

발 간 등 록 번 호

11-1360395-000341-10



IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한

전지구 기후변화 보고서 2012

RCP 2.6/4.5/6.0/8.5 따른 기후변화 전망

IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 전지구 기후변화 보고서 2012

국립기상연구소

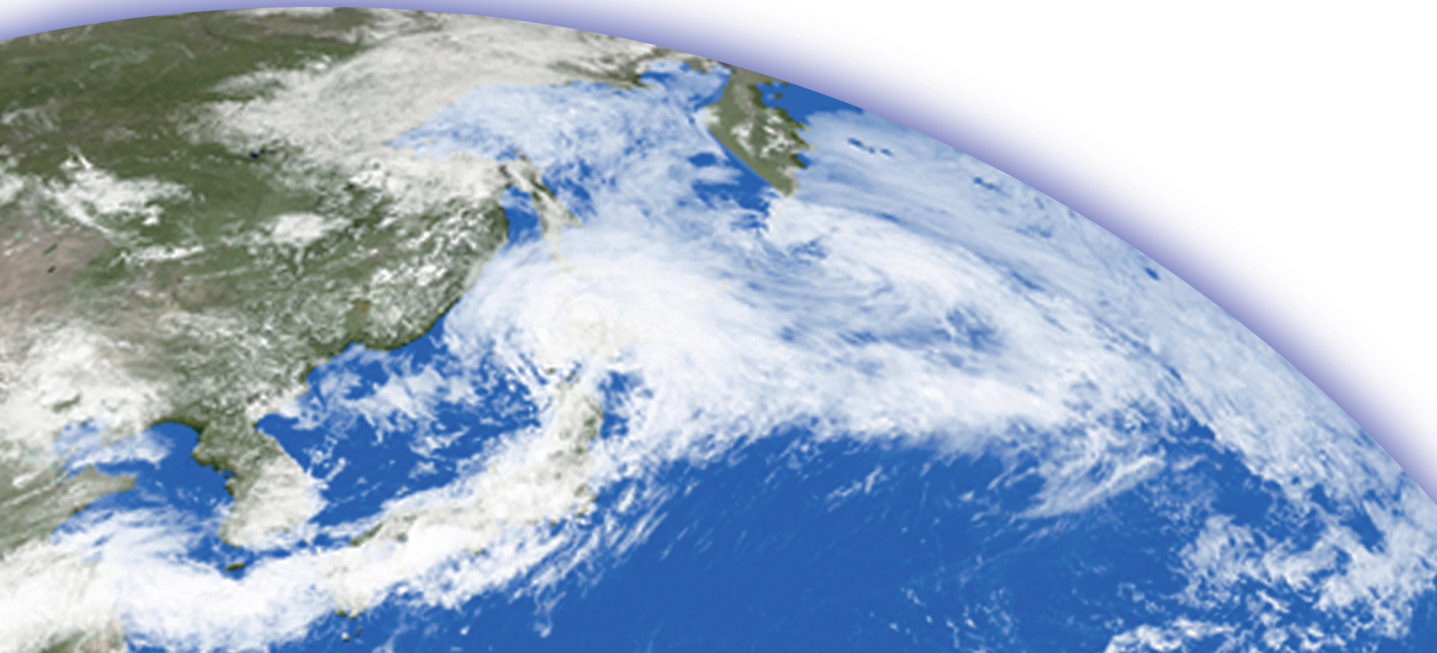


표지내용 : 천리안 위성사진(2010년 7월 12일)
국가기상위성센터 제공

IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한

전지구 기후변화 보고서 2012

RCP 2.6/4.5/6.0/8.5 따른 기후변화 전망



목 차

1. 개요	1
2. 시나리오 산출과 단일 강제력 실험	3
2.1 시나리오 산출방법	3
2.2 단일강제력 실험	5
2.2.1 에어로졸 강제력과 복사 수지 변화	5
2.2.2 단일 강제력 실험 별 전구기온 변화	7
3. CMIP5 참여 기후변화모델의 성능과 미래 기후 전망	8
3.1 CMIP5 참여모델의 성능 평가	8
3.2 기온 및 강수량 미래 전망	10
3.3 대기 순환 미래 전망	14
3.4 태풍	22
4. HadGEM2-AO 기후모의 및 미래 변화	25
4.1 기온	25
4.2 강수	35
4.3 물순환	40
4.4 해양	46
4.5 해빙	52
4.6 기후구분	55
5. 우리나라 기후변화	59
5.1 전지구 기후변화모델에 따른 한반도 기온과 강수의 미래 전망	59
5.2 지역 기후변화모델에 따른 기후모의 성능 및 미래 전망	60
5.3 극한 기온 및 강수 변화	73
5.4 한반도 상층 기온변화	85
6. 에어로졸과 탄소순환 전망	90
6.1 에어로졸	90
6.2 탄소순환	94
6.2.1 육상탄소순환	94
6.2.2 해양탄소순환	96
참고문헌	98
기여저자와 편집자	99
부록: 약어	100

1. 개요

최근 인간 활동에 따른 대기 중 온실 가스 농도의 증가로 인해 지구 에너지 수지에 불균형이 일어나 기후가 변화되고 있다. 이 기후변화는 자연 생태계와 인간·사회·경제 활동에 큰 영향을 미칠 가능성이 있으므로 인류 전체가 대응해야 할 중요한 과제의 하나로 자리 매김하고 있다. 이에 따라 1988년에 기후변화에 관한 정부간 협의체 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)가 설립되었다. 2007년에 발표된 IPCC 4차 평가 보고서에서 20세기 중반 이후에 관측된 지구 평균 기온 상승의 대부분이 인간 활동에 따른 온실 가스의 증가로 인해 발생되었을 가능성이 매우 높다고 결론 내렸다. 온실 가스 배출량의 향후 전망에 근거한 여러 기후 모델의 예측 실험 결과에 따르면 21세기 말의 세계 평균 기온 상승을 1.1~6.4℃로 전망하였다. 그리고 2012년에 발표된 "기후 변화 적응 추진을 위한 극한 현상 및 재해의 위험 관리에 관한 특별 보고서"에서는 평균 기후의 변화뿐만 아니라, 극한 기온이나 호우의 빈도가 증가할 가능성이 높다고 분석하였다. 우리나라도 지난 20세기 (1912~2010년) 동안 지구온난화와 도시화의 영향으로 기온이 0.18℃/10년 속도로 상승하였고, 같은 기간에 강수량은 21 mm/10년 비율로 증가하는 등 급격한 기후변화를 겪고 있다.

지구 온난화와 이에 따른 기후 변화에 대처하기 위해, 온실 가스 농도의 증가를 저감하여 기온 상승을 감소시키는 "완화" 정책과 함께 불가피하게 변할 수밖에 없는 기후 변화로 인한 부정적인 영향을 인간·사회·경제 시스템을 조절함으로써 약화시키는 "적응" 정책을 마련하여 지구위험을 줄일 수 있다. 기후변화의 과학적 이해와 완화·적응 정책에 기여하기 위하여 기후변화 시나리오를 산출할 필요가 있다. 2013~2014년 발간 예정인 IPCC 제5차 기후변화 평가보고서 작성을 위하여 국제적인 온실가스 시나리오인 대표농도경로 (Representative Concentration Pathway, RCP)를 선정하였다. 그리고 RCP에 따른 전지구 기후변화 시나리오 산출을 위해 국제사업인 CMIP5¹⁾가 수행되었다. 국립기상연구소는 이와 같은 국제적인 기후변화모

1) CMIP5 (the phase five of the Coupled Model Intercomparison Project)는 세계기상기구 (WMO)의 세계기후계획 (WCRP)에서 주관하는 국제사업이다. 현재 이 사업에는 우리나라를 포함한 미국, 영국 등 14개 국가가 참가하고 있다.

델 비교 사업에 참여하고 국가 기후변화 적응대책 수립 지원을 위한 기후변화 시나리오를 산출하고 있다.

국립기상연구소는 2009년부터 영국 기상청 해들리센터와의 협력을 통하여 지구 시스템모델을 도입하여 2011년에는 4종의 RCP 중에서 RCP4.5와 8.5에 대한 기후변화를 전망하였고 이에 대한 분석 결과를 “기후변화 시나리오 보고서 2011”에 발표하였다. 이번 “기후변화 시나리오 보고서 2012”에서는 RCP 4종 (2.6/4.5/6.0/8.5)에 대해서 전지구기후변화 시나리오를 생산하여 미래 전망을 분석하였다. 그리고 CMIP5 참여 모델의 모의 성능과 기후변화 시나리오의 불확실성을 평가하였다. 또한, 지역 기후변화모델을 이용하여 우리나라 지형의 영향 등을 보다 현실에 가깝게 예측 계산에 반영하여 평균적인 기후 변화뿐만 아니라 극한 기온과 폭우 등에 대해서도 평가하였다. 이 한반도 기후변화 시나리오는 국내 기후변화 영향, 취약성 평가 및 적응 대책 수립 등의 기후변화 대응을 위해 제공되고 있다.

2. 시나리오 산출과 단일 강제력 실험

2.1 시나리오 산출방법

국립기상연구소는 전지구기후변화 시나리오를 산출하고 IPCC 5차 평가보고서 참여를 위하여 영국 기상청 해들리센터와 협력하고 있다. 전지구 기후변화 시나리오를 산출하기 위해 영국기상청이 개발한 전지구 기후변화모델인 HadGEM2-AO를 이용하였다. HadGEM2-AO 모델은 대기-해양-해빙-에어로졸 모델로 구성되어 있으며, 대기모델의 분해능은 수평적으로 N96 (~135 km 간격, 192 x 145 격자)이며 연직적으로 38층 (최상층은 ~40 km)을 가진다. 해양모델의 분해능은 동서방향으로 1° 간격 (360개 격자)과 남북으로 1°~1/3° (216개 격자)로 적도부근에서 고분해능을 가진다. 연직 격자구조는 표층부근에서 5 m 간격으로 조밀하여 상층 300 m 이내에 20개 층이 할당되어 있고 하층으로 갈수록 두꺼워진다. 해빙모델은 해양모델과 동일한 격자체계를 가지며 얼고 녹음 계산을 위한 열역학과정과 해빙의 이동을 다루는 역학과정이 포함되어 있다.

전지구 미래 기후변화를 전망하기 위해서 국제권고기준에 따라 외부 강제력을 설정하고 모델을 구동하여 기후변화 시나리오를 산출하였다. 사용된 강제력은 IPCC AR5를 위한 온실가스 배출 시나리오로인 대표농도경로 (RCP)로써 이산화탄소, 메탄, CFCs 등의 온실가스의 시간변화 뿐만 아니라 태양복사와 화산폭발과 같은 자연강제력 그리고 황, 바이오메스, 검댕 등의 에어로졸과 오존 등을 고려하였다. 지표피복의 변화 또한 HadGEM2-AO 모델에 처방되고 있다. HadGEM2-AO 모델은 9가지 지표피복형태를 고려하고 있으며 이는 활엽수, 침엽수, 관목, C3형 초지²⁾, C4형 초지, 도시, 물, 토양, 얼음이다. 모델의 각 격자는 이들의 면적비율의 합이 1이 되도록 구성되어 있다. 과거와 미래 토지이용자료를 구축하기 위해 Land-Use harmonization Project (<http://luh.unh.edu>)의 작물 (Crop), 목초지 (Pasture), 도시 지표피복자료를 기반으로 C3형, C4형, 도시로 변환하였다. 물, 토양, 얼음은 IGBP

2) C3형 초지는 탄소원자 3개의 화합물을 만드는 식물로 벼, 밀 등의 온대 식물이 해당되며, C4형 초지는 탄소원자 4개의 화합물을 만드는 식물로 옥수수, 사탕수수 등의 열대 식물이 해당됨.

(International Geosphere-Biosphere Programme) 기후값을 사용하였다. 각 강제력에 대한 자세한 설명은 「기후변화 시나리오 보고서 2011」를 참고하기 바란다.

실험종류와 방법은 다음과 같다. 먼저 제어실험 (pre-industrial control)은 1860년의 온실가스 농도로 고정하여 기후변화모델을 적분하여 대기-해양-해빙이 준평형 상태로 안정화시키는 작업이다. 과거기후 모의실험 (historical run)은 제어실험에서 산출한 준평형 상태를 초기값으로 취한다. 이후 1860년부터 2005년까지 시간에 따라 변화하는 온실가스, 에어로졸, 오존, 태양복사와 화산폭발 강제력을 주어 기후변화모델을 적분함으로써 과거기후를 재현한다. 미래기후변화 전망은 과거기후 모의실험의 마지막 상태 (2005년)를 초기조건으로 RCP 강제력에 따라 미래 기후변화를 산출한다. 국립기상연구소는 현재까지 제어실험 1000년을 산출하였고, 지금까지 제어실험의 200년, 400년, 500년째 결과를 초기조건으로 주어 과거기후 모의실험 (1860-2005)을 수행, 이후 RCP2.6, 4.5, 6.0 및 8.5 강제력에 따른 미래기후변화 시나리오를 산출하였다. (표 2.1). 이 보고서에서는 과거기후 모사 성능이 우수한 400년 준평형 상태를 초기조건으로 하여 산출한 과거 및 미래 기후변화 시나리오 결과에 대해 자세히 설명한다.

표 2.1 HadGEM2-AO를 이용한 장기적분 실험 종류와 각 실험의 적분 기간.

실험	적분기간
제어실험 (pre-industrial control)	≥ 200
과거기후 모의실험, 1860~2005년 (historical ensemble)	≥ 156
RCP2.6 & 4.5 & 6.0 & 8.5에 대한 미래전망 실험	≥ 95

2.2 단일강제력 실험

2.2.1 에어로졸 강제력과 복사 수지 변화

에어로졸에 의한 기후변화 영향력을 살펴보고자 모든 강제력을 포함시킨 과거기후 모의실험 (historical run, HIST)을 기준으로 에어로졸 단일 강제력 실험 (AERO)과 황산염 단일 강제력 실험 (SULP), 그리고 온실가스 강제력 실험 (GHGS)을 수행하였으며, 각 강제력 실험의 결과로부터 제어 실험 (pre-industrial control: CTRL)의 차이를 통해 인위적인 배출에 의한 기후변화 영향에 대한 분석을 수행하였다. 에어로졸은 직접적으로 태양 복사를 산란, 흡수하여 지표에 도달하는 복사 수지를 감소시킨다. 온실가스와는 다르게 생존 시간이 몇 시간에서 수일로 짧기 때문에 국지적으로 분포 양상이 다르며, 주로 방출지역 주변에서 높은 농도를 보인다. 에어로졸은 성분 및 농도에 따라 태양 복사의 감쇄 정도가 달라진다. 그림 2.1a 에서와 같이 550 nm 파장에 대한 총 에어로졸의 광학두께 (aerosol optical depth, AOD)를 살펴보면 1900년 이후 그 값이 증가하고 있으며, 1950년 이후 큰 폭으로 상승하고 있다. 이 기간에 북미와 유럽 등 고위도에서의 황 배출량이 크게 증가한 기간이며, 20세기 말 주요 배출 지역이 동아시아로 옮겨짐에 따라 최고점이 북위 30도 부근으로 옮겨지고 있다(그림 2.1b). 적도 근방에서의 AOD 증가는 중부 아프리카 지역의 biomass-burning에 의한 에어로졸 증가를 반영하고 있다 (그림 2.1c).

황산염 입자와 같이 에어로졸 중 일부는 구름응결핵으로 작용하여 구름의 미세 물리적 성질을 변화시킴으로써 간접적으로 복사수지에 영향을 주기도 한다. 인위적인 에어로졸 방출이 증가하면 대기 중 구름입자의 농도를 증가시키는데, 입자간 물 경쟁에 의한 성장이 억제되어 구름 입자의 반경이 작아진다 (그림 2.1d). 특히, 황산염 에어로졸의 주요 배출지역인 북반구 고위도에서 구름입자 반경의 감소 경향이 뚜렷하게 나타나고 있다. 구름입자 반경의 감소는 2차적으로 구름물간의 충돌 효율을 낮추기 때문에, 강수 효율을 떨어트려 구름의 생존 시간을 증가시킴으로써 하층운 증가에 기여하고 있다 (그림 2.1e). 구름 입자 반경이 감소하면 구름의 밝기가

증가하게 될 뿐만 아니라, 하층운 면적이 증가함에 따라 태양복사에 대한 구름의 반사효율을 증가시킨다. 이와 같은 에어로졸의 직, 간접적인 효과에 의해 20세기 중반 이후 북반구 대기 상단에서 강한 음의 복사 수지가 나타나고 있다 (그림 2.1f).

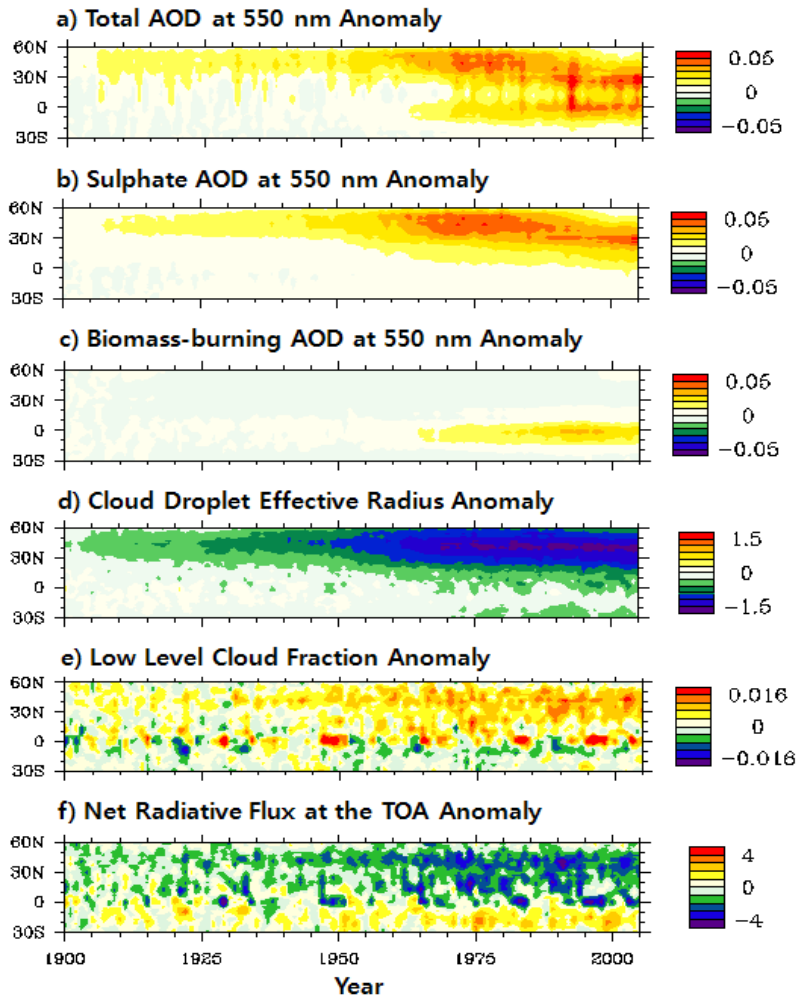


그림 2.1 에어로졸 단일 강제력 실험 (AERO)에 의한 위도별 연평균 변화 경향, (a) 550 nm 파장에 대한 총 에어로졸 광학두께, (b) 550 nm 파장에 대한 황산염 에어로졸 광학두께, (c) 550 nm 파장에 대한 Biomass-burning 에어로졸에 대한 광학두께, (d) 구름 유효입자 반경, (e) 하층운량, 및 (f) 대기 상단에서의 복사강제력 변화.

2.2.2 단일 강제력 실험 별 전구기온 변화

인위적 에어로졸에 의해 지표 복사수지의 감소는 전구 평균 기온 감소에 기여한다. 그림 2.2는 각 실험별 지난 과거 150년간의 적분 실험을 수행한 결과로써, 과거 기후 모의실험 (HIST)의 온도 변동이 CRU 관측 자료와의 변화 경향과 일치했다. 온실가스 단일 강제력 실험 (GHGS)에 의해서는 20세기 동안 꾸준히 상승하여 산업화 이전에 비해 약 1.5°C 이상 높아진 반면, 에어로졸 단일 강제력 실험 (AERO)은 1950년 이후 급격하게 온도가 감소하고 있으나 후기에 들어서면서 감소율이 완화된 후 산업화 이전에 비해 약 1°C 낮아졌다. 특히 20세기 중반에는 과거기후 모의실험의 전구 온도가 산업화 이전 수준 (CTRL)으로 낮아지는데, 이 기간에 급격하게 증가한 에어로졸 방출이 온실가스의 온난화 효과를 완전히 상쇄하고 있는 것으로 판단된다. 20세기 말 온실가스에 의한 강제력은 지속적으로 증가하는 반면 에어로졸 방출이 줄어들면서 전구 평균 온도가 급격하게 상승하고 있다.

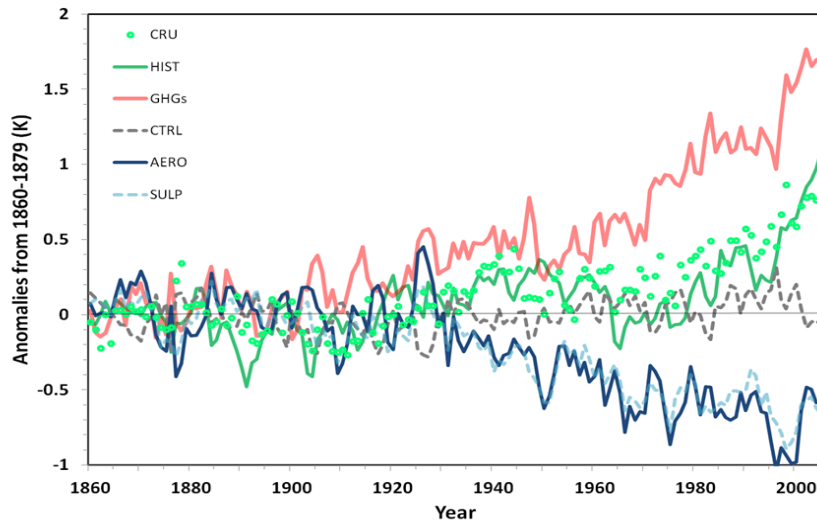


그림 2.2 전구 1.5 m 기온의 연평균 변화, CRU 관측자료 (녹색 원)와 HadGEM2-AO 기후모델을 이용한 과거기후 모의실험 (녹색 선), 온실가스 단일 강제력 실험 (붉은 선), 산업화 이전수준으로 고정 강제력 실험 (검은 파선), 에어로졸 단일 강제력 실험 (파랑 선), 황산염 에어로졸 단일 강제력 실험 (파랑 파선) 결과.

3. CMIP5 참여 기후변화모델의 성능과 미래 기후 전망

3.1 CMIP5 참여모델의 성능 평가

기후변화 모델이 모의한 과거기후를 관측과 비교하여 성능을 평가하였다 (Reichler and Kim, 2008). 평가 방법은 먼저 모델이 모의한 31개 기후 변수들을 관측 값과 비교하여 편차를 구하고³⁾ 구해진 모델의 편차를 전체 모델의 평균 편차로 나누어, 각 모델의 성능을 계산하였다⁴⁾. 그리고 이렇게 계산된 편차를 모든 변수에 대하여 평균하여, 31개 기후 변수의 모의 성능을 모두 반영한 종합적인 모델 편차를 계산하였다⁵⁾.

국립기상연구소의 기후변화 모델 결과를 IPCC 5차 평가보고서 작성에 참여한 모델들의 결과와 비교하였으며, 지역별로 나누어 살펴보았다 (그림 3.1). 값이 작아 질수록 (푸른색이 진해 질수록) 관측과의 편차가 작아지고 모델의 모의 성능 결과가 좋을 것을 의미하며, 국립기상연구소의 실험 결과가 우수함을 알 수 있다.

IPCC 2차 평가보고서부터 5차 평가보고서까지 참여 모델들의 성능을 같은 방법을 사용하여 전 지구적으로 비교하였을 때 (그림 3.2), 세대를 거듭할수록 모델의 성능이 점차 향상되어 관측에 가까워지고 있음을 알 수 있다. 그러나 최근 들어 모델들 간의 성능 차이도 줄어들고 있으며, 모델의 성능이 향상되는 폭도 줄어들었다.

$$3) \text{ 기후 변수별 관측값과의 비교 편차 } E^2 = \sum_{n=1}^N w_n \left(\frac{\overline{s_n - o_n}}{\sigma_{n,o}} \right)^2$$

N : 총 모델 수, w : 가중치, S : 모델값, O : 관측값, σ : 표준편차

$$4) \text{ 전체 모델의 평균 편차에 대비한 각 모델의 편차 비 } I_n^2 = \frac{E_r^2}{E_g^{2m}}$$

E_r : 지역별 관측 값과의 비교편차, E_g : 전지구 관측 값과의 비교 편차, $\overline{m}$: 모델 평균

$$5) \text{ 모든 변수에 대한 모의성능을 종합 반영한 평균한 최종 모델 평가 지수 } \overline{I^{2v}}, \quad \overline{v}: \text{기후변수 평균}$$

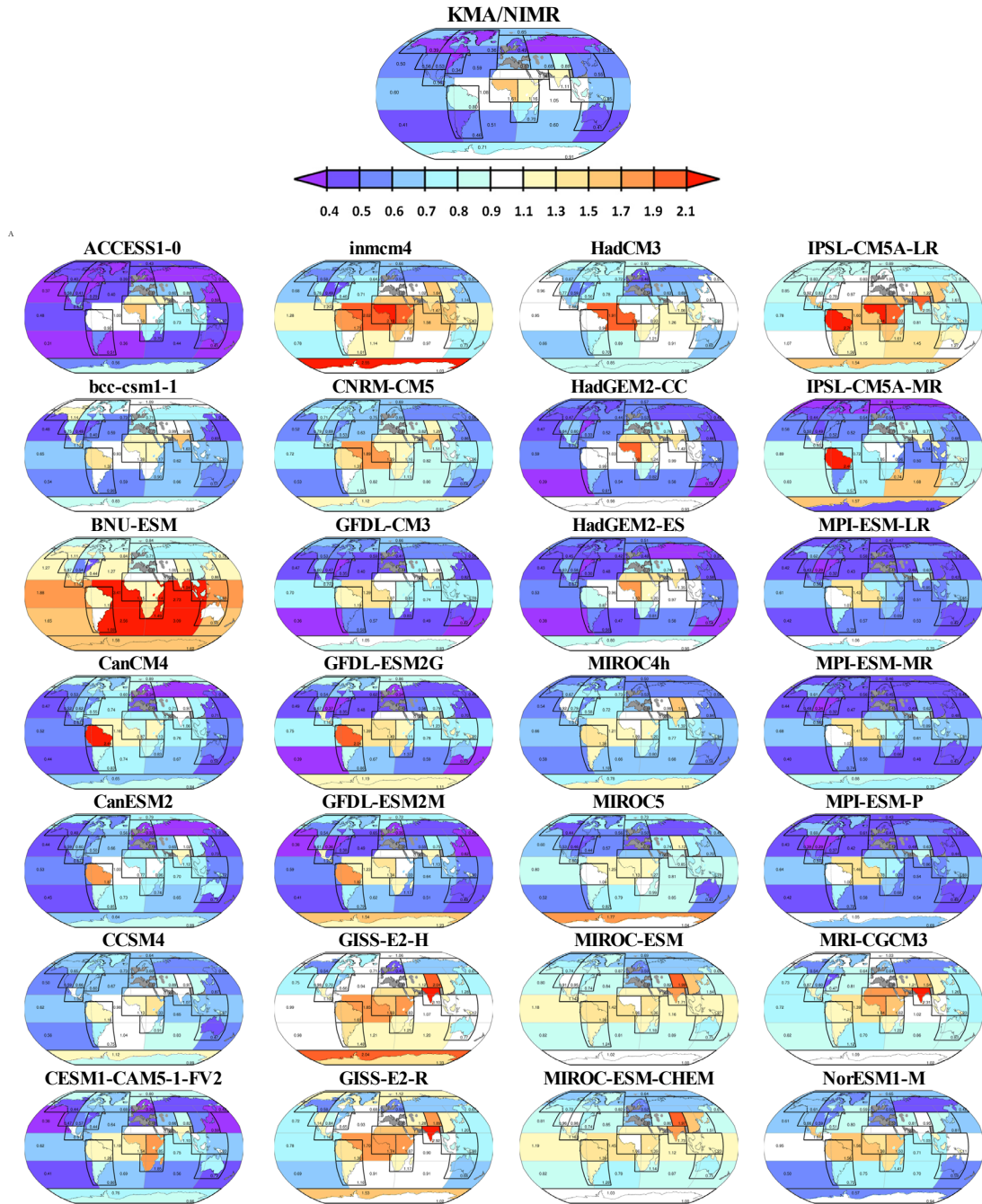


그림 3.1 기후모델과 관측과의 편차를 이용한 성능평가 결과 비교. 가장 위쪽 결과가 국립 기상연구소 HadGEM2-AO의 결과이며 나머지는 IPCC 5차 평가보고서 작성에 참여한 모델의 성능평가 결과임.

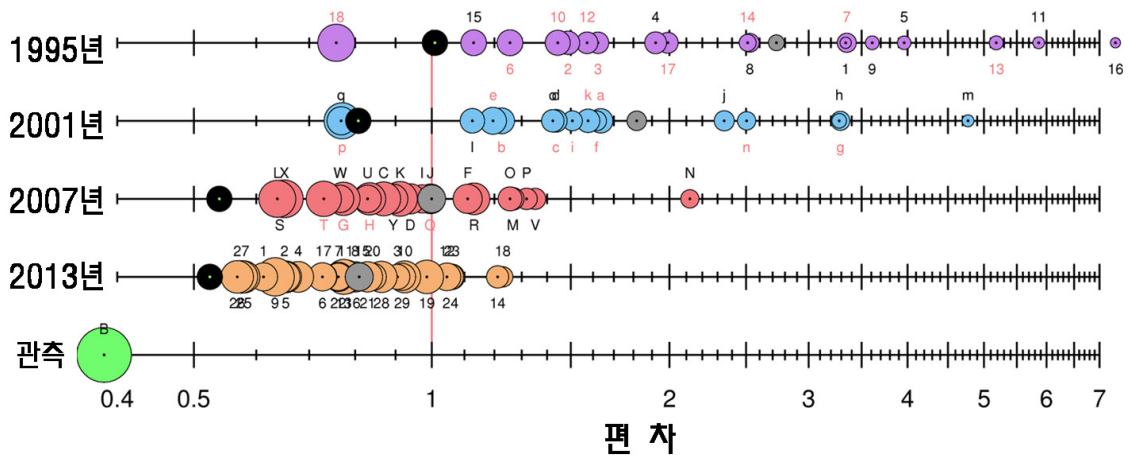


그림 3.2 IPCC 2차 (1995년), 3차 (2001년), 4차 (2007년), 5차 (2013 예정) 평가보고서 작성에 참여한 모델 간의 성능평가 결과. 회색 원은 모델들의 평균이며, 검은색 원은 각 성능평가 변수별로 평균한 앙상블 값으로 평가한 결과를 나타냄.

3.2 기온 및 강수량 미래 전망

CMIP5 16개 모델의 결과를 이용하여 전지구 기온과 강수의 앙상블 평균한 미래를 전망하였다. 사용된 모델은 표 3.1에 나타내었다. 1861년부터 2100년 까지 CMIP5 16개 모델의 전지구 앙상블 평균한 기온 및 강수의 변화를 살펴보았다 (그림 3.3). 과거기후 (1971~2000년) 앙상블 평균을 기준으로 21세기 말 (2071~2100년)의 전지구 미래변화를 살펴보면, 현재에 비해 21세기 말에 기온은 RCP2.6 시나리오에 의해서 약 1.3°C , RCP4.5 에서는 약 2.1°C , RCP6.0 에서는 약 2.4°C , RCP8.5 시나리오 하에서는 약 3.7°C 상승하는 것으로 나타났다. 그리고 강수는 RCP2.6 시나리오에서는 21세기 말에 약 2.9%, RCP4.5 에서는 약 4.1%, RCP6.0에서는 약 4.1%, RCP8.5 에서는 약 6.1% 증가될 것으로 전망되었다. 기온과 강수는 모든 시나리오에서 상승 추세를 보이고 있으며, 고농도 시나리오인 RCP8.5에서 상승폭이 높게 나타났다. 예측 불확실성 (시계열에서 CMIP5 모델 간의 표준편차를 나타낸 음영)은 고농도 시나리오에서 크게 나타났고, 기온보다 강수에서 더 크게 나타났다.

전지구 기온과 강수의 미래변화를 공간적으로 살펴보았다. 전망의 유의성을 확보하기 위해서 T-test를 통해 기온은 95% 이상, 강수는 90% 이상의 신뢰수준을 보이는 지역을 점묘화하였다 (그림 3.4와 3.5). 기온은 미래에 모든 지역에서 상승할 것으로 나타났다. 해양의 경우 열적용량 (heat capacity)이 크기 때문에 해수면 기온의 지연현상 (thermal inertia)이 나타나, 상대적으로 육지에서의 온도증가가 크게 나타나고 있다. 또한 전구온도 증가에 따른 적설 및 해빙면적 감소에 의한 알베도 되먹임 (ice-albedo feedback) 효과 및 극지역의 지면역전층 (near surface inversion)에 의한 장파복사의 트랩 현상이 북반구 고위도 지역의 온도증가를 가속화 시키고 있다 (Bintanja et al., 2011). 강수는 전지구 평균 강수는 증가할 것으로 나타났지만 지역적으로 증감의 차이를 보였다. 극 지역, 북아프리카, 적도태평양 지역에서는 미래에 강수가 크게 증가할 것으로 나타난 반면에, 지중해 인근, 남아프리카, 호주 남서부, 태평양 동부연안 등지에서는 미래에 강수가 감소할 것으로 나타났다.

표 3.1 앙상블 평균에 사용된 CMIP5 16개 모델

	Model	Center	해상도
1	bcc-csm1-1*	BCC	128x64
2	CCSM4	NCAR	288x192
3	CSIRO-Mk3-6-0*	CSIRO-QCCCCE	192x96
4	GFDL-CM3	GFDL	144x90
5	GFDL-ESM2G	GFDL	144x90
6	GFDL-ESM2M	GFDL	144x90
7	GISS-E2-R	NASA-GISS	144x90
8	HadGEM2-AO*	NIMR	192x145
9	HadGEM2-ES	MOHC	192x145
10	IPSL-CM5A-LR	IPSL	96x96
11	MIROC-ESM*	MIROC	128x64
12	MIROC-ESM-CHEM*	MIROC	128x64
13	MIROC5*	MIROC	256x128
14	MRI-CGCM3*	MRI	320x160
15	NorESM1-M	NCC	144x96
16	NorESM1-ME	NCC	144x96

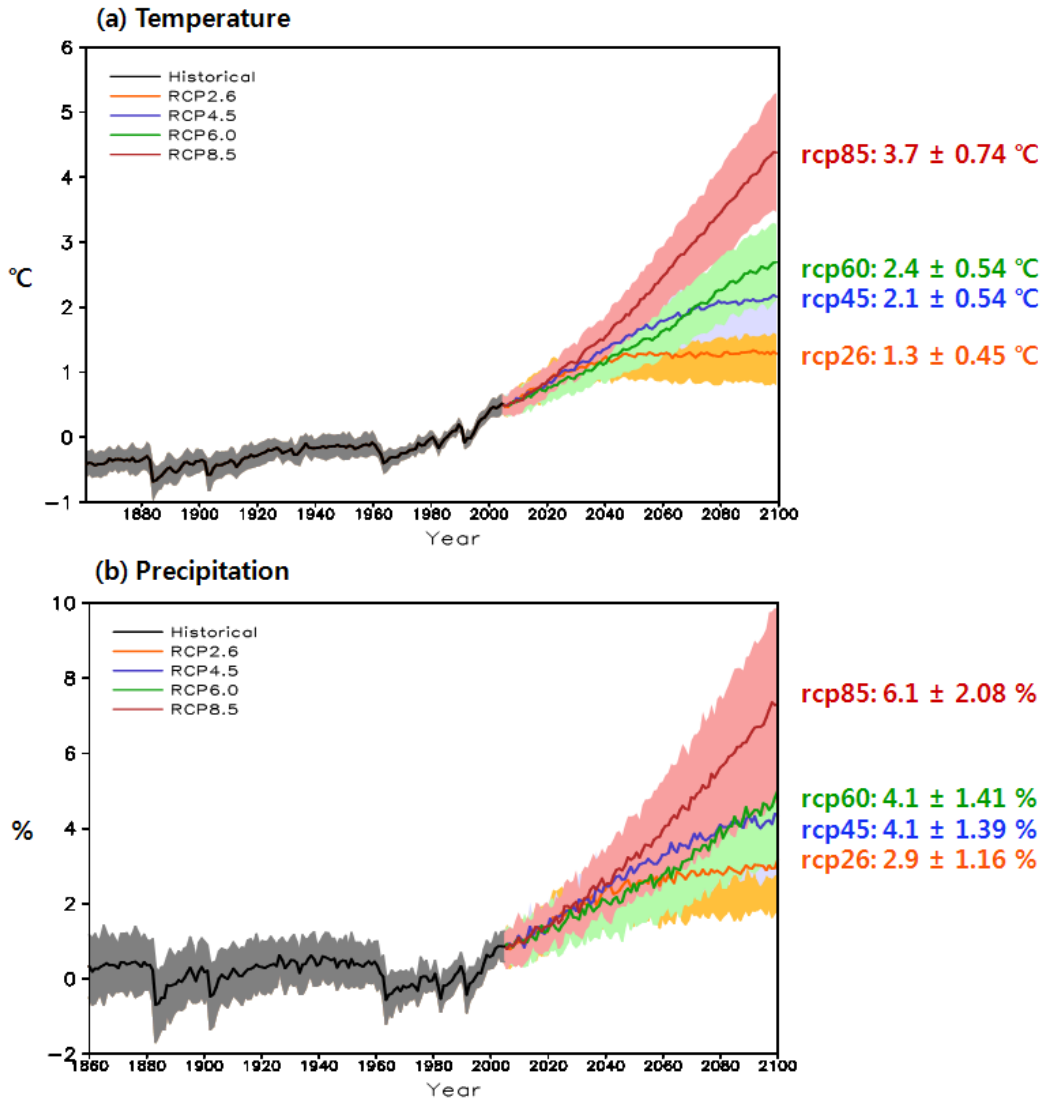


그림 3.3 전지구 연 (a) 기온 및 (b) 강수량 변화 시계열 (1861~2100년). 음영은 표준편차를 의미함. 제시된 값은 과거기후(1971~2000년) 대비 미래기후 (2071~2100년) 변화 $\pm$ 표준편차.

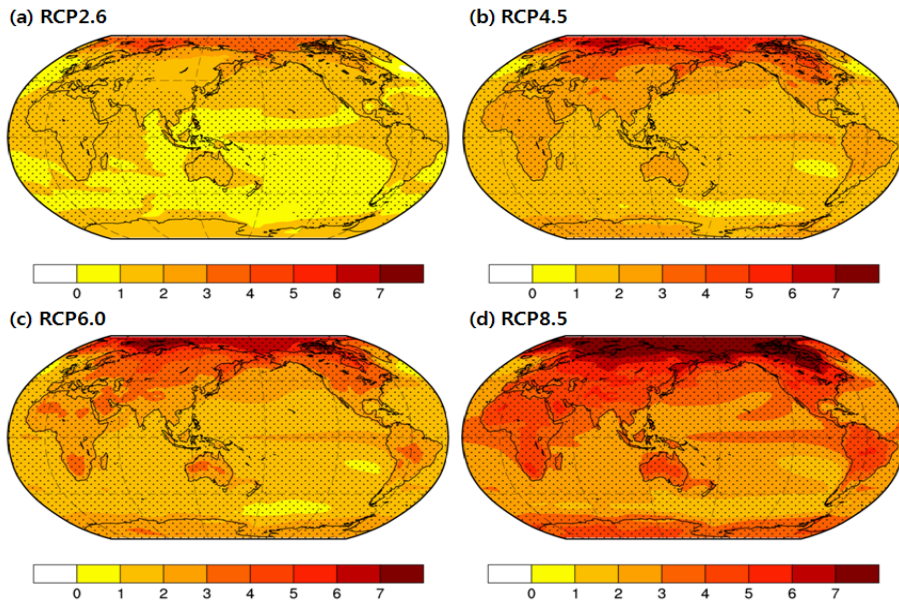


그림 3.4 과거모의 (1971-2000년) 대비 미래시나리오 (a) RCP2.6, (b) RCP4.5, (c) RCP6.0, (d) RCP8.5에 따른 미래 (2071-2100년) 기온 변화 (단위, °C). 99%이상 신뢰구간 • 표시

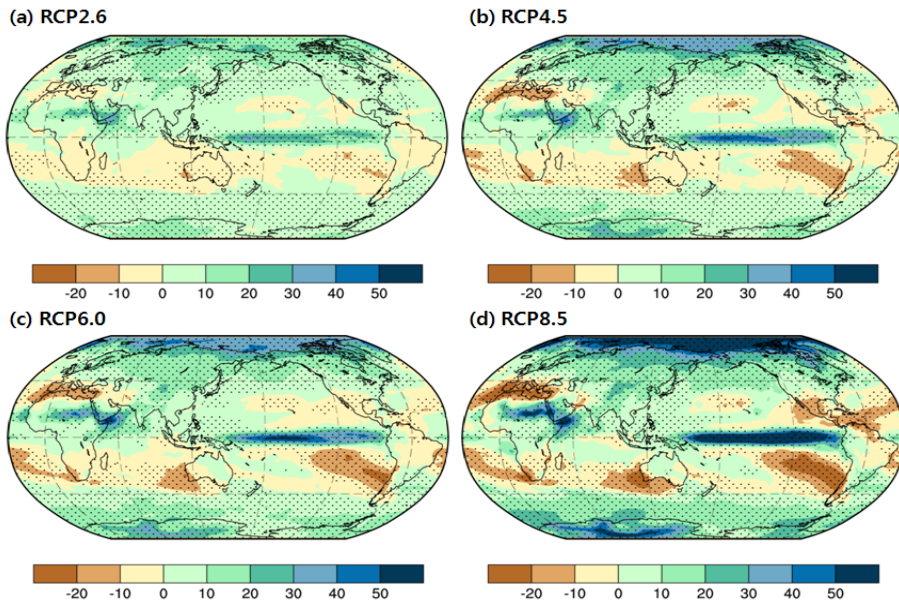


그림 3.5 과거모의 (1971-2000년) 대비 미래시나리오 (a) RCP2.6, (b) RCP4.5, (c) RCP6.0, (d) RCP8.5에 따른 미래 (2071-2100년) 강수 변화 (단위, %). 90%이상 신뢰구간 • 표시

3.3 대기 순환 미래 전망

CMIP5 참여모델 (표 3.1에서 * 표기)의 양상블 평균으로부터 현재기후 (1971~2000년) 대비 21세기 말 (2071~2100년)의 대기 순환의 변화를 살펴보았다. 전지구 대부분의 지역에서 기온이 상승하며 해양에 비해 육지에서 기온상승이 클 것으로 전망되었다 (그림 3.6). 또한, JJA에 비해 DJF에 기온 상승폭이 크며 특히 겨울반구 극지방에서 기온상승이 클 것으로 나타났다. 이러한 지상 기온상승의 변화강도는 온실가스 강제력이 강화될수록 더 크게 나타났다.

