

SSP 시나리오 기반 CORDEX-동아시아 2단계 다중 기후모델의 동아시아 지역 모의 성능평가 및 미래 전망 분석

김진옥*[†] · 김태준** · 김도현*** · 변영화**** · 장은철***** · 차동현***** · 안중배***** · 민승기*****

*국립기상과학원 기후변화예측연구팀 연구사, **국립기상과학원 기후변화예측연구팀 연구원, ***국립기상과학원 기후변화예측연구팀 연구원, ****국립기상과학원 기후변화예측연구팀 팀장, *****공주대학교 대기과학과 교수, *****울산과학기술원 도시환경공학과 교수, *****부산대학교 대기환경과학과 교수, *****포항공과대학교 환경공학부 교수

Performance Evaluation and Future Projection of East Asian Climate using SSP Scenario-based CORDEX-East Asia Phase 2 Multi-RCM Simulations

Kim, Jin-Uk*[†] · Kim, Tae-Jun** · Kim, Do-Hyun*** · Byun, Young-Hwa**** · Chang, Eun-Chul***** · Cha, Dong-Hyun***** · Ahn, Joong-Bae***** · Min, Seung-Ki*****

*Research Scientist, Climate Change Research Team, National Institute of Meteorological Sciences (NIMS), Jeju, Korea

**Researcher, Climate Change Research Team, NIMS, Jeju, Korea

***Researcher, Climate Change Research Team, NIMS, Jeju, Korea

****Director, Climate Change Research Team, NIMS, Jeju, Korea

*****Professor, Department of Atmospheric Science, Kongju National Univ., Gongju, Korea

*****Professor, Department of Urban and Environmental Engineering, UNIST, Ulsan, Korea

*****Professor, Department of Atmospheric Science, Pusan National Univ., Busan, Korea

*****Professor, Division of Environmental Science and Engineering, POSTECH, Pohang, Korea

ABSTRACT

Recently, the CORDEX-East Asia team completed climate change simulations based on five regional climate models (RCM) under four Shared Socioeconomic Pathways (SSP) scenarios. In this study, the performance of five RCMs and their ensemble averages for present-day climate simulations are evaluated. All RCMs have relatively high performance for climatology patterns for Korea, East China and Japan, while relatively low performance is observed for the Tibetan plateau. Many RCMs share cold and wet biases. Future climate changes under four SSP scenarios are analyzed for the end of 21st century (2081 ~ 2100) compared to present day (1995 ~ 2014). East Asia is expected to experience temperature increases of 2.4°C to 6.2°C and precipitation increases of 6.7% to 12.6%, with stronger changes in higher-emission scenarios. Among the five RCMs, HadGEM3-RA projects the largest increase in temperature while GRIMs is characterized by the strongest increase in precipitation. In line with mean warming rates, warm extreme days (TX90p) are projected to increase by 35.7 ~ 93.3 days and cold extreme days (TN10p) are projected to decrease by 23.4 ~ 35.2 days. The results of this study can be used as a reference for future detailed analyses of East Asian climate change and its impacts as well as for emphasizing the importance of carbon neutrality.

Key words: CORDEX-EA Phase 2, SSP Scenarios, Climate Changes

1. 서론

국제사회는 기후변화에 관한 정부 간 패널(Intergovernmental

Panel on Climate Change; IPCC)을 중심으로 산업화 이후 급변하는 기후변화에 대응하고 있다. 특히 최근에는 “IPCC 제6차 평가보고서 제1 실무그룹 보고서”를 비롯하여 “지구온난화 1.

[†]Corresponding author : jukim86@korea.kr (National Institute of Meteorological Sciences, 33 Seohbuk-ro, Seogwipo-si, Jeju 63568, Korea. Tel. +82-64-780-6783)

ORCID 김진옥 0000-0001-9892-9915
김태준 0000-0002-5452-4796
김도현 0000-0002-3829-5532
변영화 0000-0002-6074-4461

장은철 0000-0002-5784-447x
차동현 0000-0001-5053-6741
안중배 0000-0001-6958-2801
민승기 0000-0002-6749-010x

5°C”, “기후변화와 토지”, “해양 및 빙권”에 대한 특별보고서 등 기후변화와 관련한 다양한 연구 결과들이 발표되고 있다(IPCC, 2018; 2019a; 2019b; 2021). 이는 전 지구적으로 증가하고 있는 기후변화로 인한 재산, 인명 피해 등을 최소화하기 위해서는 과거 기후변화 추세와 미래 기후변화 전망에 대한 과학적인 정보 제공이 필수적이기 때문이다. 또한 IPCC는 새로운 공동사회경제경로(Shared Socioeconomic Pathways; SSP) 등 기후변화 예측 연구에 대한 규격을 제시하였고, 각국의 연구진들은 이를 기반으로 Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6)를 통해 고도화된 전지구 기후모델을 사용하여 전지구 및 지역에 따른 미래 기후변화 예측 연구를 수행하고 있다.

그러나 수평해상도가 수백 km 수준인 전지구 기후모델은 낮은 해상도로 인하여 각 지역에 대한 상세한 기후변화 전망 정보를 산출하고 분석정보를 제공하기에 어려움이 있다. 이에 따라 세계기후연구프로그램(World Climate Research Program; WCRP)은 보다 상세한 지역별 기후변화 연구를 위하여 2009년에 국제 지역기후 상세화 프로젝트(COordinated Regional climate Downscaling Experiment; CORDEX)를 설립하였다. CORDEX는 전지구를 14개 상세 영역으로 나누고 각 영역에 대하여 고해상도 지역 기후변화 시나리오의 산출·분석을 협력하는 프로젝트로 현재 2단계 프로젝트가 추진 중이며, 우리나라는 CORDEX-동아시아 그룹에 참여하여 동아시아 및 한반도의 미래 극한기후변화 및 태양광 에너지의 변화를 전망하고 있다(Kim et al., 2021; Park et al., 2022). 또한 기후모델은 불확실성을 포함하고 있으므로 다중 기후모델을 사용하여 이를 최소화하고 있으며(Christensen et al., 2007; Im et al., 2017), CORDEX-동아시아에 참여한 국내 연구진은 5개 지역 기후모델을 활용하여 다중 앙상블을 구축하였다. 이를 기반으로 SSP 주요 4종 시나리오에 대한 동아시아 미래 기후 전망정보를 산출하고 제공하는 체계를 구축하였다. 또한 동아시아 및 한반도 지역에 대하여 최종 산출자료를 활용한 공동 연구를 통해 기후변화에 대한 과학적 이해 확대에 기여하고 있다(Choi and Ahn, 2017; Jo et al., 2019; Kim et al., 2020, Kim et al., 2021).

이 연구에서는 CORDEX-동아시아 2단계 프로젝트에 참여한 5종의 지역 기후모델과 앙상블 평균이 현재 기후를 얼마나 잘 모의하는지 주요 기후요소에 대한 모의 성능을 정량적으로 평가하였고, 이를 본문의 3장에 수록하였다. 또한 탄소배출에 따른 미래 기후변화 전망정보를 제공하기 위하여 SSP 주요 4종 시나리오와 CORDEX-동아시아 2단계 5종의 지역 기후모델을 통해 생산된 가장 최신의 동아시아 기후변화 예측 자료를 모두 사용하여 동아시아의 지역별 미래 기후변화 전망을 분석하였으며, 이를 본문의 4장에 수록하였다.

2. 자료 및 연구 방법

기후모델을 통한 미래 전망은 불확실성이 존재하므로, 이 연구에서는 불확실성을 최소화하기 위하여 CORDEX-동아시아 2단계 영역(Fig. 1)에 대하여 수평해상도 25 km × 25 km 인 5개 지역 기후모델(HadGEM3-RA, CCLM, WRF, RegCM, GRIMs)을 통해 산출된 결과를 평균하여 사용하였다. 또한 5개 모델 각각에 대한 현재 기후 재현성 평가 및 미래 기후변화 전망 분석도 같이 진행하였다. 지역 기후모델의 입력자료는 CMIP6에 참여한 전지구 기후모델인 UK Earth System

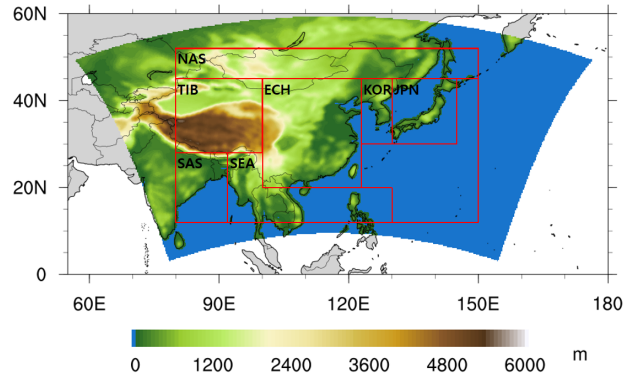


Fig. 1. CORDEX-East Asia Phase2 domain and topography (Shaded). Boxed area denotes analysis region used in this study

Table 1. Configurations of Regional Climate Models (RCM) used

	HadGEM3-RA	CCLM	WRF	GRIMs	RegCM
Vertical layers	63 eta levels	40 hybrid	27 sigma	28 sigma	23 sigma
Land surface model	MOSES II	TERRA-ML	NOAH	NOAH	CLM3.5
Convection scheme	Revised mass flux	Tiedtke	Kain-Fritsch II	SAS + CMT	MIT-Emmanuel
Spectral nudging	No	Yes	Yes	Yes	Yes
Reference	Davies et al.(2005)	Rockel et al.(2008)	Powers et al.(2017)	Hong et al.(2013)	Giorgi et al.(2012)

Table 2. ETCCDI indices used in this study

Index Name	Index Definition	Units
TX90p (Warm days)	The days TX is higher than 90th percentile of TX for historical experiment in each year	days
TN10p (Cold nights)	The days TN is lower than 10th percentile of TN for historical experiment in each year	days
R95p (Extremely wet days)	The wet (PR \geq 1 mm) days PR is higher than 95th percentile of PR for historical experiment in each year	days
RX1D (Max 1day PR)	The maximum PR in each year	mm

Model (UKESM)이며, 6시간 간격, 37층(1 ~ 1000 hPa)의 자료를 경계조건으로 사용하였다(Sellar et al., 2019). 5개의 CORDEX-동아시아 2단계 지역 기후모델은 Hadley Centre Global Environmental Model version 3 regional climate model (HadGEM3-RA), Consortium for Small-scale Modeling (COSMO)-Climate Limited-area Modeling (CLM) (CCLM), Weather Research and Forecasting (WRF), Regional Climate Model version 4.0 (RegCM), Global/Regional Integrated Model system (GRIMs)이며, 이에 대한 자세는 설명은 Table 1에 제시하였다.

