

기후변화에 따른 해수면변동  
예측에 관한 기초연구

1994. 5

한국해양연구소

# 제 출 문

한국해양연구소장 귀하

본 보고서를 “기후변화에 따른 해수면변동 예측에 관한 기초연구”의 최종보고서로 제출합니다.

1994년 5월 20일

한국해양연구소 해양물리연구부

연구책임자 : 김 철 수

# 요 약 문

## I 제 목

기후변화에 따른 해수면변동 예측에 관한 기초연구

## II 연구개발의 중요성 및 목적

최근의 지구환경은 오존층 파괴와 지구온난화 현상이 급속히 진행됨에 따라 세계 각국은 이에 대한 대응책 마련에 부심하고 있다. 1992년 6월에는 브라질의 리우데자네이로에서 UN 환경개발회의(United Nations Conference on Environment and Development: UNCED)가 열려 환경에 적합하고 지속가능한 개발을 주제로 한 환경정상회담(Earth Summit)을 가진바 있으며 리우선언과 의제 21(Agenda 21)을 채택하였다. 또한 리우회의에서는 “기후변화 협약”과 “생물다양성 협약”에 많은 나라들이 서명하였으며 우리 나라도 양 협약에 서명하였다.

상기 UN 개발회의에서 서명된 기후변화 협약은 국가간에 구체적인 의무사항을 포함하고 있지는 않으나 앞으로 우리 나라의 산업정책 수행에 제한요인이 될 가능성이 높다고 생각된다. 일반적으로 해양은 기후변화와 매우 밀접한 관계를 갖고 있으며 이와 같은 기후변화가 우리 사회의 모든 분야에 미치는 영향은 지대할 것으로 예견된다. 따라서 한반도 주변의 해수면 변화를 기후변화에 따라 예측할 수 있는 기술이 필요할 것으로 생각되며 이러한 영향을 분석여 종합적으로 평가하는데 중요성이 있다.

본 연구는 기후변화가 해수면 변동에 어느 정도 영향을 주는지를 문헌조사 및 자료를 통하여 정리하고 분석하며 이에 대한 대응 방법을 세우는데 기초자료로 활용할 수 있도록 하는 것을 목표로 한다.

## III 연구개발의 내용 및 범위

1. 기존 연구실적 및 조사자료의 정리
  - 평균해면자료
  - 기후변화의 추이
2. 기후변화에 따른 해수면 변동의 분석

#### IV 연구개발에 대한 건의

기후변화에 의한 해수면 변동에 관한 연구는 국가에서 지속적인 관심을 가지고 추진하여야 하며, 특히 우리 나라는 해수면 관측기간이 선진국에 비하여 상대적으로 짧기 때문에 외국과의 긴밀한 협조체제를 유지하여야 한다.

# SUMMARY

## I Title

A preliminary study on the sea level change caused by global climate change

## II Objectives and significance of the study

Global climate change is an environmental problem of international proportions and vast economic and social implications. In June 1992, United Nations Conference on Environment and Development (UNCED) was held at Rio de Janeiro, Brazil. Two treaties (Climate and Bio-diversity) were agreed with each nations including Korea. According to the needs of various social and scientific field, it is necessary to study the impacts of the sea level rise caused by the global climate change as a national project.

## III Contents

1. Research for literature survey and current status
  - mean sea level data
  - trends of the global climate change
2. Analysis of the sea level change caused by global climate change

## IV Suggestion

To prepare future impacts of sea level rise, we need more information and analyze the current situation for global warming. It is also required for the international cooperation by the government basis.

# 목 차

요약문(국문) .....	3
요약문(영문) .....	5
그림목차 .....	8
표목차 .....	9
제 1 장 서론 .....	10
제 2 장 토의 .....	13
제 3 장 결론 .....	33
참고문헌 .....	37

# CONTENTS

Summary(Korean) .....	3
Summary(English) .....	5
List of Figures .....	8
List of Tables .....	9
Chapter 1. Introduction .....	10
Chapter 2. Discussion .....	13
Chapter 3. Conclusion .....	33
References .....	37

## 그림 목 차

그림 1. 지구 기후시스템 구성의 개요도 .....	11
그림 2. 고산지대 빙하의 지난 300 년간 감소상황 (from Grove, 1988) .....	18
그림 3. 해양에서 1957년과 1981년 사이의 수심별 수온변화 (from Antonov, 1990) .....	19
그림 4. 지난 100 년간의 해수면의 변화 (a) Gornitz and Lebedeff(1987), (b) Barnett(1988) .....	21
그림 5. 세계 각 지역의 지난 100 년간 해수면 변동치 .....	24
그림 6. 미국 GFDL 모델에 의하여 이산화탄소가 2 배가 될때의 평형기후와 현재의 이산화탄소에 의한 기후와의 겨울철 기온의 차 (from Mitchell, 1990) .....	27
그림 7. 해양의 위도와 수심에 따른 수온의 변화 (Revelle, 1983) .....	29
그림 8. 지구의 대기온도가 3℃ 증가할 경우의 해수면 변동치 분포 (from Church <i>et al.</i> , 1991) .....	31
그림 9. 인공위성 고도계에 의한 해수면 변동 관측 개요도 .....	36

## 표 목 차

표 1. 눈, 얼음 및 빙하의 분포 (from Titus, 1989) .....	16
표 2. 지난 100 년간의 요인별 해수면 변동치 (from Warrick and Oerlemans, 1990) .....	23
표 3. 지난 100 년간(1880 - 1980)의 해수면 변동 추세 .....	25
표 4. 해수면 상승의 요인별 추정치 (from Warrick and Oerlemans, 1990) .....	32

# 제 1 장 서 론

우리가 살고 있는 지구상의 모든 에너지 근원과 기후변화의 원동력은 태양이다. 태양으로부터의 에너지는 짧은 파장의 복사 에너지이고 이중 약 2/3는 해양, 대기, 빙하 및 육상 등에 흡수되고 나머지는 우주공간으로 반사된다. 지구에 흡수된 에너지는 다시 장파의 형태로 우주공간으로 방출되므로 지구계 에너지의 입력과 출력은 대체로 균형을 이룬다. 이러한 균형을 깨는 변수로는 태양의 에너지 방출량 변화, 대류권과 성층권의 수증기, 이산화탄소, 메탄, 이산화질소, 오존 등의 온실효과 기체 (Greenhouse effect gases)의 농도 변화, 화산폭발 등에 의한 대기분진 농도의 변화 등이 있다.

일반적으로 기후는 대기권 (Atmosphere), 해양 (Ocean), 빙하 (Cryosphere), 생물권 (Biosphere), 육지권 (Geosphere)의 다섯개의 기본적인 요소로 구성되어 있다(그림 1). 이러한 요소중에서도 해양과 빙하는 기후변화에 중요한 역할을 수행하고 있다. 해양과 빙하는 열과 물을 저장하고 기후의 조절능력을 가지고 있다. 예를 들면 해양은 적도지역으로부터 극지역으로 30 ~ 50%의 열을 전달하며 고위도 지역의 기후를 조절한다. 빙하는 그린랜드와 남극에 주로 분포하며 지구 전체 담수량의 80%를 차지하고 수문학적 순환과 해수면 변동에 큰 영향을 주고 있다.

대기중의 온실효과 기체의 농도 증가에 따른 지구온난화 문제에 있어서 온난화와 함께 고려하지 않으면 안될 문제가 해수면 상승이다. 최근 발표된 IPCC Working Group I의 보고에 따르면 특별한 대책이 없이 현재의 상태대로 가면 대기온도는 앞으로 10년 마다 0.3℃ 정도의 증가율을 보일 것으로 추정되며 2,000년까지 약 6cm의 해수면 상승이 예상되고 2,030년까지는 상승의 폭이 20cm, 다음 세기까지는 약 65cm에 달할 것으로 예측하고 있다(해수면은 일반적으로 밀물과 썰물에 따라 시간적·공간적으로 변화하는 해면의 위치이고 장시간의 평균해수면과 구별하여야 하나 여기에서는 일반적 의미로서 평균해수면을 해수면으로 사용한다). 해수면 상승은 대기온도

