

# IPCC 제5차 기후변화 평가보고서(AR5) WG I /기후변화의 물리학적 근거 - 정책 결정자를 위한 요약서 소개 -



윤 용 남 |

(주)이산 상임고문 / 고려대 명예교수  
ynyoon@korea.ac.kr

기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 1988년에 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)와 유엔환경계획(UN Environment Program, UNEP)에 의해 공동으로 설립되어 기후변화에 관한 객관적인 정보를 정책결정자와 기술자 및 일반인들에게 제공하고, 인간 활동으로 인한 기후변화의 위험성을 이해시키며, 예상되는 기후변화의 영향과 적응 및 완화를 위한 대안들과 관련하여 출간된 각종 문헌자료들을 종합적으로, 객관적으로, 그리고 투명하게 평가하는 것을 주요 목적으로 하고 있다 (윤용남, 2009. 3).

IPCC는 기후변화와 관련하여 여러가지 종류의 보고서를 출간하고 있다. 이들 보고서들은 기존의 과학적 근거를 가지는 문헌자료를 토대로 하여 여러 학문분야 및 여러 지역 전문가들의 기여를 바탕으로 작성하고 있으며, 전문가집단과 195개 IPCC 회원국 차원의 이중 검토절차를 거쳐 최종적으로 보고서가 완성되어 표준도서로 활용되고 있다. 이들 보고서중 가장 중요하고 종합적인 보고서는 기후변화평가보고서(Assessment Report, AR)로서

1988년 IPCC창립이후 제1차 기후변화평가보고서(First Assessment Report, FAR)를 1990년에 발간하였으며, 제2차 평가보고서(Second Assessment Report, SAR)는 1995년에, 제3차 평가보고서(Third Assessment Report, TAR)는 2001년에, 그리고 제4차 평가보고서(4th Assessment Report, AR4)는 2007년에 출간하는 등 대략 5~6년을 주기로 기후변화평가보고서를 출간해왔다 (윤용남, 2009. 3).

IPCC의 기후변화평가보고서는 IPCC의 운영국(Bureau)아래에 운영되고 있는 3개 실무그룹(Working Groups : WG I, WGII, WGIII)이 각각의 고유영역별로 작성하는 전문보고서(full report)와 그로부터 작성한 정책결정자를 위한 요약서(Summaries for Policymakers, SPM) 및 기술자를 위한 요약서(Technical Summaries, TS)로 구성되며, 실무그룹별 요약보고서를 종합적으로 요약하여 통합보고서(Synthesis Report)를 작성하게 된다. 통합보고서는 정책결정자를 위한 요약서(SPM)와 좀더 길게 요약된 보고서(Longer Report)로 나누어 작성된다. 3개 실무그룹 중 WG I의 고유영역은 기후변화의 물리학적 근거(Physical Science Basis)이고, WGII는 기후변화의 영향, 적응 및 취약성(Impacts, Adaptation and Vulnerability)을, 그리고 WGIII는 기후변화의 완화(Mitigation)를 고유 취급 영역으로 삼고 있다 (윤용남, 2010. 4).

2007년 제4차 기후변화평가보고서(AR4)가 출간

된 이후 IPCC는 제28차 총회(Budapest, 2008년 4월)에서 제5차 기후변화평가보고서(Fifth Assessment Report, AR5)를 2014년까지 완성하기로 결정하고 실무그룹별로 집필계획에 따라 집필이 진행되어 왔으며, WG I의 AR5보고서는 집필이 제일 먼저 완료되어 2013년 9월 27일 개최된 IPCC/WGI의Stockholm 회의에서 인준받았으며 IPCC 홈페이지로부터 획득이 가능하다. AR5의 나머지 보고서의 인준 일정계획은 다음과 같다.

보고서 별	인준 예정 일정
WG I 보고서(Stockholm, Sweden)	2013년 9월 27일
WG II 보고서(Yokohama, Japan)	2014년 3월 31일
WG III 보고서(Berlin, Germany)	2014년 4월 12일
Synthesis Report (Copenhagen, Denmark)	2014년 10월 31일

AR5의 WG I 전문보고서는 총 14개 장으로 구성되어 있으며, 2014 페이지에 달하는 내용이 수록되어 있으며, 정책 결정자를 위한 요약서(SPM)와 기술자를 위한 요약서(TS)도 별도로 작성되어 있다 (IPCC, 2013.9).

본고에서는 AR5를 위한 WG I 보고서 중 “정책 결정자를 위한 요약서(SPM)”의 내용을 간추려 소개함으로써 AR4이후 “기후변화의 물리학적 근거”에 대한 추가적인 발견과 앞으로의 전망을 정리해 보고자 한다.

## 1. 서론

기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)의 제5차 기후변화평가보고서(5th Assessment Report, AR5)를 위한 실무그룹 I (Working Group I, WG I)의 작업결과는 기후시스템에 대한 각종 관측자료와 고 기후학적 기록, 그리고 각종 기후과정에 대한 이론적 연구와 기후모델을 이용한 모의를 통한 여러가지 독자적인 과학적 분석결과에 대한 문헌정보를 근거로 하여 기후변화에 대한 새로운 증거들을 고려하고

있다. WG I은 IPCC의 제4차 평가보고서(AR4)의 기후변화의 물리학적 근거(Physical Science Basis)에 관한 이론을 바탕으로 하여 그 이후에 이루어진 여러 새로운 연구의 결과를 추가함으로써 기후변화의 물리학적 근거를 보다 과학적으로 규명코저 노력하였다. IPCC의 기후변화에 대한 제5차 평가를 위한 한가지 중요한 요소로 최근인 2012년에 IPCC가 발간한 특별보고서(Special Report)인 「Managing the Risks of Extreme Events to Advance Climate Change Adaptation(SREX)」(IPCC, 2012/윤용남, 2012)는 변화하는 기후현상과 극한 기후값에 대한 정보를 제공하는 아주 중요한 근거를 내용으로 하고 있으며 AR5의 작성에 크게 기여하고 있다.

본 정책결정자를 위한 요약서(Summary for Policymaker, SPM)는 IPCC의 제1실무그룹(WG I)의 완성본 보고서의 구조를 그대로 따르고 있으며, 주요 항목별로 핵심적인 결론과 평가의 방법론적 근거를 제시하고 있다.

금번의 기후변화에 대한 평가에서 밝혀진 주요 사실들의 확실성 정도는 주요사실에 대한 과학적 이해정도에 대한 저자들의 평가를 기반으로 하여 신뢰도의 정성적인 수준으로 표시하였으며, 가능한 경우에는 확률론적으로 정량적인 신뢰도(from exceptionally unlikely to virtually certain)로 표시하기도 하였다. 발견된 사실의 타당성에 대한 신뢰도는 그 사실을 인정하게 하는 증거의 유형이라든지 양적, 질적수준, 일관성, 그리고 일치성 정도 등을 기준으로 하였다. 밝혀진 사실별 불확실성에 대한 정량적 척도의 확률론적 추정에는 관측 자료의 통계학적 분석이나 모델에 의한 추정 혹은 전문가 판단 등에 의한다. 본 SPM에서 사용된 사실별 신뢰도에 대한 전문가의 판단기준으로는 다음과 같은 기준(확률,%)이 사용되었다.