5개 모델의 현재 기후 모의실험(historical run)은 총 36년(1979 ~ 2014)에 대하여 수행되었고 미래 기후변화 실험은 IPCC 6차 평가보고서의 표준 온실가스 농도(Shared Socioeconomic Pathways; SSP) 시나리오 4종을 기반으로 총 86년(2015 ~ 2100)에 대하여 수행되었다. SSP 4종 시나리오 중 SSP1-2.6은 재생에너지 기술 발달로 화석연료 사용이 최소화되고 친환경적으로 지속가능한 경제성장을 가정하는 저탄소 시나리오이며, SSP2-4.5는 기후변화 완화 및 사회경제 발전 정도가 중간 정도라고 가정한 중간 단계 온실가스 시나리오이다. SSP3-7.0은 기후변화 완화 정책에 소극적이며 기술개발이 늦어 기후변화에 취약한 사회 구조를 가정하며, SSP5-8.5는 산업기술의 빠른 발전에 중심을 두어 화석연료 사용이 높고 도시 위주의 무분별한 개발 확대를 가정하는 고탄소 시나리오이다. 한편, 이 연구에서는 현재 기후 모의의 성능평가 및 미래 전망을 위하여 월평균 기온, 강수량 자료를 사용하였으며, 검증자료는 ECMWF Reanalysis v5 (ERA5) 재분석자료의 월평균 값을 사용하였다. 미래 기후변화 전망의 경우, 평균기후에 대한 전망은 모델의 월평균 자료를 사용하였으며, 극한기후에 대한 전망은 일평균 자료를 사용하였다. 모든 분석은 Fig. 1의 영역 중 빨간색 박스(80°E ~ 150°E, 12°N ~ 52°N)

에 해당되는 육지와 해양에 대해서 수행되었으나, 미래 극한기후 전망 분석은 육지 지역에 대해서만 수행되었다.

이 연구에서는 CORDEX-동아시아 2단계 영역에 대하여 역학적 상세화를 수행한 5개 지역 기후모델의 현재 기후 모의 성능평가를 수행하기 위하여 주요 기후 인자인 기온과 강수량에 대하여 계절별로 동아시아 영역의 5개 모델 및 앙상블 평균과 관측 간 편차를 비교하였다. 또한 모델의 공간 분포에 대한 특성을 평가하기 위하여 모든 모델에 대한 기온과 강수량의 공간분포를 비교하였으며, Taylor diagram을 통해 공간 상관관계, 공간 변동성을 제시하였다. 검증자료는 수평해상도가 0.25° × 0.25°인 ERA5 재분석 자료이고 모델자료를 검증자료의 격자로 내삽하여 비교하였다. 현재 기후 모의의 검증 기간은 20년(1995 ~ 2014)이며, 월평균 자료를 사용하였다. 동아시아 지역의 미래 기후변화 전망을 위하여 현재 기간(1995 ~ 2014년) 대비 21세기 중반기(2041 ~ 2060년)와 21세기 후반기(2081 ~ 2100년)의 기온과 강수량의 기후 평균을 비교하였고 5개 모델과 앙상블 평균의 미래 전망 결과를 제시하였다. 현재 기간은 historical run 자료를 사용하였으며, 미래 기간은 SSP 시나리오 4종의 자료를 사용하였다. 미래 극한기후 변화를 분석하기 위하여 CCI/CLIVAR/JCOMM Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI) 지수 중 극한 고온, 극한 저온, 극한 강수와 관련된 4가지 지수를 사용하였다(Table 2). 극한기후 변화 전망은 Fig. 1의 육지 7개 지역(KOR, ECH, JPN, SEA, SAS, TIB, NAS)에 대하여 수행되었으며, 각 지역에 대한 전망 결과를 4개 시나리오별로 제시하였다.

3. 지역 기후모델의 동아시아 모의 성능 평가

이 장에서는 주요 기후 인자인 기온과 강수량의 지역 기후모델과 관측(ERA5)간 편차에 대하여 공간분포와 산

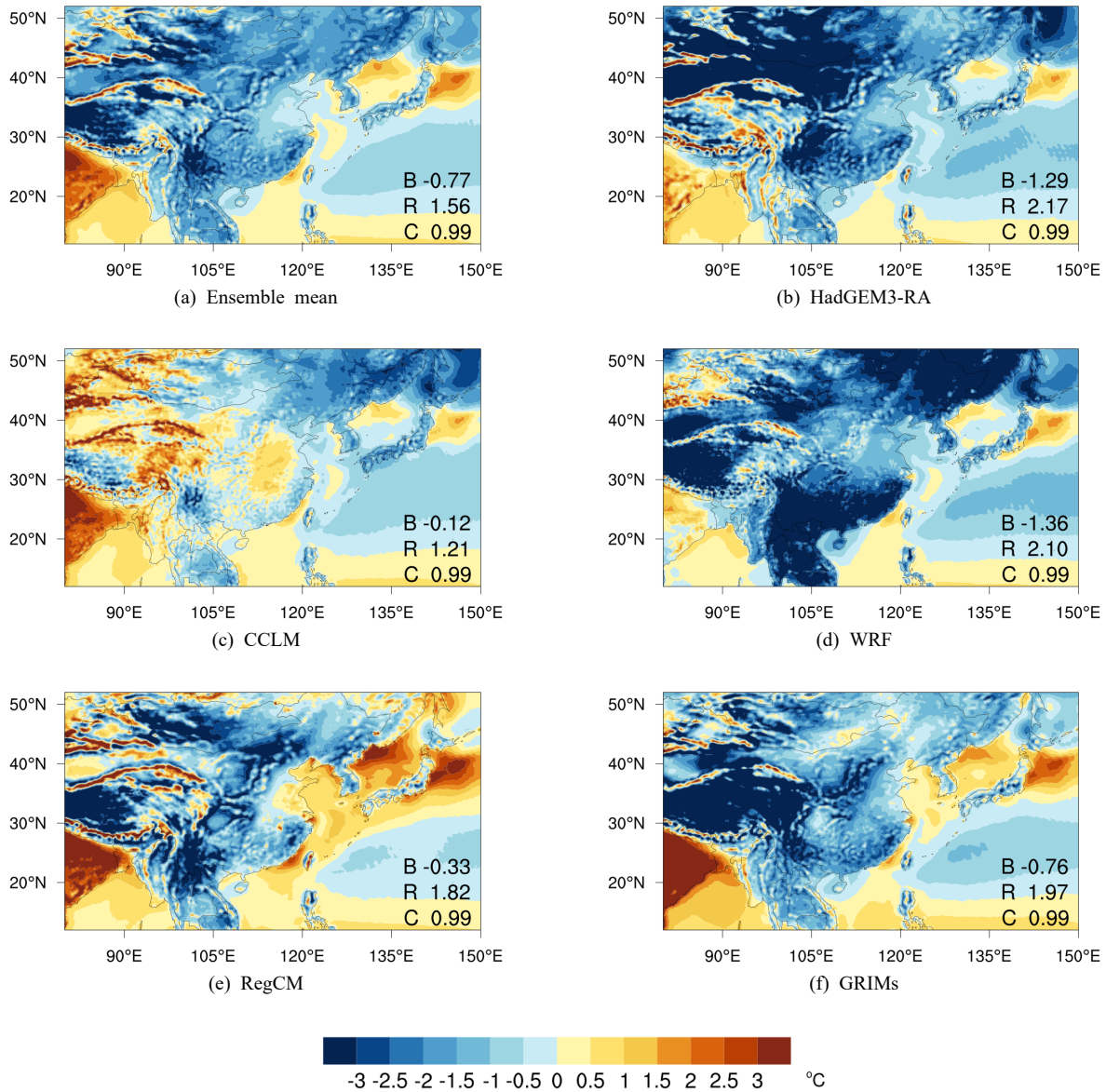


Fig. 2. Difference of annual mean temperature climatology (°C) between observations and climate simulations on East Asia region (1995 ~ 2014). At the bottom right in the figure, B means Bias, R means RMSE, C means Correlation Coefficient

포도, 그리고 Taylor diagram을 통해 평균적인 오차와 공간 변동성의 현재 기후 모의 성능을 평가하였다. Fig. 2, 3은 동아시아 지역의 연평균 기온과 강수량의 5개 모델 및 앙상블 평균과 관측자료 간 편차의 공간분포이다. 이 그림에서 우측 하단에는 모델과 관측간 공간 상관계수 (Pattern Correlation Coefficient; PCC)는 C, 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error; RMSE)는 R, 기후 평균의 편차(Bias)는 B로 표기하였다.

