



IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한

기후변화 시나리오 보고서 2011

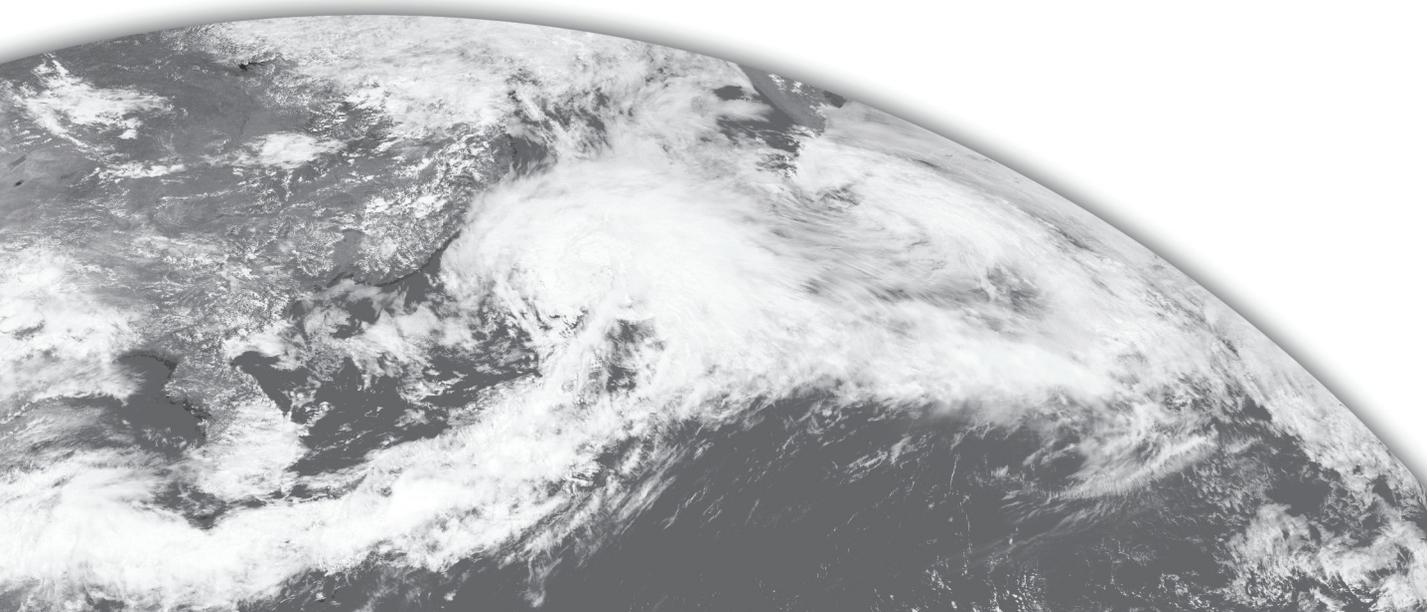


표지내용: 천리안 위성사진(2010년 7월 12일)
국가기상위성센터 제공



IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한

기후변화 시나리오 보고서 2011



목 차

요약문	iii
1. 개요	1
2. 강제력 및 실험방법	3
2.1 자연 강제력	3
2.2 대표농도경로	4
2.3 에어러솔	6
2.4 지표피복	10
2.5 기후변화 예측모델	13
2.6 실험방법	14
3. 전지구 기후변화	17
3.1 현재 기후의 모의 성능	17
3.2 전지구 미래 전망	27
3.3 전지구 극한 기온	35
3.4 전지구 극한 강수	41
3.5 태풍	47
4. 동아시아 기후변화	52
4.1 현재 기후의 모의 성능	52
4.2 기온과 강수의 미래 변화	57
4.3 수문변화	60
5. 해양 변화	70
5.1 해수면 온도	70
5.2 해수면 고도	73
5.3 해빙면적	77
6. 우리나라 상세 기후변화	79
6.1 우리나라 기후변화 시나리오 산출 방법	79
6.2 기온과 강수의 미래 변화	82

6.3 극한 기후의 변화	100
6.4 기후구의 변화	110
맺는 글	112
참고문헌	113
기여저자와 편집자	116
부록: 약어	117

요 약 문

전지구 기후변화 시나리오는 국제 기후변화모델 비교 사업 (CMIP5)에서 제시된 실험 방법으로 수평 분해능 약 135 km의 기후변화모델 (HadGEM2-AO)로 산출되었다. 기후변화 시나리오의 초기값은 1860년에서 200년 이상의 제어적분으로 산출되었다. 이 초기값으로 1860년 이후 146년(1860~2005년) 동안의 과거 기후를 모사하였으며, 이후 미래 (2006~2100년)에 대한 기후변화 시나리오를 생산하였다.

- 온실가스 시나리오 RCP 2중 (8.5, 4.5)에 대한 21세기 말 기후변화 전망을 요약하면 다음과 같다.

표 A1. 21세기 말 지구평균 기온, 강수량, 해수면 상승 전망.

RCP 시나리오		RCP4.5 (540 ppm ¹)	RCP8.5 (940 ppm)
지구평균	기온 (°C)	+2.8°C ²	+4.8°C
	강수량 (%)	+4.5%	+6.0%
	해수면고도 ³	72.7 cm	90.0 cm

¹ 2100년 이산화탄소 농도
² 30년 (1971~2000년) 기준기간 대비 미래 30년 (2070~2099)값
³ 준경험적 방식에 의한 해수면고도 변화 전망치로 열팽창과 육빙녹음 효과를 모두 포함함

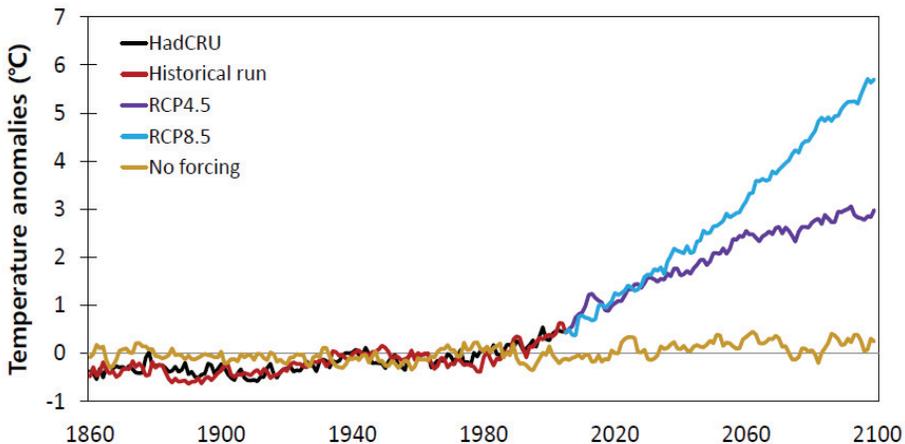


그림 A1. 1971~2000년 대비 1860~2099년 전지구 평균 1.5 m 기온의 변화.

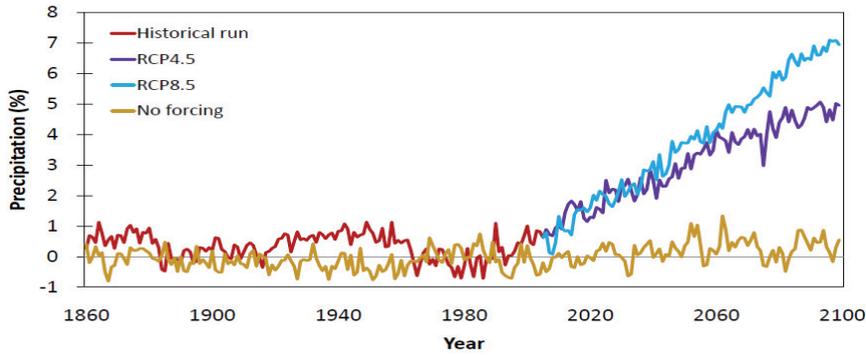


그림 A2. 1971~2000년 대비 1860~2099년 전지구 평균 강수의 변화.

- 전지구 기온 상승은 지역에 따라 차이는 있으나 대부분 상승할 것으로 전망되며, 강수량은 지역에 따라 증가 또는 감소될 전망이다.

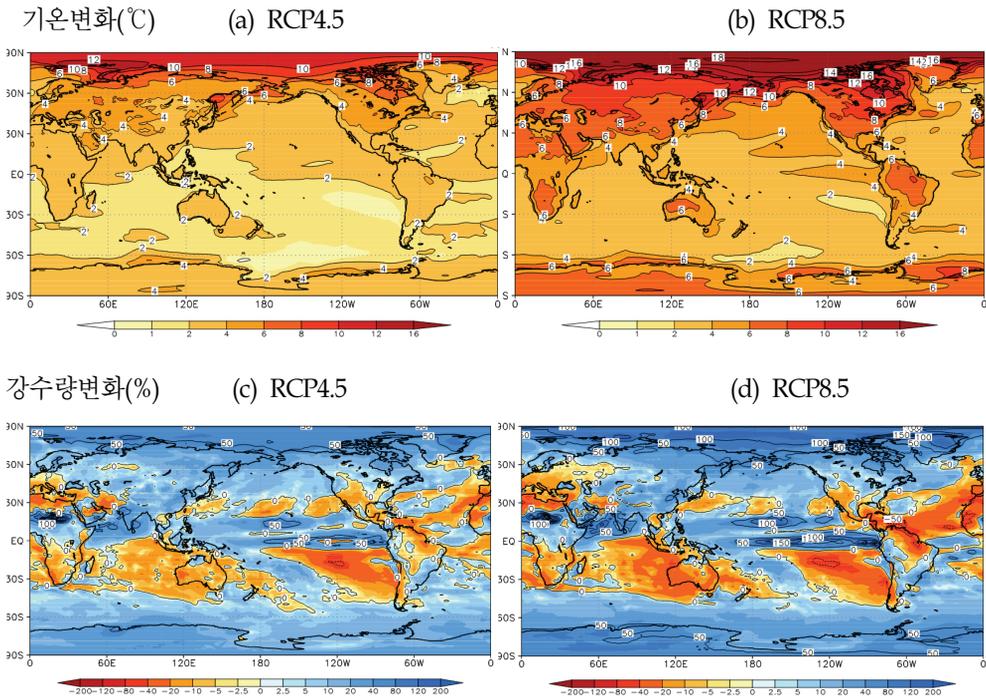


그림 A3. (a) RCP4.5, (b) RCP8.5 시나리오에 의한 20세기 말 (1971~2000년) 대비 21세기 말 (2070~2099년) 전지구 기온과 (c) RCP4.5, (d) RCP8.5 시나리오에 의한 20세기 말 (1971~2000년) 대비 21세기 말 (2070~2099년) 강수량 변화.

- 해수면 온도 증가가 예상되며, 특히 아시아와 북미 대륙의 동안에서 상대적으로 크게 증가될 것이다. 그리고 우리나라 주변 해역은 온실가스 시나리오에 따라 2.9℃ (RCP4.5)~4.7℃ (RCP8.5) 증가가 전망된다.
- 육빙녹음과 열팽창에 의한 해수면 고도 변화는 21세기 말에 20세기 말에 비해 72.7 cm (RCP4.5)와 90.0 cm (RCP8.5)의 상승이 예상된다.

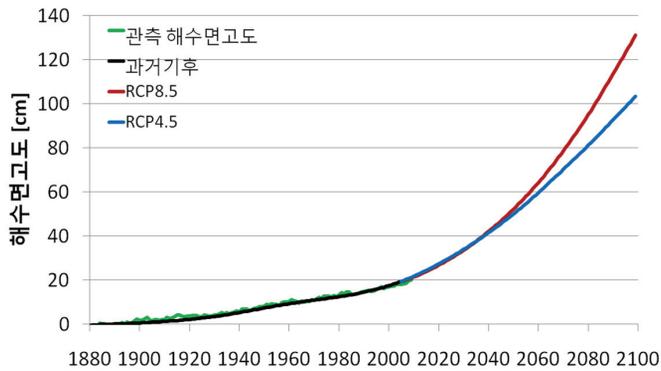


그림 A4. 전지구 평균 해수면 고도의 시간 변화. 각 실선은 검정색 선은 과거기후, 파랑 색 선은 RCP4.5이며, 빨강색 선은 RCP8.5 시나리오이다.

- 북극 해빙 면적의 변화는 21세기 말에 56.0% (RCP4.5)와 31.0% (RCP8.5)로 감소 될 것으로 전망된다.

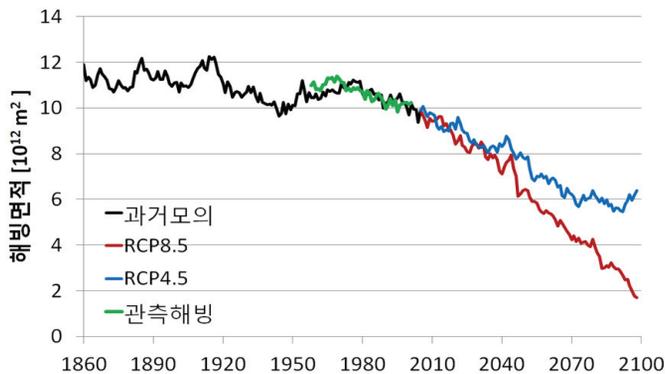


그림 A5. 1860~2099년 동안 북극 해빙 변화의 시계열.

- 동아시아 지역은 강수량이 증가할 것으로 전망되나, 기온 증가에 따른 증발량도 증가하므로, 표층의 토양 수분은 일부 지역을 제외하고는 줄어들고 심층에 대해서는 증가할 것으로 전망된다.

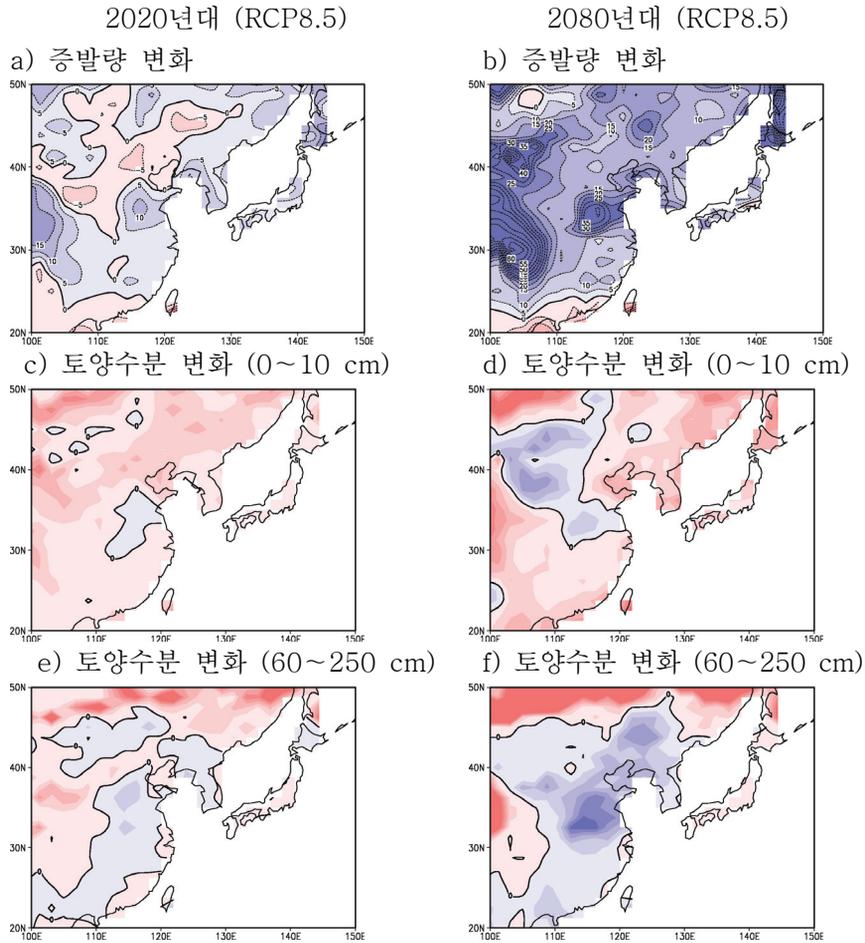


그림 A6. RCP8.5에 대한 미래 증발량, 토양 수분 변화를 나타내며, 파란색이 양의 값을 나타낸다.

- RCP8.5에 대해서 한랭야는 전지구 평균 2.8일/10년 비율로 감소하고 온난야는 15.7일/10년 비율로 증가하는 등, 한랭야와 한랭일은 감소하는 반면에 온난야와 온난일은 증가할 것으로 전망된다.

- 일강수량이 1 mm 이상인 연간 총 강수량을 총강수일수로 나눈 강수강도를 살펴보면, 21세기 말에 우리나라를 포함한 아시아 지역은 강수강도가 증가할 것으로 전망된다.
- 태풍발생지수를 분석하여 태풍발생 위치와 빈도를 평가한 결과, 전반적으로 미래에 태풍 발생이 증가할 것으로 전망되며, 특히 RCP8.5 시나리오에서 RCP4.5에 서보다 발생 가능성이 2배 이상 클 것으로 전망된다.

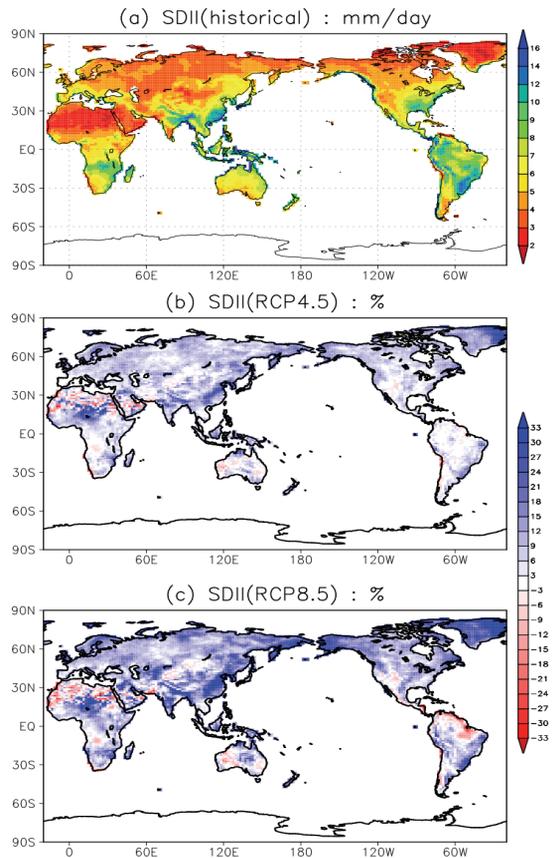


그림 A7. (a) 현재기후 (1971~2000년)에 대한 강수강도지수 (SDII) 공간 분포, (b) RCP4.5와 (c) RCP8.5에 대한 미래 (2070~2099)변화.

한반도 기후변화 시나리오는 HadGEM2-AO의 전지구 기후변화 시나리오 자료에 기초해 지역기후모델 HadGEM3-RA를 이용하여 우리나라 지역에 대한 12.5 km 해상도로 산출되었다. 모델의 모의 성능과 미래 기후변화 평가 기준을 마련하기 위하여 과거 기후 (1950~2005년)에 대한 자료를 산출하였으며, 이후 미래 (2006~2100년)에 대한 기후변화 시나리오를 생산하였다.

- 온실가스 시나리오 RCP 2종 (8.5, 4.5)에 따른 한반도 고해상도 기후변화 시나리오로부터 추정된 21세기 말 기후변화 전망 결과를 요약하면 다음과 같다.

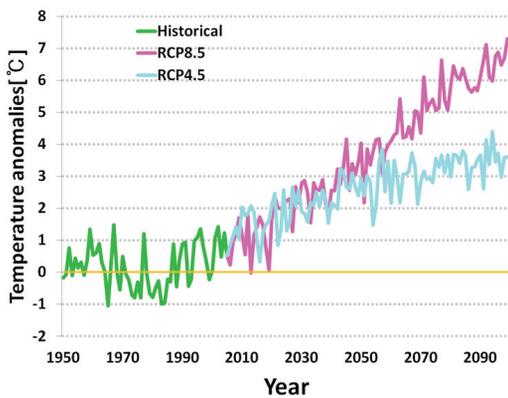
표 A2. 21세기 말 한반도 평균 기온, 강수량 전망.

RCP 시나리오		RCP4.5 (540 ppm ¹)	RCP8.5 (940 ppm)
한반도 평균	기온 (°C)	+3.4°C ²	+6.0°C
	강수량 (%)	+17.3%	+20.4%

¹ 2100년 이산화탄소 농도
² 30년 (1971~2000년) 기준기간 대비 미래 30년 (2070~2099)값

- 기후변화를 완화하기 위한 노력 없이 현재 추세대로 온실가스를 계속 배출한다면 (RCP8.5), 21세기 말 (2070~2099년)에 한반도 평균 기온은 6.0°C 상승, 강수량은 20.4% 증가가 예상되고 그리고 어느 정도 저감 노력이 실현된다면 (RCP4.5), 3.4°C 기온 상승과 17.3% 강수량 증가가 전망된다.

(a) Temperature change



(b) Precipitation change

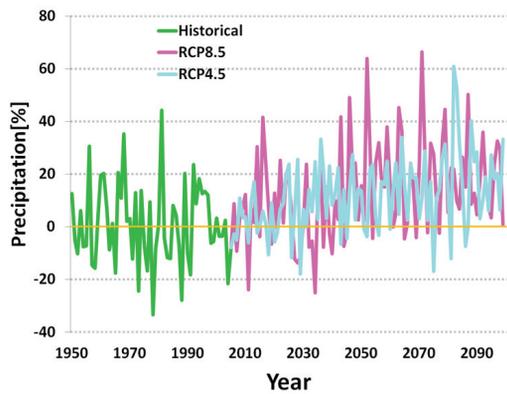


그림 A8. 1971~2000년 대비 1950~2099년 한반도 평균 (a) 1.5 m 기온 변화 (°C) 및 (b) 강수 변화 (%). 초록색은 과거기후모의, 초록색, 파란색, 분홍색은 각각 과거모의실험, RCP4.5 시나리오, RCP8.5 시나리오 실험을 나타냄.

- 기온 및 강수량은 지역에 따라 차이는 있으나 대부분 상승할 것으로 전망된다. 기온 상승은 중북부 지역에서 뚜렷이 나타나며, 강수량 증가는 남해안과 중서부 지역에서 두드러지게 나타난다.

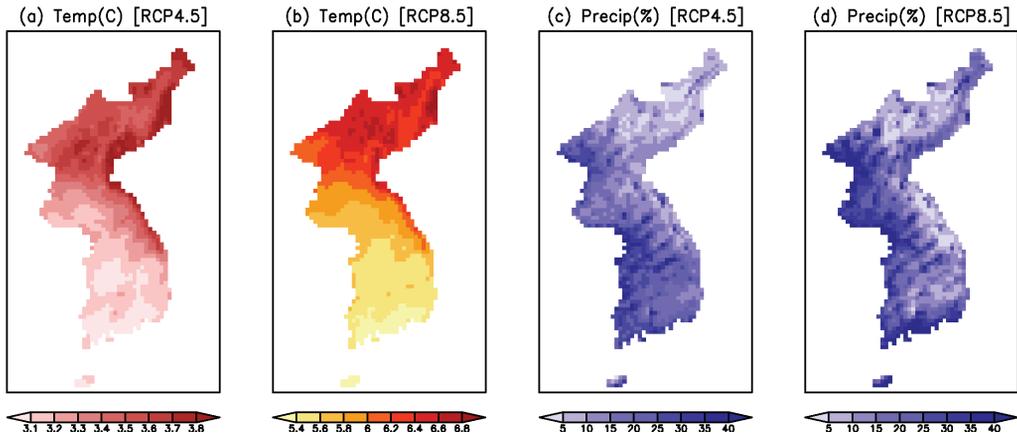


그림 A9. (a) RCP4.5, (b) RCP8.5 시나리오에 의한 20세기 말 (1971~2000년) 대비 21세기 말 (2070~2099년) 기온 변화 (°C)와 (c) RCP4.5, (d) RCP8.5 시나리오에 의한 20세기 말 (1971~2000년) 대비 21세기 말 (2070~2099년) 강수 변화 (%).

- 강수에 대한 미래 전망은 기온과 비교해 불확실성이 크다. 기온의 경우에는 경년 변동성 및 공간 변동성이 상대적으로 작고 점진적인 증가 추세는 매우 강하다. 반면에, 강수의 경우에는 경년·공간 변동성이 크고 증가 추세는 상대적으로 뚜렷하지 않다.
- 폭염일은 현재 (1971~2000년) 관측에서 연평균 8.5일인데, 기온이 상승하는 21세기 말 (2070~2099년)에는 RCP4.5 시나리오에 의하면 연평균 32.3일, RCP8.5 시나리오에 의하면 65.9일로 각각 23.8일, 57.4일 증가할 것으로 전망된다.
- 열대야일은 현재 연평균 3.7일이며, 21세기 말에는 RCP4.5 시나리오에 의하면 34.6일로 현재보다 30.9일 증가할 것으로 전망되고, RCP8.5 시나리오에 의하면 62.8일로 현재보다 59.1일 증가할 것으로 전망된다.
- 영하일은 현재 연평균 95.9일이며, 21세기 말에는 RCP4.5 시나리오에 의하면 67.5일로 현재보다 28.4일 감소할 것으로 전망되고, RCP8.5 시나리오에 의하면 42.8일로 현재보다 53.1일 감소할 것으로 전망된다.

- 집중호우일은 현재 연평균 2.20일이며, 21세기 말에는 RCP4.5 시나리오에 의하면 6.54일로 현재보다 4.24일 증가할 것으로 전망되고, RCP8.5 시나리오에서 6.59일로 현재보다 4.39일 증가할 것으로 전망된다.
- 일강수 및 일최고 기온의 극한분포는 확률밀도함수의 평균이 증가하고, 상한 꼬리 (upper tail)가 지금보다 두터워진다. 따라서 미래에는 호우와 고온일의 발생확률이 증가할 것으로 전망된다.
- RCP4.5 시나리오에 의해 산출된 21세기 말 (2070~2099년)에는 아열대 기후지역이 서해안으로는 보령까지 확대되며, 대도시 해안 지역인 인천도 아열대 기후구에 포함된다. 내륙으로는 아열대 기후지역이 전주, 광주, 순천, 산청, 합천, 대구까지 확대되며, 동해안으로는 속초까지 확대된다.
- RCP8.5 시나리오에 의해 산출된 21세기 말에는 관측지점 중 해발고도가 가장 높은 대관령을 중심으로 한 인제, 홍천, 원주, 제천 등을 제외한 전 지역이 아열대 기후지역에 포함될 것으로 전망된다.

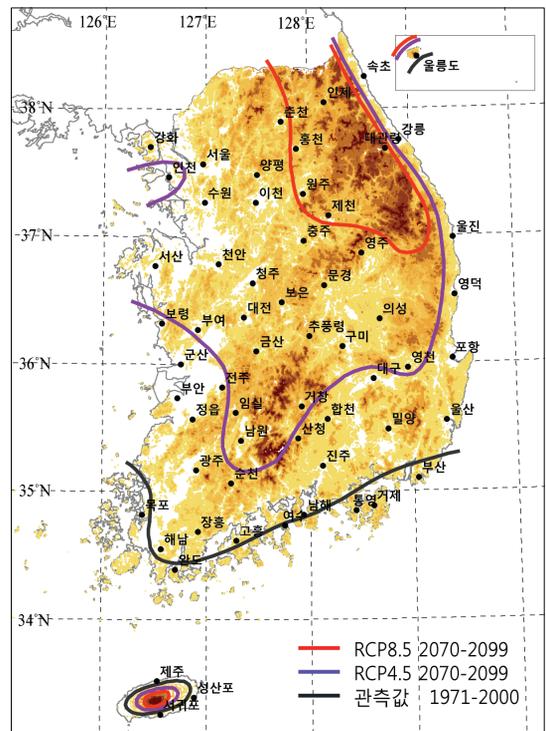


그림 A10. 아열대 지역 변화 전망. 실선은 각각 관측 자료에서 구한 현재 (1971~2000)의 아열대 지역 경계 (검정색)와 RCP 시나리오에서 전망한 2070~2099년의 아열대 지역 경계 (RCP4.5: 보라색, RCP8.5: 붉은색)를 의미한다.

1. 개요

기후변화에 관한 정부간 협의체 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)가 1988년 설립된 이후 기후변화 평가보고서를 지속적으로 발간하였다. 이 보고서에서 인간활동에 의한 기후변화와 그 영향에 대한 과학적인 증거들을 제시함에 따라 “교토의정서”, “발리로드맵” 채택 등 기후변화에 대한 국제적인 협상이 본격화되었다. 또한 다보스포럼, APEC 정상회의 최우선 의제, G8 기후변화확대정상회의 등 기후변화가 글로벌 아젠다로 급부상하는 등 기후변화가 새로운 패러다임으로 부각되었다. 이에 정부는 향후 60년 국가비전으로 “저탄소 녹색성장”을 제시하고 기후변화의 위기를 신성장동력 창출로 전환하기 위한 녹색성장 국가 전략 및 5개년계획을 수립·공포하였으며, 저탄소녹색성장기본법을 제정하여 체계적인 기후변화 대응을 위한 기반을 구축하였다.

우리나라 기온은 지난 20세기 (1912~2010년) 동안 지구온난화와 도시화의 영향으로 0.18℃/10년 속도로 상승하였고, 같은 기간에 강수량은 21 mm/10년 비율로 증가하는 등 급격한 기후변화를 겪고 있다. 기후변화 영향의 가시화로 기후변화 영향 및 취약성 평가를 바탕으로 기후변화 적응을 위한 국내 연구가 활성화되고, 이로 인하여 기후변화 시나리오에 대한 요구가 급격히 증대되었다. 기상청은 IPCC 4차 기후변화 평가보고서 (IPCC, 2007)에 사용된 온실가스 시나리오¹⁾에 따라 미래 2100년까지 전지구와 한반도 기후변화 시나리오를 개발하여 IPCC 4차 기후변화평가보고서 작성 및 국내 기후변화 대응을 위해 제공하였다.

2007년 IPCC 4차 기후변화 평가보고서 발간 이후, 2013~2014년 발간 예정인 IPCC 제5차 기후변화 평가보고서를 위하여 국제사회는 표준 온실가스 시나리오를 대표농도경로 (Representative Concentration Pathway, RCP)로 새롭게 선정하였다. 그리고 RCP에 따른 전지구 기후변화 시나리오 산출을 위해 국제사업인 CMIP5²⁾가 착수되었다. 국립기상연구소는 이와 같은 국제적인 기후변화 대응에 참여하고 국가 기후변화 적응대책 수

1) IPCC 4차 기후변화평가보고서에 사용된 대표 온실가스 시나리오는 배출에 관한 특별보고서 (Special Report on Emission Scenarios, SRES) (IPCC, 2001)의 A2, A1B, B1이다.

2) 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.

립 지원을 위한 기후변화 시나리오 개발을 추진하고 있다.

국립기상연구소는 영국 기상청 해들리센터와의 협력을 통하여 2009년부터 지구시스템모델을 도입하여 전지구 기후변화 시나리오 개발을 착수하였다. 온실가스 배출 감축 정책 이행 여부에 따라 구분할 수 있는 4종의 RCP중에서 2011년 6월에 RCP8.5, RCP4.5 온실가스 시나리오에 대해서 2100년까지 미래 기후변화 시나리오를 산출하여 대기 중 온실가스 농도에 따라 미래 전지구 기후가 어떻게 변화될 것인지에 대한 전망을 분석하였다. 한편, 전지구 기후변화 시나리오 산출과 함께, 지역적인 기후특성을 반영한 한반도 기후변화 시나리오를 생산하였다. 이 한반도 기후변화 시나리오는 국내 기후변화 영향, 취약성 평가 및 적응 대책 수립 등의 기후변화 대응을 위해 제공될 것이다.

2. 강제력 및 실험방법

2.1 자연 강제력

기후변화모의를 위해서는 기후시스템에 영향을 미치는 자연적 요인도 고려되어야 하는데, 이를 위해서 태양 복사량과 화산활동에 의한 성층권 에어러솔의 변화가 고려되어야 한다. 이 자연강제력 변화는 영국기상청 해들리센터의 기후변화모델에서 사용한 방식과 동일하다 (Stott *et al.*, 2006). 과거기후 모의기간 (Historical run) 동안 태양복사량은 태양의 활동주기, 태양활동에 대한 과거 기록, 태양흑점수의 변동을 고려하여 계산된다 (Wang *et al.*, 2005). 이 후 미래전망기간에 대해 태양복사량은 11년 주기로 같은 값을 반복해서 입력한다 (그림 2.1).

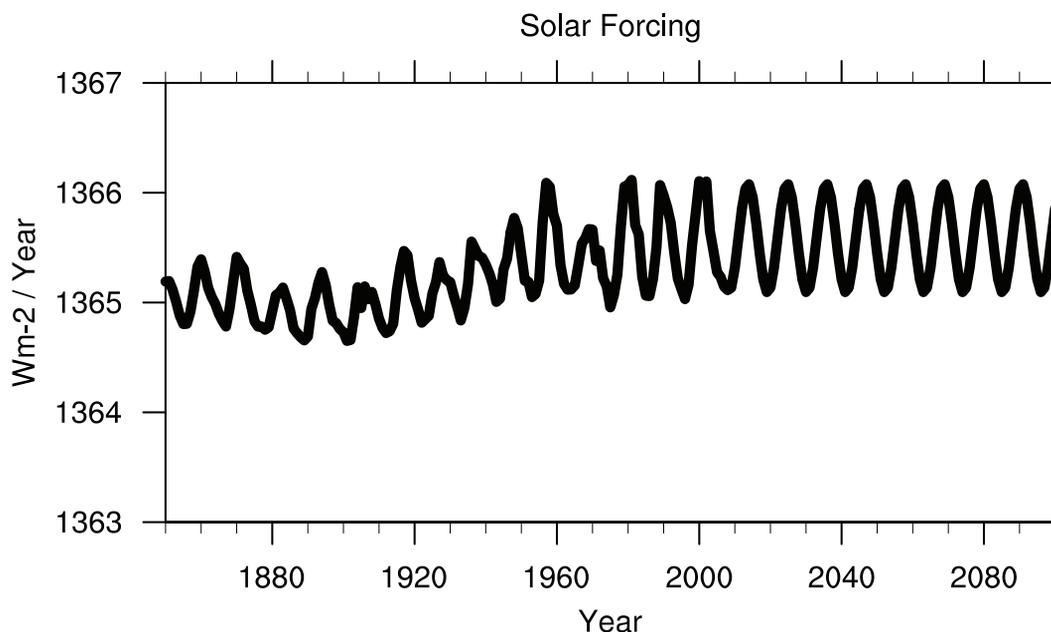


그림 2.1 모델 적분에 사용된 태양복사량의 변동 (unit: Wm^{-2} , 1850~2100).

화산활동에 의한 성층권 에어러솔은 과거기후 모의기간 동안에 대해서는 550nm 파장대의 위도별, 월별 에어러솔 광학깊이 (Sato *et al.*, 1993)를 사용한다 (그림 2.2). 미래 전망기간에 대해서는 화산활동은 포함될 수 없으므로 알려진 성층권 에어러솔의 평균 배경농도에 의한 광학깊이를 사용한다.

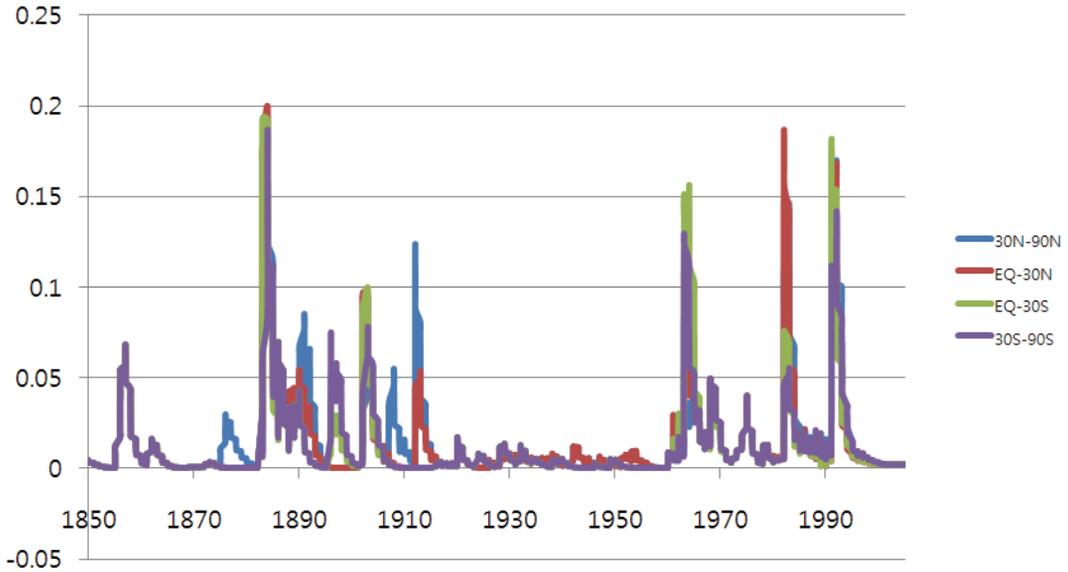


그림 2.2 550nm 파장대에서의 월별 성층권 에어러솔 광학깊이 (1850~2005).

2.2 대표농도경로

기후변화를 전망하기 위한 온실가스 농도는 IPCC AR5에서 정한 대표농도경로 (Representative Concentration Pathway, RCP)를 이용한다. IPCC AR4에서 사용된 SRES에서는 미래의 사회·경제 형태가 가장 먼저 결정되고 이에 따른 배출량 시나리오로 온실가스 농도가 정해진다 (그림 2.3). 이러한 순차방법은 분리된 각 시나리오 간의 정보 전달에 시간 지연이 일어나는 문제점이 있었다. 이에 따라 IPCC AR5에서는 인간 활동이 대기에 미치는 복사량으로 온실가스 농도를 정하였다. 여기서 하나의

대표적인 복사 강제력에 대해 사회-경제 시나리오는 여러 가지가 될 수 있다는 의미에서 ‘대표 (Representative)’라는 표현을 사용한다. 그리고 온실가스 배출 시나리오의 시간에 따른 변화를 강조하기 위해 ‘경로 (Pathway)’라는 의미를 포함한다 (그림 2.4).

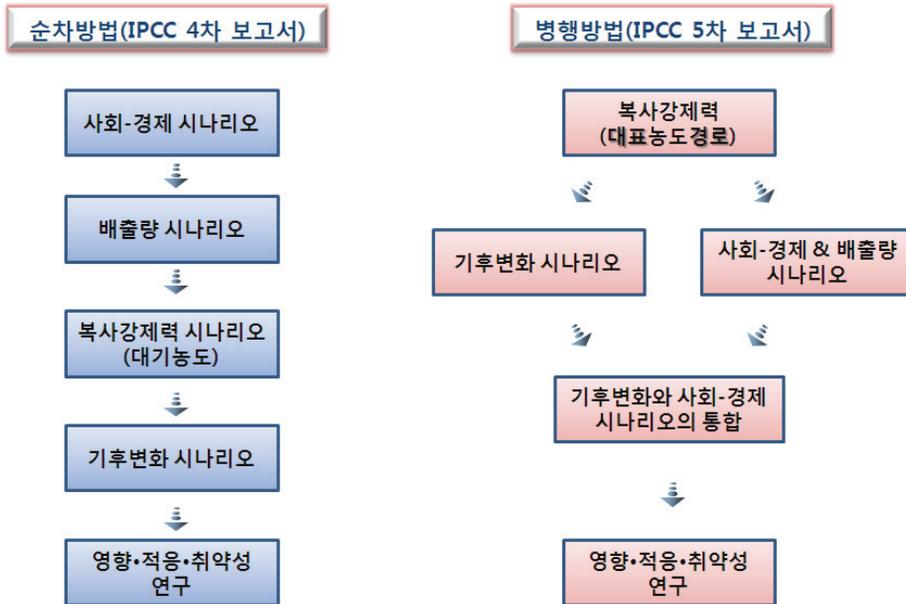


그림 2.3 기후변화 시나리오 산출 방법.

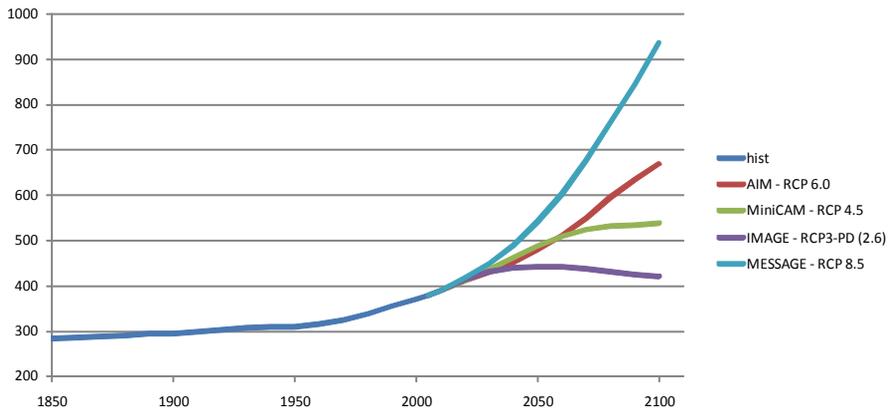


그림 2.4 CO₂ 농도의 시간변화. 과거 관측자료 (1850~2005)와 미래 IPCC RCP8.5, 6.0, 4.5, 2.6 시나리오에 근거한 농도변화.

RCP 시나리오에는 4종이 있으며, 현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우 (BAU) RCP8.5, 지구가 회복력을 가질 수 있는 최대 한계값인 RCP2.6, 그리고 온실가스 저감 정책이 어느 정도 실현되는 경우인 RCP 4.5/6.0로 구성된다. 여기서 숫자는 복사강제력의 양으로서 단위는 Wm^{-2} 이다. 지상에 도달되는 태양복사가 약 $238 Wm^{-2}$ 이므로 RCP 8.5/6.0/4.5/2.6의 복사강제력은 입사 태양복사량의 약 3.6%, 2.5%, 1.9%, 1.1%에 해당된다. 표 2.1에서는 RCP 종류, 각 RCP의 복사강제력과 농도값, 그리고 IPCC AR4의 SRES와 비교를 나타내고 있다.

표 2.1 대표농도경로 (RCP)의 종류와 그에 상응하는 복사강제력 및 CO₂ 농도.

Name	복사강제력 ¹	농도 ²	경로형태	SRES와의 비교
RCP8.5	>8.5 c in 2100	>1370 CO ₂ -eq in 2100	상승	A2~A1F1
RCP6.0	~6 Wm^{-2} (2100년)	~850 CO ₂ -eq (2100년 이후 안정화)	안정	A1B
RCP4.5	~4.5 Wm^{-2} (2100년)	~650 CO ₂ -eq (2100년 이후 안정화)	안정	B1
RCP3-PD (2.6) ³	2100년 이전에 ~3 Wm^{-2} 최고치 및 이후 감소	2100년 이전에 ~490 CO ₂ -eq 최고농도 및 이후 감소	상승 후 감소	-

¹ 복사강제력은 $\pm 5\%$ 로 정의되며, 모든 인위적인 온실기체와 다른 요소들의 순효과를 포함한다.

² CO₂ 상당농도 (equivalent concentrations, 이하 CO₂-eq)는 단순 계산식 $Conc. = 278 * \exp(\text{forcing}/5.325)$ 로 계산한다. 2005년 수명이 긴 온실기체들에 대한 CO₂ 상당농도의 최적추정치는 약 455 ppm이지만 모든 인위적인 강제 요소들의 순효과에 상응하는 CO₂ 상당농도 추정치는 375 ppm 임.

³ PD = peak and decline.

2.3 에어러솔

에어러솔 복사강제력의 변화를 통해 기후에 미치는 영향이 중요하므로, 이산화황 (Sulphur Dioxide), 검댕 (Black Carbon), 유기탄소 (Organic Carbon), 바이오매스 (Biomass-burning), 먼지에어러솔 (Dust), 해염입자를 기후변화모델의 강제력으로 고려하였다. 이산화황, 검댕, 유기탄소, 바이오매스는 Jones *et al.* (2011)의 자료를

상용하고 먼지 에어러솔, 해양입자의 대기 중 농도는 모델 적분과정에서 계산된다. 이 에어러솔들은 단파, 장파복사의 산란, 흡수의 직접효과와 구름과의 상호작용으로 간접효과를 일으킨다.

모델적분에 사용된 에어러솔 성분별 전지구 평균값의 변화는 그림 2.5와 같으며 과거 기후모의기간에 대해 이산화황의 배출량은 1980년에 최대값 64.2 Tg[S]를 보이고 이후 감소한다. 검댕, 유기탄소, 바이오매스 배출량은 과거기후 모사 동안 지속적으로 증가하는 경향이며 최대값은 각각 2005년 5.4 Tg[C], 2005년 13.1 Tg[C], 1995년 26.3 Tg[C]를 나타낸다 (그림 2.5). RCP8.5의 공간 분포 경우, 20세기 말 이산화황 주요 배출지역에서 21세기 말에는 배출량이 감소할 것으로 전망되며 인도는 배출 증가가 전망된다 (그림 2.6, 2.7). RCP8.5에 따른 20세기 말 대비 21세기 말 검댕과 유기탄소의 전지구 평균 배출량 감소는 지역적인 차이가 있는데 그 증감경향은 이산화황 경우와 유사하다. 그리고 전지구 평균 바이오매스 배출의 미래 전망은 20세기 말 주요 배출지역에서는 감소하고 고위도지역에서는 증가될 것으로 전망된다.

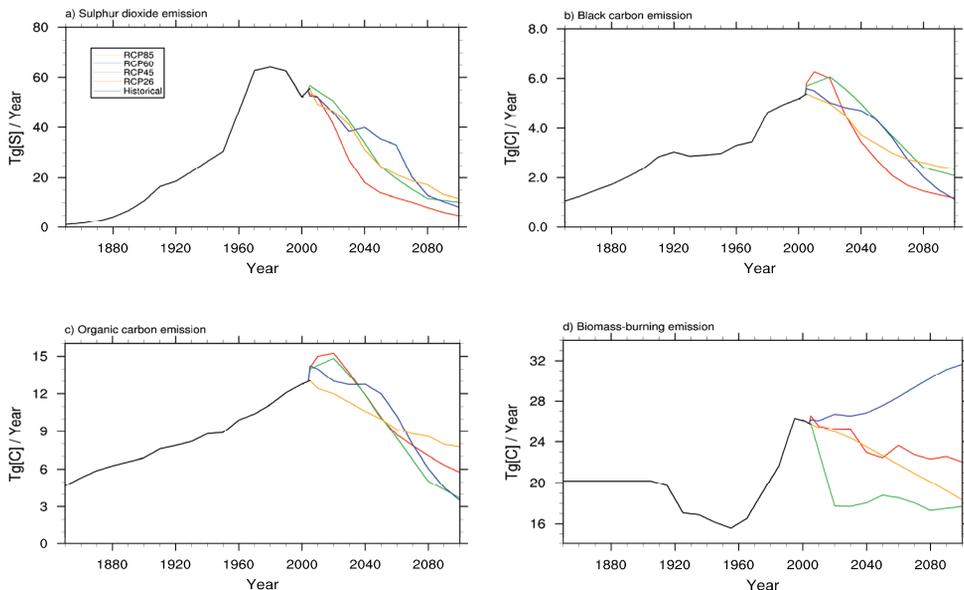


그림 2.5 과거 (1850~2005) 및 미래 (2006~2100) 기후변화모의에 사용된 대류권 에어러솔 방출량. RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5은 각각 적, 녹, 청, 황색으로 표시. (a) 이산화황, (b) 검댕, (c) 유기탄소, (d) 바이오매스.