동서평균된 연직 기온의 공간 분포는 RCP 시나리오가 강해짐에 따라 적도 상층과 극 하층에서 기온상승이 클 것으로 전망되었다 (그림 3.7). 적도 상층의 기온상승은 JJA와 DJF에 모두 두드러지나, 극지방의 기온상승은 겨울반구 대류권 하층에서, 여름반구 대류권 중층에서 크게 나타나고 있다. 또한, 여름반구에 비해 겨울반구의 성층권 기온이 크게 하강할 것으로 전망되었다.

연직 기온의 변화와 함께 제트의 변화도 일관된 특성을 보이고 있다. 성층권의 기온하강과 적도 대류권 상층의 기온상승에 의한 남북온도경도가 여름반구에 비해 겨울반구에서 더 크게 나타나는데, 이로 인해 겨울반구 제트의 경우 원래 위치에서 상층으로 더욱 강화될 것으로 전망되었다 (그림 3.8).

그림 3.9에서 해들리 순환의 변화를 살펴보았다. 현재기후에서 DJF에 남위 10도 부근에서 공기가 상승하여 북위 30도 부근으로 하강하고, JJA에 반대로 북위 10도 부근에서 상승하여 남위 30도 부근으로 하강하는 해들리 순환의 계절적 특성이 잘 모의되고 있다 (그림 3.9a). 21세기 말 해들리 순환의 변화를 살펴보면, RCP 시나리오가 강해짐에 따라 JJA 및 DJF 해들리 셀의 하강기류는 더 강화되고 상승기류는 더 약화될 것으로 나타나고 있다 (그림 3.9 b-d).

대표적인 적도지역 동서방향 대기 순환인 위커순환의 변화도 살펴보았다. 현재기후에서 서태평양의 해수면 온도는 따뜻하고 동태평양은 상대적으로 차갑기 때문에 서태평양에서 공기가 상승하여 동태평양 쪽으로 하강하게 된다 (그림 3.10a). 현재기후 대비 21세기 말에 JJA 및 DJF 모두 서태평양의 상승기류와 동태평양의 하강기류가 약화될 것으로 전망되며, 온실가스 강제력이 커질수록 위커순환의 약화 정

도가 크게 나타나고 있다 (그림 3.10 b-d). 이러한 위커순환의 약화는 해수면 온도의 변화와도 밀접한 관련이 있다. 지구온난화가 진행됨에 따라 엘니뇨와 유사한 패턴으로 열대 동태평양 해수면 온도가 상승할 것으로 전망되었다 (Yamaguchi and Noda, 2006). HadGEM2-AO 모델에서도 (그림 4.16) 다른 지역에 비해 적도 동태평양의 해수면 온도가 크게 상승함에 따라 서태평양의 상승기류와 동태평양의 하강기류가 약화되어 위커순환이 약화될 것으로 전망되었다.

해들리 순환 및 위커순환과 같은 대기 순환의 변화는 강수량의 변화와 연관이 있다. 현재기후에서 강수대가 DJF에 남위 5-10도 부근에, JJA에 북위 5-10도 부근에 위치하고 있는데 (그림 3.11a) 이러한 강수의 계절적 특성과 해들리 순환의 계절적 특성이 잘 일치하고 있다 (그림 3.9a). RCP 시나리오에서 21세기 말에 해들리 셀의 하강기류가 강화되는 겨울반구에는 아열대 지역의 강수가 감소될 것으로 전망되었다 (그림 3.11 b,c,e). 또한, 해들리 셀의 상승기류가 약화되는 적도 서태평양에서는 강수량이 감소할 것으로 나타났다. 위커순환과 강수 변화의 관련성을 살펴보면, 현재기후에서 위커순환에 의해 적도 서태평양에서 강수량이 많으며 동태평양에서 강수량이 적게 모의되는 것을 볼 수 있다 (그림 3.11a). RCP 시나리오에서는 상승기류가 약화되는 적도 서태평양에서는 강수량이 감소하고 상대적으로 상승기류가 강화되는 적도 동태평양에서는 강수량이 증가할 것으로 나타났다 (그림 3.11 b,c,e).

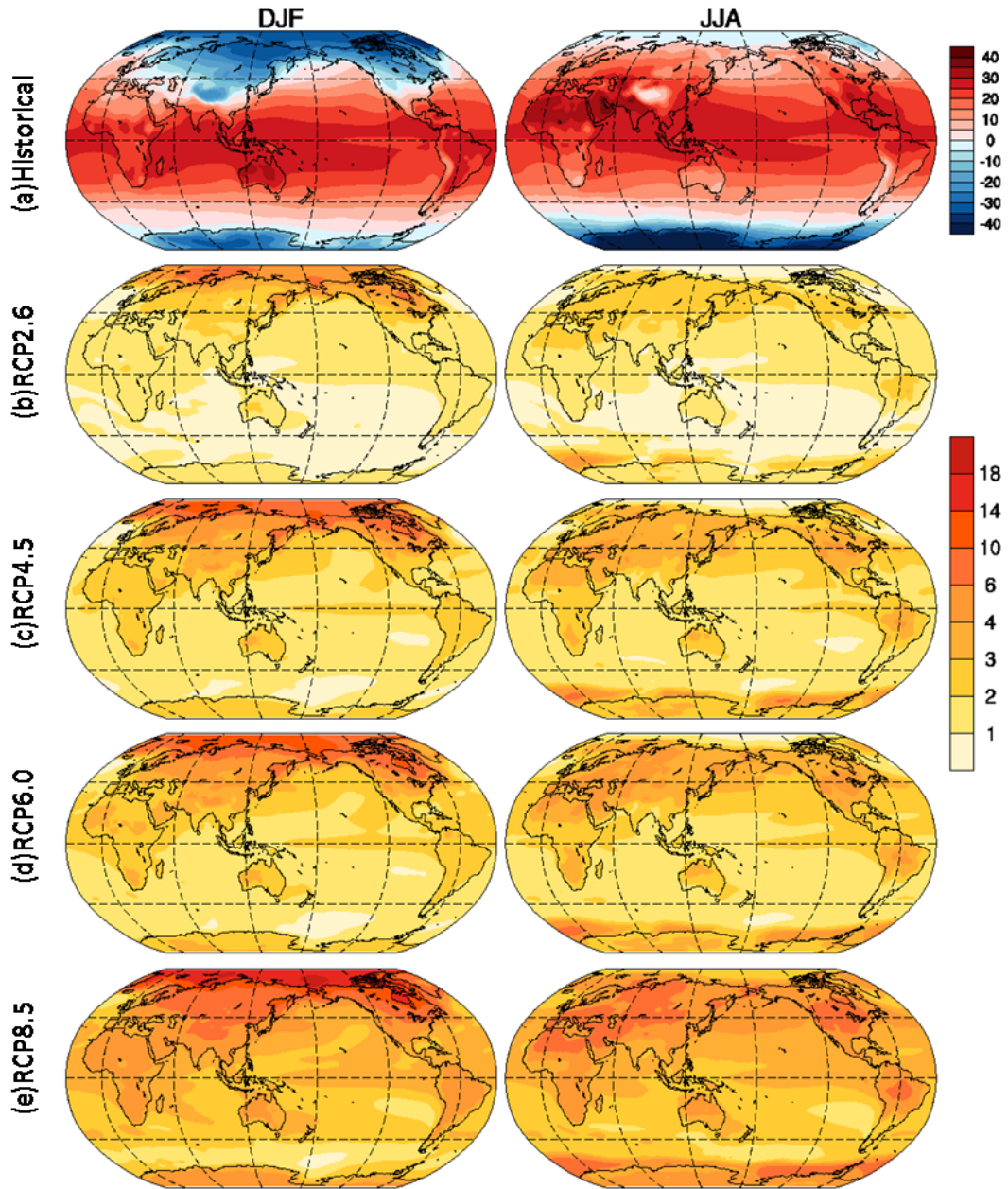


그림 3.6 지상 기온의 기후값 (a) 현재기후 (1971-2000) 및 현재기후 대비 미래 (2071-2100) 시나리오 RCP4종에서의 변화 (b) RCP2.6, (c) RCP4.5, (d) RCP6.0, (e) RCP8.5. 오른쪽면은 6월~8월, 왼쪽면은 12월~2월을 가리킨다. 단위는 $^{\circ}\text{C}$ 이다.

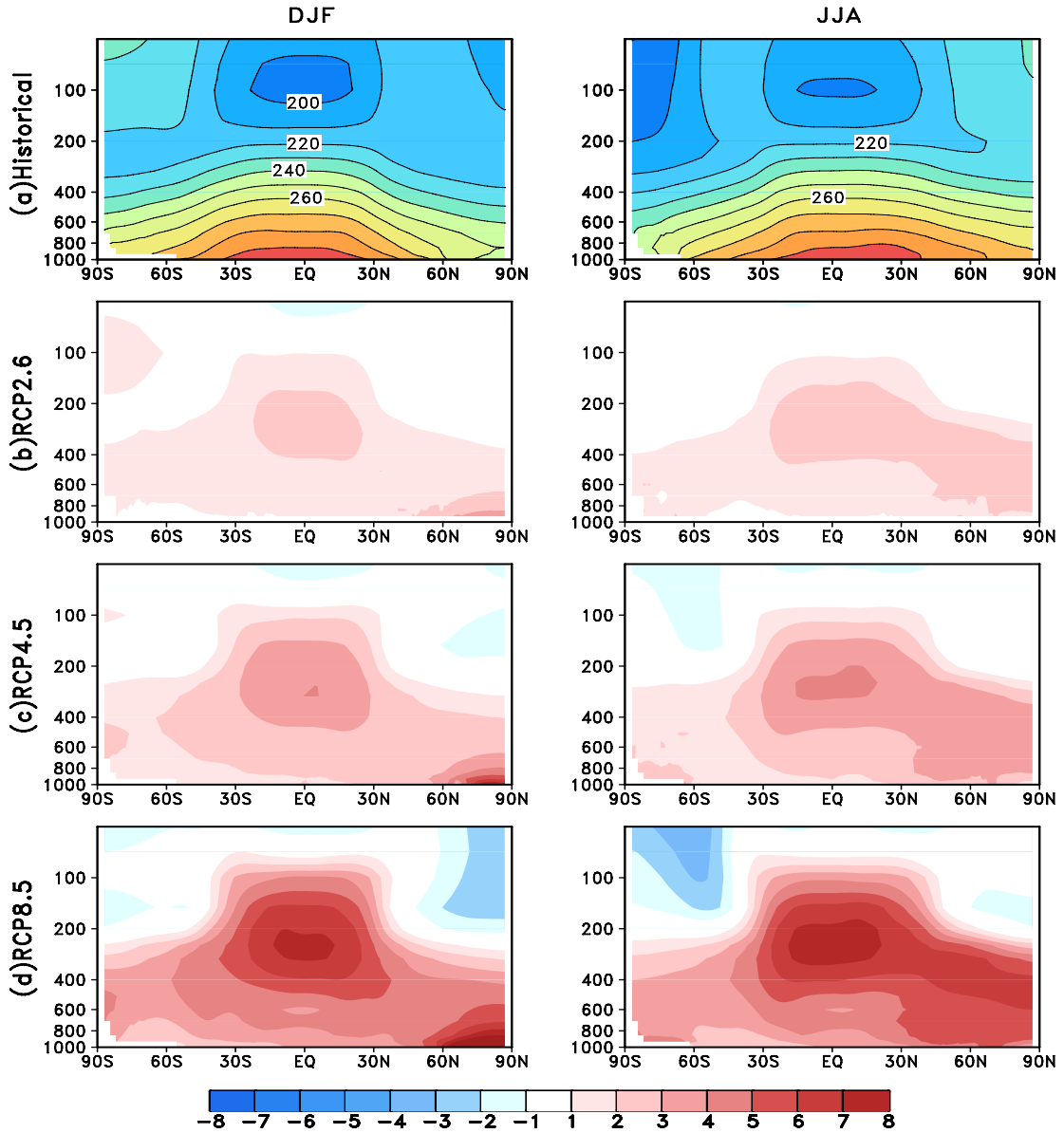


그림 3.7 동서방향으로 평균된 연직기온의 기후값 (a) 현재기후 (1971-2000) 및 현재기후 대비 미래 (2071-2100) 시나리오 RCP3종에서의 변화 (b) RCP2.6, (c) RCP4.5, (d) RCP8.5. 오른쪽면은 6월~8월, 왼쪽면은 12월~2월을 가리킨다. 단위는 K 이다.

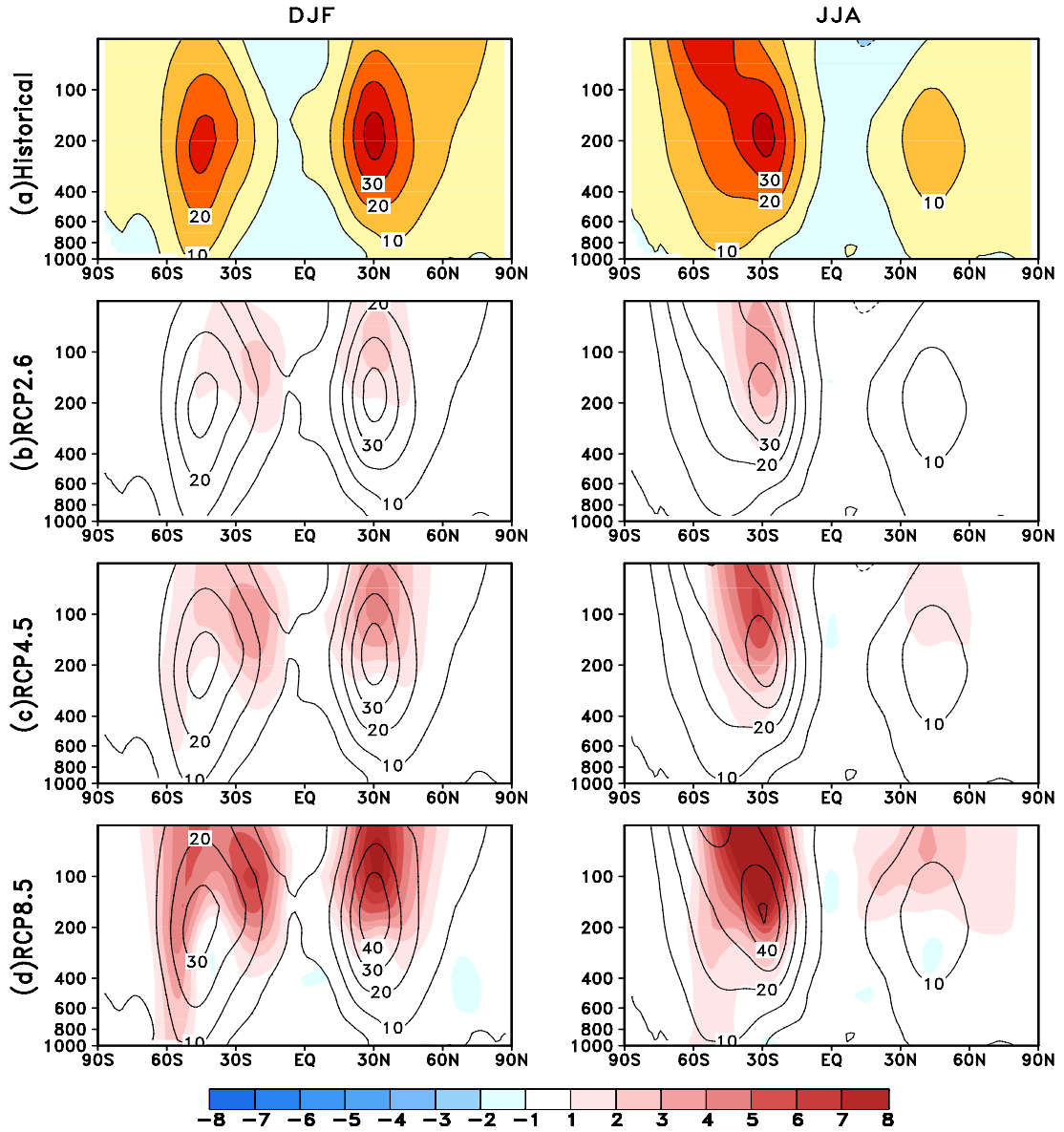


그림 3.8 동서방향으로 평균된 동서바람장의 기후값 (a) 현재기후 (1971-2000) 및 현재기후 대비 미래 (2071-2100) 시나리오 RCP3종에서의 변화 (b) RCP2.6, (c) RCP4.5, (d) RCP8.5. 오른쪽면은 6월~8월, 왼쪽면은 12월~2월을 가리킨다. (b-d)의 실선은 미래시나리오 기후값을 나타내며 양의 값은 서풍을 의미한다. 단위는 $m s^{-1}$ 이다.

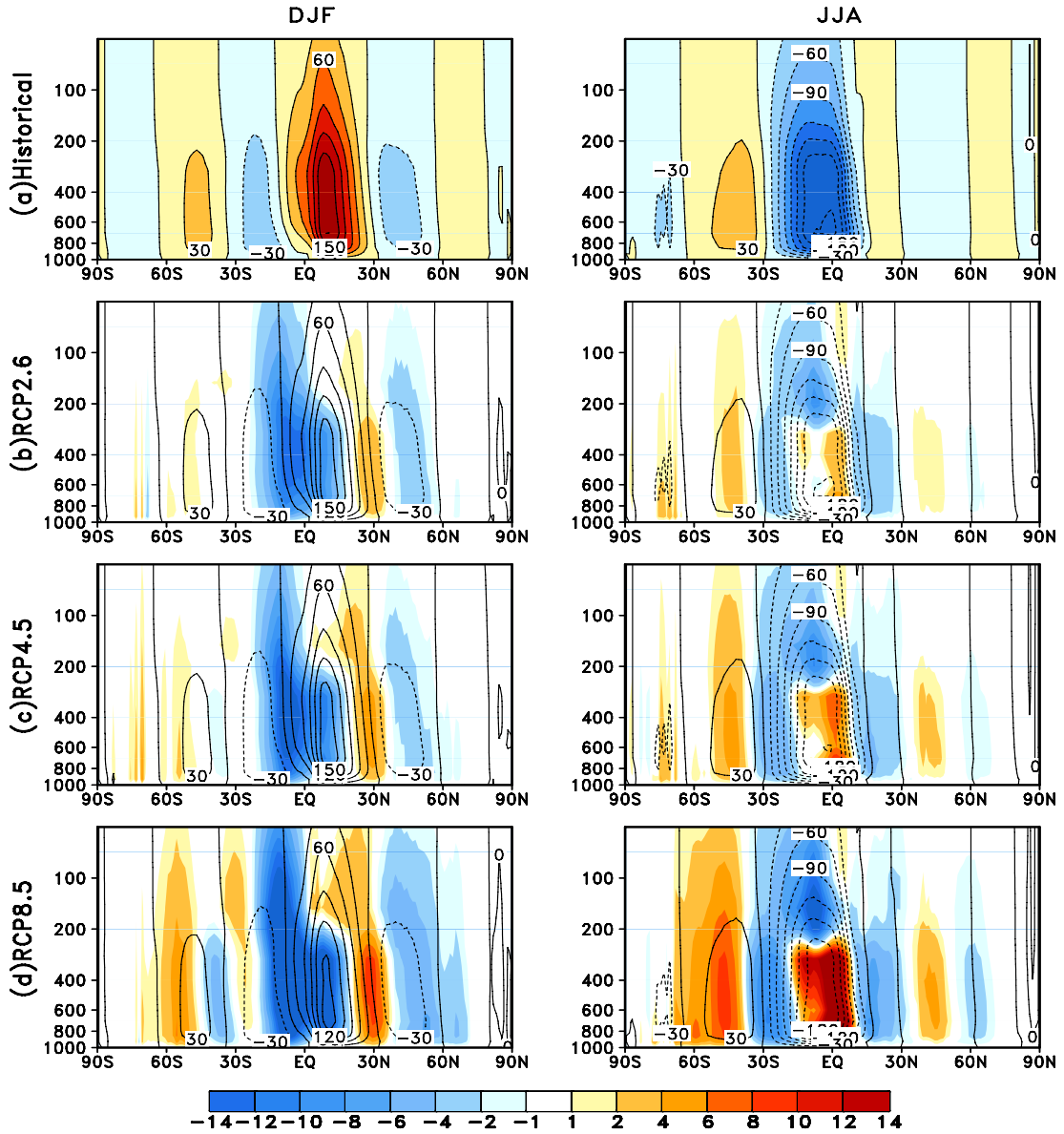


그림 3.9 동서방향으로 평균된 헤들리 순환의 기후값 (a) 현재기후 (1971-2000) 및 현재기후 대비 미래 (2071-2100) 시나리오 RCP3종에서의 변화 (b) RCP2.6, (c) RCP4.5, (d) RCP8.5. 오른쪽면은 6월~8월, 왼쪽면은 12월~2월을 가리킨다. (b-d)의 실선은 미래시나리오 기후값을 나타내며 양의 값은 시계방향, 음의 값은 반시계방향의 순환을 의미한다. 단위는 10^9 kg s^{-1} 이다.

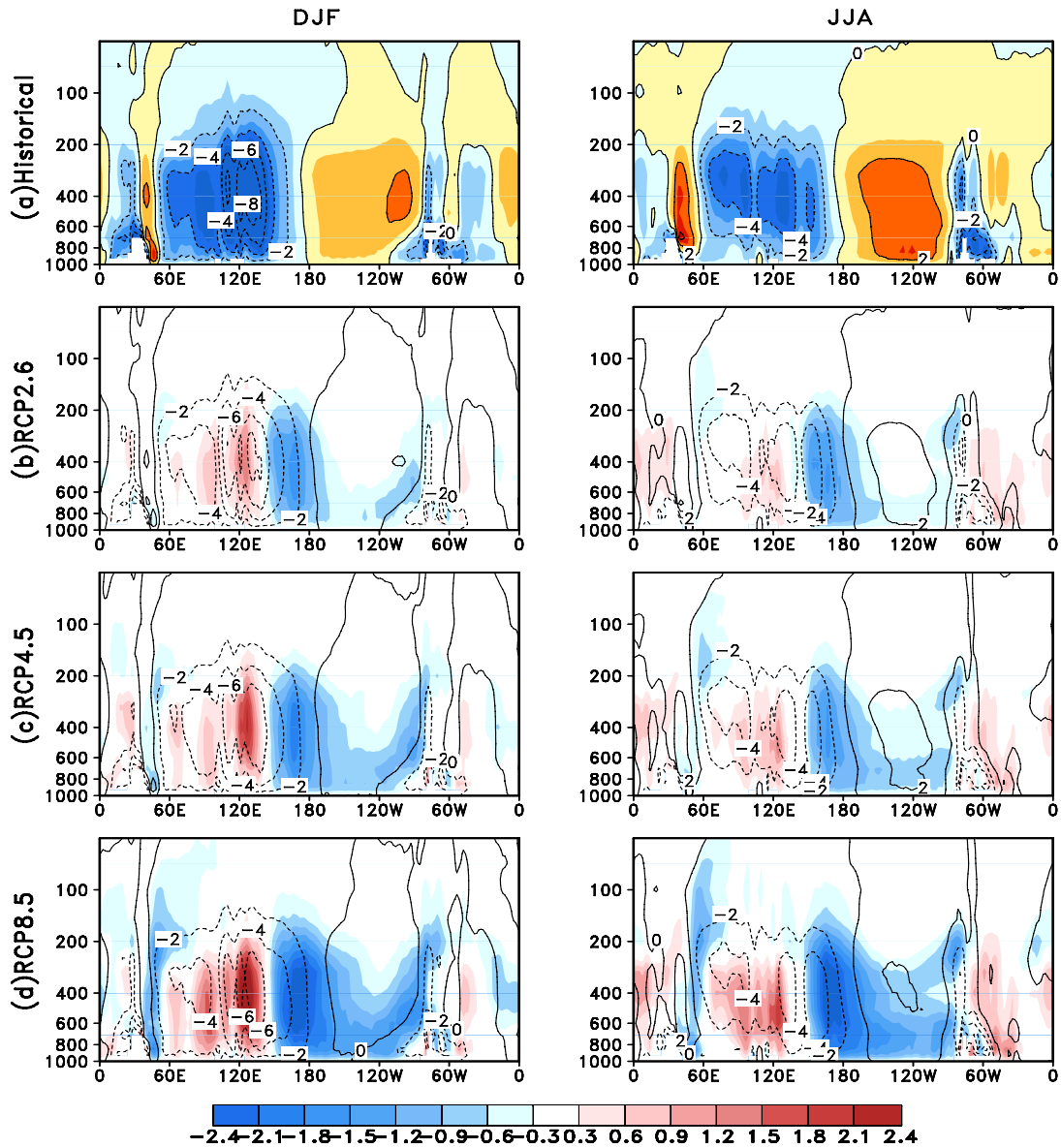


그림 3.10 적도 연직바람장의 기후값 (a) 현재기후 (1971-2000) 및 현재기후 대비 미래 (2071-2100) 시나리오 RCP3종에서의 변화 (b) RCP2.6, (c) RCP4.5, (d) RCP8.5. 오른쪽면은 6월~8월, 왼쪽면은 12월~2월을 가리킨다. 남북방향으로 남위5도에서 북위5도까지 평균하였다. (b-d)의 실선은 미래시나리오 기후값을 나타내며 양의 값은 하강기류, 음의 값은 상승기류를 의미한다. 단위는 $10^{-2} \text{ Pa s}^{-1}$ 이다.

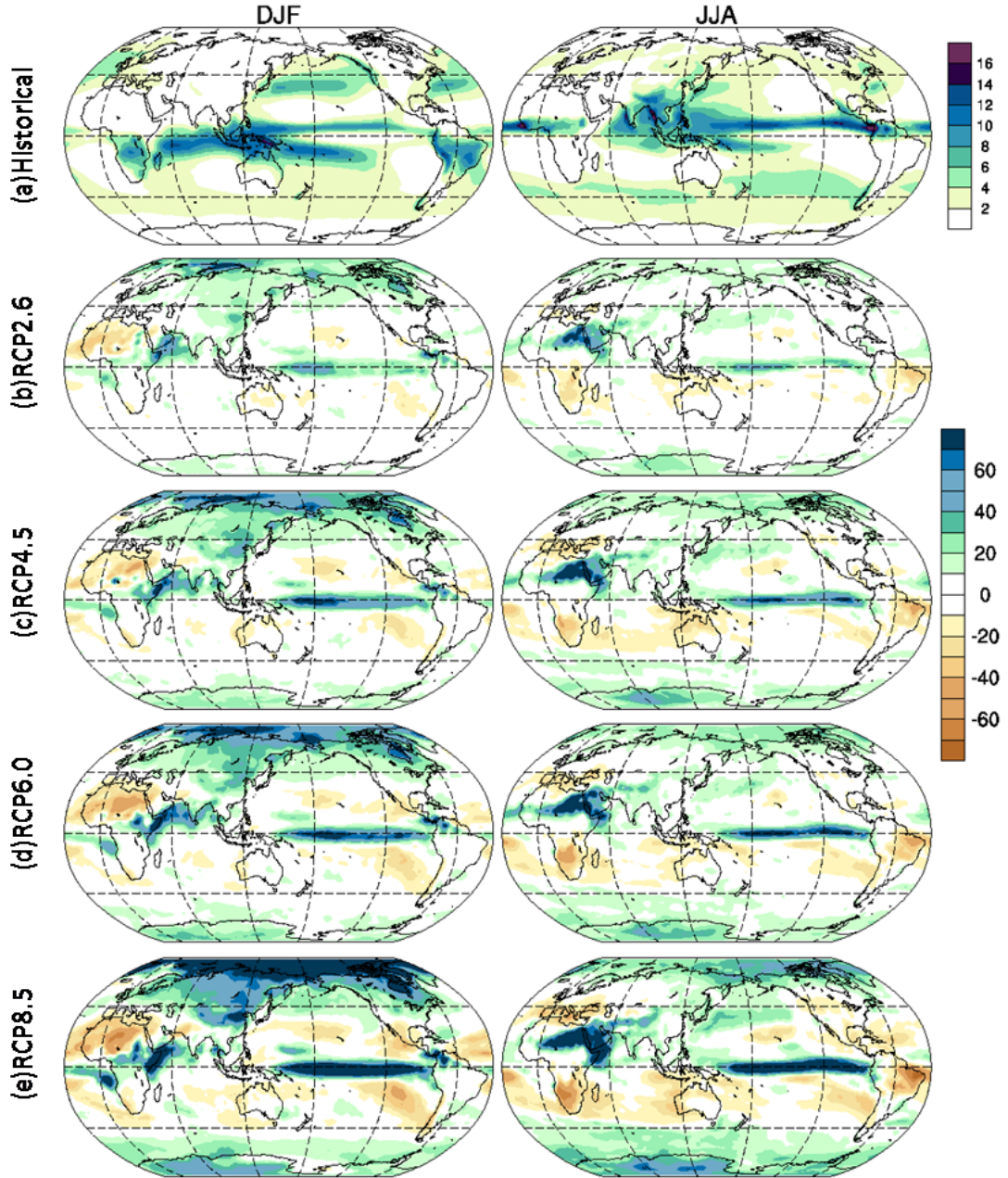


그림 3.11 강수량의 기후값 (a) 현재기후 (1971-2000) 및 현재기후 대비 미래 (2071-2100) 시나리오 RCP4종에서의 변화 (b) RCP2.6, (c) RCP4.5, (d) RCP6.0, (e) RCP8.5. 오른쪽면은 6월~8월, 왼쪽면은 12월~2월을 가리킨다. (a)의 단위는 mm day^{-1} , (b-e)의 단위는 %이다.

3.4 태풍

태풍은 가장 강한 극한 기상현상 중의 하나로 강한 바람과 호우로 큰 재해를 동반한다. 따라서 향후 기후변화에 의해 태풍 발생이 어떠할지는 최근의 중요한 이슈가 되고 있다. 따라서 기후변화 시나리오 자료로부터 미래 태풍의 잠재적 강도(Potential Intensity, PI)⁶⁾를 구하여 미래 변화를 전망하였다 (Bister and Emanuel, 1998). 태풍 잠재 강도는 해수면 온도와 기온의 연직 분포 그리고 대기의 불안정지수를 가지고 발생 가능한 태풍의 최대 강도를 최대 속도의 형태로 계산한 지수이다.

20세기 말 (1971~2000년)에 비하여 미래 21세기 말 (2071~2100년) CMIP5 7개⁷⁾ 모델의 평균적인 태풍의 잠재적 강도는 대부분의 모델에서 증가할 것으로 전망하고 있다 (그림 3.12). 특히 온실가스 고배출 시나리오로 갈수록 동태평양에서의 태풍 잠재 강도가 크게 증가할 것으로 전망된다.

우리나라로 태풍이 직접적으로 들어오는 길목인 남해 (위도 29.5~35.5°N, 경도 122~129°E)를 중심으로 한 여름철 태풍 잠재 강도 변화 또한 미래에 증가하여, 시나리오에 따라서 21세기말 15.3% (RCP2.6), 19.6% (RCP4.5), 19.0% (RCP6.0), 30.1% (RCP8.5) 강화 될 것으로 전망하였다 (그림 3.13).

$$6) PI = \sqrt{\frac{C_k}{C_D} \frac{T_s}{T_0} (CAPE^* - CAPE)}$$

C_k : 교환 계수,

C_D : 항력 계수

T_s : 해수면 온도,

T_0 : 부력이 중립에 이르는 층에서의 평균 기온

$CAPE^*$: 상승기류의 대류불안정지수,

$CAPE$: 주변기류의 대류불안정지수

7) 7개 CMIP5 사용 모델: HadGEM2-AO, CSIRO-Mk3-6-0, GISS-E2-R, MIROC5, MRI-CGCM3, NorESM1-M, NorESM1-ME

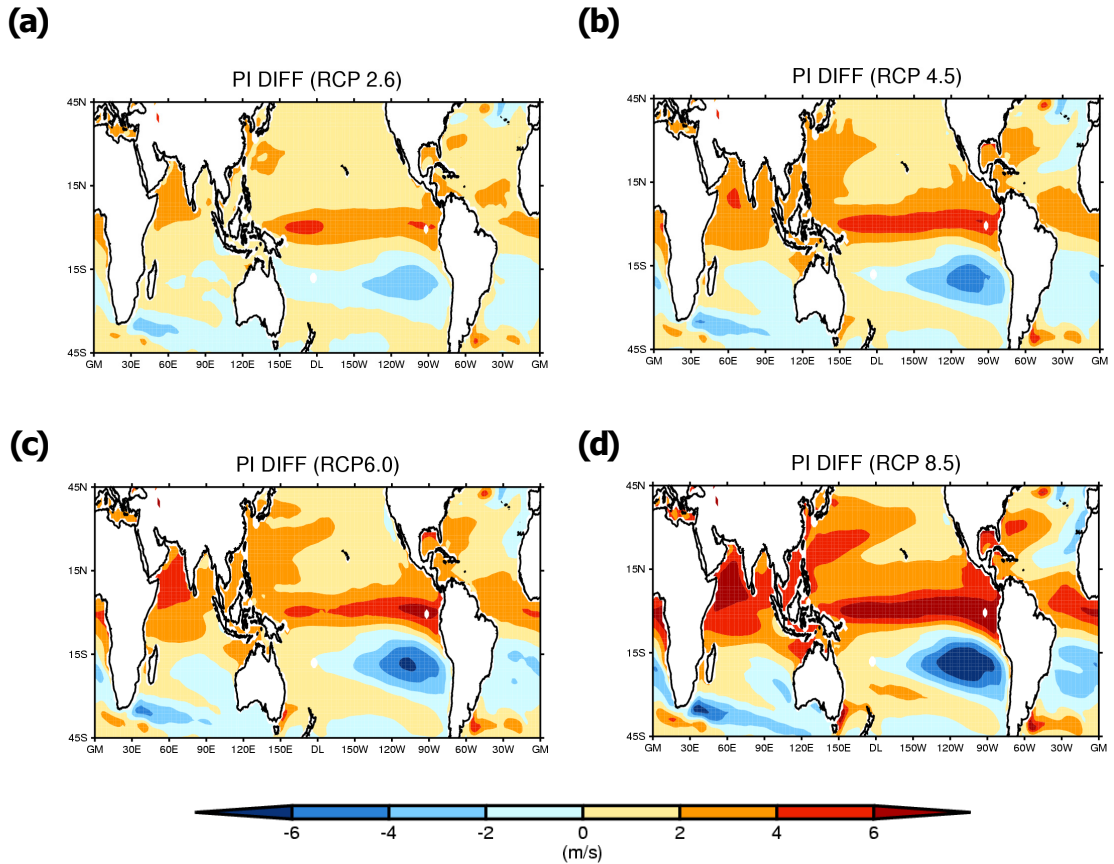


그림 3.12 CMIP5 7개 모델의 평균적인 태풍 잠재강도의 변화. 미래 (2070~2099년)와 과거 (1971~2000년)의 차이. (a) RCP2.6, (b) RCP4.5, (c) RCP6.0, (d) RCP8.5.

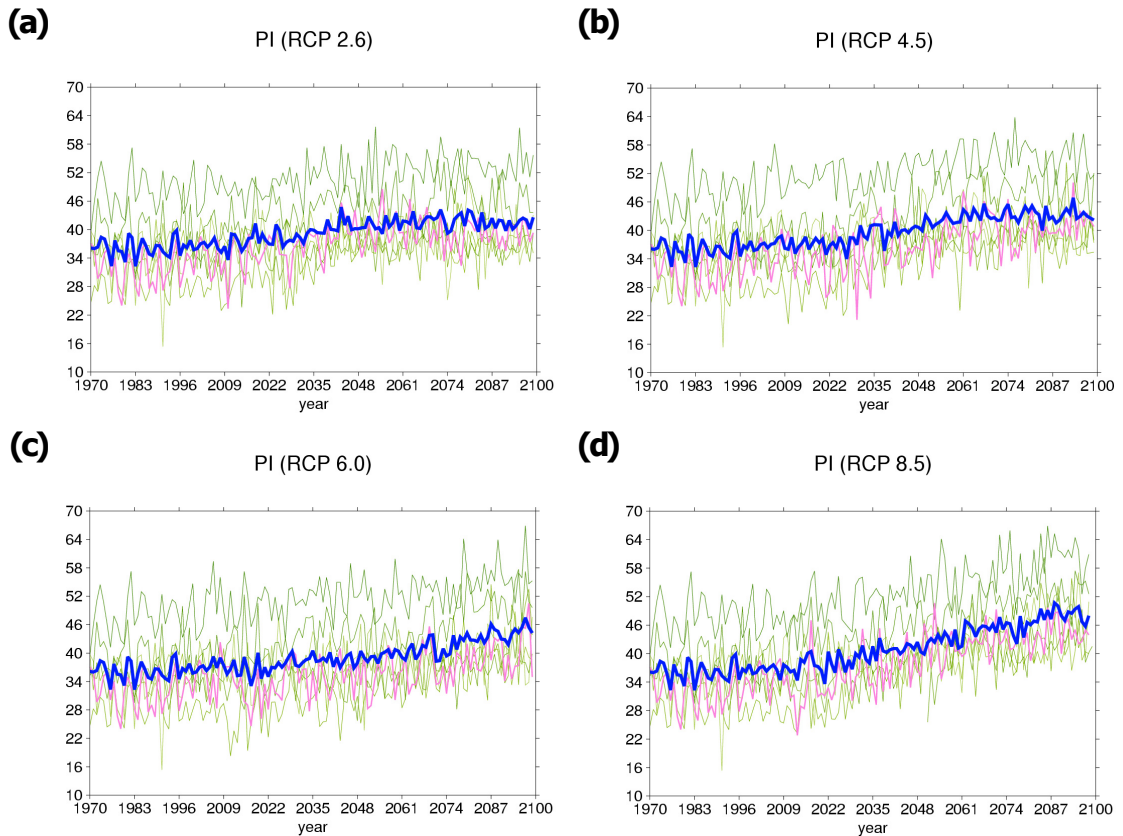


그림 3.13 우리나라 남해 부근 (위도 29.5~35.5°N, 경도 122~129°E)에서의 CMIP5 7개 모델의 평균적인 태풍 잠재강도의 시간 변화. (a) RCP2.6, (b) RCP4.5, (c) RCP6.0, (d) RCP8.5 (녹색선: CMIP5 개별 모델, 붉은선: HadGEM2-AO, 파란선: CMIP5 모델 평균).

4. HadGEM2-AO 기후모의 및 미래 변화

4.1 기온

기후변화 연구에서 평균 상태의 변화뿐만 아니라 변동성 증가에 대한 관심이 고조되면서, 극한 기후 현상의 중요성이 본격적으로 다루어지기 시작하였다. 극한 기후 현상의 분석은 다양한 기상요소에 대한 27가지 지수⁸⁾를 이용하여 수행되며 최저기온과, 최고기온의 변화를 분석하여 극한 기후에 대한 과거 및 미래 변화 경향을 제시한다. 분석된 극한 기후 지수는 온난야 일수, 온난일 일수, 한랭야 일수, 한랭일 일수, 그리고 온난기 (Warm spell)와 한랭기 (Cold spell)이다. 온난야는 최저기온 (해뜨기 전에 출현)의 높은 극값으로, 온난일은 최고기온 (한낮에 출현)의 높은 극값으로 정의되며 한랭야는 최저기온의 낮은 극값으로 정의되고, 한랭일은 최고기온의 낮은 극값으로 정의된다. 그리고 각각의 일수는 1년 중 차지하는 비율로 표현되었다⁹⁾. 또한 온난기는 최고기온의 90 퍼센타일 이상 되는 날이 6일 이상 지속되는 날, 한랭기는 최저기온의 10 퍼센타일 이하 되는 날이 6일 이상 지속되는 날을 1년 단위로 모두 합산한 날 수로 정의된다.

극한 기온 지수의 변화경향을 살펴보기 위하여 1971~200년 기간에 대해 국립기상연구소에서 산출한 과거모의와, 미래 시나리오인 RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5에 따른 전망을 분석하였다. 과거모의와 미래전망 각각 극한 기후지수의 연중 출현 비율을 산출하였다. 또한 미래 전망 2071~2100년의 30년 기간 평균된 극한 기후지수의 연중 출현 비율 및 온난기와 한랭기의 연 평균장을 산출하였다.

8) 일반적으로 극한 (extreme)은 전체 경우를 값의 오름차순으로 정렬하여 그 중에서 1%, 5%, 10% (낮은 쪽) 혹은 90%, 95%, 99% (높은 쪽)를 초과하는 이례적인 경우로 정의된다. 기온의 극한 분석의 경우 높은 극값은 전체 기온 중에서 상위 10% (90 퍼센타일)에 해당하는 값이고, 낮은 극값은 전체 기온 중에서 하위 10% (10% 퍼센타일)에 해당하는 값으로 정의된다. 이러한 정의를 최저기온과, 최고기온에 대해 각각 적용하여 극값 지수를 개발한 것이 기후변화 탐지·모니터링·지수에 대한 전문가 팀 (Expert Team for Climate Change Detection Monitoring and Indices, ETCCDMI)에서 제안한 극한 지수이다 (Alexander et. al., 2006).

9) 모델의 1년의 날 수는 360일로 현실과 차이가 있다. 따라서 표준화하기 위해 각 일수가 연중 출현하는 비율의 형태로 표현한다. 예를 들어 온난야의 비율이 10%인 경우, 연중 10%에 해당하는 날 동안 온난야가 나타남을 뜻 한다.

