한국대기환경학회지 제 30 권 제 2 호
J. KOSAE Vol. 30, No. 2 (2014) pp. 188 ~ 200
Journal of Korean Society for Atmospheric Environment
DOI: http://dx.doi.org/10.5572/KOSAE.2014.30.2.188

기술자료

IPCC 제5차 과학평가보고서 고찰

In-depth Review of IPCC 5th Assessment Report

박일수* · 장유운 · 정경원 · 이강웅[1] · Jeffrey S. Owen[1] · 권원태[2] · 윤원태[2]
한국외국어대학교 한 · 중남미녹색융합센터
[1]한국외국어대학교 환경학과, [2]기상청 기후과학국

(2014년 1월 19일 접수, 2014년 2월 25일 수정, 2014년 3월 18일 채택)

Il-Soo Park*, Yu Woon Jang, Kyung-Won Chung, Gangwoong Lee[1],
Jeffrey S. Owen[1], Won-Tae Kwon[2] and Won-Tae Yun[2]
Korea Latin America Green Convergence Center, Hankuk University of Foreign Studies
[1]*Deptartment of Environmental Science, Hankuk University of Foreign Studies*
[2]*Climate Science Bureau, Korea Meteorological Administration*

(Received 19 January 2014, revised 25 February 2014, accepted 18 March 2014)

Abstract

The IPCC 5th Assessment Report (Climate Change 2013: The Physical Science Basis) was accepted at the 36th Session of the IPCC on 26 September 2013 in Stockholm, Sweden. It consists of the full scientific and technical assessment undertaken by Working Group I. This comprehensive assessment of the physical aspects of climate change puts a focus on those elements that are relevant to understand past, document current, and project future of climate change. The assessment builds on the IPCC Fourth Assessment Report and the recent Special Report on Managing the Risk of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. The assessment covers the current knowledge of various processes within, and interactions among, climate system components, which determine the sensitivity and response of the system to changes in forcing, and they quantify the link between the changes in atmospheric constituents, and hence radiative forcing, and the consequent detection and attribution of climate change. Projections of changes in all climate system components are based on model simulations forced by a new set of scenarios. The report also provides a comprehensive assessment of past and future sea level change in a dedicated chapter.

The primary purpose of this Technical Summary is to provide the link between the complete assessment of the multiple lines of independent evidence presented in the main report and the highly condensed summary prepared as Policy makers Summary. The Technical Summary thus serves as a starting point for those readers who seek the full information on more specific topics covered by this assessment.

Warming of the climate system is unequivocal, and since the 1950s, many of the observed changes are unprecedented over decades to millennia. The atmosphere and ocean have warmed, the amounts of snow and ice

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)31-330-4721, E-mail : nierpis@daum.net

have diminished, sea level has risen, and the concentrations of greenhouse gases have increased. Total radiative forcing is positive, and has led to an uptake of energy by the climate system. The largest contribution to total radiative forcing is caused by the increase in the atmospheric concentration of CO_2 since 1750. Human influence on the climate system is clear. This is evident from the increasing greenhouse gas concentrations in the atmosphere, positive radiative forcing, observed warming, and understanding of the climate system. Continued emissions of greenhouse gases will cause further warming and changes in all components of the climate system. Limiting climate change will require substantial and sustained reductions of greenhouse gas emissions.

The in-depth review for past, present and future of climate change is carried out on the basis of the IPCC 5th Assessment Report.

Key words : IPCC, 5th Assessment Report, Climate Change 2013, Technical Summary, Policy makers Summary

1. 서 론

유엔기후변화협약(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)의 최고 과학자문 기구인 정부 간 기후변화협의체(Intergovernmental Panel of Climate Change, IPCC)는 1990년 제1차 평가보고서를 발표하였다. 이 보고서는 "인간 활동에 의한 기후 변화는 관측상의 한계로 명확하지 않다"는 입장을 밝혔다. 그러나 기후변화협약(UNFCCC)의 협상에 필요한 기초자료로 제공되었다. 이후 IPCC는 65만 년 전으로 거슬러 올라가 대기를 분석하였고, 관측망을 재정비하고 조사하여 제4차 보고서를 2007년 스페인 발렌시아에서 채택하였다. "인간의 활동에 의해 기후변화가 일어났다고 확신했고, 이 사실은 90% 확실"하다고 4차 보고서에 명시했다.

2013년 9월 26일 제5차 평가보고서(Fifth Assessment Report, AR5, "Climate Change 2013: Physical Science Basis")를 스웨덴 스톡홀름에서 개최된 IPCC 36차 총회에서 최종 채택하였다. 기후변화 원인의 강도는 이전 IPCC 평가보고서와 마찬가지로 $W\ m^{-2}$ 단위를 사용하여 복사강제력(Radiative Forcing, RF)으로 정량화했다. 복사강제력은 각각의 원인에 작용하는 에너지 플럭스의 변화이고, 대류권계면 또는 대기상한에서 산출되었다. 이전의 IPCC 보고서에서 채택한 기존의 복사강제력 개념에서는 모든 지표와 대류권 조건이 고정되었다. 5차 보고서에서는 잘 혼합된 온실가스와 에어로졸에 대한 복사강제력을 계산할 때, 해양과 해빙을 제외한 물리적 변수들을 신속하게 수정하여 작은 변화에 대응할 수 있게 하였다. 이 강제력을 유효복사강제력(Effective Radiative Forcing, ERF)이라고 전체 보고서에서 명명하였다. 이 변화는 이전 평가보고서보다 과학적으로 진전된 것이며, 원인별 온도반응을 더 잘 나타내었다. "기후변화의 주된 원인이 인간이라는 사실은 95% 확실"하다고 5차 보고서에 명시했다.

제5차 평가보고서는 실무그룹 1(Working Group I, WG I)에 의해 준비되었으며, 전체보고서(The underlying report), 정책결정자 요약서(Summary for Policy makers), 기술요약서(Technical Summary)로 구성된다. 실무그룹 1은 제5차 평가보고서(AR5)에서 기후시스템의 관측 값, 고기후 기록, 기후과정의 이론연구 및 기후모델을 이용한 모의 등을 총망라하는 다양한 과학적 분석 결과를 근거로 기후변화에 대한 새로운 증거들을 조사하였다. 이 보고서는 실무그룹 1의 제4차 평가보고서(Fourth Assessment Report, AR4)를 바탕으로 작성하였으며, 이후 새로운 연구결과를 추가하였다. 제5차 평가보고서의 일환으로 발표된 IPCC 기후변화 적응을 위한 극한현상 및 재해 위험관리를 위한 특별보고서(IPCC Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation)는 극한기상과 극한기후현상의 변화에 대한 정보의 근간이 되고 있다. 정책결정자를 위한 요약서는 실무그룹 1 평가보고서의 구성을 그대로 따랐고, 중요한 결과들은 강조하여 간략하게 요약 설명하였다. 기술 요약서는 보다 자세한 정보를 요구하는 과학자 또는 전문가들을 위해 준비되었다.