- Virtually certain(실질적으로 확실함) 99~100%
- Extremely likely(극히 있음직함) 95~100%
- Very likely(대단히 있음직함) 90~100%
- Likely(있음직함) 66~100%
- About as likely as not(있음직할 수도 있고 아닐 수도 있음) 33~66%
- Unlikely(있음직하지 아니함) 0~33%
- Extremely unlikely(극히 있음직하지 아니함) 0~5%
- Very unlikely(대단히 있음직하지 아니함) 0~10%
- Exceptionally unlikely(지극히 있음직하지 아니함) 0~1%

## 2. 기후시스템에서 관측된 변화들

기후시스템에 대한 관측은 직접측정이나 위성이나 기타 플랫폼으로 부터의 원격탐사에 기초한다. 관측장비 시대의 전 지구 규모의 관측은 기온과 기타 기후변수를 위해 19세기 중반에 시작되었으며, 보다 종합적이고 다양한 관측결과들은 1950년 이후에서야 확보가 가능하다. 고 기후학적 자료의 재구성은 백년에서 수백 년을 거슬러 올라갈 수도 있으며, 이는 대기나 해양, 빙권(氷圈, cryosphere), 지구표면에서의 장기간에 걸친 변동과 변화에 대한 종합적인 해석을 가능하게 해준다.

기후시스템의 온난화(warming)는 명백한 사실이며, 1950년대 이래 여러 가지 관측된 변화는 지난 수십 년에서 수천 년에 걸쳐 전례가 없는 엄청난 변화들이다. 대기와 해양은 온난화되었고, 눈과 얼음의 양은 감소되었으며, 해수면은 상승하였고, 온실가스의 농도는 크게 증가하였다.

## 2.1 대기(Atmosphere)

최근 30년간의 지구표면에서의 연(Annual)평균기온과 10년(Decadal)단위 평균기온은 <그림1-(a)>에서 보는 바와 같이 1850년 이후의 어떤 10년 기간보다도 계속적으로 상승 되어 왔다. 북 반구에서는 1983~2012년이 지난 1400년 기간 동안 가장 온난한(따뜻한) 30년이었을 가능성이 있다.

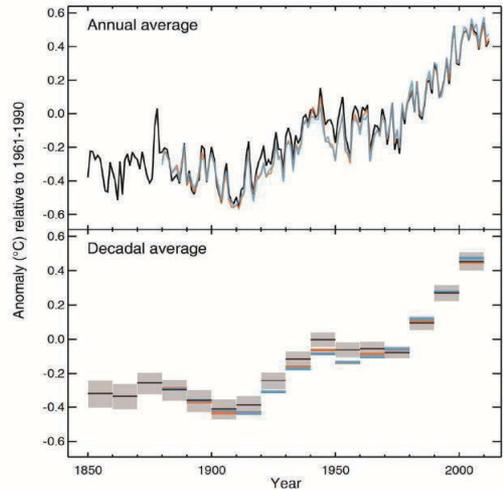


그림 1-(a). Observed globally averaged combined land and ocean surface temperature anomaly, 1850~2012

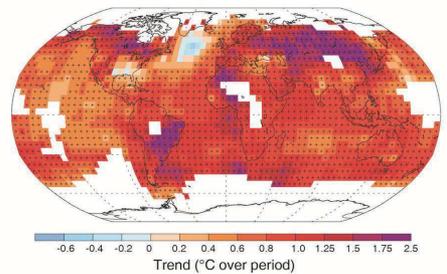


그림 1-(b). Observed change in average surface temperature, 1901~2012

- <그림 1-(a)>은 1850~2012년 기간 동안 지구표면 및 해양표면에서 관측된 전 지구적인 평균기온의 1961~1990년 평균기온 대비 편차의 크기(anomalies)를 표시하고 있다. <그림 1-(a)>의 윗 그림은 연 평균기온을 표시하고 있고, 아랫 그림은 10년 단위 평균기

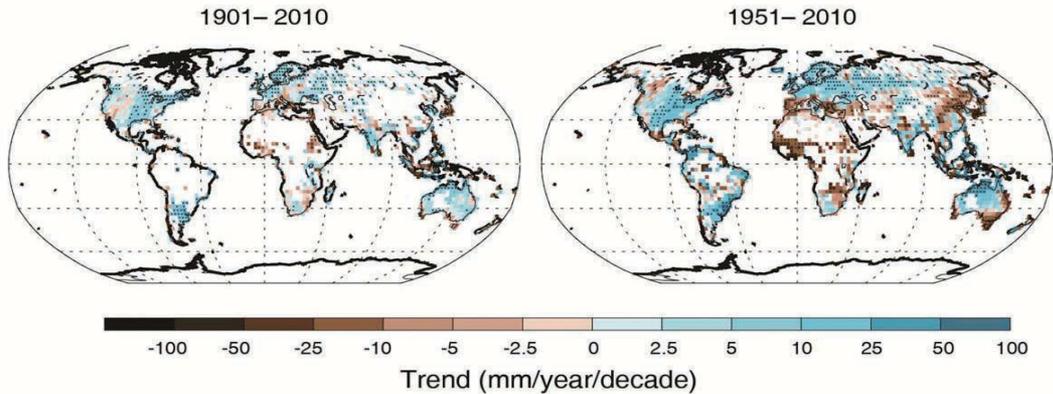


그림 2. Observed change in precipitation over land

온을 표시하고 있으며, 두 경우 모두 지구 및 해양표면의 평균기온이 점점 상승해 가고 있음을 보여주고 있다.

- <그림 1-(b)>는 1901~2012년에 관측된 지구표면의 기온변화정도를 표시하고 있으며, 1961-1990년 평균기온에 대비할 때 지구의 거의 모든 지역에 걸쳐 지구표면이 온난화를 겪었음을 알 수 있다.
- 한편, <그림 2>는 1901-2010년 기간과 1951~2010년 기간 동안에 관측된 전 지구적인 연평균 강수량의 변화를 표시하고 있으며, 최근에 가까운 강수량의 통계치(1951-2010년)가 과거 통계치(1901-2010년)의 경우보다 강수량의 증가를 보이고 있음을 알 수 있다.

## 2.2 해양(Ocean)

해양의 온난화는 기후시스템에 저장되는 에너지를 증가시키게 되며, <그림 3-(c)>에서 보는 바와 같이 1971-2010년 기간 동안 축적된 에너지의 약 90%이상은 해양의 온난화로 인한 것이다.

