

지역기후모델들로 모의된 기온자료를 활용한 남한지역의 21세기 중반 기온변화 전망

서명석¹ · 김태준^{2*} · 안중배³ · 민승기⁴ · 차동현⁵ · 성민규⁶

¹공주대학교 대기과학과 교수

²국립기상과학원 미래기반연구부 연구원

³부산대학교 대기환경과학과 교수

⁴포항공과대학교 환경공학부 교수

⁵울산과학기술원 도시환경공학과 부교수

⁶포항공과대학교 환경공학부 박사과정

(2021년 9월 11일 접수, 2021년 9월 30일 최종 수정, 2021년 9월 30일 게재 확정)

Projection of Temperature Changes for the Mid 21st Century Using Simulated Temperature Data by Regional Climate Models over South Korea

Myoung-Seok Suh¹ · Tae-Jun Kim^{2*} · Joong-Bae Ahn³ · Seung-Ki Min⁴ · Dong-Hyun Cha⁵ · Min-Gyu Seong⁶

¹Professor, Department of Atmospheric Sciences, Kongju National University

²Researcher, Innovative Meteorological Research Department, National Institute of Meteorological Sciences

³Professor, Division of Earth Environmental System, Pusan National University

⁴Professor, Division of Environmental Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology

⁵Associate Professor, Department of Urban and Environmental Engineering, UNIST

⁶Ph. D. student, Division of Environmental Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology

(Received 11 September 2021, Revised 30 September 2021, Accepted 30 September 2021)

Abstract : We projected the temperature changes in the mid-21st century with Representative Concentration Pathway (RCP) 4.5 and RCP8.5 using the temperature data simulated by four regional climate models (RCMs: WRF, CCLM, MM5, RegCM4) in Korea. The simulation area and spatial resolution of RCMs were the CORDEX-EA (COordinated Regional Climate Downscaling Experiment-East Asia) area and 25 km, respectively. We defined the temperature change as the difference (ratio) between the average annual temperature (IAV: Interannual Variation) over the projected 25 years (2026–2050) and that over the present 25 years (1981–2005). The fact that the average annual temperature bias of the four RCMs is within $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ suggests that the RCM simulation level is reasonable in Korea. Across all RCMs, scenarios, and geographic locations, we observed increased temperatures (IAV) in the mid-21st century. In RCP4.5 and RCP8.5, 1.27°C and 1.57°C will be increased by 2050, respectively. The ensemble suggests that the temperature increase is higher in winter (RCP4.5: 1.36°C , RCP8.5: 1.75°C) than summer (RCP4.5: 1.25°C , RCP8.5: 1.49°C). Central Korea exhibited a higher temperature increase than southern Korea. A slightly larger IAV is expected in the southeastern region than in the Midwest of Korea. IAV is also expected to increase significantly in RCP4.5 (summer) than in RCP8.5 (winter).

Key Words : regional climate model, mid-21st century, South Korea, temperature change, RCP4.5/8.5

주요어 : 지역기후 모델, 21세기 중반, 남한, 기온변화, RCP4.5/8.5

*Correspondence: ktj109@korea.kr

© KU Climate Research Institute

1. 서론

현재 진행되고 있는 기록적인 지구온난화는 CO₂와 같은 온실기체들의 인위적인 증가에 의한 것임이 확실히 되고 있다(IPCC, 2007; 2014; 2021). 이러한 전 지구적인 기후변화에 대한 효율적인 적응/완화 방안을 수립하기 위해서는 미래 기후변화에 대한 상세하고 정확성이 높은 예측 정보가 필요하다. 관측 및 많은 연구에서 밝혀진 바와 같이 기후변화는 지리적 위치, 고도, 계절 그리고 기후요소에 따라 상이하게 나타나고 있다(e.g., Lee and Suh, 2000; Lee *et al.*, 2005; Cha *et al.*, 2008; Kharin *et al.*, 2012; Taylor *et al.*, 2012). 따라서 전지구적 기후변화뿐만 아니라 지역규모의 상세 기후변화 연구 또한 함께 진행되어야 한다(e.g., Grell *et al.*, 1994; Meehl *et al.*, 2000; Kimoto, 2005; Suh *et al.*, 2018).

전구 및 지역규모의 수치 및 기후모델의 모의수준은 초기 및 경계조건, 수평해상도, 모의영역, 물리과정 조합 등에 따라 적지 않은 차이를 보인다(e.g., Fundel *et al.*, 2010). 따라서 수치 및 기후모델이 가지는 불확실성을 줄이기 위한 방안으로 다양한 유형의 앙상블 기법들이 개발되어 왔다(e.g., Krishnamurti *et al.*, 1999; Kharin and Zwiers, 2002; Suh *et al.*, 2012; Kim and Suh, 2013; Seong *et al.*, 2017). 또한 지역기후모델(regional climate model, RCM)들의 모의수준이 경계조건에 많은 영향을 받기 때문에 단일경계조건보다는 다수의 경계조건을 사용하는 추세이다. 즉, 가장 이상적인 미래 전망 연구는 다수의 전구기후모델(general climate models, GCM) 자료를 다수의 RCM에 경계조건으로 처방하여 모의한 자료를 활용하는 것이다. 하지만 이 경우 방대한 양의 컴퓨팅 자원이 필요하기 때문에 대부분 제한된 수의 GCM과 RCM의 결합을

활용하고 있다.

수치 및 기후모델들의 불확실성에 따른 한계를 극복하기 위한 방법으로 다양한 앙상블 기법들이 개발되어 왔는데 이들은 주로 통계적 모형을 기반으로 하고 있으며, 각 모델들의 가중치 산출을 위해서는 상대적으로 장기간의 관측자료가 요구된다. 따라서 과거 앙상블 연구들은 주로 수치예보모델과 GCM을 이용하여 수행되어 온 반면, 상대적으로 자료의 기간이 짧은 RCM을 이용한 연구들은 미흡했다. 최근에는 컴퓨팅 자원의 발달로 다수의 RCM을 이용한 장기 적분이 가능해졌다. 일례로 다수의 RCM을 이용하여 상세 지역기후변화전망을 산출하기 위한 CORDEX(Coordinated Regional climate Downscaling Experiment, CORDEX, 2015)와 같은 국제적인 협업들이 이루어져 다중 RCM을 이용한 앙상블 연구가 가능해졌다. 지역기후모델 분야에서는 NARCCAP(North America Regional Climate Change Assessment Program, e.g., Wang *et al.*, 2009), 유럽의 PRUDENCE(Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate Change risks and Effects, e.g., Jacob *et al.*, 2007) 그리고 ENSEMBLES(ENSEMBLE-based predictions of climate changes and their impacts, van der Linden *et al.*, 2009) 등이 수행되었다.

2010년 이후의 관측자료가 IPCC 5차 평가보고서에서 전망한 기온변화보다 강하게 나타나고, 전 지구적으로 극한 기상현상의 발생 빈도 및 강도가 강해짐에 따라 근미래 기후변화에 대한 관심이 크게 증가되고 있다(Park *et al.*, 2019; Suh *et al.*, 2019; IPCC, 2021). 또한 산업혁명대비 2019년 현재 +1.09℃가 상승되었으며 +1.5℃ 상승이 10년 이상 단축될 것으로 전망되고 있다(IPCC, 2021). 우리나라의 경우 일부 연구에서 전지구 평균보다 더 강한 기온상승이 전망되고 있다(e.g., Suh *et al.*,

2016; KMA, 2020). 우리나라에서도 가속화되고 있는 지구온난화에 대한 효율적 적응 및 대비책을 수립하는데 필요한 신뢰성 높은 지역기후변화 정보를 산출하기 위해, 다수의 RCM을 활용한 연구가 활발히 수행되어 왔다(Oh *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2014; Park *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2016; Suh *et al.*, 2016; Jo *et al.*, 2019). 이들 연구의 대부분은 CORDEX에서 권장하는 모의영역, 해상도 그리고 미래기후변화 시나리오(예: RCP)를 적용하였으며 다수의 RCM을 이용하였다.

우리 삶과 생태계는 평균 및 극한 기상의 빈도/강도 변화뿐만 아니라 기후의 변동성에도 영향을 받는다. 국내 기후변화 연구에서 평균 및 극한기상의 변화에 대한 연구는 많이 수행되었으나 변동성의 변화에 대한 연구는 매우 미흡하다. 따라서 본 연구

에서는 CORDEX-EA 2단계 모의 환경 및 RCP 2중(4.5, 8.5) 시나리오 하에서 4개의 지역기후모델(Regional Climate Model 4.0, RegCM4; Weather Research and Forecasting Model, WRF; Meso-scale Model 5, MM5; Cosmo Climate version of Local Model, CCLM)로 모의된 기온자료를 이용하여 21세기 중반(2021~2050년) 한반도에서의 평균 기온 및 변동특성 변화를 전망하고자 한다.