제5차 평가보고서에 수록된 주요 연구결과의 신뢰도는 과학적 이해도에 대한 본 보고서에 참여한 저

자들의 평가에 근거하여 정성적 신뢰도(매우 낮음에서 매우 높음)로 표현하고, 가능한 경우에는 정량화된 가능성을 확률적으로 표현하였다(사실상 발생 가능성 없음에서 사실상 확실). 연구결과의 타당성에 대한 신뢰도는 증거자료의 유형, 양, 질 및 일관성(자료, 메커니즘의 이해, 이론, 모델, 전문가의 판단)과 동의 정도를 근거로 하였다. 연구결과의 불확실성을 정량적으로 산출한 확률추정치는 관측, 모델결과, 혹은 관측과 모델 결과 모두에 대한 통계적 분석과 전문가의 판단을 기반으로 하였다. 일부 가능한 경우에는 불확실성의 정도를 제시하지 않고 사실에 대한 진술로 연구결과를 정리하기도 하였다.

본 논문은 기후변화과학의 최근 연구 보고서인 제5차 평가보고서(IPCC, 2013a, b)와 기상청 기후변화 보고서(KMA, 2013)의 내용 자체에 중점을 두고 기후변화의 과거, 현재, 미래를 심층적으로 검토하였다. 따라서 본 논문의 내용은 제5차 평가보고서의 발행된 시점에 맞추어 기후변화의 과학적 내용과 의미를 관련 과학자들에게 객관적으로 전달하는 데 중점을 두었으며, 모든 그림 및 표는 제5차 평가보고서(IPCC, 2013a, b)로 부터 발췌 · 인용되었다.

2. 기후시스템에서 관측된 변화

기후시스템에 대한 관측 자료는 직접적인 측정과 인공위성 같은 원격관측을 기반으로 구성된다. 온도와 여러 변수를 전 지구 규모에서 기기를 이용하여 관측하는 것은 19세기 중반에 시작되었으며, 이러한 관측은 1950년 이후 광범위하고 다양하게 이루어졌다. 고기후 복원자료는 특정변수를 수백 년에서 수백만 년 전까지 분석할 수 있게 해준다. 이러한 정보들은 모두 대기, 해양, 빙권 및 지표에서 일어나는 변동과 장기적인 변화에 대한 종합적인 관점을 제공한다. 기후시스템의 온난화는 명백하며, 1950년 이후 관측된 많은 변화들은 지난 수십 년에서 수천 년간 전례가 없었다. 대기와 해양은 따뜻해지고, 눈과 빙하의 양은 줄어들고 해수면은 상승하였으며 온실가스의 농도는 증가하였다.

2.1 대기

1850년 이래 최근 30년 동안 10년 평균 전 지구 지표온도는 과거의 어떤 10년 평균보다 온난했다(그림 1). 북반구의 경우 1983~2012년은 지난 1400년 중에서도 가장 온난한 30년일 가능성이 높다. 독립적으로 생산된 여러 개의 자료가 존재하는 1880~2012년에 전 지구 육지와 해양의 평균 지표온도 자료는 선형경향성에 의해 산출하는 경우 0.85 [0.65~1.06]°C의 온도상승을 보였다. 단일의 가장 긴 자료를 이용해서 산출한 1850~1900년 평균과 2003~2012년 평균 사이의 총 온도 상승은 0.78 [0.72~0.85]°C 이였다. 지역규모의 경향성을 산출하기에 충분히 완성도가 높은 최장 기간인 1901~2012년에 전 지구 거의 모든 지역에서 지표 온난화가 일어났다. 20세기 중반 이후 전 지구적으로 대류권의 온도가 높아진 것

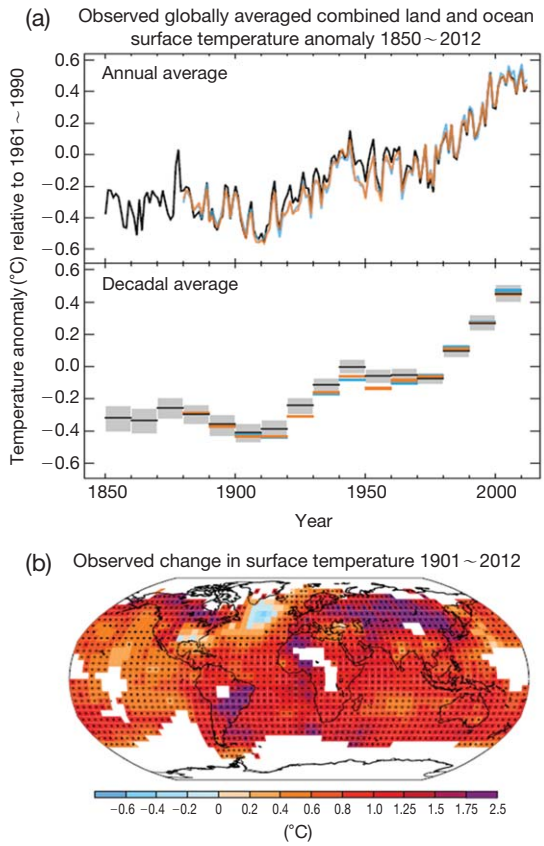

Fig. 1. (a) Observed global mean combined land and ocean surface temperature anomalies, from 1850 to 2012 from three data sets (b) Map of the observed surface temperature change from 1901 to 2012 derived from temperature trends determined by linear regression.

Table 1. Extreme weather and climate events: Global-scale assessment of recent observed changes, human contribution to the changes, and projected further changes for the early (2016～2035) and late (2081～2100) 21st century.

Phenomenon and direction of trend	Assessment that changes occurred (typically since 1950 unless otherwise indicated)	Assessment of a human contribution to observed changes	Likelihood of further changes	
			Early 21st Century	Late 21st Century
Warmer and/or fewer cold days and nights over most land areas	Very likely	Very likely	Likely	Virtually Certain
Warmer and/or more frequent hot days and nights over most land areas	Very likely	Very likely	Likely	Virtually Certain
Warm spells/heat waves. Frequency and/or duration increases over most land areas	Medium confidence on a global scale likely in large parts of Europe, Asia and Australia	Likely	Not formally assessed	Very likely
Heavy precipitation events. Increase in the frequency, intensity, and/or amount of heavy precipitation	Likely more land areas with increases than decreases	Medium confidence	Likely over many land areas	Very likely over most of the mid-latitude land masses and over wet tropical regions
Increases in intensity and/or duration of drought	Low confidence on a global scale. Likely changes in some regions	Low confidence	Low confidence	Likely (medium confidence) on a regional to global case
Increases in intense tropical cyclone activity	Low confidence in long term (Centennial) changes. Virtually certain in North Atlantic since 1970	Low confidence	Low confidence	More likely than not in the Western North Pacific and North Atlantic
Increased incidence and/or magnitude of extreme high sea level	Likely (since 1970)	Likely	Likely	Very likely

은 사실상 확실하다. 중남미 대부분 지역에서 기온 증가는 0.4～1.25℃이였으나 파라과이, 브라질 파라이바주, 리우데자네이루주를 포함하는 대서양 인접 지역에서 1.5～2.5℃로 높게 나타났다. 북반구 중위도 지역은 다른 지역에 비하여 완성도 높은 관측 자료로 인해 대류권 온도변화를 추정하는데 있어 높은 신뢰도를 나타낸다. 1901년 이후 북반구 중위도의 육지에서는 강수량이 증가하였다(그림 2). 멕시코와 과테말라 경계 지역, 에콰도르, 콜롬비아 및 베네수엘라, 브라질 대서양 연안 및 아르헨티나 지역에서는 10년 동안 5～50 mm 증가를 보였다. 그러나 남미 내륙지역에서는 강수량이 5 mm 이내로 감소하였다. 1901년부터 1951년까지 전 지구 육지 강수량 변화에 대한 신뢰도는 낮고, 그 이후로는 중간 신뢰도이였다. 대략 1950년 이후에 다양한 극한기상과 극한 기후현상의 변화가 관측되고 있었다. 전 지구적으로 낮과 밤이 추운 날의 발생 빈도는 감소하고, 더운 낮과 밤의 수가 증가한다는 사실은 가능성이 매우 높았다. 유럽, 아시아, 오스트레일리아의 대부분 지역에서 열파의 발생빈도가 증가했을 가능성이 높았다. 육지에서 호우의 발생빈도는 증가한 지역이 감소한 지역보다 늘어났을 가능성이 높았다. 호우의 빈도 또는 강도가 북아메리카와 유럽에서 증가했을 가능성이 높았다. 다른 대륙에서 호우현상의 변화는 중간 신뢰도 정도에 머무른다. 극한 고해수면 규모 및 발생의 증가 가능성도 높게 나타났다(표 1).