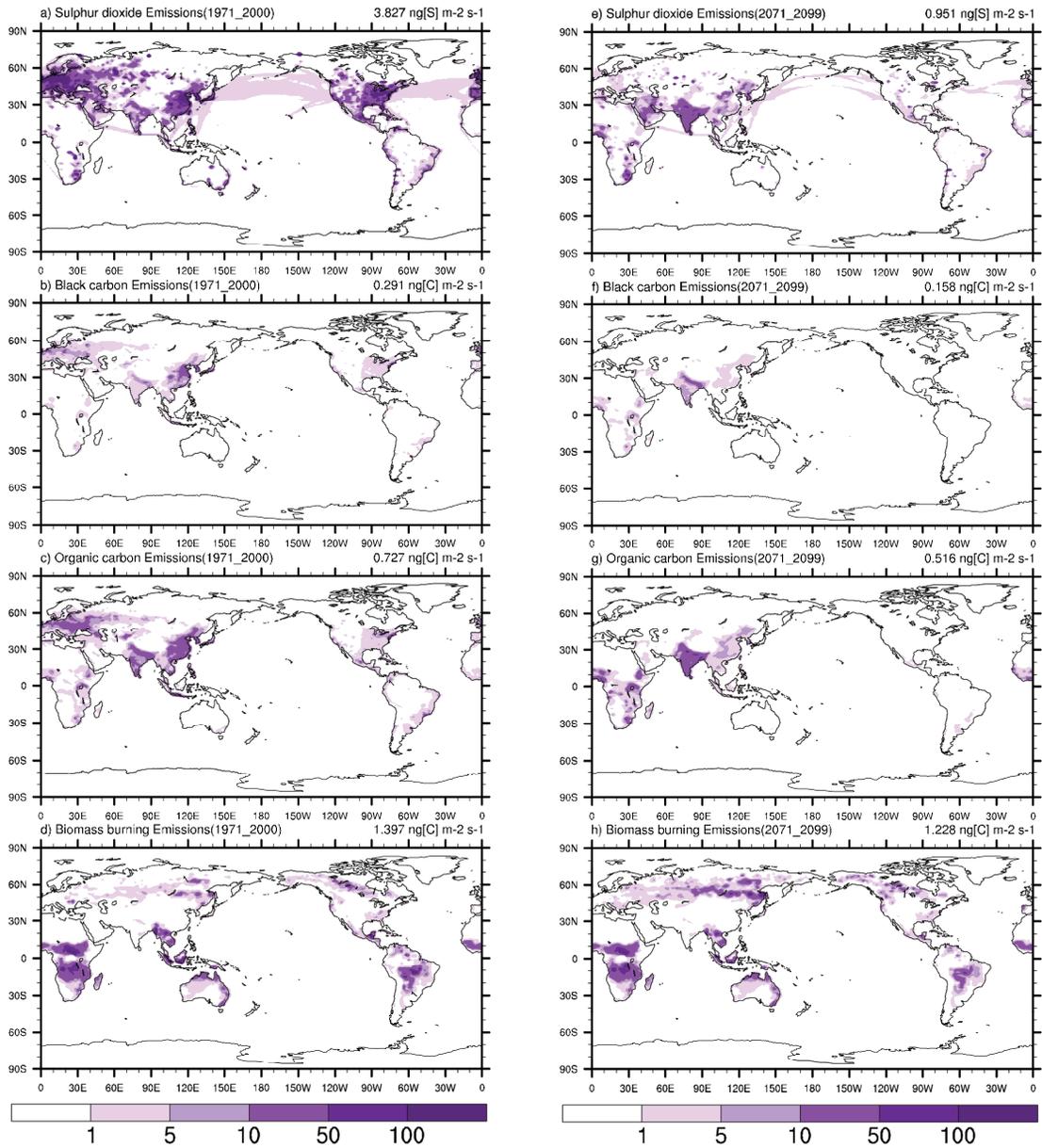


그림 2.6 과거 30년 (1971~2000, 좌) 에어러솔 방출량 및 RCP8.5에서 전망하는 21세기 말 (2070~2099) 에어러솔 방출량 분포 (단위: $\text{ng m}^{-2}\text{s}^{-1}$) (우). 우측상단에 전지구 평균값 표기. (a, e) 이산화황, (b, f) 검댕, (c, g) 유기탄소, (d, h) 바이오매스.

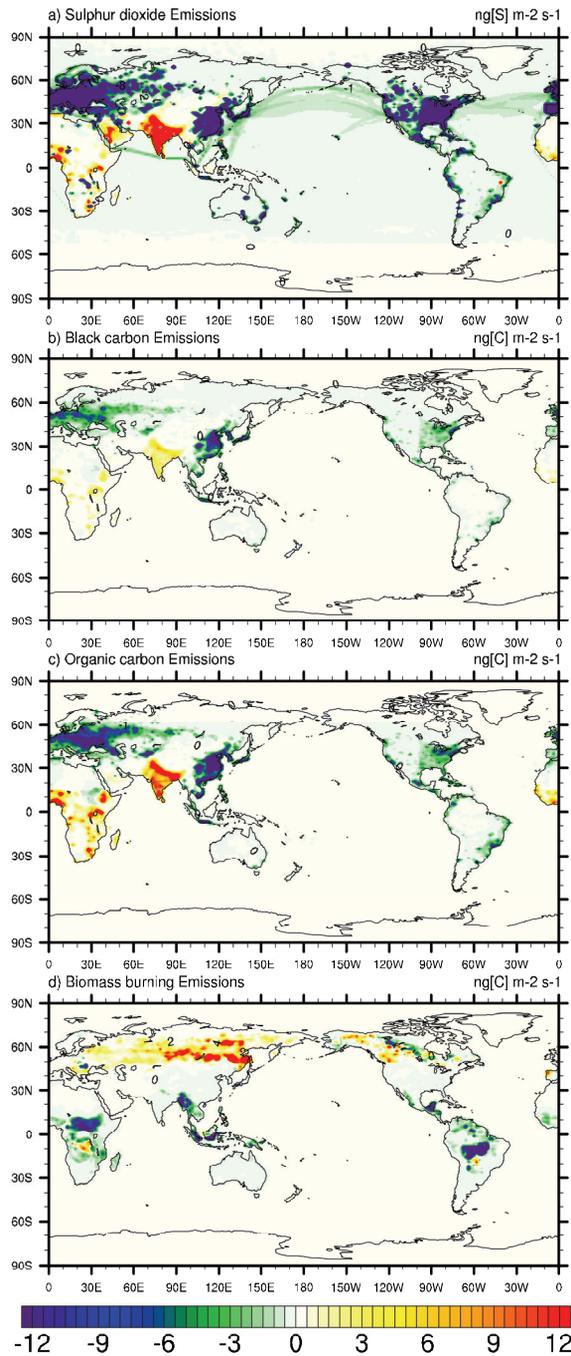


그림 2.7 RCP8.5에 따른 20세기 말 (1970~2000) 대비 21세기 말 (2070~2099) 에어러솔 방출량의 변화. 단위는 그림 우측상단에 표기. (a) 이산화황, (b) 검댕, (c) 유기탄소, (d) 바이오매스.

2.4 지표피복

지표피복자료는 Loveland *et al.* (2000)의 기후값과 CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase5)를 위해 만들어진 Klein Goldwijk *et al.* (2010), Hurtt *et al.* (2010)의 HYDE3 (History Database of the Global Environment)자료가 사용되었다. 나무, 관목, C3형 초지³⁾, C4형 초지, 도시, 물, 토양, 얼음의 면적비율은 CMIP5를 위해 과거와 미래 토지이용자료를 제공하는 Land-Use Harmonization Project 홈페이지 (<http://luh.unh.edu>)의 작물 (Crop), 목초지 (Pasture), 도시 지표피복자료를 기반으로 한다. 작물, 목초지가 C3, C4형 초지로 구성된다는 가정 하에 모델에서 사용하는 C3형, C4형 초지, 도시로 변환하였다. 그리고 물, 토양, 얼음은 IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme) 기후값을 사용하였다. 또한 전체 식생비율을 보존하기 위해 초지, 도시면적 변동량에 따라 나무, 관목의 비율이 조정되었다. RCP8.5에 따르면 20세기 말 대비 21세기 말 초지는 그 면적이 증가하고 RCP4.5에서는 감소할 것으로 전망된다. 이 증감경향이 지역적으로는 다른 차이가 나타나는데 이는 시나리오마다 설정한 미래 농업분야, 산업분야 등의 활동전망의 지역적 차이때문인 것으로 판단된다 (그림 2.8, 그림 2.9).

3) C3형 초지는 탄소원자3개의 화합물을 만드는 식물로 벼, 밀 등의 온대식물을, C4형 초지는 탄소원자 4개의 화합물을 만드는 식물로 옥수수, 사탕수수 등의 열대 식물이 해당됨

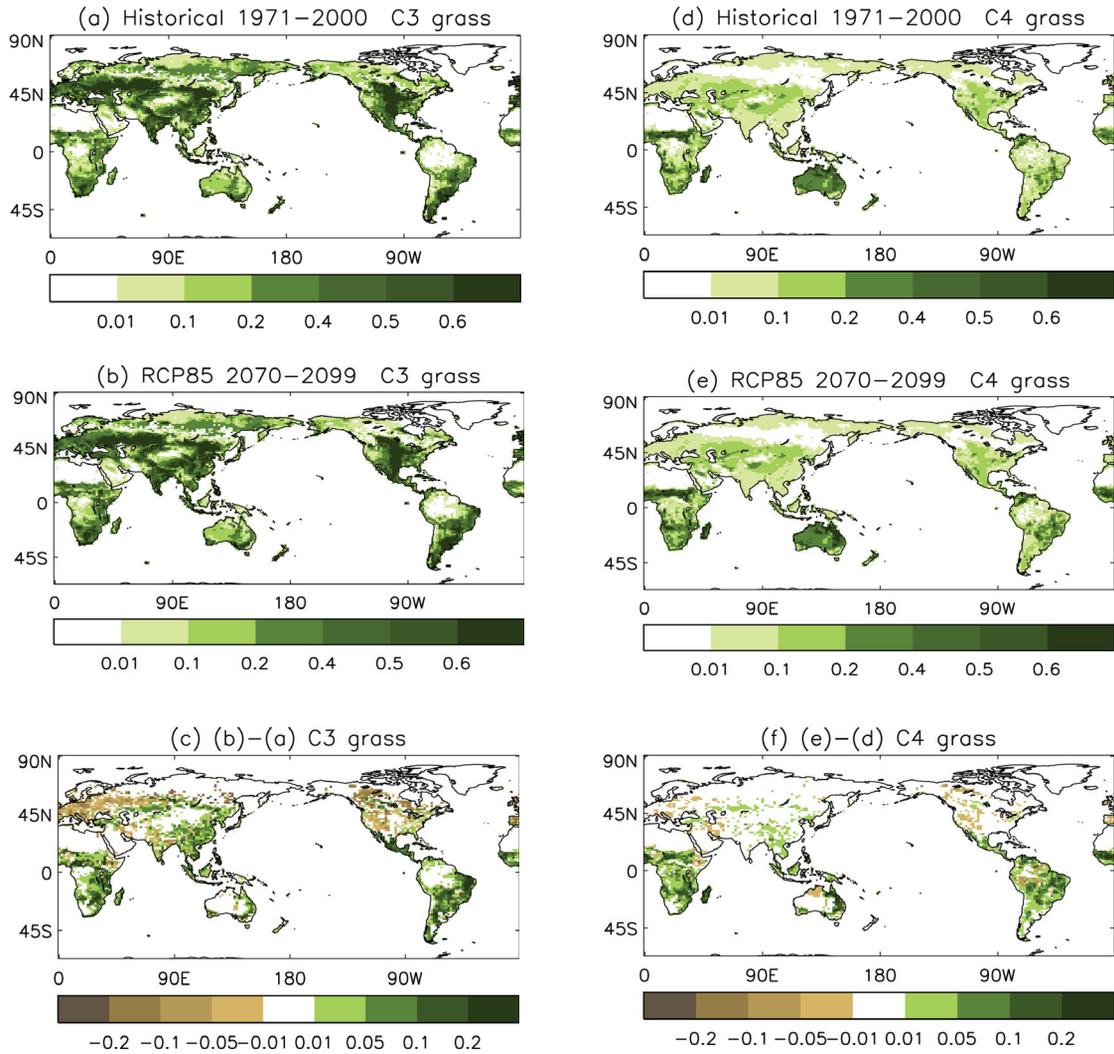


그림 2.8 과거 30년 및 RCP8.5에서 전망하는 C3형 초지 (좌), C4형 초지 (우) 면적비율의 분포. (a,d) 1971~2000년, (b,e) 2070~2099년, (c,f) (a,d)에 대한 (b,e)의 변화.

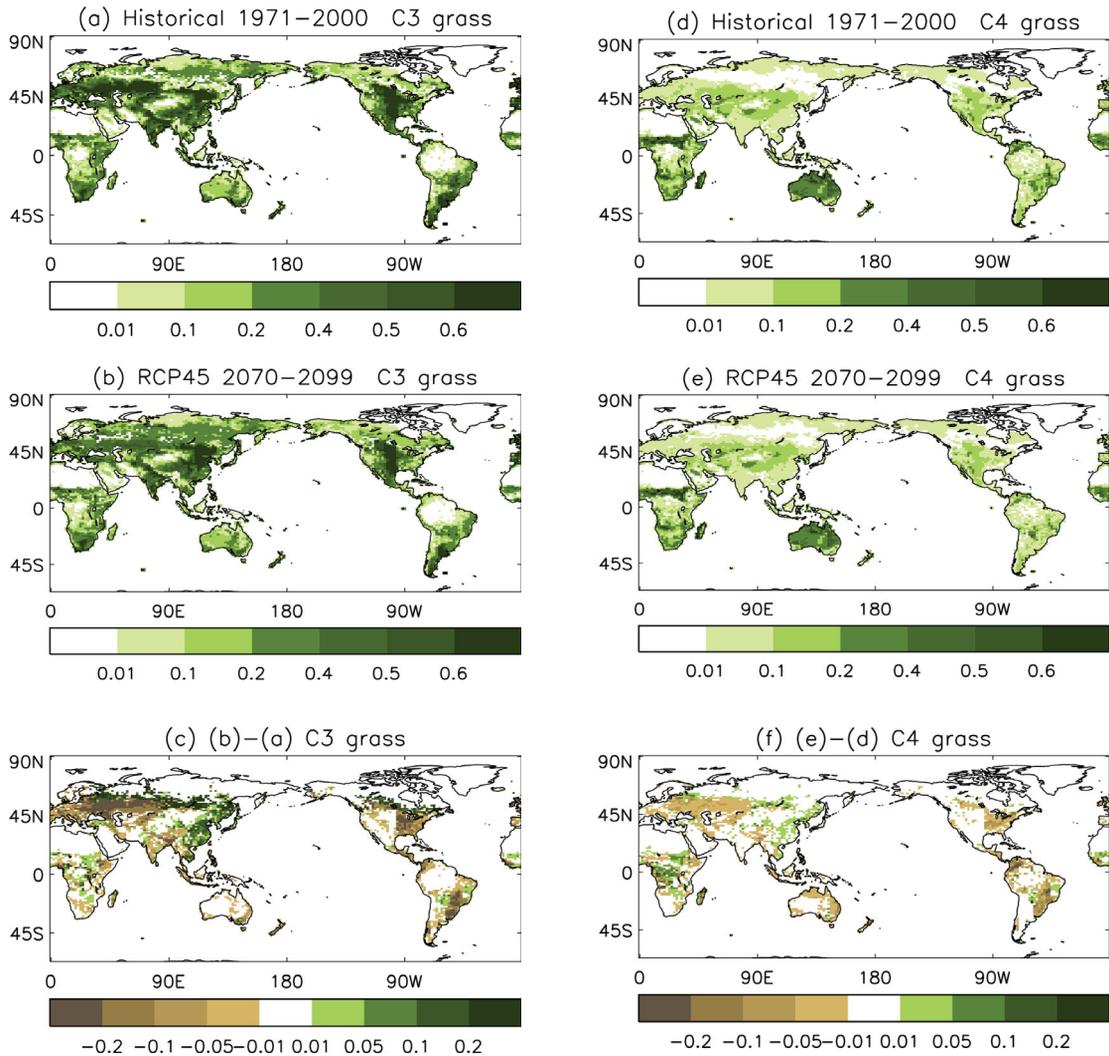


그림 2.9 과거 30년 및 RCP4.5에서 전망하는 C3형 초지 (좌), C4형 초지 (우) 면적비율의 분포. (a,d) 1971~2000년, (b,e) 2070~2099년, (c,f) (a,d)에 대한 (b,e)의 변화.

2.5 기후변화 예측모델

국립기상연구소는 영국 기상청 해들리센터의 기후변화 예측모델인 HadGEM2-AO를 도입하여 기후변화 시나리오를 산출하고 있다. HadGEM2-AO는 대기-해양-해빙-수문-에어러솔 결합 모델로 구성된다. 대기모델은 비정역학 방정식계로 바람 (동서, 남북, 연직성분), 온위, 기압, 밀도, 습기 (vapour, cloud water and cloud ice)를 예단한다. 또한 수평적으로 Arakawa-C 격자와 연직적으로 Charney-Phillips 격자체계를 채택하여 지표 근방에서 지형을 따르지만 (terrain-following) 대기 상층에서는 등고도 좌표계로 점차 전환된다. 방정식을 효율적으로 풀기위해 세미-임플리시트 (semi-implicit), 세미-라그랑지안 (semi-Lagrangian) 방안을 사용한다. 대기모델의 분해능은 수평적으로 N96 (~135 km 간격, 192 x 145 격자)이며 (그림 2.10) 그리고 연직적으로 38층 (최상층은 ~40 km)으로 구성된다 .

해양모델은 Bryan-Cox 방정식에 기반하여 수평적으로 Arakawa-B 격자 그리고 연직적으로 Z 좌표를 사용하고 주요 예측 변수는 해류, 온위, 염분이다. 해양모델은 해양 상부와 하부의 혼합을 다루며, 열, 운동량, 담수의 속 (flux)의 일부는 표층 아래로 침투할 수 있도록 구성된다. 그리고 염분약층을 따른 확산과 중규모 에디 모수화과정도 포함된다. 해양모델의 분해능은 동서방향으로 1° 간격 (360개 격자)과 남북으로 1°~1/3° (216개 격자)로 적도 부근에서 고분해능으로 구성된다. 연직적인 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 포함된다.

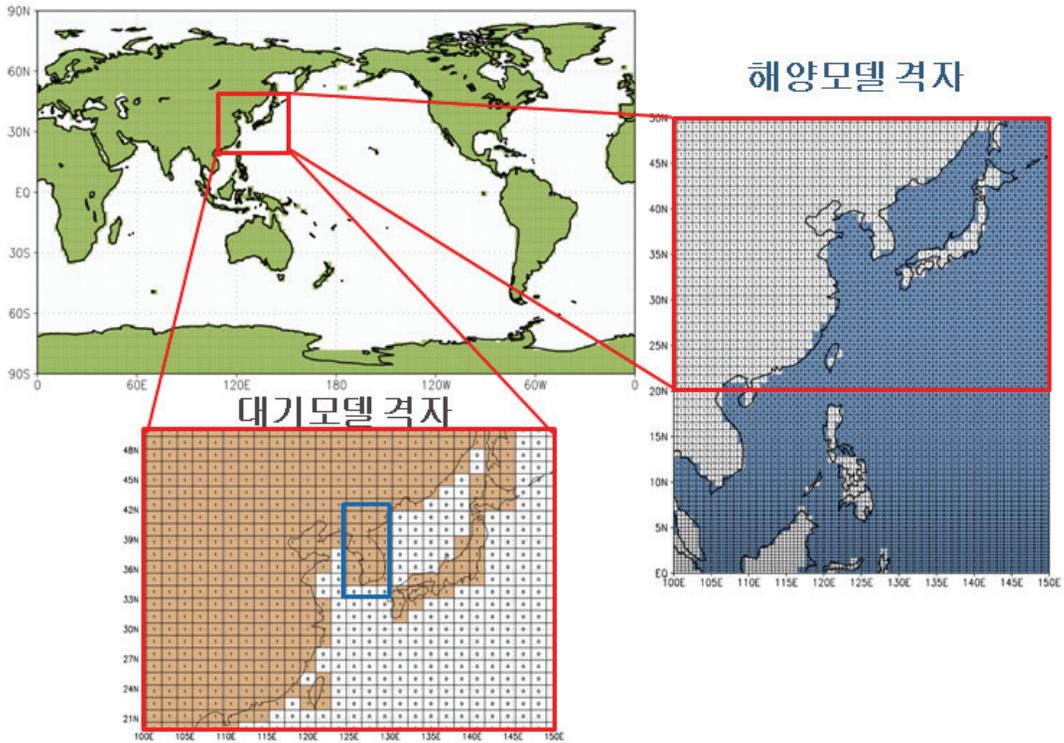


그림 2.10 HadGEM2-AO 모델의 수평 분해능과 우리나라 주변의 육지-바다 구분.

2.6 실험방법

전지구 기후변화 시나리오 개발은 CMIP5를 통해 국제적으로 수행되고 있으며, CMIP5 실험의 주요 목적은 모델이 과거를 얼마나 현실적으로 모의하는가, 그리고 미래 기후가 어떻게 변화할지에 대한 전망을 제시하는 것이다. CMIP5 실험은 CMIP5의 목적에 따라 다양하나 (Talyor *et al.*, 2009), 기상청에서는 우선적으로 미래 기후변화 전망을 산출하기 위한 실험을 집중적으로 추진하고 있으며, 그 실험 내용은 표 2.2와 같다.

표 2.2 HadGEM2-AO를 이용한 장기적분 실험 종류와 각 실험의 적분 기간.

실험	적분기간
제어실험 (pre-industrial control)	≥200
과거기후 모의실험, 1860~2005년 (historical ensemble)	≥146
RCP4.5 & 8.5에 대한 미래전망 실험	≥95
RCP2.6 & 6.0에 대한 미래전망 실험	≥95

제어실험 (pre-industrial control)은 1860년의 온실가스 농도로 고정하여 200년 이상을 적분하는 실험으로 전지구 결합기후모델을 준평형상태로 안정화시키고 모델의 내부변동을 이해하기 위한 실험이다. 과거기후 모사실험 (historical run)에서는 제어실험에서 산출된 대기와 해양의 최종 상태를 초기상태로 정한다. 이로부터 2005년까지 온실가스, 에어로솔, 오존, 태양복사와 화산폭발에 대한 강제력으로 과거기후를 재현한다. 미래기후변화 전망은 과거기후 모사실험의 마지막 상태 (2005년)를 초기조건으로 RCP 강제력에 따라 산출한다. 본 보고서에서는 제어실험의 200년째 결과를 초기장으로 사용한 과거기후 모의실험 (1860~2005)과 RCP4.5와 8.5 강제력에 따른 미래기후변화 시나리오 결과를 분석하였다.

국립기상연구소는 전지구 기후변화 시나리오뿐만 아니라 전지구 상세 기후변화 시나리오, 그리고 동아시아 (분해능 약 50 km) 및 우리나라 (분해능 약 12.5 km)에 대해 상세화한 지역 기후변화 시나리오도 개발하고 있다. 전지구 기후변화 시나리오와 지역 기후변화 시나리오 개발 산출단계와 실험종류, 초기장, 적분기간 및 실험방법을 다음에 요약하였다 (그림 2. 11).

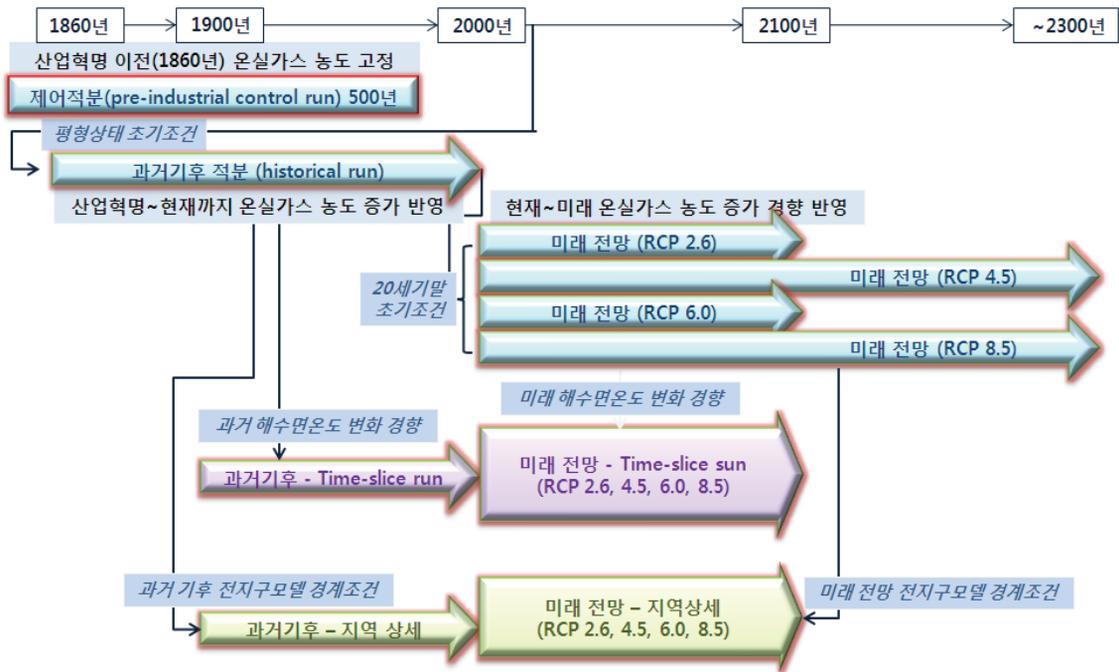


그림 2.11 기후변화 시나리오의 산출 과정

3. 전지구 기후변화

3.1 현재 기후의 모의 성능

본 절에서는 HadGEM2-AO가 모의한 현재기후 (1971~2000)의 모의성능을 평가하고자 한다. 이를 위해 HadGEM2-AO의 기온과 강수 결과를 관측과 비교하였다. 먼저 HadGEM2-AO의 전지구 기온, Hadley centre에서 전세계 지점 관측자료를 이용하여 복원한 전지구 기온 관측자료 (이하 HadCRU)와 IPCC AR4에 참여하기 위해 국립기상연구소가 모의한 ECHO-G 모델의 기온 시계열을 비교하였다 (그림 3.1). 현재 (1971~2000, 30년 평균) 기준으로 HadGEM2-AO의 전지구 평균기온은 13.7℃, 관측은 13.8℃, ECHO-G는 13.5℃로 나타났다. HadGEM2-AO는 관측에 비하여 0.1℃정도 낮게 모의하였으나 관측의 추세 등 전반적인 기온변화를 잘 모사하였고 특히, ECHO-G의 한랭편차 (cold bias)가 개선되었다.

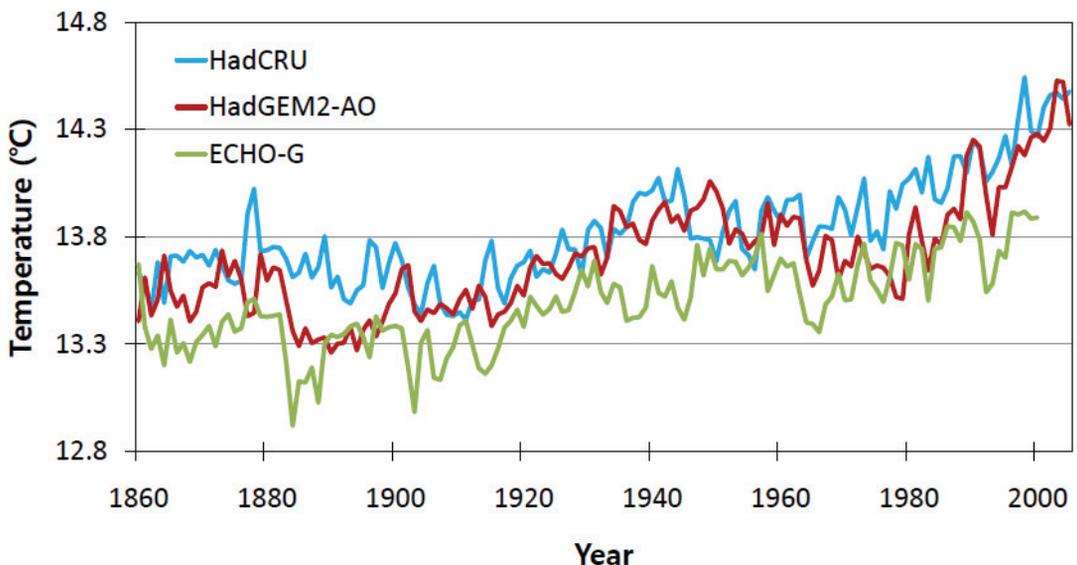


그림 3.1 1860~2005년의 1.5 m 평균 기온 변화 (단위, °C). 파란색, 빨간색, 녹색선은 각각 관측 (HadCRU), HadGEM2-AO, ECHO-G를 나타냄.

HadGEM2-AO가 모의한 기온 (1971~2000)과 강수 (1979~2005)의 기후값과 관측과의 차이를 그림 3.2와 3.3에 나타내었다. 관측자료는 기온의 경우 1971년부터 2000년까지의 ECMWF의 ERA40 월별자료를 이용하였고, 강수는 1979년부터 2005년까지의 CMAP 월별자료를 이용하였다. 모델이 모의한 전지구 기온분포는 동서분포, 대륙-해양간의 등온선의 분포 등을 현실적으로 잘 모의하고 있다. 그러나 북반구 내륙에서 한랭편차가 존재하며, 이 한랭편차는 겨울철에 중위도까지 확장된다.

모델이 모의한 강수는 관측에 비하여 전반적으로 과다하게 모의하였지만 관측의 강수 분포와 매우 유사하게 나타났다. ITCZ 지역도 강수분포를 잘 모의하였으나, 계절에 관계없이 서태평양 지역은 과소 모의하고 동태평양지역은 과다하게 모의하였다. SPCZ 지역은 관측에 비해 남북으로 좁고 강하게 나타났다. 주요 몬순지역의 강수 모의결과를 살펴보면, 아시아 지역은 전반적으로 과다하게, 인도몬순지역은 과소 모의하는 경향을 보였다.

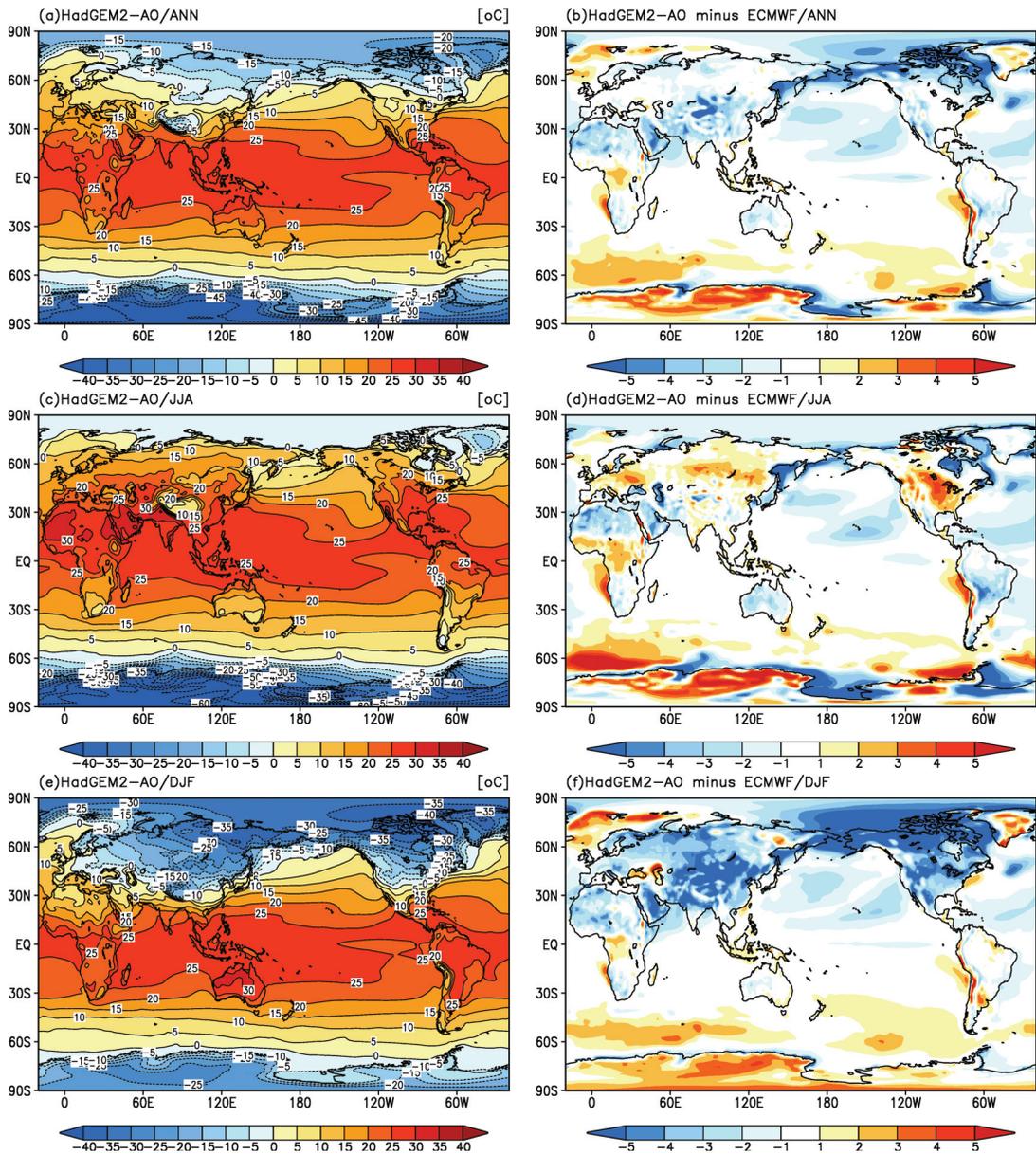


그림 3.2 연평균, 여름철, 겨울철의 현재기후 (1971~2000년)에 대한 (a), (c), (e) 1.5 m 기온의 기후값과 (b), (d), (f) 관측과의 차이 (단위, °C).

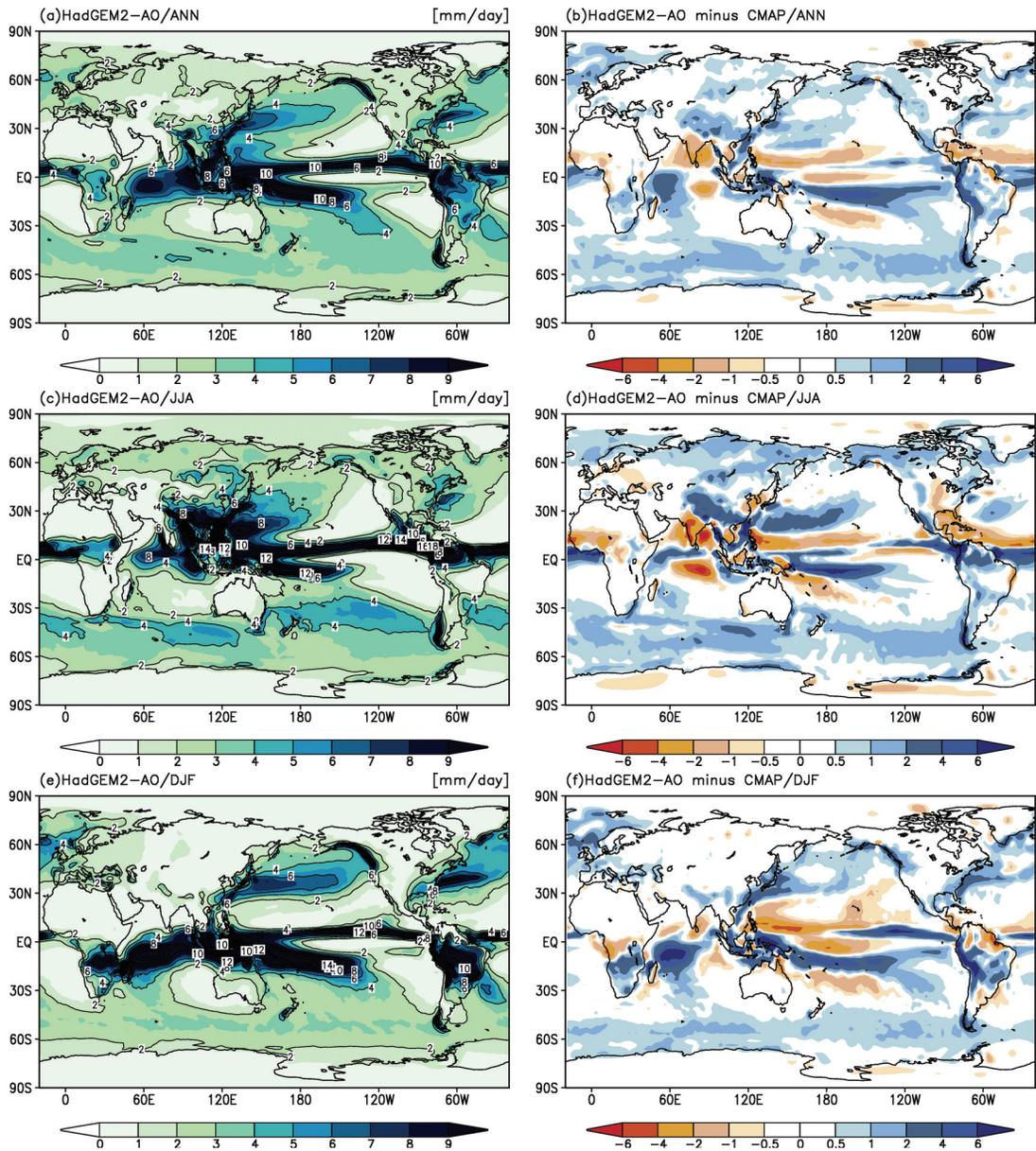


그림 3.3 연평균, 여름철, 겨울철의 현재기후 (1971~2000년)에 대한 (a), (c), (e) 강수의 기후값과 (b), (d), (f) 관측과의 차이 (단위, mm day^{-1}).

HadGEM2-AO의 기온과 강수에 대하여 1971년부터 2000년까지의 기후값을 동서평균하여 관측과 비교하였다. 모델의 기온은 관측과 매우 유사하게 나타났지만 북반구 지역에서 다소 낮게 모사되었다 (그림 3.4). 모델의 강수는 전반적으로 관측보다 많이 모의되었고, 적도부근에서 편차가 가장 크게 나타났다. 중위도 (남북위 30°~60°)에서는 남반구와 북반구에서 모두 과다모의하는 경향을 보였다 (그림 3.5).

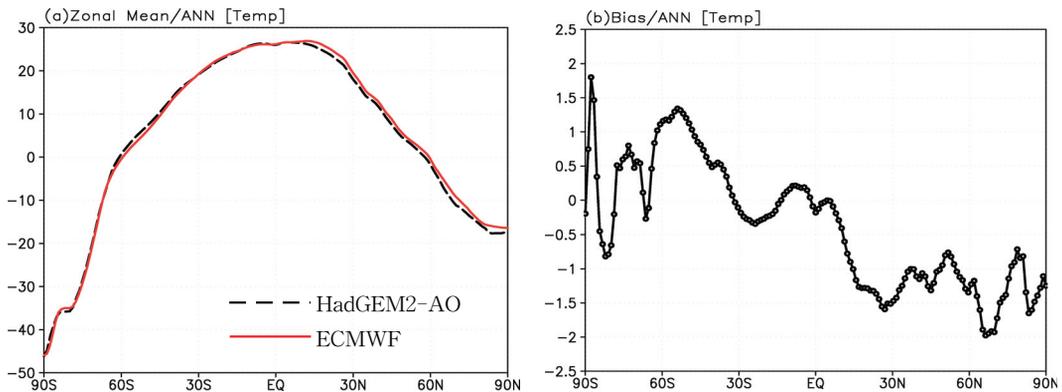


그림 3.4 1.5 m 기온에 대한 HadGEM2-AO와 관측 (ECMWF)의 (a)동서평균 분포와 (b) 차이 (단위, °C).

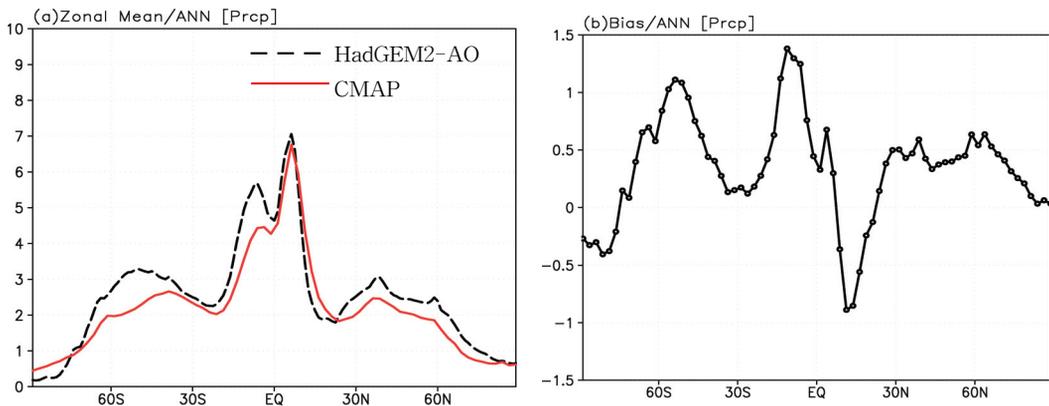


그림 3.5 강수에 대한 HadGEM2-AO와 관측 (CMAP)의 (a)동서평균 분포와 (b) 차이 (단위, mm day⁻¹).

전지구 영역에서 현재기후 (1971~2000)에 대한 기온과 강수의 모의능력을 테일러 다이어그램으로 나타내었다 (그림 3.6). 강수보다는 기온의 모의 능력이 우수한 것으로 나타났으며, 기온과 강수 모두 공간상관이 높은 편이었다 (기온: 0.99, 강수: 0.89). 그리고 강수의 경우에는 관측 대비 표준편차가 기온에 비해 크게 나타나 강수 변동성이 크다는 것을 알 수 있다 (기온: 1.11, 강수: 1.33).

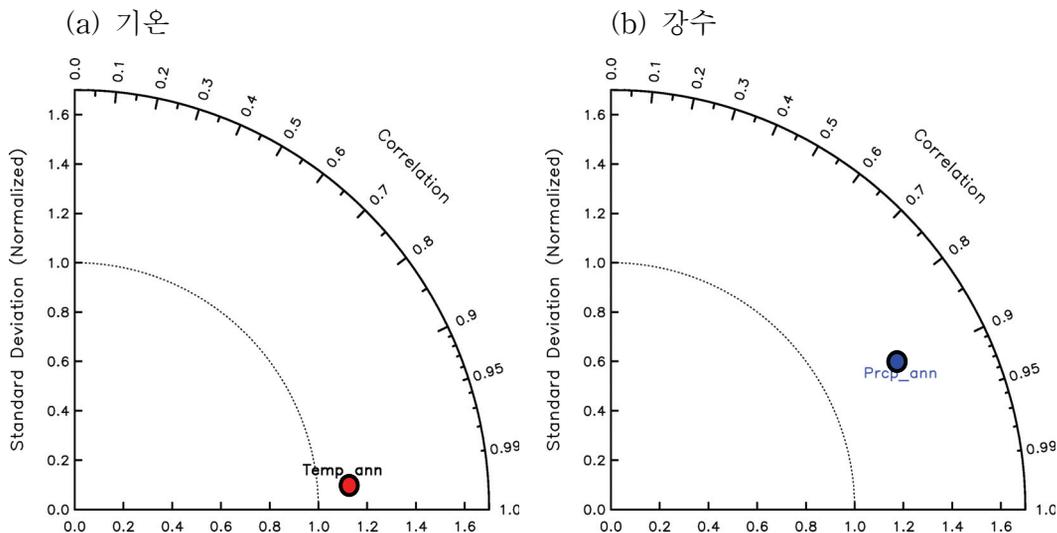


그림 3.6 현재 기후 (1971~2000)에 대한 (a)1.5 m 기온과 (b)강수의 테일러 다이어그램.

HadGEM2-AO 해양모델의 성능을 분석하기 위하여 해수면 온도를 관측으로 처방한 HadGEM2-A와 비교하였다 (그림 3.7-3.8). 여기서 HadGEM2-A는 HadGEM2-AO에서 해양모델을 끄고 대기모델만을 작동시켰다. HadGEM2-A는 관측된 해수면온도를 처방했기 때문에 해양에서의 편향 (bias)이 없다 (그림 3.7 c). 그러나 육지에서는 사하라와 중동, 티벳지역 및 북아메리카 지역에서 한랭편차 (cold bias)를 보였다. 또한 남미의 안데스 산맥 지역에서도 기온의 편차가 보였다. HadGEM2-A가 보이는 이러한 편차는 대기 모델의 계통적 오차로 이해된다. HadGEM2-AO는 HadGEM2-A와 비교하여 해양상에서 한랭편차 (cold bias)가 나타났고, HadGEM2-A의 계통적 오차가 커지는 경향을 보였다. 강수의 경우 HadGEM2-A는 관측보다 인도지역과 서태평양에서 건조 편향

(dry bias)를 보였고 그 외 지역에서는 대체로 과대 모의하였다. HadGEM2-AO는 인도 지역에서 HadGEM2-A와 같이 강수를 과소모의하고 있지만 서태평양에서는 강수를 과하게, 적도 태평양지역에서는 적게 모의하였다. 그리고 적도 남쪽에서는 SPCZ가 남동쪽으로 확장되지 못하면서 강수를 과하게 모의하였다.

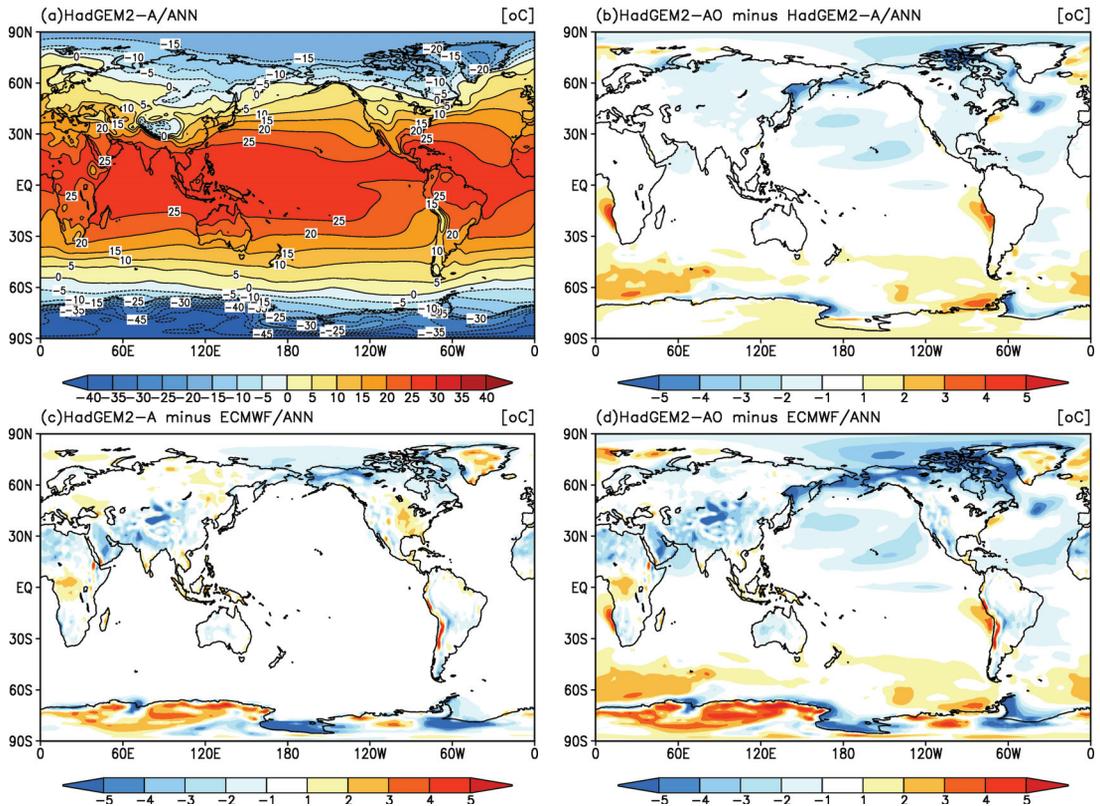


그림 3.7 (a) HadGEM2-A가 모의한 1.5 m 기온의 현재기후 (1971~2000년) 기후값 분포와 (b) HadGEM2-AO와의 차이, 그리고 (c) HadGEM2-A와 기후값과의 차이, (d) HadGEM2-AO와 기후값과의 차이 (단위, °C). 여기서, HadGEM2-A는 HadGEM2-AO의 대기모델만 작동시킨 경우임.