2. 자료 및 연구방법

1) 자료

본 연구에서는 Table 1에 나타난 자료 중 현재 및 2개의 시나리오(RCP4.5, RCP8.5)에서의 기온자료

Table 1. Information of fine-scale climate change with 25 km horizontal resolution used in this study.

GCMs	RCMs	Downscaled climate change information
HadGEM2-AO	MM5 RegCM4	- Present Climate - 27 y (1979-2005) - Scenario Runs: 2 RCP (4.5, 8.5) x 95 y (2006-2100)
MPI-ESM-LR	WRF CCLM	- Present Climate - 27 y (1979-2005) - Scenario Runs: 2 RCP (4.5, 8.5) x 95 y (2006-2100)

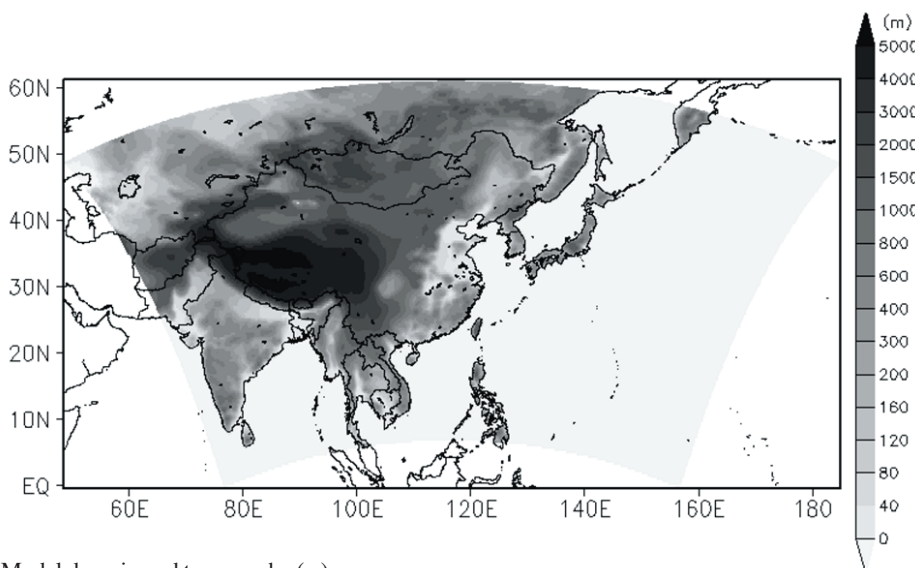


Figure 1. Model domain and topography (m).

와 한국 기상청(Korea Meteorological Administration, KMA) 관측 기온자료를 사용하였다. 특히, 한반도 지역에 대한 현재 25년(1981~2005년)과 21세기 중반 25년(2026~2050년) 기온자료를 이용했다.

지역기후 모델의 모의영역은 Figure 1에 보인 바와 같이 CORDEX-EA 2단계 영역으로 하였으며, 서쪽으로는 티벳 고원과 인도, 동쪽으로는 일본과 서태평양, 북과 남쪽으로는 각각 몽골과 남중국해를 포함하는 광대한 영역이다(Kim *et al.*, 2019; Park *et al.*, 2019). 계절에 따라 대륙과 해양의 영향을 복합적으로 받는 우리나라 기후특성을 적절히 모의할 수 있도록 모의영역을 설정하였으며 수평해상도는 CORDEX에서 권장하는 25km이다.

본 연구에서 사용한 지역기후모델은 WRF, CCLM, MM5, 그리고 RegCM4 등 4개이다. 4개 RCM들의 모의환경은 Table 2에 나타낸 바와 같다. RCM들의 모의환경 구성 및 동아시아 지역기후에 대한 모의수준은 선행 연구들을 참고할 수 있다(Jo *et al.*, 2019; Park *et al.*, 2019; Suh *et al.*, 2019).

2) 연구방법

현재 대비 미래 기후변화에 대한 전망수준의 신뢰성 향상을 위해 가장 많이 이용되는 방법은 다중 RCM과 다중 전구모델을 결합하여 모의한 다

수의 모의 자료를 이용하여 미래를 전망하는 것이다. 본 연구에서도 이러한 세계적 추세를 반영하여 Figure 2와 같이 2개의 GCM에 각각 2개의 RCM을 결합하여, 총 4개의 모의자료를 산출한 후 미래 기후변화를 전망하였다. 이때 MM5와 RegCM4는 HGA(Hadley Centre Global Environmental Model version 2, HadGEM2-AO)를 경계조건으로 하였고, WRF와 CCLM은 MEL(Max Plank Institute Earth System Model-Low Resolution, MPI-ESM-LR)를 경계조건으로 하였다. 여기서 CMIP5(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) 참여 전구모델 중 HGA와 MEL를 경계조건으로 사용한 것은 모의자료 수집이 용이한 점과 동아시아 지역 기후에 대한 모의수준이 상대적으로 우수한 점을 고려하였다(Park *et al.*, 2019). 멤버수가 많지는 않지만 한반도에서의 기온특성 변화 전망 수준 향상을 위해 모델결과의 앙상블(Multi Model Ensemble, MME)도 함께 제시하였다.

21세기 중반 RCP4.5와 RCP8.5에서의 연(계절) 평균 기온 변화는 21세기 중반 25년(2026~2050년) 평균으로부터 현재 25년(1981~2005년) 평균 기온 사이의 차로 정의했다. 평균기후변화와 함께 변동성(Standard Deviation, SD)의 변화를 분석하기 위하여 각 격자점에서의 현재(Historical run, SD_p) 대

Table 2. Detailed model configuration of four regional climate models (RCMs) used in this study.

Models	WRF	CCLM	MM5	RegCM4
Vertical levels	Eta-30	40 hybrid	σ -24	σ -23
Dynamic framework	Non-hydrostatic	Non-hydrostatic	Non-hydrostatic	Hydrostatic
PBL scheme	YSU	Davies and Turner	YSU	Holtzlag
Convective scheme	Betts-Miller-Janjic	Tiedtke	Kain-Fritsch II	MIT-Emanuel
Land surface	Noah	TERRA ML	CLM3.0	CLM3.5
Longwave radiation scheme	CAM	Ritter and Geleyn	CCM2	CCM3
Shortwave radiation scheme	CAM	Ritter and Geleyn	CCM2	CCM3
Spectral nudging	Yes	Yes	Yes	Yes
Reference	Skamarock <i>et al.</i> (2008)	Rockel <i>et al.</i> (2008)	Lee <i>et al.</i> (2004)	Giorgi <i>et al.</i> (2012)

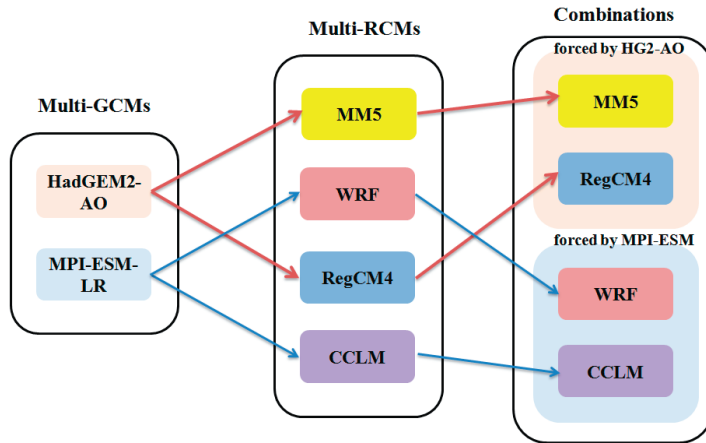


Figure 2. Combination of multi-GCMs and multi-RCMs used in this study.