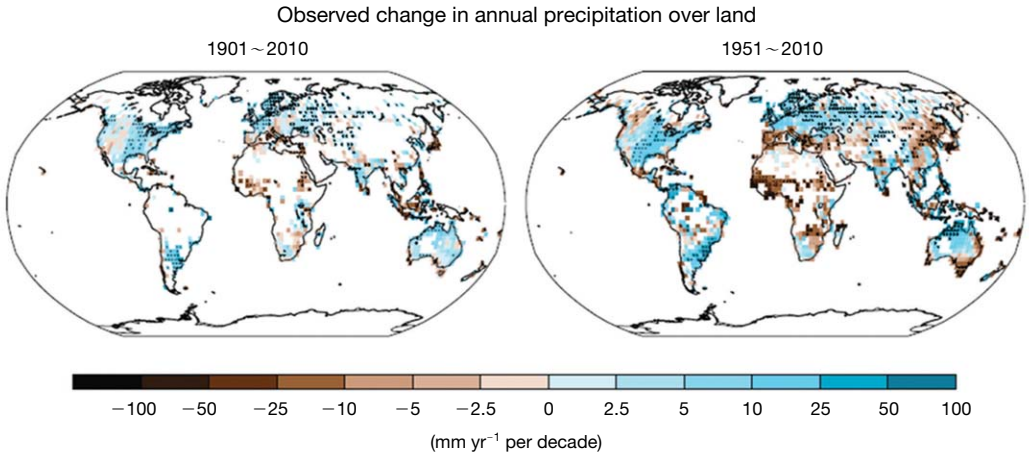

Fig. 2. Maps of observed precipitation change from 1901 to 2010 and from 1951 to 2010.

2. 2 해양

해양온난화는 기후시스템 내에 저장된 에너지 증가가 중요한 요인으로 1971～2010년에 축적된 에너지의 90% 이상을 차지한다.[1] 해양 상층부(0～700 m)가 1971～2010년에 온난해진 것은 사실상 확실하며, 1870년대와 1971년에도 온난화되었을 가능성이 높았다(그림 3).

전 지구 규모에서 해양온난화는 표층부 부근에서 가장 크며, 1971～2010년에 수심 75 m 상층부는 0.11 [0.09～0.13]°C/10년 더워졌다. 제4차 보고서 발간 이후, 해양상층부 수온자료의 기기오차(instrumental biases)가 확인되고, 그 오차가 감소되어 변화의 평가에 대한 신뢰도를 높여 주었다. 수심 700～2000 m의 해양이 1957～2009년에 온난화되었다는 사실은 가능성이 높았다. 수심 2000 m 이하의 전 지구 해역에서 수온변화의 평가가 가능할 정도로 충분한 자료가 1992～2005년에 존재하였다. 이 기간 동안 수심 2000～3000 m 깊이에서는 유의한 온도 경향성이 관측되지 않았을 가능성이 높았다. 같은 기간에 수심 3000 m 이하의 해양이 온난해졌다는 사실은 가능성이 높으며, 남빙양에서 최대 온난화가 관측되었다. 수심 0～700 m의 해양 열용량은 1903～2002년보다 2003～2010년이 느리게 증가했을 가능성이 있었다. 경년변동성이 작은 700～2000 m 해역에서 열 흡수는 1993～2009년에 약화되지 않고 지속되었다는 사실은 가능성이 높았다(그림 3).

2. 3 빙권

지난 20년간 그린란드와 남극 빙상의 질량이 감소하였고, 전 지구적으로 빙하는 지속적으로 감소되었으며, 북극해 해빙과 북반구의 봄철 적설면적도 지속적으로 감소하였다[2] (그림 3).

그린란드 빙상의 평균 감소율은 1992～2001년에 34 [−6～74] Gt yr^{-1}에서 2002～2011년에 215 [157～274] Gt yr^{-1}로 상당히 증가했을 가능성이 매우 높았다. 북극해의 연평균 해빙면적은 1979～2012년에 3.5～4.1%/10년 (0.45～0.51 × 10^6 km^2/10년) 감소할 가능성이 매우 높았다. 북극해에서 10년 평균 해빙면적의 평균 감소율은 여름에 가장 빨랐다.[3] 해빙면적은 모든 계절에서 면적이 줄었으며, 1979년 이후 매 10년 단위로 보아도 연속적으로 감소했다.[4] 적어도 지난 1,450년을 기준으로 볼 때 지난 30년 동안 북극 여름 해빙면적의 감소는 전례가 없었다. 남극의 연평균 해빙면적은 1979～2012년에 1.2～1.8%/10년 (0.13～0.20 × 10^6 km^2/10년)의 속도로 증가했을 가능성이 매우 높았다. 북반구의 적설면적이 20세기 중반 이후로 감소한다는 사실은 그 신뢰도가 매우 높았다. 1967～2012년에 3, 4월 북반구 평균 적설면적은 1.6 [0.8～

[1] 높은 신뢰도, [2] 높은 신뢰도, [3] 높은 신뢰도, [4] 높은 신뢰도

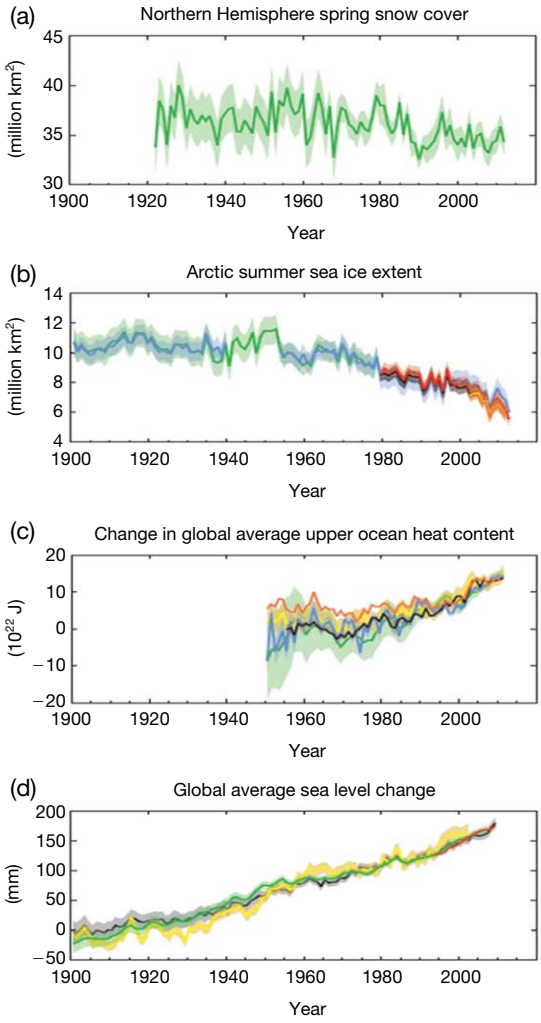

Fig. 3. Multiple observed indicators of a changing global climate: (a) Extent of Northern Hemisphere March-April (spring) average snow cover (b) extent of Arctic July-August-September (summer) average sea ice (c) change in global mean upper ocean (0～700 m) heat content (d) global mean sea level relative to the 1900～1905 mean of the longest running dataset.