Fig. 2에서 모든 모델은 관측에 비해서 동아시아 연평균 기온이 (-) 편차가 나타난다. 기온의 PCC는 모든 모델이 0.99 이상으로 관측과 유사한 공간 패턴을 보임을 확인할 수 있다. 앙상블 평균의 공간분포를 살펴보면 육상 지역과 북서태평양에서 (-) 기온 편차가 뚜렷하며, 동해와 인도, 인도양 및 적도태평양 지역에서는 공통적으로 (+) 기온 편차가 나타난다(Fig. 2a). 모델별로 살펴보면 CCLM은 Bias와 RMSE가 가장 작으며 관측과 가장 유사

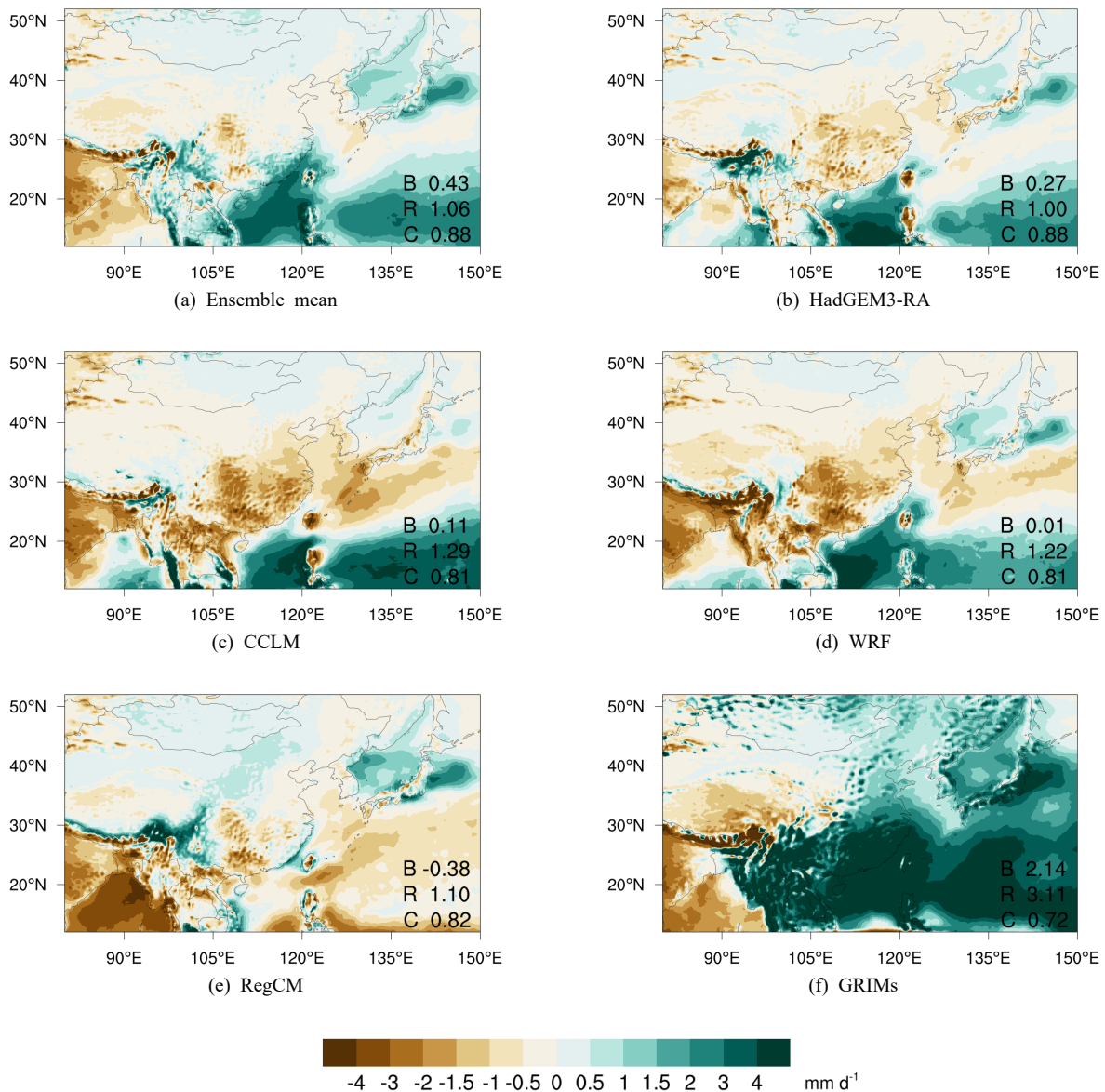


Fig. 3. Same as in Fig. 2 but for total precipitation climatology (mm d^{-1})

하게 현재 기후를 모의하는 것으로 보인다(Fig. 2c). WRF는 (-) 기온 편차가 가장 강하고 특히 티베트고원, 동남아시아와 중국 남부, 만주 지역에서 (-) 기온 편차가 뚜렷하다(Fig. 2d). Fig. 3에서 모델들은 관측에 비해서 동아시아 평균 강수량이 (+) 편차가 나타난다. 강수량의 PCC는 모든 모델이 0.7 이상으로 기온에 비해서는 낮지만, 관측과 유사한 공간 패턴을 보였다. 앙상블 평균의 공간분포를 살펴보면 육상 지역은 (-) 강수 편차가 우세하고 해양 지역은 대체로 (+) 강수 편차가 우세하며, 특히 적도태평양에서 (+) 강수 편차가 매우 강하다(Fig. 3a). 모델별로 살

펴보면 HadGEM3-RA는 강수량의 RMSE가 가장 작고 PCC가 가장 크며, WRF는 강수량 Bias가 가장 작으므로, 이들이 현재 강수량을 관측에 가장 가깝게 모의한다고 볼 수 있다(Fig. 3b, d). GRIMs는 강수량의 Bias와 RMSE가 비교적 크고 PCC가 가장 작으며, 특히 해양에서 (+) 강수 편차가 매우 크게 나타난다(Fig. 3f). 한편, RegCM은 다른 모델과는 다르게 (-) 강수 편차가 주로 나타나며 특히 저위도 지역에서 뚜렷한 (-) 강수 편차를 보인다(Fig. 3e).

또한 Fig. 1에 제시된 빨간색 box의 동아시아 영역에 대한 기온과 강수량의 계절별 모의 성능평가 결과를 figs.

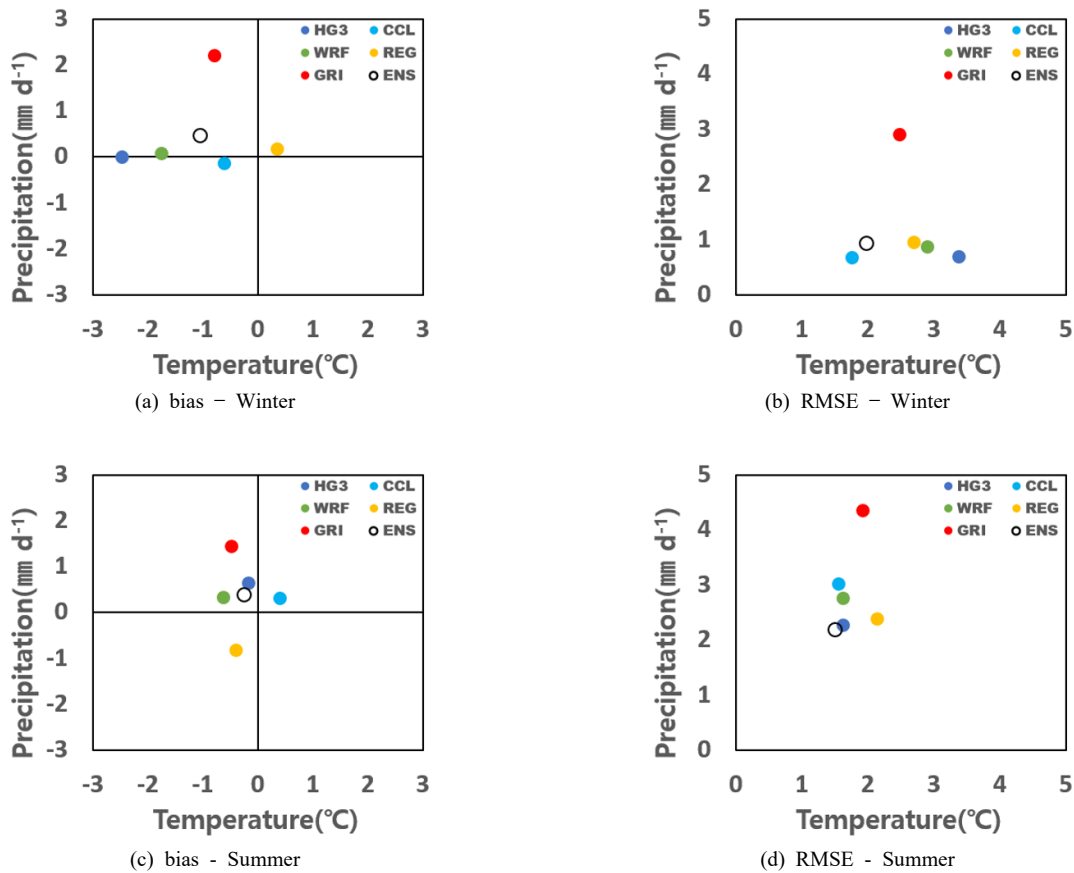


Fig. 4. Scatter diagrams of temperature and precipitation for bias (left column) and RMSE (right column) in the Winter (top row), and Summer (bottom row) on East Asia region. blue: HadGEM3-RA (HG3), skyblue: CCLM (CCL), green: WRF, orange: RegCM (REG), red: GRIMs (GRI), Black: Ensemble mean (ENS)

