



대표농도경로(RCP)에 따른 신(新) 국가 기후변화 시나리오)



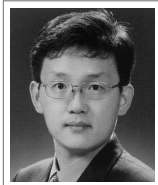
강 현 석 |
기상청 국립기상연구소 기상연구관
hyunskang@korea.kr



백 희 정 |
기상청 국립기상연구소 기상연구관
heejaek@korea.kr



부 경 은 |
기상청 국립기상연구소 기상연구관
kyungon@korea.kr



조 천 호 |
기상청 국립기상연구소 기후연구과장
choch0704@korea.kr

1. 서론

지난 20세기 우리나라의 기온은 지구온난화와 도시화의 영향으로 0.18℃/10년의 추세로 상승하였고, 강수량은 21 mm/10년의 비율로 증가하여 전 지구 평균 기후변화의 속도를 상회하였다(국립기상연구소, 2011). 기후변화의 영향이 가시화 되면서 기후변화 적응을 위한 국내 연구가 활성화 되었고, 국가 기후변화

시나리오에 대한 요구가 급격히 증대되었다. 기상청은 기후변화에 관한 정부간협의체 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 4차 평가보고서 (AR4)의 SRES²⁾ 온실가스 배출시나리오에 따른 전 지구 및 한반도 기후변화 시나리오를 산출함으로써 IPCC 4차 평가보고서의 작성에 기여하고 국내 기후변화 대응을 위한 기초 자료를 제공한 바 있다 (<http://www.climate.go.kr>). IPCC 제 4차 평가보고서(IPCC, 2007)의 발간 이후 2013~2014년에 발간예정인 제 5차 평가보고서(AR5)를 위하여 국제사회는 표준 온실가스 시나리오로서 대표농도경로 (Representative Concentration Pathways, RCP) 4종을 새롭게 선정하였다(Moss et al., 2008). 그리고 각 RCP에 따른 전 지구 기후변화 시나리오 산출을 위한 국제 기후모델링 연구사업 (CMIP5³⁾)과 지역기후 상세화 연구사업(CORDEX⁴⁾) 이 착수되었다.

기상청은 기후변화 대응을 위한 국제적인 노력에 동참하고 국가 적응대책 수립을 지원하기 위하여 국가 기후변화 시나리오 개발을 추진하고 있으며, 국립기상연구소는 영국 기상청 해들리센터와 협력을 통하여 2009년부터 지구시스템모델을 도입하여 전 지구 기후변화 시나리오 개발을 시작하였다. 온실가스의 감축정책 이행 여부에 따라 구분할 수 있는 4종의 RCP에 대하여 2100년까지 미래 기후변화 시나리오를 산출하여 대기 중 온실가스 농도에 따라 미래 전 지구 기후가 어떻게 변화할 것인지에 대한 전망을 분석하였다. 또한, 지역기후모델을 이용하여 동아시아 및 한반도의 지역기후변화 시나리오를 산출하였다. 한반도 기후변화 시나리오는 국내 기후변화 영향·취

약성 평가연구 및 적응대책 수립 등의 기후변화 대응을 위한 가장 기초적인 자료로 제공될 것이다.

이 글은 수자원 분야 연구자들이 신(新) 국가 기후변화 시나리오를 활용함에 있어 RCP 기후변화 시나리오의 개념, 산출 방법, 주요 결과 등에 대한 이해를 돕고자 작성되었다. 2장은 기후변화 예측을 위한 지구시스템 모델이 고려하는 자연 강제력을 포함한 기후변화 강제력과 기후변화 예측모델을 이용한 실험 방법을 소개하였고, 3장은 전 지구 및 한반도 미래 기후변화 전망의 주요 결과를 제시하였으며, 결론과 향후 기후변화 시나리오의 업데이트 계획을 마지막 4장에 간단하게 언급하였다.

2. 기후변화 강제력 및 실험 방법

2.1 강제력

기후변화 모의를 위해서는 기후시스템의 유지와 상호작용에 필요한 자연 강제력과 인위적인 강제력을 모두 고려하여야 한다. 자연 강제력에는 태양 활동을 대표하는 태양 복사량과 화산 활동에 의한 성층권 에어러솔의 변화를 광학 깊이(optical depth)의 형태로 고려하였다. 태양 복사량은 태양의 활동 주기, 태양 활동에 대한 과거 기록, 태양 흑점수의 변동을 고려하여 계산된다(Wang et al., 2005). 미래 전망기간에 대한 태양복사량은 11년 주기로 같은 값이 반복되어 작용하도록 처방하였다. 화산활동에 의한 성층권 에어러솔은 과거기후 모의기간에 대한 관측 자료를

사용하여 처방하였고(Sato et al., 1993), 미래 전망 기간 동안의 화산 활동은 예측할 수 없으므로 관측을 통하여 이미 알려진 성층권 에어러솔의 평균 배경 농도에 의한 광학 깊이를 사용하였다.