상층부 해양(0~700m)에서는 1971-2010년 기간 동안 온난화가 진행되었음이 거의 확실하며, 1870년대에서부터 1971년 사이에도 온난화는 계속 진행되었을 것으로 보고 있다.

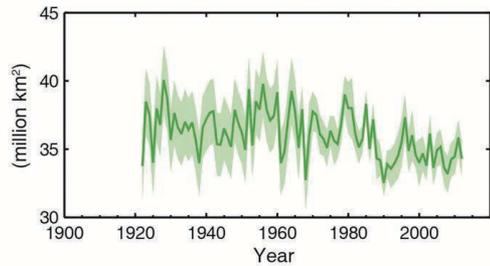


그림 3-(a). Northern Hemisphere spring snow cover

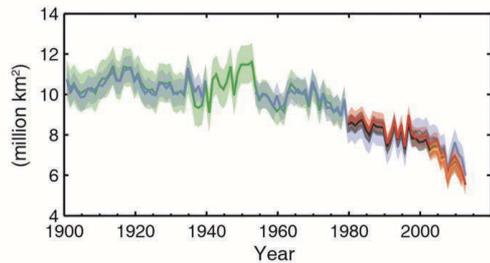


그림 3-(b). Arctic summer sea ice extent

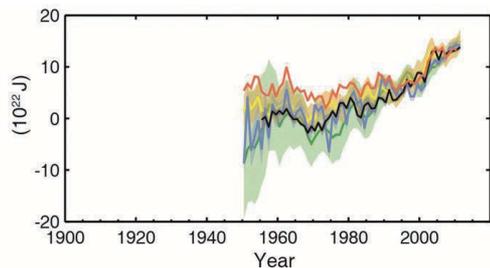


그림 3-(c). Change in global average upper ocean heat content

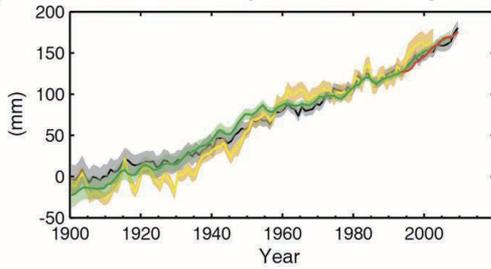


그림 3-(d). Global average sea level change

- 전 지구적으로 보면, 해양의 온난화는 해수면 가까이에서 가장 커서 해수면으로부터 75m 깊이까지 1971-2010년 기간 동안 매 10년에 약 0.11(0.09~0.13)℃가 상승하였을 것으로 보인다.
- 1957년부터 2009년까지 해수면 아래 700m-2000m 사이에서 해양의 온난화가 계속되었을 것으로 보이며, 해수면 아래 2000m 이하에서의 수온변화에 대한 전 지구적인 평가를 위한 1992-2005년 기간 동안의 관측 자료도 충분히 존재한다. 그러나 이 기간 동안 해수면 아래 2000-3000m에서의 수온변화 경향에 대한 관측자료는 없으나, 3000m로부터 해양의 바닥까지도 해양의 온난화는 있었을 것으로 판단되며, 남해양(Southern Ocean)에서의 온난화가 가장 컸을 것으로 추측하고 있다.
- 기후시스템에서의 60%이상의 순 에너지 증가는 1971-2010년의 40년간 상층부 해양(0~700m)에 축적되었으며, 30% 정도는 700m 이하에 저장되었다. 이 기간 동안의 상층부 해양에서의 지구평균 열 에너지(upper ocean heat content)의 증가는 <그림 3-(c)>에서 보는 바와 같이  $17 \times 10^{22}$  Joule 정도(2010년 기준)가 될 것으로 추정된다.

### 2.3 빙권(氷圈, Cryosphere)

최근 20년에 걸쳐 그린란드와 남극지방의 빙판(ice sheet)의 질량은 감소되어 왔고, 빙하 또한 전 세계적으로 수축이 계속되어 왔으며, 북반구의 봄눈의 적설량(그림 3-(a))과 북극해의 여름철 해빙(sea ice)의 범위(그림 3-(b)) 또한 계속 감소되어 왔다.

- 전 세계에 걸친 빙하로부터의 얼음의 평균 손실률은 1970-2009년 기간의 경우 226 Giga-tonne(Gt)/yr(1Gt=10억ton), 1993-2009년 기간의 경우는 275Gt/yr 정도였을 가능성이 대단히 크다(very likely). 참고로, 100Gt/yr 되는 얼음의 손실로 인한 전 지구의 평균 해수면 상승량은 약 0.28mm/yr가 될 것으로 보고 있다.
- 북극해와 그린란드의 여름해빙의 평균 손실률은 1992-2001년 기간의 34Gt/yr에서 2002-2011년 기간의 215Gt/yr로 급격하게 증가하였을 가능성이 대단히 클 것으로 보고 있으며, <그림 3-(b)>에서 보는바와 같이 여름해빙의 범위는 1980년 이후 급격히 감소하고 있다.
- 남극지방 빙판으로부터의 연 평균 얼음 손실률은 1992-2001년 기간의 30Gt/yr로부터 2002-2011년 기간의 147Gt/yr로 증가하였을 가능성이 있다(likely).

### 2.4 해수면(Sea Level)

19세기 중엽이후의 해수면 상승률은 지난 2000여년 동안의 평균 상승률보다 대단히 커진 것으로 믿어지고 있다. 1901-2010년 기간 동안 전 지구적인 평균 해수면 상승량은 <그림 3-(d)>에서 보는 바와 같이 약 190mm(0.19m) 정도로 보고 있다.

- 계측된 해수면 자료에 의하면 지난 2000년에 걸쳐 비교적 낮은 물의 평균 해수면 상승에서 높은 상승률로의 전환이 19세기말부터

20세기 초 사이에 있었음이 거의 확실시되며, 전 지구적인 평균 해수면 상승률은 20세기 초 이후 꾸준히 증가해가고 있는 것으로 보인다(likely).

- 전 지구적인 해수면의 평균상승률은 1901-2010년 기간에는 1.7mm/yr, 1971-2010년 기간에는 2.0mm/yr, 1993-2010년 기간에는 3.2mm/yr 정도였을 것으로 평가되고 있다(very likely). 조위계라든지 위성계 측자료에 의하면 최근에 가까운 기간의 해수면 상승률이 커지고 있음을 보여주고 있다.
- 1970년대 초 이후 온난화로 인한 빙하의 질량손실과 바닷물의 열팽창은 전 지구적인 평균 해수면 상승률의 약 75%를 차지하는 것으로 알려져 있다. 1993-2010년 기간 동안의 지구의 평균 해수면 상승량은 바닷물의 열팽창에 의한 1.10mm/yr, 빙하체적의 축소로 인한 0.76mm/yr, 그린란드 빙판의 감소로 인한 0.33mm/yr, 남극빙판의 축소로 인한 0.27mm/yr, 육지지역의 물 체적 증가에 의한 0.38mm/yr 등을 합친 2.84mm/yr로 보고 있다.

