



새로운 기후변화 시나리오와 극한 기후변화 전망

이호신, 조천호, 백희정
강현석, 부경은, 성장현

기상청 국립기상연구소 기후연구과

1. 서론

지구온난화와 이상기상의 빈번한 출현으로 기후변화는 인류의 최대 관심사가 되었다. 우리나라는 지난 97년간 1.7℃ 상승하고, 강수량은 19% 증가하여 전 지구 평균 기후변화를 상회하는 급격한 기후변화를 보이고 있다(국립기상연구소, 2011). 기후변화로 인한 영향이 가시화되면서 기후변화 적응을 위한 국내 연구가 활성화 되고, 기후변화 영향 및 취약성 평가를 위한 기후변화 시나리오에 대한 요구가 급격히 증대되었다. 기상청은 IPCC 제 4차 평가보고서(IPCC, 2007)의 SRES¹⁾ 온실가스 시나리오에 대하여 전 지구 및 한반도 기후변화 시나리오를 개발하여 IPCC 제 4차 평가보고서(IPCC, 2007) 작성에 기여하였고, 국내 기후변화 대응을 위해 자료를 제공하였다. 이후 기상청은 2013~2014년 발간될 IPCC 제 5차 평가보고서(AR5)를 위해 새롭게 선정된 온실가스 시나리오인 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP)에 따라 기후변화 시나리오를 산출하고 그 자료를 제출함으로써 국제사회에 기여하는 노력을 기울이고 있다. 이 글을 통해 기상청의 전 지구 기후변화 시나리오의 산출과정과 전 지구 및 한반도 미래 기후변화 전망의 주요결과를 제

시하고 아울러 기후변화 시나리오에 나타난 극한 기후의 변화 전망 결과를 간략히 언급함으로써 각 분야의 전문가들이 기후변화 시나리오를 이해하는데 작은 도움이 되고자 한다.

2. 기후변화 강제력 및 실험 방법

2.1 대표농도경로 (RCP)

기후변화를 전망하기 위해서 온실가스 농도는 IPCC AR5에서 정한 대표농도경로(Representative Concentration Pathway, RCP)를 이용한다. IPCC AR4에서 사용한 SRES는 미래의 사회·경제 형태가 가장 먼저 결정되고 이에 따른 배출량 시나리오를 산출함으로써 온실가스의 농도를 결정하는 순차적 방법을 취하였다. 이러한 순차적 방법은 분리된 각 시나리오 간의 정보 전달에 시간 지연이 일어나는 문제점이 있다. 이에 따라 IPCC AR5에서는 인간 활동이 대기에 미치는 복사량으로 온실가스 농도를 결정하고, 기후변화 시나리오와 사회·경제적 시나리오를 동시에 산출할 수 있는 병행적 방법을 취하고 있다. 여기서 하나의 대표적인 복사강제력에 대하여 수많은 사회경제 시나리오가 존재할 수 있다는 의미에서

1) IPCC 4차 평가보고서에 사용된 온실가스 시나리오에 관한 특별보고서 (Special Report on Emission Scenarios, SRES) (IPCC, 2001)로 B1, A1B, A2 등이 있다.

“대표(Representative)”라 명명하였고, 또한 온실가스 배출 시나리오의 시간에 따른 변화를 강조하기 위하여 “경로(Pathways)”라 표현하였다.

RCP 배출 시나리오는 모두 4종이 있으며, 저감의 노력없이 현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우(BAU)를 RCP 8.5, 지구가 회복력을 가질 수 있는 최대 한계값인 RCP 2.6, 그리고 온실가스 저감 정책이 실현됨을 가정하는 RCP 4.5와 6.0으로 구성

된다. 각각의 숫자는 2100년의 전 지구 평균 복사강제력의 변화를 의미하며, 단위는 Wm^{-2} 이다. Table 1은 RCP의 종류, 각 RCP의 복사강제력과 농도, 그리고 AR4의 SRES와의 비교를 정리한 것이다. 온실가스중 대표적인 이산화탄소 농도의 각 RCP 시나리오에 따른 시간변화를 Figure 1에 나타내었다.

Table 1. Summary of representative concentration pathways and their corresponding radiative forcings and equivalent CO₂ concentrations.

