

IPCC WGI 평가보고서 주요내용 비교를 통한 기후변화에 관한 과학적 진보

권원태 · 구교숙* · 부경은
국립기상연구소 기후연구팀
(2007년 10월 30일 접수; 2007년 12월 31일 승인)

Progresses of Climate Change Sciences in IPCC Assessment Reports

Won-Tae Kwon, Gyo-Sook Koo* and Kyung-On Boo

Climate Research Lab /National Institute of Meteorological Research /KMA
(Manuscript received 30 October 2007; in final form 31 December 2007)

Abstract

The objective of this study is to describe scientific progresses in understanding of climate change in the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) assessment reports, contributed by Working group I. Since 1988, IPCC's four assessment reports showed significant improvements in understanding of observed climate change, drivers of climate change, detection and attribution of climate change, climate models, and future projection. The results are based on large amounts of observation data, sophisticated analyses of data, improvements of climate models and the simulations. While the First Assessment Report (FAR) in 1990 reported that a detectable anthropogenic influence on climate has little observational evidence, the Fourth Assessment Report (AR4) reported that warming of the climate system is unequivocal and is very likely due to human influences. It is also noted that anthropogenic warming and sea level rise would continue for centuries due to the time scales associated with climate processes and feedbacks, even if greenhouse gas were to be stabilized.

Key words: climate change, human influence, anthropogenic warming, greenhouse gas, AR4

1. 서론

20세기의 지구온난화는 전세계적으로 가장 중요한 관심사로 지구온난화를 줄이기 위한 국제협약인 유엔 기후변화협약 (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)의 궁극적인 목적은 '인간의 간섭에 의한 기후변화가 식량 생산과 지속가능한 발전을 위협하지 않을 수준으로 온실가스 농도를 안정화'하는 것이다. UNFCCC와 같은 국제협약에서 활동 계획이나 의정서를 결정하는데 가장 중요한 자료는 모든 사람들이 인정하는 객관적, 과학적 정보이다. 세계

각국에서 공인하는 기후변화에 관한 보고서는 "정부간 기후변화 협의체 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)"에 의해 작성된다. IPCC는 세계기상기구와 유엔환경계획(UNEP)에 의해 1988년 설립된 이래 세 차례 (1990, 1995, 2001) 평가보고서를 발간하여 UNFCCC 당사국 총회에 제출하였으며, 2007년 4차 평가보고서를 발간하였다.

IPCC는 세계 각국에서 발간되는 학술지의 논문과 각종 보고서들에 게재된 기후변화정보를 평가하여 보고서를 작성한 후 전문가, 각국 정부의 검토를 거쳐 총회에서 최종적 승인을 받는다. IPCC 보고서 작성과정은 공개적이고 투명하게 이루어지며, 보고서는 모든 회원국의 승인을 받아 발간된다. 따라서 지구환경변화와 관련된 국제협약과 의정서 등을 채택함에 있어 전 세계 전문가들의 역량과 객관적이고 공개적으로 작성된 IPCC의 평가보고서, 특별보고서, 기술보고서 등은 매우 중요한 과학정보 자료이다.

*Corresponding Author: Gyo-Sook Koo, Climate Research Lab, National Institute of Meteorological Research, 460-18 Sindaebang-2dong, Dongjak-gu, Seoul 156-720, Korea.
Phone : +82-2-846-2852, Fax : +82-2-846-2853
E-mail : geogen@metri.re.kr

여기서는 네 차례에 걸쳐 발간된 IPCC 평가보고서 제1실무그룹(Working Group I ; WG1)의 과학적 연구부문을 살펴보고 각 보고서에서 제시한 기후정책에 관한 평가를 비교함으로써, 기후변화에 대한 과학적 이해의 진보를 알아보고 현재와 미래의 기후변화를 이해하고자 한다. 1, 2, 3차 평가 보고서는 WG1의 본보고서, 정책결정자를 위한 요약보고서 및 기술 요약보고서를 참조하였고 배출 시나리오에 관한 특별보고서(SRES)의 정책요약보고서를 인용하였다. 4차 평가보고서는 WG1의 정책결정자를 위한 요약보고서 중심으로 분석하였다. 본문에서 주로 사용한 IPCC 보고서의 영문약어는 Table 1과 같다.

2. 기후시스템 내의 지구온난화를 포함한 여러 가지 변화들

가. 기온

a. 전지구 평균기온

기온상승은 지구온난화를 대표하는 현상으로 모든 IPCC 보고서에서 가장 첫 번째로 다룬다. 전지구 평균기온상승에 대해서는 IPCC 3차 평가보고서, 4차 평가보고서의 정책요약보고서에서 정량화된 대표값을 제시하였는데 이는 관측자료 증가에 따라 불확실성이 1차 평가보고서와 2차 평가보고서에 비하여 감소함을 보여준다.

IPCC 1차 평가보고서 (1990, First Assessment Report, 이하 FAR)에 따르면, 1990년 당시 전지구 평균기온은 19세기 중반 이래 0.3~0.6℃ 증가하였고 전구평균 가장 더웠던 5년이 1980년대에 나타났다. 전지구평균기온의 상승범위는 2차 보고서 (1995, Second Assessment Report, 이하 SAR)에서도 FAR와 동일하게 19세기 후

반 이래 0.3~0.6℃를 보이며, SAR 발간시점의 몇 년이 1860년 이래 가장 더운 해 중 하나로 알려졌다. 전지구 평균기온은 3차 보고서 (2001, Third Assessment Report, 이하 TAR)부터 정량화된 대표수치로 보고되어 20세기 (1901~2000년)동안 0.6℃ 상승이 기록되고, 1990년대는 관측기록상 가장 따뜻한 10년이며, 특히 1998년은 가장 더운 해임을 지적하였다. 최근 발표된 IPCC 4차 보고서의 WG1 SPM (이후 AR4 WG1 SPM, 4차 정책 요약보고서라 명명)은 TAR 당시의 기록보다 급격해진 지구온난화 추세를 반영한다. 즉 100년 (1906~2005년)동안 전지구 평균기온은 0.74℃ 증가하고 최근 50년간 지구온난화 추세는 0.13℃/10년으로, 이 상승률은 최근 100년간 추세의 2배에 해당한다. 또한 1850년 이후, 전지구 평균기온은 관측기록상 가장 더운 12년 중 11년이 1995~2006년 안에 포함된다. 참고적으로 기온의 증가추이분석에 사용된 기후값은 FAR에서는 1951~1980년의 30년을 대상으로 하나 SAR 이후 AR4까지 1961~1990년 평균값을 사용하였다.