## 2.5 탄소와 기타 생물지구화학적 사이클 (Carbon and other biogeochemical cycle)

이산화탄소(CO<sub>2</sub>)와 메탄(CH<sub>4</sub>), 아산화질소(N<sub>2</sub>O) 등의 대기권 내 농도는 지난 최소 80여만년 동안 전례 없는 수준으로 증가되었다. 이산화탄소의 농도는 일차적으로는 화석연료의 사용, 이차적으로는 토지이용변화에 따른 온실가스의 배출로 인해 산업혁명 이전시대때 보다 약 40%정도 증가한 것으로 보인다. 바다는 인간 활동으로 방출된 이산화탄소의 약30%를 흡수해 온 것으로 보며, 이로 인해 바닷물은 산성화가 계속 진행되고 있다.

- 이산화탄소, 메탄, 아황산질소 등 온실가스

의 대기권내 농도는 각종 인간 활동으로 인해 1750년 이후 증가되어왔다. 2011년 이들 온실가스의 농도는 각각 391ppm, 1,803ppb, 324ppb로 산업혁명 이전 농도보다 약 40%, 150%, 20%정도 각각 높아진 것으로 보고 있다.

- 화석연료의 연소와 시멘트 생산으로 인한 연간 CO<sub>2</sub>배출량은 2002-2011년 기간 동안의 평균치가 8.3GtC/yr이었고, 2011년의 배출량은 9.5GtC로서 1990년의 배출량보다 약 54%정도 많았다. 인간 활동에 의한 토지이용변화로 생긴 2002-2011년 기간 동안에 걸쳐 평균한 연간 순 CO<sub>2</sub>배출량은 0.9GtC정도이다. 여기서, 1GtC=1Gigatonne of Carbon=10<sup>15</sup>grams of carbon이다.
- 1750년부터 2011년까지 화석연료 연소와 시멘트 생산을 통한 대기 중으로의 CO<sub>2</sub>배출량은 365GtC이며, 산림벌채나 기타 토지이용 변화로 인해 배출된 CO<sub>2</sub>량은 180GtC로 인간 활동으로 인한 전체 CO<sub>2</sub>배출량은 545GtC의 규모이다. 이중 240GtC는 대기 중에 축적되어있고, 155GtC는 해양에, 그리고 나머지 150GtC는 육지지역의 생태계에 축적되어있다.
- CO<sub>2</sub>의 배출로 인한 바닷물의 산성화는 PH 값의 감소로 정량화 된다.

## 3. 기후시스템의 최근변화에 대한 이해

기후시스템에 있어서의 최근 변화에 대한 이해는 관측이나 피드백 과정에 대한 조사 및 모델에 의한 모의 등을 통해 이루어진다. 최근의 변화를 모의하기 위한 각종 기후 모델의 능력에 대한 평가는 모의과정 초기의 기후시스템의 구성성분의 상태와 모델을 가동하는데 사용되는 자연적

및 인위적 강제력에 대한 면밀한 고려를 필요로 한다. AR4와 비교하면 현재의 보다 세밀한 장기간의 관측 자료와 개량된 기후모델에 의해 기후시스템의 더 많은 구성요소에서 탐색된 여러 가지 변화에 미치는 인간의 영향을 밝혀내는 것이 가능하게 되었다.

기후시스템에 미치는 인간의 영향은 분명하다. 이는 대기 중의 증가하는 온실가스농도와 태양의 복사강제력(radiative forcing), 관측된 온난화, 그리고 기후시스템에 대한 이해로부터 분명해진다.

### 3.1 기후모델의 평가

AR4이후 기후모델들은 크게 개선되었다. 개선된 모델들은 수십 년에 걸쳐 관측된 대륙규모의 지표면 기온 패턴과 성향을 재현할 수 있으며, 20세기 중반 이후의 급격한 온난화와 대규모 화산폭발 후의 급격한 냉각현상도 재현할 수 있다.

- 장기 기후모델에 의해 모의된 1951년부터 2012년까지의 지구규모의 평균 지표면 기온의 변화성향이 관측된 변화성향과 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 그러나, 10~15년(1998-2012년)의 짧은 기간에 걸쳐서는 관측된 성향과 모의된 성향사이에 상당한 차이가 있음이 발견되었다.
- 지역규모에서의 지표면 기온을 모의하는 기후모델의 능력에 대한 신뢰도는 광역의 경우에 비해 낮은 것이 사실이나 지역규모의 지표면 기온은 AR4에서보다 훨씬 더 정확하게 모의될 수 있다는 확신을 가질 수 있다.
- AR4이후 극한일기 및 기후사상에 대한 평가기술은 획기적으로 발전되었으며, 20세기 후반부에 걸친 극한 날씨의 발생빈도에 대한 모의성향은 대체로 관측치들과 일관성이 있는 결과를 보이고 있다.
- AR4이후 대륙규모의 강수량 패턴에 대한 모의에 있어서도 상당한 발전이 있었다.

- 몬순이나 엘니뇨-남방진동(ENSO)등과 같은 중요한 기후현상들은 이제 기후모델들에 의해 잘 재현되고 있으며, 이는 AR4 이후에 다단계모델(multi-model)에 의한 모의기법의 발전에 근거하고 있다.
- 기후모델들은 AR4에서보다는 더 많은 구름과 에어로졸(aerosol, 분무)과정과 그들의 상호작용을 포함하고 있다. 그러나, 모델에서의 이들 과정에 대한 정량화에는 아직 한계가 있다.
- 여러 모델들이 1961-2005년 기간에 걸친 상층부 해양(0-700m)에서의 열에너지 변동을 나타내는 관측자료를 잘 재현해 주고 있다.

### 3.2 기후시스템 반응의 정량화

기온의 변화라든지, 기후 피드백, 지구의 에너지 수지에 있어서의 변화 등에 대한 관측과 모델링에 의한 연구는 과거와 미래의 태양 복사강제력에 반응하는 지구온난화의 규모에 대한 확신을 제공하고 있다.

- 평형상태의 기후민감도(Equilibrium Climate Sensitivity)는 여러 세기에 걸친 일정한 복사강제력에 대한 기후시스템의 반응을 정량화하는 것으로써 대기중 이산화탄소의 농도가 두 배로 증가함에 따라 생기는 평형상태에서의 지구표면의 평균기온 변화로 정의된다. 평형기후민감도는 1.5℃에서 4.5℃의 범위에 있는 것으로 추정되고 있으며, 1℃보다 작을 가능성은 극히 희박(extremely unlikely)하고 6℃보다 클 가능성은 대단히 희박(very unlikely)한 것으로 보고 있다. 따라서, 평가된 하한치는 AR4에서의 2℃보다 작을 것으로 추정되거나 상한치는 6℃로 동일하다.
- 지구차원의 기후변화의 율과 크기는 태양복

사강제력과 기후 피드백, 그리고 기후시스템에 의한 에너지의 저장(축적)에 의해 결정된다. 최근 수십년에 대한 이들 인자의 추정치는 평가된 평형기후민감도의 범위와 잘 일치하고 있다.