4, 5에 제시하였다. 먼저 Fig. 4는 기온(가로축)과 강수량(세로축)에 대하여 5개 모델 및 앙상블 평균과 관측 간 겨울철 및 여름철의 평균적인 편차(bias, Figs. 4a, c)와 평균 제공근 오차(RMSE, Figs. 4b, d)를 보여주는 산포도(scatter diagram)이다. 먼저 편차의 산포도를 살펴보면, 겨울철 기온 편차에서 대부분의 모델과 앙상블 평균은 (-) 편차인 반면, RegCM은 유일하게 (+) 편차가 나타난다(Fig. 4a). 겨울철 강수량 편차는 대부분의 모델에서 관측과 비교하여 큰 차이가 없으나 GRIMs에서 유일하게 +2.2 mm d⁻¹로 (+) 편차가 뚜렷하다. 모델의 여름철 기온은 관측과 비교하여 편차가 1°C 미만으로 겨울철에 비하여 작고 대체로 (-) 편차가 나타나지만 CCLM에서 유일하게 (+) 편차가 나타난다(Fig. 4c). 여름철 강수량 편차는 대체로 (+) 편차가 나타나지만 RegCM에서 유일하게 (-) 편차가 나타난다. 즉, 계절에 상관없이 모델은 전반적으로 기온은 (-)

편차, 강수량은 (+) 편차가 나타나며, RegCM은 겨울 기온과 여름 강수량 모의 특성이 다른 모델과 상반되고 GRIMs는 여름 강수량을 상당히 과대 모의한다. 기후모델과 관측 간의 평균 제공근 오차(RMSE)는 겨울철에 CCLM은 기온과 강수량 모두 오차가 가장 작고 GRIMs의 강수량 오차가 매우 크며, HadGEM3-RA의 기온 오차가 가장 큰 것으로 나타났다(Fig. 4b). 여름철에 기온 오차의 정도는 모델 간에 큰 차이가 없으며, 강수량 오차는 GRIMs에서 가장 크고 HadGEM3-RA에서 비교적 작을 것으로 나타났다(Fig. 4d).

Fig. 5는 기온과 강수량에 대한 겨울철과 여름철의 5개 모델 및 앙상블 평균과 관측 간 공간 변동성을 비교한 Taylor diagram (Taylor, 2001)이며, 공간 표준편차(Standardized Deviations)와 공간 상관계수(Pattern Correlation Coefficient)가 1에 가까울수록 모의 성능이

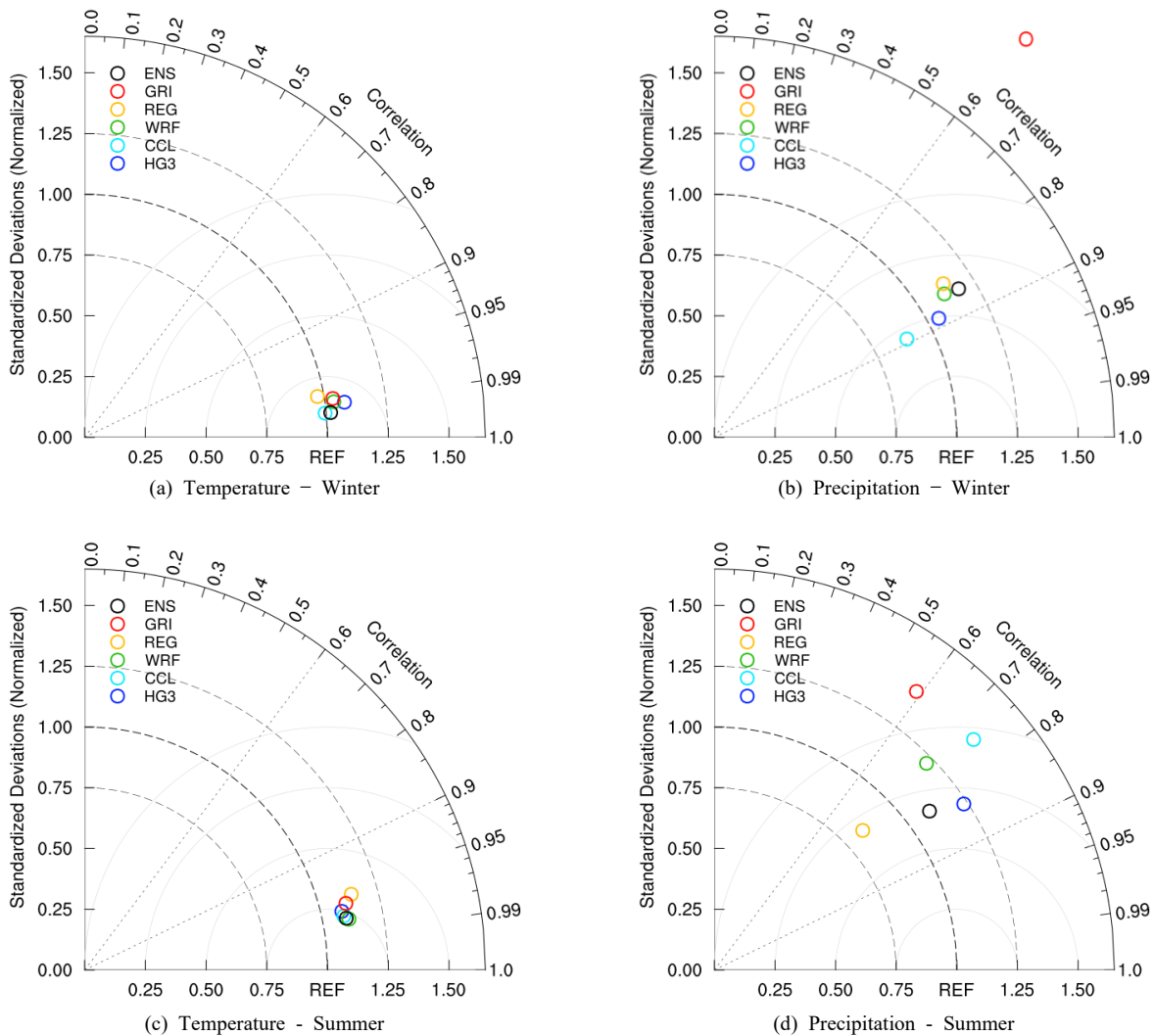


Fig. 5. Taylor diagram of temperature (left column) and precipitation (right column) in the Winter (top row), and Summer (bottom row) on East Asia region. blue: HadGEM3-RA (HG3), skyblue: CCLM (CCL), green: WRF, orange: RegCM (REG), red: GRIMs (GRI), Black: Ensemble mean (ENS)

좋은 것을 의미한다. 겨울철 기온은 모든 모델의 공간 상관계수가 0.99 이상이며, 공간 표준편차는 0.953 ~ 1.073에 분포하므로 겨울철 기온은 모델과 관측 간의 공간 패턴이 유사함을 알 수 있다(Fig. 5a). 여름철 기온의 경우, 모든 모델이 관측과 비교하여 공간 패턴이 유사할 것으로 나타났다(Fig. 5c). 겨울철 강수량의 경우, 대부분의 모델에서 공간 상관계수가 0.8 이상이고 공간 표준 편차는 0.976 ~ 1.077로 공간 패턴이 관측에 가깝지만, GRIMs는 비교적 관측과의 공간패턴에 차이가 크다 (Fig. 5b). 여름철 강수량의 공간패턴은 겨울철에 비해서

전반적으로 다소 낮은 공간패턴 모의 성능을 보인다 (Fig. 5d).

4. 동아시아 미래 기후변화 전망

4.1 기후평균 변화 전망

이 절에서는 연평균 기온과 강수량의 현재 대비 미래 변화 전망 결과를 분석하였다. Fig. 6은 5개 모델과 앙상블 평균의 현재(1995 ~ 2014년) 평균 대비 1995년부터