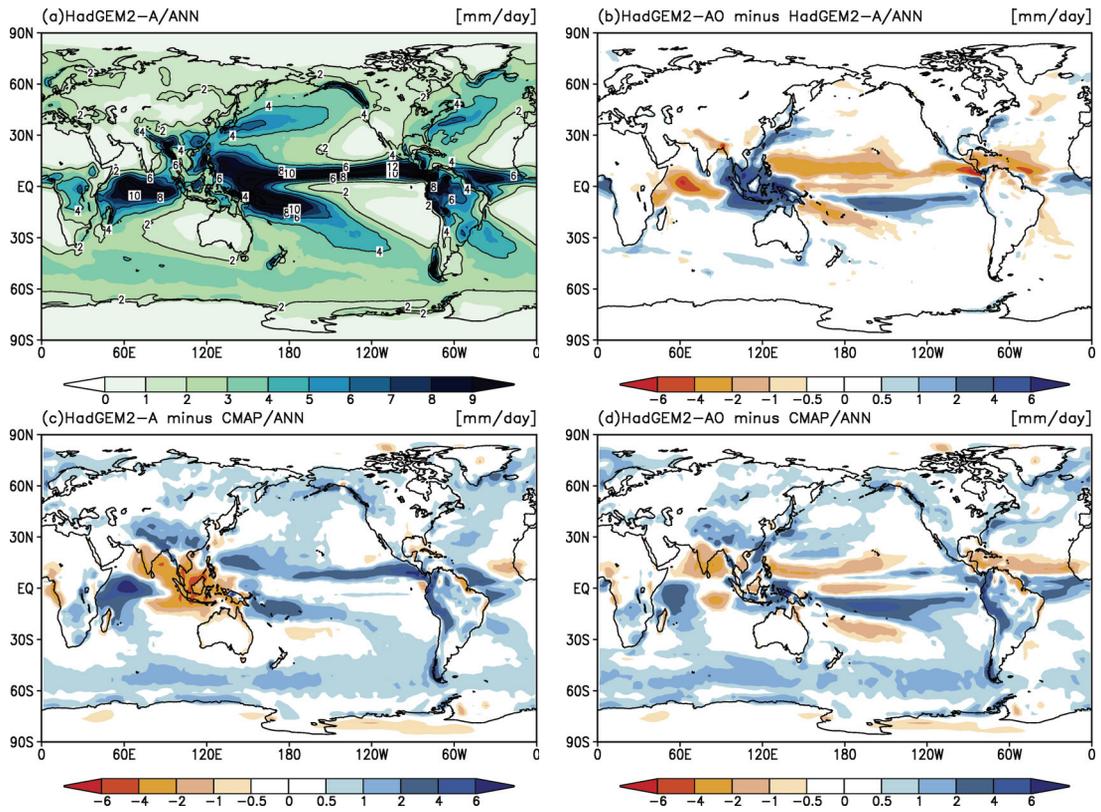


그림 3.8 (a) HadGEM2-A가 모의한 강수의 현재기후 (1971~2000년) 기후값 분포와 (b) HadGEM2-AO와의 차이, 그리고 (c) HadGEM2-A와 기후값과의 차이, (d) HadGEM2-AO와 기후값과의 차이 (단위, mm day^{-1}).

과거기후실험의 모의성능 평가를 위해 관측대비 모델 결과의 편차 값을 산정하였다 (Reichler and Kim, 2008). 모델에서 전망된 20개 기후 변수들을 관측 값과 비교하여 편차를 구하고⁴⁾ 구해진 모델의 편차를 전체 모델의 평균 편차로 나누어, 평균적인 모델 성능에 대비한 각 모델의 성능을 계산하였다⁵⁾. 그리고 이렇게 계산된 편차를 모든 변수에 대하여 평균하여, 20개 기후 변수의 모의 성능을 모두 반영한 종합적인 모델 편차를 계산하였다⁶⁾.

국립기상연구소의 결과를 IPCC 4차 평가보고서 작성에 참여한 모델들의 결과와 비교하였으며, 지역별로 그리고 대륙과 해양을 나누어 살펴보았다 (그림 3.9). 값이 작아질수록 (푸른색이 진해 질수록) 관측과의 편차가 작아지고 모델의 모의 성능 결과가 좋을 것을 의미한다. IPCC 4차 평가보고서에 참여한 대부분의 모델 결과와 비교하였을 때 국립기상연구소의 과거기후실험의 결과가 우수하였다. 특히 대부분 기후 모델에서 모의성능이 좋지 못한 인도 지역과 동아시아 지역에서도 성능 개선이 있었다.

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

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

6) 모든 변수에 대한 모의성능을 종합 반영한 평균한 최종 모델 평가 지수 \overline{I}^{2v}

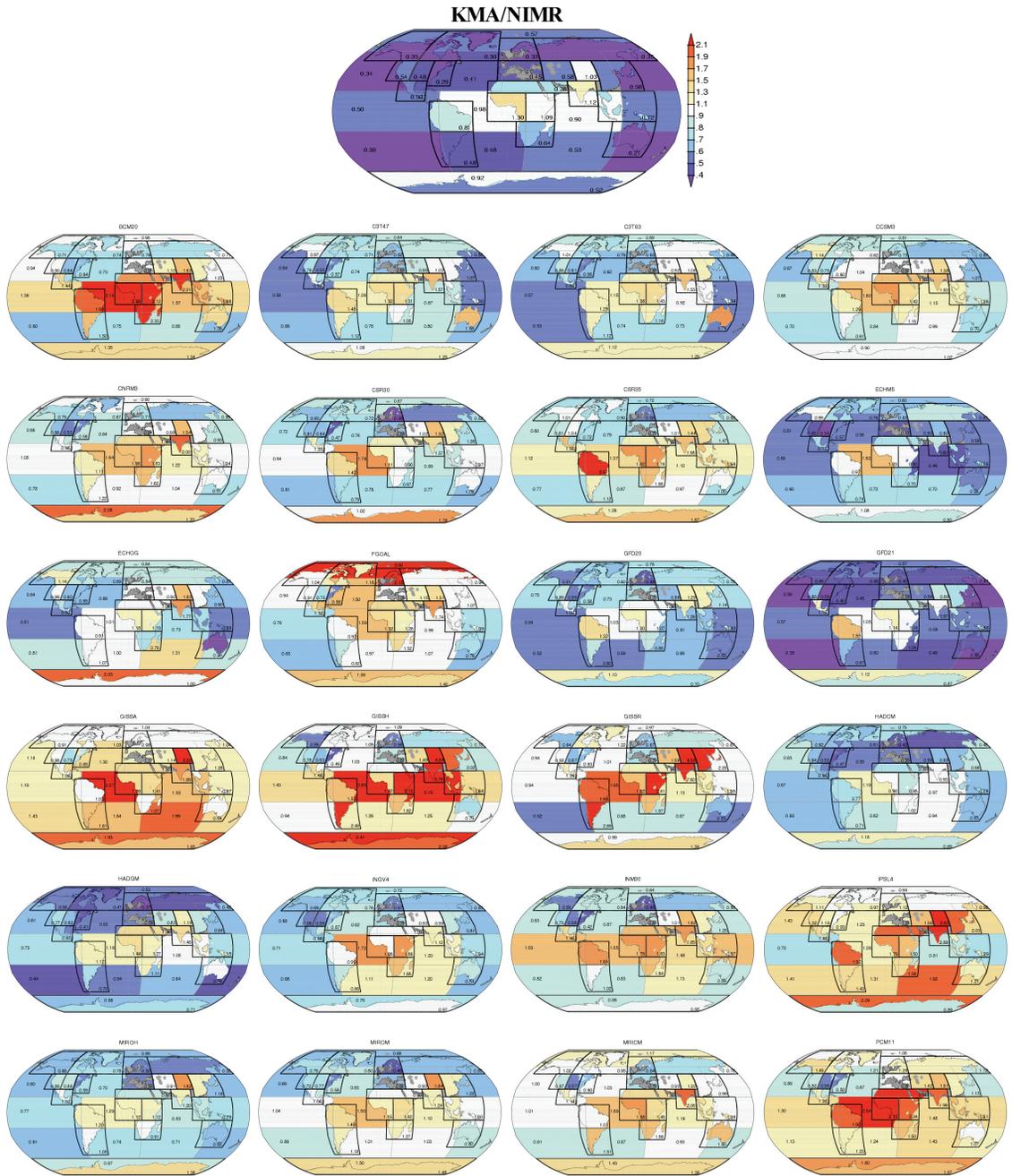


그림 3.9 기후모델 간의 성능평가 결과 비교. 가장 위쪽의 결과가 국립기상연구소 HadGEM2-AO의 결과이며 나머지는 IPCC 4차 평가보고서 작성에 참여한 모델의 성능평가 결과임.

3.2 전지구 미래 전망

전지구 미래기후를 전망하기 위해 현재기후 (1971~2000년)를 기준으로 21세기 말 (2070~2099)의 변화를 살펴보았다. 먼저, 1860년부터 2099년까지 전지구 평균한 기온과 강수의 변화를 살펴보았다 (그림 3.10~3.11). 여기서 강수는 현재기후를 기준으로 그 변화를 퍼센트 (%)로 표현하였다. RCP4.5에 의해 모의된 기온은 현재에 비해 21세기 말 (2070~2099)에 약 2.8℃, RCP8.5 시나리오 하에서는 약 4.8℃ 상승하는 것으로 나타났다. 그리고 강수는 RCP4.5 시나리오에서는 21세기 말에 약 4.5%, RCP8.5에서는 약 6.2% 증가될 것으로 전망되었다. 기온과 강수는 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오에서 모두 상승 추세를 보이고 있으며, 고농도 시나리오인 RCP8.5에서 상승폭이 더 높게 나타났다.

전지구 미래기후의 전망을 공간적으로 살펴보면, 대부분의 지역에서 기온이 상승할 것으로 나타났고 강수의 경우에는 지역적으로 차이를 보였다 (그림 3.12~3.13). 연평균, 여름철, 겨울철의 영역 평균된 값을 살펴보면 RCP4.5 시나리오에서는 각각 2.8℃, 2.6℃, 2.9℃으로 나타났고, RCP8.5 시나리오에서는 4.8℃, 4.6℃, 5.0℃으로 나타났다. 또한 여름철보다는 겨울철에 기온 상승이 두드러질 것으로 전망되었다. 그리고 육지의 기온 상승이 RCP4.5에서는 3.7℃, RCP8.5에서는 6.5℃로 나타나 해양보다 육지에서 기온 상승이 클 것으로 나타났다. 강수의 미래 변화에서 연평균, 여름철, 겨울철의 영역 평균된 값은 RCP4.5 시나리오에서는 각각 4.5%, 3.9%, 4.9%로 나타났고, RCP8.5 시나리오에서는 6.2%, 4.9%, 7.3%로 나타나 여름철보다 겨울철 강수가 뚜렷하게 증가할 것으로 나타났다. 또한 두 시나리오에서 모두 전지구 평균 강수는 증가할 것으로 나타났지만 지역적으로는 증감 지역으로 대비되었다. 연평균 강수량은 북아프리카와 남유럽, 그리고 호주지역에서 상당한 감소가 전망되었다. 고농도 시나리오일수록 강수가 증가하는 지역은 더 증가하고, 감소하는 지역은 더 감소하는 것으로 나타났다.

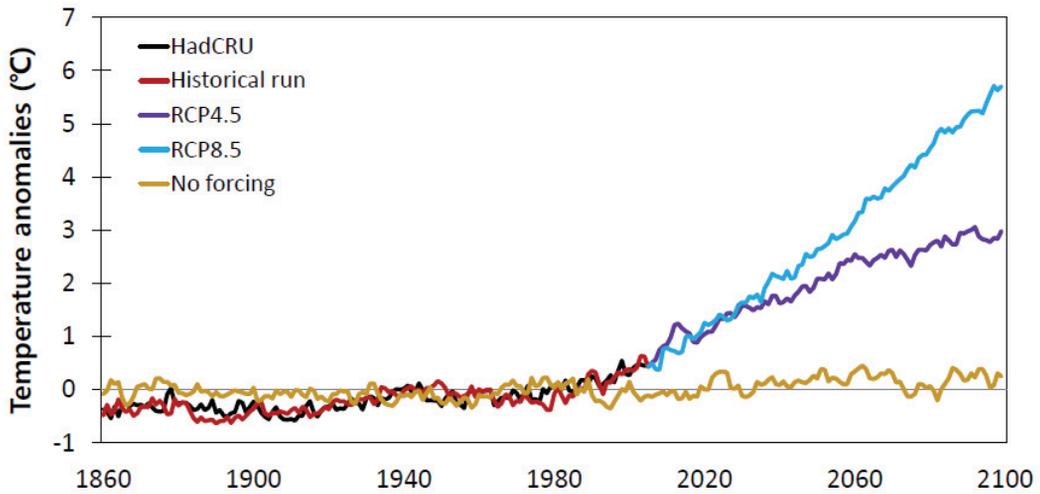


그림 3.10 1971~2000년 대비 1860~2099년 1.5 m 기온의 변화. 검정색, 빨간색, 보라색, 파란색, 노란색은 각각 관측 (HadCRU), 과거모의실험, RCP4.5 시나리오, RCP8.5 시나리오, 1850년 강제력으로 고정된 제어실험을 나타냄 (단위, °C).

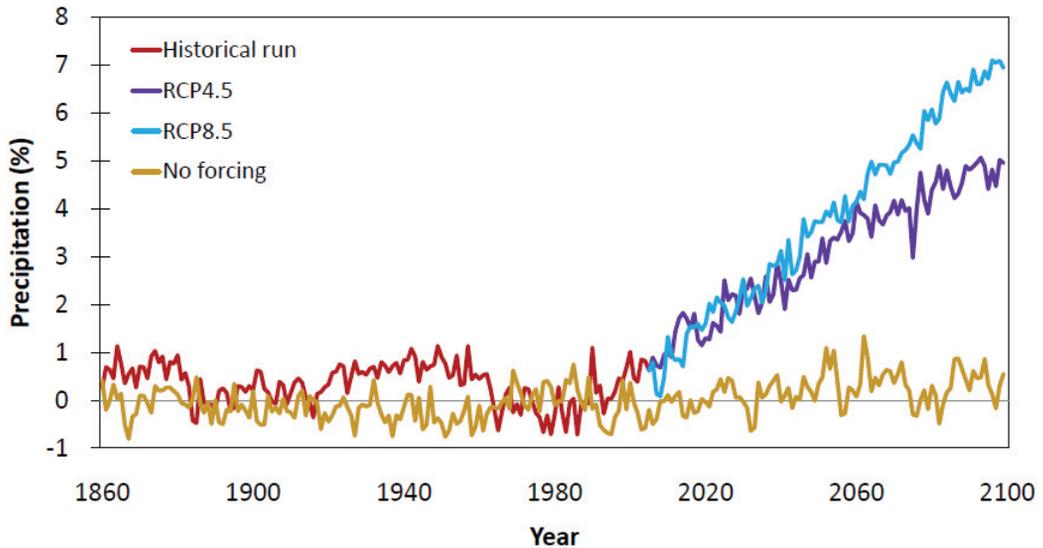


그림 3.11 1971~2000년 대비 1860~2099년 강수의 변화. 빨간색, 보라색, 파란색, 노란색은 각각 과거모의실험, RCP4.5 시나리오, RCP8.5 시나리오, 1850년 강제력으로 고정된 제어실험을 나타냄 (단위, %).

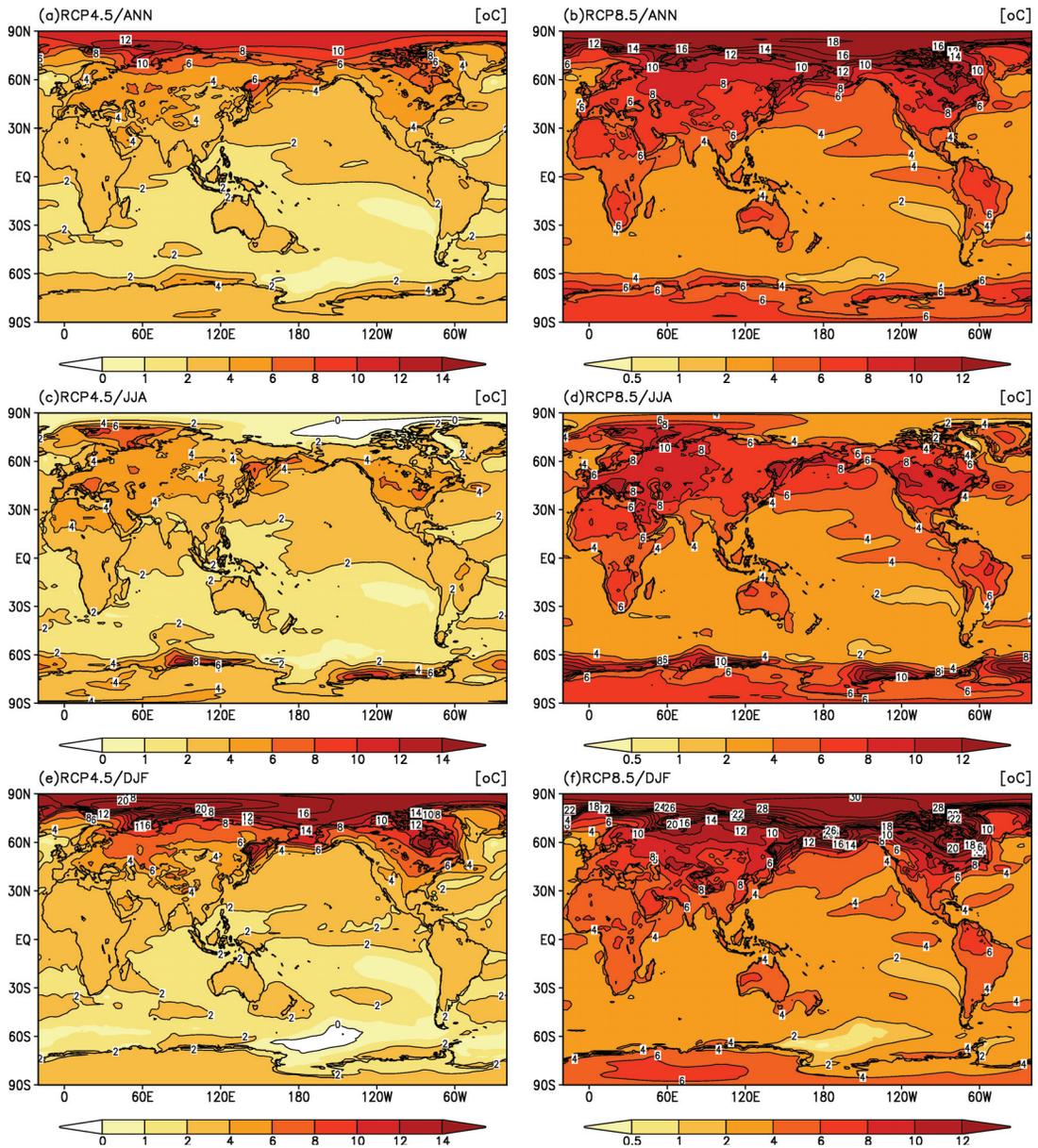


그림 3.12 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오에 의해 모의된 (a), (b) 연평균, (c), (d) 여름철, (e), (f) 겨울철의 현재기후 (1971~2000년) 대비 미래 (2070~2099년)의 1.5 m 기온 분포 (단위, °C).

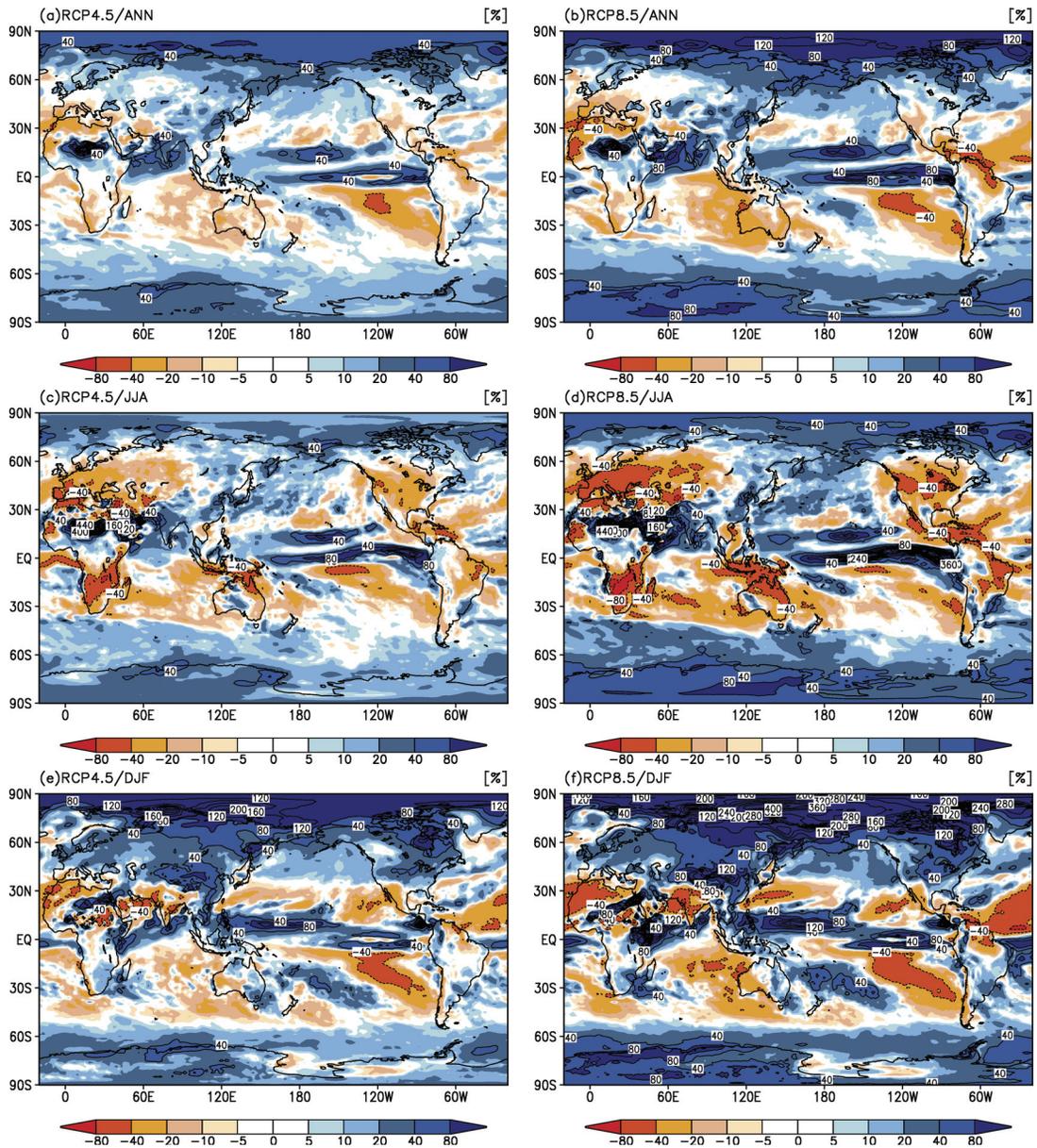


그림 3.13 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오에 의해 모의된 (a), (b) 연평균, (c), (d) 여름철, (e), (f) 겨울철의 현재기후 (1971~2000년) 대비 미래 (2070~2099년)의 강수 분포 (단위, %).

전지구 미래기후 전망에 이어, 각 대륙의 미래기후를 살펴보기 위해 전 세계 육지를 6개 지역으로 구분하여 현재기후 (1971~2000)에 대한 그 변화를 알아보았다. 6개 지역은 유럽, 아프리카, 동아시아, 호주, 북아메리카, 그리고 남아메리카이다. 6개 지역의 영역은 다른 색깔로 각각 표현하고 각 지역에 대해 평균한 기온과 강수의 시계열을 그 영역 위에 1860년부터 2099년까지 나타내었다 (그림 3.14~3.15). 기온은 6개 지역에서 모두 상승할 것으로 나타났지만 지역별로 기온 상승률이 다르게 나타났다. 또한 6개 지역의 21세기 말 (2070~2099) 기온은 모두 전지구 기온 평균 (RCP4.5: 2.8°C, RCP8.5: 4.8°C)을 상회할 것으로 나타났다. 특히 북아메리카 지역 (RCP4.5: 4.7°C, RCP8.5: 7.9°C)이 가장 더워질 것으로 전망되었다.

6개 지역별 강수 전망에 있어서는 지역에 따라 강수의 변화가 다르게 나타났다. 아프리카, 호주, 남아메리카 지역은 두 시나리오에서 모두 강수가 감소할 것으로 전망되었고 동아시아, 북아메리카에서는 모두 증가할 것으로 나타났다. 유럽지역은 시나리오에 따라 변화 경향이 다르게 나타났는데, RCP4.5에서는 강수가 2.1% 증가하고, RCP8.5에서는 4.1% 감소할 것으로 전망되었다.

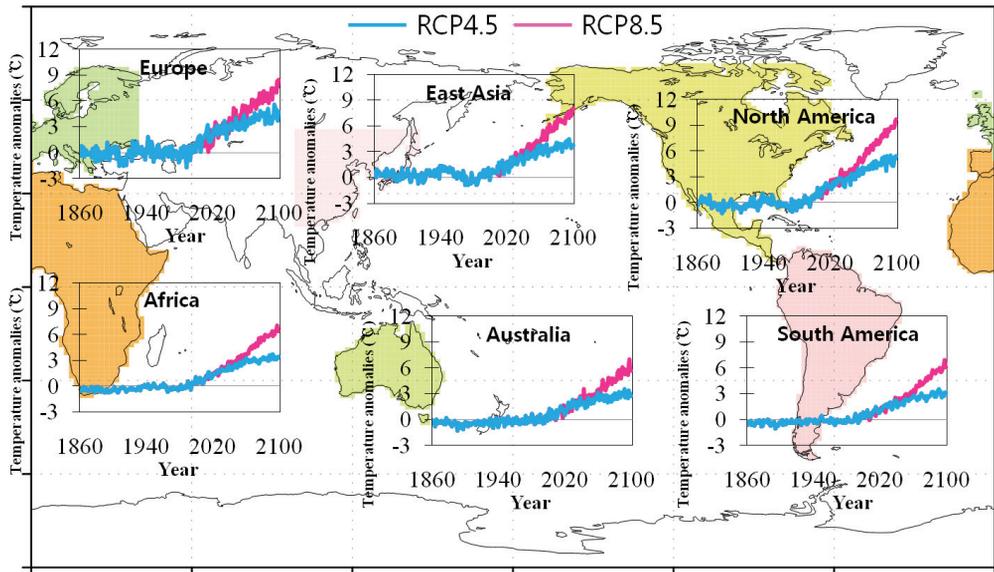


그림 3.14 RCP4.5 (파란색)와 RCP8.5 (빨간색)에 의해 전망된 6개 대륙규모에 대한 1.5 m 기온 아노말리 변화. 아노말리는 1971년부터 2000년까지 30년 기후값을 사용하여 산정하였으며, 각 대륙은 다른 색깔로 나타냄 (단위, °C).

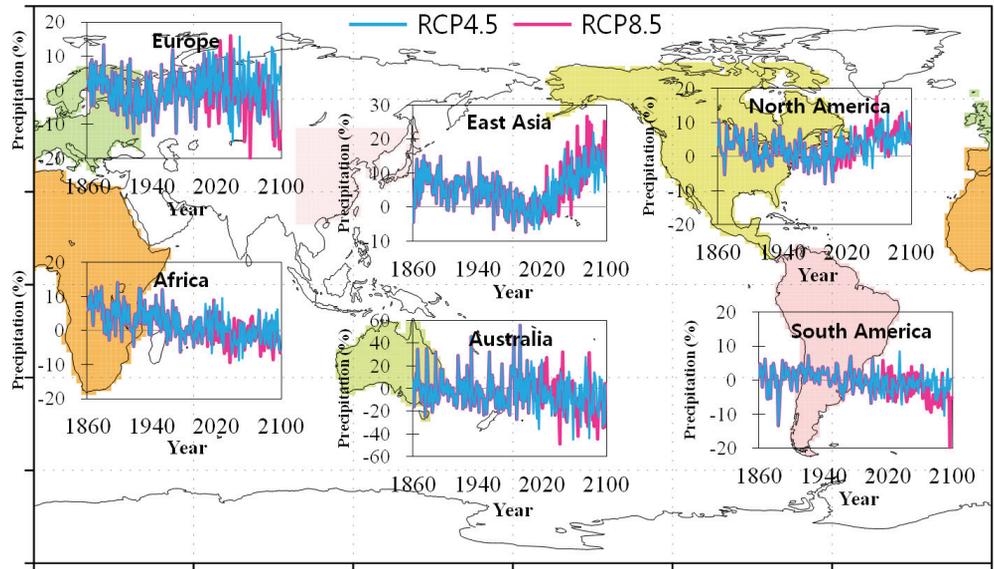


그림 3.15 RCP4.5 (파란색)와 RCP8.5 (빨간색)에 의해 전망된 6개 대륙규모에 대한 강수의 변화. 아노말리는 1971년부터 2000년까지 30년 기후값 대비 값, 각 대륙은 다른 색깔로 나타냄 (단위, %).

지구온난화에 따른 기후변화는 입체적인 대기 순환시스템의 변화를 가져오기 때문에 기후변화에 대한 넓은 이해를 위해서 지상뿐만 아니라 연직 분포에 대한 분석이 필요하다. 현재기후 (1971~2000년) 대비 미래기후 (2070~2099년)의 상층의 기온 변화를 전망한 공간 분포를 살펴보면, RCP4.5 시나리오 850 hPa에서 현재기후 대비 미래기후는 2.7°C 상승, 50 hPa에서는 1.6°C 하강할 것으로 나타났다. RCP8.5 시나리오의 850 hPa에서는 4.7°C 상승하고, 50 hPa에서 2.6°C 하강할 것으로 전망되었다 (그림 3.16).

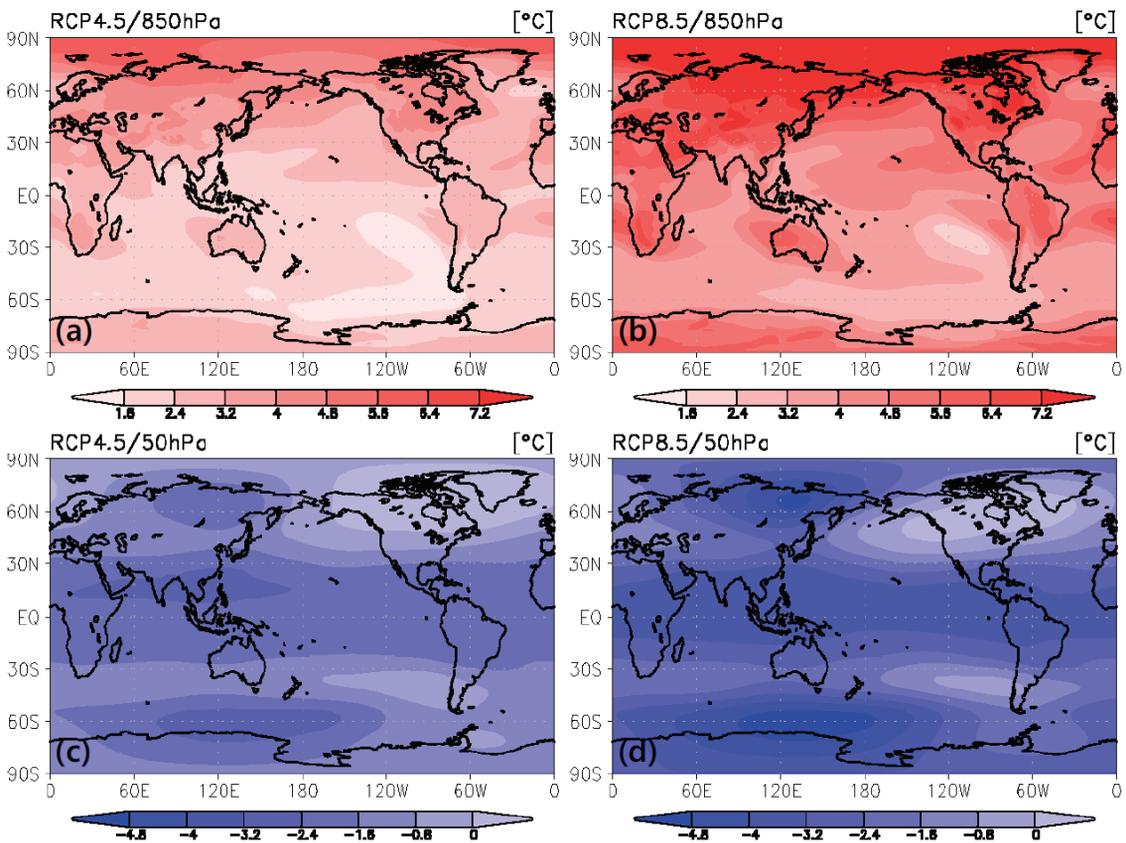


그림 3.16 시나리오에 의해 모의된 현재기후 (1971~2000년) 대비 미래 (2070~2099년)의 기온변화 분포: (a) RCP4.5/850 hPa, (b) RCP8.5/850 hPa, (c) RCP4.5/50 hPa, (d) RCP8.5/50 hPa (단위, °C).

RCP4.5/8.5 시나리오별 21세기 말과 20세기 말 동서평균의 차이를 그림 3.17에 나타내었다. 기온변화는 두 시나리오 모두 열대 지역 대류권 상부와 북반구 고위도 지역 대류권 하부에서 기온 상승이 크다. 열대 지역 상부에서 기온 상승이 큰 이유는 대류에 의해 열이 상부로 수송되었기 때문이다. 그리고 성층권에서는 대류권에서 온실가스에 의한 열 흡수로 기온이 하강될 것으로 전망된다.

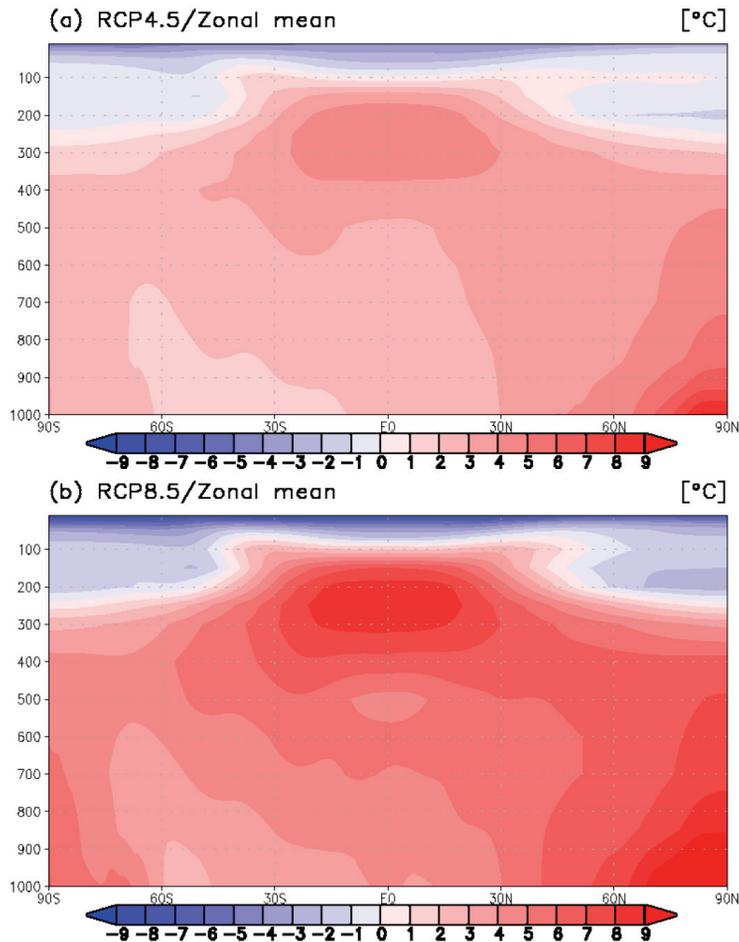


그림 3.17 시나리오에 의해 모의된 현재기후 (1971~2000년) 대비 미래 (2070~2099년)의 위도별 동서평균 기온의 연직변화: (a) RCP4.5, (b) RCP8.5 (단위, °C).

3.3 전지구 극한 기온

기후변화 연구에서 평균 상태의 변화뿐만 아니라 변동성 증가에 대한 관심이 고조되면서, 극한 기후 현상은 IPCC 제 3차 보고서 (TAR)에 제시된 후 IPCC 제 4차 보고서 (AR4)에서부터 중요성이 본격적으로 다루어지기 시작하였다. 일반적으로 극한 기후 현상의 분석은 기후변화지수와 관련된 전문가회의에서 정의된 다양한 기상요소에 대한 27가지 극한기후 지수⁷⁾를 이용하여 수행된다. 여기서는 최저기온과, 최고기온의 극값의 변화를 분석하여 기온의 평균값이 아닌 기온의 양 극단의 값의 변화경향을 파악함으로써 극한 기후에 대한 과거 및 미래 변화 경향을 제시하였다. 분석에는 극한 기후 지수 중 온난야 일수, 한랭야 일수, 온난일 일수, 한랭일 일수가 사용되었다. 온난야는 최저기온 (해뜨기 전에 출현)의 높은 극값으로, 한랭야는 최저기온의 낮은 극값으로 정의되며 온난일은 최고기온 (한낮에 출현)의 높은 극값으로 정의되고, 한랭일은 최고기온의 낮은 극값으로 정의된다.

극한 기온 지수의 변화경향을 살펴보기 위하여 1861~2005년 기간에 대해 국립기상연구소 기후변화모델이 모의한 과거모의 (historical run)자료를 분석하였다 (그림 3.18). 과거 145년 동안의 기후가 현재기후와 비교하여 어떤 특성을 보였는지 분석하기 위하여, 1971~2000년 (현재기후)의 극한 기온 출현일 수를 기준으로 하여 1861~2005년 (과거기후)까지의 격자점별로 산출된 극한 기온 출현일 수⁸⁾와 차이를 구하였다 (그림 3.18

7) 일반적으로 극한 (extreme)은 전체 경우를 값을 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).

8) 여기에 나타낸 것은 1971~2000년 일최고기온과 일최저기온을 기준으로 정의한 극한기온 지수에 대한 1861~2005년까지의 차이 (anomaly)이다. 계산을 위하여 모든 격자점에 대하여, 일최저기온과 일최고기온을 오름차순으로 정렬 한 후, 한랭야 (그림 3.18 (a))와 한랭일 (그림 3.18 (c))은 하위 10% (10 퍼센타일)의 값, 온난야 (그림 3.18 (b))와 온난일 (그림 3.18 (d))은 일최저기온과 일최고기온의 상위 10% (90 퍼센타일)의 값으로 정의하였다. 그리고 정의된 하위 10% (상위 10%)값보다 낮은 (높은) 값을 기록한 날 수를 세어 자료기간 전체에 대하여 매 해 마다 극한 출현 일 수를 산출하였다.

전지구 분포). 이를 전지구 평균한 결과 20세기 이전 기간에는 모두 따뜻해지는 경향 (그림 3.18 막대그래프)이 나타났다.

한랭야는 대부분의 육지지역에서 약한 감소 경향 (전지구 평균 10년마다 0.82일 감소)을 보였고, 온난야는 약한 증가 경향 (전지구 평균 10년마다 0.93일 증가)을 보여 전반적으로 따뜻해지는 경향이 나타났다 (그림 3.18 (a)). 이런 특징은 남아메리카 북부와 인도네시아 연안지역, 아프리카 대륙 적도부근에서 상대적으로 뚜렷하게 나타났다. 하지만 한반도를 포함한 동아시아 지역과 미국 중서부 지역, 그리고 흑해 주변 지역에서는 한랭야는 증가하고, 온난야는 감소하는 반대의 경향이 나타났다. 동아시아 (20-50N, 100-150E)지역의 한랭야는 10년마다 약 0.08일 감소로 거의 변화가 없었고, 온난야는 10년마다 0.18일 감소하여 전지구 평균과 비교할 때, 동아시아 지역의 경향성은 거의 나타나지 않는 것으로 분석되었다 (그림 3.18 (b)).

한랭일도 대부분의 육지지역에서 약한 감소 경향 (전지구 평균 10년마다 0.12일 감소)을 보였으며 (그림 3.18 (c)), 온난일 역시 약한 증가경향 (전지구 평균 10년마다 0.4일 증가)을 보여 전반적으로 따뜻해지는 경향이 나타났다 (그림 3.18 (d)). 하지만 한반도 주변 지역, 북아메리카지역, 흑해와 카스피해 주변 지역에서는 한랭일이 증가하고, 온난일이 감소하는 반대의 경향이 나타났다. 특히 미국지역은 한랭일이 약하게 증가하는 경향이 나타났고, 유라시아 내륙지역에서는 온난일이 약하게 감소하는 경향이 넓게 나타났다. 동아시아 지역의 한랭일은 10년마다 0.01일 증가로 거의 변화가 없었고, 온난일은 10년마다 0.23일 감소하여 전지구 평균과 비교할 때, 동아시아지역에서는 경향성이 거의 나타나지 않는 것으로 분석되었다.

연도별 극한기온의 분석 (막대그래프)에서 한랭야 (그림 3.18 (a))와 한랭일 (그림 3.18 (c))은 1930년대~1950년대와 1980년대 이후 감소하는 온난화 경향이 나타났다. 온난야 (그림 3.18 (b))와 온난일 (그림 3.18 (d)) 역시 1930년대~1950년대와 1990년대 이후 증가하는 온난화 경향이 나타났다. 또한 온난야가 온난일 보다 상대적으로 더 크게 증가하는 것으로 분석되었다.

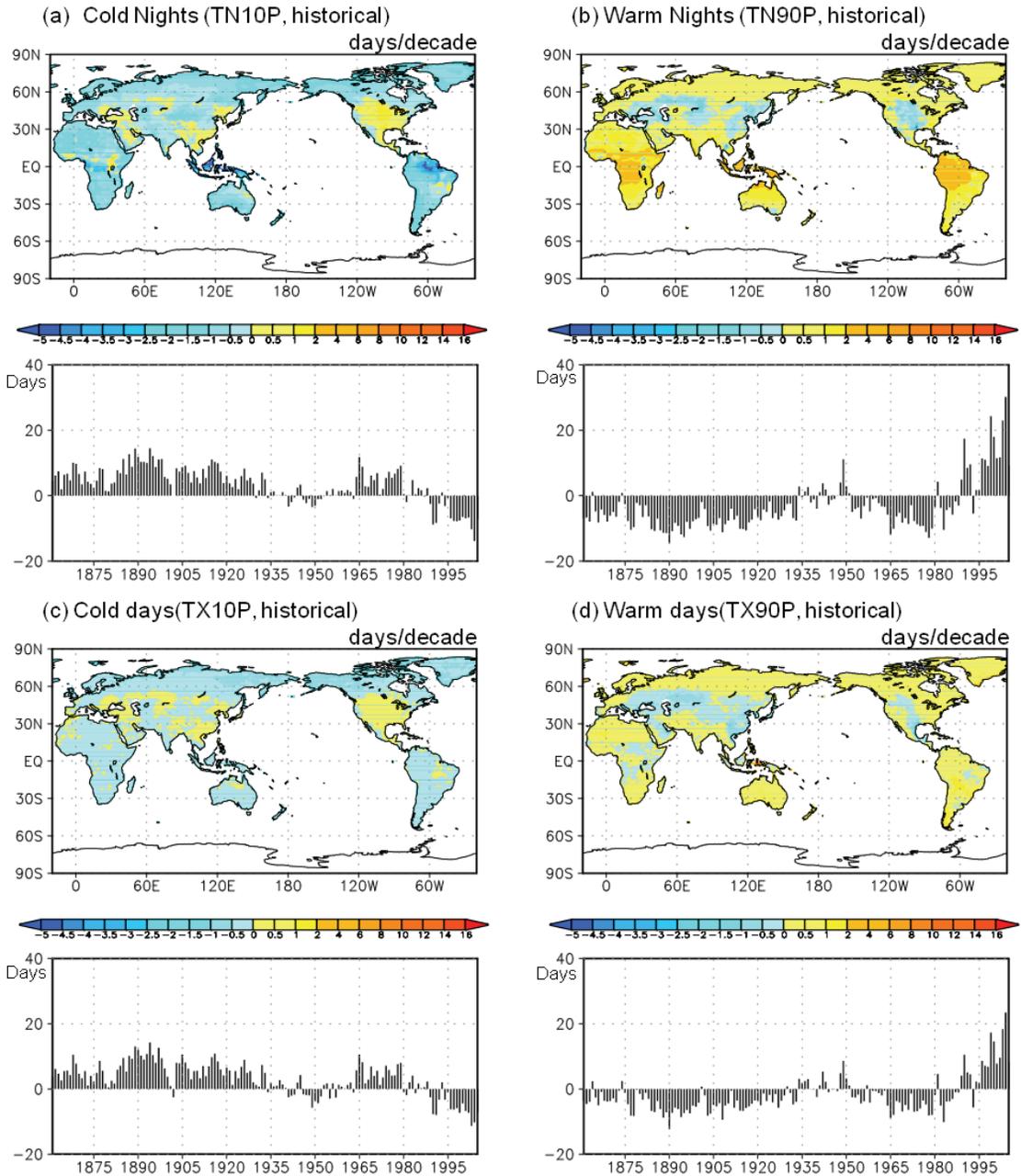


그림 3.18 HadGEM2-AO의 과거모의 자료를 이용한, 퍼센타일 기준의 기온 극값 지수 변화 경향 (10년마다의 변화 일 수, 지도)과 1971~2000년 평균에 대한 1861~2005년 간의 연도별 편차 시계열 (막대그래프), (a) 한랭야 (TN10P), (b) 온난야 (TN90P), (c) 한랭일 (TX10P), (d) 온난일 (TX90P).

미래 전망 자료에 대해서도 과거모의 자료와 동일한 극한 기후지수를 사용하여 변화 경향을 살펴보았다. RCP4.5 농도경로를 적용한 기후변화모델의 2006~2099년 미래모의에서의 극한 기온 경향을 현재와 비교하여 산출하고자, 1971~2000년 기간 (현재기후)의 평균 극한 출현일수를 기준으로 2006~2099년의 격자점별 극한 기온 출현일수와의 차이를 구하여 미래의 극한 기온 지수 경향을 계산하였으며 기타 산출 방법은 그림 3.18과 동일하였다 (그림 3.19).

RCP4.5 결과에서 나타난 미래의 한랭야는 모든 육지지역에서 감소경향 (전지구 평균 10년마다 1.89일 감소)을 보였으며 특히, 아프리카 북부와 북아메리카 북부에서 상대적으로 더 많이 감소하는 경향을 보였다 (그림 3.19 (a)). 동아시아 지역의 한랭야는 10년마다 1.96일 감소하여 전지구 평균 보다 더 빨리 감소하는 것으로 분석되었다. 온난야는 모든 육지지역에서 증가경향 (전지구 평균 10년마다 8.96일 증가)을 보였으며 특히 적도부터 남북위 20도 이내 지역에서 더 높은 증가경향을 보였다 (그림 3.19 (b)). 동아시아 지역의 온난야는 10년마다 5.16일 증가하는 것으로 나타나 전지구 증가경향보다 낮은 증가를 보였다.

한랭일은 대부분의 육지지역에서 약한 감소경향 (전지구 평균 10년마다 0.29일 감소)을 보였으며, 북반구 고위도 지역에서 상대적으로 감소경향이 컸다 (그림 3.19 (c)). 동아시아 지역의 한랭일도 10년마다 0.29일 감소하는 것으로 나타나 전지구 변화경향과 동일하였다. 온난일은 적도를 제외한 대부분 지역에서 증가경향 (전지구 평균 10년마다 2.67일 증가)이 나타났다. 그러나 적도를 중심으로 한 지역에서는 약한 감소 경향이 나타났다 (그림 3.19 (d)). 동아시아 지역의 온난일은 10년마다 3.23일 증가하는 것으로 나타나 전지구 상승 경향보다 높았다.

연도별 극한기온의 분석에서 한랭야와 한랭일은 감소하고, 온난야와 온난일은 증가하는 온난화 경향을 보였다. 특히 온난야의 증가율이 높게 나타났다.