비 미래(Scenario run, SD_F) 경년변동성의 비(SD_R)를 분석하였다. SD_R 이 1.0보다 크면 경년변동성이 증가됨을, 1.0보다 작으면 경년변동성이 약화됨을 의미한다.

$$SD_R = \frac{SD_F}{SD_P}$$

3. 연구결과

1) 기온에 대한 모의수준

남한지역 기온에 대한 4개 RCM들의 모의수준을 평가하기 위하여 기상청 운용 49개 관측지점에 대한 편차를 Figure 3에 제시하였다. 남한지역 기온에 대한 모의수준은 RCM 및 지리적 위치에 따라 상이하게 나타나고 있다. WRF는 전남해안지역의 기온을 약 1.0℃ 정도 과대하게 모의하고 있으나 그 외 지역에 대해서는 편차가 ±0.5℃ 이내로 양호하게 모의하고 있다. CCLM은 서부지역을 중심으로 기온을 과대하게 모의하고 있으나 전체적으로 남한지역의 연평균 기온을 매우 양호하게 모의하고 있다. 반면에 MM5와 RegCM4는 남한지역 연평균 기온을 대부분 과소하게 모의하고 있으며, 특히 RegCM4

는 평균편차가 -2.1℃ 정도로 강하게 과소모의하고 있다. 그림에는 나타내지 않았지만 여름 평균 기온의 경우 WRF와 MM5는 지리적 위치에 관계없이 편차가 ±0.5℃ 이내로 양호하게 모의한 반면, CCLM은 과대하게 그리고 RegCM4는 과소하게 모의하고 있다. 겨울 평균 기온의 경우 4개 RCM 모두가 전남해안 지역을 제외한 대부분 지역에서 과소(편차 < -1.0℃)하게 모의하고 있으며, 특히 MM5는 편차가 -4.0℃ 정도로 매우 과소모의하고 있다. 연평균, 여름 및 겨울 평균 기온에 대한 4개 RCM의 모의수준에서 보는 바와 같이 모델에 따라 적지 않은 차이를 보이고 있다.

2) 연평균 기온의 변화

Figure 4는 1981년부터 2050년까지 한반도 지역에서의 연평균, 여름 평균 그리고 겨울 평균 기온에 대해 각 모델의 아노말리 시계열을 RCP4.5와 8.5에 대해 나타낸 것이다. 기온의 아노말리 산출은 현재 25년(1981~2005년) 평균 기온을 기준으로 하였다. 현재기후 모의(Historical run) 특성상 RCM들이 현재기온의 경년변동을 적절히 모의하지는 못하지만, 현재 기온의 변화패턴은 적절히 모의하고 있다. 하지만 모의기간이 21세기 중반으로 갈수록 모델

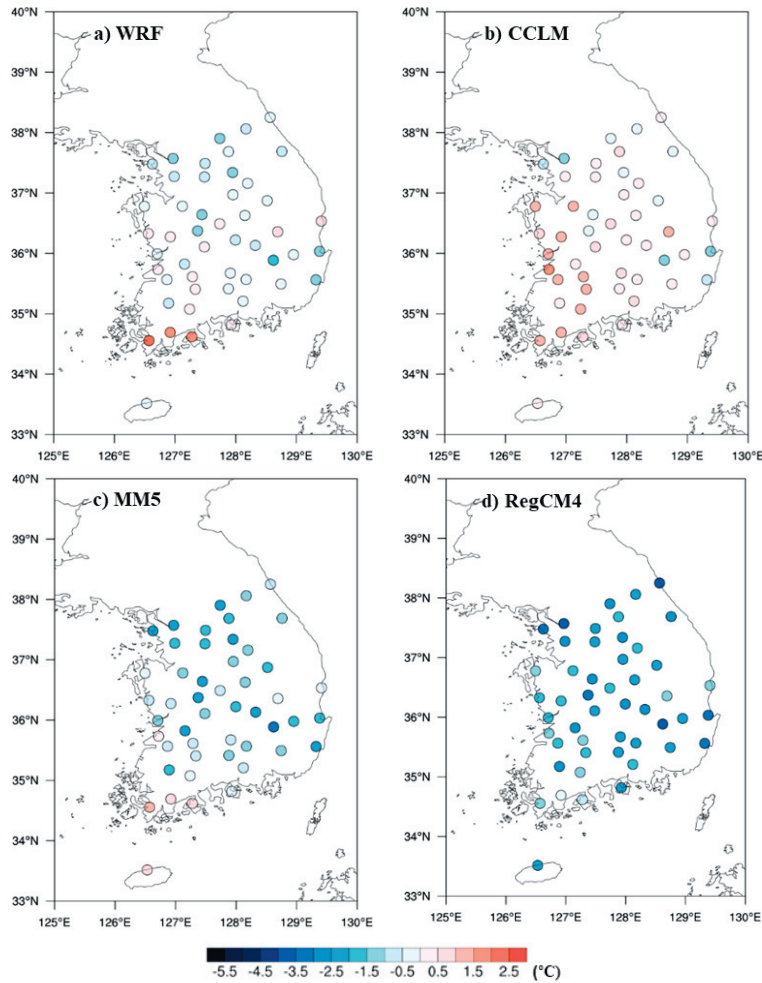


Figure 3. Spatial distribution of bias of annual mean air temperature between each four RCMs and KMA observation data.

에 따라 편차가 커지고 있으며 특히 RCP4.5에서는 MM5가 다른 모델들에 비해 기온의 증가를 매우 과대($\sim 5^{\circ}\text{C}$)하게 모의하고 있다. RCP8.5에서는 모델 간 아노말리 차가 현저히 작아지고 있으나 RCP4.5에서 연평균 기온을 과대하게 모의하였던 MM5는 여전히 연평균 기온을 다른 모델들보다 과대($\sim 4^{\circ}\text{C}$)하게 모의하고 있다.

경년변동성이 상대적으로 크게 나타난 한반도 여름 평균 기온에 대한 RCM 들의 모의수준이 매우 다양하게 나타나고 있다. 또한 RCP4.5에서 RCP8.5보다 RCM 간 편차 및 경년변동성이 크게 나타나

고 있는데 특히 2020년부터 2045년까지 매우 크게 나타나고 있다. RCP4.5에서는 MM5와 RegCM4가 경년변동성을 강하게 모의한 반면, RCP8.5에서는 MM5와 CCLM이 강하게 모의하고 있다. 또한, 2026년부터 2050년 동안 MEL을 경계조건으로 한 WRF와 CCLM보다 HGA를 경계조건으로 한 MM5와 RegCM4에서 RCP8.5 대비 RCP4.5의 한반도 여름 평균 기온 상승을 더 크거나 비슷하게 모의하여(WRF - RCP4.5: 0.93°C , RCP8.5: 1.18°C , MM5 - RCP4.5: 2.95°C , RCP8.5: 2.23°C , CCLM - RCP4.5: 1.08°C , RCP8.5: 1.46°C , RegCM4 -