종류	복사강제력 ¹⁾	상당 농도 ²⁾	경로형태	SRES와의 비교
RCP 8.5	> 8.5 Wm^{-2} in 2100	> 1370 CO ₂ -eq (2100년까지 지속적 상승)	상승	A2~A1FI
RCP 6.0	~ 6 Wm^{-2} in 2100	~ 850 CO ₂ -eq (2100년 이후 안정화)	안정	A1B
RCP 4.5	~ 4.5 Wm^{-2} in 2100	~ 650 CO ₂ -eq (2100년 이후 안정화)	안정	B1
RCP3-PD ³⁾ (2,6)	2100년 이전에 ~3 Wm^{-2} 으로 최고치 및 이후 감소	2100년 이전에 ~490 CO ₂ -eq 최고 농도, 이후 감소	상승 후 감소	—

1) 복사강제력은 $\pm 5\%$ 로 정의되며, 모든 인위적인 온실가스와 다른 요소들의 순 효과를 포함한다.

2) CO₂ 상당농도(Equivalent concentration, 이하 CO₂-eq)는 단순 계산식 $Conc = 278 \times \exp(\text{forcing}/5.325)$ 로 계산한다. 2005년 수명이 긴 온실가스들에 대한 CO₂ 상당 농도의 최적 추정치는 약 455 ppm 이지만 모든 인위적인 강제력 요인들의 순 효과에 상응하는 CO₂ 상당 농도 추정치는 375 ppm이다.

3) PD = peak and decline

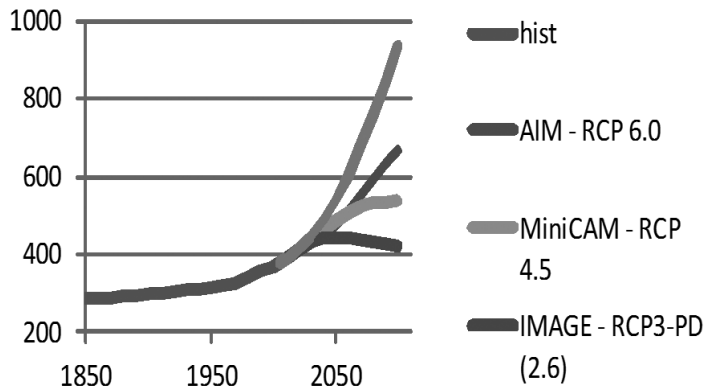


Figure 1. Time series of CO₂ concentration [ppm] from 1850 to 2100.

기획특집

2.2 기후변화 예측 모델 및 실험 내용

기상청은 신 국가기후변화 시나리오 산출을 위하여 영국 기상청 해들리센터의 HadGEM2-AO 모델을 도입하였다. HadGEM2-AO는 대기, 지면, 해양, 해빙, 육상 수문, 에어로졸 등 기후시스템의 다양한 주요성분 모듈들의 결합모델이며, 대기 모델의 공간 분해능은 동서방향으로 1.875°, 남북방향으로 1.25° 간격이며, (~135 km, 192×145 격자), 연직으로 38층(최상층은 ~40 km)으로 구성되었다. 해양 모델의 수평 분해능은 동서방향으로 1° 간격, 남북방향으로 1~1/3°로서 적도부근에서 조밀하게, 연직 층수는 42층으로 표층부근에서 약 5m 간격으로 조밀하게 구성되어 있다. 과거부터 현재, 나아가 미래까지의 기후변화를 모의하기 위

해 필요한 자연 강제력(태양활동과 화산폭발)과 인위적인 강제력(온실가스 배출량, 에어로졸, 지면피복 변화)을 모두 고려하였다. 이들 강제력에 대한 자세한 설명과 각각의 전 지구적 공간분포는 국립기상연구소(2011)를 참조하기 바란다.

전 지구 기후변화 시나리오 개발은 CMIP5를 통하여 수행되고 있으며, CMIP5의 주요 목적은 기후 모델들이 과거기후를 얼마나 현실적으로 모의하는가, 그리고 미래기후가 어떻게 변화할 지에 대한 전망을 제시하는 것이다. CMIP5에서 권장하는 실험의 종류는 목적에 따라 매우 다양하지만(Taylor et al., 2009), 기상청은 우선적으로 미래 기후변화 전망을 산출하기 위한 실험을 집중적으로 추진하고 있으며, 실험 내용은 Table 2와 같다.

