

21세기 한반도 기후변화 전망: WRF를 이용한 RCP 4.5와 8.5 시나리오 기온과 강수

안중배 · 최연우* · 조세라 · 홍자영

부산대학교 지구환경시스템학부

(접수일: 2014년 10월 1일, 게재확정일: 2014년 12월 9일)

Projection of 21st Century Climate over Korean Peninsula: Temperature and Precipitation Simulated by WRFV3.4 Based on RCP4.5 and 8.5 Scenarios

Joong-Bae Ahn, Yeon-Woo Choi*, Sera Jo, and Ja-Young Hong

Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan, Korea

(Manuscript received 1 October 2014; accepted 9 December 2014)

Abstract Historical, RCP4.5 and RCP8.5 scenarios from HadGEM2-AO are dynamically downscaled over the northeast East Asia with WRFV3.4. The horizontal resolution of the produced data is 12.5 km and the periods of integration are 1979~2010 for historical and 2019~2100 for both RCP4.5 and RCP8.5. We analyze the time series, climatology, EOF and extreme climate in terms of 2 m-temperature and precipitation during 30-year for the Historical (1981~2010) and RCP4.5 and RCP8.5 (2071~2100) scenarios. According to the result, the temperature of the northeast Asia centered at the Korean Peninsula increase 2.9 and 4.6°C in the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, respectively, by the end of the 21st century. The temperature increases with latitude and the increase is larger in winter rather than in summer. The annual mean precipitation is expected to increase by about 0.3 mm day⁻¹ in RCP4.5 scenario and 0.5 mm day⁻¹ in RCP8.5 scenario. The EOF analysis is also performed for both temperature and precipitation. For temperature, the EOF 1st modes of all scenarios in summer and winter show that temperature increase with latitude. The 2nd mode of EOF of each scenario shows the natural variability, exclusive of the global warming. The summer precipitation over the Korean Peninsula projected increases in EOF 1st modes of all scenarios. For extreme climate, the increment of the number of days with daily maximum temperature above 30°C per year (DAY_{TX30}) is 25.3 and 49.7 days in RCP4.5 and RCP8.5 respectively over the Korean Peninsula. The number of days with daily precipitation above 20 mm day⁻¹ per year (DAY_{PR20}) also increases 3.1 and 3.5 days in RCP4.5 and RCP8.5 respectively.

Key words: WRF, HadGEM2-AO, IPCC RCP scenario, future regional climate change

*Corresponding Author: Yeon-Woo Choi, Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 609-735, Korea.
Phone : +82-51-514-1932, Fax : +82-51-514-1932
E-mail : choiyw@pusan.ac.kr

1. 서 론

기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 5차 평가보고서(Fifth Assessment Report)를 통해 지난 133년간(1880~2012년) 지구 평균기온이 약 0.85°C 상승하였으며, 최근 30년(1983~2012년) 동안 지구의 평균기온은 1850년 이래 가장 더웠던 것으로 발표하였다(IPCC, 2013). Houghton et al. (1990)은 그 원인으로 이산화탄소와 같은 온실기체를 주목하였으며, 지구 온난화의 대표적인 주범인 온실가스가 기후시스템의 에너지 평형을 변화시키며 이로 인하여 온도 및 강수 등과 같은 여러 기상변수가 변화할 것이라 하였다. 현재 인위적인 온실가스 배출로 야기된 지구 온난화 추세는 자연적 기후 변동성의 범위를 벗어나고 있으며, 사회, 경제 분야 및 생태계에 이르기까지 심각한 영향을 미치고 있다(Meehl et al., 2003, 2004). 따라서 기후변화에 대한 국가 차원의 진단과 대책 마련이 시급한 실정이며 이를 위해서는 미래 기후변화에 대한 신뢰성 높은 고해상도의 예측 정보가 필요하다.

최근 이상기상에 대한 우려가 커짐에 따라 국제적인 협력을 통해 온실가스 감축을 위한 노력을 기울이고 있다. IPCC에서는 4차 평가보고서에 사용된 Special Report on Emission Scenario (SRES) 시나리오 대신, 토지이용변화에 따른 영향까지 포함된 새로운 온실가스 시나리오 Representative Concentration Pathways (RCP)를 도입하였다(Moss et al., 2008). 우리나라도 기후변화에 대응하기 위하여, 세계기후연구계획 World Climate Research Program (WCRP)에서 주관하는 국제사업인 the phase five of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5)를 수행하였다. 국립기상연구소는 CMIP5 사업의 하나로 전 지구 대기-해양 결합모형인 Hadley Centre Global Environmental Model version 2 - Atmosphere and Ocean (HadGEM2-AO)을 활용하여 RCP 시나리오 2.6, 4.5, 6.0, 8.5 별 전 지구 기후변화 자료를 산출하였다 (Baek et al., 2011).

고해상도의 지역 기후변화 전망은 국가 기후변화 적응대책 수립에 있어 필수불가결하다(Sung et al., 2012). 전구 모형의 결과는 전구 및 중규모의 대기 특성을 분석하는 데 적합하지만, 농업, 임업 및 다양한 분야에서 필요한 고해상도의 지역 기후정보를 산출하기에는 무리가 있다(Ministry of Science and Technology, 1991). 지역기후모형은 이러한 고해상도의 지역기후정보 산출에서 매우 유용한 도구로 이용되고 있다(e.g., Giorgi and Mearns, 1999; Boo et al., 2004; Im et al., 2008; Ahn et al., 2010a, b). 하지만 지역기후모형으로 산출한 미래 기후변화 정보는 상당

한 불확실성을 내재하고 있기 때문에 분석과정에서 이는 필히 고려되어야 한다. 지역기후모형의 경계장으로 사용되는 전구모형들은 각각 다른 역학체계와 격자정보 및 물리과정으로 인하여 상당한 불확실성이 내재되어 있으며, 기후강제력으로 사용되는 복사강제력 또한 불확실성을 내포하고 있다(Kim et al., 2008). Lee et al. (2006)은 집중호우의 사례분석을 통해 Weather Research and Forecasting (WRF) (Skamarock et al., 2008) 모형에 의한 최대 강수량 및 최대 강수 지역의 예측 가능성을 살펴보았으며, 한반도의 복잡한 산악 지형이 집중호우에 미치는 영향을 연구하였다. Cha et al. (2007)은 ECHO-G/S (ECHAM4/HOPE-G) (Legutke and Voss, 1999) 모형을 활용하여 20세기 기후모의실험의 기온과 강수의 모사능력을 평가하였고 미래 시나리오인 SRES를 통해 동아시아 미래 기후 변화를 전망하였다. Ahn et al. (2013)은 한반도 중심의 동북아시아 지역에서 CMIP5 Historical(현재기후) 시나리오를 강제력으로 설정하여 WRF 모형의 현재 기후 모의능력을 분석하였고, Oh et al. (2011, 2014)과 Lee et al. (2013)은 HadGEM2-AO 자료를 경계조건으로 처방한 Regional Climate Model version 4 (RegCM4) (Giorgi et al., 2012)와 Global/Regional Integrated Model system—Regional Model Program (GRIMs-RMP) (Hong et al., 2013) 모형을 이용하여 COordinated Regional climate Downscaling Experiment (CORDEX) 동아시아 영역에서의 현재기후 모의 수준을 평가하고 RCP4.5와 8.5 시나리오에 대한 미래 기후 변화를 분석하였다. 이들의 연구결과는 미래 시나리오별 기온과 강수의 변화에서 본 연구와 유사한 결과를 보이고 있지만 수평해상도가 50 km로 제한되어 있어 농업, 임업 및 기타분야에서 활용도가 낮은 것으로 판단되며, 기후변화에 따른 기온강수의 주요모드의 변화 및 극한 기후의 공간적인 변화에 대한 분석은 부족하다. 따라서 본 연구에서는 EOF 분석을 통해 RCP 시나리오에 따른 기온과 강수 주요모드의 미래 변화를 제시하였으며, 극한 기후의 공간적인 변화도 분석하였다.

본 연구에서는 RCP4.5 시나리오와 RCP8.5 시나리오를 활용하여 미래 한반도 상세기후변화정보를 산출하였다. 이를 위해, 국립기상연구소에서 제공하는 HadGEM2-AO자료를 WRFV3.4의 초기 및 경계조건으로 처방하였으며 모의기간은 현재 32년(1979~2010년)과 미래 82년(2019~2100년)으로 하였다. WRF 모형의 계통적 오차(systematic bias)나 전구모형 결과와의 비교는 Choi et al. (2011)과 Ahn et al. (2013)에 소개되어 있으므로 본 연구에서는 다루지 않는다. 2장에서는 본 연구에 사용된 모형 및 실험설계에 관해 기술하였고, 3장에서는 기후변화 시나리오에 따른 한

Table 1. Model configuration used in this study.