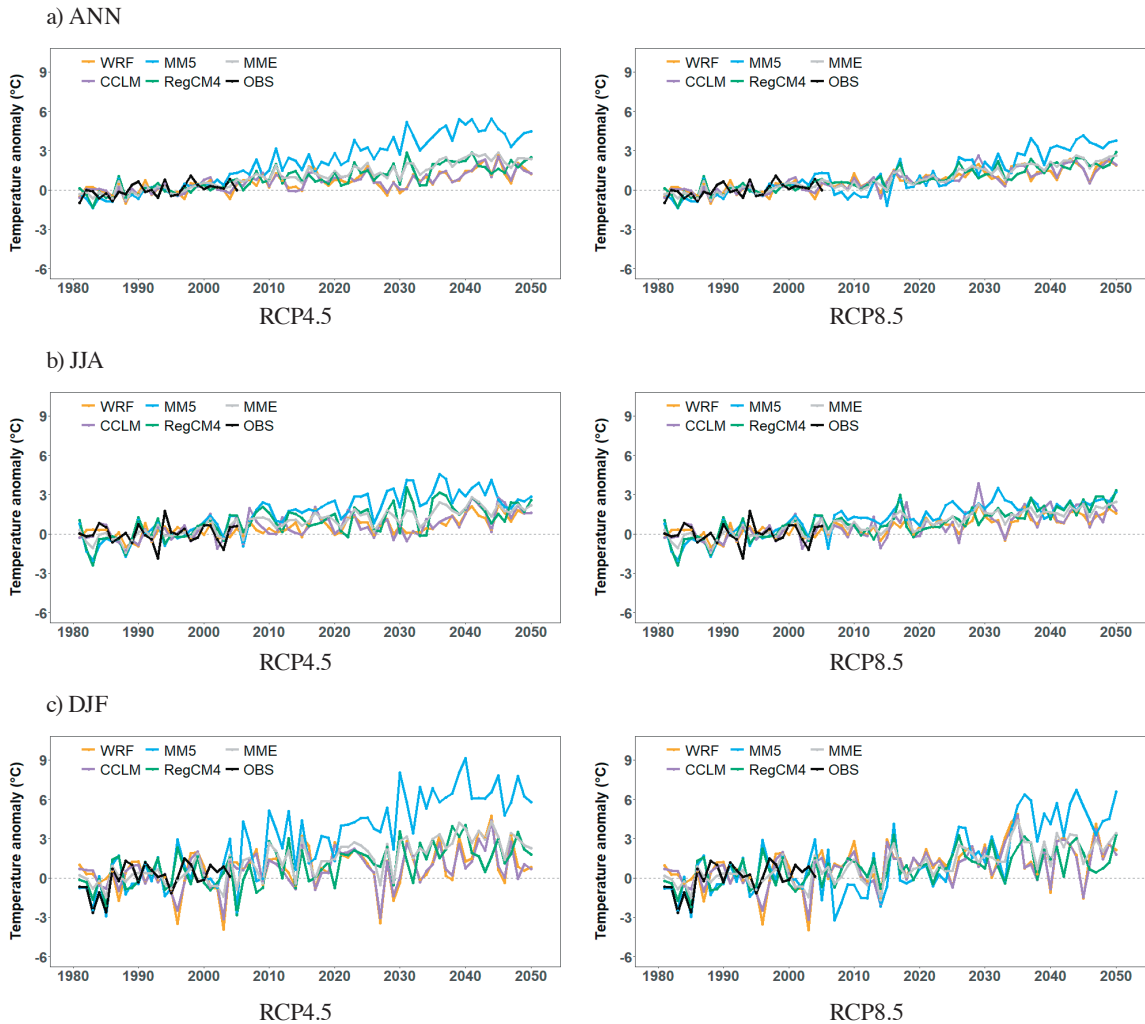


Figure 4. Time series of annual, summer, and winter temperature anomalies ($^{\circ}\text{C}$) simulated by four RCMs with observation during 1981-2050 for the RCP4.5 and RCP8.5.

RCP4.5: 1.75°C , RCP8.5: 1.82°C), RCP4.5에 비해 RCP8.5에서 한반도 여름 평균 기온 상승이 작을 것으로 전망된다(4개 RCM MME - RCP4.5: 1.68°C , RCP8.5: 1.67°C). 한반도 겨울 평균 기온은 연평균 및 여름 평균 기온보다 더욱 상승될 것으로 전망되고 있다. 특히, MM5는 미래 기간(2006년~) 겨울 평균 기온이 다른 모델들에 비해 매우 높게 상승될 것으로 전망하였고, 21세기 중반에는 최대 9°C 상승될 것으로 전망하였다. 연평균, 여름 평균 및 겨울

평균 기온에서 WRF와 CCLM은 매우 유사한 특징을 보인다. 연평균, 여름 및 겨울 평균의 시계열에서 MM5의 모의 특성이 다른 3개 모델결과와 큰 차이를 보일 뿐만 아니라 기온상승이 비상식적(특히 RCP4.5)이어서 이후 분석에서는 MM5의 모의결과를 제외하고 3개 모델의 모의결과에 대해서만 분석을 하였다.

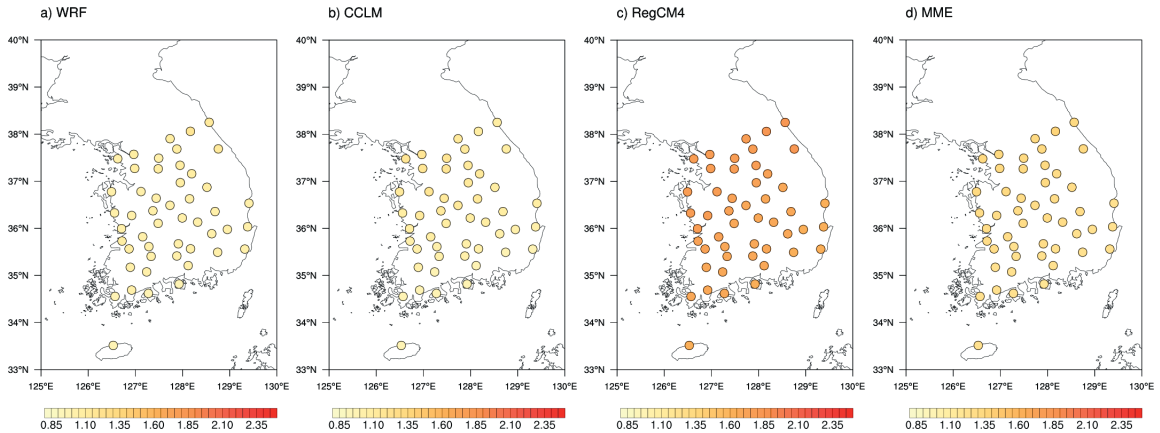
Figure 5는 현재 25년(1981~2005년) 대비 RCP 시나리오(RCP4.5/8.5) 별 21세기 중반(2026~2050

년) 연평균 기온 변화를 나타낸 것이다. RCP4.5에서는 21세기 중반 연평균 기온 변화가 지역 및 모델에 관계없이 매우 유사하게 나타나고 있다. MEL를 경계조건으로 한 WRF와 CCLM의 경우 대부분의 지역에서 기온이 약 1°C 증가될 것으로 전망하였고, HGA를 경계조건으로 한 RegCM4는 약 1.7°C 상승될 것으로 전망하였다. 각 모델 및 앙상블 평균에서 보는 바와 같이 남부지역보다 중부지역에서 기온상승이 강할 것으로 전망된다. RCP8.5에서도 RCP4.5와 유사하게 21세기 중반 연평균 기온 상승은 지역 및 모델에 따라서 차이가 거의 없다.

WRF와 CCLM은 약 1.5°C, RegCM4는 약 1.7°C의 상승을 전망하고 있다. RCP4.5 시나리오와 비교할 때, WRF와 CCLM은 약 0.5°C 높은 상승을 그리고 RegCM4는 유사한 상승을 전망하고 있다. RCP8.5에서도 제주 및 남부 해안 지역보다 중부지역에서 연평균 기온의 상승이 다소 높을 것으로 전망된다.

기후변화와 함께 관심을 가져야 할 것이 기후의 변동성 변화이다. Figure 6은 3개의 RCM으로 모의한 현재 25년(1981~2005년) 연평균 기온의 경년변동성과 21세기 중반(2026~2050년) 연평균 기온의 경년변동성의 비를 RCP 시나리오별로 나타낸 것이

A) RCP4.5



B) RCP8.5

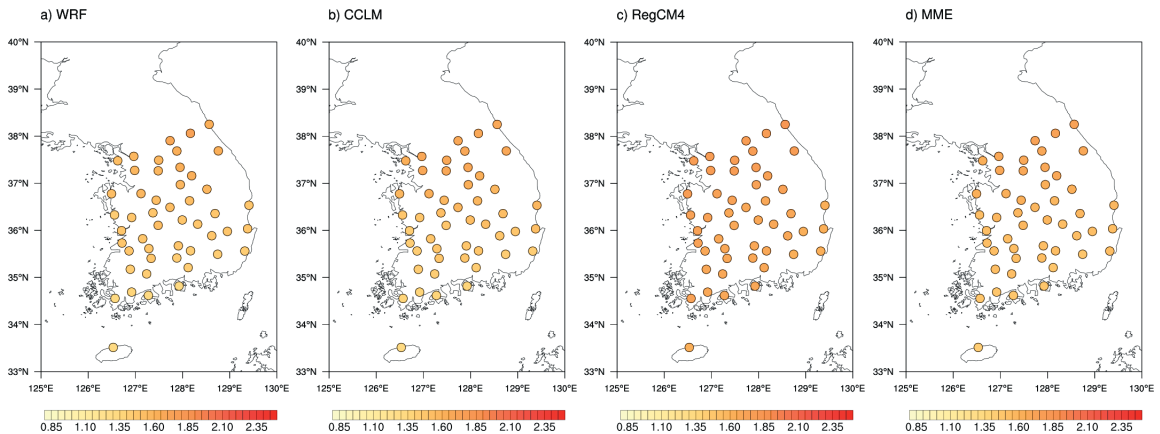
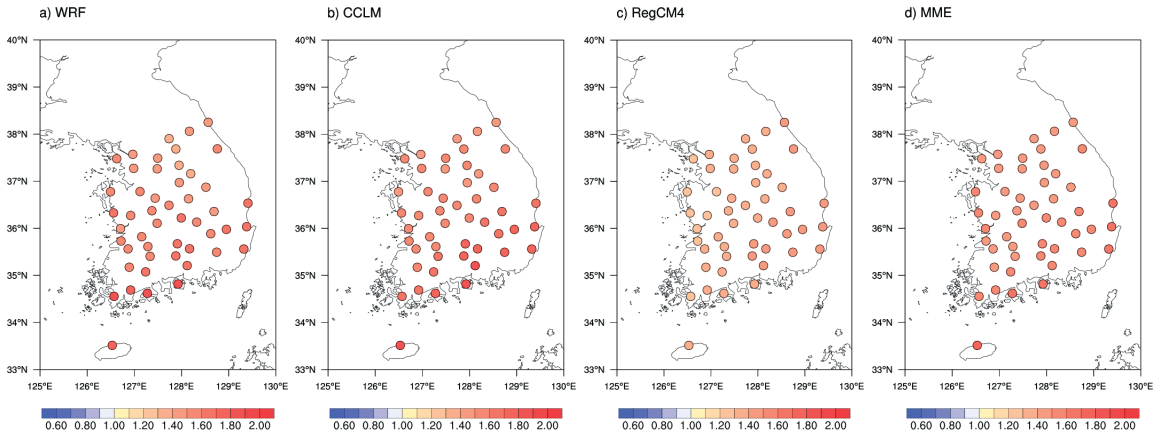


Figure 5. Spatial distribution of the difference between the mid-21C (2026-2050) and present period (1981-2005) for annual temperature (°C).