Table 2. Experiments and simulation period for climate projection using the HadGEM2-AO

실험	적분기간
제어실험(pre-industrial control)	200년 이상
과거기후 모의 실험, 1860~2005년 (historical ensemble)	146년
RCP 2.6/4.5/6.0/8.5에 대한 미래전망 실험, 2006 ~ 2100년 (projection ensemble)	95년

제어실험(pre-industrial control)은 인위적인 기후변화 강제력을 산업혁명 이전인 1860년의 온실가스 농도로 고정하여 200년 이상 적분하는 실험으로 전 지구 결합모델을 평형 상태로 안정화시키고 모델의 내부 변동을 이해하기 위한 실험이다. 과거모의 실험(historical run)은 제어실험에서 산출된 대기와 해양의 평형상태를 초기상태로 설정하고, 이로부터 2005년까지 온실가스, 에어로졸, 오존, 태양복사 및 화산폭발 등에 대한 기후변화 강제력을 이용하여 과거기후를 재현한다. 미래 기후변화 전망은 과거기후모의 실험의 마지막 상태(2005년)을 초기 조건으로 RCP 복사강제력에 따라 산출한다. 기상청은 제어실험의 200년, 400

년 및 500년째 결과를 초기 조건으로 사용하여 과거 모의실험과 RCP2.6/4.5/6.0/8.5 강제력에 따른 미래기후변화 시나리오를 산출하였고, 여기서는 200년째 초기장에 대한 결과를 제시하였다. 기상청은 지역기후모델(HadGEM3-RA)을 이용하여 동아시아 (~50 km 간격) 및 한반도 (~12.5 km 간격) 지역에 대하여 역학적 상세화 기법을 적용한 지역 기후변화 시나리오도 산출하였다.

3. 전 지구 및 한반도의 기후 전망

RCP 2중(4.5, 8.5)에 따른 21세기 말(2070-2099)의 전 지구 평균 기온과 강수량은 현재기후

(1971~2000) 대비하여 RCP4.5와 8.5에서 2.8°C/4.5%와 4.8°C/6.0% 상승할 것으로 전망되었다. 기온은 대부분의 지역에서 상승할 것으로 전망되나 지역적으로 저위도보다 고위도 지역, 해양보다 육지에서 기온상승이 더 크게 나타났다. 계절적으로는 여름철보다 겨울철의 기온 상승이 두드러졌다. 강수량은 전 지구적으로 증가하나 기온과 달리 증가하는 지역과 감소하는 지역이 뚜렷하게 구분

되었다. 연평균 강수량은 고위도 지역과 적도부근, 인도와 동아시아 지역에서 증가하고 지중해 연안을 포함한 북아프리카와 남유럽, 호주, 남미의 북동부 지역에서 상당한 감소가 전망되었다. 또한 고농도 시나리오일수록 기온은 더 크게 증가하고, 강수의 경우에는 증가하는 지역은 더욱 증가하고, 감소하는 지역은 더욱 감소할 것으로 나타났다 (Figure 2).

