCTE와의 협력을 더욱 강화시켜나간다 또한, 환경 프로그램의 일부로 기후와 자연재해에 관한 특정 연구를 수행하고 있다 이 연구는 고 기후학의 중요한 부분으로 IGBP의 Past Global Changes (PAGES)에 기여하며, 또한 기후 모델과 온실 기체의 복사 특성에 관한 내용은 WCRP의 관련 연구 분야에 중요한 자료를 제공한다

② 환경 기술과 공학

목적은 기술 혁신을 장려해 더 나은 환경질의 기준을 만들자는 것이다 이 분야에서의 주된 두 사업은 원격 탐사 응용을 포함해 환경질을 평가하고 감시하는 것과 환경을 보호하고 복원시킬 기술과 체계를 발전시키는 것이다

③ 해양 과학과 기술

해양 과학과 기술 분야에서는 환경을 고려하기 이전에 자원을 탐사하고 개발하기 위한 기본적인 지식(해양학을 포함)과 연안공학을 포함한다 Marine Science and Technology(MAST)의 특정 연구는 수괴의 순환과 교환, 생지화학적 순환과 해양 생물학, 화학, 지질학에서의 과정들에 관한 연구들과 같은 기후 변화와 관련된 주제에 관한 연구를 수행하며-WCRD의 World Ocean Circulation Experiment(WOCE)와 IGBP의

Joint Global Ocean Flux Study(SGOFS)에 참여한다 유럽 해양 및 극지 연구 위원회(ECOPS)와의 협의를 통해 MAST는 극지 연구도 지원한다 ECOPS는 유럽 위원회와 유럽 과학 재단(ESF)위원회의 연합체이다

④ 경제적, 사회적 측면에 관한 연구

연구목적은 환경 정책과 경영의 법적, 경제에 관한 법적, 윤리적, 보건적측면의 이해를 증진시키는 것이다 연구사업으로는 자연 및 기술재해의 평가와 인식, 환경 영향의 경제적 가치평가, 환경 정책 운영에 따른 사회 경제적 영향, 그리고 환경 제반에 관련된 법과 규제 사항들의 효용성과 일관성을 평가하는 연구사업을 포함한다

(나) 조직 내에서의 연구

유럽 위원회의 공동 연구 센터 내에서 기후 변화와 관련된 환경연구들은 주로 (이탈리아의 이스프라에 위치한)원격탐사응용연구소(Institut for Remote Sensing Applications, IRSA)와 환경연구소(Environment Institute)의 두 연구소에서 수행된다

① 원격 탐사 응용 연구소(IRSA)

IRSA의 환경 연구 과제는 원격탐사의 관점에서 기후변화의 정황에 따라 나타나는 과학적 연구 필요성에 따라 정해진다 IRSA의 과학자들은 생태계 역학과 기능에 관한 연구와 생물권과 지구내의 다른 요소들 간의 상호작용을 더 잘 이해하기 위해 노력한다 연구의 초점은 열대우림의 파괴, 생물량 연소와 해양의 생산력 연구에 있다 이러한 전반적인 접근 방법은 경험적 관계로부터 자료 분석기술을 개발하는 것과 물리-생물 과정에 관한 모델들을 개발하는 것이며, 개발된 기술을 더 나아가 여러 위성들(예를 들면 NOAA AVHRR, ERS1, SPOT, Landsat, Nimbus, CZCS)의 시계열 자료분석에 응용 하려는 것이다

이런 배경에서 유럽 위원회와 유럽 우주국(ESA)과의 체계적인 협력관계가 발전되었으며, 다음과 같은 공동 과제가 수행중이다 Tropical Ecosystem Environment Observations by Satellites(TREES)-지역적인 수준에서 대륙 수준까지의 열대 생태계 역학, 생물량 연소 형태와 대기 화학에 대한 영향, 우림 기후 상호 작용의 모델개발 등에 관한 연구이다. TREES 연구는 NOAA AVHRR, SPOT과 ERSISAR의 자료들을 이용하며, 지구표면에 관한 장기 감시를 위한 전지구 1km 데이터베이스 개발에 참여했다

Ocean Colour European Archive Network(OCEAN)-은 해양 일차생산, 탄소순환, 해양의 생지화학적 유동량과 전 지구적인 해양화학적 상호작용에서 이들의 역할, 그리고 해양 수송 과정에 관한 모델 연구를 위한 Coastal Zone Colour Scanner(CZCS) 자료 분석을 통해 이루어 졌다.

이 연구는 OCTOPUS(Ocean Colour Techniques for Observation Processing and Utilisation System)를 통해 SeaWiFS 자료를 이용하도록 연장되어야 한다고 제안 되었다

② 환경 연구소 (EI)

현재 지구변화 연구에 EI의 기여는 세가지 주된 사업을 통해 이루어진다 대기 물리학 -국지부분, 유럽부분과 지구전체에서의 오염물질의 대기 수송 모델을 다룬다 기존 모델과의 상호비교와 검증에 중점을 두고 있으며 실험을 통한 입력 자료의 개선 에도 중점을 두고 있다 주요 실험 설비로 기체 입자의 상호작용 연구를 위한 에어 로졸 실험실과 안정한 대기 추적자 사용을 위한 첨단 장비들이 있다

대기화학-생물과정 및 인위적으로 대류권에 방출된 기체중 유해한 화합물이거나 복사력이 강한 화합물의 변환 기구와 키네틱스 연구를 통하여 이를 기체의 화학적 운 명을 연구한다.

생물권과 대기의 상호작용-사업의 주안점은 식생 형태변화로 인한 물질의 퇴적-방 출교환과정과 대기와의 경계 표면 근처에서의 반응 주 대상으로 한다. 특히 지중해 지역에서 이들의 역할과 유럽상공의 오존 형성연구가 진행되고 있다.

IGBP의 주요 사업 International Global Atmospheric Chemistry(IGAC)과 관련된 JRC 사업의 한 예는 해양의 dimethyl-sulphide(DMS)형성과 대기중 변천에 관한 실험 과 모델 연구이다

(다) 현재의 계획

4차 연구와 개발 프로그램 기본 계획안(1994-1998)에 대한 유럽 위원회의 제안된 프로그램은 연구 분야들 중 지구 변화로 분류된다. 이 프로그램의 목적은 전지구적 환경 변화에 대한 이해를 증진시키고자 하는 전세계적인 노력에 EU가 주된 연구 기 여를 하는데에 있다 변화의 특성과 정도는 생태계의 기능과 다양성 뿐만 아니라 기후,

대기, 대기화학과 대기물리학, 해양의 순환, 생지화학적 순환을 지배하는 주요 과정들에 대한 인간 활동의 영향을 계산함으로써 예측할 수 있다. 연구에 더하여 4차 프로그램 계획안은 '실연 과제(Demonstration Projects)'를 포함하여야 하며 실질적인 부분에서 국제 과학 협력에 기여해야 한다고 제안하였다

4차 프로그램 기본계획에는 EU 연구활동 재편성에 관한 제의도 포함되어 있다 이들중 하나는 회원국들이 European Network for Research in Global Change (ENRICH) 설립을 제안하고 있다. 그 목적은 한정된 자원과 산업화 능력, 개발도상국에 관한 연구를 한데 모으며 참여한 각 나라들과 여러나라의 연구소들 간의 공동작업을 관리하는 논리적인 기초를 마련하자는 데에 있다 그리고 ENRICH가 관련된 정보들을 수집 분석하고, 협력과 교육, 연수를 계획 수행하고 정보를 배포함으로써 공공 정책의 목적을 지원하도록 제안하고 있다 ENRICH는 개발 도상국에서의 연구능력 개발을 위주로 사업을 진행시키지만 한편으로는 아프리카와 지중해 연안, 다른 한편으로는 중유럽과 동유럽까지 포함한다 이 네트워크는 기존 연구소들의 능력과 장비들을 기반으로 성립될 것이며 IGBP, WCRP, HDP 그리고 특히 Global Change System for Analysis, Research and Training(START) 등의 기존의 연구를 바탕으로 설립될 것이다 1993년 초 ENRICH 특별조사단이 네트워크의 전반적인 기능에 대한 평가, 과학적 연혁, 조직과 구조 등을 포함해 EU 환경 장관들로 구성된 원로 전문가들로 구성되었다 유럽 위원회는 ENRICH 수행을 시작하고 있다 참여와 논의, 동의를 위해서 ENRICH개념은 최근 스페인의 Seville(1993년 11월 11-13)에서 많은 청중들(EFTA와 중부, 동부유럽, CIS와 아프리카 나라들을 포함하는)에게 소개 되었다. 모임의 참석자들은 모두 ENRICH개념을 받아들였으며 가능한한 빨리 수행되기를 희망하였다.

지구 변화 연구과제들과 함께 연계된 지구 관측 조사연구과제를 1993년 4월 EC 연구 협의회는 "유럽 공동체와 우주 도전, 기회와 새로운 지침"이라는 제목의 유럽 협의회에서 채택하고 정보지를 발간하였다 이 정보지는 우주에 대한 유럽의 노력에 대한 확대되는 EU의 지원에 대한 지침을 제공한다 이는 지구 변화 연구에 대한 우주 기술의 개발과 응용에 관한 전략을 수립하도록 하는 것이다 연구장관 협의회는, 특히, 유럽 위원회가 우주 기술의 이용자로서의 역할, 특히 위성 자료로부터 최대의 혜택을 얻어내기 위해서 지구 관측 분야에서 우주기술의 역할을 지속적으로 발전시켜야 한다고 생각한다

이러한 배경에서 유럽 위원회는 유럽우주국(ESA)과 함께, 그리고 EFTA 회원국들과 공동으로 지구 관측 자료를 완전히 개발하기 위한 효율적인 네트워크 지구관측센터(CEO: Center of Earth Observation) 설립 추진을 시작했다. CEO의 활동은 -한마디로 분산화된 구조로- 사용자들을 위한(지구 변화를 포함한) 지구 환경자료를 수집 확인하고 조화시키는 작업들을 포함한다.

(라) 국제 협력

IGBP의 International Global Atmospheric Chemistry(IGAC) 연구를 위한 유럽 연구 사무소(European Project Office)는 유럽 위원회의 공동 연구 센터의 이스프라 지역에 있다. 유럽 연구 사무소의 역할은 EU 회원국과 비회원국들간의 협력을 촉진하며 유럽의 참여형태를 조정하는 것이며, 또한 EU Concerted Action on Physico-Chemical Changes in the Atmosphere와 같은 관련된 EU활동과 연계해 추진하는 것이다.

세계적인 혹은 지역적인 수준에서 시작되는 다른 밀접한 분야와 함께 연구하겠다는 의지의 표현으로 유럽위원회는 START 설립 위원회를 조직했으며 IGBP와 함께 아프리카와 기후변화에 관한 모임(1992년 11월, Niamey)을 공동 후원하였다. 더 나아가 유럽 위원회는 International Group of Funding Agencies for Global Changes Research(IGFA)와 Committee for Earth Observation Satellites(CEOS) 등에 참여한다. 또한 위원회는 JRC 과학자들을 통해 International Council for Scientific Unions(ICSU)의 Committee on Space Research(COSPAR)에 참여한다.

국제 과학 협력(ISC) 프로그램은 중국의 과학기술 위원회와 함께 유럽위원회(DGX2/JRC)에 의해 베이징에서 (1992년 10월 26-29일) “지구 변화에 대한 기여 생물권과 대기권의 상호작용” 워크숍을 개최하였다. 유럽과 중국간의 공동 연구를 위한 몇몇 연구사업들은 독립적으로 운영되며 유럽 위원회에서 지원 받는다.

(3) 각국의 노력

(가) 독 일

① 생지화학적 순환 연구

환경(환경계)내의 생지화학적 요소(물질)들의 중요한 공급원과 흡수원, 변화과정을 정량적으로 이해하기 위해서는 여러 분야의 복합적인 연구가 필수적이다. 탄소와 질소, 황(7족 원소들 뿐만 아니라) 등의 순환에 관한 정량적인 이해는 특히 중요하다. 육상이나 수생 생태계에서의 생산력은 기본적으로 이러한 성분들(탄소, 질소, 황 등)이 산소, 수소와 결합한 화합물의 양과 그 효용성에 크게 영향을 받는다. 또한 자연 생태계의 안정성은 위에서 언급한 물질들의 충분한 공급이 있어야 유지된다.

예 . 해양에서의 생지화학적 순환은 물리, 생물, 지화학 과정들에 의해서 조절된다. 그리고 이런 과정들은 복합적인 피드백 기구(메커니즘)에 의해 조절된다. 해양에서 수심 100m 이내의 상층부에서의 일차 생산(이 양이 해양에서의 생산량의 주된 부분이다)은 충분한 양의 빛과 영양염의 존재 여하에 달렸는데 이 경우 영양염은 일차적으로 질소를 말하며 인 역시 중요하고, 남반구의 고위도 지역에서는 철이 이러한 역할을 담당하기도 한다.

대기와 해양이 인접한 경계층을 통한 중요한 물질의 이동량(예를 들면, DMS ; dimethyl sulphide 와 이산화탄소)은 해양과 대기의 특성에 크게 영향을 미친다. 또한 육지와 해양간의 전이지대는 높은 생물 활동도, 즉 가속화된 순환에 의한 높은 전환율이 그 특징이다. 이러한 인간의 활동정도가 높은 경계 지역은 일어날 수 있는 여러 종류의 지구 온난화에 의하여 결정적으로 영향을 받게 될 것이다.

② 해양과 극 지역에 관한 연구

문제점 : 세계의 해양에 관한 연구는 지구 변화 연구와 관련되어 있다. 대양의 순환과 수리학적 순환, 평균 해수면 등은 변화하는 환경조건에 간접적으로 영향을 미치는 반면, 오염이나 해양의 개발(식량이나 각종 원료의 저장고로서의 역할에서)은 해양생태계에 직접적인 영향을 준다.

해양과 대기간의 다양한 상호작용은 광범위하며 지구의 기후에 최우선적으로 중요하다. 한 예로, 해양은 대기의 온난화(추가된 인위적 온실효과에 의한)를 적어도

30년 늦추었다. 대양 순환의 변화는 육상의 얼음이 녹고, 해빙들의 경계가 움직인 결과라고 예측된다. 대양 순환으로 대서양 고위도 지역에서는 찬 심층수 지역이 생기고 서부와 북부 유럽은 상대적으로 기온이 따뜻하게 된다. 이 대양순환에 변화가 생긴다면 그 결과는 엄청날 것이며 특히 유럽의 기후예측 변화는 대단할 것이다. 현재의 방법들로는 대양 순환을 완전히 기술할 수 없으며 모델들을 검증하기에도 관측 자료가 충분하지 않다. 기후모델에 따르면 극 지역에서의 해양 상층에 존재하는 대기가 따뜻해 질 것이라 한다. 그리고 이로 인해 걸프 스트림/북대서양 해류계에서의 위도선을 따른 열교환량이 줄어들 것이라 한다.

앞으로의 예측되는 온난화는 대륙에서의 수리 순환(물순환)에도 변화를 주게 될 것이다. 극지역에서는 강우가 증가하며 이로인하여 더 많은 양의 담수가 극지역에 갇히게 될 것이다.

현재 사용하고 있는 기후 모델은 예측되는 대기의 온난화 결과로 계산해 다음 십여년 내에는 평균해수면이 불과 10cm 증가할 것으로 예측했다. 이 해수면 증가는 물의 열팽창에 의한 것이다. 그러나 이 해수면 증가에 따른 지역적인 차이는 크게 나타날 것이다. 해안이 낮은 지역에서는 특히 연안에서 멀리 떠날 준비를 해야 할 것이다. 또다른 심각한 영향은 조석의 진폭과 폭풍에 의한 조류 수면의 상승이다.

해양의 오염은 연안역이나 강하구 등과 같이 쉽게 확인할 수 있는 지역만의 문제가 아니다. 인간에 의한 오염의 흔적들은 대양과 심해지역에서도 발견되는 양이 늘어나고 있다. 그 영향들이 해양 생태계내에서 관측된다. 이 영향은 해양 식물이나 동물들 사이에서의 과정들을 불안정하게 할 뿐만이 아니라 인간에게까지 되돌아온다. 해양 개발(이는 많은 국가들에서 직접적으로 경제적 중요성을 가진다)은 부적절하게 행해졌을 때 인간과 환경에 광범위한 피해를 준다.

극 지역(ice region), 특히 큰 대륙의 얼음 덩어리들과 인접한 극지방의 바다는 환경의 변화를 다른 차원에서 반영한다. "기후 기록"으로서, 대륙의 얼음은 멀리는 15만년 전까지의 환경과 기후 사건들에 관한 정보를 제공한다. 대륙붕과 해빙(sea ice) 자료는 해양-대기의 짝지어진 시스템에 대한 기후 모델에 중요하다. 극지역의 생태계(주로 남극에서의)는 이미 얼마간(약간) 변환 환경 조건들에 대한 특별한 지표종으로 쓰인다. 이는 그들이 고립되어있기 때문이다.

③ 현재의 연구동향

해수 순환은 대기와 기후에 영향을 미친다. 남극의 대양저층수의 생성에 관한 연구나 북대서양 해류에 관한 연구, 혹은 얼음덩어리로부터 바다로 불어가는 찬공기의 흐름에 관한 연구들은 현재 해양의 변화중 물리적인 요소들을 다루는 몇 안되는 연구 과제의 예이다. 이러한 활동들은 WCRP/WOCE와 WCRP/TOGA 등의 국제적인 연구로 모여진다. 해양 내에서의 해류에 관한 정량적인 자료들은 대양 순환에 관한 가능한 현실적인 예측모델을 얻기위해 필수적이다. 작은 규모(소규모)의 순환 시스템의 중요성에 관하여 최근에 토의되고 있으나, 아직 다 이해하지 못한 상태이다.

중발, 강우, 강수의 흐름, 얼음의 형성 등을 포함한 지구의 물순환에 대하여 각 나라와, 유럽, 전 지구적 규모의 연구가 WCRP/GEWEX에서 이루어지며 이 물 순환은 미량 기체들의 추이(추세)를 지구 기후의 변화로 바꾸어 준다. 이는 단일 요소(파라미터)로는 가장 중요하며 전지구적인 자료가 필수적으로 수집되어야 한다.

연안역에서의 토지 이용도의 인위적인 변화와 해수면과 기후변화가 생태계에 미치는 영향간의 상호작용에 관한 연구는 IGBP의 주 연구과제인 "Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone"(IGBP/LOICZ)에서 수행된다. 또한 해수면은 WCRP/WOCE 와 WCRP/TOGA의 중요한 요소이다. 물 순환의 변화로부터 예측된 해수면 변화 예측이 지역에 따라서 서로 일치하지 않고 있다. 예를 들어 서로다른 관측지점에서의 물리환경들로부터 일정하지 않은 외부조건이 생겨 전지구적 해수면 관측 시스템을 복잡하게 만들기 때문이다. 위에서와 같은 관측 네트워크를 가지려면 새로운 관측 방법이 개발 되어야 하며 앞으로 일을 계속해 나가기 위해서 자료의 상호 보정작업이 필요하다.

해양 오염에 관한 연구와 해양 오염의 규제, 해양 오염을 해결하기 위한 대책의 개발은 오늘날 연구의 중심과제이다. 이 연구는 바다에 유입된 잔류 물질들이 어디에 어떻게 존재하며 그 영향이 무엇인지를 밝혀야 하며 연안에서의 부영양화는 IGBP 주 연구과제인 "Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone"(IGBP/LOICZ)의 주제이다.

④ 새로운 연구의 접근

연안 지역에서의 해수중의 오염 물질의 농도에 관한 지속적인 규제는 현재 독립적이거나 고립된 지역에 한하여 이루어진다. 따라서 관측 네트워크나 관측점을 늘임으로써 자료를 수집할 수 있는 지역을 공간적으로 확대해야 한다. 게다가 대륙붕과 심해저 사이의 전이지역은 지구변화 관점에서 볼 때 거의 연구가 이루어지고 있지 않다.

따라서 이 지역에 관한 연구를 강화해야 한다.

해양의 개발은 한편으로는 식량과 원료물질의 생산과 다른 한편으로는 해양 생태계의 보존이 균형을 이루어야 한다

많은 경우 해양의 변화 결과가 현재 예측되지 못하고 있다 세계의 해양은, 특히 심해저 지역은 변화에 민감하며 아직 많은 부분이 탐사되지 않은 생태계이다 심해저 생태계의 생존능력이 변화하는 환경에 의해 얼마나 위협받고 있는지는 새로운 연구기술과 전략으로만 알아낼 수 있을 것이다

(나) 프랑스

① 연구 배경

프랑스는 1980년에 기후 환경 변화 연구에 대한 계획(PNEDC, Le Programme National d'Etude la Dynamique du Climat)을 수립하였는데, 이 계획의 목적은 기후를 정의하고 기후의 변동을 조절하는 기작에 대한 이해를 증진하고 미래의 기후변화를 예측하는데 있다

② 주요 연구 과제

기후 및 전지구 환경변화에 관한 국가 계획에 참여하거나 관련된 연구 기관은 다음과 같은 8개 연구기관이다 8개 연구기관은 다음과 같다 CNRS(Centre National de la Recherche Scientifique), DRED/MENJS(Direction de la Recherche et des Etudes Doctorales du Ministère de l'Education Nationale de la Jeunesse et des Sports), DMN(Direction de la Météorologie Nationale), IFREMER(Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer), CEA(Commissariat à l'Energie Atomique), INRA(Institut National de recherche Agronomique), PRSTOM(Institut Français de la Recherche Scientifique pour le Développement et la Coopération), BRGM(et Bureau des Recherches Géologiques et Minières) 558명의 연구원이 WCRP와 IGBP의 연구계획에 참여하고 있으며 이들의 절반은 CNRS와 MENJS 소속이다 프랑스는 91년도에 기본 예산 350 25백만 프랑과 통합 예산 424백만 프랑을 투입하고 있으며, TOGA, IGBP 등 국제공동연구계획에 적극적으로 참여하고 있다

(다) 벨기에

① Joint Global Ocean Flux Study(JGOFS) 관련 연구사업

㉠ 해양주변부 과정 연구 · 부유물의 생지화학적 특성 및 생물 반응 물질들

OMEX는 북서 유럽 대륙붕지역에서의 탄소 플럭스에 중점을 둔 여러 전문 분야로 이루어진 국제적인 해양 연구 사업동이다. 과제의 주된 목적은 수주 내에서의 탄소, 영양염 및 생물 반응 물질들의 흐름 중 미생물 입자나 육상기원, 해양내의 입자들의 생지화학적 영향의 특성을 규명하고, 정량화하며 그 흐름을 파악하는 것이다.

본 연구의 목적은 ㉠ 수주의 상부에서 재순환 되는 유기물의 중요도 평가, ㉡ 중층이나 심층수로 유출된 생물기원 물질의 결과 이해, ㉢ 재부유되는 대륙사면 퇴적물의 특성 파악, ㉣ 입자 집합체나 동물들의 배설물과 같은 침강하는 생물적인 미소 서식지 내에서의 속성작용의 특성 규명 등이며 이는 $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}$, 바륨-중정석 등의 자연적인 추적자들을 이용하여 밝혀낼 수 있을 것이다.

㉤ 해양 주변부 교환 과정 연구

본 과제는 MAST II 프로그램의 북대서양을 대상으로 이루어지는 학제적 연구사업으로의 유럽 32개 연구소의 41개 연구실이 참여하였으며 연구지역을 주로 유럽의 대륙붕이다. 생지화학적 순환이라는 부과제의 주요 목적은 수주 내에서의 탄소, 영양염 및 생물 반응 물질들의 흐름 중 미생물 입자나 육상기원, 해양내의 입자들의 생지화학적 영향의 특성을 규명하고, 정량화하며 그 흐름을 파악하는 것이다. 그 중 1개 사업내용은 다음과 같다.

일차생산을 측정하기 위해 ^{14}C 을 이용하는 실험과 유사한 배양실험중 방사성 추적자를 사용하여 용존 미량 금속의 이동율을 계산하는 연구를 수행한다. 생물활동에 대한 억제제를 사용함으로써 능동섭식과 수동 섭식을 구별할 수 있다. ^{54}Mn , ^{65}Zn , ^{63}Ni , ^{109}Cd , ^{60}Co , ^{228}Th 등을 실험할 것이다. 동위원소 희석 기술로 자연 해양 시료 중의 ^{32}P 가 들어있는 인산염으로 이 영양염의 섭식과 재생산을 쉽게 측정할 수 있다. ^{14}C 중탄산을 이용하여 일차생산을 동시에 측정할 것이다. 배양은 현장에서 하거나 빛의 세기 조건을 잘 조절하며 선상에서 수행할 것이다.

표층수에서 생겨났거나 혹은 표층수로 유입된 미세 입자들의 퇴적은 입자들이 배설물의 해중쇄설입자(marine snow)와 같이 큰 집합체로 만들어지는 집합작용을 통해서만 빠른 속도로 침강한다. 그러므로 Sediment trap의 장기 혹은 단기계류, 많은 양의 해수를 현장에서(in situ) 거르는 방법, 그리고 니스킨 형태의 채수기로 채수한 시료를 선상에서 거르는 방법 등 다양한 방법에 의해 수집된 입자들의 성분을 비교하는 것은 중요하다. 수주내의 입자들의 성분에 관한 상세한 연구는 주성분과 부성분, 미량성분 등의 농도를 결정하기 위해서 X-레이 형광법과 ICP 그리고 흑연도가니 원소 흡광 분광법과 같은 다양한 분석 기술을 동원하여 실행할 것이다. C, N, P, S, Si, Al, Fe, Cu, Mn, Cr, Co., Ni, Zn, Cd, Pb 등의 원소가 분석될 것이다.

종합적인 실험과 수직 이동 과정 모두 역학 방정식으로 수치화 할 것이다. 수치 모델은 관측된 과정들을 설명하는데에 사용될 수 있고 수리동역학적인 모델과 생물학적인 모델들을 함께한 예측용 모델에 이 방정식들을 포함시킬 수 있는 기계론적인, 혹은 변수적인 방정식을 제시하는 것이 그 목적이다.

㉔ 산호초 탄소 순환

대부분의 연안 생태계에서의 탄소 수지는 실험 자료들이 부족하여 잘 알려지지 않았다. 산호초는 열대 연안 해양역의 대표적인 형태이며 활발한 탄산화 작용으로 인하여 인류에 의해 방출된 대기중의 증가하는 CO₂에 대한 잠재적인 흡수원으로 여겨지고 있다.

그러나 탄산화작용은 화학 평형에 의해 주변수에 용존 CO₂를 방출하게 되며, 해수로부터 CO₂가 빠져나가도록 돕고 있다.

산호초 생태계(Moorca, French Polynesia)에서 해수-대기간의 CO₂ 교환에 대한 현장 관측실험이 실행되었으며 이 지역이 대기로의 CO₂공급원이라는 것을 명백히 밝혔다.

방출된 CO₂/ 침전된 탄산염 비(ψ)를 추정하면 탄산화는 대기중의 증가하는 CO₂ 농도에 양성(긍정적인) 피드백을 보인다. 355ppm인 경우에 ψ 는 약 0.6인데 산업화 이전 CO₂농도의 약 2배에 달하는 600ppm이 되었을 때 ψ 는 0.8이 될 것이다.

㉔ 극 지역에서의 해조류(Seabirds)와 해양 포유동물의 분포

남극, 그린란드, 노르웨이 해와 바렌츠 해 등이며 주로 독일의 쇠빙선 RV Polirstern 선상에서 접근이 쉬운 바다 뿐만이 아니라 주로 총빙(떠돌아 다니던 빙산들이 모여 붙은 지역)에서 해조류나 해양 포유동물(기각류와 고래류)의 출현빈도에 관한 연구를 수행하였다

높은 영양단계에 관한 자료는 완벽한 먹이 사슬, 혹은 미생물 고리를 통한 짧은 경우등 생태계의 생태 구조를 반영한다. 해조류와 포유동물이 대량 서식하는 이차 생산이 매우 높은 해역은 수괴사이의 차이, 수괴간 혹은 얼음의 가장자리 부근에 존재하는 생물활동이 활발한 전선이 존재한다. 남극에서의 크릴 밀도를 측정하는 것은 매우 중대하지만 어려운 사업으로서, 크릴을 먹는 펭귄, 바다제비, 바다표범, 수염고래 등의 밀도와 그들의 먹이 소비량으로 크릴의 양과 생산의 최소치를 계산한다.

많은 수의 주된 포식자가 크릴에 의존하는 비교적 단순한 생태 구조의 남극에서는 먹이에 대한 경쟁이 뚜렷하게 나타나며 게를 먹는 바다 표범과 펭귄의 거대한 군집이 크게 감소하는 일이 발생하고 있다

㉕ 남극 생태계에서 중형저서생물의 역할

이 프로그램은 벨기에 과학부의 ANTARIII 프로그램의 일부이며 '남부 해양에서의 생태역학과 기후와의 상호작용'이라는 총괄사업의 일부이다

남부 해양의 먹이 그물의 모든 단계들은 -저서생물을 포함하여- 일차 생산의 계절 변화에 크게 영향을 받는다. 저서생물의 생산량은 상층에서 내려오는 개체의 양, 큰 입자들이나 초식성 부유 생물의 배설물의 유기물 농도등 수주 상층의 생산량에 의하여 변화한다. 해저로의 탄소유동량이 굉장히 큰 남부 해양의 일부 지역에서는 퇴적물 내에서의 박테리아 성장율이 낮다는 사실에도 불구하고 탄소가 축적되지 않는 것으로 보인다. 이 차이는 원생동물들과 중형동물들의 생산에 의해 생겨난다고 여겨지지만 아직 그런 자료가 수집된 적은 없다. 수주 내에서의 높은 생산력과 저서생물들의 낮은 걸보기 이용도 사이의 수직불균형은 본 프로그램이 연구가치가 많은 주제임을 나타내주며, '가장 중요한 영양 단계 내에서의 물질의 이동과 생지화학적 순환'이라는 국내 연구사업과도 관련되어 있다

저서생태계에서의 에너지 균형은 각각 그 자체 고유의 속도를 가진 상호작용들의 복합적인 결과이다. 저탁층에서의 입자성 물질의 유동량이나 해저 근처에서의 퇴적 속도등은 남극지역에서도 매우 잘 연구되어있다. 그러나 퇴적물-해수 경계면에서의 저서생물들의 대사 활동과 화학물질들(산소, CO₂, 영양염류, ...)의 유동량은 잘 알려지지 않았으며 이는 본 연구사업의 주요 과제이다.

㉞ 심층 저서생물의 군집 구조와 과정들

심층 퇴적물은 인류에 의한 탄소의 주된 궁극적인 저장소이다. 식물은 수주/퇴적물간 탄소교환에 중대한 역할을 한다. 최근의 결과는 심해저 저서생물이 지구상에서 가장 높은 생물다양성을 가진 환경중 하나라고 나타냈다. 다양성은 센티미터 단위에서 킬로미터에 이르는 그리고 하루 단위에서 수십년에 이르는 자연적인 시간적, 공간적 교란에 의해 결정되어진다. 심해 생물학자들은 주로 다음 주제에 관심을 가지고 있다.

a) 해저군집 다양성 묘사, b) 이 군집들의 구조와 기능에 대한 다양한 형태의 교란의 영향 이해, c) 식물이 인류 기원의 교란에 대한 반응 예측등으로 다음의 연구사업을 수행하고 있다. ㉠ 북동 대서양의 연안 저서 개체군의 자연적인 구조와 다양성, ㉡ 물리적, 화학적, 생물적 환경에서의 과정들, ㉢ 저서생물군의 경계 지역에서의 영양 연결단계와 심해저 저서 생태계에서의 유기 탄소의 유동량, ㉣ 자연적인 교란과 인류에 의한 교란에 의해 야기되는 변화의 예측등으로 벨기에에는 다음 연구에 기여한다. ㉤ 저서생물의 생물량과 미소생물 군집의 생물량, 서로에 대한 섭식율에 의해 결정되는 군집내로의 총 에너지 흐름중 저서 생물의 역할정도를 평가하기 위한 중형동물과 작은 대형동물의 생물 에너지학과, ㉬ 일반적인 생태학적 예로서 심층 동물의 크기와 빈도간의 관계의 모형화이다.

㉟ 연안역에서의 대륙-해양 상호작용 연구사업(LOICZ)

㉠ 수은의 대기 수송, 침전과 대기-해양 교환

수은의 대기로부터의 해양 침전은 다른 하천기원의 침적을 능가하여 이제 대기는 북해의 미량 금속의 주공급원으로 인식되고 있다. 해안 정점으로부터 외삽하는 모형에 근거한 기존 추정 방법과 다르게 대기로부터의 공급을 직접 추정할 수 있도록 바다위에서 비와 에어로졸 시료를 수집하여 대기 기원 화학 물질 침적에 대한 연구에

큰 진전이 있었다 그러나 우리는 아직도 대기로부터의 공급에 대하여 중요한 부분을 잘 모르고 있다 공급원과 대기 조건에 따라 변하는 에어로졸의 수송 기구는 복잡하며, 빙물중의 기체상태와 입자상태의 수은의 추출기구도 잘 알려져 있지 않아 침적 유동량은 불확실하다.

대양상의 수은의 대기 순환과 대기와 해양간의 수은 교환에 영향을 주는 과정들은 본 연구의 주 대상이다. 다양한 수은 화합물(Hg^0 , DMeHg)의 휘발성 때문에 전 대기 유동량의 약 10%가 대양에서 방출된 유동량이라고 생각 되었었다 하지만 휘발성 종의 형성을 설명하는 요인은 아직 이론적일 뿐이다

본 연구는 용존 종의 휘발 뿐만 아니라 대기중에 존재하는 종의 용해에 영향을 미치는 요인을 조절하는 과정을 현장 조사를 통하여 더욱 잘 이해하는데 목적을 두고 있다

④ 해양시스템에서의 유기물과 그와 관련된 원소들의 생산, 수송과 소모원
영양염 유동량과 신생산(new production)

본 과제의 목적은 전 지구적 변화와 연관된 임계 원소들과 구성원들의 공급원과 흡수원의 견지에서 연안역과 대양 주변역의 탄소순환 구성원의 유동량과 과정을 정량화 하는 것이다

탄소 순환과 직접 관련된 과정으로는 대기-해양 경계면에서의 CO_2 교환, 유기물의 일차생산, 부유동물에 의한 부유식물의 섭식, 쇄설성 유기 탄소의 퇴적물로의 퇴적이나 연안역에서 대양으로의 방출, 그리고 해수중에서의 용존 혹은 입자성 유기물의 호흡 등이 있다 이런 유동량은 주로 여러 질소종과 인삼염과 함께 영양염의 유동량과 연관된다 금속의 용존상태에서 입자상태로의 전이와, 해수내의 입자형태(Ba, Si, Sr, Ca, Al)의 수직적인 탄소 순환과 밀접하게 연관되어 있으므로 유동량도 조사하였다. 이러한 모든 유동들은 일차 생산과 유기물의 재광물화와 관련되어 있다고 여겨진다

⑤ 육지에서 해양으로의 영양염 수송의 전 지구적인 변화

하천 시스템에서의 생지화학적 과정

하천을 통한 육지 환경에서 해양으로의 생물 원소들의 이동은 국지적인 연안시스템의 역할을 결정하는 중요한 과정일 뿐만 아니라 그 원소들의 전 지구적 순환에서 중요한 과정이다. 그러므로 전 지구적인 규모와 지역적인 규모에서의 유동량의 크기와 기후와 육지 사용 변화에 의한 유동량 변화를 평가하는 것은 중요하다 육지-해양

경계면은 단순히 해안선만으로 이루어지지 않는다 하천, 호수, 하구 등을 포함한 전체 배수망으로 이루어진다. 이들은 영양염이 해양에 도달하기전에 변환, 고정 또는 제거를 일으키는 강력한 물리-화학적, 생물적 과정이 일어나는 매우 활동적인 시스템이다. 그러므로 이들은 육지와 해양 사이에서 일종의 여과지 역할을 한다 이러한 여과의 유효성과 선택성은 탄소, 질소, 인, 규소 등의 순환 사이에 존재하는 강한 생지화학적 짝짓기에 의해 결정된다

본 과제의 목적은 기후와 하천유역에서의 인간활동에 의한 하천을 통한 영양염의 연안역으로의 이동을 계산하기 위하여 상류에서 하구까지의 수생 연속체(aquatic continuum)의 생지화학적 기능에 대한 일반적 모형을 개발하는 것이다 모형(RIVERSTRAHLER)은 전체 배수망에서 하천유역으로의 물의 흐름을 기술하는 Strahler(1957)에 의해 소개된 하천열(Stream order)의 개념에 기초한 이상적인 수리적 모형과 함께, 유기물과 영양염이 하류로 이동하는 동안 이들에 영향을 미치는 다양한 생물적, 물리-화학적 과정의 역학을 기술하는 한 단위(RIVE)의 결합을 이룬다.

RIVERSTRAHLER 모형을 다른 수리학적 체계와, 자연상태의 숲이 우거진 하천유역에서 공업화된 지역의 밀집된 도시 조건까지 분포하는 일련의 육지 사용 형태를 모두 포함한 이상적인 하천 시스템에 적용하려고 시도하고 있다. 또한 다른 연구 사업에서 북서유럽(Seine, Scheldt, Moselle, Loire,)의 실제 하천에 적용되고 있다

아마도 본 연구 과제의 가장 혁신적인 부분은 인간과 하천 사이의 관계와 그들의 생태학적 결과의 과거 변화 양상을 조사하기 위한 생지화학자들과 역사가들 사이의 공동연구에 있을 것이다 이런 접근의 잠재력을 증명하기 위한 첫 번째 과정으로 두 경우의 연구가 선택되었다 역사적 자료가 많은 세느강에 대한 첫 번째 시도는 연안 부영양화의 과거 변화에 새로운 생각을 갖게 하였다. 도시의 유기물질과 영양염 배출의 과거(특히 산업혁명 초기의) 경향을 분석하기에 더 적합한 연구로서 작고 극도로 오염되어 있는 Zenne 강이 선택되었다 과거변화 복원력을 갖는 모형은 그래서 인간과 환경간의 관계에 대한 과거의 경향을 더욱 잘 이해하도록 하였고, 이는 지속적인 경제발전을 위하여 필요하다

㉔ 해양 시스템내의 유기물과 그와 연관된 원소들의 생산, 수송과, 흡수원 .

대기-해양 상호작용

이 과제의 목적은 전 지구적 변화와 연관된 임계 원소들과 구성원들의 공급원과 흡수원의 견지에서 연안역과 대양 주변역의 역할을 평가하기 위해 이 환경에서의 탄소 순환 구성원의 적용에 영향을 끼치는 가장 중요한 유동량과 과정을 정량화 하는 것이다.

탄소순환과 직접 연관된 과정에는 대기 해양 경계면에서의 CO₂교환, 유기물의 일차생산, 동물플랑크톤에 의한 식물플랑크톤의 섭식, 쇠설성 유기 탄소의 퇴적물로의 침전이나 연안역에서 대양으로의 유출, 그리고 해수중에서의 용존 또는 입자상 유기물의 호흡등이 있다. 과제중 이 부분의 목적은 북서 유럽 대륙붕위에서의 CO₂의 화학과 CO₂의 분포를 정하는 것이다.

탄소함량을 변경시킬 만한 해양에서의 주된 작용(생물학적 생산, 유체역학(hydrodynamics), 대기해양간 교환,...)과 관측을 연관시키기위하여 여러 연관된 변수들(용존산소, 엽록소, 부유 고체상 물질의 농도, $\delta^{13}\text{C}$)을 조사 연구한다. 화학적 물리적 제한조건하에서 각각의 경우의 대기-해양 CO₂교환을 측정하고 조사한다.

해수내의 CO₂평형의 열역학을 모델화하기 위해 이론적인 접근이 필요하다. 분석학적 식들을 유도하고 이 식들로 유입/유출 탄산염, 중탄산염, 양자로부터 야기되는 pCO₂와 pH의 변화를 계산할 수 있다. 이런 식들로 해양 탄산화같은 여러 중요한 지화학적 특징들을 더욱 잘 이해할 수 있다.

㉕ 입자 물질의 특성화와 입자물질-동물 플랑크톤 상호작용의 정량화

부유입자물질의 더 높은 영양 단계로의 변형 정도는 수생태계 연구의 중요한 주제이다. 연안역과 얕아구에서 부유입자물질은 식물플랑크톤, 쇠설물, 무기성분, 그리고 재부유 퇴적물의 복잡한 혼합체이다. 다른 생물과의 높은 상호작용정도 때문에 모든 이전성분들은 그 해역에서 기원된 것이거나 다른 해역에서 기원된 것 일 수 있다.

본 연구는 부유입자물질의 동물플랑크톤으로의 전이, 더 높은 영양단계로의 첫 번째 연결에 초점을 두게 된다. 이 연구는 다양한 형태의 연안생태계내의 생태계 모델 개발에 목적을 둔 타학문간 과제에 대한 본 연구사업의 공헌으로서 수행된다. 동물플랑크톤의 섭식전략은 다양한 부유입자물질의 성분의 상대적 풍족도에 대하여 적

응시키는 것으로 알려져있다 연안과 얽하구 시스템의 부유 입자 물질은 복잡하여 이런 유동량을 정량화하고 모델링하는 것을 매우 어렵게 한다 그러나, 연안역과 얽하구는 인간활동에 매우 종속적이고 게다가 중요한 생물생산지역(예를 들면, 많은 어류와 갑각류의 양식장)이므로 이 곳은 이러한 시스템 경영을 뒷받침하는 과학적 모델은 매우 필요하다.

수온, 하천유동량, 수리학적 체계, 침식, 오염물질과 같은 요소들은 모두 부유입자 물질의 농도와 화학조성과 연관있다 그러므로 기후나 인간활동에 의해 이런 요소들 중 어떤 것이라도 변화하면 부유입자 물질의 농도와 화학조성에 영향을 끼치고 결과적으로 생태계에도 영향을 끼친다 다양한 기후 형태의 생태계들(벨기에 연안역, 네덜란드의 삼각주, Westerschelde, Gironde와 Elbe 얽하구, 케냐 연안역, Goi만(케냐), 소말리아 용승역)에서 부유입자물질의 구성과 부유입자물질의 동물플랑크톤으로의 전이를 연구함으로써 본 연구는 모델내에서 결합될 수 있는 입자물질 농도/화학조성과 다양한 입자 물질 성분에 대한 동물플랑크톤의 포식효과간의 일반적 관계에 도달하는데 목적을 두고 있다

㉞ 해양 생태계내의 유기 미세-오염물질 이해를 위한 생화학적, 생태학적 변수들의 중요성

생태 구획(공기-토양-물-퇴적물-생물상)에서의 미생물 오염과 유동의 모형을 개발하는 연구이다. 물리화학적 분할 과정(예를 들면, 조락성 모델)에 근거하여 수생태상에서 안정적인 유기 미생물 오염물질의 오염 정도는 본질적으로 화합물 지방친화성(팔각수의 분할계수), 생물 지방질 함량, 물의 오염정도에 의해 결정된다고 인식된다

그럼에도 불구하고 생태계의 역동성과 불균질성에 의해 오염정도의 예기치 못한 변동성이 생물현장 -잘 알려진 안정적인 유기염소 잔재 조차-에 있음을 알게 된다 해양 생물내의 미생물 오염물질 정도를 조절하는 과정을 더욱 잘 이해하면 기존의 오염 모델을 더 정교하게 할 수 있다고 여겨진다 고려되어야할 몇몇 중요한 현장변수와 과정들은 다음과 같다 생물지방구성, 생물학적으로 조절되는 획득 및 제거 과정, 흡착과 분할과정(입자 및 용존 유기 탄소 함량)에 영향을 주는 생태학적 변수 이다 그러므로 생물 지방 구성에 대한 연구와 다른 종류의 생물지방종과 미생물 오염물질간의 연관에 관한 연구가 본 과제의 목적이다 해양 생태계내의 생물 미생물 오염물질 정도(생농도 요소)에 대한 환경변수(특히 입자 및 용존 유기 물질)와 생물학적 변수(유도

(즉 EROD 활동성), 대사작용)에 대한 연구 또한 본 과제의 목적이다. 기존의 모델에 이런 정보를 융합하면 해양 환경에 대한 오염물질의 효과를 예보하고 평가하는데 이러한 모델들의 유용성과 예보치가 상당히 향상 될 것이다. 본 연구는 미생물 오염물질의 표준화 과정, 비용 효과적인 분석, 해양 오염 물질 정도의 국지적 및 전지구적 변화의 평가에 공헌할 것이다.

㉔ Flandrian 해수면 변화와 해수면 지시계의 고도 측정법 상의 위치의 의미에 관한 연구

평균 해수면의 단기, 장기변화는 기후변화에 대한 세계적인 지시계로 쓰인다. 전 지구적인 온도의 변화는 수리학적 순환에 영향을 준다. 전 지구적인 온도 변화는 대기중의 수증기량에 영향을 주며, 대양의 열팽창, 대륙내의 얼음의 부피 등에 영향을 준다. 위에 언급된 환경 변화들이 전지구적인 해수면에 영향을 준다. 그 정도가 작다 하더라도 지대가 낮은 나라들은 지역적인 해수면 상승이 매우 중요하다. 해안선이 변하고, 홍수가 증가하며, 영구 침수가 일어나고, 담수가 염수화되며 비용이 드는 연안방파제와 배수 체계의 필요성이 증가할 것이기 때문이다. 지역적으로 상승하는 해수면과 복합적으로 폭풍이 증가할 때 사회-경제적으로 이를 생각하지 않고 넘어갈 수 없을 것이다. 게다가 지역적인 해수면 상승은 단지 eustatic한 해수면 변화에 의한 것이 아니라 판 구조론에 의한 흙의 이동, 퇴적물의 증가, 빙하-균형설의 반동, 퇴적물 침전 등에 의한 것이다. 수리동력학이나 연안지역에서의 퇴적물의 공급등이 변하여도 역시 바다와 해안간의 상호작용에 영향을 준다.

Selifa 과제는 벨기에와 북부 프랑스의 연안을 따라 있는 해수면 지시계에 기록된 최근 2000년간의 해수면 움직임을 계산하고자 한다. 연안 역학 뿐만 아니라 오늘날과 최근의 해수면 지시계의 고도측정범위는 해수면 변동의 매개변수로 연구되었다. 기상조건이나 수리동역학적 요인들의 결과까지 역사적인 해수면 자료에서 근한점의 의미를 찾는 것이 또 하나의 목표이다.

과제는 관련된 기상변수들의 연속시간 자료를 만들었으며 최근 10여년에 대해서는 바다의 지리적 자료를 이용해 해수면 자체에 관한 연속 시간 자료를 만들었다. 이는 평균 해수면을 기후변화의 지시계로 사용하여 최근 백만년간의 기후 변화를 감지하기 위하여 해수면 지시계의 의미를 더 잘 이해할 수 있도록 할 것이다.

따라서 이 자료 섀은 해수면 지시계의 범위와 연안 역학의 발전에 대한 기상학적 인 충격과 단기의 수리 동역학적 사건(예로 폭풍우)의 더 나은 식견을 갖게 할 것이다.

확석 해수면 지시자는 북부 프랑스와 벨기에의 연안 평야에서 발견된다. 이런 지시자들은 대부분이 기원후 200~300년 이후 연안 평야에서 몇차례 일어났고 역사적으로 잘 알려진 침수와 관련되어 있다. 유전적으로 잘 알려진 Dunkerque II와 IIIA 침수기의 만조선 지시자는 연안 평야에서 150Km에 이르는 긴지역(북부 프랑스의 Cap Blanc-Nez에서 네덜란드 경계에 이르는)에서 발견된다. 우리는 이런 침수의 영향이 8세기와 11세기 후반에 상대적으로 끝났다고 여겼다. 앞의 국지적인 최고 수위가 현재의 연안 평균 최고 수위와 대등하다는 것은 중요한 발견이다. Dunkerque II 지시자는 현재의 현상과 현재의 조석범위와 비교해 북동방향으로 감소하는 경향의 지역적 만조수위를 시사한다. 더군다나 17세기부터 19세기까지의 기간동안은 벨기에의 동부 연안 평야의 조간대 환경의 지역적 대조면은 현재의 해안을 따라 공식적으로 기록된 대조면 보다도 약간 높다고 할 수 있다. 해수면 지시자의 고도 측정 지점에서의 단기 기상적 해수면의 수리동역학적 사건의 영향을 평가하기 위하여 1877-1990 기간동안 Ostend에서의 이용가능한 대기-해양 자료에 기초하여 수치적으로 연속적인 시간 자료를 만들었다. 이 자료의 선택 기준은 4.99m TAW를 초과하는 만조 수위였다. 자료는 천문조, 잉여조(천문조의 만조위와 바다-지리적으로 기록된 만조위의 차이), 풍향, 풍속, 기압, 조석위상(대조 전후의 날짜)으로 이루어져 있다. 최근의 모든 폭풍과 몇몇 역사적 폭풍에 대하여도 유사한 수치적 연속 자료를 만들었다. 첫 예비 결과는 잉여조의 중요성과 풍향, 풍속, 기압과의 확실한 상관관계를 나타내 주었다. 잉여조의 만조가 해안을 따르는 예의적인 만조수위를 일으키는 정도는 그것이 일어나는시기와 일주조의 만조와 한달에 두 번 일어나는 대조 사이의 시간 경과에 의해 결정된다. 계절변화와 구별하여 4.99m TAW를 초과하는 만조수위의 일년에 해당하는 빈도의 증가는 1950년 이후로 뚜렷하게 나타나는 것처럼 보이는데, 이는 폭풍의 세기와 관련이 있어 보이며 1mm/year 보다 작은 비율로 보이는 Ostend에서의 해수면 상승과는 거의 관계가 없다고 할 수 있다.

㉞ 연안 부영양화된 시스템 . 역학과 수치모델링

연안역에서 관측된 변화는 육지, 담수, 해양시스템의 변화를 나타낸다. 연안부영양화는 대륙-해양 상호작용의 가장 뚜렷한 현상중의 하나이다. 국지적 출현이 매우 차이가 크다는 것을 떠나서 부영양화의 일반적인 특징은 불균형적인 하천 영양염의

수송의 결과로서 질산염이나 인산염과 비교하여 규산염이 부족하여 식물플랑크톤의 비규조류 구성원의 성장을 촉진한다는 데 있다. 대부분의 연안 부영양화문제는 이런 -매우자주- 원치않은 종인 편모조류의 급성장 생성에 기인한다.

이런 크게 번식된 종들은 매우 자주 중간 크기의 토착 동물 플랑크톤에게 좋은 먹이가 아니어서 그들의 일차 생산물의 많은 양이 축적되어 연안역의 수리역학적 특성과 지형적인 특성에 의하여 연안역에 퇴적되거나 인접한 외해역으로 이동한다.

본 연구의 목적은 외력(예를 들면, 토지 이용 변경, 기후, 인간에 의한 개간)에 반응하여 연안 시스템의 생태학적 작용에 대한 일반적인 수학적 모델을 세우는 것이다. 마지막단계에서 이 모델은 부영양화된 해양 연안 시스템의 복구와 경영을 위한 기본적인 과학적 지식을 제공할 것이다.

생태학적 모델은 부유생물과 저서생물 시스템이 결합된 구획을 통하여 C, N, P, Si 순환을 기술하는 해상도가 좋은 물리학적-생지화학적 결합모델로 이루어져 있다.

이 모델은 연구중인 연안 시스템에 포함되어 있는 주된 자가 영양과 타가 영양과정의 역학에 대한 자세한 조사에 달려 있다.

연구방법에는 특히 환경변화에 반응하는 경향을 자연적인 변동성과 구별하기 위해서는 선택된 변수의 계절 변화를 따른 관측과 그에 해당하는 기존 자료의 수집과 소거가 포함된다. 과정에 중점을 둔 연구와 수치실험연구는 세가지 부과제에서 수행된다. 부영양화된 연안 시스템의 역학; *Phaeocystis* 군체와 집합체의 생지화학과 다뉴브강과 북서흑해 사이의 상호작용.

㉔ 연안 해양의 개관적 모형화와 관측 연구(COSMOS)

천해권(neritosphere)(=평균 저조 수위에서 200m 깊이에 이르는 얇은 해양 환경)에 관한 연구는 이곳이 전 지구적인 환경중 특별히 취약한 분기점인 이유 뿐만이 아니라 천해권으로 이동되는 육상에서 배출된 대부분이 이곳에서 처리되며 천해의 물리적, 생지화학적 기구들이 육지와 해양, 대기와 해양간의 전지구적인 유동량들의 형태와 순환을 조절하기 때문에 필수적이다.

천해의 과정들은 대양에서의 과정들과 현저히 차이가 나는데 이는 다른 조건(압력, pH,)에서 생지화학적 반응이 일어나며 대양과는 비교할 수 없는 성분들의 농도 범위나 상대적인 풍부도에 의한 것 뿐만아니라 대륙붕에서의 수리동역학의 특징 때문이기도 하다.

시간 단위가 생물학적 개체군의 시간 단위와 같은 수리동역학적 과정은 이개체군들을 그들의 물리적 공간적 구조안에 잡아두고 그들의 빈도나 지속성을 해양이나 대기와의 교환 속도에 맞추게 한다. 국내, 국외의 프로그램의 관점에서 현장 관측과 모형화를 통한 Liege 그룹의 세가지 유형의 대표적인 천해 환경 위험 대상 해역은 ㉠ Lion 만, ㉡ 유럽 대륙의 북서부 대륙붕, ㉢ Ross해와 남극 대륙붕이다.

현재 과제의 목적은 ㉠ 생지화학적 물질의 머무름과 재처리에 관련된 특정한 기구들을 각 경우에 따라 구분하며 전지구적 규모의 환경 규모에서 머무름 시간과 효율을 정량화하는 것이다. ㉡ 천해권과 대기권, 대양권들 각각의 전지구적 규모에서 현실적으로 존재하는 유동량의 특성과 주기적인 순환을 밝힌다. ㉢ 세계중에서의 천해에 관한 정성적인 비교연구 성립과 이를 예로 삼아 천해권을 통한 물질 수송 기능 계산이다. 이차 소용돌이(gyre)와 전선구조, 해류(강의 plume 전선, 대륙붕단 전선, 조석 전선과 용승전선)를 구별하는데와 세 시험 지역에서 대륙붕을 가로지른 수송과 전지구적인 규모에서의 대양으로의 유동량을 포함한 전선 지역을 비교하는데 특히 주의해야 할 것이다.

연구사업 내용은 ㉠ 부유생물의 역학과 신진대사, 유기물의 전환과 수주와 퇴적물에서의 생지화학적 상호작용에 관한 현장 연구, ㉡ 변화형 GHER 대륙붕 모형을 사용해 일반적인 순환과 그와 관련된 이차 gyre나 개관적 구조 모의 실험, ㉢ 특징형 GHER 대륙붕 모형을 사용한 전선과 다른 구조들의 과정 연구이다.

GHER 모형은 초기 방정식, 완전한 3차원(다단계), 시간의존형, 비선형, KE 와류 폐쇄 경압성 모형이다. 상태변수는 속도 벡터의 세 요소와 부력(혹은 혼합 길이)와 다른 구성요소들의 농도이다. GHER 모형은 미국 NSF의 ISHTAR 프로그램에서 북부 베링해의 일반적인 순환과 그와 관련된 용승 구조의 모형화에 성공적으로 적용되었다.

㉣ 동 아프리카 망그로브의 지속적인 관리

열대지역의 조간대에 우점하는 망그로브 숲은 육지와 바다사이의 중간운송 체계 역할을 한다. 망그로브 체계는 두가지 주요 특징은 열대 해양의 일반적으로 빈영양성의 영양염이 부족한 환경에서 현장의 유기물 생산을 최적화할 능력과 다양한 서식지의 생산력을 종합하는 능력이 있어 정착성의 그리고 이동성, 방랑성 수행동물 종들

에게 적합하게 만든다 그 결과 망그로브 숲은 다른 해안과 비교해 생물학적으로 현격한 특징을 갖는다

오늘날 망그로브는 점점 더 주요 생태계로 인식되고 있다. 열대우림이 지구 온난화에서 중요한 역할을 하는 것과 마찬가지로 망그로브는 열대지역에서 연안 침식을 막는 유일한 방법이며, 발생 초기의 어류에게는 중요한 섭식 장소이며 어류, 새우와 굴 등의 연체동물의 다양한 동물들에게는 양육장소이다 망그로브 숲은 강으로부터 오는 흐름의 속도를 늦춰 물 속의 입자들의 높은 퇴적율을 유도해 낼 수 있다 따라서 망그로브를 많이 잘라내면 강으로부터 오는 입자들의 퇴적이 줄어든다 대신 그런 입자들이 가까운 위치에서 망그로브 생태계와 매우 유사한해초 초원이나 산호초에서 퇴적된다 이것이 산호초 파괴의 주요 원인이다 해변을 침식으로부터 보호하고 산호초를 갑작스러운 죽음에서 구하기 위해 우리는 망그로브 환경 관리방안을 개발해야 한다. 그러나 이것은 망그로브 생태계에 대한 적합한 지식이 없이는 불가능하다

동아프리카의 망그로브 자원에 관한 정보는 빈약하며 관리에 필요한 기초적이고 실질적인 정보는 부족하다 이 문제는 케냐 망그로브의 관리와 보존 개선을 위한 실질적인 정보는 부족하다

연안과 해양지역을 지속적으로 관리하기 위한 경제적, 사회적 그리고 생태학적인 면에서 함께 여러학문이 연구를 수행하여야 할 필요성은 환경과 개발을 위한 국제 연합 회의(리우데자네이로, 1992 6 3 - 14)의 의제 21(Agenda 21)의 2장에서 강조되었다(AKONF. 151/26 Vol II p 130-166) 이 필요성은 동아프리카에서의 종합적인 연안역 관리에 관한 아루샤 결의안(제도를 포함한 동아프리카에서의 종합적인 지역관리를 위한 정책회의에서 제시된 결의안-1993 4. 23 - 아루샤)에서도 강조되었으며 서부 인도양 지역에서의 해양 과학 연구 능력 개발의 기부자 공동 연구에 관한 SAREC-IOC 워크샵(브뤼셀, 1993. 11 23-25)에서 다시 강조되었다

현재의 연구는 생태적, 경제적, 사회적 자료를 조합해 모형을 개발하는 것을 목표로 하고 있다 이런 모형은 동 아프리카 망그로브의 사용을 계산하고 이러한 망그로브를 지속적으로 관리하는데 어떻게 이용할 수 있는가에 관한 기초자료를 제공할 것이다 굴 양식과 바다 영림이 두가지 사업을 동시에 수행하고 있다

㉞ 현재와 미래 인류기원의 영향과 관련된 하구와 연안해양 생태계에서의 저서생물의 구조와 기능

영양염의 덫(trap), 여과기 혹은 유출 지역으로서의 하구의 역할을 성공적으로 이해하기 위해서는 연안역에서의 유입율, 유실율과 축적을 뿐만이 아니라 용존 상태와 입자 상태의 영양염의 분포에 관한 지식이 필요하다. 하구와 얇은 연안역에서는 대양과 비교해 일차생산과 다른 지역에서 기원한 쇠설성 물질의 많은 부분이 저서생물의 신진대사에 이용된다.

오염된 지역(Westerschelde와 벨기에 연안지역 처럼)에서는 중형 저서생물과 거대 저서생물은 생태계에서의 에너지 흐름에 중요하다고 보인다. 두 저서 생물 요소들은 매우 많은 수가 존재하며 중형저서생물은 영양염류의 재순환에, 그리고 거대 저서생물은 어류 등의 상위 영양단계에 먹이로서 중요하다. 해양 저서 생태계에서의 이들의 정확한 역할은 이들의 공간적 시간적 변화에 관한 지식과 생태계 내에서의 에너지 흐름을 연구를 통해 밝혀낼 수 있다. 두 저서생물 군집은 모두 인류기원의 영향에 대한 지시자 역할을 한다. 시간적, 공간적, 분포 양상은 연구중이며 퇴적물 내에서의 생지화학적 유동량들의 상관관계는 앞으로 계산될 것이다. 소형 생물에서 중형생물로의 쇠설성 먹이 사슬에서 거대 저서생물로의 유동량은 영양단계 역학 모형을 만들기 위해 정량화 될 것이다.

㉟ 해양에서의 유기물과 그와 관련된 원소들의 생산, 운반과 소모.

일차 생산과 미량 원소의 제거

본 합동 해양 연구 과제의 목적은 임계 원소들과 구성원들의 공급원과 흡수원의 견지에서 이 환경의 역할을 평가하기 위해 연안역과 해양 주변역의 탄소순환의 구성 요소들의 행동에 영향을 주는 가장 중요한 유동량과 과정을 정량화 하는 것이다. 본 연구의 궁극적인 목표는 수주와 대기, 대륙, 해양저들 사이에 각각 일어나는 탄소순환과 관련된 교환을 추정하는 것이다. 본 과제의 내용은 탄소순환과 직접 관련된 과정으로 유기탄소의 일차생산, 쇠설성 유기탄소의 퇴적물로의 퇴적, 혹은 연안역에서 대양으로의 방출등이 있다. 탄산 칼슘의 침전/용해, 수직 유동량과 방출률도 고려될 것이다.

영양염류와 미량 금속 등과 같은 많은 다른 원소들은 탄소순환과 밀접한 관련이 있다. 용존상태에서 입자상태로의 인과 미량 금속의 이동은 방사성 추적자를 이용한 배양실험을 통해 연구할 것이다. 수주 내에서의 수직 유동량과 입자성 물질들의 구성성분은 많은 양의 해수를 다양한 수심에서 퍼올려 현장(in situ)부유 물질을 모아 계산할 것이다. 이 유동량들은 모두 일차생산과 유기물의 재광물화와 관련하여 고려할 것이다. 생지화학적 모형은 연안역의 중요성과 전지구적 규모에서 대륙붕과 대양간의 교환의 중요성을 계산하기 위해서 개발될 것이다.

③ Post Global Changes(PAGES)관련 연구사업

㉔ 천문학적인 원인과 직접 관련되어 있지 않으며 대기와 해양 순환의 변화로 인한 갑작스러운 기후변화

유럽의 횡단면을 통해 천문학적인 힘에 의한 것이 아닌 빙하기(Younger Dryas 같은 변동의 문제), 화산의 힘(만천년전의 LST의 기후 영향과 같은), 유빙의 집적(마지막 빙하기 중의 Heinrich 사건과 따뜻한 간빙기)등 후에 나타나는 대기와 해양 순환의 변화와 같은 다른 힘 요인에 의해 일어나는 기후변화에 초점을 맞춘다.

㉕ Holzmaar(아이펠, 독일), 매년 총지어 생기는 최근 빙하기의 호수 퇴적물

최근에 방사성 탄소와 마지막 빙하기가 끝나던 시기의 절대적인 연령 결정이 현격히 개선되었다. ice core나 총으로 쌓인 호수 퇴적물로부터의 기록들이 기후변화의 신호들을 높은 해상도로 제공한다

㉖ Vico 호수(라티움, 이탈리아) 퇴적물의 최근 9만 5천년 Younger Dryas같은 사건은 5a 단계와 관련해 첫 삼림기의 시작의 증거이다. 그후 두 번의 따뜻하고 습한 삼림기가 발달했다. 이(ice core와 북대서양의 높은 해상도의 해양 core의 증거에 의한)는 단계5와 4사이의 전이시기의 새로운 간빙기와 시기가 일치했다. 빙하기는 수많은 중요한 간빙기를 포함한다. Heinrich 사건과의 관련 가능성을 연구중이다.

㉗ 얼음의 구성성분과 전지구적인 변화

기후시스템의 모형화와 이에의한 단기 중기의 기후변화 예측으로부터 얻은 결과들은 대륙과 해양의 두 저온권의 역할에 따라 결정되며 이는 이들의 역할이 알비도 피드백 기구(메커니즘)을 통해 특히 중요하기 때문이다. 따라서 극지방의 빙상들에

대한 모형화가 필요하다. 정확학 모형화를 이루기 위해서는 경계지역(경계면)에서 이루어지는 물리적 과정들을 알아야만 한다. 얼음-기저암과 얼음-해양 경계면에서의 경계조건은 잘 정의 되어야 한다. 그린랜드 빙상의 중앙부에서 완벽한 drilling을 해낸 위대한 유럽의 노력에 참여함으로써 이 core로부터 기저 얼음부에 대한 세밀한 연구가 현재 진행 중이다. 기저 얼음부의 기체 성분과 안정 동위원소 연구를 주로한 다변수적인 접근은 빙상행동의 모형을 바로잡기 위해 매우 중요한 그린랜드 빙상의 기저부분에 상세한 물리적 조건들을 재구성할 수 있게 하였다.

남극의 빙상은 그 안정성 상 중요한 역할을 하고 있는 얼음 대륙붕으로 둘러싸여 있다. 얼음 대륙붕의 얼음-해양 경계면은 얼음이 녹거나 물이 얼면서 형성된 얼음이 자연 증식되는 장소이다. 이런 과정들은 이 얼음 덩어리의 안정성에 영향을 주며 또한 해수면에도 영향을 준다. 얼음 대륙붕의 기저부에서 발견되는 바다 얼음의 구성 성분에 관한 연구는 얼음-해양 경계면에서 일어나는 열역학적 과정들을 더 잘 이해할 수 있게 한다. 인류에 의한 기후 변화에 더욱 빠르게 반응할 작은 얼음 대륙붕을 더 집중적으로 연구한다.

3. 국내연구 현황

가 개 요

환경의 세기가 될 21세기의 세계 신경제질서 하에서 선진들은 국제경제, 정치질서의 패권을 확보하고자 새로운 무역장벽으로서 지구환경보호라는 대명제를 앞세우고 있다. 이러한 의도하에 선진 각국들은 지구환경변화 연구들을 비롯한 환경투자를 통해 얻어낸 첨단환경기술을 상품화하기 위하여 공세적인 환경관련 국제규범을 강화하고 있는 실정이다.

선진국들의 지구환경변화연구에 대한 막대한 투자는 국제 환경협약에서 주도권을 차지하고, 개도국들의 환경정책을 강하시키기 위한 노력으로 보인다. 한편, 현재 전 세계적으로 지구환경과 관련된 국제협약은 130여개가 체결되어 있으며 그중 18개는 무역규제조치에 관한 것이다. 최근 논의대상이 되고 있는 기후변화협약 몬트리얼 의정서, 바젤협약, 런던덤핑협약, 생물다양성협약 등이 발효될 시에는 무역규제 조치가 보다 더 강화될 것으로 보이고, 이러한 국제협약들은 UR보다 더 큰 영향을 국내 제반 산업계에 미치게 될 것으로 보인다.

선진국과 국제기구를 중심으로 지구변화를 이해하기 위한 연구사업들이 활발히 추진중에 있으나, 현재까지도 지구변화에 관한 원인과 과정에 관하여 자연과학적으로 완전하게 이해되어 있지 못하고 있으며, 정확한 접근방법도 찾지 못하고 있다. 따라서 선진국들은 지구변화를 보다 명확히 이해하고, 아울러 예측에 관한 많은 불확실성을 제거하기 위해 지구변화의 실체를 장기간에 걸쳐 지속적으로 모니터링하는 연구들을 추진중이다.

한편, 우리나라의 지구환경변화에 관한 연구는 아직 소규모의 연구가 대학과 연구소에서 산발적으로 실시하고 있으나, 국가차원에서 체계적이고 통합적인 계획에 의한 연구가 수행되고 있지 못하고 있는 상황이다. 현재 정부의 선도기술 과제중 지구환경변화에 관한 과제는 기후변동 모형을 만드는 사업에 국한되어 있는 실정으로 세계수준에 비해서는 비교가 되지 못할 실정이며, 우리나라는 세계 연구프로그램중의 대표적인 WCRP에도 참여하지 못하고 있고, IGBP는 이제 학술원에서 형식적인 참여절차를 마친 단계이다. IPCC(정부간기후변화패널) 제2차 보고서 초안에 대한 각국별 검토 시에도 우리나라의 전문인력 및 재원의 부족으로 우리나라의 입장 개진이 미흡한 실정이다.

나 연구능력

우리나라는 해양에 대한 인식부족에 따른 투자 미흡으로 해양학관련 학과가 설치된 12개 대학을 포함한 23개 연구기관에 1300여 명의 해양연구인력이 있다 그러나 조사된 해양연구인력의 전공분야가 수산 내지 양식에 치우쳐 있는 반면, 해양환경연구에 관련된 전문인력은 매우 부족한 형편이다.(표 38)

해양연구능력을 가늠하는 중요한 지표인 해양조사선의 보유현황은 총 9개 기관이 27척을 보유하고 있어 숫적인 면에서는 해양선진국 수준이라 볼 수 있으나, 총 톤수는 1만3천여 톤에 불과한 소형선박들로 구성되어 있으며, 그나마 조사선의 기능면에 살펴보면 전용해양조사선은 6척에 지나지 않아 선진국에 비하여 상당히 뒤떨어져 있는 실정이다(표 39, 40). 한편 심해잠수정, 채빙선, 과학용 시추선 등 특수기능 선박은 보유하고 있지 못하고, 원양항해용 조사선은 단 2척에 불과하다 따라서 현재 보유하고 있는 선박을 효율적으로 활용하여야 할 것이다

우리나라는 70년대에 대학에 해양학과가 설치되기 시작하였고, 80년대에 한국해양연구소, 국립수산진흥원, 환경연구원, 수로국, 한국동력자원연구소에서 해양조사연구, 수산, 해양오염, 수로관측, 해저광물조사 등 분야별 연구가 시작되었다.

90년대에 이르러서야 종합해양조사선의 투입에 따라 우리나라 주변해역은 물론 태평양 및 남극까지 해양탐사를 수행하는 등 해양연구에 관한 경험축적과 기술능력 배양에 힘쓰고 있다

한편, 국내 해양기술은 수산자원, 조선, 해운항만분야에 치우쳐 있는 실정이며, 해양 에너지자원, 해양공간 이용기술, 해양환경보전 연구 등의 기술력은 아직은 초기단계에 진입한 상태로서 선진국과는 큰 격차를 보이고 있다.

표 38 국내 해양연구 인력 현황

연구기관	관련학과 설치대학	정부출연 연구기관	국립연구기관	기타관련기관	계
기관수	12	3	4	4	23
연구원수	388	454	422	59	1323

표 39. 우리나라 해양조사선 현황

(조사선은 50톤 이상, '96 현재)

보유기관	선명	총톤수	항해속도 (kts)	선원	연구원	건조년도
군산대학교	제1해림호	360	12			1990
	제2해림호	80	12	-	19	1990
	해림호	1,020	12			1994
부산수산대학교	탐양호	653	15	21	10	1993
여수수산대학교	관악산호	244	10	15		1972
	정경호	303	11	18	6	1981
	남수호	161	10	13		1982
	동백호	1,057	13	24		1993
제주대학교	백경호	389	11	13		1964
	한라호	160	12	10	50	1982
	아라호	990	14	18		1993
한국해양연구소	이어도호	350	12	13		1992
	온누리호	1,422	15	16	138	1992
한국자원연구소	탐해호	170	11	11		1977
	()	1,347	15	19	22	'96예정
수산진흥원 남해수산연구소	부산 851호	1,126	-	-	271	1972
	전남 881호	369	-	-		1992
	경북 885호	280	-	-		1993
	인천 888호	282	-	-		1995
국립환경연구원	해양환경호	78	15	15	51	1996
교통부 수로국	부산 801호	494	13	21		1980
	부산 802호	240	13	14		1982
	부산 803호	125	12	13		1979
	부산 805호	156	13	15	15	1983
	충남 821호	65	12	8		1981
	강원 831호	65	12	8		1981
	해양 2000	2000	15	35		1996
총계 9개기관	27척	13,986		320	582	

* 일부 기관의 자료는 누락되었음

표 40. 주요 외국의 해양조사선 보유 현황

국명	척수	국명	척수	국명	척수
구소련	194	프랑스	27	스웨덴	11
미국	115	캐나다	25	이탈리아	10
일본	95	서독	17	호주	10
영국	39	브라질	12	알제틴	10

다 우리나라의 연구추진 전략

지구환경변화에 관한 연구는 막대한 투자예산과 연구능력을 필요로 하는 반면, 현재로서는 국가경제발전에 시급한 문제로 대두되지는 않는다. 그러나, 선진국들의 환경관련 규제 내지 환경정책의 강화는 우리나라 무역 및 산업경쟁력에 큰 영향을 미칠 것으로 보인다. 따라서 지구환경에 관한 연구경험이 부족한 우리나라의 입장에서는 선진 각국과 국제기구 등에서 추진중인 지구변화 연구내용과 추진방법, 그리고 관련기술들에 관한 정보를 지속적으로 수집 및 분석하여 효율적인 연구분야를 도출하여 연구에 필요한 기반기술을 습득하고 핵심기술을 개발하여야 한다. 이를 위해서 국제 학회 및 심포지엄의 참가, 외국 전문가 초청 및 자문을 통한 국제동향을 분석하고, 해외연수 및 국제공동연구에 적극적으로 참여하여 신기술을 습득을 위한 제도적 장치가 마련되어야 한다.

국내의 해양연구능력과 기술개발경험을 감안하고, 국가산업발전의 기여도를 제고하여 볼 때, 지구환경변화에 관한 해양연구는 모든 것을 다하겠다는 전략보다는 국제 환경 관련 협약과 규범 등 국제여론의 정세분석을 통해 우선되는 연구분야를 선정하여 선택적으로 추진해 추진해 나가야 할 것이며, 추진방향은 독자적인 연구보다는 선진국들이 수행하고 있는 국제공동연구에 참여하는 것이 효율적일 것이다.

현재 우리나라가 주변해역을 중심으로 수행되고 있는 연안조사나 연안 모니터링에 관한 연구등의 결과물들을 여하히 지구환경변화연구에 접목시켜 동북아 해양관측망 구축 및 해양오염의 방지에 관한 지역역량을 강화하고, 지역적인 해양오염 모니터링 및 정보관리 네트워크를 구성하기 위하여 UNDP 주관으로 추진하고 있는 국제프로그램에 참여가 필요하다.

또한, 공해역에서 수행하고 있는 남극 연구중 빙하변화에 따른 해수면 변동 예측, 고기후 연구등을 통한 전지구환경변화의 대책에 대한 자료축적과 관련기술을 개발하고, 태평양 심해저 환경연구중 고해양학적 기록 복원, 심해 저층해류의 흐름 연구등을 통해 지구대양의 50%를 차지하고 있는 태평양심해역의 환경변화관측 자료들의 활용 방안이 모색되어야 한다. 아울러 지구환경변화에 우리나라의 연구결과물과 투자내역등을 국제학회 내지 심포지엄에 발표함으로써 국제사회에서 환경친화적인 국가 이미지 향상을 위한 노력이 지속적으로 필요하다.