	Description
Horizontal dimensions	201 × 180
Horizontal resolution	12.5 × 12.5 km
Vertical layer (top)	28 eta levels (50 hpa)
Microphysics	WSM3 [Hong et al., 2004]
Shortwave/Longwave radiation	CAM [Collins et al., 2002]
Surface layer	Monin-Obukhov similarity [Jimenez et al., 2012]
Land surface	Noah [Chen and Dudhia, 2001]
Planetary boundary layer	Yonsei University [Hong et al., 2006]
Cumulus	Kain-Fritsch [Kain, 2004]
Lateral boundary condition	HadGEM2-AO

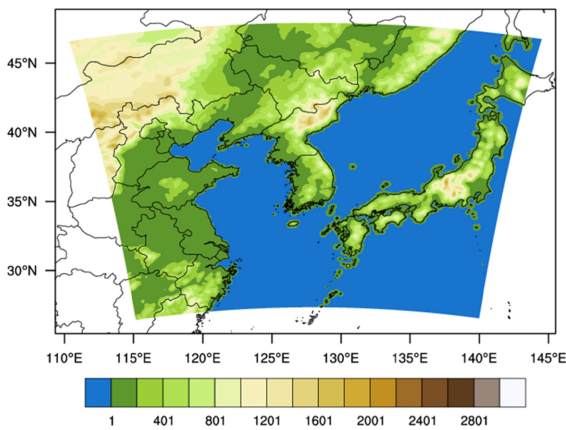


Fig. 1. Model domain and topography (in meters) for WRFV3.4 simulation.

반도 기온과 강수의 미래변화 전망을 분석하였다. 마지막으로 4장에서는 요약 및 결론을 제시하였다.

2. 자료 및 실험방법

본 연구에서는 지역기후모형인 WRF Version 3.4를 이용하여 RCP 시나리오별(4.5, 8.5) 한반도 상세기후 변화 전망을 제시하였다. 본 연구에 사용된 WRF 모형의 실험설계와 현재기후 적분결과는 Ahn et al. (2013)의 연구와 일치한다. 따라서 본 연구에서는 WRF 모형의 계통적 오차(systematic bias)나 경계장으로 사용된 HadGEM2-AO 결과와의 비교는 다루지 않는다. 본 실험에서 구름물리 과정은 WRF Single-Moment 3-class (WSM3) scheme (Hong et al., 2004), 복사 모수화는 Community Atmospheric Model (CAM) scheme (Collins et al., 2002), Land surface는 Noah Land Surface Model (Chen and Dudhia, 2001), 행성 경계층 모수화 방법은 Yonsei University (YSU) PBL scheme

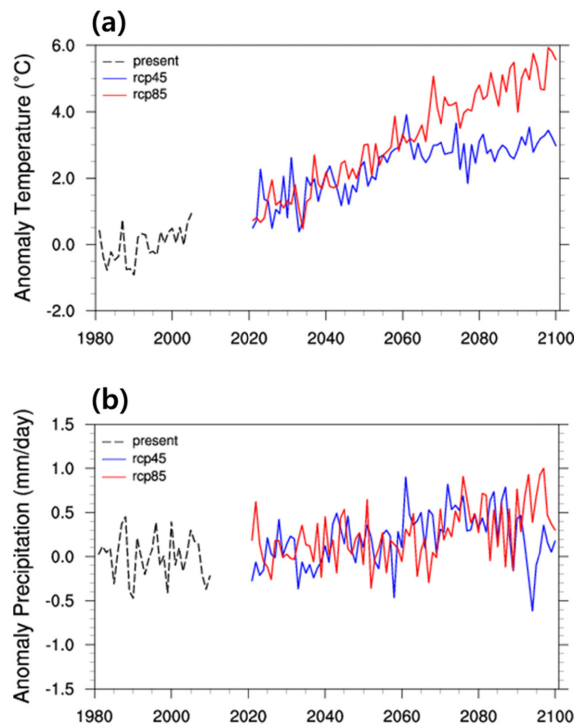


Fig. 2. Time series of annual mean (a) temperature and (b) precipitation changes over the east Asia (29°N~46°N, 117°W~138°W) relative to 1981~2010 base periods for the historical period (1981~2010) and future period (2021~2100) according to the 2 RCPs (4.5, 8.5).

(Hong et al., 2006), 적은 모수화는 Kain-Fritsch scheme (Kain, 2004)를 각각 사용한다. 본 연구에 사용된 실험설계의 구체적인 내용은 Table 1에 정리하였다. 본 연구에서는 Historical과 미래 RCP 2중(4.5, 8.5) 시나리오에 대하여 분석을 수행하였다. 분석 기간은 현재 (1981~2010년)와 미래 시나리오(2071~2100년)에 대해서 각각 30년이며, 초기 2년(1979~1980년)의 결과는

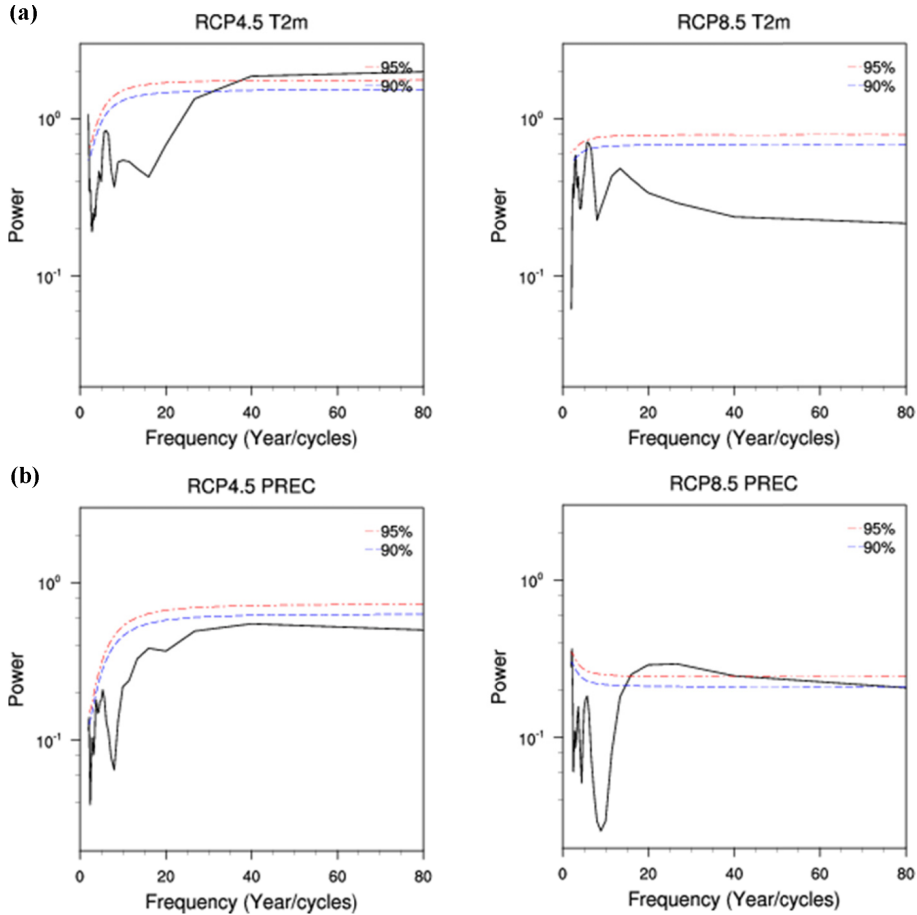


Fig. 3. The spectral analysis of time series for annual mean (a) temperature and (b) precipitation according to the RCPs (4.5, 8.5). The blue and red dashed line denote the 90% and 95% confidence level respectively.

spin-up 기간으로 분석에 사용되지 않았다.

3. 결 과

3.1 기온과 강수량의 시계열 분석

WRFV3.4로 산출한 RCP 시나리오(4.5, 8.5)별 연평균 기온과 강수의 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 검은색 파선은 현재기후(Historical), 파란색 실선은 RCP4.5, 빨간색 실선은 RCP8.5 시나리오를 의미한다. 온도의 단위는 $^{\circ}\text{C}$ 이며, 강수의 단위는 mm day^{-1} 이다. 연평균 기온 변화의 경우, 두 시나리오(4.5, 8.5) 모두 증가하는 추세를 보이며, 경년 주기의 변동성을 보인다. 21세기 후반(2071~2100년)의 연평균 기온은 RCP4.5 시나리오에서 현재 대비 약 2.9°C 상승할 것으로 모의되며, RCP8.5 시나리오 실험에서는 약 4.6°C 증가할 것으로 전망된다. 반면 강수의 미래변화는 두

시나리오에서 모두 상승률이 크지 않을 것으로 전망된다. 강수는 21세기 중반까지 시나리오별로 유사한 증가추세를 보이다 21세기 후반부터 시나리오별로 차이가 나타난다. 또한, 강수의 연별 변동 폭은 전반적으로 현재에 비해 크며 inter-decadal oscillation의 경향이 뚜렷하다. RCP4.5 시나리오 실험에서 21세기 후반의 강수량의 변화는 현재 대비 약 0.3 mm day^{-1} 상승할 것으로 모의되며, RCP8.5 시나리오에서는 약 0.5 mm day^{-1} 증가할 것으로 전망된다.