온난야 (Warm Nights)는 그래프에서 나타나는 것과 같이 과거모의 기간 동안 변화가 없고 미래 모의 기간 동안 증가를 나타내었다 (그림 4.1). 온난야의 기준 기간이 1971년부터 2000년까지이므로 이 기간에 대해서는 평균 10% 정도의 비율을 나타내었다. 그 이후 21세기 초반까지는 미래 시나리오별로 대체로 유사한 증가추세를 보이나 21세기 중반 이후부터는 시나리오별로 증가율의 차이를 보였다. 저농도 이산화탄소 시나리오인 RCP2.6은 21세기 중반이후 증가 경향이 사라지는 특징을 보였고, RCP4.5는 21세기 초반에 가장 두드러지는 증가를 보였으나 21세기 중반 이후부터는 증가 경향이 급격히 둔화되어 나타났다. RCP6.0은 21세기 초반 가장 약한 증가경향을 보였으나 21세기 중반부터 급격히 증가하는 특징을 보였다. 고농도 이산화탄소 시나리오인 RCP8.5에서는 가장 급격한 온난야 비율 증가 경향을 보였다. 즉 RCP2.6에 따르면 미래 온난야는 현재의 10% 수준에서 25% 이내의 수준으로 증가하고, RCP4.5와 RCP6.0에서는 약 35% 정도까지 증가하는 것으로 나타났으며, RCP8.5에 따르면 연중 약 50%가 온난야를 경험하게 될 것으로 전망되었다 (그림 4.1의 그래프). 미래 2071년부터 2100년까지 평균된 전지구 분포를 살펴보면 (그림 4.1의 지도), 적도지역을 중심으로 온난야가 연중 80% 이상 차지하는 것으로 나타났으며, 북극권과 동아시아를 포함한 대륙의 북동지역의 온난야 비율은 평균보다 약간 낮아 지역적으로 차이를 보이는 것으로 나타났다. 연중 온난야가 차지하는 비율의 전 지구 육지 평균은, RCP2.6에 따르면 약 23.8%, RCP4.5에서는 약 38.5%, RCP6.0에서는 약 38.3%, RCP8.5에서는 약 46.9%로 전망되었다. 동아시아 지역 (100E~150E, 20N~50N) 평균한 연중 온난야 비율은 RCP2.6에 따르면 약 18.5%, RCP4.5에서는 약 25.1%, RCP6.0에서는 약 24.7%, RCP8.5에서는 연중 약 31.0%로 전망되었다.

온난일 (Warm days)은 온난야와 같이 과거모의 기간 동안은 거의 변화가 없고 미래 모의 기간 동안 증가를 나타내었다 (그림 4.2). 온난일 역시 21세기 초반까지는 미래 시나리오별로 큰 차이 없이 유사한 증가추세를 보이나 21세기 중반부터는 시나리오별로 차이를 보였다. RCP2.6은 21세기 중반부터 증가 경향이 거의 사라지고 약 20% 값을 유지하였다. RCP4.5는 21세기 초반에 가장 두드러지는 증가를 보였으나 21세기 중반 이후부터는 증가 경향이 급격히 둔화 되는 것으로 나타났다. RCP6.0은 21세기 초반 가장 약한 증가경향을 보였으나 21세기 중반부터 증가경향

이 급격해지는 특징을 보였다. RCP8.5는 21세기 초반부터 21세기 말까지 뚜렷한 증가추세가 꾸준히 지속되어 가장 큰 온난일 비율 증가 경향을 보였다. 즉 RCP2.6 시나리오에 따르면 온난일은 현재보다 약간 높은 15% 수준에서 21세기 말이 되면 약 20% 이상으로 증가하고, RCP4.5에서는 30% 초반까지 증가하며, RCP6.0에서는 35% 까지 증가할 것으로 전망되었다. 그리고 RCP8.5에서는 연 중 50%의 날들이 온난일이 될 만큼 큰 폭의 온난일 증가가 전망되었다 (그림 4.2의 그래프). 미래 2071년부터 2100년간을 평균한 전지구 분포를 살펴보면 (그림 4.2의 지도), 적도지역을 중심으로 온난일이 많음을 볼 수 있으며 온난야와 마찬가지로 북극권과 유라시아의 온난일 비율이 전지구 평균 보다 다소 낮은 것으로 전망되었다. 전 지구 육지 평균한 연중 온난일이 차지하는 비율은 RCP2.6에 따르면 약 21.4%, RCP4.5에서는 약 32.3%, RCP6.0에서는 약 32.9%, RCP8.5에서는 약 43.1% 정도로 전망되었으며, 동아시아 지역 (100~150E, 20~50N)에서는 RCP2.6에 따르면 약 18.2%, RCP4.5에서는 약 23.6%, RCP6.0에서는 약 24.3%, RCP8.5에서는 연중 약 30.8%로 전망되었다.

한랭야 (Cold Nights)는 1990년대 후반을 기점으로 미래 모의 기간 동안 감소경향을 나타내었다 (그림 4.3). 21세기 초반까지는 RCP4.5를 제외한 나머지 미래 시나리오들은 유사한 감소를 보이다 21세기 중반부터 시나리오별로 차이를 보였다. RCP2.6은 21세기 중반부터 감소 경향이 거의 사라졌고, RCP4.5는 21세기 초반에 가장 두드러지는 감소를 보였으나 21세기 중반 이후 감소 경향이 둔화 되었으며, RCP6.0은 꾸준한 감소경향을 보였으나 21세기 후반에 감소 경향이 줄어 RCP4.5와 유사한 비율을 보였다. RCP8.5는 미래 모의 기간 동안 가장 큰 감소를 보였다. 정리하면, RCP2.6에 따르면 한랭야는 약 9%에서 21세기 말 약 5% 이하로 감소하고, RCP4.5에서는 3% 미만까지 감소하며, RCP6.0에서는 RCP4.5와 유사하나 다소 더 감소하는 것으로 전망되었다. RCP8.5에서는 연 중 1% 미만의 한랭야가 출현할 것으로 전망되었다 (그림 4.3의 그래프). 2071년부터 2100년간을 평균한 전지구 분포를 살펴보면 (그림 4.3의 지도), 시베리아지역, 티베트지역, 캐나다 서북부지역, 그리고 남미 일부 지역에서 한랭야가 상대적으로 높은 비율을 나타내었다. 한랭야는 온난야 및 온난일과는 달리 적도지역에서 비율이 낮고 대륙 중앙지역에서 높은 비율을 보였다. 전 지구 육지 평균한 연중 한랭야가 차지하는 비율은 RCP2.6에 따르면

약 4.6%, RCP4.5에서는 약 2.3%, RCP6.0에서는 약 2.1%, RCP8.5에서는 약 0.8% 정도로 전망되었다. 동아시아 지역 (100E~150E, 20N~50N) 평균한 연중 한랭야가 차지하는 비율은 RCP2.6에 따르면 약 5.3%, RCP4.5에서는 약 3.3%, RCP6.0에서는 약 3.6%, RCP8.5에 따르면 연중 약 1.1%로 전망되었다.

한랭일 (Cold days)도 한랭야와 유사하게 1990년대부터 미래 기간 동안 감소를 나타내었다 (그림 4.4). 21세기 초반까지는 RCP4.5를 제외한 나머지 미래 시나리오는 유사한 감소추세를 보이다 21세기 중반부터 시나리오별로 차이를 보였다. RCP2.6은 21세기 중반부터 감소 경향이 거의 사라졌으며 RCP4.5는 21세기 초반에 가장 두드러지는 감소를 보였으나 21세기 중반 이후부터는 감소 경향이 둔화되었다. RCP6.0은 일정한 감소경향을 보이다 21세기 후반에 감소 경향이 줄어 RCP4.5와 유사한 비율을 보였다. RCP8.5는 미래 모의 기간 동안 뚜렷한 감소추세를 보여 한랭일 비율 감소가 가장 크게 나타났다. 즉 RCP2.6에 따르면 한랭일은 약 9%에서 21세기 말에 5% 이하로 감소하고, RCP4.5와 RCP6.0에서는 동일하게 3% 미만으로 감소하는 것으로 전망되었다. RCP8.5에서는 1% 정도만 한랭일이 출현하는 것으로 전망되었다 (그림 4.4의 그래프). 미래 2071년부터 2100년간을 평균한 전지구 분포를 살펴보면 (그림 4.4의 지도), 한랭야와 거의 유사하나 한랭일 비율의 감소가 큰 지역은 더 크게, 감소가 적은 지역은 더 작게 감소하여, 지역 간의 차이가 조금 더 크게 나타났다. 전 지구 육지 평균한 연중 한랭일이 차지하는 비율은 RCP2.6에 따르면 약 4.5%, RCP4.5에서는 약 2.3%, RCP6.0에서는 약 2.3%, RCP8.5에서는 약 0.9% 정도로 전망되었으며 동아시아 지역 (100E~150E, 20N~50N) 평균한 연중 한랭야가 차지하는 비율은 RCP2.6 시나리오에 따르면 약 5.0%, RCP4.5에서는 약 4.0%, RCP6.0에서는 약 4.2%, RCP8.5에 따르면 연중 약 1.7%로 전망되었다.

온난기 (Warm spell)는 앞서 살펴본 온난일 기준 이상이 되는 날이 6일 이상 지속되는 날을 1년간 합산한 날 수이다. 여기서는 기준기간이 되는 1971년부터 2000년 평균일 수와 2071년부터 2100년 평균일 수의 차이로 나타났다 (그림 4.5). 한랭기 (Cold spell)는 앞서 살펴본 한랭야 기준 이하가 되는 날이 6일 이상 지속되는 날을 1년간 합산한 날 수이다. 여기서는 기준기간이 되는 1971년부터 2000년 평균일 수와 2071년부터 2100년 평균일 수의 차이로 나타났다 (그림 4.6).

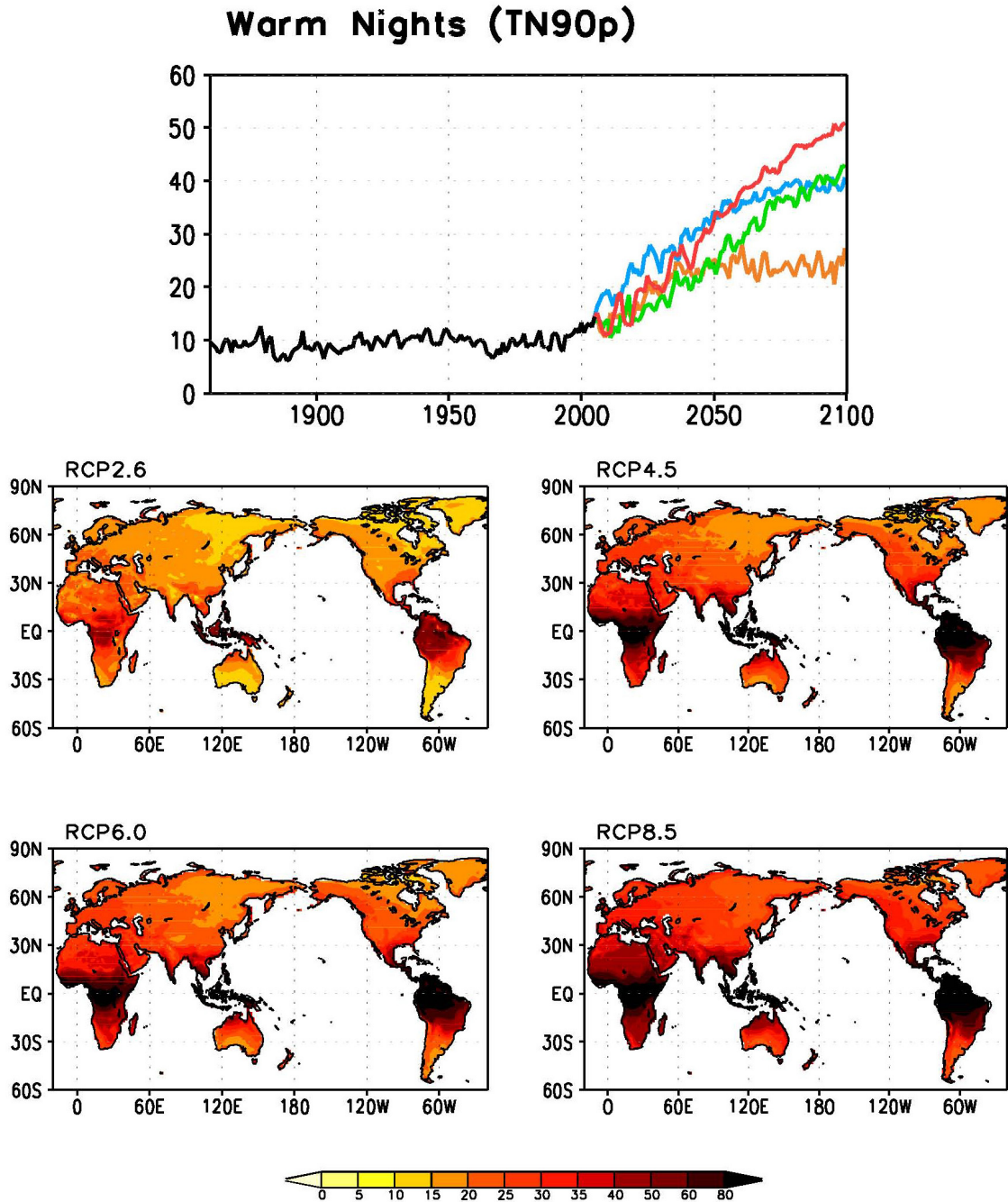


그림 4.1 온난야의 연중 비율의 변화 (그래프, 단위, %)와 RCP 4종의 2071~2100년 평균한 온난야의 연중 비율 (지도, 단위, %)

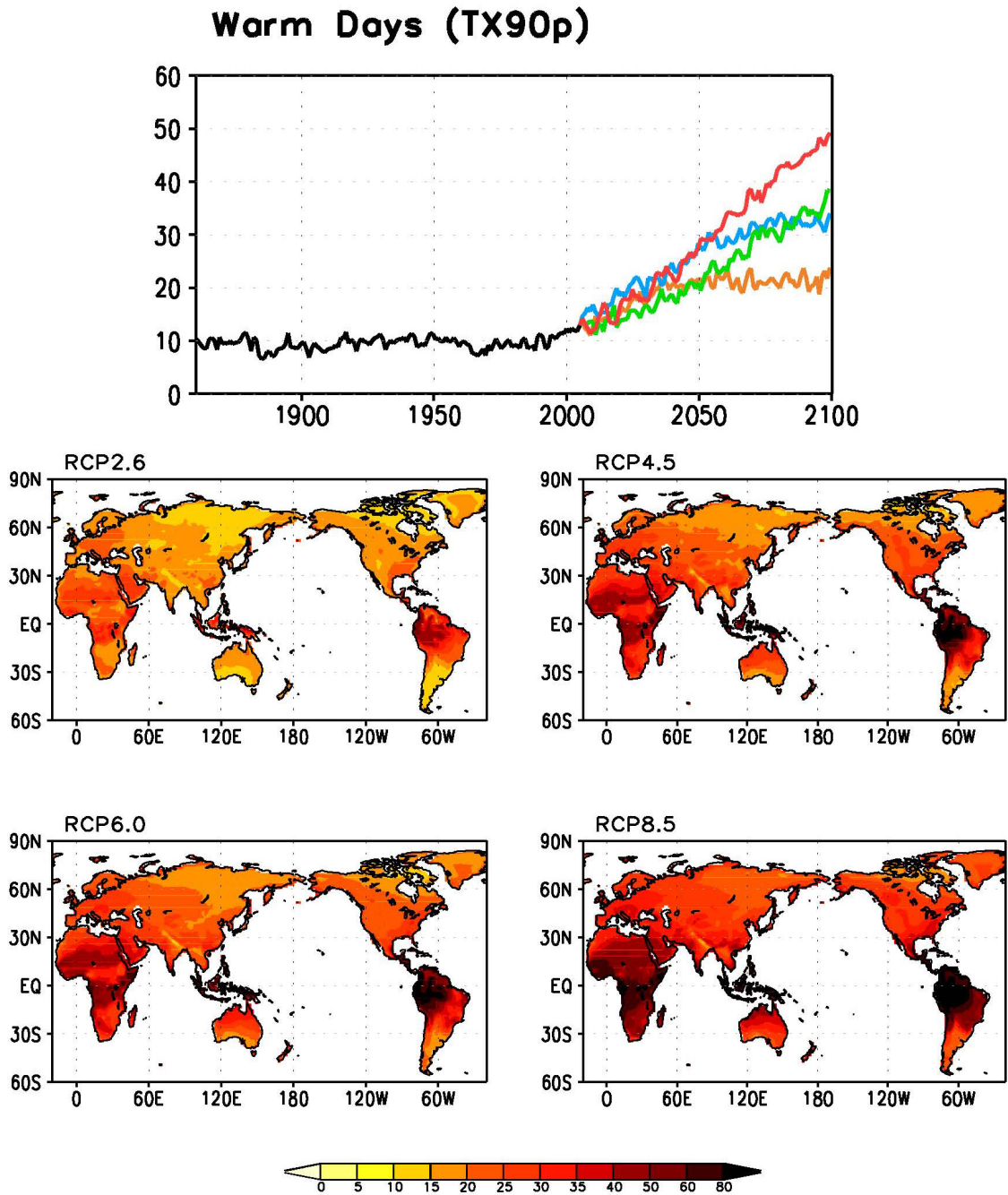


그림 4.2 온난일의 연중 비율의 변화 (그래프, 단위, %)와 RCP 4종의 2071~2100년 평균한 온난일의 연중 비율 (지도, 단위, %)

Cold Nights (TN10p)

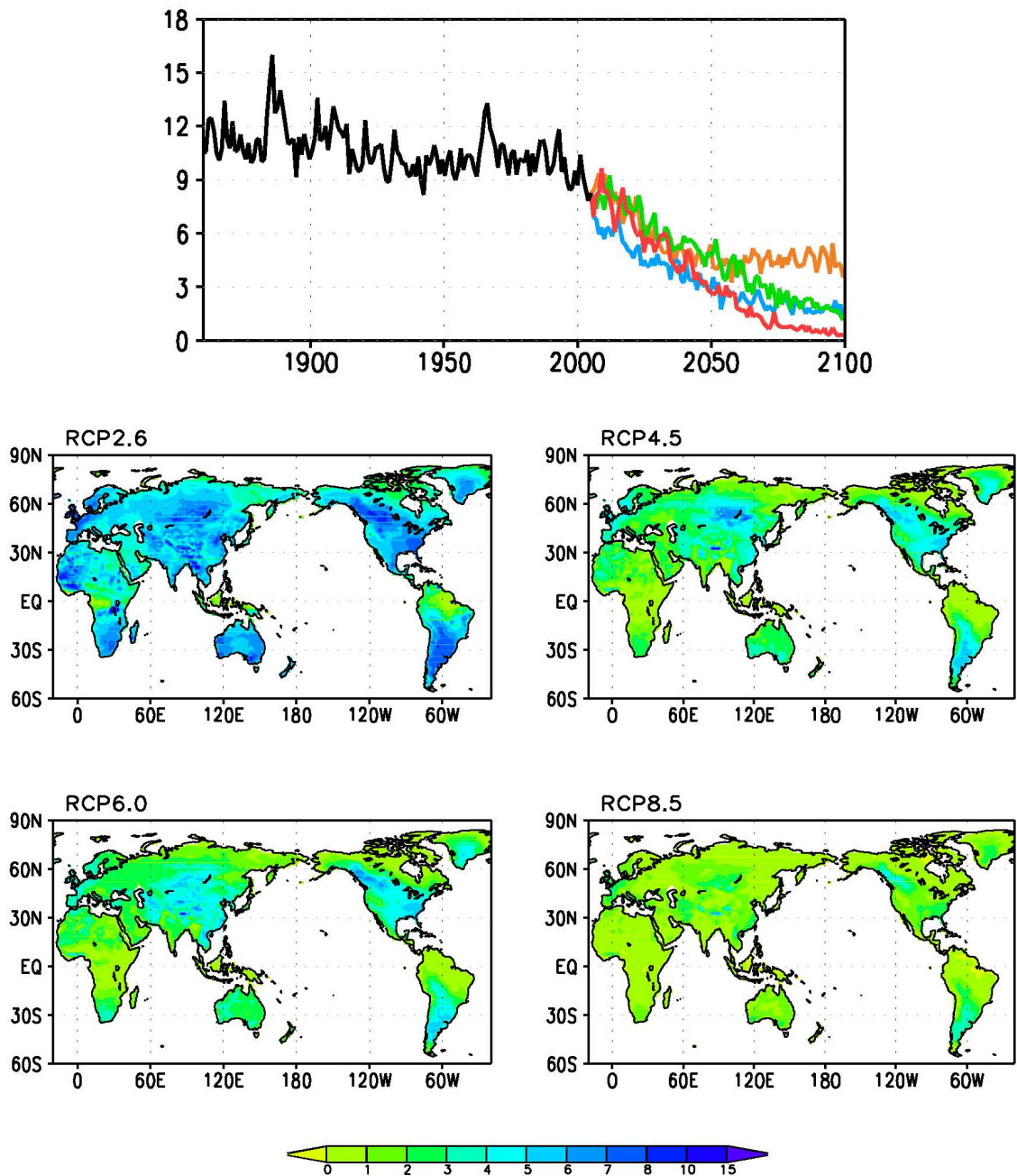


그림 4.3 한랭야의 연중 비율의 변화 (그래프, 단위, %)와 RCP 4종의 2071~2100년 평균한 한랭야의 연중 비율 (지도, 단위, %)

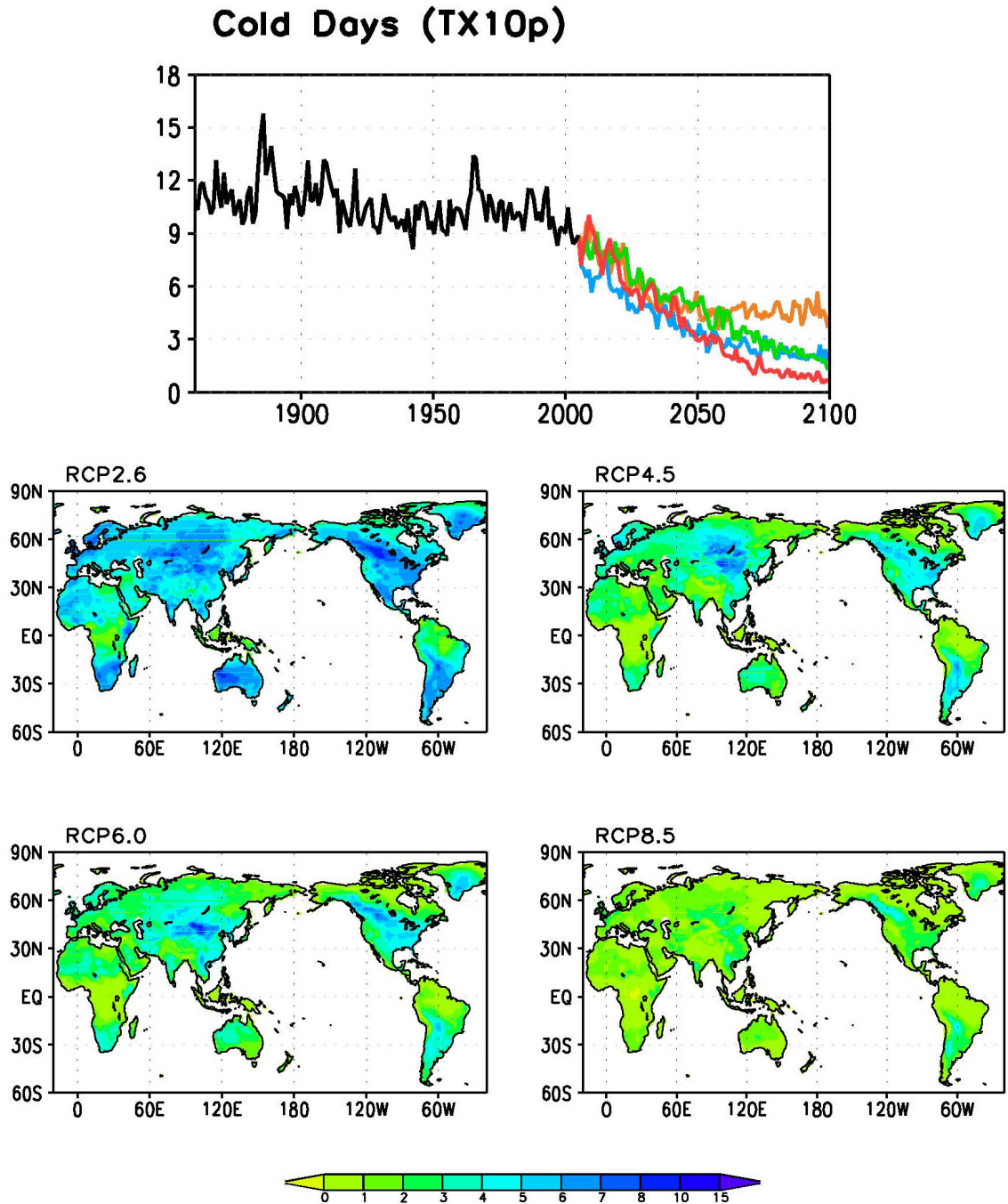


그림 4.4 한랭일의 연중 비율의 변화 (그래프, 단위, %)와 RCP 4종의 2071~2100년 평균한 한랭일의 연중 비율 (지도, 단위, %)

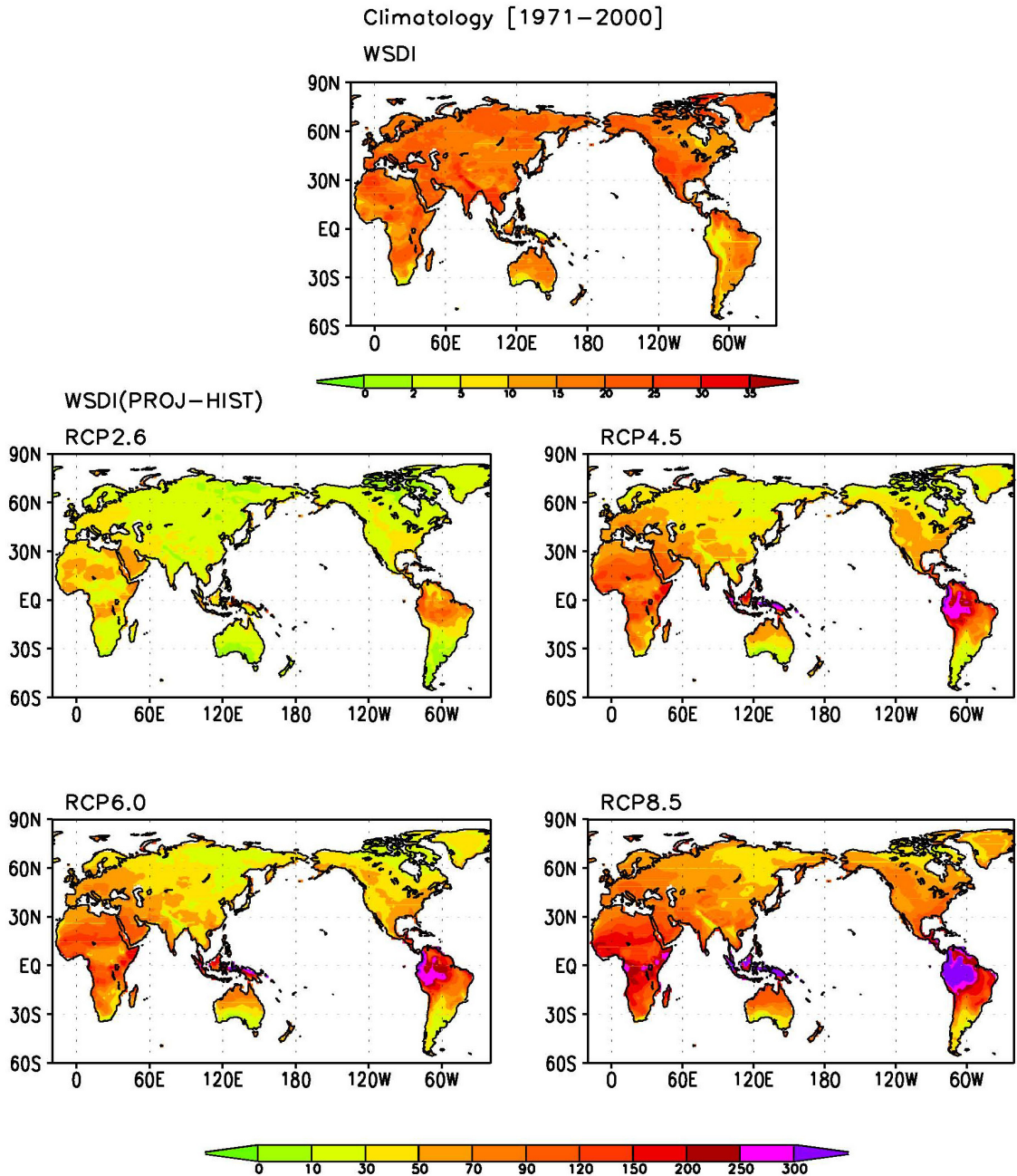


그림 4.5 과거모의 1971–2000년간 연 평균 온난기 (맨 위, 단위, days)와 RCP 4종의 1971~2000년 대비 2071~2100년의 온난기 변화 (단위, days)

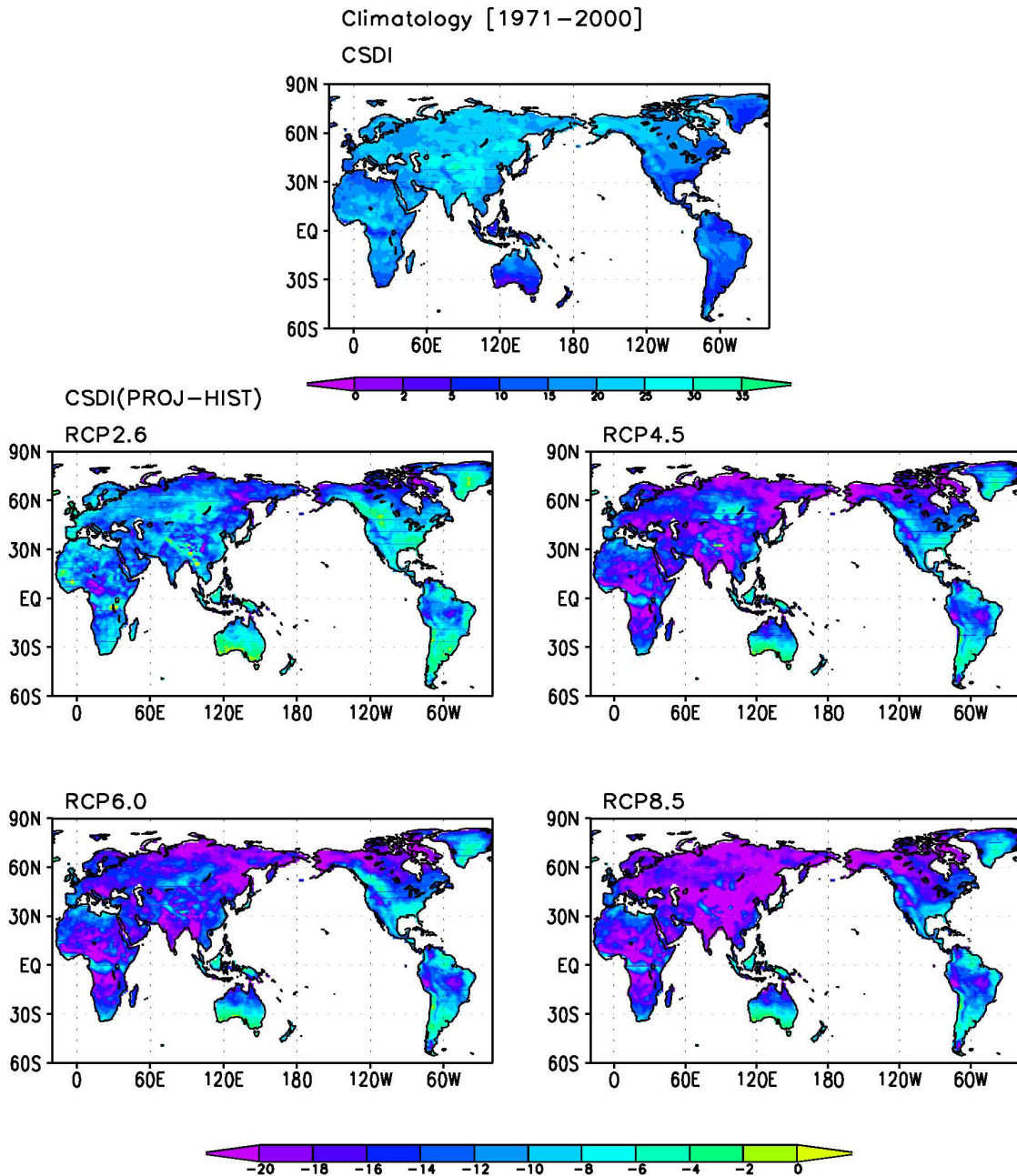


그림 4.6 과거모의 1971-2000년간 연 평균 한랭기 (맨 위, 단위, days)와 RCP 4종의 1971~2000년 대비 2071년~2100년의 한랭기 변화 (단위, days)

4.2 강수

HadGEM2-AO의 일 강수량을 이용하여 전지구 육상 강수의 극한기후 현상을 분석하였다. 강수강도지수를 이용하여 현재기후 (1971~2000년) 분포와 현재기후 대비 미래기후 (2071~2100년)의 변화를 전망하였다 (그림 4.7). 강수강도지수 (Simple Daily Intensity Index, SDII)는 일 강수량이 1 mm 이상인 연간 총 강수량을 연간 총 강수일수로 나눈 값으로 정의하였다. 현재기후 분포에서는 남서아프리카, 동남아시아, 남아메리카 지역 등에서 강수강도지수가 높게 나타났다. 전지구 강수강도지수의 미래 변화를 살펴보면, 현재보다 RCP2.5에서 약 4.4%, RCP4.5에서 약 6.9%, RCP6.0과 RCP8.5에서는 각각 약 7.3%, 10.0% 증가할 것으로 전망되었다. 강수강도의 증가는 북반구 대부분의 지역에서 나타난 반면에, 남아메리카의 북동부, 북아프리카, 호주지역 등에서는 강수강도가 감소할 것으로 전망되었다. 동아시아 (100E~150E, 20N~50N) 육지지역의 강수강도지수는 RCP4.5에서 약 11.3%, RCP8.5에서는 약 17.8%로 전지구의 변화율보다 클 것으로 전망되었다.

연속건조일수 (Consecutive Dry Days, CDD)는 연속으로 일 강수량이 1 mm 미만인 날의 최대지속일수이다. 이는 수자원 상태를 대표하는 가뭄지표로, 연속건조일수가 길수록 가뭄에 의한 피해에 쉽게 노출된다. 연속건조일수의 현재기후와 현재기후 대비 미래기후의 변화를 살펴보았다 (그림 4.8). 현재기후에서는 사하라, 아라비아, 고비 등의 사막지역과 남아프리카, 인도, 호주, 남아메리카 일부 등지에서 연속건조일수가 크게 나타났다. 연속건조일수는 현재보다 RCP2.6에서 약 0.4%, RCP4.5에서는 약 3.6%, RCP6.0에서 약 3.8%, RCP8.5에서는 약 6.8% 증가할 것으로 전망되었다. 남반구 대부분의 지역과 유럽, 북위 약 50도 이하의 북아메리카 지역 등에서는 연속건조일수가 뚜렷하게 증가하는 경향을 보였다. 그러나 북아시아 및 동아시아 지역과 북위 약 50도 이상의 북아메리카, 사하라 사막을 중심으로 하는 아프리카 내륙 지역 등에서는 연속건조일수가 줄어들 것으로 전망되었다. 동아시아의 육지지역의 연속건조일수는 미래시나리오 RCP4.5에서는 약 7.1% 그리고 RCP8.5에서 약 8.7% 감소하였다.

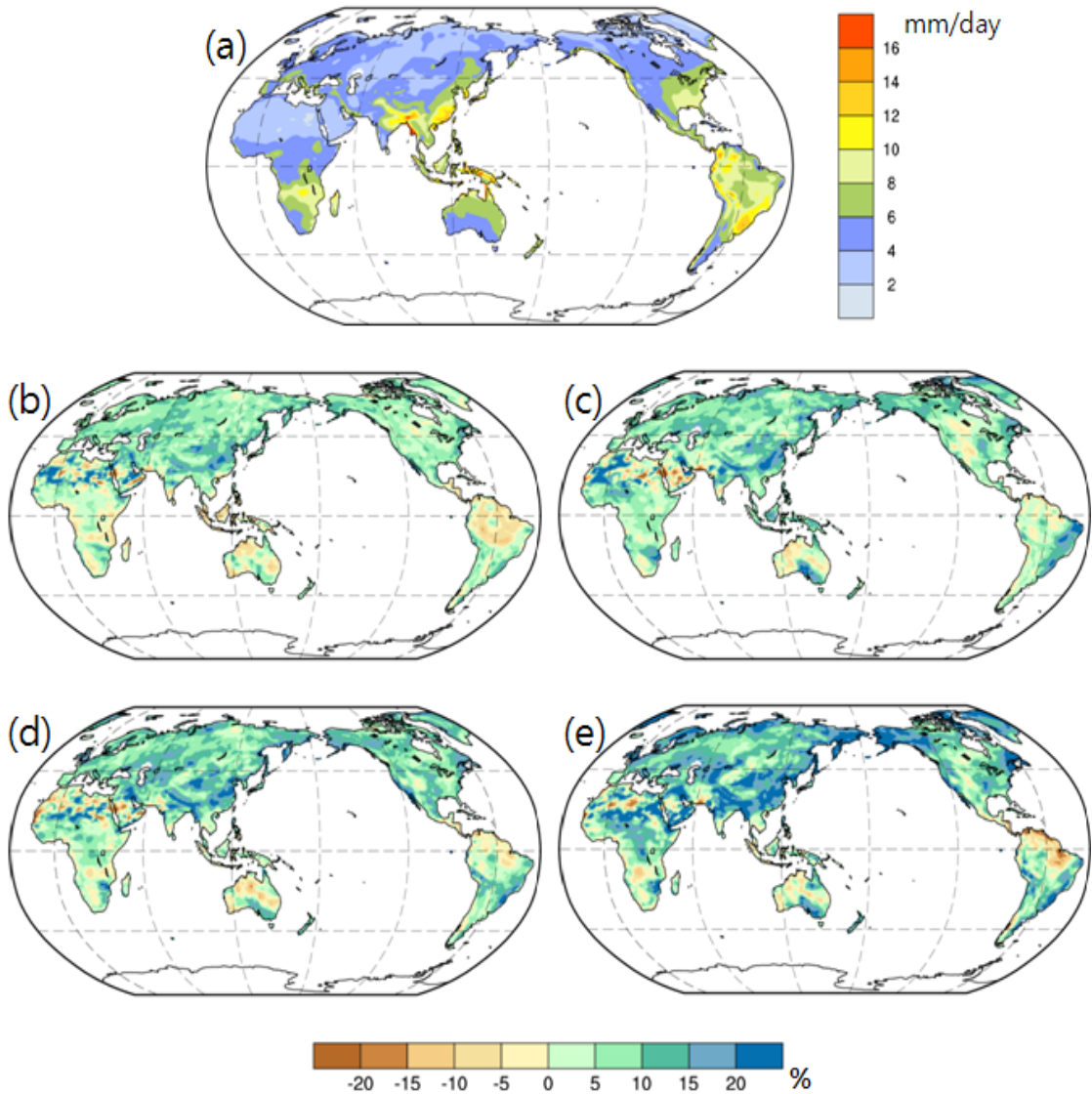


그림 4.7 HadGEM2-AO의 (a) 현재기후 (1971-2000년)에 대한 강수강도지수 (SDII)의 공간 분포 (단위, mm day^{-1})와, 미래시나리오 (b) RCP2.6, (c) RCP4.5, (d) RCP6.0, (e) RCP8.5에 근거한 현재기후 대비 미래기후(2071-2100년)의 강수강도지수의 변화 (단위, %).

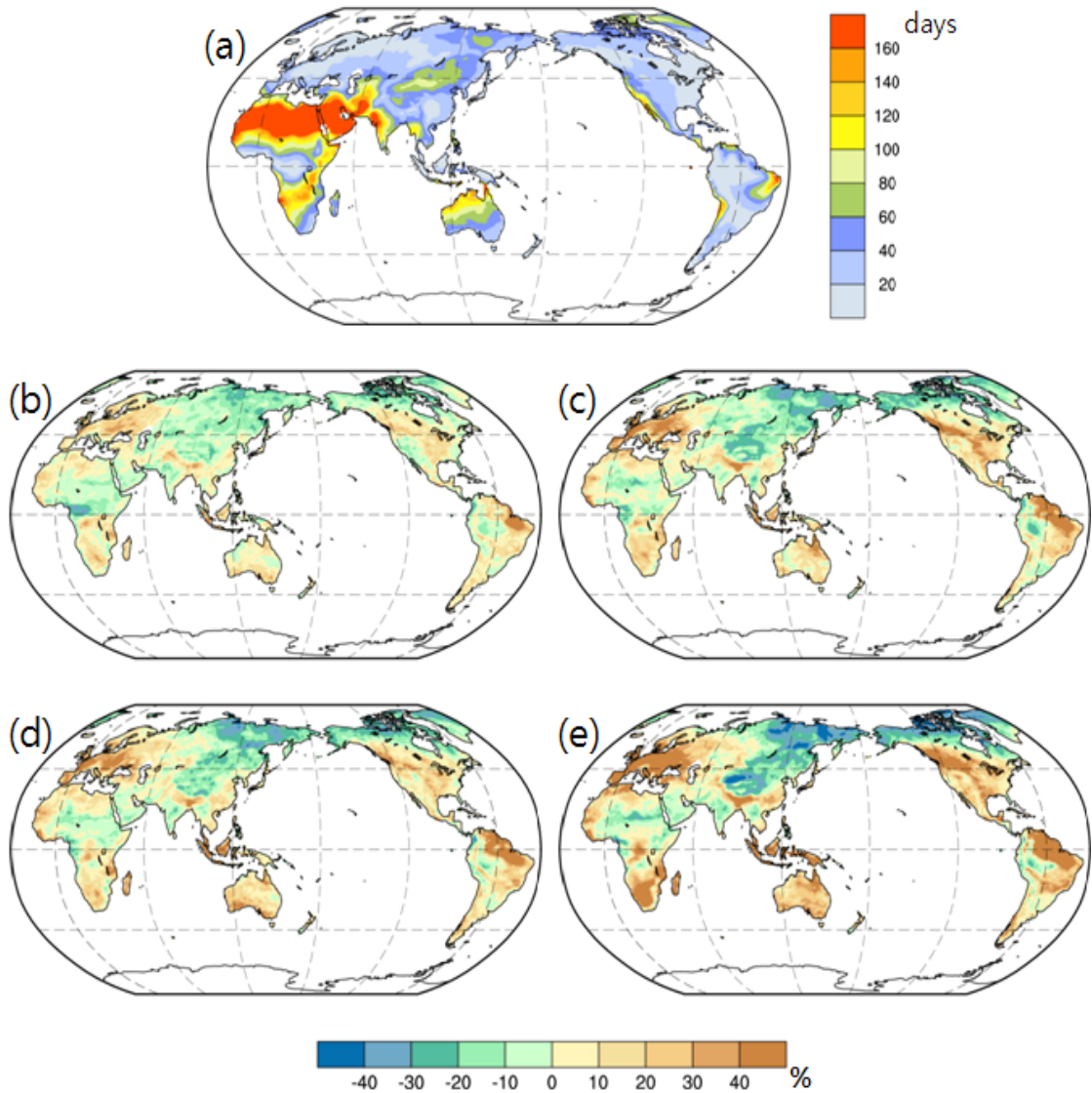


그림 4.8 HadGEM2-AO의 (a) 현재기후 (1971-2000년)에 대한 연속건조일수 (CDD)의 공간 분포 (단위, days)와, 미래시나리오 (b) RCP2.6, (c) RCP4.5, (d) RCP6.0, (e) RCP8.5에 근거한 현재기후 대비 미래기후 (2071-2100년)의 연속건조일수의 변화 (단위, %).