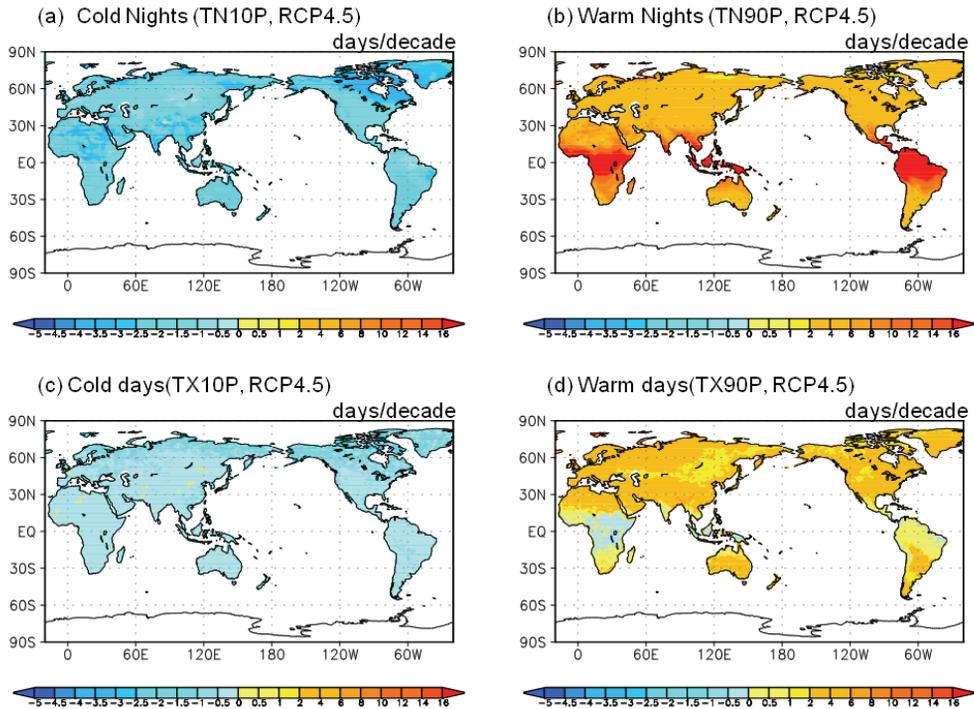


그림 3.19 RCP4.5 미래전망 자료 (2006~2099)를 이용하였으며, 분석방법은 그림 3.18과 동일.
(a) 한랭야 (TN10P), (b) 온난야 (TN90P), (c) 한랭일 (TX10P), (d) 온난일 (TX90P).

RCP8.5 시나리오에서도 그림 3.19와 동일한 방법으로 현재기후 (1971~2000년)에 대한 2006~2099년 미래 극한 기온 경향을 분석하였다. 미래 한랭야는 모든 육지지역에서 감소경향 (전지구 평균 10년마다 2.79일 감소)을 보였으며 적도지역의 감소경향은 고위도 지역에 비해 작았다 (그림 3.20 (a)). 동아시아 지역의 한랭야는 10년마다 3.29일 감소하여 전지구 평균 보다 더 빠른 감소를 보였다. 온난야는 모든 육지지역에서 강한 증가경향 (전지구 평균 10년마다 15.7일 증가)을 보였다 (그림 3.20 (b)). 특히 적도 주변 지역에서 상승경향이 뚜렷했으며, 아프리카와 남아메리카의 상승경향도 두드러졌다. 동아시아 지역의 온난야는 10년마다 9.46일 증가하여 전지구 평균 보다는 낮은 증가경향을 보였다.

한랭일 역시 모든 육지지역에서 감소경향 (전지구 평균 10년마다 2.84일 감소)이 뚜렷하게 나타났다 (그림 3.20 (c)). 동아시아 지역의 한랭일은 10년마다 3.19일 감소하여

전지구 평균 감소경향보다 높은 감소 경향을 보였다. 온난일도 모든 육지지역에서 강한 상승경향 (전지구 평균 10년마다 15.47일 증가)이 나타났다 (그림 3.20 (d)). 온난야와 유사하게 적도 주변 지역에서 상승 경향이 뚜렷했으며, 아프리카와 남아메리카의 상승경향이 두드러졌다. 동아시아 지역의 온난일은 10년마다 9.58일 증가하여 전지구 평균 보다는 낮은 증가경향을 보였다.

특히 RCP4.5에서는 온난야의 상승경향과 한랭야의 감소 경향이 상대적으로 강하여 밤이 온난화되는 경향이 낮보다 뚜렷한 것으로 분석되었다. 그러나 RCP8.5에서는 온난야의 상승 경향과 온난일의 상승경향, 그리고 한랭야의 감소경향과, 한랭일의 감소경향이 유사하게 나타나 낮과 밤 모두 유사하게 뚜렷한 온난화 경향을 갖는 것으로 분석되었다.

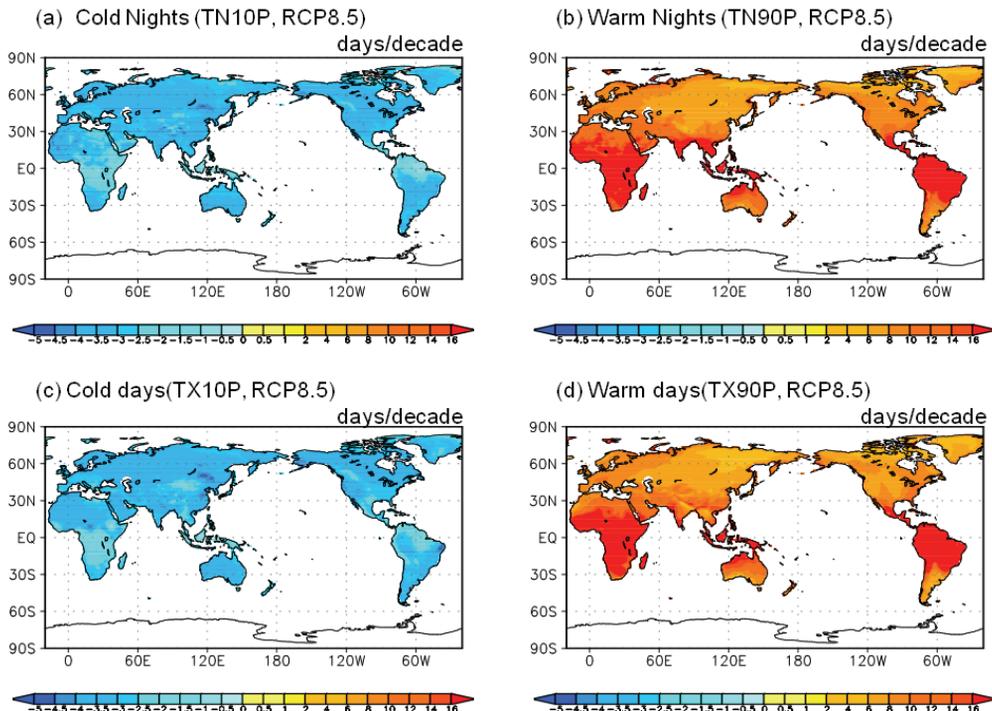


그림 3.20 RCP8.5 미래전망 자료 (2006~2099)를 이용하였으며, 분석방법은 그림 3.19와 동일. (a) 한랭야 (TN10P), (b) 온난야 (TN90P), (c) 한랭일 (TX10P), (d) 온난일 (TX90P).

3.4 전지구 극한 강수

HadGEM2-AO의 일 강수량을 이용하여 전지구 육상 강수의 극한기후 현상을 분석하였다. 분석에는 극한 기후 지수 중 연강수량, 연강수일수, 강수강도지수, 연속건조일수가 사용되었다. 과거모의 (historical run)에서 일 강수량이 1 mm 이상인 강수의 연간 총 강수량의 현재기후 (1971~2000년) 분포와 현재기후 대비 미래시나리오 RCP4.5와 RCP8.5에 의한 2070~2099년의 미래변화를 살펴보았다 (그림 3.21). 전지구 육지지역에서 미래시나리오 RCP4.5와 RCP8.5에 의해 모의된 연강수량은 현재기후 대비 각각 약 4.3%와 3.6% 증가할 것으로 전망되었다. 특히 북반구의 극지역을 포함하는 아시아의 대부분 지역과 북아메리카 고위도 지역, 아프리카의 북위 20도 부근 지역에서 연강수량이 뚜렷하게 증가하는 경향을 보였다. 반면에 지중해 주변 지역, 남아프리카, 호주, 남아메리카 북동부 지역 등은 연강수량이 크게 감소할 것으로 전망되었다.

전지구 육지지역에서 일 강수량이 1 mm 이상인 강수일의 연간 총 강수일수의 현재기후 분포와 미래변화 분포를 통하여 미래 연강수일수 변화를 알아보았다 (그림 3.22). 현재기후에서는 적도지역을 중심으로 강수일수가 크게 나타났고, 미래시나리오 RCP4.5와 RCP8.5에 의해 미래에는 전지구적으로 각각 약 -1.4%와 -4.4% 감소할 것으로 전망되었다. 남반구에서는 거의 모든 지역에서 연강수일수가 뚜렷하게 감소할 것으로 나타났다. 북반구에서는 지중해 연안 지역 및 북아프리카 지역과 북위 60도 이하의 북아메리카 지역에서 연강수일수의 감소 경향을 보였다. 복사강제력이 더 큰 미래 시나리오 RCP8.5에서 연강수일수가 더 크게 감소할 것으로 전망되었다.

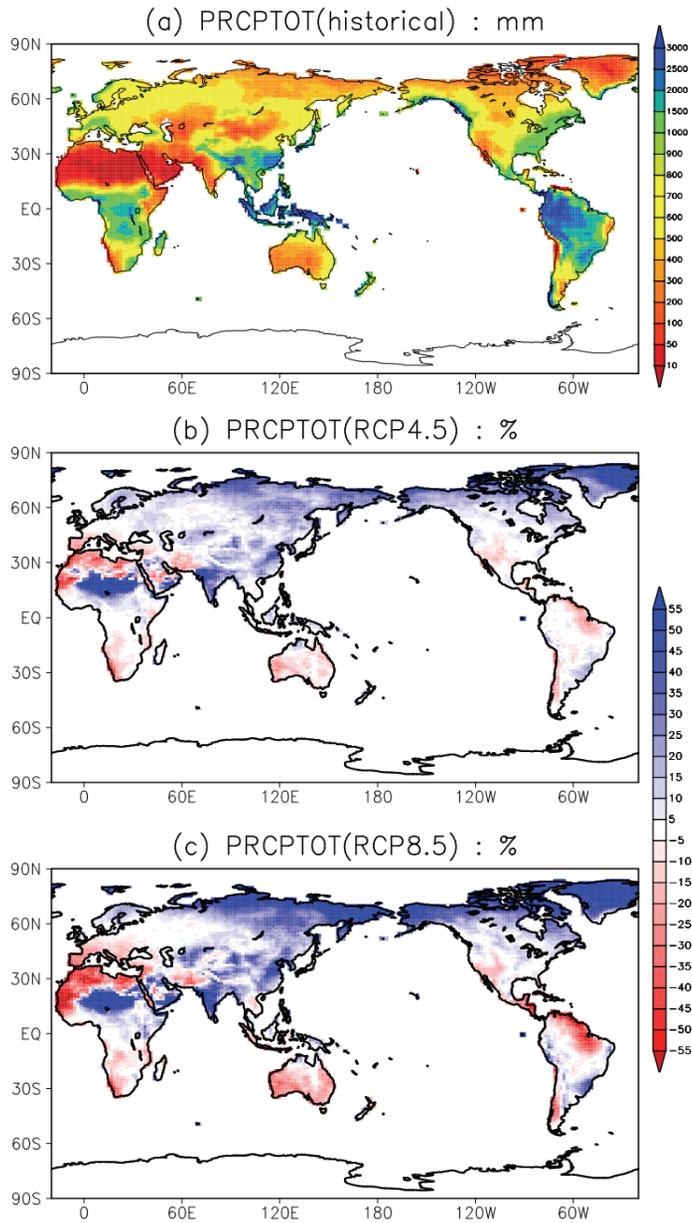


그림 3.21 (a) 과거모의에서의 현재기후 (1971~2000년)에 대한 연간 총 강수량의 공간 분포 (단위, mm), (b) RCP4.5에 근거한 현재기후 대비 미래기후 (2070~2099)의 연강수량 변화 (단위, %), (c) RCP8.5에 근거한 현재기후 대비 미래기후 (2070~2099)의 연강수량 변화 (단위, %).

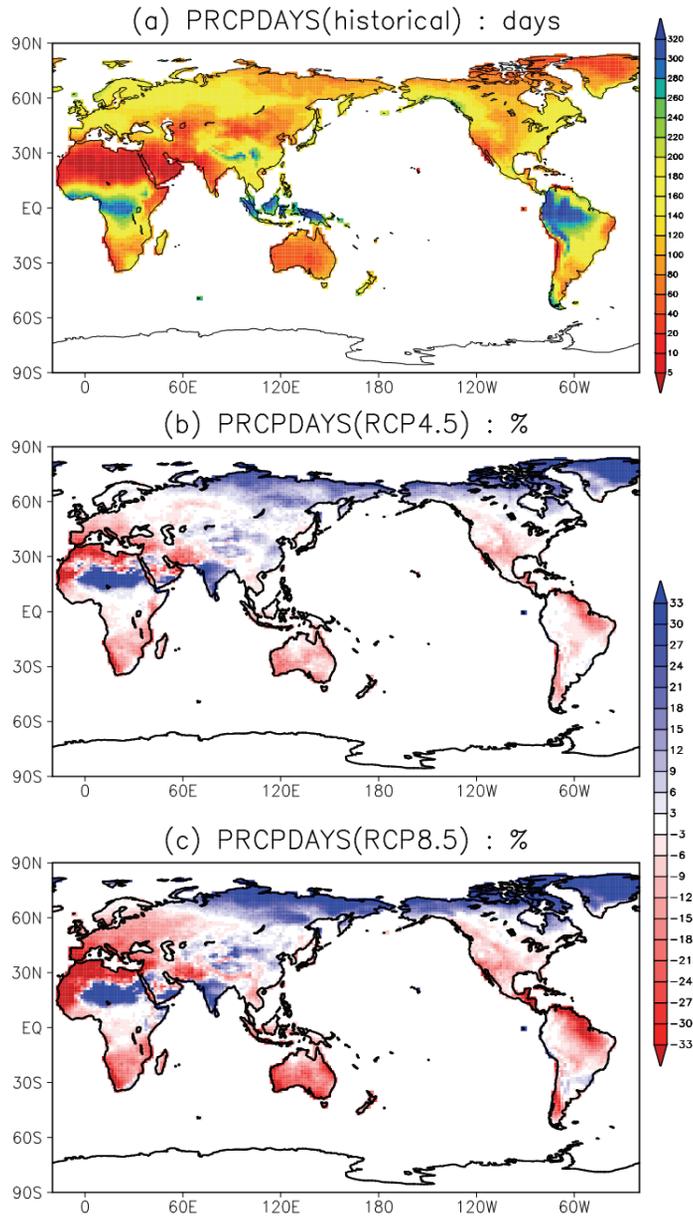


그림 3.22 (a) 과거모의에서의 현재기후 (1971~2000년)에 대한 연간 총 강수일수의 공간 분포 (단위, days), (b) RCP4.5에 근거한 현재기후 대비 미래기후 (2070~2099)의 연강수일수 변화 (단위, %), (c) RCP8.5에 근거한 현재기후 대비 미래기후 (2070~2099)의 연강수일수 변화 (단위, %).

전지구 육지지역 강수강도의 현재기후 분포와 현재기후 대비 미래변화에 대한 분석을 수행하였다 (그림 3.23). 강수강도지수 (Simple daily intensity index)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. 미래시나리오에 근거한 현재기후 (1971~2000년) 대비 미래기후(2070~2099년)의 강수강도지수 변화를 살펴보면, 미래시나리오 RCP4.5와 RCP8.5에 의해서 현재보다 각각 7.1%, 10.5% 증가할 것으로 전망되었다. 강수강도의 증가는 대부분의 육지지역에서 나타났으며 특히 북반구 고위도 지역에서 뚜렷하게 나타났다. 반면에 북아프리카와 호주의 남서부 지역에서는 강수강도가 감소할 것으로 전망되었다. 복사강제력이 큰 RCP8.5에서는 남아메리카의 북동부 지역에서도 강수강도의 감소 경향이 나타났다. 동아시아의 육지지역은 미래시나리오 RCP4.5 (RCP8.5)에 의해 약 12.0% (20.0%)로 전지구의 변화율보다 반응이 클 것으로 전망되었다.

연속건조일수 (Consecutive dry days)는 연속으로 일 강수량이 1 mm 미만인 날의 최대지속일수이다. 이는 수자원 상태를 대표하는 가뭄지표로, 연속건조일수가 길수록 가뭄에 의한 피해에 쉽게 노출된다. 연속건조일수의 현재기후 분포와 현재기후 대비 미래기후의 변화를 살펴보았다 (그림 3.24). 현재기후에서는 사하라, 아라비아, 고비 등의 사막을 포함하는 지역과 남아프리카, 인도, 호주, 북극, 남아메리카 일부 등지에서 연속건조일수가 크게 나타났다. 미래시나리오 RCP4.5 (RCP8.5)에 의해서 미래에는 전지구적으로 약 4.1% (9.0%) 증가할 것으로 전망되었다. 남반구 대부분의 지역과 지중해를 포함하는 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 크게 줄어들 것으로 전망되었다. 동아시아의 육지지역은 미래시나리오 RCP4.5 (RCP8.5)에 의해 약 7.1% (12.7%) 감소하였다.

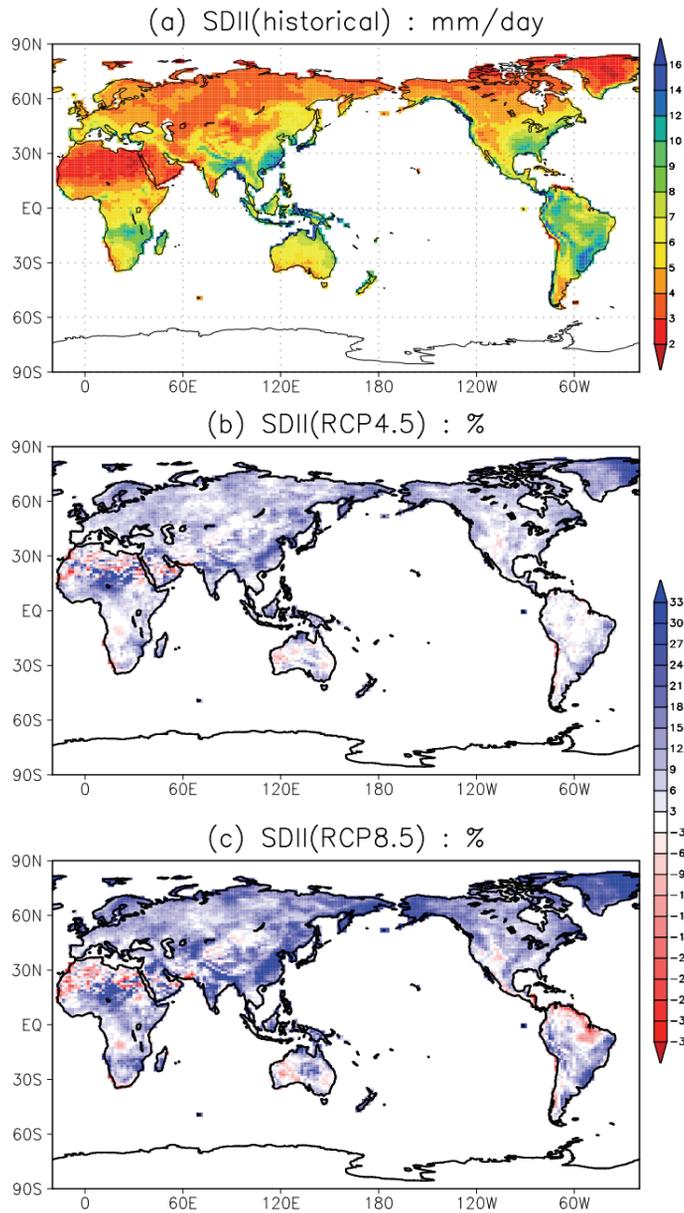


그림 3.23 (a) 과거모의에서의 현재기후 (1971~2000년)에 대한 강수강도지수 (SDII) 공간 분포 (단위, mm day^{-1}), (b) RCP4.5에 근거한 현재기후 대비 미래기후 (2070~2099)의 강수강도지수 변화 (단위, %), (c) RCP8.5에 근거한 현재기후 대비 미래기후 (2070~2099)의 강수강도지수 변화 (단위, %).

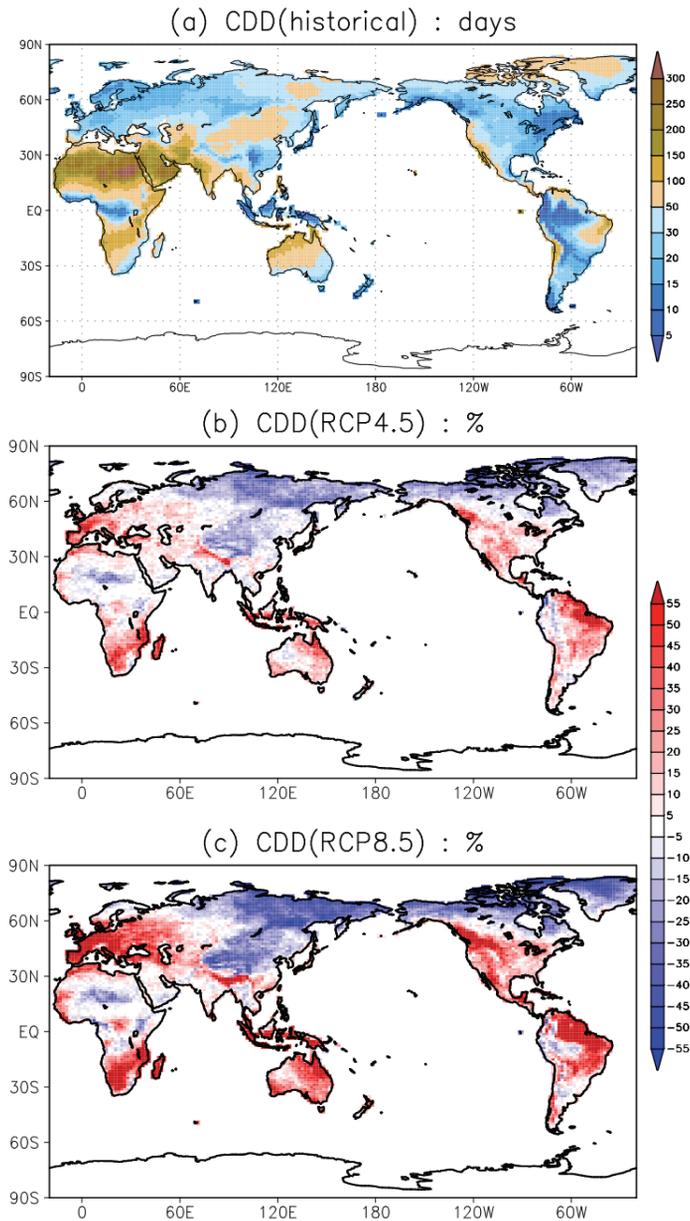


그림 3.24 (a) 과거모의에서의 현재기후 (1971~2000년)에 대한 연속건조일수 (CDD) 공간 분포(단위, days), (b) RCP4.5에 근거한 현재기후 대비 미래기후 (2070~2099)의 연속건조일수 변화 (단위, %), (c) RCP8.5에 근거한 현재기후 대비 미래기후 (2070~2099)의 연속건조일수 변화 (단위, %).

3.5 태풍

태풍은 가장 강력한 파괴력을 가지는 기상현상 중의 하나로 강한 바람과 호우로 큰 재해를 동반한다. 따라서 향후 기후변화에 의해 태풍의 발생이 어떤 영향을 받을지는 최근의 중요한 이슈로 자리잡고 있다. 기후변화 시나리오 자료로부터 미래 태풍의 변화를 전망해 보았다.

과거 태풍이 어디에서 얼마나 발생하였는지의 정보는 관측 자료를 이용하여 알 수 있다. 그러나 기후변화 시나리오에서는 직접적인 태풍 발생의 위치나 강도에 대한 결과가 산출되지 않는다. 따라서 태풍 발생과 연관된 기상 요소를 이용하여 태풍발생지수 (Genesis Potential Index, GPI)⁹⁾와 잠재적 강도 (Potential Intensity, PI)¹⁰⁾를 구함으로써 태풍이 발생하는 위치와 빈도를 가늠해 볼 수 있다 (Emanuel and Nolan, 2004; Bister and Emanuel, 1998).

태풍발생지수가 실제 태풍 발생의 위치와 빈도를 얼마나 잘 나타내는지 확인하기 위하여 유럽중기예보센터 (European Center for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 재분석 자료를 이용하여 세기 말 (1971~2000년) 태풍발생지수를 계산하고, 이를 미국의 합동 태풍 경고 센터 (Joint Typhoon Warning Center, JTWC)에서 제공하는 실제 태풍 발생 위치와 비교하였다 (그림 3.25). 태풍발생지수는 북서태평양과 북대서양, 카리브 해, 멕시코 만, 북동태평양과 인도양, 아라비아 해 그리고 벥골 만에서의 태풍 발생 현황을 잘 나타내 주고 있었다.

$$9) \text{ GPI} = |10^5 \eta_{850}|^{3/2} (1 + 0.1 V_{shear})^{-2} \left(\frac{PI}{70}\right)^3 \left(\frac{H_{700}}{50}\right)^3$$

η_{850} : 850hPa에서의 절대와도,

V_{shear} : 850hPa와 200hPa에서의 바람 시어

PI : 태풍의 잠재 강도,

H_{700} : 700hPa에서의 상대습도

$$10) \text{ PI} = \sqrt{\frac{C_k}{C_D} \frac{T_s}{T_0} (CAPE^* - CAPE)}$$

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

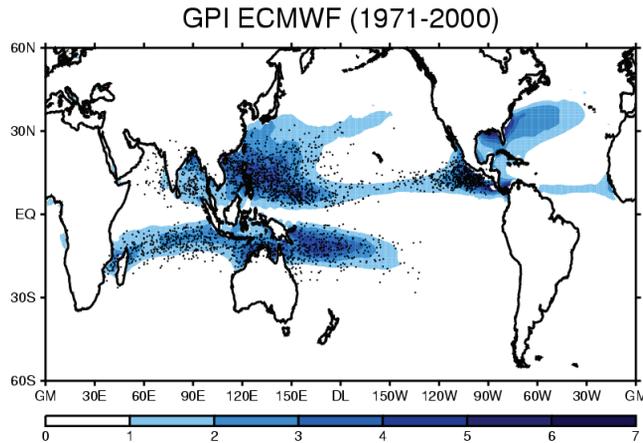


그림 3.25 유럽중기예보센터 재분석 자료로 부터 구한 태풍 발생 지수값과 실제 태풍 발생 지점 (1971~2000년).

기후변화 시나리오 자료를 이용하여 20세기 말 (1971~2000년) 태풍발생지수를 계산한 결과, 재분석 자료를 통해 계산된 결과에 비해 전반적으로 작은 값을 보이고 있었으나, 발생 분포를 잘 맞추고 있었다. 미래 (2070~2099년) 태풍의 발생은 전반적으로 증가할 것으로 보이며, 특히 RCP8.5 시나리오에서 북서태평양의 태풍발생이 크게 증가할 것으로 전망하였다. 그러나 남동태평양과 대서양, 인도양 일부에서 태풍 발생이 감소하는 지역도 나타났다 (그림 3.26).

태풍의 잠재적 강도 변화는, 태풍발생지수를 통해 본 태풍 발생 빈도 증감의 분포와 유사한 모습을 보인다 (그림 3.27). 그러나 태풍의 강도는 북서태평양지역에서 보다는 적도부근 동태평양 상에서 크게 증가할 것으로 전망되었으며, 아라비아 해와 대서양에서의 태풍 강도도 크게 증가할 것으로 전망된다.

서태평양에서 발생하여 우리나라에 영향을 주는 여름철 (7, 8, 9월) 평균 태풍 발생지수의 시간변화를 통해서도 태풍 발생이 미래 증가할 것임을 전망할 수 있다 (그림 3.28(a)). 20세기 말 (1971~2000년)에 비하여 미래 2021~2050년에 태풍 발생이 15.6% (RCP4.5)와 18.8% (RCP8.5), 2070~2099년에 29.2% (RCP4.5)와 57.5% (RCP 8.5) 증가할 것으로 전망하였다. 우리나라 남해안을 중심으로 한 여름철 태풍의 잠재 강도 변화도 시간에 따라 증가하여, 시나리오에 따라 21세기 말 27.9% (RCP 4.5)에서 42.1% (RCP 8.5) 증가할 것으로 전망하였다 (그림 3.28(b)).

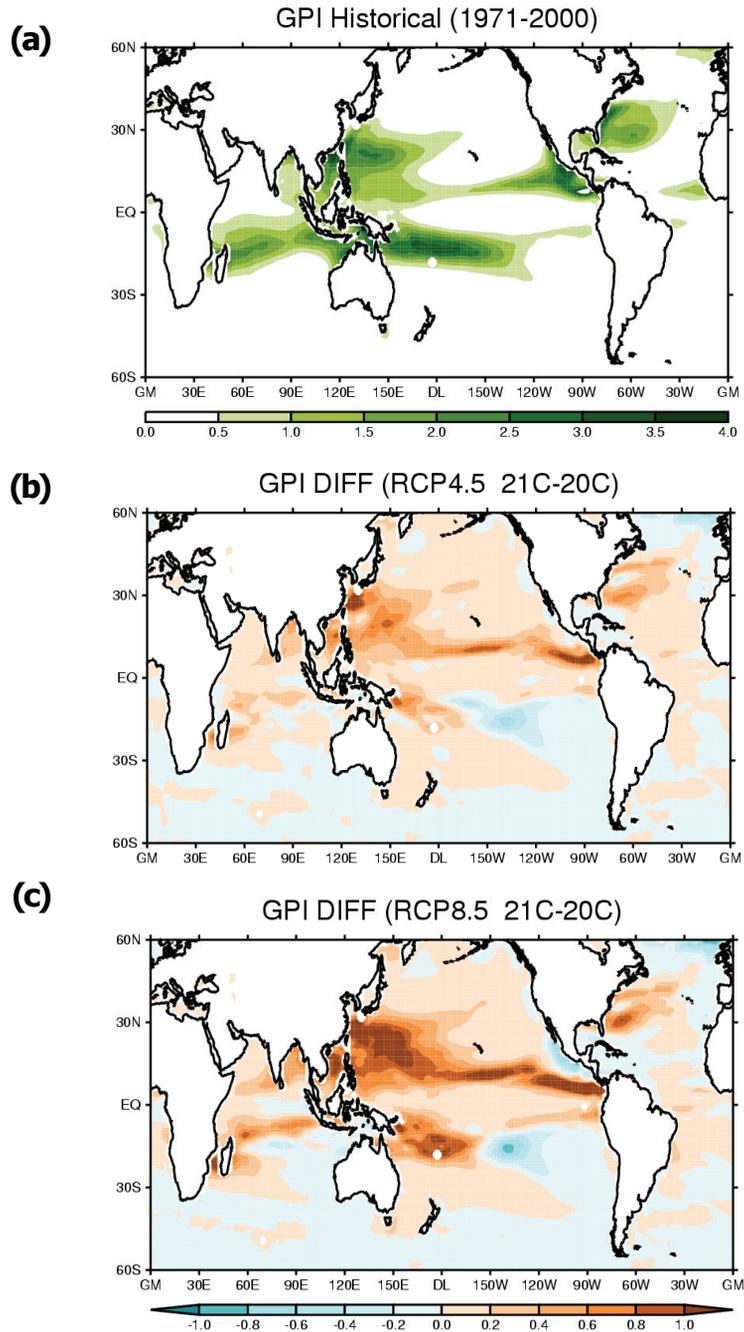


그림 3.26 기후변화 시나리오로부터 산출된 태풍발생지수. (a) 과거모의실험 결과 (1971~2000년), 미래 (2070~2099년) (b) RCP4.5와 (c) RCP8.5의 과거모의 결과와의 차이.

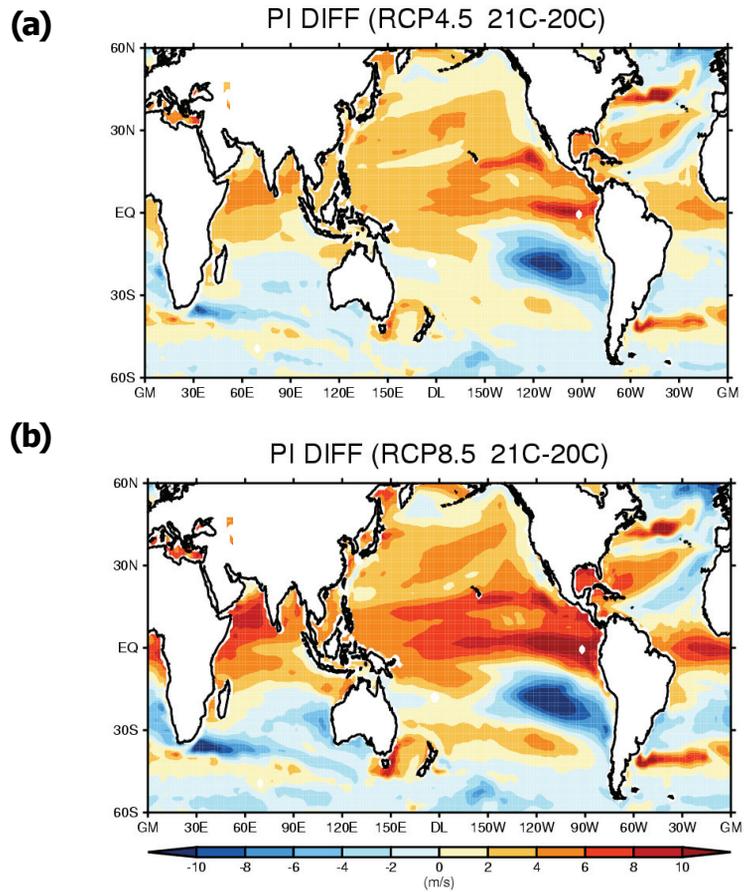


그림 3.27 기후변화 시나리오로부터 산출된 태풍 잠재강도의 변화. (a) RCP4.5와 (b) RCP8.5 (2070~2099년)의 과거 (1971~2000년) 모의 결과와의 차이.

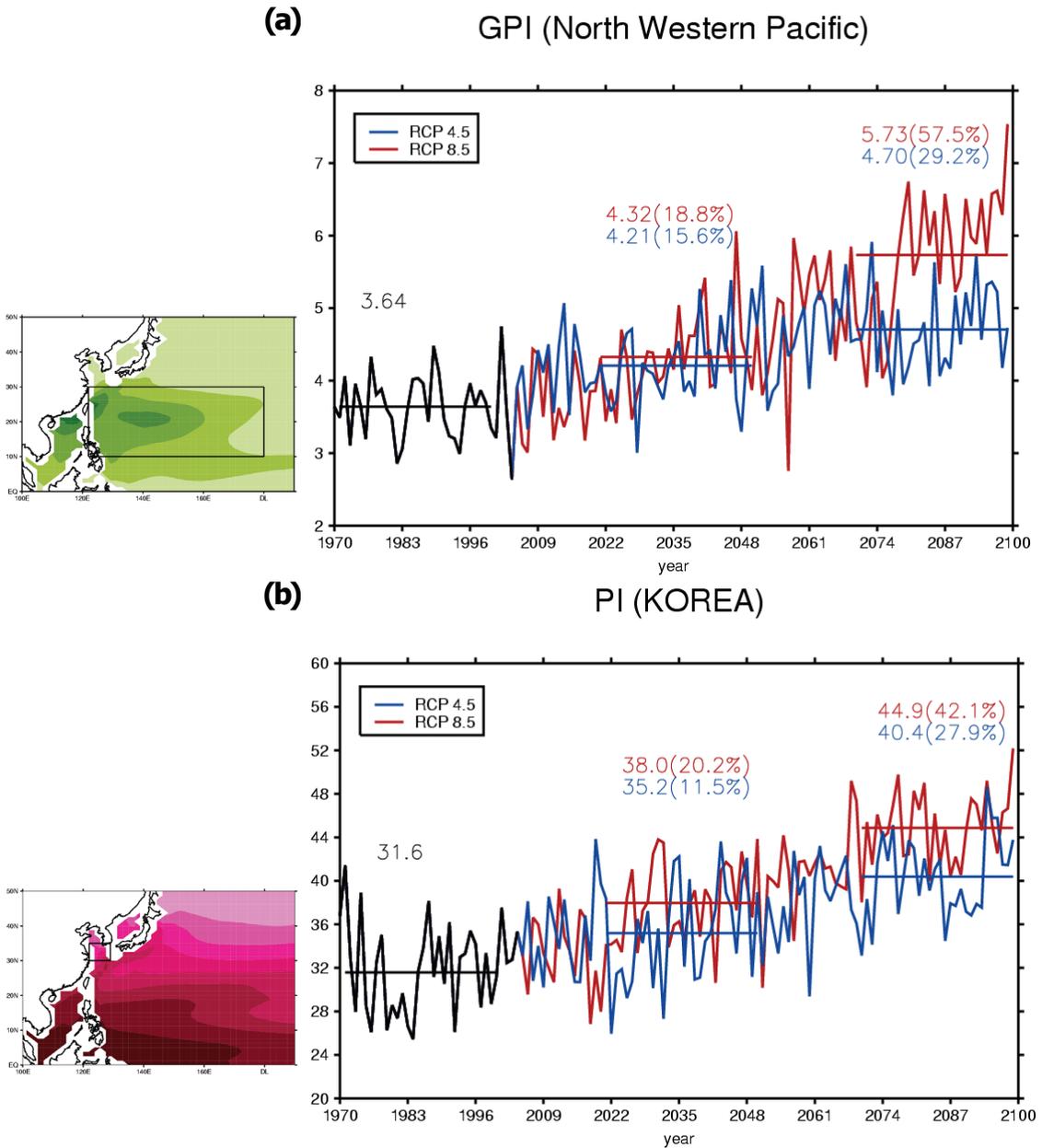


그림 3.28 기후변화 시나리오로부터 산출된 여름철 (a) 태풍 발생지수와 (b) 태풍 잠재강도의 시간 변화. 검은색은 과거기후모의 결과. 푸른색과 붉은색은 각각 RCP4.5와 RCP8.5에 따른 미래기후모의 결과. 가로 실선과 실선 상단에 표시된 값은 1971~2000년, 2021~2050년, 2070~2099년 각 30년 동안의 평균값. 왼쪽 지도에 표시된 영역은 평균 계산 영역임.

4. 동아시아 기후변화

4.1 현재 기후의 모의 성능

HadGEM2-AO 모델에서 현재기후를 얼마나 잘 모의하고 있는지 평가하기 위해 1971~2000년의 30년 자료를 이용하여 동아시아와 한반도 지역에 대한 기온의 월별 기후값을 분석하였다 (그림 4.1). HadGEM2-AO 모델의 성능을 평가하기 위해 ECMWF 재분석자료와 기후변화에 관한 정부간협의체 (IPCC)의 4차 평가보고서 (AR4)에 참여했었던 ECHO-G 결과를 함께 나타내었다. 동아시아와 한반도 지역에서 모두 ECHO-G에 비해서 관측과 더 유사한 값을 보이고 있다. 그러나 동아시아 겨울철의 경우 ECHO-G에 비해서도 낮은 온도로 모의되고 있는데 이는 겨울철 북반구의 대륙과 고위도지역에 한랭편차가 강하게 나타나기 때문이다.

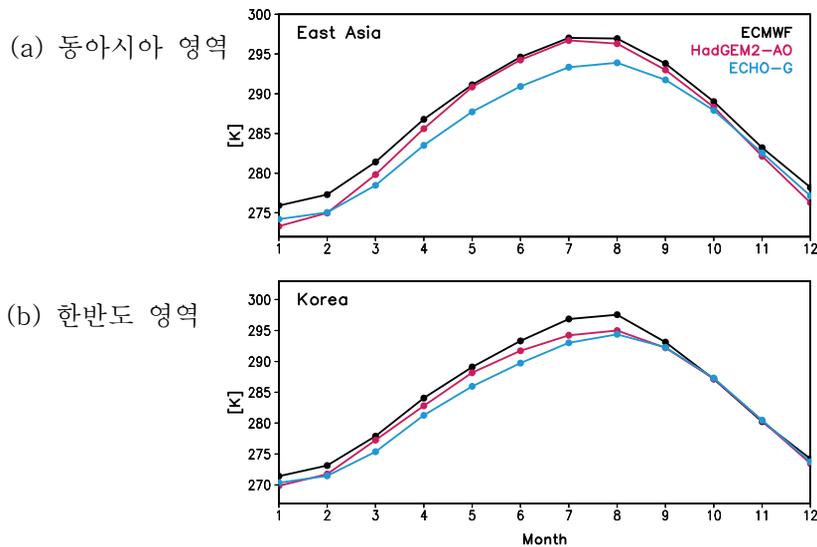


그림 4.1 (a) 동아시아 영역, (b) 한반도 영역에서의 1971~2000년 기온의 월별 기후값. 검정선은 ECMWF 재분석자료, 빨간선은 HadGEM2-AO, 파란선은 ECHO-G 결과이다. 동아시아 영역은 [100-150E, 20-50N] 그리고 한반도 영역은 [125-130E, 35-40N]의 지역을 평균하였다.

강수량의 월별 기후값은 강수의 전지구 재분석자료인 CMAP 데이터와 비교하여 성능평가를 하였다 (그림 4.2). CMAP 데이터와 기간을 맞추기 위해 1979~2005년 간의 데이터를 비교하였다. 동아시아 평균의 경우, 관측에 비해 과다모의 되는 경향이 있긴 하지만 ECHO-G에 비해 연주기 분포가 관측과 잘 일치하고 있다. 특히, 한반도 지역의 모의 성능이 향상된 것을 확인할 수 있는데 ECHO-G에서 여름철 강수피크를 제대로 모의하지 못했던 반면 HadGEM2-AO의 경우 여름철에 강수가 집중되는 특성을 잘 모의하고 있다.

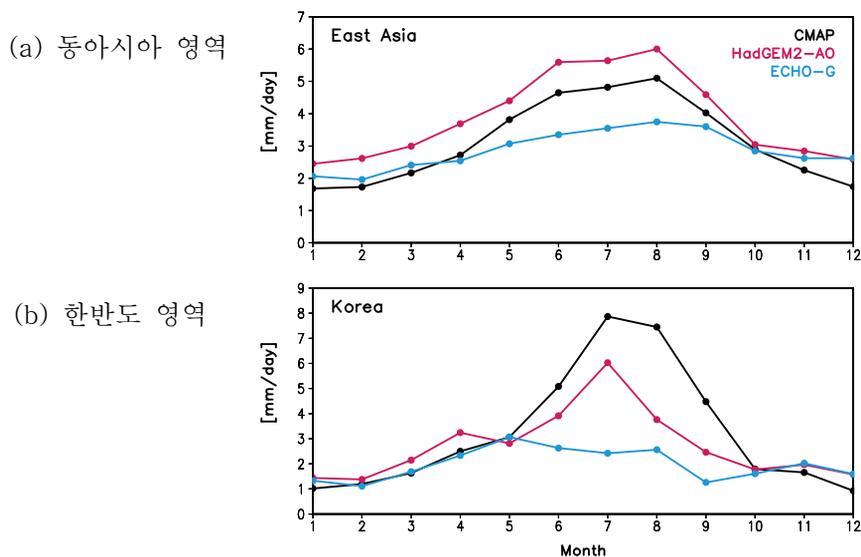


그림 4.2 (a) 동아시아 영역, (b) 한반도 영역에서의 1979~2005년 강수의 월별 기후값. 검정선은 CMAP 자료, 빨간선은 HadGEM2-AO, 파란선은 ECHO-G 결과이다. 동아시아 영역은 [100-150E, 20-50N] 그리고 한반도 영역은 [125-130E, 35-40N]의 지역을 평균하였다. ECHO-G의 경우 데이터가 존재하는 1979~2000년에 대해서만 고려하였다.

공간 분포의 모의성능을 살펴보기 위해 HadGEM2-AO의 기온과 강수의 연평균, 여름철, 겨울철의 기후값과 관측데이터를 비교하였다. 연평균의 경우, 육지지역에서 한랭편차가 나타나긴 하지만 전반적인 기온분포는 유사하게 모의하고 있으며 강수의 경우 강수밴드가 나타나는 지역은 잘 모의하고 있으나 관측에 비해 과다모의하고 있다 (그림 4.3). 여름철엔, 한반도주변의 해안지역으로 기온의 한랭편차가 나타

나고 있으며 한반도 주변에서 나타나는 강수의 과소모의를 제외하고는 전반적으로 강수를 과다모의하고 있다 (그림 4.4). 겨울철엔, 육지에서 기온의 한랭편차가 강하게 나타나고 있으며 강수도 과다모의하고 있다. 그러나 전반적으로 강수밴드지역을 잘 모의하고 있으며 기존모델에 비해 향상된 결과를 보여주고 있다 (그림 4.5).

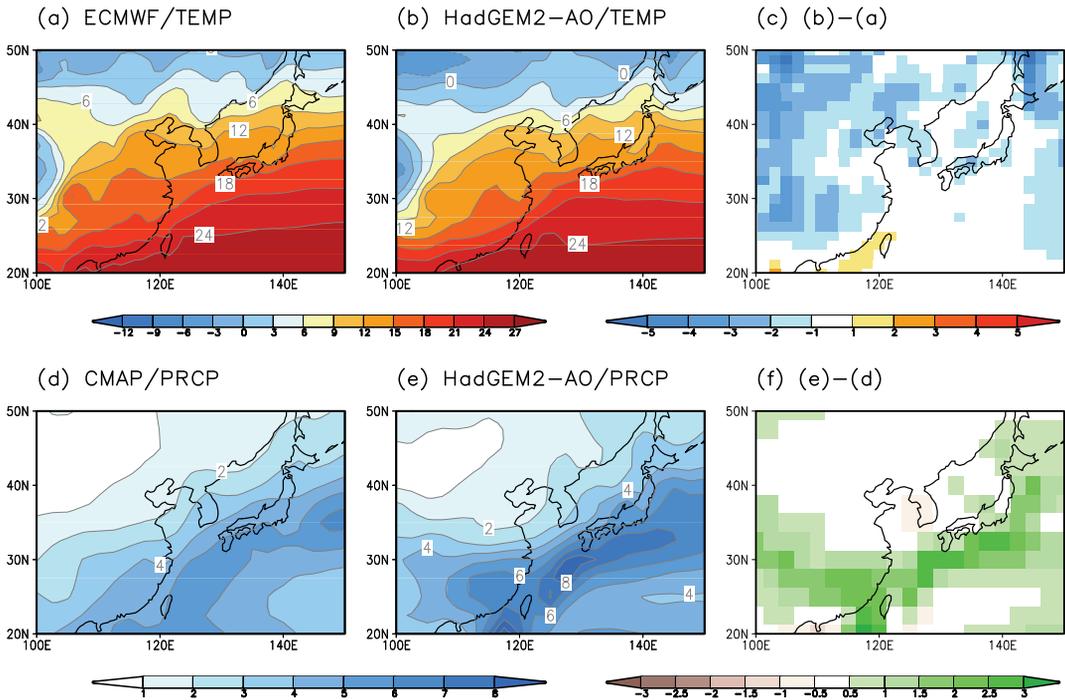


그림 4.3 (a) 1971~2000년 관측 (ECMWF) 기온의 연기후값, (b) 1971~2000년 모의된 기온의 연기후값, (d), 1979~2005년 관측 (CMAP) 강수의 연기후값, (e) 1979~2005년 모의된 강수의 연기후값, (c), (f) 관측과 모델의 차이. 온도의 단위는 $^{\circ}\text{C}$ 이며 강수의 단위는 mm day^{-1} 이다.

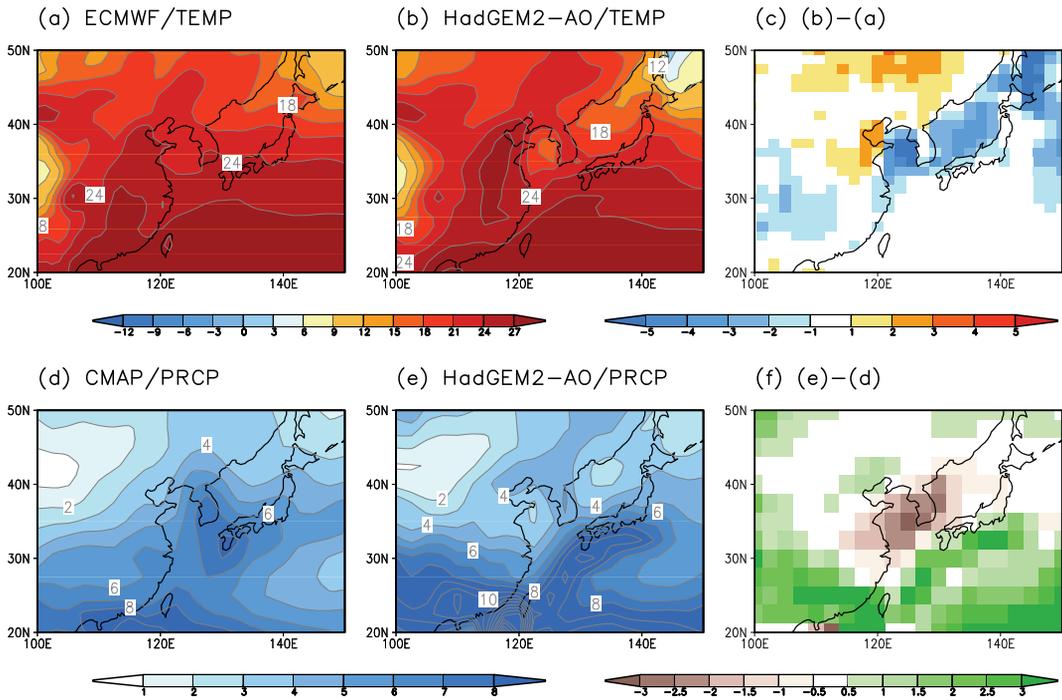


그림 4.4 (a) 1971~2000년 관측 (ECMWF) 기온의 여름철 (JJA) 기후값, (b) 1971~2000년 모의된 기온의 여름철 기후값, (d), 1979~2005년 관측 (CMAP) 강수의 여름철 기후값, (e) 1979~2005년 모의된 강수의 여름철 기후값, (c), (f) 관측과 모델의 차이. 온도의 단위는 $^{\circ}\text{C}$ 이며 강수의 단위는 mm day^{-1} 이다.