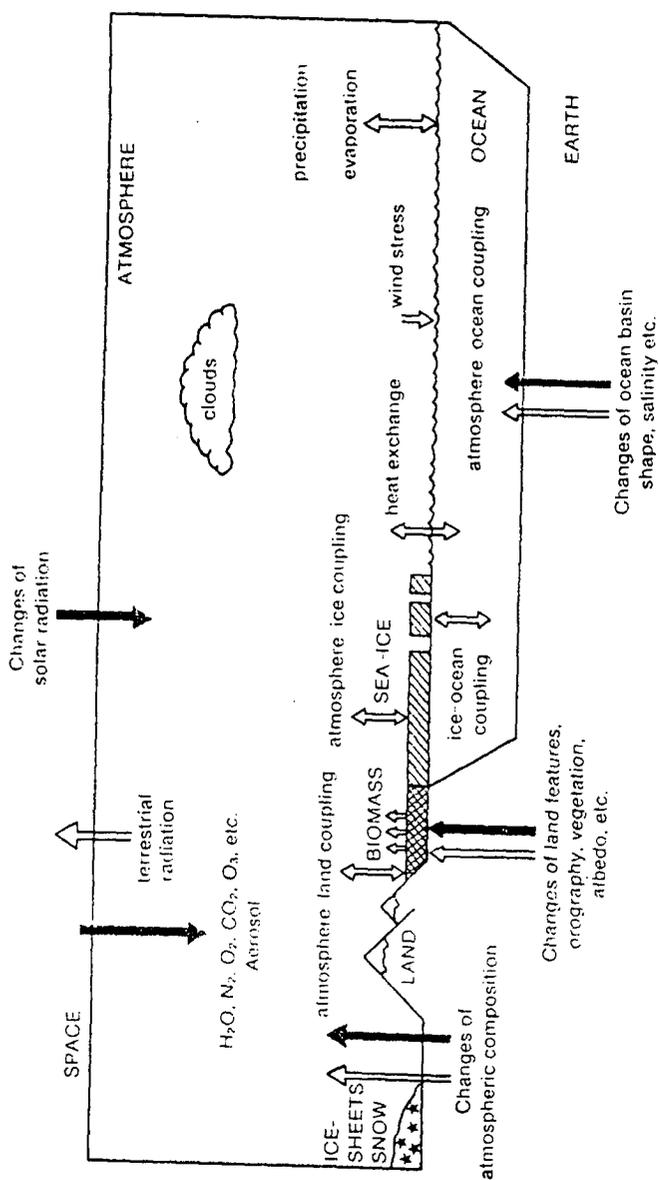


그림 1. 지구 기후시스템 구성의 개요도

의 증가에 따른 해수의 가열과 팽창, 빙하의 용융 등에 따라 주로 일어난다. 이러한 해수면의 변화를 지배하는 요인을 해역과 시기별로 정확히 분석하는 것은 어렵기 때문에 이의 예측과 추정에는 불확실성이 매우 많은 실정이다.

온실효과 기체의 배출을 효과적으로 억제하는 것을 전제로하여 계산한 해수면 상승에 관한 시나리오도 발표되었다. 그러나 온실효과 기체의 배출을 성공적으로 억제한다 할지라도 어느 정도까지는 해수면 상승이 계속될 것으로 보여진다. 위에서 언급한 내용은 해수면의 절대치만을 얘기한 것이고 실제로는 지역적인 지반의 침강이나 상승 등도 전체적인 해수면 변화에 추가되어야 할 것이다. 예를 들어 이집트의 나일강 하구에서는 델타지역의 침강율이 100 년간 20 ~ 40 cm이었으며, 태일랜드의 방콕은 이보다 훨씬 큰 연간 2 ~ 6 cm의 지하수에 의한 침강이 보고된바 있고, 일본의 니이가타에서는 천연가스의 시추로 인하여 15 년동안에 2 m의 해수면 상승이 있었다. 이러한 침강 및 상승은 전세계 해안지역의 커다란 관심사가 되고 있으며 해수면 변화를 고려할 때에는 반드시 이러한 점을 추가하여야 한다. 스칸디나비아의 일부 지역에서는 빙하작용으로 인한 반동으로 백년에 1 m 씩 해수면이 하강하고 있는 사례도 있다.

본 연구에서는 기후변화에 따른 해수면 변동을 파악하기 위하여 문헌조사 및 자료를 분석하고 토의하였다. 이 연구결과는 앞으로의 해수면 변동을 예측하는 데 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

## 제 2 장 토 의

### 1. 기후변화와 해양의 역할

해양은 지구표면의 71%를 차지하고 있으며 북반구에서는 66%, 남반구에서는 80% 이상에 달한다. 해양은 지구표면에 도달하는 태양복사 에너지의 절반 이상을 흡수, 저장하고 이를 해류를 통하여 재분배하며, 다시 수증기 형태로 열을 대기로 전달하고 또한 장파로서 직접 대기로 복사한다. 해양은 장기적, 또는 단기적으로 지구의 기후 변화 속도를 조절하는 기능을 갖고 있다. 해양에 축적된 열에너지는 해양의 상층수와 심층수에 축적되어 있고 상층수보다는 심층수의 열에너지 저장량이 크므로 지구 기후변화에 대한 해양의 역할은 단기적인 영향보다는 장기적인 영향이 더 크다. 해양의 상층수에 축적된 열에너지는 수십년의 시간 규모로 지구 기후변화에 영향을 주며, 전체 해양의 80%의 체적을 갖는 심층수의 열에너지는 백년 이상의 장기적 시간 규모로 기후변화에 영향을 준다. 따라서 장기간의 지구 기후변화는 열에너지를 공급, 분배하는 해수의 대순환에 크게 영향을 받고 있다.

최근의 연구결과는 해양의 상층수는 대기와 빠르게 반응하여 수온이 상승되고 빙하 등의 용융으로 인하여 극지역의 상층수 염분하강을 예측하고 있다. 해양대순환은 열대해역에서 흡수한 열에너지를 극지역으로 이동시키는 역할을 하는데 상층수의 수온 상승이나 염분 하강으로 인하여 극지역에서 심층수 형성이 차단될때 해양대순환에 큰 변화를 초래할 수 있으며 이 대순환의 변화는 연쇄적으로 대기순환 형태변화를 일으켜 지구 기후변화 형태를 바꿀 수도 있다. 이러한 현상은 지구의 온난화를 지연시킬 가능성은 있으나 더 큰 재앙을 초래하게 될지도 모른다.

온실효과 기체의 대기중 농도를 결정하는 중요한 역할을 해양이 수행하고 있다. 해양은 지구 표면의 가장 큰 열저장소이고 이산화탄소의 조절을 하고 있다. 지구 기후계의 각 영역별 탄소 저장량은 대기가 750 기가톤(giga ton;  $10^9$  tons), 육상 생물

과 토양이 2,000 기가톤인데 비하여 해양은 50,000 기가톤에 달한다(석, 1991). 해양에 저장되어 있는 탄소의 양은 육상의 동식물과 토양에 존재하는 총량의 25 배에 이르고, 해양에 저장되어 있는 탄소의 2%만 대기로 배출되어도 대기중의 이산화탄소의 농도는 2 배로 증가되며, 0.4%만으로도 지금까지 인류가 사용한 석탄·석유 등의 연소에 의하여 증가된 대기중의 농도인 70 ppm에 달하게 된다. 또한 해양은 매년 인간활동에 의해 생성되는 총량의 15 배에 달하는 양의 이산화탄소를 자연적인 해양과정을 통하여 대기에서 흡수하거나 대기로 배출하고 있다.

해양이 기후형성 및 변화에 영향을 주는 과정은 크게 3 가지로 구분할 수 있다. 첫째 해양이 대기와 온실효과 기체를 교환하는 과정, 둘째 해양과 대기가 열, 수증기, 운동량을 교환하는 과정, 셋째 해양이 표층에서 흡수한 열을 수직순환과 대류혼합으로 심층수에 전달하는 과정이다(그림 1). 해양과 대기간의 이산화탄소 교환은 대체로 평형상태를 이루며 실행된다. 이동량은 대기중의 이산화탄소 분압과 해양 표층수의 평형분압과의 차이에 의해 결정되며 이에 따라 지구 온난화의 진행속도가 영향을 받는다. 기후변화에 따른 대기와 해양간의 새로운 평형이 이루어 지는 기간은 대체로 2 년에서 3 년으로 알려져 있다. 이산화탄소 이외의 온실효과 기체인 이산화질소도 주로 해양으로부터 대기로 방출된다. 또한 구름형성에 중요한 역할을 하는 유화물도 화석연료 사용시 발생하는 양을 제외하고는 절반 이상이 해양으로부터 방출되고 있다.