5일 최대 강수량 (Maximum consecutive 5-day precipitation)의 현재기후 (1971-2000년) 대비 미래기후 (2071-2100년)의 변화를 전망하였다 (그림 4.9). 현재 기후에서는 아프리카 남동부지역, 동남아시아지역, 호주 북부지역, 남아메리카 지역 등지에서 5일 최대 강수량이 크게 분포하고 있다. 5일 최대 강수량은 미래시나리오 RCP2.6에 의해서 전지구적으로 현재보다 약 8.8%, RCP4.5에서는 약 11.2%, RCP6.0에서는 약 11.3%, RCP8.5에 하에서는 약 18.08% 증가할 것으로 전망되었다. 동아시아 (100E~150E, 20N~50N) 지역에서는 RCP2.6에 따르면 20.3%, RCP4.5에서는 22.3%, RCP6.0은 21.6%, RCP8.5는 32% 로 전지구 평균보다 크게 증가할 것으로 나타났다. 지역적으로 살펴보면 대부분의 지역에서 상승하는 것으로 전망되었으며, 특히 RCP8.5 하에서는 아시아 대부분의 지역, 적도 아프리카 지역, 아메리카 고위도 지역에서 뚜렷하게 증가할 것으로 전망되었다. 반면에 아프리카는 북서부 지역과 호주 남서부지역 남아메리카 북동부 지역 등은 감소하는 경향을 보였다.

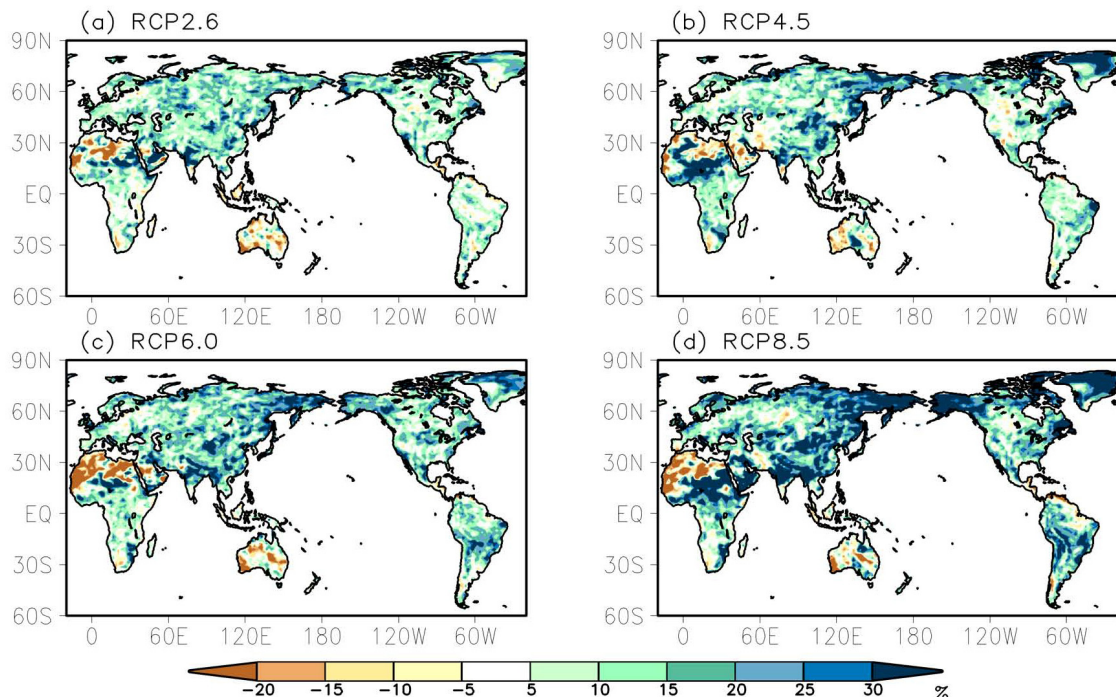


그림 4.9 HadGEM2-AO의 1971-2000년에 대비 미래시나리오 (a) RCP2.6, (b) RCP4.5, (c) RCP6.0, (d) RCP8.5에 따른 2071-2100년의 5일최대 강수량의 변화 (단위, %).

그림 4.10은 일 강수량을 이용하여 현재기후 (1971-2000년) 대비 미래기후 (2071-2100년)에서의 심한 습윤일 (Very wet days)의 변화를 나타내었다. 심한 습윤일은 현재기후에서의 95 퍼센타일 (상위 5%) 극한강수량을 기준으로 기준을 넘는 호우일의 연강수량 값이며, 미래에도 현재기후에서의 기준을 적용하여 현재기후 대비 미래시나리오에 따른 심한 습윤일의 변화를 전망하였다. 심한 습윤일은 RCP2.6에서는 전지구 평균 10.7%와 동아시아 지역에서 15.5%, RCP4.5에서는 전지구 17.4%와 동아시아 지역 18.3%, RCP6.0에서는 전지구 16.2%와 동아시아 지역 19.1%, 그리고 RCP8.5에서는 전지구 23.5%, 동아시아 지역 27.1% 증가할 것으로 전망되었다. 지역적으로는 북서 아프리카 지역, 이란고원을 제외한 북반구의 대부분 지역에선 심한 습윤일이 증가할 것으로 전망되며 고배출 시나리오일수록 극지역의 증가가 뚜렷하게 나타난다. 남반구에서는 남아프리카, 호주, 중남미 지역등 대부분의 지역에서 감소하는 경향을 보였다.

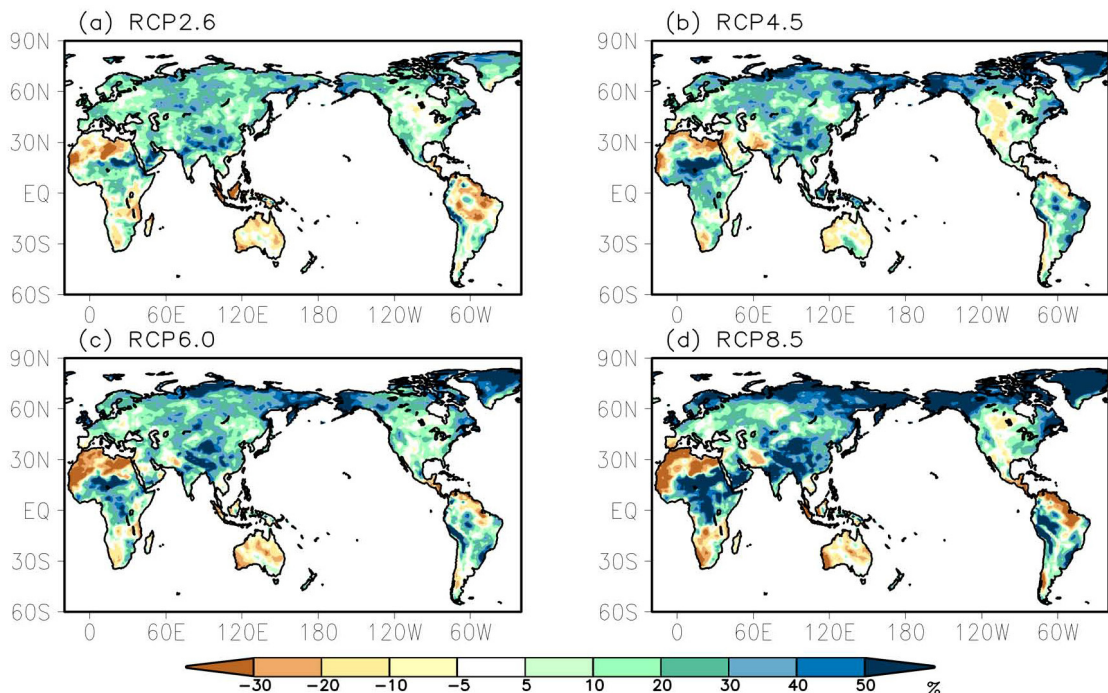


그림 4.10 HadGEM2-AO의 1971-2000년 대비 미래시나리오 (a) RCP2.6, (b) RCP4.5, (c) RCP6.0, (d) RCP8.5에 근거한 2071-2100년의 심한 습윤일의 변화 (단위, %).

4.3 물순환

본 절은 강수, 토양수분, 지표하(下) 유출량(지하수), 강 유출량 등을 이용하여 기후변화 시나리오(RCP 시나리오)에 따라 육지에서 미래 물순환이 어떻게 변할 것인지 분석하고자 한다.

그림 4.11은 HadGEM2-AO 기후모델을 이용하여 산출한 것으로, 현재기후(1971~2000년)에 대한 RCP 기후변화 시나리오 4종의 미래(2071~2100년) 강수 변화(%)를 나타낸 것이다. (a) 현재 강수량과 (c) 미래 21세기 말 강수량 변화의 전구 공간분포에서, 최대 다우지역인 남아메리카 아마존 유역, 열대 서태평양, 아프리카 남부 지역은 미래 대부분 강수량이 감소할 것으로 나타났으나, 북반구는 전반적으로 유럽과 미국 남부를 제외하고 증가하는 패턴이 나타났다. (b)는 육지에 대해 동서 평균된 강수량의 위도별 미래 변화를 보인 것으로, 약 30°N 부근의 북반구 아열대 지역에서 미래 가장 큰 강수량 증가를 보였다. 이는 (c) 공간분포에서 보듯이 아프리카 사헬지역, 아라비아 반도, 인도 지역 등에서 RCP 고배출 시나리오로 갈수록 강수량이 증가하기 때문인 것으로 분석되었다. 반면 남반구의 저위도, 중위도 육지에서는 강수량이 미래 감소할 것으로 전망됨에 따라, 미래에는 반구별 패턴이 뚜렷이 다른 양상을 보일 것으로 보인다.

그림 4.12와 4.13은 지표에서 지하 25 cm 및 지하 2 m까지 누적된 토양수분(kg m^{-2})의 분포를 각각 보인 것으로, 현재기후 (a)에 대한 RCP 시나리오별 21세기 말 미래 변화(%)의 동서 평균된 위도 분포 (b) 및 전구 공간분포 (c)를 각각 나타내고 있다. 토양의 깊이에 상관없이 누적된 수분량 전구 분포는 (a)에서처럼 북반구 고위도 지역과 강수량이 많은 지역에서 높게 나타났다. 두 그림 (b)의 위도별 분포를 비교했을 때, 지표에서 25 cm 까지 분포는 RCP 시나리오에 상관없이 대부분 지역에서 감소하는 경향을 보이고 있지만, 2 m 까지 분포에서는 저위도를 포함한 일부 위도대에서 오히려 토양 수분량이 현재기후에 비해 증가하고 있음을 볼 수 있다. 이는 (c) 공간 분포에서도 확인할 수 있다. 아마존 유역을 포함하는 남아메리카와 북아메리카 및 유라시아 대륙, 유럽지역 등에서 토양층이 깊어질수록 얇은 층에 비해 누적 토양 수분량이 현재기후보다 많이 포함하고 있음을 볼 수 있다. 토양 수분 분

석에서 있어서, 특징적인 현상은 북반구 중·고위도 (약 60°N 부근) 밴드 형태의 토양 수분 분포이다. 미래 수분 감소가 강하게 나타나는 이 현상은, 기온상승으로 인해 이 지역 식생 형태가 변화되면서, 증발산량이 상대적으로 높아졌기 때문인 것으로 추정된다. 향후 이 현상의 물리적인 연결고리에 대해 상세한 과학적 분석이 필요할 것으로 사료된다.

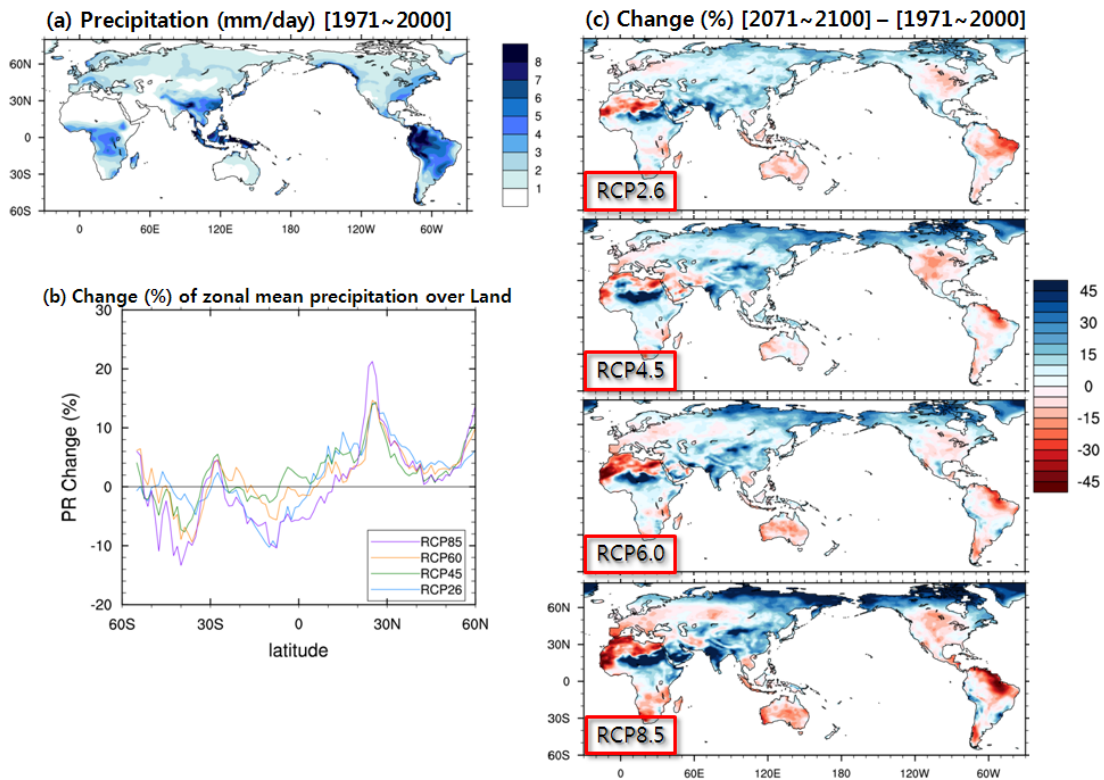


그림 4.11 HadGEM2-AO 기후모델에 따른 육지의 (a) 현재 (1971~2000년) 강수량 (mm day^{-1}) 공간분포와 기후변화 시나리오 (RCP2.6, 4.5, 6.0, 8.5)에 따른 미래 (2071~2100년) 강수량 변화 (%)의 (b) 동서 평균된 위도별 분포 및 (c) 전구 공간 분포를 각각 나타내냄.

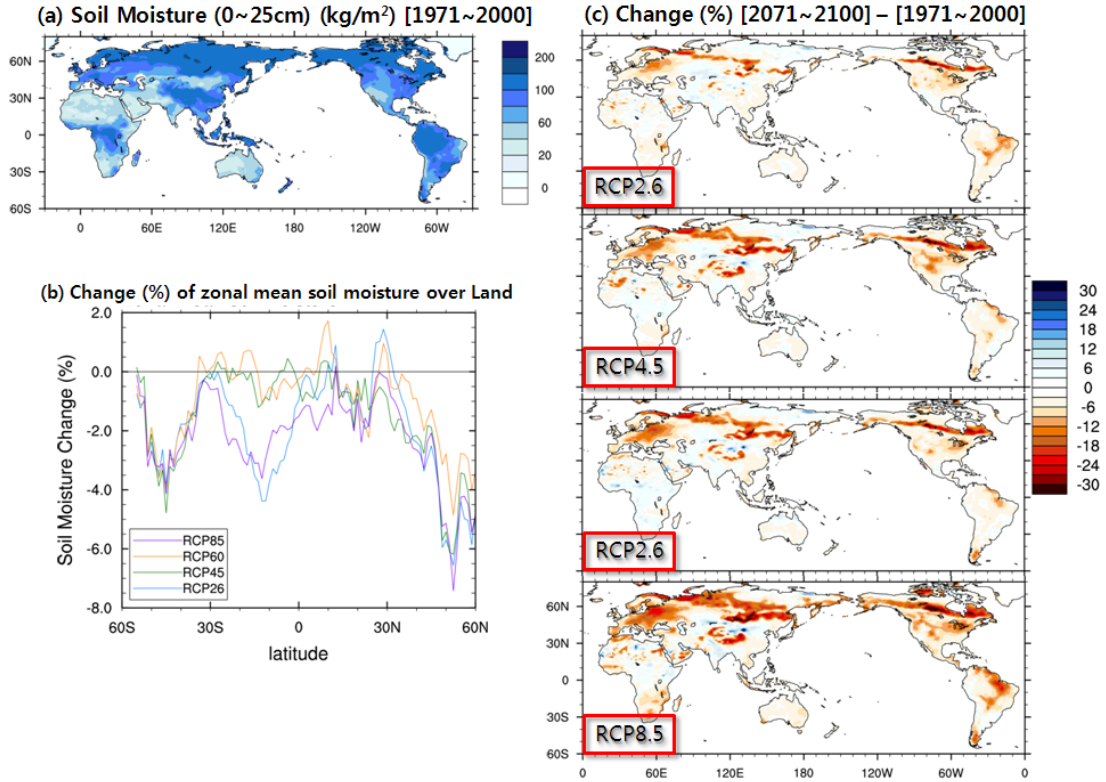


그림 4.12 HadGEM2-AO 기후모델에 따른 지표에서 지하 25 cm까지의 (a) 현재 (1971~2000년) 토양수분 (kg m^{-2}) 공간분포와 기후변화 시나리오 (RCP2.6, 4.5, 6.0, 8.5)에 따른 미래 (2071~2100년) 토양수분 변화 (%)의 (b) 동서 평균된 위도별 분포 및 (c) 전구 공간 분포를 각각 나타냄.

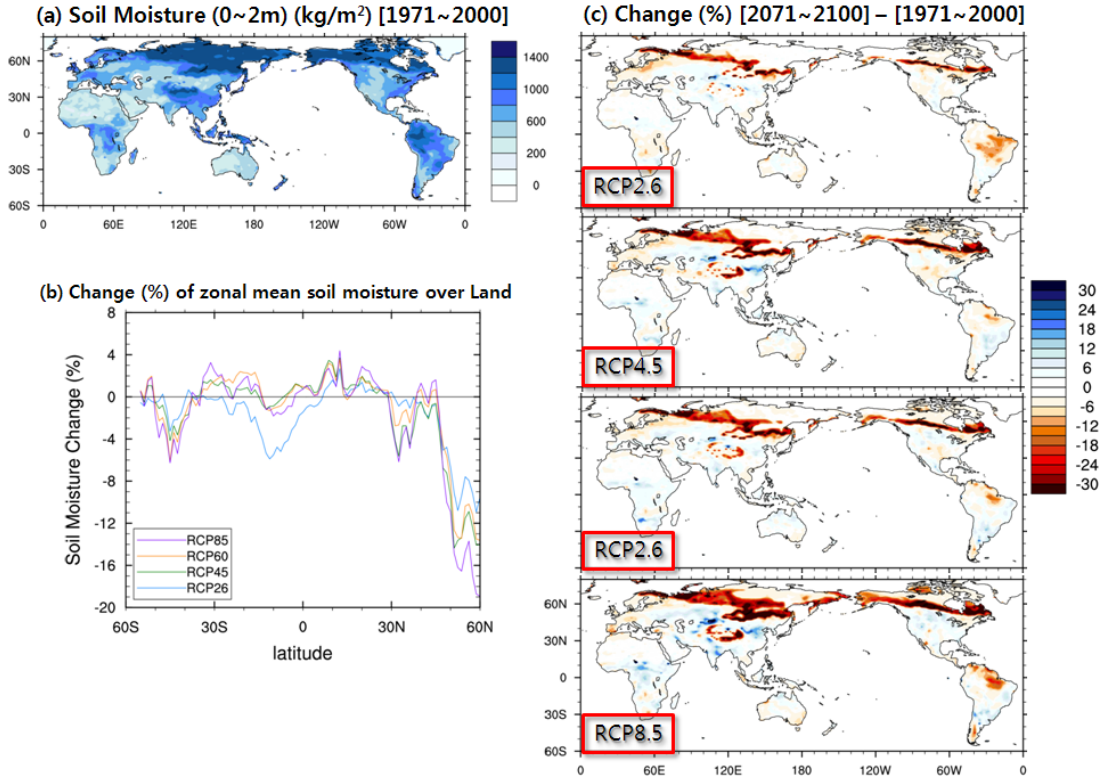


그림 4.13 HadGEM2-AO 기후모델에 따른 지표에서 지하 2 m까지의 (a) 현재 (1971~2000년) 토양수분 (kg m^{-2}) 공간분포와 기후변화 시나리오 (RCP2.6, 4.5, 6.0, 8.5)에 따른 미래 (2071~2100년) 토양수분 변화 (%)의 (b) 동서 평균된 위도별 분포 및 (c) 전구 공간 분포를 각각 나타냄.

한편, HadGEM2-AO 기후모델은 하천의 흐름을 추정하는 하천유출모듈 (TRIP; Total Runoff Integrated Pathways)이 장착되어 있고, 이에 따라 미래 전지구 주요 하천의 변화를 정량/정성적으로 유추할 수 있다. 그림 4.14는 (a) 주요 하천의 현재 30년 유출량 ($10^5 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$) 분포와 (b), (c)와 같이 RCP 시나리오에 따른 21세기 말 미래 변화 ($10^5 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$)를 동서 평균된 위도 분포와 전구 공간분포로 각각 보여주고 있다. (a)에서 현재 기후는 주요 유역인 아마존, 메콩, 레나, 앙쓰강 등에서 상대적으로 하천 유출량이 크게 나타나고 있다. 미래에는 (c)의 공간분포에서처럼 아마존 유역, 유럽, 남아프리카 및 호주 일부 지역을 제외하고 대부분 유역에서 미래 하천 유출량이 증가할 것으로 나타났고, RCP 고배출 시나리오일수록 또한 미래의 유출량이 증가할 것으로 전망되었다 (그림 4.14 (b)).

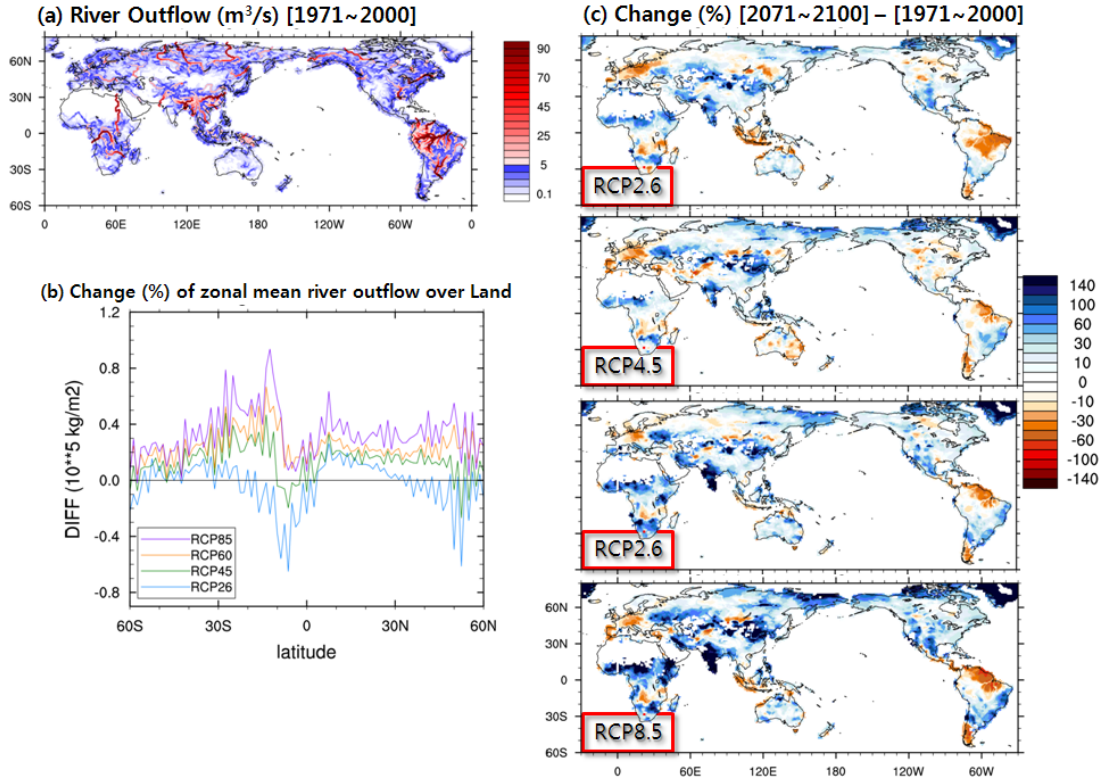


그림 4.14 HadGEM2-AO의 하천유출모델(TRIP)에 따른 주요 강 유역의 (a) 현재 (1971~2000년) 하천유출량 ($10^5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) 공간분포와 기후변화 시나리오 (RCP2.6, 4.5, 6.0, 8.5)에 따른 미래 (2071~2100년) 하천유출 변화 ($10^5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$)의 (b) 동서 평균된 위도별 분포 및 (c) 전구 공간 분포를 각각 나타냄.

본 연구에서는 지표에서의 하천 유출량 뿐 아니라 지하수 개념인 지표하(下) 유출량의 변화 대해 그림 4.15와 같이 분석하였다. 물순환 시스템에서, 육지로 내린 강수의 일부는 토양수분, 눈, 증발산 등으로 소모되고, 나머지는 육지에서 해양으로 유출량을 방류하면서 물균형을 맞추기 때문에, 이 유출량은 중요한 물순환의 한 요소라 할 수 있다. (a)는 기후모델에서 모의한 현재기후의 분포 (mm day^{-1})이며, (b)와 (c)는 각 RCP 시나리오 별 21세기 말 지표하 유출량 변화 (%)를 동서 평균된 위도 분포와 전구 공간분포로 각각 보여주고 있다. 현재 기후 분포에서는 (그림 4.15 (a)), 주로 육지에서 해양으로 담수를 방류하는 해안지역이나 하천 유역에 이 유출량은 크게 나타나고 있다. 미래에는 강수의 변화 분포와 유사하게 30°S 부근과

북반구 육지 대부분 지역에서 증가하는 경향을 보이고 (그림 4.15 (b)), 아마존 유역과 유럽지역에서 지표하 유출량이 감소할 것으로 나타났다 (그림 4.15 (c)).

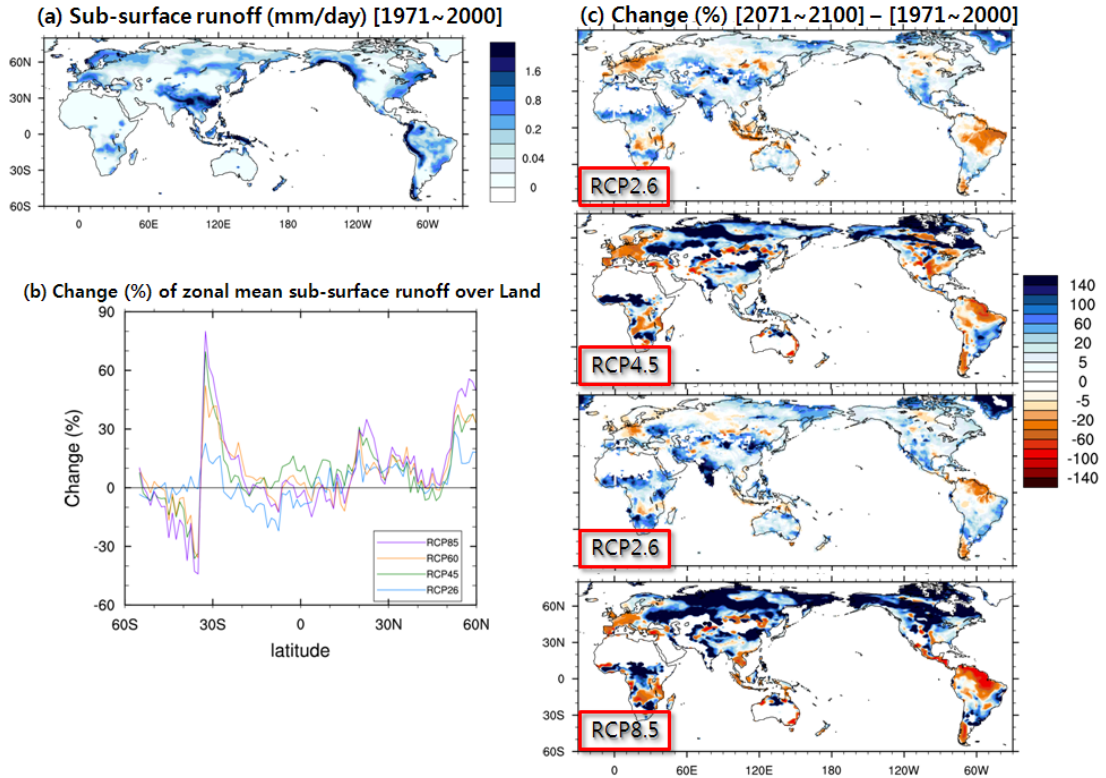


그림 4.15 HadGEM2-AO 기후모델 중 지면 모델에서 모의한 (a) 현재(1971~2000년) 지표하 (지하수) 유출량 (mm day^{-1}) 공간분포와 기후변화 시나리오 (RCP2.6, 4.5, 6.0, 8.5)에 따른 미래 (2071~2100년) 지표하 유출량 변화 (%)의 (b) 동서 평균된 위도별 분포 및 (c) 전구 공간 분포를 각각 나타냄.

4.4 해양

미래 기후변화 시나리오인 RCP 4종에 의한 해수면온도의 변화를 전망하였다. 현재기후 (1971-2000)와 비교해 보면, RCP 4종 모두 얼음이 덮힌 북극지역을 제외하면 북반구 고위도를 중심으로 해수면 온도의 상승이 뚜렷하다. 온실가스 농도가 증가하는 고배출 시나리오일수록 해수면 온도 상승폭이 증가하고 있으며, 각 시나리오별로 해수면온도의 공간 패턴의 차이는 거의 없다. 21세기 말 (2071-2100)에 전지구 평균한 해수면 온도는 온실가스 농도 시나리오에 따라 각각 0.9°C, 1.7°C, 1.8°C, 2.8°C 상승할 것으로 전망되었다. 적도지역은 서태평양보다 동태평양에서 상대적으로 수온 상승이 높게 나타나는 엘니뇨 유사 패턴으로 변화하였다 (그림 4.16).

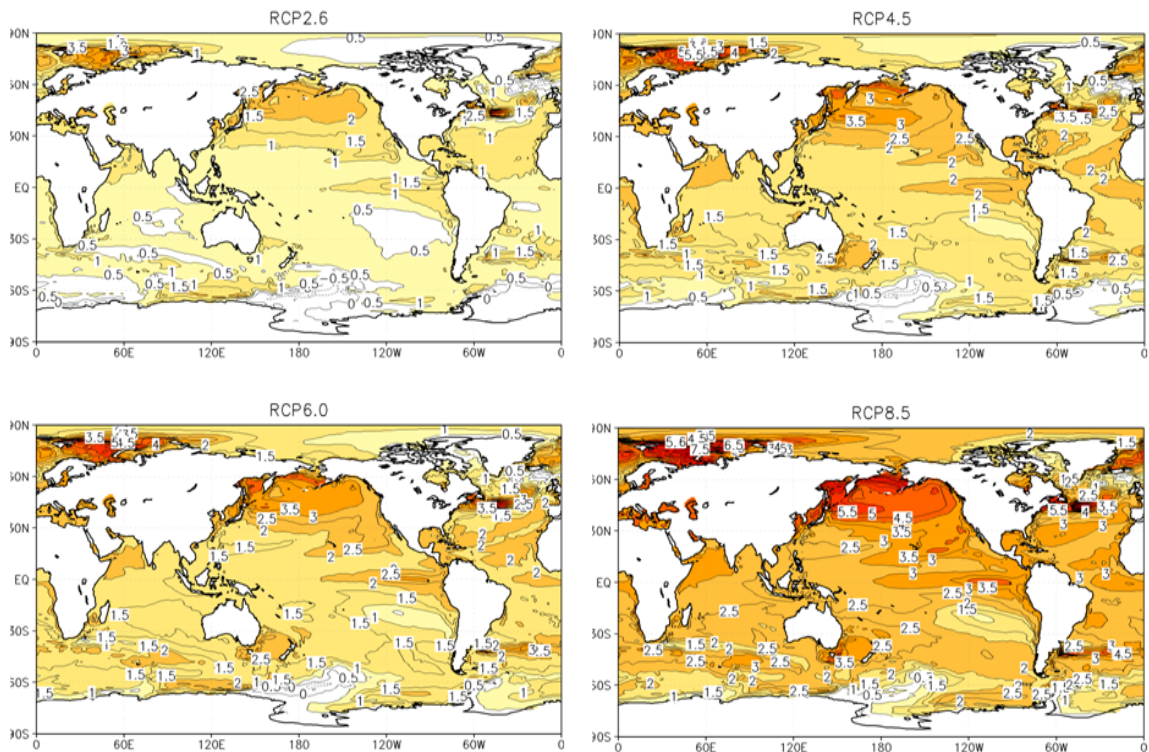


그림 4.16 해수면 온도의 미래 변화 [°C]. (a) RCP4.5와 (b) RCP8.5 시나리오 하에서의 변화로 현재 (1971~2000)를 기준으로 21세기 말 (2071~2099)의 변화를 의미함.

우리나라 주변해역 (120~135°E, 33~45°N)은 해수면 온도 상승이 상대적으로 큰 지역으로 분석되었다. 온실가스 배출 시나리오에 따라 각각 2.0°C, 3.0°C, 2.9°C, 4.5°C 상승하며, 전지구 평균보다 모두 1°C 이상 높게 상승할 것으로 전망되었다 (그림 4.17).

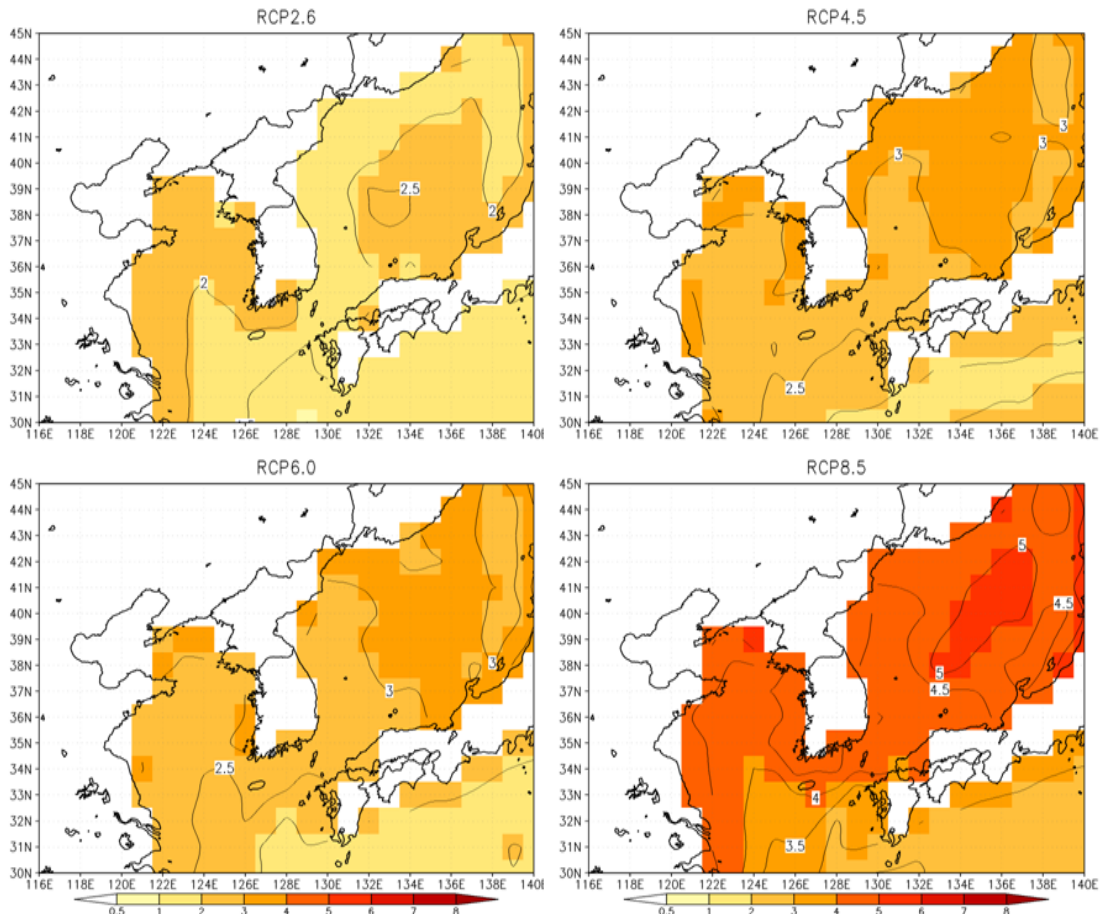


그림 4.17 한반도 주변 지역에서의 해수면 온도 미래 변화[°C]. 이 외에는 그림 4.16과 동일함.

다음으로 해수면 상승을 전망하였다. 최근의 연구에 의하면 1880년에서 2009년까지 전지구 평균 해수면은 꾸준히 증가하여 약 210 mm 상승하였다 (Church and White, 2011). 해수면의 변화는 그린란드, 남극대륙 등에서 얼음이 녹아 해양으로

물이 유입되거나 기후변화에 따른 수온 혹은 염분의 변화로 유발된다. 해양으로 유입되는 물의 양을 정확히 산정하기 위해서는 남극 및 그린랜드에 존재하는 빙상에 대한 이해가 선행되어야 하지만, 이에 대한 이해부족과 불확실성 때문에 기후모델에 빙판모델을 직접 결합하여 모의하기에는 어려운 점이 남아 있다. 따라서 대부분의 기후모델에서 수온이나 염분의 변화에 따른 해수밀도 변화에 기인한 해수면 변화 (steric effect)를 제시하고 있다.

본 보고서에서 HadGEM2-AO 모델이 모의한 수온과 염분자료를 이용하여 해수밀도를 산출하고 이로부터 미래 해수면 변화를 전망하였다. 1971~2000년 대비하여 21세기 말 (2071~2100)에 해수밀도 변화에 의해 온실가스 시나리오별로 각각 0.17 m, 0.22 m, 0.21 m, 0.27 m 상승할 것으로 전망되었다 (그림 4.18).

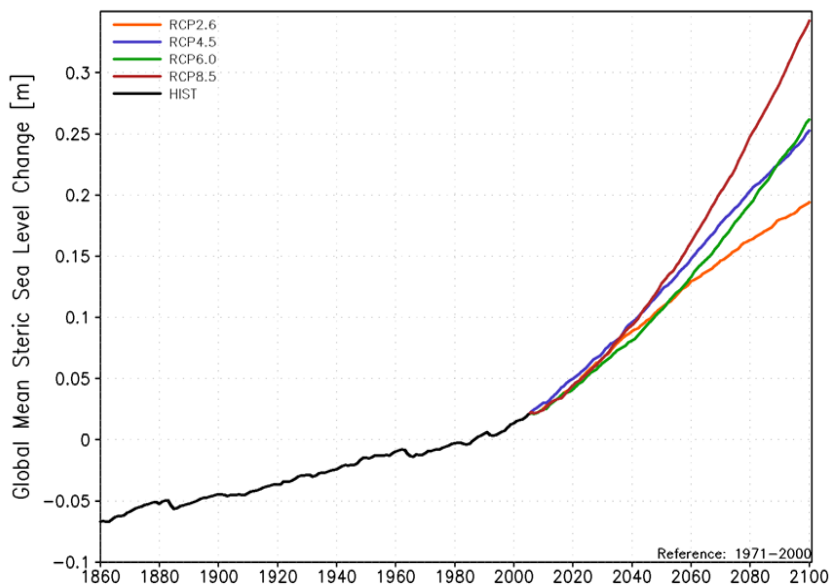


그림 4.18 전지구 평균 해수면의 시간변화. 각 실선은 과거기후 (검정), RCP2.6 (주황), RCP4.5 (파랑), RCP6.0 (초록), RCP8.5 (빨강) 시나리오이다.

21세기 동안 해양밀도 변화로 인한 전지구 평균에 대한 국지적 해수면 변화를 살펴보았다. 앞서 살펴본 바와 같이, 미래의 해수면 변화는 0.17 m~0.27 m로 시나리오별로 차이가 나지만 국지적 해수면 변화는 유사한 공간분포를 보인다 (그림

4.19). 모든 시나리오에서 남극대륙 주변에서는 평균 해수면 상승보다 낮고, 남대서양과 인도양, 남태평양에서는 연장된 띠 모양을 따라 해수면이 상승할 것으로 전망되었다. 이 띠를 따른 해수면의 상승은 지구온난화에 따른 남반구 편서풍의 남향 이동 및 강화와 연계되어 있다. 즉, 이 바람장의 변화가 해양의 남극환류를 남향시키면서 상대적으로 더운물이 남쪽으로 이동하게 되어 해수면의 상승을 유발하게 된다 (Suzuki et al., 2005).