- 과도적인 기후반응(transient climate response)은 10년 혹은 100년 시간스케일에 걸쳐 증가하는 태양복사강제력에 대한 기후시스템의 반응을 정량화하게 되며, 대기중 CO<sub>2</sub>농도가 매년 1%씩 증가하는 시나리오 하에서 두 배로 높아질 때의 지구표면의 평균기온의 변화로 정의된다. 이러한 과도기후반응은 1°C~2.5°C의 범위에 있을 것으로 보며, 3°C보다 클 가능성은 극히 적을 것으로 추정된다.
- 과도기후반응은 누적탄소배출량과 관계를 가진다. 기후시스템의 누적탄소배출량(cumulative carbon emissions)에 대한 과도기후반응(transient climate response)의 정량화를 표시하는 TCRE(transient climate response to Carbon Emissions)는 대기 중으로 배출된 1,000GtC당 발생하는 지구표면 평균기온의 변화량으로 정의되며, 1,000GtC당 0.8°C~2.5°C의 범위에 있는 것으로 추정되고, 기온이 첨두치에 도달할 때까지의 누가배출량 약 2,000GtC 까지 대해서 적용가능하다.

### 3.3 기후변화에 대한 탐색과 속성

대기와 해양의 온난화와 전 지구적 물 순환에 있어서의 변화, 눈과 얼음의 감소, 평균해수면의 상승, 그리고 각종 기후학적 극한치들의 변화 등에 대한 인간의 영향은 분명한 것으로 밝혀졌다(그림 4 참조). 이와 같은 인간의 영향에 대한 증거들은 AR4이후 널리 드러났으며, 인간의 영향이 20세기 중반 이후 관측된 온난화의 가장 결정적인 원인이 되어 왔음은 지극히 있을법한 일이라 생각된다.

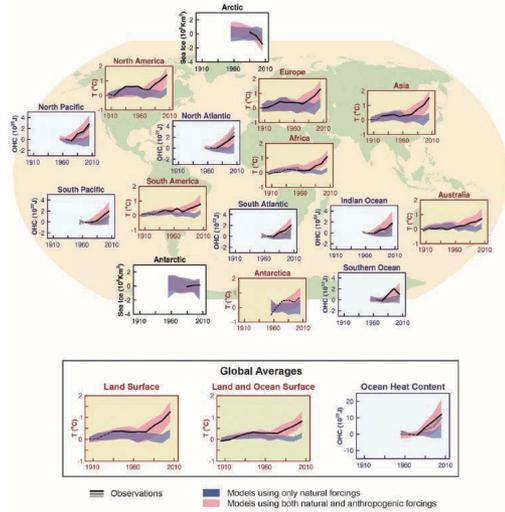


그림 4. Spatial and temporal variations of mean temperature, sea ice area and ocean heat contents

- <그림 4>는 대기권(atmosphere)과 빙권(cryosphere)과 해양권(ocean)에서의 3개 기후관련지표를 기준으로한 관측치와 모의치를 비교하고 있다.

6개 대륙별 육지표면의 기온변화는 노랑색 바탕에 표시되어 있고, 북극과 남극지방의 9월 해빙(海氷)의 표면적은 흰색바탕에, 그리고 주요 해양권 상층부의 열에너지 함량(ocean heat content, OHC)도 각각의 해양권 위치의 흰색바탕에 표시되어있다. 전 지구적인 평균치의 경년별 변화는 특정기간별 평균치로부터의 편차(anomalies)의 향으로 표시하고 있는데 지구표면 기온의 경우는 1880~1919년 기간을, 9월 해빙 표면적의 경우는 1979~1999년 기간을, 열에너지 함량의 경우는 1960~1980년 기간을 기준으로 하였다. 사용된 모든 시계열은 10년 단위의 평균값이며, 10년 기간의 중앙년에 해당하는 값을 플롯하였다. <그림 4>의 개별그림에서 실선은 해당 관측치의 신뢰도가 높은 경우의 관측치를 표시하고 있는데 반

해 점선으로 표시한 부분은 관측치의 신뢰도가 낮은 경우이다. 또한, 실선이나 점선주위에는 모의에 사용된 기후모델에 의해 산정된 모의치의 5%~95%신뢰대(confidence interval)가 표시되어 있다. 청색 신뢰대는 자연적인 복사강제력(natural radiative forcing)만을 고려하여 모의한 결과이고 분홍색 신뢰대는 자연적 및 인위적 복사강제력을 함께 고려하여 모의한 결과를 표시한다. 이들 모의에 사용된 기후모델은 CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) Multi-model이다. <그림 4>의 아랫부분에는 육지표면과 육지 및 해양표면에 대한 전 지구적인 평균기온과 해양 열에너지 함량의 10년 단위기간별 변화가 표시되어있다.

- <그림 4>의 대륙별(Europe, Asia, Africa, North America, South America, Antarctica, Australia) 육지표면 기온은 대략 1970년대 이후 급격히 상승하고 있고,
- 북극(Arctic)과 남극(Antarctic)지방 해빙(海氷)의 표면적도 1980년대에 접어들어서 급격히 감소하고 있으며,
- 주요 해양권(North Pacific, South Pacific, North Atlantic, South Atlantic, Indian Ocean, Southern Ocean)의 열에너지 함량도 1970년대 이후 급격히 상승하고 있음을 알 수 있다.
- <그림 4>의 아랫부분에 표시된 전 지구적 평균기온과 열에너지 함량의 경우도 위에서 언급한 대륙별 및 해양권별 성향과 대동소이함을 알 수 있다.

#### 4. 미래의 전 지구적 및 지역적 기후변화

기후시스템에 있어서의 변화에 대한 전망을

위해서는 단순기후 모델에서부터 중간정도의 복잡한 모델, 종합적인 기후모델, 그리고 지구시스템모델(Earth System Model)에 이르기까지 계층화된 기후모델을 사용하게 된다. 이들 모델들을 인위적인 복사강제력에 대한 일련의 시나리오를 기준으로 하여 기후변화를 모의하게 된다. 대표농도수준(Representative Concentration Pathways, RCPs)이라 불리는 일련의 시나리오가 세계기후 연구프로그램(World Climate Research Program)의 전술한바 있는 CMIP5 체제하에서 수행된 새로운 기후모델에 의한 모의에 사용되었다. 사용된 모든 RCP에서 대기중 CO<sub>2</sub> 농도는 21세기동안 대기중으로의 CO<sub>2</sub>의 누적배출량의 지속적인 증가 때문에 현재에 비해 2100년에는 훨씬 더 증가하게 된다. 특별한 언급이 없는한 본 SPM에서의 전망은 20세기말을 대표하는 1986-2005년 기간 대비 21세기말(2081-2100년)을 기준으로 한다. 그러한 전망에 역사적인 의미를 부여하기 위해서는 여러 다른 기간간의 관측된 변화를 고려할 필요가 있다. 가용한 최장의 전 지구적 표면기온자료 세트를 근거로 한 1850-1900년 기간과 AR5 기준기간(2081-2100년)의 평균값 사이의 관측된 변화는 0.61℃정도이다.