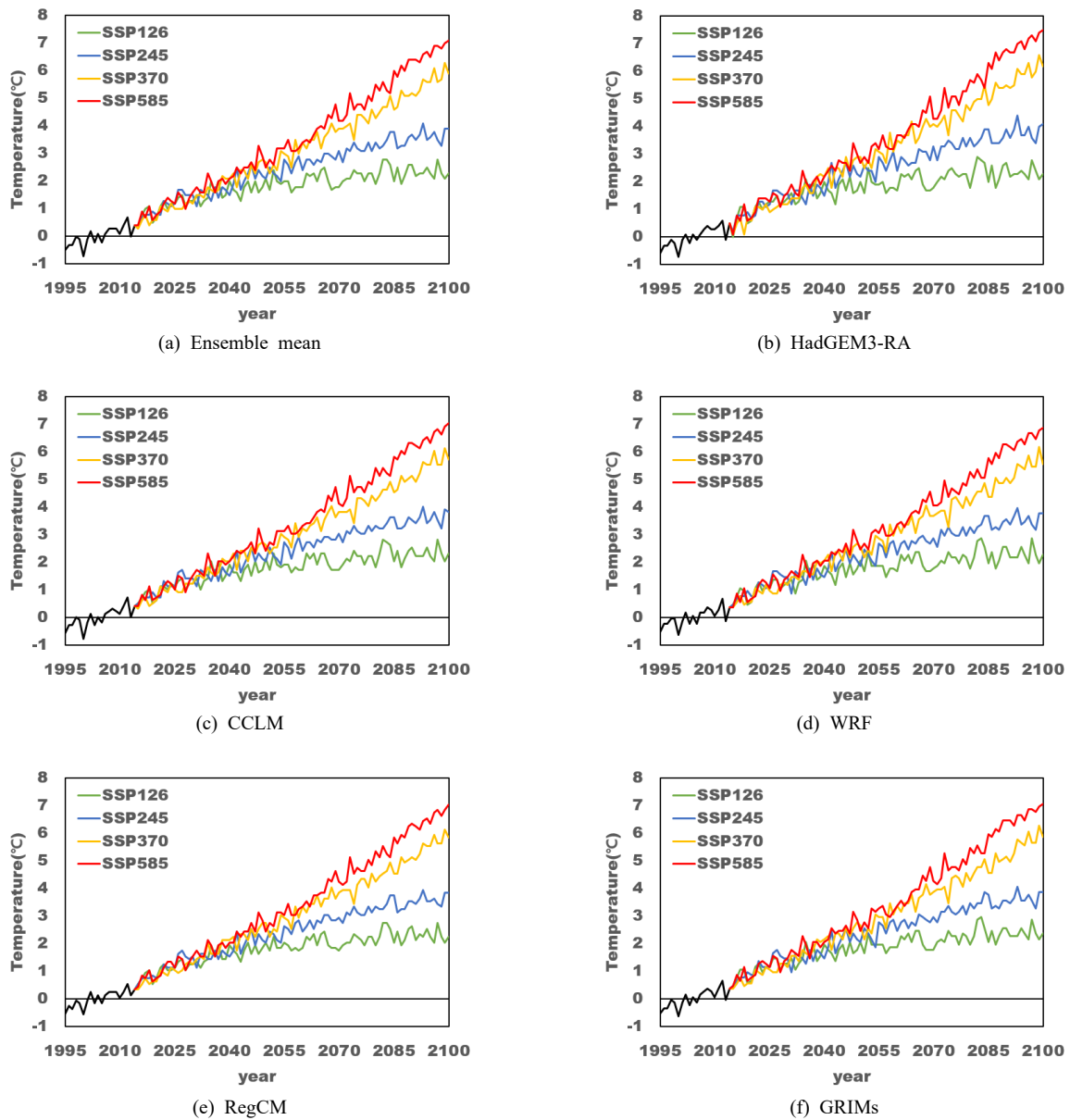


Fig. 6. Anomaly time series of annual mean temperature (°C) on East Asia from 1995 ~ 2014

Table 3. Changes in annual mean temperature and total precipitation in the future compared to the present-day (1995 ~ 2014) from MME of 5 RCM over the East Asia

Scenarios	Temperature (°C)		Precipitation (%)	
	Mid 21st century (2041 ~ 2060)	Late 21st century (2081 ~ 2100)	Mid 21st century (2041 ~ 2060)	Late 21st century (2081 ~ 2100)
SSP1-2.6	+1.8°C	+2.4°C	+4.2%	+6.7%
SSP2-4.5	+2.3°C	+3.6°C	+5.1%	+7.2%
SSP3-7.0	+2.6°C	+5.3°C	+4.4%	+10.3%
SSP5-8.5	+2.8°C	+6.2°C	+6.4%	+12.6%

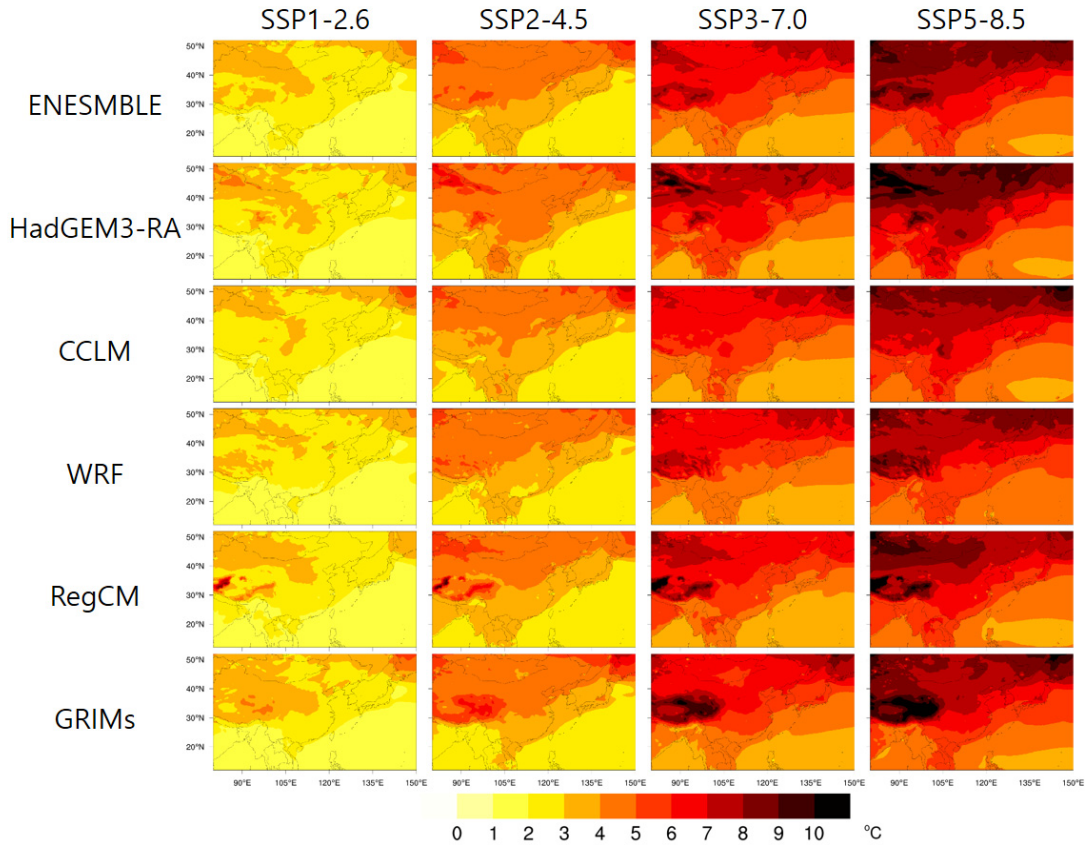


Fig. 7. Future changes of annual mean temperature (°C) between at the end of 21st century (2081 ~ 2100) and present-day (1995 ~ 2014) on East Asia region

2100년까지 동아시아의 연평균 기온의 변화를 나타내며, 미래(2015 ~ 2100년) 기간은 SSP 4종 시나리오의 결과를 제시하였다. 먼저 앙상블 평균의 기온 변화를 살펴보면 21세기 중반기(2041 ~ 2060년)에 저탄소 시나리오인 SSP1-2.6은 1.8°C 상승하고 중간단계 시나리오인 SSP2-4.5는 2.3°C 상승하며, 고탄소 시나리오인 SSP3-7.0과 SSP5-8.5는 각각 2.6°C, 2.8°C 상승할 것으로 전망된다. 21세기 후반기(2081 ~ 2100년)는 현재 대비 기온이 SSP 4종(SSP1-2.6/SSP2-4.5/SSP3-7.0/SSP5-8.5)에서 각각 2.4°C, 3.6°C, 5.3°C, 6.2°C 상승할 것으로 전망된다(Table 3). 즉, 먼 미래로 갈수록 고탄소 시나리오의 기온 상승 폭이 뚜렷하게 커지며, SSP5-8.5는 SSP1-2.6에 비해 기온 상승 폭이 최대 2.6배에 달할 것으로 전망된다. 5개 모델 중 기온 상승 폭이 가장 큰 모델은 HadGEM3-RA며, GRIMs, RegCM, CCLM, WRF 순으로 점점 기온 상승 폭이 작아진다. 21세기 후반기에 시나리오에 따른 기온 상승 폭은 HadGEM3-RA는 2.4°C ~ 6.6°C, WRF는 2.3°C ~

6.0°C로 고탄소 시나리오에서 모델 간 기온 상승 폭의 차이도 클 것으로 전망된다(Figs. 6b, d). Fig. 7은 동아시아 지역에서 21세기 후반기에 5개 모델과 앙상블 평균의 SSP 4종에 대한 기온 상승의 공간분포이다. 동아시아에서 연평균 기온 상승 폭은 주로 고위도 지역과 육상 지역, 그리고 티베트고원에서 크고 적도 서태평양에서 가장 작을 것으로 예상된다. WRF는 전체 기온 상승 폭은 가장 작으나 해양 지역의 상승 폭은 비교적 크고 HadGEM3-RA는 고위도 육상 지역에서 상승 폭이 가장 크며, GRIMs와 RegCM은 티베트고원에서 기온 상승이 매우 뚜렷할 것으로 전망된다.