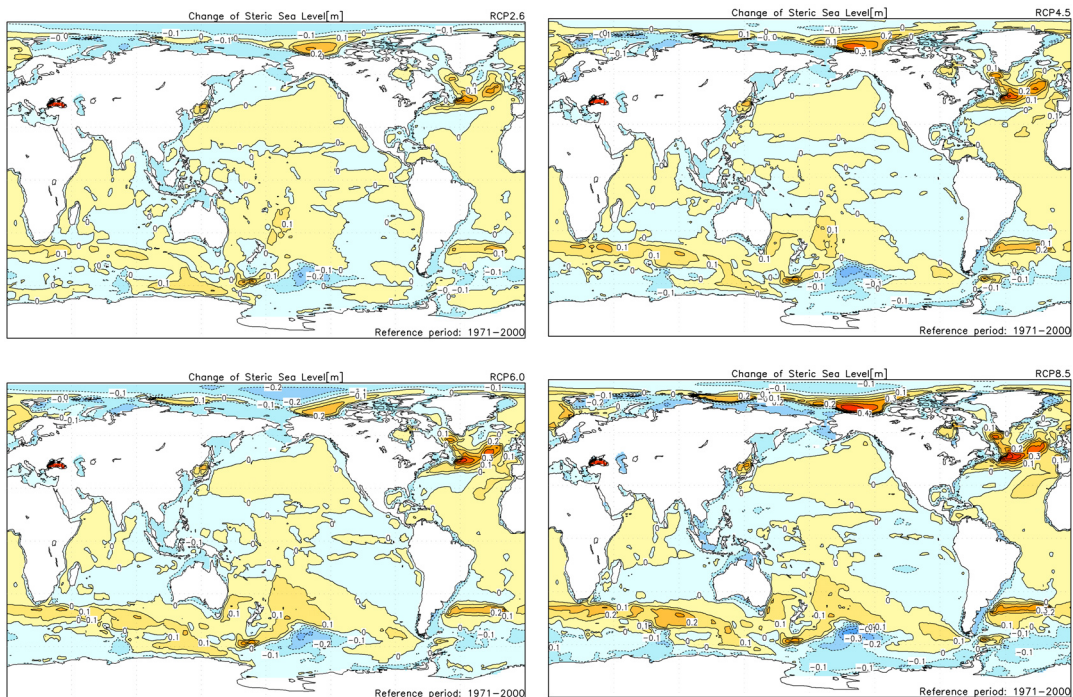


그림 4.19 21세기 동안 해양밀도 변화로 인한 전지구 평균 대비 국지적 해수면 변화 (m) (즉, 양의 값은 전지구 평균 변화보다 더 큰 국지 해수면 변화를 나타냄). 그림은 각각 (a) RCP2.6 (b) RCP4.5 (c) RCP6.0 과 (d) RCP8.5 시나리오에 대한 결과이다.

우리나라 주변해역에서는 수심이 낮은 서해보다 수심이 깊은 동해에서의 해수면 상승이 더 컸으며, 서해는 전지구 평균 해수면 상승보다 작을 것으로 전망되었다 (그림 4.20). 또한 동해, 남해, 서해의 연안에서 미래 해수면 변화는 고배출 시나리오 일수록 해수면 상승이 더 클 것으로 전망되었다 (그림 4.21).

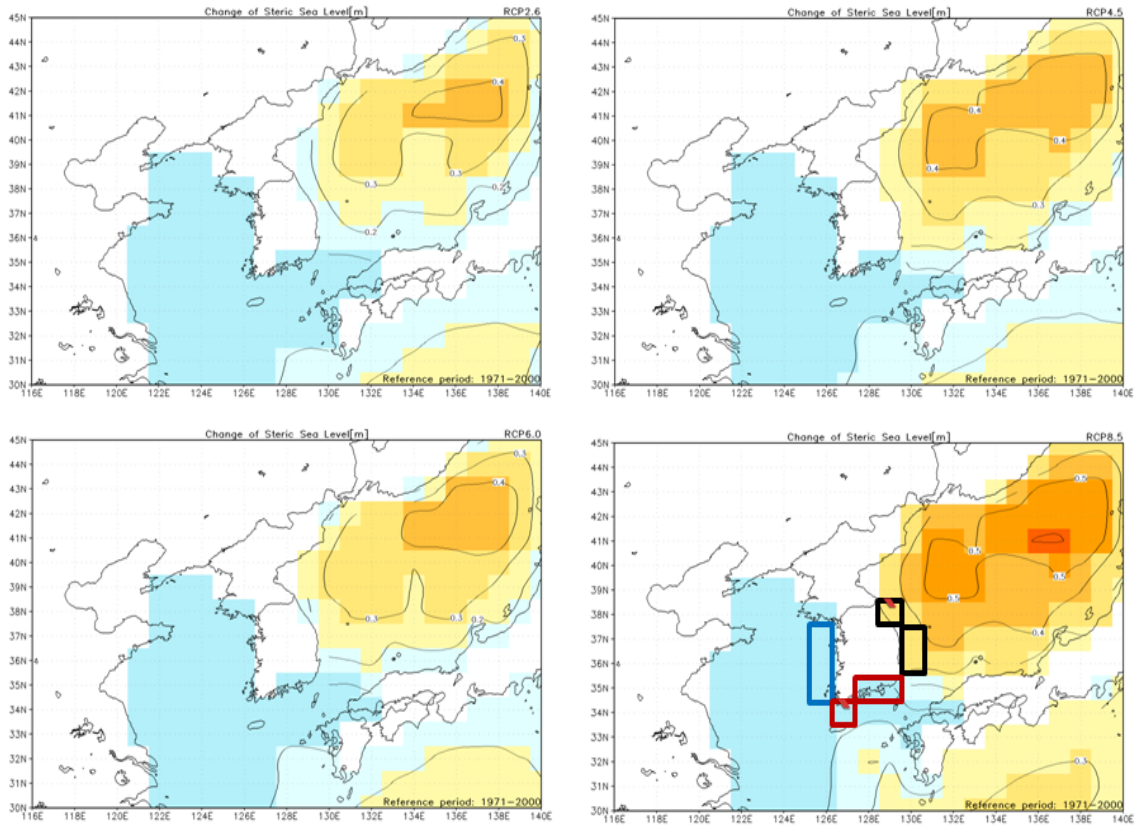


그림 4.20 우리나라 주변해역에서의 열팽창에 의한 해수면의 변화 (m). 1971~2000년 대비 2071~2100년의 변화이다. 그림내 사각상자는 우리나라 연안의 해수면변화를 산출하기 위해 정의한 동해, 서해, 남해이다. 그림내 사각상자는 우리나라 연안의 해수면변화를 산출하기 위해 정의한 동해, 서해, 남해이다.

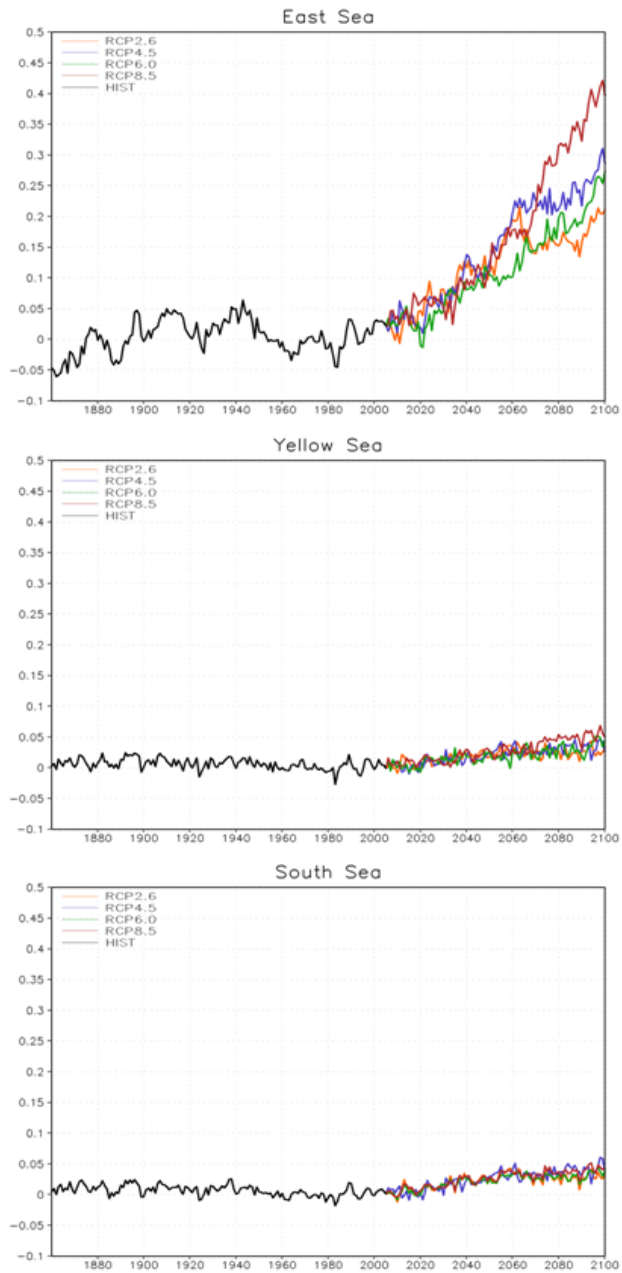


그림 4.21 우리나라 주변해역에서의 열팽창에 의한 해수면의 변화의 시간변화 (m). 1971~2000년 대비 2071~2100년의 변화이다. 그림은 각각 (a) 동해 (b) 서해 (c) 남해에 대한 결과이다.

4.5 해빙

해빙면적 (sea-ice extent)은 모델의 해빙농도 (sea-ice concentration)가 0.15 이상인 격자의 면적의 합으로 정의하고 미래전망을 산출하였다. 모델의 불확실성을 고려하기 위하여 HadGEM-AO의 200, 400, 500년 제어적분으로 산출한 시나리오의 앙상블 평균을 취하였다.

그림 4.22에 나타난 것과 같이 모델은 관측에 비해 대체로 연평균 해빙면적을 작게 모의하는 경향이 있음을 살펴볼 수 있으며, 북반구의 해빙면적의 모의가 관측에 보다 가깝게 나타나, 북반구의 해빙면적의 모의가 남반구의 모의에 비해 신뢰성이 높음을 알 수 있으며, 각 음영의 위아래 폭의 크기로 북반구보다는 남반구에서 해빙면적의 모의에 대한 모델의 불확실성이 큼을 알 수 있다. 북반구 관측의 해빙면적의 감소경향은 모델도 잘 모의하고 있으며 온실가스 증가에 따라 해빙의 감소경향도 크게 좌우됨을 확인할 수 있다. 한편 남반구 해빙면적은 온실가스의 증가에 따른 해빙의 감소 경향이 덜 민감하게 반응한다.

그림 4.23에는 계절별 해빙면적의 변화경향을 나타내었다. 북반구 겨울철에는 RCP8.5의 해빙면적의 감소가 두드러지게 나타나며, 북반구 여름철에는 해빙면적이 1백만 km^2 미만이 되는 얼음 없는 시대가 RCP8.5의 경우 2040년대, RCP4.5의 경우 2050년대, RCP6.0의 경우 2060년대에 나타날 것으로 전망되었다. 한편, 남반구의 경우 여름철 해빙면적의 변화는 완만하게 감소하는 것으로 전망되었으며, 남반구의 겨울철은 북반구의 겨울철과 마찬가지로 해빙면적의 감소가 두드러짐을 확인할 수 있다. 또한, 남반구 해빙면적의 불확실성은 여름철 해빙면적의 불확실성에서 기인함을 알 수 있다.

양 극에서의 해빙의 수평분포의 과거기후 및 RCP8.5 시나리오의 미래 전망은 그림 4.24에 나타내었다. 해빙의 미래전망에서는 북반구 여름의 경우, 해빙이 거의 완전히 유실되었음을 확인할 수 있으며, 겨울의 경우 캄차카 반도 부근의 해빙이 완전히 소실되고, 바렌츠해로부터 북극해로 해빙의 쇠퇴가 진행되고 있음을 볼 수 있다. 남반구 여름에는 해빙의 쇠퇴가 크게 나타나지만, 부분적으로 해빙은 분포하고 있음을 확인할 수 있으며, 겨울에는 인디안, 대서양, 태평양 해역 모두에서 해빙의 쇠퇴가 진행됨을 알 수 있다.

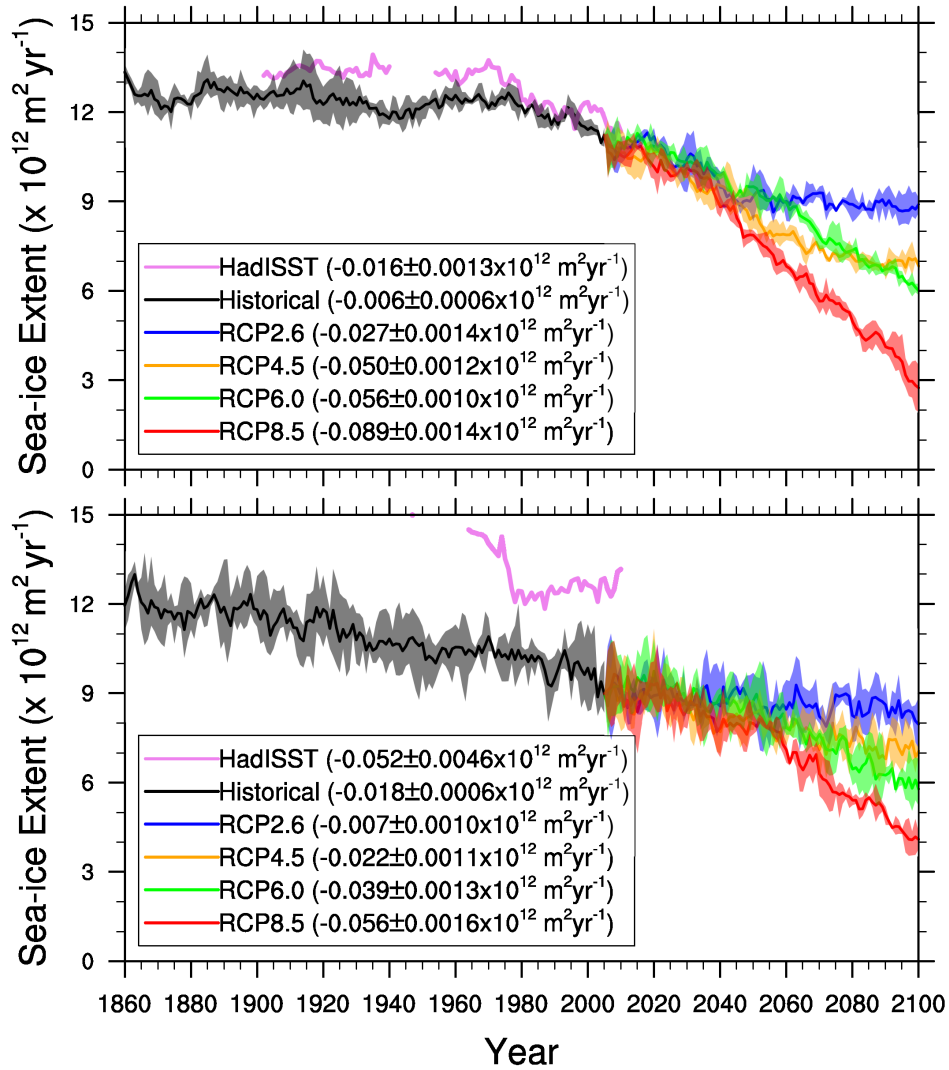


그림 4.22 앙상블 평균한 연평균 해빙면적의 시계열 (1860~2100). (상) 북반구 (하) 남반구의 해빙면적이며 관측 (보라), 과거기후 (검정), RCP2.6 (파랑), RCP4.5 (주황), RCP6.0 (초록), RCP8.5 (빨강)이다. 각 색깔별 음영은 모델 앙상블의 모의 범위를 나타내며, 범례의 괄호안의 숫자는 변화정도와 그 오차를 각각 나타낸다.

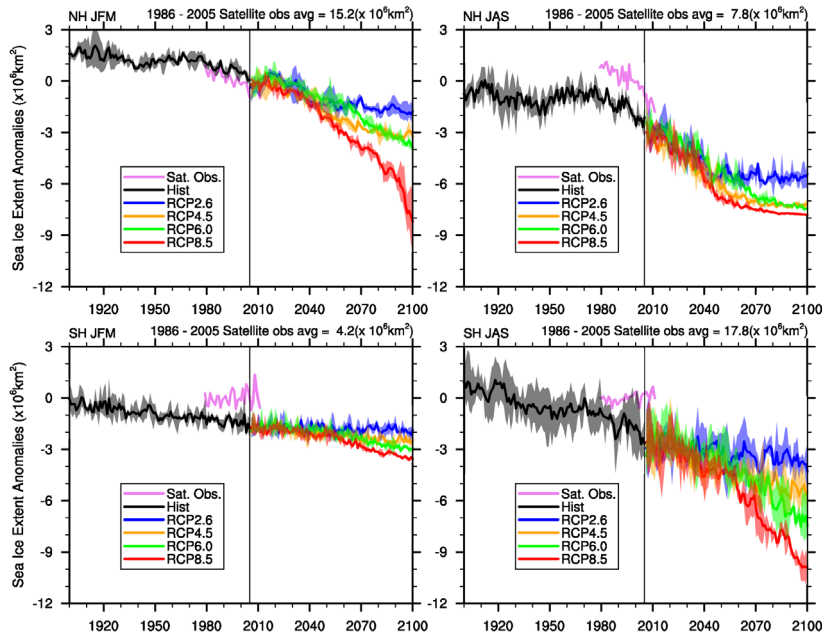


그림 4.23 이상불 평균한 해빙면적의 계절별 시계열 (1900~2100). (좌상) 북반구 겨울 (우상) 북반구 여름, (좌하) 남반구 여름, (우하) 남반구 겨울의 해빙면적이며 그림 4.22과 같은 형식이다.

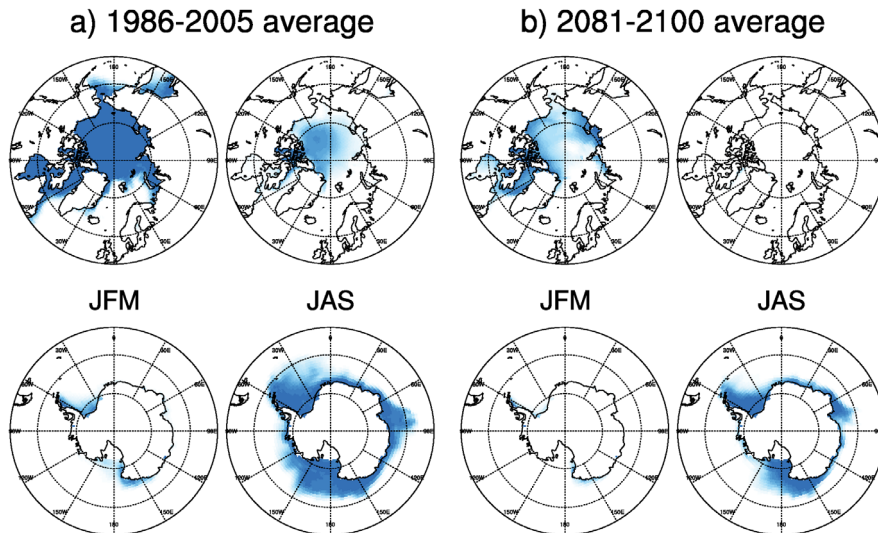


그림 4.24 20년 평균 (a) 현재 (1986~2005)와 (b) 미래 (2081~2100) 해빙 농도의 수평분포. 음영은 해빙 농도 0.1 이상이며, 미래 해빙 전망은 RCP8.5의 결과이다.

4.6 기후구분

쾨펜의 기후구분의 정의를 이용하여 과거기후 (1971-2000년), 현재기후 (1979-2005년), 및 미래기후 (2071-2100년) 에서의 기후구분을 분석하였다. 쾨펜의 기후구분은 식생분포에 따라 기후를 구분하였으며, 기온과 강수량을 기본으로 하여 기호로 유형화하였다. A는 저위도기후로 습윤한 열대기후에 해당되며 이 기후의 경계는 최한월평균기온 18°C 선이다. B는 건조기후로 기온과 강수량의 수분효율을 고려하여 구분하였다. C와 D는 중위도 기후로 최한월평균기온 -3°C 를 기준으로 구분된다. E는 고위도 기후이며 나무의 생육한계선인 최난월 평균기온 10°C 가 기준이다 (표 4.1) (이승호, 2007).

표 4.1 쾨펜의 기후구분

A 열대	Tropical ($T_{\min} \geq +18^{\circ}\text{C}$)	Af	Rainforest
		Am	Monsoon
		Aw	Savannah
B 건조	Arid	BS	Steppe
		BW	Desert
C 온대	Warm ($-3^{\circ}\text{C} < T_{\min} < +18^{\circ}\text{C}$)	Cw	Dry winter
		Cs	Dry summer
		Cf	without dry season
D 냉대	Cold ($T_{\min} \leq -3^{\circ}\text{C}$)	Dw	Dry winter
		Ds	Dry summer
		Df	without dry season
E 한대	Polar ($T_{\max} < +10^{\circ}\text{C}$)	ET	Tundra
		EF	Frost

HadGEM2-AO의 지상기온 및 강수량을 이용한 쾨펜기후구분 결과를 관측과 비교하였다 (그림 4.25). 관측자료는 1979년부터 2005년까지의 CRU TS3.1 기온자료와

CMAP 강수 자료를 사용하였다. 기후변화 시나리오 자료를 이용하여 1979-2005년 동안 기후구분을 분석한 결과, 관측자료를 통해 계산된 결과와 전반적으로 유사한 기후구 분포를 보였다. 그러나 지역별로 살펴보면 타림분지, 호주, 북미지역의 건조계열기후 (BS, BW), 인도 지역의 열대사바나기후 (Aw)와 시베리아 지역의 냉대습윤기후 (Df)를 잘 모의하지 못하였다. 그림 4.26은 HadGEM2-AO와 관측자료에 의한 5개 대 기후구의 면적비를 나타냈다. 관측에 비해 극기후 (E), 온대기후 (C), 냉대기후 (D)는 과소모의 하였으며, 건조기후 (B)와 열대기후 (A)는 과다모의 하였다.

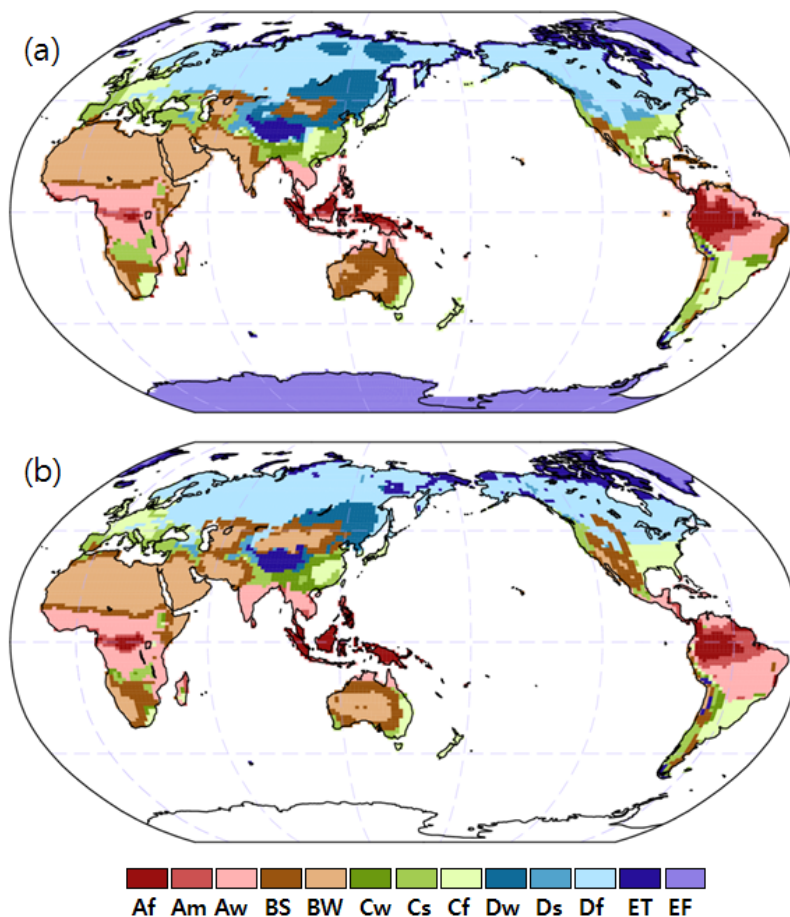


그림 4.25 현재기후 (1979-2005년)에 대한 (a) HadGEM2-AO 모델과 (b) 관측자료 (CRU TS3.1와 CMAP)의 쾨펜 기후 구분.



그림 4.26 쾨펜의 기후구분에 따른 5대 기후구의 면적비(단위, %). 여기서 푸른색 막대그래프는 HadGEM2-AO 모델을, 붉은색 막대그래프는 관측의 결과를 나타낸다. E는 극기후, B는 건조기후, A는 열대기후, C는 온대기후, 그리고 D는 냉대기후를 의미한다.

과거기후 (1971-2000년) 및 미래시나리오에 따른 미래기후의 (2071-2100년) 기후구분을 살펴보았다. 고농도 시나리오인 RCP8.5에서 기후구 변화가 가장 두드러지게 나타났다. 현재기후에 비해 미래에 유럽 지역은 냉대습윤기후 (Df)가 줄어들고 온대기후의 지중해성기후 (Cs)가 증가하며, 호주에서는 온대계열기후 (Cf, Cs)와 스텝기후 (BS)가 줄어들고 사막기후 (BW)가 증가할 것으로 전망되었다. 북미지역에서는 냉대습윤기후 (Df)가 줄고 고지지중해성기후 (Ds), 지중해성기후 (Cs), 스텝기후 (BS)가 증가할 것으로 나타났다. 아프리카 남부지역에서는 건조계열기후 (BS, BW)가 증가하였으며, 남위 20도 부근의 남미지역은 열대계열기후 (Af, Am, Aw)의 증가가 두드러질 것으로 전망하였다. 아시아지역에서는 티벳고원이 툰드라기후 (ET)에서 미래엔 냉대동계소우기후 (Ds)로 전환되었으며, 타림분지 주변의 건조계열기후 (BS, BW)이 확대될 것으로 나타났다.

과거기후 (1971-2000년) 대비 미래시나리오에 의한 미래 (2071-2100년) 기후구 면적비변화를 살펴보면, 전반적으로 극기후 (E)와 냉대기후 (D)의 면적비가 감소하

고 건조기후 (B), 열대기후 (A), 온대기후 (C)의 면적비가 증가할 것으로 전망되었다. 고농도 시나리오 일수록 면적비의 증감이 크게 나타나며, 특히 병설기후 (EF), 지중해성기후 (Cs)와 스텝기후 (BS)에서 두드러지게 변화하였다 (그림 4.27).

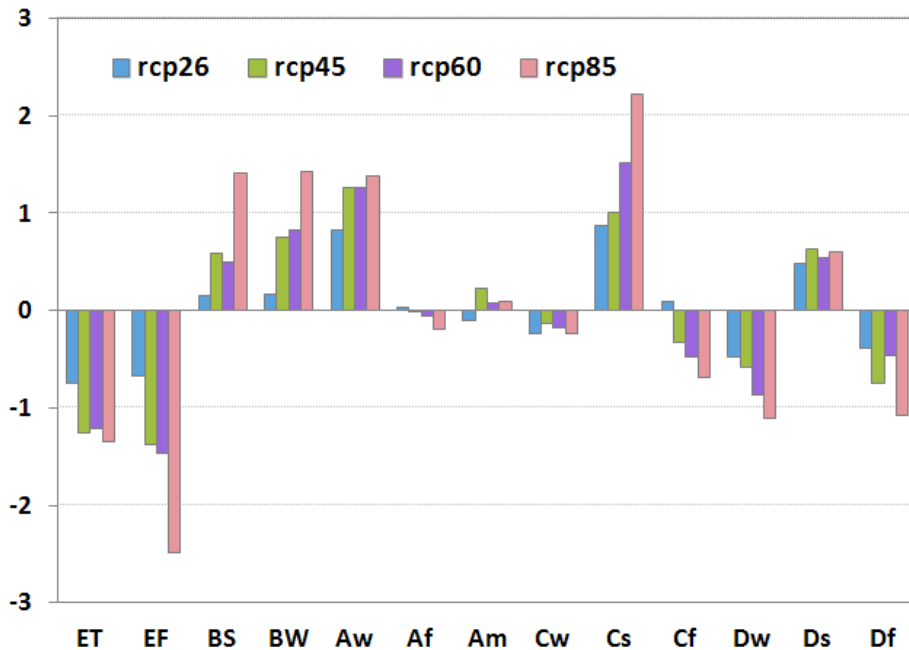


그림 4.27 과거기후(1971-2000년) 대비 미래 시나리오에 따른 미래 (2071-2100년) 쾨펜의 기후구 면적비 변화 (단위, %).

5. 우리나라 기후변화

우리나라가 위치한 동아시아 지역은 복잡한 지리적 특성 때문에 기후 변동성이 크며, 최근에는 기후변화에 따라 극한 기후의 발생 빈도 및 강도가 증가하는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 기후변화에 대응하기 위하여, 우리나라의 수문·농업·건설·환경 등 다양한 부문에서 기후변화 영향평가/적응/취약성 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이 때 무엇보다도 현재와 미래에 대한 신뢰할 수 있는 상세 지역 기후변화 정보가 요구되고 있다. 이에 따라, 국립기상연구소는 국가 차원의 기후변화 대응을 위해, 우리나라 지역에 대한 고해상도의 지역기후시나리오를 개발하여 우리나라의 상세 기후변화를 분석하였다.

5.1 전지구 기후변화모델에 따른 한반도 기온과 강수의 미래 전망

1861년부터 2100년 까지 CMIP5 16개 전지구 모델 (표 3.1)의 앙상블 평균한 기온 및 강수의 한반도 영역 (123~132°E, 32~44°N)에 대한 변화를 살펴보았다 (그림 5.1). 과거기후 (1971~2000년)를 기준으로 21세기 말 (2071~2100년)의 기온 및 강수량의 미래변화를 살펴보면, 과거에 비해 21세기 말에 한반도의 기온은 RCP2.6 약 1.8°C, RCP4.5 약 2.7°C, RCP6.0 약 3.1°C, RCP8.5 약 4.8°C 상승 정도를 보이며, 한반도 영역의 기온 상승이 전지구 기온보다 더 크게 상승하는 것으로 나타났다. 그리고 한반도 영역에서 강수는 RCP2.6 시나리오에서는 21세기 말에 약 6.5%, RCP4.5 약 9.2%, RCP6.0 약 8.4%, RCP8.5 약 13.2% 증가될 것으로 전망되어 전지구 강수보다 약 2배정도 더 증가할 것으로 전망되었다. 기온과 강수는 모든 시나리오에서 상승 추세를 보이고 있으며, 고농도 시나리오인 RCP8.5에서 상승폭이 높게 나타났다. 그러나 한반도 영역에서는 CMIP5 모델의 강수모의 변동성이 큰 것을 알 수 있다 (전지구 참고 그림 3.3).

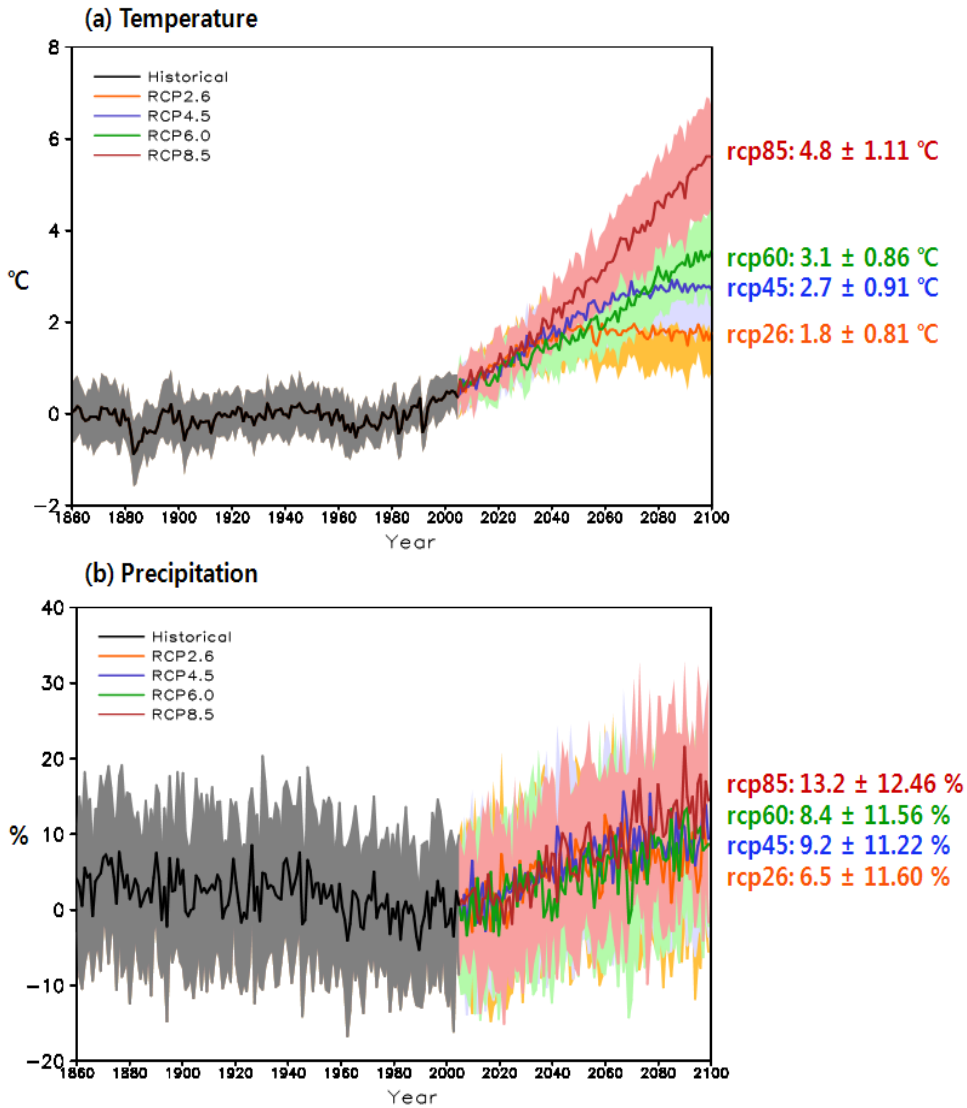


그림 5.1 한반도영역의 연 (a) 기온 및 (b) 강수량 변화 시계열 (1860- 2099년). 음영은 표준편차를 의미함.

5.2 지역 기후변화모델에 따른 기후모의 성능 및 미래 전망

국립기상연구소에서는 지역기후모델 (HadGEM3-RA)을 이용하여 과거모의 실험 (1979~2005)을 수행하고 RCP 4종 (2.6, 4.5, 6.0, 8.5)에 따른 한반도 미래 (2006~

2100) 고해상도 기후변화 시나리오를 생산하였다. 측면경계자료는 135 km 해상도의 전지구 대기-해양 결합모델 (HadGEM2-AO)의 전지구 기후변화 시나리오 자료를 사용하였다. 한반도 지역 기후변화 시나리오의 해상도는 12.5 km (적도 0.11°)의 200 (동서)×180 (남북) 간격이며, 우리나라를 비롯하여 중국 및 일본의 일부 지역을 포함하고 있다.

산출된 한반도 상세 기후변화 시나리오의 기온과 강수를 관측자료, 전지구 기후변화 시나리오와 비교하였다. ECMWF의 ERA-interim의 17년 (1989~2005) 재분석 자료를 이용하여 월별 1.5 m 기온 모의성능을, CMAP의 27년 (1979~2005) 관측자료를 이용하여 월별 강수 모의성능을 분석하였다 (그림 5.2). 한반도 상세 기후변화 시나리오와 전지구 시나리오에서 공통적으로 겨울철 기온을 관측보다 낮게 모사하였다. 강수의 경우 한반도 상세 기후변화 시나리오가 관측에 비해서 과대모의 되고 있는 경향을 보이지만 전지구 시나리오의 결과에 비해서 여름철 강수가 집중되는 특성을 관측과 더 유사하게 모의한다.

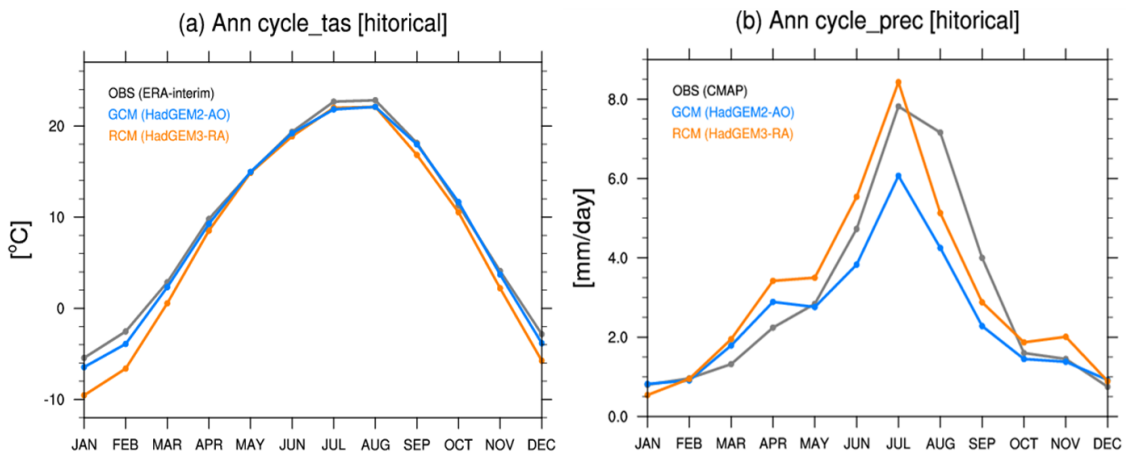


그림 5.2 한반도 영역 중 육지에서의 (a) 1989~2005년 기간의 1.5 m 온도와 (b) 1979~2005년 기간의 강수의 월별 기후값. 검정색선은 관측자료 (ERA-interim : 온도, CMAP : 강수), 주황색선은 HadGEM3-RA, 파란색선은 HadGEM2-AO의 결과를 나타냄.

전지구 시나리오와 한반도 상세 기후변화 시나리오의 연평균, 여름철, 겨울철 기온과 강수결과를 각각 재분석 자료, 관측 자료와 비교 하였다 (그림 5.3-그림 5.5). 전반적으로 한반도 상세 기후변화 시나리오의 결과는 전지구 시나리오의 모의와 비슷한 경향을 보인다. 연평균 기온의 경우, 두 모델 모두 전반적인 기온분포는 유사하게 모의 하고 있지만 육지지역에서 한랭편차가 나타난다. 강수의 경우 지역 모델의 결과가 전지구 모델의 모의 결과에 비해 해양의 강수 과대 모의와 한반도의 과소모의 경향이 줄어든 향상된 결과를 보여주었다 (그림 5.3).

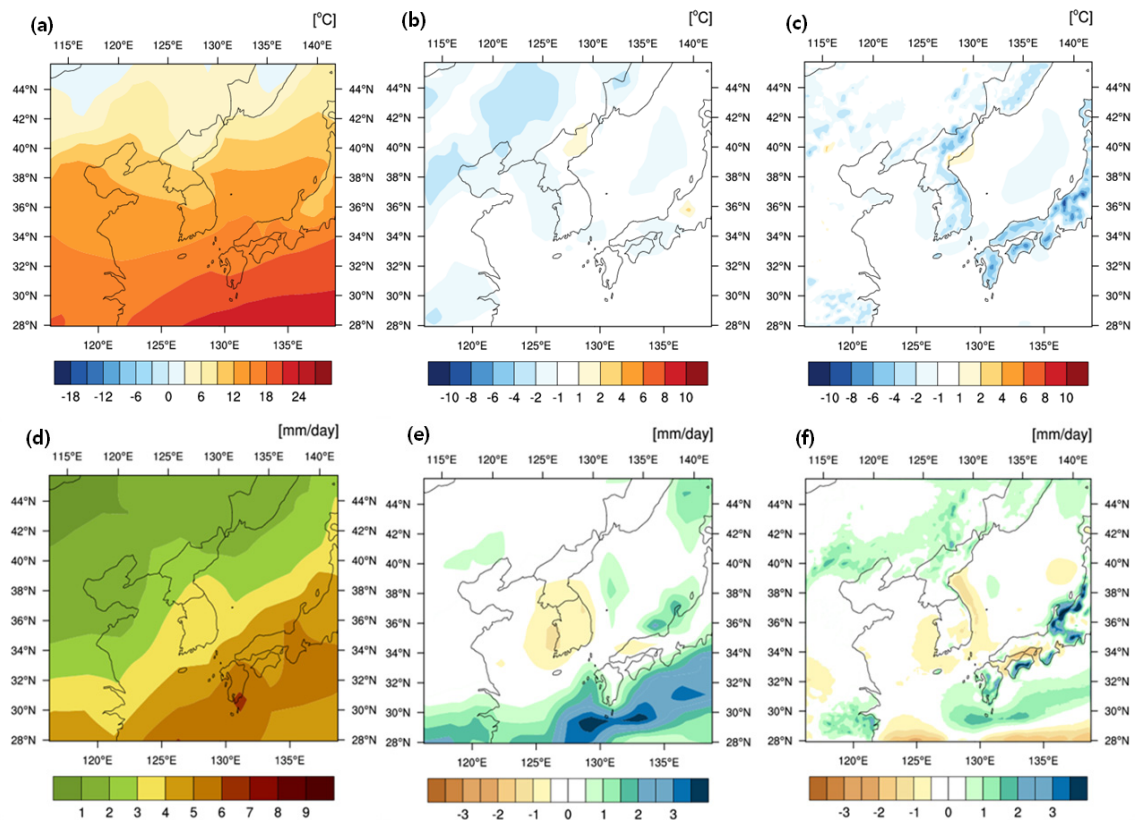


그림 5.3 (a) 1979~2005년 재분석 기온 자료 (ERA-interim)의 연기후값, (b) 재분석 자료와 전지구 기후시나리오의 기온 차이, (c) 재분석 자료와 지역 기후변화 시나리오의 기온 차이, (d) 1989~2005년 관측 강수 (CMAP)의 연기후값, (e) 관측과 전지구 기후변화 시나리오의 강수 차이, (f) 관측과 지역 기후변화 시나리오의 강수 차이. 온도의 단위는 $^{\circ}\text{C}$ 이며, 강수의 단위는 mm day^{-1} 이다.

여름철엔 두 모델 결과 모두 한반도 주변의 해안지역에서 기온의 한랭편차와 강수 과대 모의를 보인다 (그림 5.4). 겨울철엔 상세 기후변화 시나리오의 기온모의에서 한반도 산악지역에 한랭편차가 전지구 시나리오에 비해 강하게 나타났다. 해양의 강수 과대모의는 두 모델 비슷하게 나타났다 (그림 5.5).