지난 백년동안 해수면은 약 10 cm 정도 상승한 것으로 나타났다. 조석계를 사용하여 실제 해수면을 관측한 자료와 전지구적인 해수면 변동의 추세를 감안한 연구 결과에 따르면 후반 50 년간의 상승률은 거의 2 mm/yr이었고 전반 50 년간은 실제의 해수면 변동이 거의 없었다(Barnett, 1984). IPCC 보고에 따르면 1990년에서 2100년 사이에 30 ~ 110 cm 정도 지구 전체의 해수면 상승이 있을 것으로 예상하고 있다. 이러한 해수면 상승에 대한 예상치 중에서 2100년까지 65 cm의 값이 가장 유력한 것으로 알려져 있다. 이러한 해수면 상승의 직접적인 원인으로는 주로 해양 상층부의 열에 의한 팽창과 극지 및 고위도 지역의 빙하가 용융되어 일어난다.

## 2. 해수면 변화의 요인

지구상의 해수면은 해양의 형태와 크기, 해수의 양 그리고 해수의 평균밀도 등의 요소에 의하여 결정된다. 첫번째 요소는 기후변화에 의한 영향을 받지 않으나 뒤의 두 요소는 영향을 받는다. 따라서 해수면의 변화는 전지구적인 현상과 지역적인 현상의 두가지로 크게 나눌 수 있다. 전지구적인 현상은 지구상의 해양 전체가 가지고 있는 물의 체적의 변화에 따른 것이고, 지역적인 현상으로는 국지적인 지각의 침강이나 융기에 따른 변동이나 해류의 변화 또는 유전 개발과 지하수 채수 등의 인간의 활동에 의하여 발생한다. 지구온난화에 따른 해수면의 변화는 전자에 속한다고 할 수 있으며 과거 자료의 분석을 통하여 전지구적 해수면 상승을 추정하기 위해서는 각 지역 고유의 변화를 먼저 파악하여야 한다. 지난 간빙기(Interglacial Age)에는 기온이 지금보다 불과 1 ~ 2℃ 정도 높았는데 해수면은 7 m나 높았던 것으로 알려져 있다. 또 지금으로부터 5,000 ~ 8,000 년전의 기후온난기에 일본의 경우 해수면이 약 4 ~ 5 m 높아졌기 때문에 앞으로 같은 정도의 해수면 상승이 일어나는지의 여부를 알기 위해서도 해수면 변동의 주요 요인이 되는 지각변동을 고려하지 않으면 안된다. 해수면 변동의 요인을 정리해 보면 다음과 같다.

### 가. 해수 체적의 변화

#### 1) 전체 해수의 질량의 변화

주로 강수량과 육지로부터의 유입량에 의하여 변화되기 때문에 남극이나 그린랜드의 얼음, 또는 고산지대 등지에 있는 빙하 등의 증감에 따라 일어난다. 현재 지구상에 존재하는 모든 빙하가 전부 용융된다고 가정하면 해수면은 75 m 이상 상승할 정도의 양이다. 동부 남극대륙의 빙하만으로도 해수면은 60 m 이상 상승하게 되고, 서부 남극대륙과 그린랜드의 빙하의 양은 각각 해수면을 7 m 이상 상승시킬 수 있다(표 1). 고산지대 등의 빙하도 해수면을 30 ~ 60 cm 상승시킬 수 있는 양이다. 그러나 해양에 떠있는 빙산이나 얼음 등은 용해되어도 해수면이 상승하지는 않는다. Grove(1988)는 고산지대의 빙하가 지난 19세기 후반 50 년동안 실질적으로 감소하였

표 1. 눈, 얼음 및 빙하의 분포 (from Titus, 1989)

	Area ( $10^6 \text{ km}^2$ )	Ice Volume ( $10^6 \text{ km}^3$ )	Sea-Level Equivalent (m)
Land ice : East Antarctica	9.86	25.92	64.8
West Antarctica	2.34	3.40	8.5
Greenland	1.7	3.0	7.6
Small ice caps and mountain glaciers	0.54	0.12	0.3
			0.6
Permafrost (excluding Antarctica):			0.6
Continuous	7.6	0.03	0.08
Discontinuous	17.3	0.7	0.17
Sea ice: Arctic			
Late February	14.0	0.05	
Late August	7.0	0.02	
Antarctic			
September	18.4	0.06	
February	3.6	0.01	
Land Snow Cover			
N. Hemisphere			
Early February	46.3	0.002	
Late August	3.7		
S. Hemisphere			
Late July	0.85		
Early May	0.07		

음을 질량보존에 관한 분석과 빙하의 위치 추적에 근거하여 발표하였다. 그림 2에 빙하의 지난 300 년동안의 감소상황을 나타내었다. 가장 큰 고산지대 빙하의 감소가 일어난 시기는 1920년에서 1960년 사이였다.

## 2) 해수의 열팽창(thermal expansion)

해수는 가열되면 밀도가 감소되고 해수의 체적이 증가되는 역관계를 가지고 있다. 이와 같이 해수의 질량이 변하지 않고서도 수온이 상승하여 해수의 체적이 늘어나고 이에 따른 결과로 해수면이 상승하게 된다. 해양의 온난화는 표층에서 크고 수온의 상승은 위도가 증가함에 따라 함께 증가되나 대체로 북위 50 ~ 70°에서 최대가 된다. 해수의 염분 변화에 의한 밀도와 체적의 변화는 그다지 크지 않은 것으로 알려져 있다. 해수의 열팽창은 주로 해양의 상층부에서 일어나는데, 그림 3에서처럼 수심 500 m 이하의 중층부에서도 이러한 현상이 가끔 나타나는 것으로 알려져 있다 (Antonov, 1990). Thomson과 Tabata(1987)는 북동태평양에서 27 년간의 자료를 사용하여 해수의 열팽창에 의한 해수면 변동치를 조사하였는데 상승률은 0.93 mm/yr로 나타났다. 해수의 열팽창에 관한 연구를 위해서는 장기간에 걸친 해양조사 및 수치모델 등에 의한 방법이 널리 이용되고 있으나 아직은 초기 단계의 실정이기 때문에, 관측자료가 일부 해역에 국한되어 있으며 시·공간적으로 연속적인 자료가 절대 부족한 형편이다. 최근 세계 여러 나라가 참여하고 있는 해양대순환실험(WOCE, World Ocean Circulation Experiment), 열대해양대기실험(TOGA, Tropical Ocean and Global Atmosphere) 등은 이러한 문제를 다루기 위한 좋은 프로그램으로 평가된다.

## 나. 지각변동에 의한 상대적 해수면 변화

1) 빙하기, 간빙기의 변동에 의하여 대륙에 있는 얼음의 양이 변하고 이러한 무게의 변화에 따라 지각이 침몰하여 일어나는 해수면의 변화이다.

## 2) Plate 운동에 따른 지각변동

지구 표면을 덮고 있는 암석층으로 이루어진 여러 개의 판(板)이 서로 영향을 미침에 따라 표층부의 각종 구조 변동 및 지진 등의 현상을 일으키는데 지역에 따라 지각이 침강하는 곳도 있고 반대로 융기하는 곳도 있다. 이러한 지각 변동에 따라

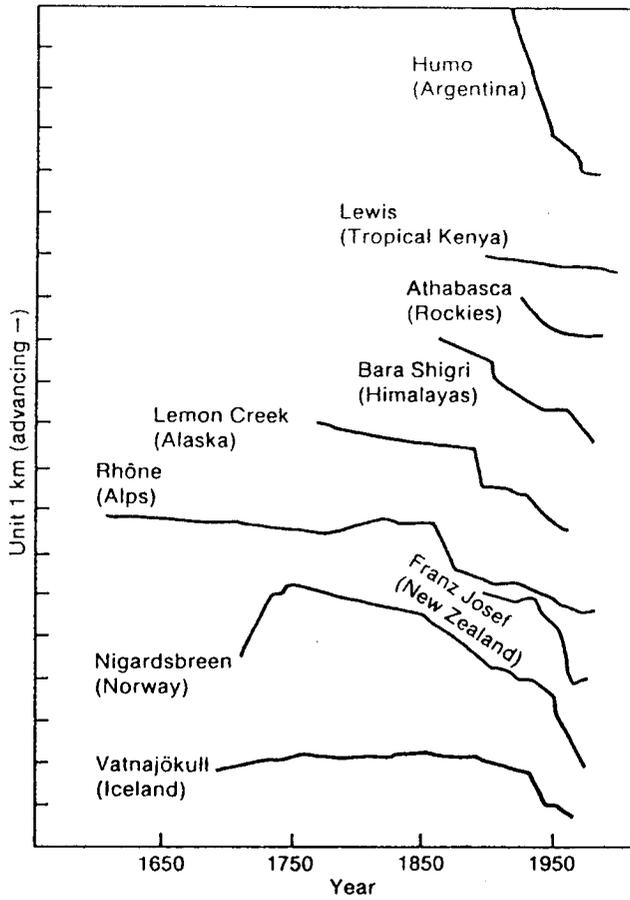


그림 2. 고산지대 빙하의 지난 300 년간 감소상황 (from Grove, 1988)