그러나, 온난화는 AR5 기준기간동안의 평균을 능가하게 발생하였다. 따라서, 이는 현재까지의 역사적인 온난화에 대한 추정이라 할 수 없는 것이다.

온실가스의 계속된 배출은 더 심한 온난화와 기후시스템의 모든 구성요소에 변화를 가져 올 것이다. 기후변화를 제한하기 위해서는 온실가스 배출량의 획기적이고 지속가능한 감소를 필요로 할 것이다.

- 다가오는 수십 년에 대한 기후변화 전망결과는 21세기 후반부에 대하여 전망된 바와 유사한 기후변화의 공간적 패턴을 보일 것이지만 그 규모는 다소 작아질 것으로 보고

있다. 내부적 변동성(internal variability)은 기후에 주도적인 영향을 계속 미칠 것이며, 특히 단기간에 걸쳐, 그리고 지역규모에서의 영향이 클 것으로 보고 있다. 21세기 중반까지 전망된 기후변화의 규모는 온실가스 배출시나리오의 선택에 따라 크게 영향을 받게 된다.

- AR5에서의 온실가스 배출 시나리오로 IPCC의 WG I은 AR4에서의 SRES(Special Report on Emission Scenarios)에서 제시한 A1, A2, A1B, B1, B2 등의 시나리오 대신 4가지 종류의 새로운 시나리오를 사용하였으며, 이는 대표농도수준(Representative Concentration Pathways, RCPs)이라 정의하며 그 내용은 다음과 같다.

■ RCP는 산업혁명시작전년도 부근인 1750년 대비 2100년의 대략적인 총 태양복사강제력(total radiative forcings)으로 표시되는 것으로, 1750년의 복사강제력을  $1\text{Watt}/\text{m}^2$ 로 할때 2100년에는 RCP2.6의 경우에는  $2.6\text{Watt}/\text{m}^2$ , RCP4.5의 경우에는  $4.5\text{W}/\text{m}^2$ , RCP6.0의 경우는  $6.0\text{W}/\text{m}^2$ , RCP8.5의 경우는  $8.5\text{W}/\text{m}^2$ 의 복사강제력이 기후변화에 영향을 미치게 될 것이라는 시나리오이다. 이들 4개의 RCP중 RCP2.6은 대단히 낮은 복사강제력 수준을 대표하는 완화 시나리오(mitigation scenario)이고 RCP4.5와 RCP6.0은 안정화 시나리오(stabilization scenario)이며, RCP8.5는 대단히 많은 온실가스 배출을 대표하는 시나리오이다. 따라서, RCP는 IPCC의 제3차 및 4차 평가보고서에서 사용된 기후정책과는 무관한 SRES와는 달리 21세기 기후정책의 범위(영역)을 대표하는 것으로 볼 수 있다. RCP6.0과 RCP8.5의 경우 복사강제력은 2100년까지는 첨두치에 도달하지 않으나, RCP2.6의 경우는 첨두치에

도달한 후 감소하게 된다. 한편, RCP4.5의 경우 2100년까지 복사강제력은 안정화에 도달하게 된다.

■ 대부분의 CMIP5 모델이나 Earth System Model(ESM)은 RCP별로 2100년까지의  $\text{CO}_2$ 농도를 421ppm(RCP2.6), 538ppm(RCP4.5), 670ppm(RCP6.0), 그리고 936ppm(RCP8.5)으로 하여 모의를 실행하였다. 메탄가스나 아산화질소가스를 포함할 경우 RCP별 복합  $\text{CO}_2$  동등 농도는 2100년까지 각각 475ppm(RCP2.6), 630ppm(RCP4.5), 800ppm(RCP6.0), 1,313ppm(RCP8.5)이 된다.

- 4개의 RCP에 근거하여 전망된 기후변화는 시나리오간의 차이를 보일뿐 그 패턴이나 규모에 있어서는 AR4에서와 거의 비슷하다.

#### 4.1 대기온도(기온)

21세기말의 지구표면의 기온변화는 RCP2.6이외의 3가지 시나리오를 적용 할 경우 1850~1900년 기간에 비해  $1.5^\circ\text{C}$ 정도 증가할 것으로 보인다. 또한, RCP6.0과 RCP8.5의 경우는 약  $2^\circ\text{C}$ 정도를 초과할 것으로 보이며, RCP4.5의 경우는  $2^\circ\text{C}$ 정도를 초과하지는 않을 것으로 보인다. RCP2.6의 경우를 제외한 모든 시나리오 하에서는 2100년 이후에도 온난화는 계속 될 것이다. 온난화는 연도별 내지는 10년 단위 기간별로 변동을 계속 보이게 될 것이며, 지역별로도 균등하지는 않을 것이다.

- 1986~2005년 기간 대비 2016~2035년 기간의 지구표면의 평균기온 변화는  $0.3^\circ\text{C} \sim 0.7^\circ\text{C}$ 의 범위에 있을 것으로 전망되며, 자연적인 내부적 변동성에 비교하여 계절적 및 연간평균기온의 단기적인 상승은 중위도 지역에서 보다 아열대 지방에서 더 클 것으로 전망된다.

- 20세기말인 1986~2005년 기간대비 21세

학술/기술기사

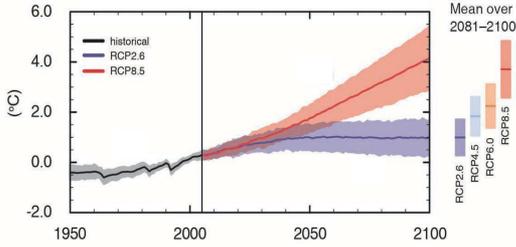


그림 5-(a). Global average surface temperature change

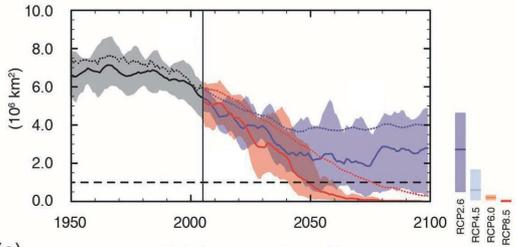


그림 5-(b). Northern Hemisphere September sea ice extent

기 말인 2081~2100년 기간의 지구표면 평균기온의 범위를 CMIP5모델로 모의한 결과는 <그림 5-(a)>와 같다.