2.4]%/10년, 6월 평균 북반구 적설면적은 11.7 [8.8～14.6]%/10년 정도로 줄었다. 이 기간 동안에 북반구의 적설면적은 1년 내내 통계적으로 의미 있는 증가를 보이지 않았다.

2. 4 해수면

19세기 중반 이후 해수면 상승률은 과거 2000년의 평균보다 컸으며,[5] 1901～2010년에 전 지구 평균 해수면은 0.19 [0.17～0.21] m 상승했었다(그림 3). 전 지구 평균해수면의 평균 상승률은 1901～2010년에 1.7 [1.5～1.9] mm yr^{-1}이였고, 1971～2010년에 2.0 [1.7～2.3] mm yr^{-1}이였으며, 1993～2010년에는 3.2 [2.8～3.6] mm yr^{-1}이였을 가능성이 매우 높았다. 1970년대 초반 이후 온난화로 인한 빙하의 질량손실과 함께 해양 열팽창은 관측된 전 지구 평균해수면 상승의 75%를 설명하고 있다.[6] 1993～2010년의 전 지구 평균해수면 상승은 높은 신뢰도를 가지고, 온난화로 인한 해양 열팽창 (1.1 [0.8～1.4] mm yr^{-1}), 빙하 (0.76 [0.39～1.13] mm yr^{-1}), 그린란드 빙상 (0.33 [0.25～0.41 mm yr^{-1}) 및 남극 빙상 (0.27 [0.16～0.38] mm yr^{-1})의 변화, 육지에서 물 유입 (0.38 [0.26～0.49] mm yr^{-1})이 각각 기여한 부분의 총합과 일치하였다. 기여도의 합은 2.8 [2.3～3.4] mm yr^{-1}이였다.

2. 5 탄소 및 생지화학적 순환

대기 중 메탄 (CO_2), 메탄 (CH_4), 아산화질소 (N_2O)의 농도는 최소한 지난 800,000년간 전례 없는 수준을 나타냈다. 이산화탄소 농도는 산업화 이후 일차적으로는 화석연료 사용으로 인한 배출과 2차적으로는 순 토지이용변화로 인한 배출로 40% 정도 증가하였다(그림 4). 해양은 인위적으로 배출된 이산화탄소의 30%를 흡수했으며 이는 해양산성화에 주요 원인이 되었다.

인위적인 활동으로 대기 중 이산화탄소, 메탄, 아산화질소 등 온실가스의 농도는 1750년 이후로 모두 증가했다. 이러한 온실가스들의 농도는 2011년에 각각 391 ppm, 1803 ppb, 324 ppb로 산업화 이전보다 약 40%, 150%, 20% 높았다. 현재 이산화탄소, 메탄, 아산화질소 농도는 과거 800,000년 동안의 빙하에 기록되어 있는 농도범위를 크게 초과하였다. 지난 세기 동안 대기농도의 평균 증가율은 지난 22,000년 동안 전례가 없었다는 사실은 매우 높은 신뢰도를 갖는다. 2002～2011년에 화석연료의 연소와 시멘트 생산으로 인해서 대기 중으로 배출된 이산화탄소의 양은 8.3 [7.6～9.0] GtC $12yr^{-1}$이며,[7] 2011년에는 9.5 [8.7～10.3]

[5] 높은 신뢰도, [6] 높은 신뢰도, [7] 높은 신뢰도

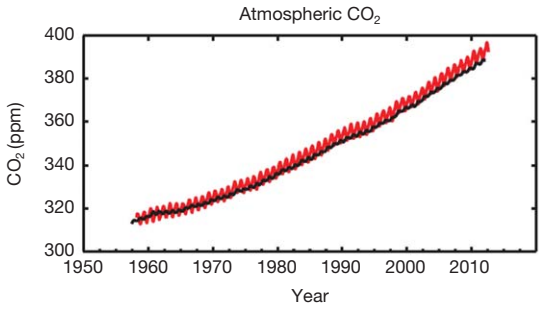

Fig. 4. atmospheric concentrations of carbon dioxide (CO_2) from Mauna Loa (19° 32′ N, 155° 34′ W-red) and South Pole (89° 59′ S, 24° 48′ W-black) since 1958.

GtC yr^{-1}으로, 1990년 수준에 비해 54% 증가한 것이다. 2002～2011년에 인위적 활동으로 인한 토지이용 변화로 인해서 발생한 연평균 순 이산화탄소 배출량은 0.9 [0.1～1.7] GtC yr^{-1}이었다.[8] 1750～2011년에 화산연료의 연소와 시멘트 생산으로 375 [345～405] GtC의 이산화탄소를 배출하였고, 벌채와 토지이용의 변화로 180 [100～260] GtC의 이산화탄소를 배출한 것으로 추정되었다. 이런 결과로 인위적 누적 배출량은 555 [470～640] GtC이였다. 인위적으로 배출된 누적 이산화탄소 배출량은 대기에 240 [230～250] GtC, 해양에 155 [125～185] GtC, 자연 육상생태계에 160 [70～250] GtC 축적되었다.

3. 기후변화의 원인

지구 에너지수지를 변경시키는 자연적 또는 인위적으로 발생하는 물질 및 과정이 기후변화의 원인이다. 복사강제력 (Radiative forcing, RF)은 달리 표시하지 않는 한 이들 원인의 변화로 초래된 에너지 수지의 변화를 정량화 한 것으로 1750년을 기준으로 2011년의 변화량으로 표시한다. 복사강제력이 양수이면 지표온난화가 진행되고, 음수이면 지표냉각화가 진행된다. 1750년을 기준으로 산출한 2011년의 인위적인 총 복사강제력은 2.29 [1.13～3.33] W m^{-2} (그림 5)이며, 1970년 이후 그 이전 수십 년보다 더 빠르게 증가했다. 2011년의 인위적인 총 복사강제력 추정치은 제4차 보고서에서 산출한 2005년도 추정치보다 43% 더 높았다. 이것은 대부분의 온실가스 농도가 지속적으로 증가하였고, 약한 순 냉각 효과(음의 RF)를 나타내는 에어로졸로 인한 복사강제력의 추정치가 개선되었기 때문이다. 1750년을 기준으로 잘 혼합된 온실가스(이산화탄소, 메탄, 아산화질소 및 할로카본)의 배출로부터 산출한 2011년 복사강제력은 3.00 [2.22～3.78] W m^{-2}이고 (그림 5), 온실가스의 농도변화에 의한 복사강제력은 2.83 [2.26～3.40] W m^{-2}이였다. 이산화탄소 배출량은 단독으로 1.68 [1.33～2.03] W m^{-2}의 복사강제력을 나타냈다. 에어로졸로 인한 구름의 작용을 포함하여 대기 중 총 에어로졸이 영향을 미치는 복사강제력은 −0.9 [−1.9～−0.1] Wm^{-2}이고,[9] 이는 대부분의 에어로졸이 초래하는 음의 강제력과 태양복사를 흡수하는 검댕이 초래하는 양의 효과를 포함한 것이다. 순 복사강제력의 최적 추정치은 검정 다이아몬드로 표시하고, 상응하는 불확실성 구간을 함께 제시하였으며, 그 값은 그림의 오른쪽에 신뢰도 수준 (VH-매우 높음, H-높음, M-중간, L-낮음, VL-매우 낮음)과 함께 표시하였다. 가스에 대한 농도기반 복사강제력은 합산하여 유사한 색의 막대그래프로 표현하였다 (그림 5).