Figure 3에서는 파워 스펙트럼(power spectrum) 분석을 이용하여 RCP 시나리오별 기온과 강수 미래변화의 주기성을 분석하였다. 그림에서 파란색과 붉은색 파선은 각각 신뢰수준 90%와 95%를 나타낸다. 스펙트럼 분석에 의하면, RCP4.5 시나리오 기온은 2~3년 주기의 경년 변동성이 통계적으로 유의하게 나타나며, 40년 주기 이상의 inter-decadal oscillation도 나

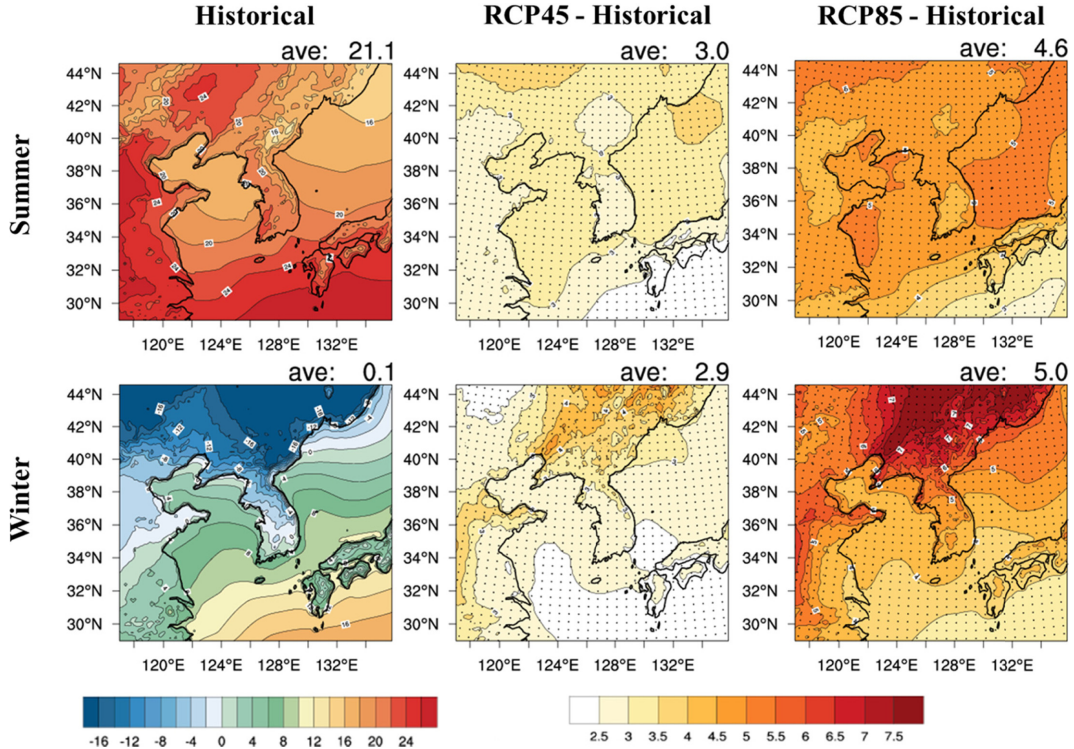


Fig. 4. Climatological summer (upper) and winter (bottom) mean temperature [$^{\circ}\text{C}$] at 2 m for historical period (1981~2010), the differences between future period (2071~2100) and the historical period with respect to the RCPs (4.5, 8.5). The black dots in figures are marked when there are positive and negative values at or above the 95% confidence level.

타난다. 또한, RCP8.5 시나리오 기온에서는 2~3년과 5년 주기의 경년 변동성이 우세하게 나타난다. 연평균 강수량의 경우, 두 시나리오 모두 기온의 변동성과 유사하게 2~3년 주기의 변동이 나타나며, RCP8.5 시나리오에서는 20~40년 주기의 inter-decadal oscillation도 나타난다.

시계열 분석결과를 종합해보면, 기후변화 시나리오(RCP4.5, RCP8.5)에 기초한 미래 연평균 기온과 강수는 전반적으로 상승할 것으로 전망되며, 특히 고농도 시나리오인 RCP8.5에서 기온과 강수의 상승폭이 가장 클 것으로 전망된다.

3.2 기온과 강수량의 공간적 변화

Figures 4와 5에서는 WRFV3.4로 산출한 상세기후 변화 전망을 공간적으로 나타냈다. Fig. 4는 RCP 시나리오(4.5, 8.5)에 근거한 계절평균(여름, 겨울) 기온의 현재(1981~2010년)와 미래변화(2071~2100년)를 나타낸 그림이다. 기후변화에 대한 통계적 유의성 검증을 위해 Student's t-test (Bretherton et al., 1999)를 사용하였고 신뢰구간 95%에 포함되는 영역은 검은색 점으로 표시하였다. 각 그림에서 오른쪽 위의 숫자는

분석영역의 평균값을 의미한다.

WRFV3.4가 모의한 현재 기후의 여름철 평균 기온은 21.1°C 이며, 남한에서는 전반적으로 20°C 이상의 기온 분포가 나타난다(Fig. 4). 또한, 내륙 산간 지역에서는 18°C 이하의 낮은 기온 분포를 보이지만 중국 화동, 화북 지방 및 일본 남해상에는 24°C 이상의 높은 기온 분포를 보인다. 겨울철 평균 기온의 경우, 해양을 포함한 전 지역 평균 기온 값은 0.1°C 이며, 여름철 기온 패턴과는 달리 위도에 따른 기온의 분포가 뚜렷하게 나타난다. 또한, 내륙 산간지역에서는 여름과 동일하게 기온 값이 -4°C 이하의 낮은 분포를 보이며, 북위 34도 이하의 지역과 해양지역에서는 영상의 기온이 나타난다. 분석 결과를 요약해 보면, 각 시나리오별 여름철 및 겨울철 평균 기온의 미래변화는 전 지역에서 증가할 것으로 전망되며, 고농도 시나리오로 갈수록 기온 상승률이 높을 것으로 전망된다. 특히 여름철의 경우, 육지보다 해양의 기온 상승이 높을 것으로 전망되며, 겨울철에는 고위도로 갈수록 기온 증가가 크게 나타난다. 21세기 후반의 여름철 평균기온은 RCP4.5에서 3.0°C , RCP8.5에서는 4.6°C 증가할 것으로 전망된다. 또한, 겨울철 평균기온의 미래

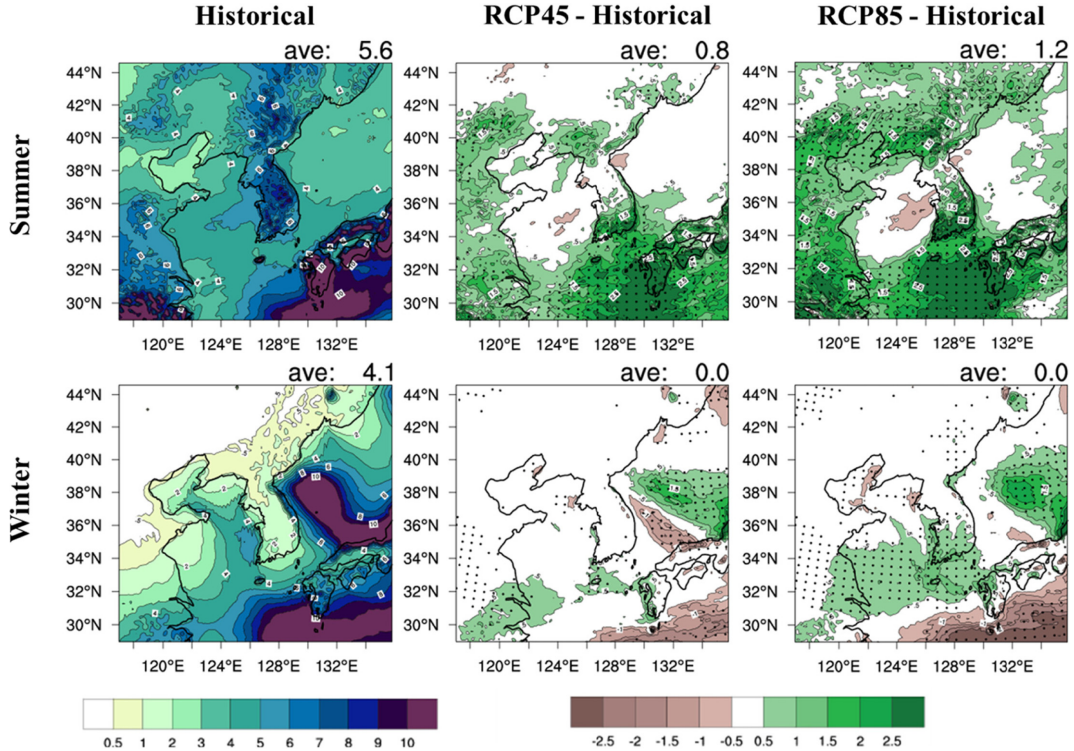


Fig. 5. Same as Fig. 4 except for precipitation [mm day^{-1}].