- <그림 5-(a)>에서 보는 바와 같이 RCP2.6의 경우 지구표면 평균기온은 0.3°C~1.7°C의 범위로 상승하고, RCP4.5의 경우는 1.1°C~2.6°C, RCP6.0의 경우는 1.4°C~3.1°C, RCP8.5의 경우가 2.6°C~4.8°C정도 상승할 것으로 전망되고 있다. 북극지방은 지구 평균기온 보다 더 급속한 온난화가 진행될 것이고 육지지역에서의 온난화는 해양지역에서 보다 더 심하게 진행될 것이다.
- <그림 6-(a)>는 RCP2.6과 RCP8.5의 경우에 대하여 1986~2005년 기간 대비 2081~2100년 기간의 지구표면 평균기온의 변화를 모의한 결과를 나타내고 있다.

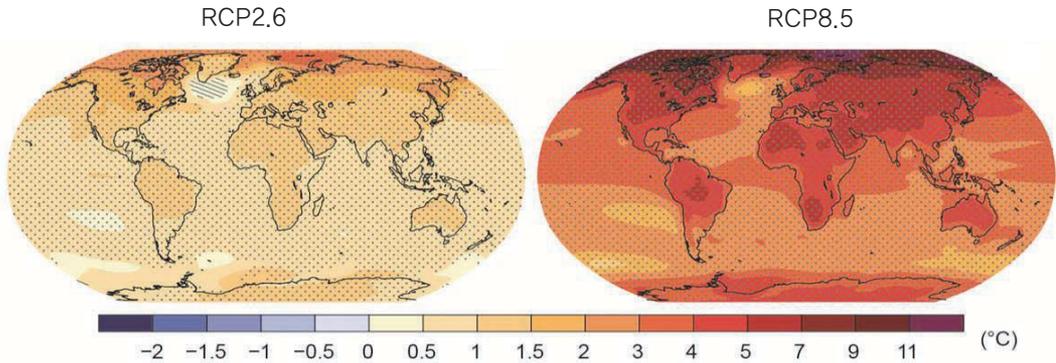


그림 6-(a). Change in average surface temperature(1986~2005 to 2081~2100)

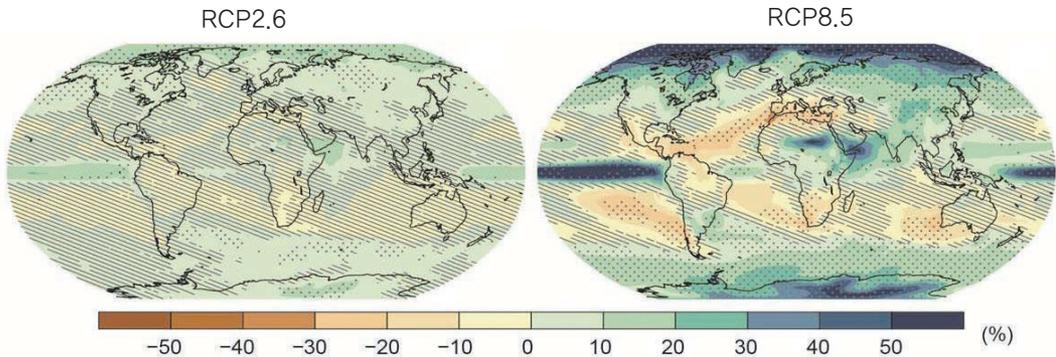


그림 6-(b). Change in average precipitation(1986~2005 to 2081~2100)

- 1850~1900년 기간의 평균기온과 대비할 경우 21세기말의 지구 표면온도변화는 RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5의 경우 1.5℃를 초과할 것으로 전망된다. RCP6.0과 RCP8.5의 경우 온난화는 2℃를 초과할 것이고, RCP4.5의 경우는 2℃를 초과하지 않을 가능성이 높으며, RCP2.6의 경우는 2℃를 초과할 가능성이 거의 없을 것으로 전망된다. RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0의 경우 온난화는 4℃를 초과하지 않을 것이며, RCP8.5의 경우 4℃를 초과할 수도 있을 것으로 전망된다.
- 지구표면의 평균기온이 상승함에 따라 일 단위 혹은 계절단위로 볼때 육지지역에서는 보다 잦은 고온사상과 보다 드문 한냉사상이 발생할 것은 거의 틀림이 없다. 열과 현상도 보다 높은 빈도와 긴 지속기간으로 발생 가능성이 대단히 크다.

#### 4.2 물 순환

21세기에 걸친 온난화로 인해 지구상의 물 순환에 생기는 변화는 시공간적으로 균일하지는 않을 것이다. 지속적인 예외는 있을 것이나 습윤지역과 건조지역간, 혹은 습윤계절과 건조계절간의 강수량의 차이는 증가할 것이다.

- 고 위도지역과 적도에 가까운 태평양지역은 <그림 6-(b)>의 RCP8.5 시나리오에서 볼 수 있는 바와 같이 21세기말(2081~2100년 기간)에는 1986~2005년 기간 대비 연 평균 강수량의 큰 증가(20%~50%)가 있을 것으로 전망된다. 한편, 중위도 지역과 아열대 건조지역에서는 연 평균 강수량이 감소할 것이고 중위도 습윤 지역에서는 증가하게 될 것으로 전망된다.
- 지구표면의 평균기온 상승에 따라 21세기 말엽에는 대부분의 중위도지역과 습윤한 열

대지역에 걸쳐 극한 강수사상의 발생이 심화되고 발생횟수가 증가할 것으로 전망된다.

- 전 지구적으로 보면 몬순기후대 지역에서는 연평균 강수량이 21세기동안 증가할 것이다. 몬순풍(Monsoon Winds)은 약화될 것이나 몬순강수량은 대기중 습도의 증가로 인해 증가될 것으로 전망되며, 몬순기상의 시작시기는 빨라지고 종료시기는 지연되어 많은 지역에서 몬순계절의 길이가 길어질 것으로 전망된다.

#### 4.3 해양

전 지구적인 해양(바다)은 21세기동안 계속해서 온난화가 진행될 것이다. 태양복사열은 바다 표면으로부터 깊은 바다로 침투하게 되어 해수순환(ocean circulation)에 영향을 미칠 것이다.

- 가장 강력한 해양의 온난화는 열대 및 북반구 아열대 지역의 표면에서 진행될 것으로 전망되고 있다. 해면으로부터 보다 깊은 곳에서의 온난화는 남쪽해양(Southern Ocean)에서 가장 극심해질 것이다. 해수면 부근 100m 상층부에서의 해양온난화에 대한 가장 적절한 산정치는 21세기 말에 가서 해수면으로부터 약 100m되는 깊이에서 약 0.6℃(RCP2.6의 경우) 내지 2.0℃(RCP8.5의 경우)정도가 될 것이며, 약 1,000m되는 깊이에서는 0.3℃(RCP2.6의 경우)내지 0.6℃(RCP8.5의 경우)정도가 될 것으로 전망된다.