IPCC AR4에서 사용한 SRES 온실가스 배출 시나리오는 미래의 사회·경제 형태를 먼저 결정하고 이에 따른 배출량 시나리오를 산출함으로써 온실가스의 농도를 결정하는 순차적 방법을 취하였다. 이러한 순차적 방법은 배출 시나리오로부터, 기후변화 전망, 영향·취약성평가 및 적응분야에 정보 전달이 지연되는 문제점이 있다. AR5에서는 인간 활동이 지구시스템에 영향을 미치는 복사량으로 온실가스 농도를 먼저 결정하고, 기후변화 시나리오와 사회·경제적 시나리오를 동시에 산출 할 수 있도록 병행적 방법을 취하고 있다. 즉, 하나의 대표적인 복사강제력에 대하여 수많은 사회경제 시나리오가 존재할 수 있다는 의미에서 “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 구성된다. 각각의 숫자는 전 지구 평균 복사강제력의 변화를 의미하며, 단위는 Wm^{-2} 이다. 현재 기후에서 지상에 도달하는 태양복사량이 약 $238 Wm^{-2}$ 이므로 RCP 8.5/6.0/4.5/2.6에서의 복사강제력 변화는 각각 약 3.6/2.5/1.9/1.1%에 해당하는 양이다. Table 1은

- 1) 이 글이 제시하는 그림, 표, 및 숫자 등은 “IPCC 5차평가보고서 대응을 위한 기후변화 시나리오 보고서 2011(국립기상연구소, 2011)”을 인용한 것이며, 향후 다양한 앙상블 실험 결과에 따라 달라질 수 있습니다.
- 2) IPCC 4차평가보고서에 사용된 대표 온실가스 시나리오 배출에 관한 특별보고서 (Special Report on Emission Scenarios, SRES) (IPCC, 2001)로서 A2, A1B, B1등이 있다.
- 3) CMIP5(The Phase 5 of the Coupled Model Intercomparison Project)는 세계기상기구(WMO)의 세계기후연구프로그램(WCRP)에서 주관하는 국제 기후모델링 연구사업으로, 우리나라를 포함한 미국, 영국 등 14개 국가가 참여하고 있다.
- 4) CORDEX(Coordinated Regional Downscaling Experiment)는 WCRP에서 지원하는 지역기후 상세화연구 사업으로 동아시아를 포함한 전 세계 12개 지역에 대한 고해상도 지역기후시나리오 산출을 목표로 한다. 한국 기상청은 CORDEX 사업에 참여함과 동시에 지역자료센터의 역할도 수행하고 있다.

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

종 류	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 ±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

RCP의 종류, 각 RCP의 복사강제력과 농도, 그리고 AR4의 SRES와의 비교를 정리한 것이다.

온실가스 배출량 이외에도 기후변화를 유발하는 중요한 인위적 강제력으로 대기 중 에어러솔과 토지사용으로 인한 지면 피복의 변화가 있다. 대기 중 에어러솔은 태양 및 지구복사의 반사·흡수·산란 등의 직접효과와 구름과의 상호작용을 통한 간접효과를 일으키며 기후시스템에 영향을 미친다. 신 기후변화 시나리오에는 이산화 황(Sulphur Dioxide), 검댕(Black Caborn), 유기 탄소(Organic Caborn), 바이오매스 연소(Biomass-burning), 먼지(Dust), 해염(Sea Sault) 총 6종의 에어러솔을 기후변화 모델의 강제력으로 고려하였다. 4종의 RCP 시나리오는 지면 피복의 변화도 함께 제공되는데 CMIP5에 참여하는 모델의 지면피복상태가 모두 다르다. 기상청의 신 기후변화 시나리오는 나무, 관목, C3 및 C4형 초지, 도시, 물, 토양, 얼음의 면적 비율을 각 RCP에 따라 조정하여 사용하였으며, 전체 식생비율은 보존되도록 처방하였다. 에어러솔 및 지면피복 강제력에 대한 보다 자세한 설명과 각각의 전 지구적 공간분포는 국립기상연구소(2011)를 참조하기 바란다.