변화는 RCP4.5 시나리오에서 현재 대비 2.9°C 상승할 것으로 모의되며, RCP8.5 시나리오에서는 5.0°C 증가할 것으로 전망된다.

WRFV3.4가 모의한 현재 기후의 여름철 평균 강수량은 5.6 mm day^{-1} 이다(Fig. 5). 선행연구에서는 동아시아 지역의 강수가 여름 몬순의 영향(Ho et al., 1988)으로 인해 여름철에 집중된다고 밝혔다. 본 연구에서도 기존의 연구 결과와 마찬가지로 한반도 전역, 중국의 화동, 동북지역 그리고 일본을 포함한 주변 해상에서 많은 강수량이 나타난다. 특히 중국의 화동지역과 일본에서는 강수량이 10 mm day^{-1} 이상으로 가장 많이 나타난다. 겨울철 강수의 경우, 현재 기후의 평균 강수량은 4.1 mm day^{-1} 이며, 전반적으로 위도에 따라 강수량이 감소하는 패턴을 보인다. 특히 동해상과 일본의 남해상에서 10 mm day^{-1} 이상의 많은 강수량이 나타난다. RCP 시나리오(4.5, 8.5)에 따른 여름철 및 겨울철 평균 강수량의 미래변화를 살펴보았다. 강수량의 변화는 계절에 따라 큰 차이를 보이며, 고농도 시나리오로 갈수록 상승 폭이 증가하는 경향을 보인다. 여름철의 경우, 한반도의 남부지방과 북부지방에서 강수량이 약 1.5 mm day^{-1} 이상 증가할 것으로 전망되며, 중부지방에서는 현재 대비 변화가 없

을 것으로 전망된다. 또한, 중국의 화동, 화북지역 및 일본을 포함한 주변 해역에서도 강수량이 전반적으로 증가할 것으로 모의되며, 특히 일본 주변의 해역에서는 강수량이 가장 많이 상승할 것으로 전망된다. 겨울철의 경우, 육지에서의 강수량 변화는 적을 것으로 전망되며, RCP8.5 시나리오의 경우에만 한반도 남부지방에서 강수량이 0.5 mm day^{-1} 이상 증가할 것으로 나타난다. 특히 한반도의 남해와 동해상 먼 바다 및 일본의 남부지역에서는 강수량의 증가 및 감소가 두드러질 것으로 전망된다. 여름철 평균 강수량의 미래 변화는 RCP4.5 시나리오에서 0.8 mm day^{-1} , RCP8.5 시나리오에서 1.2 mm day^{-1} 증가할 것으로 전망되며, 각 시나리오별 겨울철 평균 강수량의 변화는 현재 기후 대비 큰 차이가 없을 것으로 전망된다.

3.3 EOF 분석

Figures 6와 7은 각각 여름과 겨울 기온 아노말리의 Empirical Orthogonal Function (EOF) 분석을 수행한 결과이다. 분석기간은 Historical (1981~2010년), RCP4.5 그리고 RCP8.5 (2071~2100년)이며 아노말리는 각 기간의 기후 평균값을 제거함으로써 계산되었다. 따라서 EOF 분석은 Historical 30년 또는 시나리오에 따

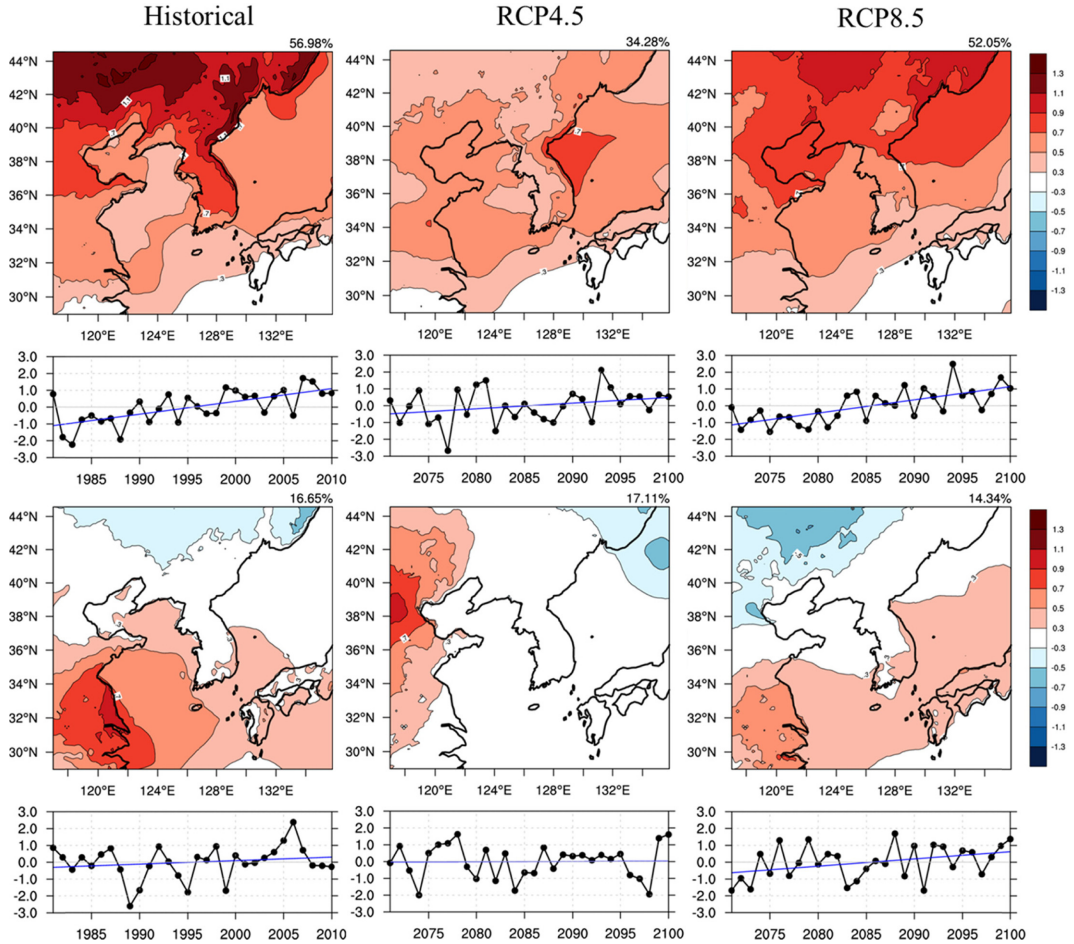


Fig. 6. The first two EOF modes and PC time-series of JJA temperature anomaly at 2 m [°C] for historical period (1981~2010) and future period (2071~2100) with respect to the RCPs (4.5, 8.5).