한편, 최근 해양연구가 첨단기술의 활용을 통한 종합적·세계적 성격으로 전환됨에 따라 우리나라의 해양연구도 국제협력을 바탕으로 한 국제적인 차원에서의 연구로 방향 전환이 필요하고, 인공위성의 이용 및 세계적 관측망의 공동사용 등 국가간 협력 또는 국제적 연구조직에 참여를 추진해 나가야 한다. 또한, 국내 해양전문출연 연구기관을 중심으로 대학, 국·공립 연구기관간에 협동연구체제를 구축하여 인력교류, 정보·자료교환, 시설 및 장비의 공동활용을 촉진하고, 연구분야별 강점을 최대한 활용토록 하여 민간 기업체에서 필요로 하는 환경관련 국제무역규제에 관한 대응책을 마련해야 하고, 공해산업체가 활용 가능한 환경기술 개발에 주력해야한다

제 4 장

산업적 측면의 국가적 대응전략

여 백

제 4장 산업적 측면의 국가적 대응전략

제 1절 GR의 실체와 주요 논의내용

1. GR의 개념 및 실체

최근 이슈화되고 있는 환경라운드(Green Round , GR)의 역학관계를 살펴보면 선진국들이 냉전시대 종식이후 지구환경보전이라는 명분하에 새로운 국제경제·정치질서의 패권을 확보하려는 의도로 활용되고 있음을 알 수 있다 따라서, 선진국들은 개도국들의 환경정책을 강화시키기 위한 수단으로서 다양한 무역규제를 가하고 있으며 일부 선진국에서는 환경정책을 강화하지 않는 국가의 수출품이 선진국 시장에 접근되는 것을 규제해야 한다는 주장을 견지하고 있다

가 GR의 개념

최근 지구환경보전을 위한 각종 국제환경협약과 미국, 독일 등 일부 선진국의 개별 입법이 상당한 무역규제를 포함함에 따라 기존의 GATT체제를 수정 및 보완할 필요성이 대두되고 있다 즉, 「GATT의 그린화」가 요구되고 있다

협약에 있어서 GR이란 환경문제를 감안하여 기존의 국제무역질서를 새롭게 정립하려는 다자간의 협상을 의미하고 있다. 이는 1992년 리우회의에서 천명한 「지속가능한 개발」(Environmentally Sound and Sustainable Development; ESSD)이라는 대원칙과 이의 이행강령인 「의제 21(Agenda 21)」의 구체적 실천방법으로 이해될 수 있다. 한편, 광의에 있어서 GR이란 환경을 이유로 하여 무역에 영향을 주는 환경협약, 무역규제, 환경정책 등을 의미하며, 이는 다자간의 환경통상협상 뿐만 아니라 당사국간의 쌍무적 혹은 일방적인 조치도 포함하고 있다

나. GR의 실체

우리가 피부로 느낄 수 있는 GR의 실체는 환경정책과 산업경쟁력의 관계에 존재하고 있다고 볼 수 있는데, 이는 무역과 환경부문 논의의 핵심이다 만약 환경정책

이 산업경쟁력에 큰 영향을 미치지 않는다면 현 세계무역체제의 교란없이 지구환경문제를 비롯한 여러가지 환경문제를 해결할 수 있을 것이다 그러나, 환경정책의 강화 내지 환경관련 경제적 수단의 도입이 자국의 산업경쟁력에 영향을 미칠 것이라는 우려는 결국 환경문제 해결을 위한 국제적 공조체제를 어렵게 만들고 있다 예컨대, 무임승차자(Free-rider)의 문제가 발생할 수 있다 따라서, 지구환경문제의 사안에 따라서는 무임승차자의 문제를 방지하고 국제환경협약의 실효성을 제고하기 위해 무역규제가 불가피하게 된다 이외에도 선진 각국은 자국의 환경정책 강화가 대외경쟁력을 약화시킬 것에 대비하여 국경세 조정(EU), 환경상계관세(미국) 등 자구적인 대응수단을 모색하고 있다 또한 이들은 현행 GATT/ WTO의 규정상 인정되고 있지 않는 '환경덤핑(Eco-dumping)' 을 규칙화 해야 한다는 것이며, 이는 선진국과 개도국간의 찬반이 엇갈리는 큰 쟁점으로 부각되고 있다.

2. GR관련 무역규제 수단

선진국들이 GR을 통해 지구환경보전을 명분으로 내세워 무역규제를 하려는 수단에는 여러가지 방법들이 있다 이들은 여러 형태로 분류가 가능한데, 기능별로 분류하면 직접 규제수단과 경제적 규제수단으로 구분할 수 있다.

가 직접 규제수단(Regulatory Instruments)

직접 규제수단이란 정부 또는 공공기관이 기준을 설정하여 오염물질의 배출을 제한하거나 생산기술, 오염방지기술을 규제하여 오염물질 배출행위에 직접적으로 개입함으로써 환경오염을 감소시키는 수단을 지칭한다(표 41)

표 41. GR관련 직접 규제수단 형태

형 태	내 용
제품과 성분의 사용규제 및 금지	· 환경오염을 유발할 수 있는 특정제품 및 물질의 생산, 사용 및 유통을 제한하거나 완전 금지시킴
생산공정 및 방법(PPMs) 규제	· 환경오염을 유발하는 생산공정에 대한 규제 조치
강제규범(기술규정, 표준 등)	· 제품, 공정, 배출 및 환경기준 등 광범위한 부문에 대해 규제기관이 설정하는 기술적 규정과 표준
자원사용량 할당	· 재생가능한 자원의 보전과 오염을 억제하기 위해 정부가 자원 사용량 쿼터를 정함
정보공개 의무	· 유해물질 배출자료 제출의무, 환경영향평가 시행의무, 검사 및 인증절차 관련자료 제출의무 등을 지칭함
사전통보 승인절차	· 유해제품, 폐기물, 멸종위기 동식물의 수출입 또는 사용을 통제, 금지하기 위해 취한 조치를 국제적으로 사전 통보함

나 경제적 규제수단(Economic Instruments)

경제주체의 환경 의사결정 과정에 비용과 수입개념을 적용시켜 가격 메카니즘 내에서 환경의사결정을 하도록 유도하는 규제수단으로서 오염자의 자율적이고 신속적인 대응을 유도할 수 있다는 특징을 지니고 있다.

(1) 환경상계관세(Environmental Countervailing Duties)

환경상계관세 혹은 환경관세(Eco-duties)는 자국상품과 외국상품간의 환경비용의 격차를 해소하려는 목적으로 수입품에 부과하는 일종의 수입관세이다. 환경관세는 환경기준이 낮은 국가에서 생산된 수입품이 일종의 ‘숨은 보조금(Hidden Subsidies)’을 받고 있다고 간주하여, 각국의 환경기준 준수에 따른 생산비액의 차이를 상계하려는데 그 목적이 있다. 그러나, 이에 대해 미국을 중심으로 수년간 논의되어 왔지만 환경관세가 환경규제의 차이에서 발생하는 경쟁력 불균형을 치유하는데 실제로 사용된 예는 아직 없다.

(2) 국경세 조정(Border Tax Adjustments)

국경세 조정은 각국이 나름대로 부과하는 조세의 종류 및 세율이 상이함으로 인해 교역제품에 대해 이중과세가 부과될 수 있는 바 이에 따른 경쟁여건의 부당한 차이를 해소하기 위한 목적으로 적용되고 있다. 통상 이것은 국내 동종상품에 상응하여 수입품에 대해 부과하거나 수출품에 대해 환급(Rebate)될 수 있는 내국세의 종류 및 그 적용양식 등을 내용으로 하고 있다. GATT/WTO 규범하에서 간접세로 간주되는 환경제품세(사용될 때 혹은 소비된 후 오염을 야기하는 휘발유, 자동차, 화학물질, 살충제 등의 제품에 부과)는 국경세 조정의 대상이 되는 반면 직접세로 간주되는 환경공정세(환경을 오염시키는 생산공정 및 시설에 부과)는 허용되지 않는다. 따라서, 국내 환경제품세는 동종 수입품에 부과될 수 있고 수출품에 대해서는 환급이 가능하다. 반면 환경공정세는 동종 수입품에 부과될 수 없으며 수출환급도 불가능하다. 한편 경제적 수단의 국내적 사용과 연계된 국경세 조정은 국내 환경규제와 연계된 환경상계관세에 비해 상대적으로 시행이 용이하다.

3. GR관련 국제기구동향

가 GATT/WTO

GATT는 1994년 4월 마라케쉬에서 결의한 “무역과 환경에 관한 결정문”에 따라 세계무역기구(WTO)산하에 무역환경위원회(CTE)를 설치하고 7개의 무역·환경 논의 의제를 설정하여 토의를 진행중에 있다. 이를 항목별로 보면 ① 환경목적의 무역규제(다자간 환경협약 포함)와 다자간 무역체제, ② 환경목적의 부과금, 국경세 조정 및 기준, 포장, 라벨링 등과 다자간 무역체제, ③ 국내환경대책과 환경목적 무역규제의 투명성 제고, ④ 개도국에의 배려(수출시장에 대한 개도국의 접근 개선 및 재정·기술지원), ⑤ WTO와 다자간 환경협약 분쟁해결 기능의 조정·분쟁처리 등의 의제를 분야별로 논의하고 있다.

WTO/CTE는 1995년, 1996년간 연속회의를 통해 환경보전과 국제무역의 연계에 관한 보고서를 작성하여, 1996년 12월에 개최될 제 1차 WTO 각료이사회에 보고서를 제출할 예정이다. 동 보고서가 향후 무역과 환경문제의 연계에 관한 국제 규범화의 시금석이 될 것으로 보인다.

나. 경제협력개발기구(OECD)

1991년 경제협력개발기구(OECD) 무역위원회와 환경위원회가 공동으로 무역·환경 연계 논의를 검토하기 위해 '무역환경 전문가 회의'를 구성하였다. 동 전문가 회의에서 1993년에 수립된 무역·환경에 대한 OECD 절차적 가이드라인을 OECD 각료 이사회가 승인한 바 있다. 1995년 5월에는 OECD 절차적 가이드라인을 구체화하는 구체적 가이드라인을 수립하여 OECD 각료이사회에 보고하여 승인을 받았다. 그리고 이 각료이사회는 승인된 구체적 가이드라인을 보완하여 1997년 각료이사회에 그 작업결과를 보고하도록 지시하였다.

현재 OECD에서 작업하고 있는 10개 작업 내용은 ① 무역·환경 정책 및 협정의 조사, 심사 및 동향파악을 위한 방법론, ② 무역자유화의 환경에 대한 영향, ③ 생산공정 및 생산방법(Process and Production Methods, PPMs), ④ 환경보전을 위한 무역 규제의 사용, ⑤ 라이프 싸이클 관리 및 무역의 개념, ⑥ 환경기준의 조화, ⑦ 경제적 수단, 환경보조금과 무역, ⑧ 환경정책, 투자 및 무역 등이다.

OECD의 결정은 선진국 입장을 종합·대변하는 것으로 향후 무역·환경연계에 대한 국제적 논의에 상당한 영향을 미칠 것으로 예상된다.

다 UN

UN은 무역과의 연관성 보다는 지구환경에 대한 위기의식에서 출발, 주로 「환경보전」 측면에서 논의를 진행하고 있다. 1992년 6월에 개최된 유엔환경개발회의(UNCED)는 환경보전을 목적으로 하는 무역규제가 자의적 또는 부당한 차별적 조치나 위장된 수단을 포함해서는 안된다는 것을 명시하였고, 「의제 21」에서는 환경 규제기준의 차이에 따른 생산비 격차에 대한 무역규제는 부당하며 또한 국가간 또는 지구적 차원의 환경문제 해결을 위한 무역규제도 가능한 국제적 합의에 기초해야 한다고 규정하였다.

라. 국제표준화기구(ISO)

국제표준화기구(ISO)는 국제적 차원에서 기업의 환경보전을 유도하기 위한 노력의 일환으로 국가별로 상이한 환경관련 규격들을 통일하여 상품 및 용역의 거래시 환

경인증을 주는 작업을 추진하고 있다. 1993년 6월에 환경관련 기술위원회(TC207)를 발족시켜 환경관리체계, 환경감사, 환경라벨링, 환경성과평가, 전과정평가 등 7개 환경 규격의 국제적 표준을 제정하는 작업을 시작하였다. 현재 환경경영체제(EMS)에 대한 국제규범이 마련되어 1996년 7월 부터 시행될 예정이며, 환경라벨링(EL)등 기타 작업 과제는 1997년 말까지 규격제정을 완료할 예정이다

주요 현안과제는 환경기술이나 관리체계면에서 앞서 있는 선진국의 주도로 작업이 진행되고 있어서 개도국과 선진국의 이해가 상충되고 있으며, 중소기업의 경우 체제정비와 비용부담면 등에서 어려움이 예상되고 있는데도 불구하고 기업규모와 관계없이 일률적인 체제를 적용시키는 문제점, 그리고 기존 품질인증제도인 ISO 9000 과의 조화문제 등이 지적되고 있다.

4. 주요 논의내용과 쟁점사항

가. 주요 논의내용

향후 GR에서 논의될 주요의제는 다음과 같은 내용을 포함할 것으로 예상된다

첫째, 국가간 환경기준 또는 기술기준의 차이와 관련한 무역규제이다 이는 크게 보면 국가별 환경규제 기준의 준수 차이에서 비롯되는 제품생산비의 차이에 대하여 상계관세를 부과하자는 논의와 제품의 환경기술 기준을 강화하여 무역규제 수단으로 활용(자동차 배기가스 기준등)하자는 논의로 대별하여 볼 수 있다

둘째, 특정물질 또는 생산방식의 규제에 의한 무역제한이다 현재 CFCs, 특정 화학물질 등 환경적으로 유해한 제품 및 성분의 생산·사용을 근거하여 무역을 규제 또는 금지하는 추세에 있다 또한 「제품」 자체가 환경에 유해한 경우 뿐만 아니라 제품의 PPMs가 환경에 유해한 경우에도 무역규제를 가하려는 움직임이 예상된다

셋째, 환경관련 제품의 표준 및 인증제도에 의한 무역규제이다 현재 국제표준 화기구(ISO)는 제품의 생산에서 부터 폐기에 이르는 전과정의 환경영향과 기업의 환경경영체제를 포괄하는 ISO 14000시리즈를 제정 중에 있다 향후에는 환경친화적인 상품에 대한 환경라벨링의 부여기준이 강화되고 대상품목을 확대, 소비자의 환경인식에 따른 실질적인 수입제한 요소로 작용할 것이다

넷째, 포장폐기물 관리강화로 인한 무역규제이다 이는 국가별로 제품의 포장

재질과 방법을 규격화하여 자국의 규격에 부적합한 경우 무역규제 수단으로 작용할 것이다. 현재 제품의 제조·유통업자에게 포장폐기물의 회수·재활용 의무를 부과하는 추세에 있으며 수입업자에 대한 무역규제 효과가 발생할 것으로 보인다

다섯째, 경제적 수단의 사용확대로 인한 무역규제 효과이다 직접규제수단을 보완하기 위해 시행되는 환경관련 부과금·세금 등 경제적 수단은 국경세 조정 형태로 수입품에 부과되며 또한 제품자체 뿐만 아니라 생산공정에 대해서도 국경세 조정문제가 제기될 것이다.

나 주요 쟁점사항

지금까지의 국제적 논의 동향을 살펴보면, 무역과 환경문제에 관한 국제적인 논의에서 제기될 수 있는 주요 쟁점사항은 다음과 같이 예상할 수 있다

첫째, 무역자유화를 추구하는 GATT/WTO의 기본원칙과 환경보전을 위한 무역규제와의 법률적·제도적 조화문제이다 이는 환경을 이유로 한 무역규제와 GATT/WTO의 무역자유화원칙간의 상충문제로서 GATT/WTO 체제내에서 어느 정도까지 환경목적의 무역규제를 수용할 것인지에 대한 논란이 예상된다

둘째, 환경목적으로 무역규제를 시행할 경우 다자간 합의에 의해야 하는지 또는 필요에 따라 일방적 무역규제도 인정해야 하는지 여부이다 현재 미국등 일부 선진국은 지구환경보전을 위한 국제환경협약의 이행 또는 자국의 환경보전을 명목으로 하는 개별국가의 일방적 무역규제의 필요성을 주장하고 있으며, 반면에 GATT/WTO 및 개도국은 이에 대해 반대입장을 표명하고 있다

셋째, 선진국과 개도국간의 현저한 입장차이를 조정하는 문제이다 선진국은 기본적으로 무역규제가 효과적인 환경보전 수단이라는 입장에 있으며, 반면에 개도국은 환경파괴에 대한 선진국의 역사적 책임을 고려할 때 무역규제 보다는 재정·기술적 지원이 중요하다는 입장을 표명하고 있어서 상호 이해가 대립되고 있다.

제 2절 우리산업에 미치는 영향

환경관련 무역규제에 따른 파급효과는 일반적으로 경제개발단계와 산업구조 및 환경의 수준에 따라 다를 것이며, 산업 및 업종별로도 크게 상이할 것으로 보인다

우리나라의 경우 현재의 경제개발단계 및 산업구조를 고려하여 볼 때 GR 등 국제환경 정책의 강화가 단기적으로는 우리경제 및 산업 전반에 걸친 경쟁력 약화와 수출 감소를 초래할 것으로 예상되지만, 중장기적으로는 환경기술의 개발 및 체화를 위한 노력여하에 따라 오히려 국제 경쟁력이 강화될 것으로 예상된다(표 42).

표 42. GR이 우리나라의 무역 및 산업경쟁력에 미치는 영향 (자료: 통상산업부)

구 분	영 향
<p>무역에 미치는 영향</p>	<ul style="list-style-type: none"> · 우리나라는 대외의존도가 높아 관련산업 위축이 수출감소로 직결됨 · 환경비용의 내부화를 위한 국제규범(환경상계관세제도 등)이 설정되는 경우 우리산업의 수출경쟁력 약화가 심화될 우려가 있음 <ul style="list-style-type: none"> - 우리나라는 아직 선진국에 비해 환경기준이 낮고, 기술개발 투자 등 환경관련 투자규모도 작기 때문에 국제환경규제가 강화될 경우 수출에 큰 제약을 받게 됨 · 환경관련 무역규제들은 최근들어 급속한 속도로 진전되고 있기 때문에 수출업계에 대하여는 규제내용 및 정보의 파악과 대책마련에 어려움이 가중되고 있음 <ul style="list-style-type: none"> - 특히, 무역규제들은 선진국을 중심으로 청정기술 및 대체기술의 개발과 연계되어 채택되고 있기 때문에 관련분야에서의 기술수준이 낮은 우리나라로서는 주요 교역상대국인 선진국 시장에서의 접근이 점차 어려워질 가능성이 있음
<p>산업 경쟁력에 미치는 영향</p>	<ul style="list-style-type: none"> · 환경정책의 강화에 따른 원가부담의 증대 <ul style="list-style-type: none"> - 몬트리얼 의정서 및 기후변화협약 등으로 인해 CFCs등 규제대상물질을 사용하는 산업(전기, 전자, 자동차, 반도체 등)과 에너지 다소비형 산업(철강, 석유화학 등)을 중심으로 비용 상승요인 발생 · 원료 및 원자재 조달에 애로 발생 <ul style="list-style-type: none"> - 바젤협약 발효에 따라 제지, 석유화학 등 관련 산업부문에서 재활용 원자재의 적기 수급에 차질 우려 - 생물 다양성협약 등으로 인해 목재, 가구, 건설, 의약업계의 원자재 조달에 영향

1. 경제에 미치는 영향

지금까지 연구된 국내외 연구보고서들은 대체적으로 단기적으로는 부정적인 영향을 예측하고 있으며, 장기적으로는 대응여하에 따라 긍정적인 견해를 보이고 있다

OECD 국가가 석유배럴당 10달러의 탄소/에너지세를 도입할 경우 미국 경제연구단체인 DRI 연구소가 우리경제에 미치는 영향을 분석한 결과를 보면 국내총생산(GDP)은 매년 0.4% 그리고 수출은 연평균 0.5% 감소, 수입가격은 2.5% 그리고 소비자 물가는 0.7% 상승하며, 매년 92,000명의 고용감소가 예상된다

산업연구원의 분석에 의하면 선진국들이 상계관세를 부과할 경우 우리나라의 제조업부문은 연간 평균 2.7%의 수출 감소를 가져올 것으로 보인다. 품목별로는 화학(7.5%), 철강·금속(10.1%), 제지산업(9.0%) 등 에너지 다소비업종의 수출감소폭이 클 것으로 보인다(표 43)

표 43. 상계관세 부과시 산업별 수출감소율(%) (자료 산업연구원)

품 목	對 미국	對 일본	對 EU	합 계
화학제품	6.3	8.7	6.4	7.5
종이제품	8.3	10.7	8.1	9.0
석유류	1.7	1.7	2.1	2.0
철강 금속제품	6.8	13.9	4.8	10.1
전기·전자	1.0	1.3	0.8	1.0
자동차	1.2	1.3	1.2	1.2

반면에 국내업계의 환경산업·시장개척 및 기술개발 촉진도 기대할 수 있다. IFC의 분석에 의하면 세계 환경시장의 규모는 1991년의 3,000억달러에서 2000년에는 6,000억 달러로 연평균 5.5%로 성장할 것으로 전망된다. 한편, 우리나라의 환경시장 규모는 1991년에는 8,000억원 정도에 불과하였으나 '90년대 중반에는 2조원, 그리고 2000년에는 5조원으로 성장할 것으로 예상된다. 또한 우리나라는 배연탈황·탈질기술, 대기오염 측정장비기술, 오·폐수 탈질·탈인기술, 난분해성 산업폐수처리기술, 소음·진동방지 기술 등이 개발되어 사업화될 것이며 저오염 공정기술(Cleaner Production Tech), 환경상품 생산기술(Green Products Production Tech), 자원 재이용 기술(Recycling, Recovery and Reuse) 등 청정기술(Clean Tech.)의 기술개발이 기대된다.

2. 산업에 미치는 영향

가. 환경정책과 산업경쟁력의 관계

GR의 실체라 할 수 있는 환경정책과 산업경쟁력의 관계를 거시적인 측면에서 살펴 보면, OECD 국가의 경우 환경규제의 준수비용(Compliance Cost)이 전체산업의 비용에서 차지하는 비중이 1-2% 정도에 불과하기 때문에 경쟁력과 무역에 미치는 영향이 미미하다. 오히려 환경정책에 의해 산업경쟁력이 제고될 수도 있다. 즉, 환경정책은 원료절감을 유도하며, 청정기술의 개발 및 생산의 효율성을 제고하며, 폐기물 감량화 및 재활용을 촉진시킨다. 결과적으로 환경과 관련하여 마케팅면에서 우위를 갖는 환경제품(Green Products)을 생산케 하고, 환경적 재화 및 용역을 생산하는 지원산업을 발전시키며, 일찍이 환경기술에 투자한 기업에 선구자의 이익(Front-runner Advantage)을 가져다 준다.

그러나, 미시적인 측면에서 볼 때 환경정책은 특정 산업 및 기업의 경쟁력에는 상당한 영향을 미칠 수가 있다. 특히 석유화학, 펄프·제지, 광업 등 공해 혹은 자원 집약적인 산업에 있어서는 환경정책의 부정적인 영향이 상당히 크게 나타날 수가 있다. OECD 국가의 경우, 이들 산업에서의 환경규제 준수비용은 총비용의 2%를 상회하며 또한 환경투자의 18-20%를 차지하고 있다. 특히 노동, 자본, 기술 등에서 경쟁력의 열세에 있는 산업 및 기업들에 대해서는 환경규제가 상당한 영향을 미칠 수 있다. 한편, 특정산업에 대해서는 환경규제가 오히려 경쟁력에 긍정적인 영향을 줄 수도 있다. 일반적으로 공해와 자원고갈은 경제적 폐기물과 자원의 비효율적 사용을 의미하지만, 환경규제는 기업으로 하여금 자원을 효율적으로 이용하게 하고 생산비를 절감케 하여 비용상의 비교우위를 창출할 수 있도록 한다.

나. 국제 환경협약이 미치는 영향

CFCs, Halon 등 오존층 파괴물질의 사용을 규제하는 '몬트리얼 의정서'에 따르면 CFCs의 경우에는 1994년 부터 1988년 실적의 75%를, 1996년 부터는 1988년 실적의 100%를 감축해야 하며 Halon 의 경우에는 1994년 부터 1988년 실적의 100%를 감축해야 한다. 동 협약에 의하면 관련물질의 생산 및 이용기술의 비가입국에로의 이전이 금지되고 있다.

몬트리얼 의정서와 관련하여 CFCs는 냉매, 세척제, 발포제 등으로 광범위하게 사용되는 주요 원자재로서 가전(냉매, 발포제), 반도체(세척제), 정밀기계(세척제) 업종의 생산차질 및 관련제품의 가격경쟁력 약화로 인한 수출감소가 예상된다. CFCs 등 규제물질의 사용량 제한으로 관련산업의 생산차질은 1992년의 경우 약 2조원 규모, 1995년에는 약 3조 6,300억원의 규모에 이를 전망이다. CFCs대체물질의 개발도 현재는 실험 제조단계에 불과해 앞으로 기존 냉매의 사용이 전면 금지될 경우 전량을 비싸게 수입해야 하는 것은 물론 수출에서의 가격경쟁력도 상당히 타격을 받을 것으로 보인다 (표 44)

표 44 국제환경협약이 국내산업에 미치는 영향

업종	관련협약	영향 및 대응
반도체	몬트리얼 의정서	· 제조공정에 있어서 공정용, 세정용 등으로 규제물질인 CFCs를 대량 사용
가전기기	몬트리얼 의정서	· CFCs를 대량으로 사용하는 냉장고, 에어컨 등이 많은 영향을 받음
화학	몬트리얼 의정서 기후변화협약 바젤협약 생물다양성협약	· 에너지 다소비업종이면서 연료, 플라스틱, CFCs 등 오염유발물질을 생산하는 공해산업이기 때문에 여러 환경협약으로부터 영향을 받음
비철금속	기후변화협약 바젤협약	· 비철금속산업은 에너지 소비비중 및 스크랩 등을 이용한 재활용 비중이 높음
철강	기후변화협약	· 에너지 다소비업종으로 CO ₂ 배출축소가 불가피함
섬유	기후변화협약	· 염색가공분야에서 에너지 소비를 줄일 수 있는 저온염색기술의 개발이 필요
조선	해양오염방지협약	· 해난사고에 의한 해양오염을 줄이기 위해 이중 선체구조 또는 중간갑판구조를 채택
제약	생물다양성협약 야생동식물보호협약	· 약재로 사용되는 동식물이 규제대상일 경우, 대체약재의 개발이나 국내사육촉진 등의 대응책이 강구되어야 함
자동차	몬트리얼 의정서 기후변화협약	· 연비향상 및 배출가스 축소를 위한 기술개발 필요 · 자동차, 에어컨 냉매도 CFCs 대체물질로 교체해야 함

에너지 사용억제 등을 통하여 CO₂ 등 온실가스 배출을 규제하는 「기후변화협약」에 따르면 선진국의 경우 2000년 까지 온실가스 배출량을 1990년 수준으로 축소해야 한다. 사회, 경제, 환경정책 수립시 기후변화 문제를 반영해야 하며 온실가스의 통계와 국가정책이행에 관한 보고를 주기적으로 해야 하는 의무가 있다

기후변화협약의 경우 석탄, 석유 등의 화석연료 의존비율이 80%가 넘는 우리나라의 경우 LNG 등 청정연료로 대체하기 위한 비용증가로 철강, 비철금속, 시멘트, 석유화학, 제지 등 에너지 다소비업종의 경쟁력 약화가 예상된다. 반면에 오염방지시설업, 에너지·건설업, 에너지 이용기기의 제품개발 등의 부문에서는 신규사업 기회의 창출이 예상된다

폭발성, 인화성, 중독성 등 13개 유해폐기물 47종(18개 산업폐기물, 27개 중금속, 2개 생활폐기물)의 교역을 제한하는 '바젤협약'은 폐기물 발생의 최소화 및 관련물질의 국내처리 시설의 확보를 요구하고 있다

바젤협약의 경우 고철, 파지, 납, 플라스틱 등 유용 폐기물의 구입난으로 비철금속, 제지, 화학, 철강업종의 생산위축 및 가격상승이 예상된다. 우리나라는 미국, 독일 등 52개 가입국 이외의 국가와는 폐기물 수출입이 전면 금지되고 협약가입국과도 두나라 정부의 승인 없이는 수출입을 할 수 없게 되며 수출입 업자는 수출입시 본선 인도가격(FOB)의 2/1000를 수수료로 납부해야 한다.

생물다양성협약과 삼림원칙도 향후 의정서 형태로 구체화될 경우 생명공학기술을 이용하는 제약, 식품, 화학공업, 제지산업 등이 영향을 받을 것으로 예상된다

특히, 목재산업의 경우 우리나라는 수입의존도가 90%가 되기 때문에 향후 목재 수입 비용부담의 증가가 예상된다

런던덤핑협약의 경우 1996년 부터 모든 폐기물의 해양투기를 금지시킨다는 방향으로 협약이 강화될 전망이다. 따라서 국내 폐기물 관계법의 강화가 예상된다. 국내 폐기물 처리업체중 해양투기 위탁처리업체의 경우 도산될 위기에 놓여 있으며, 또한 폐기물 처리비용의 상승을 가져와 기업의 경제적 부담이 점차 늘어날 전망이다. 또한 불법유출 방지조치에 따른 농업, 축산업, 의약업 등 유전자원 관련산업에도 영향을 미칠 것으로 보인다.

멸종위기에 처한 야생동식물의 포획, 채취와 이의 국제교역을 규제하는 「CITES」는 관련동식물 수출입의 사전허가제를 규정하고 있다. 동 협약의 경우 우리나라는 1993

년 7월에 가입하였으며 정부는 협약 수용을 위한 국내법을 정비하였다 이에 따라 우리나라는 한약재 원료의 수입 및 밉크·여우 등 모피관련 산업에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다.

다. 선진국의 개별규제가 미치는 영향

미국은 1990년 10월 「신대기정화법」에 의해 자동차 등 유해가스 배출원에 대해 오염방지장치 장착과 저공해 및 개량휘발유의 생산을 의무화하고 있다. 대기정화 기준, 자동차 배기가스 배출기준, 유독오염물질, 산성비 억제 대책 등 8개 부문으로 구성된 동법의 규정들은 미국 산업계 뿐만 아니라 교역상대국의 수출품에도 동일하게 적용된다 예를 들어 자동차의 경우 1996년부터 미국시장에서 판매되는 모든 차량은 강화된 배출가스 기준을 적용받으며, 엔진의 연비도 현재 갤런당 27.5마일에서 최소한 40마일로 개선되어야 하며 이 기준에 미달하는 경우에는 0.1마일당 5달러의 부과금을 부담해야 한다

1996년 부터 실시되는 미국의 배출가스 규제기준 및 엔진의 연비기준 강화로 자동차 업계의 수출감소가 예상된다 현재 미국에서 시판되고 있는 현대자동차 소나타의 경우 연비가 갤런당 20-24마일인 점을 감안하면 현재의 시장점유율을 유지하는데 만도 엄청난 기술개발 비용이 소요된다.

독일은 1991년 '포장쓰레기법'에 의거 생산자(수출자) 또는 유통업자(수입상)가 자사제품에서 발생하는 각종 포장쓰레기를 직접 수거토록 하였다 또한 재활용을 위한 회수 및 처리시설을 의무화하고 있다. 이와 관련하여 'Topfer 법령'에 의하면 각 기업, 도매상, 소매상들은 Dualer Systems Deutschland (DSD)라는 회사에 「Green Dot」 로고를 받는 대신에 일정 금액을 지불하게 되며, 이 로고가 붙은 제품에 대해서는 DSD가 포장쓰레기를 책임지고 수거하여 재생하는 곳으로 보낸다 또한 독일은 1994년 부터는 폐기물회수 처리의 대상품목을 전기·전자제품으로 확대하였으며, 1995년 부터는 자동차도 포함시키고 있다

독일의 생산제품의 폐기물 회수 및 재활용 의무화, 포장재회수 의무화 규제의 시행으로 전기, 전자, 자동차업종의 폐품회수 및 처리비용을 부담으로 원가상승에 의해 수출의 타격이 예상된다 특히 폐차문제와 관련하여 독일은 1996년 부터 철강제품의 100%, 비철금속의 85% 등 부품의 재활용 비율을 규정, 자동차 생산업자로 하여금 이

를 준수토록 하는 한편 폐기가 불가능한 부품도 최대한 소각한 후 매립토록 하고 있다(표 45).

핀란드, 네델란드, 스웨덴 등 북유럽 국가들은 1986년 부터 에너지의 생산, 이용 과정에서 발생하는 CO₂, SO₂의 단위량이나 화석연료에 세금을 부과하는 에너지·탄소세를 도입하였으며, 이밖에 미국, 독일, 일본 등에서도 에너지·탄소세의 도입을 검토 중이다. 철강, 석유화학, 자동차 등 에너지 다소비업종의 생산 및 수출에 영향을 미칠 것으로 예상된다

표 45 선진국의 개별적 규제내용 및 영향

규 제 명	시행국가	시행일시	규 제 내 용	영 향
신대기 정화법	미국	'96년	· 자동차의 배출가스 규제기준 강화 · 엔진의 연비기준 강화 (현재 갤런당 27.5마일 → 최소 40마일)	· 국내기술수준이 낮아 규제기준 준수에 어려움
CFCs경고 표시	미국	'93년 5월	· 오존층 파괴물질 사용, 혹은 함유제품의 경고라벨 부착 의무화	· 칼라TV, 반도체, 냉장고, 에어컨 등 전기전자 제품의 수출감소
포장쓰레기 규제법	독일	'91년 6월	· 생산자(수출자), 유통업자(수입상)가 자사제품에서 발생하는 각종 포장쓰레기를 직접 수거토록 함	· 폐품회수 및 처리비용의 부담에 의한 원가 상승
폐전기전자 처리법	독일	'94년	· 포장쓰레기법에 의거 1994년부터 폐기물 회수, 처리의 대상 품목을 전기전자제품으로 확대 · 1995년부터는 자동차도 포함 시킴	· 원가상승으로 전기전자제품 및 자동차의 가격 경쟁력 약화

다. ISO 14000이 미치는 영향

향후에는 ISO 14000 인증의 취득여부가 곧 제품 및 기업의 환경이미지와 직결되며 국가간 통상에 있어 새로운 무역장벽으로 대두될 것으로 보인다(표 46) 이에 대한 철저한 대비를 할 경우 국제무역의 기회 증대, 기업 및 제품에 대한 소비자의 인식 제고, 환경관련 제품, 시장 및 기술개발 촉진 등 긍정적인 효과를 기대할 수 있다. 그러나, 동 인증의 미 취득시 선진국의 무역장벽화, 기업 이미지 실추, 환경관련 제품, 시장 및 기술개발 기회상실 등 부정적인 효과가 나타날 것이다

또한 지구환경보전 및 개선을 위한 산업계의 자발적인 참여가 요구되며 기업들은 지속적인 환경개선노력에 관한 환경정보를 기업의 이해관계자들에게 공개하여야 할 것이다

표 46 ISO 14000의 파급효과

항 목	긍정적 효과	부정적 효과
환경법규	<ul style="list-style-type: none"> 조직의 자율관리 강화에 따라 행정상의 법규적용 감소 관료적이고 사무적인 각종 불필요한 요구의 최소화 	<ul style="list-style-type: none"> 국내법 개정시 혼란 예상
국제통상	<ul style="list-style-type: none"> 국가간 규격통일로 규격을 단일관리할 수 있어 국제통상업무를 간소화(특히, 다국적 기업) 	<ul style="list-style-type: none"> 선진국의 무역장벽화
기업이미지	<ul style="list-style-type: none"> 기업의 성실성과 신뢰성의 국제화 	<ul style="list-style-type: none"> 인증 미취득시 기업 이미지 실추
환경제품·시장	<ul style="list-style-type: none"> 환경관련 제품생산 및 시장점유 확대 	<ul style="list-style-type: none"> 환경관련 제품 및 시장상실
환경기술	<ul style="list-style-type: none"> 관련기술 개발 가속화 	<ul style="list-style-type: none"> 기술장벽에 의한 산업 활동 위축

제 3절 우리산업의 현황과 나아갈 방향

1. 선진국의 동향

선진국은 그동안 많은 투자를 통해 개발된 첨단환경기술의 시장을 극대화하기 위한 전략으로 환경관련 국제규제를 강화하고자 하고 있으며(Greening of Merchantalism), 환경규제의 강화로 인한 자국의 경쟁력 손실을 보전하기 위한 보호주의적 제도적 장치의 마련(Greening of Protectionism)을 통해 GR에서 공세적인 입장을 취하고 있다

가. 미 국

미국은 선진국 중에서도 국제환경협약의 국내이행을 가장 많이 규제하고 있는 나라이다. 1990년에 개정된 대기정화법은 개별국의 환경규제로는 상당히 포괄적인 내용을 포함하고 있는데 이 규정들은 미국 산업계뿐만 아니라 교역상대국의 수출품에도 동일하게 적용된다. 미국의 규제는 오염물질 사전예방(Pollution Prevention)에 중점을 두고 있으며 산업계는 이를 준수하기 위해 더 엄격한 자체기준을 설정하여 운영하고 있다.

3M사의 유명한 3P운동(Pollution Prevention Pays 오염물질 사전예방은 돈벌이가 된다)은 그 대표적인 예로 들 수 있다 1975년부터 1992년까지의 시행결과 600 만 톤의 오염물질을 감소시켰으며 6억 5,000만불의 비용을 절약하였다. 1988년에는 2000년을 향한 「3P Plus Program」을 발표했다 1987년을 기준으로 오염배출량을 90% 감소시키고 폐기물의 발생량을 50% 감소시킴으로써 궁극적으로 무방류시스템(Zero Discharge System)을 지향하고 있다

듀폰사는 1989년 최고경영자가 기업환경주의를 선언한 이래 「전사환경계획 프로그램」을 운영하고 있다 각 사업부에서 실행과제를 위한 제안을 받아 그 제안을 수행하기 위한 총 비용의 20% 이내의 범위에서 오염물질을 80% 이상 감소시키는 제안들을 실행과제로 채택하고 있다 제품별로는 전과정평가를 1993년에 32% 실시했으며 1995년까지 100% 실시할 계획이다(제품당 5만불 소요)

미국은 국가주도로 산업구조조정을 하는 것이 아니라 자유경쟁체제를 바탕으로

산업계의 자생력을 키우는 철저한 기업의 생존경쟁원칙을 추진하고 있다. 정부는 환경기준강화에 중점을 두고 이를 준수하지 못하는 기업은 자연도태되는 적자생존의 원리에 의거한 자율적인 산업구조조정을 통해 경쟁력을 갖는 기업을 육성하는 정책을 펴고 있다. 즉 미국은 기술의 우위와 경제규모의 우위를 최대한 활용하여 국익을 극대화하려는 전략을 추진하고 있다고 판단된다

나. EU

EU는 공해산업의 국제적 이동, 환경보전에 의한 무역에의 영향, 공해의 다국적화 등 환경문제의 국제적 중요성을 고려하여 국제협력을 바탕으로 한 정책수행을 원칙으로 하고 있다. 이런 점에서 EU는 환경요인을 감안한 새로운 국제무역규범을 설정하려는 다자간협상(협회의 GR)에 적극적이다

EU는 소비자들의 환경보전에 대한 높은 의식수준을 바탕으로 환경마크제도를 많이 채택하고 있다. 독일의 경우 1981년 1%의 시장점유율을 보이던 제품이 환경마크 부착후 40%까지 확대된 사례도 있다. 특히 정부가 우선구매를 하고 있기 때문에 사실상 개도국에 대한 일종의 비관세 무역장벽의 역할을 하고 있다

덴마크는 1981년 맥주와 음료용기의 재활용 확대를 위해 음료용기 회수제도를 도입하여 맥주 및 음료제조 회사에 대해 용기를 회수하는 장소와 설비를 갖추도록 하고 용기의 원활한 회수를 위한 계획의 수립의무를 부과하고 있다. 이로써 덴마크에 맥주나 음료를 수출하기 위해서는 덴마크의 환경청이 승인한 형상과 소재로 만든 병을 사용해야 하며 회수를 위한 많은 비용을 투자해야 했다. 이후 독일은 플라스틱 용기에 대해 강제 예탁금제도를 도입했고, 이탈리아는 플라스틱 포장을 금지하여 외국의 플라스틱 포장제품의 판매를 금지하고 있다

결국 EU는 환경마크제도를 이용하여 환경수준이 낮은 국가로부터의 수입을 규제함으로써 환경보전이라는 명목으로 새로운 무역장벽을 통해 자국의 산업을 보호하려는 전략을 취하고 있다

다 일본

일본은 국제 환경규제의 강화조짐에 대비하여 1993년에 “환경기초법”을 제정하는 등 국내 환경제도 정비에 노력하고 있다. 1994년 6월에는 통산성 주관으로 “환경산업 Vision”을 작성하였다. 환경산업 Vision은 「환경문제의 새로운 전개를 추진하는 기업활동에 있어서의 환경고려」를 주제로 한 것이다. 이 산업환경 Vision의 특색은 환경고려의 관점으로써 전과정평가(LCA)의 개념이 포함되어 있다. 구체적으로는 각 제조업과 에너지산업별로 원재료의 조달에서부터 제조단계, 유통단계, 사용단계, 동시에 폐기단계에 이르기까지 실시해야 할 환경고려의 기본방향을 제시하고 있다.

일본은 GR의 논의에 대해 미국, EU, 혹은 개도국 등과는 달리 뚜렷한 입장을 표명하고 있지는 않다. 단지 지구환경문제에 대해서는 적극적인 참여를 하고 있다. 일본은 정부가 기업에 의무를 부과하여 환경문제를 해결하려 하고 산업계는 협회 등을 통하여 자신의 의견을 국가정책에 반영하는 일본 특유의 협력체계가 잘 구축되어 있다.

일본은 산업계에서도 환경기술개발에 많은 투자를 하여 환경기술이 이미 상당한 수준에 도달해 있고 그동안 정부주도로 산업정책적인 차원에서의 노력도 경주하여 상당한 산업구조 개선도 이룩하였다. 실제 GR로 인해 가장 큰 이익을 얻을 수 있는 국가가 일본이 될 가능성이 크다. 일본은 결국 내실추구를 통해 국익을 극대화하는 전략으로 대응하고 있다고 보여진다.

2. 우리산업의 현황과 문제점

지난 30년간 우리나라는 연평균 8.5%에 달하는 고도성장으로 산업구조 고도화를 이루어 왔다. 그동안 우리나라의 산업은 농업형 1차산업 → 노동집약 경공업 → 자본집약 중화학 → 초기 기술·지식집약의 가공형 조립산업으로 변모되면서 산업의 부가가치를 높여왔다. 그러나 성장위주의 산업발전으로 양적규모는 확대되었으나 환경과 같은 질적인 성장은 도외시 되었다. 한편 수출주도의 산업위주로 성장하였지만 선진국의 수입규제에 대응하기에 급급하여 교역상대국에 대한 협상시 우리의 주장을 관철시키는 협상능력의 배양도 중요한 문제로 대두되고 있다.

가 대외적 현황과 문제점

대외적으로는 GR의 실체에 대한 인식의 부족으로 GR에 대한 기본적인 연구가 부족하고, 협상준비가 체계적으로 갖추어져 있지 못한 상태로 우리나라의 기본입장이 아직 정립되어 있지 못하다 또한 다자간 협상에 참여하는 대외 협상팀의 구성원의 연속성 및 전문성이 취약하고, 협상시 가장 현실적인 감각을 가지고 있는 산업계의 참여도가 낮은 것이 현재 우리가 안고 있는 문제점으로 지적될 수 있다

나 대내적 현황과 문제점

(1) 산업구조가 공해집약적이고 에너지 다소비형

표 47에서와 같이 공해집약적, 에너지 다소비 업종인 철강, 석유화학 및 정제, 시멘트, 제지 등이 전체 산업에서 차지하는 비중(부가가치 기준, 설비투자비기준)이 점차 증가 추세에 있고 에너지 원단위도 일본에 비해 상당히 열세인 상태이다

표 47 에너지 다소비 오염 유발업종의 연도별 비중 (단위 %)

구 분	산업구조(부가가치액)			설비투자비중		
	'85	'90	'92	'93	'94	'95
에너지 다소비 오염 유발업종	37.6	35.1	38.8	25.4	29.1	31.5
에너지 저소비 오염 저유발업종	62.4	64.9	61.2	74.6	70.9	68.5

주 에너지 다소비 오염유발업종 : 철강, 석유화학, 정제, 시멘트, 제지산업을 포함

(2) 제조업분야의 환경설비투자가 미흡

환경설비투자가 정부의 환경규제에 어쩔 수 없이 수동적으로 따라가는 소극적 투자에 불과하고, 전체설비투자에 대한 오염방지 설비투자의 비중을 보면 선진국이 4~5% 수준인데 반해 우리나라는 2%에 불과한 실정이다 또한 이 환경설비투자도 대부분 사후처리(End-of-Pipe) 설비투자이고 청정생산 설비투자의 비중은 극히 미약한 실정이다 특히 중소기업의 경우 환경설비에 투자하는 금액이 대기업의 1/5수준에도 못

미치고 있다(표 48)

표 48 년도별 오염방지 설비투자 비율

(단위: 10억원, %)

구 분	1990	1993
제조업 설비투자(A)	16,227	15,008
오염방지 설비투자(B)	267	335
오염방지 설비투자 비율(B/A)	1.6	2.2

출처 . 산업은행, 설비투자 계획조사

(3) 환경경영체제에 대한 인식 부족

환경친화적인 기업경영에 대한 산업계의 인식이 아직 확산되어 있지 않다. 중소기업의 경우는 아직 개념정립조차 되어 있지 않은 상태이고 대기업도 명확한 환경 경영에 대한 이해가 부족하다. ISO 14000으로 대표되는 환경경영은 환경에 대한 조직의 대응체제와 제품의 영향을 정량적으로 평가하는 것으로 조직과 제품을 축으로 환경과 관련된 모든 요소를 경영에 반영시키는 것이라 할 수 있다. 그러나 구체적으로 실행해야 할 추진항목과 계획을 수립하고 있는 기업은 국내에서는 별로 없는 것이 현실이다.

현재 국내에서도 공진청이 주관하는 KS 14000과 환경부가 주관하는 환경친화기업제도를 시행하고 있으나 산업계가 모두를 수용하기가 쉽지는 않다. 많은 부분이 중복되면서도 각기 요구하는 바가 다르고 기업의 비밀 유지라는 측면에서 제출하기 어려운 자료를 요구하는 경우도 있기 때문이다. 산업계가 양자를 수용할 수 있도록 좀 더 정부차원에서의 검토가 필요한 것으로 생각된다.

(4) 환경관련 사회기반체제 및 규제완화 미흡

환경에 유해한 폐기물(일반폐기물, 산업폐기물)을 처리할 수 있는 사회기반이 구축되어 있지 않다. 무엇보다도 중요한 것은 폐기물을 처리할 수 있는 회수·운반체제와 관련된 사회기반 구축이 전혀 이루어지지 않은 것이 가장 큰 문제로 보여진다. 교통체증으로 인한 물류비용의 증가와 인건비의 상승, 님비현상으로 인한 중간 집하

장 및 처리장 부지매입 곤란 등 환경산업에 참여할 수 있는 여건조성도 미흡하고, 폐기물을 처리하는 설비의 구축은 가장 기본적이면서도 중요한 요소이나 현재 국내에는 생산성 향상을 위한 자동설비를 갖춘만한 물량의 확보가 어려워 경제성을 갖춘 처리업체가 별로 없다.

한편 환경산업을 위한 규제의 완화도 필요한 것으로 보여진다. 환경규제치의 완화를 의미하는 것이 아니라 규제치는 강화를 하더라도 행정절차는 완화 및 간소화할 필요가 있다. 예를 들어 산업계에서 자체처리를 위한 설비의 신축시 부지는 내무부, 환경설비는 환경부의 허가를 득해야 하는데 공장 신축허가 심사시에 이를 통합 관리하는 방안도 고려해 볼 수 있을 것으로 생각된다. 또 공장이 설립될 수 있는 입지조건임에도 불구하고 특정물질을 배출하는 설비는 설치할 수 없는 조항은 수정될 필요가 있다고 보여진다. 운영에 대한 규제의 완화대신 법규제치를 위반할 경우에는 엄격한 처벌조항을 적용한다면 법규내에서 산업계의 자율성을 최대한 보장할 수 있을 것이다.

(5) 산업간 협력체계 미흡

각 산업별로는 나름대로 환경오염을 줄이기 위한 방안들을 강구하고 있으나, 체계적인 산업간 협력체계는 미흡한 현실이다. 제품생산을 위한 소재산업의 경우 계열사가 많은 대기업은 일부분 협력체계를 이루고 있으나 중소기업이나 특정분야의 전문업체들이 필요로 하는 환경친화적 소재의 경우는 경제성이 없다는 이유로 개발의 우선순위에서 뒤쳐지고 있다.

그리고 보다 중요한 산업간 협력체계는 한 산업에서 버려지는 폐기물을 다른 산업의 원료로 사용할 수 있는 협력체계의 구축이 무엇보다 절실히 요구된다. 국가전체로 보면 이 방법이 자원의 활용도를 높이는 동시에 폐기물 발생량을 줄이는 가장 효과적인 방법이기 때문이다.

(6) 환경기술수준 낙후

우리나라의 환경기술수준은 발생된 오염처리에 치중하는 1세대 수준에 불과한 한편으로 오염물질 발생 저감, 저공해 공정의 개발, 무공해 제품의 생산 등 2세대 청정

기술의 개발은 이제 막 시작한 수준이다 분야별로는 대기·수질이 상대적으로 높은 반면, CFCs 대체, CO₂ 제거기술은 미국, 일본 선진국에 비하면 열악한 형편이다(표 49) 환경기술개발비가 GNP에 차지하는 비중을 보면 선진국이 약 0.03%이상인데 비해 우리나라는 0.007%에 불과한 형편이고 환경기술개발을 위한 G-7 프로젝트도 대부분 오염물질의 사후처리에 국한되어 있고 청정생산 기술개발에 대한 지원이 매우 부족한 실정이다

표 49. 선진국과 국내환경기술 수준 비교

기술구분	선진국	한국
대기 수질오염 방지기술	100	60~70
폐기물 소각 처리기술	100	20~30
방지기자재 및 분석장비	100	20~30
조립형 처리시설 제작기술	100	0

자료 : 국립환경연구원

(7) 환경산업의 기반 미약

세계환경시장의 규모는 향후 5~6%의 지속성장을 보일 것으로 전망되고 있으나 우리나라의 환경산업이 전체 제조업에서 차지하는 비중은 0.29%에 불과하다. 우리의 환경설비업체의 문제점으로는 낮은 기술수준(핵심기술은 대부분 도입에 의존), 영세성, 전문성 결여, 하청도급구조 등을 들 수 있고 또한 전문인력에 대한 양성기관의 부족도 큰 문제이다.

또한 이들 기업을 지원하기 위한 세제, 금융, 기술개발자금의 지원이 미비하고 (1989년 한국 6.6억달러, 미국 375억달러, 일본 167억달러), 환경설비에 대한 기술 지원 및 정보 보급체계의 미흡도 환경산업을 발전시키는데 걸림돌로 작용하고 있다.

3. 우리 산업의 나아갈 방향

가. 기본 방향

우리 경제가 2000년대초 선진산업국으로 도약하기 위해서는 산업의 내실화와 함께 구조고도화를 촉진하는 한편, 무한경쟁에 이겨 나갈 수 있는 세계 초일류수준의 산업 경쟁력을 확보하여야 할 것이다 WTO의 출범으로 교역상대국의 무역장벽이 완화됨으로써 대외 의존도가 높은 우리 산업에 상대적으로 유리한 여건이 전개될 것이나 무역과 환경·노동·공정한 경쟁·기술개발 등을 연계시키기 위한 다자간 협상이 본격화되어 산업발전에 큰 변수로 작용할 전망이다.

무역과 환경을 연계시켜 국제무역질서를 새롭게 정립하려는 WTO체제하의 다자간 협상인 GR의 실체는 환경정책과 산업경쟁력의 관계에 존재한다 일반적으로 산업 경쟁력의 제고를 위해서는 환경기준을 높이거나 낮추는 규제적인 환경정책을 이용하기보다는 지원적 산업정책의 전개가 더 바람직하다고 보고 있다

이에 따라 GR체제하에서의 우리 산업이 나아갈 방향은 대외적으로는 환경외교 및 협약관련 협상능력의 배양과 대내적으로는 산업간(Inter-Industry), 산업내(Intra-Industry) 조정 및 이에 따른 산업정책의 변화라는 차원에서 논의되어야 할 것이다. 우리나라의 산업구조는 1970년대와 1980년대를 거치면서 이미 선진국형태로서 그 틀을 갖춘 바 있다. 따라서 최근의 산업구조 조정은 산업간의 조정보다는 산업내에서의 조정 형태로 진행되고 있다. 경제선진화를 위해서는 고부가가치형 산업구조로의 전환과 더불어 GR체제를 고려한 환경친화적인 구조로의 전환이 필요하다.

이와 함께 지난 30여년간에 걸친 산업화 시대의 정부주도 경제운영체제가 선진국 진입을 위해서는 민간기업주도 경제체제로 전환되어야 한다는 점이 논의되어야 한다 즉 시장원리가 경제행동의 기본준거가 되어야 하며 세계적 수준으로 우리의 경제제도를 바꾸어야 하고 이에 따라 정부의 산업정책도 변화되어야 할 것이다

이에 산업계에서는 자발적인 환경보전 노력이 강조되어 각 기업에서는 지속적인 성장을 위해 환경경영체제의 구축, 환경경영전략의 수립, 환경친화적 사업구조로의 전환이 이루어 져야 한다 또한 WTO체제하에서는 정부의 직접적 지원형 산업정책은 실시하기가 불가능하고 간접적 기능지원정책만 가능하기 때문에 과학기술개발, 인력양성 등에 정부의 지원책이 모아져야 한다 이를 바탕으로 환경기술개발 및 인력 양

성을 통한 환경산업의 육성, 재생산업관련 사회기반구축 등이 활성화될 것이 기대된다. 특히 세계질서가 동서 냉전체제에서 지구환경문제를 축으로 개편되고 있기 때문에 방위산업의 쇠퇴와 함께 환경·에너지산업의 확대가 기대되고 있다. 이에 국내 환경문제의 해결을 위해서만이 아니고 향후 수출 주력산업으로 발전시키기 위해서도 지구환경보전 기술개발 및 환경산업의 육성이 절대적으로 필요하다.

나 세부추진방향

(1) 환경외교 및 협약관련 협상능력의 배양

지금까지 지구환경보전을 위한 국제환경협약은 130여개에 이르고 있으며 이중 무역규제를 수반하는 것도 18개에 달하고 있다. 이들 무역규제의 특징은 그 범위에 있어서 1992년 리우회의를 계기로 오염물질의 사용 및 교역규제 등 특정한 유해행위 중심의 규제에서 경제활동전반에 대한 규제로 발전되고 있다는 점이다.

국제환경협약이 국가경제 및 산업활동에 지대한 영향을 미칠 것임을 감안할 때 앞으로 협상의 진행상황에 대한 면밀한 검토와 함께 국제환경규제별로 국내산업에 대한 영향을 논의단계에서부터 충분히 분석하여 협상시 취해야 할 입장을 미리 정립해 두고 이를 기초로 국제협상이 우리나라에 유리하게 진행될 수 있도록 외교 및 협상능력을 배양해야 한다.

이를 위해서는 전문적이고 지속적인 협상팀이 구축되어야 하며, 주요 의제에 대해서는 전문가와 산업계의 공동연구가 활발하게 진행되어야 한다. 한편 각종 국제환경협약이 산업별 특성에 따라 영향이 다르기 때문에 업종별 협상전략을 수립하여야 하며, 직접적인 영향을 받게 되는 산업계가 협상팀에 적극 참여하여 우리산업의 입장이 충분히 반영될 수 있도록 해야 할 것이다. 또 국제사회에서 우리나라와 비슷한 이해관계를 가진 국가들로 동조세력을 구성하여 협상력을 제고하여야 할 것이다(표 50).

표 50. 환경외교 및 협상능력 배양방안

- 정부관련기관, 산업계 및 전문가로 협상팀 구성
- 산업계 및 전문가의 공동연구로 유예기간을 최대한 확보키 위한 대안제시 (국가정책 및 업종별 협상전략 개발)
- 동구권 국가, 동남아 국가, 산유국 등과 공동보조하여 선발개도국으로서 선진국과는 다른 특별조항을 항목별로 세분, 삽입

(2) 에너지 사용효율 제고 및 청정에너지 이용 확대

환경친화적 산업구조로 전환하기 위한 시발점은 산업정책과 에너지정책 그리고 환경정책을 연계시킴으로써 산업구조가 환경친화적 에너지 소비구조를 가지게 하는 것이다. 특히 기후변화협약에서 CO₂ 등 온실가스 저감을 위한 참여국가의 기본 의무 사항이 정해져 있다는 점을 감안할 때 환경친화적 에너지 소비구조를 가지는 산업구조의 중요성은 아무리 강조해도 지나치지 않는다.

산업구조를 환경친화적 에너지 소비구조로 전환시키기 위해서는 단기적으로는 에너지 이용효율을 제고시키고, 장기적으로는 청정에너지(신에너지 포함)의 이용을 확대하는 장·단기적으로 구분된 추진전략이 필요하다.

에너지 이용효율 제고는 기술개발을 통해 에너지 이용기기의 에너지효율을 개선하거나 관리를 통해 에너지소비를 절약함으로써 달성될 수 있다. 한편 청정에너지 이용확대는 탄소 함유량이 많은 에너지원에서 적은 에너지원으로서의 대체를 포함해서 원자력, 태양광·태양열에너지 등 신에너지의 이용을 확대시키는 것인데 이는 온실가스의 배출을 저감시킬 뿐만 아니라 천연자원의 보전도 꾀할 수 있다.

이들 단·중·장기전략이 효과를 거두기 위해서는 ① 에너지 이용기기의 효율 개선이나 청정에너지 이용확대를 위한 개발지원 및 보급확대 방안, ② 에너지소비 절약 및 연료전환을 경제논리를 통해 유도하는 환경비용의 내부화 등 제도적 뒷받침이 요구된다.

(3) 제품전과정에 걸친 환경친화적 산업활동의 추진

현재 ISO에서 추진중인 전과정평가(LCA) 표준규격제정과 OECD에서 추진중인 PPMs규제가 기업에게 환경친화적인 생산공정 및 방법을 선택하도록 하는 압력요인으로 작용할 것이 전망됨에 따라, 종래 제품자체에만 국한되었던 환경보전을 위한 무역규제가 향후에는 원료의 채취에서 부터 제조과정을 거쳐 최종폐기될 때까지의 제품전과정으로 확대될 것으로 전망된다.

이들 규제는 생산방식에 있어서의 리엔지니어링을 요구하며, 따라서 제품전과정에 걸친 환경친화적 산업활동의 추진을 요구한다.

이를 위해서는 단기적으로는 오염방지시설의 증개설을 통해 사후처리의 효율성을

제고함으로써 오염물질 배출기준을 준수할 뿐만 아니라 국제협약에서 논의되고 있는 유해물질(예 CFCs 등)의 사용을 금지시키고, 장기적으로는 생산공정개선, 청정기술개발 등을 통해 오염발생의 예방에 주력해야 할 것이다

한편 이와 관련하여 최종제품 생산자(대기업)와 부품 공급자(협력업체)간의 관계에 있어 일보 진전이 요구된다 이는 제품전과정에 걸친 산업활동을 전개하기 위해서는 최종제품 생산자의 환경친화적 활동뿐만 아니라 부품 공급자의 환경친화적인 활동 역시 강조되기 때문이다 전술한 바와 같이 대부분의 최종제품 생산자인 대기업의 경우 기업활동에 있어서의 환경성은 어느 정도 고려되고 있다고 할 수 있으나 부품 공급자인 중소기업들은 그러지 못한 실정이며, 결국 부품 공급자가 환경친화적이지 못하면 최종제품 생산자 역시 환경성을 인정받지 못하게 되는 결과를 초래하게 된다. 따라서 지금까지 주종관계에 있던 최종제품 생산자와 부품 공급자간의 관계는 차후 협력관계 및 운명 공동체로서의 관계로 전환되어야 할 것이다

(4) 환경경영체제의 구축

소비자들의 구매성향이 환경성을 중요시하는 방향으로 변화하면서 기업활동에 있어서도 기존에 경제성만을 강조하던 경영체제에서 벗어나 환경성 또한 함께 고려해야 하는 새로운 경영체제 즉, 환경오염을 감소시키면서 기업의 성과를 증진시킬 수 있는 환경경영체제로의 전환이 요구된다 특히 환경경영체제의 구축은 국제무역에 있어서도 환경분야의 산업경쟁력을 확보하기 위한 필수사항이 될 전망이다

환경경영체제 구축을 위한 세부대책으로는 먼저 우리 실정에 맞는 환경관리체제의 구축 및 환경감사제도의 정립과 국내기반의 조성을 들 수 있다. 특히 국내 기반 조성을 위한 과제로서는 ① 국내전문가 양성, ② 품질관리 인증심사원 제도의 보완 발전, ③ 국내 인증을 위한 심사기관 설치, ④ 외국 인증기관과 상호인증 협정 체결 등이 있다

(5) 환경관련 사회기반 구축 및 폐기물 재활용 제고

원료의 획득이 점차 어려워지고, 폐기물 수거 및 처리의 책임을 기업도 마찬가지로 분담해야 한다는 사회적 요구가 높아짐에 따라 폐기물 재활용 제고와 재생산업의

육성을 위한 제반여건이 환경친화적인 산업을 위한 기본이 되었다. 특히 폐기물을 재활용할 수 있는 사회기반이 잘 조성된 국가의 경우 앞으로 사회는 자진수거 및 리스, 혹은 저당의 시대가 될 것이라고 할 정도로 폐기물 재활용을 기업의 환경성을 결정하는 핵심인자로서 인식하고 있다

폐기물 재활용의 제고는 정부, 기업 그리고 지역사회의 협조체제가 없이는 효과를 거둘 수 없다. 폐기물 재활용을 제고하기 위해 정부는 재활용을 촉진하기 위한 제도적 장치를 마련해야 한다. 폐기물 재생산업의 육성을 위해 폐기물 관리기금 등을 활용한 금융지원제도를 확대하고 폐기물 처리 및 재활용관련 기술개발과 시설투자에 대한 세제의 우대방안도 강구해야 한다. 또한 중요한 것은 업종별로 LCA를 통한 명확하고 과학적이며 합리적인 근거에 입각한 목표를 제시해야 한다.

한편 기업은 기본적으로는 그린엔지니어링을 도입함으로써 재활용이 용이하도록 제품을 설계·개발하며, 기업의 사회적 책임을 완수하기 위한 활동에 관심을 두어야 할 것이다. 이외에도 주요품목별 사업자 가이드라인의 작성·실천, 기업과 지방자치단체와의 협력 강화가 요구된다.

(6) 산업간 공동협력체제 구축

대부분의 산업활동은 타산업의 산업활동과 밀접한 관계를 가지고 있다. 따라서 거시적인 측면에서 환경친화적인 산업구조를 가져가기 위해 즉, 국가 전체적인 산업활동으로 인한 환경부하를 총체적으로 감소시키기 위해서는 산업계 전체차원에서 추진하는 것이 중요하다. 예를 들면 ① 폐기물 유발산업과 재생자원 활용·이용산업과의 협력, ② 소재·부품산업과 가공·조립산업과의 협력, ③ 공급산업과 수요산업과의 협력, ④ 공동사업 추진, 업계 공동노력을 통한 물류의 합리화, ⑤ 각 산업이 보유하고 있는 기술, 설비, 정보 등의 타산업 제공 등을 통해 환경부하의 감소를 유도하여야 한다.

(7) 중소기업의 지원 방안

GR이 구체화될 경우 상대적으로 대기업보다는 중소기업에 상당한 영향을 줄 것으로 예상된다. 중소기업들은 규모의 영세성, 만성적 자금압박 등으로 인해 사실상

오염방지설비의 설치조치가 어려운 형편이다. 따라서 중소기업을 환경친화적으로 전환시키기 위해서는 중소기업의 오염방지 및 처리시설의 구입자금지원을 대폭 증액하거나 이들의 집단화를 통해 오염방지 및 처리시설을 공동으로 운영토록 함으로써 오염방지비용을 절감하고 오염물질 배출을 효과적으로 통제할 수 있도록 하여야 한다. 또한 문제점으로 부각되고 있는 대형배출업소와 중소배출업소간 형평성 결여 문제를 해소하기 위하여 제도상 보완이 이루어져야 할 것이다

(8) 환경기술개발 투자 확대 및 환경산업 육성

국제환경규제에 대응하기 위해서는 환경기술을 핵심기술로서 선정, 적극 지원·개발하여야 한다. 뿐만 아니라 환경기술과 환경산업은 산업계가 환경을 개선하고 국제환경규제를 극복하는데 필수불가결한 요소이므로 환경기술개발 투자를 대폭 확대해야 한다. 또한 국제적 환경규제 강화에 따른 긍정적 효과를 최대한 누리기 위해서 환경산업을 중점 육성하여 수출산업화를 추진해야 하며, 청정기술, 지구환경보전 기술, 환경오염방지기술 등 환경관련 핵심 및 기본기술개발을 21세기 선도기술 개발사업(G7 프로젝트)의 중점과제로 선정하여 적극 추진해야 할 것이다. 아울러 민간부문에서 연구개발 촉진을 위해 세제·금융상의 지원을 확대하고 개발된 대체물질의 시장확보방안도 강구할 필요가 있다.

또한 환경산업의 육성을 위해서 기존 영세업체들의 전문화가 필요할 뿐만 아니라 대형화를 위해 자체기술개발이 가능하고 설비능력을 갖춘 대기업의 참여를 유도하며 환경관련 기자재의 국산화도 추진해야 할 것이다. 폐기물처리 및 재생시설용 투자촉진을 위해 투자시설에 대한 감가상각시 내용연수 단축, 각종 부담금의 손비인정, 재활용 가능한 폐자원에 대한 부가가치세 면제 등 적극적인 지원책을 강구해야 한다.

(9) 보조금의 효과적인 이용

WTO체제의 출범이후 시장개방의 확대에 의한 보조금 지급제한은 취약한 특정산업의 지원·육성을 크게 제약하여, 산업발전에 큰 변수로 작용할 전망이다. 이러한 여건하에서 환경산업육성 및 취약기술개발을 위해서는 기업활동여건을 전반적으로 개선하면서 새로운 산업여건에 부응하는 지원체제의 구축이 요구된다.

현재 WTO협정상 보조금은 허용보조금, 금지보조금, 상계가능보조금으로 구분되어 있는데 이중 허용보조금은 특정성이 없거나 연구개발·낙후지역개발·환경보전을 위한 보조금은 일정범위내에서 허용하고 있어 국내 환경기술개발 및 취약분야에 대한 지원·육성에 적극 활용해야 할 것이다

이를 위해서는 생산성향상 설비투자 세액공제 등의 국산과 수입품에 대한 차등 지원제도에서 그 차등을 없애는 등 금지 보조금적 요소를 제거하며, 공업발전기금·공업기반기술개발자금 등 기술개발자금을 확대 개편하는등 국내산업에 미치는 영향을 고려하여 이행기간내에 연차적으로 개편하고, 개편에 따른 보완대책을 강구해야 할 것이다 또한 오염물질 배출억제 또는 폐기물의 효율적 처리 등을 통한 기업들의 환경보전을 위한 노력정도에 따라 차등을 두는 환경우대금리의 도입을 적극 검토 해야 할 것이다.

(10) 환경규제의 강화 및 행정절차의 간소화

환경성이 기업경영의 중요 요소로서 대두됨에 따라, 정부는 기존의 규제위주에서 국가의 환경보전 목표수준내에서 기업의 자율적인 활동을 통해 대처해 나가도록 하는 시대조류에 부합한 환경정책으로 전환할 필요가 있다 즉 국내의 환경규제의 수준을 점차 선진국 수준으로 향상시켜 나가야 하며 운영상에 있어서도 법규위반에 대해서는 엄격하게 집행되어야 한다 그러나 배출시설의 설치를 위한 인허가 등에 대한 행정 절차에 대해서는 간소화하여 기업의 여건에 맞는 자율적인 노력을 통해 자체 경쟁력을 강화시킬 수 있도록 기반을 조성해야 할 것이다

(11) 산업계의 자발적 참여 유도

WTO에서는 환경규제에 대한 국가간 격차에 따른 생산비 차이와 경쟁력 왜곡에 대해서는 무역규제수단보다 정보수단을 통한 소비자 행동에 영향을 미치는 것이 보다 효과적이고 바람직하다는 견해이다 이해관계자들이 개별기업의 환경정보를 요구하여 그로 인해 구매의사가 결정된다면 기업들은 자발적으로 환경보전에 노력할 수 밖에 없을 것이다 예를 들면 미국 환경보호청(EPA)에서는 독성 화학물질에 대한 33 /50 프로그램을 만들어 기업의 자발적인 참여를 유도하였다 1987년을 기준으로 5년 후

인 1992년말에는 33%, 1995년말까지는 50%로 독성 화학물질의 방출을 저감하는 프로그램이다. 처음에는 기업들의 반발이 많아지만 정부의 인센티브 부여와 소비자들의 호응을 받아 대부분의 기업들이 참여하고 있으며 그 결과는 매년 공개되고 있다.

제 4절 주요 업종별 대응방안

1. 전기·전자

전자산업은 1993년에 생산은 29조 2,640억원, 수출은 222억 2,600만달러로 수출 의존율이 61%에 이르고 우리나라 총 수출액의 27%를 차지하는 선도산업이다.

전자산업은 타산업에 비해 대기오염물질이나 CO₂의 배출은 적은 편이나 냉매 및 부품의 세척제로 CFCs물질의 사용, 도장공정에서 발생하는 폐수, 기타 각 공정에서 플라스틱, 금속 슬래그, 폐유 등의 폐기물이 발생하고 있다. 이렇게 전자제품의 각 제조공정에도 각종 오염물질이 배출될 뿐만 아니라 제품을 사용한 후에도 재활용할 수 있는 여지가 적고 반면에 기술발전속도가 빨라 제품의 수명주기가 단축됨으로써 제품 폐기물을 다량으로 발생시키고 있다.

전자제품의 경우 발생하는 환경부하는 제조공정과 폐기단계로 구분할 수 있다.

제조공정에서 환경부하를 감소하기 위해 실시한 노력은 고효율설비·기기의 도입 등을 통한 에너지절약, 세정공정 개선과 도장공정의 생략 등의 환경오염물질 사용량 절감, 분리회수 및 재이용을 통한 산업폐기물 발생량 감소 등이 있으며 향후에는 폐기물 발전도입, 무세정공정 개발, 재이용에 의한 공정내 리사이클 확대가 요구된다. 폐기단계의 환경부하를 감소하기 위해서는 적절한 처리를 위한 사회기반이 우선 구축되어야 하며 제품개발시 리사이클이 용이한 재료의 선정, 분해의 용역화, 부품수 감소 등의 대책을 강구해야 한다(그림 38)

한편 반도체와 PCB(인쇄회로기판)의 제조에는 많은 화학공정이 포함되어 있어 환경에 미치는 영향은 더욱 크다. 특히 PCB의 도금공정과 반도체의 에칭공정에서 나오는 화학물질은 환경에 치명적인 영향을 미칠 수 있다. 이때 발생하는 오니와 폐액의 감소를 위해 폐기물을 이용한 발전도입으로 에너지 효율향상, 각종 용제(Solvent)의 변경을 통한 폐기물 발생량 감축 및 자원재생화 등의 대책을 수립해 왔으며 CFCs와 같은 규제물질의 사용을 중지하고 대체물질의 사용등을 강구하고 있다.

그림 38. 전자제품의 환경부하 및 대책

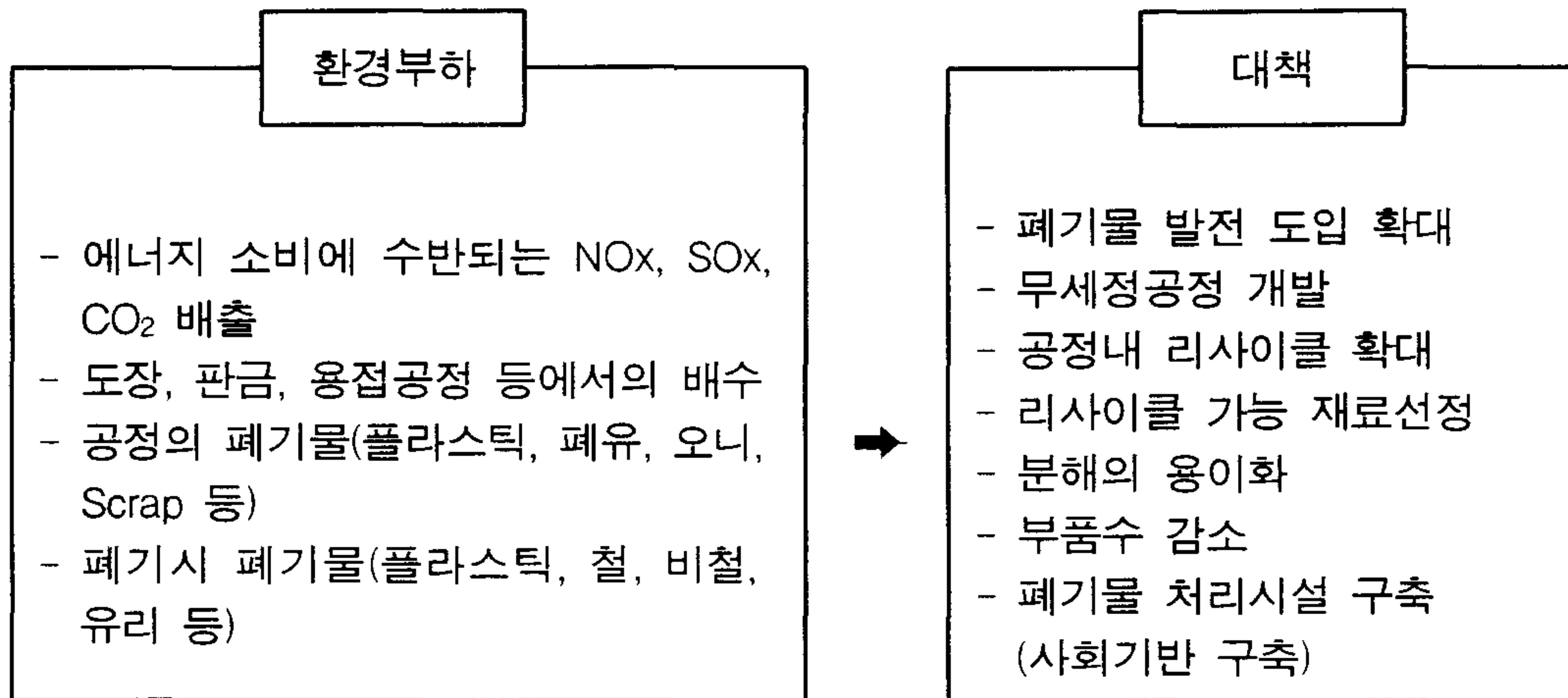


표 51. GR체제하의 전자산업의 대응방안

단 계	대 응 방 안
원료조달	<ul style="list-style-type: none"> · 환경에 유해한 물질의 사용금지 · 재이용이 용이한 부품 및 재료의 사용 촉진
제 조	<ul style="list-style-type: none"> · 에너지/자원프로세스 절약 · 유해물질 유해폐기물 발생 최소화 · 부산물 및 폐기물의 최소화, 분해용이성
유통소비	<ul style="list-style-type: none"> · 안전한 운반과 보관, 수송 용이를 위한 대책 · 과잉포장, 무겁고 두꺼운 용기 회피 · 포장재·용기의 리사이클, 재자원화 (리사이클이 가능한 재료의 선택)
폐 기	<ul style="list-style-type: none"> · 제품의 리사이클 재자원화 <ul style="list-style-type: none"> - 원재료의 스펙 표준화로 사용재료 종류의 감축, 재료의 성분 표시 - 분해의 용이화, 부품수 감축 등 리사이클 처리가 용이한 구조 채택 - 폐기물 감량화를 위한 제품의 소형화, 부품의 공용화

전자산업의 환경문제를 해결하기 위해서는 특정 공정이나 어느 한 단계만을 고려한 해결책은 근본적인 문제를 해결 할 수 없다 제품(혹은 부품)의 전과정(원료 선정에서부터 폐기에 이르기까지)에서 일관된 정책을 수립하여 단계별로 문제를 해결해야 한다 전자산업의 각 단계별로 추진해야 할 과제는 아래 표 51에 정리하였다.