b. 지역적 기온 변화

지역적 기온변화에 대하여 FAR는 겨울과 봄 북반구 중위도 대륙에서 지구온난화가 가장 큼을, SAR에서는 FAR의 결과와 더불어 북서대서양, 북태평양 중위도에서 연중기온 감소를, TAR에서는 기온상승이 1976~1999년에 특히 북반구 중·고위도에서 크다고 기록한다. 한편 AR4 WG1 SPM에서는 북극의 관측분석이 더해지면서 북극 평균기온이 지난 100년간 지구 평균상승률의 2배를 보이고, 북극 영구동토기온은 1980년 이후 3℃까지 증가하고 1900년 이후 북반구 계절동토의 최대 면적이 7% 까지 감소하며 특히 봄에는 최대 15%까지 감소한 점이 기록되었다.

Table 1. The glossary for Working Group I contribution to the Intergovernmental Panel on climate Change used in this paper.

IPCC 보고서(실무그룹I)	Intergovernmental Panel on Climate Change (Working Group I)	영문약어	발간년도
1차 평가보고서	First Assessment Report	FAR	1990
2차 평가보고서	Second Assessment Report	SAR	1995
3차 평가보고서	Third Assessment Report	TAR	2001
4차 평가보고서 중 정책결정자를 위한 보고서 (실무그룹 I)	Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report, Summary for Policymakers	AR4 WG1 SPM	2007

c. 일교차

이산화탄소 배증 평형 실험 결과 일변화의 감소는 작다고 하였던 FAR의 결과가 SAR에서는 1950년 이후 육지의 최저기온증가가 최고기온 증가량보다 2배 커지면서 일교차가 감소하고 이를 운량면적증가와 관련을 지어 보다 구체화되었다. 이는 1950~1993년간 육지 야간 일최저기온 상승은 $0.2^{\circ}\text{C}/10\text{년}$ 로 주간 상승률의 2배를 보이는 것과 관련이 있다 (TAR). 그러나 AR4 WG1 SPM에서는, 1979~2004년까지 낮기온과 밤기온이 모두 같은 비율로 상승하여, 일교차는 변하지 않고 지역적 변동이 매우 큰 달라진 변동 추이를 언급한다.

나. 강수량

2001년까지 강수량의 변화는 육지 고위도와 열대에 국한된 분석만이 있었고 보다 자세한 지역별 변동추이는 AR4에서 언급되기 시작하였다. 1990년 (FAR)에는 육지, 특히 고위도에서 증가, 아열대에서 감소만이 언급되었던 것이 1995년 (SAR)에는 북반구 고위도 육지에서 특히 가을철 강수량이 증가하였고 20세기동안 육지 강수량은 전지구적으로는 약 1% 증가를 밝혔다. TAR (2001)에서는 20세기동안 북반구 중·고위도에서 $0.5\sim 1.0\%/10\text{년}$ 의 강수량 증가비율과 열대 육지에서는 $0.2\sim 0.3\%/10\text{년}$ 의 증가율이 분석되었다. AR4 WG1 SPM (2007)에서는, 1990~2005년 대부분의 지역에서 강수량이 장기적인 추세이며 남북아메리카 동부지역, 북부유럽, 북부 및 중앙아시아에서 강수량 증가가 뚜렷하였다. 반면에 사헬, 지중해 연안, 남아프리카 및 남아시아 일부 지역에서는 건조화가 관측되었다.

다. 빙하

빙하와 적설면적의 변화는 위성관측자료로 인하여 1995년 SAR부터 면적변화가 정량적으로 언급되었다. FAR에서는 19세기 말 이후 대부분의 고산 빙하 후퇴로 인한 전지구온도 상승만 언급되었던 것이, SAR에서는 1988~1994년 21년의 위성 자료에서 북반구 지표면 적설범위의 감소, 특히 봄에 두드러짐이 관측되었다. TAR에서는 위성자료를 통해 1960년대 이후 적설지역이 10% 감소하고 20세기동안 극지방 이외 지역에서 고산 빙하가 감소하였다. 이러한 빙하와 적설면적의 감소는 남반구에도 나타나고 있음을 AR4 WG1

SPM에 언급하였다 (2007년, 남반구의 자료까지 추가되면서 고산빙하와 적설면적은 양반구에서 모두 감소함이 제시되었다).

라. 해수면

해수면 상승에 대한 수치는 최근에 이르러 정량화되었다. 즉, FAR 당시 19세기 말 이후 100년에 걸쳐 10~20 cm 상승하고 전지구적으로 상승추세는 동일하지는 않았다. SAR도 유사하게 100년에 10~25 cm 상승, TAR에서도 20세기동안 전지구 평균해수면은 10~20 cm 상승을 보고하였다. 그러나 AR4 WG1 SPM에서는 전구평균 해수면은 1961~2003년에 연간 1.8 mm 상승, 특히 1993~2003년은 상승률이 가속화되어 연간 3.1 mm 상승하였는데 1993~2003년동안 해수면 상승에는 그린랜드와 남극 얼음평상의 감소를 원인으로 설명한다.

마. 대기권온도

FAR 당시 많은 지역에서 지표보다 중간대류권에서의 온도상승이 크고 성층권에서 냉각효과를 나타내는 대기 연직구조가 보고되었다. 1991년 피나투보 화산 폭발 이후 1992, 1993년에 상대적으로 대류권 기온은 낮아졌고 하부성층권 기온이 상승했다(SAR). 1994년에는 다시 기온이 상승하였으며 이 때 기온은 1961~1990년 평균보다 약 0.27°C 높았다. TAR에 따르면, 0~8 km의 대기권온도는 지난 40년 동안 상승하고 AR4 WG1 SPM에서는 육지와 해양, 상층대류권에서 1980년대 이후 평균대기의 수증기 함유량 증가가 보고되었다.