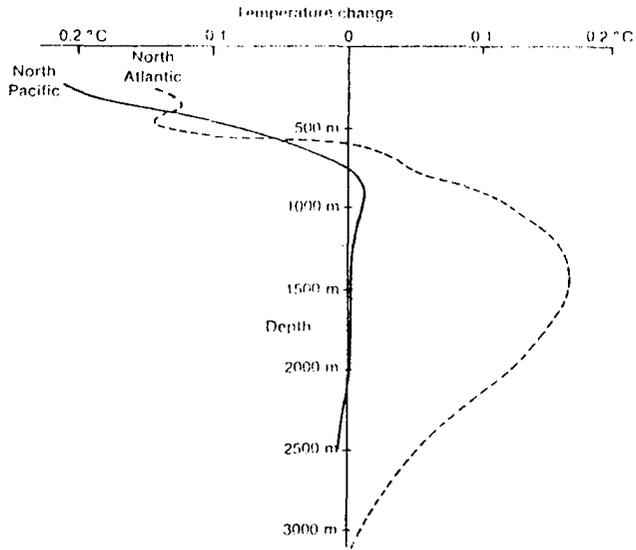


그림 3. 해양에서 1957년과 1981년 사이의 수심별 수온변화 (from Antonov, 1990)

해수면 변동이 있게 된다.

#### 다. 해류에 수반되는 해수면의 변동

대서양의 Gulf Stream이나 태평양의 Kuroshio처럼 크고 흐름이 강한 해류가 있는 경우, 대양의 서쪽해안의 해수면은 동쪽해안보다 2 m 정도 높게 나타나는 데 이러한 해수면의 변동은 해류의 변화에 따라 달라질 수 있다.

### 3. 과거 100 년간의 전지구적 해수면의 변화

온실효과 기체는 19세기 이래 증가되어 왔으며 이에 따른 전지구적 기온의 상승 경향도 꾸준히 지속되어 오고 있다. 과거 100 년간에 0.5℃ 정도의 온도 상승이 있는 것으로 보고되고 있다. 이러한 기온 상승과 함께 전지구적 규모로 해수면의 상승도 일어난 것으로 추정된다. 알프스나 북미대륙의 빙하는 계속 줄어들고 있기 때문에 이 줄어든 양 만큼의 해수가 증가된 것으로 볼 수 있다.

전세계의 검조소 해수면 기록을 분석하여 지역적인 지각변동(지진 등)에 의한 영향 및 20 년 이하의 단기간 관측점 등을 제거하여 전지구적 평균의 해수면 변화를 계산하는 연구가 수행되었다(Gornitz *et al.*, 1982; Gornitz and Lebedeff, 1987; Barnett, 1988). 이러한 연구의 결과에 의하면 1880년부터 1980년까지 과거 100 년간 지구 전체의 평균 해수면은 12 cm 정도 상승한 것으로 나타났다(그림 4). Gornitz와 Lebedeff(1987)의 조석관측 정점 130 개의 분석결과는 해수면 상승이 대체로 직선적이고 상승률은 0.9 ~ 1.1 mm/yr이었다. Barnett(1988)는 155 개의 관측 정점 자료를 분석하였는데, 해수면 상승이 처음에는 변동이 그다지 크지 않으나 1910년부터 1980년 사이는 급격한 해수면 상승을 보이며 상승률은 1.7 mm/yr로 나타났으며 전체 기간의 상승률은 1.15 mm/yr로 계산되었다. 해수면 상승 추정치의 오차는 주로 지각변동 등에 의한 육지의 수직방향의 움직임 제거하는 작업의 어려움에 원인이 있다.

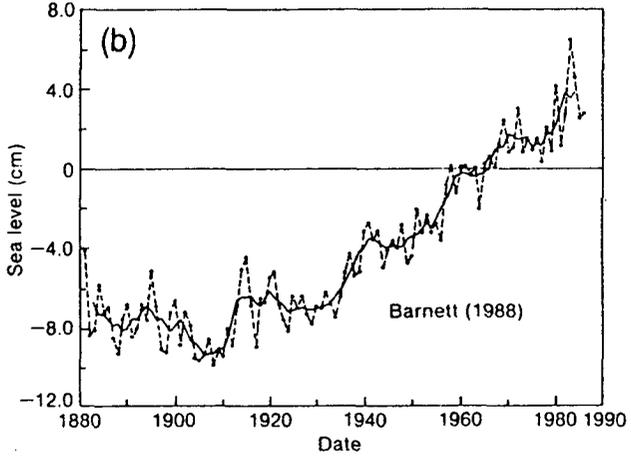
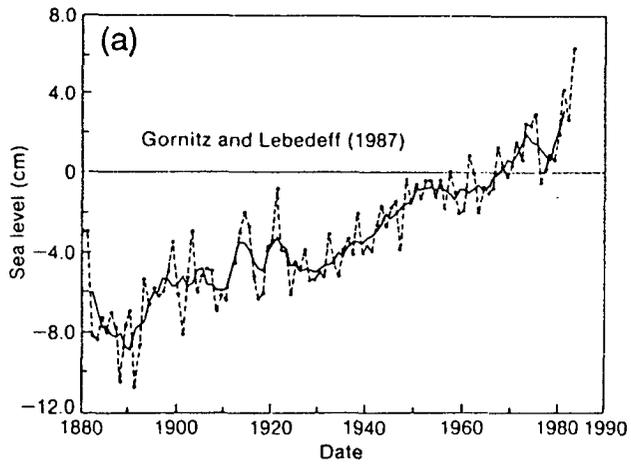


그림 4. 지난 100 년간의 해수면의 변화 (a) Gornitz and Lebedeff(1987)  
 (b) Barnett(1988)

이러한 해수면의 상승은 지구의 기온 상승과 밀접한 관계를 갖는 것으로 보여진다. 이 해수면 변동의 원인은 해양 상층부 해수의 열팽창에 의한 체적의 변화와 고산지대의 빙하와 그린랜드의 빙하 등이 녹아서 발생한 것으로 추정하고 있다(표 2). 이 추정치에 의하면 남극대륙의 빙하는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 1880년에서 1985년 사이의 해수의 열팽창에 의한 해수면 상승치의 수치모델 계산결과는 약 2 ~ 6 cm로 나타났다(Wigley and Raper, 1990). 이러한 원인 이외에도 지각의 운동이나 강으로부터 유입되는 퇴적물, 해류의 변동성 및 지역적인 해상풍의 강도에 의해서도 비록 크지는 않지만 해수면의 변동이 일어날 수 있다. 대서양의 버뮤다 해역에서 수온과 염분의 관측 결과에 의하면 4°C 등온선의 수심이 아래로 100 m 정도 이동한 사실(즉 상층부의 수온이 상승하였음)을 알 수 있었고 이는 해수면 변화가 해수의 열팽창에 의한 것임을 보여주고 있다(Roemmich and Wunsch, 1984).

지난 100 년간(1880년 - 1980년)의 해수면 변동 추세를 그림 5와 표 3에 각각 나타내었다. 지구 온난화와 관련된 정확한 추세를 파악하기 위하여 장기간(6,000년)의 해수면 변동 성분을 제거하였다. 장기간의 해수면 변동 성분을 제거한 지난 100 년간의 해수면 상승은 1 mm/yr의 비율인 10 cm로 계산되었다. 이 결과는 일부 지각 변동이 심한 지역을 제외하고 지구상의 거의 대부분의 지역에서 타당한 값으로 나타났다. 그리고 과거 100 년간 육상에 설치되어 있는 댐 등에 의하여 저장된 물은 해수면을 1 ~ 2 cm 정도 하강시킨 것으로 보이나 반면에 육지에 있는 지하수의 수위가 내려가서 해수면이 수 cm 정도 상승하였기 때문에 이러한 육상에 있는 저수지나 지하수에 의한 해수면 변동은 서로 상쇄되어 거의 영향이 없다고 할 수 있다.