2.2 기후변화 예측 모델 및 실험 방법

신 국가기후변화 시나리오 산출을 위하여 영국 기상청 해들리센터와 공동연구를 통하여 도입한 HadGEM2-AO를 사용하였다. HadGEM2-AO는

대기, 지면, 해양, 해빙, 육상 수문, 에어러솔 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 5 m 간격으로 조밀하게 구성되어 있다.

전 지구 기후변화 시나리오 개발은 CMIP5를 통하여 수행되고 있으며, CMIP5의 주요 목적은 기후모델들이 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.

제어실험(pre-industrial control)은 인위적인 기후변화 강제력을 산업혁명 이전인 1860년의 온실

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

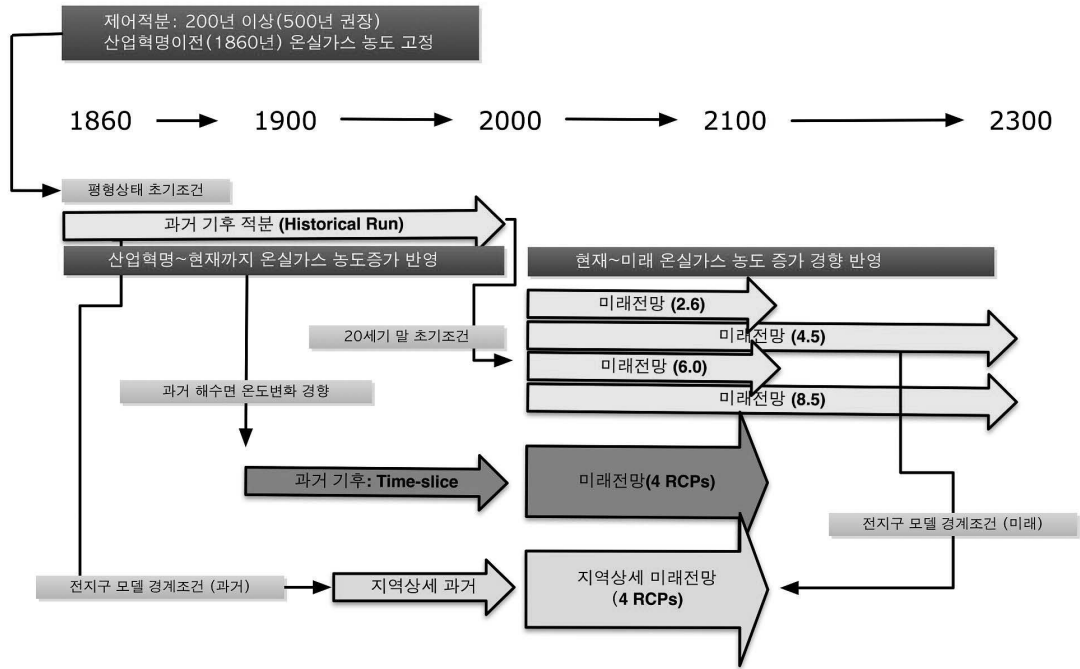


Figure 1. Procedures for global and regional climate projections

가스 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 과거 기후모의 실험의 마지막 상태(2005년)을 초기 조건으로 RCP 복사강제력에 따라 산출한다. 이 글에서는 제어실험의 200년째 결과를 초기 조건으로 사용한 과거 모의실험과 RCP4.5 및 8.5 강제력에 따른 미래 기후변화 시나리오 결과를 보였다. 기상청은 또한 지역기후모델(HadGEM3-RA)을 이용하여 동아시아 및 한반도 지역에 대하여 역학적 상세화 기법을 적용한 지역기후변화 시나리오도 함께 산출하였다. 이상과 같이 전 지구 및 지역기후변화 시나리오의 산출단계와, 실험종류, 초기자료, 적분기간 및 실험방법을 Figure 1에 보였다.

3. 전 지구 및 한반도의 기후 전망

RCP 2중(4.5, 8.5)에 따른 21세기 말 전 지구와 한반도의 평균적 기후변화 전망을 요약하면 Table 3과 같다. 전지구 기온의 상승은 지역에 따라 크기의 차이는 있으나 대부분의 지역에서 상승할 것으로 전망되며, 북극지역의 기온 상승폭이 가장 크며 북반구 육지가 남반구와 해양에 비하여 기온상승이 뚜렷할

Table 3. Summary of the climate projections from global and regional climate scenarios.