바. 극한 기후값

FAR 당시 미래 고온현상이 빈번해지고, 저온현상은 빈도가 작아질 가능성이 언급되다가 SAR에서는 20세기 기후변동에서 전지구 변화와 날씨의 극값 일치 여부를 판단하기에는 자료가 불충분하여, 극한현상이나 기후변동성이 20세기에 전지구적으로 증가한다는 증거들은 나타나지 않는다고 보고되었다. 그 뒤 TAR에서는 20세기동안 전지구적으로 극심한 가뭄 또는 호우 지역의 증가는 적지만, 아프리카, 아시아 등 일부지역에서는 가뭄빈도와 강수가 수 십년간 증가함을 밝혔

다. AR4 WG1 SPM은 호우사례 빈도는 대부분의 육지지역에서 증가하고, 극한기온의 변화는 지난 50년간 관측되었으며 더운낮과 더운밤, 열파가 빈번하게 발생하고 있다고 보고하였다.

사. 순환

1990년 FAR에는 대서양, 유럽 등 몇몇 지역에서 지난 세기동안 지역적인 대기순환변동의 발생만이 언급되나 SAR와 TAR는 ENSO의 변화를 언급한다. 1990~1995년 중반까지 지속된 ENSO의 긴 지구온난화가 최근 120년의 정황에서 보면 비정상적이었던 SAR의 기록이 TAR에서는 ENSO현상이 1970년대 중반부터 빈번해지고 강화됨을 보고하였다. AR4 WG1 SPM은 북대서양에서 강한 열대저기압 활동이 증가한다는 관측 증거를 보이고, 그 원인으로 1970년 이후 열대해수면 온도 상승을 언급한다. 그러나 현재까지도 전구해양의 자오선 순환, 토네이도, 우박, 먼지폭풍 등 소규모현상의 장기적 추세는 증거가 불충분한 상태이다.

3. 인간활동에 의한 온실가스와 에어러솔 배출

가. 온실기체 농도

인간활동에 의한 배출은 CO₂, CH₄, CFCs, N₂O 등 온실가스의 대기농도를 증가시켰다 (IPCC, 1990). SAR은 온실기체의 농도는 지속적으로 증가한다고 보고하였으며, CO₂, CH₄, N₂O는 산업혁명 이전부터 증가하여 1992년 당시 각각 30%, 145%, 15% 증가하였다. 이러한 증가경향은 인간활동에 기인하며 대부분 화석연료 사용, 토지이용도 변화 및 농업에 의해 좌우된다. TAR에서도 온실가스농도는 인간활동의 결과로 계속 증가하고 있다고 보고되었고, 1750년 이후 CO₂, CH₄, N₂O는 31%, 151%, 17%로 증가하였다. TAR당시 CO₂는 과거 20년간 인위적인 배출의 약 3/4이 화석연료 연소에 의한 것이며 나머지는 토지이용도 변화 특히 삼림개간이 원인으로 20년간 증가율은 매년 1.5 ppm (0.4%)이다. 또한 CH₄ 농도 증가의 절반 이상, N₂O 농도 증가의 약 1/3은 인위적인 요인에 의한 것이었다. 1750년 이후 CO₂, CH₄, N₂O의 전구평균농도는 AR4 WG1 SPM에 와서도 인간활동의 결과로 뚜렷하게 증가함이 보고되었다. 대기 중 CO₂농도는 산업혁명 이전 280 ppm에서 2005년 379 ppm으로 약 35%

증가하였고, 주요원인은 화석연료 사용과 토지이용변화를 든다. 화석연료에 의한 CO₂ 연배출량은 1990년대 평균 연간 6.4 GtC에서 2000~2005년 평균 연간 7.2 GtC으로 증가하였고, 토지 이용변화에 따른 CO₂ 배출량은 1990년대 평균 1.6 GtC으로 추정된다. 대기 중 CH₄농도는 산업혁명 이전 715 ppb에서 1990년대 1732 ppb, 2005년에 1774 ppb로 증가하였다. CH₄농도의 증가원인은 인위적인 활동이 거의 확실하며 주로 농업과 화석연료 사용에 의한다. 대기 중 N₂O의 농도는 산업혁명 이전 270 ppb에서 2005년에 319 ppb로 증가하였으며, 1/3 이상이 인위적인 요인으로 대부분 농업에 의한다.

나. 온실기체에 의한 복사강제력

FAR에서는 수명이 긴 기체들은 현재수준에서 농도 안정화를 위해 60% 이상의 인간활동에서 오는 배출이 즉각적으로 감소해야 한다고 지적하였으며, CH₄은 15~20%의 감소를 요구하였다. SAR은 수명이 긴 온실기체의 직접복사강제력은 2.45 W m⁻²로 주로 CO₂, CH₄, N₂O는 각각 1.56 W m⁻², 0.47 W m⁻², 0.14 W m⁻²를 차지하였다. CFCs, HCFCs에 의한 직접 복사강제력은 0.25 W m⁻²이나, 이는 음의 복사강제력을 야기하는 성층권 오존파괴의 원인이 되므로 순 복사강제력은 0.1 W m⁻²까지 감소한다. 또한 북반구에서 대류권 오존은 인간활동으로 인하여 산업혁명 이래 증가하고, 약 0.4 W m⁻²의 양의 복사강제력으로 추정하였다. TAR에서도 복사강제력이 인간활동의 결과로 인해 계속 증가하였다. 1750~2000년까지 온실가스 증가로 인한 복사강제력은 2.43 W m⁻²였으며, CO₂ (1.46 W m⁻²), CH₄ (0.48 W m⁻²), 할로젠화탄소 (0.34 W m⁻²), N₂O (0.15 W m⁻²) 농도 증가에 의한다. 1979~2000년까지 관측된 성층권 오존층 감소는 약 0.15 W m⁻²의 음의 복사강제력으로 추정된다. 1750년대 이후 대류권 오존량은 오존 형성 기체의 인위적 배출로 인해 36% 증가하였고 약 0.34 W m⁻²의 양의 복사강제력을 갖는다. AR4 WG1 SPM에 의하면 1750년대 이후 인간활동에 의한 전지구평균 순영향은 지구온난화이며, 양의 복사강제력이 1.6 W m⁻²로 매우 확실시되었다. CO₂, CH₄, N₂O 증가로 인한 총복사강제력은 2.30 W m⁻²이며, CO₂ 복사강제력은 1995년부터 2005년까지 20% 증가하였다. 오존형성화합물 (질소산화물, 일산화탄소, 탄화수소) 방출에 의한 대류권 오존 변화는

0.35 W m^{-2} , 할로카본 변화에 의한 직접복사강제력은 0.34 W m^{-2} , 지표피복 변화에 의한 복사강제력은 -0.2 W m^{-2} 이다. 1750년 이후 태양복사변화에 의한 복사강제력은 0.12 W m^{-2} 로 3차 보고서 추정치의 1/2 값이다.