표 2. 지난 100 년간의 요인별 해수면 변동치 (from Warrick and Oerlemans, 1990)

	LOW	BEST ESTIMATE	HIGH
Thermal expansion	2	4	6
Glaciers/small ice caps	1.5	4	7
Greenland Ice Sheet	1	2.5	4
Antarctic Ice Sheet	-5	0	5
TOTAL	-0.5	10.5	22
OBSERVED	10	15	20

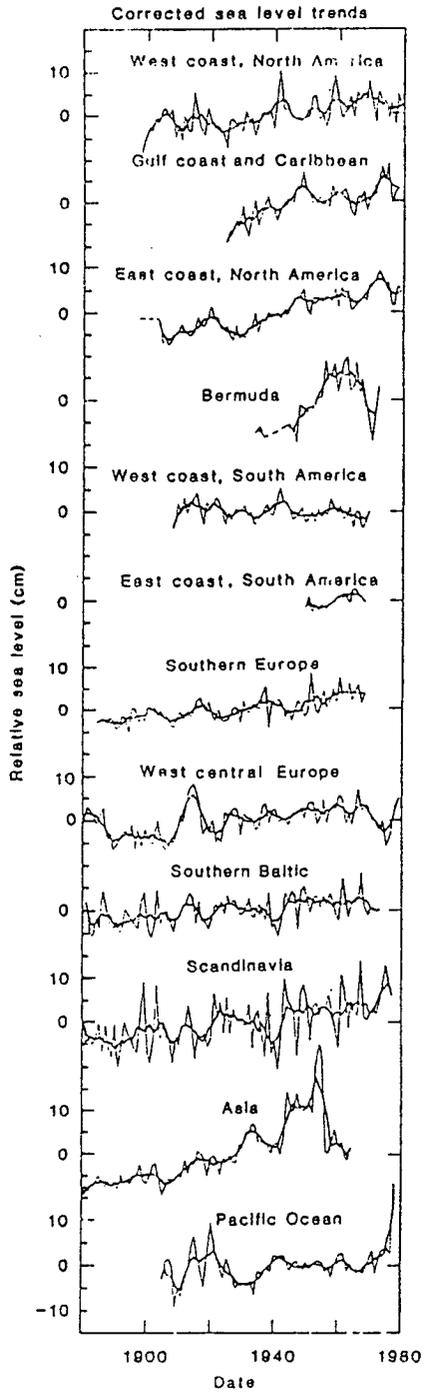


그림 5. 세계 각 지역의 지난 100 년간 해수면 변동치  
(from Roemmich and Wunsch, 1984)

표 3. 지난 100 년간(1880 - 1980)의 해수면 변동 추세

Region	Sea level trend, 1880 to 1980			Corrected sea level trend, 1880 to 1980		
	Num- ber of sta- tions	Linear trend (cm/100 years)	95 percent confldence limit (cm/100 years)	Num- ber of sta- tions	Linear trend (cm/100 years)	95 percent confldence limit (cm/100 years)
West coast, North America	16	10	2	1	8	3
Gulf Coast and Caribbean	6	23	4	4	16	5
East coast, North America	32	30	2	30	15	2
Bermuda	1	26	16	1	20	16
West Coast, South America	8	19	31	2	-3	3
East coast, South America	5	4	11	2	16	11
Africa	2	32	31	0		
Southern Europe	15	32	2	7	7	2
West central Europe	7	13	2	5	4	2
Southern Baltic	21	4	2	14	5	2
Scandinavia	47	-37	3	10	10	3
Asia	9	4	3	2	22	4
Australia	9	13	3	0		
Pacific Ocean	15	19	3	6	6	4
Global mean	193	12	1	86	10	1

#### 4. 장래 해수면 상승의 추정

기후변화의 추정에서 하나의 큰 문제는 해양의 열용량에 의한 온난화 시기의 어긋남이다. 해수는 거대한 열용량을 갖고 있으며 가열 냉각에 대한 온도 변화를 완화시킨다. 따라서 지구규모의 온난화의 경우에도 해양 상층부의 가열에 대하여 수온 상승을 억제하도록 작용하기 때문에 단시간의 물리현상과는 달리 수십년 또는 그이상의 시간폭을 갖게 된다. 또한 장래의 해수면 상승은 온실효과 기체의 대기중 농도, 기후변화의 양상, 반응시간 등에 따라 달라지기 때문에 정확한 예측은 매우 어려운 실정이다.

과거 100 년간의 지구 평균 해수면의 상승은 10 ~ 20 cm이었다. 그동안 전지구 평균기온은 약 0.5℃ 상승하고 있다. 이 두개의 값사이에 어떤 비례관계가 성립한다고 가정하면 이산화탄소가 2 배가 되는 시점의 기온 상승의 추정치가 2 ~ 4℃ 사이라고 보면(그림 6), 해수면의 상승은 불확실성을 감안하여도 40 ~ 160 cm의 범위가 될 것으로 추정된다. 일부 학자들은 이산화탄소의 대기농도가 2050년까지 50% 증가하고 2075년에는 2 배가 될 것으로 계산한다.

21세기 말까지의 해수면 상승은 대략 다음과 같이 구성되는 것으로 많은 학자들이 분석하고 있다.

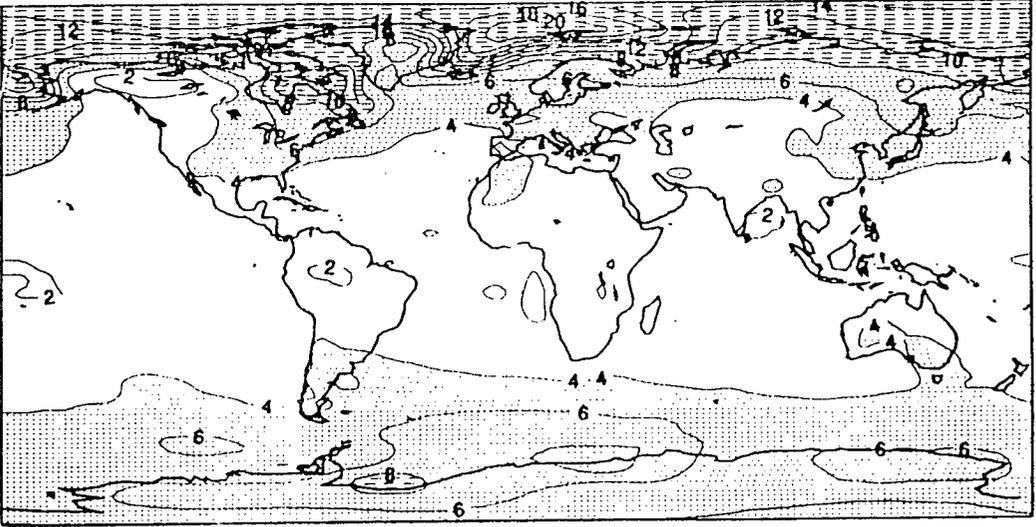
- |                 |   |             |
|-----------------|---|-------------|
| (1) 해수의 열팽창     | : | 15 ~ 30 cm  |
| (2) 산악 빙하의 용융   | : | 10 ~ 30 cm  |
| (3) 그린란드 빙하의 용융 | : | 10 ~ 30 cm  |
| (4) 남극 빙상의 변화   | : | -10 ~ 80 cm |

---

계	:	25 ~ 170 cm
---	---	-------------

위의 분석에서 남극 빙하의 영향에 의한 변화의 폭이 큰 이유는 다음과 같다. 현재 남극대륙의 빙하는 사실상 전지역이 0℃ 이하이고 기온이 다소 상승하여도 전체적으