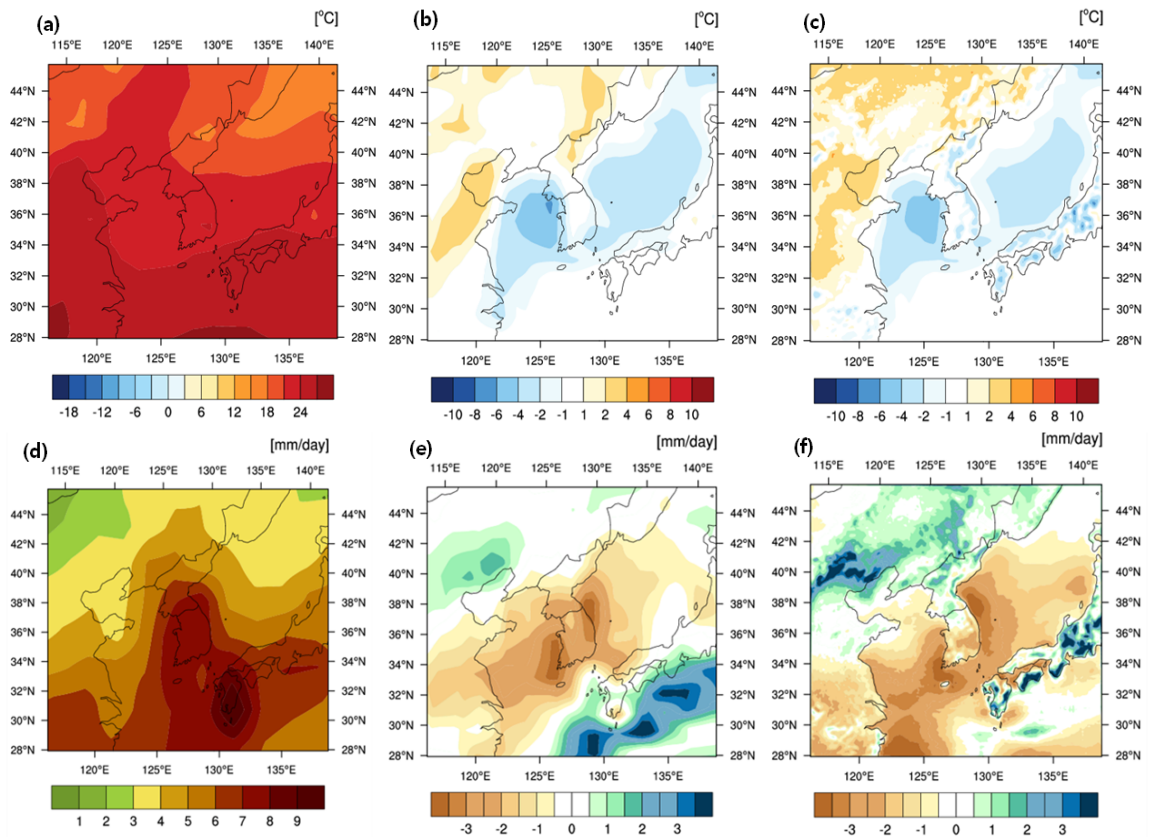


그림 5.4 (a) 1979~2005년 재분석 기온 자료 (ERA-interim)의 여름철 (JJA) 기후값, (b) 재분석 자료와 전지구 기후시나리오의 기온 차이, (c) 재분석 자료와 지역 기후변화 시나리오의 기온 차이, (d) 1989~2005년 관측 강수 (CMAP)의 여름철 (JJA) 기후값, (e) 관측과 전지구 기후변화 시나리오의 강수 차이, (f) 관측과 지역 기후변화 시나리오의 강수 차이. 온도의 단위는 $^{\circ}\text{C}$ 이며, 강수의 단위는 mm day^{-1} 이다.

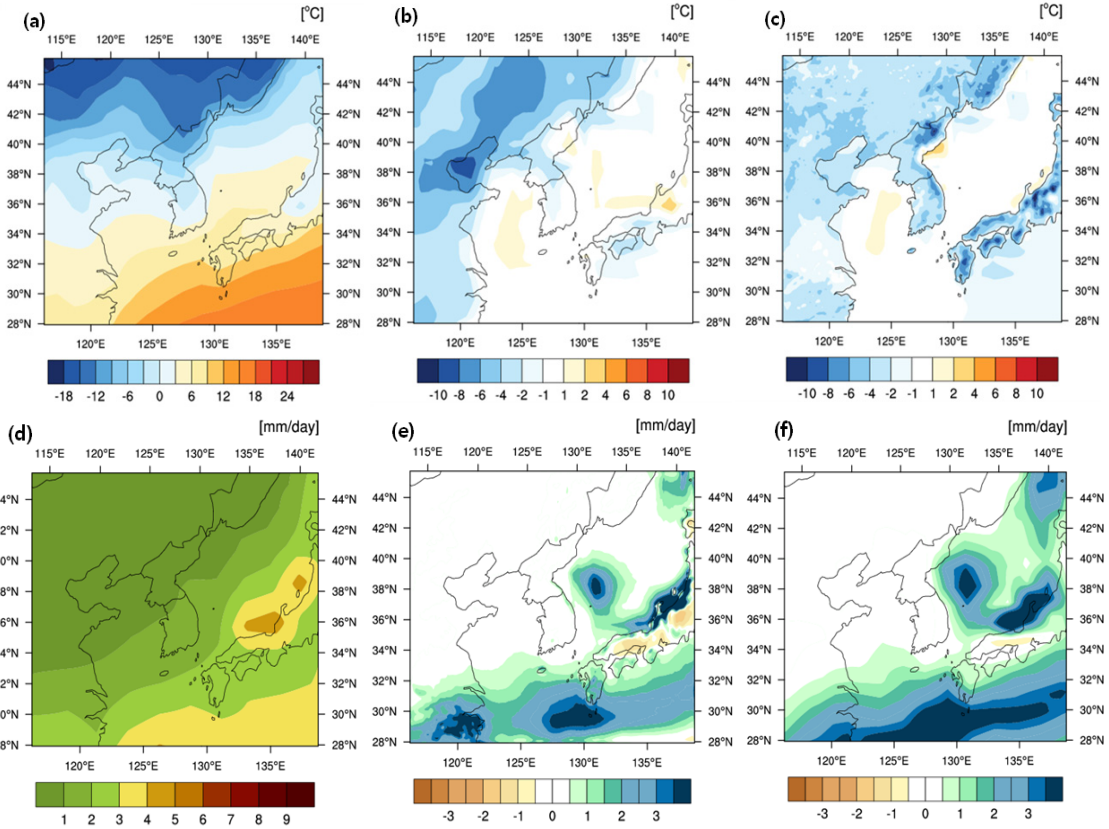


그림 5.5 (a) 1979~2005년 재분석 기온 자료 (ERA-interim)의 겨울철 (DJF) 기후값, (b) 재분석 자료와 전지구 기후시나리오의 기온 차이, (c) 재분석 자료와 지역 기후변화 시나리오의 기온 차이, (d) 1989~2005년 관측 강수 (CMAP)의 겨울철 (DJF) 기후값, (e) 관측과 전지구 기후변화 시나리오의 강수 차이, (f) 관측과 지역 기후변화 시나리오의 강수 차이. 온도의 단위는 $^{\circ}\text{C}$ 이며, 강수의 단위는 mm day^{-1} 이다.

지역기후모델로 산출한 한반도 상세기후변화 시나리오를 바탕으로 우리나라 기후변화 전망을 알아보았다. 현재기후를 기준으로 20세기 말부터 21세기 말까지의 변화를 살펴보았다. 현재기후는 1981~2005년 (25년)으로 선정하였다. 먼저, 1979년부터 2100년까지 한반도 영역을 평균한 기온과 강수의 변화를 그림 5.6에 보였다. 이 그림에서 기온은 현재기후를 기준으로 실제 변화 온도를, 강수는 그 변화를 백분율 (%)로 나타내었다.

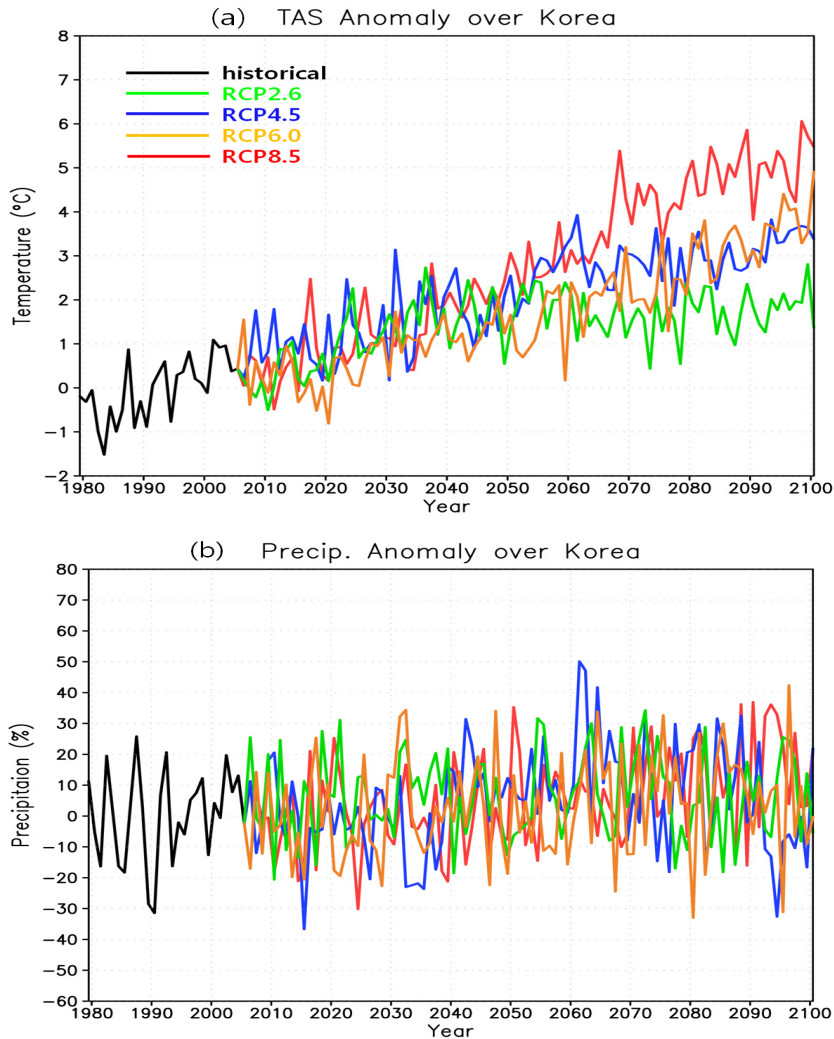


그림 5.6 1981~2005년 대비 1979~2100년 (a) 연평균 기온의 변화 (°C)와 (b) 연평균 강수의 변화 (%). 검은색은 과거모의 실험, 연두색은 RCP2.6, 파란색은 RCP4.5, 주황색은 RCP6.0, 빨간색은 RCP8.5 시나리오 실험을 나타냄.

기온 변화의 경우에는 모든 RCP 시나리오 결과에서 증가 추세가 뚜렷이 나타나며, 현재와 비교하여 21세기 후반에는 RCP2.6 시나리오 하에서는 1.8°C, RCP4.5에서는 3.1°C, RCP6.0에서는 3.3°C, RCP8.5 시나리오 하에서는 4.9°C까지 상승할 것으로 전망 된다 (표 5.1). 반면에 강수의 경우에는 증가 추세가 약하게 나타나며, 연별

변화율의 변동 폭이 큰 것을 알 수 있다. 21세기 후반에는 RCP2.6 시나리오 하에서는 4.0%, RCP4.5에서는 4.7%, RCP6.0에서는 5.5%, RCP8.5 시나리오 하에서는 15.0% 증가할 것으로 전망 된다 (표 5.1). 이와 같이, 기온과 강수 모두 각 RCP 시나리오에서 상승 추세를 보이고 있으며, 고농도 시나리오인 RCP8.5에서 상승폭이 가장 크게 나타난다. 21세기말 RCP 시나리오별, 계절별 한반도 평균 기온 및 강수의 미래변화 전망의 정량적 값을 표 5.1에 정리하였다.

표 5.1 현재 (1981~2005년) 대비 미래 (2076~2100년) 한반도 평균 기온 및 강수량 전망

RCP시나리오			RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
			2076-2100	2076-2100	2076-2100	2076-2100
한반도 평균	기온 (℃)	연평균	1.8	3.1	3.3	4.9
		봄	2.1	3.3	3.4	5.2
		여름	1.9	3.2	3.3	5.1
		가을	1.7	3.1	3.2	4.7
		겨울	2.2	3.3	3.3	5.2
	강수량 (%)	연평균	4.0	4.7	5.5	15.0
		봄	12.0	8.1	12.7	14.9
		여름	8.0	8.0	5.3	17.5
		가을	-14.0	-9.0	-4.0	6.3
		겨울	-2.4	4.1	14.8	30.8

우리나라 상세 기후변화를 공간적으로 살펴보면, 대부분의 한반도 지역에서 기온이 상승하고 대부분의 남한 지역에서 강수가 증가할 것으로 전망 된다 (그림 5.7~그림 5.8). 미래변화는 각 시나리오 별로 현재기후 (1981~2005)를 기준으로 21세기말 (2076~2100)을 비교해보았다. 그림 5.7에서 기온의 미래변화를 보면, 기온 상승은 전 지역에서 나타나지만 중북부지역에서 남부지역보다 높은 기온 상승정도를 보이고 있으며 고농도 시나리오로 갈수록 상승률이 크다. 강수의 변화는 전반적으로

증가 추세를 보이고 이러한 강수 증가의 지역적 편차가 크다. 전 지역적으로 강수 증가를 보이는 RCP8.5 결과 이외에는 대부분 남해안과 남동부지방에 두드러진 증가 경향이 나타난다 (그림 5.8).

우리나라 기후변화의 공간분포를 계절별로 전망해보면 계절에 따른 차이가 큰 것을 알 수 있다 (그림 5.9~그림 5.16). 기온의 경우, 봄철에 4종 시나리오 모두 남서부 보다 북동부 지역의 기온상승이 두드러지며 (그림 5.9), 여름철에는 내륙 산간 지역보다 해안지역의 기온상승이 크게 나타난다 (그림 5.10). 가을철에는 남부의 내륙지역 보다 북부지역의 기온상승이 크다 (그림 5.11). 겨울철은 봄철의 지역적 경향과 유사한데, 봄철에 비해 온도 상승폭이 크다 (그림 5.12). 이와 같이, 기온 변화의 공간 분포를 살펴보면 고농도 시나리오 일수록 온도 상승이 크게 나타나지만, RCP4.5와 RCP6.0 두 시나리오는 차이가 크지 않다. 그리고 온도 상승폭은 현재기후가 따뜻한 지역보다는 추운 지역의 기온 상승이 뚜렷하다.

강수의 경우를 살펴보면, 시나리오에 따라 지역별로 더욱 두드러진다 (그림 5.8). 봄철에는 한반도 대부분의 지역에서 강수의 증가가 전망되나 RCP6.0에서는 남부지방의 봄철 강수가 많이 증가하는 반면 다른 시나리오 결과에서는 중부지방의 강수가 증가하는 경향을 나타냈다 (그림 5.13). 여름철의 경우에는 지역적 차이가 눈에 띄게 나타나는데, 4종 시나리오 모두 남부지방과 동해안 지역의 강수 증가가 나타나고 중부 내륙 지방에서의 강수 감소가 전망 된다 (그림 5.14). 가을철에는 RCP6.0의 남해안 지역과 RCP8.5의 경우를 제외하고 대부분 시나리오에서 전 지역적으로 현재보다 가을 강수가 감소할 것으로 보였다 (그림 5.15). 겨울철의 경우에는 여름보다 더욱 크게 지역적 차이가 나타나는데, RCP8.5의 경우는 전지역에서 강수 증가를 보이며, 특히 남부지역의 강수가 크게 나타난다. 나머지 시나리오에서는 남부지역에서는 강수 증가가, 북서부 지역에서 겨울철 강수 감소를 전망 한다 (그림 5.16).

상세기후변화 시나리오를 통해 나타난 우리나라 기온과 강수의 미래변화를 정리해 보면 기온의 경우에는 경년 변동성 및 공간 변동성이 상대적으로 작고 시나리오별 점진적인 증가 추세는 매우 강하다. 반면에, 강수의 경우에는 경년, 공간 변동성이 크고 증가 추세는 상대적으로 약하다. 그러므로 강수에 대한 미래 전망은 기온과 비교해 불확실성이 크다고 할 수 있다.

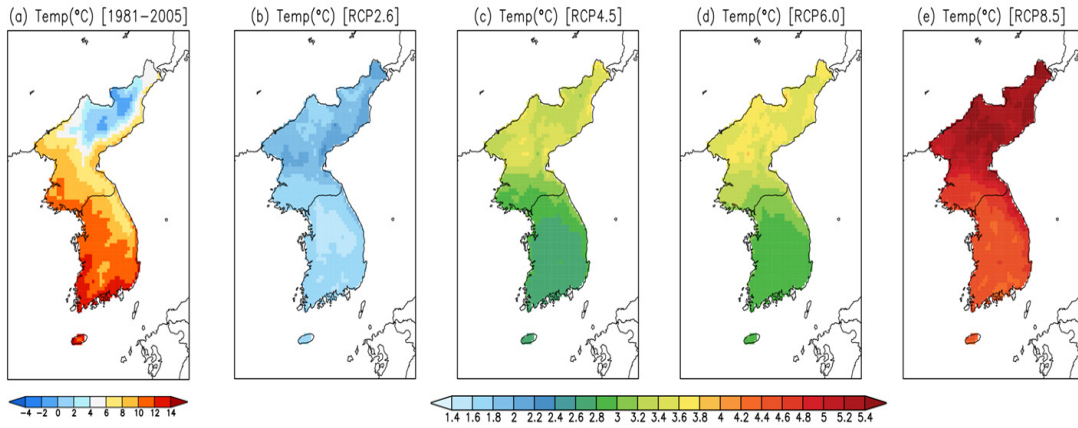


그림 5.7 RCP 시나리오 4종에 의해 모의된 연평균 기온의 현재기후와 미래변화 분포 (°C).
(a) 현재기후 (1981~2005년), (b) RCP2.6의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망, (c) RCP4.5의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망, (d) RCP6.0의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망, (e) RCP8.5의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망.

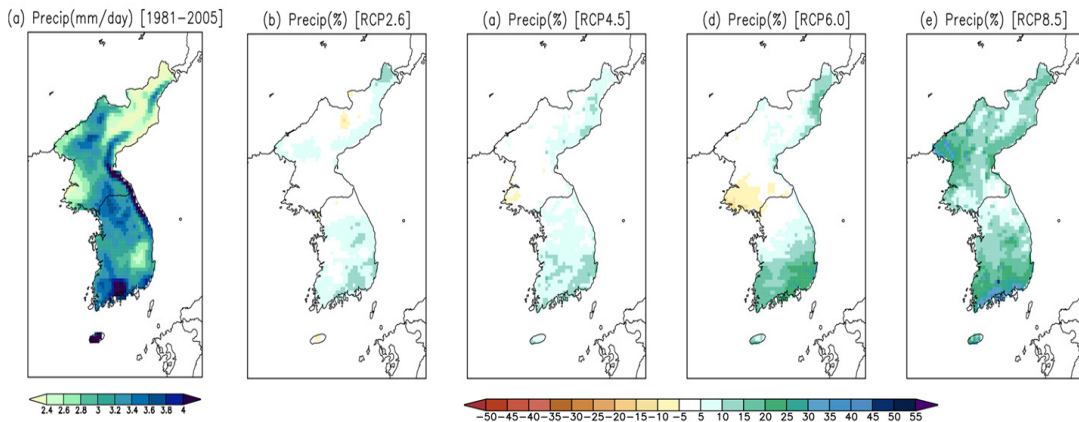


그림 5.8 RCP 시나리오 4종에 의해 모의된 연평균 강수의 현재기후 (mm day^{-1}) 와 미래변화 분포 (%). (a) 현재기후 (1981~2005년), (b) RCP2.6의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망, (c) RCP4.5의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망, (d) RCP6.0의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망, (e) RCP8.5의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망.

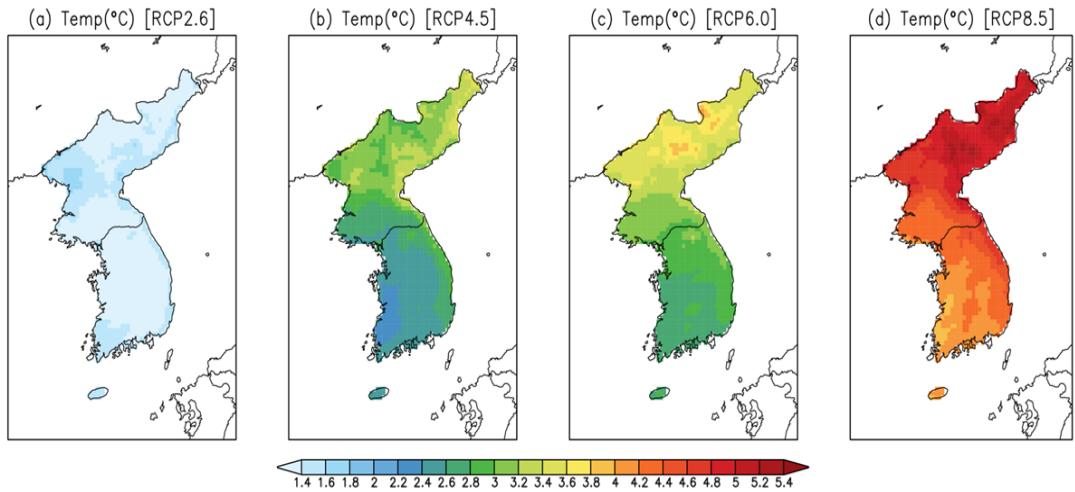


그림 5.9 RCP 시나리오 4종에 의해 모의된 봄철(MAM) 기온의 현재기후 대비 미래변화 분포 (°C). (a) RCP2.6의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망, (b) RCP4.5의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망, (c) RCP6.0의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망, (d) RCP8.5의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망

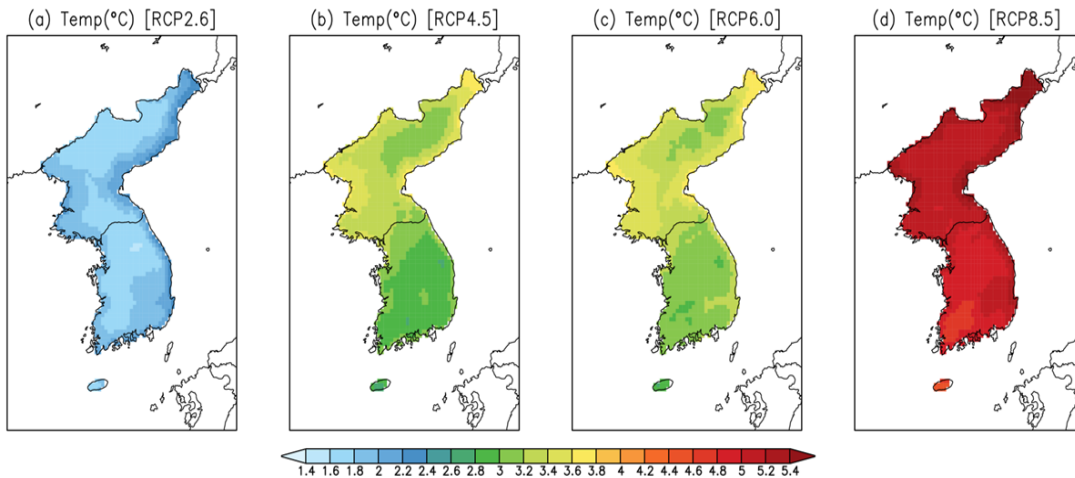


그림 5.10 RCP 시나리오 4종에 의해 모의된 여름철(JJA) 기온의 현재기후 대비 미래변화 분포 (°C). (a) RCP2.6의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망, (b) RCP4.5의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망, (c) RCP6.0의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망, (d) RCP8.5의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망

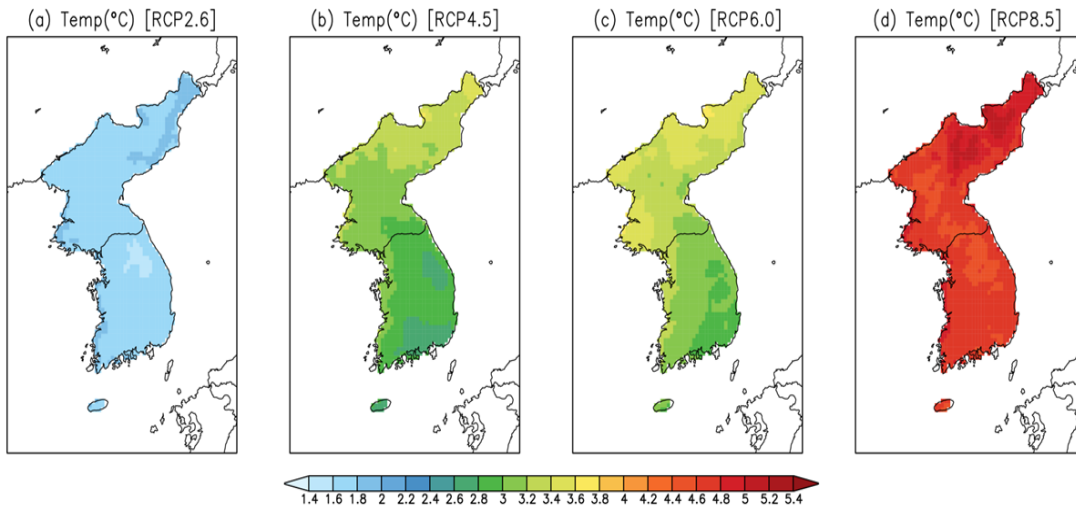


그림 5.11 RCP 시나리오 4종에 의해 모의된 가을철(SON) 기온의 현재기후 대비 미래변화 분포 (°C). (a) RCP2.6의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망, (b) RCP4.5의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망, (c) RCP6.0의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망, (d) RCP8.5의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망

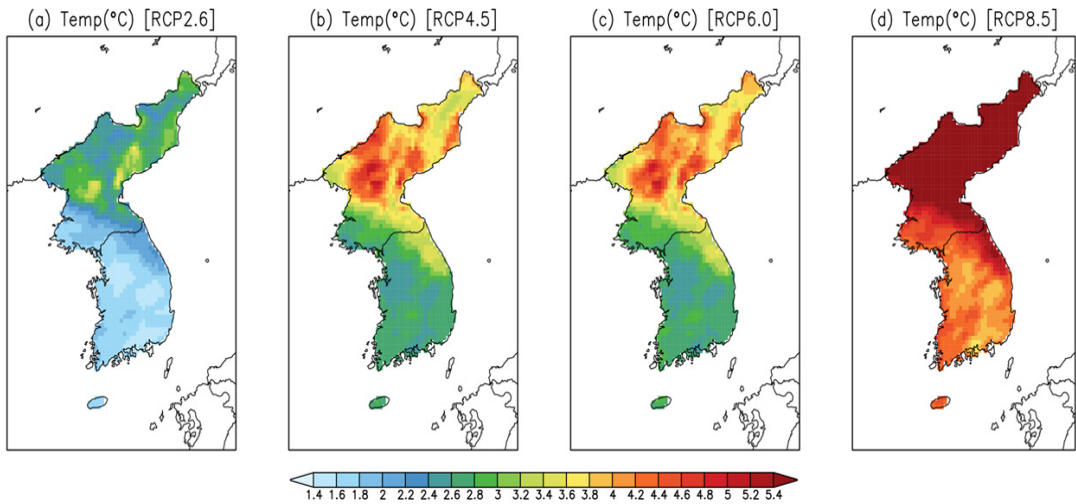


그림 5.12 RCP 시나리오 4종에 의해 모의된 겨울철(DJF) 기온의 현재기후 대비 미래변화 분포 (°C). (a) RCP2.6의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망, (b) RCP4.5의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망, (c) RCP6.0의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망, (d) RCP8.5의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망

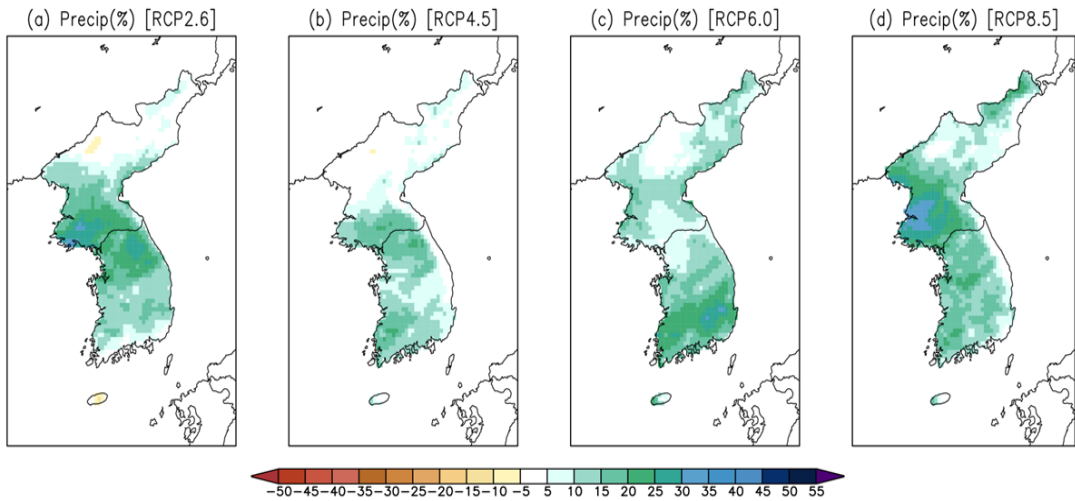


그림 5.13 RCP 시나리오 4종에 의해 모의된 봄철(MAM) 강수의 현재기후 대비 미래변화 분포 (%). (a) RCP2.6의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망, (b) RCP4.5의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망, (c) RCP6.0의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망, (d) RCP8.5의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망

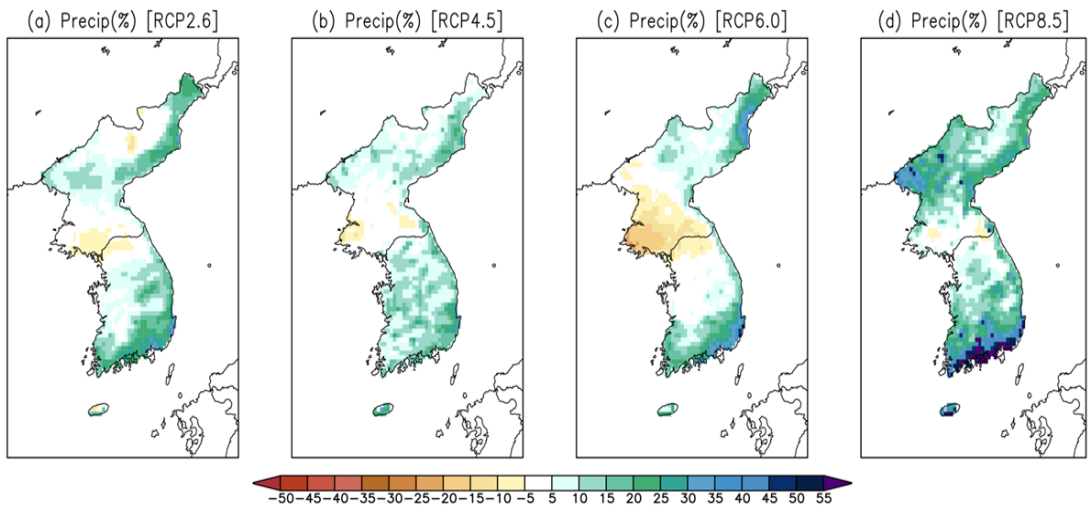


그림 5.14 RCP 시나리오 4종에 의해 모의된 여름철(JJA) 강수의 현재기후 대비 미래변화 분포 (%). (a) RCP2.6의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망, (b) RCP4.5의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망, (c) RCP6.0의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망, (d) RCP8.5의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망

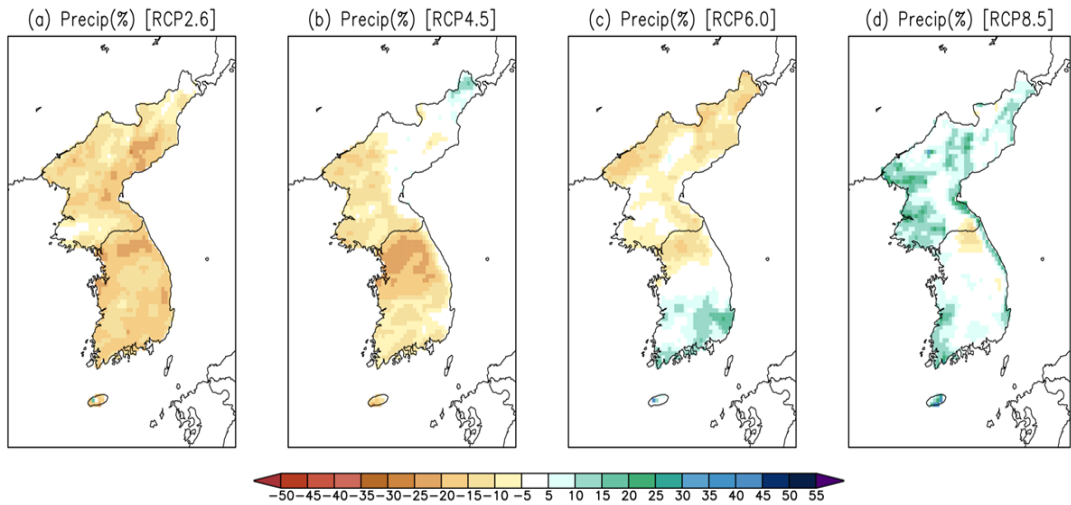


그림 5.15 RCP 시나리오 4종에 의해 모의된 가을철(SON) 강수의 현재기후 대비 미래변화 분포 (%). (a) RCP2.6의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망, (b) RCP4.5의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망, (c) RCP6.0의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망, (d) RCP8.5의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망

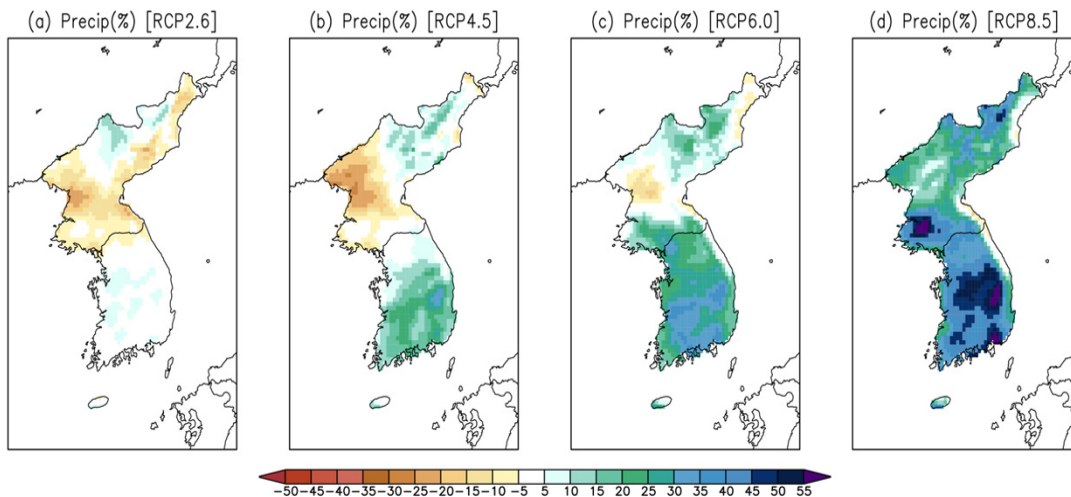


그림 5.16 RCP 시나리오 4종에 의해 모의된 겨울철(DJF) 강수의 현재기후 대비 미래변화 분포 (%). (a) RCP2.6의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망, (b) RCP4.5의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망, (c) RCP6.0의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망, (d) RCP8.5의 21세기 말 (2076~2100) 변화 전망

5.3 극한 기온 및 강수 변화

홍수 및 폭염과 같은 극한기후현상은 평균적인 기후변화보다 사회, 경제 및 자연 환경에 더 큰 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 이러한 극한기후현상은 지역마다 그 변화가 다르게 나타날 것으로 기대되므로 고해상도 지역 기후변화 시나리오 자료와 관측 자료를 이용하여, 주요 극한 기후 현상인 폭염, 열대야, 영하일, 호우의 발생 빈도 변화 및 난방도일, 냉방도일 등 극한기후 지수의 공간 분포 변화를 전망하였다. 시나리오 자료의 바이어스는 관측값 (1981~2005년)을 이용하여 보정되었다. 또한 분위회귀분석방법을 이용하여 극한 기온 및 강수의 변화를 전망하였다.

폭염일은 일 최고기온이 33℃ 이상인 날로 정의된다. 현재 (1981~2005년) 연 폭염일수의 공간 분포를 보면 22.0일의 대구를 제외하면 전 지역에서 20일 미만의 분포를 보인다 (그림 5.17 a). 저농도 시나리오인 RCP2.6 시나리오에 의한 21세기 후반 (2076~2100년) 연 폭염일수의 공간 분포를 보면 가장 높은 빈도를 보이는 대구에서 34.2일로 현재보다 12.2일 증가하며, 지역별로 0.4일 (대관령)에서 15.8일 (정읍)까지 증가할 것으로 전망된다 (그림 5.17 b). RCP4.5와 RCP6.0 시나리오에 의한 21세기 후반 연 폭염일수의 분포는 서로 매우 유사하며, 지역별로 현재보다 2~3일 (대관령)에서 29~33일 (전주)까지 증가할 것으로 전망된다 (그림 5.17 c, d). 고농도 시나리오인 RCP8.5 시나리오에 의하면 대관령을 중심으로 한 태백산지 지역을 제외한 전 지역에서 30일 이상의 폭염일 분포를 보이며, 지역별로 현재보다 9.4일 (대관령)에서 58.6일 (남원)까지 증가할 것으로 전망된다 (그림 5.17 e). 우리나라의 현재 연 폭염일수는 9.2일이나 기온의 상승으로 21세기 후반에는 폭염일이 증가할 것으로 전망되며, RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5 시나리오에 의하면 21세기 후반의 연 폭염일수는 각각 18.9일, 30.6일, 33.3일, 56.7일로 전망된다.