4. 기후변화의 탐지와 원인 규명

기후시스템에 대한 인류의 영향은 명백하였다. 이 사실은 대기 중 온실가스의 농도 증가, 양의 복사강제력, 관측된 온난화, 기후시스템의 이해를 고려했을 때 분명하였다. 인위적 영향이 대기와 해양의 온난화, 전 지구 물 순환의 변화, 적설면적과 빙하의 감소, 전 지구 평균 해수면의 상승, 일부 기후극한현상에서 탐지되었다 (그림 6, 표 1). 제4차 보고서 이후 인간의 영향을 증명하는 증거는 점점 더 확대되고 있었다. 20세기 중반 이후 관측된 지구 온난화의 주요 원인이 인간의 영향이었을 가능성이 대단히 높았다. 1951～2010년에 관측된 전 지구 평균기온 상승의 절반 이상을 인위적인 온실가스 농도 증가와 함께 다른 인위적 강제력의 증가가 유발하였을 가능성은 대단히 높았다. 20세기 중반 이후 남극대륙을 제외한 모든 대륙에서 인위적 강제력이 지표온도의 상승에 상당한 기여를 했을 가능성이 높았다. 1970년

[8] 중간 신뢰도, [9] 중간 신뢰도

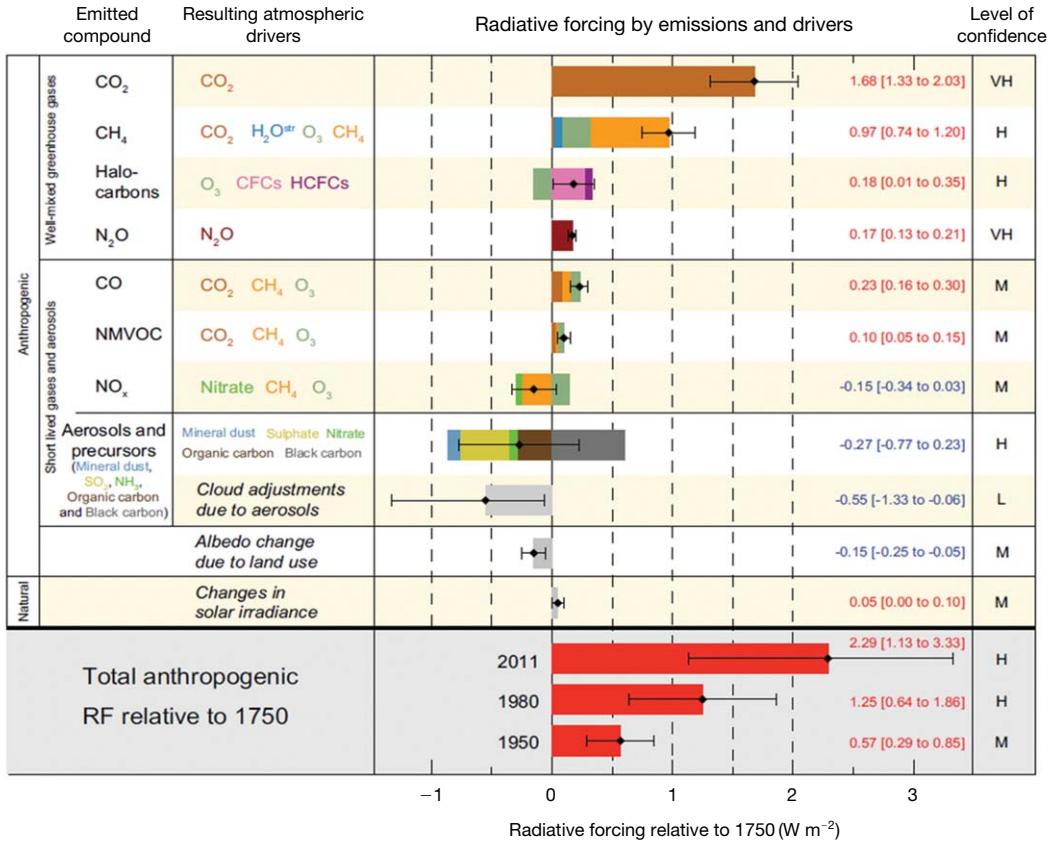

Fig. 5. Radiative forcing estimates in 2011 relative to 1750 and aggregated uncertainties for the main drivers of climate change.

대 이후 관측된 전 지구 해양상층부(0～700 m)의 열용량에 인위적 강제력이 상당한 기여를 했을 가능성이 매우 높았고, 인위적인 영향이 1979년 이후 북극 해빙 감소에 기여했을 가능성이 매우 높았다. 남극 해빙 면적이 약간 확장한 것에 대한 과학적 이해는 변화 원인에 대한 과학적 설명이 불완전하고 논란의 여지가 있기 때문에 낮은 신뢰도를 갖는다(그림 6).

5. 미래 전 지구 기후변화

기후시스템의 변화에 대한 전망은 간단한 기후모델에서 중간복잡도 모델, 통합 기후모델 및 지구시스템모델까지 다양한 모델들을 사용한다. 이러한 모델들은 일련의 인위적 강제력 시나리오를 기반으로 변화를 모의한다. 새로운 기후모델을 모의하기 위해서 세계기후연구프로그램 (World Climate Research Programme, WCRP) CMIP5 (Coupled Model Intercomparision Project Phase 5)의 기반 하에서 새로운 시나리오인 대표농도경로 (Representative Concentration Pathways, RCPs)가 사용되었다. IPCC 제5차 과학평가보고서를 위해서 과학계는 4종의 RCP 시나리오를 정의했다. 1750년을 기준으로 한 2100년 총 복사강제력으로 RCP2.6는 2.6 W m^{-2}, RCP4.5는 4.5 W m^{-2}, RCP6.0는 6.0 W m^{-2}, RCP8.5는 8.5 W m^{-2} 등으로 정의된다.