RCP 시나리오		RCP 4.5 (540 ppm ¹⁾)	RCP 8.5 (940 ppm)
지구 평균	기온(°C)	+ 2.8 ²⁾	+ 4.8
	강수량(%)	+ 4.5	+ 6.0
	해수면 고도 ³⁾ (cm)	+ 72.7	+ 90.0
한반도 평균	기온(°C)	+ 3.4	+ 6.0
	강수량(%)	+ 17.3	+ 20.4

1) 2100년의 이산화탄소 농도

2) 30년(1971~2000년) 기준 기간 대비 미래 30년(2070~2099년)의 값

3) 준 경험적 방식에 의한 해수면 고도 변화 전망 값으로 열팽창과 육빙의 녹음 효과를 모두 포함함

것으로 전망되었다. 강수량은 증가할 것으로 전망되는 지역과 감소할 것으로 전망되는 지역이 뚜렷하게 구분된다. 특히, 우리나라를 포함하는 동아시아 대부분의 지역은 강수량이 증가할 것으로 전망되나, 우리나라 남동쪽의 북서태평양 일부 지역에서는 강수량의 감소가 전망되는 지역도 부분적으로 존재하는 것으로 나타났다.

육빙의 녹음과 해양의 열팽창에 기인하는 해수면 고도의 변화는 21세기 말에 현재 기후(20세기 말)에 비하여 72.7 cm (RCP4.5)와 90.0 cm (RCP8.5)의 상승이 예상된다. 북극 해빙 면적은 21세기 말에 현재에 비하여 56%와 31% 수준으로 감소할 것으로 전망되었다. 동아시아 지역의 강수량은 증가할 것으로 전망되었지만, 기온 상승에 따른 증발량 증가로 인하여 표층의 토양 수분은 일부 지역을 제외하고 감소하는 것으로 전망되었다. 따라서 미래에는 강수의 증가로 인한 홍수의 위험과 지표층 가뭄의 위험이 공존할 가능성이 있는 것으로 판단된다.

12 km 해상도의 지역기후모델을 이용한 지역기후 변화 시나리오에 따르면 기후변화 완화의 노력 없이 현재 추세대로 온실가스를 계속 배출하는 경우 (RCP8.5), 21세기 말 우리나라 평균기온은 약 6.0℃

상승, 강수량은 20.4% 증가가 예상되고 저감노력이 실현되는 경우(RCP4.5)은 3.4℃의 기온 상승과 17.3%의 강수량 증가가 예상된다. 기온의 상승은 우리나라 중북부지역에서 뚜렷하게 나타나며, 강수량의 증가는 남해안과 중서부 지역에서 두드러지게 나타난다(Figure 2). 일반적으로 강수에 대한 미래전망은 시·공간에 따른 변동성이 크므로 증가 추세가 기온에 비하여 뚜렷하지 않고 불확실성 또한 큼을 주지할 필요가 있다.

한반도 지역의 폭염일은 현재(1971~2000년) 관측에서 연평균 8.5일인데, 기온이 상승하는 21세기 말(2070~2099년)에는 RCP 4.5와 8.5에서 각각 32.3일, 65.9일로 나타나 매우 증가할 것으로 전망되었다. 열대야일(현재 평균 3.7일) 또한 21세기 말 RCP4.5와 8.5의 경우 각각 34.6일과 62.8일로 급격하게 증가할 것으로 전망되었다. 반면 추위와 관련된 영하일수는 급격하게 감소할 것으로 전망된다. 기후구의 변화도 뚜렷하게 나타난다. RCP4.5에 따르면 아열대 기후구 지역이 서해안으로는 보령까지 확대되고, 대도시 해안 지역인 인천도 아열대 기후구에 포함된다. 내륙으로는 전주, 광주, 순천, 산청, 합천, 대구까지, 동해안 지역으로는 속초까지 아열