라 변화된 2071~2100년의 기후(Figs. 4, 5)에 대한 주된 패턴을 보여주는 것이다. 그림의 오른쪽 상단의 숫자는 전체 변동 중 각 공간장이 설명하는 변동을 의미한다. 각 패턴 아래에 나타난 시계열은 Principle Component (PC)의 시계열로 파란색 선은 각 시계열의 선형 트렌드를 나타낸다. Reference 기간(Historical)의 여름 기온 EOF 첫 번째 모드는 전체 변동의 56.98%를 설명하는 모드로, 한반도를 포함한 동북아시아의 육지에서 강한 양의 아노말리가 나타났으며, 그 크기는 북쪽으로 갈수록 큰 것으로 나타났다. 또한 이 모드의 PC 시계열을 살펴보면 2010년으로 갈수록 증가하는 트렌드를 가지고 있으므로, 한반도를 포함한 동북아시아의 기온이 점차 증가하는 특징을 가지는 것으로 나타났다. EOF 두 번째 모드는 전체 변동성의 16.65%를 설명하며, 중국의 화동지역을 중심으로 동북아시아의 남쪽 해상에 양의 아노말리가 나타나는

패턴을 보였다. 한반도의 경우 남해 및 동해안을 따라서만 양의 아노말리가 나타났다. RCP 4.5와 8.5 두 시나리오의 EOF 첫 번째 모드의 공간분포는 Historical과 유사한 패턴을 나타냈으며, 변동성은 각각 34.28%, 52.05%로 나타났다. PC 시계열에서는 양의 트렌드가 나타나, 미래에도 기온은 꾸준히 증가할 것으로 전망되며, 그 정도는 RCP8.5가 더 클 것으로 전망된다. RCP4.5와 RCP8.5 시나리오 모두 동북아시아 전반에 걸쳐 양의 아노말리가 나타났으나, RCP4.5의 경우 일본 남쪽 해상을 제외한 거의 모든 영역에서 양의 아노말리가 나타났고, RCP8.5의 경우 북한을 포함한 약 위도 37도 이북의 영역에서 북으로 갈수록 큰 양의 아노말리가 나타났다. 두 번째 모드의 경우 RCP4.5는 서에서 양, 동에서 음의 아노말리가 나타났고, RCP8.5는 남에서 양, 북에서 음의 아노말리가 나타났다. Figure 7의 경우 겨울철 기온에 대한 EOF 분석결과이다.

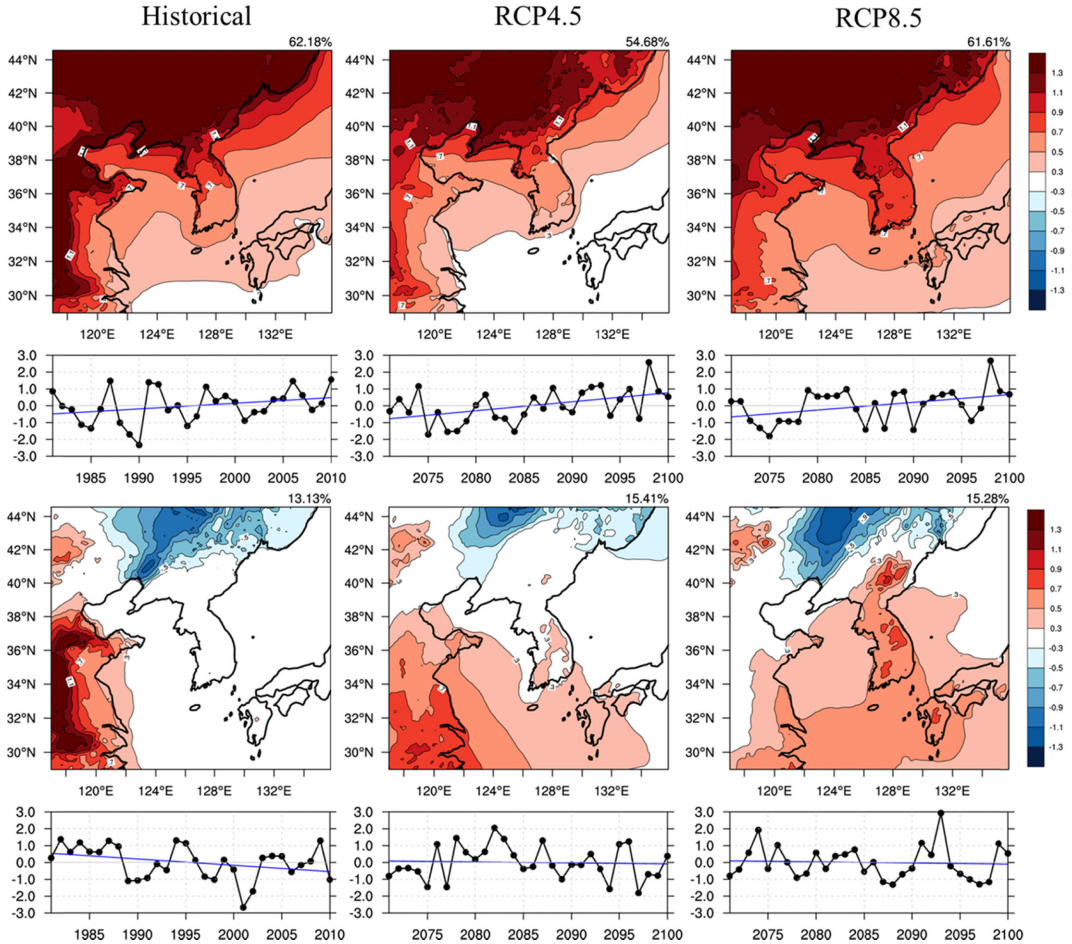


Fig. 7. Same as Fig. 6 except for DJF temperature [$^{\circ}\text{C}$].

Historical과 RCP4.5, RCP8.5 모두 육지에서 양의 아노말리가 나타났으며, 여름철 기온의 EOF 첫 번째 모드보다 큰 값을 나타냈다. Historical의 경우 첫 번째 모드가 전체 변동의 62.18%를 설명하는 것으로 나타났고, RCP4.5와 8.5의 경우 각각 54.68%, 61.61%를 설명하는 것으로 나타났다. PC 시계열은 historical의 경우 뚜렷한 증가의 추세가 나타나지 않았으나, RCP4.5와 RCP8.5의 경우 증가 추세가 뚜렷해, 현재보다 21세기 후반에 겨울철 기온의 증가가 더 뚜렷할 것으로 전망된다. EOF 두 번째 모드의 경우 Historical은 13.13%, RCP4.5와 RCP8.5의 경우 15.41%와 15.28%를 설명하며, Historical과 RCP4.5의 경우 중국의 화동지방에 양의 아노말리, 동북지역에 음의 아노말리가 나타났다. 이와 달리 RCP8.5의 경우 한반도를 포함한 북위 40도 남쪽의 영역에서 음의 아노말리, 북위 40도 북쪽에서는 양의 아노말리가 서로 대비하여 나타났다.

Figures 8과 9는 여름과 겨울의 강수에 대한 EOF

분석 결과이다. 여름철 강수의 EOF분석 결과 Historical의 경우 EOF 첫 번째 모드는 18.82%, 두 번째 모드는 13.97%의 강수의 변동성을 설명한다. EOF 첫 번째 모드에서는 한반도에 강한 양의 아노말리가 나타났으나 PC 시계열의 경우 감소하는 추세를 나타내어, 한반도 강수의 감소추세를 나타냈다. EOF 두 번째 모드의 경우 일본과 남한에 뚜렷한 음의 아노말리가 나타났다. RCP4.5의 경우 첫 번째 모드는 15.50%의 변동성을 설명하며, Historical의 첫 번째 모드와 유사하게 한반도에 양의 아노말리와 일본 남쪽 해상에 음의 아노말리가 나타났다. 두 번째 모드 역시 Historical과 유사한 모습이 나타났으나, Historical에 비해 양의 아노말리가 한반도 남부지역에 강하게 나타내며, 일본 남쪽 해상만 약한 음의 아노말리가 나타났다. RCP8.5의 경우 Historical과 RCP4.5와 달리 동북아시아의 전 지역에서 양의 강수 아노말리가 나타났으며, 특히 한반도의 남부지역과 중국의 화동지역, 일본에 강하게