5.1 대기 온도

21세기 말의 전 지구 지표온도 변화는 RCP2.6을 제외한 모든 RCP 시나리오에서 1850～1900년 이전

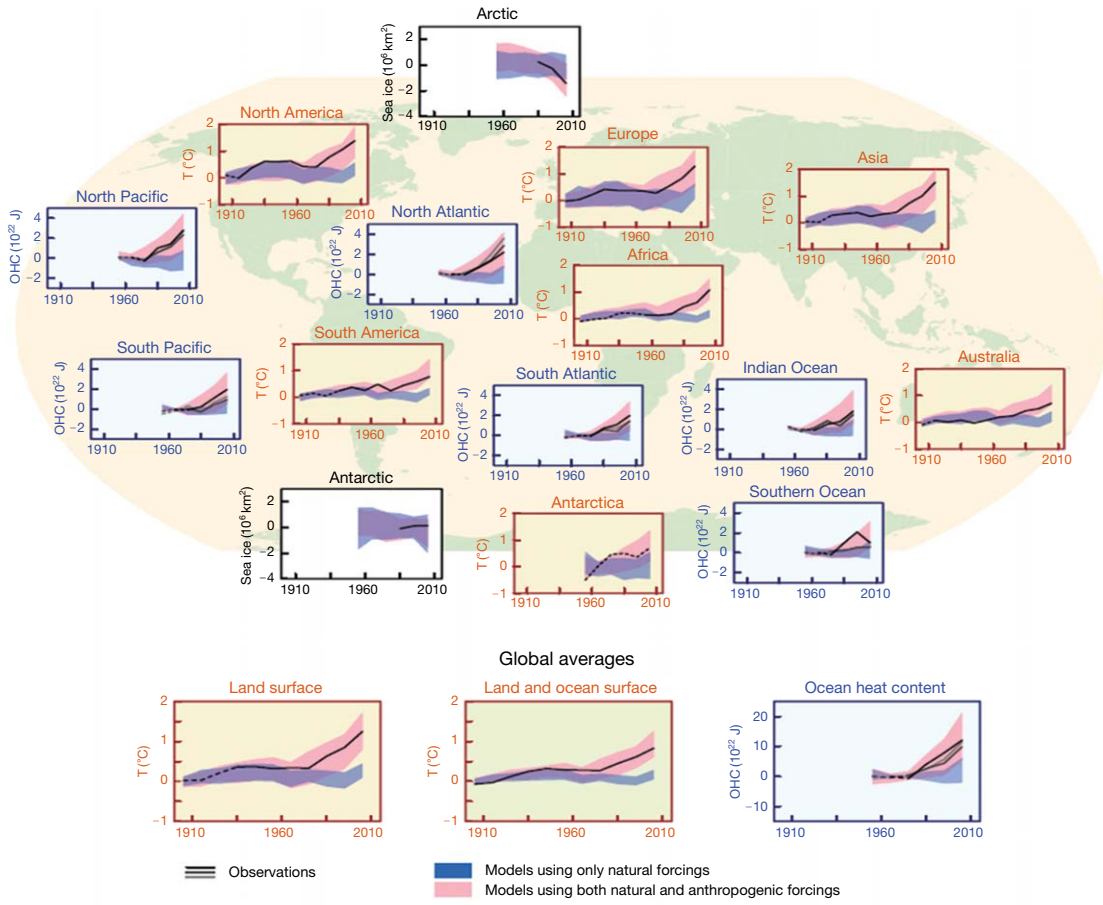

Fig. 6. Comparison of observed and simulated climate change based on three large-scale indicators in the atmosphere, the cryosphere and the ocean: change in continental land surface air temperatures (yellow panels), Arctic and Antarctic September sea ice extent (white panels), and upper ocean heat content in the major ocean basins (blue panels). Global average changes are also given. Anomalies are given relative to 1880～1919 for surface temperatures, 1960～1980 for ocean heat content and 1979～1999 for sea ice.

과 비교하여 1.5°C를 초과할 가능성이 높았다. RCP 6.0과 RCP8.5에서 전 지구 지표온도는 2°C를 초과할 가능성이 높으며 RCP4.5에서도 2°C를 초과하지 않을 가능성보다 초과할 가능성이 높았다. RCP2.6을 제외한 모든 RCP 시나리오에서 온난화는 2100년 이후에도 지속될 것이다(그림 7). 1986～2005년을 기준으로 2081～2100년의 전 지구 평균지표 온도상승은 CMIP5 기후모델에서 0.3～1.7°C (RCP2.6), 1.1～2.6 °C (RCP4.5), 1.4～3.1°C (RCP6.0), 2.6～4.8°C (RCP 8.5) 내에 들 것으로 전망되었으며 가능성이 높았다 (표 2).

5. 2 해양

전 지구 해양은 21세기동안 지속적으로 온난화될 것이다. 열은 해수면에서 심해까지 전달되어 해양순환에 영향을 미칠 것이다. 가장 강력한 해양온난화는 열대와 북반구 아열대의 해양표층에서 나타날 것으로 전망되었다. 남빙양에서는 온난화가 심해에서 가장 뚜렷하게 나타날 것이다.[10] 21세기 말까지 상층부 100 m에서 해양온난화의 최적 추정치가 약 0.6°C

[10] 높은 신뢰도

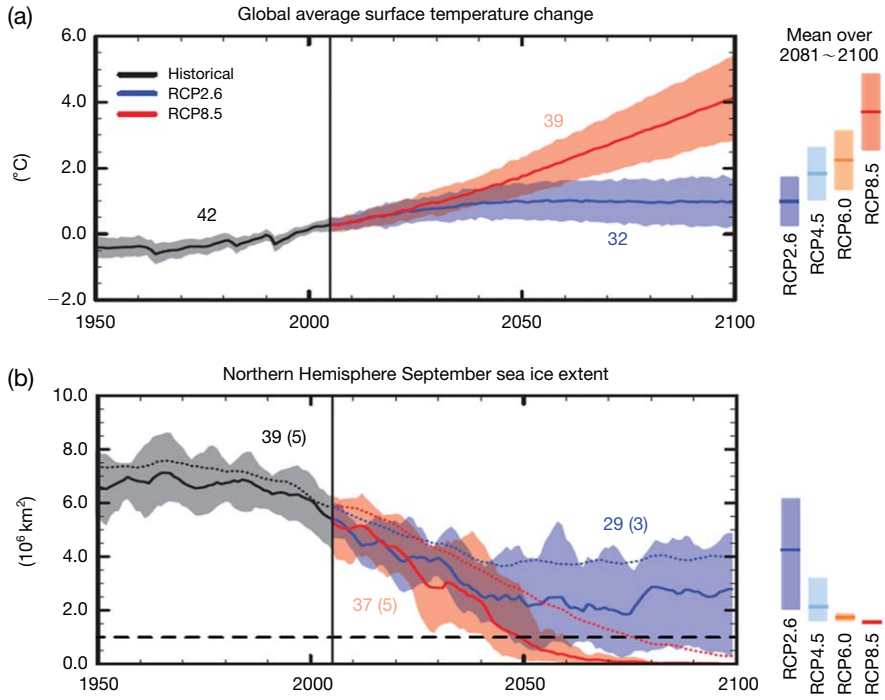

Fig. 7. CMIP5 multi-model simulated time series from 1950 to 2100 for (a) change in global annual mean surface temperature relative to 1986～2005, (b) Northern Hemisphere September sea ice extent (5-year running mean).

Table 2. Projected change in global mean surface air temperature and global mean sea level rise for the mid- and late 21st century relative to the reference period of 1986～2005.

	Scenario	2046～2065		2081～2100	
		Mean	Likely range	Mean	Likely range
Global Mean Surface Temperature Change (°C)	RCP2.6	1.0	0.4～1.6	1.0	0.3～1.7
	RCP4.5	1.4	0.9～2.0	1.8	1.1～2.6
	RCP6.0	1.3	0.8～1.8	2.2	1.4～3.1
	RCP8.5	2.0	1.4～2.6	3.7	2.6～4.8
	Scenario	Mean	Likely range	Mean	Likely range
Global Mean Sea Level Rise (m)	RCP2.6	0.24	0.17～0.32	0.40	0.26～0.55
	RCP4.5	0.26	0.19～0.33	0.47	0.32～0.63
	RCP6.0	0.25	0.18～0.32	0.48	0.33～0.63
	RCP8.5	0.30	0.22～0.38	0.63	0.45～0.82

(RCP2.6)～2.0°C (RCP8.5) 정도이고, 약 1,000 m 깊이에서는 0.3°C (RCP2.6)～0.6°C (RCP8.5) 정도이였다.