다. 에어러솔에 의한 복사강제력

FAR 당시 인위적 에어러솔은 지역적 냉각효과의 원인으로 가능성만 인식되고, 정량적으로 유효한 자료는 없었다. SAR에서는 인위적 에어러솔은 음의 복사강제력을 일으키고, 화석연료 연소, 바이오매스의 연소 또는 다른 배출원에 의해 생기는 대류권 에어러솔은 지구 평균 약 0.5 W m^{-2} 의 음의 복사강제력이 보고되었다. TAR에 의하면 인위적인 에어러솔은 대기 중 생존기간이 짧고 주로 음의 복사강제력을 일으키며, 직접복사강제력은 황산염 (-0.4 W m^{-2}), 생물체 연소에 의한 에어러솔 (-0.2 W m^{-2}), 화석연료 유기탄소 (-0.1 W m^{-2}), 화석연료 검댕 에어러솔 (0.2 W m^{-2})에 의한 것이다. 에어러솔은 직접적인 복사강제력 뿐만 아니라 구름에 미치는 영향을 통한 간접적 복사강제력도 언급되었다. AR4 WG1 SPM은 에어러솔(황산, 유기탄소, 검댕, nitrate, 먼지)에 의한 인위적 기여는 냉각효과를 가져오며 총직접복사강제력은 -0.5 W m^{-2} , 간접구름 알베도강제력은 -0.7 W m^{-2} , 검댕 에어러솔의 눈 위 침적에 기인한 지표 알베도 변화는 $+0.1 \text{ W m}^{-2}$ 의 복사강제력을 가진다. AR4 SPM에 따르면 복사강제력에 대한 이해는 지상관측, 위성 등의 관측자료의 향상과 모델링에 의해 TAR에 비해 증진되었으나 불확실성은 여전히 남아있다고 언급되어 있다.

4. 기후변화 탐지 및 원인규명

FAR 당시 기후변화 패턴 예측에 대한 확신이 제한적이기 때문에 인위적 신호에 대해서는 아직 알 수 없으며, 지금까지의 변화들은 자연변동성과 또 다른 효과(아마도 인간활동에 의한 효과)에 의해 잘 드러나지 않을 수 있기 때문에 정확하게 제시할 수 없다고 밝혔다. SAR에서는 기후에 대한 인위적인 영향을 확인하려는 시도에 많은 진전이 세가지로 언급되었다. 첫째, 증거의 균형을 통해 전지구 기후에 미치는 인간의 영향을 식별할 수 있으나, 인위적인 신호는 자연적 기후변동의 배경값으로 드러나고 있다. 둘째, 온실기체에 추가하여

황산 에어러솔의 영향을 포함함으로써 인간에 의한 복사강제력을 좀 더 현실적으로 추정하게 되었으며 이에 따라 기후에 미치는 인위적 영향과 자연적 영향을 구별해내기 위한 시도가 있었다. 셋째, 모델을 이용하여 관측된 기후변화 일부를 인간활동의 결과로 돌리려는 시도로 유형을 근거로 한 방법(pattern-based-method)을 적용하여 원인-영향 관계를 정립하였다.

TAR는 50년간 관측된 지구온난화의 대부분은 온실가스 농도 증가에 의한 것일 가능성이 있다고 하였다. 또한 해수의 열적 팽창과 육지 얼음의 광범위한 감소를 통해 20세기의 지구온난화는 관측된 해수면 상승에 대한 기여도가 큰 것 같다고 보고하였다. 인위적 기후변화에 대한 이해는 TAR 이후 개선되었으며, AR4 WG1 SPM은 지구온난화는 논란의 여지가 없을 정도로 명백하다고 밝혔다. 20세기 중반 이후 전지구 평균 기온 상승값의 대부분이 인위적인 온실가스 증가에 의한 것일 가능성이 매우 높고 온실효과가 지표기온, 해양온도, 해수면 상승에 기여함을 규명하였다. 또한 관측의 제약과 기후모델 분석은 처음으로 기후민감도에 대한 평가의 가능 범위를 제시할 수 있게 하며, 복사강제력에 대한 기후시스템 반응의 이해에 대한 확신도를 증가시킨다.

5. 기후 시나리오

기후시나리오는 인간에 기인한 기후변화의 잠재적인 영향을 조사하는데 사용되기 위해 구성된 미래 기후에 대한 표현이다. IPCC의 기후시나리오 개발은 실무그룹 I의 기후변화의 과학에 관한 평가, 실무그룹 II에서 고려되고 있는 영향, 적응, 취약성 평가, 실무그룹 III에서 다루어지는 배출시나리오 등에 의한다. 미래의 인위적인 기후변화 예측은 특히 온실기체와 에어러솔 전구물질의 미래 배출량과 대기 중에 남아있는 배출량의 비율에 관한 가정에 따라 달라진다.

FAR의 배출 시나리오는 CO_2 , CH_4 , N_2O , CFCs, CO, NO_x 기체들의 2100년까지의 배출을 포함한다. 경제성장률과 인구는 네 가지 시나리오(시나리오 A, B, C, D)에서 동일하게 가정되고 Business-as-Usual 시나리오(시나리오 A) 하에서는 에너지 공급이 석탄에 집중되어 있으며 2100년까지 CO_2 대기 중 배출농도가 6.84 W m^{-2} 로 될 것으로 예상된다. 시나리오 B는 온실가스 배출 억제가 낮은 시나리오로 2100년까지 CO_2 의 대기 중 배출농도는 4.43 W m^{-2} 로 예상하고, 시나리오

C는 2100년까지 3.62 W m^{-2} 의 CO_2 배출을 예상하였다. 가장 강력한 배출 억제 정책을 포함한 시나리오 D는 2100년까지 CO_2 의 대기 중 배출을 2.90 W m^{-2} 로 예상하였다. SAR에서 사용된 IS92 시나리오 (IS92a-f)들은 1990년부터 2100년에 대해 인구와 경제성장, 토지이용도, 기술변화, 에너지활용도, 연료혼합물에 관한 가정에 기초를 두고 온실기체와 에어러솔 전구물질의 범위를 달리하였다. IS92a 시나리오는 2100년에 전세계 인구를 113억으로, 경제는 2.3% 성장을 예상하며, 2100년 CO_2 농도는 733 ppm로 예상한 시나리오이다. IS92c 시나리오는 2100년 전세계 인구는 64억, 경제성장은 1.2% 증가, CO_2 농도는 485 ppm로 예상한 2100년 예상 농도가 낮은 배출시나리오이다. IS92e 시나리오는 2100년까지 전세계 인구 113억, 경제성장 3.0% 증가, CO_2 의 대기 중 농도는 2100년 986 ppm를 예상한다.