다음으로 현재부터 미래까지(1995 ~ 2100년) 동아시아 평균 강수량의 연도별 변화를 살펴보았다(Fig. 8). 우선 앙상블 평균의 강수량 변화를 살펴보면 21세기 중반기에 SSP 4종(SSP1-2.6/SSP2-4.5/SSP3-7.0/SSP5-8.5)에서 각각 4.2%, 5.1%, 4.4%, 6.4% 증가하여 시나리오 간에 큰 차이가 없는 것으로 나타난다. 그러나 21세기 후반기에는

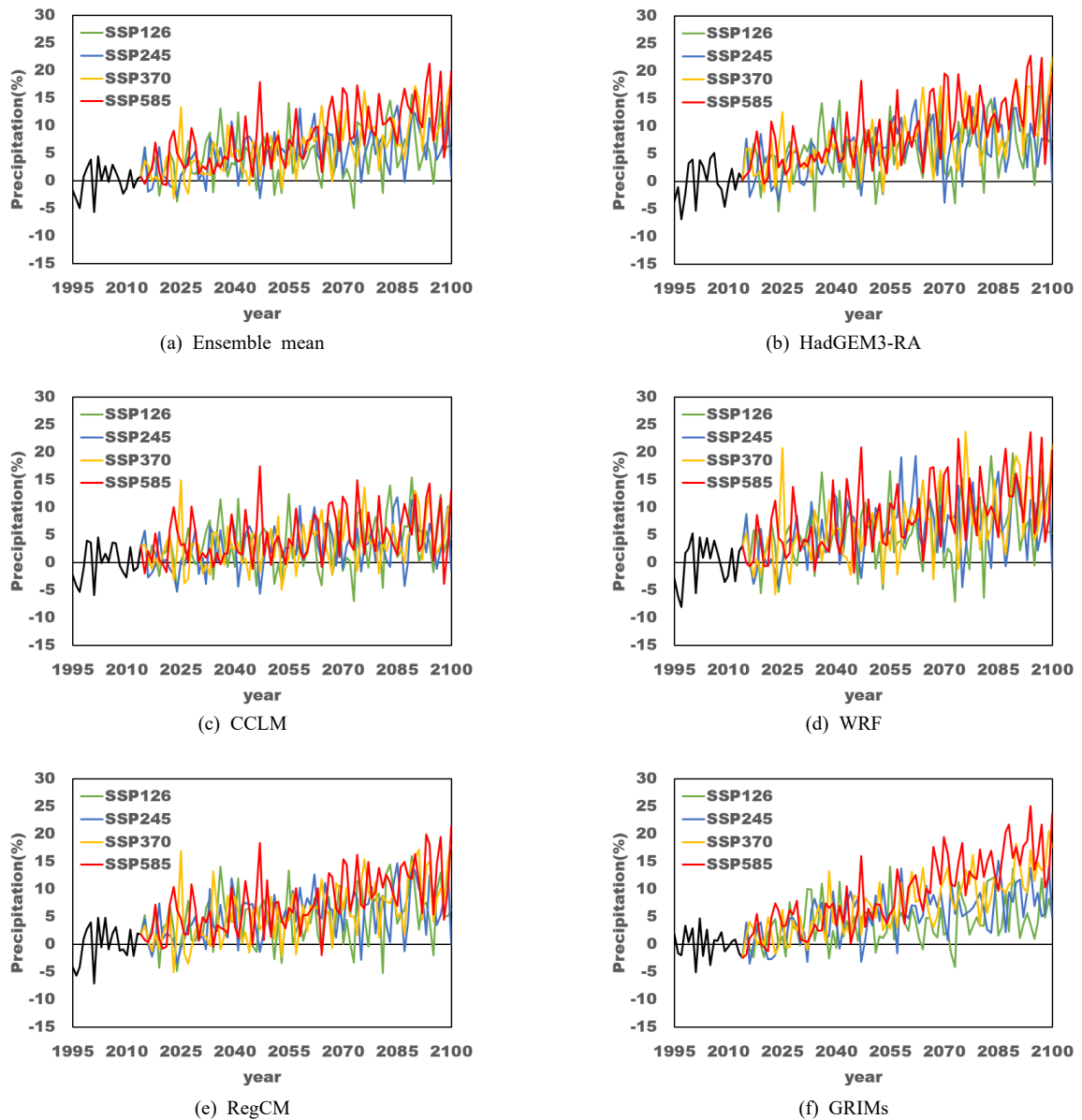


Fig. 8. Same as in Fig. 6 but for total precipitation (%)

강수량이 SSP1-2.6은 6.7% 증가하고 SSP2-4.5는 7.2% 증가하며, SSP3-7.0과 SSP5-8.5는 각각 10.3%, 12.6% 증가하여 고탄소 시나리오 위주로 급증할 것으로 전망된다(Table 3). 21세기 후반기에 SSP1-2.6과 SSP2-4.5에서는 5개 모델 간 강수량 증가율 차이가 크지 않으나 SSP3-7.0과 SSP5-8.5에서는 모델간 차이가 크다. GRIMs에서 강수량 증가율이 각각 12.5%, 16.5%로 가장 뚜렷할 것으로 전망되는 반면(Fig. 8f), CCLM은 모든 시나리오에서 강수량 증가율이 4.3 ~ 6.1%로 가장 작을 것으로 전

망된다(Fig. 8c). 21세기 후반기 강수량의 변화를 지역별로 살펴보면 동쪽보다는 서쪽에서, 해양 지역보다는 육상 지역에서 증가율이 크고 인도와 티베트고원에서도 증가율이 크게 나타났다(Fig. 9). GRIMs는 육상 지역의 강수량 증가와 해양 지역의 강수량 감소가 뚜렷하게 대비된다. 다른 모델들도 일본의 동쪽 해상과 티베트고원의 동쪽 지역, 그리고 동남아시아 지역에서 대체로 강수량 감소가 전망된다.

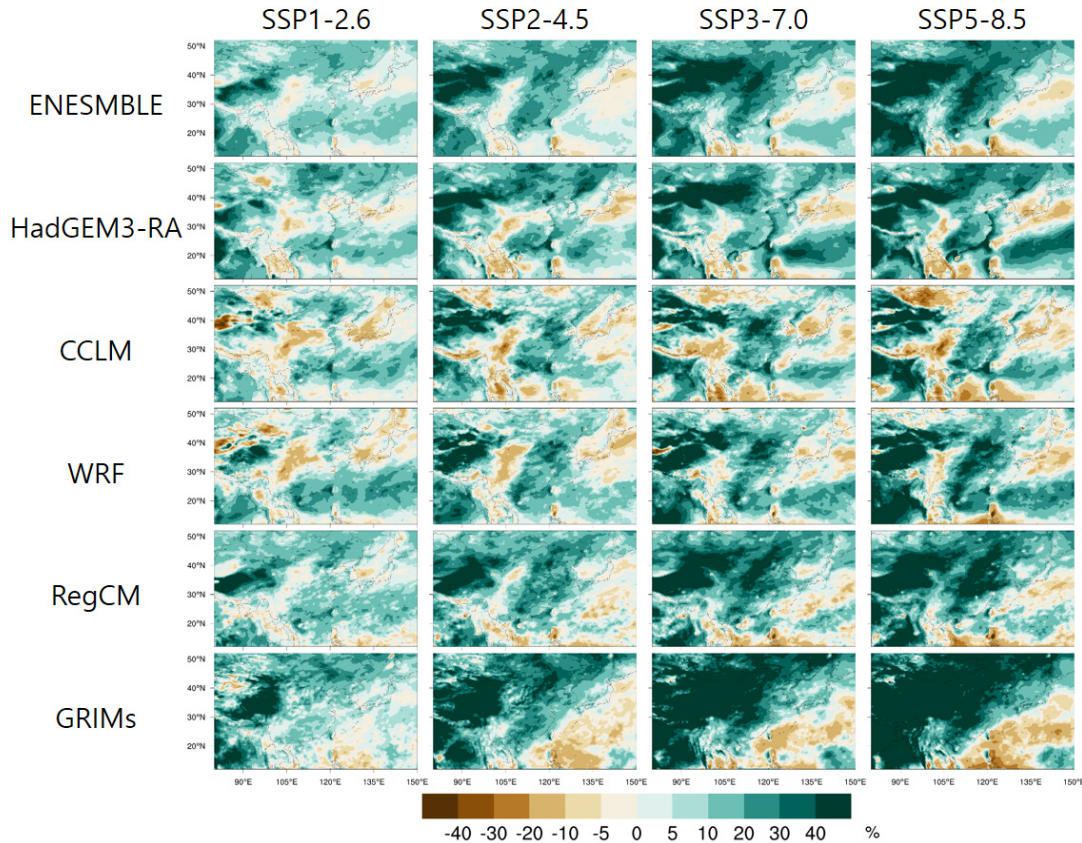


Fig. 9. Same as in Fig. 7 but for total precipitation (%)

4.2 극한기후 변화 전망

이 절에서는 극한 고온지수와 극한 저온지수, 그리고 극한 강수지수의 미래 변화에 대하여 분석하였다. Fig. 10a는 동아시아 7개 육상 지역에 대하여 극한 고온지수인 온난일(TX90p)의 현재(1995~2014년) 기간과 21세기 후반기(2081~2100년)의 편차를 나타낸다. 21세기 후반기 동아시아 TX90p는 SSP 4종(SSP1-2.6/SSP2-4.5/SSP3-7.0/SSP5-8.5)에서 앙상블 평균의 경우, 각각 35.7일, 55.3일, 80.0일, 93.3일 증가하여 고탄소 시나리오에서 비교적 뚜렷한 변화가 예상된다. 지역별로 TX90p 증가 폭을 비교하면 SEA 지역에서 가장 크고 NAS 지역에서 가장 작을 것으로 예상된다. 모델별로 TX90p 증가 폭을 비교하면 RegCM에서 가장 크게 증가하고 GRIMs에서 가장 작게 증가할 것으로 전망된다. 따라서 미래 TX90p가 가장 크게 증가하는 경우는 SSP5-8.5 시나리오, SEA 지역의 RegCM 모델이며, 예상되는 증가폭은 약 188일이다. 5개 모델의 미래 TX90p 변화의 불확실성

을 살펴보면, SAS 지역에서 모델 간 TX90p 변화 전망에 차이가 크며, JPN 지역에서는 모든 모델에서 TX90p가 유사한 폭으로 증가할 것으로 전망된다.