5. 3 빙권

전 지구 평균 지표온도가 상승했기 때문에 21세기에는 북극의 해빙면적이 지속적으로 줄어들고 얇아질 것이며, 북반구 봄철 적설면적이 줄어들 가능성이 매우 높았다. 전 지구 빙하 부피는 더 감소할 것이다. 다중모델 평균에서 북극해빙면적은 21세기 말까지 연중 감소될 것으로 전망되어진다. 9월의 경우 RCP

2.6에서 43%, RCP8.5에서 94% 범위에 있고, 2월의 경우에는 각각 8%와 34%의 범위에 있었다[11] (그림 7). 21세기 말까지 남극 주변의 빙하를 제외하고 전 지구 빙하 부피는 RCP2.6에서는 15～55%가 감소하고, RCP8.5에서는 35～85%가 감소할 것으로 전망되었다.[12]

5. 4 해수면

21세기에 전 지구적으로 평균해수면은 지속적으로 상승할 것이다(그림 8). 모든 RCP 시나리오에서 해수면 상승률은 해양온난화의 강화와 빙하 및 빙상의 질량감소로 인해서 1971～2010년에 관측된 상승률을 초과할 가능성이 매우 높았다. 2081～2100년 기간의 전 지구 평균해수면은 1986～2005년보다 RCP2.6에서 0.26～0.55 m, RCP4.5에서 0.32～0.63 m, RCP6.0에서 0.33～0.63 m, RCP8.5에서 0.45～0.82 m 상승할 가능성이 높았다.[13] RCP8.5의 경우 2100년 해수면은 0.52～0.98 m 상승하고, 2081～2100년 동안 해수면 상승률은 8～16 mm yr^{-1}이었다.[14] 이러한 범위는 모델과 빙하 및 빙상 기여도에 대한 문헌 평가를 결합하여 CMIP5 기후전망으로부터 산출한 것이다(그림 8, 표 2).

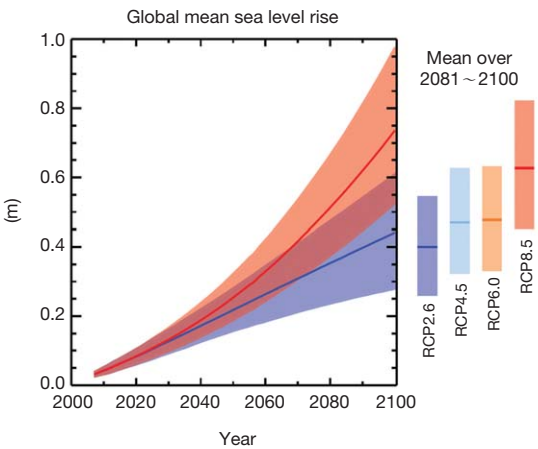

Fig. 8. Projections of global mean sea level rise over the 21st century relative to 1986～2005 from the combination of the CMIP5 ensemble with process-based models, for RCP2.6 and RCP8.5.

5. 5 탄소 및 생지화학적 순환

기후변화는 탄소순환 과정에 영향을 주고 이런 과정은 대기 중 이산화탄소 증가를 강화시킬 것이다.[15] 해양에 의한 탄소흡수의 증가는 해양산성화를 악화시킬 것이다. RCP 4종 모두에서 2100년까지 인위적으로 배출된 이산화탄소를 해양이 계속 흡수할 것이며 고농도 경로의 경우 흡수량이 더 많아질 것이다.[16] 육지 탄소흡수에 대한 미래 변화는 다소 불확실하였다. 모든 RCP에서 대부분의 모델이 미래 육지의 지속적인 탄소흡수를 전망하지만, 일부 모델의 경우 기후변화와 토지이용 변화의 영향이 합쳐져 육지의 탄소흡수 감소를 모의한다. 지구시스템 모델에 근거하면 21세기에는 기후와 탄소순환이 양의 되먹임이 될 것이라는 사실은 높은 신뢰도를 갖는다. 즉, 기후변화가 대기 중 이산화탄소의 증가로 초래된 육지와 해양의 탄소 흡수원의 일부를 상쇄할 것이다. 그 결과 인위적으로 배출된 많은 이산화탄소가 대기에 남아 있게 될 것이다. 백년에서 천년 시간규모에서 기후와 탄소순환 간의 양의 피드백은 이산화탄소 자료와 모델링을 통해 그 근거를 찾을 수 있었다. 15개 지구시스템모델에서 산출된 결과처럼 RCP의 대기 이산화탄소 농도와 비교할 수 있는 2012～2100년의 이산화탄소 누적배출량은 RCP2.6에서 140～410 GtC, RCP4.5에서 595～1005 GtC, RCP6.0에서 840～1250 GtC, RCP8.5에서는 1415～1910 GtC의 범위에 있었다(표 3).

Table 3. Cumulative CO_2 emissions for the 2012 to 2100 period compatible with the RCP atmospheric concentrations simulated by the CMIP5 Earth System Models.

Scenario	Cumulative CO_2 emissions 2012 to 2100			
	GtC		Gt C	
	Mean	Range	Mean	Range
RCP 2.6	270	140～410	990	510～1505
RCP 4.5	780	595～1005	2860	2180～3690
RCP 6.0	1060	840～1250	3885	3080～4585
RCP 8.0	1685	1415～1910	6180	5185～7005

Notes: 1 Gigatonne of carbon=1 GtC=10^{15} grams of carbon. This corresponds to 3.667 $GtCO_2$.

[11] 중간 신뢰도, [12] 중간 신뢰도, [13] 중간 신뢰도, [14] 중간 신뢰도, [15] 높은 신뢰도, [16] 매우 높은 신뢰도

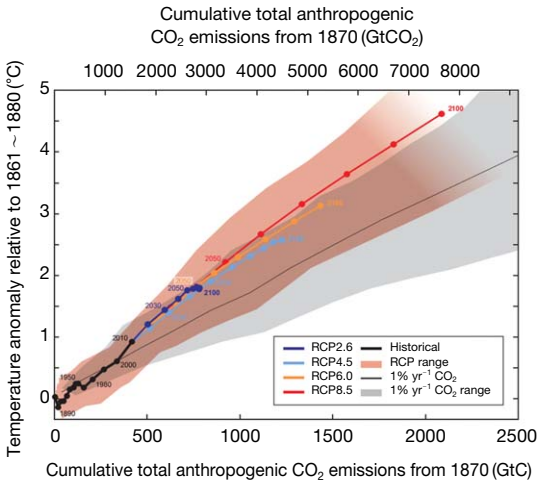

Fig. 9. Global mean surface temperature increase as a function of cumulative total global CO_2 emissions from various lines of evidence.