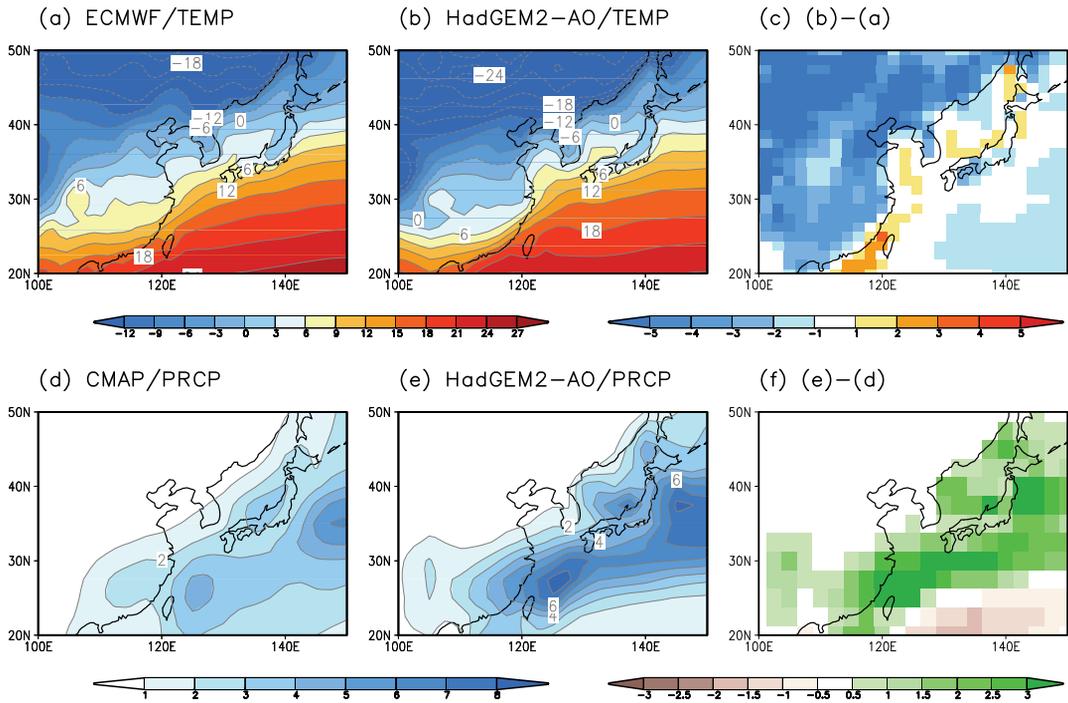


그림 4.5 (a) 1971~2000년 관측 (ECMWF) 기온의 겨울철 (DJF) 기후값, (b) 1971~2000년 모의된 기온의 겨울철 기후값, (d), 1979~2005년 관측 (CMAP) 강수의 겨울철 기후값, (e) 1979~2005년 모의된 강수의 겨울철 기후값, (c), (f) 관측과 모델의 차이. 온도의 단위는 $^{\circ}\text{C}$ 이며 강수의 단위는 mm day^{-1} 이다.

4.2 기온과 강수의 미래 변화

많은 선행연구들에서 지구온난화에 따른 동아시아 지역의 기온 상승과 강수량 증가를 전망하고 있다 (Min *et al.*, 2006; Lu *et al.*, 2007; Moon *et al.*, 2008; Yun *et al.*, 2008). 따라서, HadGEM2-AO에서는 동아시아지역의 미래기후를 어떻게 전망하는지 기온과 강수의 미래변화를 살펴보았다 (그림 4.6~4.7). 현재기후는 1971~2000년 30년간의 기후값으로 선정하였으며 미래기후는 대표농도경로 (RCP) 시나리오인 RCP4.5와 RCP8.5에 근거하여 2070~2099년 30년간의 기후값으로 선정하여 현재기후 대비 얼마나 변화되었는지 살펴보았다. 연평균, 여름철, 겨울철 모두 동아시아 전 지역에서 온도상승을 전망하고 있으며 특히 고위도에서의 온도상승이 크게 나타날 것이라 전망된다 (그림 4.6). 동아시아 영역 평균된 값의 변화를 살펴보면, 연평균값은 RCP4.5는 3.3도, RCP8.5는 5.7도 상승한다. 또한, 여름철은 각각 3.3도, 5.7도 상승하며 겨울철은 3.5도, 6.1도 상승하여 여름보다는 겨울철 온도상승이 클 것으로 전망된다. 강수 전망에 있어서는 여름철엔 동아시아 지역 대부분에서 강수증가가 나타나고 있다 (그림 4.7). 반면 겨울철에는 남중국해에서 일본 남해상에 이르는 지역에서 강수량이 감소하는 것으로 전망하고 있으며 나머지 지역에서는 전반적으로 강수량이 증가하는 것으로 나타났다. 동아시아 영역 평균된 강수량의 변화를 살펴보면, 연평균값은 RCP4.5는 5.0%, RCP8.5는 5.5% 증가한다. 또한, 여름철은 각각 10.8%, 15.3% 증가하며 겨울철은 0.6% 증가, 7.3% 감소한다고 전망된다. 겨울철엔 시나리오에 따라 강수량의 변화가 거의 없거나 RCP8.5의 경우는 오히려 감소하는 것으로 전망하고 있는 반면 여름철은 강수량이 큰 폭으로 증가하고 있으며 강제력이 강화될수록 강수량이 증가하는 것으로 나타났다.

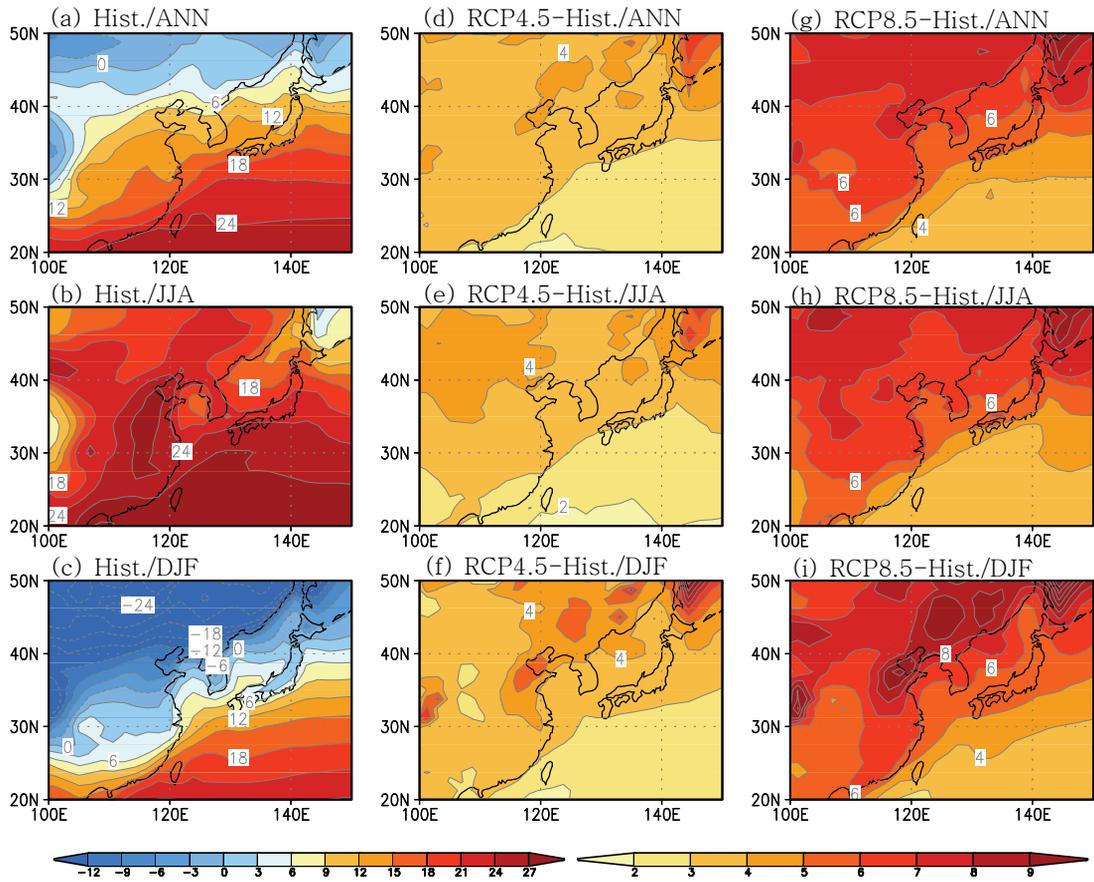


그림 4.6 (a) 연평균, (b) 여름철, (c) 겨울철 현재기후 (1971~2000)에서의 온도의 기후값, (d) 연평균, (e) 여름철, (f) 겨울철 RCP4.5에 근거한 현재기후 대비 미래기후 (2070~2099)의 온도 변화, (g) 연평균, (h) 여름철, (i) 겨울철 RCP8.5에 근거한 현재기후 대비 미래기후 (2070~2099)의 온도 변화. ANN은 연평균, JJA는 여름철 평균, DJF는 겨울철 평균을 가리킨다. 단위는 °C 이다.

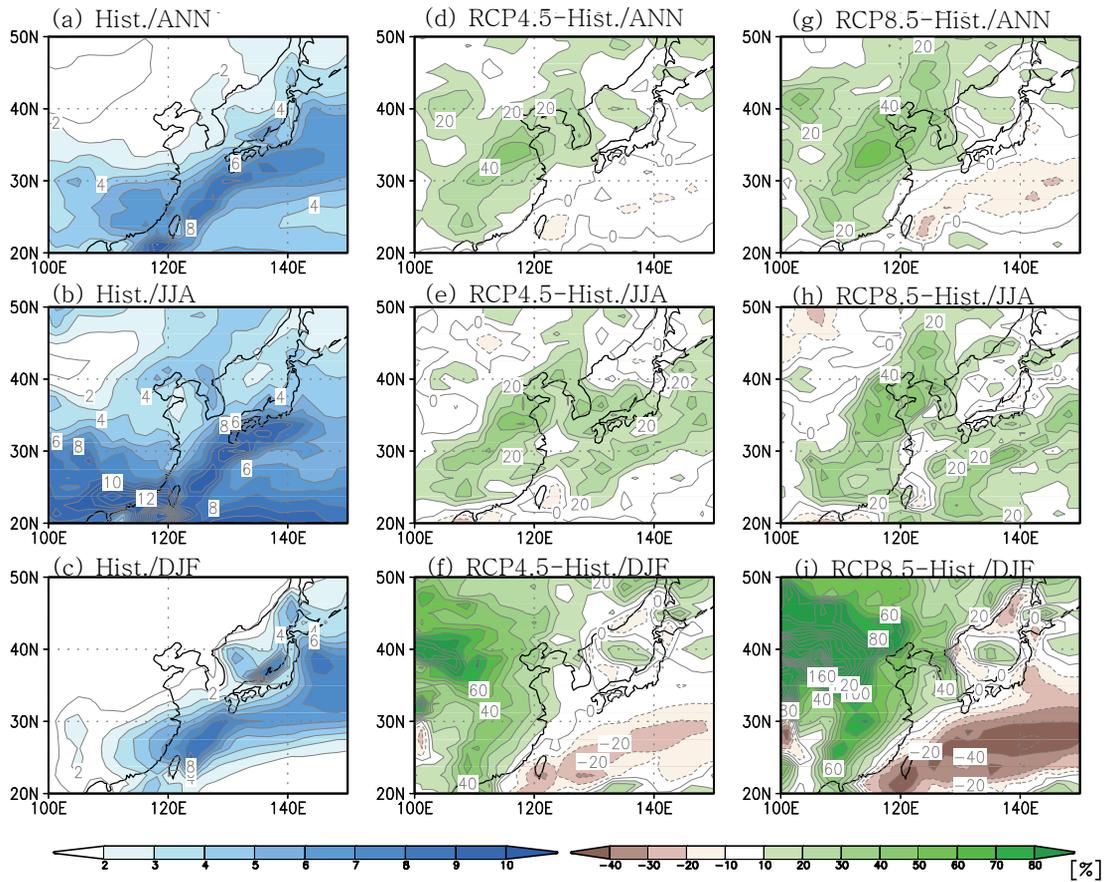


그림 4.7 (a) 연평균, (b) 여름철, (c) 겨울철 현재기후 (1971~2000)에서의 강수량의 기후값, (d) 연평균, (e) 여름철, (f) 겨울철 RCP4.5에 근거한 현재기후 대비 미래기후 (2070~2099)의 강수량 변화율, (g) 연평균, (h) 여름철, (i) 겨울철 RCP8.5에 근거한 현재기후 대비 미래기후 (2070~2099)의 강수량 변화율. ANN은 연평균, JJA는 여름철 평균, DJF는 겨울철 평균을 가리킨다. (a)~(c)의 단위는 mm day^{-1} 이며 (e)~(i)에서의 변화율은 % 이다.

4.3. 수문변화

물은 자연적으로 순환하는 자원으로 지속적으로 재충전 된다. 지구상에는 2.5%의 담수가 존재하지만 대부분이 빙하나 지하수로 존재하여 그 중에서도 가용할 수 있는 담수의 양은 매우 적다 (Oki and Kanae 2006). 또한 아프리카, 중동지역, 서아시아 그리고 동유럽지역은 그곳의 인구에 비해 가용 담수의 양이 매우 적어 물 부족으로 인한 어려움을 겪고 있다 (Gleick 1993). 또한 반 건조지대인 지중해지역, 미국 서부지역, 남아프리카 그리고 브라질 북동지역은 미래 기후변화에 따른 기온의 상승으로 인해 가용담수의 부족으로 인한 어려움을 겪을 수 있을 것으로 전망되고 있다 (Bates 2008). 이렇듯 기후의 변화와 담수와의 상관관계에 대한 연구는 미래 기후변화에 따른 지구상의 모든 인류와 생물종들의 생존을 위해 가장 우선적으로 고려되어야 한다. 따라서 기후변화와 담수와의 상관관계를 이해함으로써 미래 기후변화에 따른 물 부족으로 인한 위협으로부터 자유롭기 위한 비용 효율적인 물 관리 전략이 요구된다.

기후변화에 따른 기온의 상승과 더불어 동아시아 지역의 강수량 증가로 인한 하천의 유출량의 미래 변화를 HadGEM2-AO 모델을 이용하여 전망하였다. 양쯔강은 세계에서 4번째로 큰 강이며 유출량은 9번째로 많은 강인데 유출량의 계절변화는 봄철에 최소값을 나타내며 여름철에 최대값을 보이는 계절변동의 특징을 나타낸다 (그림 4.8 a, c). 양쯔강의 유출량이 21세기 후반으로 갈수록 점차 증가하며 다른 계절에 비해 여름철에 유출량이 크게 증가하는 것을 볼 수 있다 (그림 4.8 a, c). 2020년대 (2010~2039년), 2050년대 (2040~2069년) 그리고 2080년대 (2070~2099년)에 양쯔강 유출량의 변화는 현재 기후 (1970~2000)에 비해 각각 0.7%, 10.3% 그리고 19.3%정도 증가할 것으로 전망하고 있다 (그림 4.8 b d).

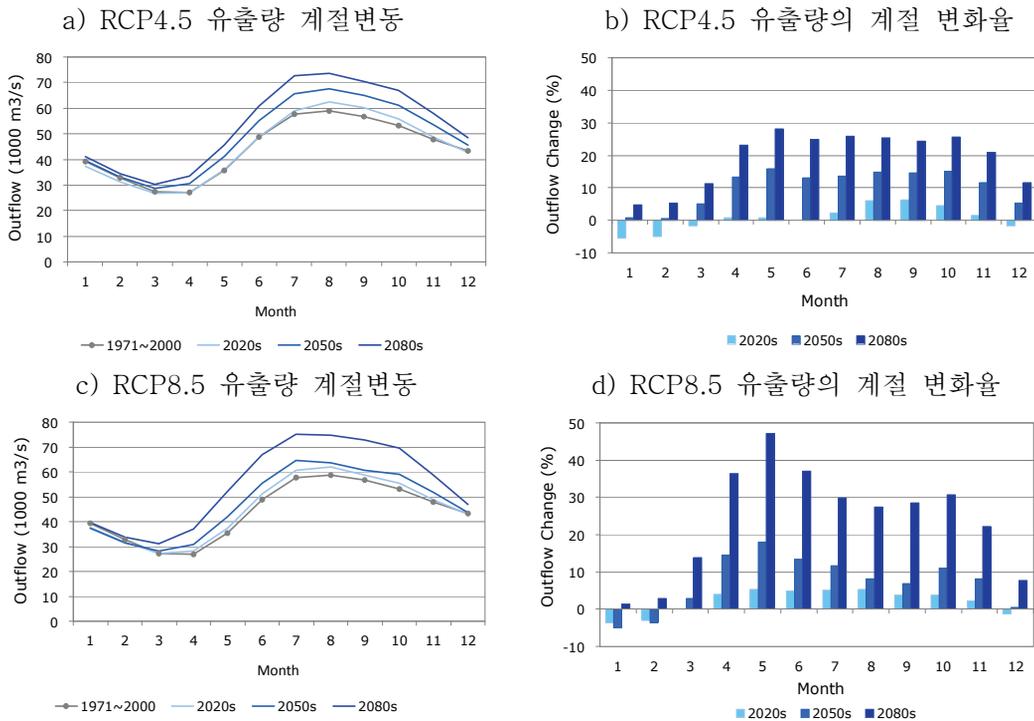


그림 4.8 HadGEM2-AO RCP4.5 (위)와 RCP8.5 (아래) 시나리오 자료의 a), c) 양쯔강 지역에서 유출량의 계절변화와 b), d) 유출량의 미래 변화율. 회색, 하늘색, 파란색 그리고 진한 파란색은 각각 현재기후 (1971~2000년), 2020년대 (2010~2039년), 2050년대 (2040~2069년) 그리고 2080년대 (2070~2099년)을 각각 보여주고 있다. 미래 양쯔강 유출량의 변화율은 현재기후 (1971~2000년)에 대한 평균 변화율이다.

우리나라 한강과 낙동강의 유출량의 계절변화를 보면 한반도 강수량의 계절변동을 잘 따른다. 한강과 낙동강의 유출량의 계절변화는 대체로 최대값이 7월에 나타나고 있으며 겨울과 봄철에 최소값을 보인다 (그림 4.9 a와 c, 4.10 a와 c). 한강과 낙동강의 유출량의 변화를 보면 21세기 후반으로 갈수록 유출량이 증가하는 것을 볼 수 있으며 특히 여름철 유출량의 증가가 다른 계절에 비해 클 것으로 전망된다 (그림 4.9 b와 d, 4.10 b와 d).

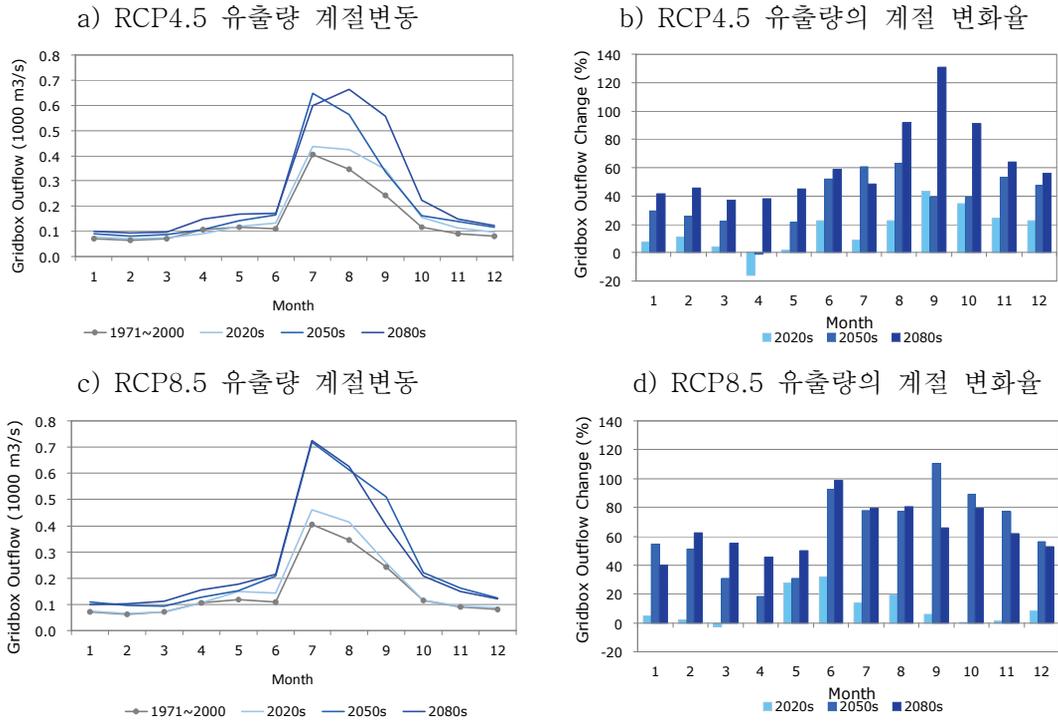


그림 4.9 HadGEM2-AO RCP4.5 (위)와 RCP8.5 (아래) 시나리오 자료의 a), c) 한강 지역의 유출량의 계절변화와 b), d) 유출량의 미래 변화율. 회색, 하늘색, 파란색 그리고 진한 파란색은 각각 현재기후 (1971~2000년), 2020년대 (2010~2039년), 2050년대 (2040~2069년) 그리고 2080년대 (2070~2099년)을 각각 보여주고 있다. 미래 한강 유출량의 변화율은 현재기후 (1971~2000년)에 대한 평균 변화율이다.

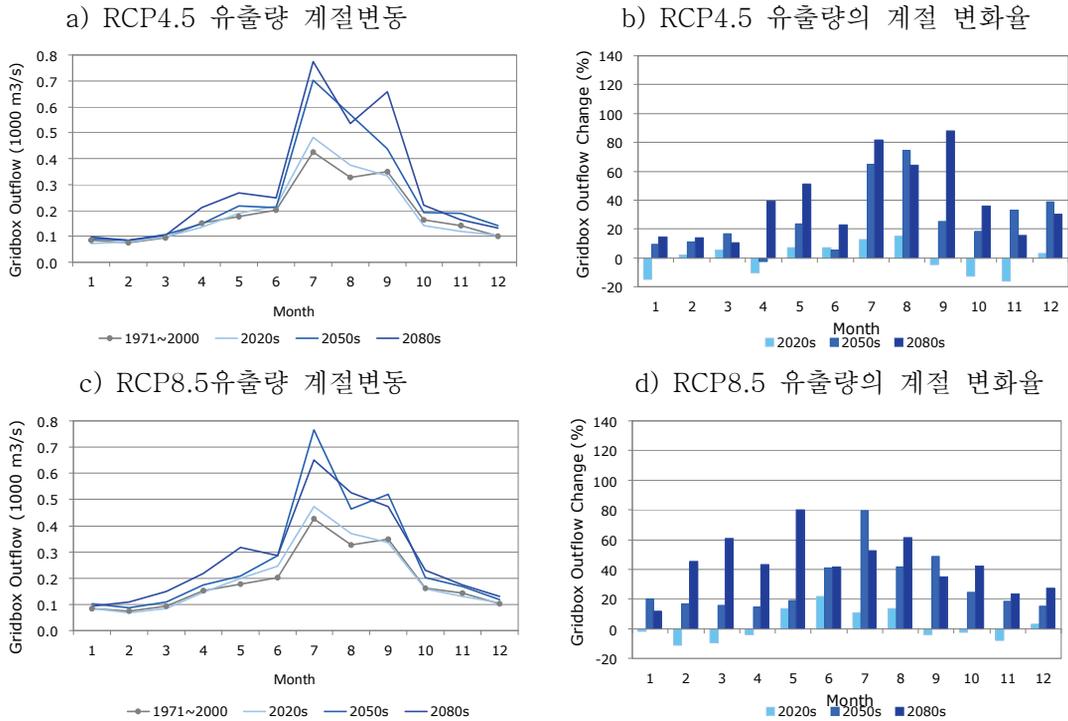


그림 4.10 HadGEM2-AO RCP4.5 (위)와 RCP8.5 (아래) 시나리오 자료의 a), c) 낙동강 지역에서의 유출량의 계절변화와 b), d) 유출량의 미래 변화율. 회색, 하늘색, 파란색 그리고 진한 파란색은 각각 현재기후 (1971~2000년), 2020년대 (2010~2039년), 2050년대 (2040~2069년) 그리고 2080년대 (2070~2099년)을 각각 보여주고 있다. 미래 낙동강 유출량의 변화율은 현재기후 (1971~2000년)에 대한 평균 변화율이다.

미래 기후변화로 인한 동아시아 지역의 강수량의 증가로 인해 하천 유출량 증가하고 이에 따라 동아시아지역의 하천 저수용량이 증가하는 것을 볼 수 있다 (그림 4.11). 미래 온실가스 증가에 따른 동아시아지역 기온의 상승은 지표면에서의 증발에도 큰 영향을 미친다. 강수량의 증가가 유출량과 하천 저수용량을 증가시키지만 기온의 상승으로 인해 지표면에서의 증발은 더욱더 활발해 진다. 따라서 동아시아 지역 증발량의 변화를 보면 21세기 후반으로 갈수록 증발량이 점점 증가하는 것을 볼 수 있다 (그림 4.12).

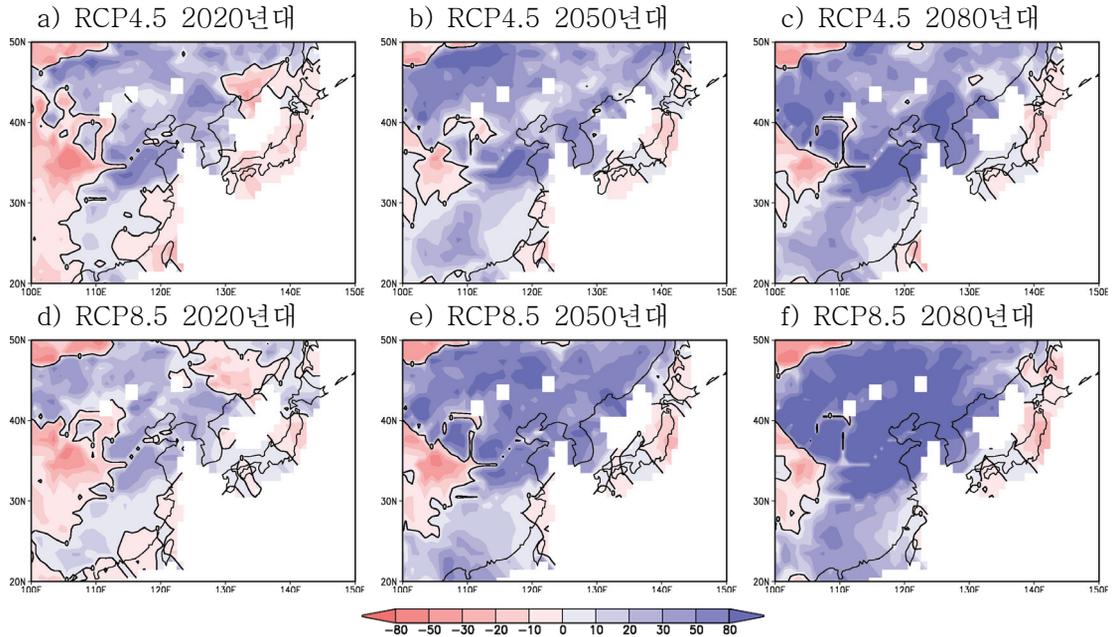


그림 4.11 HadGEM2-AO RCP4.5 (위)와 RCP8.5 (아래) 시나리오 자료로부터 생산된 a), d) 2020년대 (2010-2039년), b), e) 2050년대 (2040~2069년) 그리고 d), f) 2080년대 (2070-2099) 하천 저수용량의 변화율 (%). 하천 저수용량의 변화율은 현재기 후 (1971-2000년)에 대한 평균 변화율이다.

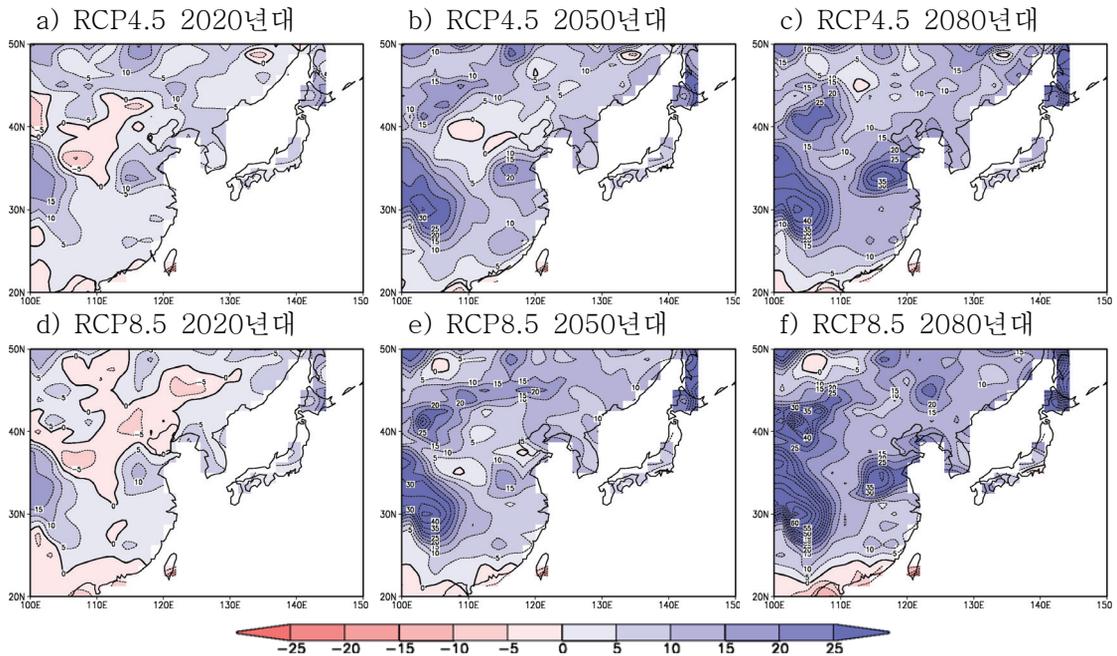


그림 4.12 HadGEM2-AO RCP4.5 (위)와 RCP8.5 (아래) 시나리오 자료로부터 생산된 a), d) 2020년대 (2010-2039년), b), e) 2050년대 (2040~2069년) 그리고 d), f) 2080년대 (2070-2099) 지표 증발량의 변화율 (%). 지표 증발량의 변화율은 현재기후 (1971-2000년)에 대한 평균 변화율이다.

전 지구 기후변화 모델에서 전망한 토양수분의 변화를 보면 앞서 지표 증발량이 크게 증가함에 따라 지표면부근 (0~10 cm)에서 토양수분의 감소가 21세기 후반으로 갈수록 뚜렷하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 앞서 강수와 하천 저수용량의 증가하는 모습과는 반대로 동아시아지역 즉 중국 일부 지역을 제외하고 한반도 지역과 일본전역에서 지표면 부근 토양에서의 토양수분이 감소할 것으로 전망하고 있다 (그림 4.13). 그러나 토양 깊숙이 들어갈수록 지표부근의 토양 수분과 달리 토양수분이 감소하는 영역이 줄어들어 깊은 토양에서는 토양수분이 증가할 것으로 전망된다. (그림 4.14, 4.15, 4.16).

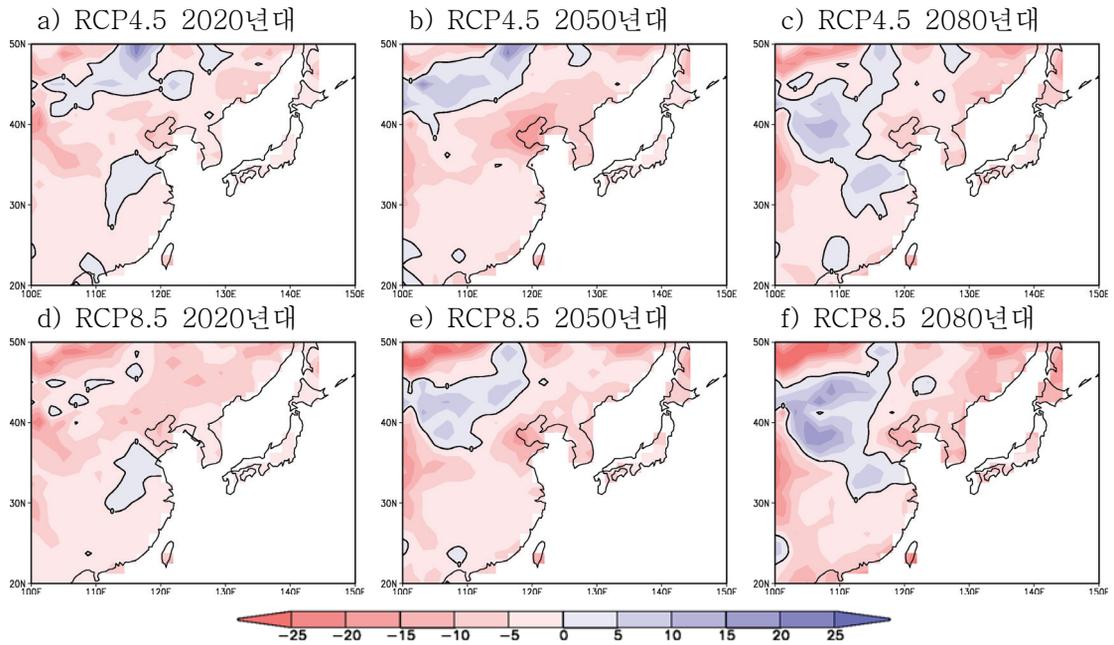


그림 4.13 HadGEM2-AO RCP4.5 (위)와 RCP8.5 (아래) 시나리오 자료로부터 생산된 a), d) 2020년대 (2010~2039년), b), e) 2050년대 (2040~2069년) 그리고 d), f) 2080년대 (2070~2099) 토양 1층 (0~10 cm)에서의 토양 수분의 변화율(%). 토양 수분의 변화율은 현재기후 (1971~2000년)에 대한 평균 변화율이다.

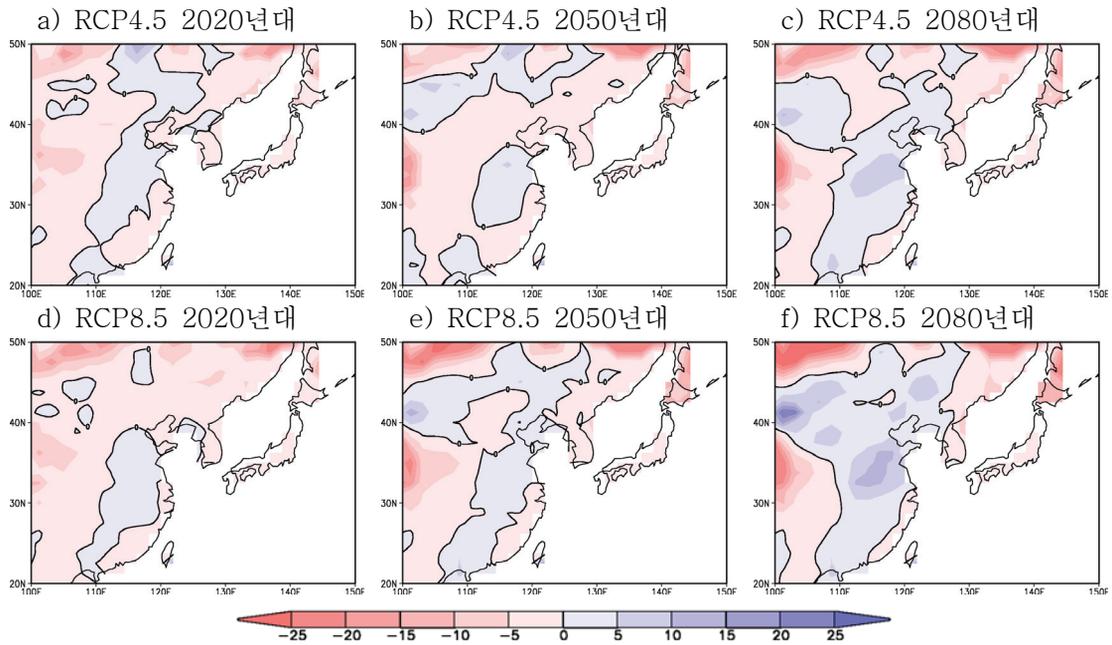


그림 4.14 HadGEM2-AO RCP4.5 (위)와 RCP8.5 (아래) 시나리오 자료로부터 생산된 a), d) 2020년대 (2010~2039년), b), e) 2050년대 (2040~2069년) 그리고 d), f) 2080년대 (2070~2099) 토양 2층 (10~25cm)에서의 토양 수분의 변화율(%). 토양 수분의 변화율은 현재기후 (1971~2000년)에 대한 평균 변화율이다.

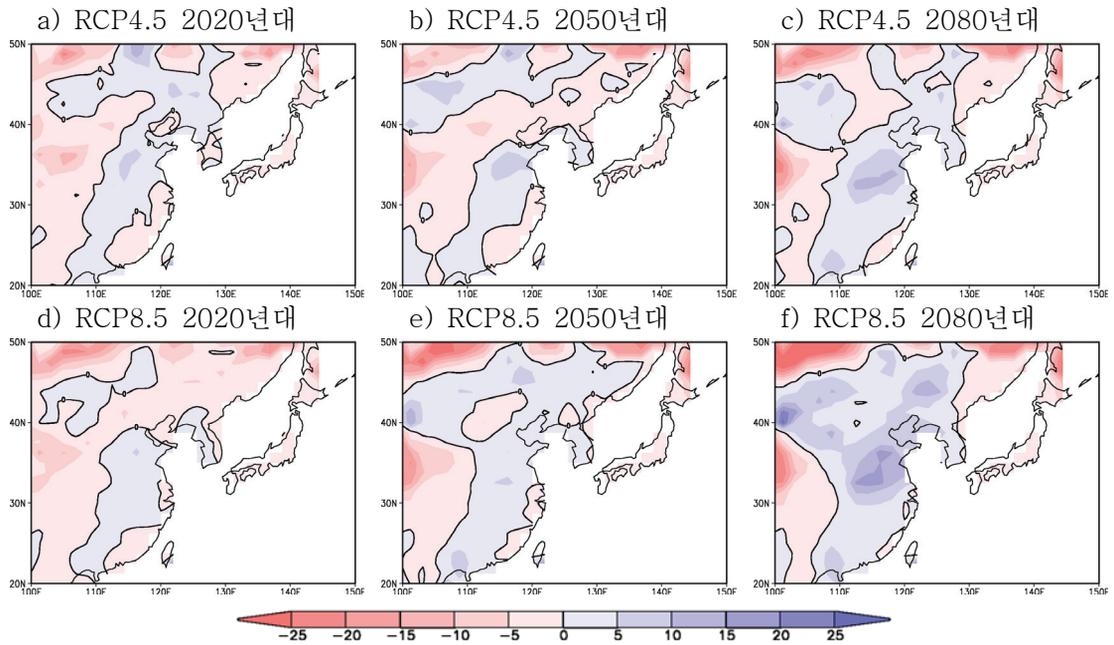


그림 4.15 HadGEM2-AO RCP4.5 (위)와 RCP8.5 (아래) 시나리오 자료로부터 생산된 a), d) 2020년대 (2010~2039년), b), e) 2050년대 (2040~2069년) 그리고 d), f) 2080년대 (2070~2099) 토양 3층 (25~60 cm)에서의 토양 수분의 변화율 (%). 토양 수분의 변화율은 현재기후 (1971~2000년)에 대한 평균 변화율이다.

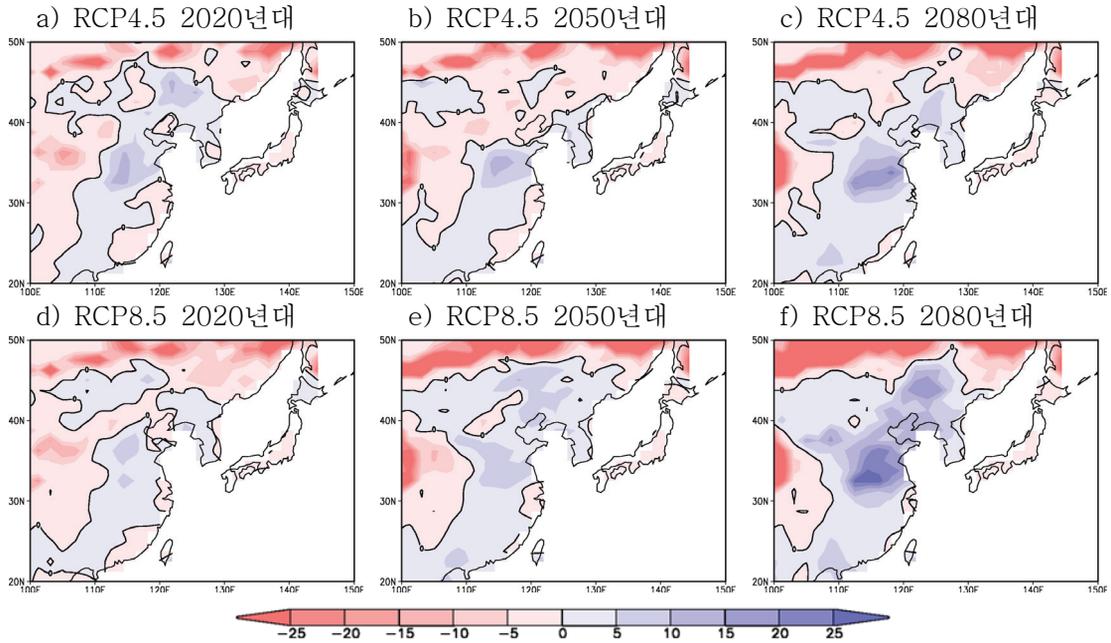


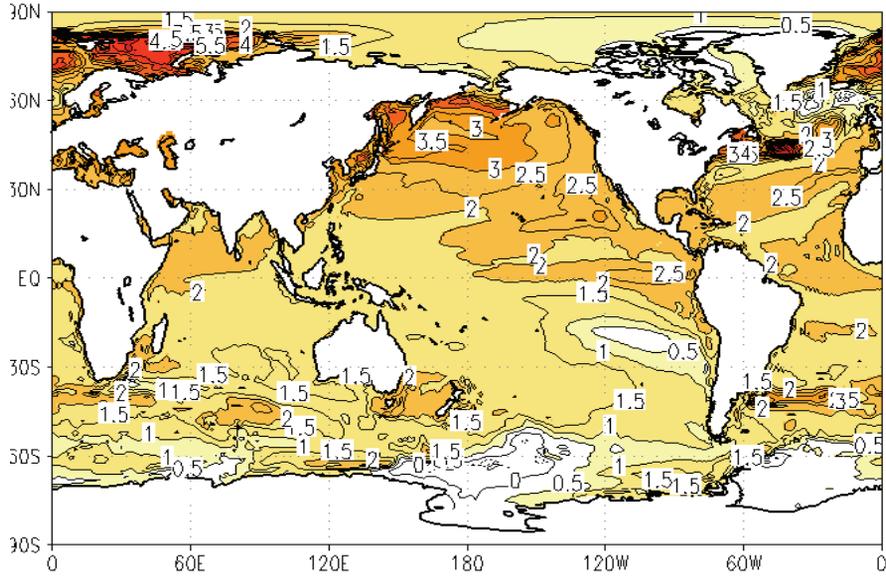
그림 4.16 HadGEM2-AO RCP4.5 (위)와 RCP8.5 (아래) 시나리오 자료로부터 생산된 a), d) 2020년대 (2010~2039년), b), e) 2050년대 (2040~2069년) 그리고 d), f) 2080년대 (2070~2099) 토양 4층 (60~250 cm)에서의 토양 수분의 변화율 (%). 토양 수분의 변화율은 현재기후 (1971~2000년)에 대한 평균 변화율이다.

5. 해양 변화

5.1 해수면 온도

미래 기후변화 시나리오인 RCP4.5와 RCP8.5에 의한 해수면온도의 변화를 전망하였다. 현재기후 (1971~2000)와 비교하여 보면, RCP4.5와 RCP8.5 시나리오에서 모두 얼음이 덮힌 북극지역을 제외하면 북반구 고위도를 중심으로 해수면 온도의 상승이 뚜렷하다. 온실가스 농도가 증가할수록 해수면 온도 상승폭이 증가하지만 해수면 온도의 공간 분포는 크게 바뀌지 않는다. 해수면 온도 변화의 공간 분포는 우리나라 동쪽과 북미의 동쪽에서는 상대적으로 크게 증가하며 적도지역에서는 서태평양보다 동태평양에서 상대적으로 수온 상승이 높아 엘니뇨 유사 (El Nino-like) 분포로 변화하고 미래 (2071~2099)에는 현재보다 1.8°C (RCP4.5)와 3.3°C (RCP8.5) 상승될 전망이다 (그림 5.1). 우리나라 주변해역은 전세계 해양중에서 해수면 온도 상승이 상대적으로 큰 지역으로 분석되었다. RCP4.5 시나리오 하에서는 2.9°C, RCP8.5에서는 약 4.7°C 증가할 것으로 전망되었다 (그림 5.2).

(a) RCP4.5



(b) RCP8.5

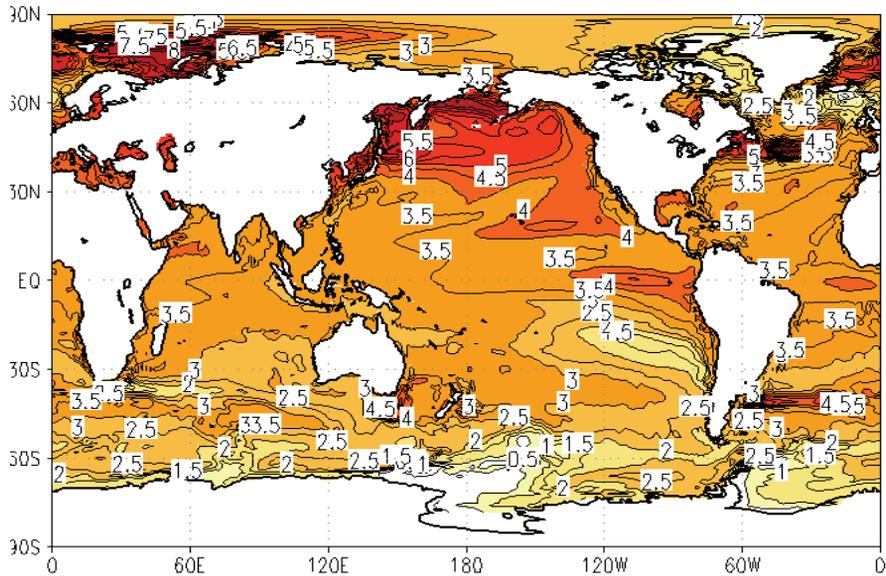
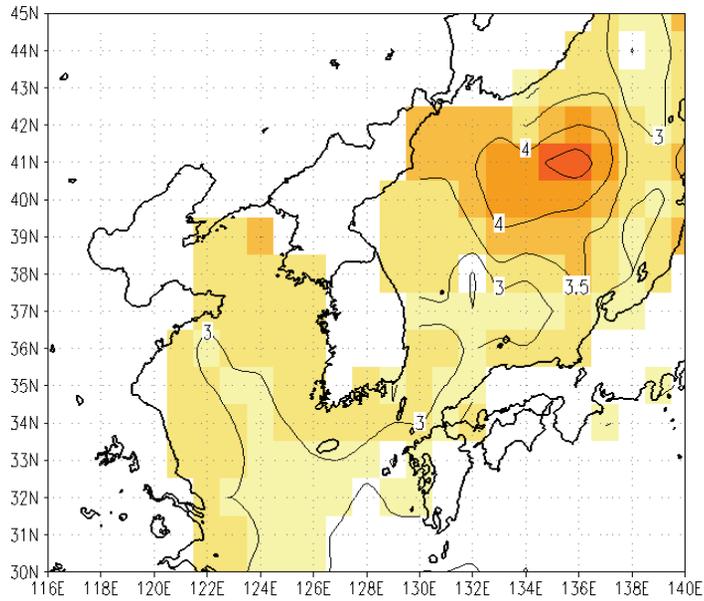


그림 5.1 해수면 온도의 미래 변화 [°C]. (a) RCP4.5와 (b) RCP8.5 시나리오 하에서의 변화로 현재 (1971~2000)를 기준으로 21세기 말 (1971~2099)의 변화를 의미함.