열대야일은 일 최저기온이 25℃ 이상인 날로 정의된다. 현재 연 열대야일수의 공간 분포를 보면 제주도 및 남해안 일부 지역을 제외한 전 지역에서 10일 미만의 분포를 보인다 (그림 5.18 a). RCP2.6 시나리오에 의한 21세기 후반 연 열대야일수는 서울, 대전, 대구 등의 대도시와 남해안 및 제주도 지역에서 20일 이상의 분포를 보이며, 지역별로 현재보다 2.6일 (인제)에서 25.5일 (여수)까지 증가하고 대관령은 현

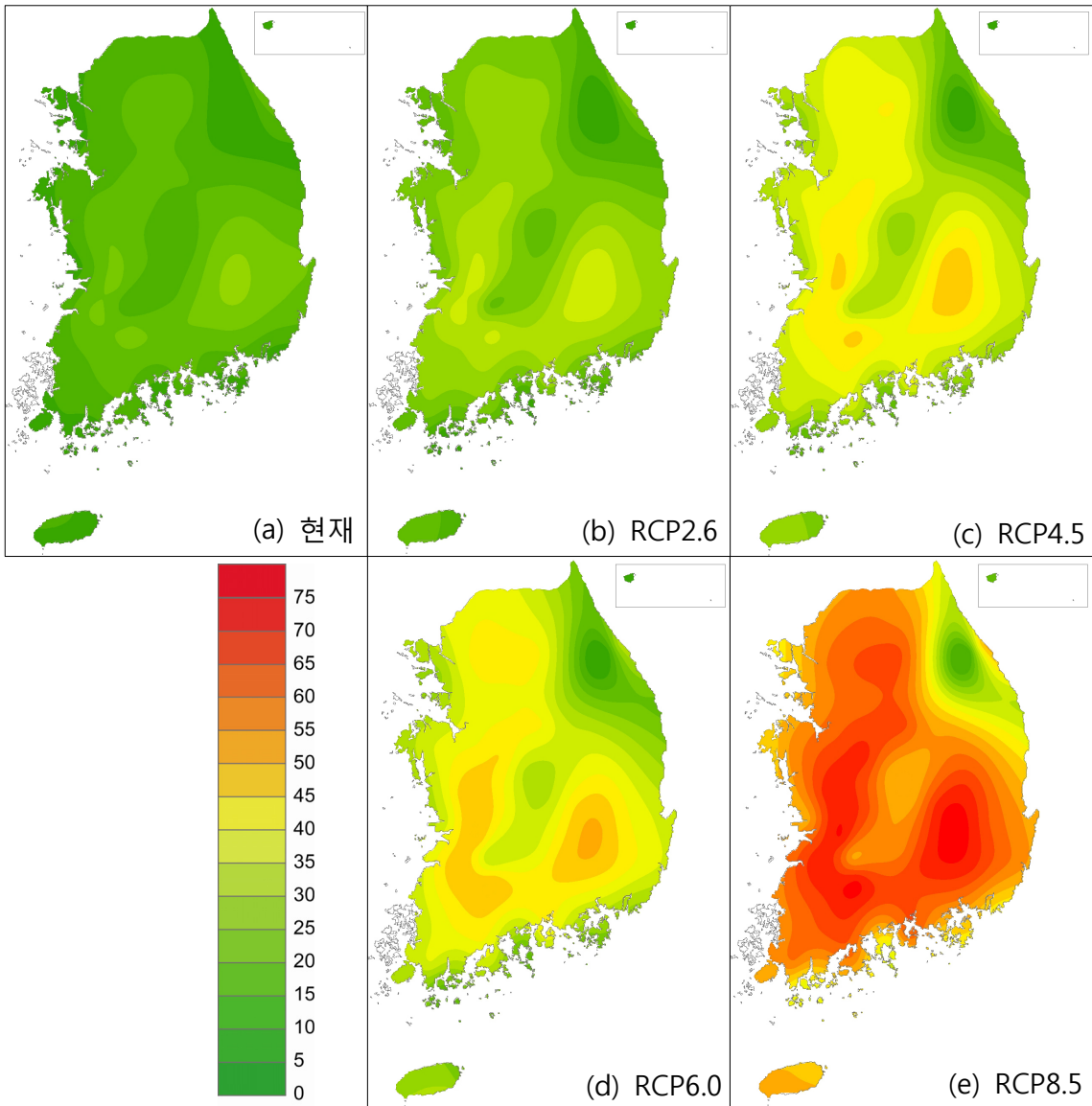


그림 5.17 관측 자료로 구한 현재 (1981~2005년) 연 폭염일수 (a)와 RCP 시나리오에 의한 21세기 후반 (2076~2100년) 연 폭염일수 (b: RCP2.6, c: RCP4.5, d: RCP6.0, e: RCP8.5)

재와 같이 열대야가 출현하지 않을 것으로 전망된다 (그림 5.18 b). RCP4.5와 RCP6.0 시나리오에 의한 21세기 후반 연 열대야일수는 서로 유사한 분포를 보이며, 대관령에서도 0.8~0.9일의 열대야가 출현하고 서귀포에서는 현재보다 41~43일 증가할 것으로 전망된다 (그림 5.18 c, d). RCP8.5 시나리오에 의하면 21세기 후반 연

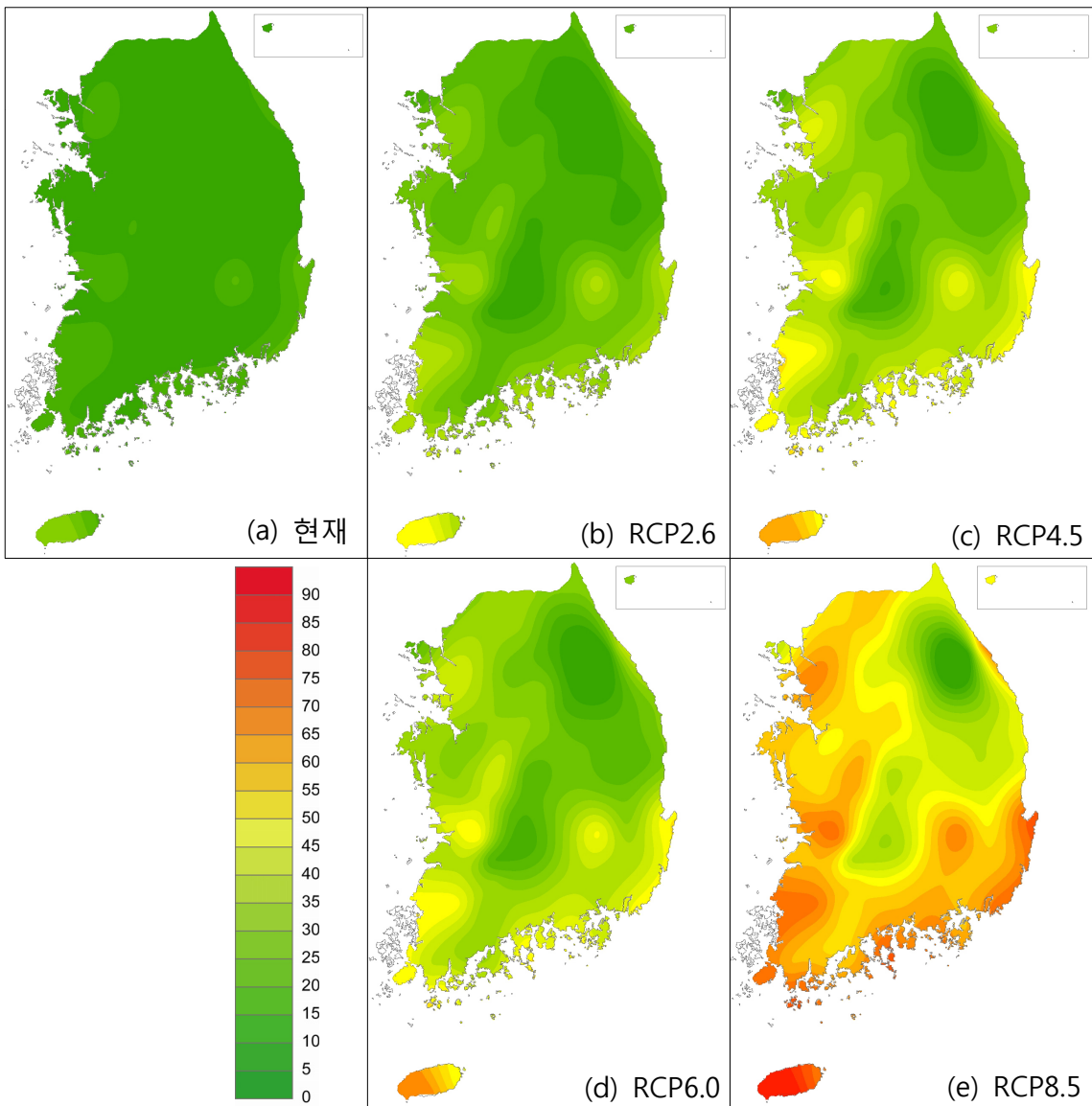


그림 5.18 관측 자료로 구한 현재 (1981~2005년) 연 열대야일수 (a)와 RCP 시나리오에 의한 21세기 후반 (2076~2100년) 연 열대야일수 (b: RCP2.6, c: RCP4.5, d: RCP6.0, e: RCP8.5)

열대야일수는 대관령 (4.9일)을 제외한 전 지역에서 20일 이상의 열대야 출현 빈도를 보이며 서귀포에서는 90일까지 나타날 것으로 전망된다 (그림 5.18 e). 우리나라의 현재 연 열대야일수는 4.7일이고 RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5 시나리오에 의하면 21세기 후반에는 연 열대야일수가 각각 17.2일, 28.8일, 29.6일, 54.2일로 증

가될 것으로 전망된다.

영하일은 일 최저기온 0°C 이하인 날로 정의된다. 현재 연 영하일수의 공간 분포를 보면 제주도 및 남해안과 대도시 지역을 제외한 모든 지역에서 100일 이상의 분포를 보이며, 제주와 서귀포에서는 10일 미만의 분포를 보인다 (그림 5.19 a).

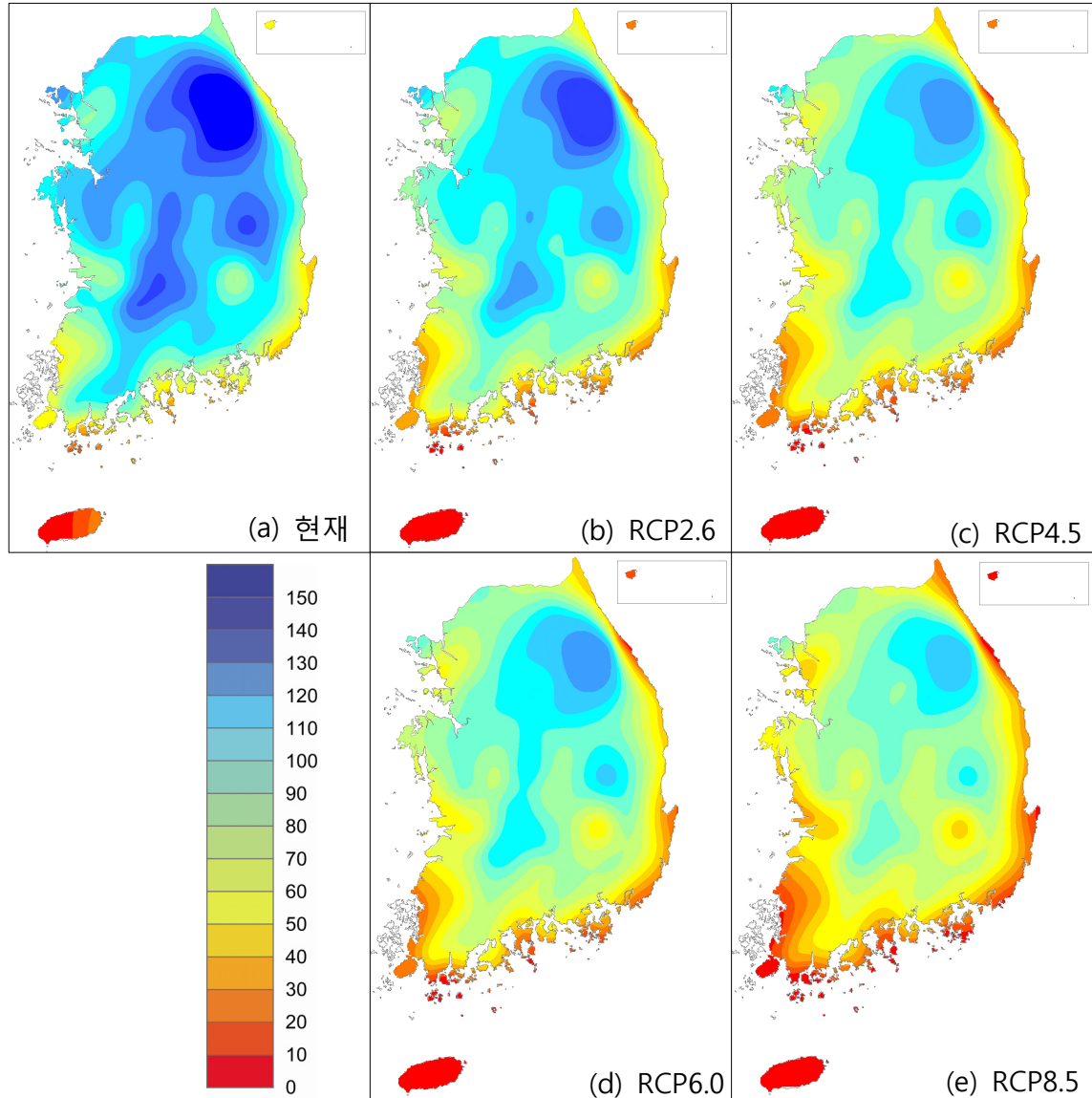


그림 5.19 관측 자료로 구한 현재 (1981~2005년) 연 영하일수 (a)와 RCP 시나리오에 의한 21세기 후반 (2076~2100년) 연 영하일수 (b: RCP2.6, c: RCP4.5, d: RCP6.0, e: RCP8.5)

RCP2.6 시나리오에 의하면 21세기 후반에는 연 영하일수가 지역별로 1.4일 (서귀포)에서 142.9일 (대관령)까지의 분포를 보이며, 주로 동해안 및 남해안 지역에서 현재보다 20일 이상 감소될 것으로 전망된다 (그림 5.19 b). RCP4.5와 RCP6.0 시나리오에 의한 21세기 후반 연 영하일수의 분포는 서로 유사할 것으로 전망되며, 대관령을 중심으로 한 중부 산지 지역에서만 100일 이상 출현할 것으로 전망된다 (그림 5.19 c, d). RCP8.5 시나리오에 의하면 21세기 후반 연 영하일수는 현재보다 크게 줄어들어 제주와 서귀포에서는 영하일이 출현하지 않으며, 해남에서는 최대 60일까지 감소할 것으로 전망된다 (그림 5.19 e). 우리나라의 현재 연 영하일수는 99.1일이며, RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5 시나리오에 의하면 21세기 후반에는 연 영하일수가 각각 82.4일, 71.4일, 69.6일, 58.4일로 전망된다.

난방도일은 1년 중 일 평균기온이 18°C 이하인 날을 골라 기준이 되는 18°C 기온에서 그날의 일 평균기온을 뺀 값을 적산시킨 값이다. 이것은 일반적으로 일 평균기온이 18°C 이하가 되면 사람들이 난방을 시작한다는 개념에서 설정된다. 현재 난방도일의 분포를 보면 대체로 대관령, 홍천, 제천, 춘천, 원주, 이천 등의 중부 내륙 및 산지 지역에서 3,000도일 이상의 높은 분포를 보인다 (그림 5.20 a). 반면에 RCP2.6 시나리오에 의하면 21세기 후반에 대관령에서만 3,000도일 이상의 분포를 보이며, 지역별로 현재보다 294도일 (서귀포)에서 551도일 (대관령)까지 감소할 것으로 전망된다 (그림 5.20 b). RCP4.5와 RCP6.0 시나리오에 의한 21세기 후반 난방도일의 분포는 서로 유사하며, 역시 대관령에서만 3,000도일 이상의 분포를 보인다 (그림 5.20 c, d). 두 시나리오 하에서 21세기 후반에는 현재보다 450~480도일 (서귀포)에서 930~970도일 (대관령)까지 난방도일이 감소할 것으로 전망된다. RCP8.5 시나리오에 의하면 21세기 후반에 중부 내륙 및 산지 지역을 제외한 전 지역에서 난방도일이 2,000도일 미만일 것으로 전망되며, 지역별로 현재보다 697도일 (서귀포)에서 1,412도일 (대관령)까지 감소할 것으로 전망된다 (그림 5.20 e). 우리나라의 현재 난방도일은 2,626.6도일이나 RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5 시나리오에 의하면 기온 상승으로 21세기 후반에는 각각 2,244.9도일, 2,018.8도일, 1,980.9도일, 1,709.8도일로 감소될 전망이다.

냉방도일은 24°C 이상인 날의 기온과 24°C 와의 차를 합한 값으로 일반적으로 일 평균기온이 24°C 이상이 되면 냉방을 시작한다는 개념에서 설정된다. 현재 냉방도

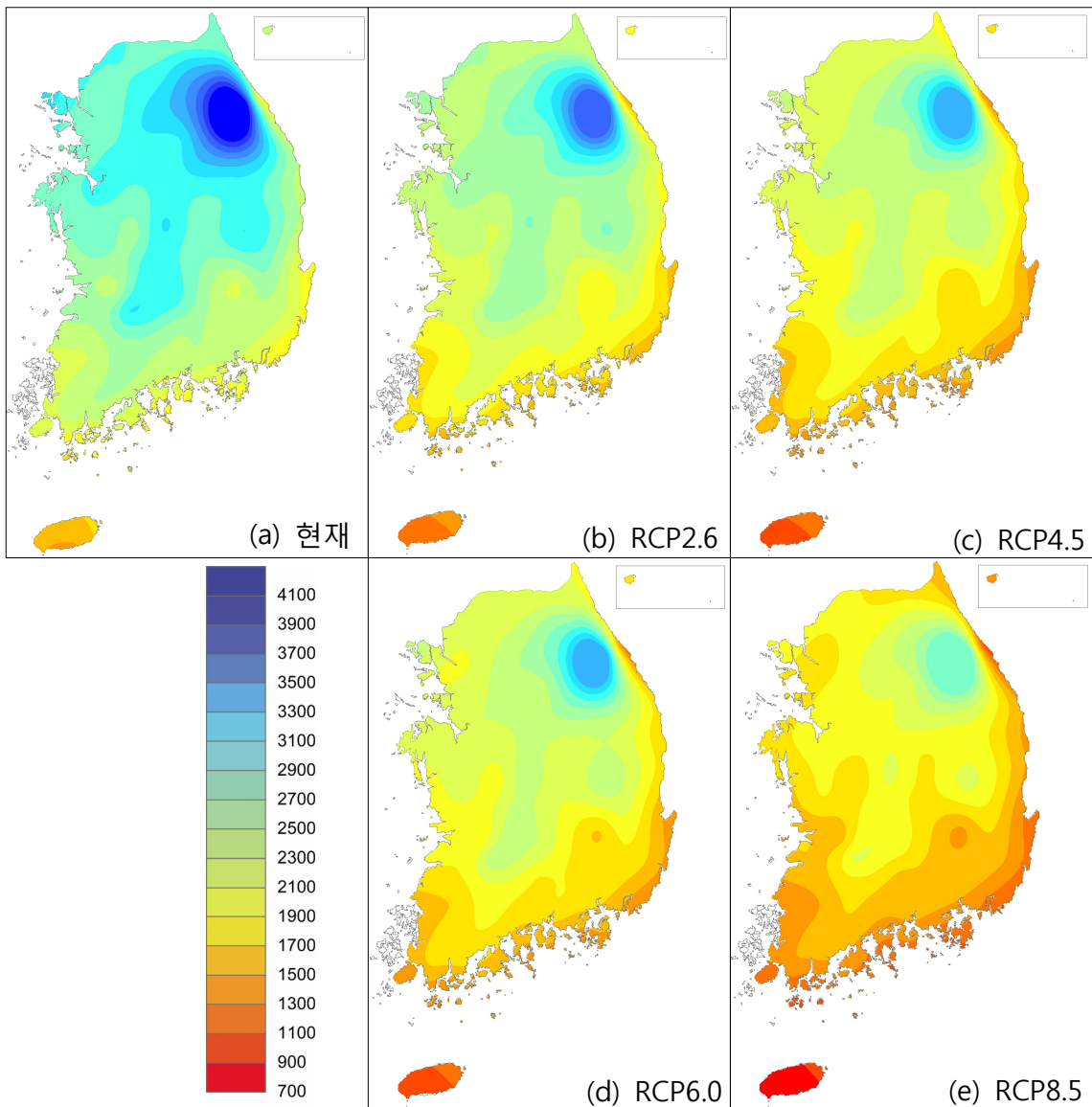


그림 5.20 관측 자료로 구한 현재 (1981~2005년) 난방도일 (a)와 RCP 시나리오에 의한 21세기 후반 (2076~2100년) 난방도일 (b: RCP2.6, c: RCP4.5, d: RCP6.0, e: RCP8.5)

일의 분포를 보면 대관령에서 0.7도일로 가장 낮고 대구에서 177.6도일로 가장 높은 분포를 보인다 (그림 5.21 a). 반면에 RCP2.6 시나리오에 의하면 21세기 후반에는 지역별로 13.1~161.2도일의 증가로 대관령 13.8도일에서 서귀포 323.3도일까지의 분포가 전망된다 (그림 5.21 b). RCP4.5와 RCP6.0 시나리오에 의한 21세기 후반 냉방

도일의 분포는 유사할 것으로 전망되며, 약 30도일 (대관령)에서 430도일 (서귀포)의 지역별 분포를 보인다 (그림 5.21 c, d). RCP8.5 시나리오에 의하면 21세기 후반 냉방도일은 현재보다 크게 증가하여 대관령에서도 약 100도일의 분포를 보이며 대구에서는 659.6도일의 가장 높은 분포가 전망된다 (그림 5.21 e). 우리나라의 현재

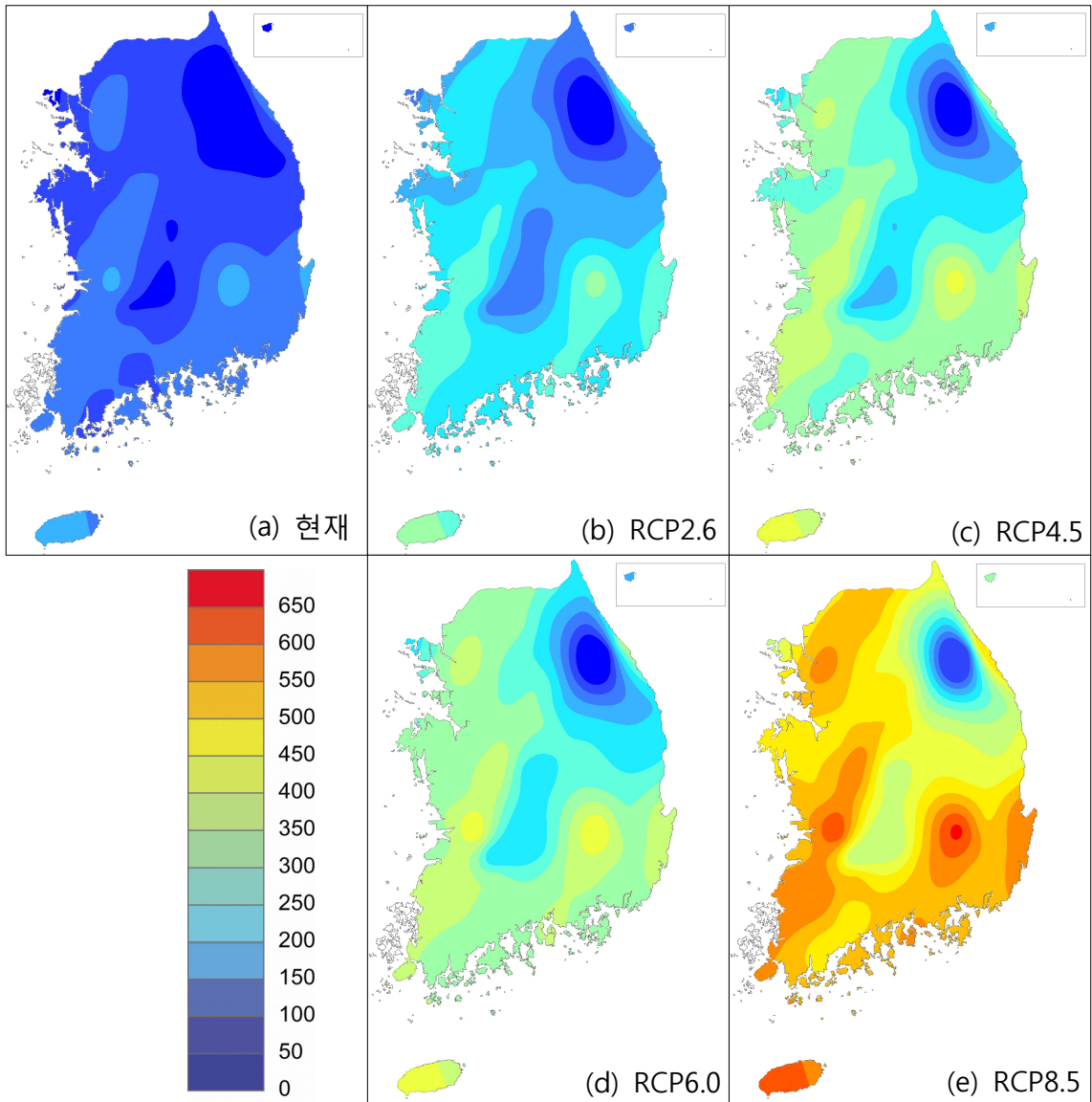


그림 5.21 관측 자료로 구한 현재 (1981~2005년) 냉방도일 (a)와 RCP 시나리오에 의한 21세기 후반 (2076~2100년) 냉방도일 (b: RCP2.6, c: RCP4.5, d: RCP6.0, e: RCP8.5)

냉방도일은 97.9도일이나 21세기 후반에는 기온 상승으로 RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5 시나리오에 의하면 각각 209.8도일, 295.3도일, 307.9도일, 490.1도일로 냉방도일이 증가될 것으로 전망된다.

현재의 일 강수량 관측 자료에서 80 mm 호우에 해당하는 백분위수 (상위 2.33

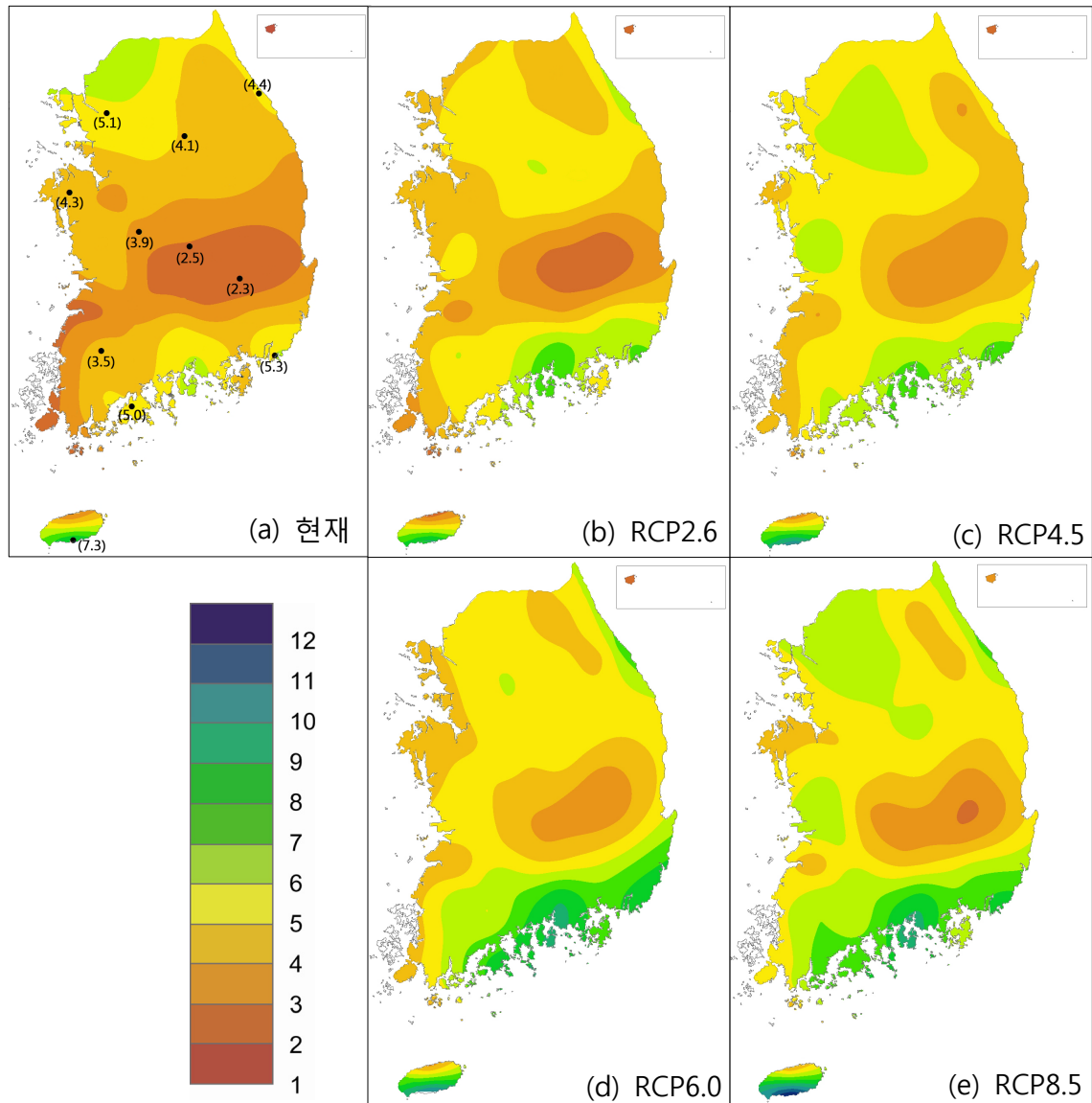


그림 5.22 현재 모의 (1981~2005년) 연 호우일수 (a, 괄호 안 숫자는 관측값을 의미함)와 RCP 시나리오에 의한 21세기 후반 (2076~2100년) 연 호우일수 (b: RCP2.6, c: RCP4.5, d: RCP6.0, e: RCP8.5)

퍼센타일)를 모델에서 모의된 현재 강수에 적용하여 호우의 기준 (47.6 mm 이상)으로 정의한 뒤 현재 모의 및 미래 시나리오에 대해 각각의 발생빈도를 구하였다. 모델에서 모의하는 우리나라의 현재 연 호우일수는 4.3일이며, 관측 자료에 의한 연 호우일수는 4.1일로 모델이 관측값을 잘 모의하는 것으로 판단된다 (그림 5.22 a 참조). 현재 모의 연 호우일수의 공간 분포를 보면 대구, 영천, 구미, 의성 등 영남 내륙 지역에서 3일 미만으로 호우빈도가 낮고 부산, 남해, 성산, 서귀포 등 남해안 동부 및 제주도 남부 지역에서 6일 이상으로 높다 (그림 5.22 a). RCP2.6 시나리오에 의하면 호우빈도가 현재보다 지역 평균 0.7일 증가할 것으로 전망되며, 울산, 남원, 목포, 부산, 남해, 여수, 강릉, 광주, 밀양 등 동해안북부, 남부 내륙 및 남해안 지역에서 호우빈도 증가가 큰 것으로 전망된다 (그림 5.22 b). RCP4.5 시나리오에 의하면 호우빈도가 현재보다 지역 평균 0.9일 증가할 것으로 전망되며, 서해안 남부, 남해안 지역에서 대체로 호우빈도 증가가 크게 전망된다 (그림 5.22 c). RCP6.0 시나리오에 의한 호우일수 분포를 보면 지역 평균 1.3일 증가가 전망되며, 대체로 고흥, 진주, 여수, 울산 등 남해안 지역에서 3일 이상 크게 증가할 것으로 전망된다 (그림 5.22 d). RCP8.5 시나리오에 의한 호우일수 분포에서는 지역 평균 1.7일 증가가 전망되며, 남해안뿐만 아니라 남부 내륙과 제주도 남부 지역에서도 호우빈도의 증가가 클 것으로 전망된다(그림 5.22 e). 모델에서 모의하고 있는 우리나라의 현재 연 호우일수는 4.3일이며, RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5 시나리오에 의한 21세기 후반 연 호우일수는 각각 5.0일, 5.4일, 5.8일, 6.0일로 전망된다.

기후의 장기간 변화 경향을 분석하기 위하여 기후 시계열에 분위회귀분석방법(Quantile regression method)을 적용하게 되면 모든 분위에서의 변화율에 관한 정보를 얻을 수 있으며, 이는 상위 또는 하위 등 극값에서의 추세에 관심이 있는 경우 유용하다. 그림 5.23은 2011~2100년 동안 서울 관측지점의 일최고기온 시계열에서의 분위별 변화 추세를 나타낸 것이다. 분석기간 동안 대부분 계절에서 RCP4.5 시나리오보다 RCP8.5 시나리오에 의한 분위별 일최고기온의 상승이 더 클 것으로 전망되며, 상위 분위보다 하위 분위에서의 변화율이 더 클 것으로 전망된다. RCP4.5 시나리오에 의하면 가을철 일최고기온의 99퍼센타일에서 0.4℃/10년의 변화율로 가장 크게 기온이 상승할 것으로 전망되고 있으나, RCP8.5 시나리오에 의하면 겨울철 1퍼센타일에서 0.9℃/10년의 변화율로 가장 크게 일최고기온이 상승할 것으로 전망된다.

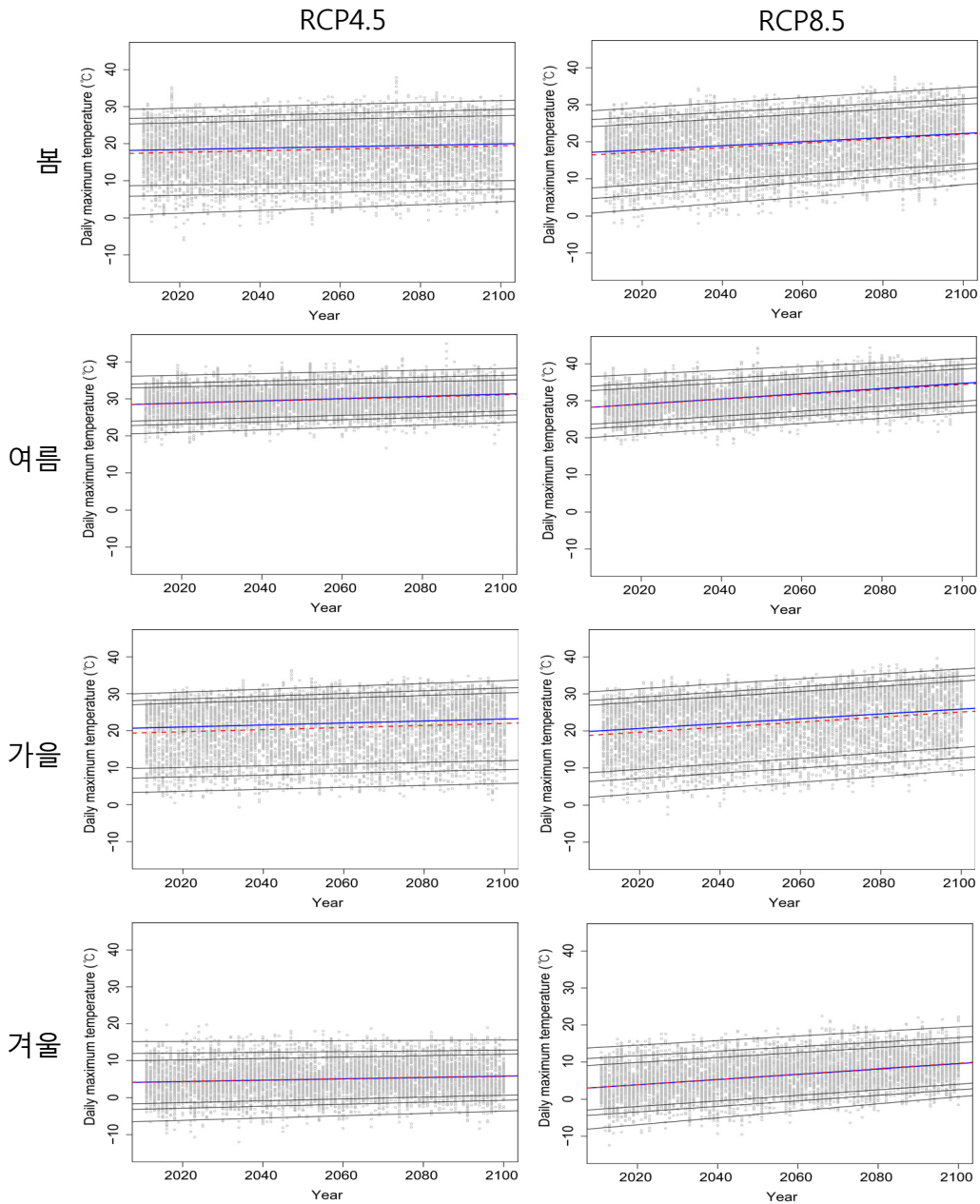


그림 5.23 2011~2100년 서울 관측지점의 일최고기온 시계열에서의 분위별 변화율
(각 그림에서 실선은 아래서부터 0.01, 0.05, 0.10, 0.50, 0.90, 0.95, 0.99
분위별 추세를 나타내며 이 중 푸른색 선은 중앙값 추세를 나타냄. 붉은색
점선은 최소제곱법에 의한 회귀선을 나타냄.)

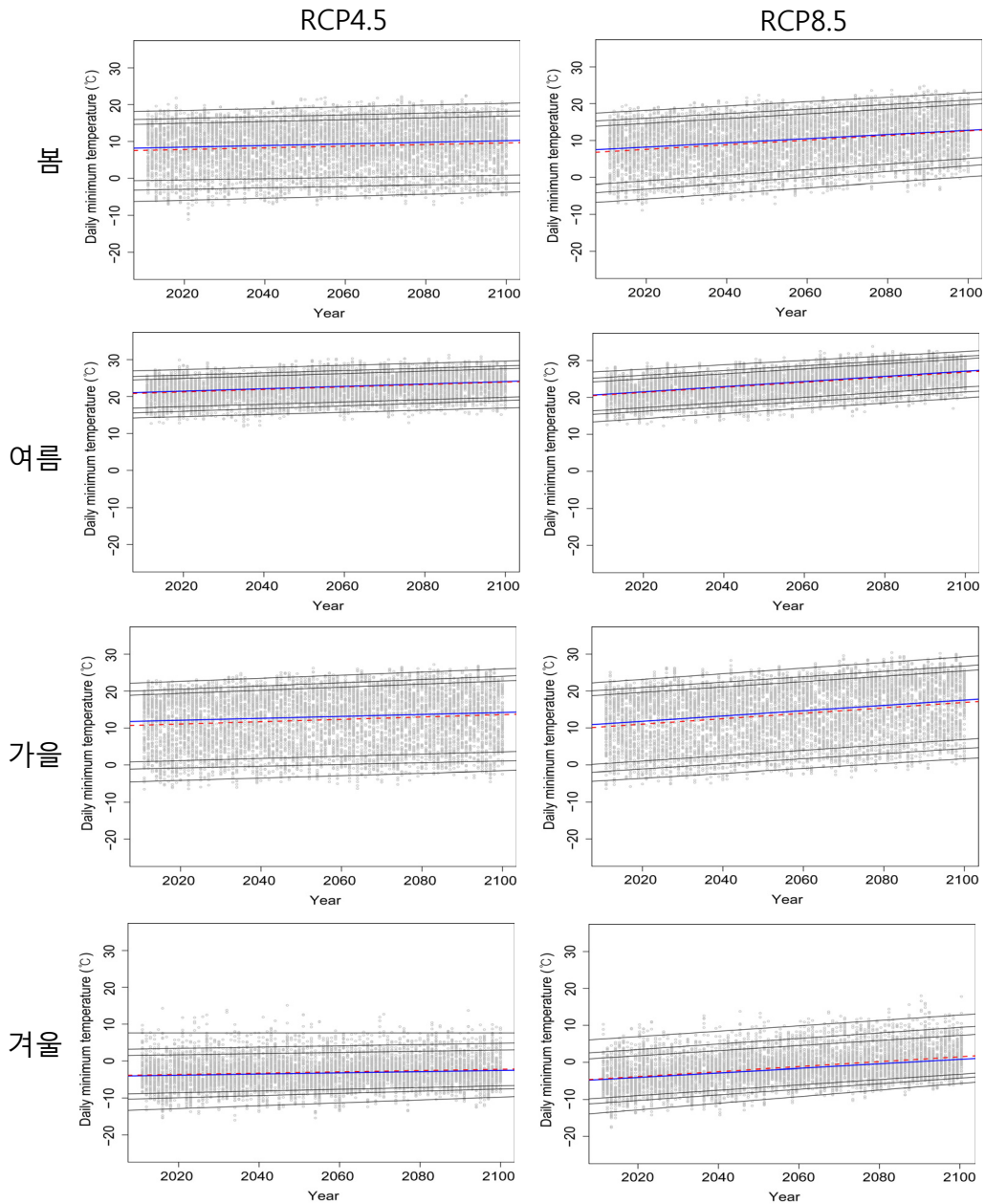


그림 5.24 2011~2100년 서울 관측지점의 일최저기온 시계열에서의 분위별 변화율
(각 그림에서 실선은 아래서부터 0.01, 0.05, 0.10, 0.50, 0.90, 0.95, 0.99 분위별 추세를 나타내며 이 중 푸른색 선은 중앙값 추세를 나타냄.
붉은색 점선은 최소제곱법에 의한 회귀선을 나타냄.)

그림 5.24는 2011~2100년 동안 서울 관측지점의 일최저기온 시계열에서의 조건부 변화 추세를 나타낸 것이다. 일최저기온의 시계열 역시 RCP4.5 시나리오보다 RCP8.5 시나리오에 의한 분위별 일최저기온의 상승이 더 클 것으로 전망되며, 대부분 계절에서 평균 변화 추세보다 상위나 하위 분위에서의 변화가 더 크고 가을철을 제외한 전 계절에서 상위 분위보다 하위 분위에서의 변화가 더 클 것으로 전망된다. 일최저기온 시계열에서 RCP4.5 시나리오에 의하면 가을철 95퍼센타일에서 기온 상승($0.4^{\circ}\text{C}/10\text{년}$)이 가장 클 것으로 전망되는 반면에 RCP8.5 시나리오에 따르면 1퍼센타일의 분위에서 $0.9^{\circ}\text{C}/10\text{년}$ 의 변화율로 일최저기온의 상승이 가장 클 것으로 전망된다.

그림 5.25는 서울 관측지점의 50 mm 이상 일강수량 시계열에서의 조건부 분위별 변화 추세를 나타낸 것이다. 50 mm 이상 일강수량의 평균 변화를 보면 RCP4.5 시나리오의 경우 50 mm 이상 일강수량이 $2.0\text{ mm}/10\text{년}$ 의 변화율로 증가할 것으로 전망되며, RCP8.5 시나리오의 경우 $2.1\text{ mm}/10\text{년}$ 의 변화율로 증가할 것으로 전망되어 두 시나리오 간에 유사한 변화 추세를 보인다. 그러나 상위 분위로 갈수록 RCP4.5보다 RCP8.5 시나리오에서 50 mm 이상 일강수량의 증가가 더 클 것으로 전망된다. 상위 극값인 99퍼센타일 (90퍼센타일)의 50 mm 이상 일강수량의 경우 RCP4.5 시나리오에 의하면 $13.5\text{ mm}/10\text{년}$ ($5.9\text{ mm}/10\text{년}$)의 변화율로 증가할 것으로 예상되는 반면에 RCP8.5 시나리오에 의하면 $30.8\text{ mm}/10\text{년}$ ($6.7\text{ mm}/10\text{년}$)의 변화율로 증가할 것으로 전망된다.

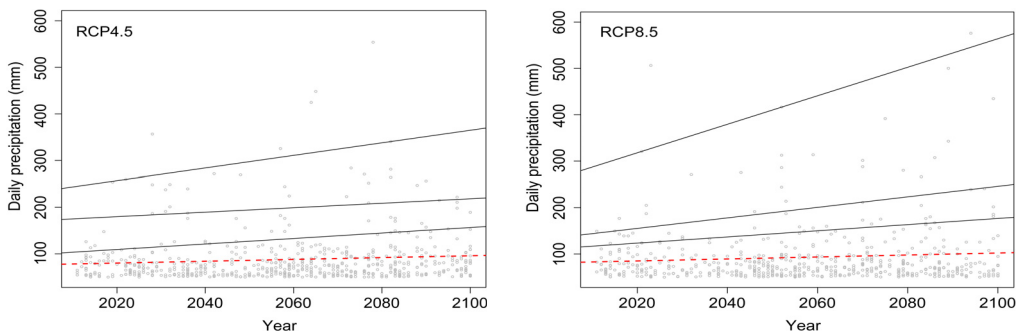


그림 5.25 2011~2100년 서울 관측지점의 50 mm 이상 일강수량 시계열에서의 분위별 변화율 (각 그림에서 실선은 아래서부터 0.90, 0.95, 0.99 분위별 추세를 나타내며, 붉은색 점선은 최소제곱법에 의한 회귀선을 나타냄.)

5.4 한반도 상층 기온변화

본 절에서는 과거 54년 동안 (1958~2011년) 한반도의 상층 기온변화를 살펴보고자 한다. 경기도 오산 지역의 라디오존데 자료를 사용하였으며, 결측이 가장 적은 시간대인 0000 UTC를 이용하여 연직 기온변화를 분석하였다. 분석에 사용된 고도는 총 14개 (1000, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 100, 70, 50, 30, 20, 10 hPa) 이다.

1958~2011년까지 고도별 시계열 그림 5.26에 나타내었다. 지상부터 대류권 영역에서는 뚜렷한 기온상승을 보였고, 특히 250 hPa에서 기온 상승 추세가 가장 높게 나타났다. 100 hPa에서는 기온상승 및 하강 추세가 거의 나타나지 않았고, 성층권 하부에서는 기온하강 추세가 나타났다. 연평균 기온의 대류권 기온 상승은 분석기간 동안 250 hPa에서 $0.25\text{ }^{\circ}\text{C decade}^{-1}$ 로 가장 높았으며, 성층권 하부 50 hPa에서는 $-0.26\text{ }^{\circ}\text{C decade}^{-1}$ 으로 기온 하강 추세를 보였다 (그림 5.27). 그림 5.28은 계절별 연직 기온변화 추세를 나타냈다. 기온변화 추세는 가을과 겨울철에 높은 기온 상승률을 보였으며 특히, 겨울철에 기온 상승률 가장 높게 나타났다. 반면, 봄과 여름철은 가을과 겨울철에 비해 비교적 낮은 상승률을 나타냈다. 가장 높은 기온 상승률은 겨울철 400 hPa 영역에서 $0.39\text{ }^{\circ}\text{C decade}^{-1}$ 로 나타났으며, 겨울철 50 hPa 영역에서 $-0.38\text{ }^{\circ}\text{C decade}^{-1}$ 로 가장 높은 기온하강 추세를 보였다.