한편 전자업계의 힘으로만 해결 할 수 없는 분야는 관련산업과의 긴밀한 협조 체제하에서 공동으로 해결하는 협력관계를 정립해야 한다. 특히 소재산업과의 협력으로 환경친화적인 소재(플라스틱 등)의 개발은 필수적이라 할 수 있다 자동차 제조공정에서 발생하는 폐철판을 가전산업에서 이용하고, 가전제품의 제조공정에서 발생하는 폐플라스틱을 생활용품의 원재료로 사용하는 등의 협력관계는 자원의 적절한 이용을 통해 산업폐기물 발생량을 줄이는 좋은 방법이라 할 수 있다

2. 석유화학

국내의 석유화학산업은 1992년도 생산액 기준으로 7조 7천억원을 생산하였으며 제조업 총생산액의 34%를 점유하고 있다 또한 1994년도 석유화학산업의 수출은 39억 2천만달러로 총수출액의 4.1%를 차지하고 있으며 에틸렌 기준에 의한 생산능력은 세계 총능력의 4.6%인 357만톤/년에 달하고 있다.

그리고 수급에 있어서는 '90년대 초반 대폭적인 시설 확대로 인한 공급과잉에 따라 시장질서 붕괴와 가격급락으로 극도로 경영이 악화되었으나 1994년 하반기 이후 경기회복, 일부 국가의 공장사고 등으로 수급이 균형을 이루면서 국제가격이 빠른 속도로 회복되고, 경영수지도 상당히 개선되고 있으며 이러한 현상은 당분간 지속될 전망이다.

그렇지만 '80년대 들어 와서 산유국과 개도국을 중심으로 설비투자의 확대가 지속되고 있고 금년부터는 GR체제도 가시화되고 있어 향후 범용품 분야에서의 대내외 경쟁은 더욱 치열하여 질 것으로 예견된다

석유화학산업은 유기화학제품, 무기화학제품, 화성제품, 정밀화학제품 등 다양한 제품을 생산하고 있으며, 개개제품은 나프타를 분해하여 기초화학제품 및 유도제품의 제조, 최종제품의 제조 등 공정을 거친다.

이들 개개의 제조공정은 각각 산화, 환원 등 단위반응, 추출, 분리 등의 단위조작을 복수로 조합하여 만들어지며, 원료나 제품에 따라 혹은 기술의 고도화에 따라 다

소 차이는 있으나 NOx, SOx, CO2 등 배출가스와 오니 등의 폐기물이 발생된다 뿐만 아니라 이 업종은 철강, 시멘트 등과 함께 대표되는 에너지 다소비업종이며, 특히 최근에는 폐플라스틱 처리문제라던가, 폐스치로폴 처리문제 등을 야기시키고 있다 지금까지 석유화학산업의 경우 GR에 대비하여 운전효율을 개선한다든가 폐열 회수율을 높이고 공정을 개선하는등 생산과정에서 에너지 사용량을 줄이는 방법외에도 원료의 투입량을 절감할 수 있는 기술개발 등이 있어 왔으며, NOx, SOx의 대책으로 탈황·탈질설비의 도입, 연료의 저유황화, 연소개선 등이 추진되었고, 공정내 회수 등에 따른 탄화수소 화합물대책, 활성오니에 의한 BOD, COD 처리를 실시해 왔다

앞으로는 제품 및 제조 공정상의 청정기술개발, 지구환경문제를 해결하기 위한 기술개발, 원료의 대체 기술개발 등에 역점을 두어야 한다.

제조공정상의 청정기술개발로는 발생된 부산물에서 에너지, 원료, 물 등을 회수하여 재이용하거나 가공하여 2차 생산품을 생산하여 경제성 및 환경성을 더욱 극대화하는 기술을 개발하여야 한다 또한 새로운 생산공정을 도입하거나 기존의 공정을 개선하여 오염물질의 발생 및 에너지, 원료, 물 등의 소비를 극소화하는 기술을 개발하여야 하며 기존의 제품과는 성능은 유사하지만 환경에 대한 유해성이 보다 적은 제품 또는 신물질 생산기술을 개발하여야 한다

지구환경문제를 해결하기 위한 기술로는 오존층 보호를 위한 CFCs 대체물질개발, 지구 온난화 방지를 위한 CO2 고정화, 처분 및 이용기술, 생물 다양성 협약과 연관된 생명공학관련 기술, 산성비 문제를 해결하기 위한 탈황·탈질 기술 등이 거론되고 있는데 전부 화학공업의 영역이다

석유를 원료로 하는 석유화학산업에 있어 대체원료를 위한 기술개발은 대체에너지 기술개발 못지 않게 오염의 사전예방을 위해 중요하다.

또한 화학물질의 개발에서 폐기에 이르기까지 환경, 안전, 보건부문을 지속적으로 개선해 나가며 관련된 내용을 공개적으로 다룰 것을 천명하고 실행하는 자발적인 환경개선 참여 프로그램인 Responsible Care Program을 적극 도입하여 실천하여야 한다. 석유화학산업의 단계별 대응방안을 제시하면 표 52와 같다.

표 52. GR체제하의 석유화학산업의 대응방안

단 계	대 응 방 안
원료조달	<ul style="list-style-type: none"> · 재생, 미이용, 대체자원의 이용 · 환경부하가 적은 연료의 사용 · 원료생산에 따른 환경부하의 감소 · 원료사용기준 도입(금지, 한정, 권장 등으로 분류)
제 조	<ul style="list-style-type: none"> · 에너지절약 설비의 도입과 새로운 에너지 절약기술의 개발 · 환경친화적 청정제조공정의 연구개발 <ul style="list-style-type: none"> - 나프타 접촉 분해기술의 개발, - 바이오 리액터 기술의 개발 · 공정내 부산물의 재이용 및 재생자원화 기술개발 · 공정상의 위험 등에 대한 주기적 평가와 위험의 최소화
유통·소비	<ul style="list-style-type: none"> · 물류 포장의 합리화 · 청정에너지 사용 운송수단 도입 · 제품개발 시점에서 환경친화적 사용을 위한 제품개발 <ul style="list-style-type: none"> - 에너지 절약형 및 오염물질 저감형 제품개발 · 화학물질의 종합안전관리 추진 <ul style="list-style-type: none"> - 화학물질의 안정성에 관한 Data Sheet(MSDS)의 보급 확대
폐 기	<ul style="list-style-type: none"> · 제품개발 시점에서 폐기를 고려한 제품 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 분해가 용이하거나 구조채택 및 리사이클이 가능한 소재 사용 - 소형화, 경량화, 보충품 및 부품교환에 의한 재임요화 · 제품사용의 장기화 유도 · 제품, 소재의 리사이클을 위한 회수체계 추진, 적정처리 모색 · 재활용업체에 대한 기술전수 및 선진 재활용 기술 조사

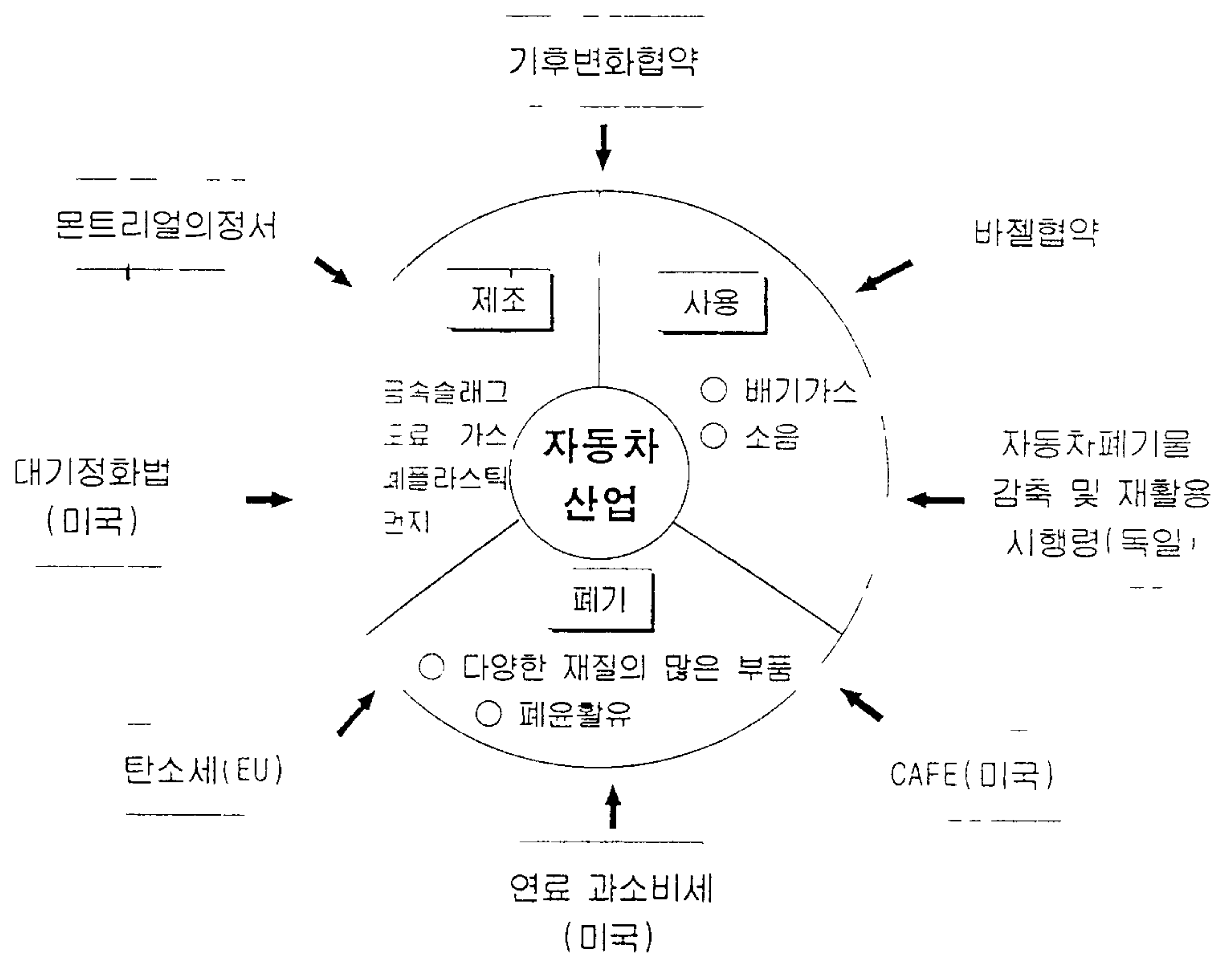
3. 자동차

자동차산업은 기술 및 자본 집약적 산업으로 관련산업에 대한 파급효과가 크고 규모의 경제가 요구되는 종합산업이다. 또한 자동차는 단일제품으로 세계 최대의 교역상품으로서 한나라의 경제력과 기술력의 척도가 될 뿐만 아니라 산업구조의 고도화와 경제성장에 중요한 역할을 하고 있다. 우리나라도 자동차 산업은 1994년 현재 231만대를 생산(세계 6위)하고, 74만대를 수출(세계 7위)하는 등 국가경제에 기여하는 바가 크다.

자동차는 제조공장의 규모가 크고 다단계의 제조공정을 거쳐 생산되는데 제조공장에서는 금속슬래그, 도료가스, 주물폐사, 폐플라스틱, 먼지 등을 발생시키고, 이용과정에서는 배출가스, 잡음 등에 의한 환경오염을 발생시키며, 폐차시에는 다양한 재질로 구성된 많은 부품 그리고 윤활유 등을 통해 환경을 오염시키는 등 제조, 이용, 폐기처리의 각 단계에서 대기오염, 소음문제, 폐기물 등 다양한 환경문제를 야기시킨다.

반면 국제적인 환경규제는 몬트리올의정서, 기후변화협약, 바젤협약 등 대부분의 환경협약이 자동차 산업과 관련을 가지고 있으며, 특히 최근에는 대기정화법, 자동차 평균연비규정(Corperate Average Fuel Economy, CAFE), 연료 과소비세(이상 미국), 자동차폐기물 감축 및 재활용 시행령(독일), 탄소세(EU) 등 개별 국가별 환경규제의 대두로 국내 자동차업계는 기술적·경제적 등 측면에서 상당한 영향을 받을 것으로 예측된다(그림 39). 자동차산업에서의 환경대책으로는 배기가스 및 연비규제, 재활용 기술, 특정물질 사용규제, 자동차관련 환경기술개발 등을 들 수 있다

그림 39 자동차 산업의 환경문제와 관련 국제환경규제



가 배기가스 및 연비규제

자동차기술에 있어서 배출가스의 저감과 연비향상과는 상호 밀접한 관계가 있으며 또한 연비향상과 CO₂ 배출저감 또한 밀접한 관계를 갖는다 이를 위한 방안으로는 엔진연소효율의 제고, 차체의 공기저항계수 저감, 타이어의 공기저감 및 신소재 채용을 확대하여 차량의 경량화를 기하는 것이 주요인자로 작용하고 있다. 특히 최근 차량의 경량화가 연비향상과 직결된다는 것이 주목되고 있다

국내에서는 1992년 G-7 프로젝트로 차세대 자동차 개발에 착수, 1996년까지 최고속도 120 km/h, 1회 충전거리 300km의 주행이 가능한 4인승 전기자동차 신제품 제작을 목표로 연구진행중이며, 자동차의 연료소비율을 향상시키기 위하여 에너지이용 합리화법에 의거 승용차의 경우 연비표시의 의무화와 자동차에 연비 및 등급라벨을 부착토록 하였으며, 배기량별로는 목표 소비효율을 도입하여 1996년까지 5.1%, 2000년까지 10.3% 개선을 목표로 하고 있다

나. 재활용기술

자동차의 경우 2만여종의 부품으로 구성되어 있고 그 소재도 철강, 고무, 플라스틱 등으로 다양하고 운전중에 필수적으로 사용하는 윤활유와 부동액 등을 비롯하여 배터리 등이 있기 때문에 폐차시 발생하는 폐기물의 종류는 다양하다. 국내에서는 이와 관련하여 1992년 12월 자원절약과 재활용촉진에 관한 법률을 제정, 자동차를 제 1종 지정품목으로 지정하고 자동차의 설계시 구조 및 재질을 재활용이 용이토록 하고 있는데 그 구체적인 추진책으로는 ① 리사이클이 용이한 플라스틱의 채용확대, ② 플라스틱의 단순화, ③ 플라스틱에 대한 재질 식별 Marking 표시, ④ 재활용기술의 개발 및 대체재료의 개발, ⑤ 해체하기 쉬운 구조의 연구개발과 신차 개발에의 적용, ⑥ 제조공정에서의 폐기물 감량화와 리사이클, ⑦ 폐기물 처리시에 환경부하가 적은 재료의 사용확대 등을 들 수 있다

다. 특정물질사용규제

자동차에 있어 특정물질의 사용규제로는 CFCs물질을 들 수 있다 자동차에 있어 용도별 CFC사용은 자동차용 에어컨의 냉매, 플라스틱의 발포용, 전자부품의 세정

제 등에 사용하고 있다. 자동차업계에서는 지난해부터 신규로 개발하여 판매하고 있는 신차에는 기존냉매 CFC-12가 아닌 대체냉매인 HFC-134a 신냉매 에어컨을 개발하여 사용하고 있으며, 특히 수출용 승용차량에는 거의 대부분 신냉매를 사용하는 에어컨으로 대체하고 있는 실정이다.

라. 자동차 관련 환경기술 개발

국제 환경규제에 대비하여 근본적인 대응방안은 결국 저공해 및 무공해 자동차의 개발에 모아지고 있는데 구체적으로는 전기 자동차, 메탄올 자동차, 천연가스 자동차, 태양광 자동차 등이다. 그러나 천연가스나 메탄올을 자동차 연료로 사용할 경우 기술적인 난점이 있을뿐만 아니라 환경문제도 완전히 해결되지 않기 때문에 전기 자동차의 개발에 역점을 두어야 할 것이다. 또한 정부에서도 자동차산업을 국가 기간산업으로 지속적인 발전시키기 위해 저·무공해 자동차 개발촉진을 위한 세제 및 금융 지원 등 각종 지원책을 확대하여야 할 것이다(표 53)

표 53. GR체제하의 자동차 산업의 대응방안

단 계	대 응 방 안
제 조	<ul style="list-style-type: none"> · 폐기물 배출삭감을 위한 공정내 Co-product의 유효이용 추진 · 세정제용 CFCs, 유기염소계 용제의 폐지 및 유기용제 사용 억제 · 공장의 배출가스 및 폐수대책 추진
사 용	<ul style="list-style-type: none"> · 연비의 향상 · 배출가스의 감소 · 소음감소 · 저·무공해차 개발
폐 기	<ul style="list-style-type: none"> · 폐기물의 감량화 및 재활용이 용이한 설계기법 도입 · 리사이클이 용이하도록 단일재료 사용 · 폐차회수시스템 구축

4. 섬유

국내 섬유산업의 위치는 1992년 기준으로 수출이 157억달러로 총수출액의 20%를 차지하며, 생산액은 20조원으로 제조업 총생산액의 10%를 차지하는 중요한 위치에 있다 또한 순수익면에서 무역수지가 연간 100억 달러 이상의 흑자를 유지하고 있다는 점을 간과해서는 안된다

섬유산업의 특성을 살펴보면 농목축업 및 석유화학산업에서 원료가 공급되고 원사·원단·의류에 이르면서 점차 기술적·예술적·문화적 가치가 부여되어 부가가치가 높아지는 것이다 즉, 소재·화학·염색·기계·설비·공정 등과 관련된 기술이 요구되며 여기에 패턴, 디자인, 패션 등 문화예술성을 더한 공업과 예술의 종합산업인 공예산업이라 볼 수 있다 그러나 지금까지 국내 섬유산업은 기술에만 의존하여 성장해 왔다고 해도 과언이 아니다 앞으로는 문화예술적 가치를 극대화하여 최소의 자원소모로 최대의 생산가치를 창출하는 저자원소모, 저환경부담, 고부가가치 산업으로의 전환이 GR체제하에서 섬유산업이 주요산업으로 성장·발전할 수 있는 중요한 요인이 된다

섬유산업의 환경문제는 염색, 가공, 섬유처리 등 습식공정을 수반하는 생산공정에 있어서의 수질오염에 있다 특히 염색가공업에 집중되어 있는 것으로서 섬유산업전체의 환경문제를 일으키는 주요인이기도 하다 또한 섬유제품의 습식처리과정에서 많은 물의 사용과 함께 에너지 소비도 수반하므로 폐수처리와 에너지 절약이란 두가지 문제를 동시에 해결해야 한다 한편 면직물 원단 제조공정에서 발생하는 공정별 공해 부담율을 보면 호발공정, 정련공정, 염색공정, 가공공정 등의 순으로 오염부담을 안고 있으며, 특히 제직준비에서 사용된 호제의 제거과정인 호발공정이 절대적인 오염부담을 안고 있다

섬유산업이 단편적인 환경문제 해결로써가 아니라 경쟁력을 확보하기 위하여 보다 차원 높은 개선방안이 제시되어야 한다 그것은 섬유산업의 종합화, 전문화, 집중화를 위한 섬유전문단지 조성을 확대하여 수익을 최대화하고 자원 소비 및 환경문제를 최소화하여야 한다(표 54)

표 54. GR체제하에서의 섬유산업의 대응방안

단 계	대 응 방 안
제 조	<ul style="list-style-type: none"> 에너지 및 자원절약을 위한 제조공정 개선 <ul style="list-style-type: none"> - 세부공정의 단축 및 저온 염색기술 개발 - 염료사용량을 감축하는 기술개발
유통·공급	<ul style="list-style-type: none"> 조합단위의 일괄수송 등 물류 합리화
폐 기	<ul style="list-style-type: none"> 중고 섬유의 리사이클 시스템 구축

5. 철강

철강산업은 국가의 기간산업으로서 1980년대의 활발한 신증설에 힘입어, 1994년 현재 3,375만톤 생산, 56억달러 수출(세계 7위)을 보이고 있다. 철강산업의 제조공정은 대량의 원재료 및 에너지를 사용하여 다양한 공정을 거쳐 제품을 생산하고 있는데, 사전처리공정에서 NOx, SOx, CO2, 분진 등 대기배출가스, 제선공정, 제강공정에서 고로 슬래그와 제강 슬래그, 압연공정에서 酸洗廢水, 含油廢水 등의 폐수와 폐유, 슬러지 등의 폐기물이 발생하고 있다. 에너지 다소비형업종인 철강산업은 기후변화협약에 의거 CO2의 배출규제가 본격화될 경우 가장 큰 타격을 받게 될 산업이다. 환경친화적으로 철강산업을 전환하기 위해서는 신제강공정의 도입, 오염방지시설의 도입, 연료의 전환, Co-product의 재이용 및 고철회수시스템 구축 등을 들 수 있다.

철강산업은 철강생산시 다량의 에너지를 사용하고 있을 뿐만 아니라 최근에는 에너지가 더 많은 초강력강 등 고품질철강의 생산비중이 높아지고 있어 차후 철강산업의 단위당 에너지 소비량은 늘어날 추세이다. 따라서 신제강공정의 개발이 철강산업을 환경친화적 산업구조로 전환하는 근본적인 대책이라 할 수 있다. 환경친화적인 제강공정으로는 용융환원제철법 등이 있는데 현재 국내에서도 이 기술을 개발중에 있으며 2000년이후에나 실용화될 것으로 전망되고 있는 바 그 이전에는 에너지사용의 효율화를 기하고 폐열을 최대한 이용하는데 주력해야 할 것이다. 오염방지시설의 도입 및 연료전환에 있어서는 소결배연집진, 탈황설비, 含油폐수처리 설비 등의 도입과 저유황연료에의 전환 등의 조업개선이나 NOx 연소기술의 개발 등을 들 수 있다.

한편 Co-product의 재이용에 대해서 살펴보면 제철산업에서 발생하는 Co-product

로는 슬래그, 스크랩 등을 들 수 있는데, 슬래그는 시멘트 원료나 벽돌용 골재로 사용되며, 스크랩은 제철의 원료로 사용된다 특히 스크랩을 제강원료로 사용할 경우 철광석 사용시에 비해 에너지소비량을 1/3수준으로 줄일 수 있다 따라서 자원의 효율적 사용관점에서 이들 Co-product의 재활용이 요구된다

철강산업은 리사이클이 매우 중요한 산업이다. 특히 고철의 사용확대는 에너지 절약뿐만 아니라 폐기물문제의 해결에도 크게 기여할 수 있다. 때문에 철강업계가 나서서 고철 회수체계를 구축하는 방안이 추진되어야 할 것이며 아울러 관련업계와의 협조체제도 모색되어야 할것이다(표 55).

표 55 GR체제하에서의 철강산업의 대응방안

단 계	대 응 방 안
원료조달	<ul style="list-style-type: none"> 고품질의 철강을 재생하기 위한 불순물 식별 및 제거 기술 개발
제 조	<ul style="list-style-type: none"> 설비개선으로 에너지 절약 추진 환경친화적 청정공정의 연구개발
폐 기	<ul style="list-style-type: none"> 슈퍼메탈의 개발 제품의 장수명하에 기여하는 표면처리 강판의 고성능화

6. 제지

제지산업은 1992년 기준으로 생산액이 5조 8,000억원으로 제조업에서 3%의 비중을 차지하고 있다. 제지산업은 펄프 및 古紙를 이용하여 각종 종이 및 종이제품을 생산하는 산업으로, 화학공업·철강업 다음으로 용수 사용량이 많은 전형적인 용수 다소비형 산업이며 자본집약적인 대형 장치산업이라 할 수 있다

제지산업의 환경문제는 폐수, 배기가스, 원료와 폐수처리과정에서 발생하는 폐기물과 소음이다 특성상 사용 용수량이 많고 폐지를 다량 조달해야 하는 제조업이므로 폐수처리에 가장 많은 관심을 가지고 있다 특히 증해공정에서 발생하는 리그닌 溶出로 나타나는 COD의 수치가 높다. 또한 표백공정에서 발생하는 염소 역시 수질오염의 유발인자이다 최근에는 종래의 염소계 표백제의 사용대신 산소표백을 채용하여 COD의 부하량을 대폭 감소시키고 있다 공정별 오탁성분은 표 56에 정리하였다

표 56. 공정별 오탁(汚濁) 성분

공정	汚濁 성분
粗木 蒸解 회수(증발관 응축수) 淨選 漂白 抄紙	수피, 목분 리그닌 등 유기물 초산, 메탄올 결속섬유, 미세섬유 리그닌, 당류, 유기산 미세섬유, 충전제

향후 제지산업에서 추진해야 할 대응방안은 표 57과 같다.

표 57. GR체제하의 제지산업의 대응방안

단계	대응방안
원료조달	<ul style="list-style-type: none"> 리사이클의 추진 <ul style="list-style-type: none"> - 재생지 제조기술의 개발 - 재생자원 이용제품의 개발 間伐材 등 미이용 자원의 개발
제조	<ul style="list-style-type: none"> 표백공정의 공업용수 Closed화 기술과 농축 수질오염제거 기술 개발 염소계 약품사용 감소기술 개발
유통	<ul style="list-style-type: none"> 공동수송에 의한 물류의 효율화

여 백

부 록

1. 세계기후연구프로그램의 기획사업
2. 전지구적 해양관측시스템
3. 남·북반구의 고기후연구
4. 미국의 지구환경연구사업

여 백

<부록1>

세계기후연구 프로그램(WCRP)의 기획사업

기후변화 연구 (Climate Variability, CLIVAR)

여 백

1 연구 내용

가. 서론

전 세계 국가들은 규칙적인 계절의 반복으로 안정적인 기후예보를 인지하고 생활해 왔다. 변하지 않는 기후 달력에 기초하여 곡물을 심고 수자원을 운영하였다. 아시아 계절풍의 영향권에는 전 세계 인구의 절반이 살고있다. 그런데 이곳에 내리는 여름 강우는 삶의 원천이며 강우의 양과 시기는 풍년과 기근을 결정하였다. 몇년 동안 계절풍 양상이 달라질 경우 농작물을 마른땅에 심어야 하며, 봄 강우가 홍수가 되면 결국 농사를 망치게 되고, 또한 폭설은 심한 도시교통 정체의 요인이 된다. 이러한 예로 볼 때 실제로 기후가 매년 극적으로 변화할 수 있으며 이 같은 기후변화가 인류의 생존에 관련된 문제가 되기도 한다.

기후는 장시간에 걸쳐 지속적인 변화를 보인다. 십년 이상 계속된 아프리카의 가뭄, 미국의 1930년에 있었던 흑모래 폭풍을 동반한 심한 건조 시기는 장기간의 기후변화가 얼마나 우리의 삶과 재산에 영향을 줄 수 있는가를 보여주는 예들이다. 대기배기가스의 축적으로 인한 온실가스의 증가와 그에 따른 온도상승, 최근의 전세계에 걸친 기후변화 등은 기후 시스템, 기후의 자연적 변화, 그리고 인류의 경제활동이 기후를 어떻게 변화시켰는가 등을 알기 위한 연구의 필요성을 부각시켰다.

계절적 기후변화와 경년간 기후변화에 대한 새로운 이해와 몇몇 열대지역에서 기후변화 연구 결과는 TOGA 프로그램의 주요 수행 임무중의 하나이며, 기후연구에 대한 가장 의미 있는 활동중의 하나였다. 이 연구에서 열대 태평양에서 엘니뇨를 예보할 수 있으며, 심한 경우 가뭄 상태의 세계 전역에 관련된 변화들과 나아가서 1년 앞까지 보통 기온의 상하한을 예보할 수 있다는 것을 보였다. 이들 예보의 이용은 이미 농업과 수자원을 운영하는데 있어 전략적인 계획을 세우는데 유리하게 만들었고, 어떤 지역에서는 엘니뇨의 영향을 최소화 시키는데 도움을 주었다. 또한 세계 해양순환 실험 (World Ocean Circulation Experiment, WOCE)은 처음으로 수행된 전지구적인 해양순환에 대한 연구이며, 이것은 기후 시스템에서 해양의 역할을 이해하는데 큰 도움을 주었다. TOGA와 WOCE의 성공은 기후 변화에 더 확실하고 정량적인 측정 방법들을 제공하였고 기후 변화 모델링에 대한 연구를 가능하게 하였다. CLIVAR는 대기의 에어로졸 축적 변화와 방사성 기체의 증가와 같은 인류 기원으로 인한 기

후의 변형과 자연적인 변화의 상호작용에 대한 우리의 이해와 수개월에서 1세기 시간 규모로 전지구적인 기후의 예보와 기후변화에 대해 연구하는 프로그램이다 이러한 것들이 새로운 기후 연구 프로그램의 하나인 CLIVAR의 논리적인 근거와 과학적인 개요이다

나. CLIVAR의 목적과 요점

CLIVAR 프로그램에 대한 목적과 요점들은 아래와 같다

① 다른 관련된 기후 연구와 관측 프로그램과 상호 협력하여 기후 시스템 모델을 개발하고, 자료의 수집, 수집된 관측 자료의 분석을 통한 계절, 경년, 십년, 백년간의 시간 규모에서 기후변화와 예측에 관련된 물리적인 작용들을 연구

② 고기후와 관측 기계 사양을 통합하여 관심있는 시간 규모의 전체 기후변화에 대한 기록을 확대

③ 전지구적인 예측 모델을 개발하여 계절간, 경년간 기후 예측의 정확성과 예측 범위를 넓히는 것

④ 인간에 의한 기후 변형을 감지하기 위하여 관측된 기후 기록들과 예측을 비교하여 방사성 활성 기체와 에어로졸의 증가에 대한 기후 시스템의 반응을 예상하고 이해

다 CLIVAR의 구성 프로그램

CLIVAR 프로그램은 세 개의 프로그램으로 구성되었다 세 가지 구성 프로그램은 다음과 같다

(1) CLIVAR-GOALS

전지구적인 해양-대기-육상 시스템의 예보와 계절간, 경년간 기후 변화 연구 프로그램이다. 핵심연구내용은 ① TOGA 프로그램의 성공에 토대를 두어 계절간-경년간 시간 규모로 전지구적인 해양-대기-육상 시스템의 변화와 예보를 측정, ② 계절간-경년 기후 변동을 연구하기 위하여 TOGA 관측 시스템을 포함한 관측 능력을 개발, ③ 계절-경년간 시간 규모로 변하는 열대 주변의 기후 변수들과 해표면 온도 예측 기술과 모델을 개발, ④ 인도양, ENSO, 육상 표면 진행 과정들과 계절풍의 상호작용 대한

예측의 능력과 지식의 증대, ⑤ 열대 지역과 열대외 지역 사이의 상호작용으로부터 발생하는 기후 변동과 그에 대한 예측을 이해, ⑥ 해빙의 진행 과정과 육지 표면 반응, 해양과 대기의 상호작용에서 기인된 열대 외 지역의 계절-경년간 기후 변화의 예측을 이용하고 그러한 예측을 이용하기 위한 수단들을 개발하는 것 등이다

(2) CLIVAR-DecCen

십년간-백년간 기후 변화와 예측에 관한 연구 프로그램이다. 핵심내용은 ① 전지구적인 연관된 시스템에서 해양의 역할을 특별히 강조하여 십년에서 백년간의 시간 규모를 가진 기후 변동의 변화와 예보의 기작들을 측정, ② 기기에 의한 기록들과 고기후 모델 기록으로 전지구적인 십년간-백년간 시간 변화를 갖는 기후 변화의 양상들을 기술하고 이해력을 높이는 과학적 자료수집, ③ 해양과 고기후의 자료, 현재 대기의 재분석, 자료 복구에 대한 공동 노력으로 기후 변화의 기록을 확대하고 새로운 고기후 지표를 발견하여 새로운 해양 모니터링 관측점을 설치, ④ 전 지구의 십년간 변화를 예측, 이해, 기술하는데 필요한 적당한 관측, 모델링, 계산, 자료 수집, 보급 시스템을 완성하고 개발, ⑤ 십년간에서 백년간의 기후 변동을 일으키는 요인인 해양과 대기의 상호 작용으로 인한 수괴의 변형, 강한 경계류, 해류의 정체 지점과 회귀 지점과 같은 해양학적인 분야의 진행 과정들을 연구하고 밝히는 것 등이다.

(3) CLIVAR-Acc

인류가 만든 물질에 의한 기후 변화의 감지와 모델링 연구이다 핵심내용은 ① 인류 기원의 물질에 대한 기후 변화 시스템의 반응 연구, ② 에어로졸의 변화와 방사성 기체의 인류 기원에 의한 증가 등에 의한 기후 반응의 예측 가능성, 모델링, 전문 지식을 개발, ③ 기후 변화와 기후의 평년 상태에 대한 인류 기원성의 변화 양상을 규명, ④ 다른 인류 기원으로 인한 변화의 영향과 온실 가스의 증가와 관련된 징후와 경향을 감지하기 위해 다른 두개의 CLIVAR 프로그램으로부터 유추한 자연적인 기후 변화에 대한 이해를 이용하는 것 등이다

라 프로그램의 수행

CLIVAR는 위에서 언급된 각 프로그램들을 수행하기 위한 관측, 모델링, 자료 복

구 등에 대해 연구할 것이다 이들 연구의 성공은 국가별 프로그램을 수행하는 국가 간 상호 협력에 달려 있다 예를 들면, 프랑스와 독일은 국립 CLIVAR 연구 프로그램을 세웠으며, 유럽 연합은 CLIVAR 프로그램을 통합 수행하기로 하였다. 미국은 CLIVAR의 첫 번째 구성 성분에 기여할 수 있는 GOALS 프로그램을 기안 중이다 CLIVAR는 다양한 국가별 프로그램과 다국적 프로그램 사이에 협력을 권장하고 현장 관측 프로그램과, 특별히 그 목적들이, 일치되도록 노력하고 있다.

CLIVAR는 1996년에서 1997년까지 북대서양 프로젝트로 현장 관측 활동이 끝나는 WOCE와 긴밀한 협력을, 1994년 12월에 공식적으로 끝난 TOGA 프로그램으로부터 원활한 연구 이행을 가져올 것이다 순서 바른 진행은 이들 프로그램에 의해 확립된 적당한 하부 구조들을 보존하고 TOGA와 WOCE에 의해 시작된 관측 프로그램들의 지속적인 수행이 필요하다.

CLIVAR는 또한 진행 중인 다른 WCRP 프로그램들과 상호 협력할 수 있도록 장려한다. 예를 들면, 전 지구적인 기후 시스템에서 해양의 역할은 GEWEX 프로그램의 육지 수력학적인 진행 과정 연구 없이는 만족스럽게 제시할 수 없다 CLIVAR 연구의 중심적인 구성 성분들은 전지구적인 변화에서 중심적인 역할을 제시하는 SCAR과 IASC에서 승인된 지역 연구 프로그램뿐만 아니라 남극 부표(IPAS) 국제 프로그램과 WCRP 북극 기후 시스템 연구와의 협력을 필요로 한다. 또한 CLIVAR는 대기 자료에 대한 연구 필요성을 강조하며 IGBP의 과거 전지구적인 변화에 대한 연구 프로젝트와 상호 협력을 필요로 한다.

가장 중요한 요인은 최근 만들어진 전지구적인 기후 관측 시스템, 전지구적인 해양 관측 시스템과 CLIVAR의 상호작용이다. CLIVAR의 학술 프로그램은 현재 가동 중인 관측 전지구적인 네트워크를 통해 얻은 자료와 더 특수한 연구를 통한 관측으로 얻어진 자료를 요구한다. CLIVAR 운영위원회는 이러한 문제들에 관하여 GCOS와 GOOS 프로그램 조직체와 상호 협력한다

2. 전지구적인 해양대기-육상 시스템의 계절에서 경년의 변화와 예측 (CLIVAR-GOALS)

가. 개요

(1) 이론적 근거

근년에 들어서 해양과 대기의 경년 변화를 예보하고 이해하는데 관심이 고조되고 있다. 그러한 관심은 부분적으로 Tropical Ocean Global Atmosphere (TOGA) 프로그램의 결과로 생성되었고, 이것으로부터 경년 변동의 예측이 가능하다는 것을 보였다 더욱이 기후 예보 목적을 위해 열대 태평양을 관측하기 위한 관측기기들이 TOGA의 일부분으로써 설치되었다. 따라서 계절과 경년시간 규모에 대한 대기 예보를 위한 물리적인 기본 원리는 과거 10년 이내에 꽤 많이 수립되었다 그러나 기후변동 시스템 예보에 대한 본래부터 가지고 있는 제한적인 요소들에는 여전히 많은 문제들이 남아 있다 게다가 현재 개발된 예보 시스템을 수행하는데 실제적인 많은 문제점들이 해결되지 않고 남아 있다 이 예보 체계를 수립하는데 학술적 뼈대를 제공하고 지역적 그리고 전지구적인 규모로 계절간에서 경년간 변화에 대한 예측에 관해서 연구하는 것이 CLIVAR-GOALS의 기본 목적이다

열대 태평양에서 변화, 특히 엘니뇨 남방 진동 (ENSO)의 온도 상승과 온도 하강 상태를 추정하기 위한 TOGA의 연구결과로 나머지 전세계 해양에 대한 자세한 정보 없이도 예측할 수 있다는 것이 밝혀졌다 더군다나 이 지역에서 해양 상층의 상태, 특히 해표면 온도 (Sea-Surface Temperature, SST)는 과거의 상관관계를 토대로 세계의 먼 지역에 대한 계절간과 경년간의 기후 변동을 추론하는데 이용할 수 있을 것으로 추정된다. SST는 열대 태평양의 오직 바람 자료만을 초기 값으로 입력하여 미리 1년 정도 앞까지 예측할 수 있었다 이것들은 열대 태평양에서 특히 ENSO의 일부 현상들의 경년 변이를 예측하는데 유용한 기술이 있다는 것을 보여준다.

계절에서부터 몇 년까지 시간 규모로 자연적인 기후 변화를 예측하고 이해하기 위하여 전 지구의 해양 상층, 대기, 육상시스템의 상태가 검토되어야 한다. 그러한 광범위한 시도가 단계별로 차례차례 현재 TOGA 예보 시스템으로 이루어 졌다. 열대 태평양 연구는 열대 대서양과 인도양을 포함하며 그리고 마침내 전 지구 상층 해양까지 확대되었다 몇 년 이하의 시간 규모의 경우에는 해양의 상층만을 고려할 필요가 있을 것 같다 열대와 중위도에서 이 층의 깊이는 상층 수백 미터에 제한된다 고위도에

서 계절의 변화는 상층 천미터 또는 그 이상을 포함할 수 있다 토양의 습도와 알베도를 포함한 육상-표면 진행 과정은 이러한 시간 규모로 기후 시스템과의 상호작용과 육상 표면의 상태를 예측하고 관측하기 위하여 고려할 필요가 있다

(2) 학술적 목적

CLIVAR-GOALS 프로그램은 계절에서부터 경년까지 시간 규모로 전체 기후 시스템의 변화를 적당한 한계까지 예측하고, 관측하며 추측하기 위한 궁극적인 목적을 가지고 있다 이 시간 규모의 변화 연구로 계절풍의 변화, 가뭄, 홍수와 같은 기후 이상 변화등과 같은 유용한 예보를 즉시 얻을 수 있는 사회적, 경제적 이점을 갖고 있다

CLIVAR-GOALS 프로그램은 TOGA프로그램이 TOGA에서 수행된 관측시스템의 확립과 ENSO 모델링과 예측 능력의 확립으로 프로그램 수행에 모델이 된다 CLIVAR-GOALS는 필요하다면 관측 시스템을 확장하고 전세계에 전역에 지역적인 단주기 기후 변화 예보의 가능성을 조사하고, 전지구적인 기후 시스템에 지역의 관심을 확대함으로써 TOGA보다 더 광범위한 학술 분야를 개발할 것이다 CLIVAR-GOALS는 이들 변화를 예보하기 위하여 개발 중인 전지구적인 해양-대기-육상 모델을 실행하고 지역적인 기후의 경년 변화를 예보 또는 설명하기 위하여 열대 외 지역의 SST, 토양의 습도, 적설의 표층 상태의 영향을 조사할 것이다.

CLIVAR-GOALS의 학술적인 목적은 ① 연관된 기후 시스템의 모델링과 관측을 분석하여 계절간, 경년간 기후 변화와 예측을 분석하고 기술, ② 상층 해양, 대기, 육상, 빙하 시스템의 연관된 모델링 프로그램을 통하여 계절간 경년의 기후 예측에 대한 정확도의 향상, ③ 다른 관련된 기후 연구와 관측 프로그램을 가지고 상호 협력하여 변화를 예측하고 계절-경년간의 기후 변화를 아는데 필요한 프로그램을 보급하고 적절한 관측을 수행하며, 컴퓨터를 사용하고, 자료 파일을 보관하는 시스템을 개발 등이다

(3) 프로그램의 요소들

계절에서부터 경년 시간 규모에 기후 예보는 CLIVAR-GOALS 프로그램의 첫 번째 목적이다 이 목적을 위한 연구에서 모델링, 관측, 경험적인 연구, 진행 과정 연구 등 4개의 중요한 프로그램 요소들을 채택함으로써 TOGA의 성공적인 예를 뒤따르게 될 것이다

자료 흡수와 예보를 위한 개선된 연관 해양-대기 모델의 개발과 응용은 CLIVAR-GOALS 프로그램의 주요 주제이다 모델 초기 설정에 필요한 것들은 관측 시스템의 특성을 정하는데 도움이 될 것이다 경험적인 연구들은 크게 모델 개선의 필요성을 제안하며, 어떠한 진행 과정의 연구들이 필요한가를 결정하는데 보탬이 될 것이다 이들 요소들은 운영할 수 있는 기후 모니터링과 예보 시스템의 개발에 대한 연구 뼈대를 제공할 것이다

예보의 기술을 향상시키기 위하여 인도양과 해양-대륙 열원사이 이에 상호작용도 조사될 것이다 열대 지역의 예보를 완전히 이용하기 위하여 대서양과 접경 지역의 남아메리카와 아프리카 대륙과의 상호작용 또한 고려될 것이다 아프리카까지 조사 지역을 확장할 경우 아프리카 대륙과의 상호작용을 조사해야 할 필요가 있다 CLIVAR-GOALS에서는 또한 계절에서 경년간 기후 예측에 고위도의 해양과 육상, 빙하의 영향을 조사할 것이다

나 ENSO와 열대에서 예보

(1) 이론적인 배경

ENSO는 몇 년마다 발생하고 대략 1년 동안 지속되는 기후 시스템의 준 주기적인 교란 현상이다 이것은 이상 온난상태(온도 상승) 또는 이상 냉온상태(온도 하강)로 존재하나 이상 온난상태가 이상 냉온 상태보다 더 사회경제적인 영향을 주는 경향이 있다. 이 현상의 중심은 열대 태평양이나 이것의 영향은 태평양 이외의 지역까지 확대된다.

따뜻한 상태 동안에 서 열대 태평양과 동 열대 태평양 사이에 대기의 흐름이 변한다. 이 역학적인 흐름의 변화에 의하여, 강수는 날짜 변경선 쪽으로 인도네시아 지역으로부터 동쪽으로 교체되며, 보통 무역풍은 약해지고 심지어 역전되기도 하며, SST는 동쪽 적도 태평양에서 증가하고 Ecuador와 Peru연안을 따라 해양의 표면에서 심각한 어업의 붕괴를 초래하는 영양염의 감소와 강수는 증가한다

공기가 서태평양 전역에서 상승하고 동태평양에서 하강하는 태평양을 가로지르는 대기의 순환은 Walker 순환이라 한다 Walker 순환의 세기는 Darwin에서 월 평균 해 표면 압력의 이상 변화치에 의해 설명된다 Darwin에서의 해표면 압력의 변이는 동태평양에서 SST 변이와 상관관계를 나타내는 경향이 있다 또한 변이의 시간 규모는

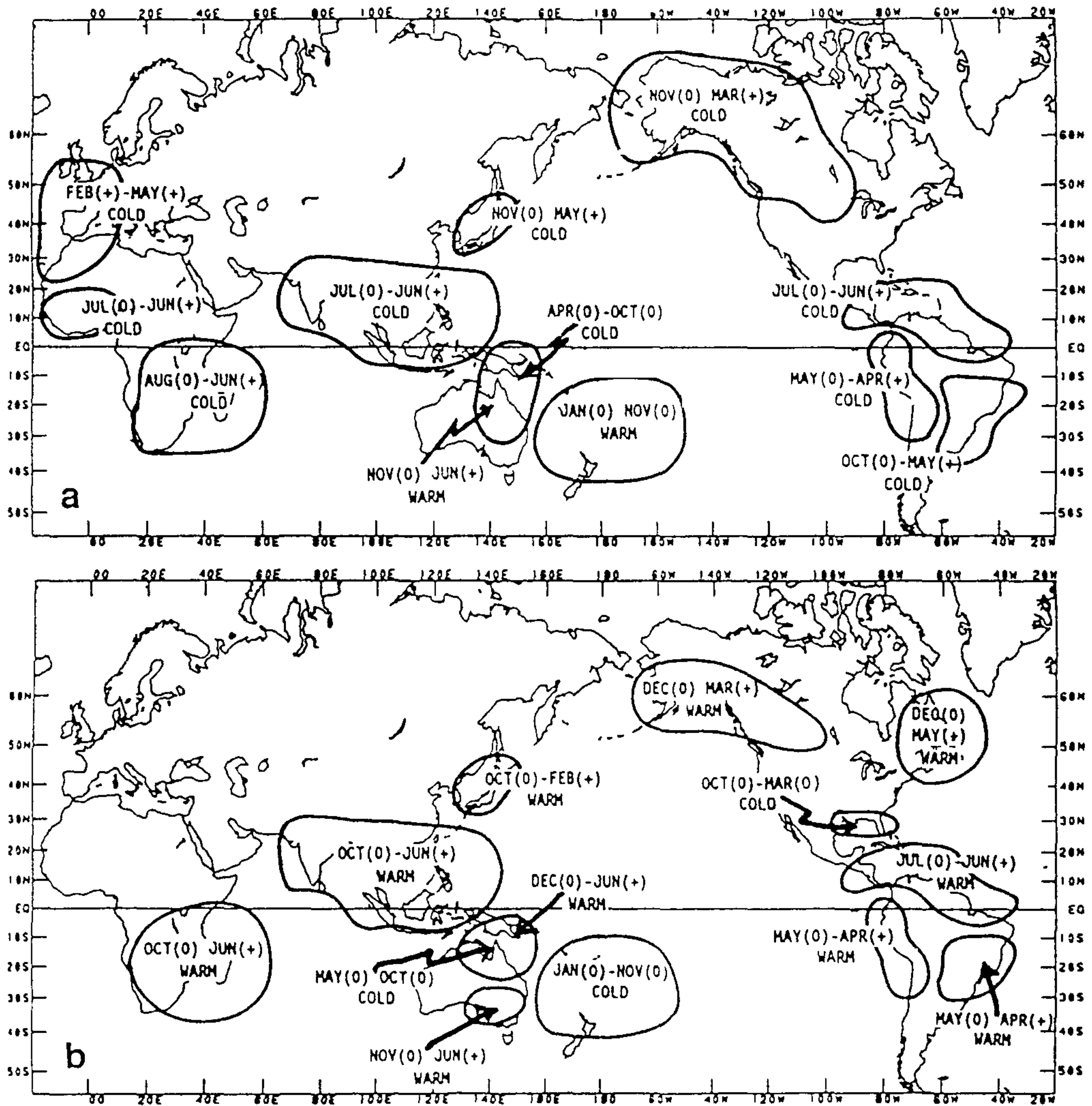
몇 년이고, 이것은 대기에 대한 고유의 시간규모는 아니다 이러한 관측은 Walker 순환의 변이가 해양의 진행 과정과 밀접하게 관련이 있다는 것을 암시하며, ENSO는 해양과 대기의 상호작용과 밀접한 관련이 있음을 의미한다.

또한 자연적인 변화에서 기인된 해양의 용승현상 변동은 해양에서 이산화탄소의 흡수율에 영향을 줄 수 있다 대체로 십년 시간 규모에서 기후 시스템에서 인류 기원 변화와 자연적인 변화 사이의 상호 작용에 대한 이러한 문제 해결이 CLIVAR에는 중요할 것이다 특히 1970년대 중반 이후 ENSO의 변화 원인은 규명할 필요가 있다

(2) 계절간 예보에 관한 경험적인 연구들

계절 변화 규모에 대한 예측은 현재 전 세계의 많은 지역에 제한적으로 만들어지고 있다. 그러한 예보에 사용되는 모델들은 역사적인 자료에서 유래하고 해양과 대기의 일반적인 순환 요소 사이의 이제까지 밝혀진 연관성에 기초를 둔다 예를 들면, 그러한 관련성은 강우나 지역적인 순환의 예보인자를 확인하는데 사용된다. 경험적인 모델을 이용하여 열대에서 계절간 예보에 관한 종합적인 재검토가 Hastenrath에 의해 제공되었다 ENSO의 지수는 많은 열대지역을 위한 계절간 예보 모델에 매우 중요한 정보이다. 이것은 남방 진동지수 (Southern Oscillation Index, SOI)에 의해 제공되는데 이것은 태평양을 횡단하는 Walker 순환 세기의 지표로 사용된다. 특히 SOI는 Tahiti와 Darwin에서 해표면 압력의 이상 변동치의 표준 차이점으로 정의된다. 경험적인 연구들은 전지구적으로 열대와 아열대의 많은 지역들에서 SOI와 상관관계가 있는 기후 이상 변화가 나타남을 보여준다. 예를 들면, 그림 1은 온도의 이상 변화가 SOI와 관계가 있는 지역들을 보여준다. 그러한 상관관계는 강우와 같은 다른 변수에 대해서도 나타난다. 그래서 예를 들면, 오스트레일리아에서 주된 가뭄은 일반적으로 SOI와 큰 역 편위(偏位) 관계를 보여준다 SOI에 의해 영향을 받은 많은 지역에서 통계적으로 큰 상관관계를 보여주며 이것은 지역적인 예보를 위한 한 기준을 제공해 준다

경험적인 연구들이 유용한가의 여부는 이용할 수 있는 자료의 질과 자료 기간에 의해 제한되며, 보통 나타날 수 있는 변화의 전 범위를 추론하는데 너무 짧거나 불확실하다. 따라서 경험적인 관계를 수치 모델로 확고히 할 필요가 있다 예를 들면 UKMO 일반 순환 모델 (GCM)은 관측된 SST를 사용하면 열대 북아프리카 강우의 경



< 그림 1 >

Schematic representation of regions where surface temperature is teleconnected with the Southern Oscillation (surface pressure difference between Tahiti and Darwin) (a) for periods when the Southern Oscillation is high, (b) for periods when the Southern Oscillation is low. The time of year when the teleconnections are strongest is shown within the region. The symbol "0" denotes the same year as the peak in the magnitude of the Southern Oscillation. The symbol "+" denotes the year following the year in which the magnitude of the Southern Oscillation peaked (from Halpert and Ropelewski, 1992)

년 변동을 모델링하는 기술을 설명해 준다. 그림 2는 사하라 사막과 Guinea 연안의 10년 동안 6-9월 강우를 관측하고 모의 실험한 막대그래프를 보여준다. 이 지역에 대한 다른 초기 조건에는 모델 결과가 크게 변하지 않으나, 이것이 개개의 모델에 의존하는 범위는 현재 연구 중이다.

다 온대와 한대 지역에서의 예측

(1) 이론적인 배경

온-한대 지역에서 계절간 예보 가능성은 많은 열대 외 대기와 해양의 변화는 직접적으로 대기 순환의 불규칙한 변화와 관계가 있기 때문에 열대 지역에서의 계절간 예보처럼 간단하지가 않다. 온-한대 지방 대기는 내부 변화도가 가장 약한 여름철에 가장 예측이 가능할 것으로 기대된다.

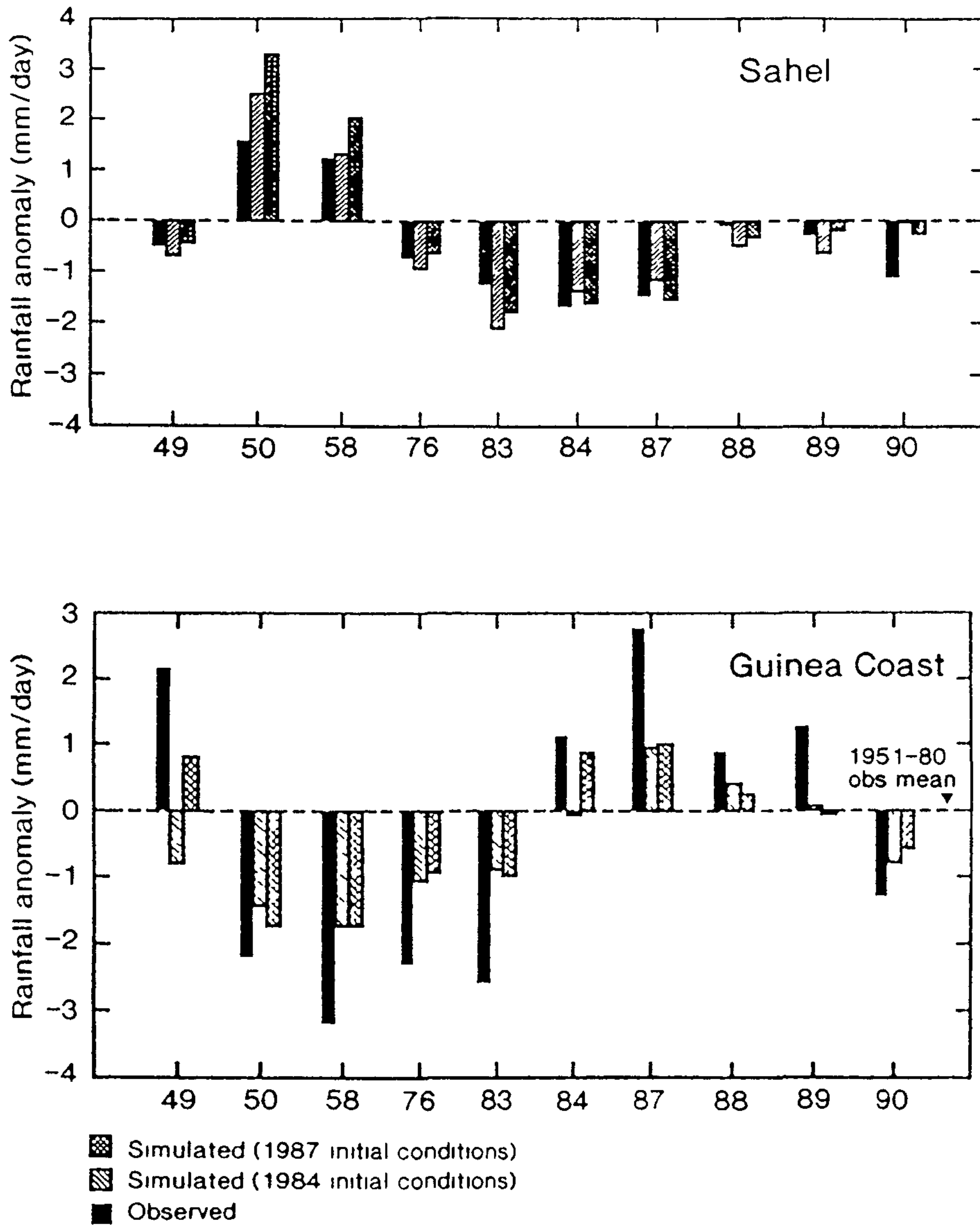
열대에서처럼 중위도에서 대기 순환으로 십년 규모의 변화에 관계가 있는 분명한 징후들이 있다. 예를 들면, Trenberth 와 Hurrell은 북태평양 지역에서 겨울 동안 평균 해수면 압력의 십년간 변화를 발견했다. 남반구에서도 유사하게 남서 오스트레일리아에서 겨울철에 십년간 규모에서 변동은 그 지역의 겨울 강우 변화와 관계가 있음이 발견되었다. 그러한 장주기 변화는 중위도에서 계절간 변화를 바꿀 것으로 기대된다.

Latif와 Barnett는 북태평양 지역에서 십년 규모에 관한 변화의 특성을 연구하기 위하여 GCM을 사용하였다. 그 모델로부터 그들은 해표면 온도가 저온이 되는 빈도 변화의 30%는 해양의 아열대 환류와 Aleutian 저기압권의 해양 대기 모드와 관계가 있음을 발견하였다. 만일 이 모드가 과학적으로 확실하다면 이것은 장기 예보에 사용될 수 있다. 세계의 특정 지역에서 예보의 범위를 넓히기 위한 이러한 모드들에 관한 가능성 조사는 CLIVAR의 중요한 활동이 될 것이다.

(2) 계절간 예보에 관한 경험적인 연구들

ENSO 예보를 남반구 열대 외 지역에 이용하기 위한 연구가 활발하다. ENSO의 강한 영향은 남아메리카 전체와 아프리카뿐만 아니라, 오스트레일리아 전국과, 뉴질랜드에 나타난다. 남반구에서의 기상 변화와 ENSO와의 앞섬/지연 관계가 유용한 예보를 위하여 이용될 수 있는 이러한 경험적인 관계가 가능할 것이다. 관련된 많은 국가의 과학자들은 이미 실험적인 예보를 만들고 있다.

Simulated and observed July–September rainfall



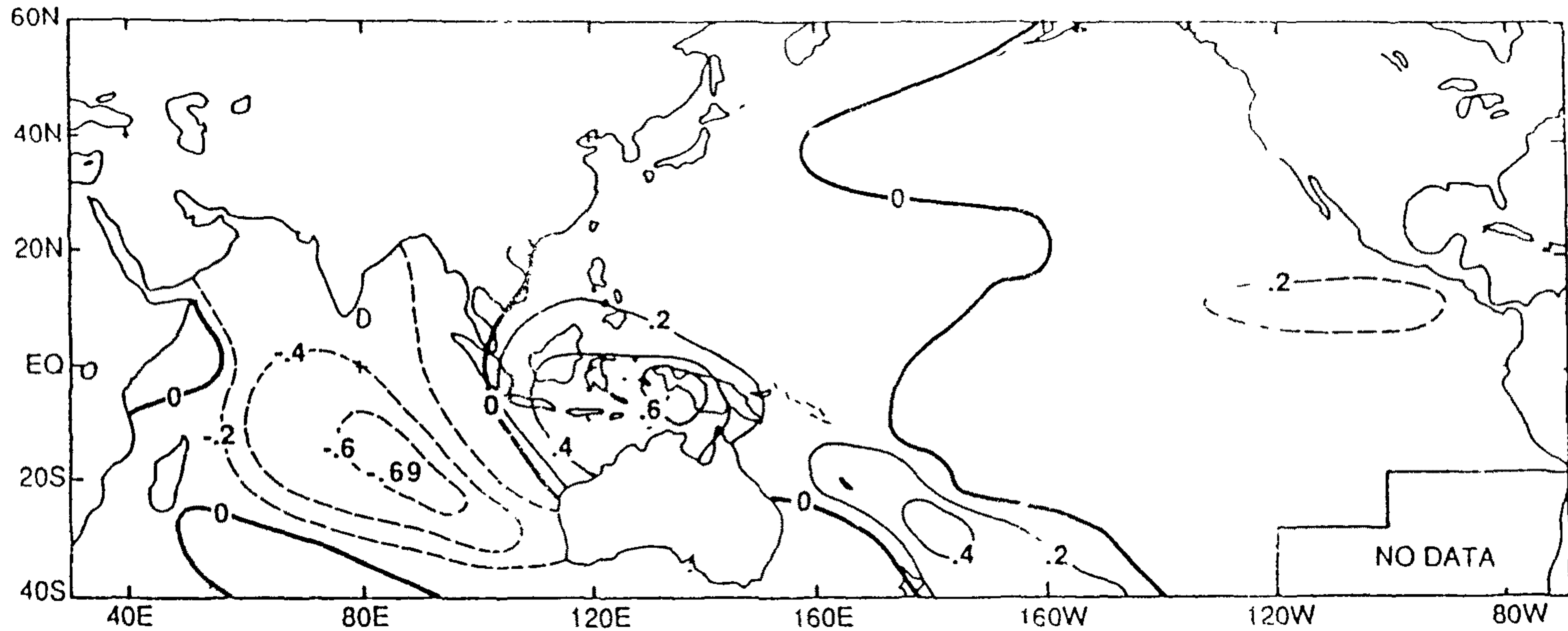
< 그림 2 >

Histograms comparing observed (solid) and simulated July to September Sahel and Guinea Coast rainfall anomalies for ten past years using the UKMO climate model (integrations made with specified observed SST). The two simulations are run from different initial conditions taken from data from 1987 and 1984 (Rowell *et al.*, 1992, Maskell and Rowell, personal communication)

주변의 해양에서 해수면 온도 분포와 오스트레일리아 기후 사이에 통계적인 관계는 여러 해 동안 관측되었다. 이들 관계는 열대 지역에서 열대 외 지역으로 확장되어 발견된다. 예를 들면, Streten 은 오스트레일리아 강우와 대규모의 SST 이상 변동치 사이의 분명한 연계를 설명하기 위하여 SST의 20년 자료 세트를 사용하였다. 오스트레일리아 강우에 미치는 남방 진동의 영향은 잘 기록되어 있으나, 최근에 오스트레일리아 기후에서 전지구적인 SST 분포에 대한 이상 변화의 영향이 분명하다. 예를 들면, Nicholls는 오스트레일리아 겨울 강우의 첫 번째 주요 구성분은 그림 3에서 보여주듯이 중앙 인도양과 인도네시아 사이의 SST 경사와 상관관계가 있음을 보인다. 오스트레일리아 기후 변화에서 더 장기간 변화의 특성은 Allan과 Haylock에 의해 연구되었다. 그들은 특히 최근 몇십 년에 걸쳐 남서 오스트레일리아에서 겨울 강우의 일반적인 감소 원인을 살펴보았다. 그들은 전 지역에 평균 해수면 압력에 대규모 순환의 변화와 관련이 있는 강우의 십년 규모의 변화를 발견하였다. 대규모의 순환과 특별한 지역의 기후변동 사이의 관련 원인을 설명하고 기록하기 위하여 CLIVAR에서 더 심도 깊은 연구를 수행할 필요가 있다. 동남아프리카 강우의 경년 변화는 대서양과 인도양의 특정한 부분의 SST와 밀접하게 관계가 있다. 가장 밀접한 관계는 동아프리카 연안의 외양과 대서양의 Benguela 연안을 따라 남서 인도양에서 SST와 함께 발견되었다.

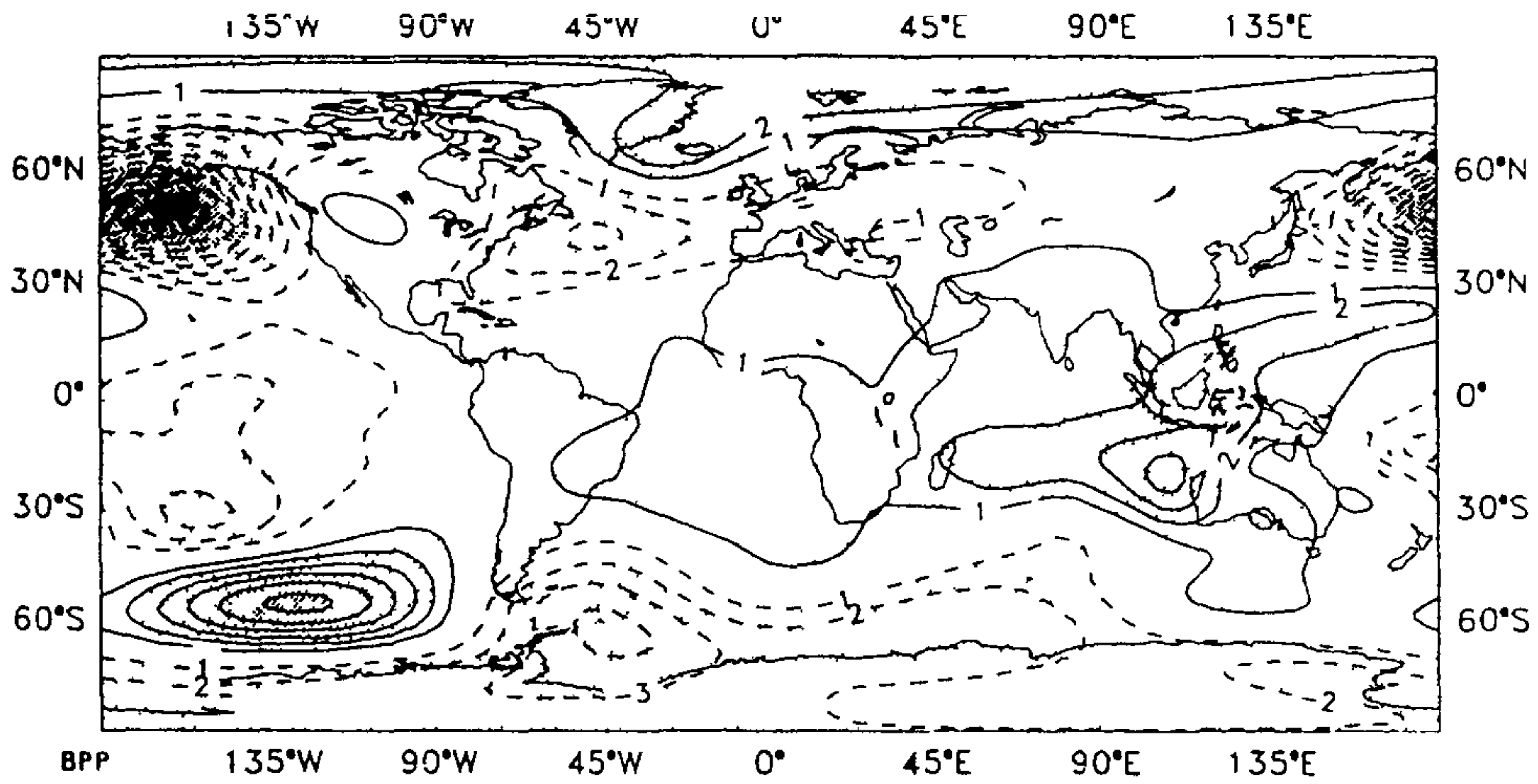
(3) 열대와 온-한대 지역의 상호작용에 관한 모델링 연구들

온-한대 지역의 변화를 모의 실험하기 위한 모델에서 현재 발생 능력의 한 예로서 그림 4는 T63 ECMWF 모델의 120일 통합의 두 앙상블 평균 사이의 차이를 보여준다. 두 앙상블은 11월 1일 부터 9일까지 연속적인 일일 분석으로 초기 값을 설정하였다. 첫 번째 앙상블에서 통합은 1986년부터 자료를 사용하여 초기화하였으며 엘니뇨 기간인 북방의 겨울 1986/87에 관측된 전지구적인 SST로 통합하였다. 두 번째 앙상블에서 통합은 1988년부터 자료를 이용하여 초기 설정하였으며 라니냐 기간인 겨울 1988/89에 관측된 SST로 통합하였다. 일반적으로 관측치와 모의 실험치의 일치는 상당히 좋다. 이것은 관측된 연구들로부터 얻은 결과들과 일치하며 특히 비록 내부 변화의 크기와 비교할 정도로 크지 않으나 유럽 전역에 엘니뇨의 영향이 있다는 것과 일치한다. 1987/88 기간동안 다른 계절에 만들어진 계절의 앙상블 통합들은 북

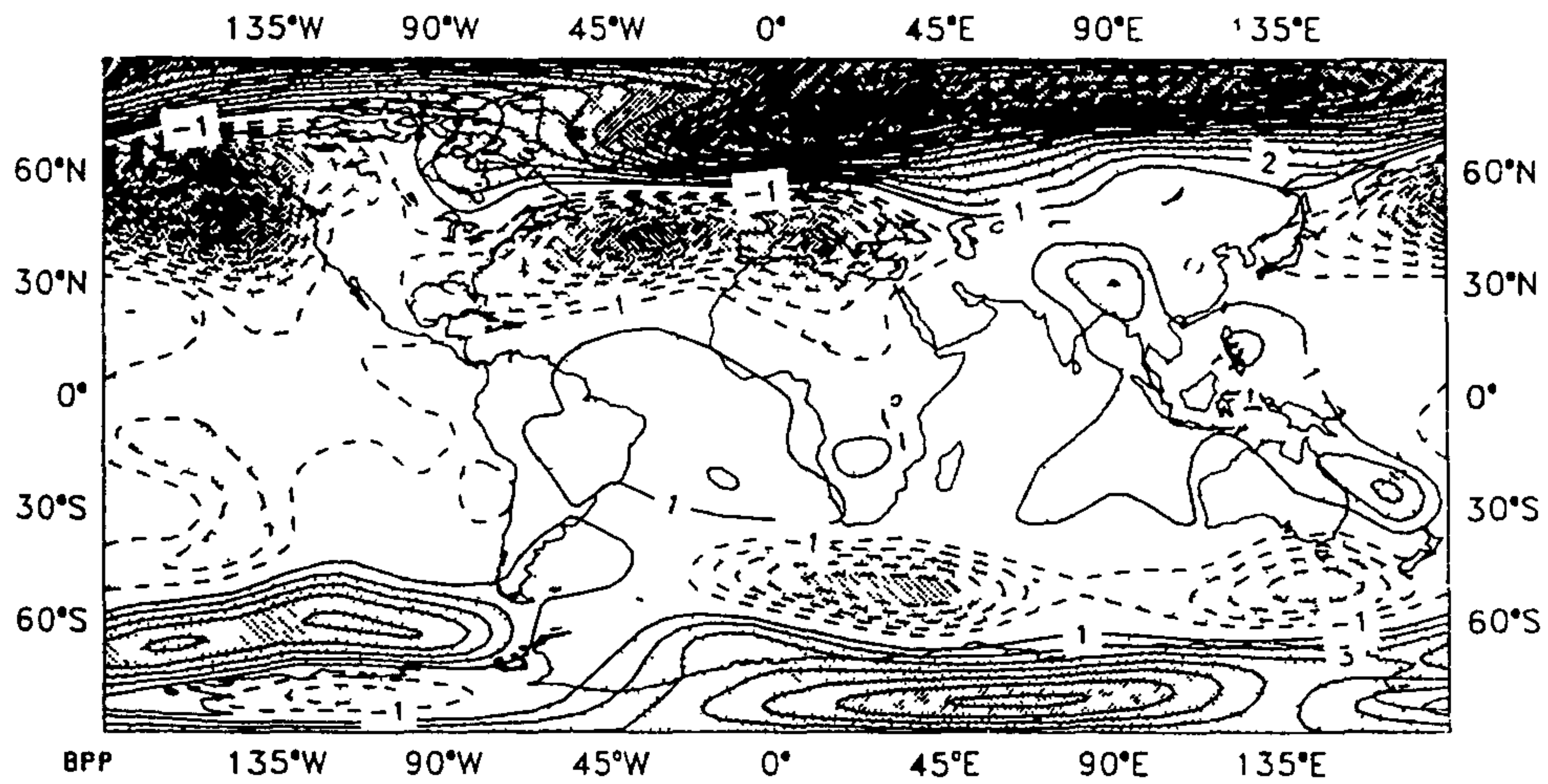


< 그림 3 > Simultaneous correlations between austral winter (JJA) SST anomalies and the first rotated principal component of Australian rainfall (Nicholls, 1989)

a)



b)



< 그림 4 >

Seasonal-mean 1000 mb height difference estimates for DJF 1986/7 - DJF 1988/9 (a) from 9-member ensemble-mean integrations initiated on 1, 2, 9 November and run with observed SSTs, (b) from operational analyses (Palmer and Anderson 1994)

쪽의 열대 외 지역 대기에서 최대 예보 가능치가 봄에 있을 것이라고 암시해 준다

또한 계절간 시간 규모로 유럽 전역에 순환이상 변동치가 엘니뇨와는 직접적으로 관련이 없는 SST 이상 변동과 상관관계가 있다는 증거가 있다 예를 들면, 모델감도 연구들은 하류 대기의 발달로 Newfoundland 근처에 중위도 SST 이상 변화의 영향을 암시하는 관측된 상관관계를 재현한다. 그러나 강한 기후 변화에서 SST의 역할은 논의의 여지가 있다. CLIVAR가 열대 외 해양과 대기 사이의 상호작용에 대하여 밝혀야 할 문제이다.