(a) RCP4.5



(b) RCP8.5

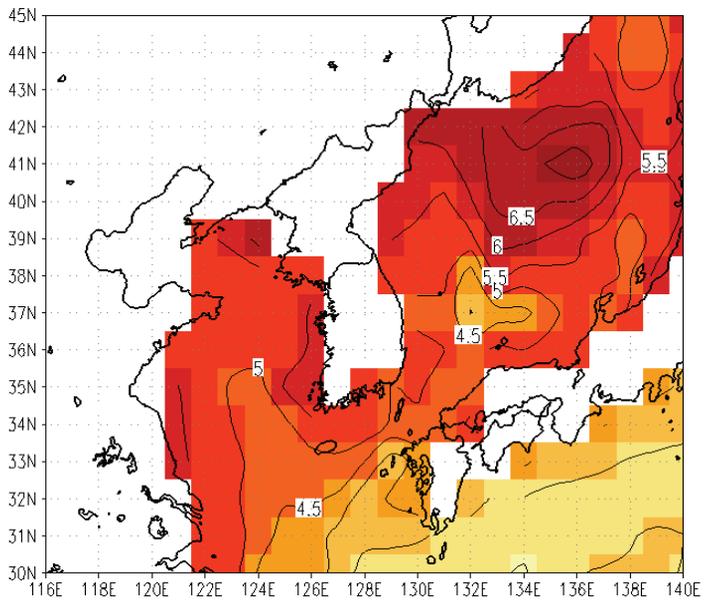


그림 5.2 한반도 주변 지역에서의 해수면 온도 미래 변화[°C]. 이 외에는 그림 5.1과 동일함.

5.2 해수면 고도

기후변화에 따라 인간사회에 가장 큰 악영향을 줄 수 있는 요소 중 하나가 해수면 상승으로 평가되고 있다 (IPCC 2001; 2007). 해수면 고도는 그린랜드, 남극대륙 등에서 빙하가 녹을 때와 수온상승으로 물이 팽창하여 상승하게 된다. 대부분의 기후모델에서는 수온이나 염분의 변화에 따른 해수밀도 변화에 기인한 해수면 고도 변화 (steric effect)를 산출하고 있으며, 육빙 녹음 효과를 포함한 전체 해수면 상승 효과는 준경험적인 방식을 적용하여 전망하고 있다. 본 보고서에서는 HadGEM2-AO의 과거모의 결과와 관측결과를 비교하고 미래 RCP8.5와 RCP4.5 시나리오 하에서의 열팽창 효과 (여기서는 수온과 염분 변화를 포함)와 준경험적인 방식에 의한 전체 해수면 고도 변화를 살펴보고자 한다.

모델의 열팽창에 의한 전지구 평균 해수면 고도의 모의성능을 살펴보기 위해 1955~2003년 기간 동안의 해수면 고도 상승추세를 여러 선행연구들의 최근 추정치와 비교하였다. Antonov *et al.* (2005)와 Ishii *et al.* (2006)은 수심 0~700 m에서의 해수면 고도 변화 추세를 각각 $0.33 \pm 0.07 \text{ mm yr}^{-1}$ 와 $0.36 \pm 0.06 \text{ mm yr}^{-1}$ 로 추정하였는데, HadGEM2-AO는 0.38 mm yr^{-1} 로 계산되었다. 최근 1993~2003년 동안의 해수면 고도 상승추세는 위 두 선행연구 모두 $1.2 \pm 0.5 \text{ mm yr}^{-1}$ 로 추정하였고, HadGEM2-AO의 계산치는 1.31 mm yr^{-1} 이다. HadGEM2-AO의 결과는 관측과 같이 최근의 급격한 해수면 고도 상승추세를 잘 반영하고 두 기간에 대한 추세값 모두 선행연구의 해수면 고도 변화추세 추정범위에 포함된다.

열팽창 뿐 만 아니라 육빙녹음 효과까지 포함하는 전체 해수면고도의 변화를 전망하기 위해 준경험적 방식 (Rahmstorf, 2007)을 적용하여 해수면고도를 산출하였다. 준경험적 방식은 지상기온의 변화가 해수면의 변화를 유발한다는 가정 하에 기온과 해수면의 변화율을 연계한다. 모델의 지상기온 자료로 산출한 해수면고도는 관측된 해수면고도 (1880~2009)와 매우 일치한다 (그림 5.3). 이를 바탕으로 미래 RCP4.5와 RCP8.5 시나리

오의 지상기온을 이용하여 미래의 전지구 평균 해수면 고도의 변화도 산출하였다. 1980~1999년 대비하여 21세기 말 (2090~2099, 10년 평균)에 전지구 평균 해수면 고도 상승은 RCP4.5에서 83 cm, RCP8.5에서 108 cm로 추정되었다. 이 중에서 열팽창에 의한 해수면 고도 상승분은 각각 24 cm와 34 cm이다. 동 기간에 대한 IPCC 4차 평가보고서의 열팽창에 의한 해수면 고도 변화 (2090~2099, 10년 평균)는 B1 시나리오에서 10~24 cm, A2 시나리오에서 14~35 cm, A1F1 시나리오에서 17~41 cm로 추정하였다. 그러므로 HadGEM2-AO의 RCP4.5는 B1 시나리오의 범위에 RCP8.5는 A2~A1F1 시나리오의 추정범위에 들어있다.

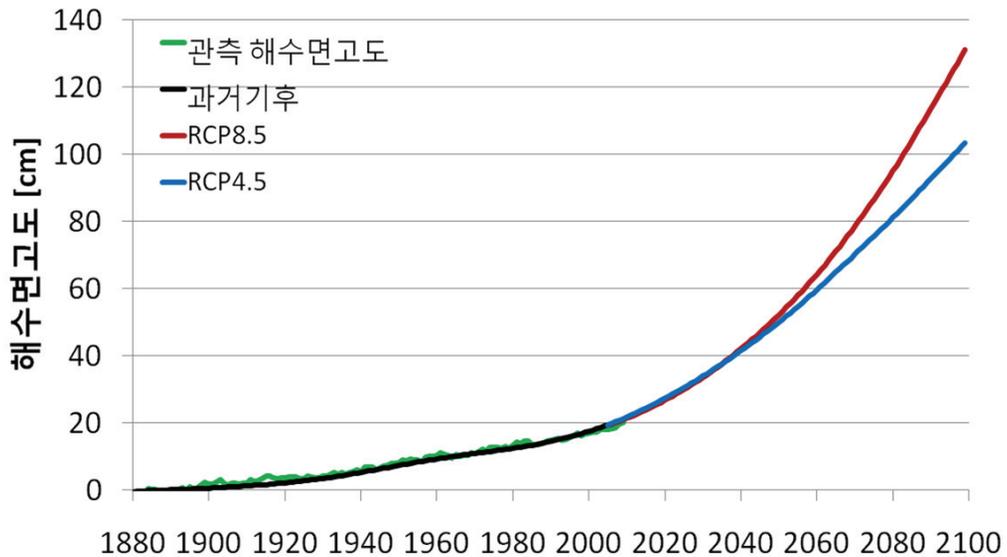


그림 5.3 전지구 평균 해수면 고도의 시간변화. 각 실선은 과거기후 (검정), RCP4.5 (파랑), RCP8.5 (빨강) 시나리오이다.

다음으로 해수면 고도의 지역적 변화를 살펴보았다 (그림 5.4). 현재 (1980~1999년) 대비 21세기 말 (2080~2099년)의 전지구 평균 해수면 고도 상승치는 RCP4.5에서 78 cm, 그리고 RCP8.5에서 98 cm이다. 각 지점에서의 해수면 고도 변화를 전지구 평균과 비교하기 위해 전지구 평균 해수면 상승값을 제거하고 나타내었다. 남반구 해양에서는 평균 해수면 상승보다 작게 나타났고, 남대서양과 인도양, 남태평양에서 길게 연장된 띠를 따라 해수면이 상승하였고, 이는 IPCC AR4 결과와도 일치한다.

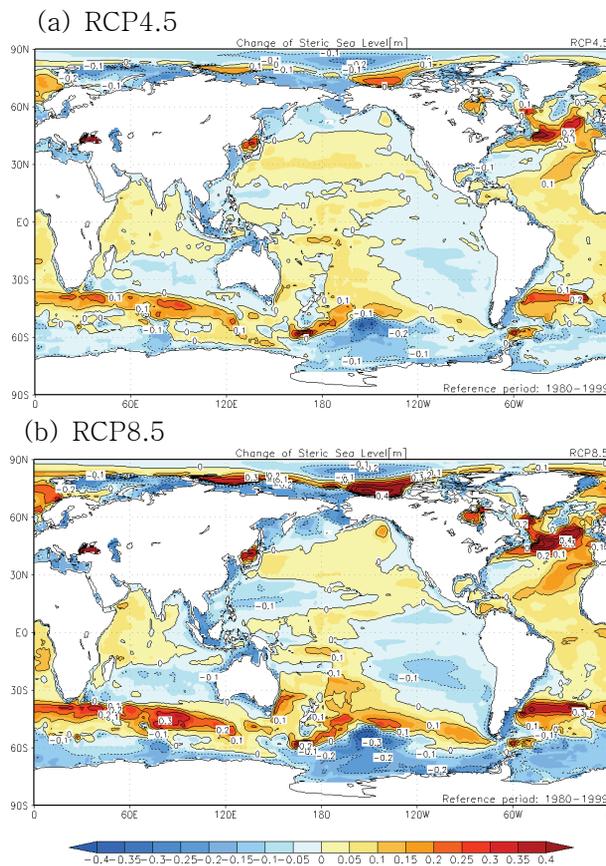


그림 5.4 해수면 고도의 지역적 변화 (m). 미래 전지구 평균 해수면 고도 변화에 대한 상대적인 변화임 (즉, 양의 값은 전지구 평균한 해수면 고도 변화보다 지역적인 해수면 상승이 더 큰을 의미). 미래 변화를 산출하기 위한 현재기후 기준기간은 1980~1999 (20년)이며, 미래기간은 2080~2099 (20년)이다. 그림은 각각 (a) RCP4.5와 (b) RCP8.5 시나리오에 대한 결과이다.

우리나라 주변해역에서는 동해의 해수면 상승이 매우 두드러졌고, 서해는 수심이 낮아서 전지구 평균보다 해수면 상승이 작게 나타났다 (그림 5.5). 또한 동해, 남해, 서해의 각 지점에서 미래 해수면고도의 변화는 온실가스 농도가 증가할수록 해수면 상승이 더 클 것으로 전망되었다 (그림 5.6).

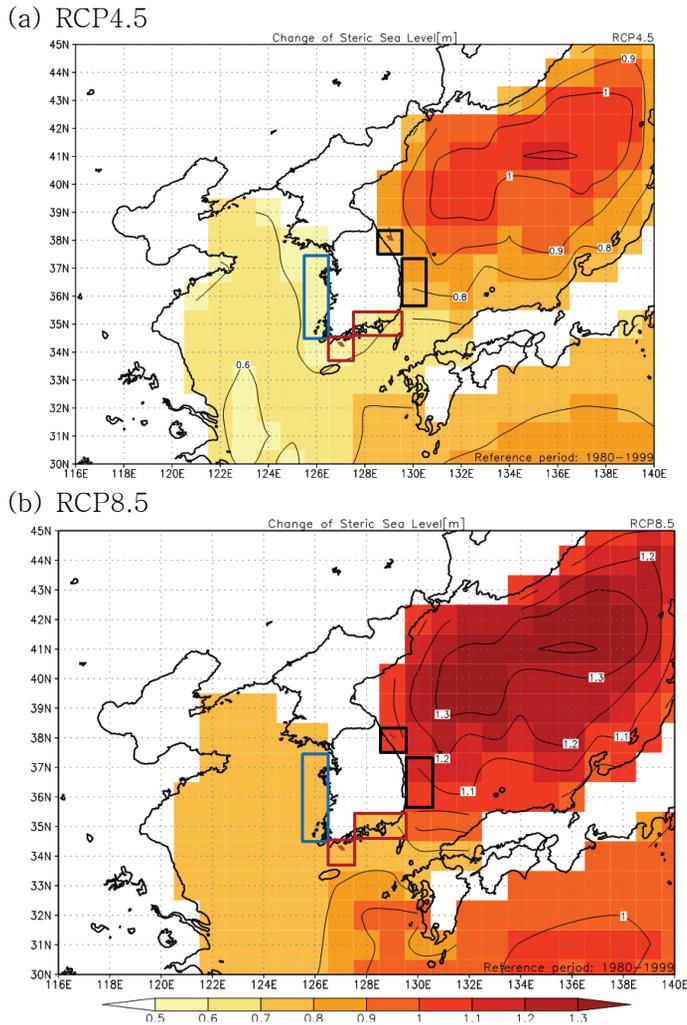


그림 5.5 우리나라 주변해역에서의 해수면 고도의 변화 (m). 해수면 고도 변화는 열팽창과 육빙녹음 효과를 모두 포함하며, 1980~1999년 대비 2080~2099년의 변화이다. 그림내 사각상자는 우리나라 연안의 해수면 고도변화를 산출하기 위해 정의한 동해, 서해, 남해이다.

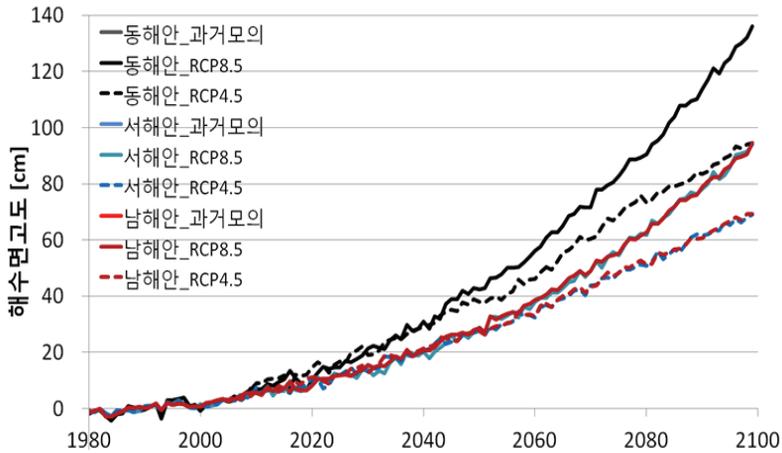


그림 5.6 우리나라 해수면 고도의 시간변화 (cm). 실선은 과거기후 (1980~2005)와 RCP8.5 (2006~2099), 점선은 RCP4.5 시나리오 결과이고 동해 (검정), 서해 (파랑), 남해 (빨강)의 영역은 그림 5.5에 표현하였다. 열팽창과 육빙녹음 효과를 모두 포함하며, 현재기후 1980~1999 (20년)에 대한 상대적인 변화이다.

5.3 해빙면적

HadGEM2-AO의 미래 해빙면적의 변화를 살펴보았다. 모델의 해빙면적을 산출하기 위해서는 모델의 해빙농도 (sea-ice concentration) 변수를 이용한다. 해빙농도는 각 격자 내에 해빙이 차지하는 비율을 의미하며 0에서 1사이의 값을 가진다. 그 값이 0이면 해당격자에 해빙이 없다는 의미이고, 1이면 해빙이 그 격자를 모두 채우고 있다는 의미이다. 따라서 각 격자의 면적과 해당되는 해빙농도를 알면 해빙면적을 산출할 수 있다.

모델이 해빙면적을 얼마나 잘 모의하는지 살펴보기 위해 ECMWF의 ERA-40 자료 중에서 월별 해빙농도를 이용하여 1958~2001까지의 해빙면적을 산출하였다. 모델은 관측과 비교하여 전지구 해빙면적을 작게 모의하는 경향이 있다. 북반구 해빙면적은 ECMWF와 유사하게 모의하나 남반구에서는 다소 작게 모의하였다. 온실가스 증가에 따라 미래에는 해빙면적이 줄어들는데, RCP4.5 (RCP8.5)의 21세기 마지막 10년 동안에는 현재기후 (1971~2000)와 비교하여 전지구 해빙은 60.0% (30.2%)만이 남게 될 것으

로 전망되었다. 북반구 해빙면적의 감소는 더욱 뚜렷하여 55.4% (22.8%)만이 남게 될 것이며, 남반구 해빙면적은 현재 해빙면적의 64.5% (38.0%)만이 유지될 것으로 전망하였다. 북반구 9월은 연중 해빙면적이 가장 작을 때인데, RCP4.5 (RCP8.5) 시나리오에서 2050년대 (2040년대) 이후에는 북극 해빙면적이 1백만 km^2 미만이 되는 얼음 없는 (ice free) 시대를 전망하였다 (그림 5.7).

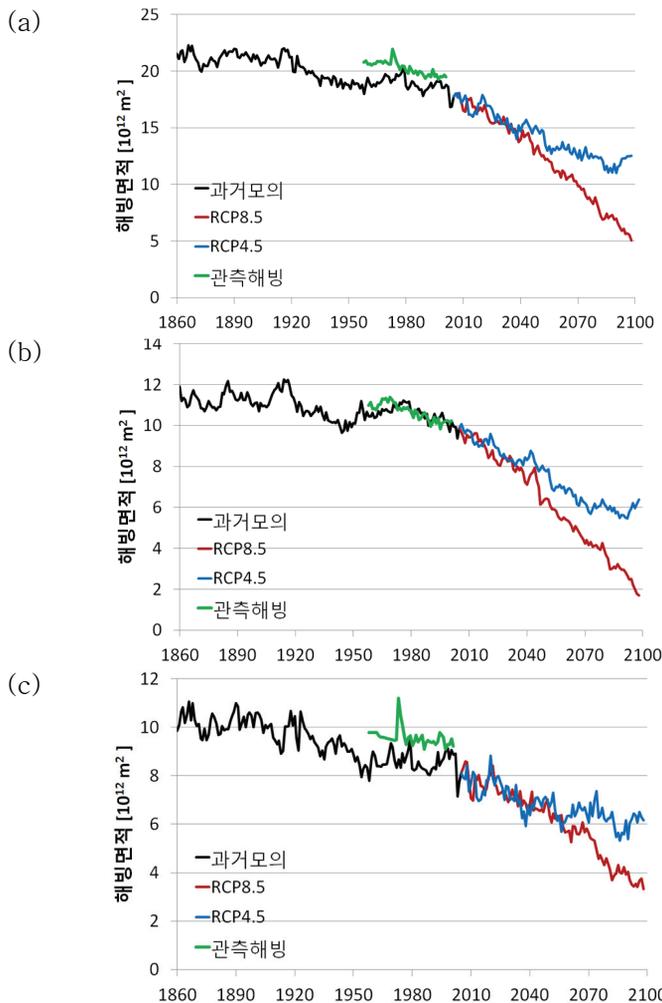


그림 5.7 연평균 해빙면적의 시계열 (1860~2099). (a) 전지구 (b) 북반구 (c) 남반구의 해빙 면적이고 실선은 각각 과거기후 (검정), RCP4.5 (파랑), RCP8.5 (빨강), ECMWF 분석 (녹색)이다.

6. 우리나라 상세 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.

6.1 우리나라 기후변화 시나리오 산출 방법

국립기상연구소는 국가 차원의 기후변화 대응을 위한 기후변화 시나리오를 개발하고 있으며, 이는 2단계로 구성되어 있다 (그림 6.1). 먼저, 새로운 온실가스 배출 시나리오인 RCP 시나리오에 기초해 전지구 대기-해양 결합모델인 HadGEM2-AO로 약 135 km 해상도의 전지구 기후변화 시나리오를 산출한다. 그리고 전지구 기후변화 시나리오 자료에 기초해 지역기후모델 HadGEM3-RA¹¹⁾로 우리나라 지역에 대한 12.5 km 해상도의 지역 기후변화 시나리오를 산출한다.

지역기후모델 HadGEM3-RA의 역학체계 및 물리과정은 기본적으로 전지구모델 HadGEM2-AO의 대기모델과 유사하다. 비정수 역학계이며, 밀도를 제외한 모든 예단변수에 대해 준-라그랑지안 이류를 적용한다. 다만, 모델 도메인을 설정하는 과정에서 전구 대기모델과 달리 관심이 있는 지역만을 모델 영역으로 정한다. 이 때, HadGEM3-RA는 지구의 극점을 수치적으로 이동시켜 관심영역을 적도지역으로 설정한다. 따라서, 모델 적분 영역은 적도 위경도 격자 (equatorial latitude-longitude

11) HadGEM3-RA: Atmospheric Regional climate model of Hadley Centre Global Environment Model version 3, 영국기상청 해들리센터의 HadGEM3 대기모델 기반 지역기후모델

grid) 체계를 갖게 된다. 이와 같은 좌표계 성질은 다른 지역모델과 뚜렷이 구분되는 특징이다. 일반적인 지역모델의 경우에 지구 표면의 상태를 평면으로 나타내는 지도투영법을 적용한 직각좌표계를 이용하기 때문에 모델 도메인이 너무 커지면 지구표면 왜곡현상이 발생하게 되지만, HadGEM3-RA에서는 지도투영법이 필요 없는 구면좌표계를 사용하기 때문에 모델 도메인의 확장이 다른 지역모델과 달리 비교적 용이한 장점이 있다.

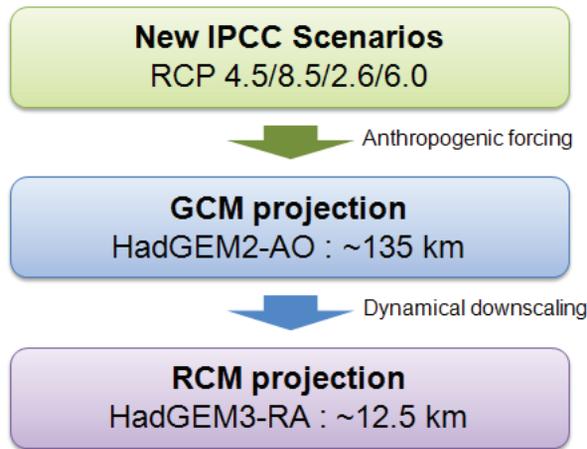


그림 6.1 국립기상연구소의 고해상도 지역 기후변화 시나리오 생산 전략

우리나라 지역에 대한 고해상도 지역 기후변화 시나리오를 산출하기 위해서, 약 12.5 km 수평분해능 (적도 0.11°)의 200(동서) × 180(남북) 격자로 모델 영역을 설정하였으며, 이 영역은 우리나라를 비롯하여 중국 및 일본의 일부 지역을 포함하고 있다. 이 때, 대규모 강제력 정보는 동서남북 각각 8개의 격자점으로 구성된 완충지역(buffer zone)을 통해 측면경계조건으로 처방된다. 따라서, 실제로 사용자에게 제공되는 자료의 수평영역은 8개의 측면 격자점을 제외한 184 × 164 격자이다.

고해상도 지역 기후변화 시나리오는 과거기후모의 (1950~2005년)와 2종 시나리오 (RCP8.5/4.5)에 기초한 미래기후전망 (2006~2099)에 대한 지역기후모델 자료로 구성된다. 지역기후모델 자료를 전지구모델 결과와 비교해보면, 고해상도 지역기후모델의 장점이 잘 나타난다. 그림 6.2에서처럼, 강수 및 지상기온 모의에 있어, 전지구모델에서는 표현할 수 없는 복잡한 지형의 효과에 의한 소규모 특징이 잘 모의된

다. 따라서 미래기후전망에 있어서도, 상세한 기후 변화 정보를 산출할 수 있다.

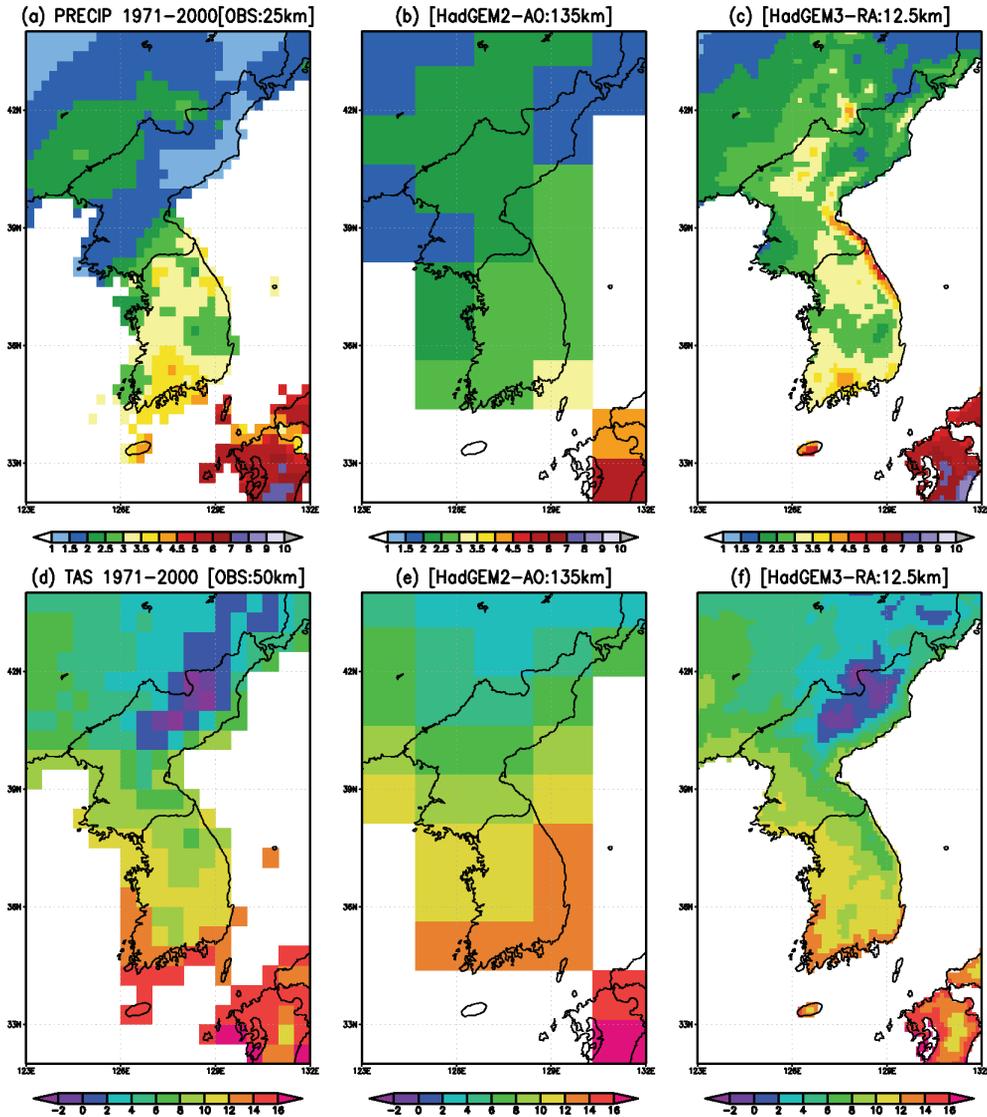


그림 6.2 강수량 (a~c) 및 지상기온 (d~f)의 30년 기후 (1971~2000)의 관측값 (a와 d)과 전지구모델 (b와 e) 및 지역기후모델 (c와 f) 모의 결과.

6.2 기온과 강수의 미래 변화

우리나라 상세 기후변화를 전망하기 위해 현재기후 (1980~2009년)를 기준으로 21세기 말까지의 변화를 살펴보았다. 먼저, 1950년부터 2099년까지 한반도 영역을 평균한 기온과 강수의 변화를 그림 6.3~6.4에 보였다. 여기에서 강수는 현재기후를 기준으로 그 변화를 백분율 (%)로 표현하였다. 먼저, 기온의 경우에는 증가 추세가 뚜렷이 나타나며, 현재에 비교하여 RCP4.5 시나리오 하에서는 21세기 후반 (2070~2099)에 약 3.0℃, RCP8.5 시나리오 하에서는 5.6℃ 까지 상승할 것으로 전망된다. 반면에, 강수의 경우에는 증가 추세가 약하게 나타나며, 21세기 후반에는 RCP4.5 시나리오 하에서는 15.8%, RCP8.5 시나리오 하에서는 18.7% 증가할 것으로 전망된다. 이와 같이, 기온과 강수 모두 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오에서 상승 추세를 보이고 있으며, 고농도 시나리오인 RCP8.5에서 상승폭이 더 높게 나타난다.

한반도 평균 기온 및 강수의 변화를 계절별로 전망해보면 (그림 6.5~6.12), 봄 (3~5월)·여름 (6~8월)·가을 (9~11월)·겨울 (12~2월) 모든 계절에서 뚜렷한 증가 추세가 나타나지만, 그 크기는 계절에 따라 상이하다. 특히, 겨울철의 기온 상승 및 강수 증가가 다른 계절에 비해 크다. 먼저, 기온의 경우에는 가을철의 미래변화가 연평균 미래변화의 크기가 비슷해, RCP4.5 시나리오 하에서는 21세기 후반에는 3.0℃ 까지 상승할 것으로 전망되고, RCP8.5 시나리오 하에서는 5.6℃ 까지 상승할 것으로 전망된다. 봄철과 여름철에는 상대적으로 작은 증가를 보이는데, RCP4.5 시나리오 하에서는 각각 2.6℃, 2.9℃ 상승할 것으로 전망되고, RCP8.5 시나리오 하에서는 각각 5.1℃, 5.4℃ 상승할 것으로 전망된다. 반면에, 겨울철은 상승폭이 매우 크며, RCP4.5 시나리오 하에서는 3.4℃, RCP8.5 시나리오 하에서는 6.3℃ 상승할 것으로 전망된다. 한편, 강수의 경우에는 기온에 비해 계절별 차이가 매우 크며, 고농도 시나리오인 RCP8.5 보다 저농도 시나리오인 RCP4.5에서 상승폭인 큰 계절도 있다. 봄철과 겨울철에는 RCP8.5에서의 강수 증가량이 크며, 반면에 여름철과 가을철에는 RCP4.5의 강수 증가량이 크다. 그러나, 두 시나리오 모두 겨울철의 증가 추세가 다른 계절에 비해 월등히 높다.

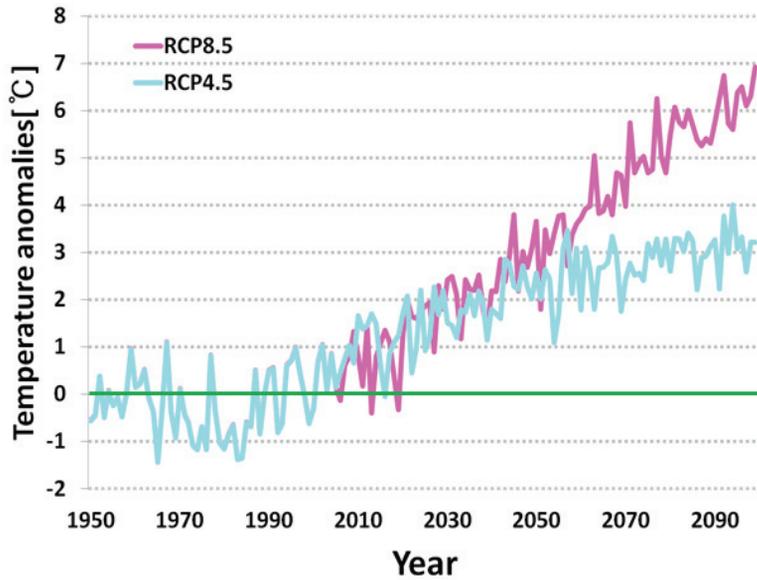


그림 6.3 1980~2009년 대비 1950~2099년 연평균 기온의 변화 (°C). 파란색, 분홍색은 각각 RCP4.5 시나리오, RCP8.5 시나리오 실험을 나타냄.

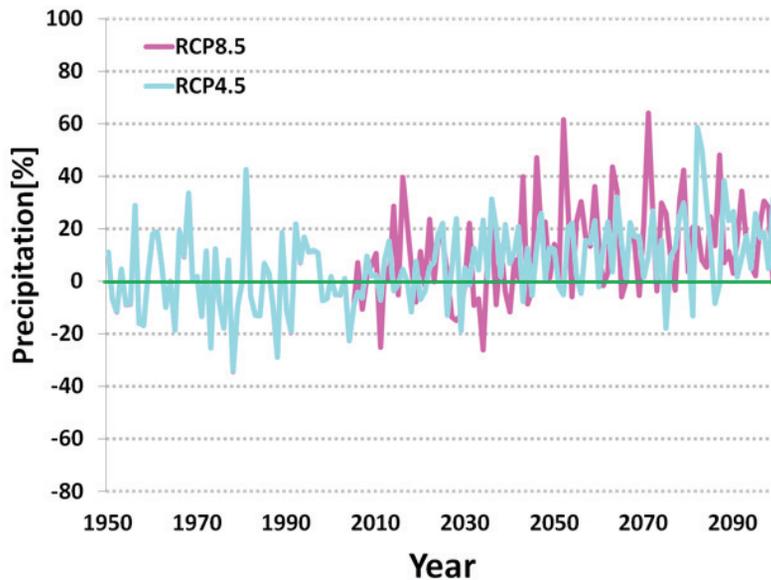


그림 6.4 1980~2009년 대비 1950~2099년 연평균 강수의 변화 (%). 파란색, 분홍색은 각각 RCP4.5 시나리오, RCP8.5 시나리오 실험을 나타냄.

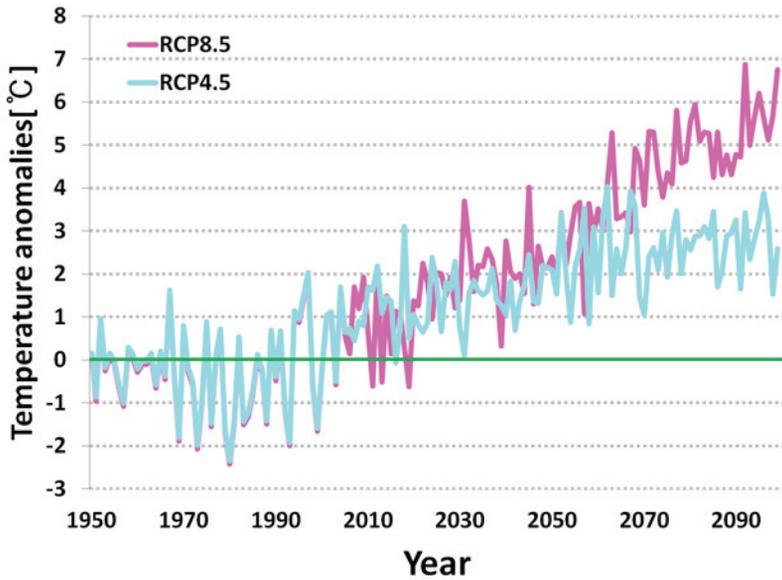


그림 6.5 1980~2009년 대비 1950~2099년 봄철 (MAM) 기온의 변화 (°C). 파란색, 분홍색은 각각 RCP4.5 시나리오, RCP8.5 시나리오 실험을 나타냄.

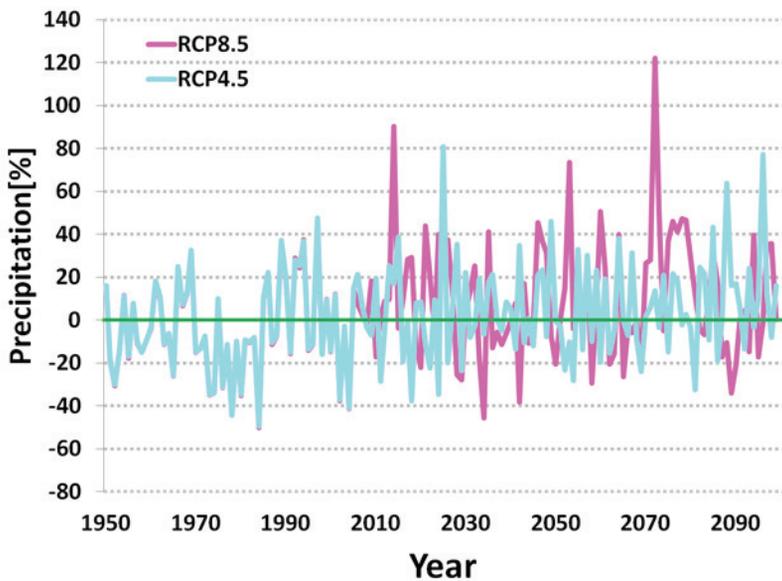


그림 6.6 1980~2009년 대비 1950~2099년 봄철 (MAM) 강수의 변화 (%). 파란색, 분홍색은 각각 RCP4.5 시나리오, RCP8.5 시나리오 실험을 나타냄.

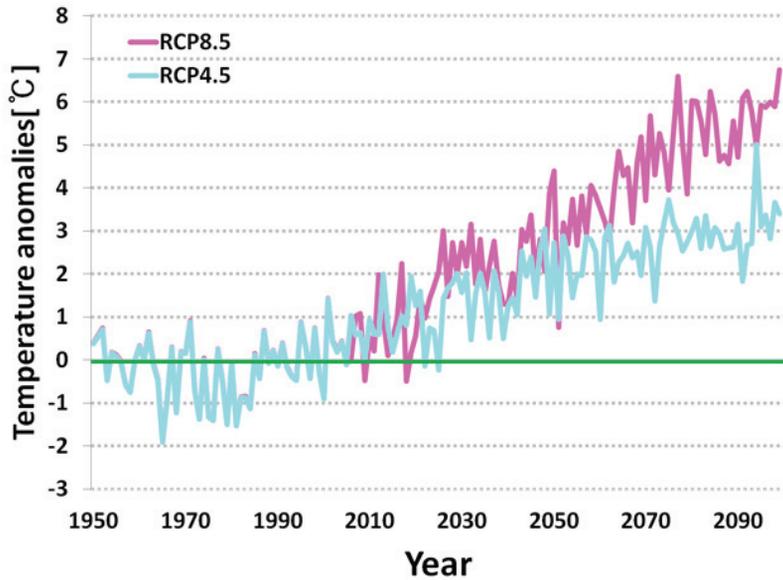


그림 6.7 1980~2009년 대비 1950~2099년 여름철 (JJA) 기온의 변화 (°C). 파란색, 분홍색은 각각 RCP4.5 시나리오, RCP8.5 시나리오 실험을 나타냄.

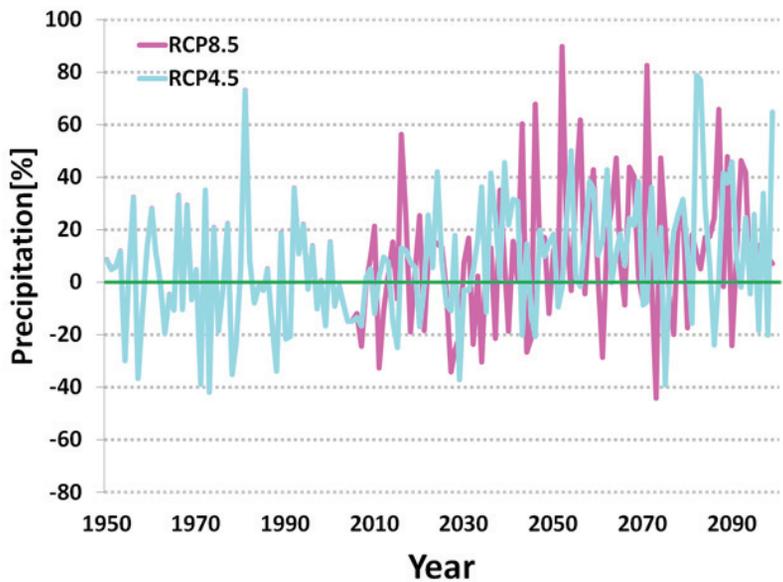


그림 6.8 1980~2009년 대비 1950~2099년 여름철 (JJA) 강수의 변화 (%). 파란색, 분홍색은 각각 RCP4.5 시나리오, RCP8.5 시나리오 실험을 나타냄.

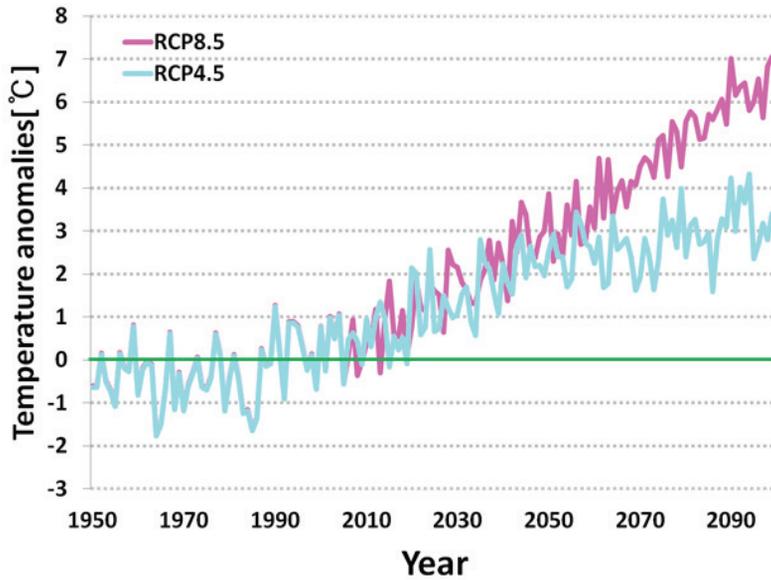


그림 6.9 1980~2009년 대비 1950~2099년 가을철 (SON) 기온의 변화 (°C). 파란색, 분홍색은 각각 RCP4.5 시나리오, RCP8.5 시나리오 실험을 나타냄.

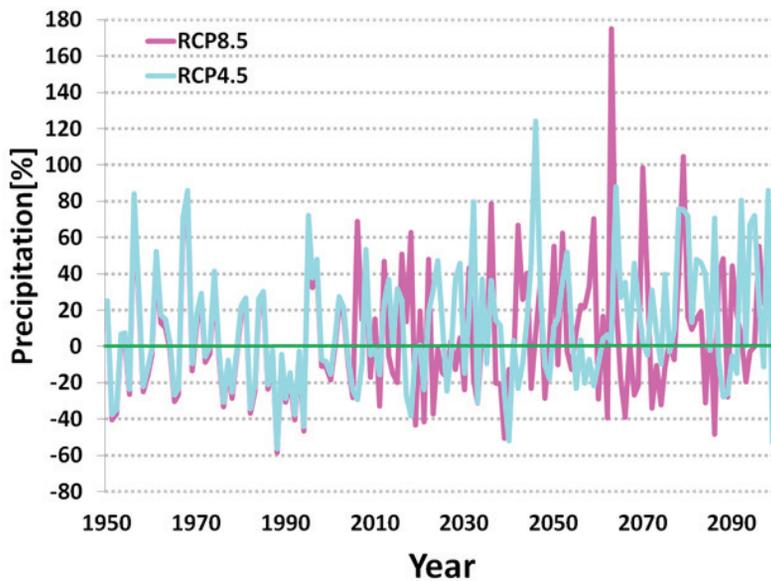


그림 6.10 1980~2009년 대비 1950~2099년 가을철 (SON) 강수의 변화 (%). 파란색, 분홍색은 각각 RCP4.5 시나리오, RCP8.5 시나리오 실험을 나타냄.

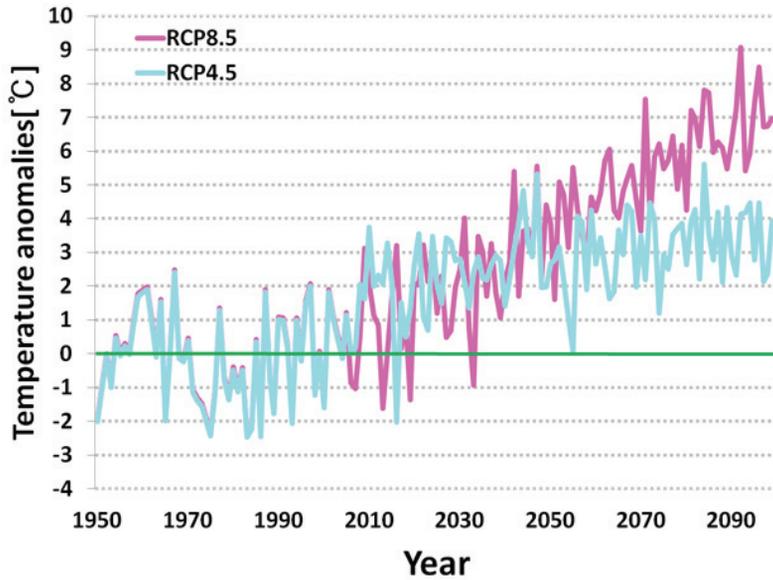


그림 6.11 1980~2009년 대비 1950~2099년 겨울철 (DJF) 기온의 변화 (°C). 파란색, 분홍색은 각각 RCP4.5 시나리오, RCP8.5 시나리오 실험을 나타냄.

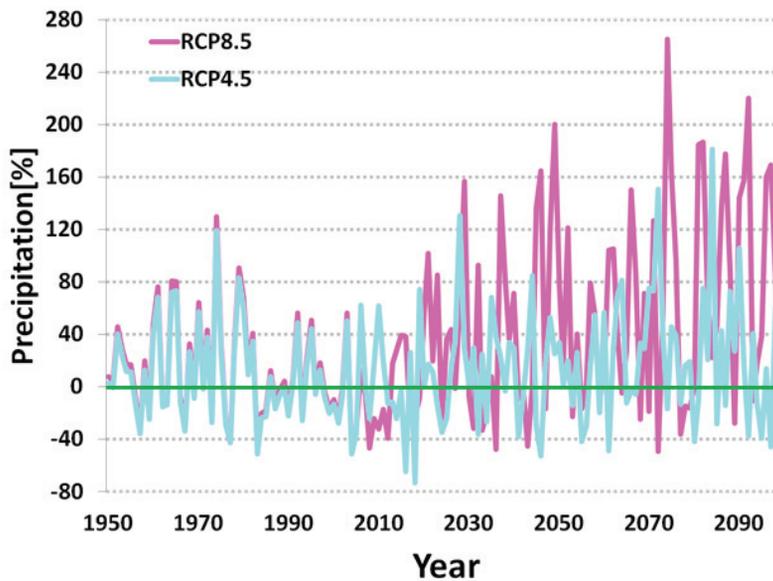


그림 6.12 1980~2009년 대비 1950~2099년 겨울철 (DJF) 강수의 변화 (%). 파란색, 분홍색은 각각 RCP4.5 시나리오, RCP8.5 시나리오 실험을 나타냄.

우리나라 상세 기후변화를 공간적으로 살펴보면, 대부분의 지역에서 기온이 상승하고 (그림 6.13~6.14), 강수가 증가할 것으로 전망된다 (그림 6.23~6.24). 기온의 미래 변화에서 21세기 전반 (2020~2049)과 21세기 후반 (2070~2099) 시기로 구분하여 한반도 평균값을 살펴보면, RCP4.5 시나리오에서는 각각 1.8℃, 3.0℃ 상승하고, RCP8.5 시나리오에서는 2.2℃, 5.6℃ 상승한다. 기온의 상승은 전체적으로 비슷하지만 남부 지역보다는 중북부 지역에서 크다. 한편, 강수의 미래 변화에서 21세기 전반과 21세기 후반에서의 한반도 평균 변화값이 RCP4.5 시나리오에서는 각각 8.4%, 15.8% 증가로 전망되고, RCP8.5 시나리오에서는 5.2%, 18.7% 증가로 전망되어, 21세기 말에 가까워질수록 강수 증가가 뚜렷하다. 강수의 증가는 지역적으로 변화의 폭이 매우 크며, 전반적으로 남해안과 중서부 지역에서의 두드러지게 나타난다.