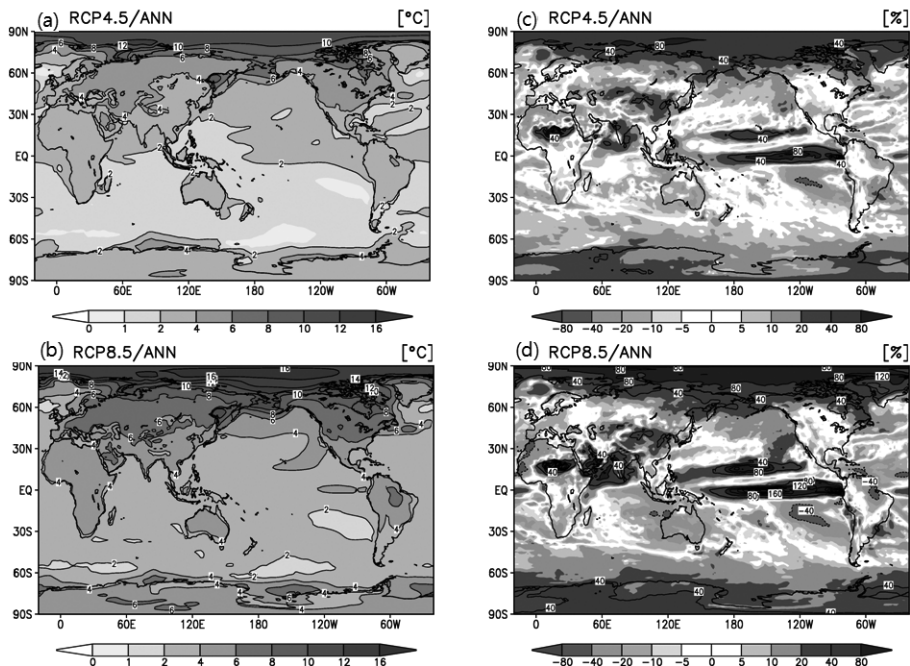


Figure. 2 Changes of global mean surface air temperature (a, b) and precipitation (c, d) under RCP 4.5 and RCP 8.5 relative to the period of 1971~2000.

지구 온난화에 따라 극한 기후의 변화도 전망되었다. 21세기 말 RCP4.5와 8.5에서 한랭야는 모든 육지지역에서 10년에 1.89일과 2.79일 감소, 한랭일은 대부분의 육지지역에서 0.29일과 2.84일 감소, 온난야는 8.96일과 15.7일 증가, 온난일은 2.69일과 15.47일로 크게 증가하였다. 일 강수량

이 1mm 이상인 강수일은 미래에 줄어들 것으로 전망되어 21세기 말에 1.4%와 4.4% 감소하였다. 반면 1mm 이상인 연 강수량은 4.3%와 3.6%로 증가할 것으로 전망되었다. 1mm 이상인 강수일수와 강수량의 미래 변화 공간분포는 Figure 2의 강수량 변화 분포와 유사하며, 아시아와 북아메리카

기 | 획 | 특 | 집

60도 이상의 고위도 지역과 아시아 대부분 지역, 그리고 아프리카의 20N 부근과 인도지역에서 증가하고 지중해 주변, 남아프리카, 호주, 남아메리카 북동부 지역 등에서 감소할 것으로 전망되었다. 이에 따라 강수강도는 북아프리카 지역과 호주, 남아메리카 북동부, 아시아 일부 지역을 제외한 대부분 지역에서 증가할 것으로 전망되었다 (Figure 3).

12.5 km 해상도의 지역기후모델을 이용한 지역기후변화 시나리오에 따르면 기후변화 완화의 노력 없이 현재 추세대로 온실가스를 계속 배출하는 경우(RCP8.5), 21세기 말 우리나라 평균기온은 약 6.0oC 상승, 강수량은 20.4% 증가가 예상되고 저감노력이 실현되는 경우(RCP4.5)은 3.4oC의 기온상승과 17.3%의 강수량 증가가 예상된다. 기온과

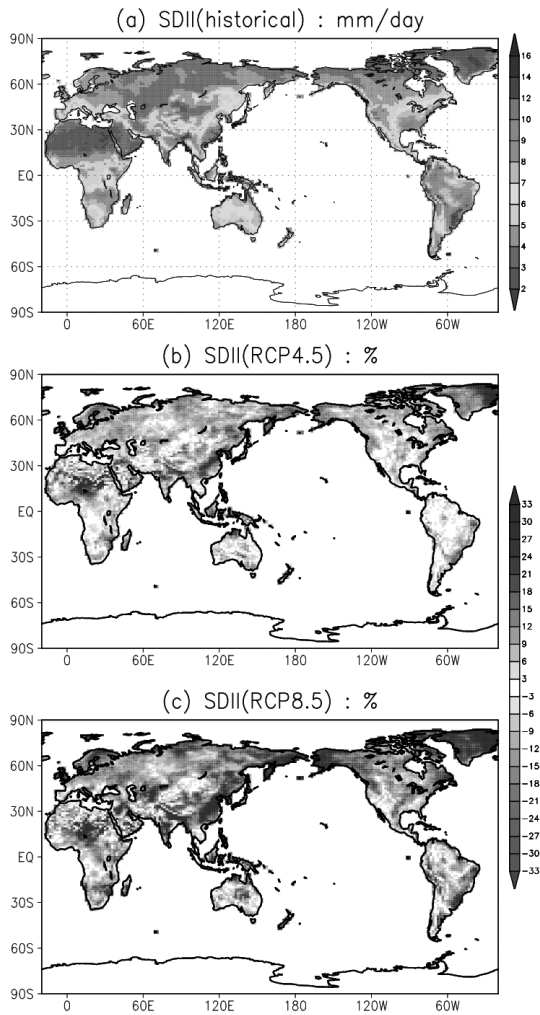


Figure 3. Simple daily intensity index (SDII) for (a) climatology (1971–2000) in mm day⁻¹ and percentage changes in future SDII under (b) RCP4.5 and (c) RCP8.5.