열대 외 지역의 기후 이상 변동치에 관한 연관된 모델의 hindcasts는 Bengtsson 등에 의한 이중 접근(two-tier approach)을 이용하여 만들어졌다 이 시도에서 열대 태평양 SST은 표층 바람과 SST 사이에 통계적인 관계로 추정된 대기 구성 성분과 연관된 해양의 GCM으로 구성되어 있는 연관된 모델을 이용한 첫 번째 hindcast(예보)이다 이렇게 만들어진 SST는 열대와 열대 외 지역의 상호작용을 나타내는 대기모델에 이용되며 생성될 열대 외 지역의 변화들의 hindcast를 가능하게 한다 열대 지역과 열대 외 지역 사이의 상호작용을 조절하는 진행 과정들에 대한 우리의 이해는 여전히 초기 단계이다. CLIVAR-GOALS의 목적은 온-한대 지역에서 발견되는 어떠한 기후 변화라도 예측할 수 있는 기술을 향상시키는 것이다

라 계절풍과 이들의 예보

(1) 전지구적인 열원

열대 대기는 주로 상층으로 길게 뻗은 구름에서 나온 잠열에 의해 움직인다 이 대류의 구름들은 큰 덩어리로 묶여지는 경향이 있음을 보여주는데, 이 구름들은 열대 대기의 "열원 (heat sources)"이 된다 지구에는 세계의 주요 열원이 있다 하나는 아마존 분지 위에 집중되어 있고, 하나는 열대 아프리카, 가장 큰 것은 인도네시아와 말레이시아를 포함하고 섬 주변과 주변 해양 지역들을 포함하는 "해양성 대륙 (maritime continent)"에 있다 아메리카, 아프리카, 아시아-오스트레일리아의 계절풍은 이러한 열원의 계절적인 변화와 관련이 있다 계절풍 열원은 일반적으로 북방의 여름철에 가장 북서쪽에, 남국의 여름철에 가장 남동쪽에 위치한다 아시아-오스트레일리아 계절풍을 포함하는 해양성 대륙 열원은 SST 변화와 밀접한 상관관계가 있는 반면, 아마존 분지와 아프리카 열원은 주로 육상 위에 있어 SST와 관련이 적다 사실 이 열원의

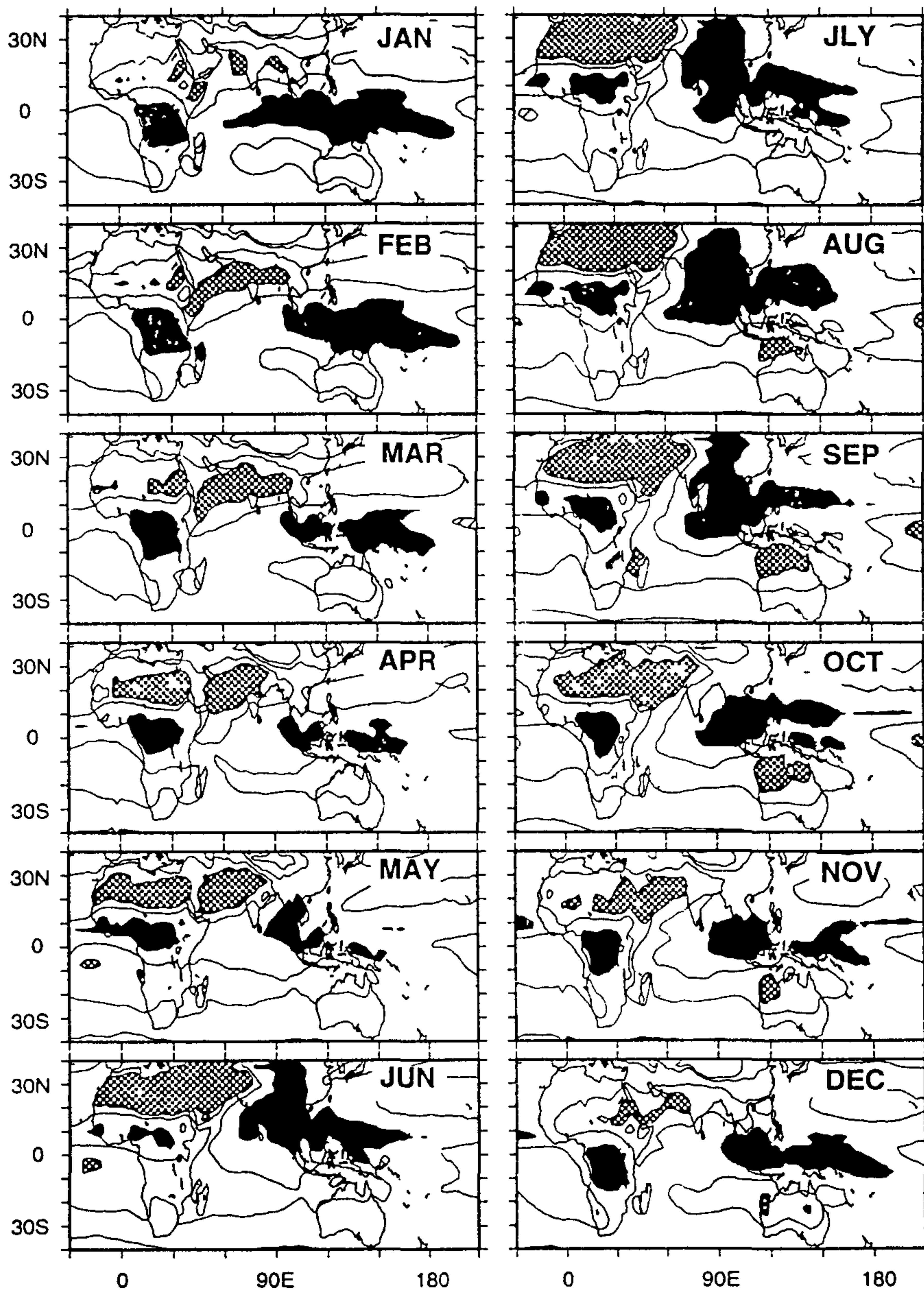
경년 움직임은 ENSO 현상과 관계가 있으며, 계절풍은 해양을 움직이는데 매우 중요하다.

국지적인 열원 외에 남태평양수렴대와 (South Pacific Convergence Zone, SPCZ) 남대서양 수렴대는 (South Atlantic Convergence Zone, SACZ) 남동쪽에서 북서쪽으로 생성되고, 각 해양에 열대간 수렴대 (Intertropical Convergence Zones, ITCZs)가 형성된다 열대간 수렴대는 일반적으로 적도의 북쪽에 있고, 북방의 봄에 적도에 가장 가까이 존재하며 북방의 늦가을에 가장 북쪽에 있다

전지구적인 상관관계로부터 계절풍은 대기의 경년 열 순환에 가장 큰 기여를 하고 이것들은 상당히 대기의 일반 순환 자체에 영향을 끼친다 열원과 열 소비 (열이 흡수 소산되는 지역)의 년 순환 과정에 대한 도표 표시는 우주에서 측정된 장파 방사 (Outgoing long-wave-radiation, OLR)의 분포이다 낮은 방사는 깊은 대류 구름들의 찬 표면을 나타낸다 그림 5은 경도와 위도로 평균 월 분포에 의하여 서태평양과 인도양, 아프리카 전역에 대한 OLR의 경년 순환을 보여준다 태평양-인도양 지역에서 OLR 최소의 위치는 warm pool에서 동남아시아까지 북쪽으로 이동한다. 반대로 북아프리카와 중동에서 OLR 최대는 연중 내내 북방의 여름에 증가하며 더 지속적인 형태로 존재한다 이 장파 방사 열싱크는 가장 지속적인 기후학적인 특징이다. 그래서 열 중심 지역과 대기 열의 경사 모두 강한 연중 주기가 있다.

계절풍 특히 아시아-오스트레일리아 계절풍은 대류권 순환의 경년 변화에 중요한 원인이다 비록 최대 경년 SST변화의 중심이 ENSO 대 사건의 특징이 있는 동쪽 열대 태평양에 위치하나, 가장 큰 경년 운동에너지 변화의 중심은 계절풍 지역에 위치한다.

인도-태평양 지역에서 열의 경년 순환 과정은 복잡하다 3월과 4월 사이에 동태평양의 SST는 증가하며 따라서 적도를 따라 동서 SST 경사는 최소 상태이다. 적도를 따라 낮은 OLR의 지역은 이 시기에 급하게 감소하기 시작한다 반면 태평양에서 동서 열경사 (heat gradient)는 감소하나 인도 계절풍과 관계가 있는 열은 5월과 6월 사이에 적도의 북쪽에서 대류 활동이 커질 때 빠르게 증가한다 이 빠른 변화와 관련되어 인도의 동아시아 계절풍의 시작은 꽤 갑작스럽다 10월에 유사한 진행 과정은 아시아에서 겨울 계절풍이 시작되며 오스트레일리아에서 여름 계절풍이 시작되는 특징들이 있다



< 그림 5 >

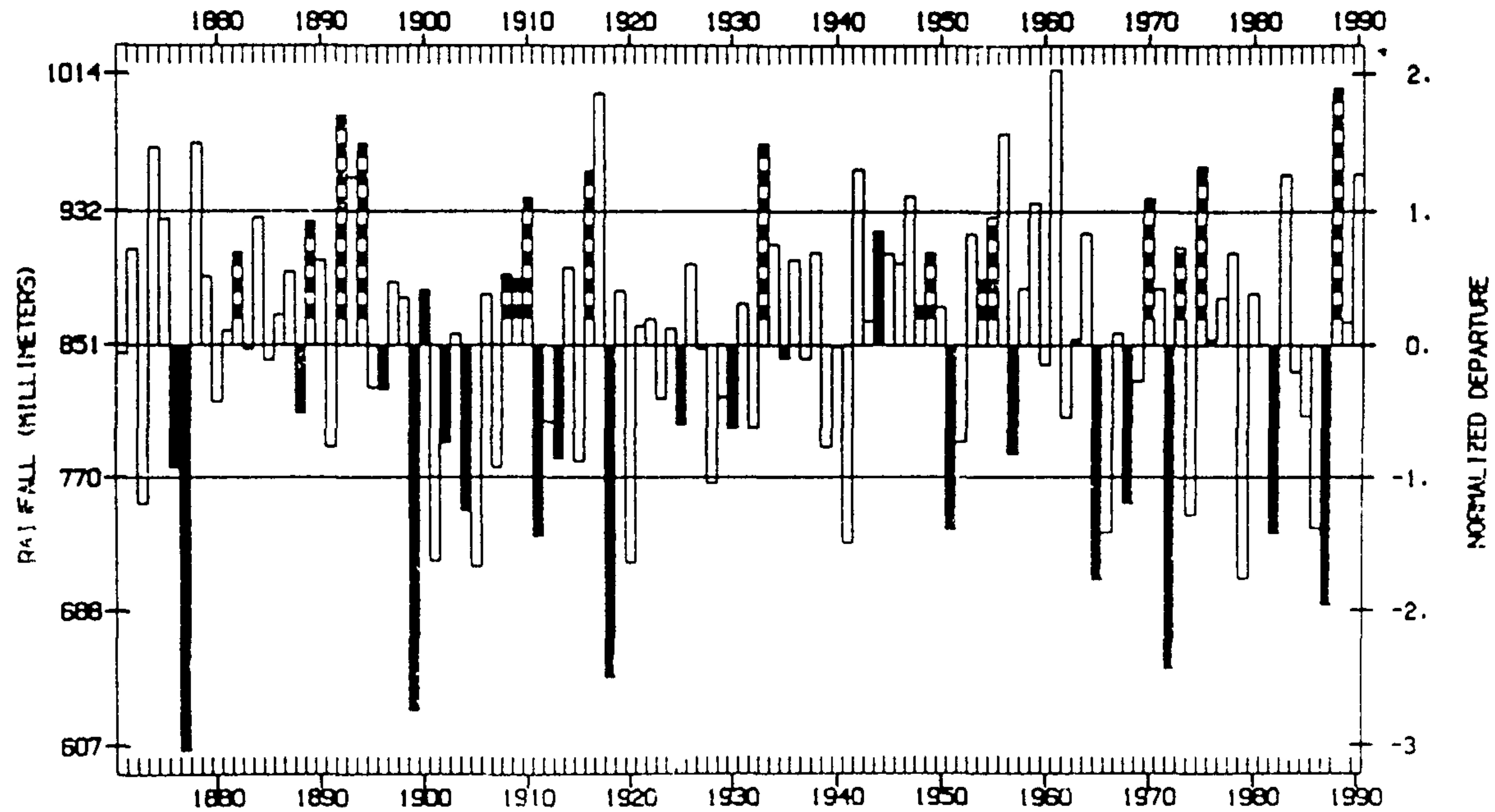
The annual cycle of the outgoing long-wave radiation (OLR) in terms of the long-term monthly averages. In the Pacific-Indian Ocean region, the minima in OLR (correlated with maximum convection, and thus with precipitation) exists in the eastern Indian Ocean and the western Pacific Ocean. Through spring and early summer, the locus of minimum OLR moves northward to East and South Asia. However, over North Africa and the Middle East, the maximum in OLR (indicating radiational cooling to space) exists as a very persistent feature throughout the year. In boreal summer, it increases in value by 30 W/m^2 more than winter, indicating a stronger radiative loss to space (Webster, 1995)

거대한 아시아 대륙 때문에 동반구는 전통적으로 계절풍 반구로 여겨져 왔다. 사실 인도 전역의 여름 계절풍 강우에서 경년 변동은 심각한 가뭄이나 파괴적인 홍수를 일으키기에 충분할 정도로 크다. 1877년의 심각한 가뭄은 인도 계절풍 강우의 예보 인자를 찾으려는 시도들을 유발하였다. 비록 현실적인 예보 인자들은 알 수 없는 것으로 판명되었지만, 이것들의 조사로 결국 지금 유명한 남방 진동을 발견하게 되었다.

(가) ENSO와 아시아 여름 계절풍

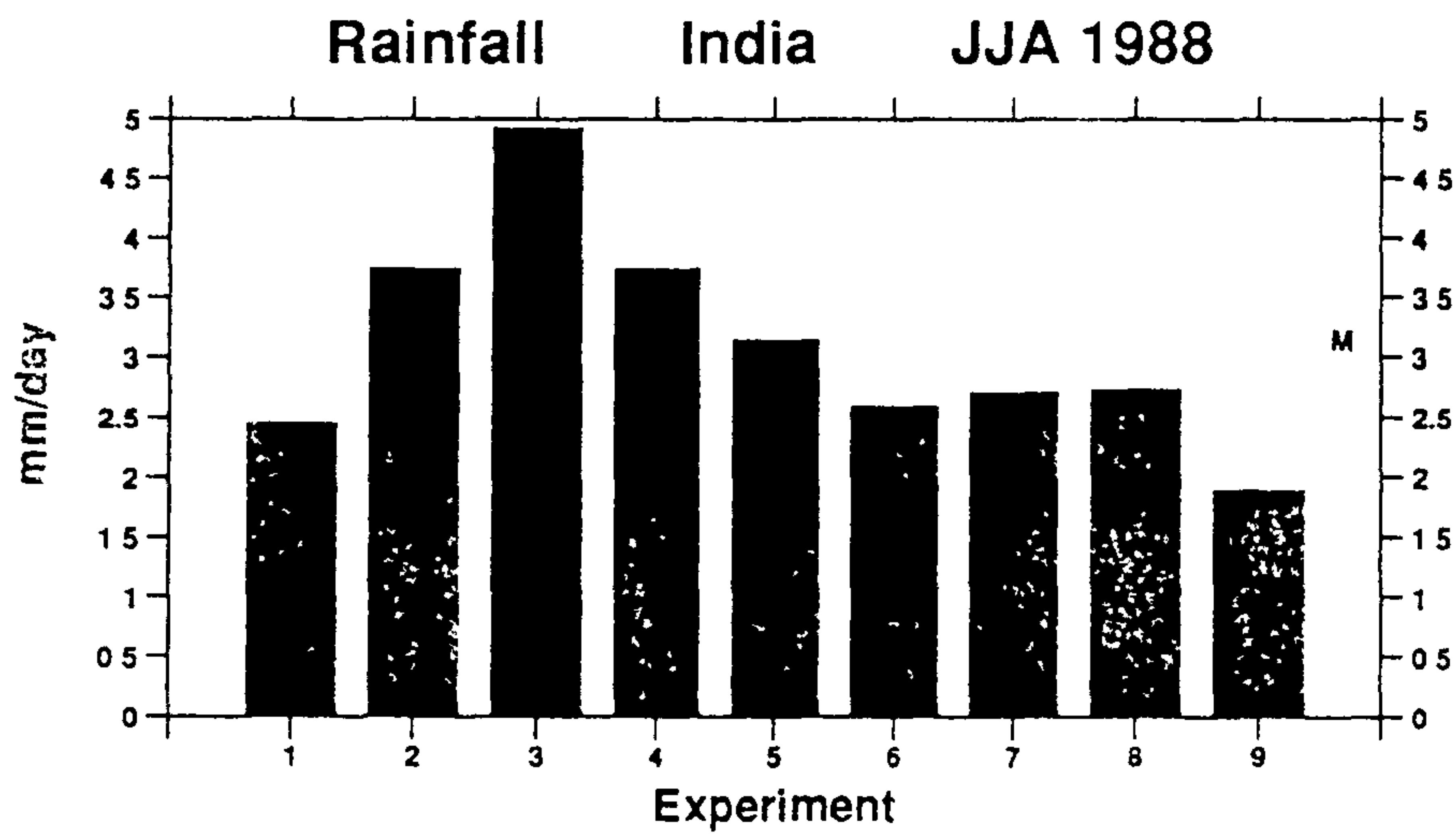
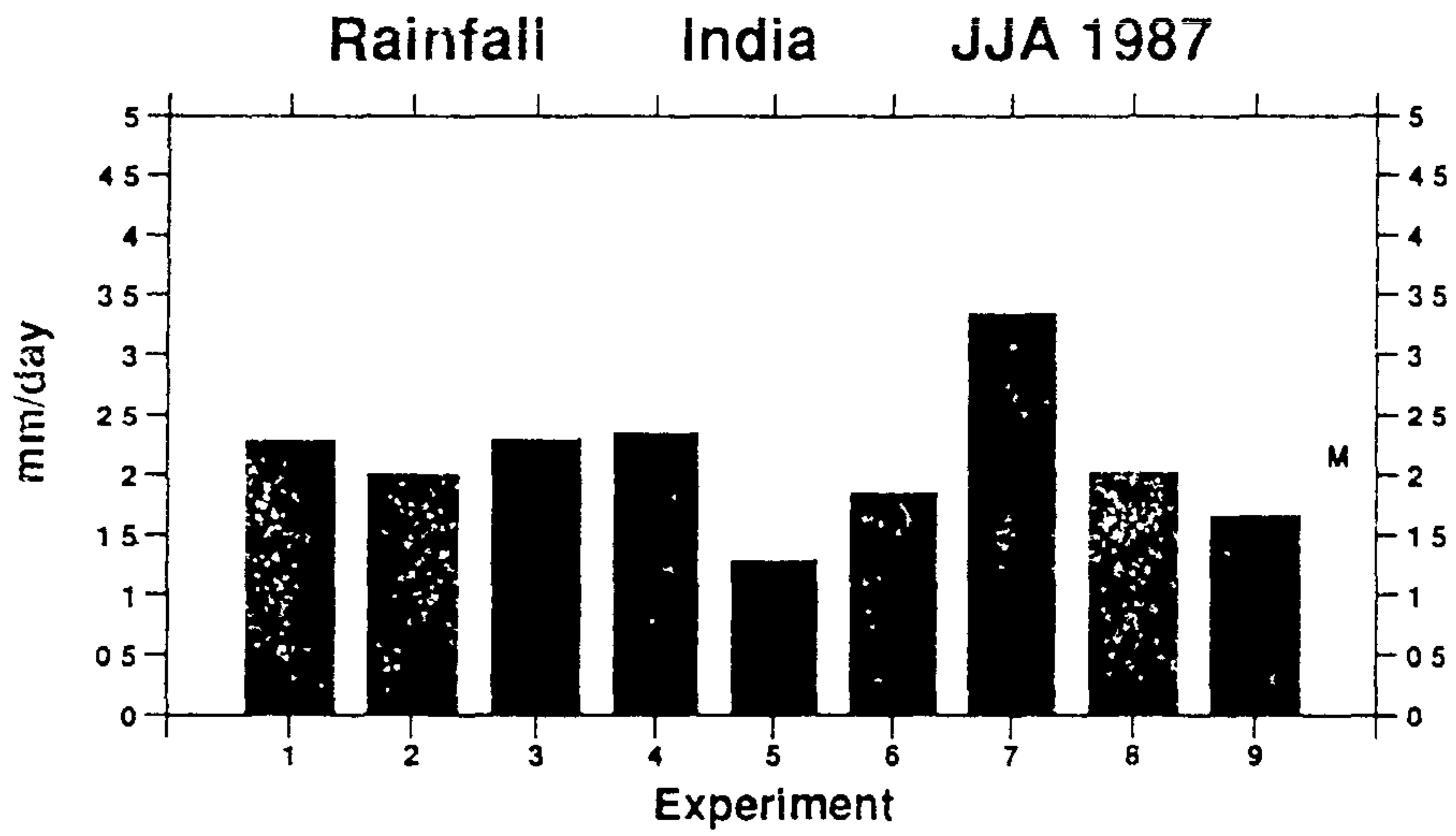
Rasmusson과 Carpenter은 ENSO와 아시아 여름 계절풍 사이에 분명한 관계가 있음을 보여주었다. 인도 전역의 가뭄은 ENSO의 온난 위상(warm phase)과 관계가 있고 홍수는 한랭 위상(cold phase)과 관계가 있다. 이 관계는 그림 6에서 보여진다. 그러나 이러한 밀접한 관계에도 불구하고 강우 이상 변동의 세기와 ENSO 세기 사이의 대응 관계는 비교적 약하다. 인도 전역에 강우는 전 계절풍 지역의 강우에 관한 징조는 아닌 것 같다. 사실 인도는 오직 동반구의 전형적인 계절풍 지역의 작은 지역일 뿐이다. 서태평양의 warm pool 지역에 걸친 대류 작용이 동아시아 계절풍 강우 선의 세기와 위치에 영향을 준다.

계절풍-ENSO의 동시적인 연계는 수치 모델을 이용한 TOGA/WANE 계절풍 수치 실험 그룹에 의해 조사되었다. 두개의 특정한 시기가 연구를 위해 선정되었다: 1987년 엘니뇨 여름 (warm phase)과 1988년 라니냐 여름 (cold phase)이 그것이다. 아프리카 사하라 사막 아래 지역 나라들과 인도 모두 1987년에 극심한 가뭄을 겪었다. 1988년에 사하라 사막의 강우는 이것의 장주기 평균으로 복귀되었지만 인도의 계절풍 강우는 평균 이상이었다. 일련의 모델들은 관측된 SST를 이용하여 2년 동안 4-8월에 실행되었다. 몇 개의 모델만이 인도 강우가 1987년에는 평균 이하로 1988년에는 평균 이상이었음을 발견하여 분명하게 해주었다. 이것은 물리적 특성들을 모델로 만드는 것에 대한 인도 강우 예보의 감도를 나타내며, 이 지역이 아주 복잡한 변화가 있음을 보여준다. 결과들이 또한 초기 조건들에 민감할 가능성이 있다. 그림 7은 강우가 이들 초기 대기설 정상태와 구별되는 한 앙상블의 9개 통합으로부터 평균을 보여준다. 앙상블 전체의 평균 강우는 단지 그림 6에서 나타내었듯이 1987년 동안에 평균 이하이고 1988년에는 평균 이상이다. 그러나 앙상블 구성 요소들 이상의



< 그림 6 >

Anomalies of Indian rainfall. Warm ENSO years are marked by shading and cold events by hatching (Shukla, 1991).



< 그림 7 >

An ensemble of Indian rainfall for (a) 1987, and (b) 1988, showing the stochastic element in monsoon rainfall (Palmer and Anderson, 1994)

강우에서 중요한 확장이 있고, 특히 차가운 앙상블에 있으며, 이것은 상당히 혼란스런 영향을 암시한다. 해양-육상-대기 연구센터 (Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies, COLA) 모델을 가지고 한 유사한 실험은 앙상블 수 사이에 더 작은 폭을 보여준다. CLIVAR는 그러한 결론들이 개개의 모델에 의존하는 정도를 분명하게 하려고 노력해야 할 것이다.

마 대기-육상 표면 상호작용의 역할

육상 표면 특성 또한 계절간 시간 규모로 대기의 변화에 영향을 미친다는 증거가 있다. 토양 습도와 적설에 이상 변동치는 계절간 기후 이상 변화의 발생과 유지에 중요하다는 것을 보여주었다. 따라서 기후 변화를 예보하고 이해하기 위하여, 또한 연관된 시스템의 요소로서 그리고 특히 경계 조건으로써 모두 식물의 성장과 육상의 진행 과정들을 고려해야만 한다.

계절간 예보를 위한 대규모의 육상 표면 이상 변화의 영향과 중요성에 대한 초기의 추측 중의 하나는 Blanford에 의해 제안되었는데, 그는 인도와 미얀마 전역에 여름 계절풍은 히말라야의 봄 적설에 의해 영향을 받는다고 하였다. 이 추측은 모델 실험으로 부분적으로 지지되었다. Chen은 또한 히말라야 위에 적설이 중국 전역에 걸친 동아시아 계절풍에 영향을 줄 것이라고 제안하였다.

알베도와 표층 조도와 같은 큰 육상-표면 특성들은 식물 성장과 잎면적 지수와 같은 생물학적인 특성들에 의존한다. 알베도, 표층 조도, 토양 습도의 육상-표면 특성에 변화는 지면 온도, 증발, 현 열류 속도에 변화를 초래한다. 지면 온도의 수평적인 경사의 변화는 또한 습도의 수렴을 바꾼다. 습도 수렴에 직면하여 온도의 수직적인 경사의 편차는 대류와 강우에 변화를 가져오고 이것은 결과적으로 더 토양의 습도를 바꾼다. 양자택일로 대기과 육상-표면과의 상호작용은 대류를 일으키는 낮은 수준의 안정성에 국부적인 변화처럼 더 간단하게 여겨질 수도 있고 이것은 구름과 강우로 표층 습도를 바꾼다. 이들 상호작용의 특성과 정도는 육상-표면 변화가 발생하는 역학적인 순환 지역의 특징에 달려 있다. 아열대 지역에서 연장된 가뭄의 출현과 열대 외 지역에서 지속되는 열파의 성향이 최소한 부분적으로나 대기-육상 상호작용으로 설명될 수 있다. 또한 습기의 국부적인 재순환, 식물 성장, 잎면적 지수 등은 강수의 지역적인 분포에 중요한 역할을 한다. 이 대기-육상 상호작용을 정확히 다룰 경우 계

절간 평균 표면 온도의 예보와 가능한 세계의 아열대 대륙 지역에 강우의 예보 가능성을 제공한다

중위도 순환에서 토양 습도 이상 변화의 역할이 GCM 통합을 이용하여 연구되었다. 예를 들면, Yeh 등과 Wang은 토양 습도에서 큰 지역적인 이상 변화는 2개월 이상 지속되는 비정상적인 대기 순환을 생성할 수 있음을 보여주었다. Serafini은 초기의 여름철 토양 습도 이상 변화가 시베리아와 북아메리카에서 최소한 50일 동안 지속될 수 있음을 발견하고 봄철 마지막에 토양 습도의 값들이 그 후 여름의 기후에 상당히 영향을 미칠 것으로 추정하였다. Simmonds와 Lynch는 오스트레일리아 겨울철 기후에 미치는 토양 습기 이상 변화의 영향을 연구하는데 유사한 결론에 도달하였다. Fennessy 등은 북아메리카 전역에 1988년 여름 가뭄을 모의 실험할 수 있는 그들의 능력이, 만일 이들의 통합이 관측된 토양 습도에 대한 추정치로 초기 설정되었다면, 상당히 개선되었을 것이라고 하였다. 게다가 Webster와 Srinivasan은 계절풍의 계절 간에 변화에 관한 표면 수력학적인 진행 과정들의 중요성을 보여준다

중위도 SST 이상 변화의 예보와 영향에 대한 논의에서 지적되었듯이 이들 결과들은 육상 표면 이상 변화들이 기본적으로 예보 가능하다는 것을 증명하지 못한다. 이들 특성의 변동은 간접적으로 (예를 들면 ENSO) 또는 내부 대기 변화에 의해 주로 조종되는 것 같다. 반면에 대기와 이들의 상호작용은 이상 변화의 육상 표면 에너지가 없을 경우보다 더 지속된다면 특별한 대기 순환 양상을 상당히 안정화 할 것이다.

계절간 경년 기후 변화의 예보에 대한 연관된 해양-육상-대기 시스템의 현실적인 모델의 개발은 따라서 토양 습도, 육상-표면 알베도, 눈덩이로 뒤덮인 들판과 표층 조도를 기술하는 것 보다 예보 가능한 종합적인 육상-표층 과정 모델들을 필요로 한다. CLIVAR-GOALS의 모델링 구성 성분은 육상-표면과 열대 외 지역에서 대기, 상층 해양, 토양 습도에 관한 모의 실험, 눈, 해빙과 식물 성장을 포함한 열대 해양과 대기의 연관된 모델의 확대를 중점을 두어 다룰 것이다. 낮은 빈도의 기후변화가 해빙 확장의 연간 변화와 관계가 있을 가능성이 있다. 그러나 그러한 변화를 예보할 수 있는 능력은 설명되지 않았다.

더 좋은 육상-표면 모델의 개발 임무와 육상 표면 모델을 확인하기 위한 자료 세트의 준비가 GEWEX 프로그램과 함께 우선적으로 남아 있다. CLIVAR-GOALS은 육상-표면 진행 과정을 전지구적인 해양-대기-육상 시스템에 합치는데 이들 GEWEX 결

과들을 이용할 것이다 CLIVAR-GOALS 모델에서 해빙에 관한 설명은 ACSYS 모델링 발달에 달려 있다

마. 프로그램의 영역

프로그램의 구체적인 실행 계획은 구성되어 있지 않다. 여기서는 단지 CLIVAR-GOALS를 실행할 국제적인 활동 영역과 특성의 개관을 제공할 작정이다 프로그램의 첫번째 책임은 성공적인 TOGA 프로그램하에 개발된 연구 활동을 유지하고 추진하는 것이다 CLIVAR-GOALS은 아래에서 자세하게 논의되어질 4개의 주요 요소를 포함할 것이다 즉 경험적인 연구들, 모델링, 관측과 진행 과정 연구들 각각의 구성 성분들은 종합적인 프로그램의 개발에 필수적이며 각각은 다른 구성 성분들의 결과에 의지한다

(1) 모델 개발과 감도 연구들

수많은 해양 모델들은 연관된 기후 연구들에 사용할 만하고, 여러면에서 적절하나 여전히 대기과 해양을 연결하고 혼합의 변수화시 심각한 결점들이 나타난다. 해양 모델의 실행은 또한 수평적인 해석에 제한되어 있고, 이들의 작용이 수직적인 해석이 총 개념으로 기술되어 있느냐에 달려있다 모델들은 일반적으로 사실 전 지구적이기 보다 분지 규모이며, 그래서 열 염분 순환의 표시는 제한되어 있다 모델에서 부적절하게 사용된 초기 설정 진행과정은 이들 모델에 누적된 결함의 영향을 보상해야 한다.

많은 모델들의 결과는 동쪽 열대 태평양과 동쪽대서양 SST가 약간 따뜻하다 이것의 가장 그럴 듯한 원인은 너무 적은 구름의 생산이며 총운에 대한 모의 실험의 부족의 결과이다 이것은 SST의 증가를 초래하며 너무 많은 태양 방사를 표면에 도달할 수 없게 하고 또한 총운의 발달을 방해한다 체계적인 모델 에러의 제거가 CLIVAR-GOALS의 우선 순위로 남아있다

(2) 예보 시스템의 개발

TOGA동안 연관된 모델은 어떤 계절과 어떤 지역에서 실시간 계절 사이의 예보를 지원할 수 있는 장소에서 개발되어 왔다 그러한 시스템은 지금 여러 나라에서

운영중이며, 이들의 정확성과 일관성에 대한 지속적인 평가는 연관된 모델의 개발에 대한 그 이상의 자극을 제공한다.

일반적으로 완전히 해양-대기 상호연관 GCMs보다 이상변화 모델들이 ENSO 예보에 사용된다. 유효성은 지역적인 강우나 온도보다 지역적인 SST를 배경으로 하는 경향이 있다. 따라서 이들 시스템은 일년의 특정한 때에 특정한 지역에 계절간 변화에 대하여 유용한 정보를 제공해주는 반면, 실시간 계절간 예보시스템의 개발을 돕기 위한 국제적인 연구 뼈대를 제공하기 위하여서는 CLIVAR-GOALS는 분명 필요하다.

(3) 모의 실험과 계절풍의 예보

GCMs에 의해 북방의 여름 동안에 인도 지역 전역에서 강우의 모의 실험에서 기술은 수년 동안 대체로 향상되지 않았다. 인도 경도 전역에 걸쳐 열대수렴대의 구별되는 선택된 위치의 존재때문에 모델들은 해양의 열대수렴대와 관련되어 발생하는 대부분의 강우로 한 형태를 맞추는 경향이 있다. 중요한 GCMs에 의해 모의 실험된 강수에 뚜렷한 차이가 있으며, 보통 여름 강우 양상은 관측과 다르다. Palmer은 또한 인도 전역에 걸쳐 여름 계절풍 강우에 대한 모의 실험은 초기 조건에 매우 민감하다는 것을 발견했다. COLA 모델 결과들은 초기 조건같은 감도를 보여주지 않는다.

CLIVAR-GOALS는 만일 이들 결과들이 모델 결함의 영향이거나 또는 이것들이 계절풍의 큰 자연적인 변화에 관한 징후들이 있다면 조사해야 한다.

인도 지역 전역 강우의 모의실험에 대한 부족은 아프리카 사하라 사막과 같은 열대 지역의 다른 지역들에 상황과는 반대일 수 있다. 이들 차이는 만일 부수적인 진행이 경년 규모로 예보를 만든다면 CLIVAR-GOALS에 의해 알아둘 필요가 있다.

(4) 수치 기상 예보와 기후 변화 모델링

기후 예보와 예보 실험에 사용되어질 몇몇 모델들은 기후 변화 실험에서 사용된 것과 다르지 않은 중간 범위의 기상 예보에서 사용된 것과 같은 대기의 구성성분을 가지고 있을 것이다. 따라서 세계의 모델링 사이에 상호작용에 대한 고려할 만한 영역이 있다.

계절간 시간 규모로 평균 흐름과 기상에 관한 모의 실험에서 개선은 기상 예보

모델의 향상을 가져올 수 있다. 한 예는 낮은 풍속 조건에서 잠열류속에 관한 설명에 의해 제시된다. 계절간 시간 규모 실험으로부터 북태평양을 차단하는 빈도를 모의 실험하는 능력은 인도네시아 부근 SST의 특성에 특히 민감하다는 것이 발견되었다. 이것은 증발의 변수화로 그 이상의 연구를 촉진하였다. 이것은 연관된 모델에서 엘니뇨와 같은 낮은 빈도의 변화의 모드들을 모의하는데 중요한 그러한 열류속을 정확하게 설명할 수 있는 능력이 있을뿐만 아니라 중간 범위의 시간 규모로 기상 대사건(Synoptic events)의 발달에 중요하다. 사실 연관된 GCMs와 NWP 모델에서 사용된 많은 변수들은 모든 시간 규모에서 성공적인 모의 실험을 하는데 중요하다.

(5) 재분석

모델들을 실험하는데 이용할 수 있는 기후 기록들은 부족하다. 꽤 완전한 상층 대기 관측의 약 30년 기록이 이용할 만하다. 이것은 존재하고 있는 자료로부터 가능한 최상의 자료 세트를 준비하는데 상당한 노력이 필요하다는 것을 의미한다.

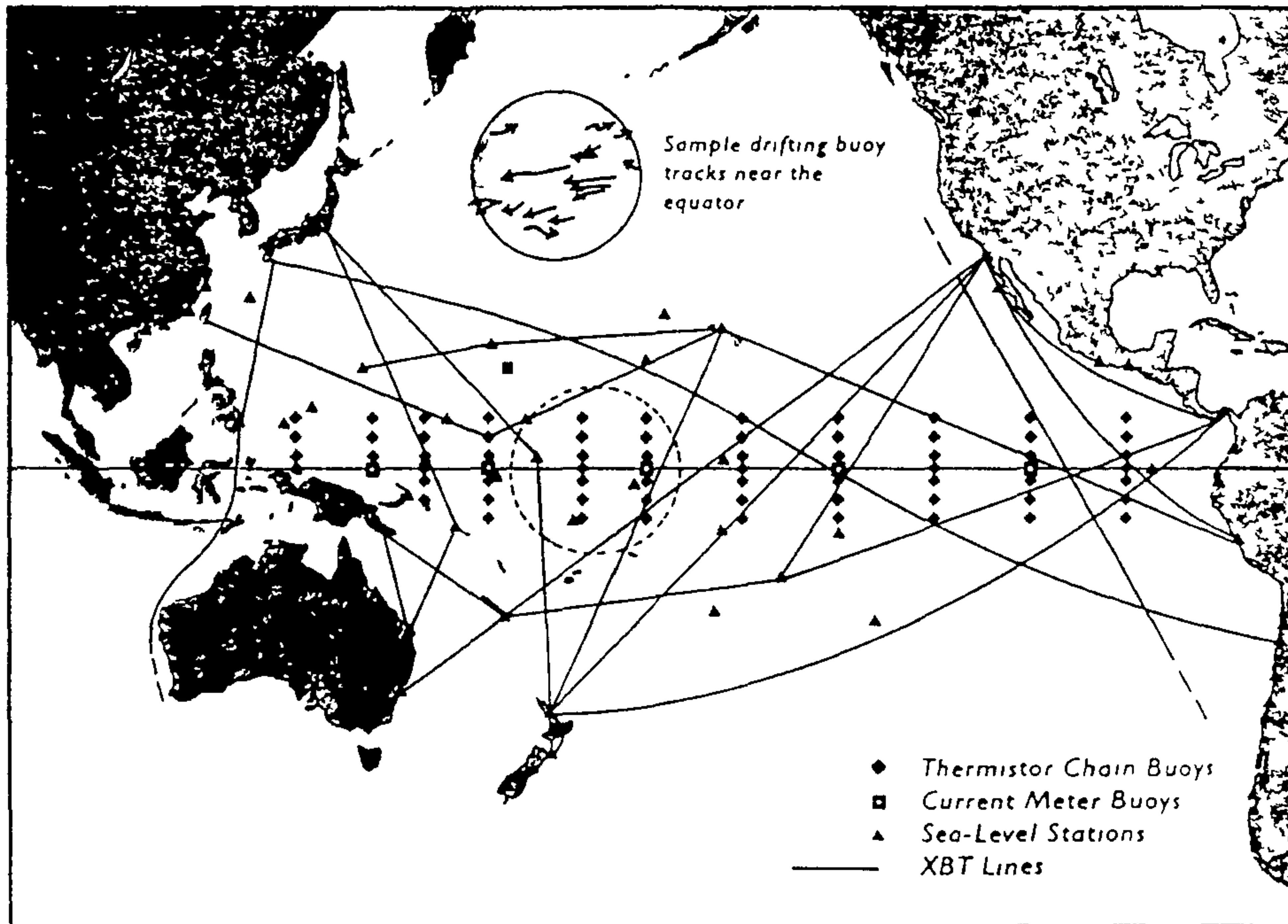
(6) 관측

(가) 일반적인 요구들

CLIVAR-GOALS 관측 요구들은 기후 변화의 예보와 모의 실험의 초기 설정과 확인, 그리고 계절간 경년시간 규모로 연관된 기후 시스템의 작용을 결정하는 물리적인 기작들에 관한 협정 획득과 기본적인 과학적 가정들에 대한 실험을 가능하게 하는 한 데이터베이스의 개발을 목표로 삼는다.

CLIVAR-GOALS에 대한 관측 시스템의 개발은 국제 프로그램의 발전 영역에 기초를 두어야 한다. TOGA 동안 10년의 경험은 CLIVAR-GOALS의 많은 관계, 특히 계절간 경년 기후 변화를 조정하거나 조절하는 열대 태평양 상층 해양의 역할을 중점을 두어 다루기 위하여 관측 시스템의 실행과 설계에 기여했다. 그림 8은 TOGA동안 개발된 태평양에서 XBT 선들과 배열 정박된 열대 대기 해양(Tropical Atmosphere Ocean, TAO)의 현재 분포를 보여준다. CLIVAR-GOALS에 대한 우선 순위는 이 열대 태평양 관측 시스템의 유지이다. 특히 태평양 TAO 배열은 상층 해양의 열 구조와 SST와 풍속, 표층 부근 습도를 포함한 변수들을 측정하여 기후 분석과 예보에 대한 필수적인 자료를 제공한다. 게다가 배열은 해양 순환, 염분, 강수를 측정하기 위하여 더 개발되었다.

Tropical Pacific Ocean Observing System



< 그림 8 >

Distribution of ocean observing systems in the Pacific developed under TOGA, including the TAO array and XBT lines

다른 해양에 대해 CLIVAR는 하나 이상의 답사 형태로 존재할 것이다 관측 시스템은 현상이 예보 가능한가를 결정하기 위하여 모델링 효과를 보충하는데 필요하다. 따라서 CLIVAR-GOALS의 관측 프로그램은 이들 해양의 상층까지 확장할 필요가 있다

여기에서 간략하게 서술하는 관측 요구들은 국제적으로 상호협력 노력에 의해 수행할 필요가 있고, 전지구 적인 규모로 연관된 시스템 작용의 특징을 나타내는데 목적을 둔 CLIVAR-GOALS의 중심 활동들을 나타낸다

CLIVAR-GOALS에 대한 자료에 대한 요구는 ① 대기의 에너지에 그들의 반응 특성을 설명하기 위한 해양학적 자료와 해양의 열 저장과 순환을 결정하기 위한 해양학적 자료, ② 두 매체 사이에 상호작용을 조정하는 플럭스를 측정하기 위한 해양-대기 계면의 자료, ③ 해양의 에너지에 대한 대기의 반응을 설명하기 위한 대기의 자료와 대기의 일반적인 순환을 측정하기 위한 대기의 자료, ④ 육상-표면 특징들, ⑤ 확인하고 연구하기 위한 데이터베이스를 확대하기 위한 대리 자료 등이다

CLIVAR-GOALS은 이미 국제 사회에 제공되는 존재하고 있는 기상학적 해양학적 시스템과 기작들을 기초로 일을 추진할 것이다 예를 들면, 많은 기본적인 대기 자료는 활동중인 수치 예보 센터에서 나온 주요 기상학적 변수들에 대한 전지구적 분석으로부터 얻게 될 것이다 그럼에도 불구하고 특정한 분석을 통합하기 위한 자료 처리와 부가적인 관측이 필요할 것이다 CLIVAR-GOALS하에 조직된 많은 자료의 수집, 파일 보관, 처리 활동은 TOGA 와 WOCE에 의해 세워진 자료 시스템에 의존할 것이다

CLIVAR-GOALS에 대한 처리 활동과 계획중인 자료 획득에 중요한 요소는 전지구적인 기후 관측 시스템의 개발 (Global Climate Observing System, GCOS)과 전지구적인 해양 관측 시스템 (Global Ocean Observing System, GOOS)으로 된 기후 전형(轉形)일 것이다 아래 기술되는 대부분의 현장 해양 측정은 GCOS의 해양 구성성분을 포함하기 위한 지원으로써 해양 관측시스템 개발 위원단 (Ocean Observing System Development Panel, OOSDP, 1995)에 의해 확인되었다 이것은 GOOS의 기후 전형이다 GCOS와 GOOS의 상호 협력은 CLIVAR-GOALS 개발될때 중요한 활동이 될 것이다 이들 프로그램과 연합 활동들은 기본으로서 GCOS/GOOS를 이용하여 새로운 관측 시스템의 실험과 개발, 설계를 포함할 것이다

(나) 관측 시스템

많은 대기, 해양과 육상-표면 변수들의 관측은 CLIVAR-GOALS의 목적과 일치하기 위해 필요할 것이다. 특별한 강조는 아래에서 기술하였듯이 직접적으로 대기-해양 상호작용에 영향을 주는 과정들을 이해하기 위한 요구에 들 것이다. 많은 이들 변수들을 측정하기 위한 관측시스템은 TOGA 하에 초기 설정되었으며, 이것은 CLIVAR-GOALS의 초기 연구 활동을 돕기 위하여 꼭 계속할 필요가 있다.

① 표층 바람의 변형

바람의 변형 에너지 함수에 관한 해석은 안정도-의존적인 항력계수를 추정하기 위하여 습도와, SST, 표층 대기 온도의 측정을 필요로 한다. 직접 관찰은 활동중인 바람 변형 결과를 증명하고 개선하는데 필요하다. 열대 태평양 바람장의 표본 관측 연구는 10-15° 경도와 2-3° 위도를 매일 측정하는 것이 적당된다.

CLIVAR에 대한 최소한 요구는 0.01Pa 정확도로 월간 평균 바람 변형의 추정이 가능하게 하는 측정들이다. 이것은 GCOS/GOOS 하에 운영중인 시스템과 일치할 것으로 기대된다. CLIVAR-GOALS의 연구 요구들은 특히 열대수렴대 근처 더 높은 빈도 결과들에 (주간 또는 10일 평균) 중점을 둘 것이다.

장기간 동안 계류 (산란기)와 능동, 수동 마이크로파로 조정되는 바람으로부터 직접적인 측정방법의 혼합은 현장 관측에 대한 지역적인 정확성을 가진 원격탐사의 공간적인 적용범위와 합치한다면 가장 좋은 접근방법이다.

② 표면하 온도

TOGA는 주로 NOAA 미국 기상센터와 같은 활동중인 센터들의 결과에 의해 구성된 전지구적인 SSTs계 (fields)에 의존한다. 이 결과는 현장과 위성 SST 자료를 이용한다. 현장 네트워크는 계류 부이와 표류 부이로부터 이루어진 측정과 선박 관측으로 구성될 필요가 있다. 비교적 선박 관측이 불충분하고 전해양의 일부분만이 선박 규정항로에 적합하기 때문에 부이 관측은 필요하다.

GOOS 프로그램은 선박 관측을 개선하리라 기대되며 선박 관측은 무작위 오차의 경향이 있다. 선박 관측은 위성 궤도를 따라 지도의 작성과 위성 치우침에 대한 교정에 맞는 정보를 제공해주는 장점이 있다. Kent의 연구는 선박 관측의 특성은 항상

될 수 있고, 정확한 SST와 대기-해양 플럭스 측정에 이용할 수 있음을 보여준다 이 관측들을 향상시키기 위한 프로그램을 수행하는데 몇 년이 걸릴 것으로 예상된다

질 높은 SST 관측들은 표류 부이로 제공된다 이 기술은 전지구적인 네트워크의 유지가 편리하고 보장되는 점에서 완성되었다 최소한의 요구는 여러 규모를 해결하는데 이용할 수 있는 충분한 질 높은 관측이다. 치우침을 교정한 위성 자료와 부이 관측에 토대를 둔 SST 분석의 비교는 보정 향상이 남방 중위도에서 가장 중요함을 보여준다

검색에 사용되는 많은 위성 관측은 또한 GCOS-GOOS하에 늘려야 하며 극궤도 관측의 완전한 가능성을 이용할 필요가 있다. 많은 위성으로부터 SST정보의 이용 (e.g. Along Track Scanning Radiometer, ATSR)또한 활발하게 조사되어야 한다 만일 이것들이 덜 치우친 추정들을 제공한다면 현장 관측에 대한 필요성은 줄어들 수 있다 그러나 경험은 현장 측정 프로그램이 항상 분석의 유효성을 보장하는데 필요하다는 것을 보여준다

③ 상층 해양 열 구조 (upper-ocean thermal structure)

표층 바람 변형과 SST와 함께 상층 해양 열구조계는 CLIVAR의 모든 양상과 연관된 대기-해양 모델의 성공적인 초기화에 필수적인 것으로 여겨진다 선박으로부터 XBTs를 이용하여 작성된 온도 단면도들은 비용이 효과적인 한 계속 이용해야한다 단면도를 작성하는 ALACE 부이와 같은 새로운 기술이 개발될 때 조사들은 관측 플랫폼들에 대한 가장 좋은 혼합을 확인하기 위해서 실행되어야 한다 적도파 유도장 치내에 고빈도 샘플링은 저빈도 신호를 줄이고 고빈도 변화를 해결하기 위하여 필요하다. 다층온도측정기를 사용한 TAO배열은 태평양에서 이 요구를 충족시키기 위해 유지되어야 하며, 연구는 미래에 다른 열대 분지에 대한 유사한 배열들에 대해 수행하고 조사하는데 필요하다

④ 해양 순환

적도를 따라 장기간 계류된 해류 속도 측정은 TAO배열의 일부로써 계속되어야 한다. 태평양에서 측정방법은 대략 30° 경도 간격으로 만들어져야 한다 다른 해양에서 관측은 직접적인 해류 측정을 포함하는 상층 해양 열측정에 대한 영구적인 네트

워크를 고안할 수 있도록 간격을 정할 필요가 있다

이동 부이 (뜰개) 프로그램은 표면 경계층의 순환에 대한 자료 세트에 TOGA와 WOCE에 제공되었다. 이 플랫폼은 또한 SST의 관측을 향상시킨다. WOCE와 협력하여 CLIVAR는 이들 자료가 모델 결과에 대한 확인이나 예보 시스템의 입력으로 이용될 수 있는 정도를 조사해야 한다. 유사한 자료 세트가 인도양과 열대 대서양에 대해서도 얻어져야 한다

⑤ 대기의 변수들

TOGA 동안 측정된 요구들에 토대를 둔 바람직한 목적으로는 ㉑ 세계적인 규모의 순환에 대한 적절한 3차원적인 구조를 기술하기 위하여 열대 지역에서 매일 2500 km 간격으로 바람에 대한 완전한 수직적인 단면도 작성, ㉒ 최소한 매일 한번 지구 전체에 걸쳐 각 정점에서 대류권에 바람의 완전한 수직적인 단면도 작성, ㉓ 지구 전체에 최소한 매일 기본으로 1200 km 간격으로 대기의 표층 압력, ㉔ 전지구적인 순환에 미치는 차후의 영향과 열대 대류권에서 잠열 방출에 이상변동 양상들을 분석하기 위한 장파방사와 강수에 관한 분포도 작성, ㉕ 상층 해양층에 방사파 유입 등이다

자원 관측 상선단 (Voluntary Observing Ship, VOS) 프로그램으로부터 얻은 자료와 표층 정점들은 지구 전체에 1200 km 해상도로 대기 표층 압력에 대한 요구를 만족할 것이다. 그러나 표류중인 부이와 자동 정점으로부터 부가적인 표층 압력 측정은 남반구의 온-한대 지역에서 필요할 것이다

CLIVAR-GOALS는 유입되는 단파 복사 플럭스에 대한 표면 복사 수지 기후 프로젝트 (Surface Radiation Budget Climatology Project)와 강수의 분포도 작성을 위해 전지구적인 강수 기후 프로젝트 (Global Precipitation Climatology Project, GPCP), 그리고 전지구적인 플럭스 자료세트의 공급을 위해 GEWEX 프로젝트에 의지해야 할 것이다.

⑥ 해수면

해수면 관측은 모델을 확인하고 모델 초기값 설정을 하는데 유용하다. 최소한 CLIVAR 초기년도 동안 위성 고도 측정기는 보통의 전지구적인 해수면도를 작성할 수 있을 것이다. 자료는 역학적인 고도에서 약 3cm의 정확성으로 열대에서 확인되었다

이 질이 좋은 고도 측정기에 의한 측정은 현재 위성이 만들어내는 것 이외에도 지속될 것이며, 기후 연구에 이들의 이용을 최대화하기 위해 CLIVAR-GOALS에 의해 완전히 이용될 필요가 있다

협약된 해수면 정점 네트워크에서의 측정방법들은 또한 해수면 변화도를 작성하는데 이용될 수 있다 이것은 또한 역사적인 해수면 기록들의 연장을 보장 하기 위해 장주기 기록들이 있는 많은 정점을 유지하는 것도 중요하다 측지학이나 다른 방법을 이용하여 측지적(測地的) 영향이 제거된 정점들이 다른 정점들보다 CLIVAR에 더 가치가 있다.

⑦ 염분

열대 해양의 많은 지역에서 강수율과 증발율에 상당한 불균형이 있다 따라서 표층 염분의 국부적인 변화는 해양 상층의 밀도에 중요한 영향을 미친다 연관된 해양 대기 시스템의 전체 역학에 중요한 염분 변화를 정량화하는 것이 CLIVAR-GOALS에 필요할 것이다 이것은 관련된 진행과정들의 모델링 연구뿐만 아니라 상층 해양 염분의 체계적인 측정도 필요할 것이다. 예를 들면, 직접적인 염분 측정방법이 TAO 계류에서 통합되어야 할 것이다. 열대 강우 측정 임무 (Tropical Rainfall Measurement Mission, TRMM)와 같은 위성과 부이에 장착된 강우 계량기로 전 해양 강우의 측정 또한 표층 염분의 분석을 도울 것이다.

(다) 고기후 자료

최근 기계화된 시기 이전의 기후는 추정 기록으로 유추해야 한다 이것들은 나무의 나이테, 동위원소, 심해 퇴적물과 빙하 시추의 지화학적 미소고생물학적 분석, 산호 시추의 지화학적 분석 (동위원소, 미량금속)을 포함한다. 예를 들면, 태평양 전역에 몇 개의 적도 지점에서 산호각으로부터 얻은 미량 금속 기록과 동위원소 기록은 ENSO 변화에 대한 다양한 양상들의 가치 있는 기록을 제시한다 개별적으로 각 분석 기술은 ENSO 현상의 중요한 구성 성분에 대한 민감한 감시기를 제공한다 표면 온도, 강우, 바람과 용승 월간 해석을 시도중인 이들 기록들은 이 지역에서 경년 기후변화에 대한 완전한 스펙트럼을 포함하며 열대 태평양 전역에 해양학적인 이상변화와 기후의 공간적인 변화와 생성에 대한 자료를 제공한다 파키스탄의 대륙 주변부

로부터 (인도양) 또는 Carriaco 분지 (Caribbean 북대서양)으로부터 또는 캘리포니아 만 (태평양)의 퇴적물과 같은 호상점토 (연층)의 해양 퇴적물은 온도나 염분에 관한 높은 해석 기록 (1-2년)을 제공하며 이것은 산호 기록과 비교될 수 있다 이 방법은 잠정적으로 최소한 열대에서 최근 1000년까지 기계적인 해양의 자료를 확대할 수 있다

십년간에서 백년간 변화는 가장 많은 고기후 기록들에서 분명하다 그린랜드 빙하 기록은 경년 해석 시도를 가능하게 한다. 버뮤다와 열대 태평양의 산호 기록에서 처럼 대부분 마지막 천년을 포함하는 나무 나이테로부터 정확하게 기록된 온도 역사는 경년 해결이 가능하듯이 기록에서 십년간의 변화는 분명하다. 그러나 이 대리 기록들은 여전히 전지구적인 분석에는 너무 드물기 때문에 지역적인 환경에서만 오직 해석되어야 한다. 예를 들면, 1607-1982년에 대한 갈라파고스 섬의 산호 온도 기록들은 이전보다 20세기 동안 더 차가워진 바다 표층 온도를 나타낸다 반면에 오스트레일리아 대보초와 오스트레일리아 아브라함 암초 기록은 지난 100년 동안 따뜻한 해표면 온도가 1850-1900년 시기에 평균 해표면 온도 보다 높았음을 나타낸다.

고기후 자료의 분석에 대한 현재의 활동들은 다음과 같은 주제를 포함하기 위하여 CLIVAR-GOALS 하에 확장될 수 있다

- ㉑ 열대 변화에 영향을 주는 피드백 진행과정에 대한 가정들을 실험 (즉 유라시아 적설과 인도양 적도의 SST가 아시아 계절풍의 강도에 미치는 상호의 영향),
- ㉒ ENSO의 빈도에 있어서 십년간 규모에 변화의 영향과 정도의 추정;
- ㉓ ENSO와 아시아 계절풍, 아프리카 계절풍과 같은 열대 기후 시스템 사이에 장주기 관계들에 대하여 기술,
- ㉔ 대규모 경계 에너지와 열대 해양-대기 시스템의 계절간 주기 사이에 관계의 기술.

(라) 진행과정 연구들

CLIVAR-GOALS의 학술적인 목적들을 성취하기 위하여 실행할 필요가 있는 예보와 모의 실험에 사용된 모델들의 정확성을 제한하는 진행과정들에 대해 항상 목적을 둔 특별한 연구들이 기대된다 특정한 관찰, 모델링, 자료 요구들은 이들 진행과정 연구들의 학술적인 목적들에 부응하기 위해 정해질 것이다

CLIVAR-GOALS에 관련된 국제 프로젝트가 GEWEX 아시아 계절풍 실험 (GEWEX Asian Monsoon Experiment, GAME)이다 GAME의 주된 학술적인 목적은

전지구 해양과 에너지 순환에서 아시아 계절풍의 역할과 아시아 계절풍 변화에 대한 지식을 늘리는 것이다. 프로젝트는 국제 과학 위원회에 의해 지도될 것이며, 장기간의 측정과 위성 관측, 진행과정 연구들, 자료수집등을 포함할 것이다. 이것은 1997년에 시작될 것이며 3년 TRMM 프로젝트의 중간 년도와 맞추기 위해 1998년은 관측 강화 시기가 될 것이다

CLIVAR-GOALS에 관련된 많은 다른 국제 과정 연구들이 다음 몇 년에 걸쳐 수행될 것 같다 범미 계절 풍을 조절하는 대기-해양-육상 상호작용 과정들에 대한 연구와 아시아 계절풍에 대한 인도양에서의 대기-해양 상호작용 연구등이 있다.

3 십년에서 백년간 기후 변화와 예보(CLIVAR-DecCen)

가. 개요

(1) 이론적인 근거

지구 기후는 매년 마다 또는 더 긴 시간 규모로 자연적인 변화를 겪는다. 몇 개의 기후 변화 현상 중에서 가장 두드러진 ENSO만이 많이 연구되어 왔다. 변화 유형들이 대개 장주기인 다양한 변화가 지역적으로 넓은 지역에 걸쳐 존재한다 이것들은 주로 관측기계에 의한 기후 기록이 약 백년정도 전부터 시작되었기 때문에 기록이 상대적으로 빈약하다 지구의 자연적인 기후 변화에 대한 원인이 되는 기작들에 대해 이미 알려진 것들 또한 태부족이다. 이 지식과 이해의 부족은 일반적으로 말해서 변화의 시간이 길어질 때 점점 중요해지는 해양의 역할과 관계가 있다.

기후에서 인류 기원성 변화들은 자연적인 기후 변동을 토대로 첨가될 것이다 따라서 미래의 기후변화를 측정하기 위하여 CLIVAR-ACC의 중요성은 자연적인 기후 변화의 공간적 시간적 규모, 예보 가능한 정도와 이해에 있다. 비록 이것이 19세기 이래로 약 0.5°C까지 따뜻해진 전지구적인 표층 대기 온도의 관측 기록으로부터 추정되었지만, 십년간 변화는 기후 기록의 일부일 수 있고 이것은 아직 대기에서 온실 가스의 증가에 의한 온난화라고 하는 것은 아직 이른다.

CLIVAR-DecCen은 더 긴 기후 시스템의 변화와 십년간의 변화에 대한 물리학적 이해에 중심을 둘 것이다 해양에서 일어나는 진행과정들은 이 시간 규모로 매우 중

요하고 해양의 기후에 미치는 역할에 관하여서는 너무 알려져 있지 않기 때문에 CLIVAR-DecCen은 초기에 해양의 역할을 조사하기 위한 특별한 노력을 할 것이다 이것은 다양한 공간과 시간 규모로 심해와 표층 해양의 관측들을 필요로 한다

대기가 오직 해표면 온도만을 접하는 반면 해양-대기 사이의 상호관계는 해양의 표층 이상을 포함한다 SST 양상들은 많은 섞임 현상과 3차원 해양 순환에 의존한다 이것들은 십년간 시간 규모에 기후 시스템의 핵심적인 부분을 나타내며 시공간 규모의 넓은 스펙트럼을 따라 표층과 해양 전체를 연결한다 CLIVAR-DecCen은 십년과 백년 기간 규모에서 전지구적인 SST 양상과 변화, 지역의 형태, 해양을 움직이는 힘을 이해하려고 노력한다.

이들 규모의 기후 변화에 대한 우리의 이해가 ENSO와 관련된 현상들보다 깊지 않다는 인식 때문에 CLIVAR-DecCen 프로그램은 전반에서 기술한 CLIVAR-GOALS 활동들이 하는 것보다 더 학술적이라는 특징을 갖고 있다

(2) 학술적인 목적들

CLIVAR-DecCen은 십년간 백년간 시간 규모로 연관된 기후 시스템의 물리적 특성들을 이해하고 이들 시간 규모의 기후 변화를 예보할 수 있는 정도를 측정하는 것을 기본적인 목적으로 갖고 있다 이것은 빙설과 관련된 것과 대기, 육상의 수력학적 순환, 전 지구적 기후 변화를 가져오는데 이들 구성 성분들과 연결되는 피이드백을 포함한 해양 진행과정들을 포함한다

CLIVAR-DecCen 의 학술적인 목적들은 ㉞ 연관된 기후 시스템의 모델링과 관측들의 분석을 통하여 십년간에서 백년간 기후 변화와 예보를 이해하고 기술하는 것, ㉟ 고(古) 연구들의 프로그램, 자료 고고학, 대기와 해양의 자료 재분석, 관측 프로그램들로 십년간에서 백년간 변화의 기록을 확장하는 것, ㊱ 관측 프로그램들과 다른 관련된 기후 연구와 협력하여, 십년간에서 백년간 기후 변화와 예보의 기작들을 이해하는데 필요한 프로그램과 적절한 관측과 자료 계산, 자료 파일 보관을 수행하고 개발하는 것 등이다

(3) 과학적 문제들

CLIVAR-DecCen의 포괄적인 연구 목적은 십년간 변화에 대한 예보 가능한 정도를 결정하는 것에 특히 강조하여 복합 해양-대기 시스템의 십년간에서부터 보다 긴 시기의 기후 변화에 관한 물리적 특성을 이해하는 것이다. 이 목적을 추구하기 위하여 일련의 연구 문제들이 제기되고, 정량적인 것을 강조하여 CLIVAR-DecCen에 의해 해답을 찾게 될 것이다.

(가) 대기-해양-해빙 시스템에서 십년간과 더 긴 시간 변화의 특징적인 양상은 무엇인가?

이 연구 문제의 범위는 외부 에너지와 수력학적인 순환과 연결하기 위하여, 대기-해양 복합 모델의 존재를 찾고 대기와 해양과 빙설에서 변화의 양상을 규명하기 위하여 기계적인 기록과 고기후 기록에 대한 분석에 초점을 둔다. 과거 몇십 년의 기후 기록에 대한 인류 기원에 의한 변화의 존재 가능성은 여기에서 고려되어야 한다.

(나) 해양-대기-빙하-육상시스템의 구성 성분들이 어떻게 다른 구성 성분들의 변화와 서로 작용 하는가?

이 질문을 제안하는 연구들은 기후 시스템의 개별적인 구성 성분들의 영향을 기술하려고 시도해야 할 것이다. 기후 기록의 부족 때문에 많은 이 문제들이 모델링으로 제시되어야만 할 것이고 여기에서 개별적인 기후 구성성분들이 그러한 연구를 위해 분리될 수 있으나, 그러한 관계에 대한 중요한 통계적인 결과들은 고기록의 분석으로부터 또한 예상된다.

(다) 기후 시스템에서 십년간과 더 긴 시간 변화에 대한 기작은 무엇인가?

이것은 돌발적인 기후 변화를 초래할 조건들이나 대기에서 이것의 영향, 해양의 내부 변화와 같은 십년간과 더 긴 시간의 변화에 대한 물리를 이해하는데 목적을 둔 일련의 연구 문제들이다. 모델링은 필수적인 연구 도구이나 과거 기후 변화 또한 분석되어야 할 것이다.

(라) 십년과 더 긴 시간의 변화가 어느 정도 예보 가능한가?

기후 지시자의 통계적인 기반과 십년과 더 긴 시간의 변화에 대한 더 나은 물리

적 특성들에 대한 해석이 제공된다면 이것으로 특별한 기후 양상들의 지속과 예보 정도에 대한 조사가 가능할 것이다

(4) 프로그램의 요소들

더 자세한 수행 계획으로 나아가기 위한 초기의 단계로서 제안된다면 프로그램의 개요는 다음의 연합된 시도이다:

① 대기 순환과 해빙의 분석과 재분석 그리고 바다 표층 변수들과 내부 해양 변화에 기초한 자료들의 분석과 재분석, 특별한 중점은 최근 과거 동안에 인류의 영향과 자연적인 영향을 구별하는데둔다;

② 고기록으로부터 과거 기후의 이해 향상을 위한 연구,

③ 복합 모델과 비복합 모델 모두를 사용한 모델링 연구들,

④ 측정 프로그램의 초기 설정

해양과 대기를 연결하는 진행과정들은 해양 수괴 형성을 지배하고 기후 변화에서 해양의 역할에 책임이 있으며, 혼합과 용승 현상과 빙하의 역할 모두 모델에서 더 잘 나타내고 이해하는데 필요하다.

(5) DecCen 연구 문제들

문제들의 첫 번째 세트는 십년간과 더 긴 시기의 변화의 패턴들을 결정하는데 초점을 둔다; 두 번째는 만일 에너지가 유일한 한 구성성분이라면 기후 시스템 내에 영향들을 확인하고자 시도한다, 세 번째는 연관된 시스템의 기작을 말한다 마지막으로 비록 이것이 위에서 언급한 세 부분의 연구 문제들의 일부이지만 예보의 정도는 분리된 주제로 논의된다

(가) 대기-해양-해빙 시스템에서 십년간과 더 긴 시기의 변화 양상들의 특징은 무엇인가?

연구 문제들의 이 카테고리에는 기계와 고기후 자료의 분석에 관한 정량적인 증가에 우선적으로 목적을 두나 또한 모델로 생성된 기후의 분석도 포함한다 특별한 목적들은 ① 단순 해양 모델이나 또는 연관된 모델과 기계적인 기록에서 SST의 변화, 대기 순환, 해빙, 내부 해양 온도-염분 구조를 규정하는 것, ② 외부 에너지의 변화, 특히 태양 방사와 에어로졸 그리고 또한 긴 시기에 빙상으로부터 담수의 유입의 변화

를 설명하는 것, ③ 관측과 복합 모델에서 변화에 관한 해양-대기 복합 모드들을 확인하는 것, ④ 더 오래된 기후 역사에서 추론된 변화의 존재와 고기후 에너지의 역사를 조사하기 위하여, 그리고 기후 자료를 과거로 넓히는데 고기후 징후들을 해석하고 분석하는 것 등이다

(나) 해양-대기-빙하-육상 시스템의 구성 성분들이 어떻게 다른 구성 성분들의 변화와 상호협력하는가?

이 부분의 문제들은 기후 시스템의 개별적인 구성 성분들이 분리된 모델링에 의해 본격적으로 역점을 두어 다루어져야 할 것이다. 고기록에서 재현되는 사건들의 통계적인 분석이 개별적인 기후 시스템 구성성분들의 역할을 이해하도록 해 줄 것이다. 특별한 연구 문제들은 ① 예를 들면, 서안 경계류나 폭풍 궤도와 관계가 있는 해빙 분포와 SST의 십년간 또는 더 긴 시기의 변화에 대한 대기의 반응은 무엇인가? SST 변화가 십년간 열대 강우 분포에 무슨 영향을 미치는가? ② 해양이 대기 에너지의 스펙트럼에 반응하는 것은 무엇이고 어떻게 이것이 SST와 표층 염분에 반사되는가? ③ 대기와 해양, 해빙 분포에서 생물권 시스템과 육상-빙하 변화와 육상 수력학적 순환에 대한 십년간과 더 긴 시기의 변화의 영향은 무엇인가? ④ 위의 기작들로부터 어떤 피이드백을 확인할 수 있는가? ⑤ 화산으로 인한 에어로졸의 대기로의 유입과 특히 태양 방사의 변화에 의해 외부에서 영향을 주는 십년간과 더 긴 시기의 자연적인 변화는 어느 정도인가?

(다) 기후 시스템에서 십년간과 더 긴 변화의 기작들은 무엇인가?

이 문제 세트는 중요한 기작들을 해결하기 위한 시도로써 기후 변화의 물리적 특성을 이해하는데 목적이 있다 특별한 연구 문제들은 다음과 같다

① 해양의 십년간에서 백년간 내부 변화에 대한 기작은 무엇이고 이것은 어느 정도 대기에 영향을 미치는가? 이 주제하에 주 중점은 특히 북대서양에서 동서방향의 움직임과 대규모 오버턴닝들이다

② 현재 기후의 전지구적 이동이나 지역적인 이동을 초래하는 조건들은 무엇인가? 그리고 기초가 되는 전지구적 또는 지역적인 기작들은 무엇인가? 특히 과거 기후 시기 동안 동서방향 오버턴닝 순환에 대한 고기후학적으로 추론된 갑작스런 변화를 일으키는 기작은 무엇인가?

③ 십년간에서 백년간 기후 변화의 기작에 대하여 과거 기후로부터 무엇을 배울 수 있는가? 어떻게 십년간에서 백년간 시간규모로 기후가 변화했는가?

④ 무슨 과정들이 해빙설의 십년간 변화에 개입되었고 기후시스템에서 이 변화의 역할은 무엇인가? 예를 들면, 수괴 형성, 표층 플럭스, 알베도에 미치는 이것의 영향.

⑤ 무슨 과정들이 전지구적인 해수 순환의 장주기 변화에 개입되어 있으며, 양극으로부터 해빙과 담수의 유출에 특히 어떤 변수들이 있고 어떻게 이것은 북쪽 대륙 전역에 수력학적인 순환과 대기 조건들에 의존하는가?

(라) 십년간과 더 긴 변화는 어느 정도 예보가능한가?

이 문제에 대한 해답은 과정 연구의 결과들뿐만 아니라 적당한 통계적인 모델과 수치 모델들을 개발하는 진행정도에 달려있을 것이다. 어느 정도 고기록을 개발에 이용할 수 있고 모델들을 증명하며 이것들의 예보 능력이 조사되어야만 한다. CLIVAR-DecCen의 주요 임무중의 하나는 해양-대기-빙하 변화의 연관된 모드들을 어느 정도 예보할 수 있는가를 결정하는 것이다.

물론 DecCen 목적에 부합하는 해답이 되도록 부가할 수 있는 연구 문제들이 있다 예상했듯이 어떤 것은 다른 국제적인 활동에 의해 수행되어야 할 것이다 예를 들면, CO₂ 흡수에서 해양의 십년간 변화의 역할은 무엇인가? 비록 이것은 어느 정도 흡수가 인류 기원성 영향에 중요한가가 아직 증명되지 않았으나 자연적인 십년간에서 백년간 변화에 대한 이것의 역할은 확실히 주목할만하다 CLIVAR-DecCen은 오직 문제의 물리적 특성만을 고려할 것이다. 이 문제의 다른 면들은 JGOGFS와 같은 프로그램에 의해 착수될 것으로 기대된다

4. 인류 기원성 기후 변동 감지와 모델링 (CLIVAR-ACC)

가 서론

온실 기체의 인류 기원성 방출은 전지구적인 온난화와 국부적인 기후와 환경변화 그리고 해수면 상승을 일으키는 것과 광범위한 관계가 있다 만인 사실이라면 이것들은 심각하게 사회적 경제적 영향을 끼칠 것이다 기후 변화에 대해 권위 있는 예고와 시기 적절한 충고는 정부와 일반적인 대중들에 의해 그리고 정부간 기후 변동

위원회 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)의 재검토 과정을 통해 한다. 십년간과 백년간 시간 규모를 포함하여 백년까지 기후 시스템의 자연적인 변화의 조사와 관련된 CLIVAR 프로그램과 이 변화 진행정도는 온실 기체와 에어로졸로부터 오는 것과 같은 외부에너지에 변화와 상호 작용을 하며 ICPP를 돕는데 특히 중요할 것이다

인류 기원성 기후 변동과 관련된 일들에 국가 정책과 국제적인 정책 수립을 위한 요구는 기후 시스템 모델과 모델의 능력과 모델을 더 잘 이해하기 위한 필요성을 강조한다. 특히 특히 인류의 영향으로 미래에 어떻게 기후가 변할 것인가에 관한 실제적인 예보에 대한 절실한 요구가 있다

CLIVAR-ACC의 목적들은 ① 관측된 기후 변동에 자연적인 변화와 인류 기원 요인들의 상대적인 원인들을 정량화하고 더 잘 이해하기 위하여, ② 인류 기원성 기후 변동의 초기 감지에 적합한 통계적인 기술들과 전략들을 적용하고 확인하기 위하여, ③ 다른 인류 기원 영향들과 온실 기체의 농도 증가로부터 다음세기 말까지 기후 변화를 예보하기 위하여, ④ 가능한 정도까지 지역적인 기후 변화의 예보를 제공하기 위하여, ⑤ 기후 변동을 감시하기 위한 관측 시스템 구축에 대한 길잡이를 제공하기 위하여 연구사업을 진행하고 있다

그러한 가능성들을 전하기 위하여 학술 위원회는 전지구적인 기후 시스템의 모델링과 기후 시스템의 이해와 기후의 변화와 감도를 개선하기 위한 노력을 확대하고 서둘러야 한다 이와 관련하여 이 이상의 연구를 위해 우선적인 주제들은 외부와 내부 에너지에 기후 시스템의 감도와 한 계절에서부터 수십 년까지 시간규모로 기후와 자연적인 변화를 지배하는 과정들과 이의 피이드백을 포함해야 한다.