(a) DJF 2 X CO<sub>2</sub> - 1 X CO<sub>2</sub> SURFACE AIR TEMPERATURE: GFHI



(b) JJA 2 X CO<sub>2</sub> - 1 X CO<sub>2</sub> SURFACE AIR TEMPERATURE: GFHI

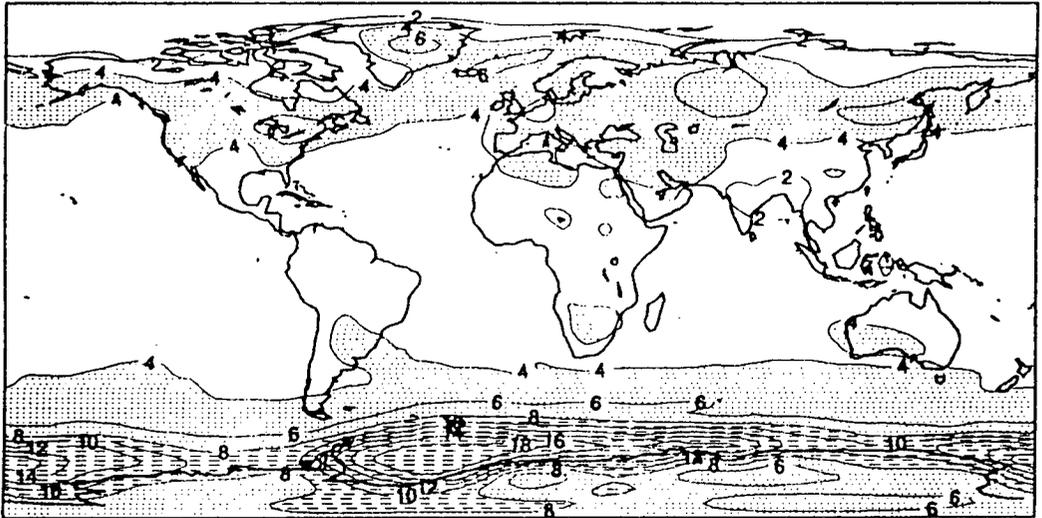
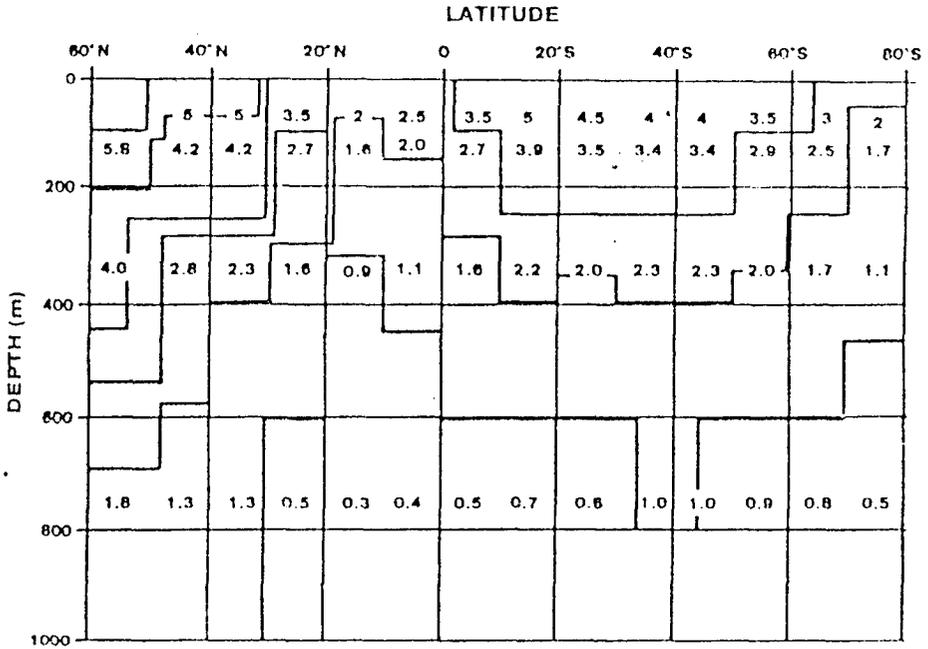


그림 6. 미국 GFDL 모델에 의하여 이산화탄소가 2 배가 될때의 평형기후와 현재의 이산화탄소에 의한 기후와의 겨울철 기온의 차(from Mitchell, 1990)

로는 녹지 않기 때문이다. 한편 0℃ 이하에서 기온이 상승하여도 포화 수증기의 양은 증가하기 때문에 남극대륙의 강설량은 증가하게 된다. 동시에 증발량도 증가하지만 수치모델의 계산에 의하면 강설량이 더 크기 때문에 결국 남극의 빙하는 발달하게 된다. 이러한 현상이 100 년 정도 계속되면 오히려 해수면이 10 cm 정도 하강하게 된다. 그러나 남극의 빙하는 다른 이유에 의하여 감소할 가능성도 있다. 남극대륙상의 얼음은 빙하나 빙산으로 흘러나가 바다에 떠다니는데 이 흘러나가는 속도가 온난화의 진행에 따라 빨라질 가능성도 있다. 이러한 가능성도 여러가지 불확실성이 많기 때문에 일반적으로 해수면 변화의 예상치는 25 ~ 80 cm 정도로 보는 것이 타당하다.

남극의 빙하에 관한 Thomas(1985)의 연구는 2050년까지 기온이 3℃ 상승한다고 가정했을 때 13 ~ 80 cm의 해수면 상승이 예상되나 경우에 따라서는 1 ~ 2.2 m까지도 해수면이 상승할 가능성이 있다고 보고하였다. 그러나 미국과학원 남극위원회에서는 Thomas의 연구를 면밀히 검토한 결과 해수면 상승이 1 m에 달할 가능성도 있지만 오히려 10 cm 정도 하강할 수도 있다고 보고 가장 합리적인 해수면 상승은 0 ~ 30 cm의 범위일 것으로 결론을 내린바 있다.

Revelle(1983)의 수치모델 결과는 해수의 수심별, 위도별 수온 상승이 2050년에서 2060년 사이에 4.2℃에 이를 것으로 예측하였고(그림 7) 해양 상층부의 열팽창에 의하여 해수면이 30 cm 상승할 것으로 나타났다. 산악지대의 빙하에 의한 해수면 상승은 2080년까지 12 cm 일것으로 추정하였다. 이 결과는 그린란드 빙하의 중요성에 대하여 발표한 최초의 연구 결과이었다. Meier *et al.* (1985)은 주로 빙하의 용해에 관하여 분석을 실시하였으며, 다음 세기인 21 세기 말까지 0.5℃의 기온 상승이 빙하의 용해에 의하여 2.8 cm의 해수면 상승을 일으키고, 1.5 ~ 4.5℃의 기온 상승은 8 ~ 25 cm의 해수면 상승이 생길 것으로 계산하였다. 한편 Hoffman *et al.* (1986)은 산악지대의 빙하에 의한 해수면 상승은 2100년까지 12 ~ 38 cm에 이를 것으로 보았으며 기온 상승폭은 2.3 ~ 7.0℃로 추정하였다.



Source: Revelle, 1983.

그림 7. 해양의 위도와 수심에 따른 수온의 변화(Revelle, 1983)

Lacis *et al.*(1981)의 연구결과에 의하면 2050년까지 기온이 1.0 ~ 2.6℃의 범위로 올라가고 열팽창에 의한 해수면 상승은 12 ~ 26 cm에 이를 것으로 보고 있고, 2100년까지는 지구온난화가 2.3 ~ 7.0℃로 진행되고 이에 따라 해수면은 28 ~ 83 cm 상승하게 된다고 발표하였다.

그림 8은 기온이 3℃ 상승할 때를 가정하고 수치모델을 이용하여 해수면 변동을 예측한 결과이다(Church *et al.*, 1991). 이 결과에 의하면 해양에서의 파동(Kelvin 또는 Rossby Wave)에 의한 해수 가열의 재분배가 이루어지게 되고 바람이 변하지 않는 경우 적도지방에서 해수면 상승이 크고 극지방에서는 작게 나타나는 경향을 보이고 있다.

표 4에 위에서 살펴 본 여러 학자들의 2100년까지의 해수면 변동의 요인별, 연도별 추정치를 요약하여 나타내었다. 이 표에 나타난 추정치는 온실효과 기체 배출에 대한 방지 노력을 고려하지 않고 지구 온난화가 현상태로 진행될 것으로 가정하여 산출한 값이다. 미국과학원에서는 2100년까지의 해수면 상승을 50 ~ 200 cm로 추정하였고, Hoffman *et al.*(1986)은 56 ~ 368 cm으로 비교적 높은 추정치를 보이나 2025년 까지는 그들의 추정치가 상당히 낮은 것을 볼 수 있다.