다. RCP4.5에서 WRF는 21세기 중반에 연평균 기온의 경년변동성이 중부지역과 남부지역에서 각각 약 30~40% 그리고 50% 이상 증가될 것으로 전망하고 있다. 특히, 전남 지역 및 제주 지역에서는 연평균 기온의 경년변동성이 70~80% 이상 증가될 것으로 전망하였다. CCLM도 WRF와 유사하게 경년변동성이 증가될 것으로 전망하였는데, 특히 남부 해안지역에서는 70~80% 이상 증가될 것으로 전망하였다. RegCM4는 대부분의 지역에서 연평균 기온의 경년변동성이 30~40% 증가될 것으로 전망하였고, 충남 서해안 지역에서는 20% 증가될 것으로

전망하였다. 기온상승과 반대로 변동성은 중부보다 남부에서 더 강하게 증가될 것으로 전망하고 있다. RCP8.5 시나리오에서는 RCP4.5와 매우 다른 공간분포를 보이고 있다. WRF는 21세기 중반에 연평균 기온의 경년변동성이 남한 전체에서 약 10~20% 증가될 것으로 전망하였다. CCLM은 경년변동이 태백산맥을 경계로 서쪽지역에서는 약 30~40%, 동쪽지역에서는 20% 증가될 것으로 전망하였다. RegCM4는 전체적으로 연평균 기온의 경년변동성이 약하게 (10~20%) 증가될 것으로 전망하고 있는데, 강원 지역에서는 10% 감소될 것으로 전망하였다. 기온상

A) RCP4.5



B) RCP8.5

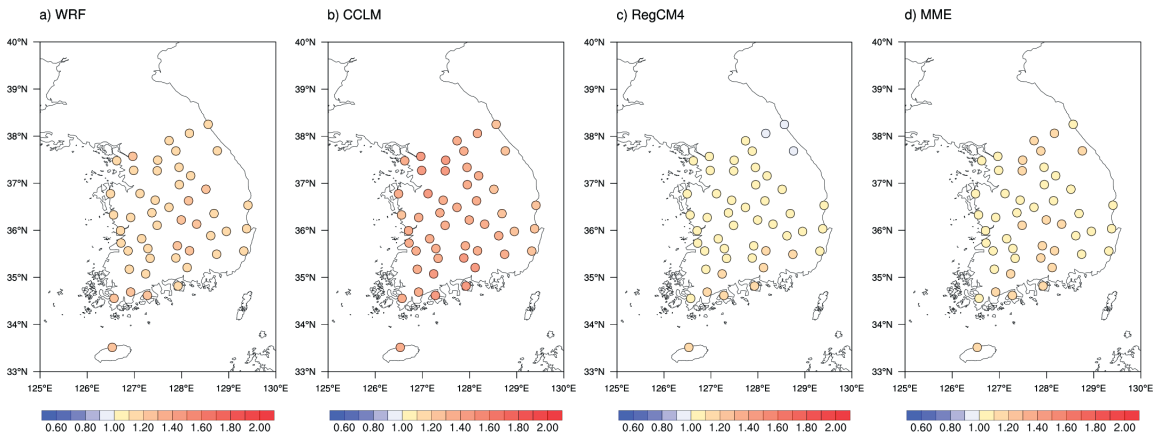


Figure 6. Spatial distribution of the mid-21C (2026-2050) variance to present period (1981-2005) ratio for annual temperature (°C).

승과 다르게 기온변동성은 RCP4.5에 비해 RCP8.5에서 증가 강도와 공간 차가 모두 약하다.

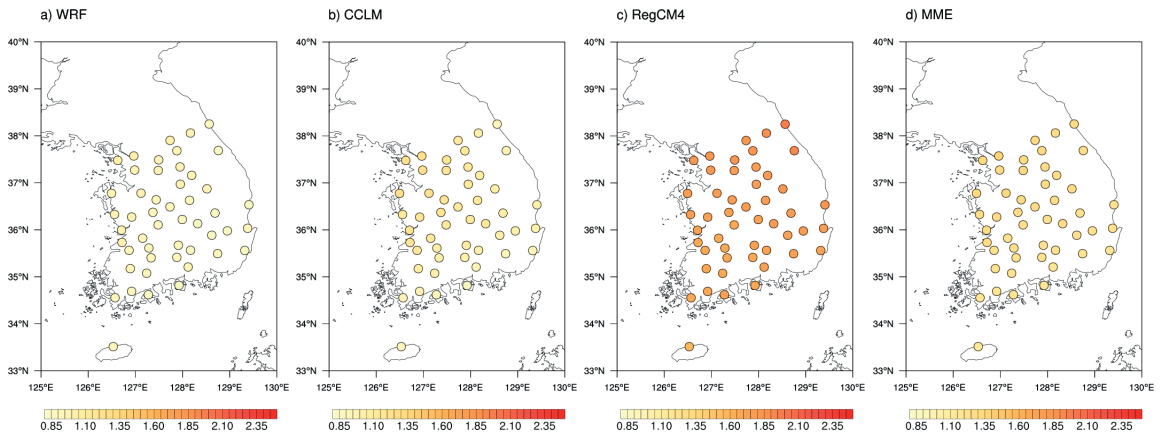
3) 여름 평균 기온의 변화

Figure 7은 Figure 5와 같이 21세기 중반(2026~2050년) 여름 평균 기온의 변화를 나타낸 것이다. RCP4.5에서는 연평균 기온과 유사하게 지역에 관계없이 여름 평균 기온의 상승패턴은 유사하게 나타나고 있다. 하지만 RCM에 따라서는 차이가 있는데 WRF는 약 0.9℃, CCLM은 약 1℃가 상승될 것으로 전망한 반면, RegCM4는 약 1.7℃ 상승될 것

으로 전망하였다. RCP8.5에서도 RCP4.5에서와 같이 지역에 따라 여름 평균 기온의 상승의 차이는 크지 않았으나 모델에 따라서는 차이가 있다. 또한 RCP4.5 시나리오 대비 여름 평균 기온의 상승폭도 모델에 따라 상이하게 나타나고 있는데, WRF는 약 1.17(RCP4.5: 0.9)℃, CCLM은 약 1.46(1.0)℃, 그리고 RegCM4는 약 1.8(1.7)℃ 상승될 것으로 전망하였다. RCP4.5와 RCP8.5 모두에서 남부지역보다 중부지역에서 여름 평균 기온 상승이 클 것으로 전망된다.