1996년 IPCC는 IS92 시나리오들을 대체하는 새로운 배출시나리오를 개발하기 시작하고, 개발된 SRES 시나리오들은 TAR 이후부터 사용되었다. A1 (A1FI, A1T, A1B), A2, B1, B2의 네 가지 SRES 배출 시나리오군, 40개 시나리오를 구성하고 이들은 미래의 온실가스와 황산염 에어러솔을 인구통계, 경제, 기술적 측면에서 다루고 있다. A1 시나리오 집단은 에너지 시스템의 기술변화 대안방안에 따라 세 그룹으로 나뉜다. A1FI 시나리오는 화석연료 의존형 시나리오로 대기 중 CO_2 농도가 2100년 970 ppm을 예상하며, A1T 시나리오는 비화석연료 중심으로 2100년까지 CO_2 농도는 540 ppm을 예상한다. A1B 시나리오는 2100년까지 CO_2 농도가 지속적으로 증가하여 720 ppm에 이를 것으로 예상하고 에너지 공급원이 균형을 이룬다. A2 시나리오는 혼합세계를 설정하고 인구의 지속적 증가를 가정하여 2100년 CO_2 농도는 830 ppm에 도달할 것을 예상한다. B1 시나리오는 A1 시나리오와 마찬가지로 금세기 중반에 최정점을 보이다가 그 이후에 감소하지만 부가적인 기후 이니셔티브 없이 개선된 형평성을 포함하여 경제, 사회, 환경 분야의 지속가능성에 대한 전지구적 해결을 강조하고 있는 시나리오로 2100년 CO_2 농도는 550 ppm을 예상한다. B2 시나리오는 경제, 사회, 환경 분야의 지속가능성에 대해 지역적 해결을 강조하며 2100년 CO_2 농도는 600 ppm에 이를 것을 예상한 시나리오이다.

6. 모델

기후를 과학적으로 이해하고 미래 기후를 예측하는

데 가장 강력한 도구는 대기-해양-빙권 등을 삼차원으로 표현하는 결합기후모델이다. 기후모델은 1970년대에는 대기모델로만 구성된 전구순환모델 (General Circulation Model), 1980년대에는 지표모델, 1990년대 초에는 해양-해빙모델이 추가·개발되어 급속히 발전한다. 1990년대 중반 이후 황순환 및 에어러솔 모델, 탄소순환모델이 추가되어 인위적인 기후변화를 예측하기에 적합한 모델로 진보하였다. 1990년 FAR에서의 대기-해양 결합은 매우 초보 단계이며, 대부분 Atmospheric-Ocean Mixed layer model을 사용하였다. 비역학 slab 모델과 대기 모델을 결합한 결과에 의존하였기 때문에 ENSO와 관련된 변동성은 모의할 수 없었다. 1995년 SAR에서는 결합모델링이 급속하게 가속화되었고 11개의 결합 모델 (BMRC, CCC, COLA, CSIRO, GFDL, GISS, IAP, MPI, MRI, NCAR, UKMO)이 사용되었다. 이 모델에서 기후의 대규모 특징들이 평균적으로 잘 모의되었으며, 반구, 대륙 등의 큰 공간 규모의 모의가 지역규모 결과보다는 정확하였다. 일부 AOGCM에서 ENSO를 닮은 변동성이 CO_2 증가에 따라 거의 변화가 없거나 적도상 동태평양에서 해수면 변동성의 감소를 보였다. ENSO와 같은 변동성이 포함된 전지구 AOGCM은 열대지역 동서 평균 하층 대류권의 기온에서 연간변동성이 주로 열대성 대륙에 미치는 영향으로 증가할 수 있다고 제기하였다.

2001년 TAR에서 미래 기후예측을 위한 모델의 능력에 대한 신뢰도가 증가하였고, 총 21개의 결합 모델 (ARPEGE/OPA2, BMRCa, CCSR/NIES, CCSR/NIES2, CGCM1, CGCM2, CSIROmk2, CSM1.0, CSM1.3, ECHAM3/OPYC, GFDL_R15_a, GFDL_R15_b, GFDL_R30_c, GISS2, GOALS, HadCM3, IPSL-CM2, MRI1, MRI2, DOE PCM)이 사용되었다. 이 시기에도 모델은 기후의 모든 양상은 모의할 수 없고 특히 구름, 구름-복사, 구름-에어러솔 간의 상호작용에는 불확실성이 있다. 몇몇 모델에서는 열과 수증기 플럭스의 비물리적인 보정없이 최근 기후에 대한 모의결과를 생산하여 만족스러운 결과를 보였다. TAR에 이르러 결합모델을 이용한 ENSO 모의 능력이 개선되었다. 그러나 엘니뇨와 관련된 해수면 온도의 최대 변동 지역은 서쪽으로 옮겨져 나타났고 강도는 약하게 나타났다. 이전까지 결합모델에서 모의하지 못했던 문순과 북대서양 진동(NAO)을 포함한 다른 현상들이 TAR에 와서 적절히 다루어졌다.