Fig. 10b는 동아시아 7개 육상 지역에 대하여 극한 저온지수인 한랭야(TN10p)의 현재 기간과 21세기 후반기의 편차를 나타낸다. 앙상블 평균의 21세기 후반기 동아시아 TN10p는 SSP 4종(SSP1-2.6/SSP2-4.5/SSP3-7.0/SSP5-8.5)에서 각각 23.4일, 30.5일, 34.3일, 35.2일 감소하며, 미래 고탄소 시나리오에서 TN10p는 연간 약 1.3일~2.2일 발생할 것으로 전망된다. 지역별 TN10p 감소 폭을 비교하면 해양의 영향이 강한 JPN 지역에서 감소 폭이 가장 크고 위도가 높은 NAS에서 감소 폭이 비교적 작을 것으로 전망된다. 모델별 TN10p의 감소 폭은 HG3에서 가장 크고 GRIMs에서 가장 작은 것으로 나타났다. 5개 모델의 미래 TN10p 변화의 불확실성을 살펴보면, SEA 지역은 모델 간 TN10p 변화 전망에 차이가 크며, 모든 모델에서 JPN의 TN10p가 유사한 폭으로 감소할 것으로 전망된다.

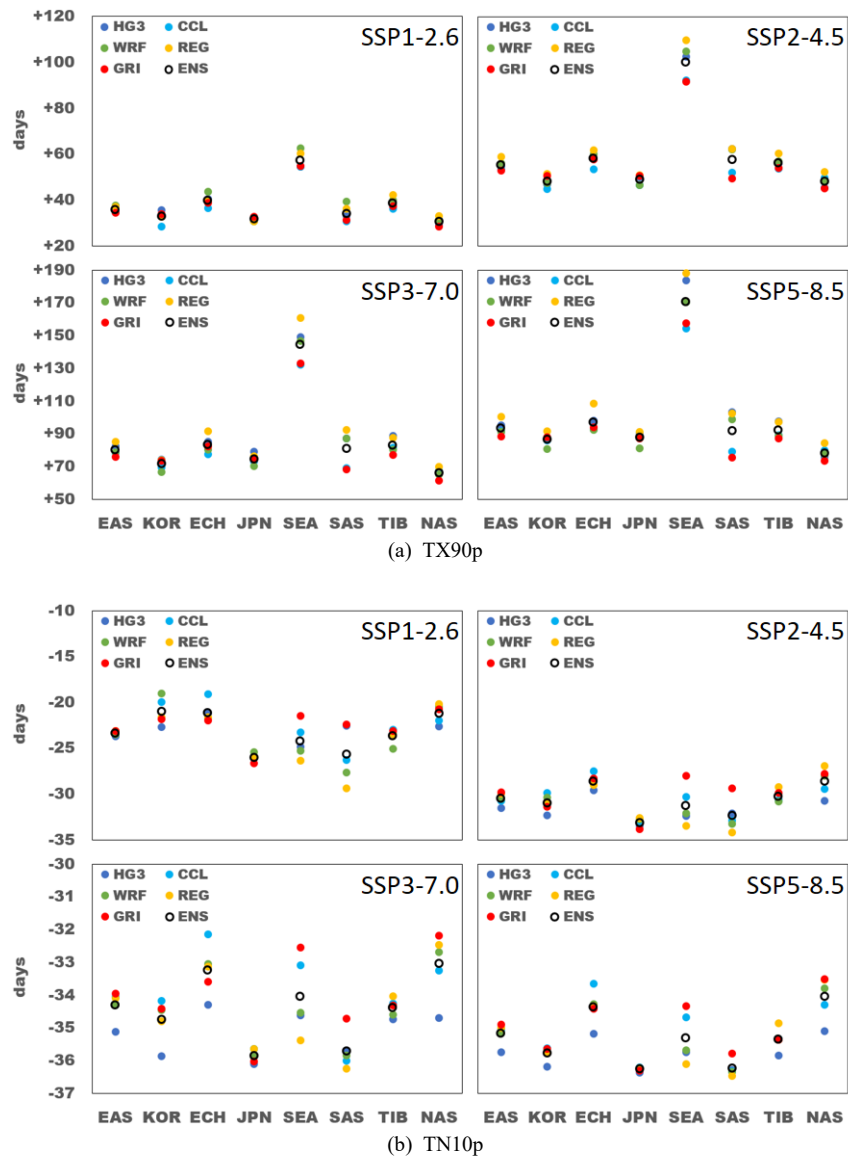


Fig. 10. Changes in temperature extreme indices between present-day (1995 ~ 2014) and late 21st century (2081 ~ 2100). In this figure, TX90p denotes warm days, and TN10p denotes cold nights. blue: HadGEM3-RA (HG3), skyblue: CCLM (CCL), green: WRF, orange: RegCM (REG), red: GRIMs (GRI), Black: Ensemble mean (ENS)

Fig. 11은 동아시아 7개 육상 지역에 대하여 극한 강수 지수의 현재 기간과 21세기 후반기의 편차이며, Fig. 11a는 극한 강수일수 지수인 상위 5% 극한강수일(R95p), Fig. 11b는 극한 강수량 지수인 1일 최다강수량(RX1D)을 나타낸다. 먼저 앙상블 평균의 R95p는 SSP 4종 시나리오 (SSP1-2.6/SSP2-4.5/SSP3-7.0/SSP5-8.5)에서 각각 1.0일, 1.6일, 2.2일 2.7일 증가하여 고탄소 시나리오에서 뚜렷한

증가가 예상된다(Fig. 11a). 지역별로 R95p의 증가 폭을 비교하면 전반적으로 TIB 지역에서 크고 JPN에서 작으며, 5개 모델별로 R95p의 증가 폭을 비교하면 강수량 증가가 뚜렷한 GRIMs에서 크고 강수량 증가율이 가장 작은 CCLM에서 가장 작은 증가 폭을 보인다. 모델 중 RegCM은 다른 모델들에 비해서 TIB에서는 R95p가 매우 크며, SEA에서는 R95p가 유일하게 감소할 것으로 전망하였다. 다음으로

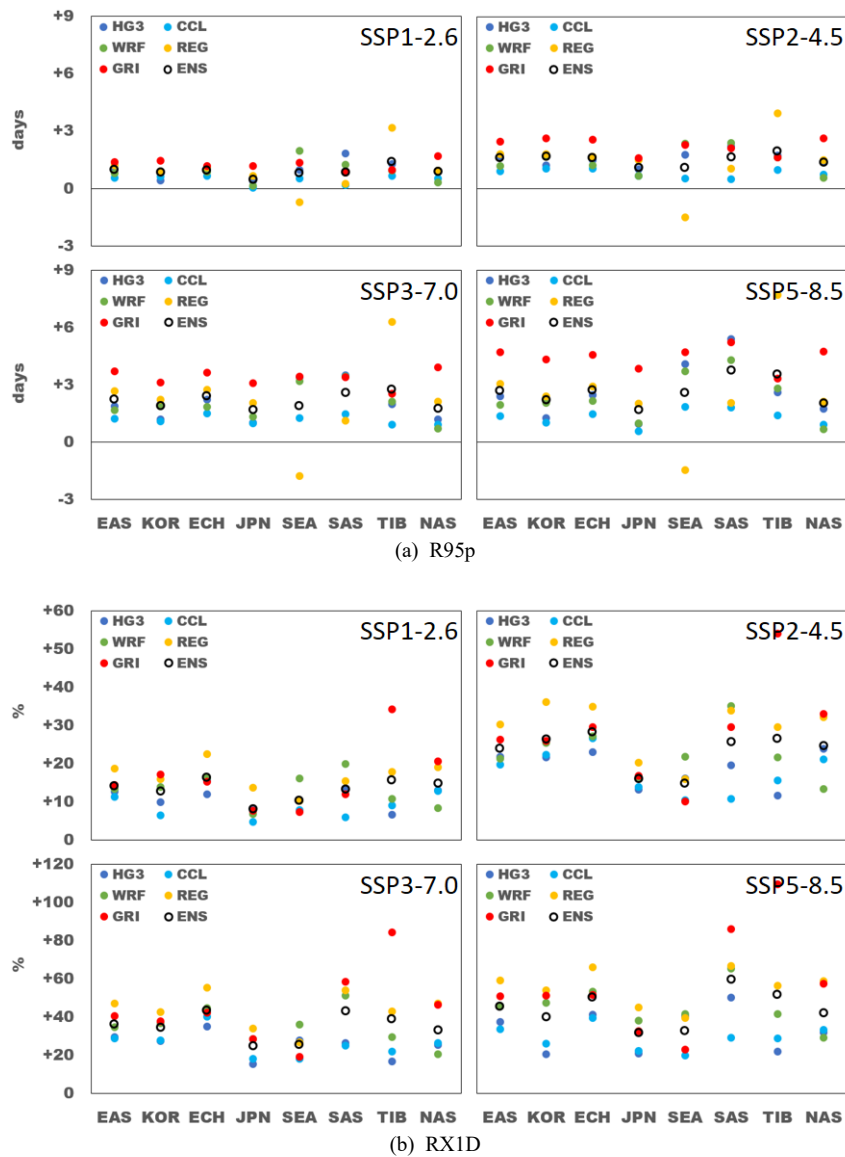


Fig. 11. Same as in Fig. 10 but for precipitation extreme indices. In this figure, R95p denotes extremely wet days, and RX1D denotes annual maximum 1-day precipitation

양상블 평균의 RX1D의 미래 변화는 동아시아에서 평균적으로 SSP 4중(SSP1-2.6/SSP2-4.5/SSP3-7.0/SSP5-8.5)에서 각각 14.1%, 23.9%, 36.0% 45.3% 증가가 전망된다(Fig. 11b). 지역별로 RX1D 증가 폭은 전반적으로 ECH 지역에서 크고 SSP5-8.5에서는 SAS 지역의 증가가 크며, JPN 지역에서 가장 작을 것으로 전망된다. 모델별로 RX1D 증가 폭을 비교하면 RegCM에서 가장 크고 CCLM에서 가장 작다. GRIMs는 TIB 지역에서 RX1D가 매우 크게 증가할 것으로 전망하고 있다.