3개 RCM으로 모의한 21세기 중반(2026~2050

A) RCP4.5



B) RCP8.5

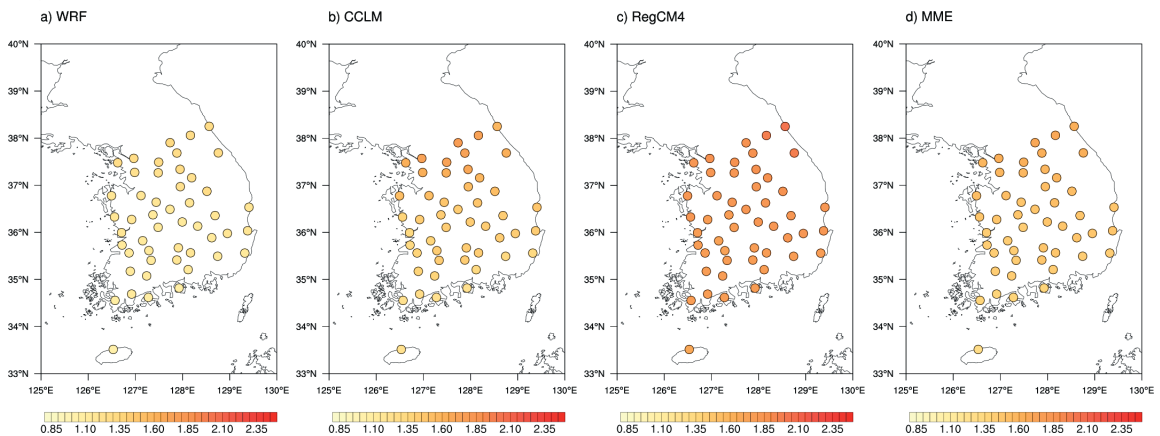
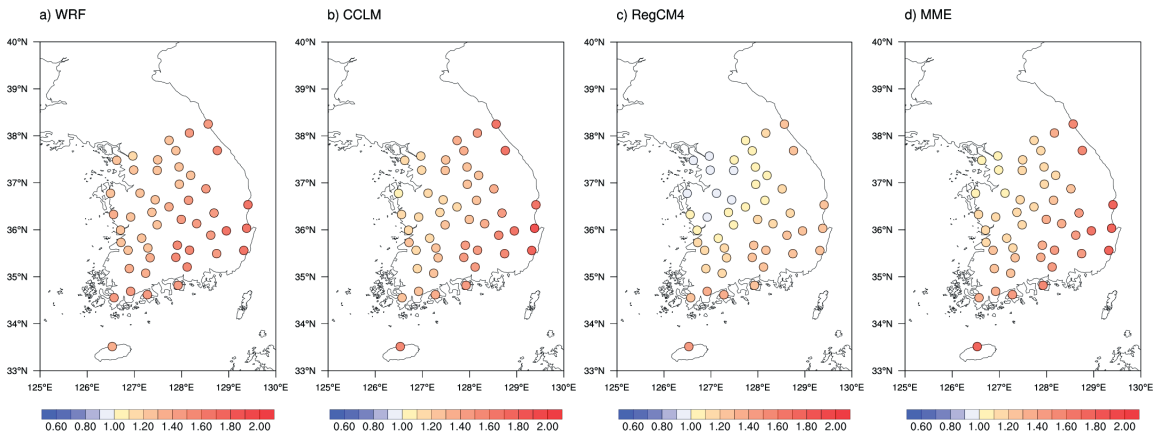


Figure 7. Same as Figure 5, but for summer temperature (°C).

년) 여름 평균 기온의 경년변동성 변화를 RCP 시나리오(RCP4.5/8.5) 별로 분석하였다(Figure 8). RCP4.5에서 WRF 및 CCLM은 21세기 중반 여름 평균 기온의 경년변동이 모든 지역(특히 태백산맥 동쪽 지역)에서 증가(30~40%)될 것으로 전망하였고, RegCM4는 경기 및 충청 일부지역에서 감소(10~20%)를, 다른 지역에서는 증가(20~30%)를 전망하였다. 또한, 모델에 관계없이 동해안 및 영남 지역에서 여름 평균 기온의 경년변동성이 크게 증가될 것으로 전망하였다. RCP8.5 시나리오에서 WRF는 RCP4.5에서와 유사한 변화패턴을 보

였으나, 증가폭은 낮게 전망하였다. CCLM은 중부 및 전라도 지역에서 RCP4.5보다 경년변동성이 더욱 증가될 것으로 전망하였으나, 경상도 해안 지역에서는 RCP4.5보다 작게 증가될 것으로 전망하였다. RegCM4는 RCP4.5에서와 다르게 모든 지역에서 여름 평균 기온의 경년변동성이 약 25% 감소될 것으로 전망하였고, 특히 경기 및 충청 지역에서 크게 감소될 것으로 전망하였다. RCP4.5에서는 3개 RCM이 대부분 지역에서 여름 평균 기온의 변동성이 증가될 것으로 일관성 있게 전망하였으나, RCP8.5에서는 모델에 따라 차이가 커서 변동성 변

A) RCP4.5



B) RCP8.5

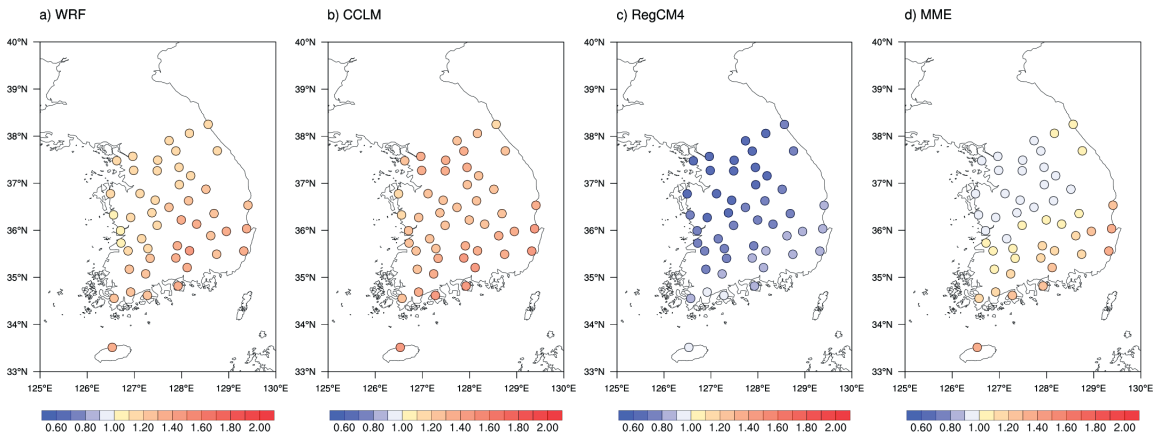


Figure 8. Same as Figure 6, but for summer temperature (°C).

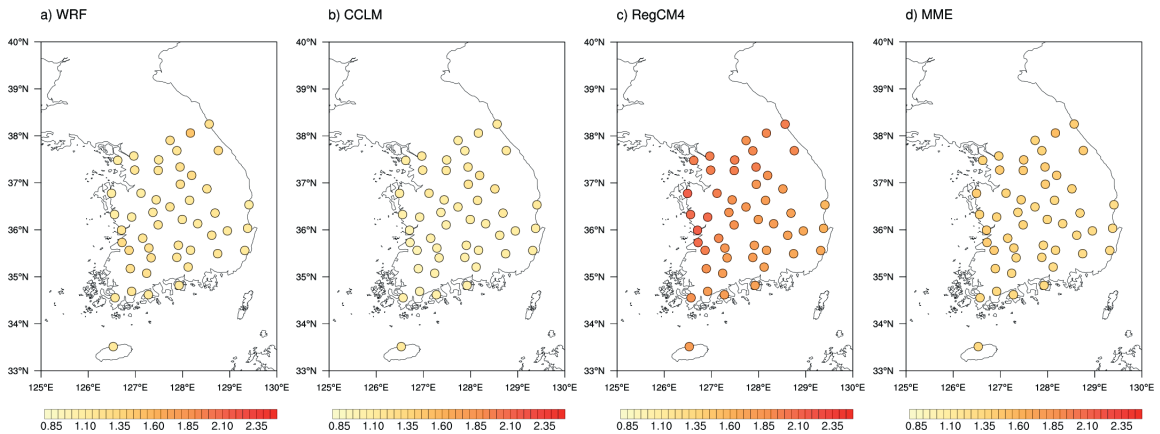
화를 전망하기가 쉽지 않다. 여름 평균 기온의 변동성은 시나리오 및 모델에 관계없이 중서부 지역보다 남동부지역에서 크게 증가될 것으로 전망된다.

4) 겨울 평균 기온의 변화

Figure 9는 3개 RCM으로 21세기 중반 겨울 평균 기온의 변화를 전망한 것이다. 여름 평균 변화 전망에서와 같이 시나리오 및 RCM에 관계없이 겨울 평균 기온도 전국적으로 상승이 전망되고 있다. 하지만 시나리오 및 RCM에 따라서 겨울 평균 기온의 상승에 차이가 있다. RCP4.5 시나리오에서

WRF, CCLM, 그리고 RegCM4는 각각 약 1.1°C, 약 1.0°C, 그리고 약 1.7°C의 상승을 전망한다. RCP4.5 보다는 작지만 RCP8.5에서도 겨울 평균 기온 상승이 RCM에 따라 차이를 보인다. WRF는 약 1.96°C 상승을 전망하여 RCP4.5 보다 0.85°C 높은 전망치를 보였는데, 이것은 연평균 및 여름 기온의 상승(약 1°C)보다 높은 값이다. CCLM은 약 1.75°C 상승을 전망하여 RCP4.5 보다 약 0.75°C 높은 전망치이다. RegCM4는 약 1.5°C 상승할 것으로 전망하였는데 이것은 RCP4.5보다 약 0.3°C 작은 값이다. RCP8.5에서 겨울 평균 기온 상승은 RCP4.5와 다르