5. 6 기후안정화 및 불가역성

21세기 후반과 그 이후의 전 지구 평균 지표온난화는 주로 이산화탄소 누적배출량에 의해서 결정된다(그림 9). 온실가스의 배출이 중단되어도 기후변화의 양상은 대부분 수백 년 동안 지속될 것이다. 이것은 수세기동안 발생된 주요 기후변화가 과거, 현재, 미래의 이산화탄소 배출량에 의해 지속됨을 의미한다. 누적 이산화탄소 총 배출량과 전 지구 평균 지표온도의 변화는 거의 선형적인 관계를 가진다. 주어진 온난화 정도는 누적된 이산화탄소 배출량과 관련이 있다. 따라서 초기의 배출량이 많으면 많을수록 후에 배출량을 더 많이 줄여야 한다. RCP2.6에서 처럼 인위적인 이산화탄소 배출만으로 발생한 온난화를 1861~1880년 이후 2°C 이하로 억제하기 위해서는 시나리오별로 최대로 900 GtC (3300 $GtCO_2$), 820 GtC (3010 $GtCO_2$), 790 GtC (2900 $GtCO_2$)이 저감되어야 한다(그림 9). 2011년까지 515 [445~585] GtC (1890 [1630~2150] $GtCO_2$)가 이미 배출되었다. 온난화 목표치를 낮추기 위해서 혹은 특정한 목표치 이하로 유지할 가능성을 높이기 위해서는 누적된 이산화탄소의 배출량을 낮춰야 한다. 이산화탄소 이외의 기타 온실가스의 증가, 에어로졸의 감소 및 영구 동토 층에서 배출되는 온실가스의 양을 고려하면, 특정 온난화 목표치를 달성하기 위해서 배출 할 수 있는 누적 이산화탄소 배출량은 더 적어진다(그림 9). 장기간에 걸쳐서 대기 중 이산화탄소를 대량으로 제거하는 경우를 제외하면 이산화탄소 배출로 인한 인위적인 기후변화의 많은 부분은 수 세기 또는 수천 년 시간 규모에서 돌이킬 수 없다. 인위적인 순 이산화탄소 배출이 완전히 멈춘 이후에도 지표온도는 수세기 동안 높은 온도를 거의 일정하게 유지할 것이다. 해양표면에서 심해로 장기간 열이 전달되어 발생한 해양온난화는 수세기 동안 지속될 것이다. 시나리오에 따라 다르지만, 배출된 이산화탄소의 15~40%가 1,000년 이상 대기 중에 남아 있을 것이다.

6. 결 론

IPCC는 2007년 4차 평가보고서에서 2100년의 지구 온도 및 해수면 상승치를 각각 1.1~6.4°C, 18~59 cm로 예측했었다. 5차 평가보고서에서는 6년 전 전망을 지구 온도는 최소 0.2°C, 최대 4.8°C까지 하향 전망하였고, 해수면은 상향 조정해 최소 29 cm, 최대 92 cm까지 오를 수 있는 것으로 결론 내렸다. 최대 상승 가능치가 33 cm나 높아진 것이다. 특히 이번 IPCC 5차 평가보고서는 기후 변화의 주범이 인간이라는 사실이 95% 확실하다고 밝혔다. 3차(2001)에서는 66%, 4차(2007)에서는 90%였지만 이젠 화석연료 사용과 같은 인간의 활동이 주된 원인이라는 사실에 별 의심의 여지가 없어진 것이다.

기후시스템의 온난화는 명백하며, 1950년 이후 관측된 많은 변화들은 지난 수십 년에서 수천 년간 전례가 없었다. 대기와 해양은 따뜻해지고, 눈과 빙하의 양은 줄어들고 해수면은 상승하였으며 온실가스의 농도는 증가하였다. 대기 중 이산화탄소, 메탄, 아산화질소의 농도는 최소한 지난 800,000년간 전례 없는 수준을 나타냈다. 이산화탄소 농도는 산업화 이후 일차적으로는 화석연료 사용으로 인한 배출과 2차적으로는 순 토지이용 변화로 인한 배출로 40% 정도 증가하였다. 1750년을 기준으로 산출한 2011년의 인위적인 총 복사강제력은 2.29 W m^{-2}이며, 1970년 이후 그 이전 수십 년보다 더 빠르게 증가했다. 이것은 대부분의 온실가스 농도가 지속적으로 증가하였으며, 대기 중 이산화탄소 농도의 증가가 총 복사강제력에 가장 큰 기여를 했기 때문이다.

기후시스템에 대한 인류의 영향은 명백하였다. 이 사실은 대기 중 온실가스의 농도 증가, 양의 복사강제력, 관측된 온난화, 기후시스템의 이해를 고려했을 때 분명하였다. 기후모델들은 20세기 중반 이후의 급속한 온난화와 대형 화산분화 직후 일어난 냉각화를 포함하여 지난 수십 년간 대륙 규모에서 관측된 지표온도 패턴과 경향성을 잘 재현하고 있었다. 온도변화, 기후피드백, 지구에너지 수지의 변화에 대한 관측 및 모델 연구 모두가 과거 및 미래 강제력에 따라 반응하는 지구온난화 규모에 대한 신뢰성을 제공하고 있었다. 인위적 영향이 대기와 해양의 온난화, 전 지구 물 순환의 변화, 적설면적과 빙하의 감소, 전 지구 평균 해수면의 상승, 일부 기후극한현상에서 탐지되었다. 제4차 보고서 이후 인간의 영향을 증명하는 증거는 점점 더 확대되고 있었다. 20세기 중반 이후 관측된 지구 온난화의 주요 원인이 인간의 영향이었을 가능성이 대단히 높았다.

온실가스가 계속 배출되면 온난화가 더 많이 진행되고, 기후시스템의 모든 구성요소가 변화하게 될 것이다. 기후변화를 막기 위해서는 온실가스의 배출량을 상당히 지속적으로 줄여야 한다. 21세기 말의 전 지구 지표온도 변화는 1850～1900년 이전과 비교하여 1.5℃를 초과할 가능성이 높았다. 21세기에 전 지구적으로 평균해수면은 지속적으로 상승하여 2100년에 0.52～0.98 m 상승할 가능성이 높다. 21세기 후반과 그 이후의 전 지구 평균 지구온난화는 주로 이산화탄소 누적배출량에 의해서 결정된다. 온실가스의 배출이 중단되어도 기후변화의 양상은 대부분 수백 년 동안 지속될 것이다. 이것은 수세기동안 발생된 주요 기후변화가 과거, 현재, 미래의 이산화탄소 배출량에 의해 지속됨을 의미한다.

88년 결성된 IPCC는 세계 130여 개국 과학자 2,500여 명으로 구성돼 있으며 기후 변화와 관련된 기구 중 가장 규모가 크고 권위가 있으며, 기후 변화와 관련된 최신 연구를 수렴하는 작업을 한다. 5년마다 발표하는 보고서는 세계 환경 정책에 막대한 영향을 미친다. 본 논문은 제5차 평가보고가 발행된 시점에 맞추어 보고서의 핵심적인 사항들을 체계적으로 정리하고자 노력하였다. 따라서 기후변화의 과학적 근거에 관심이 많은 관련 과학자들뿐만 아니라 정책결정자 및 일반 대중에게도 최근 기후변화의 과학적 내용을 제공하는데 큰 역할을 하리라 기대한다. 또한 환경부에서 추진하고 있는 “2014년도 기후변화 대응 환경기술개발사업”의 온실가스 감축 및 기후변화 적응 통합관리 분야 연구에서도 훌륭한 참고 자료로 인용되길 기대한다.

감사의 글

이 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2009-413-B00004). 또한 기상청의 지원으로 수행되었다.

References

IPCC (2013a) Summary for Policy makers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., 33pp.

IPCC (2013b) Technical Report, In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., 129pp.

KMA (2013) Climate Change 2013, Summary for policy makers, (11-1360000-000951-14), Korea Meteorology Administration, 36pp.