#### 4.4 빙권(Cryosphere)

전 세계적인 지구표면 평균기온이 상승함에 따라 21세기동안 북극해의 바다얼음판(Sea ice cover)은 계속해서 수축하고 두께가 얇아질 것으로 전망되고 있다. 전 지구적인 빙하의 체적 또한 계속해서 감소될 것이다.

- 북극해에서의 9월중 바다얼음판 면적의 연중 지속적인 감소는 21세기 말까지 계속될 것으로 기후모델에 의한 모의결과가 전망하고 있다. 이와 같은 감소의 범위는 RCP2.6 시나리오일 때의 43%로부터 RCP8.5 시나리오일 때의 94%정도가 될 것으로 전망되고 있다. <그림 5-(b)>는 북반구의 9월 바다얼음판 면적에 대한 모의결과로서 RCP 시나리오별로 20세기 말인 1986~2005년 기간 대비 21세기에는 바다얼음판 면적이 급격히 감소하고 있음을 알 수 있으며, RCP8.5의 경우 2050년 중에는 바다얼음판의 면적이  $10^6 \text{km}^2$ 가 되고 2070년경에는 거의 사라지게 된다는 전망이다.
- 남극지방에서도 전 지구표면의 평균기온 상승에 따라 21세기 말에는 바다얼음판의 면적과 체적의 감소가 전망되고 있다.
- 21세기 말까지는 전 지구적 빙하체적은 RCP2.6의 경우는 15~55%, RCP8.5의 경우는 35~85%정도가 감소할 것으로 전망되고 있다.
- 21세기 말까지 북반구의 봄철 적설면적은 RCP2.6의 경우는 약 7%, RCP8.5의 경우는 약 25%정도 감소 할 것으로 모의 전망되었다.
- 지구표면의 평균기온이 상승함에 따라 북위 고위도지역의 지표면부근에 형성되어있는 영구 동토의 범위는 감소 될 것이 확실시 된다. 21세기말까지 지구표면 부근(상층부 약 3.5m)의 영구 동토(permafrost)의 면적은 RCP2.6의 경우는 약 37%, RCP8.5의 경우는 약 81% 감소할 것으로 전망하고 있다.

#### 4.4 해수면

전 지구적인 평균해수면은 21세기 기간 동안 상승을 계속할 것이다. 증가된 해양의 온난화와 빙하

(glaciers) 및 빙판(ice sheets)의 체적손실이 증가함에 따라 모든 RCP 시나리오 하에서 해수면의 상승률은 20세기말인 1971~2010년 기간 동안에 관측된 값을 초과할 가능성이 대단히 크다.

- 전 지구적인 평균해수면 상승에 대한 전망은 해수면의 변동에 대한 개선된 물리적 이해와 관측 자료에 보다 근접하는 결과를 제공하는 개선된 모델, 그리고 빙판의 동역학적 변화를 고려하는 등의 이유 때문에 신뢰도 측면에서 AR4에서 보다는 크게 개선되었다고 볼 수 있다.
  - <그림 7>에서 보는바와 같이 1986~2005년 기간 대비 2081~2100년 기간 동안의 전 지구적인 평균해수면의 상승량은 RCP2.6의 경우 0.26~0.55m, RCP4.5의 경우 0.32~0.63m, RCP6.0의 경우 0.33~0.63m, 그리고 RCP8.5의 경우 0.45~0.82m로 전망되었다. RCP8.5의 경우 2100년까지의 해수면 상승량은 0.52~0.98m이며, 2081~2100년 기간 동안 매년 8~16mm의 상승률을 보일 것으로 전망된다.
- 이와 같은 전망들은 전술한 바 있는 CMIP5 기후모델에 빙하와 빙판의 동역학적 변화가 고려된 개선된 기후모델을 사용하여 얻어진 것이다.

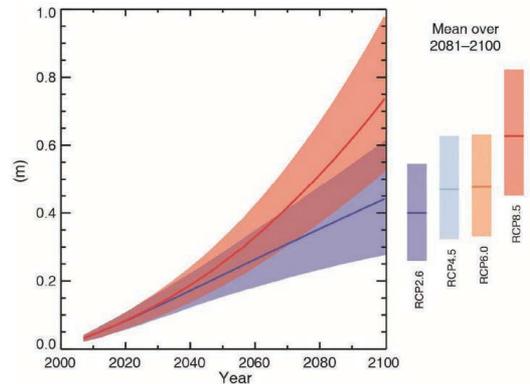


그림 7. Global mean sea level rise

- RCP시나리오별 전망에 있어서 해수의 열 팽창은 21세기 지구평균 해수면 상승량의 약 35~55%를 설명해주며, 빙하는 약 15~35%를 설명해주는 것으로 해석된다. 그린랜드 빙판 용해의 증가효과는 이지역의 강설량을 초과하게 되어 장래의 해수면 상승효과를 가져올 것으로 전망된다. 반면에, 남극지방의 경우에는 빙판의 용해가 크지 않고 강설량의 증가효과가 더 커서 장래의 평균해수면은 상승보다는 하강할 것으로 전망하였다. 그린랜드 빙판과 남극지방 빙판

의 해빙을 동시에 고려할 경우의 2081-2100년 기간의 전 지구적인 평균 해수면 상승효과는 약 0.03~0.20m 정도로 전망되었다.

- 해수면상승은 공간적으로 균등하지는 않을 것으로 전망되고 있다. 21세기말까지 해수면은 해양지역의 약 95%이상 되는 지역에서 상승하게 될 것이며, 전 세계 해안선의 약 70%는 전 지구적인 평균해수면 변동량의 약 20%이내에서 해수면의 변동(상승)을 겪게 될 것으로 전망되고 있다. 

## 참고문헌

1. 윤용남, IPCC/ Technical Paper VI, 「기후변화와 물」소개, 한국수자원학회지 제42권 제3호, 2009.3
2. 윤용남, 「미리보는 IPCC 제5차 기후변화 평가 보고서의 구성내용」, 한국수자원학회지 제43권 제4호, 2010.4
3. IPCC, Special Report, 「Managing the Risks of Extreme Events to Advance Climate Change Adaptation(SREX)」, 2012
4. 윤용남, 「기후변화 적응증진을 위한 극한사상과 그로인한 재해의 위험성 관리」에 관한 IPCC 특별 보고서 소개, 한국수자원학회지 제45권 제3호, 2012
5. IPCC, Fifth Assessment Report(AR5), 「Climate Change 2013 : The Physical Science Basis」, <http://www.ipcc.ch>(IPCC홈페이지), 2013.9