AR4 WG1 SPM (2007)에서는 다양한 모델로부터

가능한 시뮬레이션 수가 많아졌으며 보강된 관측자료를 바탕으로 미래 기후변화 추정에 대한 정량적인 근거를 제공하게 되었다. 4차 보고서에서는 총 23개 (BCC-CM1, BCCR-BCM2.0, CCSM3, CGCM3.1(T47), CGCM3.1(T63), CNRM-CM3, CSIRO-MK3.0, ECHAM5/MPI-OM, ECHO-G, FGOALS-g1.0, GFDL-CM2.0, GFDL-CM2.1, GISS-AOM, GISS-EH, GISS-ER, INM-CM3.0, IPSL-CM4, MIROC3.2(hires), MIROC3.2(medres), MRI-CGCM2.3.2, PCM, UKMO-HadCM3, UKMO-HadGEM1)의 결합 모델이 사용되었다. TAR 이후 AOGCM은 다양한 시간 규모대에서 대규모 변동을 더 잘 모사하였다. 모델들은 북반구와 남반구 연동모드, PDO, PNA 등 중위도 패턴을 잘 모사하였다. 적도에서는 엘니뇨의 주기와 공간 패턴등이 향상되었으나 seasonal phase locking, 엘니뇨-라니냐 간의 비대칭성은 여전히 문제점으로 남아있다. IPCC에서 사용된 결합모델들은 미래 기후변화에 대하여 대륙규모 이상에서는 신뢰할 수 있는 수준의 결과를 모의한다. 이것은 모델은 역학법칙에 기반을 두고 현재 기후의 중요한 현상을 잘 모의하고 있으며 과거의 기후 및 기후변화를 재생산하는데 성공했다는 것을 의미한다. 그러나 모델은 아직까지 중요한 몇몇 개선점을 보이고 있어 미래기후변화를 전망하는데 있어 불확실성에 대한 평가를 포함하여야 한다.

7. 미래 기후변화 전망

미래 기후변화에 따른 영향과 취약성을 평가하고 이에 대한 적응조치를 개발하는 것이 기후변화에 대한 피해를 줄이는데 매우 중요하다. 이를 위해서는 미래에 기후가 어떻게 변할 것인지에 대한 전망이 필수적이다. IPCC 평가보고서에서는 기후모델의 발전과 아울러 미래전망에 대하여 급속한 발전을 이루었다.

가. 기온

a. 전지구 평균 기온 전망

FAR은 온실가스 배출 시나리오 IPCC Business-as-Usual 하에서 다음세기동안 전구 평균기온의 증가율이 $0.3^{\circ}\text{C}/10\text{년}$ 이고, 2025년까지 현재보다 1°C , 2100년까지 3°C 증가할 가능성을 전망한다. IPCC 배출 시나리오 B를 가정하면 $0.2^{\circ}\text{C}/10\text{년}$, 시나리오 C와 D 하에서는 $0.1^{\circ}\text{C}/10\text{년}$ 의 기온증가를 전망한다. SAR은 6

개의 IS92 시나리오를 바탕으로 약 $1.0\sim 3.5^{\circ}\text{C}$ 의 기온 증가를 전망한다. IS92a 시나리오에서 기후민감도의 최적추정값을 가정하고 에어러솔의 예상 증가분을 고려하여 모델에서 전지구 평균 지표면 기온증가는 1990년과 비교하여 2100년까지 약 2°C 상승을 전망한다. 이것은 시나리오가 배출량을 낮게 가정하고 황산 에어러솔의 냉각효과를 삽입하고 탄소순환 처리를 개선했기 때문이다. 배출량이 작은 IS92c 시나리오는 기후민감도와 결합하고 에어러솔 미래 농도 변화를 포함할 때 2100년까지 약 1°C 기온상승이 예상된다. 배출량이 큰 IS92e 시나리오와 기후민감도가 높은 값을 결합하였을 때 에어러솔 미래 농도 변화를 포함하면 약 3.5°C 의 지구온난화가 전망된다.

TAR에서는 1990~2100년동안 전지구 평균 지표면 온도는 $1.4\sim 5.8^{\circ}\text{C}$ 증가를 예상하며, 이는 35개 SRES 시나리오에서 나온 기후모델에 기초한다. TAR에서 전망한 기온 증가는 SAR의 증가값보다 크고, 이는 IS92 시나리오에 비해 SRES 시나리오에서 이산화황의 배출을 더 낮게 가정하기 때문이다. AR4 WG1 SPM에서는 향후 20년간 SRES 배출 시나리오에서 약 $0.2^{\circ}\text{C}/10\text{년}$ 의 기온증가율을 예상한다. 모든 온실가스와 에어러솔이 2000년 수준을 유지한다고 할지라도 추가적으로 10년간 0.1°C 의 기온상승이 기대된다. 6개의 주요 SRES 시나리오에서 전구평균 지구온난화의 최적 추정치와 가능범위를 제시하였다. 최저배출 시나리오인 B1 시나리오에서는 $1.8[1.1\sim 2.9]^{\circ}\text{C}$ 를, 최대배출 시나리오인 A1FI에서는 $4.0[2.4\sim 6.4]^{\circ}\text{C}$ 의 값을 제시하였다.

b. 지역적 기온 전망

FAR은 육지는 해양보다 빠르게 온난화되고, 겨울철 전구평균보다 북반구 고위도 지역에서 온난화가 더 클 것을 전망하였다. 그러나 지역기후변화는 전구평균과는 다르고 지역적인 변화전망의 신뢰도는 낮다고 보고하였다. SAR에서는 모델 모의 결과 겨울철 해양보다 육지 표면의 온난화가 더 크고, 겨울철 북반구 고위도에서 온난화가 최대, 여름철 남극에서 온난화는 거의 나타나지 않을 것으로 전망하였다. TAR는 최근 전지구 모델에 의하면 거의 모든 육지지역은 전지구 평균보다 더 빨리 온난화되며, 특히 겨울철 북반구 고위도 지역에서 온난화가 매우 빨리 진행될 것을 전망하였다. AR4 WG1 SPM은 21세기 지구온난화는 육지와 북반구 고위도에서 가장 크고, 남반구 해양과 북대서

양에서 가장 작게 전망하였다.

c. 강수량

미래의 기온 증가 전망에 따라 강수량도 증가할 것으로 FAR는 전망하였다. SAR는 전지구적으로 평균 물순환이 강화되며, 겨울철 고위도에서 강수량과 토양 수분이 증가할 것으로 예상하였다. TAR에 의하면 전지구 평균 수증기량과 강수량은 21세기동안 증가할 것이고, 21세기 하반기까지 강수량은 겨울철 북반구 중·고위도 지역과 남극에서 증가할 것으로 전망하였다. AR4 WG1 SPM은 강수량이 고위도에서 증가 가능성이 매우 높은 반면 아열대 육지에서는 감소할 가능성을 높게 전망하였다. 그리고 A1B 시나리오에 의하여 2100년까지 약 20% 감소를 예측한다.