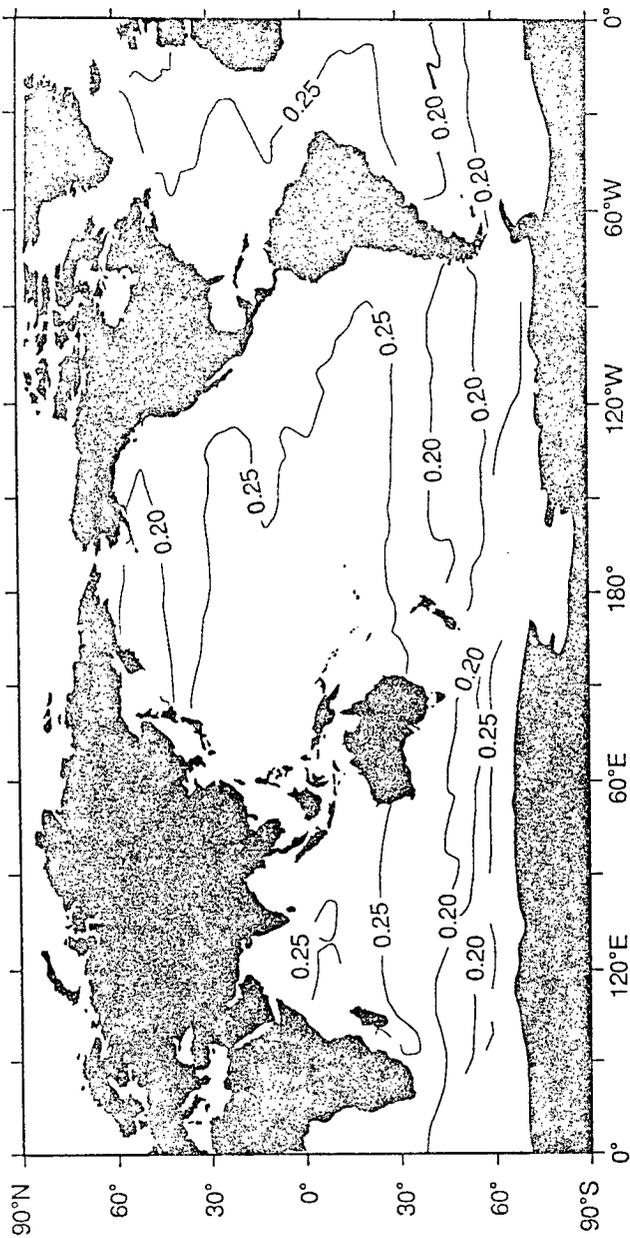


그림 8. 지구의 대기온도가 3°C 증가할 경우의 해수면 변동치 분포 (from Church et al., 1991)

표 4. 해수면 상승의 요인별 추정치 (from Warrick and Oerlemans, 1990)

	CONTRIBUTING FACTORS				TOTAL RISE <sup>a</sup>		
	Thermal Expansion	Alpine	Greenland	Antarctica	Best Estimate	Range <sup>f</sup>	To (Year)
Gornitz (1982)	20	20 (Combined)			40		2050
Revelle (1983)	30	12	13		71 <sup>b</sup>		2080
Hoffman et al. (1983)	28 to 115	28 to 230 (Combined)				56 to 345 26 to 39	2100 2025
PRB (1985)	<sup>c</sup>	10 to 30	10 to 30	-10 to 100		10 to 160	2100
Hoffman et al. (1986)	28 to 83	12 to 37	6 to 27	12 to 220		58 to 367 10 to 21	2100 2025
Robin (1986) <sup>d</sup>	30 to 60 <sup>d</sup>	20±12 <sup>d</sup>	to +10 <sup>d</sup>	to -10 <sup>d</sup>	80 <sup>i</sup>	25 - 165 <sup>i</sup>	2080
Thomas (1986)	28 to 83	14 to 35	9 to 45	13 to 80	100	60 to 230	2100
Villach (1987) (Jaeger, 1988) <sup>d</sup>					30	-2 to 51	2025
Raper et al. (1990)	4 to 18	2 to 19	1 to 4	-2 to 3	21 <sup>g</sup>	5 to 44 <sup>g</sup>	2030
Oerlemans (1989)					20	0 to 40	2025
Van der Veen (1988) <sup>h</sup>	8 to 16	10 to 25	0 to 10	-5 to 0		28 to 66	2085

<sup>a</sup> - from the 1980s

<sup>b</sup> - total includes additional 17cm for trend extrapolation

<sup>c</sup> - not considered

<sup>d</sup> - for global warming of 3.5°C

<sup>f</sup> - extreme ranges, not always directly comparable

<sup>g</sup> - internally consistent synthesis of components

<sup>h</sup> - for a global warming of 2-4°C

<sup>i</sup> - estimated from global sea level and temperature change from 1880-1980 and global warming of 3.5±2.0°C for 1980-2080

## 제 3 장 결 론

### 1. 해수면 변화 요약

- 현재의 지구 온난화 현상은 해수의 열에 의한 팽창, 고산지대 빙하의 용융을 일으키고 극지방의 빙원이 녹아서 해양으로 유입되기 때문에 해수면 상승을 가속화 시키게 된다.
- 지구적 규모의 해수면 상승은 과거 100 년간 10 ~ 15 cm이었다. 해양과 빙하에 관한 연구결과는 지난 세기의 0.4℃ 기온상승에 따른 이러한 해수면 상승이 모델에 의해 계산된 결과와 잘 일치하고 있음을 보여 준다. 그러나 원인과 결과에 대한 명확한 관련성을 밝히지는 못했다.
- 지구 온난화에 따른 해수면 상승은 2025년까지 10 ~ 20 cm, 2100년까지는 50 ~ 200 cm에 이를 것이다. 이중에서 해수의 열팽창에 의한 해수면 상승은 2100년까지 25 ~ 80 cm에 달하고, 그린란드와 고산지대의 빙하에 의한 영향은 10 ~ 30 cm에 달할 것이다. 남극대륙 빙하의 용융에 의한 영향은 0 ~ 100 cm 정도가 유력하나 다음과 같은 가능성도 존재한다. 첫째는 강설량이 증가하여 오히려 남극의 빙원이 커지게 되어 다른 해수면 상승요인과 상쇄되는 경우와, 둘째는 빙하가 용융되고 깨지는 속도가 빨라져 해수면 상승이 2 m까지 상승하게 되는 경우이다.
- 앞으로 300년 또는 500년 후에 서부 남극대륙의 대빙원이 용융된다면 지구의 해수면은 추가로 6 m 정도 상승하게 된다.
- 특정지역에서의 지각변동에 의한 지반의 침강과 융기현상은 반드시 그 지역의 해수면 예측에 고려하여야 한다.

## 2. 대책 및 건의

여러 나라의 과학자들은 향후 2100년까지 지구온난화의 진행에 따른 해수면 상승을 대략 65 cm 정도로 예측하고 있다. 그러나 전세계적으로 해안지역은 이미 인구밀집, 환경의 오염, 과잉개발 그리고 지반 침강 등의 여러 문제점 뿐만이 아니라 기후변화와 해수면 상승이라는 심각한 문제점을 안고 있다. 연안역 개발에 따른 제반 문제점들은 전세계 모든 지역에서 지역적으로 또는 각 나라별로 공통적으로 나타나고 있다. 현재의 연안역 관리(Coastal Zone Management) 개발 현황은 인력, 자금, 목표, 조직 그리고 법적인 측면에서 나라별로 많은 차이를 보이고 있다. 지구의 온난화 추세가 계속되고 온실효과 기체의 배출이 성공적으로 억제된다고 하더라도 어느 정도까지는 해수면이 상승할 것으로 예상되기 때문에 전지구적인 차원에서 이에 대한 인류의 생존을 위한 대비책을 조속히 마련할 필요성이 있다.

전세계 인구의 약 20%가 연안에 살고 있는 것으로 보고되어 있고, 우리나라의 경우에도 해안지역은 대체로 인구가 밀집되어 있으며 경제적으로도 산업활동이 활발하며 환경학적인 면에서도 매우 민감한 지역이다. 일정 규모의 해수면 상승은 우리나라의 해안지역, 특히 남해와 황해의 경우에 많은 문제점을 야기시키고 환경의 파괴를 초래하게 될 것이다. 따라서 해안지역의 국가 기간 산업시설을 포함한 여러 기능의 재배치와 환경과 산업과의 균형있는 관계를 수립하는 일이 매우 중요하다.

우리나라의 경우 기후변화와 관련하여 장기간의 자료에 의한 분석은 현재로서는 불가능하나 전지구적인 해수면의 상승은 한반도의 경우에도 거의 비슷하게 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서 국내의 일부 기관(수로국, 한국해양연구소 등)에서 수행중인 한반도 주변과 특히 남극기지에 대한 해수면 변동 관련 관측업무의 확장 및 이에 대한 예산의 지원과 정책적 뒷받침이 절실히 요청된다. 뿐만 아니라 해안지역의 물리적 기반을 이루고 있는 조석의 통계적 특성, 폭풍우에 의한 해일, 파도, 하천으로 부터의 담수 유입량 그리고 지하수의 수위 등에 대한 연구와 분석 작업도 꾸준히 추진하여야 할 것이다.