이 CLIVAR 프로그램의 구성 성분은 또한 국제적인 전문지식, 상호협력, 상호 협의를 완전 이용할 수 있는 효과적이고 체계적인 방법에 대한 이들 문제들을 제시하기 위한 전략을 세울 것이다 이것은 특히 지역적인 측면에 중점을 두고 확실하게 규명된 기후 변동 시나리오에 관한 평가와 체계적인 생산에 대한 기후 모델들을 개발하는데 전략적인 프로그램을 개발하고 수행할 것이다. 이것은 또한 인류 기원으로 인한 기후 변동에 대한 “흔적” 확인 또는 감지 방법을 확립하려고 노력할 것이다

이 목적들에 부합하기 위하여 이것은 특히 최고 기술 수준의 종합적인 전지구적인 기후 모델을 포함하여 대기와 해양 모델의 조직을 유지하고, 응용하며 개선하고,

실험하고, 지속적인 개발이 필요할 것이다. 이들 모델들을 확인하고 개발하기 위하여 고도의 관측 시스템이 유지되고 구축되었음을 확실히 할 필요가 있다. 이 기능은 다른 두개의 CLIVAR 구성 프로그램들을 지원하는데 모아진 관측으로 보충되고 국제 GCOS 프로그램으로 수행되리라 예상된다

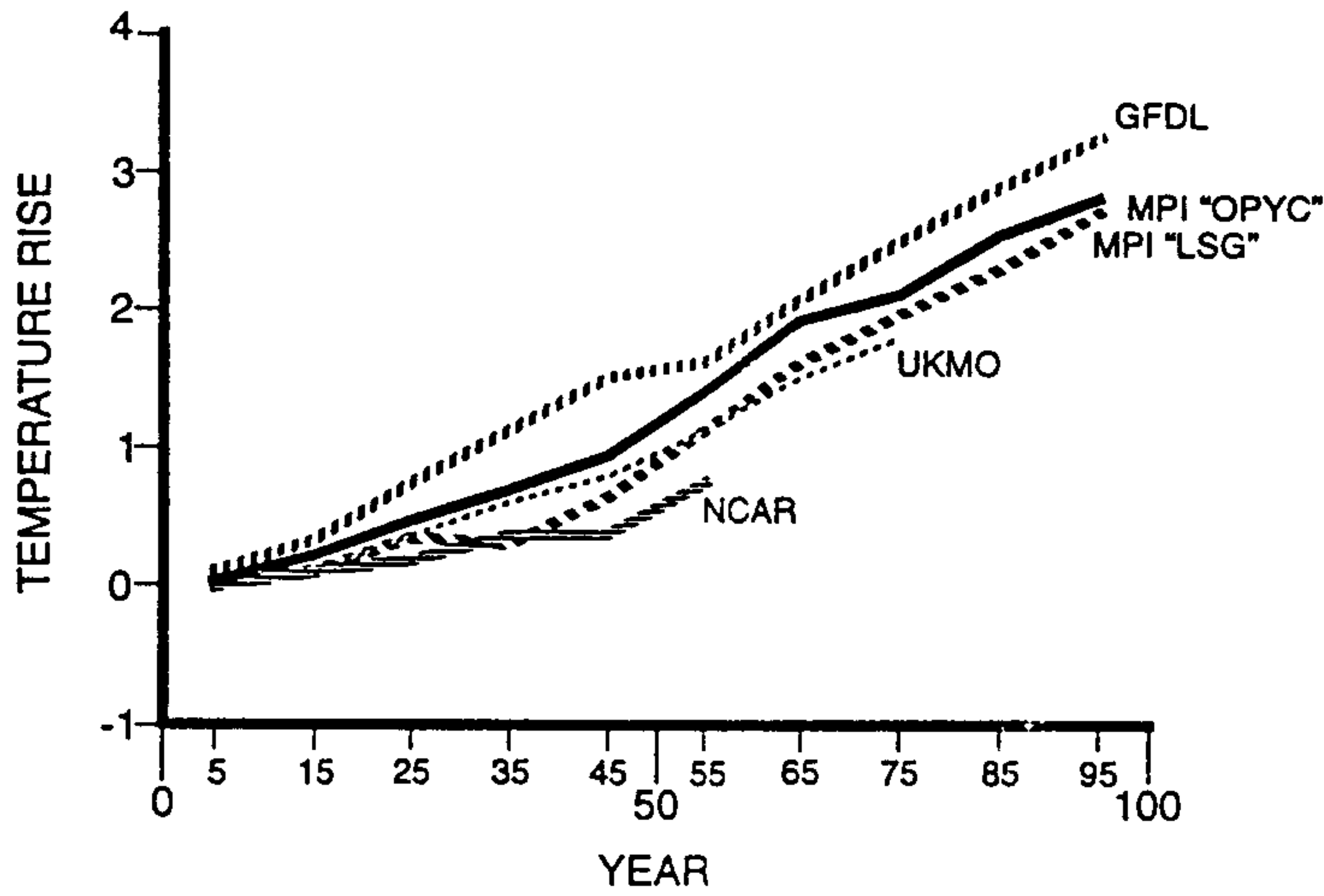
나 기후 변동 모델링

인류 기원 영향으로 인한 전지구적이고 지역적인 기후에 변화는 다음 십년이나 이십년 동안 자연적인 변동 이상으로 감지되기가 어렵고, 작고 느릴 것 같다. 과거와 미래 자료는 기후 변화를 이해하고, 감지하고, 모델들을 확인하고, 기후를 감시하는데 필수적이다. 모델들은 인류 기원성한 기후 변동의 흔적을 확인하기 위해 그리고 기후 시스템에 대한 우리의 이해를 진전시키는데 필요하다. 이것들은 기후 변동을 예보하는 열쇠이다

기후 시스템의 복잡함을 다룰 수 있는 가장 많은 가능성을 갖고 있는 모델은 대기와 해양, 빙하권과 육상-표면사이에 상호 작용을 포함하는 3차원 전지구적 연관 모델들이다. 이것들은 기후 시스템의 많은 피드백 과정들과 시공간에 기후 변화의 특징을 현실감 있게 재생산할 수 있는 유일한 모델들이다. 대기와 해양에서 중요한 역학 과정들은 해결되어야 하고 대기와 해양, 육상과 빙하권사이에 물리적인 과정들과 교환 기작들은 시스템의 에러를 최소 하는데 중점을 두고 일관성 있게 변수화되어야 한다

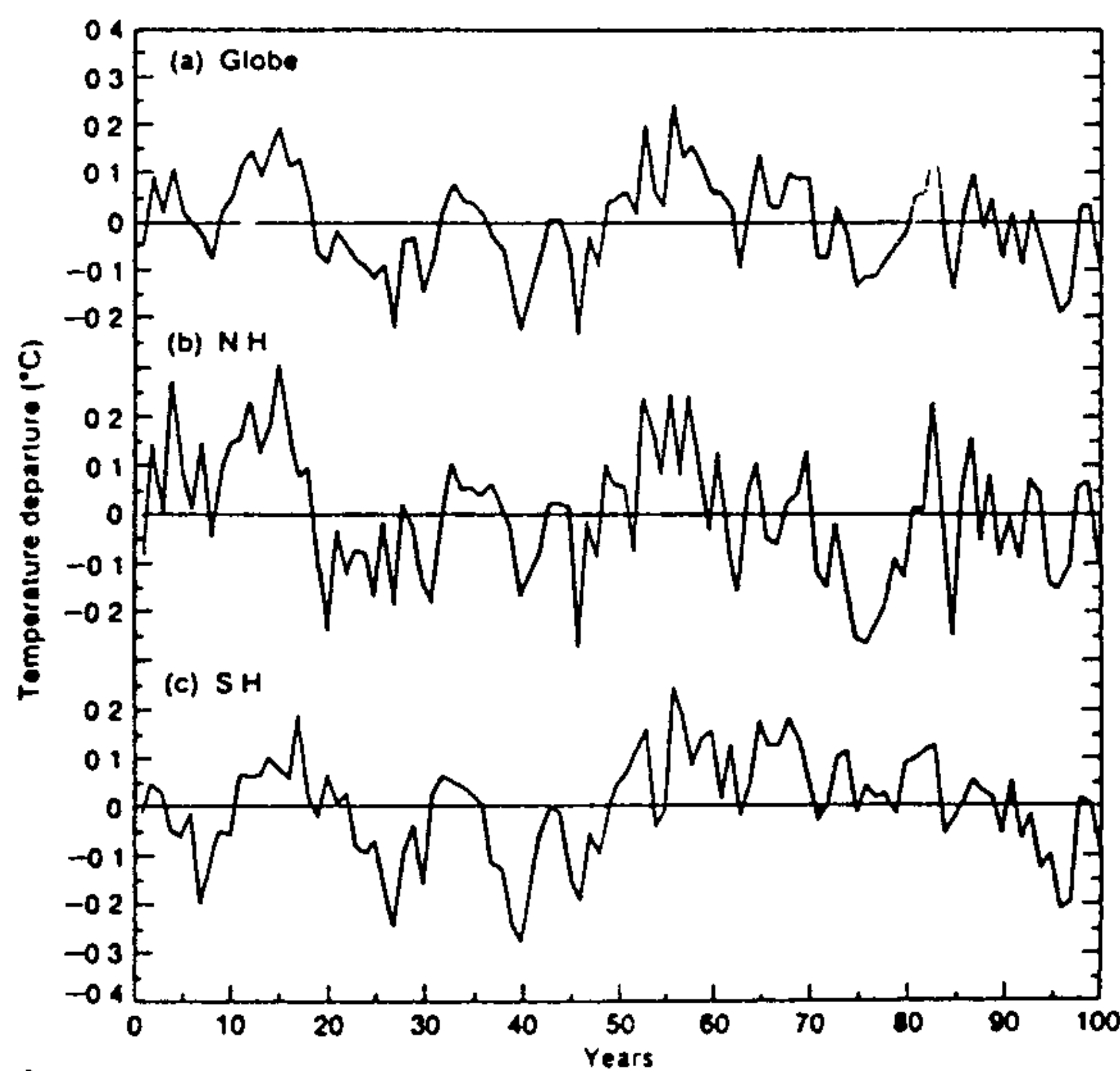
기후 변동 모델링의 중요성은 온실 기체에서 점진적인 변화에 반응하는 기후 발생을 조사하는 순간반응 실험에 둔다. 순간 반응 실험들은 이전의 기후 변동 연구에서 흔한 소위 평형 모델 모의 실험보다 기후 변동을 평가하는데 더 물리적으로 실제적인 구조를 제공한다. 이 순간 반응 실험들은 종합적인 3차원 전지구적인 복합 기후 모델로 오랜 계산을 필요로 하고, 따라서 슈퍼컴퓨터의 사용을 요구한다

에어로졸이나 오존 변화를 포함하지 않은 연관된 기후 모델(IPCC, 1992)을 가지고 한 최근 일시적인 모의 실험은 온실 기체 방출의 시나리오 A동안 IPCC (1990)에 의해 예시된 십년당 온도 상승률 0.3°C 를 보였다. 모델에서 온도 상승은 꾸준히 진행되지 않고 모든 모델들은 경년, 십년간과 심지어 더 긴 시간 규모로 변화를 나타내며, 어떤 모델들은 ENSO와 같은 효과를 재생산한다. 이 모델들의 십년내 변화는



< 그림 9 >

Decadal mean changes in globally averaged surfaced temperature ($^{\circ}\text{C}$). in various coupled ocean-atmosphere experiments used in transient climate change integration in accordance with the IPCC Scenario A, "Business as usual" This corresponds approximately to an annual increase of the atmospheric CO_2 concentration of 1%. Note that the scenarios employed differ from model to model, and that the effect of temperature drift in the control simulation has been removed. GFDL (Manabe *et al.*, 1991), MPI "OPYC" (Lunkeit, 1993), MPI"LSG" (Cubasch *et al* , 1992), UKMO (Murphy and Mitchell, 1995), NCAR (Washington and Meehl, 1991) Modified figure and caption from IPCC, 1992.



< 그림 10 >

Temporal variations of the area-average deviation of annual mean surface air temperature ($^{\circ}\text{C}$) from the corresponding 100-year average of the control as simulated by the GFDL coupled ocean-atmosphere model for (a) the globe, (b) the Northern Hemisphere and (c) the Southern Hemisphere (from Manabe *et al* . 1991)

0.3-0.4 °C의 관측된 자연적인 변화와 비교할 정도로 발견된다 (그림 10) 일반적으로 바다보다 육지 전역에서 더 높은 값으로 온도 상승에 상당한 공간적인 변이가 있다 (그림 11). 최소 값은 북대서양과 남극 주변과 같은 강하고 깊은 수직적 혼합과 관련된 해양 지역에서 발견된다

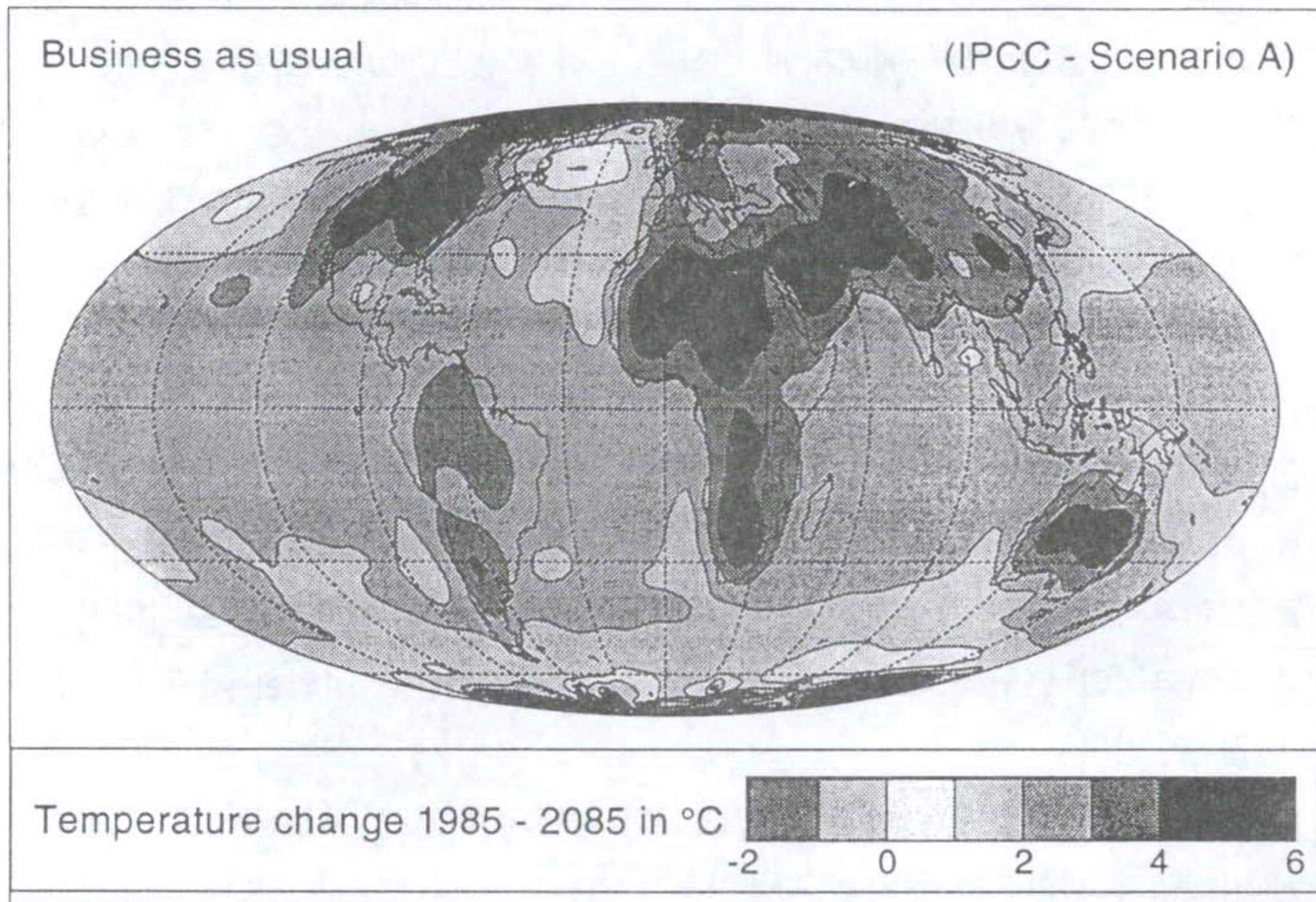
특별한 문제는 복합 모델의 초기값 설정이다 이것은 주로 해양의 상태가 관측의 부족으로 불충분하게 알려졌기 때문이다. 게다가 해양의 높은 열 이너셔로 바다는 현재 대기 에너지와 균형이 맞지 않다 그러므로 이 결점들은 해양을 정확하게 초기 설정하기 어렵게 만든다

기후 변동 연구에 사용된 연관된 모델들은 최근에 급속한 발달을 하였고 상당히 실제 변화를 몇 부분에서 재생하였다 온실 기체와 황산염 에어로졸로 부터 결합된 시간 의존성 에너지를 포함한 예비 연구들은 지난 100년 동안 전지구 온도의 전체 경향을 재생산하는데 성공적이었다 자연적인 변화의 크기에 대한 우리의 지식의 부족과 기후 감도와 역사적인 영향의 불확실로 인한 모의 실험된 변동과 관측된 변동 사이의 일관성을 해석하는데 신중해야 한다 방사 에너지에 영향을 주는 에어로졸과 다른 요인들의 지속적이고 확장된 모니터링은 만일 모델들이 기계적인 기후 변동의 기록에 대해 유효하다면 절대 필요하다 기후 변동의 모델 설계는 태양 방출에 변동과 화산 폭발을 포함하는 예측할 수 없는 요인들과 기체와 에어로졸의 축적으로 미래의 인류 기원성 기체와 특별한 물질에 대한 불충분한 지식으로 제한될 것이다

장기간 규모에 걸쳐 기후 예보의 기본적인 문제를 깊이 고려해야 한다. 이것은 얼마나 확실하게 미래 대기 축적을 측정하는가와 해양과 생물권과 함께 대기에서 온실 기체의 교환의 역할 측정을 포함한다 마지막으로 복합적인 기후 상태의 존재에 대한 문제를 더 이해해야 한다 만일 그러한 복합적인 평형상태가 존재한다면 외부 에너지에 작은 변화가 그러한 한 상태에서 다른 상태로 이동할 수 있는가를 알아야 한다

다. 모델 연구의 중요사항

현재 연관된 모델들이 자연적인 기후 변화를 모의 실험하는 정확성 수준은 변경된 대기 성분에 기후의 반응을 예보하는 그들 능력에 대한 우리의 확신을 제한하는 한 요인이다. 기후 복합 모델의 결점들과 한계는 기후에 중요하리라 여겨지는 모든



< 그림 11 >

Surface air temperature change for the last decade of a 100-year run of a climate change experiment, "Business as usual", equivalent to a compound increase of atmospheric CO₂ of about 1.3% annually (from Cubasch *et al.*, 1992)

특징들을 적당하게 해결하는 컴퓨터 프로그램이 충분하지 않고 기후 시스템에서 많은 피드백 과정들을 다루는 방법의 불확성 때문이다 특히 중요한 것은 기후 시스템에서 특징적인 경년과 십년 변화에 원인이 되는 과정들을 재생산하는 것이 온실 기체로 인해 일으켜진 것과 같은 에너지에 변화에 의해 변경될 부분이다.

제시된 중요한 학술적인 문제들은 다음과 같다: ① ENSO 모드처럼 연관된 시스템의 어떤 모드들이 외부 에너지에 변화로 인하여 변경, 향상 또는 약해지는가? ② 해양 순환이 어떻게 바뀌고 이 변동은 기후 시스템의 행동에 무슨 영향을 미칠 것인가? ③ 전지구적인 구름 분포가 어떻게 변화하고 구름의 방사 에너지를 변경할 것인가? ④ 수력학적인 순환이 어떻게 바뀌고 시스템의 안정에서 이것의 역할은 무엇인가?

또한 연구될 다른 문제들은 다음과 같다 ① 기후 시스템은 극치(extremes)가 더 커지게 되는 상태로 바뀔 수 있는가? ② 기후 시스템은 피드백을 갖고 있으며 이것은 작은 변화 요소들이 커져서 전혀 다른 상태의 기후 시스템이 되도록 할 수 있는가? ③ 인류 기원 영향에 대한 기후의 반응에 대한 이해의 진전은 개선된 종합적인 연관된 기후 모델을 만드는데 달려있다 기후에 관한 더 체계적인 모니터링과 기후 모델의 지속적인 연구와 개발은 전지구와 지역적 규모에 더 적합한 기후 예보를 꾸준히 이끌 수 있다

다음은 외부 영향의 변화에 대한 반응과 경년과 십년간 시간 규모를 포함하는 연관된 시스템의 자연적인 변화를 재생산하기 위해서 중심 목적을 둔 더 합당한 모델들을 개발하기 위한 목표이다:

① 구름의 3차원 분포와 단파 방사와 장파 반사에 대한 이들의 영향을 모의 실험하는 것, ② 혼합과 수송 진행과정들을 더 잘 설명하기 위하여 해양 모델의 해석에 해양 과정들의 변수화를 개선하는 것, ③ 대기 해양 연계에서 플럭스 보정과 같은 경험적인 보정에 대한 필요성을 제거하는 것, ④ 해빙 역학과 빙하로 뒤덮인 해양에 열교환의 종합적인 처리를 포함하여 완전히 상호 협력적인 해빙 모델을 통합하는 것, ⑤ 식물 성장과 적설에 특히 관련된 이질의 경계 조건들에 대한 육상 표면 플럭스를 더 잘 설명하는 것, ⑥ 오존을 포함하여 방사성 활성 기체의 분리된 처리를 삽입하는 것, ⑦ 대기 에어로졸의 직간접 영향들을 모델에서 통합하고 측정하는 것, ⑧ 적당히 상호작용하는 대기의 화학적 성분을 모델에 포함하고 측정하는 것 등이다

라. 모델 확인

인류 기원성 기후 변동의 감지와 모의 실험에 대한 연관된 모델의 결정적인 이용이 적절히 관측된 자료에 대한 모델들의 확인이다. 어떤 단계에서 모델 확인은 모델 개발과 실험의 보통 한 부분으로써 모든 모델링 그룹에 의해 수행된다. 일치된 표준 세트에 의한 모델 확인을 위한 상호협력은 대기과 해양 모델의 경우에 모델 오차의 분석을 촉진하도록 한다. 이것은 지금 체계적인 방법에서 연관된 모델까지 확대될 것이다.

기후 변화 예보에 대한 연관된 모델을 수행하고 개발하는데 필요한 자원을 고려하여 이것들이 상대적인 비교에 의한 국제 협력 평가는 특히 가치가 있다. 연관된 모델에 관한 그러한 집합적인 확인 또는 상호 비교는 조사되어야만 하는 수행 측정과 비교 분석과 저장되어야 할 자료와 수행의 정도, 초기 조건들과 경계 조건들에 대한 국제적인 동의를 포함해야 한다. 그러한 국제 프로젝트의 효과적인 수행에는 참여하는 모델링 그룹과 상호협력으로 교환과 분석, 자료 저장에 필요한 자원과 모델 모의 실험에 필요한 전용 자원이 필요할 것이다. 그러한 연관된 모델 상호 비교 프로젝트는 대기 모델 상호 비교 프로젝트의 방법으로 CLIVAR NEG으로 서로 협력해야 한다. 이것은 인류 기원성 기후 변화의 예보에 모델 의존도를 기록하기 위하여 대조 연관된 모델 모의 실험과 순간 연관된 모델 모의 실험의 체계적인 상호 비교를 포함해야 한다.

현재 기후 모델의 확인은 주로 지난 몇 십년을 포함한 대기의 자료세트 이용에 기초를 둔다. 즉 모델들은 현재 대기 기후에 대해서만 오직 효과적으로 유효하다. 더 많은 해양의 특징들을 포함하며 고기후 연구로부터 과거 기후 상태의 재구성을 이용하여 더 넓은 영역의 기후까지 유효성을 확대할 필요가 있다. 연합 연구들은 고기후 모델 상호비교 프로젝트를 (Paleoclimate Model Intercomparison Project, PMIP) 착수해야 한다.

마 인류 기원성 기후 변동 감지

CLIVAR ACC는 인류 기원성 기후 변동의 감지에 주요 불확실한 것들을 줄이고 확인하려고 시도할 것이다. 불확실한 것들은 일반적인 두 부분으로 나눌 수 있다. 인류 기원성 기후 변동 징후의 예보에 속한 것들과 그러한 징후를 감지해야만 하는 것

에 대한 자연적인 변화의 잡음 정도이다.

징후 불확실성은 방사 에너지의 공간-시간 발생에 불확실, 피이드백의 부적절한 설명과 어떤 에너지의 경시, 징후 추정 문제, 소위 “cold start” 오차, 플렉스 보정 절차, 등에 의해 생긴다. 이중 오직 두 가지 원인의 징후 불확실을 강조한다, 황산염 에어로졸의 경시와 관련된 것과 징후 측정 문제에서 기인된 것들이다.

매우 최근까지 완전히 연관된 대기 해양 GCMs(A/OGCMs)로 수행된 “인류 기후 변동” 실험들은 오직 이산화 탄소의 영향만 조사하였다. AGCM과 A/OGCMs을 가지고 한 더 최근의 실험들은 황산염 에어로졸의 직접적인 영향은 “CO₂-only” 실험으로 나온 표층 온도 반응 양상들이 본질상 바뀌게 됨을 보여준다. 온실 기체 (GHG) + 황산염 에어로졸 영향과 결합된 실험으로부터 반응 양상에 대한 관측된 표층 근처 온도 기록들을 찾는 한 연구는 최소한 관측된 변화들이 “CO₂-only” 실험으로부터 얻은 양상들보다 이들 결합된 반응 양상들과 더 일치한다는 결론에 도달하였다. 이것은 어떤 지역적인 규모에 바탕을 둔 잡음 (CO₂-only 징후를 감지하려고 노력하는데 반하여) 이 사실 기후에 대한 인류 기원에 의한 영향의 일부로 간주된다. 게다가 첫 번째 모델 결과들이 황산염 에어로졸의 기후 징후가 공간적으로 계절적으로 매우 특이하다는 것은 보여주기 때문에 모델 교란 실험에서 에어로졸의 포함은 관측된 기후 변화를 인류 기원 영향으로 돌리기 쉽게 만들 것이다.

확실히 CLIVAR는 기후 모델에서 더 물리적으로 실제적인 직간접적 에어로졸 영향을 포함하는 쪽으로 수치 실험들을 지원하고 고무할 필요가 있을 것이다. 기후 변화 감지 연구에 대한 가장 큰 관련 실험들은 GHG 황 방사에서 과거 시간의존성 변화에 대한 우리의 가장 좋은 추정들에 의해 상호작용의 대류권 화학으로 A/OGCM은 초기설정 조건 현실화의 앙상블 실험들일 것 같다.

점점 기후 변동 감지 연구들은 기후 시스템의 십년간에서 백년 시간 규모로 자연적인 변화에 관한 정보를 제공해주는 수치 모델들에 의존한다. 많은 최근의 연구에서 모델의 자연적인 변화의 잡음은 기후에서 관측된 변동의 징후를 판단하는데 사용하는 “야드자, 판단 비교의 척도”를 만들어 낸다. 저빈도 자연 변화에 대한 정보는 많은 기록들의 부족과 모호하게 분할된 자연적인 변화의 잡음과 인류 기원성 징후의 어려움으로 인하여 관측된 기록들로부터 쉽게 이용할 수 없다. 이것은 고자료 자체에 결점들로 인하여 고기후 기록으로부터 쉽게 이용할 수 없다. 이것들은 부족한 공간의 적용범위, 자료 불확실, 자료의 통계적인 조작에 의해 재구성된 기후 변수들의 저

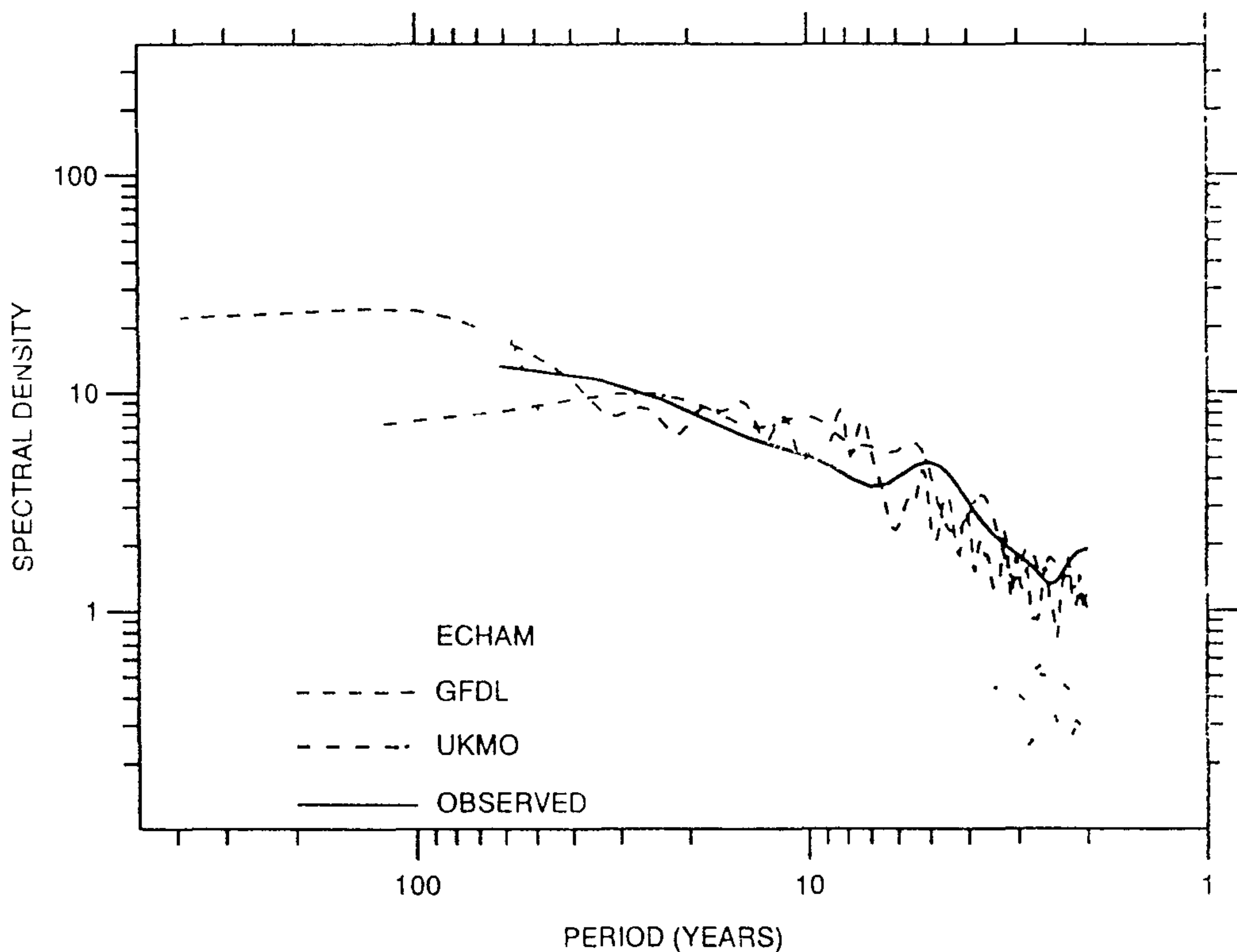
빈도 특징들에 대한 가능한 수정, 비기후 요인으로 인한 잡음으로부터 기후 징후의 제거에 어려움 등을 포함한다.

많은 새롭고 오랜 (1,000년) 연관된 모델 조절 실행이 다음 몇 년에 걸쳐 수행될 것 같고 이것은 광범위한 공간과 시간 규모에 걸쳐 변화의 구분에 큰 차이를 낼 것이다. 예를 들면, GFDL, UKMO와 MPI A/OGCMs와 함께 수행된 오랜 대조 통합에서 표층 대기 온도의 변화에 대한 최근 비교는 자연적인 변화의 우세한 양상들과 전지구적인 평균 온도 (그림 12)에 대한 모델 스펙트라에 실제적인 차이를 보여주었다. 그러한 불일치는 모델 물리학 해석, 변수, 플럭스 보정 과정, 초기 설정 차이의 결과이다. 이들 잡음의 불확실성은 우리가 기후에 관한 인류 기원으로 인한 영향을 감지하기 위해 예상할 수 있을 때에 대하여 실제 상태를 만드는 우리의 능력에 한계들이 있을 것이다.

CLIVAR-ACC의 한 목적은 그러므로 자연적인 변화에서 잡음과 불확실성들의 감소일 것이다. 특히 중요한 십년간에서 백년 시간 규모로 A/OGCMs에 의해 모의 실험된 십년간 시간 규모의 변화에 대한 확인은 이미 진행중이다. 모델로 만들어진 백년 시간 규모 변화의 확인은 더 문제가 많다. 이것은 오직 이상적으로 지구의 기후 역사에서 최근 1,000-2,000년 동안 높은 시간적 해석의 고기후 데이터 베이스의 개발에 목적을 둔 노력들을 후원함으로써 수행될 수 있다. 만일 우리가 연관된 모델에 의해 모의 실험된 대규모 공간-시간적 변화의 어떤 특징들을 유효하다고 확인할 수 없다면 자연적인 변화의 잡음에 관한 근본적으로 다른 모델 추정들을 구속할 수 없을 것이다.

징후와 잡음의 불확실 축소뿐만 아니라 CLIVAR-ACC는 기후 변동 감지와 속성 문제에 다변량 통계 방법의 응용을 장려해야 할 것이다. 온실 기체의 변화에 관측된 기후 변화의 명백한 원인은 전지구적인 평균 온도 분석만으로는 수행되지 않을 것으로 알려져 왔다. 특별한 원인이나 원인들에 대한 중요한 관측된 변화의 설득력 있는 속성은 “흔적” 시도를 아마 필요로 할 것이다.

기후 변동 감지 연구의 용어로 “흔적”이란 인류 기원 징후가 있으리라 예상되는 방향을 정의하는 다변량 벡터이다. 흔적은 일반적으로 모델 실험 또는 GHG 징후 (또는 GHG + 황산염 에어로졸 징후)의 예상되는 공간-시간 구조에 관한 연역적인 정보로부터 생긴다. 지문 혹은 흔적은 기후 시스템의 자연적인 변화 특징들을 설명하



< 그림 12 >

Spectrum of variability of global mean, annually-averaged near-surface temperature estimated from observed data and from three model control runs. Observed data are from Jones (1994). Model results are from the 1,000-year GFDL control run (Stouffer *et al*, 1994), the first 600 years of the 1,000-year ECHAM-1/LSG control integration (Hasselmann *et al*, 1995) and the first 310 years of the UKMO control (Mitchell *et al*, 1995b). The spectrum provides information on the distribution of variance on different time scales, ranging from two years (the shortest period that can be resolved using annual-mean data) to nearly 400 years for the long GFDL control run. Spectra were estimated after first subtracting overall linear trends from the modeled- and observed time series. The GFDL and UKMO spectra are close to the observed spectrum in the range of periods for which the spectra overlap. The level of variability indicated by the ECHAM spectrum is lower than observations (and than either of the other models) on time scales of between 2 and 40 years. On longer time scales the ECHAM control run has higher power than in either of the other model simulations, in part due to the non-linear climate drift that it exhibits over the first 200 years. The short length of the observed record (140 years) precludes a reliable estimate of temperature variability on time scales much longer than two- to three decades (from Chapter 8 IPCC 1995).

는 자료와 관측된 변화 (또는 순간 온실 온난화 실험의 모델 결과로부터)에 적용된다

지난 몇 년 동안에 많은 흔적 연구들이 수행되었다. 이 조사들은 고도의 함수로써 대기의 온도 변화의 기록과 관측된 표층 대기 온도의 기록에서 모델로 예견된 징후를 찾았다. 다른 지문 연구들은 다양한 대기 변수들이나 해양 변수들의 징후대 잡음 특성을 조사하거나, 증명하는 방법론의 목적을 가지고 오직 모델 자료만 사용하여 수행되었다. 이러한 연구들의 결과는 부분적으로 다른 통계적인 방법을 사용했기 때문에 비교하기 어렵다. CLIVAR-ACC가 하나의 “선택된 (preferred)” 감지 전략을 요구할 수 없는 반면 다변수를 찾는 공간-시간 지문은 어떤 형태의 최적 여과 시도를 포함할 것이 분명하다.

요약하면 CLIVAR-ACC의 감지 양상은 관측기계와 고기후의 모델에 기초한 연구들의 결합을 필요로 할 것이고, CLIVAR의 다른 구성 프로그램에서 제시된 자연적인 변화와 예보보다 더 기초적인 연구를 수행하게 할 것이다.

여 백

<부록 2>

전지구적 해양 관측 시스템
(Global Ocean Observing System)

여 백

1. GOOS의 개념

가. GOOS의 정의

(1) 정 의

해양관측자료의 수집, 분석 및 효율적인 분배를 위해 과학적으로 설계된 지속적이고 국제적인 관측 및 운영시스템을 의미한다.

(2) 필요성

해양에 대한 체계적이고 장기적인 관측은 전지구적인 환경변화를 이해하고 예측하는데 매우 중요하다. 그러나 많은 기존의 해양관측 프로그램들은 대상지역이나 연구비, 관측기간, 연구목표 등이 극히 제한적일 뿐만 아니라 대부분 표층수의 관측에 한정되어 있어 전지구적인 환경변화에 기여하는 해양의 역할을 이해하는데 어려움이 많다. 이에 효과적인 연구를 위해서는 과학적인 운영체계가 필요하다.

(3) 개 념

① GOOS - Monitoring

모니터링을 과학적 계획 및 자료의 수집, 양질의 자료생산 및 보급, 정보의 생산 및 보급에 기초한 지속적인 관측이라 정의한다면 GOOS는 모니터링의 개념과 유사하다.

② GOOS - operational oceanography

지금까지의 해양학이 주로 연구조사(research) 중심이었던 반면 GOOS는 확고한 원칙에 의해 연속적으로 반복 적용되므로 운영해양학(operational oceanography)의 개념을 가지고 있다.

(4) GOOS의 목표

- ① 연안역을 포함한 전해양에 대한 효율적인 이용을 도모하고 정책수립을 위한 기초자료를 제공
- ② 전지구적 기후변화 예측에 적합한 지속적이고 체계적인 관측시스템의 확립

(5) 대상해역

GOOS는 극지방을 포함한 전 해양을 대상으로 하며 과학적인 계획하에서 장기간 관측을 수행한다.

(6) 자료수집 및 제공방법

원격탐사와 현장(in situ) 조사에 의해 수집된 자료들을 모든 회원국에 제공하고 있다.

나. GOOS의 역사

1989 제15차 IOC 정기총회에서 발안

1990 제2차 세계기후협의회(the Second World Climate Conference)에서 GOOS 체제 설립의 필요성 재확인

1991 제16차 정기총회에서 GOOS의 개발시작 결의(WMO와 UNEP도 동참, IPCC의 후원)

1992 「Agenda 21」에서 채택 : 특히 제17장에서 GOOS와 같은 전지구적 차원의 관측 중요성 강조

1993 제17차 IOC 정기총회에서 GOOS의 개발계획과 발전전략인 「The Approach to GOOS」 채택 : 위기상황에 치닫고 있는 환경의 개선을 위해 선진국의 GOOS 참여와 연구비 지원을 독려

1993 일본에서 Megascience Forum . OECD 회원국 51개국이 참가하여 Mega Science로서 GOOS 개발촉진에 동의

1995 제2차 IOC-WMO-UNEP 회기에서 GOOS의 빠른 시행을 위해 프로그램의 우선순위를 검토

다 GOOS의 참여현황

현재 약 40여개 국가가 등록되어 있으며, 미국, 영국, 일본, 프랑스, 호주가 연구비와 연구인력을 제공하는 등 GOOS의 계획과 실행과정에 주된 역할을 하고 있음. 또한 다른 많은 나라에서도 GOOS와 관련된 국제회의에 대표자를 보내거나 국가별 위원회를 조직하는 등 관심을 보이고 있다

라. GOOS의 참여대상

GOOS는 정부, 학교, 연구소, 산업체 등 모든 연구기관과의 협조를 필요로 하며, 이들의 다양한 관심분야를 수용하기 위해 5개의 세부 모듈을 운영하고 있다

GOOS에 참가하기 위해서는 장기적이고 정기적이며, 실질적인 관측시스템이어야 하며 비용적으로 효과적인 시스템이어야 한다.

마. GOOS의 구성

GOOS는 적용되는 분야에 따라 다음과 같이 5가지 세부 모듈로 분류된다

(1) 기후변화의 관측 및 예측모듈(Climate Monitoring, Assessment & Prediction)

① 필요성

지구적 차원에서 보면 대기와 해양은 상호연관되어 있음 해양은 이산화탄소와 다른 온실기체의 공급원이자 소모원으로 작용하며, 전지구적 규모의 강우와 증발을 조절함. 따라서 수주일 이상의 기후변화 예측은 해양의 역할에 대한 고려없이 불가능함. 매년 기상학자들은 2000만개가 넘는 대기관련 자료를 받는 반면 해양에 대한 자료는 인공위성에 의한 표층자료를 제외하면 전무한 실정이다

② 목표

전지구적인 기후변화에 있어서의 해양의 역할에 대한 포괄적인 정보제공

③ 내용

GOOS의 기후변화모듈은 GCOS(the Global Climate Observing System . WMO, IOC, ICSU(International council of Scientific Union). UNEP가 공동으로 개발하고 있는 기후관측 프로그램)의 해양부문을 지원할 수 있도록 GCOS의 계획과 조화를 이루어 연구가 이루어 질 것임 동 모듈은 TOGA 프로그램을 통해 시범모듈로서 이미 시행되고 있다

④ 초기 중점과제

연중 변화관측(특히 ENSO 예보)

(2) 해양생물자원 관측 및 평가모듈(Monitoring & Assessment of Marine Living Resources)

① 필요성

해양환경의 변화는 그 속에 서식하는 생물들의 조성과 행동양식에 피할 수 없는 변화를 초래한다

② 목표

해양생태계의 기능과 구조 및 생태계의 변화를 설명하기 위한 물리, 생물, 화학, 지질학적 인자를 관측

③ 내용

해양생물자원의 지속가능한 개발을 위해 환경변화가 이러한 자원들의 생산력 및 분포상태에 주는 영향을 조사

④ 초기 중점과제

- ㉠ 기후-생태계 상호작용, ㉡ 플랑크톤 생물량의 대규모 변화,
- ㉢ 생물종의 분포와 조성

(3) 연안역과 그 변화에 대한 관측모듈

① 필요성

지속가능한 개발은 유용한 자료의 양과 정확한 예측능력이 선행될 때 가능함. 많은 연안국들은 개발로 인한 연안환경의 변화와 연안역에 대한 사회적 관심이 고조되고 있다.

② 목표

연안역의 변화추세 평가 및 공통관심사의 해결을 위한 참여

③ 내용

연안역 모듈이 전지구적인 성격을 띠기 위해서는 다음과 같은 요건이 필요함

㉠ 특정한 지역에 국한되는 관심사나 문제가 아니라 일반적인 관심사나 문제를 다루어야 한다

㉡ 지역적으로 발생한 문제일지라도 국제적인 관심과 도움이 필요한 경우

㉢ 전지구적인 현상이 연안역에 영향을 줌으로써 문제가 발생한 경우

④ 초기 중점과제

㉠ 대륙붕상의 연안류 관측, ㉡ 수질관측을 위한 해수의 색깔관측, ㉢ 해저생물의 서식처 변화, ㉣ 빙하관찰

(4) 해양의 생태적 건강성에 관한 평가 및 예측모듈

(Assessment & Prediction of the Health of the Ocean)

① 필요성

전지구적으로 해양오염의 심화

② 목표

연안과 대륙붕에서의 지역적 혹은 전지구적 규모의 오염수준과 경향을 모니터링하고 해양의 생태적 건강상태를 평가할 수 있는 시스템의 구축

③ 내용

기후변화와 수질에 영향을 미치는 해양오염 부하를 관측하고 평가하고 위성을 이용한 실시간 관측을 통해 해양에서의 유해물질과 유류오염사고에 대한 효과적인 대응을 지원한다

④ 초기 중점과제

a) 유해물질 사고의 발생감지 및 확산예측

b) 연안역의 오염물질 부하량의 변화추정

c) 오염물질의 유입에 대한 연안역의 수용능력 평가

(5) 해양기상서비스 및 해양 운영서비스 모듈

(Marine Meteorological & Oceanographic Operational Services)

① 필요성

해운 및 수산업, 관광산업에 필수적인 자료를 각종 기상 및 '해황자료의 서비스

② 목표

단기 또는 중기의 기상예보능력을 향상시키고 해운 등 각종 해양산업을 경제적으로 운영하는데 필요한 자료를 수집, 분석

③ 초기 중점과제

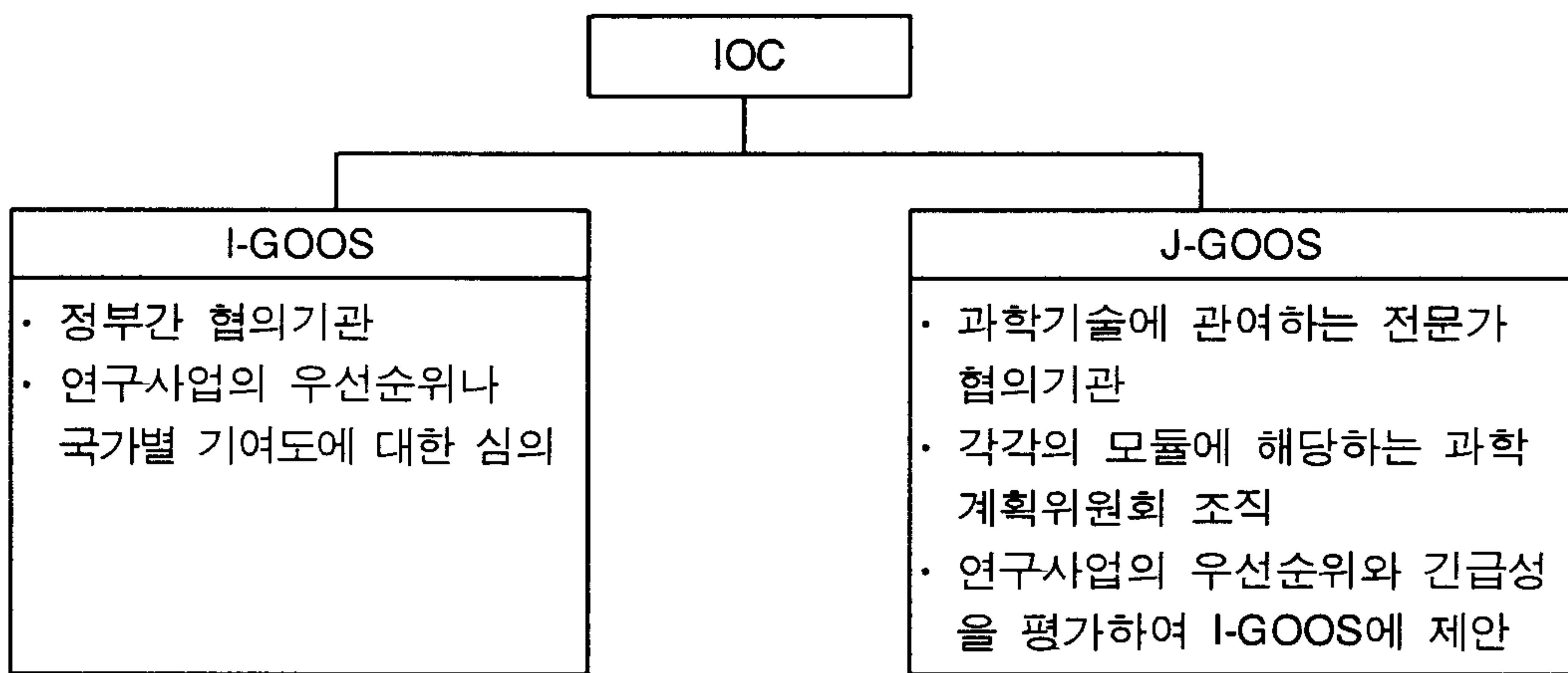
표층류와 바람, 해수의 색

2. GOOS의 계획과 운영

가. GOOS의 계획과 운영구조

(1) 운영구조

GOOS의 계획 및 운영을 위해 IOC산하에 I-GOOS(Intergovernmental Committee for GOOS)와 J-GOOS(Joint Scientific and Technical Committee for GOOS) 등 2개의 실행구조를 마련하였으며, 이러한 두개의 그룹 산하에는 특정연구를 수행하는 다양한 실행 하부구조를 구축한다



(2) 계획의 주체

국제과학협회(International Scientific Panel)에서 GOOS를 총괄계획하고 있으며, 과학적 디자인은 J-GOOS에서 담당하고 GOOS의 모든 계획은 I-GOOS에 제출됨 개별 국가에서는 본부에서 제공하는 지침서에 준하여 연구계획을 수립해야 한다

미국의 경우 국립과학아카데미, 국립조사위원회에서 GOOS의 각 계획들을 검토하고 평가하고 있음

나 GOOS의 각 모듈별 진행현황

(1) 「기후변화의 관측 및 예측모듈」

OOSDP(the Ocean Observing System Development Panel)에 의해 1990년 이래 5년동안 시행되었음.

- (2) 「해양의 생태적 건강성에 관한 관측모듈」
약간 실행이 지연되고 있다
- (3) 「해양생물자원 관측 및 평가모듈」
OOSDP보다 2~3년 늦게 시작되었다.
- (4) 「연안역과 그 변화에 대한 관측모듈」
미국에서 시작되어 국제적인 계획으로의 합류를 앞두고 있음
- (5) 「해양서비스」
과학적인 계획을 필요하지는 않지만 보다 강력한 국제적인 연대와 이행 노력이 필요한 상태

다. GOOS의 각 프로그램별 진행현황

GOOS는 현재 진행중인 해양관측프로그램을 기반으로 하여 운영해양학으로 발전되어 개발될 것이므로 현재 진행중이거나 계획중인 프로그램에 대한 고찰이 필요하다

(1) WOCE · World Ocean Circulation Experiment(1990-97)

- ① 주관 : ICSU(International Council of Scientific Union)
- ② 내용 · 열과 해수의 전지구적 순환, 해수표면의 굴곡에 대한 위성탐사

(2) TOGA Tropical Ocean Global Atmosphere(1985-94)

- ① 주관 · WCRP(World Climate Research Programme)
- ② 내용 : 적도 해양-대기 상호작용, 적도의 열구조, ENSO의 예측을 위한 모니터링, 고정부표, 이동부표 관측

(3) JGOFS : Joint Global Ocean Flux Study(1991-2000)

- ① 주관 : ICSU(International Council of Scientific Union)
- ② 내용 이산화탄소 수지, 퇴적물 측정을 위한 Sediment trap, 해양상층부의 온도-염분 수직 profile 조사

(4) GLOBEC Global Ocean Ecosystem Dynamics(1992-)

- ① 내용 동물플랑크톤의 전지구적 분포, 생태역학, 어류조사, 수중음향조사

(5) LOICZ Land Ocean Interaction Costal Zone Experiment(1992-2001)

- ① 내용 연안역 조사, 퇴적물 수지, 해수표층 레이다, 지화학적 조사

(6) GOEZS Global Ocean Euphoric Zone Study(1998-2005)

① 내용 해양 상층부의 생태학, 해수의 색, 광학, 수중음향 측정

(7) ODP Ocean Drilling Program(1990-2000)

① 내용 해저시추, 판구조 조사, 고기후 조사, 지진파 등

(8) CLIVAR . Climate Variability and predictability Experiment(1997-)

① 내용 해양에 있어서의 기후변동, 수중음향조사, 수중음향을 이용한 수온 조사 등

라. GOOS의 자료관리

(1) 자료의 종류

GOOS의 모든자료는 원격탐사 및 현장조사에 의해 얻어지며 해양과 관련된 모든 물리 화학 생물 지질학적 지표(Parameter)가 포함된다.

(2) 자료의 신뢰성

GOOS를 수행함에 있어 관측자료의 신뢰성을 확보하는 것은 가장 중요한 과제이다 전세계의 다양한 연구기관에서 얻어지는 자료가 동일한 신뢰도를 가질 것으로는 기대할 수 없으므로, 전문가의 파견이나 연구기관간의 상호검정(intercalibration) 등 자료의 질관리 프로그램(Quality Assurance and Quality control : QA/QC)을 통해 자료의 유효숫자가 결정될 것이다

(3) 자료관리방법

GOOS에 의해 얻어진 자료는 그것의 소유권이 제한되어 있지 않다면 모든 사람에게 제공되어야 하며, 얻어진 자료는 반드시 그 신뢰성이 보장되어야 한다. 국가적 관심사와 개인적 관심사의 차이에 따른 자료공개의 상충문제는 향후 해결되어야 할 과제이다

3. GOOS를 수행함으로써 기대되는 이익

가. 연구비

Full-up GOOS를 이루기까지는 향후 약 10~20년이 소요될 것이며, Full-up GOOS를 수행하는데는 연간 5억에서 20억 달러의 연구비(인공위성 사용료를 제외)를 필요로 함. 인공위성 사용료까지 포함한다면 200억이상이 소요될 것이라는 보고도

있다. 그러나 전세계적으로 개별 국가에서 이루어지는 연구비를 합산하면(인공위성 사용료 제외) 50~100억 달러 이상이므로 GOOS를 통해 상당한 연구비 절감효과가 있다

나. 기대되는 이익

연구조사는 그 자체로서도 중요한 의미가 있으나, 지금까지는 얻어진 연구조사 자료를 실용적으로 이용하여 인간생활의 편리와 안전에 기여하는 것에는 크게 관심을 기울이지 않았음 GOOS는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 고안되었고 GOOS를 통해 제공되는 여러가지 이익과 기여를 통해 일반대중의 관심을 촉발하여 연구비 지원을 가능케 할 것으로 예상하고 있다

GOOS로 부터 얻을 수 있는 이득은 다음 3가지로 분류할 수 있는데, 이러한 모든 비용효과는 전문가들에 의해 여러 분야에서 검토되고 있다

(1) 직접적 경제이득

동일한 관심과 목적을 갖는 나라들이 개별적으로 연구를 수행하는 것보다는 GOOS와 같은 전지구적 규모의 관측시스템을 통하여 상호보완, 협조하는 것이 더 경제적이다. 예를 들어 ENSO의 정확한 예보 및 운영시스템을 구축하는데 드는 비용은 미국에서만 수십 억 달러이고 전지구적으로는 약 200억 달러에 달하는데, GOOS를 이용하여 자료의 관측 및 운영을 하게 되면 1억달러정도(인공위성 사용료 제외)가 소요된다. 또한 항로서비스를 하거나 유류오염의 효과적인 방제를 지원해 줌으로써 직접적인 경제적인 이득을 유발하게 된다

(2) 정책결정 지원

GOOS 수행과정에서 얻어지는 각종 자료는 정책결정가들에게 위급하게 다가오는 문제들을 조기에 인식시키는데 많은 도움을 줄 것이며, 환경관리자에게는 해양자원의 보전 등 산적인 문제점 해결에 필요한 정보를 제공할 수 있을 것이다

예 해수면 상승률 측정, 어업과 다른 수산자원의 관리, 환경개발과 보존사이에서 정책을 결정할 때의 판단기준 제공

(3) 보다 나은 삶의 질을 제공

건강한 연안환경 조성 및 생물다양성 유지, 환경변화에 대한 이해도 증진을 통해 보다 쾌적한 해양환경을 유지할 수 있다

(4) 지속가능한 개발을 뒷받침

GOOS를 통해 이루어지는 보다 정확한 관측과 상호작용에 대한 이해는 지속 가능한 개발이 추구하는 '발전과 보존간의 미묘한 균형'을 도출하는데에 일조할 수 있을 것이다

4. 요약

가. 향후과제

(1) 국제적 측면

- ① GOOS의 체계에 관한 과학적인 이해에 기초하여 각각의 GOOS 모듈에 대한 신중한 계획이 요구된다
- ② 자료운영에 관한 시스템 기술개발이 필요하다.
- ③ GOOS가 사회에 제공할 수 있는 경제가치에 관한 이해제고 필요가 요구된다

(2) 국제적 측면

- ① GOOS가 우리나라에 미치는 사회·경제적 가치평가 요망
- ② 전지구적 규모의 지구변화가 우리나라 기후 및 연안환경에 미치는 영향의 예측이 필요
- ③ GOOS에 참여하기 위해서는 현행 해양과학조사 기반에 관한 재검토가 요망
- ④ 동북아시아 지역의 NEAR-GOOS 구축 가능성 및 이득에 관한 평가필요

나. 전망

GOOS는 국제적이고 과학적인 계획하에서 기존에 존재하고 있는 시스템을 세분, 확장하고 새로운 과학조사와 자료관리체제를 구축하는데 기여할 것임. 향후 GOOS를 통해 전지구적인 해양관측의 효율적인 통합관리 및 예보체제가 완성될 것이다

<부록 3>

남 · 북반구의 고기후연구

(PAleoclimate of the Northern and Southern Hemisphere)

여 백

1. PANASH-PEP 연구와 실행

가 개 요

지구의 (기후)변화에 대한 비판적 질문들을 논의하기 위하여, 지구의 자연사에 대한 분명한 정량적 기록을 만들 계획적 노력의 일환으로 국제적인 고과학공동체 (paleoscientific community)를 조직하는 것이 PAGES의 업무이다 그 목적으로 PAGES 프로젝트는 국제적 조직을 개발하였고, 연구를 위한 발기가 IGBP의 전체적 목표를 성취하기 위하여 조직되고 실행되었다 PANASH(PAleoclimate of the Northern and Southern Hemispheres) 프로젝트는 PAGES의 관찰하고자하는 주된 초점이다 이것은 상호반구의 기후역학과 연결에 대한 연구를 실행하기 위한 조직적 매개물을 의미한다 PANASH의 연구활동은 주요한 기후변동의 계열(sequence)과 상(phase)에 초점을 맞춘, 일련의 PEP(Pole-Equator-Pole) 단면과 연결이 된다 각 단면은 인접 지역과 관련하여 지역적 고기록(paleo-record)을 평가할 기회를 제공하며, 그래서 과거기후 변화에서 상호반구(interhemisphere)의 동력에 대한 우리의 이해를 넓힐 기회를 준다

제4기 후기(late Quaternary)의 고환경기록들은 과거지구환경과 기후에서 자연의 다양성에 대한 정보를 담고 있다. 이들 자료는 기후-변화 예보의 확실성을 평가하는데에, 그리고 과거와 현재의 기후변화의 역학을 이해하는데에 가치가 있다. 고환경 기록들은 시간적, 공간적 해결의 여러 단계에서 분석되어질 수 있기 때문에, 얻어낸 고기후정보는 기후변화의 특성, 속도 그리고 공간적 범위에 대한 인식을 제공할 수 있다 그러나 지구의 고기후를 표시하는 하나의 유일한 고기후 대체기록(육지, 해양 또는 빙하 시추)은 없다 그러므로 지역적이고 복합분야에서의 증명은 기후변화과정의 전체적 이해를 얻기 위해서 모아지고 완전하게 되어져야 한다.

지구기후변화연구의 주요한 불확실들은 기후변화의 역학 및 원인과 관련이 된다 우리가 과거에 발생했던 다른 기후를 이끄는 조건들의 범위에 대한 환경계의 반응을 이해할 때만이, 우리는 미래 기후변화의 예보에 이성적인 자신감을 가질 것이다 상호반구의 고기후대비와 기후변화역학에 대한 더 나은 이해는 이 연구에 비판적이다 기후변화가 양반구에서 어떻게 연결되는지에 대해서 우리는 아는 바가 적다 이를 위하여 남북반구로부터의 고기후기록들의 이해되는 연구가 PAGES/IGBP 프로젝트에 의하여 조정되어 있다. PANASH 프로젝트의 과학적 사항이 상호반구인 극-적도-극(PEP)

의 세계의 단면에 의하여 정의되어 있다 여기에는

PEP I. 아메리카 단면 (The Americas Transect),

PEP II 호주-아시아 단면 (The Austral-Asian Transect),

PEP III 아프리카-유럽 단면 (The Afro-European Transect)

이들 단면은 각 지역에 적합하게 육지와 해양 양쪽기반의 조사를 포함한다. 조사의 보충세트(IMAGES International Marine Earth Global Change Study)는 고기후의 심해기록들을 다룬다 계절적 규모에서 세기적 규모의 기후동력에 대해서 여기 단면들은 해양-대기의 시스템에 초점을 두는 ARTS(Annual Record of Tropical Systems)와 CLIVAR(WCRP)과 연결이 될 것이다 추가적 프로젝트는 극지역에서의 고환경연구에 초점을 두고 있다 즉, CAPE(Circum-Arctic PaleoEnvironments), EPICA(European Project for Ice Coring in Antarctica), ITASE(International Trans-Antarctic Scientific Expedition) 그리고 WAIS(West Antarctic Ice Sheet) 시추 프로젝트

나 목 표

PANASH 프로젝트의 일차적 목표는 지구의 기후변화에 대한 우리의 이해를 다음과 같이 개선하는 것이다:

- ① 두 반구로부터 기후변화가 (크기, 상 그리고 지리적 범위에서) 어떻게 상호 관련이 되는지에 대한 기록작업;
- ② 각 반구에 영향을 줄 지 모르는, 잠재적으로 중요한 힘의 요소들에 대한 기록의 결정;
- ③ 기후계(climatic system)의 특정한 부분에서 일어나는 변화들의 영향을 증폭 또는 감소시키는데 작용하는, 중요한 되물림작용(feedback)의 확인,
- ④ 반구들 사이에서의 기후연결에 대한 역학의 규명

이들 목표는 다음과 같은 사항이 요구된다

- ① 현재 존재하는 고기후에 대한 정보가 지리적 불균형을 보여서, 자료가 빈약한 지역에서의 중요한 새로운 연구,
- ② 남북 과학자들 사이의 협력증대,
- ③ 조사된 프로젝트, 현황 그리고 새로운 방법(예: 대체, 지구연대학)을 논의하는 과학자 모임에 의하여 대표되는, 남북연결에 초점을 두는 새로운 연구

지난 250,000년 이상의 기후변화의 기록들은, 매우 다른 특성을 가졌을 두개의 완전한 기후주기 중에 빙기-간빙기를 기록하는데 필요하다(PAGES "Temporal Stream 2"). 과거 2,000년의 기록은 기후변화에서 더 높은 빈도수를 해결하는데 필요하다(PAGES "Temporal Stream 1"). 비록 이들 시간의 시기 동안에 필요한 해(resolution)를 갖는 다수의 완전한 기록들을 얻는 것이 가능하지 않을지 모르나, 특별히 대륙기록들에 초점을 맞추어, 잘 조직된 국제적 노력은 전세계규모의 기후변화에 대한 우리의 이해를 크게 증진시킬 것이다

연간의 시간적 해를 가진 가장 자세한 고기후정보는 지난 2,000년 동안이 유용하며, 나이테, 산호초, 해양과 호소의 호상(縞狀:varve)퇴적층, 빙하시추, 그리고 역사적 기록들로부터 복원된다. 과거 하나나 둘의 빙기-간빙기 주기를 가지며 수십에서 세기의 시간적 해를 잠재적으로 제공할 수 있는 기록들은 황토, 토탄층, 호소성 퇴적물, 호수류, 빙하시추 그리고 심해퇴적층을 포함한다

이들 여러 기록의 종류를 비교하기 위하여, 기후적 신호(signal)들은 정량화되어야 한다(현대의 관찰로 검정되는) 선택한 시간간격에 대한 정량적 고기후측정들은 두개의 다른 프로젝트, 즉 PMIP(Paleoclimate Model Intercomparison Project)와 PMAP(Paleoenvironmental Multiproxy Analysis and Mapping Project)에 가장 중요한 것이다; PEP 단면으로부터의 결과들은 직접적으로 이들 노력들과 관련될 것이다

대다수 고기후자료의 세트들은 정성(定性)적이며, 상호비교를 위하여 정량적으로 유용하게 되려면 주요한 노력들이 요구될 것이다. 더우기 다양한 시간적이고 공간적 규모로 의미있는 비교를 위하여, 엄격한 나이조정(age control)이 요구되며, 연계(linkage)는 대기, 육지 그리고 해양자료세트들 사이가 이해될 필요가 있다. 이들 연계가 이해되어질 때만이 기후력(climate forcing)의 단계가 결정되고 상호반구의 연결들이 확인될 수 있다

다. 비판적 연구업무

여기서 우리는 PANASH 프로젝트가 주의하여 초점을 맞추어, 대다수 중요한, 그러나 아직 풀리지 않은, 일반적 질문들을 확인하려 한다. 이 목록은 우선권이 있거나 결코 철저한 것은 아니지만, PANASH/PEP 연구활동들에 의하여 언급될, 중요한 질문들의 범위를 게재한 것이다

(1) Stream 1 Timescale (과거 2,000년)

- ① 각 반구에서 지난 2000년 동안의 기후와 비교하여 20세기의 기후는 얼마나 이상(異常)조건이었나? 남부해양(Southern Ocean)은 이상기후조건을 제한하는데 어떤 역할을 담당하였나?
- ② “소빙하기”(Little Ice Age)는 양반구에서 동시적이었고 비슷한 크기이었나?
- ③ 기원후 1,000±200년쯤에 전세계적으로 광범위한 온난기가 있었나?
- ④ 수십년에서 세기적 규모까지 양반구의 기후변화의 기록들을 평행하게 이끈, 각 반구의 Hadley cell circulation에서의 teleconnection은 존재하는가?
- ⑤ 지난 이천년 이상 동안에 발생한 수리학적 변화는 무엇이었으며, 이들은 상, 크기, 그리고 지리적인 범위에서 어떻게 관련되는가?
- ⑥ 지난 이천년 이상 동안의 ENSO(El Nino-Southern Oscillation)와 그 기후의 teleconnection의 기록은 무엇인가?
- ⑦ 시기, 크기, 그리고 화학성분을 포함하여, 남북반구에서의 폭발적 화산분출의 기록은 무엇인가? 이들 기록이 각 반구에서 기후변동과 어떻게 관련되는가?
- ⑧ 과거 2,000년 이상 동안 기후변동을 조절하는데 있어서 태양복사에너지변동의 역할은 무엇이었나?
- ⑨ 과거 2,000년 이상 동안 해수면변화의 기록은 무엇이고, 이것은 두 반구의 주요한 빙상(ice sheet)에서 질량균형의 변화와 어떻게 관련되는가?
- ⑩ 기후에 영향을 주는 인간충격의 중요성은 무엇인가?

(2) Stream 2 Timescale (과거 250,000년)

- ① 남북반구에서 기후진화 사이의 상(相)관계는 무엇이었나?
- ② 두 반구 사이에서 복사에너지의 힘을 전하는데에 열염(thermohaline) 순환과 대기의 trace gas의 역할은 무엇인가?
- ③ 두 반구에서 에어로졸 부하량(aerosol loading)의 장기기록은 무엇이었으며, 이것은 기후변동에 어떻게 영향을 주었는가?
- ④ 그린란드 빙하시추에서 관찰된 산소동위원소의 급격한 변화는 남반구의 빙하시추기록에서도 관찰되는가? 북대서양 지역 이외의 해양퇴적물과 육지의 기록에서도 비슷하게 갑작스런 변화를 보이는가?

- ⑤ 지난 250,000년 이상 동안의 급격한 기후변화와 기후계의 변동성이 양반구에서 동시에 나타났는가?
- ⑥ 열대지역에서의 수리학적 변화들이 고위도에서의 변화와 어떻게 관련이 되었는가? 대규모 수리학적 시스템은 궤도력(orbital forcing)들과 어떻게 관계가 되는가?
- ⑦ 저위도와 고위도에서의 생물량(biomass) 변화는 대기의 trace gas에 어떻게 영향을 주는가?
- ⑧ 계절풍(monsoon) 기후는 과거에 어떻게 변했으며, 세계의 여러 부분에서 계절풍 순환의 동시적 변화를 보였는가?

라 PANASH 기초연구전략

PANASH 프로젝트 내의 모든 연구활동들은 아래와 같은 일반적 윤곽으로 기초적 과학전략을 따를 것이다

- ① Stream 1 연구를 위하여는 일년에서 수십년의 해(resolution)를, 그리고 Stream 2 연구에는 수십년에서 세기적 규모의 해를 갖는 연속적이고 고해(high resolution)의 기록들에 PANASH는 주된 초점을 둘 것이다,
- ② 대체기록들을 이용하는 PANASH 연구들은, 가능한한 가장 정확하고 자세한 측정조정(dating control)을 얻기 위해서 연대학에 특별한 주의를 둘 것이다,
- ③ 고기후 복원에 이용된 PANASH의 대체기록들은 잘 검증될 것이며, 이것은 분명하게 이해되는 고기후 신호(signal)를 제공할 것이다;
- ④ 가능하다면 다대체 연구들은 회수된 정보를 최대화하기 위하여 수행될 것이다,
- ⑤ 각 단면을 따라 해양과 육지 기록들의 비교에 특별한 주의가 요구될 것이다,
- ⑥ 가능하다면 연구지역(site)은 선택될 것이고, 이들 지역은 기후의 대규모 준-시스템 변화에 대한 진단적 증거를 제공한다,
- ⑦ 적합한 곳에서, 환경에 미치는 인류활동의 영향에 특별한 주의가 주어져야 한다,
- ⑧ 자료-모델 상호비교와 시간-종속의 모델화의 필요성에 특별한 주의가 요구될 것이다;
- ⑨ 모든 PANASH의 자료들은 고기후학을 위한 세계자료센터-A(WDC-A World Data Center-A for Paleoclimatology)에서 수행될 것이며, 관심있는 과학자들에게 정보에 대한 공개적 평가와 자유스런 상호교류를 제공한다

마. 제4기 후기의 힘과 경계의 조건

외부 힘과 경계의 조건들에서 가장 중요한 변화들 중, 두 반구에서 제4기 후기의 고기후를 이해하는데에 고려됨에 필요한 것은 다음과 같다

- ① 궤도력에 의하여 작동되는(Milankovitch 주기) 태양복사에너지의 변화들,
- ② 과거대기성분(특히, CO₂, CH₄ 등과 같은 방사성으로 활성인 trace gas과 에어로졸의 농도),
- ③ 육지 및 해양성 기반의 빙하의 범위와 체적, 그리고 eustasy에 의한 해수면변화들,
- ④ 해수표층온도(SST)와 염도의 변화들, 이들 변화가 수온약층의 순환을 이끈다

(1) 태양복사에너지

주요한 천문학적 변수의 변화에 의하여 영향받는 태양복사에너지의 분포는 상호 반구 규모에서의 기후변화들을 이해하는데에 가장 중요하다 1만년당 1주기(1 cycle/ 10 kyr)와 10만년당 1주기(1 cycle/ 100 kyr) 사이의 빈도대(frequency band)에서, 기후계의 주요한 힘은 지구궤도와 그의 회전축의 변화 때문인 복사량의 변화와 관련이 있다 그러므로 궤도요소(orbital element)들과 결과된 복사량의 위도와 계절적 분포들은, 과거기후의 지질학적 대체기록과 기후모델에 의하여 모의(simulation)되는 기후변동 사이의 중요한 관련을 이룬다

PANASH의 내용에서, 기후변화에서의 동시성과 관련이 되는지, 또는 양반구에서 다르게 작용하는 힘에 대한 지구의 전세계적 반응과 관련이 되는지 결정하기 위하여, 두 반구 사이의 상관관계(phase relationship)에 특별한 주의를 해야한다. 이것은 심각한 문제는 아니다 왜냐하면 두개의 주요한 천문학적 요소들, 즉 지구자전축의 기울기(obliquity 또는 tilt)와 기후의 세차운동(precession)이 날, 계절, 그리고 반구에 따라서 복사량에 다르게 작용한다 자전축기울기는 동일한 국지적 계절 중에 양반구에서 동일한 역할을 하지만, 반면 세차운동은 반대효과를 가진다 이것은 자전축기울기의 증가는 북반구와 남반구의 여름철에 각각 남북반구에서 받은 태양복사에너지의 증가를 의미한다 근일점(perihelion)의 겨울로부터 근일점의 여름으로의 진행은 북반구 여름 중에 전지구상의 복사량을 증가시키고 북반구 겨울 중에 그것을 감소시킬 것이다 그러므로 북반구 여름 중에 북부 위도에서의 태양복사에너지의 증가와 남반부 여름 중의 남부 위도에서의 감소를 우리는 안다 북반구 위도와 남반구의 같은 위도에서의

복사량 사이의 상관관계는 우리가 고려한 복사량의 종류에 또한 의존한다 (예 특별한 날 중에 받은 또는 전계절을 통하여 받은 복사량) 더우기 기후자료의 해석에 있어서 대부분의 시간은, 여섯달의 시간차를 암시하는, 양반구에서의 동일한 지역의 계절을 고려함이 우리에게 요구된다

일년 중 어떤 주어진 시간에, 일일복사량은 지배적 역할을 하는 모든 위도에 대하여 일치한다(즉, 극지역의 밤과 밀접한 고위도 이외에 모든 위도) 그러나 동일한 국지적 시간을 통하여 복사량이 비교될 때, 남북반구 사이에서는 정확한 불일치의 관계가 있다(즉, 남북반구 사이의 여섯달의 시간차로). 세차운동이 복사량 신호를 지배하는 위도에서, 예를 들면, 북반구의 주어진 위도에 대한 하지(summer solstice)에서의 복사량은 남반구의 동일한 위도에서의 하지복사량에는 정확하게 일치하고, 남반구의 동일한 위도에서의 동지(winter solstice) 복사량에는 불일치한다 동지와 하지는 각각 남북반구를 고려할 때, 동일한 국지적 시간에 상응한다.

대조적으로, 남북반구에서 하나의 주어진 위도에 대한 계절적 복사량(즉, 주어진 계절전체를 통하여 받은 복사량)은 동일한 천문학적 계절에 대하여는 정확하게 불일치하고 동일한 국지적 계절에 대하여는 일치한다 이것은 계절적 복사량이 단지 자전축기울기의 함수이기 때문이다 평균복사량(계절복사량 나누기 계절의 길이)이 관계될 때, 이것은 정확히 역이다, 남북반구에서 주어진 위도에 대하여 계산된 평균복사량은 동일한 천문학적 계절에 정확히 일치하고, 동일한 국지적 계절에는, 적어도 세차운동이 크게 지배하는 위도의 대부분에서는 불일치한다 이것은, 자전축기울기가 6만년과 3만년전 사이의 북위 90도에서 더욱 중요한 역할을 할 때, 덜 뚜렷하다

(2) Trace gas와 에어로졸

CO₂와 CH₄와 같은 trace gas의 농도는 빙기-간빙기의 시간규모를 통하여 중요하게 변했고, 그 시기에 이들 변화는 급격하였다 과거 대기의 CO₂ 농도변화는, 극지의 빙하시추로부터, 그리고 더욱 최근에는 토탄늪지로부터 각각 복원이 되었다 이들 모든 기록들은 거의 고기후변화와 동시적이며 높은 폭의 변화를 보여 준다 대기의 CO₂ 변화에 대한 가능한 역학은 해양수온약층의 순환과 해양화학의 변화들이다 그렇다면, 그것은 상호반구의 차이가 궤도에 의하여 일어난 복사량 이상(anomaly)의 결과로서 예상될지 모를 때에 기후변화의 실제적 상호반구의 동시성을 설명할지 모른다 그러

나 많은 풀리지 않은 질문들은 지구탄소순환에 포함되는 역학과정을 고려함이 남아 있다. 육지탄소저장에 대한 식물의 과거역할, 육지표면성질의 특성화, 그리고 육지표면으로부터 기후변화의 되물림(feedback)과 관련된, 이들 질문의 일부는 PEP 프로젝트에서 논의해야 될 것이다 열대우림(대기 CO₂의 근원과 하강 그리고 육지탄소저장)과 CH₄의 근원으로서 열대습윤지대의 크기변화는 특히 중요할 것이다. 그린란드의 빙하시추기록으로부터 유추된 것과 같은 CH₄ 수준의 갑작스런 감소와 북부열대, 특히 북아프리카(예: Gasse and Fontes, 1992)에서의 건조조건으로 갑작스런 후빙기의 반전 사이에서의 실제적 동시성은 열대의 육지표면조건과 대기 CH₄ 수준의 변화 사이에서의 관련성에 대한 질문이 생긴다. 이것은, 특히 북부평지가 빙하로 덮혀 있거나 얼어 있었을 때의 총적세(또는 現世 약1만년전 이후) 이전 시기 중에 중요하다. 열대와 한대습윤의 양지대의 범위변화는 PANASH의 내용 내에서 실험되어질 것이다.