우리나라 기후변화의 공간 분포 또한 계절에 따라 차이가 크다. 기온의 경우에, 봄철에는 두 시나리오 모두 남서부 보다는 북동부 지역의 기온 상승이 두드러지는 가운데, 그 상승폭이 RCP8.5 시나리오에서 크다 (그림 6.15~6.16). 여름철에는 내륙지역 보다 해안지역에서의 기온 상승이 크다 (그림 6.17~6.18). 가을철에는 남부지역 보다는 북부 지역의 기온 상승이 크다 (그림 6.19~6.20). 겨울철 또한 남부지역 보다는 북부지역의 기온 상승이 크다 (그림 6.21~6.22). 이와 같이, 기온 변화의 공간 분포를 살펴보면, 현재 기후가 따뜻한 지역보다는 추운 지역의 기온 상승이 뚜렷하다. 그리고 강수의 경우에는 계절별 지역 차이가 더욱 두드러진다. 봄철에는 한반도 대부분 지역의 강수가 증가할 것으로 전망되나, 일부 동해안 지역은 다소 감소할 것으로 전망된다 (그림 6.25~6.26). 여름철의 경우에는 지역적 차이가 더욱 크며, 대체로 남부 지역에 강수 증가가 나타나고 내륙 일부 지역은 강수량 감소가 전망된다 (그림 6.27~6.28). 가을철에는 중·남부 내륙 지역은 다소 감소할 것으로 전망되고, 북부지역은 뚜렷이 증가할 것으로 전망된다 (그림 6.29~6.30). 겨울철에는 대체로 한반도 전역의 강수가 증가할 것으로 전망되며, 특히 RCP8.5 시나리오의 경우에는 남해안 일부 지역 및 중북부 지역의 강수량이 현재의 두 배 이상으로 증가할 것으로 전망된다 (그림 6.31~6.32).

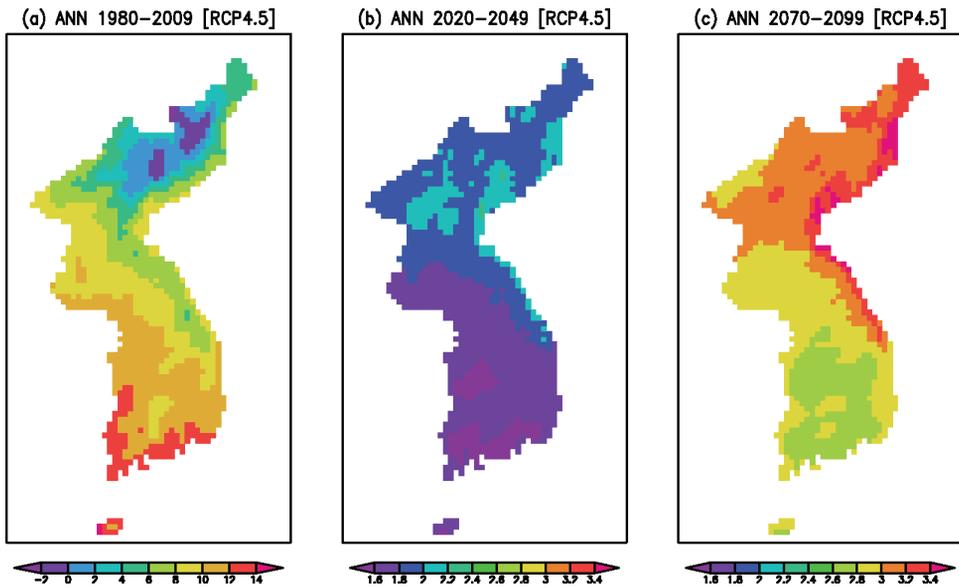


그림 6.13 RCP4.5 시나리오에 의해 모의된 연평균 기온의 현재기후 (°C)와 미래변화 (°C) 분포. (a) 현재기후 (1980~2009년), (b) 21세기 전반 (2020~2049년)의 변화, (c) 21세기 후반 (2070~2099)의 변화.

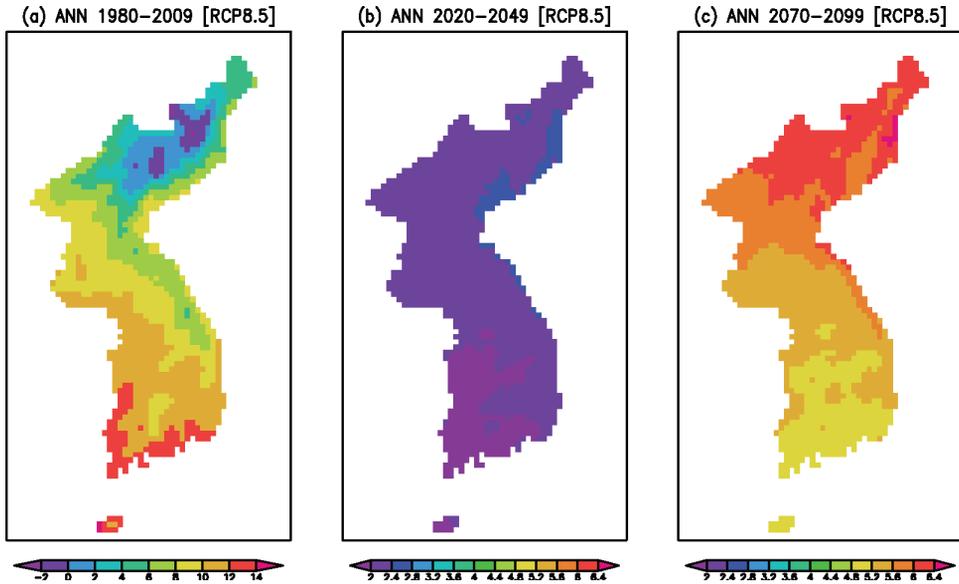


그림 6.14 RCP8.5 시나리오에 의해 모의된 연평균 기온의 현재기후 (°C)와 미래변화 (°C) 분포. (a) 현재기후 (1980~2009년), (b) 21세기 전반 (2020~2049년)의 변화, (c) 21세기 후반 (2070~2099)의 변화.

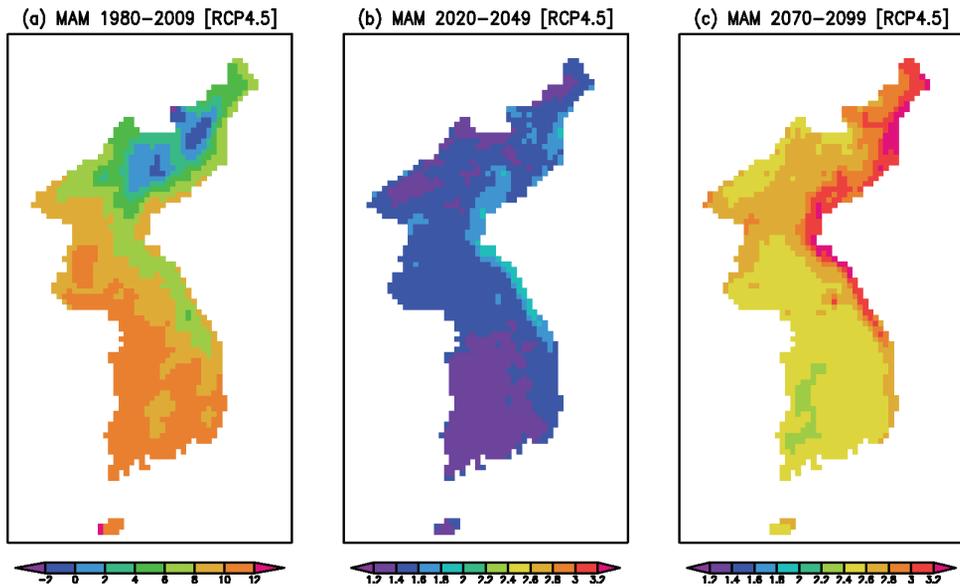


그림 6.15 RCP4.5 시나리오에 의해 모의된 봄철 (MAM) 기온의 현재기후 (°C)와 미래변화 (°C) 분포. (a) 현재기후 (1980~2009년), (b) 21세기 전반 (2020~2049년)의 변화, (c) 21세기 후반 (2070~2099)의 변화.

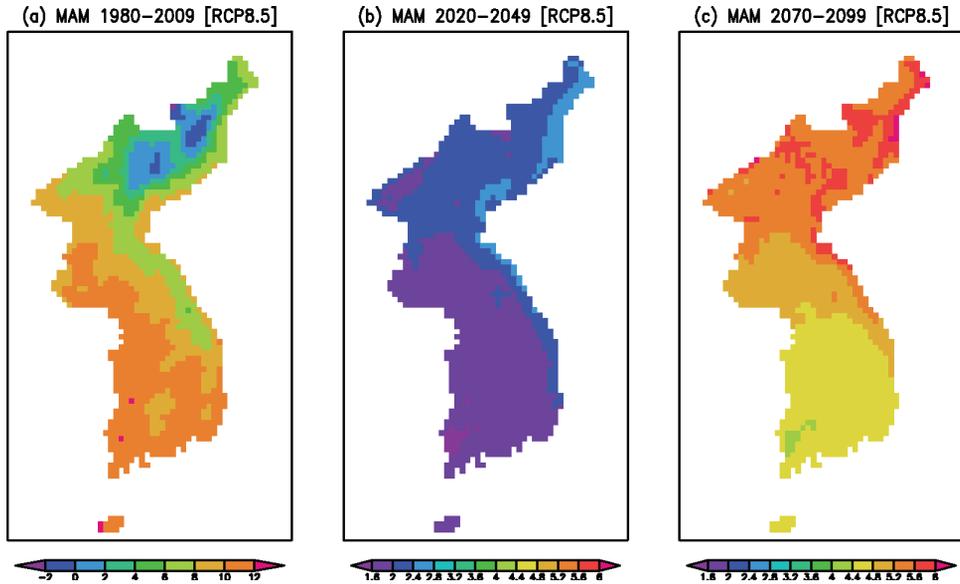


그림 6.16 RCP8.5 시나리오에 의해 모의된 봄철 (MAM) 기온의 현재기후 (°C)와 미래변화 (°C) 분포. (a) 현재기후 (1980~2009년), (b) 21세기 전반 (2020~2049년)의 변화, (c) 21세기 후반 (2070~2099)의 변화.

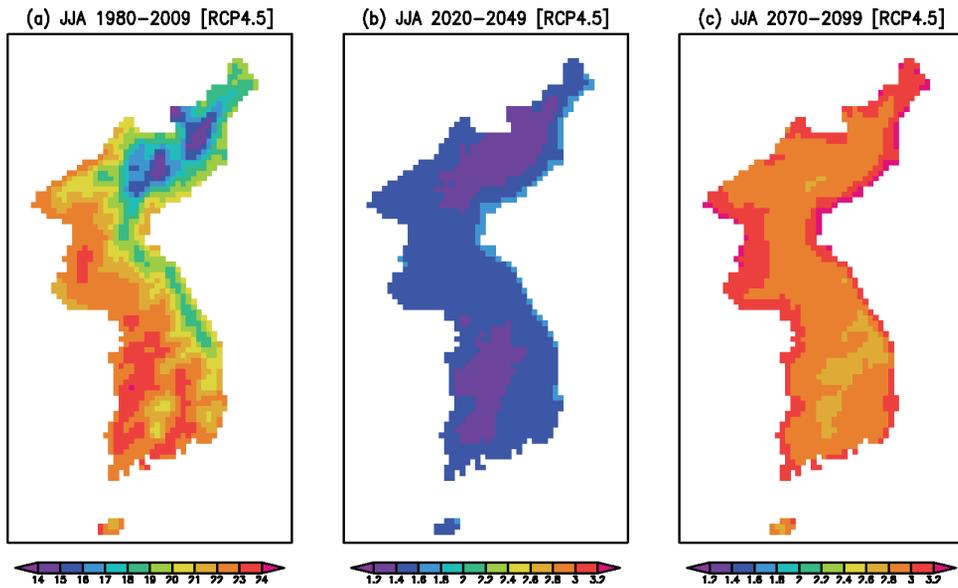


그림 6.17 RCP4.5 시나리오에 의해 모의된 여름철 (JJA) 기온의 현재기후 (°C)와 미래변화 (°C) 분포. (a) 현재기후 (1980~2009년), (b) 21세기 전반 (2020~2049년)의 변화, (c) 21세기 후반 (2070~2099)의 변화.

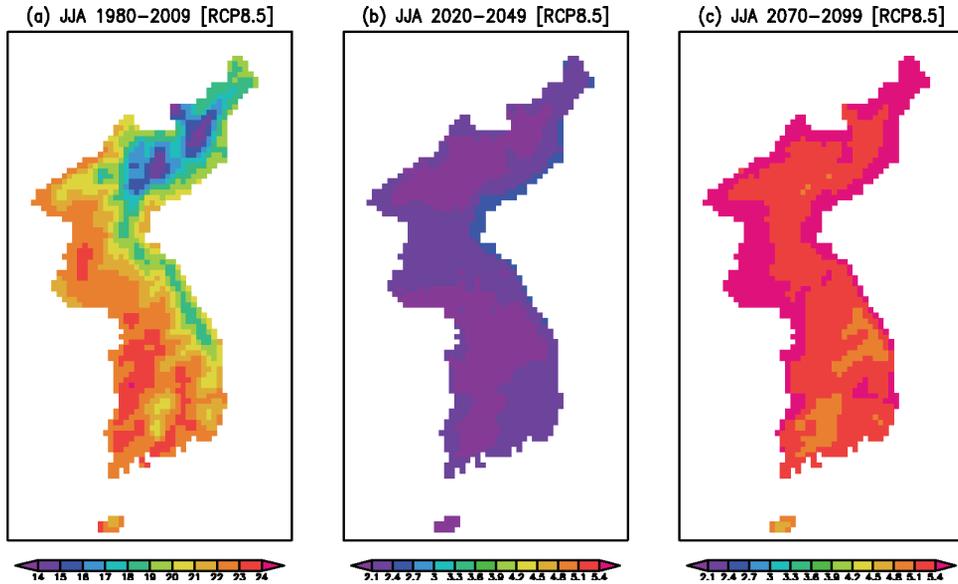


그림 6.18 RCP8.5 시나리오에 의해 모의된 여름철 (JJA) 기온의 현재기후 (°C)와 미래변화 (°C) 분포. (a) 현재기후 (1980~2009년), (b) 21세기 전반 (2020~2049년)의 변화, (c) 21세기 후반 (2070~2099)의 변화.

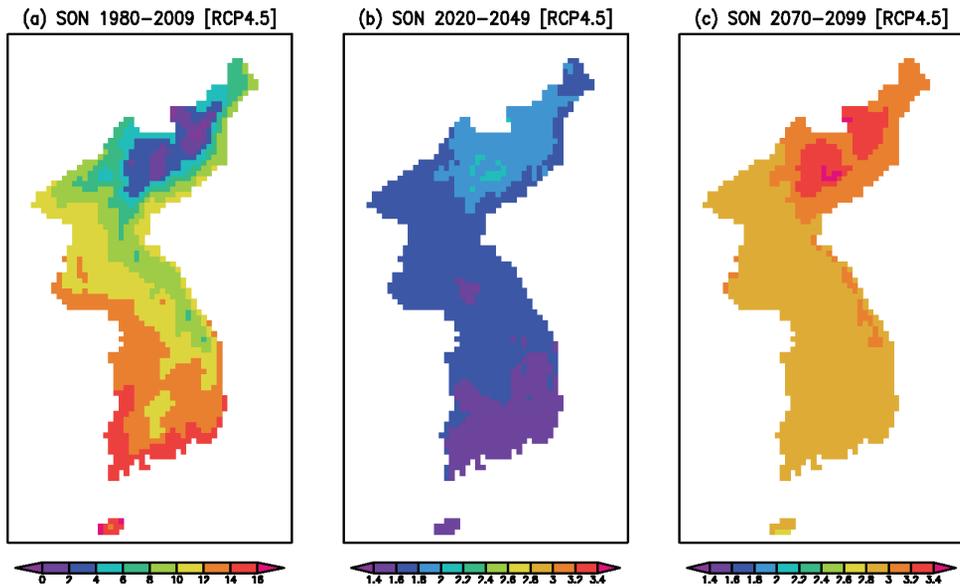


그림 6.19 RCP4.5 시나리오에 의해 모의된 가을철 (SON) 기온의 현재기후 (°C)와 미래변화 (°C) 분포. (a) 현재기후 (1980~2009년), (b) 21세기 전반 (2020~2049년)의 변화, (c) 21세기 후반 (2070~2099)의 변화.

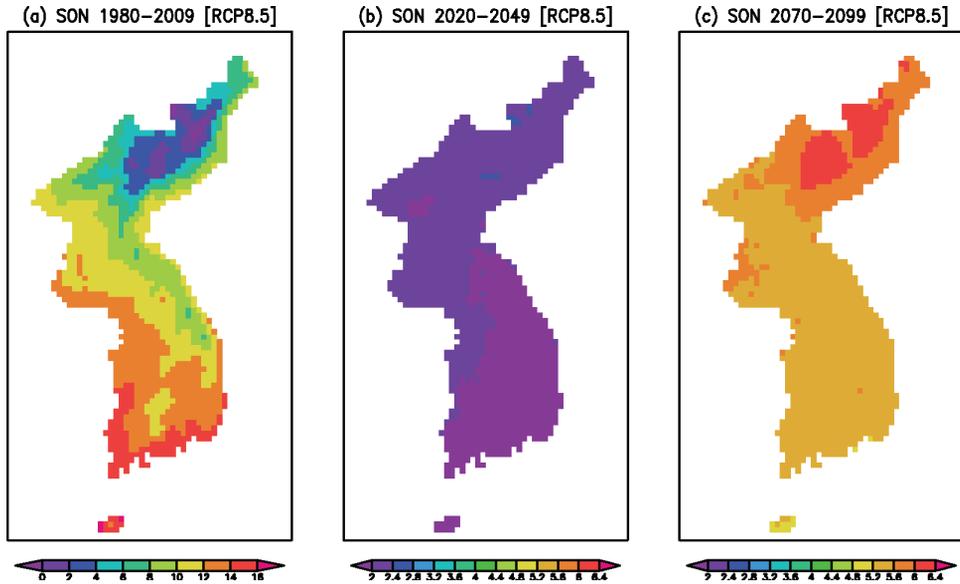


그림 6.20 RCP8.5 시나리오에 의해 모의된 가을철 (SON) 기온의 현재기후 (°C)와 미래변화 (°C) 분포. (a) 현재기후 (1980~2009년), (b) 21세기 전반 (2020~2049년)의 변화, (c) 21세기 후반 (2070~2099)의 변화.

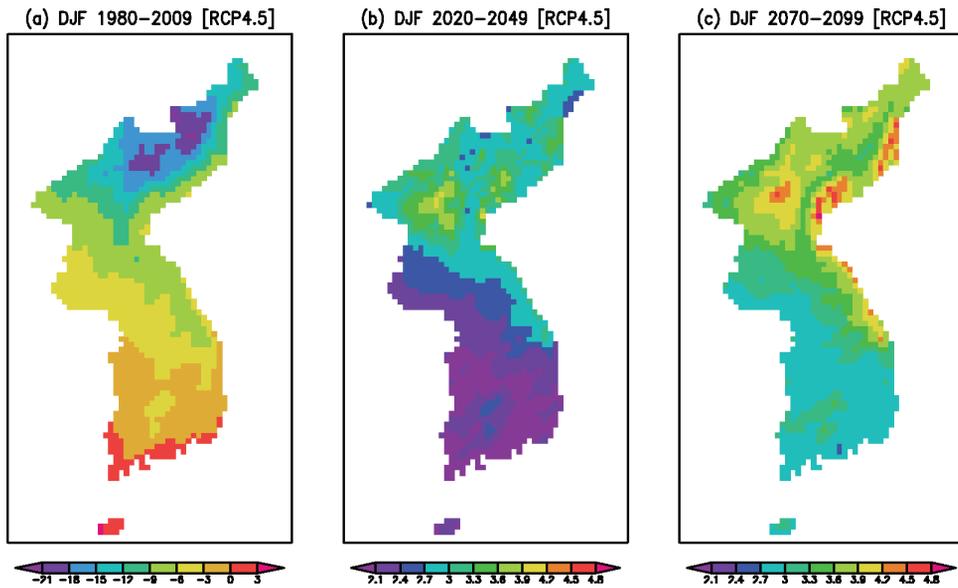


그림 6.21 RCP4.5 시나리오에 의해 모의된 겨울철 (DJF) 기온의 현재기후 (°C)와 미래변화 (°C) 분포. (a) 현재기후 (1980~2009년), (b) 21세기 전반 (2020~2049년)의 변화, (c) 21세기 후반 (2070~2099)의 변화.

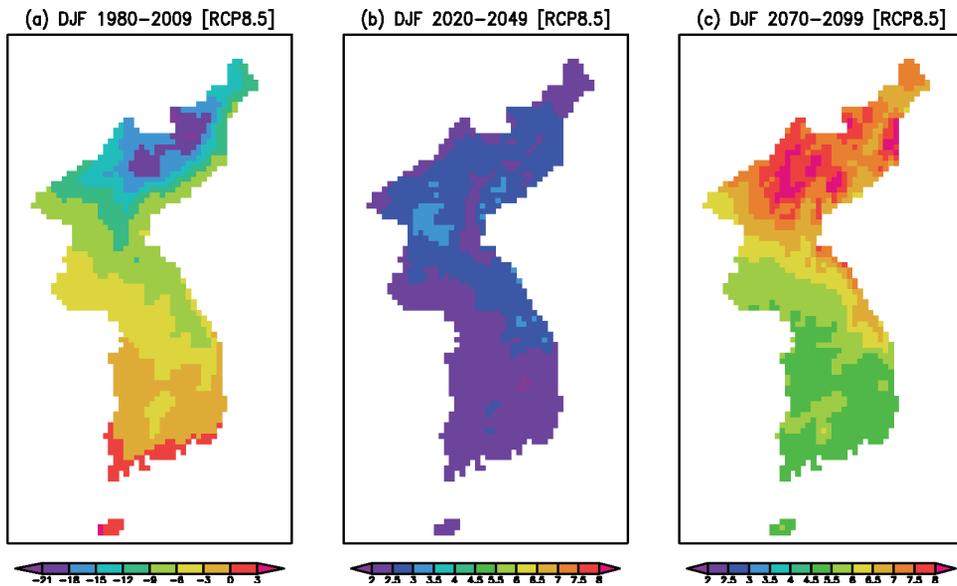


그림 6.22 RCP8.5 시나리오에 의해 모의된 겨울철 (DJF) 기온의 현재기후(°C)와 미래변화 (°C) 분포. (a) 현재기후 (1980~2009년), (b) 21세기 전반 (2020~2049년)의 변화, (c) 21세기 후반 (2070~2099)의 변화.

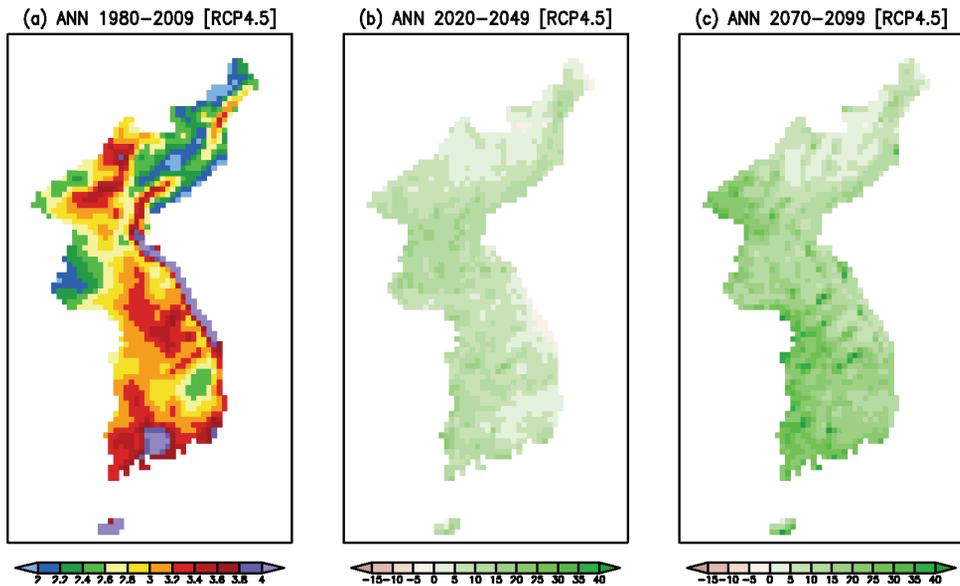


그림 6.23 RCP4.5 시나리오에 의해 모의된 연평균 강수의 현재기후 (mm day^{-1})와 미래변화 (%) 분포. (a) 현재기후 (1980~2009년), (b) 21세기 전반 (2020~2049년)의 변화, (c) 21세기 후반 (2070~2099)의 변화.

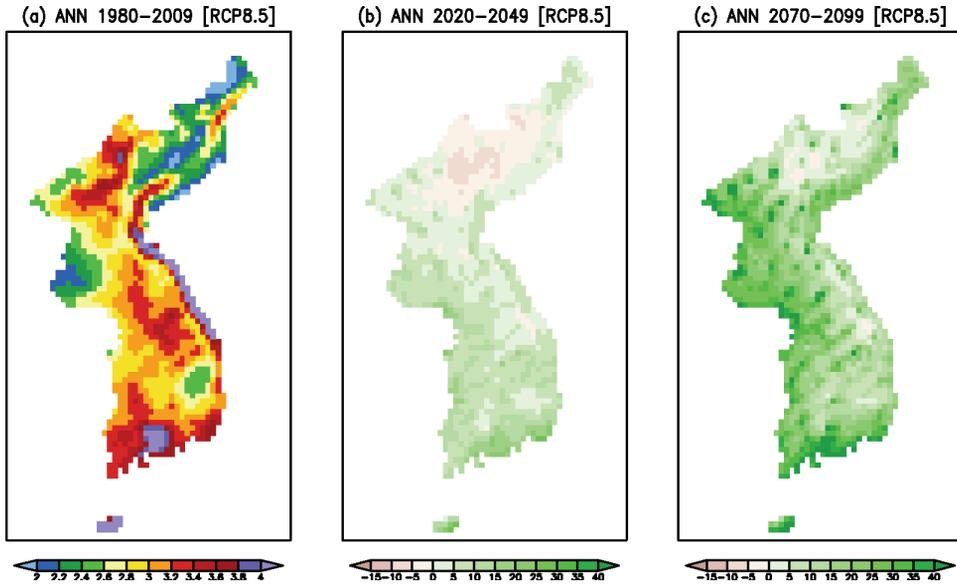


그림 6.24 RCP8.5 시나리오에 의해 모의된 연평균 강수의 현재기후 (mm day^{-1})와 미래변화 (%) 분포. (a) 현재기후 (1980~2009년), (b) 21세기 전반 (2020~2049년)의 변화, (c) 21세기 후반 (2070~2099)의 변화.

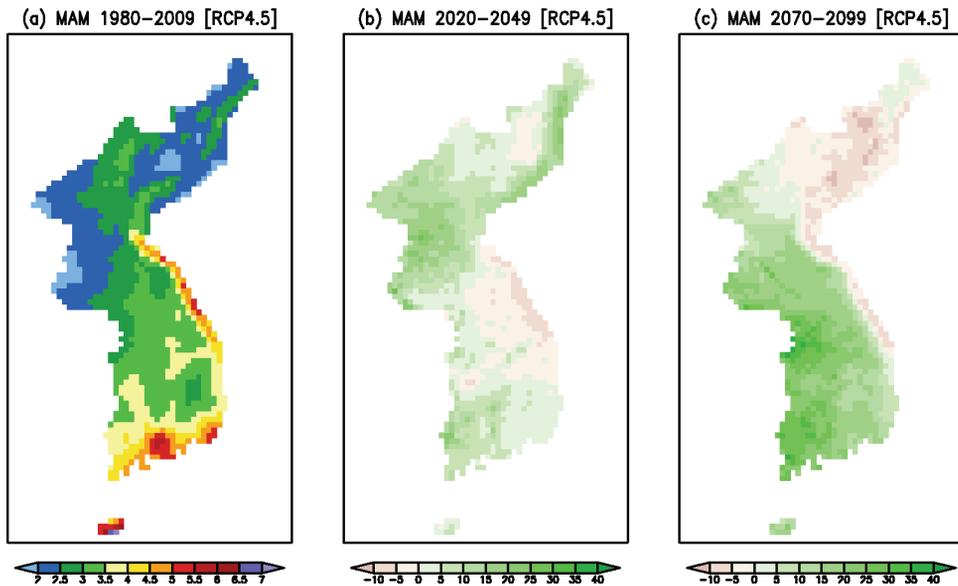


그림 6.25 RCP4.5 시나리오에 의해 모의된 봄철 (MAM) 강수의 현재기후 (mm day^{-1})와 미래변화(%) 분포. (a) 현재기후 (1980~2009년), (b) 21세기 전반 (2020~2049년)의 변화, (c) 21세기 후반 (2070~2099)의 변화.

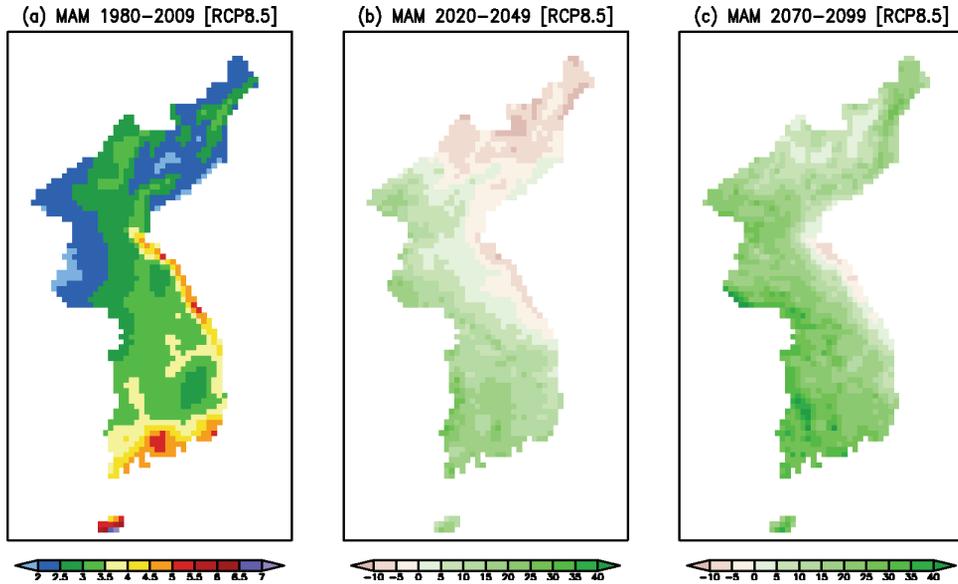


그림 6.26 RCP8.5 시나리오에 의해 모의된 봄철 (MAM) 강수의 현재기후 (mm day^{-1})와 미래변화(%) 분포. (a) 현재기후 (1980~2009년), (b) 21세기 전반 (2020~2049년)의 변화, (c) 21세기 후반 (2070~2099)의 변화.

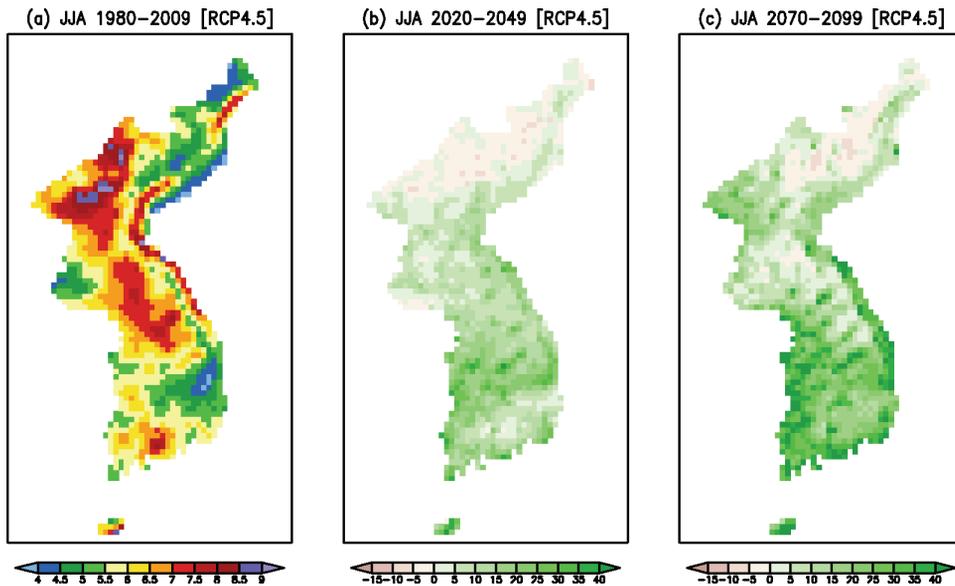


그림 6.27 RCP4.5 시나리오에 의해 모의된 여름철 (JJA) 강수의 현재기후 (mm day^{-1})와 미래변화(%) 분포. (a) 현재기후 (1980~2009년), (b) 21세기 전반 (2020~2049년)의 변화, (c) 21세기 후반 (2070~2099)의 변화.

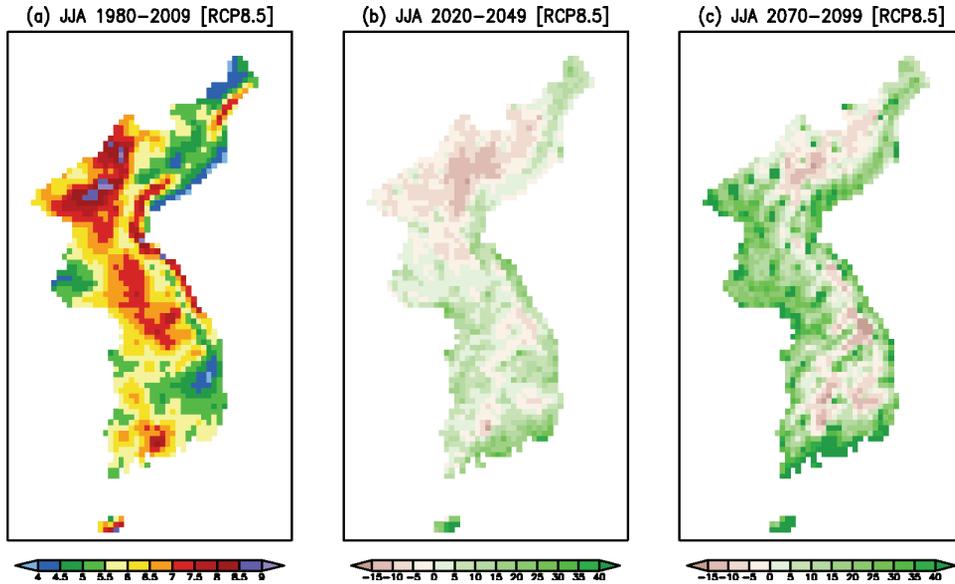


그림 6.28 RCP8.5 시나리오에 의해 모의된 여름철 (JJA) 강수의 현재기후 (mm day^{-1})와 미래변화(%) 분포. (a) 현재기후 (1980~2009년), (b) 21세기 전반 (2020~2049년)의 변화, (c) 21세기 후반 (2070~2099)의 변화.

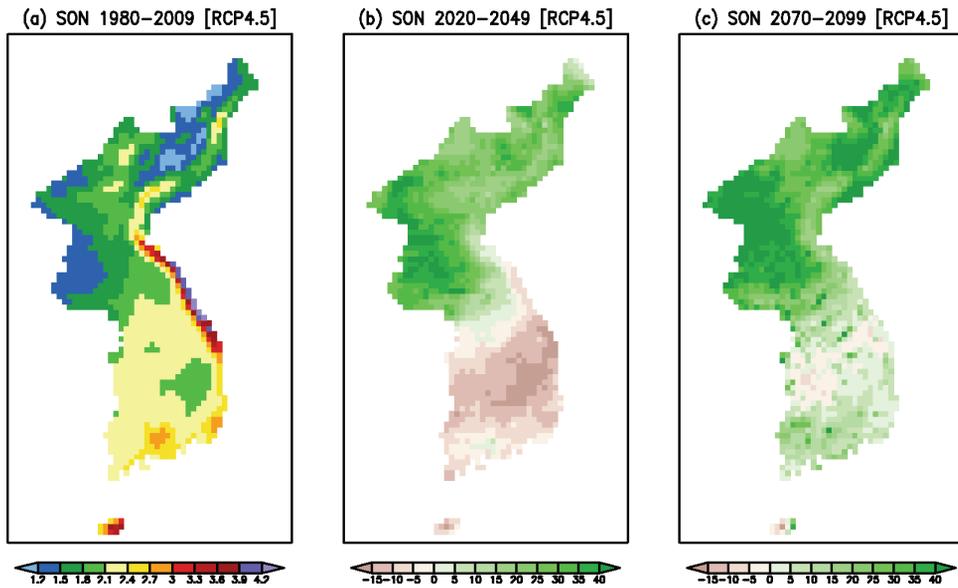


그림 6.29 RCP4.5 시나리오에 의해 모의된 가을철(SON) 강수의 현재기후 (mm day^{-1})와 미래변화(%) 분포. (a) 현재기후 (1980~2009년), (b) 21세기 전반 (2020~2049년)의 변화, (c) 21세기 후반 (2070~2099)의 변화.

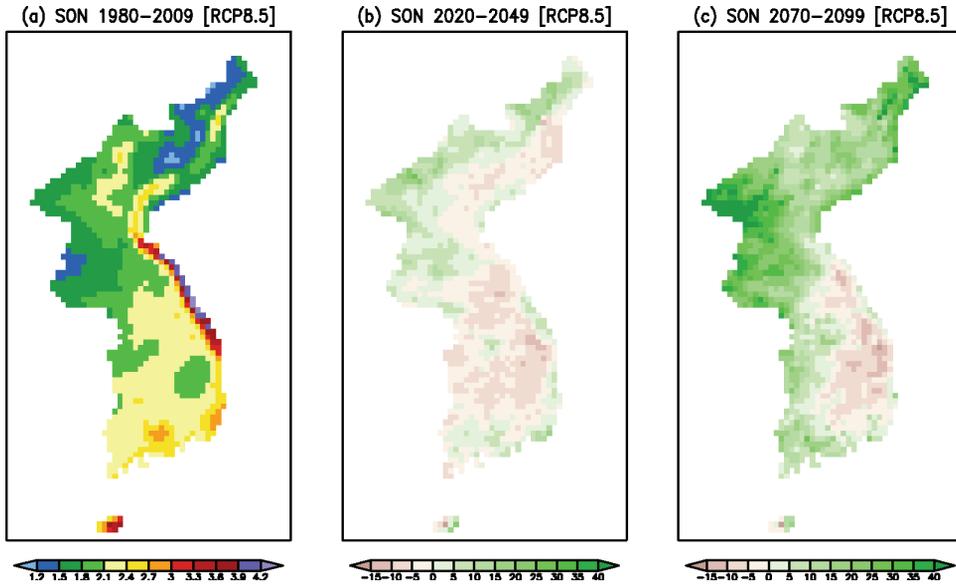


그림 6.30 RCP8.5 시나리오에 의해 모의된 가을철 (SON) 강수의 현재기후 (mm day^{-1})와 미래변화(%) 분포. (a) 현재기후 (1980~2009년), (b) 21세기 전반 (2020~2049년)의 변화, (c) 21세기 후반 (2070~2099)의 변화.

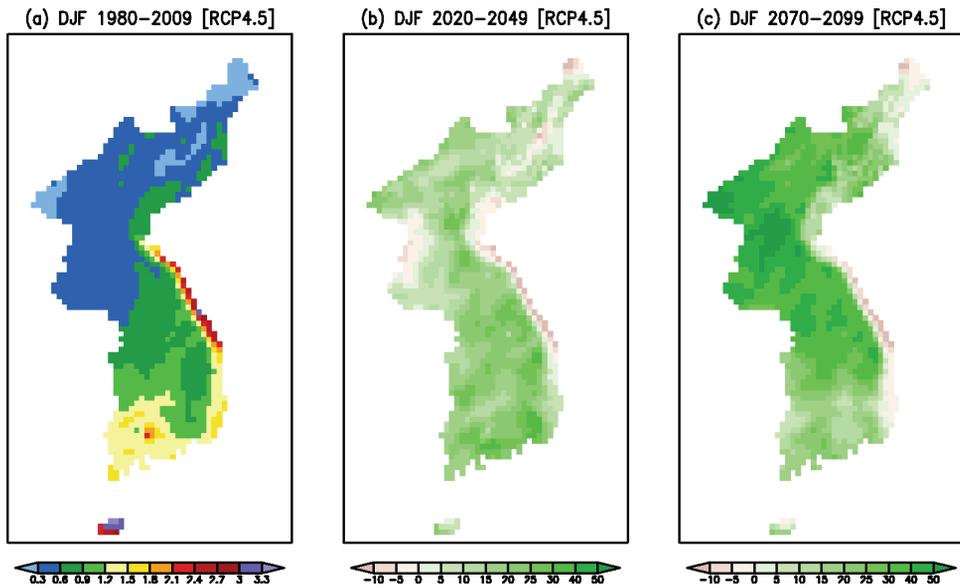


그림 6.31 RCP4.5 시나리오에 의해 모의된 겨울철 (DJF) 강수의 현재기후 (mm day^{-1})와 미래변화(%) 분포. (a) 현재기후 (1980~2009년), (b) 21세기 전반 (2020~2049년)의 변화, (c) 21세기 후반 (2070~2099)의 변화.

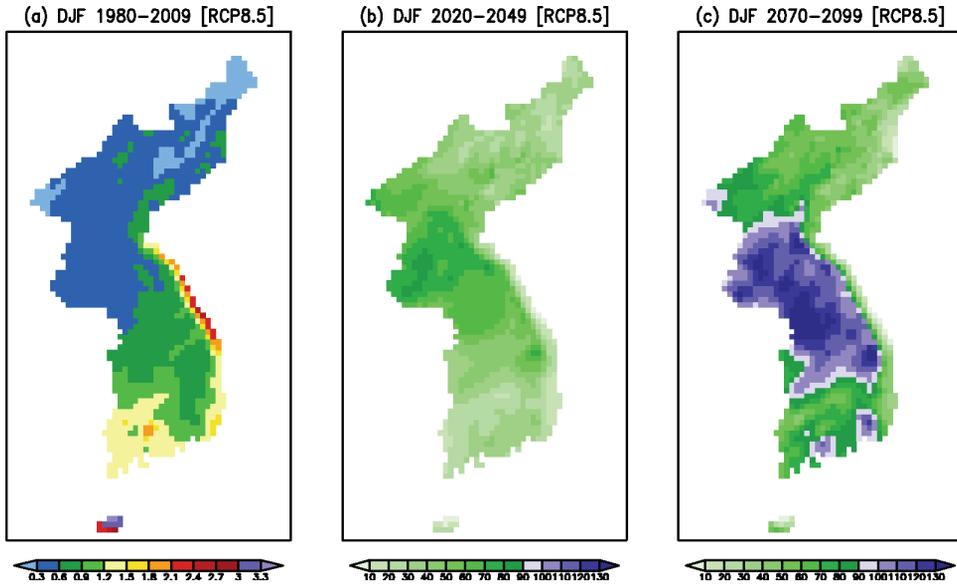


그림 6.32 RCP8.5 시나리오에 의해 모의된 겨울철 (DJF) 강수의 현재기후 (mm day^{-1})와 미래변화(%) 분포. (a) 현재기후 (1980~2009년), (b) 21세기 전반 (2020~2049년)의 변화, (c) 21세기 후반 (2070~2099)의 변화.

우리나라 기온과 강수의 미래변화를 비교하면 중요한 특징이 나타난다. 기온의 경우에는 경년 변동성 및 공간 변동성이 상대적으로 작고 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.

마지막으로, 20년 동안의 RCP 시나리오별, 시기별, 계절별 한반도 평균 기온 및 강수의 미래변화 전망을 표 6.1에 정리하였다.

표 6.1 현재 (1980~2009년) 대비 미래 한반도 평균 기온 및 강수량 전망

RCP 시나리오			RCP4.5		RCP8.5	
			2020~2049	2070~2099	2020~2049	2070~2099
한반도 평균	기온 (℃)	연평균	1.8	3.0	2.2	5.6
		봄	1.5	2.6	2.0	5.1
		여름	1.4	2.9	2.1	5.4
		가을	1.7	3.0	2.1	5.6
		겨울	2.7	3.4	2.5	6.3
	강수량 (%)	연평균	8.4	15.8	5.2	18.7
		봄	6.0	10.2	5.7	17.7
		여름	8.9	16.3	2.9	14.6
		가을	12.1	23.2	0.5	12.8
		겨울	14.3	27.5	45.9	81.4

6.3 극한 기후의 변화

최근 들어 폭염, 열대야, 집중호우 등 극한 기후 현상은 세기의 증가뿐만 아니라 발생 빈도도 잦아지고 있고, 무엇보다 미래에는 현재보다 발생 빈도수가 더욱 증가할 것이라고 예상되고 있다. 따라서 고해상도 지역 기후변화 시나리오 자료와 관측 자료를 이용하여, 우리나라의 주요 극한 기후 현상인 폭염, 열대야, 영하일, 집중호우의 발생 빈도수 변화 및 난방도일, 냉방도일의 변화를 분석하였다.

폭염일은 일 최고기온 33℃ 이상인 날로 정의되며, 현재 (1980~2009년) 연평균 9.0일이다. 그러나 기온의 상승으로 21세기 전반 (2020~2049년)에는 RCP4.5 시나리오에 의하면 연평균 폭염일수가 16.5일, RCP8.5 시나리오에 의하면 23.0일로 각각 7.5일, 14.0일 증가할 것으로 전망된다. 또한 21세기 후반 (2070~2099년)에는 RCP4.5 시나리오에 의하면 연평균 폭염일수가 29.6일, RCP8.5 시나리오에 의하면 64.7일로 각각 현재보다 20.6일, 55.7일 증가할 것으로 전망된다. 현재 연평균 폭염일수의 지역 분포를 보면 대구에서 22.0일로 폭염 발생 빈도가 가장 높으며, 합천, 의성, 밀양, 영천, 전주, 구미, 포항 등 내륙 일부 지역에서만 15일 이상으로 폭염 발생 빈도가 높은 편이고 중부지역의 경우 대부분 10일 미만으로 낮다 (그림 6.33 a). 반면에 RCP4.5 시나리오에 의하면 미래에는 내륙 지역을 중심으로 폭염 발생 빈도가 크게 증가하여 21세기 후반에는 밀양에서 58.0일까지 폭염이 발생할 것으로 전망된다 (그림 6.33 b, c). RCP8.5 시나리오에 의하면 21세기 후반에는 밀양에서 연평균 폭염 발생일이 92.9일까지 전망되며, 대관령, 울릉도, 속초, 울진 등 해안 일부 지역과 산지 지역을 제외한 대부분 지역에서 폭염이 연평균 50일 이상 발생할 것으로 전망된다 (그림 6.33 d, e).

우리나라의 현재 연평균 열대야일수는 4.0일이다. 열대야일은 일 최저기온이 25℃ 이상인 날로 정의된다. RCP4.5 시나리오에 의하면 21세기 전반 연평균 열대야일수는 14.8일로 현재보다 10.8일 증가하고 21세기 후반에는 32.2일로 28.2일 증가할 것으로 전망된다. 또한 RCP8.5 시나리오에 의하면 21세기 전반과 후반에 연평균 열대야일수가 각각

20.6일, 59.9일로 16.6일, 55.9일 증가할 것으로 전망된다. 현재 연평균 열대야일수는 서귀포에서 20일 이상의 가장 높은 분포를 보이며, 남해안, 남부지역의 서해안 및 동해안 일부 지역, 서울, 대구, 광주 등의 대도시 지역에서 5일 이상으로 비교적 발생 빈도가 높다 (그림 6.34 a). 반면에 미래에는 열대야가 출현하지 않았던 대관령, 거창, 임실 등의 지역에서도 열대야가 나타나기 시작한다. RCP4.5 시나리오에 의하면 21세기 후반에 열대야가 대관령을 제외한 전 지역에서 연평균 10일 이상 출현하고 서귀포에서는 72.0일까지 출현할 것으로 전망된다 (그림 6.34 b, c). 또한 RCP8.5 시나리오에 의하면 21세기 후반에 대관령을 제외한 전 지역에서 열대야가 연평균 30일 이상 출현하고 서귀포에서는 97.1일까지 출현할 것으로 전망된다 (그림 6.34 d, e). RCP8.5 시나리오에 의하면 21세기 후반에는 대관령에서도 연평균 5.5일까지 열대야가 출현할 것으로 전망된다.