정확한 해수면 상승을 예측하기 위해서는 관측장비의 개선과 함께 해양의 주요 특성중의 하나인 수온의 수직구조를 파악하는데 노력을 기울여야 한다. 수온의 수직구조는 기후변화에서 해양이 수행하고 있는 역할을 파악하는 가장 중요한 자료중의 하나이며 해양-대기에 관한 기후모델의 기초 입력자료로 사용된다. 따라서 우리나라 주변의 해양특성조사의 관측 횟수를 증가시키고 모든 관측자료를 데이터 베이스화 하여 활용도를 높이고 관련기관 사이의 협력을 더욱 강화하여야 한다.

국제적으로는 지구온난화에 따른 해수면 상승의 피해를 최소화하기 위해서는 해양의 물리적 현상에 대한 정확한 이해가 선행되어야 한다. 따라서 국제적인 조사기구에 가입함은 물론 협력관계를 강화하기 위하여 국제공동연구 프로그램(WOCE, TOGA, JGOFS 및 남극연구 등)에 적극 참여하여 자료 및 정보를 공유함으로써 지구환경에 대한 이해를 높여 나가야 한다. 이를 위해서는 인공위성 고도계를 사용한 측정법(그림 9)을 포함한 전지구적 자료의 수집 또한 절실히 필요한 것으로 생각된다.

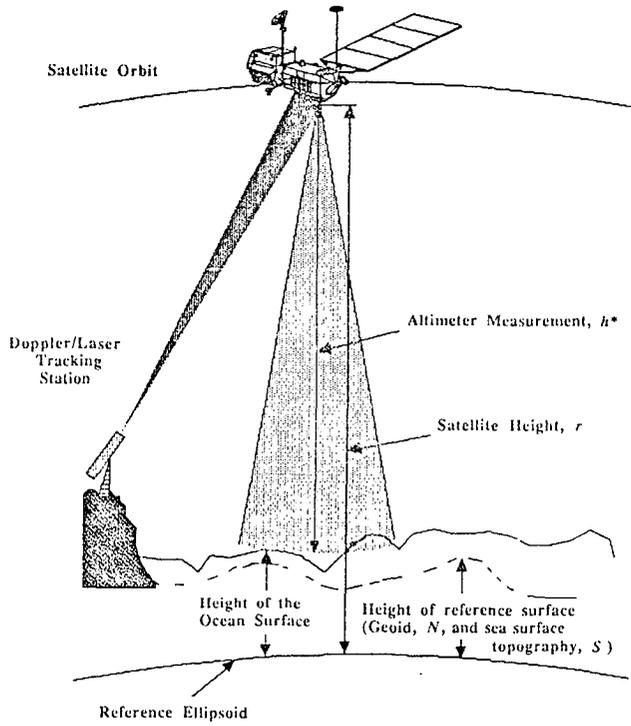


그림 9. 인공위성 고도계에 의한 해수면 변동 관측 개요도

## 참 고 문 헌

- 석문식, 1991, 지구온난화에 따른 해양환경 변화와 그 대책. 지구온난화가 한국에 미치는 영향과 그 대응책에 관한 심포지움, 한국과학기술원, 111pp.
- 日本海洋學會, 1991, 海と地球環境. 東京大學 出版會, 409pp.
- Antonov, J. I., 1990, Recent climatic changes of vertical thermal structure of the North Atlantic and North Pacific Oceans. *Meteorol. i Hidrolog.*, 4.
- Barnett, T. P., 1984, The Estimation of Global Sea-Level Change: A Problem of Uniqueness. *J. Geophys. Res.* 89, 7980-7988.
- Barnett, T. P., 1988, Global Sea Level Change, in NCPO, Climate variations over the past century and the greenhouse effect. A report based on the First Climate Trends Workshop, 7-9 September 1988, Washington D.C. National Climate Program Office/NOAA, Rockville, Maryland.
- Church, J. A., J. S. Godfrey, D. R. Jackett, and T. R. McDougall, 1991, A model of sea level rise caused by ocean thermal expansion. *J. Climate* 4, 438-456.
- Folland, C. K., T. R. Karl, and K. YA. Vinnikov, 1990, Observed Climate Variations and Change, in *Climate Change The IPCC Scientific Assessment* (Eds. J. T. Houghton, G. J. Jenkins, and J. J. Ephraums). Cambridge University Press, 365pp.
- Gornitz, V., Lebedeff, S., and J. Hansen, 1982, Global Sea-Level Trend in the Past Century. *Science*, 215, 1611-1614.
- Gornitz, V., and S. Lebedeff, 1987, Global Sea Level Changes during the Past Century, in *Sea-Level Fluctuation and Coastal Evolution* (Eds. D. Nummedal, O. H. Pilkey and J. D. Howard). SEPM Special Publication No. 41.
- Grove, J. M., 1988, *The Little Ice Age*. Metuen, London, 498pp.

- Hoffman, J. S., Keyes, D., and J. G. Titus, 1983, *Projecting Future Sea-Level Rise*. Washington, D.C.
- Hoffman, J. S., Wells, J., and J. G. Titus, 1986, *Future Global Warming and Sea-Level Rise*, in *Iceland Coastal and River Symposium '85 Reykjavik* (Eds. G. Sigbjarnarson and P. Brunn ). National Energy Authority.
- IPCC, 1991, *Climate Change: Science, Impacts and Policy*. Proceedings of the Second World Climate Conference, Cambridge University Press, 578pp.
- Jaeger, J., 1988, *Developing policies for responding to climatic change: A summary of the discussions and recommendations of the workshops held in Villach 1987 and Bellagio 1987*. WMO/TD No. 225.
- Koblinsky, C. J., P. Gaspar, and G. Lagerloef, editors, 1992, *The future of spaceborne altimetry: Oceans and climate change*. Joint Oceanographic Institutions Incorporated, Washington, D.C., 75pp.
- Meier, M. F., *et al.*, 1985, *Glaciers, Ice Sheets, and Sea Level*. National Academy Press, Washington, D.C.
- Mitchell, J. F. B., S. Manabe, V. Meleshko, and T. Tokioka, 1990, *Equilibrium Climate Change - and its implications for the Future*, in *Climate Change The IPCC Scientific Assessment* (Eds. J. T. Houghton, G. J. Jenkins, and J. J. Ephraums). Cambridge University Press, 365pp.
- Oerlemans, J., 1990, *A projection of future sea level*. *Climatic Change*, 15, 151-174.
- Polar Research Board (PRB), 1985, *Glaciers, Ice Sheets and Sea Level: Effect of a CO<sub>2</sub>-induced Climatic Change*. Report of a Workshop held in Seattle, Washington, September 13-15, 1984, U.S. DOE/ER/60235-1.
- Raper, S. C. B., R.A. Warrick, and T. M. L. Wigley, 1990, *Global sea level rise: past and future*. in *Proceedings of the SCOPE Workshop on Rising Sea Level and Subsiding Coastal Areas, Bangkok 1988* (Ed. J. D. Milliman), John Wiley and Sons.

- Revelle, R., 1983, Probable Future Changes in Sea Level Resulting from Increased Atmospheric Carbon Dioxide, in *Changing Climate*. National Academy Press, Washington, D.C.
- Roemmich, D. and C. Wunsch, 1984, Apparent Changes in the Climatic State of the Deep North Atlantic Ocean. *Nature*, 307, 447-450.
- Thomas, R. H., 1985, Responses of the Polar Ice Sheets to Climatic Warming, in *Glaciers, Ice Sheets, and Sea Level* (Eds. Meier *et al.*). National Academy Press, Washington, D.C.
- Titus, J. G., 1989, The Causes and Effects of Sea Level Rise. in *The Challenge of Global Warming* (Ed. D. E. Abrahamson), Island Press, 358pp.
- Thomson, R. H., and S. Tabata, 1987, Steric height trends of ocean station PAPA in the northeast Pacific Ocean. *Marine Geodesy*, 11, 103-113.
- Van der Veen, C. J., 1988, Projecting future sea level. *Surv. in Geophys.*, 9, 389-418.
- Wigley, T. M. L., and S. C. B. Raper, 1990, Future changes in global-mean temperature and thermal-expansion-related sea level rise. in *Climate and Sea Level Change* (Eds. R. A. Warrick, T. M. L. Wigley), Cambridge University Press, Cambridge.
- Warrick, R. A., and J. Oerlemans, 1990, Sea Level Rise. in *Climate Change The IPCC Scientific Assessment* (Eds. J. T. Houghton, G. J. Jenkins, and J. J. Ephraums), Cambridge University Press, 365pp.