d. 빙하

결합모델에서 빙하 예측을 위한 해양-해빙모델은 1990년대 초에 추가되어 시뮬레이션되었기 때문에, TAR부터 빙하 변화를 전망한다. TAR에 의하면 북반구 적설면적과 해빙넓이는 감소하고, 21세기동안 빙하와 얼음모자는 지속적으로 광범위하게 감소할 것으로 전망한다. AR4 WG1 SPM은 적설면적의 축소와 더불어 영구동토가 해동되는 깊이가 증가하는 지역이 확대될 것을 전망한다. 해빙은 모든 SRES 시나리오에서 북극과 남극 모두에서 축소할 것으로 예상되었다.

e. 해수면

FAR (1990)의 Business-as-Usual 시나리오에 의하면 전구평균 해수면 상승률은 다음 세기동안 6 cm/10yr이며, 이것은 주로 지표얼음의 녹음과 해양에서의 열팽창에 의한 것임을 전망한다. 2030년까지 해수면은 20 cm, 2100년까지 65 cm 상승을 예측한다. SAR (1995)에서도 평균해수면이 해양의 열적팽창과 빙하 및 얼음평상의 녹음으로 인해 상승할 것으로 예상한다. IS92a 시나리오를 가정할 때, 기후민감도와 지구온난화에 따른 얼음녹음의 감응 정도를 최적 추정값으로 가정하고 에어러솔의 미래 변화 영향을 포함하면 모델 예측결과 현재부터 2100년까지 해수면이 약 50 cm 상승할 것으로 예상한다. 이 값은 FAR (1990)의 최적추정값보다 약 25% 낮고, 이는 기온상승 전망값이 작아졌을 뿐 아니라 기후 및 얼음녹음 모델의 개선 때문이다. IS92c 시나리오와 기후 및 얼음녹음에 대한 가장 낮은 민감도를 결합하고 에어러솔 영향을 포함시킨 경

우, 현재부터 2100년까지 해수면은 약 15 cm 상승을 예상한다.

IS92e 시나리오와 기후 및 얼음녹음에 대한 가장 높은 민감도를 결합하고 에어러솔 영향을 포함시키면, 현재부터 2100년까지 해수면은 약 95 cm 상승을 예상한다. TAR (2001)에 의하면 전지구 평균 해수면은 SRES 시나리오 전범위에서 1990~2100년 기간동안 0.09~0.88 m 상승할 것이며, 그 원인은 열적팽창과 빙하 및 얼음모자 크기의 감소이다. AR4 WG1 SPM (2007)은 2090-2099년의 전구평균 해수면 상승 모델은 각각의 시나리오 중간값이 TAR의 2090-2099년 모델 평균의 10% 내에 있다고 밝혔다. AR4 WG1 SPM에서는 복사강제력이 A1B 시나리오수준으로 2100년까지 안정화된다면 열적팽창만으로 2300년까지 1980-1999년에 비해 0.3 m에서 0.8 m로 해수면이 상승될 것을 전망한다.

f. 대기 순환, 극값 등

FAR (1990)은 ENSO와 관련한 변동성을 모의할 수 없는 비역학 slab 모델과 대기 모델을 결합한 결과에 의존하였으므로 ENSO 등의 변화를 전망할 수 없었다. SAR (1995)은 북대서양 온도-염분 순환 강도의 감소와 극심하게 더운 날의 발생횟수 증가 및 극심하게 추운 날의 발생횟수 감소를 전망하였다. 또한 열대성 저기압과 같은 심한 폭풍의 발생횟수나 지리적 분포 변화에 대해서 현재로서는 언급하기 힘들다고 밝혔다. TAR (2001)에서는 향후 100년간 엘니뇨 현상의 크기는 거의 변화없거나 조금 증가할 것을 예상하였다. 당시 대부분의 모델은 북반구 고위도 지역으로의 열수송을 감소시키는 해양 열염분 순환의 약화를 모의하였다. AR4 WG1 SPM(2007)에서는 열대저기압이 더욱 강해질 가능성이 높고 열대 해수면온도의 지속적인 상승과 더불어 호우 및 최대풍속이 증가할 것을 예상한다. 또한 고온극한, 열파, 호우는 지속적으로 빈발할 가능성이 매우 높다고 전망하였다.

8. 인위적 기후변화의 지속 여부

FAR (1990)은 인간활동의 결과로서 예측되는 온실기체 농도의 지속적인 증가로 다가오는 세기에 뚜렷한 기후변화를 일으킬 수 있다고 제시한다. SAR (1995)은 인위적 기후변화에 대한 초기 증거가 있는 만큼 모델결과가 맞다면 인위적 기후변화의 지속은 설득력

이 있을 것으로 보고하였다. TAR (2001)에서는 인위적인 기후변화는 수세기동안 지속될 것이라 보고되었다. AR4 WG1 SPM (2007)에 의하면 온실가스 농도가 안정화된다고 할지라도 인위적인 지구온난화와 해수면 상승은 기후과정 및 되먹임과 연관된 시간규모로 인해 수세기동안 지속될 것이다. 또한 기후-탄소 순환 피드백에 대한 최근의 이해에 기초하면, 모델은 이산화탄소 농도가 450 ppm으로 안정화되어야 한다고 언급한다.

9. 불확실성(Uncertainty) 및 향후계획

불확실성은 오차범위로 이해하는 것이 더욱 정확하다. 기후변화 메커니즘의 이해, 자연적인 변동성 평가, 미래 인구증가 및 정책, 과학기술의 발달, 미래 온실가스 및 에어러솔 배출량 및 농도, 기후모델의 성능, 지역 기후의 상세화기법 등 기후변화에 대한 불확실성은 여러 가지 분석 방법을 적용할수록 커진다. 미래 기후변화에 대응하기 위해서 오차범위를 보다 정확하게 평가하는 것이 필요하다.

FAR (1990)은 기후변화의 지역적 패턴과 정도, 시간에 따른 예측에서 불확실성이 있으며 이는 미래농도 예측에 관련된 온실가스 배출원과 흡수원, 기후변화의 정도와 패턴에 영향을 주는 구름과 해양, 해수면 상승에 영향을 주는 극빙상 등에 대한 불완전한 이해 때문이었다. SAR (1995)은 불확실성을 줄이기 위해 몇 가지 우선적인 작업을 제시한다. 첫째, 온실기체, 에어러솔 및 에어러솔 전구물질에 대한 미래 배출량과 생지화학적 순환에 관한 추정 및 미래 농도와 복사 특성 예측, 둘째, 모델 내 기후과정과 기후변화의 설명 및 예측 개선을 위한 구름, 해양, 해빙, 식생과 관련한 피드백 효과, 셋째, 모델 실험과 기후변동의 탐지 및 규명 연구를 위하여 기후시스템의 변수들에 대한 장기간의 계기 또는 대체 관측자료의 체계적인 수집이 필요하다.