제4기 후기 중에는 대기의 에어로졸 부하(aerosol load)의 거대한 변화가 있었다 이것은 크게 대륙내부의 건조성 변화의 결과와 대륙빙상의 발달 및 붕괴와 연관된 광범위하게 씻긴 평원의 생성으로서이다 찬 빙기 중에 대기로의 증가된 먼지플럭스의 시기는 심지어 매우 먼 극지방의 빙하시추에서도 분명하게 기록되어 있다 덧붙여, 기후변화의 원인으로 하나의 역할을 담당하였을지도 모르는, 격변의 폭발화산작용의 시기가 있었다. 그와 같은 대기변화는 각 반구에서 동일한 것은 아니었을지 모르며, 그래서 각 반구에서 풍성(aeolian) 먼지플럭스의 과거기록과 에어로졸 변화의 결과는 PANASH 연구프로그램에서 논의할 필요가 있다 예를 들면, COHMAP 위원은, LGM 후의 증가된 계절풍 우기체계가 1만5천년전에 발생하였음을 NCAR AGCM 모의(simulation)로부터 찾았으며, 반면 대체자료는 호수 수준이 1만2천년전까지도 나타나지 않았음을 보여 준다. 이것은 빙하시대의 에어로졸은 열대지역에서 증가되는 태양복사에너지로 심각하게 고갈시켰음을 제안한다 다른 가설들이 제안되어질 수 있다 (예. 첫 wet pulse는 이들 aquifer가 노출되기 전에 이를 다시 채웠을지 모른다). 그러나 더 많은 연구가 과거에 증가된 에어로졸의 중요성을 충분히 평가하는데에 필요하다. 에어로졸의 플럭스와 기원의 과거변동은 황토 퇴적층, 호수와 해양퇴적물내의, 빙하시추내의 풍성기원의 물질로부터, 그리고 사구(sand dune)의 과거 크기로부터 복원되어질지 모른다 예를 들면, 아라비아, 북서아프리카, 서중부아프리카의 앞바다, 그리고 중앙대서양의 연구에서 보여 주듯이, 연안 해양퇴적물을 단기와 큰 지리적 규모에

서 과거 바람의 강도를 복원하는데 아마도 가장 좋은 재료이다. 세계의 모든 PEP 단면 내에는, 각 반구에서 풍성활동의 과거역사를 풀기 위한 중요한 고기후정보를 포함하는 황토퇴적층의 긴 육지기록들이 있다

(3) 과거의 빙하범위와 하구에 의한 해수면 변화

비록 빙상의 형성과 붕괴는 (해수면 변동과 같은) 기후변동의 반응이지만, 빙상의 존재자체는 폭풍의 노선을 바꿀 수 있고 관련된 기후이상의 원인일 수 있다 이것은 또한 광범위한 해빙(sea-ice)의 지역에서 사실이다 예를 들면, 최근최대빙기중에 북대서양에서 해빙의 확장은 유럽을 지나는 서풍 제트기류의 위치와 강도에 영향을 주었다. 강화된 서풍 제트기류는 유럽의 동쪽방향으로 더욱 깊숙히 침투하였다 북유럽(Fennoscandian)과 북미의 양쪽 빙상은 고기압(anticyclone)을 만들었고, 이는 오늘날보다도 더 차고 건조한 조건들을 형성하였으며 그의 남부경계를 따라서 표면동풍으로 이끌었다.

북반구의 대륙빙상이 붕괴되었을 때, 북대서양으로의 용수(meltwater) 플럭스는 북대서양의 훨씬 밑으로 이끄는 결과로서 열염순환을 파괴시켰을지도 모른다 참으로 하구에 의한 해수면 변화는, 세계의 PEP 단면의 많은 부분에서 발견되는 것처럼, 낮은 연안해수를 갖는 지역에서 극히 중요할 수 있다 지역적 규모에서, 해양의 해침과 해퇴는 온도의 계절성의 영향은 물론 습도의 가용성을 극적으로 변화시킬 수 있다 큰 규모의 해양순환은 또한 하구에 의한 해수면 변화에 의하여 영향을 받을지 모른다

(4)해수표층온도와 해양순환

남대서양으로부터 적도횡단의 열과 염 수송의 강도에 의존하는 북대서양에서의 해수표층온도(SST)는 크게 북부와 서부유럽의 기후를 조절한다 대서양에서의 SST 변화는 PEP I과 PEP III 양쪽지역에서 기후에 대하여 중요한 결과를 가질 것이다 열염 수송대(thermohaline conveyor belt)의 효율성은 해수의 밀도, 즉 온도와 염도분포에 의하여 그 자체가 크게 결정된다. 염도는 특히 북대서양 심해수 생산을 감소시키게 작용할지 모르는, 빙하용수(ice meltwater)와 강물의 방류로부터 담수공급에 민감하다 남반구에서 열염수송대의 역류는 또한 크게 흥미롭다 Alguhas 해류에서 분산의 위치와 표층온도는 남아프리카의 내부, 모잠비크 그리고 마다가스카르에서 기후에 강

하게 영향을 준다 이들 지역으로부터의 고자료와 북미지역의 자료와의 비교는, 동남 아프리카에서 지역적 기후에 대한 해양순환과 복사량의 상대적 역할을 보다 더 이해하게끔 이끈다 용상(upwelling)의 유형변화와 수괴의 변위를 통하여 열염순환의 변화로부터 결과된, 기타 다른 지역들에서의 기후적 효과들이 또한 있을지 모른다. 예를 들면, Younger Dryas 연대기 중에 아프리카 계절풍의 약화는, Laurentide 빙상 (Laurentide Ice Sheet: LIS)의 녹는 과정과 관련하여, 열염순환의 줄어든 효율과 임시적으로 연관되었다

El Nino 이벤트(그리고 대기의 Southern Oscillation과의 연결들)는, 비열대지역과 중요한 teleconnection을 갖는, 열대지역에서 높은 빈도의 기후변동에 비판적 역할을 감당한다. 아열대해양에서 해수표면의 조건변화는 부분적으로 계절풍 변동을 조절한다 대기압경사(atmospheric pressure gradient)(한대지역의 여름 때 내륙으로 부는 계절풍의 공기흐름을 만든다)와 남부 아열대해양으로부터 모아진 잠재열(latent heat)의 (대륙에서 계절풍의 강우에 의한) 결과된 방출에 대한 책임으로 구별이 되는 육지-해양의 열에 의하여 계절풍은 발생한다 현재, 인도와 아프리카 양쪽지역의 약한 계절풍은, El Nino-Southern Oscillation(ENSO)에 의하여 부분적으로 조절되는 남부 아열대 해양상에서 양의 SST 이상(anomaly)과 결부된다 현재의 SST 자료는, 남부해양은 북대서양과 남태평양이 찰 때 따뜻하며, 역으로 따뜻할 때 차였음을 보여 준다. 그와 같은 상황은 Sahel 지역에서 한발 지역과 동시적으로 발생한다 태양복사의 계절적 분포변화 이외에, 계절풍의 변동에 대한 해수표층과 열대 육지표면온도의 상대적 역할은 아프리카, 인도와 동아시아의 양 계절풍의 영역에서 조사되어야 한다

현재, 마지막 완전빙기의 시기(2만1천-1만8천년, CLIMAP, 1981)에서 저위도의 해수표층온도의 다양한 측정들 사이에는 아직도 논쟁이 되는 간격(불일치)이 있다 전이 함수(transfer function)로부터 검정된 완전빙기의 SST는 현재의 값과 비슷하였다. 그러나 최근의 산호초와 유기화합물로부터의 지구화학적 증거는 열대의 SST가 더 낮았음을 제시한다. 이것은 열대지역의 빙하시추연구와 지하수기록으로부터 유래된 희귀 가스의 고온도 연구에 의하여 확증된 바 있다 더우기 원래의 완전빙기에 대한 CLIMAP 자료의 재분석은, 열대해양에 대한 CLIMAP SST 값이 재평가될 필요가 있을지 모름을 제안한다 이 질문에 대하여 앞으로의 작업이 더욱 필요하며 세계의 PEP 단면 내의 연구가 그런 문제를 해결하는데에 도움이 될 것이다.

바 방법과 기술에 대한 추천

PANASH-PEP 활동을 통한 국제적 협력은 가장 현대적 방법들이 고기록의 분석에 쓰여지게 확산시킬 것이다. 이 목적으로, PAGES는 고기후기록의 대륙시추작업을 위하여 상호분야의 규약장치(set of protocol)를 제안하고 있다. 적절한 방식으로, 자세한 지구화학, 동위원소, 미화석과 거시화석의 분석들을 위한 시료채취 전에, magnetic susceptibility와 같은 연속적 지구물리학적 측정에 강조가 놓일 것이다. 간격을 줄이는, 높은 정밀도의 측정작업은 프로젝트의 본질적 부분이 되어야 한다. 다변수(multi-parameter)의 미고생물학 연구는 정량적이고 통계적인 복원기술을 이용하는 연구팀에 의하여 수행되어야 한다. 여기서 우리는 비록 다음의 논의가 결코 철저한 것은 아니지만 몇가지 중요한 논점들을 강조하고자 한다.

(1) 측 정

지구의 과거-기후계의 이해는 우선 확고하게 계산된 연대학(年代學)에 의존한다. 방사성탄소의 방법은 몇가지 이유들 때문에 그 응용에 제한이 따른다.

- ① 대기 ^{14}C 함량의 변동(그래서 ^{14}C 연대방법은 진정한 역년(calendar year)과 일치하지 않는다).
- ② 고해양(paleo-ocean)과 호수에서의 저장효과(reservoir effect)가 잘 알려져 있지 않다.
- ③ 이 방법은 3만-4만 (^{14}C)년전보다 오래된 시료에 응용되지 않는다.

절대적 연대학적인 조절(chronological control)이 측정에 필요하다.

- ① 기후이벤트(예 Younger Dryas event)의 실제적 존속기간,
- ② 탁상지의 지속(plateau duration)(퇴물림효과에 의한 CO_2 섭취와 방출의 속도),
- ③ 시추점(site) 사이의 참된 (총서)대비

실제적 역년연대는, 나이테연대기록(dendrochronological record)에 대한 방사성탄소의 시간을 검정함으로써 과거 1만년 동안의 기간에 대하여 계산되어 있다. 서로 다른 몇가지 화합되는 방법들(예 서부와 중부 유럽의 마아르호(maar lake) 화산폭발시 분출물이 없이 단지 가스폭발에 의하여 생긴 분화구의 호수)에 공통되는 엽리의 퇴적층, 스웨덴의 호상(varve)점토층, 나이테, speleothem, 산호초)을 시험함에 의하여, ^{14}C

으로 1만년전 이상으로 계산곡선을 확장하는데에 더 많은 노력을 경주해야 한다. 항성력(sidereal calendar)을 갖는 절대연대와 계산에 대한 잠재성을 지닌 시추(site)나 물질이 우선되어야 한다.

시간-동시성의 이벤트의 정확한 측정에 강조가 놓여야 한다(예. 광범위하게 분산되어 있는 화산재<tephra>층이나 ^{14}C 탁상지) 독일, 프랑스, 이태리, 그리스의 화산재층은 과거 1만3천년동안의 우수한 층서(대비) 지시자임이 입증되었으며, Toba의 분출(8만년전)은 동남아시아의 넓은 지역에 걸쳐 화산재층을 퇴적시켰다 잘 정의되고 측정된 화산재층은 대륙, 빙하 그리고 해양 기록 사이의 대비를 용이하게 할 수 있다.

^{14}C 방법은 현재에서부터 4만년전 시기까지 응용된다 다른 방법과의 상호비교는 4만년전보다 오래된 퇴적물을 측정하는데에 이용되기 전에, 또한 주어진 방법과 관련된 가능한 편재(간격)를 추적하는 데에 필요하다 ^{238}U 계열(^{210}Pb , $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$), K-Ar, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, ^{10}Be , ^{36}Cl , 분열비적법(分裂飛跡法 fission track), 전자스핀공명(electron spin resonance ESR), 아미노산(amino acid) racemization, 열법발광(thermoluminescence: TL), 또는 과학적으로 자극된 루미네센스(luminescence)(자성단계사이 내의 쇠설성 단계상에서)와 같은 방법들이 시험되고 응용되어질 수 있다.

"customer"와 "analyst" 사이의 밀접한 협력이 높게 추천되는데, 특히 연대결정을 위한 시료의 채취와 처리에 필요한 기술적 요구들이 점차로 세분되어졌기 때문이다(특히 AMS 측정시). 잘 확인된 재료(예 식물거시화석, 화분(pollen), 자성의, 비결정화된 탄산염류)만이 ^{14}C 측정에 이용됨을 또한 추천한다 층서적 내용이 없는(계열내 위치에 의하여 자체의 층서적 밀바침이 없는), 흩어진 자료는 측정에 추천되지 않는다

(2) 동위원소기술

기타 응용들 중에, 고강우(paleoprecipitation)와 고온도의 동위원소성분은 다음으로부터 얻어질 수 있다 ① 온대와 열대의 알프스형 빙하의 동위원소성분(^2H , ^{18}O), ② 급류를 갖는 온대호수에서 자성의 호상 탄산염류의 ^{18}O , 그리고 수생과 육지 양쪽기원의 유기물질의 동위원소성분(특히 나이테)

폐쇄호수에서 자성탄산염의 ^{18}O 은 일차적으로 강우와 증발의 균형을 반영한다 그러나 이 변환치의 올바른 계산은 과거 물과 동위원소 수지(budget) 사이의 관계에 대한 이해를 요구한다

과거식생형태는 수생과 육지 양기원의 유기물질의 동위원소성분으로부터 얻을 수 있다
재충전기간(recharge period) 중 고온도에 대한 정량적인 결정은 방사성탄소로 측정된 지하수내 희귀가스(noble gas)의 농도로부터 가능하다 이 방법은 특히 사막지역에서 유용하다(예 아프리카 Mali의 충적세(Holocene) 때의 재충전기간에 대한 것)

(3) 정량적 고기후복원

생물군체(biological assemblage)의 육지기록으로부터 고기후-고환경변수들을 추론하는 전이함수(transfer function)의 이용은 이제 널리 받아들여지고 있다(예: PEP III 지역에서 유럽 또는 동아프리카의 화분, 곤충 또는 수생물질들, 예 아프리카의 규조류). 다른 접근은 폐쇄된 분지호수에서의 고온도와 고염도의 조건을 정량화하는 지화학적 관계에 의존한다 그와 같은 접근은 더욱 개발되고 기타 다른 지리적 지역에 응용될 필요가 있다 그러나 기반이 되는 생물학적이고 지화학적인 과정의 이해없이 통계적 기술에 전체의 신뢰를 두는 것을 피하는데 많은 주의를 기울여야 한다 다른 대체지시자와 다른 전이함수에 기초한 고기후계산의 상호비교는 언제라도 가능하게 되어야 한다

정량적 고기후계산은 특정시기의 과거기후를 독도(mapping)하는데 기초를 만든다 PEP의 세단면으로부터의 결과는 PAGES PMAP(Paleoenvironmental Multiproxy Analysis and Mapping) 프로젝트를 위하여 중요한 정보의 토대를 제공할 것이다.

사. 모델화의 활동

일반순환모델(General Circulation Models. GCMs)은 과거기후를 연구하는데에 중요한 도구이다 그것들은 기후변동과 변화를 이끌 수있는 역학과 상호작용을 평가하는데에 도움을 주며, 현재의 것들과는 다른 기후조건들을 모의(simulation)할 수 있다 모델화된 기후모의는 또한 고자료와 비교함에 의하여 평가될 수 있으며 그래서 모델의 확실성에 대한 시험을 제공한다 추가로, 모델이 기후추적자(climatic tracer)를 포함하는 수송과정을 포함할 때, 모델들은 물의 동위원소와 사막의 먼지와 같은 고자료류의 해석에 도움을 줄 수 있다.

(1) PANASH와 PMIP(Paleoclimate Model-Intercomparison Project) 사이의 상호작용

PMIP는 고기후모의(paleoclimatic simulation)를 위하여 수많은 GCM(일반순환모델)을 채택할 것이다. 약 15개의 그룹은, 동일한 경계조건들(즉, 빙상, trace gas 함량, 해수표충온도와 해빙)을 이용하여 총적세 중기(6천년전)와 최근최대빙기(LGM, 2만1천년전)에 대한 고기후모의를 수행할 것이다. PAGES와 WGNE/WCRP 양쪽에 의하여 지지된 이 프로젝트는, 모델결과의 감도(sensitivity)와 구름이나 지하수리학과 같은 모델변수화(model parameterization)를 위한 기후변화의 감도와 모의된 역학을 조사하는데 도움을 줄 것이다. PMIP는 상대적으로 잘 기록된 과거 2만1천년동안의 극한 기후 조건에 상응하는 두개의 짧은 시기(snapshot period)에 초점을 둔다. 6천년전에 대한 실험은 (해양과 해빙에 대한 현재의 조건을 이용하여) 북반구의 계절풍순환과 대륙온난화에 대한 태양력변화의 충격에 집중될 것이다. 2만1천년전에 대한 실험은, 빙상의 존재와 CO₂ 농도의 낮아짐에 대한 구름 되물림작용(cloud feedback)은 물론 열대와 중위도 순환의 감도를 진단하는데 도움을 줄 것이다.

(2) 모델-자료의 비교

모델-자료의 비교는 PMIP의 중요한 부분이다. 왜냐하면 그것들은 모델결과를 확인하고 이용된 다양한 변수화를 평가하는데에 도움을 주기 때문이다. 그러나 이것은 좋은 공간적 영역과 6천년전과 2만1천년전 양쪽의 시간부분에 대하여 언제라도 가능한 기후변동의 계절적 해결을 갖는 지구자료세트(global data set)를 요구한다. 이것은 돌아오는 가까운 미래에 야외과학자에게는 중요한 도전을 나타낸다.

전략은 NATO 회의(workshop)에서 논의가 되었다. 자료수집을 위하여 추천된 시기는, AGCM에 의하여 연구된 것으로 온난한 총적세 중기와 한랭한 최근최대빙기를 포함시키기 위하여, $6,000 \pm 250$ ¹⁴C년과 $18,000 \pm 1,000$ ¹⁴C년이다. 첫단계로서, PMIP는 측정과 오차치에 대하여 좋은 질의 조절을 갖는 이용할 만한 자료의 합성을 요구한다. biome과 호수 단계의 자료정보에 특별한 강조가 놓일 것이다. 그다음단계로, 특히 과거 최대빙기에 대하여, 틈을 채우기 위한 자료수집에 투자할 필요가 있다.

총적세 중기와 최근최대빙기(LGM)의 양쪽조건에 대하여 다양한 GCM(일반순환모델)을 가지고 이미 수행된 모의(simulation)에 따라서, 우리는 PEP 단면 내에서 자료습득을 위하여 몇가지 추천의 개요를 말할 수 있다. 6,000년전에 대하여, 예비의 모델

대 모델 비교는 두개의 주된 특성을 강조한다. 아프리카와 아시아의 여름계절풍변화(모델 상호간의 유형과 강도), 그리고 북반구대륙의 여름온난화, 이것은 2-3 C까지 이른다(그러나 모델 상호간에는 1 °C 차이가 날지 모른다). LGM(최근최대빙기)에 대하여, 중요한 변화는 모든 계절에 대하여 모의되지만 이것들은 모델 상호간에 크게 다를지 모른다(예: 동부 남극이나 유럽에서 수리학적 수지(budget)의 변화) 잘 측정되고 검증된 대체자료는 이들 불확실성을 해결하는데 도움을 줄 것이며 모델모의(model simulation)의 가치있는 테스트를 제공할 것이다

(3) PEP 결과의 해석을 위한 기타 다른 모델화연구

감도(sensitivity) 실험들은 다음과 같은 질문들을 논하는데에 수행될 수 있다 총적세 중에 감소된 계절풍 강도의 원인들, 대륙기후에 대한 Dansgaard-Oeschger 온난 이벤트의 충격, 그리고 지구기후에 대한 열대의 육지표면조건들의 충격 대기의 일반순환모델들은, 바다표면의 조건변화 그리고/또는 식생(vegetation) 변화 그리고/또는 온실기체농도와 함께 태양력(solar forcing)에 기후의 감도를 시험하는데 이용될 수 있다 가까운 미래에, 연결된 대기과 해양의 일반순환모델들이 급격한 기후변화를 연구하는데에 또한 유용하게 될 것이다. GCM(일반순환모델) 내에 자리잡은 중규모(mesoscale) 모델의 개발은 지구적이고 지역적인 기후의 상호작용을 조사하는데에 비판적 중요함이 될 것이다

아 PANASH 자료운영

현대공공분야의 자료운영(data management)은 모든 PAGES의 활동과 업무의 불가결한 부분이다 이 자료운영이 PAGES의 현재와 미래의 연구목적에 의하여 가동됨은 본질적인 것이다. PAGES의 미래에 대한 요구가 완전히 예상되어질 수 없기 때문에, 자료운영계획은 유연해야 한다, 운영되는 자료는, 모든 PAGES 결과가 기초되는 1차자료는 물론 유래된 고환경결과(예 공간적 복원) 양쪽을 포함해야 한다 또한 PAGES는 모든 연구결과의 주의깊은 기록과 지원을 위하여 강력한 자료운영을 요구한다 PAGES 자료운영은 모든 자료와 결과들의 장기보관에 대비한다 이런 모든 이유 때문에, 모든 PAGES 활동과 업무는 1차("raw")와 유래된(2차) 양쪽자료의 운영을 포함한다 PAGES는 과학유산의 일부로서 고환경자료의 광범위한 기록을 남길 것이다

PEP 연구에 이용된 모든 자료는 공공분야의 자료창구의 일부로서 운영될 것이다. 자료운영활동에 대한 책임은 조직된 방식에 따라 PEP 지역을 통하여 분산될 것이다. 모든 지역의 자료운영센터는 자료와 자료운영기술을 자유롭게 교환될 것이고, 지구변화공동체에 있는 모든 것들에 이용하기 쉽고 또한 쉽게 손닿을 수 있는 방식으로 고클imate의 자료와 정보를 제공하기 위해서 함께 일할 것이다.

PAGES 자료운영활동은 국제교류를 통하여 꾸준히 개선되고 있기 때문에, PAGES 조사자들이 PAGES 자료운영센터와 접촉하고 밀접하게 일하는 것은 본질이 될 것이다. 현재, 미국 콜로라도주의 Boulder시에 소재한 고기후학을 위한 세계자료센터-A(WDC-A for Paleoclimatology)는 자료의 (보관)기록을 돕는데 준비되어 있으나, PAGES 공동체를 위하여 지역의 자료운영에 대한 노력들이 또한 결정적 역할을 하리라 예상되어 진다. 일반적으로, 3년 주기(generation) 내에 또는 지금까지 처음으로 나온 출판의 시기에 인정된 PAGES 자료운영센터에 자료가 제출되어야 한다. PAGES 자료운영센터는 자료가 어떻게 제출되고 나뉘어지는지에 대한 정보를 제공할 수 있다. 다음과 같은 자료의 유형이 보관될 것이다:

- ① 관련된 연대학적인 정보를 포함하여, 원본의 원형("raw") 또는 1차적 고기후, 고생태, 그리고 고해양학의 자료. 이것은 자연 그대로의 나이트록의 측정, 역사물로부터의 정보, 또는 깊이의 함수로서 화분(pollen)의 계산과 같은 자료를 포함할 수 있다.
- ② 1차자료로부터 개발된 2차자료. 예를 들면, 이것은 복합의 나무핵으로부터 개발된 나이트의 연대, 추론된 나이의 함수로서 화분의 퍼센트, 그리고 대기 ^{14}C 의 현재변동에 대한 교정된 방사성탄소의 자료를 포함할 수 있다.
- ③ 고기후측정이나 식생의 복원과 같은 1차와 2차자료로부터 추론된 3차정보. 이들 자료는 시간의 계열(time series)과 독도된 형태(mapped form) 양쪽에서 운영되어질 수 있다.
- ④ 검정자료, 우선적으로 1차와 2차 자료를 과거기후, 해양 또는 생물권 조건들의 정량적인 평가로 전환될 필요가 있는 현대환경자료의 세트.
- ⑤ 가설화된 기후력 함수의 시간계열(예: 태양, 화산암, trace gas, 또는 궤도).
- ⑥ 시간을 통한 기후경계의 조건들(예. 빙하의 확장고 높고, 육지표면의 특성들).
- ⑦ 모델로부터의 출고(output)(예 대기의 GCM<일반순환모델>, 식생모델).

차. 실행과 조직

일련의 연구계획에 의하여, 각 PEP 단면을 위한 그리고 IMAGES 프로젝트(International Marine Global Change Study)를 위한 연구계획이 개발되었다. 세계의 다른 세부분에 대한 고기후연계의 복원과 관련하여 이들 모임은 과학공동체의 전형을 가져왔다. 각 단면에 대한 과학적 사항은 현재의 기후와 이들 힘의 다른 특성들과 관련이 있다. 연구와 실행계획들과 함께 이들 계획모임으로부터 나온, 전체적 PEP 전략은 이 보고서에서 서술되어 있다. IMAGES 과학의 계획은 따로 출판되었다.

PEP 지도자들과 PAGES과학조정위원회(PAGES Scientific Steering Committee)에서 선출된 위원으로 구성된 PANASH 조정위원회(PANASH Steering Committee)는 PANASH 프로젝트의 목표를 촉진하기 위한 촉매제로서 작용할 것이다. 그들의 행동들은 우선 두 종류의 활동을 포함할 것이다. 과학자의 주의가 PANASH의 목적에 초점을 두는 작업(workshop)과 심포지움의 조직, 그리고 PANASH의 목표를 논하는 국내적이고 국제적 연구노력의 명백한 촉진. 이들 양쪽 행동은 PAGES 과학조정위원회로부터 안내받는 PAGES Core Project Office를 통하여 실행될 것이다. 각 PEP 단면은, 이를 따라 연구개발을 우선하고 강화하기 위해서, 그리고 또한 연구목표를 향한 진전을 평가하기 위해서 연구자문위원회(Scientific Advisory Committee)를 설립할 것이다.

2. PEP II: 호주-아시아 단면

가. 개 요

PEP II 단면(transect)은, 동남아시아와 사할린에서부터 일본과 대만까지의 복잡한 양상의 섬들(complex of islands)을 포함하여, 인도의 준대륙(subcontinent)에서 베링해협까지 아시아의 지체(land mass)를 커버한다. 그것은 남쪽으로 인도네시아의 해양대륙과 필리핀과 뉴기니아의 섬들을 지나고 더 남쪽으로는 호주대륙과 미크로네시아, 뉴칼레도니아, 피지와 뉴질랜드의 섬들까지 뻗어가며, 결국에는 남극에 인접한 남부해양(Southern Ocean)을 가로질러서 펼쳐진다.

이 거대한 지역은, 자체의 특성을 갖는 매우 다양한 환경을 포함하며, 이는 지역적이고 지구적인 기후계(climate system)를 통하여 다른 지역의 것들과 연결된다. 이들 연결은 거의 조사나 서술이 되어 있지 않았으며, 그것들을 국제적인 연구 안건에 확고하게 올려놓는 것이 필요하며 그래서 기후변동의 역학과 원인을 보다 더 이해하게 된다. 기후는 지역의 많은 국가들에게 인류의 건강과 복지를 위하여 중요한 역할을 하며, 과거기후의 기록들은 미래에 예상되어지는 기후변동에 대하여 더욱 안전한 한계를 알아낼 수 있다. 단면을 가로지르는 인류의 점유역사는 어디든 가장 길고 가장 훌륭하게 도큐먼트된 기록을 포함하며, 또한 천년 동안 또는 그보다 짧게 존재하였던 기타 다른 곳들을 포함하기도 한다. 기후계에 대한 인류활동의 영향은 거의 알려져 있지 못하지만, 그러나 단면을 따라 존재하는 기록들은 이 주제에 대한 다양한 가설을 시험할 기회를 제공한다.

지역 내에서의 일부 연구는 변화의 양상과 개요적 규모로 과정의 상호관계를 고려하였다. 그러나 대부분은 국가들이나 주변의 바다 내에서 국지적 또는 지역적 문제에 대하여 초점을 맞추었다. 이 작업의 성과는 PEP II 지역에서 환경기록의 다양성과 중요성에 대한 분명한 증명이었다. 이 장의 목적은, 단면내 큰 규모의 특성과 지구의 기타 다른 지역과 연결되는 현상을 정의하고, 이해하며, 그리고 설명할 필요성을 강조하는 것이다. 편서풍을 갈라놓는 북쪽의 커다란 탁상지(plateau), 세계에서 가장 중요한 해양의 온난풀(warm pool) 그리고 계절풍에 의하여 영향받는 가장 큰 지역을 포함하여, 이 단면은 수많은 독특한 특성을 포함하고 있다.

PEP II 지역은 제4기의 환경역사에 대한 자연적 기록의 중요한 본체를 포함한다. 예를 들면, 열대의 산악지대와 그밖의 다른 곳에서의 수목선(tree line) 변화에 대한 연구들은 높은 진폭의 온도변화가 발생하였음을 보여 주었으며, 화분(pollen)과 지형학적인 증거들은 지역의 계절풍이 최근기후주기(last climate cycle)의 시기를 걸쳐서 크게 다른 강도로 작동하였음을 보여 주었다. 사막, 빙상, 풍성퇴적층(aeolian deposit)의 유형에서 그리고 식생과 동물군의 양상에서 커다란 변화를 하였음을 증명한 기록들이 있다. 이들 변화의 규모는 기후적인 의미로 지역을 가로지르며 정량화될 필요가 있다.

PANASH 연구와 실행계획에 대한 이 부분의 절에서, 단면 내의 일반적인 생물리학적 특성들의 윤곽이 그려졌으며 몇가지 출판된 환경기록들에 대한 개론이 주어졌다. 이 장의 주요한 부분은 주된 질문들을 다루었다. 이것은 우선권의 장치로서 가까운 미래에 언급되어야 하며, 자료에 대한 필요성과 접근의 지적이 서술되어 있다.

나 단면의 특성

PEP II 단면은 과거 환경기록을 독특하게 만든 지역과 특성을 포함하며, 이는 시스템의 환경현상과의 반응에 대한 수많은 정보를 제공한다 teleconnection을 통하여, 이것들은 다른 PEP 단면에서 취급하는 것들을 포함하여, 다른 전세계적 규모의 시스템에서의 현상들과 연결된다 이 절에서 PEP II의 특별한 특성들에 대한 개요가 주어 져 있다.

(1) 빙하지역

PEP II 단면의 독특한 특성은 최근빙하주기(LGM) 중에 실제로 작은 빙하면 적이다 시베리아에서 그리고 티벳의 탁상지에서, PEP I과 PEP III 단면의 북쪽에서 발생한 것과 같은 어떤 빙모(ice cap)를 유지하기에는 실제로 이곳은 너무 건조하다 열대지역에서 작은 빙모는 뉴기니아 섬의 고산지역에 형성되었고, 빙하는 South Island와 뉴질랜드에 걸쳐서 넓게 형성되었다 그밖의 작은 빙하지역은 시베리아, 중국, 일본, 인도네시아, 그리고 호주의 높은 산악지역에 축적되었으나, 이것은 아마도 국지적인 환경의 중요성만을 가졌을 뿐이다

(2) 넓은 영구동토지역

세계에서 가장 중요한 영구동토지역은 중국, 시베리아의 동부, 그리고 북부 사할린 섬에 존재한다 이들의 영향은, 타이가, 툰드라와 늪지가 영구동토가 발생하는 곳에 존재하는 가장 풍부한 식생유형과 같은 것이다 이 지역의 대다수 커다란 강의 시스템은 영구동토의 노출을 갖는 계곡을 차지하며, 이들 중 일부는 현재 불안전하고 영구동토의 후퇴는 계곡을 넓히게끔 이끈다 이들 지역의 역사와 어떻게 반응하였는지 그리고/또는 어떻게 지구기후를 작동하였는지는 알려져 있는 것이 거의 없다 몇몇 장소에서 영구동토지역은 현재시간에 극적으로 후퇴하고 있으며(일년당 10m 이상), 묶여 있던 메탄의 막대한 양이 방출되고 있다 이것이 지구의 온실효과에 의한 온난화에 중요한 역할을 할지 모르기 때문에, 우리는 어떻게 그리고 어떤 속도로 영구동토가 기후조건에서 과거의 변화에 반응하였는지 이해할 필요가 있다

(3) 티벳 탁상지

지구에서 가장 높고 가장 중요한 탁상지인 이곳은 상대적으로 최근의 지질 역사를 갖고 있으며 제3기 이후로 제4기로 넘어 오면서 중요한 용기를 경험하였다 이곳은 지구기후에 엄청난 영향을 가졌었다 이곳은 '제3의 극'(Third Pole)과 같이 작용하지만, 중위도에 위치하기 때문에 편서풍을 빗나가는 곳이다 탁상지의 빙하면적은 대륙의 위치 때문에 작으며 자체의 위치로 많은 사막을 형성하며, 이는 바로 빙하지역이 높은 먼지함량을 가짐을 의미한다. 아마도 시베리아의 고기압, 아시아 계절풍의 활동과 침투 그리고 북반구의 안과 밑 양쪽으로 영향을 주는 어떤 하강기류에 영향을 줄만큼 탁상지와 그의 위치가 중요하다 탁상지의 표면용기는 제4기 전체의 조망으로부터 지구기후에 중요한 충격을 주었지만, 그러나 표면용기의 속도가 지난 250,000년 동안 어떠한지는 불분명하다 용기만이 그와 같은 시간의 규모에서 기후변화에 영향을 주었을 것 같지는 않다.

(4) 천해(shallow sea)

이 지역에는, 특히 중국의 동쪽지역, 동해와 Sunda와 Sahul의 대륙붕 주변에는 천해가 많다 빙하순환 중에 막대한 면적의 지역이 다양하게 범람하고 말랐을 것이며, 최근최대빙하(LGM) 중에 식물과 (인류를 포함하여) 동물의 종 발산이 증가되었을 뿐만 아니라, 증발, 지표면반사율(albedo) 그리고 극도로 커다란 육지표면의 변화들이 발생하였을지 모른다 일본, 한국, 인도네시아의 해양대륙, 필리핀, 뉴기니아에서 그리고 홍적세(Pleistocene)와 충적세(Holocene)의 경계 주변의 북부 호주에서 대부분의 식생반응(vegetation response)은 이들 변화의 결과일지 모른다

(5) 해양대륙(Maritime Continent)

해양대륙의 형태는 해수면의 변동과 북쪽으로 미는 인도-호주판의 호주 부분 때문에 상당히 변하였다 상대적인 바다와 육지의 변화는 대륙부분의 지체로부터 현재 보이고 있는 수많은 섬들까지의 표류를 초래하였다. 이들 지역으로부터 기록을 해석하는 일은 지역적인 (지질)구조의 고려, 상대적인 육지와 해수면 변화와 지구환경변화의 국지적 암시를 요구한다

(6) 서태평양의 온난풀('Warm Pool')

인도네시아와 뉴기니아 주변에 있는, 세계에서 가장 큰 해양의 온난풀은 현재 (온실기체<greenhouse gas>이기도 한) 습기의 주요한 지구기원 중에 하나이다 이 지역에서 해수표층온도(SST)는 일반적으로 29 C를 초과한다 이 습도 기원의 작동과 정지의 개폐는, 예를 들면 ENSO의 작동을 통하여, 중요한 국지적이고 지구적인 효과를 가진다. 온난풀 위의 강한 저기압 시스템은 해양으로부터 대기로의 엄청난 양의 열전달에 대한 원인이 되며, 이 Walker 순환의 상승 가지는 인도네시아의 지역을 걸쳐서 높은 강우량의 이유가 된다. 최근최대빙기(LGM)에서와 같이, 더 낮은 해수면 하에서 온난풀 지역의 역할은, 아마도 ENSO가 작동되지 않았던 위치로, 크게 변화를 하였을 것이다.

(7) 환경경사(environmental gradient)

PEP II 단면 내에는 매우 가파르고 매우 넓은 환경경사의 풍부함이 있다 티베트의 탁상지와 뉴기니아와 뉴질랜드의 고산지대 주변의 계절풍, 온도와 습도, 그리고 시베리아와 북부 호주의 해변 섬의 강우경사(precipitation gradient)처럼 중요한 현상의 상대적인 충격과 다양성을 시험할 수 있도록 이것들은 제공한다. 이들 경사를 따라 변하는 시스템의 감도는, (완만한지 또는 급격한지를) 그리고 반구(hemisphere) 사이의 차이를 포함하여 지체효과(lag effect)가 있는지를, 반응의 본질에 대한 평가할 수 있는 질문들을 만든다 이들 질문은 생물체(biota)와 인류의 활동에 매우 중요한 암시를 가진다. 불행하게도, 가파른 환경경사를 가지는 지역들은, 대체자료를 검증하는, 추적 지점을 갖는 기록을 제공하는 지점이 부족한 곳에 위치한다

(8) 화산활동

PEP II 단면 내에는 상당히 수의 매우 활동적인 화산들이 있다. 아마도 일본과 뉴질랜드는 별문제로 하더라도, 화산재(tephra) 기록들은 이 지역에서 육지와 해양기록의 범위를 통하여 시간 지시자(time marker)의 가치있는 자원이 되기에는 아직도 많은 양의 작업이 필요하다

다 이 지역의 현대 기후와 그 다양성

(1) 아시아의 기후

아시아 단면의 주요 육지의 유형은, 시베리아의 고기압, (티벳 탁상지에 의하여 갈라지고 빗나가는) 젯트기류(jet stream) 그리고 여름과 겨울의 계절풍에 의하여 지배 받는다 동해를 통하여 일본 섬들의 동쪽까지 흐르는 일본온난기류(Japan warm current)의 지역에서, 젯트기류로부터의 공기의 흐름과 북태평양 고기압으로부터의 동풍의 공기흐름은 일본, 한국의 인접해변 그리고 동부 시베리아에 풍부한 강우를 가져 온다 저기압은 북쪽으로 향하고 봄에서 가을까지 남부 중국과 인접 섬들의 기후에 영향을 끼치지 모른다 그러나 여름에 이것은 일본과 한국의 남부 해안에까지 확장하며 강한 폭풍을 가져 온다 해마다 비와 눈의 형태는 남부 중국의 습한 지역에서부터 (>2000 mm/yr) 티벳 탁상지와 북서 중국과 시베리아의 사막 지역까지(<50 mm/yr) 걸치는, 두드러진 온도경사(temperature gradient)와 같다. 평균온도경사는 티벳 탁상지의 위치에 의하여 크게 변화였다

이들 형태는 자연적 식생에 반영된다. 예 열대숲이 아열대숲의 띠로 변하는 곳인, 아시아의 주요육지와 인접 도서국가들의 해안을 따라서 이것은 중국에서, 그리고 일본과 한국의 최남부에서인 북위 24도와 34도 사이에서 발생한다. 더욱 북쪽인 중국, 중앙과 북부 한국, 혼슈우 그리고 남부 홋카이도 그리고 더욱 남동해안의 시베리아에서는 온대 구과류(소나무)가 지배하는 반면, 더욱 북쪽에는 다시 냉대 구과류가 지배하며 점차 타이가를 거쳐 툰드라로 변한다 산성(aridity), 대륙성(continentality) 그리고 고도경사(altitudinal gradient)는 주요 해변의 섬에서 식생유형(vegetation pattern)을 조절한다 한대 숲과 초원의 넓은 범위는 동위 120도와 북위 50도에서부터 동위 95도와 북위 28도까지 중국의 야외풍경을 지배한다 이곳의 내륙은 가장 높은 위도에서 확 펼쳐져 있고(open) 식생이 없는 지역을 갖는, 건조초원과 건조스텝이 일어난다

커다란 빙하주기는 이 지역에서 대표되며 계절풍의 강도와 산성의 등급으로 알려져 있음은 분명하다 그래서 이것은 지구과정과 연결되어 있지만, 수십년 내지 세기적 시간규모에서 이들 시스템의 변동은 이해되지 않고 있다 온난하고 습한 시기는 건조하고 찬 상황과 교대되는 듯하다 이들 문제들에 대한 지식은 이 지역에 있는 사람들에게 기본적으로 중요하다

(2) 해양대륙의 기후

온난풀과 이에 관련된 저기압 세포의 열대 장소와 위치는 이 지역의 기후를 지배한다. 기후는 일년내내 따듯하고 뜨거우며, 강우량이 높으며 자연적 식생은 열대우림이다. 이 지역의 고산지대는 비그늘(rainshadow)의 조건을 만들며, 그것의 높은 고도는 국지적인 온도경사의 결과를 만든다 그래서 뉴기니아의 고산지대는 Inan Jaya의 남쪽까지 섬에서 국지적인 건조계곡과 비그늘 효과를 창출하며, 저지대의 열대림에서부터 montane forest와 잡목림 지대를 거쳐 알프스형 초원지대와 산꼭대기에는 만년설까지 다양한 식생의 범위를 갖는다

계절풍과 ENSO의 자연적 변동은, 이것은 호주 근처와 비그늘 지역에서 일부 지역에 영향을 주는 강우량의 전달과 한발에 영향을 주듯이, 이 지역에서 가장 중요한 관심거리가 된다

(3) 호주의 기후

호주의 중위도 위치는 자체 대륙의 중심에 위치한 아열대 고기압을 확실하게 한다 온도는 온화한 날씨부터 뜨거운 날씨까지 이루며 유일하고 중요한 고지대는, 온도가 적당하고 일부 국지적 비그늘 지역이 발생하는 남동부 지역과 Tasmania 섬에 위치한다. 대륙의 대부분은 아습(sub-humid)에서 건조한 기후까지 보이며, 또한 북쪽에서 많은 강우량을 가져오는 여름의 약한 계절풍을 갖는다, 주요 육지의 남서와 남동 지역에 겨울 강우를 가져오는 남부해양(Southern Ocean) 상의 지역에서, 남극 고기압에서 생성된 남부전선이 있다 호주 고기압은 연중 위도상으로 이주하며 Tasmania 섬만이, 일년내내 강우를 받는 편서풍의 영향 하에 정면으로 놓인다. 대륙의 동부는, 특히 ENSO의 영향 하에, 주기적으로 호주 고기압이 저지효과(blocking effect)를 가지며 적은 강우가 해안영역의 내륙에서 발생하는 곳에 위치한다 강우형태는 자체의 커다란 변동에 의하여 특징되며, 평균강우량은 빈약한 강우형태의 기술이다. 내륙의 중앙 호주는 북부나 남부의 비를 함유한 시스템에 의하여 지원받음이 빈약하다. 그것의 평균강우량은 낮고 동일하게 분포되어 있지만, 그러나 실제로 비는 열대성 저기압의 드문 기습 또는 편서풍의 북쪽으로부터의 침투를 동반하는 큰 이벤트 중에 내린다

호주의 식생 형태는 대륙에서 가장 양호하게 물이 찬(또는 관개된) 지역의 우림과 키 큰 유칼립투스 구성되어 있다 이것은 북쪽, 남서쪽 그리고 동쪽의 해안을 따라

서 띄엄띄엄 분산되어 있으며, 이것은 확트인 수림지대, 삼림지대 그리고 초원과 관림 지대를 통하여 내부까지 분류되어 나누어져 있다 알프스형 황야와 초원은 남동부의 고지에서 발생한다

그러므로 이 지역에 대한 주요한 기후의 질문들은, 북쪽과 남쪽에서 공기체(ar mass)의 습기함량은 무엇이 조절하고 이것들이 Stream 1과 Stream 2에서 어떻게 ENSO와 상호작용을 하는지 논의할 필요가 있다

(4) 남서태평양의 기후

남서태평양의 섬들은, 낮은 일년 온도범위, 일반적으로 믿을 수 있는 강수량 그리고 축축한 계절주기를 갖는, 해양기후를 얻는다 예를 들면, 뉴칼레도니아와 뉴질랜드에서와 같이, 고산지대는 동쪽으로 이주하는 날씨계(weather system)와 기후유형 결과의 복합체와 상호작용한다 그래서 서부 South Island, 뉴질랜드 그리고 뉴칼레도니아의 최단 북부의 해안은 온화한 온도로 습기가 차있으며 습한 상록의 숲을 지지한다 반면, 이들 섬의 동부와 서부 지역들은 각각 계절적으로 건조한 숲, 관림지대와 초원 지대를 담고 있다. 뉴질랜드의 산들은, 호주에서처럼, 황야와 초원의 알프스형 식생으로 중요하지만, 더 높은 고도의 지역은, 만년설은 물론 만년빙하로 존재하게 한다

태평양 상의 대부분의 작은 나라들은 열대지역에서 낮은 지형 상에 놓여 있다 주된 질문들은 이들 나라가 해수면 변동과 강우유형에 따라 영향을 받는가이다. 가장 부담되는 연구질문은, ENSO를 작동시키는 것과 강우의 변동과 예상되어질 수 있는 (열대성)저기압의 빈도에 대한 이해를 만드는 것이다

라. 존재하는 제4기 기록의 개요

이 지역으로부터 육지와 해양의 기록들은 몇가지 이용할 만한 가장 중요한 제4기 자료기록을 포함하고 있으며 다른 것을 위하여 그 잠재력은 대단하다 여기 짧은 개요에서, 단지 주된 기록과 합성작업들은 언급할 수 있는 것이 드물다 동시에 채워야 할 필요성이 있는, 공간적이고 시간적인 자료의 결함이 많이 있다

아시아의 예에 대하여, 최근최대빙기의 장시간 규모에서 큰 온도와 강우 플럭스(fluctuation)가 발생하였고 이것은 호수기록, 화분자료, 해양퇴적물 그리고 인도로부터 사구 지역과 사막의 기록에서 관찰되었다. 황토와 고토양(paleosols)의 계열을 갖는 중

국의 황토 탁상지의 기록과 중앙 일본의 Biwa 호수로부터의 퇴적물은 제4기를 완전히 덮는 대체기록을 제공한다 이들 기록은 수많은 방법에 의하여 연구되었고 많은 면에 있어서 세계적으로 다른 부분의 육지기후의 대비에 기반을 형성한다 또한 고해 (high resolution)의 빙하기기록과 나이테기록에 대한 자료가 급증하고 있다 덧붙여, 중국, 일본, 한국 그리고 인도네시아는 수세기에서 수천년 동안의 (보관)자료를 오랫동안 써왔으며, 이것은 단기의 기후변화에 대한 증거를 담고 있다. 또한 다른 환경현상의 기록을 갖고 있으며 대체기록을 시험하는 것에 반하는, 특히 범람과 기타 드문 기후사건과 같은 큰 크기이지만 낮은 빈도의 현상에 대하여 이것들은 가치있는 자원이다 이들 기록물은 번역되어지고 데이터베이스로 조직될 필요가 있다 그래서 그것은 고공동체(paleo- community)에 더욱 널리 이용되어질 수 있다 이들 기록을 통하여 역사는 PAGES의 목적을 위하여 그것의 평가에 공헌하도록 지지할지 모른다.

PEP II 단면의 거대한 해양지역은 퇴적물 기록이 흩어져 있다 솔로몬 탁상지는 제4기 지점(site)의 열쇠가 되고, 일본주변과 해양대륙으로부터의 기록들은 특히 중요한 자료를 제공한다. 이 자료는 최근최대빙기 밑에서부터 충적층까지의 시기를 커버한다

인도네시아와 뉴기니아로부터 긴 화분과 산호의 계열(sequence)들은 최근빙하주기 부분의 기후변동과 더욱 최근의 계절풍 변동에 대한 자료를 제공한다 이 지역에서 계절풍 강도의 커다란 변화가 발생하였던 것을 이제는 알고 있으며, 최근최대빙기에서 알프스형 수목선(tree line)은 적어도 5 C 냉각을 제안하기에 충분할 만큼인 약 1km 더 낮았다. 이 냉각은 CLIMAP 기록에서는 증명되어있지 않다. 계절풍의 최근변동이 기록되어 있는 잠재적으로 긴 호수기록과 나무와 산호성장의 증가량을 포함하여, 이 지역은 열대지역에서 가장 좋은, 이용되지 않은 일부 기후기록을 갖고 있다. 이 지역에서, 후자(최근의 계절풍변동)를 조절하는 것이 무엇인지, 특히 온난풍의 변동과 어떻게 관련이 되는지 이해할 필요가 있다 장기 기후기록의 복원을 위하여, 바람의 속도, 방향 그리고 습기 함량이 어떻게 영향을 받는지 드러내 주는 티벳 탁상지와 동남아시아로부터의 자료는 물론 자세한 해수면(변화)과 구조지질의 역사가 요구된다.

호주 내에는 수많은 제4기 기록들이 있다 New South Wales의 George 호수로부터 퇴적상, 고자기와 화분 기록들과 북서부 Queensland의 Lynch 분화구로부터 화분 기록들과 서부 Tasmania의 Darwin 분화구 호주에서의 빙하작용은 제한된 지역에 있

었으나, 최근최대빙기에 건조성은 더욱 지배적이었다. 호주의 기후에 대한 주된 질문들은, 저기압, 범람, 한발 그리고 미개간지 산불이 주된 환경위협이듯이, 이 지역의 습도 수지(budget)에 영향을 주는 것이다. 장기시간의 규모에서, 총적세(현세)는 지난 100,000년의 부분이 가장 습하였고 그래서 비일상적이다 습도 수지는 북풍의 비를 함유한 시스템과 계절풍의 침투와 편서풍에 의하여 조절되는 남풍 시스템에 의하여 통제가 된다 어디보다도 특히 동부 호주에서 ENSO와 강하게 연결되어 있다

비록 몇개의 지점(site)이 최근최대빙기까지 확장되는 기록을 포함하고 있지만, 뉴질랜드 또는 근처 태평양의 섬에는 과거 간빙기-빙기-간빙기의 전체를 커버하는 유일한 지점의 기록은 없다. 육지와 해수면 변동의 구조지질학적 구성요소는 매우 중요하다 계절성과 강우변동의 양은 뉴질랜드, 피지 그리고 뉴칼레도니아와 같이 더 큰 나라에는 매우 중요하다 뉴질랜드, 그리고 피지에 대하여 환경적 중요성에 대한 길면서 고해인 기록들이 있지만, 그밖에는 거의 잘 알려져 있지 않다

PEP II 단면의 남쪽 부분의 두드러진 특징은, 북쪽의 기록들과 대비하는데 유용한 산호초, 다른 고환경 기록들과 나이테의 고해 기록으로부터 오는 양상이 이제는 드러나고 있다는 것이다 그러나 현재 부족한 것은 단면을 따라 주요한 대강의 요소의 자료세트에 대한 엄격한 대비이다 이것은 부분적으로, 국지적이거나 지역적 규모의 환경변화의 유형에 크게 초점을 맞춘 조사자들의 견해로부터 오는 결과일지 모른다 CLIMAP와 COHMAP 프로그램과 기타 다른 분석들은, 지역적 대비 특히 과거기후 조건에 대한 일반순환 모의(simulation)와 비교함으로써, 이제 이런 유형의 대비를 개발하고 있다. 또한 부족한 것은, 단면을 따라 수많은 열쇠가 되는 지점들 주변에 조직된, 조화된 시추작업을 위한 노력이다. 몇몇 기록들은 벌써 존재하지만, 새로운 지점들이 더욱 신뢰할 만한 지역적 합성을 만들게 도와 주는게 필요하다.

마. PEP II에서 대답되어질 수 있는 일반과학질문

PEP II 골격 내에 적절한 일반과학질문들은 시스템의 변동을 증명하는 기록이나 자료에 집중되어야 한다; 이것은 단면의 남쪽과 북쪽 지역 그리고 다른 단면과 연결되는 모양을 포함할 것이다. 기후계가 어떻게 기능하는지 결정하기 위해서, 상호반구의 열과 습도 교환의 시간적, 공간적 유형을 조사하는 것은 분명히 중요하다 존재하는 대체기록들은, 즉 관찰된, 쓸모있고 역사적 기록들에서, 그리고 인류사회에 중대하

게 충격을 가했는지 모르는 변화의 속도와 크기에서, 증명된 것보다 상당히 더 큰 변화를 환경계는 경험하였다는 것을 보여주고 있다. 고환경 정보는, 인류사회와 분명히 관련되는 범람, 불 그리고 저기압과 같은 중요한 현상의 빈도에 대한 정보를 제공할 것이다. PAGES 프로젝트 하에서, 이것은 기후변동의 외적, 내적 힘의 공헌과 환경계에 대한 인류활동의 충격을 설명하려는 시도에 의하여 행해질 수 있다. 여기서 묘사된 전체적인 전략은, 예상모델에 의하여 과거조건의 묘사와 모의(simulation) 시험 양쪽을 허용하는 자료를 만드는, 연구의 중요성에 강조를 두는 것이다.

Stream 1과 Stream 2 양쪽에서 추가적 자료가 모든 지역에서 필요하지만, 특정 지역에서 일부 자료보관기록에 집중하기 위한 상당한 범위가 있다. PEP II 지역은 자료 원천에서 풍부하지만, 이들 중 대부분은 체계적으로 조사되어 있지 않다. 각 자료 원천은 기후와 자체의 기능적 관계를 가지며, 일부 경우에 있어서 자료는 기후나 인류 충격의 기간에서 검정되지 않았다. 대체자료의 가치를 개선하고 정의를 내리는, 그리고 (오차기간의 계산을 포함하는) 검정의 작업은 PEP II 프로그램의 본질적 부분이다. 중요한 것으로는, 단면을 따라서 큰 과정과 문제점들의 이해는 다대체 접근이 착수된 곳에서 가장 이롭게 진행될 것이다.

각 지역에서 기후는 이들 요소들에 의하여 지배될 것이다. 이것은, Stream 1(매년 또는 더 좋은 해)과 Stream 2(더 낮은 시간의 해) 자료 양쪽을 드러낼 수 있는 곳에 굵게 보여주고 있다.

모든 고환경 작업을 위한 특정한 자료의 필요는 연대학의 건축이다. 일부 의문은, 측정에서 더 확고하고 더 낮은 불확실성에서 기술적인 극복의 결과 때까지 대답 못하는 체로 남을 것이다. PEP II 단면의 특정한 강도는 화산 신호(signal)인 듯하며, 이것은 남극에서 시베리아의 Kamchatka 반도까지 반구 전체에 걸쳐서 기원한다. 신호는 특히 뉴질랜드, 인도네시아-뉴기니아 그리고 일본 지역에서 강하지만, 아직도 화산 재층의 특징, 측정 그리고 지역적 범위에 대한 체계적 작업이 빈약한 상태이다.

호주의 Tasmania와 아시아로부터 선택된 나이테 기록들은 연대학적 기간에서 많은 희망을 보여 주었다, 다음 단계에서 이것을 기후자료와 함께 검정하게 될 것이다. 동일한 접근이 단면의 많은 곳으로부터 화분 자료에 대하여도 필요하다. 몇몇 경우에서, 대체기록들의 검정을 위한 필요한 자료를 만들기 위하여, 기상대, 특히 급격한 환경경사를 따라서 위치한 지역에 있는 기상대를 설립할 필요가 있을지 모른다.

PEP II 지역에서 큰 규모의 환경변화에 관련되는, 가장 높은 우선권, 아직 넓게 기초가 되는 질문들을 커버한다 이들 질문은 주된 개요적 규모의 요소의 묘사, 기능 그리고 동력적 관계에 집중하며, 그리고 성공을 위하여, 수많은 나라에 위치한 과학자들로부터 오는 조사를 함께 작성하고 신뢰할 것이다. 확인된 모든 질문에는 수많은 공통된 속성이 있다. 이것은 급격한 시스템 변화의 관계, 경향, 변동성 그리고 가능성을 확인하는 것을 포함한다

(1) Stream 1 프로젝트에 의한 분석에 미결인 질문들

지리적으로 넓은 곳에서 고해(high resolution)의 자료를 얻기란, 나무, 산호와 자이언트 조개의 성장을 그리고 연속적이고 높은 퇴적율을 갖는 호수분지와 빙상 등의 기록이 이용될 만한 장소로 제한되는 것과 같다 또한 중국, 일본, 한국 그리고 인도네시아로부터 역사적 기록들은 높은 고해 기록들을 제공할 잠재력을 가진다 이것은 특히 시베리아 고기압의 위치, 아시아의 계절풍, 온난풍의 영향 그리고 높은 에너지이지만 낮은 빈도의 이벤트 발생과 관련되는 기후변동을 묘사하는데에 유용할지 모른다

(가) 제4기 환경변화에서 기후와 인류 각각의 역할은 무엇이었는가?

고해와 잘 검정된 대체기록들은, 자연의 환경변화에 대한 배경의 지식이 없이는 인류충격의 영향을 얻어내기가 힘들듯이, 이런 종류의 의문에 시도하는 것이 요구될 것이다 많은 질문들은 이런 후원 하에 어울리며, 그것은 분명히 인류사회와 관련된 시간의 규모에서 중요성을 가진다 전체적 힘 함수들의 범위에 대한 상대적 중요성이 여기서 조사될 필요가 있다. 태양력, 화산, ENSO와 다른 종류의 힘의 미세규모의 크기와 변동성에 대하여 더욱 필요하다 이것들은 의심의 여지없이 물리적이고 생물학적인 시스템의 다양함과 상호작용을 하지만, 그 방식에 있어서는 불분명하다. 다른 분야에 있는 우리의 동료들은, 환경위험의 수준을 계획하고 결정하기 위해서 이런류의 질문에 대답들을 알아야할 필요가 있다 또한 수림의 파괴, 농토와 토양의 풍화(침식)으로부터 초래되는 지표면반사율(albedo)과 수리학적 변화에 반응하는 기후의 분석과 같은, Stream 2에서 이 질문을 분석하는 상당한 범위가 있다.

(나) 더 높은 빈도로 기후 변화가 일어난 것처럼, 낮은 빈도에서는 어떻게 ENSO가 변하였는가?

ENSO는 이 지역의 많은 부분에서 기후에 대한 주된 영향으로서 인식이 된다 단면을 따라서 동부 호주, 뉴질랜드와 많은 섬 국가들에서 주기적 한발, 강류 그리고 경제적이고 사회적 복지는 특히 ENSO의 변동에 민감하다 심지어 지난 수십년간 ENSO와 관련된 큰 이벤트가, 이전에 지난 세기를 걸쳐서 ENSO 변동을 측정할, 쓸모있는 기록들 중에 관찰이 되지 않았다

(다) 지난 2,000년 중에 기후 극단(extremes)의 변동성과 빈도는 변하였는가, 그리고 어떤 역학에 의하여 변하였는가?

기후계의 변동성과 빈도는, 제4기 후기의 대체자료의 범위에 따라 직접적으로 측정된 것보다 더 크다 이것은 부분적으로, 시베리아 고기압, 북쪽에서 중국과 인도에서 그리고 남쪽에서 해양대륙을 가로질러 호주까지의 계절풍 시스템, 그리고 남북 단면 양쪽의 편서풍에 의하여 조절이 된다 이 시스템은 강우, 한발과 불의 빈도에 영향을 주며, 특히 인류사회에 가장 영향을 주는 것은 극단이다 그 역학에 대한 더 충분한 이해는, 극단의 이벤트를 누그러 뜨리는 계획과 준비에서 중요한 기능을 가진다

(라) 온난화는 변화된 경계조건에 어떻게 반응하였나, 그리고 그 반응은 어떻게 ENSO에 영향을 주었나?

단면의 대부분에서 수리학적 극단은 아마 이 상호작용과 관련된다 이 상호작용은 매우 분명하지 않은 방식으로 연결되어 있고, 더우기 다른 PEP 단면과의 teleconnection들이 있다. 이것들은 어떻게 전개가 되었는가, 그리고 이들 전개가 얼마나 오랫동안, 그리고 어떤 형태로, 작동되었는가? 여기서 임계점(critical point)은 온난화와 계절풍 시스템 사이의 관계를 이해하는 것이다 장기 경향들, 변동성과 극단의 대부분은 아마도 이들 상호작용의 종류들과 관계되는 것이다 우리는 이들 변동성의 종류에 대하여 아는 바가 거의 없다 이들 결과들은 상당히 과학적 중요성과, 이 지역의 많은 나라를 대하여 사회적 중요성을 가질 것이다

(2) Stream 2 프로젝트에 의한 분석에 미결인 질문들

(가) 시간을 통하여 어떤 변화들이 아시아-호주 계절풍의 강도를 변화시켰는가?

계절풍의 강도는 궤도와 태양력, 그리고 해수면으로부터의 증발량에 의하여 상당히 영향받을 것이다. 태양과 궤도의 요소(factor)들로부터 힘의 정도, 해양대륙 (Maritime Continent)의 지역에서 천해 지역의 확장과 온도의 역사, 이 지역으로 바람을 빚나가게하는 티벳 탁상지의 역할, 그리고 이것이 어떻게 북반구의 빙모(ice cap)의 성장과 연결이 되는지에 대하여는 훌륭히 조화된 자료가 필요하다 이것(환경변화)들은 특히 복사력(insolation forcing)에 민감하고 되물림작용(feedback)에 의한 것 같으며, 저위도와 고위도의 기후변동에 대한 자세한 비교는 어떻게 이것이 작동하는지에 대한 평가를 할 수 있게 한다 이 질문에 대한 완전한 분석은 또한, 이 지역에서 해수면 변동과 중요한 (지질)구조적 활동의 결과로써 결정되는 육지와 해수 표면 면적의 기록들을 요구할 것이다 온난풍의 역사는 이 질문에 대하여 매우 중요하다, 산호와 해양 자료, 그리고 다양한 육지 자료의 근원은 이것의 분석을 가능하게 하며, 이해되어지는 ENSO의 활동에 대한 관련된 영향들을 알 수 있게 할 것이다 Stream 1 우선 목록 내에는 이 질문을 또한 포함하는 것에 대한 상당한 범위가 있다

(나) 편서풍은, 얼마나 많이, 위도상 표류하였는가, 그리고 그 변화의 원인은 무엇이었는가?

지구의 환경경사(environmental gradient)는 활발한 대기순환과 자오선적인 에너지 전이에 영향을 준다 시베리아와 호주의 고기압 중심을 갖는 편서풍의 상호작용은 아마 장기 수리학적 역사, 그럼으로써 PEP II 단면을 따라서 중요한 지역의 생지리학적 유형(biogeographical pattern)과 지형(landform)에 영향을 주었다. CAPE(CircumArctic Paleo Environment)는, 동부 시베리아와 알래스카의 환경 역사에 대하여 부분적으로 초점을 두어 설계된 PAGES의 운영업무이며, 그래서 연구의 대부분은 이 질문에 직접적으로 연관이 될 것이다

(다) 시베리아와 호주의 고기압 시스템은 시간을 통하여 위치와 강도를 변화시켰는가, 그리고 이들 변화의 원인은 무엇인가?

시베리아 고기압의 위치는, 아시아 계절풍과 편서풍의 변화와 관련된, 기후 유형과

연결이 되는 것 같다. 티벳 탁상지 주위의 (지질)구조적 효과는 이 시간 규모에서는 중요하지 않다 이 상호작용을 이해하기 위해서, 이 지역에서 시베리아 고기압의 현재 평균위치의 북쪽, 동쪽 그리고 남쪽까지 고식생(paleovegetation), 황토와 영구동토(permafrost)의 자료와 계절적인 계절풍의 세기에 대한 역사를 조사하기 위한 추가적 해양자료가 필요하다 HIPP 프로그램(Himalayan Interdisciplinary Paleoclimate Program)은 아시아의 중앙고원지대로부터 본래의 보관기록에 대한 다양한 정리를 평가하는데 초점을 맞춘다 Stream 1과 Stream 2 양쪽 해(resolution)의 기록은, 자연의 기후 변동성과 계절풍의 행태에 대한 이해를 증진시키기 위해서, 그리고 이 지역의 기후를 조절하는 힘의 기구(hierarchy)를 결정하기 위해서 확충되고 있다 추가로, 러시아, 일본과 미국에 의하여 지원되는 PAGES의 운영업무인 Baikal Drilling Project는 바이칼호의 긴 호소기록에 의하여 중앙아시아에 대한 기후변화를 캐내고 있다 바이칼호는 매우 중요한 지역에 위치하고 있다 즉, 이 호수는 실제로 비빙하(unglaciated) 지역에 놓여 있으며 시베리아 고기압의 겨울 중심과 밀접하게 위치하고 있다 퇴적율(sedimentation rates)은 일부 퇴적물에서 높으며, 궤도 빈도(orbital frequency)가 기록에서 분명한 것은 이미 알려져 있다

호주 고기압의 위치는 북쪽에서의 강력한 계절풍 활동과 이로 인한 위에서 강조한 관련과 남쪽에 있는 편서풍의 강도에 의하여 영향을 받는다 후자는 부분적으로 남극으로부터 남부해양(Southern Ocean)을 건너서 오는 기류(passage of air)에 의하여 작동된다 호주에 있는 사막의 사구(desert dune) 유동성, 호수 수준과 수림의 면적에 대한 유형은 고기압의 위치에 의하여 상당히 영향을 받으며, 모든 이들 영역으로부터의 많은 자료가 남극빙상의 화학적, 물리적 성질과 남부해양에서 해빙의 기록을 위하여 필요하다 이것은 평가되는 원인과 관계를 규명하는데 더 커다란 모습의 조립을 가능하게 할 것이다.

(라) 해양대륙, 동아시아 그리고 북부 호주에서, 기후는 어떻게 해수면과 SST의 변화에 의하여 영향을 받았는가?

천해의 거대한 지역은 크게 제4기의 해수면 변동에 의하여 영향을 받았다 강의 방류와 위에서 확인된 지역의 많은 곳에서 건조와 습윤한 조건의 분포를 포함하여, 수리학적 조건들은 해수면 변동에 의하여 영향을 받는다 이들 변화는 확실히 중요한

생지리학적 암시를 가졌을 것이며 이 지역에서 인류의 이주에까지 영향을 주었을지 모른다. 지역적인 해수면, SST 그리고 온난풀 사이의 관계는 다수의 teleconnection 을 통하여 지구적으로 중요하였을 것 같다. ARTS(Annual Records of Tropical Systems)는 PAGES의 발의이고, 이것은 산호초, 나이테, 빙하시추와 호상(varved) 퇴적물로부터 고해의 기록 산출을 용이하게 하는 것이 그 목적이다. 모든 그러나 후자는 잘 알려져 있거나 또는 PEP II 단면을 따라서 개발 중에 있다.

이들 질문에 대답하기에 이용할 만한 자료는 문헌과 도표 1에서 가리키고 있는 검토되지 않은 기록들에 있다. 과학자들이 두개 또는 그 이상의 개요 규모의 요소들이 상호작용하는 지역을 가로질러 기후신호의 시간, 변동성과 강도를 정력적으로 시험할 준비가 되어 있는 곳에서 중요한 진척이 만들어질 수 있다.

마 다른 단면들과 국제적 프로젝트에 PEP II 연구의 연결

다른 PEP 단면들과 공통으로 많은 접근과 문제점들이 분명하게 있다. PEP II에 의하여 내놓은 질문에 대답하는 것과 상당히 관련되는, 측정과 일부 모델-자료의 상호 비교에 대한 논의가 있다. PAGES 프로그램의 일부인, ARTS와 CAPE는 PEP II 질문에 가치있는 입력정보(input)를 또한 제공한다.

PEP II와 PEP III 사이에는 강한 북쪽의 연결이 있다. 동유럽 및 중앙 유럽의 기후와 인도의 계절풍에 영향을 주는 시베리아 고기압은 양쪽 단면에 중요한 부분을 형성하며, INQUA/PAGES 고계절풍 프로젝트는 PEP II와 PEP III 사이의 연결에 대한 연구를 자극하는 것이 목적이다. 또한 ENSO를 갖는 PEP II와 PEP I 사이에는 주된 interface가 있다. PEP I이나 PEP II에서 이와 관련된 많은 작업은 서로가 다른 단면에 관계될 것이다. CAPE는 두 단면 사이에 더욱 강력한 연결을 나타낸다.

해양과 남극빙상 연구는 IMAGES와 같은 많은 국제적 협력체에 의하여 착수되어지고 있고, PEP II가 가능한 곳의 정보교류와 합작지원을 위하여 이들 협력체와 긴밀한 접촉을 유지하는 것은 중요하다.

PEP II 연구의 많은 성과를 위해서는, PMIP와 PMAP, 그리고 IGBP의 GAIM 시추프로젝트와 같은 다른 PAGES 활동들이 필요하게 될 것이다. 더우기 BAHC, GEWEX, LOICZ 그리고 기타 다른 프로젝트에서 식물생리학자, 수리학자, 연안지형학자와 대기과학자들에 의하여 수행된 연구들은 되물림(feedback) 역학과 육지와 해양

표면의 동력에 대한 더 나은 인식을 제공할 것이다

최근 COHMAP 프로그램으로의 확장과 INQUA의 위원회에 의하여 수행되고 있는 것들을 포함하여, 여러 다른 발의들은 국제적 협력의 범주로 구분이 된다, 모든 PEP 단면들은, 이들 노력들과 관련될 새로운 자료와 인식을 제공할 것이다

여 백

<부록 4>

미국의 지구환경연구사업
(U.S. Global Change Research Program)

“ 변화하는 지구 ”

여 백

1 서론

지구변화 연구는 용수, 식량과 같이 인간의 생존에 필수적인 미래의 자원의 가용성을 확신할 수 있도록 지구 시스템에 관한 잘 확립된 과학적인 이해를 제공함으로써 국가와 전 세계에 중요한 이득을 가져다 준다 미국의 지구환경변화 프로그램(USGCRP)은 국제 공동연구자들과 함께 홍수, 가뭄, 열전이 같은 극단적인 사건을 예측하고 이에 대응하는데 필요한 능력을 증진시키는데 필요한 기반을 제공하고 있다 USGCRP는 또한 기후, 지구 표면의 자외선, 지표면과 같은 중요한 환경 요인의 변화에 대한 취약성을 감소시키는데도 그 목적을 두고 있다 환경 문제에 관한 최선의 의사결정과 미래 세대의 사회적 및 경제적 건강을 보장하기 위해 과학적 지식은 필수적이다.

USGCRP는 1989년에 만들어져서 1990년의 지구변화조사법(Global Change Research Act)에 의해 1990년에 공식화 되었다 그 이후, 지구변화 연구는 핵심기반 연구로 지속되어왔다 지구 시스템에 관한 과학적 이해를 증진시키는 것은 과학기술국(National Science and Technology Council)의 환경자원위원회(Committee on Environment and Natural Resources)의 최우선 과제이다.

가 지구변화란 무엇인가?

지구변화는 생물을 유지하는 지구의 능력을 변화시킬 수 있는 지구 환경의 변화(기후, 육상 생산력, 해양 혹은 다른 수자원, 대기 화학, 그리고 생태계의 변화를 포함하는)로 정의될 수 있다. 지구변화에 관련된 핵심연구 주제들은 ① 단기간의 기후 변동 ② 향후 수십 년간의 기후변화 ③ 성층권의 오존 고갈 및 증가된 자외선 ④ 지표면의 변화와 육상 및 해양 생태계의 변화관한 연구이다.

지구변화에 관한 향상된 과학적 지식은 환경변화에 대한 인간과 생태계의 취약성을 감소시킬 수 있다 이러한 연구는 인류복지, 경제 성장과 번영, 그리고 식량의 공급 및 담수의 충분한 공급과 그 질의 보장에 있어서의 지속적인 발전을 통하여 건강한 사회를 건설하는 초석을 제공한다

지구 곳곳에서는 매년 가뭄, 홍수와 같은 사건에 의해 중대한 경제적 손실이 발생한다. USGCRP는 이런 사건을 예측하고 대응하는 사회의 능력을 증진시키는데 일

조하는 단기간의 기후변화에 관한 연구를 지원한다 온도와 강수 패턴의 변화와 이들의 수확량, 산림, 인체 병원균에의 영향을 더욱 잘 이해함으로써 사회로 하여금 수십 년 내지 수 세기 기간의 큰 피해를 감소시킬 수 있는 미래의 잠재적 기후변화에 대비할 수 있게 한다 오존층 파괴, 생물 다양성의 변화, 그리고 육상 및 수자원의 생산성 변화와 관련된 증가된 자외선의 조사 수준의 영향에 관한 증진된 지식도 유사한 혜택을 줄 것임은 명백하다

나 USGCRP의 초점은 무엇인가?

USGCRP는 지구 시스템과 구성 성분의 과학적 연구에 초점을 두고 있다 지구 시스템 과정과 상호작용의 포괄적인 연구는 복잡한 과학적 도전이다 인간의 영향과 환경과의 상호작용은 그 범위가 국지적인 것으로 부터 전 지구적인 것까지, 그리고 수일 혹은 수 계절부터 길게는 수십년 혹은 수 세기까지 이른다 이런 다양한 스케일과 상호작용을 이해하기 위해서는 넓은 범위의 과학분야 및 전 세계의 모든 지역으로부터의 광범위한 과학자들의 참여가 필요하다 따라서 USGCRP 활동은 다른 관련된 국가적 혹은 국제적 연구 프로그램들과 통합 조정된다

USGCRP 연구는 지구변화를 관측하고, 보고하며, 이해하고, 예측하는 구조로 조직되어 있다 즉 이런 변화의 결과와 잠재적으로 해로운 영향에의 인간과 생태계의 취약성을 평가하며, 이런 지식을 분석하고 전달하기 위한 통합된 평가를 수행할 도구와 능력을 개발한다

(1) 지구변화 관측

지구 시스템의 다른 일면을 관측하고 감시하는 육상, 해상, 항공, 그리고 위성 관측 시스템의 통합 조정된 프로그램은 전지구적 환경 변화를 보고하고, 그것들의 예측적인 이해를 얻는데 가장 중요한 것이다 지구 변화를 관측하는 가장 포괄적인 장비는 많은 국제공동연구자와의 협력으로 미국에 의해 계획되고 실현되고 있는 우주로부터의 관측 시스템이다. 현재 작동 중이거나 계획중인 다른 위성 관측 시스템은 가동중인 기상 위성과 오존과 다른 대기의 화학물질, 전 지구의 해면, 지형, 토양 습기, 해빙 유동, 그리고 대양의 온도를 관측하는 위성들을 포함한다

이런 위성 관측은 많은 해상 및 항공 시스템에 의해 보완되며 결과가 향상된다. 예를 들면, 열대 태평양의 광범위한 대양 관측 시스템은 해양-대기 상호작용에 대한 중대한 정보를 제공하고 있다. 다른 현장관측 시스템은 온실 기체, 에어로졸, 오존, 자외선, 그리고 육지-대기 상호작용과 같은 중요한 지구 시스템 매개변수들을 관측한다.

(2) 지구변화 연구보고 활동

지구변화 연구활동은, 지구 변화 과정의 이해를 개선하고 사회에의 영향을 총괄적으로 평가하기 위해 방대한 양의 아주 다양한 데이터와 정보를 생성하며 또한 필요로 한다. 지구변화 연구의 범위는 매우 광범위하다 즉, 생태계의 연구, 생물 다양성, 해양과 대기의 상호작용으로 부터 과학적인 평가를 위한 도구와 방법의 개발까지를 포함한다. 따라서 중요한 데이터는 기록 보관하고 저장되며, 그리고 개개의 연구 활동을 위해 사용될 수 있어야 하며, 해석을 극대화 하기 위해 여러 분야에서 관련 자료는 검증되고 결합될 필요가 있다

(3) 지구변화의 이해

지구 시스템을 조절하는 물리적, 화학적, 생물적, 그리고 인위적 과정들을 제어하는 근본적인 과정들과 메커니즘에 관한 연구는, 미래의 변화를 예측하고 잠재적인 결과 및 영향을 분석하는데 필요한 기반을 제공한다. USGCRP는 대기, 해양, 빙하(눈, 얼음, 빙하 등), 육상(육지 표면), 해양 및 육상 생태계와 이 성분들간의 관계에 관한 연구를 포함한다. 넓은 시간적, 공간적 범위의 이런 과정들의 중요성을 이해하는 것은 미래의 변화를 예측하는 데 있어서 특별히 중요하다.

현재 진행되고 있는 프로그램은 구름 연구, 태양 및 적외선 과정의 연구, 에어로졸의 복사 영향에 관한 연구, 육상과 해양 생태 과정과 대기 조성 및 기후와의 상호작용에 관한 연구를 수행하고 있다. 이 연구의 결과는 미래의 기상 및 오존 농도의 변화, 지표 자외선 수준의 변화, 그리고 어업, 숲, 농경지구의 전 지구적 생산성의 변화를 예측하는 개선된 모델의 기초를 제공 할 것이다.