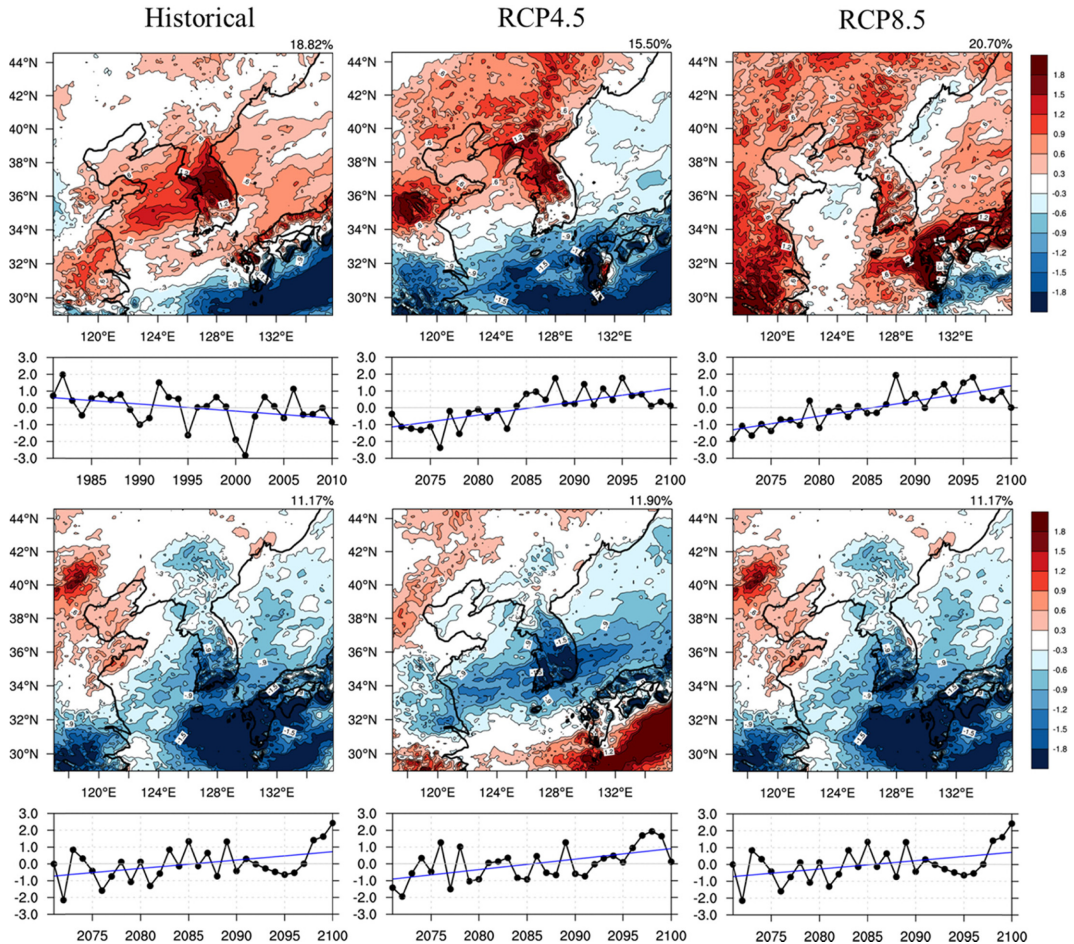


Fig. 8. Same as Fig. 6 except for JJA precipitation [mm day^{-1}].

나타났다. PC 시계열의 경우, RCP4.5와 RCP8.5 모두 Historical과 반대로 뚜렷한 증가추세가 나타나, 양의 아노말리를 패턴을 나타낸 한반도의 경우 강수가 증가할 것으로 전망된다. EOF 두 번째 모드는 RCP4.5의 경우 11.90%, RCP8.5의 경우 11.17%의 변동성을 설명한다. 한반도 남부에 대해서는 두 시나리오 모두 음의 아노말리를 나타내고 있으나, 일본지역의 강수는 RCP4.5의 경우 육지에는 음의 아노말리, 남쪽해상에서는 양의 아노말리를 나타내고 RCP8.5에서는 육지와 남쪽해상 모두 음의 아노말리를 나타냈다. 겨울철의 경우 여름에 비해 한반도에서의 강수변동이 작게 나타났으며, 이는 Historical뿐 아니라 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오에서도 동일하게 나타났다. 첫 번째 EOF 모드는 전체 변동성 가운데 Historical의 경우 18.18%, RCP4.5와 8.5 시나리오의 경우 21.55%, 17.73%를 설명하였다. 세 개의 시나리오 모두 일본의 남쪽해상에서 강한 음의 아노말리가 나타났으며, 이러한

음의 아노말리는 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오로 오면서 중국의 화동지역까지 넓어진 것으로 보인다. 동해상에서는 Historical의 경우 음의 강수 아노말리가 나타났지만, RCP4.5에서는 양의 아노말리가, 8.5에서는 북쪽은 음의, 남쪽은 양의 아노말리가 다이폴 형태로 나타났다. EOF 두 번째 모드의 경우, 전체 변동 가운데 Historical은 14.89%, RCP4.5는 16.83% 그리고 RCP8.5는 12.51%를 설명하며, 공통적으로 한반도의 동해안을 따라 양의 아노말리를 나타냈다. 하지만 동해 해상에 대해서는 Historical과 RCP8.5는 음의 아노말리를 나타내는 반면, RCP4.5에서는 양의 아노말리를 나타내었다. RCP4.5의 패턴에서는 Historical과 RCP8.5에서는 나타나지 않는 서해안에 강한 양의 아노말리를 나타냈다.

3.4 극한 기후 변화

WRFV3.4가 산출한 모의결과를 이용하여 RCP 시

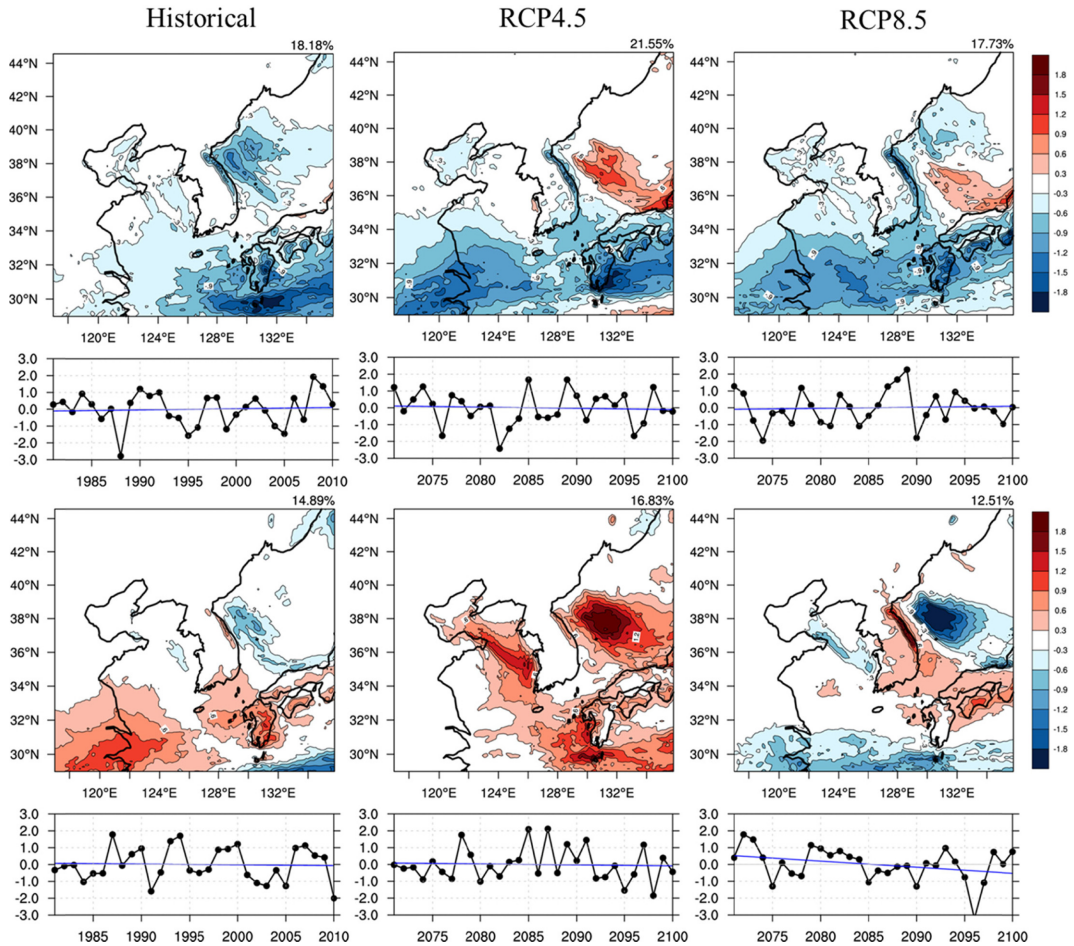


Fig. 9. Same as Fig. 6 except for DJF precipitation [mm day^{-1}].

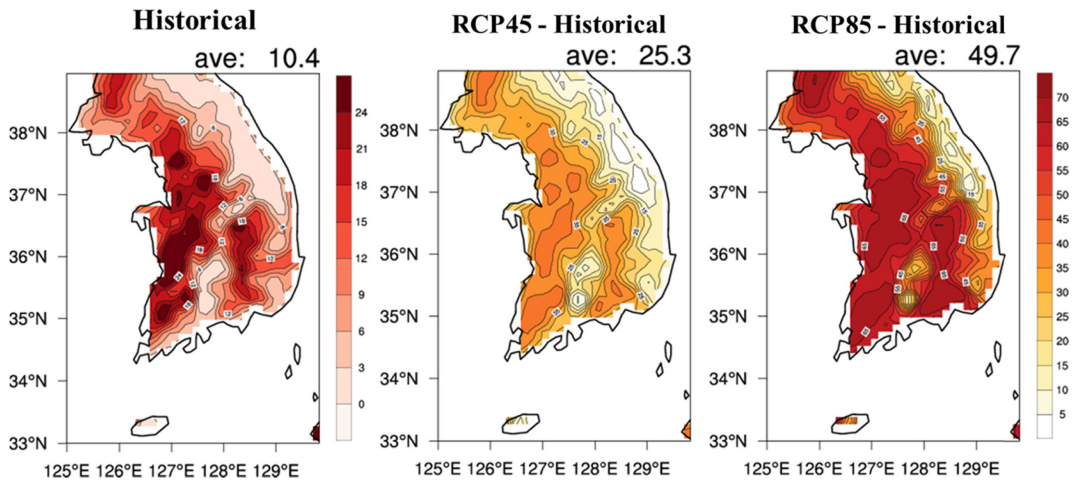


Fig. 10. Spatial distribution of $\text{DAY}_{\text{Tx}30}$ [day year^{-1}] over South-Korea for historical period (1981~2010), the differences between future period (2071~2100) and the historical period with regard to the RCPs (4.5, 8.5).