영하일은 일 최저기온 0°C 이하인 날로 정의되며, 현재 연평균 98.0일이다. RCP4.5 시나리오에 의하면 21세기 전반과 후반에는 연평균 영하일수가 각각 76.6일, 68.3일로 현재보다 21.4일, 29.7일 감소할 것으로 전망된다. 또한 RCP8.5 시나리오에 의하면 21세기 전반과 후반에 연평균 영하일수가 각각 76.6일, 44.5일로 21.4일, 53.5일 감소할 것으로 전망된다. 현재 연평균 영하일수의 지역 분포를 보면 대관령, 홍천, 제천, 양평, 부여, 문경, 합천, 산청 등 산지 지역 및 중부 지역 등에서 100일 이상 높은 분포를 보이며, 제주와 서귀포 등에서는 10일 미만의 낮은 분포를 보인다 (그림 6.35 a). 반면에 RCP4.5 시나리오에 의하면 21세기 후반에는 영하일수가 충주, 춘천, 임실, 양평, 인제, 보은, 홍천, 제천, 대관령 등의 중부 산지 지역을 중심으로 한 일부 내륙 지역에서만 연평균 100일 이상 출현할 것으로 전망된다 (그림 6.35 b, c). 또한 RCP8.5 시나리오에 의하면 21세기 후반에 연평균 영하일수가 100일 이상 출현하는 지역이 없을 것으로 전망되며, 서귀포와 제주 등 제주도 지역에서는 영하일이 출현하지 않을 것으로 전망된다 (그림 6.35 d, e).

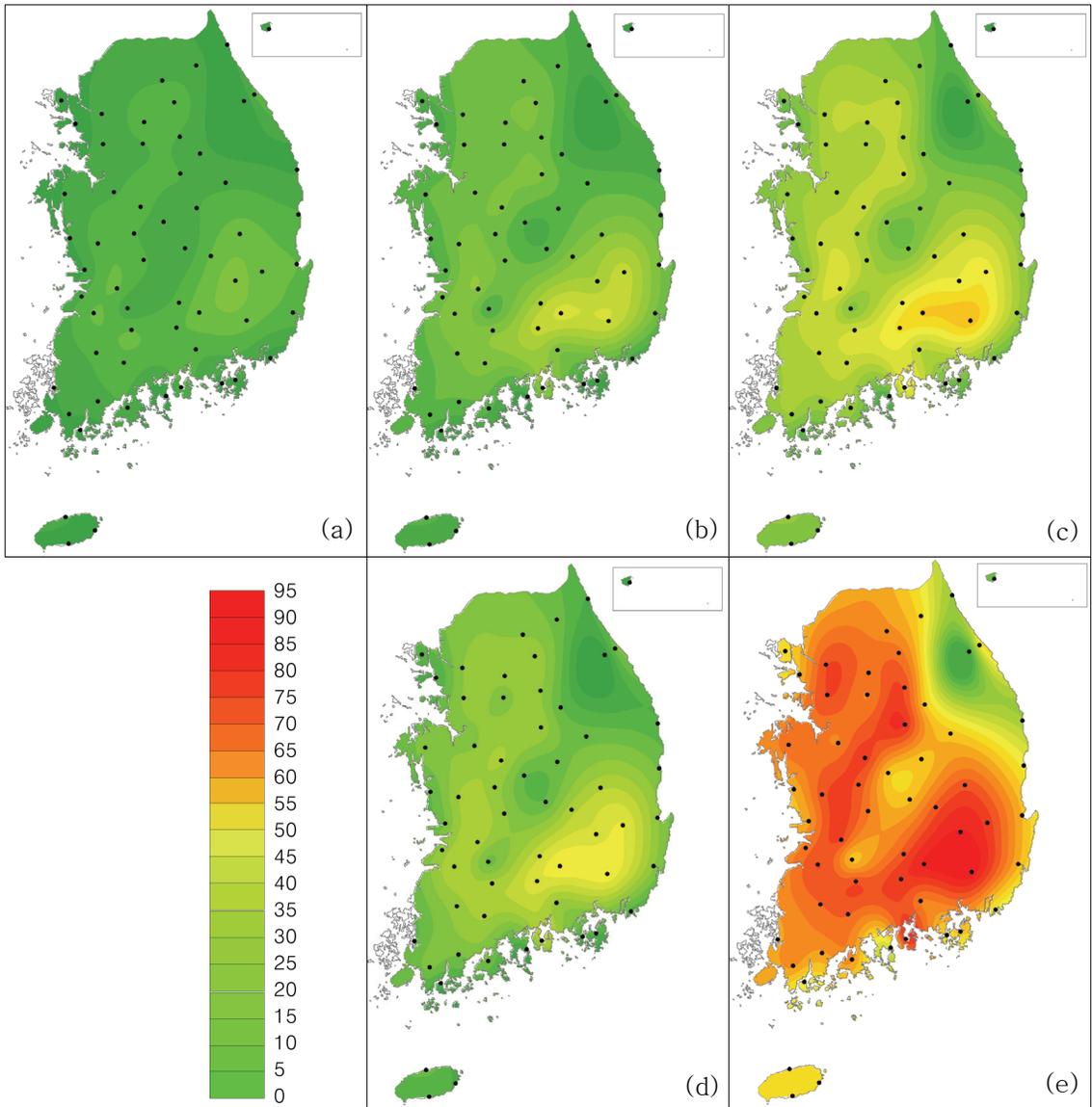


그림 6.33 관측 자료로 구한 현재 (1980~2009년) 연평균 폭염일수 (a)와 RCP 시나리오에 의한 21세기 전반 (2020~2049년; b: RCP4.5, d: RCP8.5) 및 21세기 후반(2070~2099년; c: RCP4.5, e: RCP8.5) 연평균 폭염일수

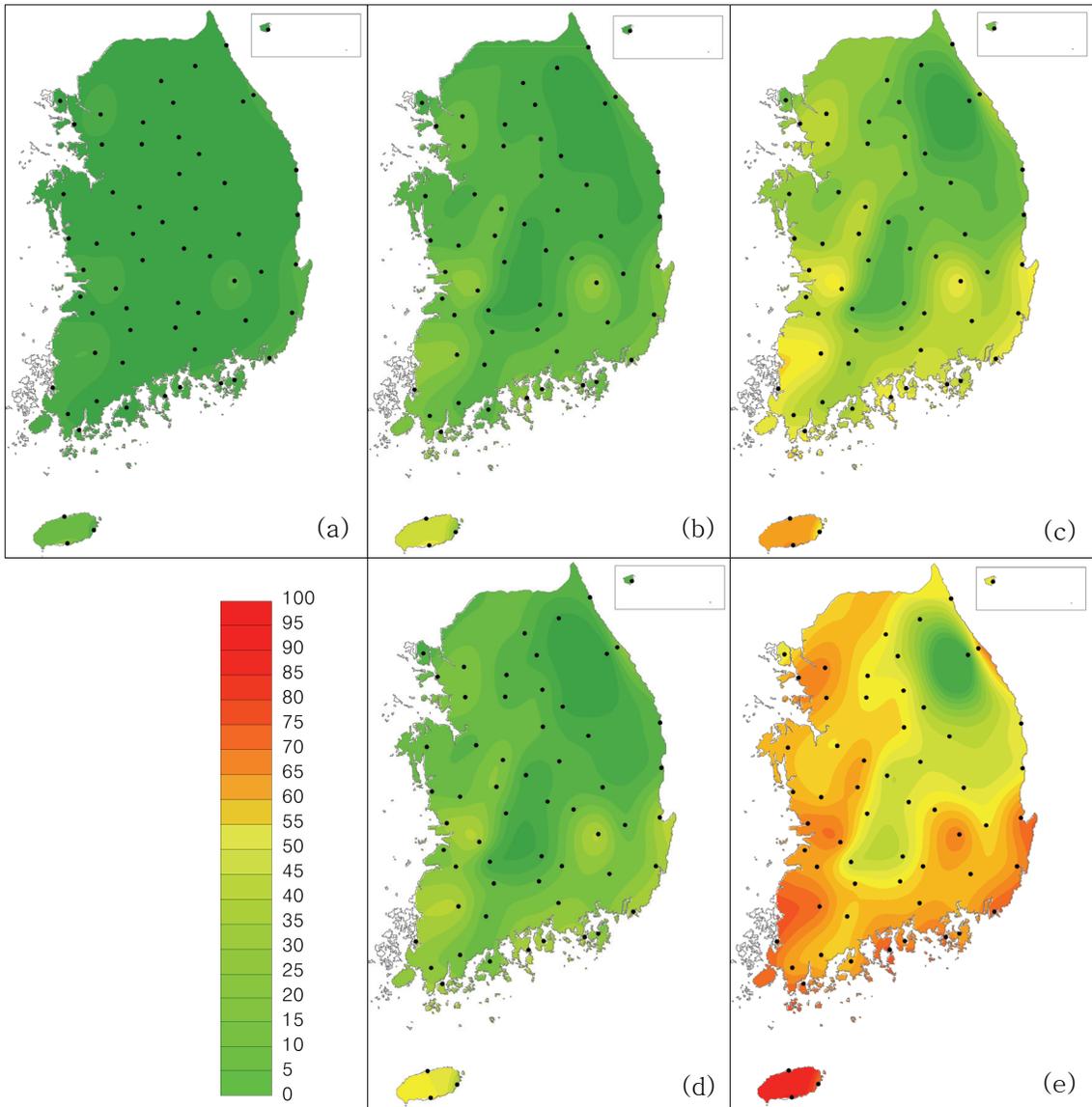


그림 6.34 관측 자료로 구한 현재 (1980~2009년) 연평균 열대야일수 (a)와 RCP 시나리오에 의한 21세기 전반 (2020~2049년; b: RCP4.5, d: RCP8.5) 및 21세기 후반 (2070~2099년; c: RCP4.5, e: RCP8.5) 연평균 열대야일수

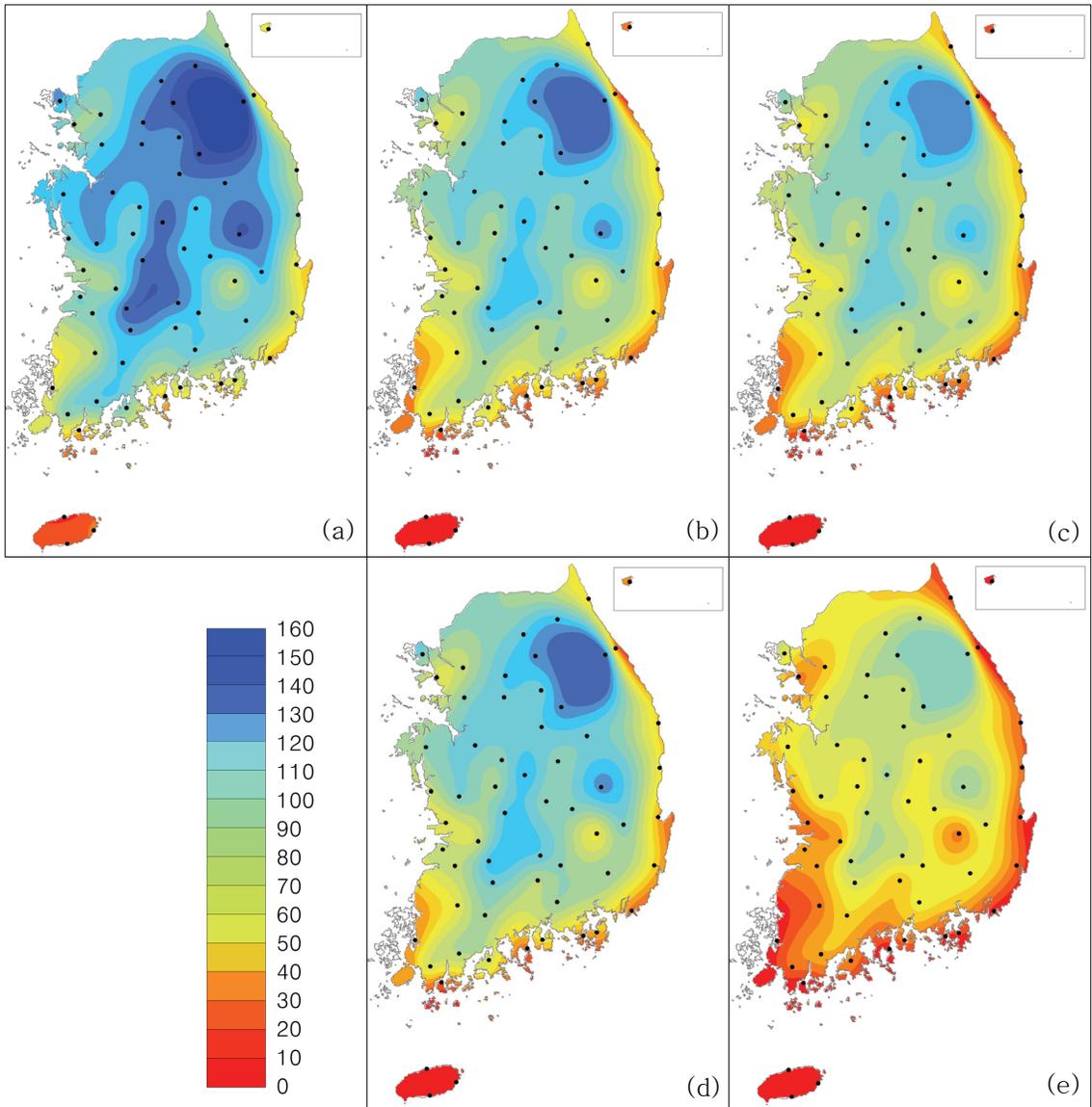


그림 6.35 관측 자료로 구한 현재 (1980~2009년) 연평균 영하일수 (a)와 RCP 시나리오에 의한 21세기 전반 (2020~2049년; b: RCP4.5, d: RCP8.5) 및 21세기 후반 (2070~2099년; c: RCP4.5, e: RCP8.5) 연평균 영하일수

난방도일은 1년 중 일 평균기온이 18℃ 이하인 날을 골라 기준이 되는 18℃ 기온에서 그날의 일 평균기온을 뺀 값을 적산시킨 값이다. 이것은 일반적으로 일 평균기온이 1

8°C 이하가 되면 사람들이 난방을 시작한다는 개념에서 설정된다. 난방도일 값이 더 크다는 것은 난방의 필요가 크다는 것으로 기온이 상대적으로 낮음을 의미한다. 현재 연평균 난방도일은 2,609.9도일이다. 그러나 기온의 상승으로 21세기 전반에는 RCP4.5 시나리오에 의하면 연평균 난방도일이 2,177.8도일, RCP8.5 시나리오에 의하면 2,140.8도일로 각각 432.1도일, 469.1도일 감소할 것으로 전망된다. 또한 21세기 후반에는 RCP4.5 시나리오에 의하면 연평균 난방도일이 1,971.2도일, RCP8.5 시나리오에 의하면 1,517.6도일로 각각 현재보다 638.7도일, 1,092.3도일 감소할 것으로 전망된다.

현재 연평균 난방도일의 지역 분포를 보면 대관령에서 4,258.7도일로 가장 크며 서귀포에서 1,398.2도일로 가장 낮은 분포를 보인다 (그림 6.36 a). 대체로 충주, 강화, 의성, 임실, 원주, 양평, 보은, 춘천, 인제, 홍천, 제천, 대관령 등 중부 내륙 및 산지 지역에서 3,000도일 이상의 높은 난방도일 분포를 보인다. 반면에 RCP4.5 시나리오에 의하면 21세기 후반에 난방도일이 가장 낮은 지역인 대관령의 난방도일이 3,606.5도일로 전망되며, 대관령을 제외한 전 지점에서 3,000도일 미만의 난방도일 분포를 보인다 (그림 6.36 b, c). RCP8.5 시나리오에 의하면 21세기 후반에는 대관령, 홍천, 제천, 인제를 제외한 전 지점에서 난방도일이 2,000도일 미만일 것으로 전망된다 (그림 6.36 d, e).

냉방도일은 24°C 이상인 날의 기온과 24°C와의 차를 합한 값으로 일반적으로 일 평균 기온이 24°C 이상이 되면 냉방을 시작한다는 개념에서 설정된다. 냉방도일 값이 더 크다는 것은 냉방의 필요가 크다는 것으로 기온이 상대적으로 높다는 것을 의미한다. 현재 연평균 냉방도일은 95.6도일이다. RCP4.5 시나리오에 의하면 21세기 전반과 후반에는 연평균 냉방도일이 각각 171.7도일, 291.6도일로 현재보다 76.1도일, 196.0도일 증가할 것으로 전망된다. 또한 RCP8.5 시나리오에 의하면 21세기 전반과 후반에 연평균 냉방도일이 각각 223.8도일, 531.7도일로 128.2도일, 436.1도일 증가할 것으로 전망된다.

현재 연평균 냉방도일의 지역 분포를 보면 서귀포에서 176.7도일로 가장 크고 대관령에서 0.7도일로 가장 낮으며, 서귀포와 제주, 대구에서만 냉방도일이 150도일 이상이다 (그림 6.37 a). 반면에 RCP4.5 시나리오에 의하면 21세기 후반에 대관령의 냉방도일이 30.9도일로 전망되며, 대관령을 제외한 전 지점에서 150도일 이상의 분포를 보인다 (그

림 6.37 b, c). RCP8.5 시나리오에 의하면 21세기 후반에는 서귀포에서 냉방도일이 708.5도일로 전망되며, 대관령을 제외한 전 지점에서 300도일 이상의 높은 분포를 보인다 (그림 6.37 d, e).

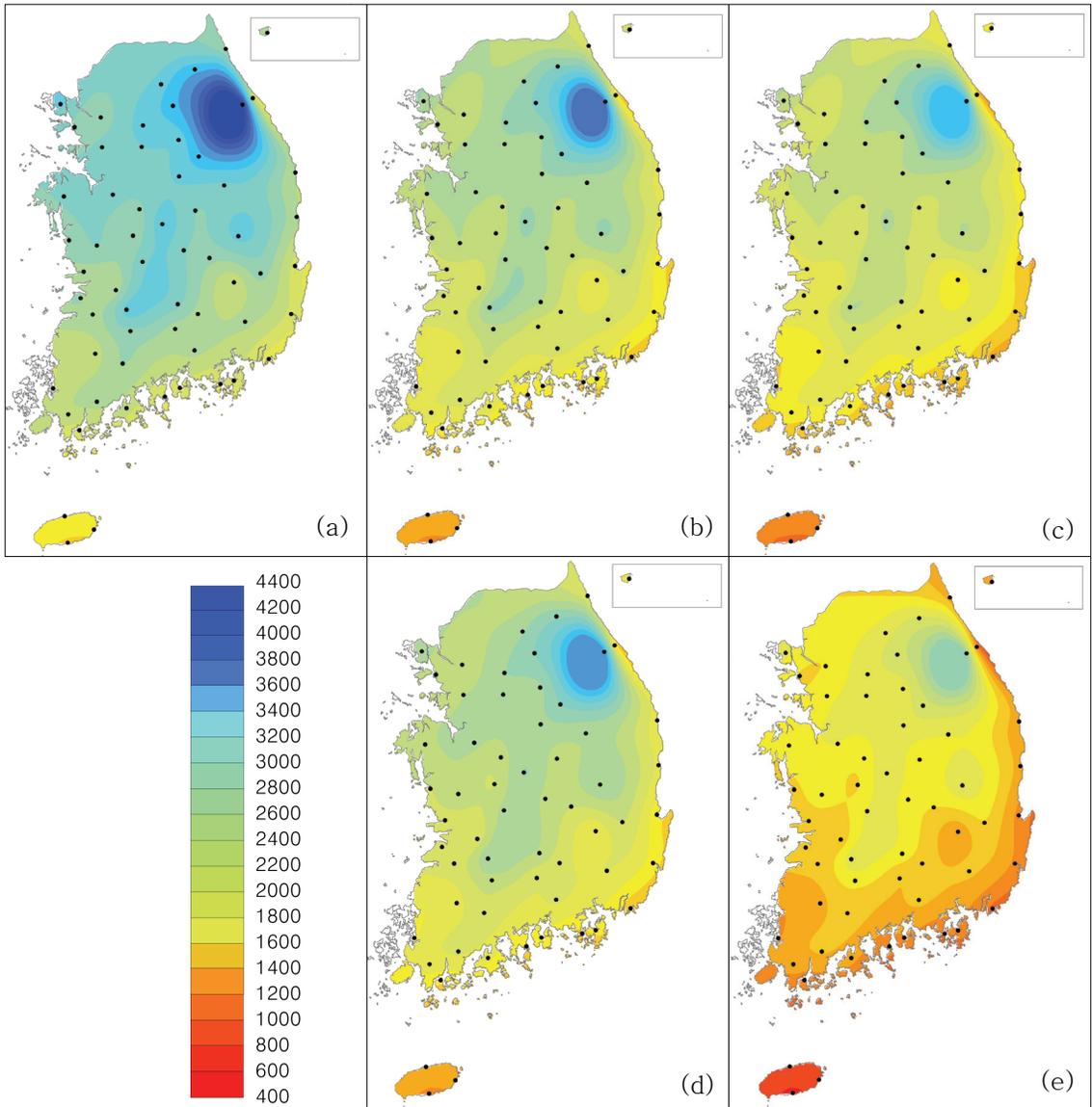


그림 6.36 관측 자료로 구한 현재 (1980~2009년) 연평균 난방도일 (a)과 RCP 시나리오에 의한 21세기 전반 (2020~2049년; b: RCP4.5, d: RCP8.5) 및 21세기 후반 (2070~2099년; c: RCP4.5, e: RCP8.5) 연평균 난방도일

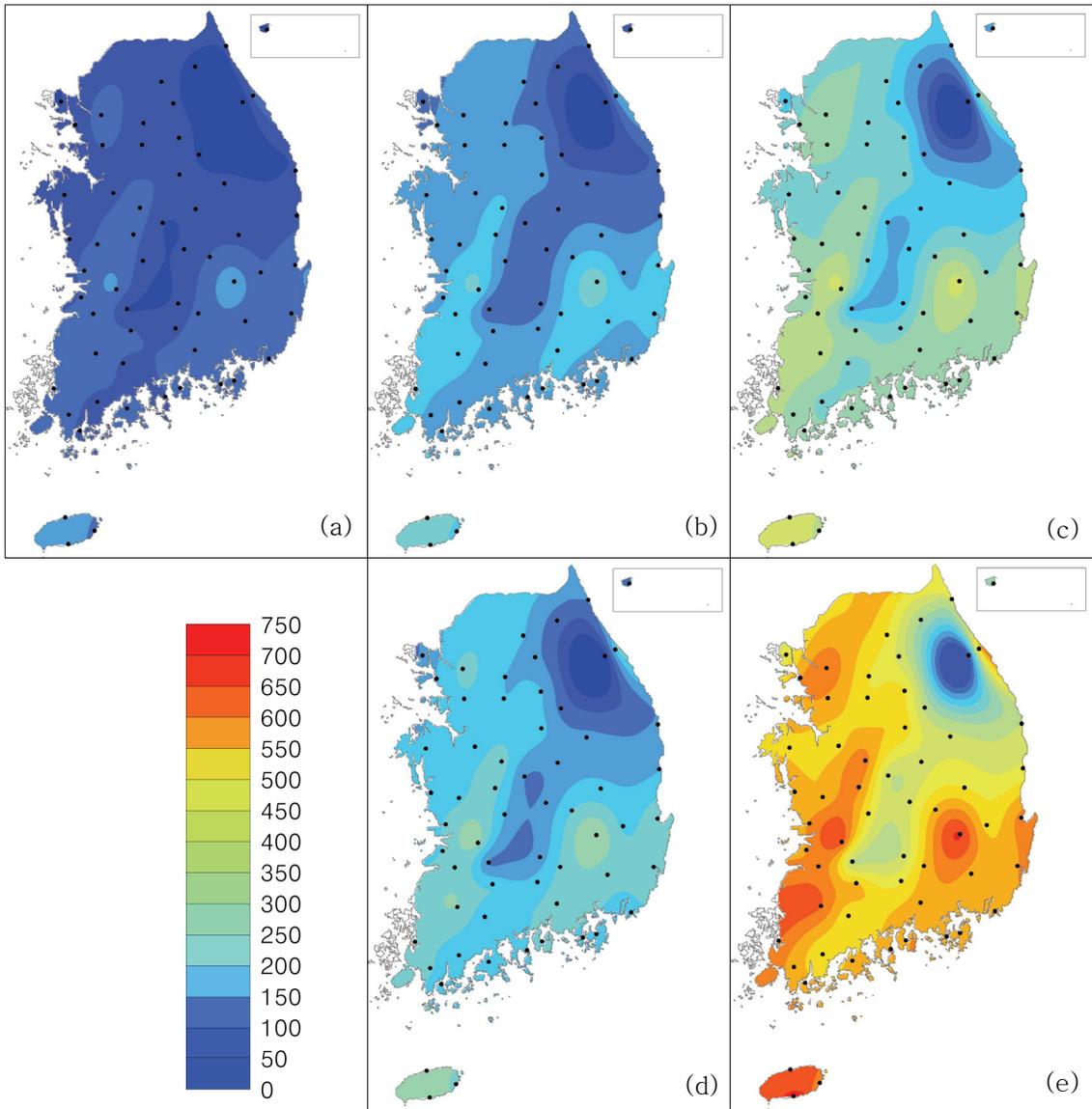


그림 6.37 관측 자료로 구한 현재 (1980~2009년) 연평균 냉방도일 (a)과 RCP 시나리오에 의한 21세기 전반 (2020~2049년; b: RCP4.5, d: RCP8.5) 및 21세기 후반(2070~2099년; c: RCP4.5, e: RCP8.5) 연평균 냉방도일

극한 강수 및 기온의 미래 변화를 분석하기 위해서 현재기후 (1980~2009년), 21세기 전반 (2020~2049년) 및 21세기 후반 (2070~2099년) 기간 각각의 극한 분포를 추정하고, 이에 따른 확률밀도함수의 변화를 살펴보았다. 일최대 강수의 확률밀도함수를 비교해보면, RCP4.5에 따른 21세기 전반 미래기후전망에서는 평균을 의미하는 GEV 분포의 위치 (location) 매개변수가 78.5 mm에서 84.4 mm로, 변동을 의미하는 규모 (scale) 매개변수가 24.4 mm²에서 34.9 mm²로 현재에 비하여 증가할 것으로 전망된다. 2070년에서 2099년까지의 21세기 후반 미래기후전망에서는 위치 매개변수가 현재에 비해 16.7 mm 증가되어 95.2 mm로, 규모 매개변수는 19.2 mm² 증가되어 43.6 mm²로 전망된다. 21세기 말일수록 가까운 미래보다 위치 및 규모 매개변수가 더 증가하는데, 이는 극한값의 평균적 크기와 변동성이 미래가 될수록 더욱 증가된다는 것을 의미한다. 또한 미래로 갈수록 GEV 분포의 꼬리가 지금보다 두터워져 큰 강수의 발생확률이 증가하리라 전망된다. RCP8.5에 따른 미래전망 또한 현재 비하여 위치, 규모 매개변수가 커지고 큰 강수의 발생확률이 증가하리라 전망되며, 현재에 대비한 증가량은 RCP4.5에 따른 전망보다 더 크다.

일최고 기온의 경우에는, RCP4.5에 따른 21세기 전반 미래기후전망에서는 위치 매개변수가 현재 31.1°C에서 32.3°C로, 변동을 의미하는 규모 매개변수가 현재 1.23°C²에서 1.42°C²로 증가할 것으로 전망된다. 21세기 후반에는 위치 매개변수가 현재에 비해 3.0°C 증가되어 34.1°C로, 규모 매개변수는 0.15°C² 증가되어 1.38°C²로 전망된다. 현재에 비하여 21세기 전반 및 후반 모두, GEV 분포의 꼬리가 두터워져 높은 일최고 기온의 발생확률이 증가할 것으로 전망된다. RCP8.5에 따른 미래전망 또한 현재 비하여 위치 및 규모 매개변수가 커지고, 일최고 기온의 발생확률이 증가하리라 전망된다.

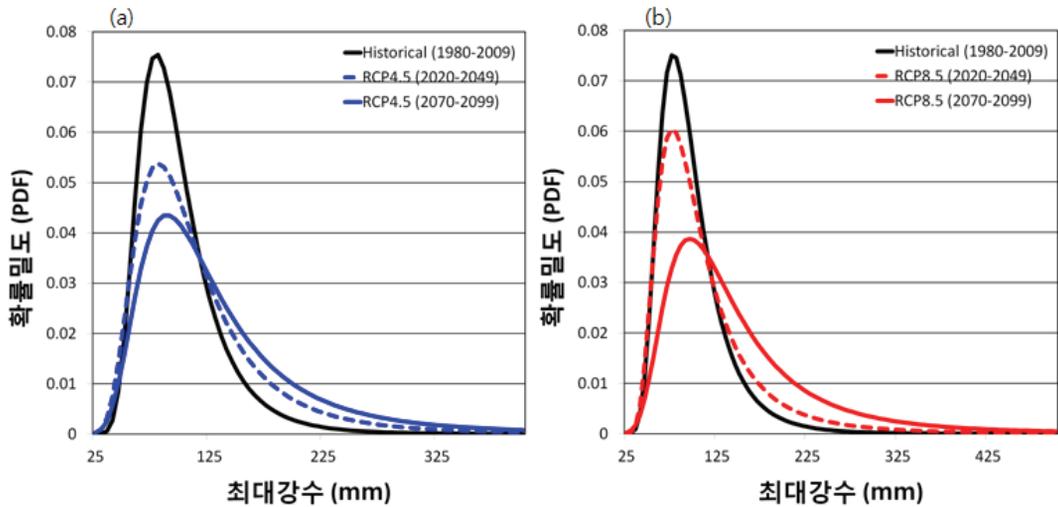


그림 6.38 현재기후 (1980~2009) 모의에서 추정된 일최대 강수의 GEV 분포 확률밀도함수 (검정색 실선)와 RCP4.5 (a)/8.5 (b)에 따른 미래기후 (2020~2049, 2070~2099) 전망에서 추정된 확률밀도함수 (파선 및 실선).

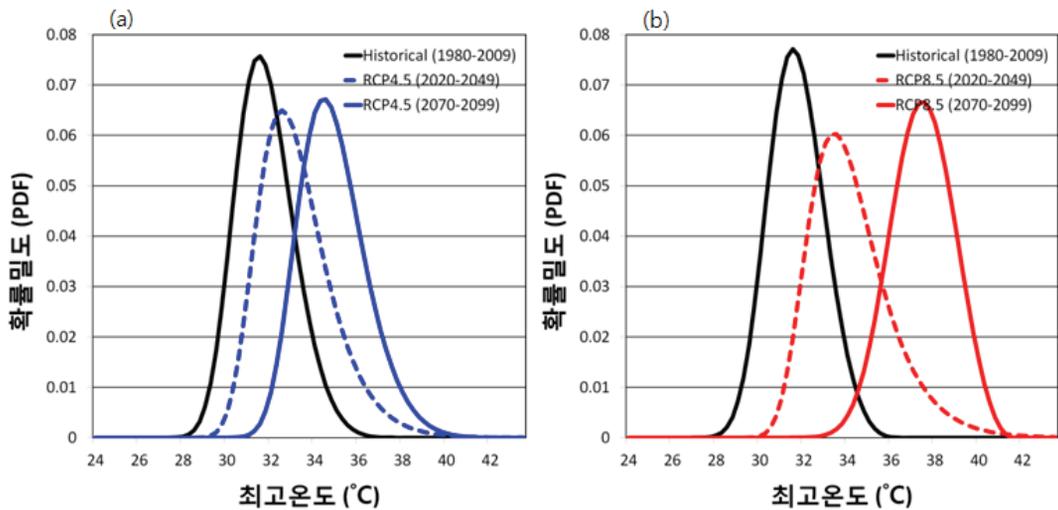


그림 6.39 현재기후 (1980~2009) 모의에서 추정된 일최고 기온의 GEV 분포 확률밀도함수 (검정색 실선)와 RCP4.5 (a)/8.5 (b)에 따른 미래기후 (2020~2049, 2070~2099) 전망에서 추정된 확률밀도함수 (파선 및 실선).

6.4 기후구의 변화

최근 우리나라는 기온 상승으로 작물, 과수, 어류, 산림 등의 이동이 나타나면서 기후가 아열대화 될 가능성이 제기되고 있다. 이에 따라 현재 육상 및 해양 생태계 분포 특성과 비교적 유사한 분포를 보이는 트레와다¹²⁾의 기준을 이용하여 아열대 기후지역의 변화를 전망하였다 (권영아 등, 2007).

현재의 아열대 기후지역을 파악하기 위하여 평년값 (1971~2000년)에 트레와다의 기준을 적용하면 제주도와 부산, 거제, 통영, 목포, 완도, 여수 관측지점을 중심으로 한 남해안 지역이 아열대 기후지역에 포함된다 (그림 6.40). 이 중 서귀포는 10°C 이상인 달이 3~11월로 9개월이며, 그 외 지역은 4~11월의 8개월이다.

RCP4.5 시나리오에 의해 산출된 기온 값으로 미래 (2070~2099년) 아열대 기후지역을 전망한 결과 제주도와 남해안 일부 지역에 해당되었던 아열대 기후지역이 서해안으로는 보령까지 확대되며, 대도시 해안 지역인 인천도 아열대 기후구에 포함된다. 내륙으로는 아열대 기후지역이 전주, 광주, 순천, 산청, 합천, 대구까지 확대되며, 동해안으로는 속초까지 확대된다. 이 중 10°C 이상인 달이 9개월 이상인 지역이 크게 증가하여 포항, 대구, 울산, 부산, 통영, 여수, 완도, 제주, 성산, 서귀포, 거제, 남해 등 제주도 및 남해안 지역 대부분이 포함된다.

RCP8.5 시나리오에 의하면 관측지점 중 해발고도가 가장 높은 대관령을 중심으로 한 인제, 홍천, 원주, 제천 등을 제외한 전 지역이 아열대 기후지역에 포함될 것으로 전망된다. 아열대 기후구에 포함되는 지역 중 임실, 양평, 서산, 춘천을 제외한 전 지역에서 10°C 이상인 달이 9개월 이상이며, 특히 제주도 지역은 1~12월의 모든 월 평균기온이 10°C 이상으로 전망된다.

12) 트레와다는 최한월 평균기온이 18°C 이하이면서 월평균기온이 10°C 이상인 달이 8~12개월인 것으로 아열대를 정의하였다 (Trewartha and Horn, 1980).

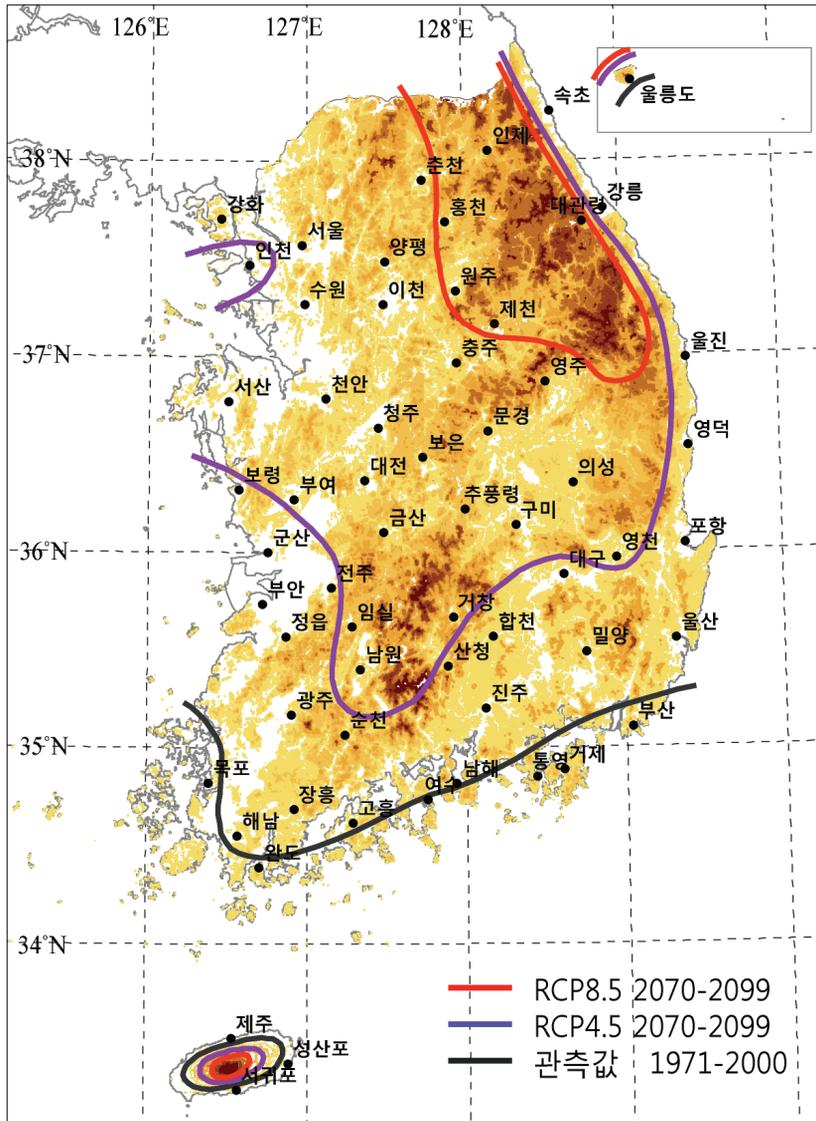


그림 6.40 아열대 지역 변화 전망. 실선은 각각 관측 자료에서 구한 현재 (1971~2000)의 아열대지역 경계 (검정색)와 RCP 시나리오에서 전망한 2070~2099년의 아열대 지역 경계(RCP4.5: 보라색, RCP8.5: 붉은색)를 의미한다.

맺는 글

이 보고서에서는 대표농도경로 (RCP) 4가지 시나리오 중 핵심 실험인 RCP8.5/4.5에 대한 기후변화를 분석하였다. 이 분석은 2013년에 발간될 IPCC 5차 보고서에 따른 새로운 기후변화 시나리오에 선제적 대응을 위한 것이다. 2012년에는 RCP 2.6/6.0를 포함한 RCP 4종 모두에 대한 기후변화 시나리오가 분석될 예정이다. 그리고 산업혁명 이전 기후상태를 현재 산출된 200년 뿐만이 아니라 500년, 700년과 1000년 적분 결과를 이용한 기후변화 전망을 수행할 계획이다. 이러한 국립기상연구소의 자료뿐만이 아니라 국제 기후변화모델 비교실험 (CMIP5)에 참여하는 모든 기관의 기후변화 시나리오도 수집될 것이다. 이들 자료를 이용하여 기후변화 전망에 대한 불확실성을 정량화할 수 있으므로 기후변화 대응에 보다 신뢰성 있는 대책을 세울 수 있을 것이다.

현재 기후전망은 지구시스템의 주요 과정인 탄소순환, 생태역학과 화학과정은 미리 처방된 값으로 산출되었다. 앞으로 기후변화모델에 지구시스템의 과정들을 결합하여 이들의 상호작용을 포함한 기후 전망을 산출할 계획이다. 여기서는 미리 처방된 온실가스 농도가 아니라 배출량이 강제력으로 직접 입력되어 이에 의한 화학과정, 생태역학과 해양 생물 과정이 포함된 탄소순환을 통해 모델 자체에서 온실가스 농도를 결정한다. 또한, 동아시아의 기후 특성을 고려한 물리모수화과정의 개선도 포함될 것이다. 이를 통해 보다 정교한 기후변화 시나리오뿐만이 아니라 오존층, 해양산성화, 탄소순환, 그리고 수문과 식생 변화 등 지구환경 위험 요인 대응을 위한 전망 자료를 생산할 예정이다.

참고문헌

- 권영아, 권원태, 부경은, 최영은, 2007: A1B 시나리오 자료를 이용한 우리나라 아열대 기후구
전망. *대한지리학회지*, **42(3)**, 82-95.
- 백희정, 조천호, 권원태, 김성균, 조주영, 김영신, 2011: 온실가스 시나리오 RCP에 대한 새로운 기
후변화 시나리오 개발 전략. *한국기후변화학회지*, **2**, 55-68.
- Alexander, L. V., Zhang, X., Peterson, T. C., Caesar, J., Gleason, 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.
- Antonov, J. I., S. Levitus, and T. P. Boyer, 2005: Steric variability of the world ocean,
1955-2003. *Geophys. Res. Lett.*, **32(12)**, L12602, doi:10.1029/2005GL023112.
- Bister, M. and K. A. Emanuel, 1998: Dissipative Heating and Hurricane Intensity.
Meteorol. Atmos. Phys. **65**, 233-240.
- Emanuel, K. A., and D. S. Nolan, 2004: Tropical cyclone activity and global climate. *26th
Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology*, Miami, FL, Amer. Meteor.
Soc., 240-241.
- Feng L., T. J. Zhou, B. Wu, T. Li, and J.-J. Luo, 2011: Projection of future precipitation
change over China with a high-resolution global atmospheric model. *Adv.
Atmos. Sci.*, **28(2)**, 464-476. doi:10.1007/s00376-010-0016-1.
- Hurtt, G. C., *et al.*, 2010: Harmonization of Land-Use Scenarios for the Period 1500-
2100:600 Years of Global Gridded Annual Land-Use Transitions, Wood
Harvest, and Resulting Secondary Lands, *Climatic Change*, submitted.
- 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, 996 pp.
- Ishii, M., M. Kimoto, K. Sakamoto, and S.I. Iwasaki, 2006: Steric sea level changes

- estimated from historical ocean subsurface temperature and salinity analyses. *J. Oceanogr.*, **62**(2), 155–170.
- Jones, C. D. *et al.*, 2011: The HadGEM2–ES implementation of CMIP5 centennial simulations, *Geosci. Model Dev. Discuss.*, **4**, 689–763.
- Klein Goldewijk, K., Beusen, A., and Janssen, P., 2010: Long term dynamic modeling of global population and built-up area in a spatially explicit way: HYDE 3.1., *Holocene*, **20**, 565–573.
- Loveland, T. R., Reed, B. C., Brown, J. F., Ohlen, D. O., Zhu, Z., Yang, L., and Merchant, J. W., 2000: Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover 5 from 1 km AVHRR data, *Int. J. Remote Sens.*, **21**, 1303–1330.
- Lu, R., Y. Li, and B. Dong, 2007: East Asian precipitation increase under the global warming. *J. Korean Meteor. Soc.*, **43**, 267–272.
- Min, S. K., S. Legutke, A. Hense, U. Cubasch, W. T. Kwon, J. H. Oh, and U. Schlese, 2006: East Asian climate change in the 21st century as simulated by the coupled climate model ECHO–G under IPCC SRES scenarios. *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 1–26.
- Moon, J.–Y., M.–H. Kim, D.–H. Choi, K.–O. Boo, W.–T. Kwon, 2008: Change of East Asian summer monsoon by time slice experiment. *Atmosphere*, **18**, 55–70.
- Moss, R., M. Babiker, S. Brinkman, E. Calvo, T. Carter, J. Edmonds, I. Elgizouli, S. Emori, L. Erda, K. Hibbard, R. Jones, M. Kainuma, J. Kelleher, J. F. Lamarque, M. Manning, B. Matthews, J. Meehl, L. Meyer, J. Mitchell, N. Nakicenovic, B. O'Neill, R. Pichs, Keywan Riahi, Steven Rose, Paul Runci, Ron Stouffer, Detlef van Vuuren, John Weyant, Tom Wilbanks, J. P. van Ypersele, and M. Zurek, 2008: Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, 132 pp.
- Reichler T. and J. Kim, 2008: How well do coupled models simulate today's climate? *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **89**, 303–311.
- Sato, M., Hansen, J. E., McCormick, M. P., and Pollack, J. B., 1993: Stratospheric aerosol optical depths (1850–1990), *J. Geophys. Res.*, **98**, 22987–22994.

- Stott, P. A., Jones, G. S., Lowe, J. A., Thorne, P., Durman, C., Johns, T. C., and Thelen, J.-C., 2006: Transient climate simulations with the HadGEM1 climate model: causes of past warming and future climate change, *J. Climate*, **19**, 2763-2782.
- Stott, P. A., Tett, S. F. B., Jones, G. S., Allen, M. R., Mitchell, J. F. B., and Jenkins, G. J., 2000: External Control of 20th Century Temperature by Natural and Anthropogenic Forcing, *Science*, **290**(5499), 2133-2137.
- Taylor, K. E., R. J. Stouffer, and G. A. Meehl, 2009, A Summary of the CMIP5 Experiment Design, 30 pp.
- Tett, S. F. B., Jones, G. S., Stott, P. A., Hill, D. C., Mitchell, J. F. B., Allen, M. R., Ingram, W. J., Johns, T. C., Johnson, C. E., Jones, A., Roberts, D. L., Sexton, D. M. H., and Woodage, M. J., 2002: Estimation of natural and anthropogenic contributions to 20th Century temperature change, *J. Geophys. Res.*, **107**, D16, doi:10.1029/2000JD000028.
- Trewartha, G. T., and L. Horn, 1980: An introduction to climate, 5th(eds.), McGraw-Hill, New York.
- Wang, Y.-M., Lean, J. L., and Sheeley Jr., N. R., 2005: Modelling the Sun's magnetic field and irradiance since 1713, *Astrophys. J.*, **625**, 522-538.
- Yun, K.-S., S.-H. Shin, K.-J. Ha, A. Kitoh, and S. Kusunoki, 2008: East Asian precipitation change in the global warming climate simulated by a 20-km mesh AGCM. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, **44**, 233-247.

기여저자와 편집자

요약문

백희정 박수희 조천호
백희정

1. 개요

2. 강제력 및 실험 방법

심성보 이호신
조천호 백희정 이호신
이조한 심성보 박수현
부경온
이호신
이호신

2.1 자연 강제력

2.2 대표농도경로

2.3 에어러솔

2.4 지표피복

2.5 기후변화 예측모델

2.6 실험방법

3. 전지구 기후변화

간순영 현유경 이호신
간순영 이재호 이호신
이종화
김민지
현유경

3.1 현재 기후의 모의성능

3.2 전지구 미래 전망

3.3 전지구 극한 기온

3.4 전지구 극한 강수

3.5 태풍

4. 동아시아 기후변화

최다희 김민지
최다희
박이형

4.1 현재 기후의 모의성능

4.2 기온과 강수의 미래 변화

4.3 수문변화

5. 해양변화

이호신
이호신
이호신

5.1 해수면온도

5.2 해수면 고도

5.3 해빙면적

6. 우리나라 상세 기후변화

강현석 박수희
박수희 이인혜
이경미 성장현
이경미

6.1 우리나라 기후변화 시나리오 산출 방법

6.2 기온과 강수의 미래 변화

6.3 극한 기후의 변화

6.4 기후구의 변화

편집

조천호 이현정
이조한 이호신 박혜선
박수희

전지구 기후변화모델 구축

지역 기후변화모델 구축

부록: 약어

AR4	4th Assessment Report
CDD	Consecutive Dry Days
CMAp	Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation
CMIP5	Coupled Model Intercomparison Project Phase5
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ETCCDMI	Expert Team for Climate Change Detection Monitoring and Indices
GPI	Genesis Potential Index
HadGEM2-A	the Hadley Centre Global Environment Model version 2 - Atmosphere model
HadGEM2-AO	the Hadley Centre Global Environment Model version 2 - Coupled Atmosphere-Ocean model
HadGEM3-RA	the Hadley Centre Global Environment Model version 3 - Regional Atmosphere model
HYDE3	History Database of the Global Environment
IGBP	International Geosphere-Biosphere Programme
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ITCZ	Intertropical Convergence Zone
RCP	Representative Concentration Pathways
SDII	Simple Daily Intensity Index
SPC	South Pacific Convergence Zone
TAR	Third Assessment Report
TN10P	Percentile-based indices include occurrence of cold nights
TN90P	Percentile-based indices include occurrence of warm nights
TX10P	Percentile-based indices include occurrence of cold days
TX90P	Percentile-based indices include occurrence of warm days

인쇄일 | 2011년 10월 인쇄

발행일 | 2011년 11월 발행

발행처 | 국립기상연구소 기후연구과

발행인 | 권원태

국립기상연구소

서울시 동작구 여의대방로16길 61

070-7850-6500

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

발간등록번호

11-1360395-000233-01