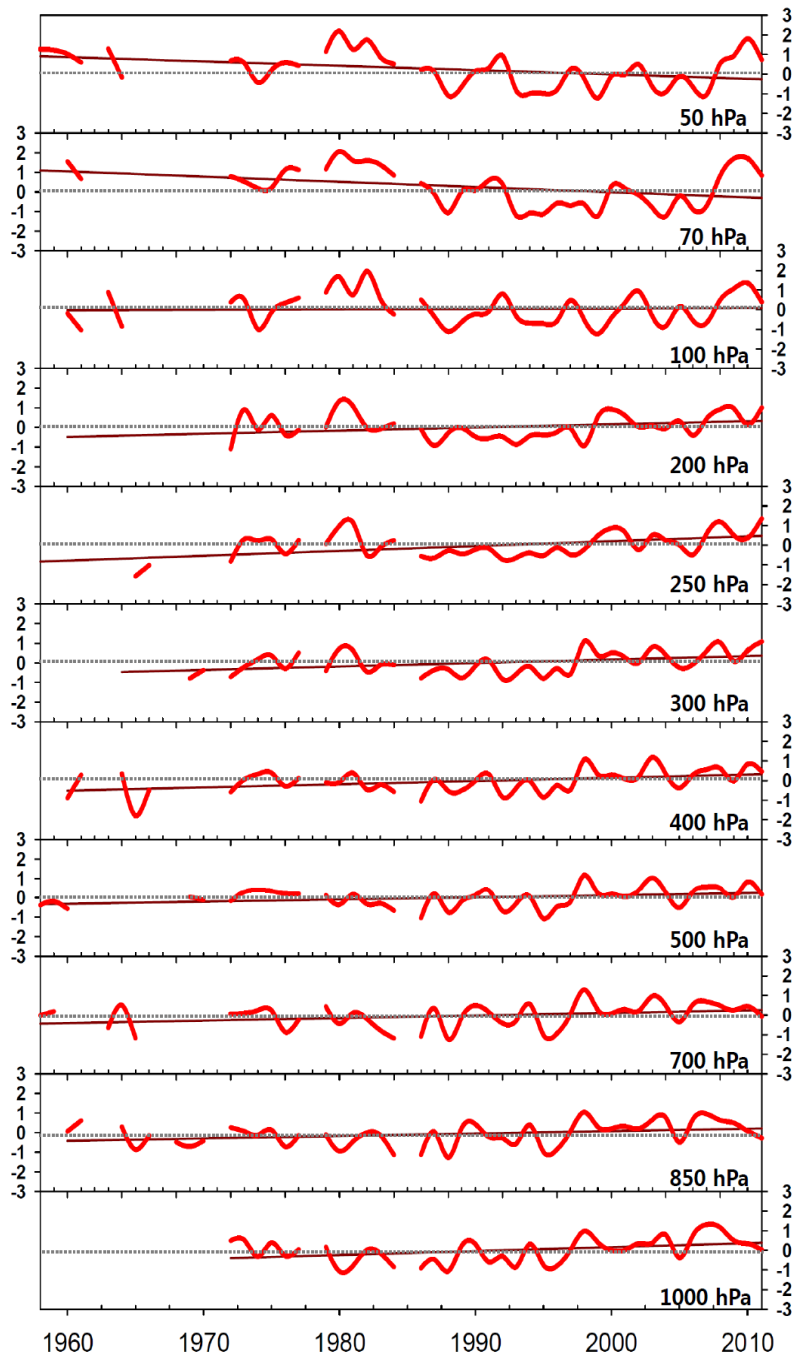


그림 5.26 1958~2011년의 고도별 연직 기온 시계열 변화 (단위, $^{\circ}\text{C}$).

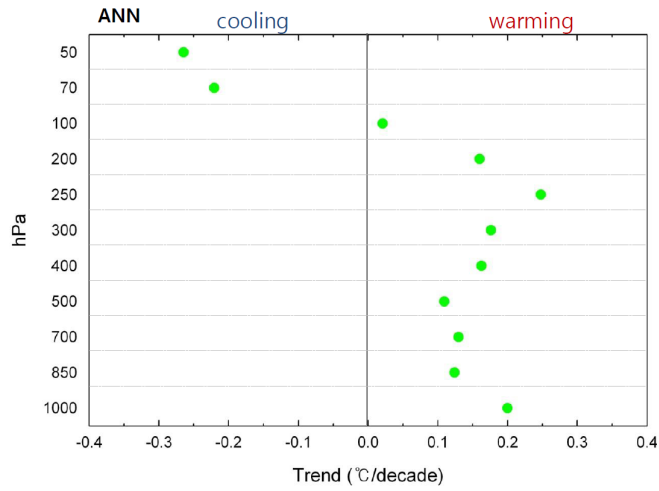


그림 5.27 1958~2011년의 연평균 상층의 기온상승 추세변화 (단위, $^{\circ}\text{C decade}^{-1}$).

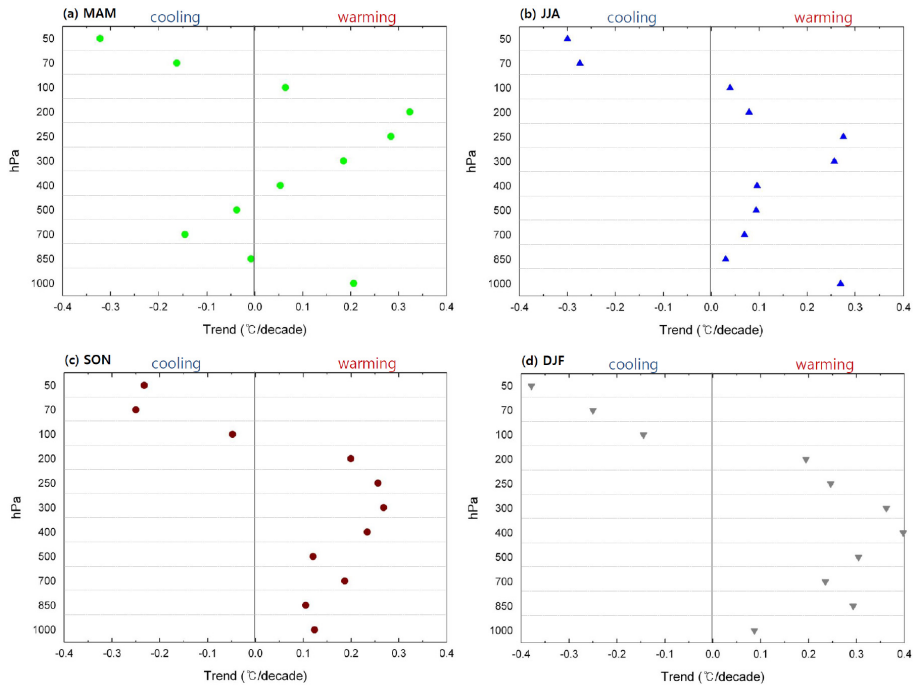


그림 5.28 1958~2011년의 계절별 상층의 기온상승 추세변화. (a) 봄 (3월-5월), (b) 여름 (6월-8월), (c) 가을 (9-11월), (d) 겨울 (12월-2월) (단위, $^{\circ}\text{C decade}^{-1}$).

1000–850 hPa 간의 기온감률 (lapse rate)을 1972~2011년까지 과거 20년 (1972~1991년)과 최근 20년 (1992~2011년)으로 나누어 분석하였다. 지난 40년 동안 기온감률은 추세변화가 거의 나타나지 않았다. 하지만 과거 20년에는 전체 기간의 기온감률 변화보다 더 낮은 기온감률 하강 추세를 보였으며, 최근 20년은 과거 20년의 기온감률 감소추세와 반대로 상승 추세를 보였다 (그림 5.29).

존데자료를 이용한 분위 분석에서 25분위는 대기가 가장 안정한 경우를 의미하며, 75분위는 가장 불안정한 경우를 의미한다 (Gaffen et al., 2000). 과거 20년에는 전체 기간보다 더 낮은 기온감률 감소추세를 보였고, 최근 20년에는 상승 추세를 나타냈다. 과거 대비 최근 20년에는 불안정한 경우 (75분위)의 추세 $0.017\text{ }^{\circ}\text{C km}^{-1}\text{ decade}^{-1}$ 보다 안정한 경우 (25분위)의 추세 $0.022\text{ }^{\circ}\text{C km}^{-1}\text{ decade}^{-1}$ 로 더 높은 증가율을 보였다 (그림 5.30).

그림 5.31에서는 계절별로 기온감률 추세변화를 분위별로 분석하였다. 모든 계절에서 기온감률의 변화는 과거에서 현재로 오면서 불안정해지는 추세를 보였다. 특히, 봄철에 과거 20년 보다 최근 20년에 기온감률이 가장 크게 증가하였다.

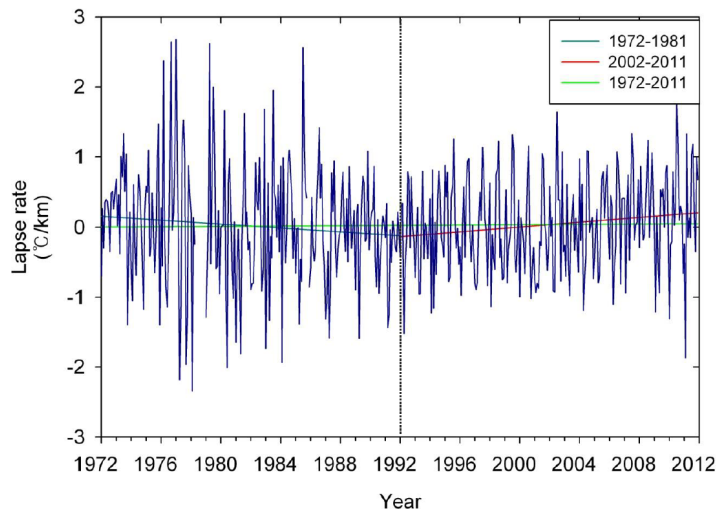


그림 5.29 1972~2011년의 기온감률 시계열 변화 (단위, $^{\circ}\text{C km}^{-1}$).

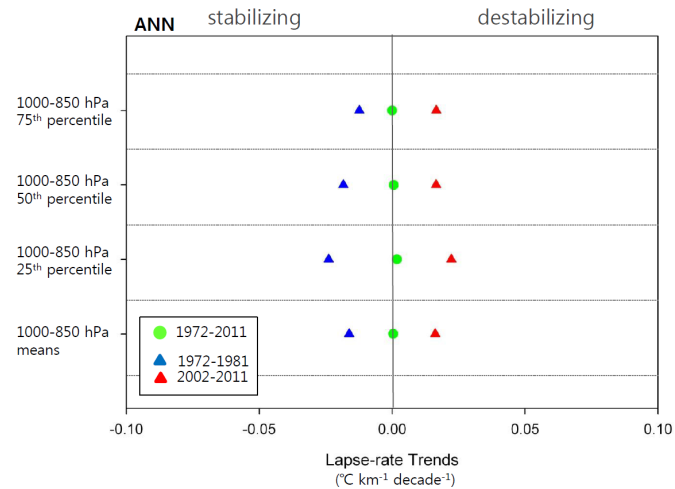


그림 5.30 1972~2011년의 분위별 연평균 기온감률 변화 (단위 $^{\circ}\text{C km}^{-1} \text{ decade}^{-1}$).

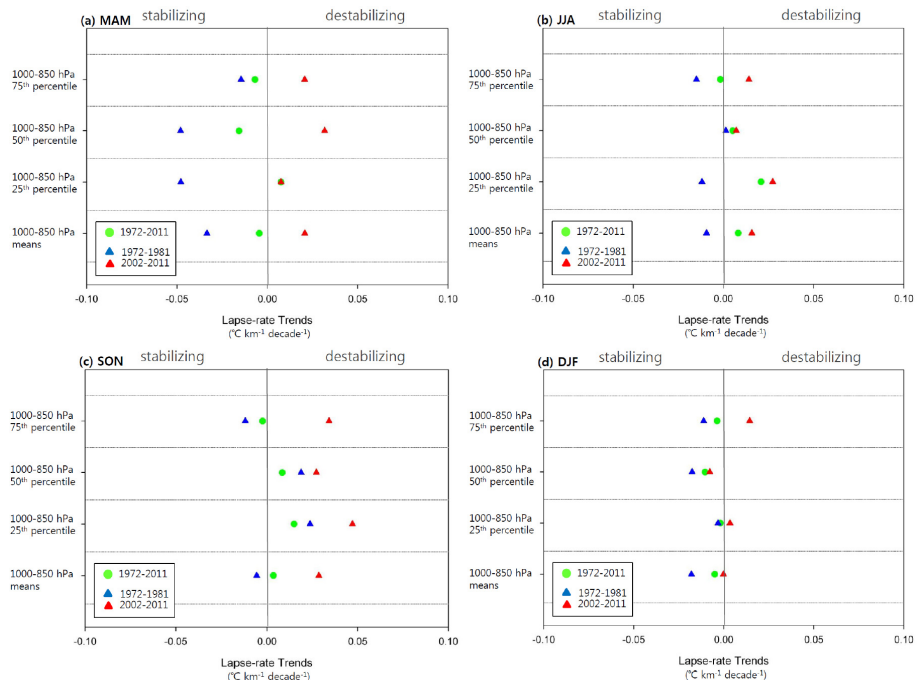


그림 5.31 1972~2011년의 계절별로 분위별 기온감률 변화. (a) 봄 (3월-5월), (b) 여름 (6월-8월), (c) 가을 (9-11월), (d) 겨울 (12월-2월) (단위, $^{\circ}\text{C km}^{-1} \text{ decade}^{-1}$).

6. 에어로졸과 탄소순환 전망

HadGEM2에서 산출되는 기후변화시나리오에는 대기, 해양시스템의 변화와 더불어 에어로졸과 탄소순환에 대한 정보가 포함된다. HadGEM2은 6종의 에어로졸을 고려하는데 이중 먼지에어로졸은 외부강제력으로 입력되지 않고 대기경계층과정에서 계산된다. 변화된 기후조건에서 먼지에어로졸 배출량이 영향을 받고 에어로졸은 장·단파복사의 산란, 흡수의 직접효과를 통해 기후와 상호작용을 한다. 이 에어로졸 자료는 동북아시아 봄철 황사발생을 전망하는데 활용될 수 있다. 이에 아시아지역 봄철 먼지에어로졸의 변화를 전망하고 더불어 HadGEM2의 탄소순환과정을 이용하여 21세기 육상 및 해양 탄소의 변화를 전망하였다.

6.1 에어로졸

북동아시아지역 봄철 먼지 에어로졸의 배출량 변화를 전망하였다. 과거와 미래 RCP 2종 (8.5, 4.5)에 대한 3개의 앙상블 적분결과를 평균하였다. 북동아시아 (30~55N, 80~145E) 영역은 사막지역과 건조한 지역으로서 아시아의 먼지 에어로졸 발생 근원지가 포함되어 있다. 영역 평균한 먼지 에어로졸의 연변동과 4-5월 변동을 살펴보면 (그림 6.1, 그림 6.2), 연변동과 4-5월 변동은 변화추세가 유사하고, 월별 방출량중 4-5월이 가장 크다. RCP8.5에 따르면 연변동과 4-5월 평균 변동에서는 21세기말 먼지 방출이 증가가 뚜렷하나, RCP4.5에서는 4-5월 평균 변동에서 21세기말 먼지 방출이 상대적으로 작은 폭으로 증가하였다. 표 6.1은 북동아시아 지역의 20세기말 (1971~2000년) 대비 21세기 미래 (2071~2100년)의 먼지 방출 전망을 정량적으로 표시하였다. RCP4.5에 따르면 연별 배출량은 미래는 거의 변화가 없는 반면, RCP8.5에서는 미래는 10.3% 증가를 전망한다. 동아시아 지역에 먼지 발생이 빈번한 4-5월의 배출량은 RCP4.5에서는 현재대비 미래는 7.4% 증가, RCP8.5에서는 미래는 12.1% 증가가 전망된다. RCP8.5에서 4-5월 배출량은 RCP4.5에서 전망된 양보다 약 1.6배 크다.

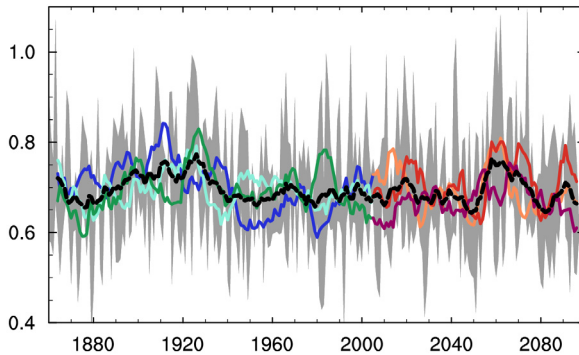
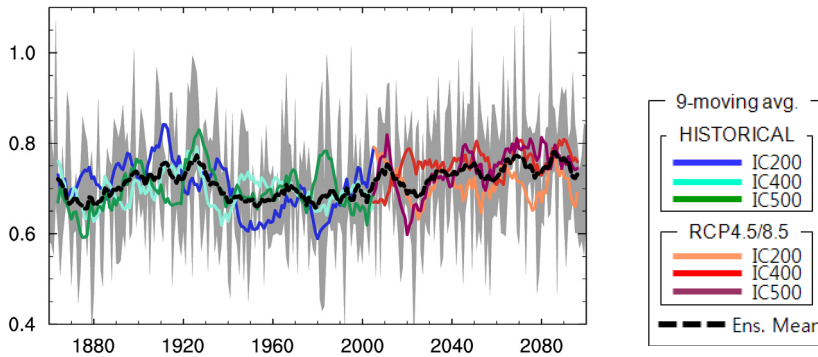
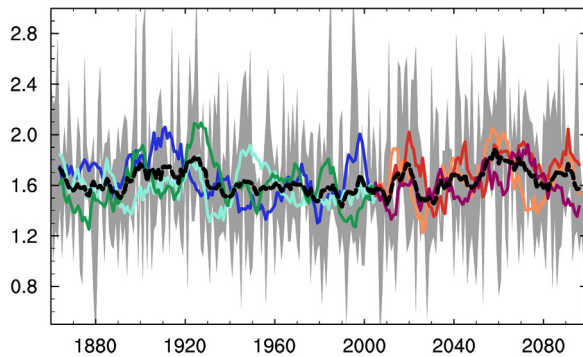
(a) Annual Dust Emission of RCP4.5 [$\text{g km}^2 \text{mon}^{-1}$](b) Annual Dust Emission of RCP8.5 [$\text{g km}^2 \text{mon}^{-1}$]

그림 6.1 과거 (1860~2005) 및 미래 (2006~2100) IPCC RCP4.5, 8.5 시나리오에 근거한 북동아시아 지역 (30N~55N, 80E~145E)의 연간 먼지 배출량. 파랑색, 하늘색, 초록색은 과거기후적분 앙상블 멤버이며, 주황색, 빨강색, 보라색은 미래 기후 앙상블멤버로 검정 점선은 앙상블평균임. (단위, $\text{g km}^2 \text{mon}^{-1}$)

그림 6.3은 20세기말 (1971~2000년)과 21세기말 (2076~2100년) 먼지 에어로졸의 4-5월 배출량 변화와 토양수분속의 변화를 시나리오별로 구분한 것이다. 그림 6.3 (a)에서 20세기말 몽골 남부 지역이 주요 배출원으로 나타난다. RCP4.5에서 20세기말 대비 21세기 말에서는 몽골지역 먼지 주요 배출원지역에서는 배출이 감소하지만 중국의 북동 지역에서 먼지 방출이 증가한다. RCP8.5 전망자료의 21세기말에서는 몽골지역의 북위 42도 이상 되는 지역과 중국 북동쪽 지역에 먼지 에어로졸의 방출

이 증가한다. 먼지 에어로졸 발생의 기상 조건은 지표면의 습윤한 정도와 지표면 부근 풍속에 의해서 결정된다. RCP8.5에서의 42도이북지역의 먼지 방출이 뚜렷한 지역은 지표면의 수분함량과 연관이 크다 (그림 6.3 d,e,f). 지표면 수분함량이 감소하는 지역에서는 먼지 방출이 증가하였으며, 지표면의 수분함량이 증가하는 지역에서는 먼지 방출이 감소하였다 (그림 6.3 d,e,f).

(a) April-May Dust Emission of RCP4.5 [$\text{g km}^2 \text{mon}^{-1}$]



(b) April-May Dust Emission of RCP8.5 [$\text{g km}^2 \text{mon}^{-1}$]

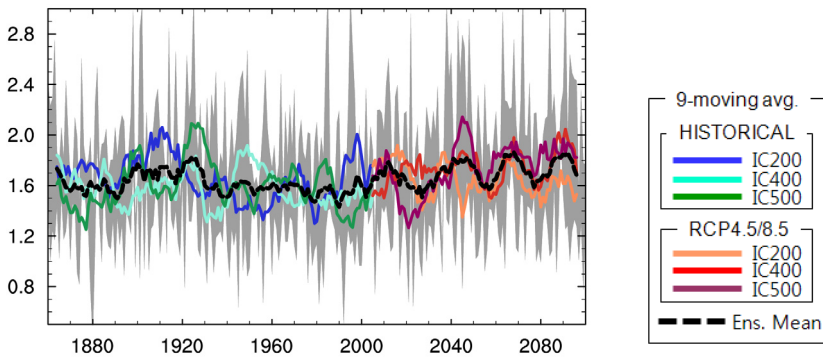


그림 6.2 과거 (1860~2005) 및 미래 (2006~2100) IPCC RCP4.5, 8.5 시나리오에 근거한 북동아시아 지역 (30N~55N, 80E~145E)의 4~5월 먼지 방출량. 파랑색, 하늘색, 초록색은 과거기후적분 앙상블 멤버이며, 주황색, 빨강색, 보라색은 미래 기후 앙상블멤버로 검정 점선은 앙상블평균임. (단위, $\text{g km}^2 \text{mon}^{-1}$)

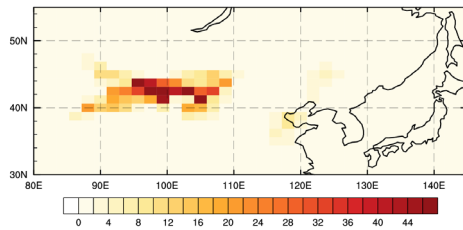
표 6.1 북동아시아 지역 (30N~55N, 80E~145E)의 먼지 방출 전망.

실험	연간 미래 먼지 방출 전망 (2021-2050 / 2071-2100)	4-5월 먼지 방출 전망 (2021-2050 / 2071-2100)
RCP4.5	-1.1% / - 0.0% ^{1,2}	2.7% / 7.4%
RCP8.5	6.9% / 10.3%	10.2% / 12.1%

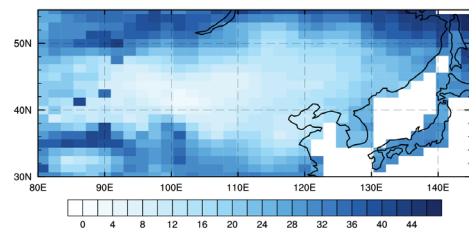
¹ 수치는 소수 둘째자리에서 반올림.

² 30년 (1971~2000년) 기준기간 대비 미래 30년 (2071~2100년) 값

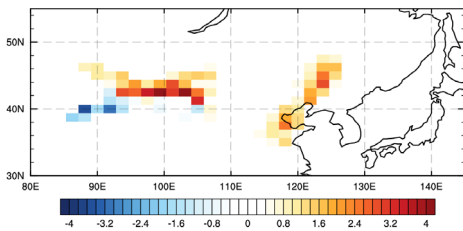
(a) HIST (1971~2000년)



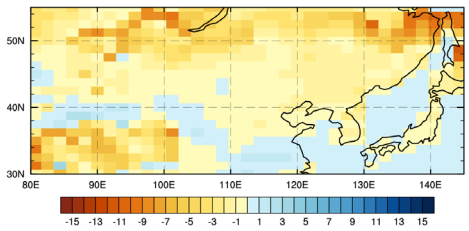
(d) HIST (1971~2000년)



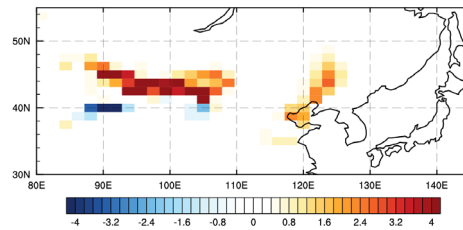
(b) RCP4.5 (2071~2100년) - HIST



(e) RCP4.5 (2071~2100년) - HIST



(c) RCP8.5 (2071~2100년) - HIST



(f) RCP8.5 (2071~2100년) - HIST

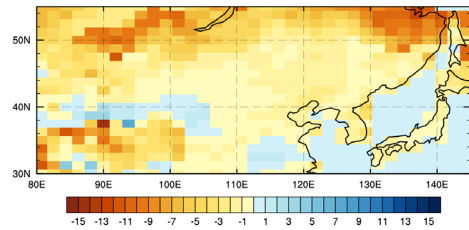


그림 6.3 (a) 20세기말 (1971~2000년) 양상블 평균한 4-5월 먼지 에어로졸 배출량 분포. (단위, $\text{g km}^2 \text{mon}^{-1}$) (b), (c) 20세기말 대비 미래 (2071~2100년)의 4-5월 먼지 에어로졸 배출량 변화. (d) 20세기말 (1971~2000년) 양상블 평균한 4-5월 토양수분속 분포. (단위, mm) (e), (f) 20세기말 대비 미래 (2071~2100년)의 4-5월 토양수분속 변화. (b), (d) RCP4.5 미래 시나리오. (c), (e) RCP8.5 미래 시나리오.

6.2 탄소순환

6.2.1 육상탄소순환

탄소는 생명활동이 유지되기 위해 가장 기본적인 물질로서 대기 중에서 CO_2 가스 상으로 존재한다. 식물은 광합성을 통해 탄소를 식물체에 고정하고 식물체를 유지하며 호흡 (줄기, 잎, 뿌리 등)을 통해 대기로 이산화탄소를 방출하여 탄소순환을 변화시킨다. 이때 생산되는 에너지는 식물이 사용할 수 있으며 순일차생산량 (Net Primary Production, NPP)이라 정의한다.

탄소순환과정이 결합된 HadGEM2은 5종류의 식물 (활엽수림, 침엽수림, C3형 초지, C4형 초지, 관목)¹⁰⁾에 대한 NPP를 산출한다. RCP4.5에서 C3 NPP는 21세기말 (2075~2099년)에 남중국에서 가장 많이 증가가 전망된다. C4 NPP는 남중국에서 거의 변하지 않고 사하라 이남 아프리카에서 감소가 전망된다 (그림 6.4c, d). RCP8.5에서 21세기말에 C3 NPP는 거의 모든 지역에서 크게 증가할 것으로 전망된다. C4 NPP는 C3에 비해 상대적으로 지역적인 변화가 크게 나타난다 (그림 6.4e, f).

10) C3와 C4형 식물은 농경지와 초지 모두 포함되며, C3형 식물은 쌀, 밀, 콩 등의 온대식물, C4형 식물은 옥수수, 사탕수수 등의 열대식물이 해당됨. 관목은 줄기와 가지가 구분이 뚜렷하지 않은 2m 이내의 식물을 말함

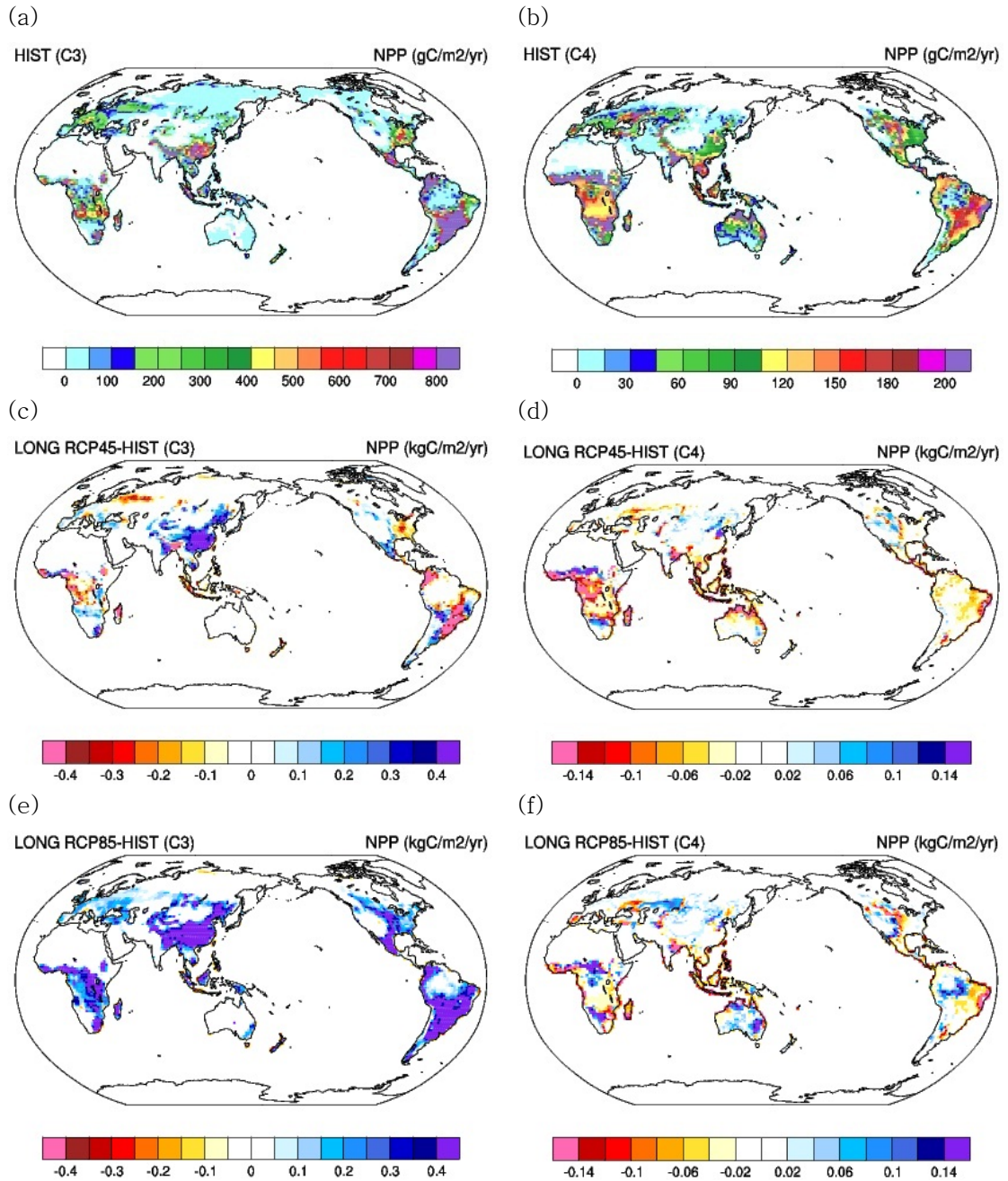


그림 6.4 HadGEM2-CC가 모의한 20세기말 (1981-2005년) (a) C3와 (b) C4의 NPP 분포 (단위, gC m⁻²yr⁻¹). 20세기말 (1981-2005년)과 21세기말 (2075-2099년)의 C3와 C4의 분포차이 (단위, kgC m⁻²yr⁻¹). RCP4.5 (c, d)와 RCP8.5 (e, f).

6.2.2 해양탄소순환

지난 200년 동안 해양은 인위적으로 방출된 이산화탄소의 약 30%를 흡수하여 해양 생지화학 상태에 많은 변화를 겪고 있다. 특히 바다 표층 pH는 약 0.1 pH단위까지 떨어졌으며 대양별, 연안별 pH 변화율에는 불확실성이 크다. 이에 HadGEM2-Carbon Cycle을 이용하여 대기 이산화탄소 증가에 따른 해양의 생지화학 상태 변화를 전망하였다.

20세기말 표층 pH는 용승 지역인 적도 동태평양 지역에서 낮고, 차갑고 생물활동이 활발한 양반구 중위도 지역에서 높다 (그림 6.5a). RCP4.5에서 20세기말 대비 21세기말에는 북극해지역을 제외하고 대부분의 해양에서 비슷한 크기로 pH가 감소하고, RCP8.5에서는 양반구 모두 중위도 이상 해양에서 감소가 더욱 뚜렷하다 (그림 6.5b, c). 20세기말 8.1에서 RCP4.5에서는 7.9, RCP8.5에서는 7.8로 감소가 전망된다. pH 0.1 감소는 해양 수소이온 농도의 약 30% 증가를 의미한다.

해양의 생지화학 성분의 변화는 탄산칼슘 (CaCO_3)을 아라고나이트 형태로 저장하고 있는 해양생물에 영향을 미치게 된다 (그림 6.6). 20세기말에는 열대해양에서 산호가 안정적으로 생존할 수 있는 조건인 아라고나이트 포화도 3.25 이상의 값이 유지된다 (그림 6.6a). RCP4.5와 8.5에서 아라고나이트 포화도는 20세기말 (1981~2005년) 대비 21세기말 (2075~2099년)에 각각 18.2%, 35.8% 감소가 전망되는데, 특히 RCP8.5에서는 열대 해양 대부분의 지역에서 3.25 이하의 값이 전망된다 (그림 6.6b, 6.6c).

적도 동태평양에서는 강한 용승을 통해 깊은 바다에서 표층으로 영양분이 공급된다. 20세기말 식물성 플랑크톤이 이 지역에서 풍부한 것이 이 때문이다 (그림 6.7a). 이 지역은 RCP에 따르면 적도 동서순환의 변화에 따라 용승이 약화되어 표층 영양분과 식물성 플랑크톤이 감소할 것이 전망된다. RCP4.5와 8.5에서 20세기말 대비 21세기말에 각각 8%, 14% 식물성 플랑크톤 감소가 전망된다 (그림 6.7b, 6.7c). 캄차카 반도, 알래스카와 남극 연안에서는 플랑크톤의 증가가 전망된다.

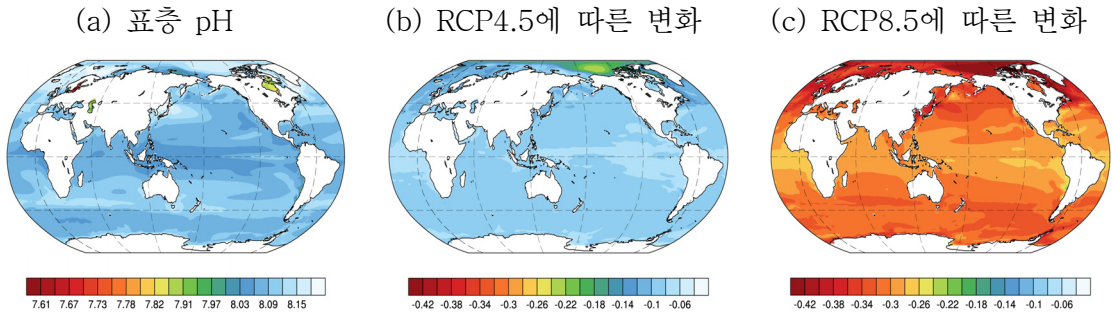


그림 6.5 (a) 20세기말 (1981~2005년) 표층 pH 분포 (단위, pH 단위). 20세기말 대비 21세기말 (2075~2099년) 표층 pH 변화 (단위, pH 단위). (b) RCP4.5 시나리오, (c) RCP8.5 시나리오.

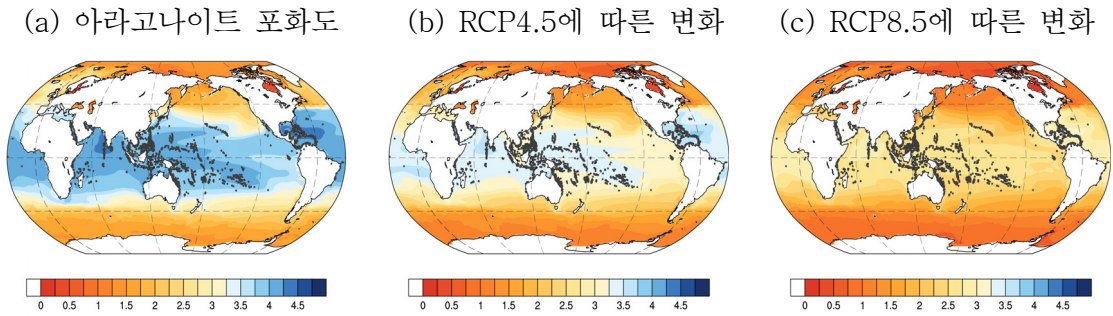


그림 6.6 아라고나이트 포화도 분포 (a) 20세기말 (1981~2005년), (b) RCP4.5 시나리오, (c) RCP8.5에 따른 21세기말 (2075~2099년). 회색점은 산호초 위치를 나타냄 (출처, ReefBase <http://www.reefbase.org>).

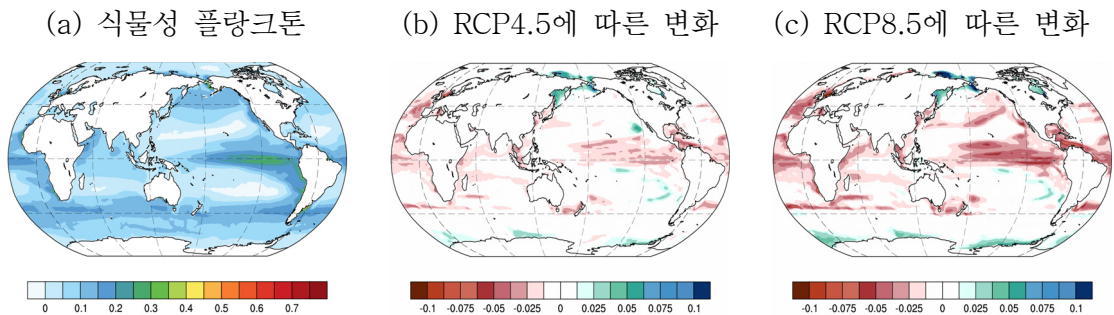


그림 6.7 (a) 20세기말 (1981~2005년) 식물성 플랑크톤 분포 (단위, $\mu\text{mol l}^{-1}$), 20세기말 대비 21세기말 (2075~2099년) 식물성 플랑크톤 변화 (단위, pH 단위). (b) RCP4.5 시나리오, (c) RCP8.5 시나리오

참고문헌

이승호, 2007: 기후학, 푸른길, 440pp.

Alexander, L.V., Zhang, X., T.C., Caesar, J., Cleason, B., Klein Tank, A.M.G., Haylock, M., Collins, D., Trewin, B., Rahimzadeh, F., Tagipour, A., Rupa Kumar, K., Revadekar, J., Griffiths, G., Vincent, L., Stephenson, D.B., Burn, J., Aguilar, E., Brunet, M., Taylor, M., New, M., Zhai, P., Rusticucci, M. and Vazquez-Aguirre, J.L., 2006: Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation., *J. Geophys. Res.*, **111**, 1-22.

Bintanja, R. and R. G. Graversen, and W. Hazeleger, 2011: Arctic winter warming amplified by the thermal inversion and consequent low infrared cooling to space. *Nature Geoscience*, **4**, 758-761.

Bister, M. and K. A. Emanuel, 1998: Dissipative Heating and Hurricane Intensity. *Meteorol. Atmos. Phys.* **65**, 233-240.

Church, J. A. and N.J. White, 2011: Sea-level rise from the late 19th to the early 21st Century. *Surveys in Geophysics*, **32**, 585-602, doi:10.1007/s10712-011-9119-1.

Gaffen, Dian J., Benjamin D. Santer, James S. Boyle, John R. Christy, Nicholas E. Graham, Rebecca J. Ross, 2000: Multidecadal changes in the vertical temperature structure of the tropical troposphere, *Sci.*, **287**, 1242-1245.

Reichler T. and J. Kim, 2008: How well do coupled models simulate today's climate? *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **89**, 303-311.

Suzuki, T., H. Hasumi., T. T. Skamoto, T. Nishimura, A. Abe-Ouchi, T. Segawa, N. Okada, A. Oka andddd S. Emori, 2005: Projection of future sea level and its variability in a high-resolution climate model: Ocean processes and Greenland and Antarctic ice-melt contributions. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L19706, doi:10.1029/2005GL023677.

Yamaguchi, K., and A. Noda, 2006: Global warming patterns over the North Pacific: ENSO versus AO. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **84**, 221-241.

기여저자와 편집자

1. 개요	조천호 백희정
2. 시나리오 산출과 단일 강제력 실험	
2.1 시나리오 산출방법	이효신
2.2 단일강제력 실험	심성보
3. CMIP5 참여 기후변화모델의 성능과 미래 기후 전망	
3.1 CMIP5 참여모델의 성능 평가	현유경 김준수
3.2 기온 및 강수량 미래 전망	김민지
3.3 대기 순환 미래 전망	최다희 정유림
3.4 태풍	현유경 김경나
4. HadGEM2-AO 기후모의 및 미래 변화	
4.1 기온	이종화
4.2 강수	김민지
4.3 물순환	김문현
4.4 해양	이효신
4.5 해빙	이조한
4.6 기후구분	김민지
5. 우리나라 기후변화	
5.1 전지구 기후변화모델에 따른 한반도 기온과 강수의 미래 전망	김민지
5.2 지역 기후변화모델에 따른 기후모의 성능 및 미래 전망	이인혜 박준성
5.3 극한 기온 및 강수 변화	이경미
5.4 한반도 상층 기온변화	이재호
6. 에어로졸과 탄소순환 전망	
6.1 에어로졸	박수현
6.2 탄소순환	설경희 박성빈 김재훈 이철
편집	조천호 이현정

부록: 약어

AOD	Aerosol Optical Depth
AR5	5th Assessment Report
CDD	Consecutive Dry Days
CMAP	Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation
CMIP5	Coupled Model Intercomparison Project Phase5
CRU	Climate Research Unit
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ETCCDMI	Expert Team for Climate Change Detection Monitoring and Indices
HadGEM2-AO	the Hadley Centre Global Environment Model version 2 - Coupled Atmosphere-Ocean model
HadGEM2-A	the Hadley Centre Global Environment Model version 2 - Atmosphere model
HadGEM3-RA	the Hadley Centre Global Environment Model version 3 - Regional Atmosphere model
IGBP	International Geosphere-Biosphere Programme
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
RCP	Representative Concentration Pathways
SDII	Simple Daily Intensity Index
TRIP	Total Runoff Integrated Pathways

인쇄일 | 2012년 12월 인쇄

발행일 | 2012년 12월 발행

발행처 | 국립기상연구소 기후연구과

발행인 | 남재철

국립기상연구소

서울시 동작구 여의대방로16길 61

070-7850-6500

<http://www.nimr.go.kr>