(4) 지구변화 예측

전 지구적 관측 및 연구로 인해 과학자들은 이전의 지구 변화를 설명하고 재현하며, 미래의 변화와 그 결과를 예측하는 모델을 개발하고 개선해 나가고 있다. 미래의 지구변화의 정확한 예측은 개발된 모델들이 대양, 대기, 육지, 그리고 생물을 포함한 지구 시스템의 많은 구성요소의 상호작용을 얼마나 잘 적용되는가에 달려 있다. 현장 및 관측 프로그램은, 국지적 스케일 및 전 지구적 스케일의 패턴과 변수들(특히 강수량, 온도, 지표의 기복)을 연관시키고 모델 결과와 실세계의 조건을 비교하는 노력을 위한 기반을 제공한다

모델화 연구자들은 농경활동, 생물학적 생산성, 토양의 변화, 미량 기체 교환, 대기의 순환과 화학, 그리고 대양의 순환 패턴과 기후 시스템과의 상호작용을 자신들의 모델에 포함하려는 노력을 기울임에 따라 전 지구 환경모델의 개선은 계속 이루어지고 있다. 예를 들어, 대기 중의 에어로졸의 영향을 고려하는 최근의 기후모델은 지난 세기 동안 실제 일어난 변화와 유사한 기후변화를 예측할 수 있게 되었다.

(5) 지구변화의 결과분석

전 세계 환경변화의 결과를 평가하는 것은 환경변화의 경제적, 보건학적, 그리고 사회적 영향을 알아내고 해석하는 것과 잠재적인 이변에 대한 적응 및 완화를 위한 가능성을 이해하는 것을 포함한다. 현재 진행중인 연구 노력은 전 지구적 기후의 변화, 대기의 가스 농도, 증가된 자외선, 지표면의 변화, 그 외 다른 환경요인의 변화에 대한 동식물의 생리학적 및 생태학적 반응의 이해를 증진시키는데 초점이 맞추어져 있다. 이런 노력들은 산림 감시, 생존을 위협받거나 멸종위기에 처한 종들에 관한 연구, 가뭄, 자외선, 그리고 새로운 해충 및 포식자의 출현 같은 환경적 제약을 견뎌내는 생리학적 기반에 관한 연구 등으로 구성된다. 이러한 프로그램들은 환경변화에 저항력이 강한 농작물을 개발하는데 주력하고 있다

소비형태의 변화, 기술의 발전 및 확산의 조정, 그리고 국지적 및 세계적 무역 형태의 변화와 같은 사회적 변화와 환경변화의 상호작용을 분석하기 위한 경제 연구 프로그램들도 진행 중이다. 지구변화의 결과를 평가하는데 중요한 다른 프로그램들은 오존을 파괴시키는 화합물의 대체물질을 개발하는 프로그램들, 에너지 공급 비용과 이익을 분석하는 노력, 그리고 토양 회복과 벌목의 효과를 연구하는 프로젝트로 구성되어 있다.

(6) 통합평가 기술 개발

USGCRP는 정책입안자들에게 사회적 이슈에 대한 과학적 평가를 제공하기 위한 연구를 진행하고 있다. 이러한 활동의 주요한 일면은 물리학, 생물학, 사회학 및 경제학으로 부터 자료를 통합하는 도구와 방법론의 개발이다. 통합된 평가법은 정책결정자들로 하여금 다양한 상황의 영향을 평가하는 포괄적인 기초자료를 제공함으로써 지구변화에 대한 적절한 대응책을 세우는데 도움을 준다. 이러한 기초자료는 관련된 향후의 연구사업 선정에 있어 우선순위를 결정하는 데도 유용하다.

USGCRP는 미국 과학자들의 국제적 평가 절차에 기여하는 주요한 역할을 해 왔다. 국제적 평가는 전 세계의 수 만명의 과학자들에 의해 수집된 정보를 통하여 과학적인 발견에 대해 공감할 수 있는 의견을 이끌어 내기 위해 수행된다. 국제적 평가의 예로는, 오존 고갈에 대한 UNEP(United Nations Environment Programme) /WMO(World Meteorological Organization)의 결과들과 기상변화에 대한 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에 의한 결과들이 있다.

2. 단기기간의 기후 변동

지구의 기후는 엘 니뇨 사이클에 의해 입증되듯이, 단기기간의 자연적 변동을 끊임 없이 겪고 있다. 이렇게 자연적으로 나타나는 변동은 가뭄, 홍수와 같은 극단적인 사건을 이끌어 낼 수도 있다. 장기기간의 가뭄은 도시 거주지와 숲에 화재를 일으키기 쉽고, 식량 및 물의 생산을 방해할 수도 있으며, 때로는 개발지역에서는 수많은 사람의 이주를 유발할 수도 있다. 장기적이며 과도한 강우는 홍수, 수자원의 오염, 그리고 일시적으로 경제 생산과 무역활동에 변화를 초래한다.

단기기간의 해양 온도, 해빙, 그리고 지구 기후변화에 끼치는 다른 요인들의 변동에 관한 정보를 제공하고, 개선된 예보능력은 잠재적으로 파괴적인 기후변화에 의한 피해를 줄일 수 있을 것이다. 이러한 재해들에 대한 조기 경보는 곡물의 교체, 수자원 관리방법의 변경 등을 통하여 이러한 사건에 대처할 수 있는 전략을 개발하는 데 필요한 기초자료를 제공한다.

관측과 분석에 의하면, 어떤 지역에서는 단기적인 대기상태의 변동은 최고 2년 이전에 예측이 가능하다. 이런 예측은, 해면 온도, 토양 내의 수분의 양과 같은 매개 변수의 변화 관찰에 근거한다. 단기기간의 심각한 기후변화의 정확한 관측은 장기기간의 기후변화를 파악하는 초석이 될 수 있다.

가. 단기간(Seasonal-interannual)의 기후변화에 관한 연구사업 계획

① 열대 태평양 기후에 미치는 영향을 파악하고 예보기술을 증진시키기 위해 열대 태평양 감시

열대 태평양의 변화, 특히 해면 수온의 변화는 많은 열대 및 중위도 국가들의 기후에 막대한 영향을 미친다. 국제 공동연구자들과 협동하고 있는 USGCRP는, 열대 태평양의 상태를 연속적으로 감시하고 데이터를 연구 및 운용 센터로 실시간에 보내기 위해 유일한 관측기기를 설치하였다.

② 기후 변동의 예보를 개선하기 위해 현장 데이터를 모델에 결합

적도 서태평양에서의 대기-해양 상호과정은 El Nino-Southern Oscillation (ENSO) 현상의 변동에 매우 중요하다. 최근 서태평양에서의 국제적 현장관측에 의해 획득된 양질의 데이터는 기후학적으로 중요한 지역의 해양-대기간 상호작용에 대한 이해를 증진시키기 위해 분석되고 있다.

③ 전 지구적 강수량과 기후변화와의 관계 규명

열대와 그외 주요 지역에서의 강수량 패턴은 대기-열대 해양간의 상호작용에 의한 대규모 대기순환 패턴과 밀접하게 연계되어 있다. 여러지역의 육상 및 위성 관측 시스템으로 부터 입수된 추정치를 통합함으로써 USGCRP는 많은 국제연구자들과 협력하여 최초로 효율적인 전 세계 강수량의 분포도를 만들었다. 전 지구 강수량의 분포도를 개선함으로써, 수자원 관리 개선과 기후 시스템에 대한 이해증진 그리고, 예측을 통해 전 세계에 혜택을 줄 것이다.

④ 예보 기술

USGCRP는 엘 니뇨를 적어도 1년 전에 예보할 수는 체계를 만들었으나, 그 예보는 열대 태평양 해면 수온변화 및 이에 관련된 기상 영향에만 초점을 맞추고 있다. 예보기술은 열대 즉 엘 니뇨 현상의 근원 부근에서 가장 잘 맞으나 다른 현상이 더 큰 역할을 하는 고위도(즉 북아메리카 상공)에서의 정확도는 떨어진다. 열대 태평양을 넘어서 단기적 기후 변이에 영향을 미치는 것으로 믿어지는 다른 열대 해양들, 고위도의 해양들, 그리고 지표면 과정의 영향을 포함하도록 기상변동 예측 가능성을 늘리기 위한 연구가 계획되고 있다.

⑤ 예보모델 개발을 개선을 위한 연구센터 설립

USGCRP의 실험적 예보치는 제한된 열대 국가들(예를 들어, Brazil과 Peru)에게

제공하고 있다. 이런 예보는 초보적인 것으로, 예보가 전 세계적으로 이용될 수 있도록 배포하기 위한 기계적 시스템 없이 진행되고 있다. 지역 기상예보 모델과 방법론의 개발을 촉진하고 참여국 과학자들의 훈련을 지원할 연구센터를 확립하기 위한 다국간의 계획 과정이 진행중이다. 다른 센터는 정기적으로 관심을 가진 국가들에게 예보 지침을 생산, 평가, 배포한다.

⑥ 기상변화에 대한 사회적 취약성을 평가하고 적응을 위한 대책 마련

개인, 사회 정도의 차이는 있으나 계절적 혹은 연별 기후 변동에 영향을 받는 경제분야를 표현하는 사회적 및 경제적 요인의 이해는 그런 취약성을 감소시키고 적응성을 증가시키는 데 필수적이다. 기후분석과 예보능력의 진보를 이용하기 위해서는 기후정보가 기후에 민감한 분야(즉 수력발전, 보험, 운송, 수산업, 농업)의 경영 의사 결정에 통합될 필요가 있다. 더구나 자연적 변이에 적응함으로써 얻어지는 교훈은 장기간의 기후변화가 극단적인 사건들의 빈도와 강도로 나타날지 모른다는 가능성에 사회로 하여금 대비하는데 도움이 된다.

3 향후 수십년 간의 기후변화

인간사회는 지구의 기상에 의존하고 있다. 기상 패턴과 인간의 적응능력은 식량, 물, 그리고 생명을 유지시키는데 필요한 다른 자원공급을 결정한다. 단기간의 이상적인 변화가 사회에 중대한 영향을 주는 반면, 수십 년에서 수백 년에 걸쳐 일어나는 더욱 장기간의 기후변화에 대한 사회의 취약성은 이러한 변화를 이해하고 대응하는 능력에 좌우될 것이다. 따라서 기후 변화와 온실효과에 의한 온난화의 원인과 역학, 그러한 변화의 생태학적 및 사회경제적 잠재적 영향, 그리고 그러한 변화를 감소시키고 적응하는 여러 대안의 의미 등을 과학적으로 잘 이해하는 것이 시급하다.

기후는 자연의 힘과 인간활동의 영향을 받는다. 예를 들면, 지구상의 살기에 적당한 온도는 "온실효과"라고 알려진 자연현상에 의해 유지된다. 태양의 복사열은 지구의 대기와 육지, 물에 의해 흡수된다. 그 결과 생기는 열은 장파 복사로 다시 발산되는데, 그 중 일부는 우주로 되돌아 가고 또 다른 일부는 수증기, 이산화탄소, 메탄, 아산화 질소, 염화불화탄소, 오존 같은 대기 기체에 흡수된다. 이런 기체 중 일부는 자연적으로 존재하지만, 인간활동에 의한 온실 기체의 증가는 온실효과를 증대시켜 지구 표면과 대기온도를 상승시킨다. 화석연료 연소와 토지 사용 변화와 같은 인간 활동은

대기중의 이산화탄소를 30%나 증가시켰고 산업화 시대 이래 메탄의 농도를 2배 이상 증가시켰다

인간활동에 의한 변화와 자연발생적인 변화들이 어떻게 복합적으로 장래의 세계 기후에 영향을 미치는지 연구하는 데는 아직 많은 발전이 필요하다.

165개국 이상의 과학자들이 참여하여 이루어진 IPCC 평가는, 온실기체와 에어로졸의 방출로 인해 다음 세기 말까지는 지구의 평균 온도가 섭씨 1 - 4° 까지 높아지고, 해수면이 상승하고, 전 지구적 강수 패턴이 바뀔 수 있음을 시사한다. 다른 불확실한 것 중 강수 패턴의 예측 변화의 정도와 장소는 특히 예상하기 어렵다

관측자료는 지난 100년 간 지구의 평균 온도가 약 0.5° C 상승하였음을 보인다. 이런 온난화가 주로 자연 변화에 기인할 가능성은 매우 적다. 이런 관찰된 온난화는 거의 2년 동안 태양 복사를 줄이는 화산 분출을 일으킨 Pinatubo의 화산 폭발의 영향에도 불구하고 계속되고 있다. 최근 기후 모델 시뮬레이션은 이러한 관찰된 추세를 정확하게 설명해 왔다. 미래기후 예측에 대한 확신을 높이기 위해 대기중의 에어로졸 농도, 대기중의 수분의 모든 단계적 순환, 구름과 복사량의 상호관계, 해양-대기간 모델링, 그리고 자연 기후변화 범위를 예상하는 체계의 발전이 필요하다

기온, 강수, 해면변화 등 다음 수십년간 예상되는 기후변화는 인구증가, 토지의 용도 변경, 공해에 의해 일어나는 자연체계에 변화를 초래한다. 상승된 온실효과에서 예상되는 기온변화가 오래 전부터 일어났으나, 과학적 증거에 의하면 변화가 수 십년이 아니라 수 세기 혹은 수 백만 년에 걸쳐 일어난 것으로 보인다.

가 향후 수십년 간의 기후 변화에 관한 연구계획

① 기후 변화의 역학의 이해를 향상하기 위한 지구의 과거 기후 재구성

빙하 주상시료 자료와 지구의 과거 기후 및 기후변화와 관련된 다른 역사적 기록을 분석하고, 모델 성능을 평가하기 위해 시뮬레이션한 결과와 지질학적 기록을 비교한다

② 지난 세기 동안의 기후 시스템 변화의 관측적 증거를 분석

인간활동으로 인한 자연적 변이를 구분하기 위해 위성 및 현장관측 외에도 변화의 경향과 패턴을 알기 위해 기존의 기상 데이터를 재분석하고 모델 시뮬레이션과 비교한다

- ③ 기후 변화를 일으키는 자연적 및 인간에 의한 요인 평가
온실 기체와 대기중 에어로졸의 기원, 제거, 체류시간 및 그것들의 복사균형에 미치는 총체적 영향을 포함한다
- ④ 향후 수십년 간의 지구 기후 변화의 예측을 개선
모델 시뮬레이션을 해양, 대기, 육상, 빙하 및 해빙의 영향과의 포괄적인 연결로 확장하고 구름에 의한 복사와 화학적 반응과 같은 중요한 과정을 더 잘 나타낼 수 있도록 한다.
- ⑤ 기후 변화의 예정된 패턴 및 변화율에 대한 사회의 취약성을 평가
경제, 인간 건강, 생태계를 포함한 지구 시스템이, 예측된 기상 변화의 비율 및 정도에 대한 취약성을 평가하기 위한 연구를 수행한다

나. 다음 세기 동안의 기후변화 예보와 잠재적 영향

- ① 수자원
식수의 질과 양, 관개, 산업, 전기발전을 위한 물의 가용량, 어업은 강수량 변화와 증가된 증발에 의해 많은 영향을 받을 것이다 강수량의 증가는 더욱 잦은 홍수를 유발할 것이다. 기후변화는 전 세계 주요 강 유역들에게 더욱 압박을 가할 것이다.
- ② 해안자원
IPCC의 예측 범위 내에 드는 2100년 까지 해면의 50cm 상승은 미국의 5000 제곱 마일 이상의 건조한 땅과 4000 제곱 마일에 이르는 습지를 침수시킬 수 있다.
- ③ 건강
오랜 기간 동안 높은 온도로 열에 의한 스트레스로 사망률이 증가할 수 있다. 강수와 기온의 변화 패턴은 해충과 병원균의 새로운 서식처를 제공하여, 말라리아나 열병 같은 전염병의 감염범위를 확장시킬 수 있다
- ④ 농업
대평원 같은 미국의 몇몇 지역에서 가뭄이 더 자주 일어나겠지만 새로운 기술 발달과 식수 패턴의 변화는 농업에 대한 역효과를 상쇄할 수 있다. 그러나 개발도상국에서는 영향이 증대할 것이다.

⑤ 삼림

다음 세기 동안 북미 대륙 삼림 종의 범위는 450km 만큼 북쪽으로 이동하여 향후 수십년 간 현재의 생태군을 붕괴하거나 재편하면서 할 수 있다. 더 높은 기온과 강수변화로 숲은 화재, 질병, 해충에 의한 피해를 더 받을 수 있다.

⑥ 에너지와 운송

더 높은 기온은 냉방수요를 증가시키고 난방의 요구량을 줄인다 겨울철의 교통 중단은 감소할 것이나 해상운송은 홍수나 낮아진 강 수위의 영향을 받을 수 있다.

4 성층권의 오존 고갈 및 증가된 자외선

지구 표면의 생물은 성층권 오존층에 의해 태양의 해로운 자외선으로부터 보호를 받는다. 지난 수십년 간 CFC와 halons와 같은 합성 화학물질이 새로운 세대의 냉매, 단열재, 방화재, 그리고 다른 제품을 공급하기 위해 개발되었다 이 물질들이 광범위하게 사용된 후 이 물질이 오존을 파괴하는 활성을 가진 형태로 분해되는 성층권에 도달하기 전에 대기에서는 화학변화를 일으키지 않는다는 사실이 밝혀졌다 CFC 분자에서 나오는 염소 원자 하나는 수천개의 오존 분자를 파괴할 수 있다

인공위성과 지상에서의 관측에 의하면 오존의 손실은 계절적으로 일어나며 특히 봄철 남극 성층권에서 일어나는데 이것은 “오존 구멍”으로 알려져 있는 현상을 일으키는 원인으로 확인되었다 또 다른 우려는 많은 인구가 살고 있는 중위도 지역에서 관측된 오존 고갈현상이다 구름이나 공해의 변화가 없는 대기 오존의 감소는 지표의 자외선을 증가시킨다

인간 건강과 관련된 자료의 분석, 남극의 해양 식물성 플랑크톤의 생산, 증가된 자외선 노출의 영향에 대한 주의깊은 현장 및 실험실 연구에 의하면 증가된 자외선의 양은 지구표면의 인간건강, 어류의 개체수, 많은 육상 및 해양 생태계에 부정적인 영향을 끼칠 수 있음을 보인다 인간이나 다른 동물에 대한 영향은 심각한 화상의 증가, 비타민 D 합성 감소, 그리고 암 등이다. 식물의 경우에는 증가된 자외선에 노출은 광합성의 필수과정이 방해될 수 있다 증가된 자외선은 또한 농업 생산성에 영향을 미치고 플라스틱 같은 합성물질의 파괴를 초래한다.

오존 고갈의 영향에 대한 국제적 인식으로 인하여, 많은 CFC와 halon의 방출이

다음 수년간 단계적으로 줄어들 것이다 대기중 CFC 농도의 전 지구적 관찰은 몬트리얼 의정서 및 그 개정안의 반응으로 취해진 조치가 원하는 효과를 내고 있음을 발견하였다.

현재 진행중인 성층권의 오존고갈 및 증가된 자외선에 대한 연구목표는 지구 성층권 및 대류권 상부의 오존 농도의 변화 추세와 패턴 및 지구 표면의 자외선 추세와 패턴의 관찰 및 기록을 기록하고, 오존 변화와 그것과 지구표면에서 일어나는 자외선 변화 예측을 가능케 하는 성층권과 대류권 상부의 물리적, 화학적 과정을 모델화 하는 것이다. 또한 변화하는 오존농도와 그 결과 발생하는 지구 표면에서의 자외선 변화와 인간 건강과 다른 생물에 미치는 영향을 평가하고 새로운 대체 화합물의 개발 효과를 평가하는데 주력하고 있다

성층권 오존 고갈 및 증가된 자외선에 대한 연구에서 상부 대기권 관측위성(Upper Atmosphere Research Satellite, UARS)을 이용하여 항공기 측정에서 드러난 극지방 성층권 구름(PSC)의 과정을 광범위한 지역에서 분석할 수 있는 남극 전체의 자료를 제공하였다 한편 북극지방은 더 따뜻하기 때문에 PSC의 형성은 더욱 국지적이고 일시적이어서 오존의 손실은 덜하다 그러나 증가하는 몇몇 온실 기체의 농도로 인한 성층권의 냉각은 극지방 성층권 구름 형성을 증가시키고 따라서 북극지역의 오존고갈을 더 유발할 수 있다

지구 전체의 대기측정은 오존을 고갈시키는 CFC-11, CFC-12 및 여러가지 halon 화합물 농도의 증가율이 둔화되고 있다고 확인하고 있다 대류권에서의 전체 유기 chlorine과 bromine의 증가율은 지난 수년간 매우 감소되었다 전체 성층권의 chlorine/bromine은 1990년대 최고치에 이를 것이며 그 후 수십년 간 오존층이 서서히 회복될 것이다

의학연구는 자외선의 증가가 두가지 방법으로 암의 발전을 일으킴을 발견했다 즉 자외선은 피부의 암억제 유전인자를 돌연변이 시키며, 또한 전에 상처입은 피부가 더 많은 돌연변이 세포를 생산하게 한다 그러므로 햇볕에서의 자외선에의 노출은 종양을 발생시키거나 종양을 악화시키는 인자로 작용한다 이러한 발견은 오존층 고갈로 인한 증가된 자외선에의 인간의 노출에 대한 우려를 높인다

가 성층권의 오존 고갈과 자외선 증가에 관한 연구계획

① 오존층 회복을 감시

성층권 chlorine/bromine의 총량은 1990년대 말에 최고치에 이를 것이며, 그 후 천천히 오존의 회복이 뒤따를 것으로 예상된다. 성층권 오존에 영향을 미치는 화학물질(chlorine, bromine, nitrogen, hydrogen의 산화물)의 지속적인 위성관측은 공공안전과 건강을 보장하고 몬트리얼 의정서와 그 개정안에 호응하여 취해진 조치가 의도한 효과를 발휘하는지 확인하는데 필요하다.

② 대기 중의 CFC 농도와 다른 오존 고갈 기체 감시

CFC, halon, 그리고 다른 오존파괴 기체의 방출이 예상대로 감소하기를 원하면 국제적 협약을 지켜야 한다. 이러한 기체의 장기간의 계속된 위성 감시만이 국제 정책 수립자가 약속된 단계적 감축 일정을 이행하는지 확인할 수 있다.

③ 오존고갈을 파악하고 이해하기 위한 지속적 노력

대략 오존층이 다음 세기에 회복될 것으로 예상되지만 향후 수십년 간 심각한 고갈이 일어날 수 있다. 예를 들면, 극지방의 예외적으로 추운 겨울은 극지방의 오존 고갈을 일으킬 수 있다. 성층권으로의 많은 양의 황화가스 방출(즉 화산 폭발에서 오는)은, sulfates와 인간이 방출하는 chlorine과 bromine이 관련된 계속된 화학반응을 통하여 심각한 오존 손실을 가져올 수 있다. 그러한 화산폭발이 향후 수년 이내에 일어난다면, 그것은 성층권 chlorine 양이 최고치에 달함에 따라 특히 해를 많이 끼칠 것이다.

④ 오존 고갈 잠재성과 CFC 대체물질이 환경에 미치는 영향에 대한 과학적 정보 제공

CFC와 halon이 단계적으로 없어짐에 따라 광범위한 대체물질 분자들이 나타났다. 이런 각종 기체의 물리적, 화학적 특성을 완전히 이해함으로써 과학자들은 각 기체의 오존층에 대한 영향, 각 성분의 독성과 지구 환경 내에서의 운명, 그리고 그것이 기후변화에 미칠 잠재적 영향을 비교하는데 필요한 정보를 얻을 수 있는데, 그렇게 함으로써 이런 대체물질 중 어느 것을 선택해야 할 것인가에 대한 발달된 과학적 근거를 제공한다. 이 정보는 대체물질 개발에 있어서 경제적인 손실을 피할 수 있게 한다.

⑤ UV 추세 파악

지표면 자외선에 영향을 미치는 오존 및 다른 요소(즉 구름)의 높은 수준의 측정, 오존 고갈과 지표면 자외선 추세 간의 관계에 영향을 미치는 물리적 과정을 이해

하는 데 필요하다. 단지 이러한 방법으로만 기선이 설정될 수 있고, 이 기선으로 부터의 편차에 영향을 미치는 변수를 정의할 수 있다 또한 더 많이 영향을 받는 지역에서 오존 추세에 대한 반응을 정의하는 높은 수준의 자외선 측정이 필요하다.

⑥ 오존 고갈에의 methyl bromide의 역할을 정량화하고 대체물질 개발

methyl bromide는 자연적 그리고 인간기원의 심각한 오존파괴 유발 기체이다. methyl bromide의 기원 및 제거는 이 물질의 현재 및 장래의 오존 고갈 잠재성을 보다 정확하게 평가하기 위해 더욱 잘 정량화되어야 한다 농업에서 이미 광범위하게 methyl bromide가 사용된 점에 비추어 보면, methyl bromide가 단계적으로 폐기됨에 따라 이 화학물질의 여러 대체물질이 필요하다

⑦ 성층권 오존과 지표면 기후와의 관계를 이해

성층권 오존이 고갈됨에 따라 성층권은 냉각되고 지구표면도 냉각되는 경향이 있다 정확한 관계는 오존고갈의 수직단면과 간접적 화학 되물림작용에 달려 있다. 과거 및 미래의 지구 기후 시스템의 혼란을 적절히 이해하기 위해서는 이러한 관계가 잘 정량화되어야 한다.

5. 지표면 변화와 육상 및 해양 생태계의 변화

지표면의 인위적 변화는 인간 역사를 통해 일어났다 즉, 많은 땅이 농업, 임업, 댐감 수집, 그리고 도시 및 산업발전을 위해 개간되었다 댐건설, 수로 개설, 대단위 농업 관개시설의 개발, 도시 및 공업용수의 급격한 증가는 많은 지역의 자연적 물 순환을 바꾸는 등 광대한 변화가 이루어졌다

지표면과 생태계의 변화는 최근 수십년 간 뚜렷이 일어났다. 많은 지역에서 변화율이 가속됨에 따라 변화의 정도와 영향 또한 가속되고 있다. 그 어느 때보다 지표면과 생태계 변화의 폭넓은 관점이 필요하다 다행히도 이런 요소들에 관한 정보를 얻고 관리하는 새로운 기술이 발달되었다 지표면 변화의 역학과 결과를 측정하고 이해하는 과학과 새로운 기술이 지난 10년간 급격히 발달되었다 LANDSAT 데이터를 이용한 적도와 온대지역에 대한 연구에 의해 벌목율이 기록될 수 있고 재생과 2차적 성장 또한 측정될 수 있다 인공위성 자료는 지상으로 부터의 측정 및 항공측정과 함께 지표면 변화가 어떤 지역의 생물 다양성, 수리학적 과정, 미래 자원 생산과 이용에 대한 잠재력에 대한 영향을 알기 위해 사용될 수 있다. 넓은 지역의 지표면과 육상 활

용에 의한 변화를 측정하는 방법과 연구 결과는 현재 가축이나 임업 제품 생산을 위한 계획을 개발하거나 다목적용 공공토지를 관리하기 위한 상업용으로 사용되고 있다.

지표면 및 관련된 변수에 대한 자료량의 증가는 지표면 변화의 역학 분석을 용이하게 한다. USGCRP가 지원하는 연구는 지표면과 관련된 관례를 등급매기는 여러 방법을 연구하면서 광범위한 지역의 지표면 변화율과 패턴을 조사하였다. 이러한 노력은 일련의 지표면 지역을 설명케 한다 지역 사례 연구는 IGBP와 국제 Human Dimension of Global Environmental Change Programme(HDP)의 핵심인 Land-Use and Land-Cover Change(LUCC) 프로젝트에 참여하는 과학자들에 의해 개발된 공동 규약을 사용하여 여러 지역에서 시작되었다 이런 지역 사례 연구의 비교 방법을 통하여, 각 지역에서의 지표면 변화의 역학 분석은 인간과 자연 과정의 복잡한 상호작용을 이해하는데 더욱 일반적인 발전을 위한 기초가 된다. 다음 10년간 지표면과 육상개발 역학을 리모트 센싱하는 기술에 새로운 큰 발전이 기대되는데, 이는 지표면 변화의 역학을 기록하는데 필요한 자료를 크게 증가시킬 것이다.

토지와 관련된 변화를 더 잘 이해하는 것 이외에 해양에 의해 영향을 받거나 해양에 영향을 미치는 변화가 지구 전체 시스템의 역학을 이해하는데 중요하다. 태양에 의해 따뜻해지고 바람에 의해 움직이는 거대한 해류가 지구의 계절적, 단기적 기후변동에 영향을 미친다 해양은 여러 식물과 동물 공동체의 서식지이고, 해양은 용해된 탄소, 질소, 산소, 그 외 다른 원소를 받아들이거나 내보내고 한다 해양생물은 그러한 원소의 전 지구적 순환에 관여하는데 해양, 대기, 육상에서의 이런 원소의 농도에 영향을 미친다 해양생물과 순환연구는 이런 생화학적 사이클과 생명보존을 위한 그들의 역할을 이해하기 위해 매우 중요하다

해양은 현재 인간활동으로 부터 점점 압력을 많이 받고 있다. 산업 폐기물, 합성 비료, 다른 공해물질은 강을 통해 바다로 흘러드는데, 이것은 생물에 손상을 가하고 해양 생태계의 구성에 급격한 변화를 초래한다 적조 종의 구성이 변화하고 독성 조류의 “적조”가 세계 해안지역에 더욱 빈번하게 나타난다 적도지방에서 여러 생물들을 지탱하는 산호초가 특히 피해가 심하다 어류와 갑각류도 역시 영향을 받으며 해양 산업에도 큰 영향을 끼친다. 새로운 리모트 센싱 능력과 인공위성, 항공기, 선박상의 기기, 부이, 계류를 통하여, USGCRP 지원 연구는 해양생물의 여러 자연적 또는 인위적 지구 환경변화에 대한 반응을 연구하고 있다

인간은 육상 및 해양 생태계에 점점 많은 요구를 하고 있다. 과제는 자연적 또는 인위적 변형의 잠재적 결과와 산업활동이 육지와 해양, 연안 생태계의 구조와 기능에 미치는 영향을 이해하는 것이다. 그러한 이해는 생태계가 제공하는 인간생활의 편의와 안정성을 유지에 필요한 재화와 용역을 유지하는데 필요하다. 인위적 토지변경과 산업화에 의한 잠재적 이득은 그러한 활동으로 인한 생태학적 재화와 용역의 감소 및 손실과 연관된 잠재적 비용과 균형을 이루는 것이 필수불가결하다.

가 지표면 및 육상과 해양 생태계의 변화에 대한 최근 과학적 업적

① 특정 지역에서 장기간의 실험 결과로 집약적 농경으로 인한 토양내 탄소의 손실을 감소하는 영농법, 토양내 탄소 수준을 증가시키고 토양을 더욱 비옥하게 하는데 이용되는 비료교체 같은 농업기술의 변화를 가져왔다.

② Amazon 열대 우림에 대한 인공위성 자료를 이용한 새로운 분석에 의하면 벌목된 지역의 30% 만큼이 2차적 자연갱신의 단계에 있다. 이러한 재생장 시스템은 대기중의 이산화탄소를 위한 잠재적으로 중요한 제거원이다.

③ 남아프리카 사반나에서 일어난 화재의 인공위성 관측은 이 지역에서 산화된 생물량 비율과 공간적 분포에 대한 새로운 정보를 제공하고 있다. 이 연구에 의하면 예전의 화재로 인한 생물체의 손실량의 측정은 너무 높은 것으로 알려졌다.

나 지표면 및 육상-해양 생태계의 변화에 대한 연구계획

① 북 아메리카의 지표면을 분류하고 목록 작성

연방기관들은 LANDSAT 위성자료(100m 보다 작은 해상도를 가진)를 분석하고 1970년 부터 현재까지 북 아메리카와 전 적도 열대지역의 지표면을 분류하고 목록을 만드는데 협조하고 있다. 이러한 노력은 생태계의 기능에 영향을 미치는 변화를 기록하고, 지구 변화 연구계와 정책 수립자에게 벌목과 같은 변화에 대한 정확한 평가를 제공한다. Mexico 정부와 협조하여 Mexico의 일부 지역에서 지표면 변화를 연구하는 프로그램이 개발되고 있다. 이 연구는 10년 단위로 지표면 변화를 분석하는 것을 목표로 하는데 특히 농업용에서 도시용으로 토지 이용의 변경과 삼림에서 농업용으로의 토지 변경과 관련된 것이다. 이 연구는 생산성 변화와 관련된 지식을 향상시킬 것이다.

② 국제 육상개발 및 지표면 변화 연구(LULC) 프로그램의 참여

전 지구적 지표면과 육상개발이 과거에 어떻게 변화하였는지를 파악하고, 현재 지표면의 상태를 평가하기 위한 포괄적 과학 계획이 개발되었다. 지표면을 1 km의 해상도로 파악하는 것을 목표로 한 프로그램은 여러 다른 지역적 및 역사적 관점에서 육상개발에 의한 변화의 주요 인위적 원인과 향후 수십년 간 일어날수 있는 변화의 가능성을 연구하는 것이다. 지표면 변화에 대한 육상 생태계의 차후 반응을 예상하기 위해서는 지표면의 과거 변화와 생태계의 구조 및 기능과의 관계를 이해하는 것이 필요하다.

③ 생태계의 변화 반응과정과 영향 연구

육상 생태계 및 지구변화(TECO)프로그램은 1996년에도 계속될 것이다. 이 프로그램 하의 새로운 연구는 ㉠생물종들의 파악, 생태적 특징과 과정연구, 그리고 생태계가 어떻게 지표면 변화와 관련되어 있는지 이해를 증진시키는데 초점을 두고, ㉡여러 영향의 결과(즉, 물리적 환경과 생태 매개변수가 동시에 변화할 때)를 예측하는 능력을 향상시키는 데 있다.

④ 육상개발과 지표면의 역학을 이해를 위한 국제공동연구

이미 진행중인 연구 위에 설계된 새로운 종합 계획은 위성관측과 연관된 인구통계학적 자료를 사용하여 Amazon 지역에서 일어나고 있는 벌목과정 모델의 개발을 포함한다.

⑤ 지구 환경변화에 대한 해양생물의 반응 연구

자연적 및 인위적 환경변화가 해양생물에 미치는 영향을 연구하기 위한 과학 계획이 개발되었다. 연구는 ㉠육지, 대기, 혹은 용승을 통한 해양 내부로 부터의 영양염류의 유입, ㉡생리적 상태를 변화시키는 기온의 변화, ㉢기초생산력에 영향을 미치거나 세포에 손상을 주는 자외선, ㉣생태계 구조와 기능에 영향을 미치는 해양 순환 및 다른 해양 과정들의 변화에 초점을 둔다.

⑥ 육상개발 변화의 결과로 인한 탄소 플럭스의 변화 추적시스템의 개발

육상개발과 관리변화로 인한 육상 탄소 플럭스를 정량화하기 위한 새로운 연구 프로그램이 시작되었다. 국가 및 지역적 차원에서 생태계의 변이상태, 탄소의 농도, 탄소의 순환, 그리고 그들의 육상개발 변화와의 관계에 대한 정보가 수집되고 있다.

이런 정보는 탄소의 기원 및 제거와 관련된 과학적 이슈를 제기하고 CO₂에 의해 높아진 온실효과에 대한 대응책을 개발하는 과학적 기초를 제공하는데 필요하다.

㉗ 새로운 인공위성 데이터의 연안문제 적용

연안 프로그램은 ㉖해로운 적조를 구별하고 추적하며, ㉘부유 퇴적물의 거동과 연안으로의 유입을 결정하기 위해 연안 및 하구 퇴적물을 추적하고, ㉙오염물질과 적조의 확산 패턴을 결정하기 위해 연안 역학 과정(대양 순환 패턴)을 탐지하고, ㉚연안 어업과 생태계 관리에 적용하는 것에 초점을 둔다

다 지표변화의 원인 분석

지표면은 자연적인 영향으로 인해 변할 수 있다. 마지막 빙하시대 말 빙하가 물러나면서 생긴 기후 변화는 삼림의 연속적 변동을 가져왔다 최근에는, 지하수면 수위의 상승 및 하강을 포함한 배수 시스템의 변화는 농경생활에 급격한 변화를 자주 초래한다 홍수나 가뭄 같은 단시간의 사건까지도 농경생활의 패턴을 변화시킬 수 있다

지표면의 변화는 인간의 토지 이용 방법의 변화에 가장 많이 영향을 받는다 한 예가 도시 확장에서 볼 수 있는데 삼림과 평야가 집, 공장, 상가, 공원, 부속도로, 주차장으로 대체된다. 인위적 지표면 변화의 다른 예는, 나무가 벌목, 목장, 작물, 발전 등 여러가지 이유로 벌목되는 적도 지방의 우림의 벌목에서 볼 수 있다 또 다른 지역에서는 벌목의 주요 이유는 급격히 늘어나는 인구를 위한 난방과 요리를 위해 의해 연료공급용 장작이다.

인간의 토지사용이 지표면에 막대한 영향을 줄 수 있듯이, 인간활동은 종종 해양 생태계와 어업, 삼림, 토양, 다른 천연자원의 생산성에 영향을 미친다 육상개발은 연안지역에서 연안류의 흐름, 영양염류, 부유퇴적물의 흐름에 영향을 주는데 직접적으로 인간과 해양 생태계 환경에 영향을 미친다

6 지구변화 연구의 공통적인 견해

가. 관측 체제

전 지구 시스템의 과학적 이해를 증진하고 그 요소들과 그들간의 상호관계의 깊은 이해를 위해서는 장기적이고 포괄적인 지역 및 지구 관측자료를 수집하고 기록하

여 분석하는 것이 필수적이다 USGCRP는 통합 관측 전략으로 지구 시스템의 여러 다른 면을 측정하고 감시하는 육지, 해양, 항공 및 위성 시스템의 종합 프로그램을 가지고 있다.

포괄적인 지구 관측 체제는 지구 시스템 여러 부분의 영향을 이해하고 예측하는 능력을 향상시키는데, ① 지구의 기온을 조절하고 구름을 생성, 유지, 분산시키며 구름과 태양 복사와의 상호관계를 통제하는 수리학적 및 동적 과정, ② 미량기체 및 에어로졸의 생성, 이동 및 운명과 분산에 일조하는 생지화학적 과정과 분포양상, ③ 물, 열의 수송을 통한 육지 및 해양의 표면과 대기와의 상호작용을 통괄하는 기상 과정, ④ 화산과 빙하 및 해빙을 통한 지구 표면의 모양을 형성하고 변화시키는 지구물리적 과정등의 연구를 수행한다

USGCRP는 지구변화에 중요한 해양 및 육지 변수의 측정 뿐 아니라 대기권 구름, 에어로졸, 수증기, 오존의 관측과 연구를 지원하는 국제적 관측 프로그램의 개발에 참여하고 있다 USGCRP에서 가장 포괄적인 관측 시스템은 우주에서 행하여지는 Earth Observing System(EOS)이 있는데 이는 미국 과학자들이 다른 나라와의 협조에 계획되고 시행된다 1998년에서 2014년 사이에 계획된 일련의 발사에 따라 시행되는 EOS는 최소한 15년 동안 지표면, 생물권, 대기, 해양의 전 지구적 관측을 제공하는 일련의 polar-orbiting과 low-inclination 인공위성으로 구성되어 있다. EOS는 구름, 복사열, 에어로졸, 해양 순환과 해수면, 육지와 해양의 표면 온도, 강수와 습도, 빙하의 이동, 지구표면 고도, 전 지구적 생물 생산성, 대기 화학, 태양 복사등에 관한 연구를 수행한다.

EOS는 많은 부분의 지구 시스템의 역학을 이해하고 예측하는 능력을 크게 향상시킬 것이다 다른 우주 센서는 기상위성, 오존과 다른 대기중의 화학물질을 측정하는 인공위성, 정확하게 해면을 기록하는 인공위성, 지형, 토양 내 습기, 해빙 역학, 대양의 수온을 기록하기 위하여 구름을 통해 지구표면을 관찰하는 레이더 시스템 등이 있다.

우주에서의 관측은 온실 기체, 에어로졸, 오존, 자외선 같은 주요 지구 시스템 변수와 해양-대기-육지 시스템의 상호작용의 주요 변수를 측정하는 지구 표면의 시스템에 의해 보완된다 미국은 광범위한 해양 감시 기기를 운영하기 위해 여러 나라와 협조한다 기관 간의 자외선 감시 네트워크가 상호보완된 자외선 자료를 전국에 공급할

수 있도록 개발되었다 온실 기체와 오존파괴 물질의 대기중의 농도는 현장 및 flask-sampling site의 비공식적 세계 네트워크를 통해 감시된다 미국은 또한 육상과 해양 생태계에 대한 장기적 관찰과 연구를 위한 현장 네트워크 설치 계획을 수립하고 있다 현재의 USGCRP 생태계 관측 시스템은 이 네트워크에 포함시킬 것을 고려 중이다

나 자료 정보처리 체계

지구 변화 연구활동은 지구 변화를 기록, 이해, 모델링 및 평가할 방대한 양의 매우 다양한 자료와 정보를 생산하고 요구한다 USGCRP 내의 자료 및 정보 관리 노력의 주요 관점은 Global Change Data and Information System(GCDIS)의 개발이다. GCDIS의 개발은 Federal Geographic Data Committee와 National Information Infrastructure, 특히 Government Information Locator Service를 포함한 미국 정부 내 관련 활동과의 협조하에 이루어진다. GCDIS는 지구 변화 데이터와 정보 관리 프로그램의 하부구조를 제공한다 GCDIS는, 공동기준과 접근 방법, 기술공유, 자료정책 협력에 의한 상호 사용할 수 있는 개개의 기관 시스템으로 구성된다 GCDIS의 기능은 각 자료와 정보의 우선순위를 정하고, 그런 세트를 발굴하고 개발하며 이러한 자료와 정보 및 관련 서비스를 GCDIS에 통합하는 것이다 USGCRP는 최근 U S Global Change Data and Information System Implementation Plan을 발표하였다

GCDIS는 또한 기후 변동성을 평가하고 지구변화 탐지에 중요한 수많은 장기간 과거 자료를 포함하고 있다 이같은 자료는 전 세계의 역사적 해양 기상관측, 상층대기 관측, 기온 및 강수의 세계 및 지역적 변화, 해양 관측, 에어로졸과 오존을 포함한 대기중의 희유성분에 대한 기초연구를 포함한다 예를 들면 Landsat의 과거 자료는 전 지구적 지표면 변화 연구에 중요하다

GCDIS의 한 요소인 Earth Observing System Data and Information System(EOSDIS)은 EOS 강령 추진을 지원하기 위해 점차적으로 만들어졌다 EOSDIS는 자신의 Distributed Active Archive Center(DAAC)들을 통하여 자료를 공급하기 시작했다 1996년에 예정된 개선으로 다른 지구 변화 자료에 보다 빠르고 더 포괄적인 사용자 서비스와 연결을 제공할 것이다 EOSDIS는 또한 기존의 장기 위성자료(Pathfinder data)를 얻을 수 있는 수단을 제공한다 Atmospheric Radiation

Measurement(ARM) 프로그램 같은 주요 연구 프로그램에 의해 생성된 자료는 GCDIS의 한 부분으로 통합되고 있다

다. 인류활동에 의한 영향의 종합평가를 위한 기술 연구

지구변화의 역학에 대한 지식이 늘어남에 따라, USGCRP는 환경변화와 관련된 기본적인 사회, 행위과정에 대한 연구에 더 중점을 두고 있다 지구변화의 인위적 영향에 대한 미국의 연구는 국제 Human Dimensions of Global Environmental Change Programme(HDP)의 골격하에 다른 나라의 관련된 연구와 협조하고 있다 미국 내에서는 지구 변화의 경제적, 인구 통계학적, 사회적, 제도적, 지리적, 그리고 인간건강과 관련된 면을 연구하고 있다 인간활동이 자연체계에 영향을 미치는 과정과 인간이 변화하는 자연조건에 대응하는 방법이 주된 관심사이다. 인간과 환경의 상호작용의 가장 중요한 형태 중에는 육지 표면의 변형, 인간의 토지이용과 지표면을 또한 변화시키는 자연적 현상과의 상호작용의 산물이다

인간과 자연 시스템이 서로 상호작용하는 복잡한 방법에 대해 이해를 제공하는 것 이외에 USGCRP 연구는 지구변화에 대해 생각하는 데 있어서 정책결정자를 도와주는 새로운 도구와 방법을 개발하였다 여러 프로그램이 지구 변화의 종합평가를 위한 방법과 모델의 개발과 사용을 지원하고 있다 종합평가는 지구의 물리적, 생물학적, 인간 시스템 간의 복잡한 상호작용을 조사하는 새로운 방법이다 통합평가는, 한 시스템의 변화가 다른 시스템에 미치는 영향을 추산할 수 있도록 정량적 모델과 다른 여러 시스템의 표현과의 효과적 연결을 포함한다 변화의 역학에 대해 중요한 정보를 제공하는 것 이외에 통합평가는 국내 및 국제적으로 정부와 민간부문 분야 정책 결정자에게 서로 다른 대안들의 잠재적 결과를 평가하는 데 필요한 틀을 제공한다. 연구가 초점을 두고 있는 주제 중에는 물리학적, 생물학적, 사회경제적 시스템을 연결하는 모델링 접근방법의 개발, 통합 시스템에서의 불확실성과 위협에 대한 대처 등이 있다

인류활동에 의한 환경변화에 관한 연구는 환경정책과 다른 종류의 결정의 입안, 실행, 평가에 필요한 절차, 방법적 도구, 형식적 모델에 초점을 두고 있다. 연구가 초점을 두고 있는 방법론 문제는 정책결정에 있어서 전문가 판단의 사용, 환경자원의 경제적 가치, 환경질의 지표, 사례연구로부터 일반적 관계의 추출 등이다. 연구계획은

또한 문제점을 발견하고 반응을 대략 파악하여 실행하고 평가하는 과정을 조사하는 것이다 이 분야에 해당하는 연구는 기술혁신 연구와 국제적 환경 협상의 확산과 과정이다.

라. 지구변화 교육과 홍보

USGCRP의 중요한 목표는 지구 시스템의 상태와 발생할 가능성이 있는 변화에 대한 지식을 향상시키는 것이다 이러한 목표를 달성하기 위하여 USGCRP는 K-12 교육자를 위한 교육 및 교육자료 개발 뿐 아니라 학부, 대학원 및 박사후 과정 연구를 통하여 장래 과학자의 훈련을 돕고 있다 USGCRP는 또한 지구 환경문제에 대한 과학적 정보를 제공하기 위한 공공교육 노력을 후원한다 재래식 교육방식은 멀티미디어 통신과 지구변화 과학의 복잡한 학제적 성격을 파악하는데 초점을 두도록 확장되었다

지구변화 교육과 통신에 있어서 기관간의 협조의 가장 중요한 기능은 사회와 사회의 지구 시스템 상호작용에 대한 지식을 늘리는 과학적 연구에 있어서의 진전을 일반인에게 알리고 교육하는 활동을 증진하는 것이다 이러한 목적을 성취하기 위해 사용되는 구체적인 전략은, 지역에 초점을 둔 프로그램을 통해 공식적 또는 비공식적 교육활동에 교사들과 일반 대중을 계속 관련시키고, 직접 컴퓨터 또는 실험 활동을 통해 상호 작용적 교육방법을 강조하고, 차세대 과학자를 양성하기 위해 학부와 대학원 교육에 계속해서 보조금을 지급하는 것이다 교육 프로그램은 또한 새로운 지식을 교환하기 위해 초고속 통신기술 사용을 증진하고 지구 변화에 대한 연방정부의 자료와 정보의 확산을 장려한다

또한 USGCRP는 지구변화 효과를 피하거나 완화하고 혹은 적응하는데 유용한 미국의 과학연구 정보를 외국정부, 기업, 기관, 외국인에게 보급하기 위해 1990년 Global Change Research Act에 의해 Global Change Research Information Office(GCRIO)를 설립하였다 GCRIO는 또한 광범위한 정보를 미국 내의 민간인과 기관에 제공하고 있다.

7. 국제 협력

가. 국제 연구 프로그램

국제 과학기구는 WCRP, IGBP, HDP 등 3개의 대형 지구변화 공동연구 프로그램을 조직하였다 이들과 다른 국제 프로그램은 광범위한 다자간 또는 양자간 조직과

협조를 통하여 과학자들 사이, 기관 간에, 정부 간 등 여러 계층별로 협력되고 있다 국제과학협의회(ICSU)는 많은 주요 국제 프로그램을 위한 과학적 계획을 위해 적극적인 노력을 펼치고 있다. 미국은 ICSU의 이런 활동의 자금지원에 참여하고 미국 과학자들과 기관들은 ICSU 및 관련된 위원회에 참여하거나 정기적으로 교류한다 미국 기관들은 또한 International Group of Funding Agencies for Global Change Research(IGFA) 같은 비공식 국제협력 단체를 통해 다른 기관들과 일하고 있다 IGFA는 최근 지구변화 연구를 위한 국제적 모금을 마쳤는데, 이는 이런 연구활동 지원에 있어서 미국의 주도적 역할을 확인해 준다

나. 국제적 평가

국제적 평가는 150개국 이상의 수천명의 과학자들의 조사와 최근 발표된 과학문헌의 분석에 관련을 통하여 지구 환경문제에 대한 현재의 과학수준 상태를 기록한다 최근 평가는 IPCC의 과학 평가와 WMO/UNEP를 포함한다

1994년 중반에 IPCC는 기후 시스템의 방사원동력에 초점을 둔 Second Supplementary Report to 1990 IPCC Scientific Assessment를 발표하였다 IPCC는 1995년 후반에 기상 변화에 대한 2번째의 종합평가를 완성할 것으로 예상된다 이 평가는 3개의 실무 그룹에 의해 수행되었다 실무 그룹 I은 영국과 브라질이 공동 의장국인데 인간활동으로 인한 변화를 포함하여 기후 시스템에 대한 과학 상태 평가를 맡고 있다. 실무 그룹 II는 미국과 Zimbabwe가 공동 의장국인데 지구변화의 잠재적 영향과 그에 대한 적응 및 완화 측정 평가를 맡고 있다 실무 그룹 III은 캐나다와 한국이 공동 의장국인데 기후 변화와 몇몇의 방출 시나리오의 경제적 영향을 포함한 공통의 문제를 다루고 있다 많은 미국 과학자들은 이 3개의 실무 그룹에 의해 준비되는 연구에 주요 또는 공헌 저자로 일하고 있다

USGCRP는 IPCC 관련된 활동에 필요한 소수의 비서진을 설치했다 이 비서진은 IPCC 활동에 참여하고 있는 미국측의 인원을 총원하고 있는데 특히 실무 그룹 II의 미국 공동의장을 돕는다 USGCRP는 또한 미국 저자들을 돕고 1995년 IPCC 평가를 위한 미국 정부의 평가절차를 조직한다 이 평가절차는 기관, 과학자, 산업계, 기업, 그리고 다른 이해 관련 단체들이 관여하고 있는데 이들 모두 IPCC와 그 실무 그룹의 일을 평가하고 조언하도록 되어 있다

8 최근의 USGCRP 연구 결과의 핵심 내용 분석

가. 단기간(seasonal-to-interannual)의 기후 변화

(1) 단기간의 기후변동의 주요 변화를 예측

이미 완료된 TOGA 프로그램은 미국에서의 온도 이변과 강수량 이변을 포함한 예보 능력에 영향을 끼치는 해양에 관한 근본적인 지식을 증진하였다

USGCRP의 첫번째 프로젝트 중 하나인 TOGA(Tropical Ocean-Global Atmosphere) 프로그램은 1995년 성공적으로 완료되었다 10년간의 국제적 연구 노력인 TOGA는 열대 태평양과 전 지구 대기를 연결하는 과정에 대한 근본적인 새로운 지식을 생산하였으며, 궁극적으로 엘 니뇨 현상의 성공적인 예측 능력을 가져 왔다 그 프로그램은 열대 태평양의 상태를 감시하기 위하여, 엘 니뇨 현상 진화의 실시간 자료를 제공하는 열대 태평양 관측 시스템(Pacific Observing System)을 개발하고 구현하였다 이 관측 시스템의 중심이 되는 것은 TAO(Tropical Atmosphere Ocean) array인데, 이는 해수 표면 온도, 해면 바람, 상층 해양의 열 구조를 관측하는 열대 태평양에 퍼져 있는 68개의 계류형 부이로 구성되어 있다 TOGA는 또한 열대 서태평양에서의 대기-해양 상호작용 과정을 정량화하기 위해 1992-1993년 동안 전례없는 국제 현장관측 캠페인(TOGA COARE)을 실시하였다 그 결과 얻어진 자료들은 해양과 대기간의 연계의 이해와 그런 연계의 모델에서의 표현을 개선하는데 사용하기 위해 분석중이다 TOGA는 여러 개의 해양-대기 모델을 개발하였는데, 그 중 하나는 1986-1987년 및 1991-1992년의 엘 니뇨를 적어도 1년 전에 성공적으로 예보하였다 다른 모델은 1992-1993년 동안의 엘 니뇨 현상의 존속을 성공적으로 예보하였다 마침내, TOGA 연구자들은 여러 열대지방 국가(예를 들어, 브라질과 페루)들에게 실험적인 예보 결과를 배포하기 시작하였는데, 이는 농업 생산을 유지하는데 있어서 정부관리 및 농부들에 의해 성공적으로 사용되고 있다

(2) 엘 니뇨 예보의 예측기술 확장

해양학자와 기상학자로 구성된 연구팀은 최근 엘 니뇨 예보를 위한 유용한 예측 기술을 확장하였다 해양-기상 자료들은, 이전의 예보 과정에 비하여 1970년대와 1980년대의 엘 니뇨의 예보체계의 근본적인 개선을 가져왔다 그 개선은 모델 예측의

초기화에서 대기-해양 상호작용의 저주파 특성을 명시적으로 고려하였기 때문이다 그 결과 엘 니뇨는 이전에 생각했던 것 보다는 예측가능성이 향상되었다. 초기화 과정의 한 부분으로서의 표층 바람 관측치의 자료들은 ENSO 예측의 “spring barrier”를 제거하였다.

(3) 미국의 MULTI-SEASONAL 기상예보

USGCRP로 부터의 자금 지원에 의해 연방정부는 1995년 계절별 평균 기온과 강수량의 예보를 하기 시작했다 이런 능력은 해양과 대기의 개선된 관측 시스템, 열대 해양-대기의 상호작용에 대한 개선된 물리적 이해, 기상 모델의 괄목할 만한 기법의 습득을 가져온 USGCRP의 연구 노력을 통한 진보에 근거한다. 지난 10년간 이용 되어 온 one-season 예보체계를 대체하는 이 새로운 시스템은 예보기간이 사실상 1년 까지도 가능하며, 예보를 통계학적 모델과 물리적 해양-기상 순환 모델의 혼합에 근거 하게 한다. USGCRP의 최신 산물 중의 하나인 이런 예보는, 대학 및 정부 연구기관 간의 협력 및 협동의 중요성 뿐 아니라 기술을 파악하고 이론으로 부터 실제로 이전 하는 데 있어서의 효율성을 입증하였다

(4) 단기간 기후변동의 주요 변화를 예측하는 데 관련된 사건들

① 엘 니뇨와 관련된 1993년 및 1995년의 중서부 홍수와 1995년의 서해안 폭풍 1988년의 미국 동부 및 중부의 가뭄 그리고 1993년과 1995년의 북미주 전체의 홍수의 분석에 의하면, 열대 태평양의 발달된 엘 니뇨 조건은 이상 제트류가 북태평양을 거쳐 북아메리카로 불어닥치는 현상이 일어났다 1993년의 경우, 보통 보다 넓은 제트 기류와 폭풍 기류가 평상시 보다 상당히 남쪽으로 이동되었다. 6월 동안의 바람 흐름은 서 태평양과 미국 동부 지역에서 서쪽으로 부터 동쪽으로의 흐름으로 특성 지을 수 있으며, 강력한 태풍 활동이 직접 중서부 지방으로 전파되는 통로를 제공 하였다. 대기중 수분함량 분석은, 멕시코 만을 가로질러 미국 동부로 흐르는 강력한 고수분 기류를 보였다 이 평상시 보다 낮은 위도의 폭풍기류는 멕시코 만의 고수분 기류의 길을 터서 미시시피 강 북부 분지지역으로 이동되어 비가 내리게 한다 국지적인 토양 내의 수분 및 증발의 증가는 강우를 증가시키고 그러한 조건을 영속화하고 장기화 하는 것 같다

결과적으로, 이런 효과들은 그런 반응을 증폭시키고 지속하게 하는 피드백으로 보아야 할 것이며, 대기의 관점에서는 비정상적인 열대 태평양의 해면 온도는 그런 양상에의 현저한(그러나 유일하지는 않은) 외부적 요인이다. 1995년에 발생한 캘리포니아와 중서부 지방의 홍수의 예비적 분석은 막대한 강우를 가져오는 cyclone track을 형성하는 대기 순환 패턴의 움직임에 대한 엘 니뇨의 영향을 보여준다

② 엘 니뇨를 감시와 질병의 예상

최근 온도 및 강수 패턴의 변화와 관련된 전염병의 전 세계적인 재출현이 있어 왔다 1993년 건조한 미국 남서부에 virulent rodent-borne hantavirus가 나타났다 6년간의 가뭄 뒤의 폭우는 그런 바이러스의 자연 숙주의 엄청난 증가를 가져왔으며, 이것이 그런 바이러스가 인간에게 감염되는 기회를 증가시킨 것으로 생각된다 기이한 콜레라 변종도 그 해 아시아에 나타났는데, 이 기간 동안에 콜레라 바이러스에게 은신처를 제공하고 수를 증가시킨 연안의 비정상적인 조류의 번성이 있었다. 이런 질병들과 말라리아 같은 다른 질병들은, 엘 니뇨 현상 동안 발생하는 것 같은 비정상적 기후 패턴에 기인한 폭우와 연관되어 있음을 여러 증거들은 시사한다.

③ 증가되는 산호 표백현상과 해양의 온난화

산호초 생태계는 상승하는 온도, 해면, 토양침식, 그리고 오물 및 비료에 의한 과도한 영양염류에 가장 영향을 받기 쉽다 따라서 산호초 상태의 감시는 환경변화의 아주 민감한 척도를 제공한다. 1983년 부터 1991년 사이에 모든 주요 산호초 지역에서 심각한 표백 현상이 보고되었다. 산호초의 표백현상은 산호초에 서식하는 symbiotic zooxanthellae algae의 감소에 의해 일어난다 이 조류는 산호에 대부분의 탄소와, 석회암을 침착시키는 능력, 그리고 색깔을 제공한다 zooxanthellae가 산호초를 떠나면 산호초는 죽는다. 조사에 의하면, 이런 현상은 1년 중 해양의 온도가 가장 높은 몇개월 간 1°C 이상의 고온현상이 나타나는 기간 후에 나타남을 보였다. 이런 hot spot들은 그간 파악되어 왔는데, 위성 데이터를 이용하여 실시간으로 추적할 수 있게 되었다 비록 그 algae는 온도 편차가 없어지면서 다시 돌아오나, 이례적인 온난화가 지속되는 동안 많은 산호초는 죽는다 해양의 온난화에 민감한 산호초는 계속되는 온실가스에 의한 온난화의 지표자로서 주목받고 있다

④ 엘 니뇨의 영향의 지속

엘 니뇨 현상은 일반적으로 최고 2년까지 지속되는 아주 심각한 국지적 영향을 끼쳐왔다. 그러나 엘 니뇨의 장기간의 영향은 대기를 통해 전달되고 멀리 떨어진 지역의 강우 이상을 유발하는 변화에만 국한된다고 믿어져 왔다. 관측과 모델링 연구로부터의 새로운 증거는, 1982-1983년 동안에 미국 해안의 적도 천해파에 의해 생성된 전 지구 스케일의 해류는 북태평양을 횡단하였고, 약 10년 후에는 보통은 일본의 남쪽 해안으로 부터 동쪽의 중위도 태평양으로 막대한 열을 전달하는 쿠로시오 해류의 길을 북쪽으로 이동시켰다. 이런 현상은 심각한 엘 니뇨 현상이 일어나는 동안 열대에서 관측되는 것과 같은 진폭과 범위를 가진 해면 온도의 상승을 북서 태평양의 고위도에도 가져 왔다. 지난 10년간 북 아메리카의 기후에 미치는 이런 변화의 영향은 평가되고 있다.

⑤ ENSO와 세계 각국의 농산물 수확량 관계

USGCRP 연구는 엘 니뇨와 전 세계 국가들의 수확량 통계와의 관계를 연구해 왔으며, 33개국의 39종의 경제적으로 중요한 수확량이 동부 적도 태평양 해면 온도와 아주 중요한 상관관계를 보임을 발견했다. coupled dynamical model은 ENSO에 대한 자료를 통해 최고 12개월이나 미리 예측이 가능하므로, 이런 ENSO-수확량 간의 관계는 전 세계의 많은 국가들의 농업 파종 및 작물의 선택에 있어서 ENSO 예보를 이용할 수 있을 것이라는 가능성을 비추어 준다.

⑥ 엘 니뇨 예보의 경제적 가치

실험적인 엘 니뇨 예보가 오늘날의 일기예보처럼 완전히 가동된다면 농업, 임업, 수산업, 수력발전, 보험 부문에 즉각적인 이득이 기대된다. 이는 Peru, Brazil, Australia 같은 나라에서 실제로 이미 증명되었다. 경제적 측면의 연구에 의하면 엘 니뇨는 미국 남동부의 농업부문에 최고 15%의 손해를 발생시킬 수 있음이 지적되었다. 동남부 미국 경제에 있어서 엘 니뇨의 가치는 매년 1억 달러 이상일 것으로 추산된다.

나. 향후 수십년 이상 기간의 기후 변화

(1) 대기중 온실가스와 에어로졸 농도의 변화

① 대기중 이산화탄소의 연간 증가율

지난 5년간 극단적인 탄소함량의 변화가 일어나고 있다. 1960년대와 1970년대 초에는 이산화탄소 농도는 매년 약 1.0 ppmv(part per million by volume)의 비율로 증가하였다. 1980년대 대기중 이산화탄소의 농도 증가율은 평균 약 1.5 ppmv/yr로 이전의 매년 증가 비율의 거의 두배의 비율로 증가하였다(매년 화석연료로 부터의 방출량 5.5 GtC/yr와 biomass로 부터의 방출량 약 1.5 GtC/yr는 대략 2.5와 0.7 ppmv/yr의 증가, 혹은 대략 총 3.2 ppmv/yr의 증가와 동등하다. 1 GtC는 탄소 십억 톤과 같다). 1989년 부터 1993년 까지 평균 약 1.0 ppmv/yr, 때로는 0.5 ppmv/yr 까지 낮아지기도 하는 등 그 증가율은 현저히 감소되었다. 이러한 지속적인 감소는 35년 간의 기록에서 관측된 적이 없었다. 이 기간 동안 실제로는 화석연료 사용으로 인한 전 세계의 CO₂ 방출량은 오히려 약간 증가한 것으로 보아 이러한 감소 현상은 인류 활동에 의한 CO₂ 방출량의 현저한 감소에 의한 것이 아니다. 이러한 이산화탄소의 감소현상은 대양의 증진된 제거기작 혹은 감소된 자연적 기원이 아마도 CO₂ 증가율의 둔화의 이유가 아닌가 생각된다. 과학적 기록의 분석에 의하면 1994년, 1995년에는 CO₂ 증가율이 이전의 수준으로 되돌아갔다는 사실은, 이런 어느 해와 다른 이산화탄소 증가의 감소는 최근의 지구의 기상변화, 특히 대기 기온과 아마도 강수량의 변화에서 기인하는 주로 기상과 관련된 현상임을 시사한다. 기상과 다른 요인들의 탄소 사이클의 역학에 미치는 영향을 이해하기 위한 연구가 진행중이다.

② 일산화탄소 농도의 전세계적 감소와 대류권 산화과정

일산화탄소(CO)는 지구 대기의 산화능력에 있어서 중요한 역할을 하며, 따라서 인간에 의해 생성된 많은 가스 혹은 자연적 미량 가스의 농도에 간접적으로 영향을 끼칠 수도 있다. CO는 기후, 대기 화학, 그리고 오존층에 영향을 끼칠 수도 있다. CO는 대기중에서 메탄과 다른 hydrocarbon의 산화에 의해 생성되며, 자동차, 농업 폐기물, 초원 및 다른 지역의 화재로 부터 대기로 방출된다. 최근의 추정치는, 그러한 인간 활동은 현재 매년 전 지구적 CO 방출량의 반 이상의 원인임을 보여준다. 1980년

대 동안에는 CO의 방출량은 매년 대략 12%의 비율로 증가해 왔다. 그러나, 1988년부터 1992년의 기간 동안에는, 전 지구적 CO의 농도는 매년 약 -2.6%까지 급격히 감소율이 높아지며 감소하기 시작하였다. CO 감소의 가능한 설명으로는, 대기중의 hydroxyl(OH) 농도의 증가, biomass burning으로 부터의 감소된 CO의 방출, 혹은 non-methane hydrocarbon의 산화 감소에 의한 CO 생성량의 감소 등이 있다. 그 이유가 무엇이든지 간에, 대기중의 CO의 총량은 10년 전의 그것보다 적다. CO가 감소하는 계속되는 추세는 대기의 산화과정의 중요한 변화를 의미하는데, 이는 메탄 및 CFC 대체물질이 대기로부터 제거되는 속도에 영향을 끼칠 수 있다.

③ 질소에 대한 산소의 비율을 측정법과 CO₂의 기원

최근의 전 지구적 탄소 사이클의 연구 개발은 아주 정밀하게 대기중의 산소/질소의 비율을 측정하는 능력을 증진시켰다. 이 기술을 이용하여, 대기 중의 산소/질소 비율의 계절적 사이클 동안의 변화량, 반구 간의 변화도(interhemispheric gradient), 그리고 그것의 장기적 추세로부터 탄소의 운동에 관한 새로운 정보를 얻을 수 있다. 예를 들어, 산소/질소 비율의 장기 추세는 전반적인 CO₂ 제거과정을 해양 및 육상 성분으로 세분하는데 사용될 수 있다. 또한, O₂ 감소의 장기적 추세와 반구 간의 변화도는, 지표면의 변화, 육상개발에 기인하는 CO₂ 방출량의 추정치에 한계를 부여하는데 사용될 수도 있다. 이 기술은 대기중의 CO₂의 기원과 대기중의 CO₂의 농도의 증가를 억제하는 해양과 해양의 과정의 역할을 알아내는데 필요한 증진된 이해에 중대한 기여를 할 것이다.

(2) 기후에 미치는 구름과 다른 되물림작용의 영향

① 구름에 의한 태양 복사의 흡수

대기 성분의 변화가 지구의 복사 균형에 미치는 영향에 관한 예측 및 평가는 입사되는 단파장의 태양 에너지가 구름에 의해 흡수되나를 예측하는 대기 복사의 이론적 모델에 근거한다. 지리적으로 다양한 지역에서의 위성, 항공기, 표층에서 측정된 태양의 복사량의 조합에 의한 초기 결과는 구름이 낀 지역에서는 현재의 복사 모델에 의해 예측되는 양 보다 25-40 와트 더 많은 복사량이 흡수됨을 밝혔다. 이런 비정상적인 혹은 증가된 흡수량은 구름 때문이라고 생각된다. 그러나 이런 흡수율을 설명하

는 물리적 메커니즘이 아직 없으며, 이런 관측치의 대표성에 관심이 집중되어 있다 만일 이것이 사실이라면, 이런 설명되지 않은 상이점은 지구의 복사 균형을 이해하는데 있어서 예측치와 관측치 사이의 잠재적인 중요한 갭을 반영한다. 그런 변화가 증가되는 온실 기체에 대한 전 지구적 반응에 영향을 미치는 정도는 아직 불확실하다 그러나 이런 변화는 지구 표면으로 부터 대기로의 에너지 방출의 재분배를 가져올 것이며, 이는 어떻게 현재의 GCM 결과를 관측치와 비교할 것인가 하는 몇몇 오래된 문제를 풀 수 있을 것이다 무인 우주선 및 지상관측을 사용하는 Atmospheric Radiation Program(ARM)은 비정상적인 흡수를 확인하고 그 정도를 측정하기 위해 1995년에 실시하기로 계획되었다 이 실험은 태양 복사량의 흡수를 좀 더 정확히 시뮬레이션 할 수 있는 기존의 이론적 모델을 수정하는 데 필요한 기계적 정보를 제공하는데 기여할 수 있어야 한다

② 고층의 구름과 해양 표층수온의 안정화

Central Equatorial Pacific Experiment(CEPEX)와 TOGA COARE 동안 수집된 관측치들은 열대 태평양의 큰 "warm pool"의 표면 온도를 규제하는 과정에 대한 새로운 통찰력을 제공하였다 고층의 대류에 의해 생기는 광학적으로 두꺼운 구름은 표면 온도의 안정화에 중요한 역할을 하며, 고기상학 및 현대 관측에서 얻어진 것 처럼 표면 온도를 최고 기후치인 약 31°C로 제약하고 있음을 시사한다. 이전에는 주요 안정 요인으로 생각되어 온 해양 표면으로 부터의 증발은 비록 여전히 역할은 수행하나 해양 표면 수온이 역치(threshold value)를 넘어서는 그 역할이 감소하는 것으로 보인다

(3) 적도 태평양의 1차 생산과 해양의 이산화탄소 흡수

Joint Global Ocean Flux Study(JGOFS) 프로그램의 Equatorial Pacific Progress Study(EqPac)은 적도 태평양에서의 용승과 관련된 1차 생산의 역학에 관한 근본적인 새로운 통찰력을 제공하였다 적도 태평양은 대기로부터 방출되는 이산화탄소의 최대의 해양 공급원이며 1차 생산의 최대 50%가 이곳에서 일어난다 영양염류가 많은 지역에서 1차 생산과 chlorophyll 모두 기대치 이하임이 밝혀졌으며, 이런 이상현상을 설명하기 위해 두 가지의 가설이 제안되었다 즉 하나는 동물성 플랑크톤의 포식과 관련된 것이며, 다른 하나는 micronutrient iron의 유입과 관련된 것이다. 봄철에는 식물성 플랑

크톤 생장의 80-90%가 동물성 플랑크톤에 의해 소모되며, cold tongue 조건의 기간동안에는 포식에는 변화가 없으나 1차 생산은 늘어나서 심해로의 증가된 제거과정을 일으킴이 EqPac 연구자들에 의해 밝혀졌다. 이런 변화에서 볼때 먹이사슬은 질산염 보다 암모니아에 의해 영향을 받는다고 볼 수 있다.

(4) 지구의 과거 기후 변화와 미래 기후변화

지구에 대한 장기간의 기록에 의하면, 빙하기(10,000년 이상 전까지) 동안 지구 기후는 여러 급격한 변화로 현재의 기후와 매우 달랐음을 알 수 있다. 지난 기후 역사의 여러 다양한 기록은 지구의 자연적 기후 변화의 이해 향상을 돕는 정보 기반을 제공한다. 기기에 의한 기후 기록은 단지 지난 수 세기 동안의 측정된 자료에 국한된다. 이것은 인간에 의한 기후 변화를 자연의 변동성과 구별하는 방법을 제공하는데 필요한 자료로 이용된다.

① 300만전 전 해면의 높이

Pliocene 중엽(약 300-400만년 전) 동안 전 북반구에 대한 해양 및 육지 기록의 재구성은 해면이 오늘날 보다 최소한 25m 더 높았을 것이라는 사실을 가리킨다. 이 시기는 지구의 역사에 있어서 이산화탄소 농도의 급격한 증가가 있었던 시기 만큼 지구 기온이 따뜻한 시기였다. 이 시기의 분석 및 모델링 연구는 미래 기후 변화의 잠재적 결과에 통찰력을 제공하는데 사용된다. 한 연구는 북쪽 지방의 삼림이 북극해까지 뻗어있던 300만년 전 극지방에서 얼음량의 감소로 오늘날 보다 해면이 약 30m 더 높았고 전 세계 평균 기온도 오늘날 보다 3.5°C 더 높았음을 보인다.