TAR (2001)는 기후변화에 대한 탐지, 원인 추정, 이해 능력 향상, 불확실성 감소와 더불어 미래 기후예측 연구 필요성을 제시한다. 특히 추가적으로 체계적이고 지속적인 관측, 과거 기후에 대한 재구축 개발, 복사강제력 변화 유발 메커니즘과 요인에 대한 이해를 향상시키는 등 모델링 과정에 대한 연구가 필요하다고 평가하였다. AR4 WG1 SPM (2007)에서는 기후-탄소 순환결합은 기후시스템이 온난화됨에 따라 대기에서 이산화탄소가 증가할 것이나, 그 되먹임의 양은 불확

실하다고 제시하였다.

10. 종합결과과 토의

‘기후변화에 관한 정부간 협의체 (IPCC)’는 3차례에 걸친 평가보고서를 발간하였고, 2007년 실무그룹 I의 4차 평가보고서가 발간되었다. 1988년 설립된 이후 20년의 기간 동안 IPCC는 기후시스템 내에서 나타나는 변화와 지구온난화의 원인규명에 대한 과학적인 근거제공의 원천을 담당하여 왔다. 관측, 분석기법 및 모델의 과학기술 발달을 통해 기후변화에 대한 불확실성이 감소되어 전지구 및 지역적으로 나타나는 기후변화를 과학적으로 이해하는데 많은 진보를 보였다.

한 예로 인위적인 요인에 의한 기후변화여부에 대한 논란에 대하여 FAR (1990)에서 ‘관측자료를 분석한 결과 온실가스 증가효과를 정확히 탐지하는 것은 빠른 시일 내에 쉽지 않을 것 같다’고 하였다. FAR 이후 기후에 대한 인위적인 영향을 확인하려는 시도를 바탕으로 SAR(1995)의 ‘인간이 전지구 기후변화에 영향을 끼친 증거가 있다’에 이어 TAR (2001)에서는 ‘인간의 활동이 과거 50년간의 기온상승을 유발했다는 새롭고 강력한 증거가 있다’는 과학적 진전을 보였다. 2007년 AR4 WG1 SPM에 와서는 ‘20세기 중반 이후 전지구 평균 기온 관측 상승값의 대부분은 인위적인 온실가스 관측의 증가에 의한 것일 가능성이 매우 높다’고 보고하여 지구온난화는 더 이상 논란의 여지가 없이 명백하게 되었다.

과학기술의 진보에 따른 불확실성의 감소는 지구온난화에 대한 기온과 해수면 상승 수치가 정량화되었다는 점에서 가장 뚜렷하다. 강수량, 빙하, 극한기후 역시 관측자료의 보강을 통해 보다 지역적인 변화추세까지 밝혀졌다. 기후변화의 원인물질인 온실가스의 변화율에 대해서도 지속적으로 감시되고 있으며 특히 에어러솔의 복사강제력 규명이 많이 진전되었다. 1990년대 부터 시작된 모델의 급속한 발전 역시 두드러진 과학적 진보 중 하나이다. 이로부터 기온, 강수량과 해수면 상승높이로 기술된 미래 전망에 있어 불확실성의 범위가 감소하였다.

과거 FAR (1990)에 따르면 ‘인간활동의 결과로서 예측되고 있는 온실기체 농도의 지속적인 증가로 인하여 다가오는 세기에 뚜렷한 기후변화를 일으킬 수 있다’고 알려져 왔다. SAR(1995)에서도 ‘인위적 기후변화에 대한 초기증거가 있는만큼, 모델 결과가 맞다면

인위적 기후변화의 지속은 설득력 있을 것이다'고 하였던 점이 TAR(2001)에 와서는 '인간활동으로 인한 온실가스와 에어러솔의 배출은 기후에 영향을 줄 것으로 예상되는 방향으로 대기를 지속적으로 변화시키고 있으며, 지난 50년동안 관측된 대부분의 지구온난화는 인간활동에 기인한 것이라는 새롭고 유력한 증거가 있다'고 진전된 기술을 하고 있다. 또한 21세기 동안 인간의 영향에 의해 대기조성은 계속해서 변화할 것으로 예상하고 전지구 평균온도와 해수면은 모든 온실가스 배출 시나리오에서 상승하고, 이러한 인위적인 기후변화는 여러 세기동안 지속될 것이라고 전망하였다. 따라서 과학적 뒷받침하에서 AR4 WG1 SPM (2007)의 '온실가스 농도가 안정화된다고 할지라도 인위적인 지구온난화와 해수면 상승은 수세기동안 지속될 것이다'의 전망을 고려할 때 기후변화대응은 더 이상 지체될 수 없으며 다각적으로 접근하여 대책을 마련해야 할 시기임을 알 수 있다.

감사의 글

이 연구는 “metri-2007-B-5”의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Climate Impact Assessment Program (CIAP), 1975: Impacts of Climatic Change on the Biosphere. CIAP Monograph 5, Part 2 - Climate Effects. Department of Transportation, CIAP, Washington, D.C.
- IPCC, (Intergovernmental Panel on Climate Change) 1990: Climate Change: The IPCC Scientific Assessment, J. T. Houghton, G. J. Jenkins and J. J. Ephraums (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK. 365 pp.
- IPCC, 1992: Climate Change 1992: Climate Change 1992: The supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. J. T. Houghton, B. A. Callander and S. K. Varney (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, 198 pp.
- IPCC, 1994: Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios, J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, J. Bruce, Hoesung Lee, B. A. Callander, E. Haites, N. Harris and K. Maskell (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK. 339 pp.
- IPCC, 1996: Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J. T., L. G. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, and K. Maskell (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 572 pp.
- IPCC, 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contributions of working group I to the third assessment report of the governmental panel on climate change, J. T. Houghton et al, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 881 pp.
- IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Working group I contribution to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Summary for Policymakers, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 996 pp.
- WMO, 1979: Proceedings of the World Climate Conference, Geneva, 12-23 February 1979. WMO 537.
- WMO, 1984: Scientific Plan for the World Climate Research Program. WCRP Pun Series No 2, WMO/TD No 6.