강수량은 지역에 따라 차이는 있으나 대부분 지역에서 상승할 것으로 전망되며, 기온의 상승은 우리나라 남부지역 보다는 중북부지역에서 뚜렷하고, 강수량의 증가는 남해안과 중서부 지역에서 두드러지게 나타난다(Figure 4).

한반도 지역에 대한 평균한 기온과 강수의 변화를

시계열로 나타내었다(Figure 5). 앞서 살펴본 바와 같이 한반도 지역에서 기온과 강수는 모두 증가하고 있다. 그러나 미래 전망의 불확실성 측면에서 보면, 기온의 경우에는 21세기 동안의 기온 증가가 경년변동성보다 커서 미래 전망에 대한 불확실성은 크지 않지만 강수의 경우에는 경년변동성이 21세기 동안의 증가치를 상회하여 기온에 비해 미래 전망

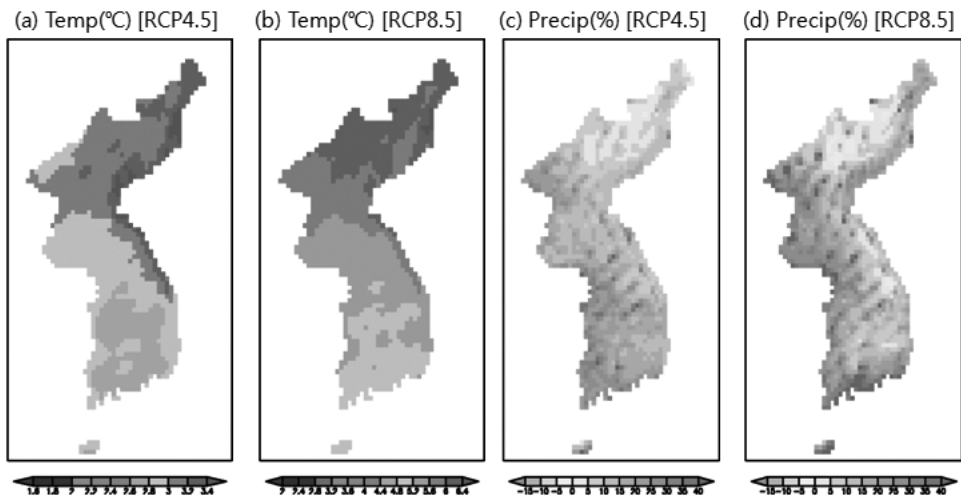


Figure 4. Regional climate projection of (a, b) surface air temperature, and (c, d) precipitation based on RCP 4.5 and 8.5.

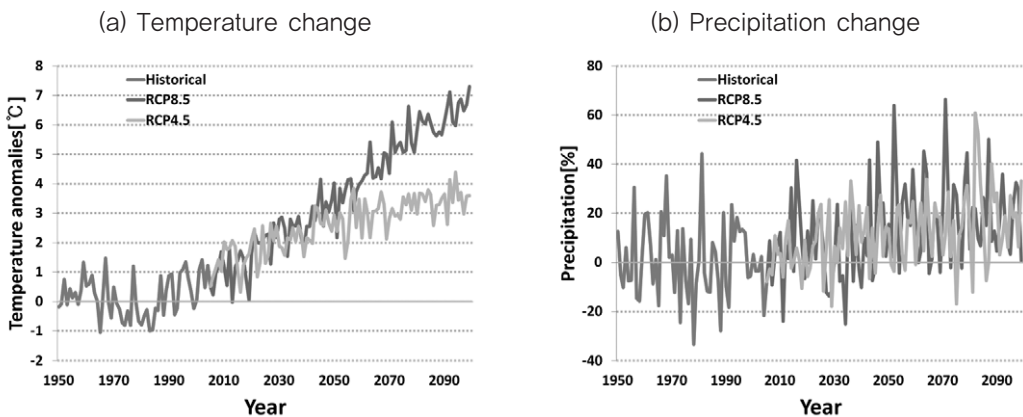


Figure 5. Time series of (a) surface air temperature and (b) precipitation averaged on the Korean Peninsula from 1950 to 2009 relative to the period of 1971~2000.