A) RCP4.5



B) RCP8.5

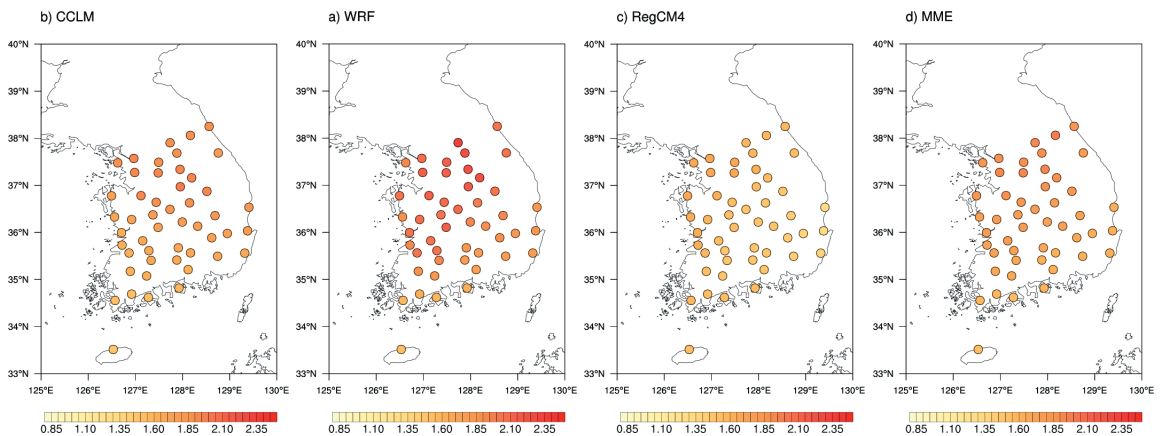


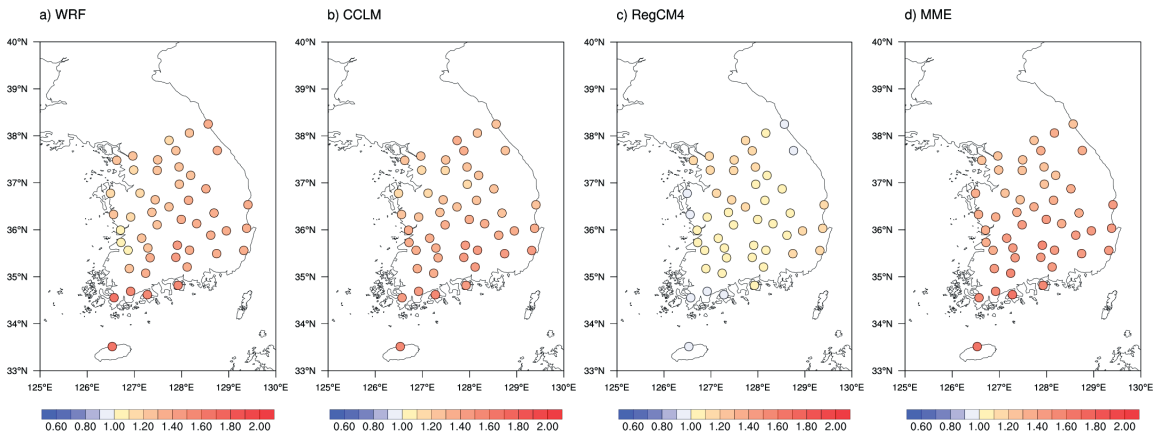
Figure 9. Same as Figure 5, but for winter temperature (°C).

계 RegCM4보다 WRF와 CCLM에서의 기온상승이 강하게 나타나고 있다. 겨울 평균 기온도 모델 및 시나리오에 관계없이 남부지역보다 중부지역에서 약 0.3℃ 이상 강한 상승이 전망된다.

Figure 10은 3개 RCM으로 모의한 21세기 중반(2026~2050년) 겨울 평균 기온의 경년변동성 변화를 RCP4.5와 8.5에 대해서 나타낸 것이다. RCP4.5에서 21세기 중반 겨울 평균 기온의 경년변동성은 지리적 위치, RCM 및 앙상블 기법에 관계없이 약 30% 정도 증가될 것으로 전망되나, 변화 강도는 RCM에 따라 다르다. WRF는 21세기 중반 겨울 평

균 기온의 경년변동성이 전라도 남해안 및 제주에 서는 약 50~70%, 그 외 지역에서는 30~40% 증가 될 것으로 전망하였다. CCLM은 36°N를 경계로 이 북지역에서는 30%, 이남지역에서는 30~50% 증가 될 것으로 전망하였다. RegCM4는 지리적으로 차이는 있으나 다른 모델보다 작은 10~20% 수준의 증가를 전망하였다. RCP8.5에서도 겨울 평균 기온의 경년변동성 변화 패턴이 RCM에 따라 상이하게 나타나고 있다. WRF는 RCP4.5에서와 유사한 변화패턴을 전망하였는데 전체적으로 변동성의 증가를 작 게 전망했을 뿐만 아니라 충청 및 전라도 일부 지역

A) RCP4.5



B) RCP8.5

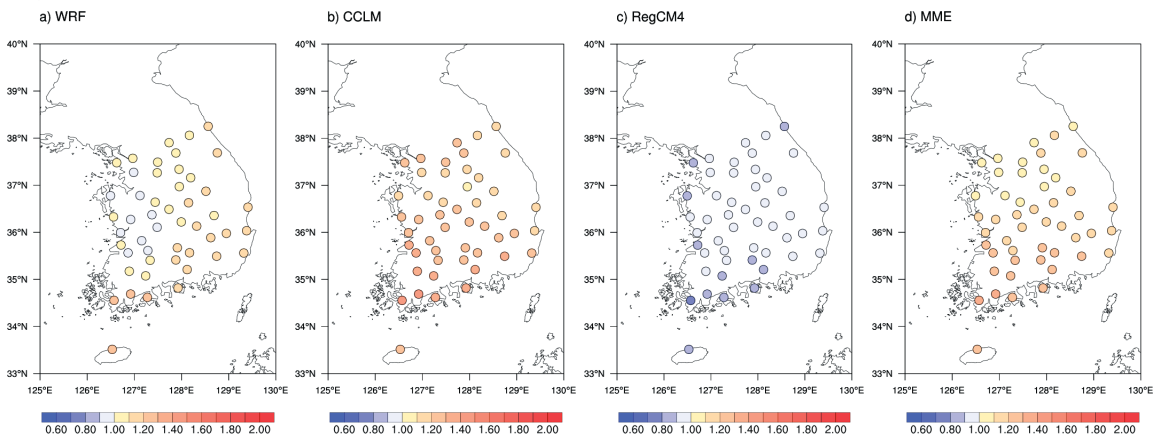


Figure 10. Same as Figure 6, but for winter temperature (°C).

에서는 경년변동성이 약 10% 감소될 것으로 전망하였다. CCLM은 전라남도 지역에서 다른 지역들(10~30%) 보다 높은 증가를 전망하였다(최대 50% 이하). RegCM4는 다른 모델들과 상이하게 경년변동성이 약 8% 감소될 것으로 전망하였는데, 경기와 충청 해안 지역에서는 20%, 전라도 남해안 및 제주 지역에서는 최대 30%까지 감소될 것으로 전망하였다. 결과적으로 양상블에서 보는 바와 같이 RCP4.5보다 RCP8.5에서 기온변동성이 약하게 증가될 것으로 보인다. 또한 기온의 상승과 반대로 변동성은 두 시나리오 모두 남부지역에서 강하게 증가될 것으로 전망된다.