정리하면, 동아시아 영역에 대하여 이 연구에 사용된 5개 지역 기후모델은 모든 시나리오에서 21세기 후반기에 극한 고온지수(TX90p)와 극한 강수지수(R95p, RX1D)는 증가하고 극한 저온지수(TN10p)는 감소할 것으로 전망하고 있다. 미래 극한 기후지수 전망 결과는 대체로 동아시아의 서쪽 영역인 TIB, SEA, SAS 지역에서 5개 모델 간 차이가 비교적 크며, 특히 극한 강수지수에서 이러한 특성이 두드러진다.

5. 요약 및 결론

이 연구에서는 CORDEX-동아시아 2단계 영역에 대하여 역학적 상세화를 수행한 지역 기후모델 5종(HadGEM3-RA, CCLM, WRF, RegCM, GRIMs)과 앙상블 평균의 현재 기후(1995~2014년) 모의 성능을 평가하였다. 또한 SSP 주요 4종(SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5)을 기반으로 산출된 지역 기후모델 5종과 앙상블 평균의 미래(2015~2100년) 기후변화 시나리오를 통해 동아시아의 상세한 미래 기후변화 전망 분석 결과를 제시하였다. 분석에 사용된 동아시아 전망자료의 수평해상도는 $25\text{ km} \times 25\text{ km}$ 이고 이를 수평해상도 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ERA5 재분석 자료의 격자로 내삽하여 사용하였으며, 분석 영역은 $80^\circ\text{E} \sim 150^\circ\text{E}$, $12^\circ\text{N} \sim 52^\circ\text{N}$ 이다.

주요 기후 인자인 기온과 강수량의 계절별 모의 성능평가 결과를 살펴보면 기온은 (-) 편차, 강수량은 (+) 편차가 주로 나타난다. 연평균기온의 경우 (-) 편차는 육상 지역과 북서태평양에서 뚜렷하고 (+) 편차는 동해와 인도, 인도양 및 적도태평양에서 뚜렷하며, 기후모델 중 CCLM의 기온 편차는 -0.1°C 로 기온의 모의 성능이 가장 뛰어나다. 강수량의 경우 해양 지역은 (+) 편차가 우세하고 육상 지역은 (-) 편차가 우세하며, HadGEM3-RA/WRF의 편차는 각각 $+0.27\text{ mm d}^{-1}/+0.01\text{ mm d}^{-1}$, 공간상관계수는 각각 0.88/0.81로 비교적 강수량 모의 성능이 뛰어나다. 겨울철에는 GRIMs의 (+) 강수량 편차와 RegCM의 (+) 기온 편차가 특징적이며, 여름철에는 GRIMs의 (+) 강수량 편차와 RegCM의 (-) 강수량 편차가 뚜렷하다. 계절별 공간 변동성 성능평가 결과는 기온의 경우 모든 계절에서 대체로 성능이 좋으며, 여름철 강수량의 공간 변동성 재현성은 기온에 비해 다소 떨어지는 것으로 나타났다.

미래 평균적인 기후변화 전망 결과, SSP 4종에서 현재 대비 21세기 중반기(2041~2060년) 기온 상승 폭은 $1.8^\circ\text{C} \sim 2.8^\circ\text{C}$ 이고 21세기 후반기(2081~2100년) 상승 폭은 $2.4^\circ\text{C} \sim 6.2^\circ\text{C}$ 로, 먼 미래로 갈수록 탄소 배출량에 따라 기온 상승 폭이 뚜렷하게 커진다. 미래 강수량 변화율은 21세기 중반기에 4.2%~6.4%이고 21세기 후반기에 6.7%~12.6%로 먼 미래에 고탄소 시나리오에서 변화가 더 뚜렷하다. 기온 상승의 지역별 특성은 고위도와 육상 지역에서 상승 폭이 크고 해양에서 상승 폭이 작으며, 5개 모델 중 HadGEM3-RA의 기온 상승이 가장 뚜렷하다. 강수량 증가의 지역별 특성은 동아시아 서쪽, 육상 지역에서 증가 폭이 크고 동쪽, 해양에서 증가 폭이 작으며, 5개 모델 중에서 GRIMs의 강수량 증가가 뚜렷할 것으로 전망된다.

미래 극한 기후변화 전망 결과, 동아시아 영역에 대하여 5개 모델은 모든 시나리오에서 21세기 후반기에 극한 고온지수(TX90p)는 35.7일~93.3일 증가하고 극한 저온지수(TN10p)는 23.4일~35.2일 감소한다. 극한 강수일(R95p)은 1.0일~2.7일 증가하고 극한 강수량(RX1D)은 14.1%~45.3% 증가할 것으로 전망된다. TX90p와 TN10p의 변화가 가장 뚜렷한 지역은 각각 SEA와 JPN 지역이며, R95p와 RX1D의 변화가 가장 큰 지역은 각각 TIB,와 SAS 지역으로 전망된다. 미래 극한 기후지수 전망 결과는 대체로 동아시아의 서쪽 영역인 TIB, SEA, SAS 지역에서 5개 모델 간 차이가 비교적 크며, 특히 극한 강수지수에서 이러한 특성이 두드러진다.

이 연구에서는 CORDEX-동아시아 2단계 영역의 신규 기후변화 시나리오의 현재 모의 성능평가와 미래 전망 결과를 분석하였다. 이를 통해 기후 인자별, 상세 영역별, 기후모델별, SSP 시나리오별로 상세한 현재 기후와 미래 기후변화 전망의 특성을 확인할 수 있었다. 이 결과는 향후 동아시아 기후변화 시나리오를 사용하는 연구에서 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 탄소 배출량이 기후변화에 명백하게 영향을 미치는 것을 확인하였으므로 탄소중립의 중요성을 강조하는 근거의 일환으로 사용될 수 있을 것이다.

사사

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「기상업무지원기술 개발연구」 「신기후체제 대응 기후변화시나리오 개발·평가(KMA2018-00321)」의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Choi Y-W, and Ahn J-B. 2017. Impact of Cumulus Parameterization Schemes on the Regional Climate Simulation for the Domain of CORDEX-East Asia Phase 2 Using WRF Model. *Atmosphere* 27(1): 105-118 (in Korean).
- Christensen JH, Carter TR, M. Rummukainen M, and Amanatidis G. 2007. Evaluating the performance and utility of regional climate models: the PRUDENCE project. *Climatic Change* 81: 1-6.
- Davies T, Cullen MJP, Malcolm AJ, Mawson MH,

- Staniforth A, White AA, and Wood N. 2005. A new dynamical core for the Met Office's global and regional modelling of the atmosphere. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 131: 1759-1782.
- Giorgi F, and Coauthors. 2012. RegCM4: Model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Climate Research* 52: 7-29.
- Hong S-Y, Park H, Cheong H-B, Kim J-E, Koo M-S, Jang J, Ham S, Hwang S-O, Park B-K, Chang E-C, and Li H. 2013. The Global/Regional Integrated Model system (GRIMs). *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.* 49: 219-243.
- Im E-S, Choi Y-W, and Ahn J-B. 2017. Worsening of heat stress due to global warming in South Korea based on multi-RCM ensemble projections. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 122: 11444-11461.
- IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Portner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Pean, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, p. 32.
- IPCC, 2019a: Summary for Policymakers. In: *Climate Change and Land. An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*[P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press.
- IPCC, 2019b: Summary for Policymakers. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. Weyer (eds.)]. In press.
- IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- Jo S, Ahn J-B, Cha D-H, Min S-K, Suh M-S, Byun Y-H, and Kim J-U. 2019. The Koppen-Trewartha climate-type changes over the CORDEX-East Asia phase 2 domain under 2 and 3°C global warming. *Geophys. Res. Lett.* 46: 14030-14041.
- Kim J-U, Kim T-J, Kim D-H, Cha D-H, Min S-K, and Kim Y-H. 2020. Evaluation of performance and uncertainty for Multi-RCM over CORDEX-East Asia phase 2 region. *Atmosphere* 30(4): 361-376 (in Korean).
- Kim D-H, Kim J-U, Byun Y-H, Kim T-J, Kim J-W, Kim Y-H, Ahn J-B, Cha D-H, Min S-K, and Chang E-C. 2021. Future Projection of Extreme Climate over the Korean Peninsula Using Multi-RCM in CORDEX-EA Phase 2 Project. *Atmosphere* 31(5): 607-623 (in Korean).
- Park C, Shin S-W, Kim G, Cha D-H, Min S-K, Lee D, Byun Y-H, Kim J-U. 2022. What determines future changes in photovoltaic potential over East Asia?. *Renewable Energy* 185: 338-347.
- Powers JG, Klemp JB, Skamarock WC, Davis CA, Dudhia J, Gill DO, Coen JL, Gochis DJ, Ahmadov R, Peckham SE, Grell GA, Michalakes J, Trahan S, Benjamin SG, Alexander CR, Dimego GJ, Wang W, Schwartz CS, Romine GS, Liu ZQ, Snyder C, Chen

- F, Barlage MJ, Yu W, and Duda MG. 2017. The weather research and forecasting model: Overview, system efforts, and future directions. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 98: 1717-1737.
- Rockel B, Will A, and Hense A. 2008. The regional climate model COSMO-CLM (CCLM). *Meteorol. Z.* 17: 347-348.
- Sellar AA, and Coauthors. 2019. UKESM1: Description and evaluation of the U.K. earth system model. *J. Adv. Model. Earth Sys.* 11: 4513-4558.
- Taylor KE. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research* 106: 7183-7192.