② 중앙 아시아의 퇴적물 기록

해양과 빙하권에서 멀리 떨어진 중앙 아시아 대륙은 지구 기후를 결정하는데 있어서 매우 중요한 역할을 한다. 이 지역은 아시아의 몬순을 포함해 겨울과 여름철에 중요한 기상 패턴이 나타난다. 바이칼호로 부터의 지자기, 방사능, 생물 성분들을 포함한 퇴적층에 나타난 기록에 대한 연구결과는 계절에 따른 환경의 태양 방사력에 대한 반응을 명백히 보여준다. 바이칼 호의 고기상학적 지표는 태양 복사 변화에 대한 직접적인 선형반응보다는 해양과 빙하에서 처럼 복잡한 기후변화 패턴을 보인다. 특

히 해양 산소 동위원소 기록에 따르면 이 지표는 지난 25만년 동안 지구상의 얼음의 부피와 매우 잘 연관된다

③ 과거 북극의 기후변화와 남극의 기후변화

2만년에서 15만년 전까지의 마지막 빙하시기에 걸친 눈 층을 가진 Greenland와 남극의 ice sheet로부터 ice core가 채취되었다. 과거의 기후 변화는 남극보다 Greenland에서 더 급격히 그리고 자주 나타났다. 눈 층에 기록된 여러 변수의 변화를 세어본 결과 단 기간 동안의 온난화 사건이 Greenland에서는 22회, 남극에서는 9회 발견되었다 Greenland의 ice core 기록에서는, 단기간의 온난화 사건은 처음과 끝에 매우 빠른 온냉 전환으로 특징지어진다 남극에서는 관련된 단기간의 온난화 사건은 초기의 느린 온난화와 말기의 느린 냉각화로 특징지어진다 이 조사의 예비결과는 Greenland의 온난화 사건이 2000년 이상 지속될 때 마다 온난화 사건이 남극에서 일어났음을 보인다 이런 증거는 대륙 ice sheet(예를 들어 북미의)의 부분 용해와 대양 순환의 변화는 최소한 부분적으로 남북 극지방 사이의 기후적 통신과 관련있음을 시사한다 지구의 마지막 빙하기 대부분 동안 North Atlantic Deep Water(NADW) 생성이 느려지거나 거의 없었으며, 또한 북유럽을 따뜻하게 하는 Gulf Stream의 이송을 중단시켰다는 증거가 있다 이 추운 기간 동안 NADW 생산의 재개는 Greenland의 ice core에 기록된 22회의 온난화 사건 동안 급격한 온난화의 원인으로 시사된다

마지막 빙하시대의 마지막 단계는 일련의 빙하 기후로의 갑작스런 회귀로 특징지어지는데, 이 중 가장 잘 알려진 것은 11000년에서 10000년 전까지 계속된 Younger Dryas 사건이다. Greenland ice core의 산소 방사성 동위원소 자료는 단지 수 십년 만에 기온이 7°C에서 10°C까지 상승하였고 이 core의 먼지의 농도와 적설률은 더 빠른 변이를 보인다 방사성 동위원소의 비율에 영향을 미칠 수 있는 여러 복잡한 과정을 고려한 일반 순환 모델이 그 비율의 측정된 변이를 재구성하는데 사용되었다 모델 결과에 의하면, 그런 변화는 북대서양의 thermohaline circulation 변화 만으로는 설명할 수 없고 수많은 moisture source가 Greenland의 적설량에 기여하는 것으로 시사된다. 또한 같은 기간 동안 남반구의 기후변화 증거는, 북대서양 지역 단독보다 훨씬 넓은 지역의 기후변화를 항상 고려해야 함을 시사한다

Greenland의 ice core 표본에서 측정된 sulfate 농도는, 지난 2천년 기간 일어난 화산활동에 비해 3배나 많은 화산 사건이 기원전 5000년 부터 7000년 사이에 일어났음을 시사한다 또한 이러한 분출은 역사적으로 알려진 가장 큰 분출보다 5배나 많은 sulfate의 농도를 생산한 것 같다 이런 결과는 deglaciation 이후 2000년 간 극지방 주위에서 화산활동이 증가하였음을 시사한다 이러한 발견은 deglaciation 이후의 지각 stress의 방출에 magma chamber가 반응한다는 것과 이것은 더욱 폭발적인 화산분출을 유인한다는 주장을 뒷받침해 준다 이러한 영향의 전체적인 정도와 기간은 아직 불확실하다

Great Basin의 paleo-vegetation 및 pluvial lake(강우과 runoff에 의해 채워지는 호수)의 성쇠는 수천년 전에는 기후가 훨씬 습하였고 지난 천년 간 매우 변동이 심했음을 가리킨다 이런 결과는 과거 기록에서 발견되는 만큼의 기후변동이 현대에는 없는 것이 이변임을 암시한다. Arizona나 Utah에서의 국지적인 옛날 홍수기록은, 큰 홍수가 간간히 일어났으며 이는 차고 습한 기후와 빈번한 엘 니뇨 episode 기간과 일치함을 보인다

(5) 미래의 기후변화 예측의 개선

① 기후 모델의 에어로졸의 냉각효과 예측

지난 20년 간 기후 모델은 온실 기체의 농도 증가로 인해 지구의 평균 기온이 상승할 것이라고 예측했다 지구 관측은 지난 세기 이래의 0.5℃ 상승은 모델 예상치의 약 반에 해당된다고 가리킨다 최근 연구에 의하면 대기중의 에어로졸의 농도 증가는 온실 기체의 온기효과를 상쇄할 수 있음을 암시한다 에어로졸 농도의 증가는 대개 이산화황, hydrocarbon의 연소관련 방출의 결과나 화석연료 사용과 biomass 연소에 의한 매연이다 이러한 에어로졸 효과를 포함한 더 새로운 기후 모델은 지구 기온에 에어로졸 농도 냉각효과를 가한다고 예상한다 에어로졸 냉각효과와 온실효과를 종합해 볼 때 합쳐진 변화의 크기와 지리적 패턴은 관찰된 변화 패턴과 상당히 비슷하다 여러 온실 기체의 지구 온난화 potential이 본래 생각보다 더 큰것으로 밝혀졌다

기후변화에 작용하는 각 온실 기체의 영향 정도를 비교하는 지표로써 온실기체의 Global Warming Potential(GWP)이 개발되었다 GWP는 정책결정자가 완화 전략을 평

가하는데 일차적 수단으로서 유용하다. 어떤 기체의 GWP는 “현재 방출된 한 단위 질량의 기체에 의한 현재와 어떤 차후 시간대 간의 cumulative radiative forcing”이라 정의되는데 참고기체(보통 이산화탄소)에 비교되어 표현된다 여러 기체에 대해서 1994년 IPCC에 의해 보고된 GWP는 1992년에 보고된 것 보다 10%에서 30% 만큼 크다. GWP에서 불확실성은 약 35%이다

② 기후 모델은 최근 기후양상을 확인하고 적도에서 증가된 hydrologic cycle의 영향을 확인해 주고 있다

지구 기후의 최근 기록(1970-1992) 동안 예상된 기후 경향과 관찰된 기후 경향과의 놀랄만한 유사성은 해면 수온에 의해서만 forcing되는 대기 일반 순환 모델을 사용하여 입증되었다. 이런 결과는 지구 평균 표면 기온의 상승은 적도 해양 온도 상승에 인한 적도의 hydrological cycle 증가의 결과라는 주장을 확인해 준다. 적도 hydrologic cycle 증가 추세는 대기중의 이산화탄소와 다른 온실 기체 농도의 증가에 의한 온실 온난화 효과의 조기신호로 보인다

③ 해양 eddy의 새로운 매개변수화는 coupled ocean-atmosphere global circulation model의 계산효율을 높인다

기후 모델에 있어서 중규모 eddy(길이가 10km에서 100km)의 정확한 특성적 묘사는 대양 순환을 연구하는데 사용되는 열, 염분, passive tracers를 이동시키는 역할 때문에 중요하다 이것은 이러한 중요한 과정을 해결하기 위해서는 해양 모델이 10km 정도의 해상도를 가져야 한다는 것을 암시한다. 대부분의 coupled GCM은 고해상도에는 엄청난 계산시간이 필요하기 때문에 보통은 수백 km 단위로 된 해양 격자를 사용한다. National Center for Atmospheric Research에 있는 과학자들에 의한 중규모 과정의 새로운 매개변수화는 과도한 계산없이 지구 기후 분포, 극방향으로의 heat flux, 심층수의 형성에 관한 향상된 예측을 할 수 있는 것으로 나타났다 발달된 컴퓨터 시스템은 전 지구적 해양 모델의 해상도를 향상시킨다

전 지구 및 지역 기후에 많은 영향을 미치는 지구적 thermohaline(혹은 conveyer belt) ocean current를 정확히 시뮬레이션하려면 “eddy-resolving” global ocean general circulation model(OGCM)의 개발이 필요하다 지구를 한편이 약 40km인 격자 셀로

나는 고해상도 시뮬레이션은 제한된 계산기 능력과 모델링 능력의 제약 때문에 가능한 것 같지 않다 전 세계 대양 순환의 수십년간의 시뮬레이션을 수행하기 위한 global eddy-resolving model이 최근의 병렬 슈퍼컴퓨터 기술을 이용하여 USGCRP 과학자들에 의해 지금 개발되었다. 이 모델들은 현재 수 세기 후의 기후 변화를 더욱 정확하게 예측하기 위해 최적화된 최신의 정교한 대기 GCM에 연결되고 있다.

중요한 강한 해류와 eddy, 그리고 해안선과 수심의 적절한 표현을 포함한 전 지구적 3차원 해양 순환의 매우 현실적인 수치 모델이 해양에 대한 물리적 이해를 향상시키고 좀 더 정확한 기후변화를 예측 가능케 하기 위해 개발되었다. 모델 출력은 현장관측 및 인공위성 관측과 비교되었는데 실제 측정된 것과 매우 잘 일치하였다 TOPEX POSEIDON satellite altimeter에 의해 관찰된 표층 고도 변이와 예측된 것과의 일치는 특히 인상적이다 모델 출력이 더 많은 분석과 과학적 사용을 위해 전 세계 30개 이상의 연구그룹에 배포되었다 해류, height, 온도, 염분의 비디오 애니메이션 또한 개개의 과학자, 교육자 및 그것을 신청한 모든 사람들에게 보내어졌다. 이 모델 개발의 중요성은 Smithsonian Institution으로 부터 “Breakthrough Computational Science”를 위한 국가적 상을 비롯하여 폭넓게 인정받았다 고병렬 컴퓨터에서 계산되는 더 높은 해상도의 모델이 1년 후에 “Science” 카테고리에서 비슷한 Smithsonian 상을 받았다.

대형의 기후 모델 시뮬레이션은 계산에 수백 내지 수천 시간의 CPU 시간을 필요로 하며, 분석과 다른 시뮬레이션 및 관측결과와의 상호비교를 위해 수 기가 바이트의 모델 출력을 만들어낸다 Climate Simulation Laboratory는 특수목적의 기후 시스템 모델링 계산 시설이다. CSL의 목적은, 지구 기후 시스템(지구 기후 시스템은 계절에서 세기 단위의 시간 규모로 대기, 해양, 육지와 cryosphere와, 관련된 생지화학과 생태학으로 정의된다.)의 대규모 및 장기간 시뮬레이션(coupled system과 적절한 모델 성분을 포함한)을 지원하기 위해 높은 수준의 계산과 데이터 저장 시스템을 제공하는 것이다

(6) 사회활동에 의한 기후변화

① 계절의 timing에서 관측된 변화는 온실효과를 나타낼 수 있다.

영국 중부의 매월 평균 온도의 340년 간의 기록(1651-1991)은 연간 온도 사이클의 timing은 1940년 까지 매 세기마다 하루씩 당겨졌다는 첫 증거를 제공하였다 이

결과는 다른 기록에서 확인되었는데 이는 태양 주위의 지구 궤도의 변화의 느린 움직임의 결과로 예상된다 그러나 1940년 이래 영국 중부와 다른 많은 북반구에서 기록된 계절의 timing은 더욱 빨리 이동하는데 이는 현재는 다른 효과가 더 영향을 끼치고 있음을 시사한다. 어떤 지점에서의 기온의 계절적 사이클의 timing은 태양열 및 적외선 열에 의한 지구의 가열과 지구상의 다른 장소로 부터의 열 이동의 상호작용에 기인한다. 계절적 사이클의 timing의 크게 가속화된 변화율은, 겨울철 solar heating을 강화하는 대기중의 온실 기체의 증가된 농도에서 예상될 수 있듯이 지역기후가 radiative mode에 의해 거의 지배받기 때문에 일어난다 예상한대로 남반구에서 계절의 timing을 덜 영향을 받는데 이는 온실기체의 복사 영향, 태양 복사, 그리고 transport mode가 현재 거의 같은 위상이기 때문이다

② 지역적 온난화는 ice shelf의 붕괴를 유도한다

1995년 2월 27일 British Antarctic Survey(BAS)는 전에 James Ross 섬과 Antarctic 반도 사이의 Prince Gustav 운하를 막고 있던 ice shelf가 붕괴되었고 Larsen Ice Shelf 남쪽 멀리에 있던 큰 빙산이 쪼개졌다고 발표했다 BAS 과학자들은 이런 현상의 이유를 1940년대 이래로 지역적 기후의 2.5°C 상승에 그 원인을 두고 있다 기후 모델은 온실기체의 생성과 관련하여 양극에서의 상승된 온난화를 예측하였다

Prince Gustav 해협에 있는 ice shelf는 그것이 붕괴되기 전 약 270 제곱 마일의 크기였다. Larsen ice shelf에서 떨어져 나온 빙산은 대략 크기가 1150 제곱 마일이고 (Rhode Island 크기) 두께는 650 피트이다 BAS 과학자들은 또한 Antarctic 반도의 서부 해안에 있는 Wordie ice shelf 또한 최근 붕괴되었다고 발표하였다. BAS 과학자들은 또한 단기간 내에 이런 ice shelf의 후퇴는 돌이킬 수 없다고 주장한다.

③ 지난 20년간 북반구 snow cover의 감소와 증가된 북반구 표층 온난화

북반구의 모든 3개 대륙 규모 지역의 매년 snow cover의 범위가 지난 20년간 약 10% 감소하였다. 이런, 특히 봄철의 snow cover의 감소는 지구로부터 우주로 방출되는 장파 복사의 양과 표층 albedo를 변화시키고, 대기온도를 한층 증가시키는 positive feedback 효과를 유발한다

④ 수증기의 증가는 기후 온난화와 연관되어 있을 수 있다

Colorado주 Boulder 상공의 저 성층권 내에 수증기가 매우 증가하였는데 이 추세는 모델 예측과 일치한다. Boulder 상공에서의 관측은 인구가 매우 밀집한 북반구 중위도 지역의 성층권을 대표하는 것이다. 9km에서 27km의 고도에서 1981년 부터 1994년 까지 매년 0.34에서 0.84% 증가하였다. 그런 수증기의 증가율은 20-25km 범위에서 최고치를 보이는데 매년 1%의 증가율을 보인다. 20km 이하 범위에서의 수증기 증가는 증가된 대기중의 메탄(메탄은 화학적으로 분해되어 수증기를 생성한다)의 성층권 내의 산화로 부터 예상되는 것보다 크다. 이는 수증기 증가가 지난 수십년 간 관찰된 지구 온도 상승의 결과일 지도 모른다고 말한다. 최근 연구는 또한 수증기 농도는 저 성층권에서 오존을 파괴하는 화학반응의 효력을 결정한다고 지적한다. 따라서 수증기 증가는 오존의 손실에 기여할 수 있다. 이 15년간의 연구는 또한 수증기에 대해서는 인공위성 자료(UARS와 SAGE II 위성)와 기구 자료가 매우 잘 일치하는 것을 보이고 있다.

⑤ 대서양 온도의 변화

중부 북대서양을 횡단하여 행하여진 관측에서 USGCRP의 지원을 받은 해양학자들은 상층 2500m에서 특이한 온난화를 발견하였으며, 1957년에서 1981년 까지의 관측치와 비교하였다. 이 횡단은 또한 Columbus의 신세계로의 첫 항로와 비슷하다. 이런 온난화는 해양에서 큰 규모 변화의 첫번째 증거이나 대서양에서 대규모의 더 따뜻한 물의 이동을 의미할 수도 있다. 북대서양에서의 또 다른 repeat ocean section은 1962년과 1991년 사이에 주목할 만한 냉각을 보인 것은 특이하다. 대서양에서의 이러한 가능성을 조사하기 위해 WOCE의 일환으로 1996년-1997년 동안 광범위한 일련의 항해가 계획되어 있다.

(7) 기후변화에 의한 잠재적 결과

① 주요한 인류의 건강 영향은 변화하는 기후와 연관이 있는 것 같다

질병의 패턴 및 영향은 기온, 강수량, 그리고 극단적인 기상현상과 연관이 있음이 보고되었다. 건강에의 잠재적인 영향은 heat stress와 연관된 것 뿐 아니라 모기나 쥐 같은 것에 의해 옮겨지는 병원균 매개체에 의한 질병의 증가도 포함한다. 장기간의

많은 강우가 병원균 매개체에 의한 질병을 증가시킨다는 증거는 1974년 남부 Africa 에서의 West Nile fever의 전염병, 1973년 인도에서의 뇌염의 발생, 1983년 Ecuador, Peru, Bolivia에서의 말라리아의 주요 전염 사실을 포함한다

② 해면상승은 조간대 습지의 생태계를 위협함이 밝혀졌다.

Louisiana 주에서의 연구는, 조간대 습지의 퇴보는 해면상승과 연관된 식물들의 water-logging stress에 기인함을 보였다. 잦은 범람에 의한 식물들의 사멸은 습지의 감소와 연못 형성의 감소를 가져왔다. Gulf 만 해안을 따라 염분 stress는 더욱 잦은 범람을 가져오곤 했다. 범람과 염분에 대한 baldcypress의 내성의 뚜렷한 유전적 변이는 해안지역의 회복 프로젝트에 적절히 염분에 내성을 가진 baldcypress를 이용할 수 있음을 가리킨다. 그러나 영구적 범람은 fruittree leafroller insect pest에 의해 잎이 떨어지는 것에 대해 baldcypress로 하여금 더욱 취약하게 한다. 남 Louisiana의 baldcypress가 주종을 이루는 50 에이커는 1993년 이 해충에 의해 거의 완전히 잎이 떨어졌다. 영구 범람 숲이 늘어남에 따라 잎이 떨어지는 지역은 점차 늘어날 것임이 전망된다. 대기 중의 이산화탄소의 증가는 조류(algae)와 다른 식물의 성장을 증진시키며, 이는 Gulf 만을 연안지역의 자연군락을 변화시킬 수 있다.

③ 고산 초원에서의 기후 온난화 실험에서 sagebrush는 관목을 대체하였다.

산지 초원의 식물의 기후 온난화에의 반응을 보기 위해 계획된 Rocky 산맥 초원에서의 실험적으로 가열된 상황에서, 관목은 더 습한 서식지에서 증가한 반면 건조한 서식지에서는 above-ground biomass of sagebrush가 증가하였다. 다른 것들과 함께 이 결과는 산업화 전 수준의 2배인 CO₂의 농도를 가지고 있는 대기에서 예상되는 상승된 온난화가 고산 초원 서식지역의 주종 식물을 바꿀 수 있음을 시사한다. 이러한 발견은, 기후 온난화 동안 관목의 경쟁력이 향상되고 sagebrush 성장도 현재 고산 초원에 많이 있는 meadow forb를 대신해서 증가하고 elongation rate도 증가하였다. 지난 10만년 간의 지구역사의 화분 기록은 또한 기후 온난화 시기 동안 sagebrush의 증가시기를 보이는데, 이는 현재의 연구결과와 일치한다.

④ 해양 온난화에 의한 남 California의 플랑크톤의 감소

남 California 해안을 따라 43년간(1951-1993)의 관측에 근거한 최근의 연구는 이 기간 동안 큰 동물성 플랑크톤의 biomass가 80%나 줄어들었음을 가리킨다. 이런 감소는 이 지역 해양의 표층 수온이 상승(어떤 지역에서는 1.5°C)한 것과 연계되어 나타나고 있는데, 온난화가 이런 변화의 이유인 것 같다. 이런 감소는 이 지역의 biotic web의 심각한 붕괴를 나타내는데 이는 큰 동물성 플랑크톤이 먹이사슬의 중요한 부분이고 몇몇 조류와 상업적으로 중요한 어류 떼의 주요 식량이기 때문이다. 표층의 강한 온난화의 결과로 상층 해양의 mixed layer와 해양의 심층부를 구별하는 수직 stratification이 상당히 강해졌다. 결과적으로 용승지역에서 덜 찬(그리고 영양이 풍부한) 물이 위로 운반되어서 대기와 만난다. 물이 덜 위로 이동함에 따라 더 적은 영양분을 포함한 얇은 수층이 빛과 광합성 과정에 노출되어 더 적은 새로운 biomass 생산을 가져와서 궁극적으로 동물성 플랑크톤이 감소하게 된다. 따라서 메커니즘은 용승수 양의 감소보다는 용승한 물이 얇은 층으로 부터 올라오므로 더 따뜻하고 영양분이 적은 것이다. 강한 해양의 stratification에 의한 영양염류의 공급 억제는 연안 지역에만 국한되는 것은 아니다. 향후 40년 동안 지구 온도는 1°C나 2°C 상승하고 stratification이 더 널리 일어나면 어업이나 다른 해양 생물에 영향이 클 수 있다.

⑤ 해양 기후 변화의 연구를 위한 GLOBEC 프로그램

GLOBEC Georges Bank Program은 (i) 어류 및 동물성 플랑크톤 성장의 측정도구로서 세포핵 항원의 증식, (ii) 북대서양 주변의 copepod 수를 측정하기 위한 새로운 종의 지표 개발, (iii) 플랑크톤 생물 분포의 매우 자세한 그림을 제공하는 고주파수중 음향학과 towed video camera의 개발과 같은 연구를 포함한다. coupled 물리-생물학적 모델은 현재 prognostic mode에서 사용되는데, 그것은 풍속 및 풍향, 증가된 가열현상과 이른 water column stratification이 Georges Bank의 군락구조에 어떻게 영향을 미칠 수 있나 하는 분석을 포함한 여러 지역의 기후 변화 시나리오의 실험을 가능케 한다. Gulf Stream과 Scotian Shelf current의 위치 및 강도 변화의 영향이 내년에 시험될 것이다. 이러한 GLOBEC 노력은, Georges Bank에서 과도한 어획이 변화하는 생태계 구조에 미치는 역할에 대한 연구를 포함하여 다른 연안 해양 프로그램과 공동으로 수행되고 있다. 이 프로그램의 결과는 어류량의 변동을 지배하는 요소로서

과도한 어획과 기후 변동성의 상대적 중요성을 평가하는 외에도 최근 어획 중지가 지역 어업사회의 사회-경제적 구조를 어떻게 변화시켰는가 하는 평가를 하는데 사용된다

⑥ boreal forest의 성장을 정지

북부 및 중부 Alaska의 수목한계 부근 나무들의 나이를 4년간 연구한 바에 의하면, 기후 변화에 대한 나무 생장의 반응은 단순하거나 선형적이 아니다. 나무 나이에 성장과 기상대와 borehole 온도 기록에 의하면 1880년대 이래 북쪽 상단의 기후는 약 2°C 정도 상승하였다(전 지구 기후 모델에 의해 예측된 것처럼 주로 가을, 겨울, 봄에). 나무로부터의 기록은 이 세기 중반까지 boreal region이 지난 300년 간 여느 때보다 더 온난했음을 보인다 이런 온난화 현상은 세계의 여느 다른 지역에서 일어난 것보다 빠르는데 이것은 생태적 반응을 연구할 중요한 기회를 제공한다 발견된 사실은, 지난 100년 간 고위도 지역이 온난해질 때 나무의 성장은 예상대로 처음에는 가속화되다가 비록 기온이 계속 상승하였으나 그 후 거의 중지되었다. 예상 외로 최근 수십년 간의 온난화 현상은 빠른 성장을 촉진하는 대신, 습기 손실을 가속화하고 나무들이 해충, 특히 전에는 더 온난한 저위도에만 있었던 해충에 더 피해를 입게 만들므로써 북쪽 지방의 삼림에 압박을 가할 수 있다 1970년대 이래 Alaska 삼림은 bark beetles(느릅나무좀과의 곤충)의 피해를 입었는데 그것은 수백만 에이커의 숲을 황폐화시켰다. 더 온난한 기온은 bark beetle의 번식기간을 단축(예를 들면 2년에서 1년으로)시켜 수를 많이 증가시켰다 해충의 생존은 더 온난한 기온의 득을 본다

⑦ 열대림의 조사는 그것들이 이전보다 훨씬 빠른 속도로 변화하고 있음

1934년 이후 관측된 열대림의 turnover rate은 약 1960년 이후 forest turnover가 뚜렷이 증가하고 있음을 시사한다 이런 증가는 1980년 대에 더욱 가속화되고 있는 것 같다. 가능한 이유로는 증가된 극단적인 기상 현상, 인근의 벌목, 대기중의 이산화탄소의 증가에 의한 늘어난 생산량에 기인한 환경변화인 것 같다. 이런 증가된 turnover rate은 열대의 생물 다양성과 열대 탄소 사이클에 중요한 의미를 지닌다 숲의 빠른 turnover는 climb plant와 gap-dependent 수종이 지배하게 하는데 이들은 증가된 이산화탄소로 부터 가장 큰 혜택을 받는 것으로 보인다. 이들 중 많은 종들은 shade-tolerant species 보다 덜 조밀한 나무를 갖고 있는데 이것은 열대림이 결국은 현재의 탄소의 sink 보다 덜한 sink가 될 수 있음을 시사한다.

- ⑧ 미국 선박에 의한 첫 북극방문으로 북극해는 생각했던 것 이상의 높은 생물 생산성을 가짐을 발견

Joint U S -Canadian Arctic Ocean Section of Arctic System Science(ARCSS)에 의한 예비적 생물학적 관측은, 많은 식물성 플랑크톤과 그 영양분에 의해 증명된 것처럼 북극이 전에 생각했던 것보다 더 생산적인 지역임을 시사한다 hydrographic 관측은 또한 대서양이 북극해 중심부분에 미치는 영향은 역사적 자료에 의해 의문시되었던 것보다 더 크다. 이것이 아마도 온난화 현상의 결과로 일어난 북극해의 주요 변화인지 혹은 기존 자료의 결함에 의한 것인지는 아직 불분명하다 대서양 층(약 200 - 400m)에서 발견된 고온은 또한 Lomonsov Ridge의 Eurasia 쪽에서도 발견되었는데 이 층의 해수는 1991년 그곳에서 관측된 것보다 0.5℃ 더 높다

(8) 기후변화에 대한 사회적 적응대책에 관한 정보

① forestry sector의 통합 모델은 삼림 성장의 증가는 2020년 까지 탄소 방출을 상쇄할 수 있을 것임을 시사한다

기후 변화 시나리오, 생태계 모델, 삼림 분야의 경제모델, carbon accounting model을 연관시키는 통합 모델의 골격이 개발되었다. 초기의 결과는 증가된 이산화탄소와 온도의 상승은 일반적으로 미국에서 net primary productivity와 목재의 성장을 증가시킬 수 있고, 토지 사용의 변화와 목재 가격하락으로 목재사용을 증가시키고, 약 2020년 부터 삼림으로 부터 대기로의 이산화탄소의 예상진입량을 잠재적으로 상쇄할 수 있음을 가리킨다. 이런 모델 조건하에서 net ecosystem productivity 변화는 그것의 soil respiration에 미치는 영향에 관한 이해의 부족으로 불확실하다

② 증가된 CO₂는 몇몇 작물을 대기 오염으로 부터 부분적으로 보호함이 밝혀졌다.

증가된 대기중의 이산화탄소는 최소한 대기오염의 피해로 부터 몇몇의 작물을 보호한다. 콩의 성장과 수확량은 대기 오염물질 O₃에 의해 감소하고 증가된 CO₂에 의해 증가하였다. 예를 들면, 주변의 O₃는 현재 CO₂의 수준에서 O₃이 없을 때에 비하여 17% 정도 수확량을 감소시킨다. 반면에, 증가된 CO₂(현재 수준의 2배까지)는 수확량을 36% 까지 증가시킨다 두 기체를 섞었을 때 CO₂ 첨가는 O₃ 효과로 부터 콩을 부분적으로 보호한다. 그러나 O₃ 농도가 증가함에 따라 일정 수준의 보호를 위해 CO₂

가 더 필요하다. 비슷한 결과가 snap bean과 토마토를 사용한 온실 연구에서 발견되었다. 이런 연구는 이런 기체들의 현재와 장래 농도에서 O₃의 부정적인 영향과 CO₂의 긍정적인 영향 및 상호작용을 평가하는데 필요한 정보를 제공한다.

③ 증가된 대기 중의 이산화탄소는 agro-ecosystem의 ground process에 영향을 미침이 발견되었다

CO₂가 많은 agro-ecosystem에서 식물 뿌리계와 그것들의 rhizosphere에서의 심각한 반응이 관측되었다 통제된 환경, open top chamber, 그리고 free-air CO₂ enrichment system에서의 실험은 일반적으로 증가된 CO₂에 긍정적으로 반응하는 수확물 성장과 개발을 보였다. 탄소를 지하 밑의 biomass에 더 많이 배당하는 것이 관측되었다 뿌리의 길이와 무게 비중이 증가하였고 전체적인 뿌리 구조가 달랐다 CO₂가 많은 공기에서 자라는 야생 목화의 rhizosphere는 변형되었으며, 전체 토양 미생물의 활동과 saprophageous nematode population은 증가하는 것이 관찰되었다. 그러한 변화는 토양내 탄소 저장과 연관되어 있고 식물의 병에 있어서 중요할 수도 있다 soil respiration은 증가된 CO₂의 농도에서 자란 수수와 콩을 위해 향상되었는데, 이는 아마 enhanced rooting을 반영할 것이다.

지하수질은, 더 많고 깊은 뿌리의 증식은 물과 영양분의 보다 효율적인 흡수로 해석될 수 있기 때문에 CO₂의 농도가 더 높은 환경에서 자라는 agro-ecosystem에서 역시 영향을 받을 수도 있다. 뿌리 구조와 기능의 반응은, soil profile 내에서의 탄소 재분배는 물론 rhizosphere population과 활동의 변화, 토양 탄소의 sequestration(포착)과 역학의 잠재적 변화에 대한 즉각적인 의미와, 토양 자체에 대한 가능한 영향에 대한 의미를 제공한다 그러한 현상은 below ground plant competition에 영향을 줄 수 있고 장래 기후에도 매우 중요할 것이다

④ 대체 삼림 관리 형식은 탄소를 저장하고 기후 변화율을 늦추도록 돕는다; 벌목은 온실기체 증가를 가속화할 수 있다

낮은 비용의 삼림관리는, 상당히 많은 양의 대기중의 탄소를 위한 근본적인 sink를 만들 수 있다. 현재 미국의 매년 방출의 10% 만큼 그러한 낮은 비용의 수단으로 포착될 수 있다 대기중의 CO₂의 증가된 농도는 숲의 탄소 배분을 바꿀 것인데, 이는

특히 지하 pool까지 탄소 포착의 증가를 가져온다 농업토양은 또한 침식을 통제하는 것은 물론 탄소를 포착하도록 관리할 수 있다 자연적인 열대림의 농장 및 목장으로의 변경은 3배 만큼 그 토지에서 nitrous oxide(N_2O) 방출을 증가시키는 잠재력이 있다 N_2O 는 향후 100년 간 CO_2 보다 120-130배 큰 단위 질량당 지구 온난화 잠재력을 가진 온실기체이다. N_2O 는 CO_2 보다 훨씬 적게 방출되기 때문에 CO_2 방출의 감소가 있는 경우에는 가장 중요하다

⑤ 기후변화와 메탄 방출의 증가와 쌀 생산의 증가

쌀은 세계의 가장 중요한 곡식중의 하나이다. 그러나 쌀 경작은 또한 두번째로 강력한 대기로 방출되는 메탄의 인간에 의한 source인데 총량의 20%를 차지한다. 신 품종의 쌀을 개발하고 메탄 방출을 줄이는 개선된 쌀 배양 방법을 개발하기 위한 새로운 연구가 진행중이다 대기중의 CO_2 농도의 증가는 주요 쌀 품종의 생산성을 향상시켜서 더 많은 식량을 제공할 것이나 또한 많은 메탄의 방출을 유발할 것이다 관련된 기후변화는 또한 쌀의 주요 해충과 그들의 천적 간의 관계를 변화시켜 잠재적으로 중대한 해충 관리문제를 일으킬 것이다 따라서 기후변화를 가속화시키지 않고 쌀 생산량을 증가시키기 위해서 신품종 쌀과 농작물 관리에 관한 연구가 필요하다

⑥ 보호지대를 설치하면 기상변화로 부터 작물을 보호할 수 있다.

Great Plain의 곡물 수확량을 보호지대의 존재 유무에 따른 함수로 나타내는 모델이 만들어졌다 보호지대는 높아진 온도와 강수량의 감소라는 시나리오 하에서 여러 작물의 수확량을 증가시킬 것임을 그 모델은 보여준다

⑦ 온실기체 방출을 둔화시킬 수 있는 새로운 기술들은 비용면에서 효율적임이 밝혀졌다

landfill에 의해 방출된 메탄으로 만든 연료전지로 전기를 발전시키는 새로운 정화 작용은 깨끗한 에너지 생산의 장점을 이용할 수 있는 적절한 방법으로 평가 발견되었다. 이 과정은 메탄을 CO_2 로 변화하게 하고 사실상 메탄의 GWP를 감소시킨다 또한 biomass로부터 휘발유에 대해 가격 경쟁력이 있는 대체 수송연료(메타놀)를 생산하는 또 다른 유망한 기술이 발견되었다

⑧ 전 세계 농업은 곡물 생산이 바뀔 수 있다면 이전에 예측했던 것 보다 더욱 잘 적응할 수 있다.

농업은 기후변화에 가장 민감한 경제분야이다. 그러나 작물변화, cultivar, tillage와 수확방법, 파종 시기 등을 통해서 점차적으로 변화하는 기후에 농부들이 적응할 수 있다는 많은 증거가 있다 GCM의 2xCO₂ 실험에 의해 시뮬레이션 된 것 같은 기후변화는, 만약 적응을 하지 못한다면 세계적으로 평균 20%에서 30%의 수확량 손실을 가져올 수 있으나, 농부들이 성공적으로 기후변화에 적응하면 이 수확량의 손실 중 대부분 또는 전부를 피할 수 있다 식물 성장에 대한 CO₂의 직접적 영향으로 인한 곡물 수확량의 증가는 곡물 손실을 상쇄시키거나 혹은 수확량 증진에 기여할 것이다 적응은 세계 각기 다른 지역에서 자라는 곡물의 종류에 큰 변화가 있을 것이며 실제적 효과는 지역에 따라 매우 다를 것이다 적응은 또한 어떤 지역에서의 생산을 포기하고 새로운 지역으로 생산을 증가시키는 등을 포함할 것이다 새로운 지역으로 작물 재배가 확장될 때 그 때까지 기후 변화로 압력을 받는 자연 시스템을 더 혼란시킬 수도 있다. 기후변화, 대기권 오존, 산성비, soil degradation, 희소한 신선한 수자원에 대한 증가하는 경쟁 등 여러 압력하에 농업생산을 유지할 수 있는 잠재력을 더 알기 위해 지구 육지 자원, 토질, 기상 및 기후, 수자원에 대한 보다 나은 자료가 필요하다.

9 성층권의 오존 고갈과 증가된 자외선

(1) 성층권의 오존 감소에 관한 새로운 관측정보

① 1994년 동안 미국 중남부 상공에서의 위성에 의해 관측된 오존의 최저 농도

정상 이상의 온도와 지속적인 아열대 제트 기류는 1994년 11월 동안의 미국 중남부 상공의 여느 때와 다른 낮은 오존 농도의 원인일 수도 있다 North Carolina, Georgia, Washington D C.의 육상의 기기들처럼 Meteor-3 위성에 탑재된 TOMA(Total Ozone Mapping Spectrometer)와 위성 장착의 TIROS Operational Vertical Sounder도 낮은 오존 농도를 기록했다 육상에서의 관측은 비록 11월 만큼 농도가 낮지는 않았으나 12월 동안 낮은 농도가 지속되었음을 확인시켜 주었다 지난 겨울 동안, 오존의 농도는 Pinatubo 화산의 폭발 이전의 겨울의 값으로 회복된 것처럼 보였다.

② 1993년 남극대륙 상공에서의 오존 관측은 역사상 최저치를 보였다

Nimbus 7 위성에 장착된 TOMS(Total Ozone Mapping Spectrometer) 기기로 부터의 데이터는 1992년 중반부터 1993년 초반까지 연속적으로 total ozone의 전지구 평균 농도는 전례없이 낮은 값으로 감소하였음을 보였다. 남극 대륙 상공의 오존 구멍은 1993년에 역사상 최저치를 보였다 같은 기간 동안, 자외선의 record level이 남극 대륙의 지상에서 관측되었다 한 관측 지점에서는, 생물체에 가장 해롭다고 믿어지는 스펙트럼의 부분인 UV-B가 1992년의 관측치보다 44%나 높게 기록되었다 1994년의 오존 농도 역시 1993년의 농도 만큼이나 낮게 보고되었다

③ 최장기간 동안의 위성관측 성층권 종단면 오존 데이터 세트가 만들어졌다.

NASA의 SBUV(Solar Backscatter Ultraviolet Radiometer) 및 NOAA의 SBUV/2로부터의 관측결과를 결합하여 역사상 가장 최장기의 위성관측의 오존 데이터 세트가 만들어졌다 통합된 전 지구 데이터 세트는 1978년 부터 1994년의 기간을 cover하며 전 지구의 오존농도 변화의 경향을 알기 위해 사용되고 있다 NOAA-11 기상위성에 장착된 SBUV/2 기기에 의해 얻어진 오존의 수직 분포 데이터 세트는 재처리되었고, 현재판(6판)의 데이터 세트가 가용하다.

④ 광선 레이다, 기구 및 위성 관측은 열대지방 오존의 Pinatubo 화산에 대한 반응을 보인다.

Pinatubo 화산 폭발(1991년 6월) 이전 및 이후에 관측된 열대 오존량에 관한 데이터는, 화산 폭발 다음 해 성층권 하부의 오존이 심각하게 감소하였음을 보였다 1991년 9월 및 1992년 5월-8월 동안 항공기 탑재 광선 레이다 및 balloon ozonesonde로 부터의 오존 관측과 이전에 관측된 sonde and satellite data를 비교해 보면, 이런 변화의 양을 알 수 있다 1991년 9월, 16-28 km 범위의 감소량은 Pinatubo 화산 폭발 이전에 비해 약 33%(29±9 Dobson Units, DU)이었다 1992년 여름에도 비슷한 변화(33±7 DU)가 관측되었다

(2) 대기중의 오존을 고갈시키는 화합물 수준에 관한 최근의 관측결과

① 스페이스 셔틀 데이터는 성층권의 할로겐 농도의 장기적 증가를 보인다

상부 성층권 및 하부 중간권(고도 50km 이상)의 hydrogen chloride(HCl)과 hydrogen fluoride (HF)의 관측이 1992년 3월-4월의 ATLAS-1의 Atmospheric Trace Spectroscopy(ATMOS)에 의해 실시되었으며, 1985년 4월-5월 기간 Spacelab-3에 장착된 ATMOS 기기에 의한 관측치와 비교되었다 이 고도에서는, 성층권의 거의 모든 염소 및 불소 원자는 각기 HCl 또는 HF의 형태로 발견되었는데, 이런 분자들은 성층권의 total burdens of halogens의 좋은 지시자가 되었다. 혼합물 3.44와 1.23 ppbv(parts per billion by volume)이 얻어졌는데, 이는 Spacelab-3 비행으로 부터 각기 37% 및 62%가 증가한 것이다. HCl로 부터 유추된 경향은, 모델로부터 예측된 chlorine loading 증가율 0.13 ppbv/year와 잘 일치한다 이런 일관성은 Pinatubo 화산 폭발이 성층권으로 그다지 많지 않은 양의 chlorine을 뿜어냈다는 이전의 관측을 뒷받침한다 fluorine 증가는 CFCs, HCFCs, 그리고 할로겐 같은 인간이 만들어 낸 source에 의한다고 해석될 수 밖에 없다

② 대기중의 CFC 증가율은 둔화되고 있다

전 지구적 대기 관측은, 오존을 고갈시키는 화학물질인 CFC-11, CFC-12, 그리고 몇몇 할로겐 화합물의 증가율이 둔화되고 있음을 확신시켜 주고 있다 대류권의 total organic chlorine and bromine의 증가율은 지난 수년간 뚜렷하게 둔화되었다 이런 관측치들은 Montreal 의정서 및 그 개정안의 반응으로 취해진 조치가 원하는 효과를 내고 있음을 시사한다 성층권의 total chlorine/bromine loading은 1990년대 후반에 최고치에 이를 것이며, 이후 수십년 간 오존층은 서서히 회복될 것으로 전망된다

③ 성층권의 hydrogen fluoride의 전 지구적 분포가 처음으로 밝혀졌다

hydrogen fluoride(HF)는 성층권에 도달하는, CFC나 수소를 포함하는 HCFC와 같은 산업 가스로 부터의 최종 분해결과의 fluorine 산물이다 성층권 hydrogen fluoride의 자연적 source는 없다 따라서 성층권에서의 그것의 존재는 CFC와 관련 분자들이 성층권에 도달할 수 있다는 명백한 증거이다 UARS의 Halogen Occultation Experiment(HALOE) 기기는 최초의 전 지구 성층권 halogen fluoride 분포를 제공하였다 이런 양의 이전 관측치는 수직적 해상도(항공기 및 지상 관측은 단지 전체 column의 것만을 얻는다) 뿐 아니라 공간적 및 시간적으로 너무나 제약이 많았다. 관

측된 HF field 내의 역학적 징후는, 그것은 상당 부분의 대기에서 conserved tracer로 작용함을 보인다. 관측된 양은 1985년 ATMOS(Atmospheric Trace Spectroscopy) 기기에 의해 우주로 부터 관측된 양보다 현저하게 높았는데, 이는 매년 4.9-6.6% 비율의 지수적 증가율과 맞먹는다.

- ④ biomass burning은 성층권 오존을 심각하게 고갈시키는 methyl bromide의 주요 source임이 밝혀졌다

인간에 의해 시작된 biomass burning은 전 지구적으로 methyl bromide 방출의 주요 source인 것으로 추정되고 있다 브롬 원자는 성층권 오존을 파괴하는데 있어 염소 원자보다 40배나 더 효과적이므로, 그것의 방출 source를 이해하는 것은 필수적이다. 다른 인간 기원의 methyl bromide의 주요 source는 soil fumigation(훈증?)과 유연가솔린을 사용하는 자동차의 배기 가스를 포함한다. methyl bromide sink를 정량화하는데 있어서의 불확실성을 알기 위해서는 더 많은 연구가 필요하다 Montreal 의정서의 최근 개정안은 1995년 1월 1일에 1991년 수준의 methyl bromide 생산량 수준으로 동결할 것을 요구하고 있다

(3) 오존 감소를 일으키는 물리적 및 화학적 과정에 관한 지식

- ① 하부 성층권에서의 오존의 catalytic destruction에 관한 새로운 연구들은 catalytic cycle의 reordering의 필요성을 제안한다.

최근의 현장 관측(ER-2 비행으로 부터)은, 하부 성층권에서의 오존의 catalytic destruction에 있어서 nitrogen radical은 이전에 알고 있던 것 만큼은 그리 유력하지 않음을 시사한다 더구나, AASE II와 SPADE airborne field experiment로 부터의 관측은, sulfate 에어로졸이 하부 성층권에서의 NOx chemistry에의 양적인 영향을 미침을 보여 주었다 이런 발견들은 오존의 고갈에 있어서, 오존과 HO₂의 반응에 가장 중요성을 두며, NOx 보다는 hydrogen-radical들(CIO와 BrO)의 중요성을 높이는 등 catalytic cycle의 reordering을 시사한다 초음속 여객기로 부터의 nitrogen oxide 방출물 같은 인류 기원 배출물의 오존층에 대한 환경적 영향을 평가하기 위해서는, 이런 오존 파괴 cycle의 양적 순서를 넓은 범위의 고도, 위도와 계절로 확장하고, 성층권 중간에서의 더욱 homogeneous chemistry에서 그 시스템이 어떻게 작동하는가를 알기 위해 더 많은 연구가 필요하다

② CFC의 hydrofluorocarbon 대체물질은 성층권의 오존 파괴의 촉매로서는 무시할 정도의 영향 밖에 없음을 실험실 연구가 확인시켜 주었다

Montreal 의정서와 그 개정안에 순응하여 chlorofluorocarbon(CFC)이 퇴장함에 따라, hydrochlorofluorocarbon(HCFC)과 hydrofluorocarbon(HFC)가 대체물질로 제안되었다 많은 HFC들은 오존 고갈에 있어서 잠재적으로 촉매 역할을 한다고 생각되었던 functional group CF_3 를 포함한다 CF_3 fragment를 포함한 reaction cycle은 성층권에서는 중요치 않으며 따라서 그런 functional group을 포함한 HFC들은 무시할 정도로 적은 ozone depletion potential(ODP)(0.0001 이하)을 가짐이 실험실 연구에 의해 밝혀졌다 그 결과는, halocarbon 대체물질은 0.2 이하의 ODP를 가져야 한다는 Clean Air Act Amendments의 요구를 이런 화합물들이 충족함을 확인한다

실험실 및 계산상의 연구들의 조합은 또한 HFC-134a의 ODP가 아주 적음을 확인하였는데, 이는 이런 물질의 방출은 그것이 대체하는 CFC보다 훨씬 적은 오존을 파괴함을 증명하는 것이다 이는 그것에 반대되는 최근의 가정을 잠재웠으며, 따라서 자동차 에어컨에 이 HFC를 사용하는데 있어서 사실무근의 제약을 제거하였다

③ 오존을 고갈시키는 물질의 새로운 대체물질

중간 해결책인 HCFC(hydrochlorofluorocarbon)들이 점차 사라져 갈 것이므로, 다른 제안된 대체물질의 환경적 및 경제적 결과에 대해 관심을 기울일 필요가 있다 HCFC의 대체물질에 관한 컴퓨터 모델링, 실험실의 화학적 및 물리적 성질의 평가, 그리고 성능 평가는 향후의 연구를 통하여 계속될 것이다 이런 대체물질은 순수한 chemicals, azeotropes, zeotropes, 그리고 non-chemical alternatives(not-in-kind substitute라고도 불리는)를 포함한다 주 관심은 대체물질들의 기상관련 매개변수에 미치는 잠재적 영향이다

④ 성층권의 nitric acid는 극지방 오존 고갈의 반구간의 차이를 설명한다

오존의 catalytic destruction에서의 denitrification의 중요성은 육상, 기구, 그리고 항공기에서의 많은 연구를 통하여 명백해졌다 극지방 하부 성층권에서의 nitric acid(HNO_3)의 존재는 두 가지 주요한 방법으로 chlorine-catalyzed ozone destruction의 누적량에 영향을 미친다 첫째, 극지방 겨울의 낮은 온도에서는, HNO_3 는 응축되어

성층권의 chlorine을 오존을 파괴하는 chemically reactive 형태로의 변환을 야기하는 극지방 성층권 구름(PSC)을 형성한다 둘째, HNO₃의 photolysis는, HIO를 억제하고 오존 파괴를 줄이는 NO₂를 방출한다 응축을 통한 성층권 HNO₃의 일시적 제거 혹은 PSC 입자의 퇴적을 통한 영구적 제거는, NO₂의 이용가능성을 감소시켜 chlorine이 더욱 오랫동안 활성화되게 한다

UARS(Upper Atmospheric Research Satellite)에 실린 Microwave Limb Sounder(MLS)은 전 겨울철 동안의 HNO₃의 반구적 관측치를 처음으로 제공하였다 이전에는, nitric acid의 농도는 다른 현장 데이터로 부터 유추되거나 항공기 장착 기기로 부터 순간치로 측정되었다 ClO 및 O₃와 더불어 HNO₃의 MLS 관측은 nitric acid와 chlorine chemistry에 의한 오존 고갈과의 관계를 직접 보이는 simultaneous commonly calibrated data의 전세계적 세트를 준다 이른 6월 까지 남극대륙 상공의 HNO₃가 현저한 감소하고 11월까지 지속되어 이 기간에 남극 오존 구멍이 생성되는 것이 관측되었다. 북극지방에서의 HNO₃의 유사한 감소는 덜 심하며, 보다 더 일시적이고 국지적이다 그러나 greenhouse gas 농도의 증가에 의한 성층권의 추가적인 냉각은 북극지방 상공에서의 denitrification을 증가시켜 그 지역에서의 더 큰 오존 고갈을 가져올 수도 있다

⑤ 위성자료로 부터 얻어진 극지방 성층권 구름의 기후학

극지방 성층권의 구름(PSC) 발생에 관한 기후학은, 1978년 부터 1989년 기간 동안 Nimbus 7 우주선 상의 Stratospheric Aerosol Measurement II(SAM II) 장비로 부터의 데이터를 사용하여 구해졌다 PCS는 고위도 오존 고갈 화학반응의 주요 원인인 촉매 표면을 제공하므로 중요하다 SAM II는 solar occultation 기법을 사용하여 atmospheric extinction을 관측하며, 북극과 남극지방의 고위도에서의 데이터를 얻는다 이런 기후학은 1982년 El Chichon 화산의 분화에 의해 심각하게 교란된 시기(북극지방은 1982, 1983년, 남극지방은 1983년)를 제외한 모든 해의 데이터를 이용한다 남극지방에서 PSC가 발생하는 계절은 5월 중순 부터 11월 초순까지이며, 위도별 PSC 발생 확률 평균의 최고치는 8월에 고도 18-20km에서 0.6 정도이다 북극지방에서는 PSC가 발생하는 계절은 뚜렷하게 짧은데, 11월 하순부터 3월 초순까지이며, 발생확률의 최고치는 2월 초순 고도 20-22km에서 0.1 정도이다 북극지방에서는 PSC

발생에 있어서 매년 간의 변동성이 현저한 반면, 남극지방에서는 늦은 계절의 구름의 수의 주된 매년 간의 변동성이 보인다 남북반구 모두에서 PSC 발생의 최대 빈도는 Greenwich 자오선(90° E-90° W)을 따라서 나타난다. PSC 형성과 관련된 온도는 북극지방의 겨울 동안에는 거의 일정하나, 남극지방의 15-20km 지역에서는 감소하는데, 이는 성층권의 dehydration과 denitrification과 일치한다

⑥ 겨울철의 polar vortex는 중위도 지방으로 부터 격리되는 것으로 계산되었다.

성층권의 화학적 연구에 있어서 중대한 불확실성은 겨울철의 polar vortex와 중위도 지방간에 어느 정도의 대기가 교환되느냐 하는 것이다 보통의 polar vortex 내부의 공기는 바깥의 공기와는 아주 다른 화학적 조성을 가지므로, 상당량의 대기 구름의 이송 및 교환은 중위도 지방의 오존량에 중대한 의미를 가질 수 있다 따라서 이런 교환량을 정량화하는 것은 중요하다 여러 연구자들의 계산은, 여러 종류의 관측 데이터에 의해서도 입증되었는데, 대부분의 성층권(potential temperature 400° K 정도 이상인)에서 vortex 내부의 공기는 외부의 공기와 잘 격리되어 있음을 보이는 강한 증거를 보인다 그런 북반구에서는, 그런 vortex의 격리는 1월이나 2월보다는 12월과 3월(각기 vortex spin-up과 breakdown에 해당하는)에 훨씬 불완전하다

⑦ 계산결과는 북극 및 남극 vortex의 강한 하강의 증거를 보인다

관측결과는 북극 및 남극지방의 winter polar vortex 내부에 뚜렷한 하강현상이 있음을 보였다 그러나 매년간의 변화량과 반구간의 비교 뿐 아니라 하강의 양적 비율과 양도 추론하기는 어렵다. 성층권의 오존량이 고도에 확실히 의존하기 때문에 이는 중요하다 두가지 테크닉을 사용하여 수행된 계산은 1988-1989년 여름 동안의 북극지방과 1987년 및 1992년 겨울 동안의 남극지방의 이런 하강을 양적으로 분석하였다 이런 계산은 radiative and trajectory code와 함께 National Meteorological Center로부터의 온도 데이터를 사용하였다. 북반구에서는, 18, 25, 50 km에 존재하는 vortex 내의 공기 덩어리는 11월 1일에 시작하여 3월 21일 까지 각기 6, 9, 27 km 하강한 것으로 계산되었다 남극지방에서는 같은 고도의 공기 덩어리는 3월 1일부터 시작하여 10월 말까지 각기 3, 5-7, 그리고 26-29 km 하강하는 것으로 계산되었다 최근 몇 년간의 결과는 Upper Atmosphere Research Satellite(UARS)로 부터의 결과와 일치한다

(4) 지표에서의 증가된 UV radiation에 관한 새로운 정보

① 지표면의 자외선 방사량을 추산하는데 사용되는 위성 오존 데이터

성층권의 오존량에 관한 대부분의 관심은 자외선을 흡수하는 그것의 역할에 기인한다. 오존량은 우주 및 지상의 플랫폼으로 부터 잘 특성지워지는 반면, 지구 표면의 자외선 방사량에 대한 고급의 가용한 데이터 세트는 아주 제한되어 있다. 우주로 부터의 관측을 사용하여 이런 고급의 데이터를 추론할 수 있을 것이라는 가능성은 지표면의 자외선 조사량 분포 및 시대에 따른 변화에 대한 지식을 줄 수 있을 것이다. 과학자들은 최근 Total Ozone Mapping Spectrometer(TOMS) 장비에 의해 관측된 조사량과 지표면에 도달하는 자외선량을 관련짓는 알고리즘을 개발하였다. 구름의 유무에 관계없이 사용할 수 있는 이 알고리즘은 Canada Toronto에 있는 Brewer spectrophotometer와 비교함으로써 테스트되었다. 예를 들어, 1990년 4월-11월 동안 310 nm에서 관측된 UV irradiance와 추론된 결과는 반 달 동안 평균의 RMS 차이가 겨우 6%로 잘 일치하고 있다.

② 연방기관들은 자외선 감시 네트워크를 구성하고 UV index를 발표하기 위해 협동한다

USDA, EPA, National Biological Service(NBS), NSF, NASA, Smithsonian, NIST 와 Department of Commerce의 NOAA를 포함한 연방기관들은 USGCRP하에 자외선 감시를 위한 국가적 네트워크를 구성하기 위하여 기관간의 위원회를 구성하였다. 그 위원회는 네트워크로 부터의 모든 자외선 관측치가 서로 비교가능하고 알려진 정확도와 정밀도를 가지도록 하는 질검증 프로그램을 개발하고 있다. 첫번째 범 정부의 장비의 상호비교는 작년 9월에 실시되었다. 1994년 6월부터 전 미국에 걸쳐 58개 도시의 UV index가 발표되고 있다.

(5) 성층권 오존 감소의 결과와 완화책에 대한 새로운 발견

① 자외선 방사량의 증가는 중요한 공공 건강 문제임이 입증되었다

지구 오존층 감소의 부작용 중의 하나는 지구 표면에 미치는 자외선 방사량의 증가이다. 그러면 자외선 방사량이 피부 세포에 미치는 영향은 무엇인가? 과학자들은, 태양에 노출된 환자들에게서 발견되는 피부암의 전조인 대다수의 grainy lesions은, 피부암의 일반적 형태인 비늘 모양의 피부 종양에서 발견되는 p53 유전자 변이와 같은

종류를 가짐을 최근 발견했다. 동물실험을 통하여, 자외선은 두 가지 방법으로 암을 일으키는 것이 밝혀졌다. 첫째, 자외선은 p53 종양억제 유전자를 변이시킨다. 둘째, 건강한 p53 유전자로 세포를 자극하여 스스로 죽게함으로써 자외선은 암으로 되기 쉬운 세포를 고르는데 도움을 준다. 따라서 햇빛은 종양을 발생시키고 종양을 발전시키는 두 가지 작용을 한다

② 남극에 덮인 얼음은 증가한 UVB의 나쁜 영향으로 부터 식물성 플랑크톤을 보호하는 것 같다.

성층권의 오존 고갈에 의한 증가된 봄철의 UVB 방사는 1차 생산을 감소시키고 남극의 해양 식물성 플랑크톤 종 구성의 변화를 일으키는 것 같다는 사실이 이전에 시사되었다 북극지방에서 실시된 실험은 현재의 감소된 1차 생산과 증가된 UVB 수준을 보였다 실험실 연구는, 비록 성장 및 광합성이 정지되는 수준은 일정치 않으나, 대부분의 플랑크톤 종들은 실험실 조건에서 높은 UVB 수준에 민감함을 보였다 성층권의 오존 고갈은, 그 결과로 생기는 증가된 봄철의 UVB irradiance와 함께, 1970년도 후반부터 점차 심각하게 발생하고 있다 따라서 식물성 플랑크톤 군은 20년 동안이나 증가된 UVB 수준에 노출되어 왔다 최근 죽은 식물성 플랑크톤 껍질더미에서 발견한 사실은, 비록 어떤 sea-ice diatom의 생산은 감소하는 증거는 있으나 식물성 플랑크톤 중 차지하는 규조류(규소질 껍질을 가진 식물성 플랑크톤)의 구성비는 장기간의 자연적 변이와 거의 구분할 수 없음을 시사한다 이런 결과는, 식물성 플랑크톤의 bloom과 봄철의 UVB 조사의 증가가 일치하지 않는 얼음이 두껍게 덮고 있는 남극의 연안지역에서는, 이런 식물성 플랑크톤은 증가된 UVB 조사량에 덜 영향을 받음을 시사한다 그러나 이런 결과는 증가된 UV는 이 지역 외부의 식물성 플랑크톤에게 중요한 점이 아니라는 것은 아니다

③ 흡속의 미생물에 의해 분해되는 오존고갈 물질과 그 대체물질

오존을 파괴하는 CFC의 잠재적 독성의 부산물은 어떤 흙에서 발견되는 미생물들에 의해 무해한 물질로 분해되는 것 같다 CFC 대체물질의 반응은 그것의 질 낮은 부산물이 환경과 생명체에 해로울 지 모른다는 관심을 일으켜 왔다 이런 발견은 어떤 호수와 salt marsh 바닥에서 발견되는 어떤 종류의 박테리아가 몇몇 잠재적으로 위험한 CFC 부산물을 무해하게 바꿀 수 있음을 가리킨다

④ 어떤 어류는 증가된 UV 조사량에도 특별한 내성을 가짐이 밝혀졌다.

어떤 어류는 고갈된 오존층과 연관된 높아진 UV-B 조사량 수준에 아주 내성이 있다. 그러나 위기에 처한 Lahontan cutthroat trout 같은 다른 어류는 현재의 UV-B 조사량 수준에도 피해를 입는다 UV-B에 내성이 있는 어류의 피부는 민감한 어류에 비해 최고 4배나 되는 양의 광에 대해 보호 인자를 가지고 있다. 이런 인자는 다양한 생태계의 수많은 종들간에 UV-B 조사량에 의해 영향을 얼마나 받나 하는 생물학적 지표로 사용될 수 있을 것이다

⑤ 오존 고갈에 대한 1994년의 과학적 평가가 출판되었다.

Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer의 Article 6의 규정에 의한 성충권 오존 고갈에 관한 최근의 과학적 평가가 출판되었다 World Meteorological Organization과 United Nations Environment Program의 후원 아래 준비된 이 보고서는 다음과 같은 장을 포함하고 있다 즉, Ozone Measurement; Source Gases Trends and Budgets; Polar Ozone, Tropical and Mid-Latitude Ozone, Tropospheric Ozone, Model Simulations of Stratospheric Ozone, Model Simulations of Global Tropospheric Ozone, Radiative Forcing and Temperature Trends, Surface UV Radiation; Methyl Bromide, Subsonic and Supersonic Aircraft Emission, Atmospheric Degradation of Halocarbon Substitutes, and Ozone Depletion Potentials, Global Warming Potentials and Future Chlorine-Bromine Loading.

10. 지표면의 변화와 육상 및 해양 생태계의 변화

(1) 지표면 변화를 감시하는 어떤 새로운 연구

① 전 지구 규모의 지표면의 새로운 지도

비록 vegetation과 지표면의 새로운 전통적 의미의 지도는 국지적 혹은 국가적 차원에서 만들어지고 있으나, 어느 한 순간의 global 지표면과 vegetation type의 분포는 거의 알려져 있지 않다 전 세계의 넓은 지역을 위해서는, 지표면 지도는 때로는 시대에 뒤떨어져 있고, 부정확하거나 혹은 전 지구적 변화의 연구에 부적합한 축척으로

되어 있다. 생태계 과정 모델들은 현재 지표면 type의 분류를 요구한다 저해상도의 multi-temporal 위성들은 최신의 전 지구 혹은 국지적인 데이터 세트를 생성하는 수단을 제공한다 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)로 부터의 개선된 전 지구적 데이터 세트는 과학자 사회에서 사용할 수 있도록 만들어지고 있다. 매일의 지구 궤도 데이터는 처리되어 1도 부터 1 km에 이르는 범위의 축척의 time series data set로 편집되고 있다 위성 데이터로 부터의 vegetation index에 의해 표현되는 생물 기후학적 차이는 다른 vegetation type을 구분하는데 사용되고 있다. multi-spectral data도 다른 지표면 type을 구분하는데 사용되고 있다 이런 새로운 전 지구적 지도는 고해상도 데이터의 표본을 사용하여 확인작업 중이다 미국은 또한 현재 IGBP에 의해 추진되고 있는 전 세계의 1 km 지표면 데이터 세트의 제작과 확인 노력에 기여하고 있다

② 인간에 의한 극단적인 terrestrial biosphere 교란의 지역적 범위와 지리적 패턴의 개관

약 9000년 전 농업 발전 이후로, 지구 표면은 계속 농작물 생산을 위하여 점차 많은 부분이 수용되어왔다. Conversion to cultivated systems has resulted in wholesale restructuring of biotic communities and the pathways of energy and nutrient flow that they control 아래의 표는 인간에 의한 극단적인 terrestrial biosphere 교란의 지역적 범위와 지리적 패턴을 요약하고 있다 Sisk 등은 어떤 생물의 멸종은 그 지역이 high biological diversity와 일치하는 곳에서 가장 잘 일어난다고 주장한다. 자연 그대로의 서식지가 폭넓게 그리고 심각하게 교란을 받는 지역을 파악하려는 시도는, 최우선적으로 보존되어야 하는 지역을 파악하려는 그 어떤 노력이라도 그것의 절대 필요한 구성요소가 되어야 한다.

③ 위성에 의한 전 세계 지표면 분석

위성 데이터를 사용하여 vegetation을 분류하는 간단하고 새로운 논리는, general circulation model의 입력을 위하여 지구의 biosphere를 특징 지우는데 없어서는 안되는 과정이다 이런 분류는, 잎의 모양과 수명과 같은 vegetation의 기본적인 형태학적인 면에 근거한다 leaf area index나 total biomass와 같은 biophysical

measurements의 구실을 쉽게 하는 것은 바로 분류이다 데이터 근원은 1 km AVHRR이다.

④ 새로운 리모트 센싱 알고리즘을 사용하여 수많은 실험 현장으로 부터 유추된 biomass density

새로운 위성 리모트 센싱 알고리즘은, 토지이용의 변화, 에너지, boreal forest의 가장 흔한 주종을 이루는 black spruce(Picea mariana) 군집 내의 물 및 탄소의 순환 연구에 키가 되는 숲의 생물 물리적 특성들을 추정하는데 사용된다. 그 알고리즘은 geometric radiative transfer model과 spectral linear mixing model에 근거한다 그 알고리즘은 Thematic Mapper bands 3 and 4의 가시광선 및 준적외선의 반사에 근거하여 forest stand의 sunlit canopy fraction, sunlit background fraction, 그리고 shadow fraction의 값들을 추정한다 이런 fraction들 간의 관계와 stand 생물물리학적 특성을 사용하여 biomass density는 31개 이상의 테스트 현장에서 추정되었는데 아주 좋은 결과를 보였다

⑤ 주로 Clear cutting으로 의한 closed canopy coniferous forest의 변화는 사유 지역에서 최대이며 공공지역에서는 최소이다

LANDSAT 이미지를 사용하여 1972년 부터 1988년 사이의 교란(주로 clear-cutting)의 비율 및 양상과 재생율을 비교함으로써 managed forest landscape에서의 fragmentation 과정을 검사하였다 서부 Oregon의 2589 평방 km의 managed forest landscape가 closed canopy forest(CF - 보통 60% 이상 침엽수가 덮인)와 other forest and nonforest type(OT - 보통 40년 이하 혹은 낙엽수림)의 두 가지 주요 forest type으로 분류되었다

1972년과 1988년 사이에 CF의 백분율은 71%에서 58%로 감소하였다 감소율은 사유지에서 최대이며, public reserve에서는 최소, 그리고 public nonreserve에서는 중간치를 보였다 고지대(914 m 이상의 지역)에서는 저지대(914m 이하)보다 높은 CF 백분율을 유지하고 있다 두 cover type의 가장자리에서의 그 지역의 백분율은 모든 소유형태 및 모든 고도에서 증가하였다 그러나 내부 서식지(OT로 부터 적어도 100m 떨어진 CF로 정의됨)의 양은 모든 소유형태 및 모든 고도 지역에서 감소하였다.1988

년 까지는 공유지는 대략 45%의 내부 서식지를 포함하였고 사유지는 12%의 내부 서식지를 가지고 있었다 평균 interior patch 지역은 160 헥타르로 부터 62 헥타르로 감소하였다. 전 지역에 대한 교란(주로 clear-cutting)의 annual rate은 1.19%이었는데, 이는 84년의 cutting rotation에 해당된다. forest landscape는 안정되거나 통제된 상태에 있지 않았으며, 현재의 forest plan 하에서는 적어도 40년간 일어나서는 안되는 그런 상태에 있었다 벌목 비율의 변동성은 사유지가 nonreserve public land보다 높았다. 그러나, 공유지에서의 분산된 벌목 패턴의 이용에도 불구하고 벌목 및 잔여 forest patch의 공간적 패턴은 전체 사유지에서 불규칙하였다 인접한 interior forest의 큰 remaining patch(5000 헥타르 이하)는, 목재 생산을 위한 용도 이외 즉, 황야 혹은 자연 연구지역 같은 공유지에만 제한되어 있다.

⑥ 벌목과 도시화를 감시하는 새로운 접근방법

thermal infrared surface temperature 관측은 vegetation index의 원거리 측정과 더불어 도시화 혹은 벌목에 의해 수반되는 surface hydroclimate의 변화를 연구하는데 처음으로 사용되고 있다 두 개의 지표 매개변수, 즉 surface moisture availability와 fractional vegetation cover가 위성 관측으로부터 얻어졌다 보통 수치적으로 0과 1사이의 값을 갖는 이런 매개변수들은 두 가지 면에서 유용하다 첫째, 이들은 육지 표면과 대기 간의 turbulent heat flux의 대부분의 변이를 반영한다 즉 이들은 기후 모델에서의 가장 중요한 입력량과 같은 건전한 측정치이다 둘째, land surface cover의 변화에 민감한 그 두 매개변수는 도시화와 벌목의 접촉 매개변수이다 따라서 이런 매개변수의 baseline image가 만들어지고 십년 혹은 그 이상 기간 동안의 변화가 도시화된다. 그리하여 지표면 특성변화가 감시될 수 있다 Pennsylvania(도시화를 위한)와 Costa Rica(벌목을 위한)의 특정 지역에서 토지이용의 변화를 감시하기 위하여 이들을 매개변수로 사용하는 연구가 시작되었다

⑦ forest fragmentation 연구는 Brazil Amazon으로 부터의 탄소의 유입량이 과대 평가 되었을 수도 있다는 사실을 시사한다

1978년 부터 1988년 사이의 Brazilian Amazon Basin에서의 벌목과 forest fragmentation을 측정하기 위해 LANDSAT 위성 이미지가 사용되었다 벌목은 Amazon

삼림의 남부 및 동부 가장자리를 따라 crescent에 집중되어 있다. 벌채된 지역은 1978년 부터 1988년 까지 78,000 제곱 km에서 230,000 제곱 km로 증가하였다 이런 결과는 Brazilian Space Agency(INPE)에 의해 독자적으로 추산된 것과 잘 일치하나 최근 공공 문헌에서 추산하는 값 보다는 낮다 또한 이는 낮은 해상도(AVHRR) 위성 데이터에 근거한 이전의 추산치는 브라질의 벌목을 약 50%나 과도하게 추산하고 있음을 보였다. 이런 추산치는 land clearing과 biomass burning으로 부터의 탄소의 순수한 flux의 평가를 개량하는 데 사용될 것이다 높은 벌목률에 근거한 모델의 추산치는 아마도 너무나 높은 값을 줄 것이다 더구나 많은 벌채된 지역은 황폐화된 후 다시 나무들이 자라고 있으며, 그리고 이렇게 다시 자라는 지역이 광범위하면 net carbon flux의 추산치는 다시 자라는 biomass에 의한 탄소의 집적으로 인해 더욱 감소시켜야 할 것이다 습한 열대지방의 다른 부분에 대한 비슷한 추산치를 만들려는 노력은 여러 기관이 참여한 Landsat Pathfinder Program 하에서 계속되고 있다

같은 연구에서, fragmented forest도 역시 추산되었다. fragmented forest는 벌채지역에 둘러 싸여 있으며, 인접한 벌채지역으로 부터 안쪽으로 1 km의 가장자리 영향을 받는 100 제곱 km 이하의 지역으로 정의된다 fragmented forest의 면적은 162,000 제곱 km에서 588,000 제곱 km로 늘어났다 이런 벌목에 의해 영향을 받는 훨씬 더 넓은 면적은 생물 다양성의 문제 뿐 아니라 육지-대기 간의 다른 상호작용에도 심각한 의미를 가진다.

(2) 지표면과 육상개발에 의한 변화의 영향

① 숲의 재생 혹은 벌목의 감소에 의한 전 지구 스케일의 carbon sequestration

숲은 전 지구 육지 표면의 41억 헥타르 이상을 차지하고 있다 지구 전체로 볼 때, 숲의 식물과 토양은 약 11500억 톤(1150 GtC)의 탄소를 포함하고 있는데, 이 양의 약 37%는 저위도 숲에, 14%는 중위도에, 그리고 49%는 고위도에 존재한다 숲 생태계의 탄소의 2/3 이상은 토양과 토탄 퇴적물에 포함되어 있다 1990년 저위도 지방의 벌목은 매년 1.6 GtC의 탄소를 방출하고 있는 반면, 중위도 및 고위도 지역의 숲 지역의 확장 및 성장은 매년 0.7 GtC의 탄소를 고정하고 있어서 매년 대기로는 0.9 GtC의 탄소가 순수 방출되고 있다 벌목 속도의 감소는 숲의 증가 및 숲의 생태계 생산성의 증가를 위한 다른 관리방법과 더불어 방대한 양의 탄소를 보존하거나 고

정할 수 있을 것이다. 지구 기후 및 토지 사용과 관련된 장래의 숲의 탄소 사이클 경향은 불확실하다. 모델의 결과 및 몇몇 연구결과는 미래에 숲은 탄소의 sink 혹은 source가 될 수 있음을 시사한다.

② 새로운 연구는 precision farming은 기후 보호에 기여할 수 있음을 보인다

전 세계 농업지역의 토양 탄소는 토지사용과 기후변화의 관계를 이해하는 데 있어서 연구자들에게는 아주 중요하다. 일반적으로 자연의 생태계로 부터 농업지역으로의 전환은 매년 이산화탄소의 형태로 대략 0.6-0.3 GtC의 탄소를 대기중으로 방출하는 것으로 생각되고 있다. 일반적으로 농업과 관련하여 밭갈이는 흙 속의 유기물의 산화를 증가시킨다. 그러나 어떤 특정지역에서의 실험은 농업 습관의 변화를 통해 흙으로 부터 탄소의 상실을 감소시킬 수 있는 가능성이 있음을 보였다. 예를 들어, 흙을 갈아엎는 것을 줄이거나 아예 그렇게 하지 않거나, cover crop을 사용하거나, 비료의 교체는 때로는 흙 속의 탄소량을 늘리며 수확량은 그대로 지속시키면서 흙을 더욱 비옥하게 할 수 있다.

새롭게 개발된 흙 속의 탄소 및 질소 process-based 모델은 농업 습관이 토양속의 탄소 역학과 토양으로 부터의 이산화탄소의 방출에 미치는 양적 영향의 특정지역 혹은 큰 스케일에서의 평가를 가능하게 한다. 다양한 기후 및 토양 조건의 그런 결과는 토양 탄소의 유실을 방지하는 가장 좋은 방법은 비료의 교체이다. 그러나 그런 결과는 토양 조직에 아주 민감하다. 질소 비료의 증가와 밭갈이의 감소는 일반적으로 토양 탄소의 유지를 증가시켰다. 궁극적인 토양 유기물의 함량은 기후에 민감하며, 토양온도가 저하하거나 진흙 및 질소비료의 증가, 비료의 교체, 찌꺼기가 많이 남는 작물일수록 증가한다. 농업 토양 내의 탄소를 유지하고 증가시키려는 노력은 토양의 생지화학적 역학의 완전한 이해를 필요로 한다.

③ 인간의 담수 시스템 공사는 해면 상승에 기여하는 것 같다

전 지구적 조석기록을 편집한 결과에 의하면 해면은 전 20세기에 걸쳐 상승하고 있으며, 이런 비율로 나간다면 고도가 낮은 해안지역에는 심각한 결과를 초래할 것이다. 알프스 빙하의 해빙 뿐 아니라 해수의 열에 의한 팽창은 이러한 몇몇 변화들의 요인이나, 지하수를 끌어 올리거나 표면수를 댐 데로 돌리거나 토양의 용도변화 등

인간의 활동도 역시 해면에 직접 영향을 끼쳐 왔다 해면은 20세기에 10-25 cm 상승한 것으로 추정되며, 이 중 약 1 cm(-5에서 7 cm 범위)가 인간의 토지이용 변화의 직접적 결과이다. 만일 프로젝트에 의해 다량의 물을 저수지나 aquifer에 저장하지 않았다면 이런 해면 상승은 50%나 더 컸을 것이다 또한 인간활동은 토양, 숲, 습지의 함수 능력에 영향을 미친다 이러저러한 인간활동은 지난 세기동안 해면의 순 상승의 원인인 것 같다 지하수의 양수, 표면수의 진로변경, 토지이용 변화 등은 관측된 해면 상승의 적어도 1/3의 원인이다 이런 연구는 담수의 이동을 연속적으로 감시하고 관리할 필요가 있음을 시사한다

④ 화재발생의 분포 및 관련된 방출

화재는 중요한 생태계의 과정이며 열대지방에서는 잘 보고되지 않는 것이다 교란과정으로서의 화재발생의 분포는 생태계 과정 모델의 입력으로 필요하다. 화재지역의 범위와 화재빈도의 변화는 방출과 전세계 생지화학 사이클의 인벤토리를 위해 중요한 의미를 가진다. 남 아프리카 사바나 지역에서의 화재발생의 발생 및 시기를 감시하기 위해 매일의 저해상도 위성 데이터가 사용되고 있다 그 화재발생 지도와 매년 사이클 동안 소실된 총 면적을 더욱 잘 추산하기 위해 고해상도 위성 데이터가 사용되고 있다. fuel load의 모델과 방출 요인의 지상 측정치와 연계된다면 이런 데이터는 희소 기체 및 입자상의 방출량(particulate emission)의 보다 나은 추산치를 얻는데 사용될 수 있을 것이다 더욱 개선된 전 세계의 수년 간의 위성 데이터의 존재는 그런 정보를 매년 제공할 수 있음을 의미한다.

⑤ 미국 토양의 유기탄소는 1950년 이후 증가되어 왔음이 밝혀졌다

미국 농업 생태계(land area 40%, 60-70%의 crop land)의 토양 내 탄소의 연구는 CENTURY 모델을 사용하여 124년(1907-2030) 동안을 시뮬레이션하였다 그 결과는 1907년 농업지로의 전환 이후 토양의 유기탄소는 1950년 까지 연속적으로 감소되다가 1970년 대 동안은 약간 증가하였다 2030년 까지 토양의 유기탄소의 양은 뚜렷하게 증가할 것이 기대된다. 또한 conservation tillage(보존경작) 습관은 토양내의 탄소의 양을 상당히 증가시킬 수는 있으나 그 영향은 지역에 따라 상당히 다를 것임이 밝혀졌다 cover crop들은 특히 미국 남부 및 동부지역에서 crop soil과 climate regime에서의 토양 내의 탄소의 양을 상당히 증가시킬 수 있음이 밝혀졌다.

열대림의 조사는 열대림이 이전의 변화보다 훨씬 빨리 변하고 있음을 발견하였다. 1934년 이후 관측된 열대림 수종의 turnover rate은 1960년 이후 forest turnover는 뚜렷하게 증가하고 있음을 시사한다. 이런 증가는 1980년대에 더욱 가속되고 있는 것 같다. 가능한 원인으로는 증가된 극단적인 기상 현상들, 인근의 벌목, 대기중의 이산화탄소의 증가에 기인한 증진된 생산량에 의한 환경 변화이다. 이런 증가된 turnover rate는 열대의 생물 다양성과 아마도 열대의 탄소 사이클에 중대한 의미를 가진다. 빠른 forest turnover는 증가된 이산화탄소에 의한 이득을 가장 많이 얻는 climbing plant와 gap-dependent tree 종들이 주종을 이루게 할 것이다. 이런 종들은 shade-tolerant 종들보다 덜 조밀한 숲을 만들므로 탄소의 sink로서는 궁극적으로는 현재보다 그 작용이 덜 할 것이다.