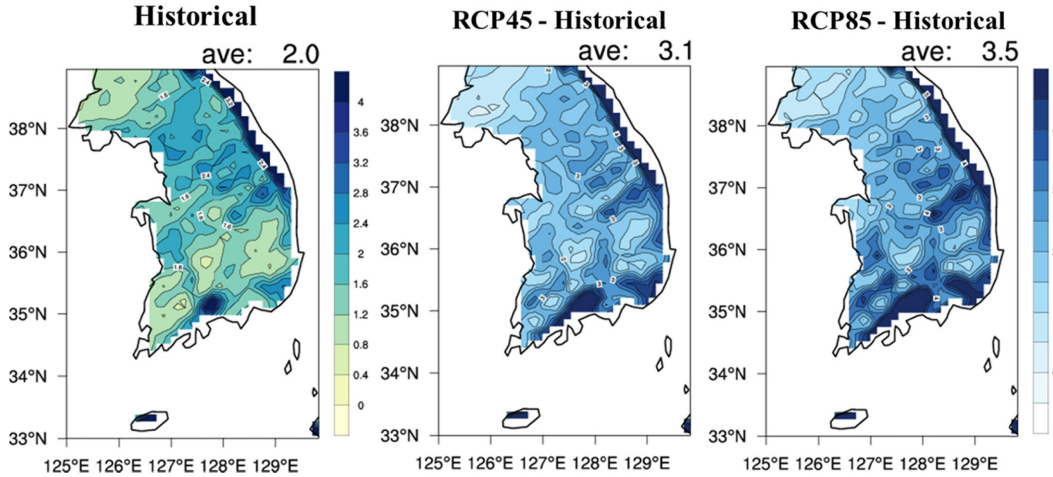


Fig. 11. Same as Fig. 10 except for DAY_{PR20} [$day\ year^{-1}$].

나리오별 극한기후 변화 전망을 살펴보고자 한다. 본 연구에서는 많은 선행연구에서 활용된 절대 임계값 방법을 이용하여 극한기후를 정의하였다(Im and Kwon, 2007; Oh et al., 2011). DAY_{TX30} 는 일 최고 기온이 $30^{\circ}C$ 이상인 날의 연중 일수로 정의되며, DAY_{PR20} 는 일 강수량이 $20\ mm\ day^{-1}$ 이상인 연중 일수로 정의하였다.

Figure 10은 절대 임계값 방법에 의해 정의된 DAY_{TX30} 지수를 현재와 미래변화에 대해 공간적으로 나타낸 그림이다. WRFV3.4가 모의한 현재 기후의 DAY_{TX30} 공간 분포를 보면 경기도, 충청도 및 전라도 지역에서 24일 이상의 높은 분포를 보이며, 내륙 산간 지역에서는 3일 미만의 낮은 분포를 보인다. 분석된 전 지역의 평균값은 10.4일이다. RCP4.5 시나리오 실험에서 DAY_{TX30} 의 현재 대비 미래변화를 살펴보면 경상도를 포함한 한반도의 서쪽 지역에서 현재보다 20일 이상 증가할 것으로 전망되며, 한반도의 동쪽 지역에서는 15일 미만의 낮은 분포를 보인다. 특히 전라도와 충청도에서는 DAY_{TX30} 가 40일 이상 증가하여 가장 높은 증가율을 보인다. 고농도 시나리오인 RCP8.5의 결과는 RCP4.5 시나리오와 유사한 패턴을 보이지만 DAY_{TX30} 의 상승률이 더 높을 것으로 전망된다. 특히 경기도를 포함한 전라도와 충청도 지역에서 RCP45 시나리오 결과와 유사하게 DAY_{TX30} 가 65일 이상 증가하는 패턴을 보이며, 태백산맥 지역에서는 20일 이하의 낮은 분포를 보인다. 위의 결과를 종합해보면, 우리나라의 DAY_{TX30} 일수는 RCP4.5, RCP8.5 시나리오에 기초하여 21세기 후반에 각각 25.3일, 49.7일 증가할 것으로 모의되며, 고농도 시나리오인 RCP8.5에서 DAY_{TX30} 의 증가율이 가장 높을 것으로 전망된다.

Figure 11은 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오에 근거한 DAY_{PR20} 지수의 현재와 미래변화에 대해 공간적으로

나타낸 그림이다. 모형이 산출한 현재기후의 DAY_{PR20} 공간 분포를 살펴보면 한반도 전역에서 0.4일에서 4 일까지의 분포를 보이며, 전 지역 평균값은 2.0일로 나타난다. 특히 태백산맥을 따라 3.2일 이상의 높은 분포를 보이며, 지리산과 제주도 지역에서도 4일 이상으로 높게 나타난다. RCP4.5와 RCP8.5 시나리오에 기초한 21세기 후반의 DAY_{PR20} 일수는 서로 유사한 분포를 보이며, 고농도 시나리오인 RCP8.5 시나리오에서 DAY_{PR20} 일수의 증가율이 높다. 현재 대비 미래의 DAY_{PR20} 일수 변화는 RCP4.5 시나리오에서 3.1일 증가할 것으로 모의되며, RCP8.5 시나리오에서는 3.5 일 증가할 것으로 전망된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 기상청 기상연구소에서 HadGEM2-AO 전지구 모형으로 생산한 Historical, RCP4.5, 그리고 RCP8.5 시나리오자료를 바탕으로 WRFV3.4 모형을 활용한 상세기후 전망자료 생산 시스템을 구축하였다. 본 시스템을 통하여 생산된 자료의 horizontal resolution은 $12.5\ km$ 이고 적분 영역은 한반도 중심의 동북아시아이다. 적분 기간은 Historical은 1979~2010년, RCP4.5 그리고 RCP8.5 시나리오는 각각 2019~2100년이고, 기상청 슈퍼컴 3호기의 “해빛” 시스템을 이용해 적분하였다. 본 연구에서는 Historical의 1981~2010년, 미래 시나리오에서는 21세기 후반인 2071~2100년에 대하여 여름 및 겨울의 기온과 강수의 time series, climatology, EOF 그리고 극한기후 분석을 시행하고 그 결과를 통해 생산된 자료를 검증하였다.

기온의 경우 21세기 후반에 RCP4.5는 약 $2.9^{\circ}C$, RCP8.5는 약 $4.6^{\circ}C$ 증가할 것으로 전망되며 강수의

경우 RCP4.5는 약 0.3 mm day^{-1} , RCP8.5는 약 0.5 mm day^{-1} 증가할 것으로 전망되었다. 기온과 강수 모두 2~3년 주기의 경년 변동성이 통계적으로 유의하게 나타난다. 또한, 계절별 기온 및 강수의 변화를 공간분포로 살펴보면, 기온의 경우 전 지역에서 기온이 상승할 것으로 나타났으며 고위도로 갈수록, 겨울에 더 가파르게 증가할 것으로 전망되었다. 여름철 강수의 경우 모든 시나리오에서 강수량이 증가하는 모습이 나타났으며 특히 한반도의 남부지방과 북부지방에서 약 1.5 mm day^{-1} 이상의 강수량의 증가가 나타났다. 한반도뿐 아니라, 중국의 화동, 화북지역 및 일본을 포함한 주변 해역에서도 여름 강수량은 증가할 것으로 나타났다. EOF 분석을 통해 살펴본 현재 및 미래의 기온 아노말리의 분포는 여름과 겨울 모두 고위도로 갈수록 아노말리가 강해지는 패턴이 EOF 첫 번째 모드로, 전체 변동 중 가장 큰 변동을 설명한다. 또한, 이 패턴의 PC 시계열은 증가하는 추세를 가지고 있어, 패턴과 같은 기온의 상승 형태가 계속해서 강화될 것으로 예상된다. 기온의 두 번째 EOF 모드는 각 시나리오 및 계절별로 상이하였으며 지역적 차이를 살펴볼 수 있어 본 시스템으로 생산된 미래 전망 자료가 미래 기후의 지역적 차이를 이해하는 데 사용될 수 있을 것으로 사료된다. 강수의 EOF분석 결과는, 여름철의 경우 현재 및 미래 시나리오 모두 한반도에 강수의 변동성이 큰 것으로 나타났고, 겨울의 경우 한반도에서는 변동이 크지 않은 것으로 나타났다. 극한 기후의 경우 DAY_{TX30}는 RCP4.5와 RCP8.5에서 각각 25.3일, 49.7일 증가할 것으로 나타났고, DAY_{PR20}은 각각 3.1일, 3.5일 증가할 것으로 전망되었다.