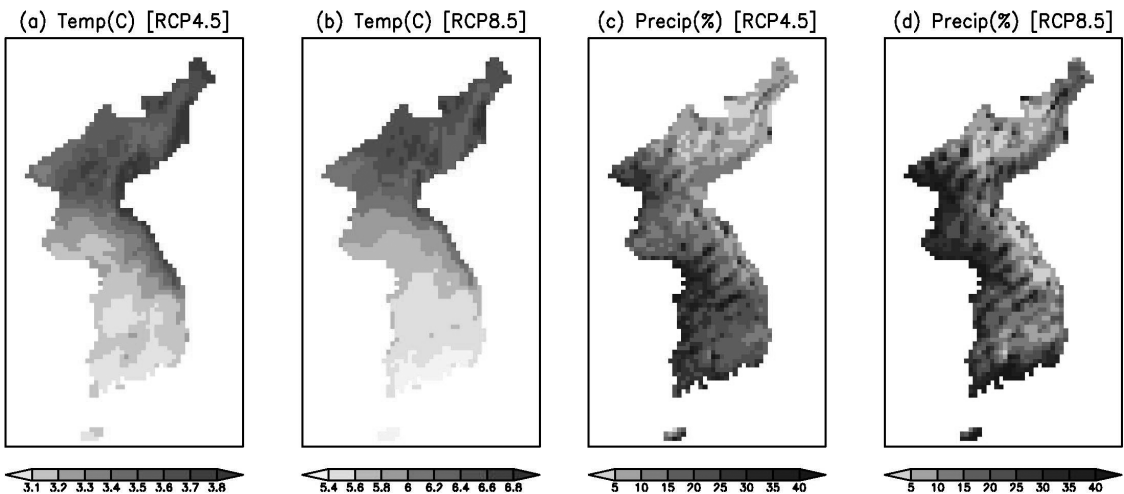


Figure 2. Regional climate projection of (a, b) surface air temperature, and (c, d) precipitation based on RCP 4.5 and 8.5.

대 기후구에 포함되는 것으로 나타났다. RCP8.5에 의하면, 관측 지점 중 해발고도가 가장 높은 대관령을 중심으로 한 인제, 홍천, 원주, 제천 등을 제외한 전국 대부분의 지역이 아열대 기후구에 포함될 것으로 전망된다.

4. 맺음말

이 글을 통하여 소개한 신 국가 기후변화 시나리오는 2013~14년에 발간예정인 IPCC 5차 평가보고서에 따른 새로운 기후변화 시나리오에 선제적으로 대응하기 위하여 기상청이 산출한 자료이다. 2012년에는 RCP2.6/6.0을 포함한 RCP4종 모두에 대한 기후변화시나리오를 산출하고 분석할 것이다. 그리고 산업혁명 이전 기후상태를 현재 산출된 200년 뿐만 아니라, 500년, 700년과 1000년 적분결과를 이용한 기후변화 전망을 수행할 계획이다. 이러한 기상청의 자료뿐만 아니라 CMIP5에 참여하는 모든 기관의 기후변화 시나리오자료를 수집하여 불확실성을 정량화함으로써 국가 기후변화 대응전략수립에 보다 신뢰성 있는 근거를 마련할 계획이다. 또한 기상청은 지구시스템의 주요과정인 탄소순환, 생태역학과 화학과정을

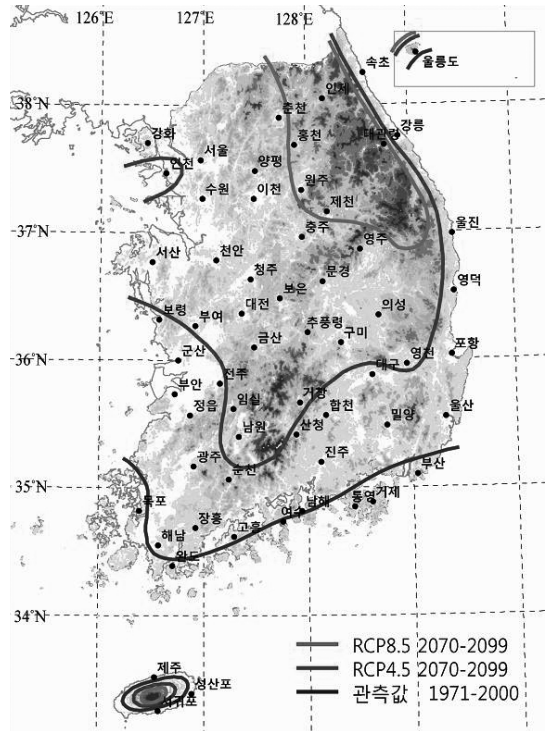


Figure 3. Changes in subtropical climate regime in the late 21st Century.

포함하면서 각각 과정의 상호작용을 고려한 기후전망 자료를 산출하기 위하여 보다 정교하고 우수한 지구시스템모델의 개발에 노력을 기울이고 있다. ☞

참고문헌

1. 국립기상연구소, 2011: IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 기후변화 시나리오보고서 2011, 기상청 국립기상연구소, 117pp.
2. 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.



3. Moss, R. and co-authors, 2008: *Towards new scenarios for analysuis of emissions, climate change, impacts, and response strategies*, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, 132pp.
4. Sato, M., J. E. Hansen, M. P. McCormick, and J. B., Pollack, 1993: Stratospheric aerosol optical depths (1850–1990), *J. Geophys. Res.*, 98, 22987–22994.
5. 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)
6. Wang, Y.-M., J. L. Lean, and N. R. Sheeley Jr., 2005: Modeling the Sun's magnetic field and irradiance since 1713, *Astrophys. J.*, 625, 522–538.