기획특집

에 대한 불확실성이 상대적으로 크게 나타났다. 한반도 지역에서 폭염일, 열대야일, 영하일수와 같은 기후지수의 변화도 전망되었다. 지구온난화에 따라 폭염일은 현재(1971-2000년) 관측에서 연평균 8.5일인데, 21세기 말(2070-2099년)에는 RCP 4.5와 8.5에서 각각 32.3일, 65.9일로 크게 증가하고, 열대야일은 현재 평균 3.7일에서 각각 34.6일과 62.8일로 급격하게 증가할 것으로 전망되었다. 반면 추위와 관련된 지수는 상당히 감소할 것으로 전망되어 영하일수는 현재 95.9일에서 67.5일과 42.8일로 크게 감소하였다. 집중호우는 현재 연평균 2.2일에서 각각 6.54일과 6.59일로 약 3배 정도 증가할 것으로 전망되었다. 또한 지역기후 시

나리오의 일최고 기온과 일최대 강수량을 통해 극한 기후의 변화를 살펴보면, 현재(1980~2009)에 비하여 가까운 미래 (2020~2049년)와 21세기말 (2070~2099년)에 극한 현상의 발생확률과 빈도가 증가할 것으로 전망되었다. 현재 일최고 기온의 평균 31.1℃에서 RCP 4.5 시나리오의 가까운 미래에 32.3℃와 21세기 말에 34.1℃로 증가하고, 그 변동 또한 현재보다 커질 것으로 전망되었다. 일최대 강수량의 평균도 증가하여 현재 78.5mm에서 21세기 전반에 84.4mm과 21세기 말에 95.2mm로 상승하고 변동성도 심화될 것으로 전망되었다. RCP 4.5의 일최고 기온과 일최대 강수의 위치 및 규모 매개변수는 Table 3.에 정리하였다.

Table 3. Summary of the change of extremes from regional climate scenarios under RCP 4.5.

변 수		historical run	RCP 4.5 (540 ppm)	
		1980-2009	2020~2049	2070~2099
기온	위치매개변수	31.1 °C	32.3 °C	34.1 °C
	규모매개변수	1.23 °C ²	1.42 °C ²	1.38 °C ²
강수	위치매개변수	78.5 mm	84.4 mm	95.2 mm
	규모매개변수	22.4 mm ²	34.9 mm ²	43.6 mm ²

4. 맺음말

기상청은 2013~14년에 발간예정인 IPCC 5차 평가보고서에 따른 새로운 기후변화 시나리오에 대응하기 위하여 전 지구 및 한반도에 대한 신 국가 기후변화 시나리오를 산출하였다. 기상청은 이 글에서 소개한 산업혁명 이전 기후상태 200년에 따른 기후변화 전망 시나리오 뿐 만 아니라 다른 기후상태인 400년, 500년으로도 과거와 미래 RCP 4종에 대한 기후변화 전망 시나리오를 산출하였다. 산업혁명 이전 500년 기후상태로 모의한 과거와 미래 RCP 4종에 대한 월평균 자료는 CMIP5에 제출되어 전 세계에 배포되고 있으며

(<http://pcmdi.llnl.gov/esgcat/home.htm>), 산업혁명 이전 실험을 포함한 400년 기후상태에 대한 전 지구 기후변화 시나리오도 연내에 제출할 예정이다. 기상청은 자체 산출한 자료뿐만 아니라 CMIP5에 참여하는 모든 기관의 기후변화 시나리오자료를 수집 분석하여 불확실성을 정량화함으로써 국가 기후변화 대응전략수립에 보다 신뢰성 있는 근거를 마련할 수 있도록 노력하고 있다.

참고문헌

국립기상연구소, 2011: IPCC 5 차 평가보고서 대응을 위한 기후변화 시나리오보고서 2011, 기상청

국립기상연구소, 117pp.

IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contributions of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K. B., Tignor M., Miller H. L. (eds.)], Cambridge

University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996pp.

Taylor, K. E., R. J. Stouffer, and G. A. Meehl, 2009: A summary of the CMIP5 experiment design, 33pp. (http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/Taylor_CMIP5_design.pdf)