따라서, WRFV3.4에 의해 모의된 한반도 및 동북아시아의 상세 기후 전망자료는 북동아시아 영역 전체의 기후변화뿐 아니라 지역적 특성을 잘 나타냄으로, 대상영역에 대한 현재 기후 및 표준실험으로 적합한 것으로 판단된다. 본 연구를 통해 생산된 결과는 다른 3개의 지역기후모형의 결과와 함께 다중모델앙상블 멤버로 사용될 예정이다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상기술개발사업(CATER 2012-3083)의 지원으로 수행되었으며, 이 연구에 기상청 슈퍼컴퓨터가 활용되도록 지원해준 기상청 슈퍼컴퓨터 운영과에 감사합니다.

REFERENCES

- Ahn, J.-B., J. Hur, and K.-M. Shim, 2010a: A simulation of agro-climate index over the Korean peninsula using dynamical downscaling with a numerical weather prediction model. *Korean J. Agr. Forest Meteor.*, **12**, 1-10 (in Korean with English abstract).
- _____, J.-Y. Hong, and K.-M. Shim, 2010b: Agro-climate indices changes over the Korean peninsula in CO2 doubled climate induced by atmosphere-ocean-land-ice coupled general circulation model. *Korean J. Agr. Forest Meteor.*, **12**, 11-22 (in Korean with English abstract).
- _____, _____, and M.-S. Seo, 2013: Present-Day Climate of the Korean Peninsula Centered Northern East Asia Based on CMIP5 Historical Scenario Using Fine-Resolution WRF. *J. Korean Meteor. Soc., Atmos.*, **23**, 527-538 (in Korean with English abstract).
- Back, H.-J., C.-H. Cho, W.-T. Kwon, S.-K. Kim, J.-Y. Cho, and Y. Kim, 2011: Development strategy for new climate change scenarios based on RCP. *Climate Change Res.*, **2**, 55-68 (in Korean with English abstract).
- Boo, K.-O., W.-T. Kwon, and J.-K. Kim, 2004: Vegetation changes in the regional surface climate over East Asia due to global warming using BIOME4. *Geophysics and Space Physics*, **27**, 317-327.
- Bretherton, C. S., M. Widmann, V. P. Dymnikov, J. M. Wallace, and I. Blade, 1999: The effective number of spatial degrees of freedom of a time-varying field. *J. Climate*, **12**, 1990-2009.
- Cha, Y.-M., H.-S. Lee, J. Y. Moon, W.-T. Kwon, and K.-O. Boo, 2007: Future climate projection over East Asia using ECHO-G/S. *J. Korean Meteor. Soc., Atmos.*, **17**, 55-68 (in Korean with English abstract).
- Chen, F., and J. Dudhia, 2001: Coupling an advanced land-surface/hydrology model with the Penn State/NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 569-585.
- Collins, W. D., J. K. Hackney, and D. P. Edwards, 2002: An updated parameterization for infrared emission and absorption by water vapor in the National Center for Atmospheric Research Community Atmosphere Model. *J. Geophys. Res.*, **107**, 1-20. doi:10.1029/2001JD001365.
- Collins, W. J., and Coauthors, 2011: Development and evaluation of an Earth-system model - HadGEM2. *Geosci. Model Dev. Discuss.*, **4**, 997-1062, doi:10.5194/gmdd-4-997-2011.
- Choi, S.-J., D.-K. Lee, and S.-G. Oh, 2011: Regional climate simulations over East-Asia by using SNURCM and WRF forced by HadGEM2-AO. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **32**, 750-760 (in Korean with English abstract).
- Giorgi, F., and L. O. Mearns, 1999: Introduction to special

- section: Introduction to special section: Regional climate modeling revisited. *J. Geophys. Res.*, **104**, 6335-6532.
- _____, and Coauthors, 2012: RegCM4: Model description and preliminary test over multiple CORDEX domains. *Clim. Res.*, **52**, 7-29.
- Ho, C.-H., and I.-S. Kang, 1988: The variability of precipitation in Korea. *J. Korean Meteor. Soc.*, **24**, 38-48 (in Korean with English abstract).
- Hong, S.-Y., J. Dudhia, and S.-H. Chen, 2004: A Revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 103-120.
- _____, Y. Noh, and J. Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 2318-2341.
- _____, and Coauthors, 2013: The global/regional integrated model system (GRIMs). *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 219-243. doi:10.1007/s13143-013-0023-0.
- Houghton, J. T., G. J. Jenkins, and J. J. Ephraums (eds.), 1990: *Climate Change - The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Im, E. S., and W. T. Kwon, 2007: Characteristics of extreme climate sequences over Korea using a regional climate change scenario. *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, **3**, 17-20.
- _____, J. B. Ahn, A. R. Remedio, and W. T. Kwon, 2008: Sensitivity of the regional climate of East/Southeast Asia to convective parameterizations in the RegCM3 modelling system. Part 1: Focus on the Korean peninsula. *Int. J. Climatol.*, **28**, 1861-1877.
- IPCC, 2007: *Climate Change 2007: The Physical Scientific Basis, Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- _____, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Kain, J. S., 2004: The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteorol.*, **43**, 170-181.
- Kim, M.-J., J.-H. Shin, H.-S. Lee, and W.-T. Kwon, 2013: An uncertainty assessment of AOGCM and future projection over East Asia. *J. Korean Meteor. Soc., Atmos.*, **18**, 507-524 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.-W., and S.-Y. Hong, 2006: A numerical simulation study of orographic effects for a heavy rainfall event over Korea using the WRF model. *J. Korean Meteor. Soc., Atmos.*, **16**, 319-332 (in Korean with English abstract).
- _____, S.-Y. Hong, E.-C. Chang, M.-S. Suh, and H.-S. Kang, 2013: Assessment of future climate change over East Asia due to the RCP scenarios downscaled by GRIMs-RMP. *Clim. Dynam.*, **42**, 1-15.
- Legutke, S., and R. Voss, 1999: The Hamburg atmosphere-ocean coupled circulation model ECHO-G. *German Climate Computer Centre (DKRZ) Tech. Rep.*, **18**, 62 pp.
- Meehl, G. A., W. M. Washington, T. M. L. Wigley, J. M. Arblaster, and A. Dai, 2003: Solar and greenhouse gas forcing and climate response in the twentieth century. *J. Climate*, **16**, 426-444.
- _____, W. M. Washington, C. M. Ammann, J. M. Arblaster, T. M. L. Wigley, and C. Tebaldi, 2004: Combinations of natural and anthropogenic forcings in twentieth-century climate. *J. Climate*, **17**, 3721-3727.
- Ministry of Science and Technology, 1991: *Development of an Operational Weather Information System for Agricultural Applications in Cheju Island (III)*. Ministry of Science and Technology, 28 pp.
- Moss, R., and Coauthors, 2008: Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies. *Intergovernmental Panel on Climate Change*, Geneva, 132 pp.
- Oh, S.-G., M.-S. Suh, D.-H. Cha, and S.-J. Choi, 2011: Simulation skills of RegCM4 for regional climate over CORDEX East Asia driven by HadGEM2-AO. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **32**, 732-749 (in Korean with English abstract).
- _____, M.-S. Suh, and D.-H. Cha, 2012: Performance of RegCM4 for extreme climate over South Korea in the CORDEX East Asia framework and its relation to lateral boundary condition. *Proceeding of Spring meeting of KMS*, 49-50.
- _____, J.-H. Park, S.-H. Lee, and M.-S. Suh, 2014: Assessment of the RegCM4 over East Asia and future precipitation change adapted to the RCP scenarios. *J. Geophys. Res.*, **119**, 2013JD020693.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill,

- D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2008: A description of the advanced research WRF version 3. *NCAR Technical Note*, NCAR/TN-475+STR, 125 pp. DOI:10.5065/D68S4MVH.
- Sung, J.-H., H.-S. Kang, S. Park, C.-H. Cho, D.-H. Bae, and Y.-O. Kim, 2012: Projection of extreme precipitation at the end of 21st century over South Korea based on Representative Concentration Pathways (RCP). *J. Korean Meteor. Soc., Atmos.*, **22**, 221-231 (in Korean with English abstract).