Table 3은 현재 25년(1981~2005년) 대비 21세기 중반(2026~2050년) 기온의 차이를 계절, 모델, 그리고 RCP 시나리오 별로 나타낸 것으로 모든 결과는 유의수준 5%에서 유의하게 나타났다. 연평균 기온의 경우 WRF와 CCLM은 RCP4.5(1.04, 1.07)℃보다 RCP8.5(1.49, 1.52)℃에서 강한 상승을 전망한 반면, RegCM4는 두 시나리오 모두에서 상대적으로 강한 상승(RCP8.5: 1.70℃, RCP4.5: 1.71℃)을 전망하고 있다. 한반도 여름 평균 기온에서도 3개 RCM들은 RCP4.5보다 RCP8.5에서 강한 기온상승을 전망하고 있다. 두 시나리오 모두에서 기온상승 크기는 RegCM4에서 가장 크나 시나리오간 차

이는 CCLM에서 가장 크게 나타나고 있다. 한반도 겨울 평균 기온에서도 WRF와 CCLM은 유사한 상승전망을 보였고, RegCM4는 1.85℃ 증가할 것으로 전망하여 연평균 및 여름 평균에 비해 강하게 상승될 것으로 전망하였다. RCP8.5에서는 WRF와 CCLM이 RCP4.5보다 더 강한 상승을 전망하였으나(WRF: 1.96℃, CCLM: 1.75℃), RegCM4는 오히려 0.3℃ 낮게 상승될 것으로 전망하였다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 우리나라에서의 21세기 중반 기온변화 특성을 알아보기 위하여 4개 RCM(WRF, CCLM, MM5, RegCM4)로 모의한 현재(1981~2005년) 및 21세기 중반(2026~2050년) 25년 기온 자료를 이용하였다. RCM의 모의영역은 CORDEX-EA 영역으로 하였고 해상도는 25km이다. 미래기후 변화 시나리오는 RCP4.5 및 8.5로 하였으며 경제조건으로는 CMIP5 참여 전구모델 중 HadGEM2-AO(MM5, RegCM4)와 MPI-ESM-LR(WRF, CCLM)를 이용하였다. 여기서 21세기 중반 기온변화는 21세기 중반 25년(2026~2050년) 평균에서 현재 25년(1981~2005년) 평균의 차를 의미하고 변동

Table 3. Difference of domain averaged temperature (°C) between the mid-21C (2026-2050) and present period (1981-2005) for South Korea according to the RCP4.5 and RCP8.5.

Season	Scenario	RCMs			
		WRF	CCLM	RegCM4	MME
ANN	RCP4.5	1.04	1.07	1.71	1.27
	RCP8.5	1.49	1.52	1.70	1.57
JJA	RCP4.5	0.93	1.08	1.75	1.25
	RCP8.5	1.18	1.46	1.82	1.49
DJF	RCP4.5	1.17	1.07	1.85	1.36
	RCP8.5	1.96	1.75	1.53	1.75

성의 변화는 현재 25년 경년변동성에 대한 미래 25년 경년변동성의 비를 의미한다.

연평균 기온에 대한 4개 RCM들의 모의수준을 기상청 관측 기온자료로 검증한 결과 지리적 위치와 경계조건에 따라서 모의수준이 상이하게 나타났으나, 전체적으로 편차가 $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ 이내로 나타나 우리나라 기온변화 전망에 활용될 수 있음을 보였다. 하지만 HadGEM2-AO를 경계조건으로 한 MM5의 모의결과(특히, RCP4.5)가 21세기 중반 기온을 비정상적으로 높게 전망하여 미래기온 변화 분석에서는 제외하였다. 우리나라에서 21세기 중반에는 RCM, 시나리오 및 지리적 위치에 관계없이 기온이 상승되는 것으로 전망된다. 연평균의 경우 RCP4.5와 RCP8.5에서 각각 1.27°C 와 1.57°C 의 상승이 전망된다. 3개 모델 앙상블(MME)로 보았을 때 우리나라에서 21세기 중반 기온은 시나리오에 관계없이 여름(RCP4.5: 1.25°C , RCP8.5: 1.49°C)보다 겨울(1.36°C , 1.75°C)에, 계절에 관계없이 RCP4.5(여름: 1.25°C , 겨울: 1.36°C)보다 RCP8.5(여름: 1.49°C , 겨울: 1.75°C)에서 더 큰 상승이 전망된다. 지리적으로는 시나리오에 관계없이 한반도 남부지역보다는 중부지역에서 기온 상승이 강하게 발생할 것으로 전망되었다. 경년변동성의 경우 RCM, 지리적 위치, 시나리오 및 계절에 따라 매우 다양하게 나타났으나 시나리오 및 계절에 관계없이 대부분 지역에서 경년변동성이 증가될 것으로 전망되었다. 시나리오 및 모델에 관계없이 주로 한반도 중서부지역보다 남부-동부지역에서 경년변동성의 증가가 강하게 발생할 것으로 전망되었다. 또한 모든 계절에서 RCP8.5보다 RCP4.5에서 경년변동성의 강한 증가가 전망되었다. 계절적으로는 시나리오에 관계없이 겨울보다 여름에 경년변동성이 강하게 증가될 것으로 전망되었다. 또한 기온상승은 지리적 위치, 계절 및 시나리오에 관계없이 HadGEM2-AO를 경계조건으로 한 RegCM4에서 강하게 전망한 반면

(RCP8.5에서의 겨울 제외), 기온의 변동성은 MPI-ESM-LR를 경계조건으로 한 WRF와 CCLM에서 강하게 전망하고 있다.

본 연구에서는 우리나라에서 21세기 중반 기온 변화 특성을 전망하기 위하여 2개 전구모델을 경계조건으로 한 4개 RCM 자료를 이용하였다. 하지만 MM5의 모의에 이상이 있어서 단지 3개 모델 결과만으로 변화를 전망하였다. RCM들의 모의수준은 이미 잘 알려진 바와 같이 경계조건, 모의영역, 물리과정 조합 및 해상도 등 다양한 조건들에 많은 영향을 받는다. 따라서 보다 신뢰성 높은 기온변화 전망을 위해서는 다수의 전구모델과 RCM의 결합의 모의자료를 이용한 앙상블 전망이 필요하다.

사사

본 연구는 “기후변화 감시·예측 및 국가정책 지원 강화사업”의 일환으로 “KMI2020-01410(기후 및 기후변화 감시·예측정보 응용 기술개발)”의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Cha, D. H., Lee, D. K., and Hong, S. Y., 2008, Impact of boundary layer processes on seasonal simulation of the East Asian summer monsoon using a regional climate model, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 100(1), 53-72.
- CORDEX, 2015, *CORDEX Domains for Model Integrations (updated 23/06/15)*, World Climate Research Programme, 16p.
- Fundel, F., Walser, A., Liniger, M. A., Frei, C., and Appenzeller, C., 2010, Calibrated precipitation forecasts for a limited-area ensemble forecast system using reforecasts, *Monthly Weather Re-*

- view, 138(1), 176-189.
- Giorgi, F., Coppola, E., Solmon, F., Mariotti, L., Sylla, M. B., Bi, X., Elguindi, N., Diro, G. T., Nair, V., Giuliani, G., Turuncoglu, U. U., Cozzini, S., Güttler, I., O'Brien, T. A., Tawfik, A. B., Shalaby, A., Zaakey, A. S., Steiner, A. L., Stordal, F., Sloan, L. C., and Brankovic, C., 2012, RegCM4: model description and preliminary test over multiple CORDEX domains, *Climate Research*, 52, 7-29.
- Grell, G. A., Dudhia, J., and Stauffer, D. R., 1994, *Description of the Fifth Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5)*, Tech. Rep. TN-398+STR, NCAR, Boulder, Colorado, 121.
- IPCC, 2007, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution 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., and Miller, H. L., Eds.], Cambridge University Press, Cambridge, 996p.
- IPCC, 2014, *Climate Change, 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, Pachauri, R. K., and Meyer, L. A. (eds.)], IPCC, Geneva, Switzerland, 151p.
- 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., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., and Zhou, B. (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- Jacob, D., Barrington, L., Christensen, O. B., Christensen, J. H., Castro, M., Deque, M., Giorgi, F., Hagemann, S., Hirschi, M., Jones, R., Kjellström, E., Lenderink, G., Rockel, B., Sanchez, E., Schar, C., Seneviratne, S. I., Somot, S., Ulden, A., and Hurk, B., 2007, An inter-comparison of regional climate models for Europe: model performance in present-day climate, *Climatic Change*, 81(1), 31-52.
- Jo, S., Ahn, J. B., Cha, D. H., Min, S. K., Suh, M. S., Byun, Y. H., and Kim, J. U., 2019, The Köppen-Trewartha climate-type changes over the CORDEX-East Asia phase 2 domain under 2 and 3°C global warming, *Geophysical Research Letters*, 46(23), 14,030-14,041.
- Kharin, V. V. and Zwiers, F. W., 2002, Climate Predictions with Multimodel Ensembles, *American Meteorological Society*, 15(7), 793-799.
- Kharin, V. V., Zwiers, F. W., Zhang, X. B., and Wehner, M., 2012, Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP5 Ensemble, *Climatic Change*, 119(2), 345-357.
- Kim, C. and Suh, M. S., 2013, Prospects of using Bayesian model averaging for the calibration of one-month forecasts of surface air temperature over South Korea, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 49(3), 301-311.
- Kim, G., Cha, D. H., Lee, G., Jin, C. S., Lee, D. K., Suh, M. S., Ahn, J. B., Min, S. K., Hong, S. Y., and Kang, H. S., 2016, Impact of horizontal resolution on precipitation simulation over South Korea with multi regional climate models, *Journal of Climate Research*, 11(2), 169-181 (in Korean with English abstract).
- Kim, T. J., Suh, M. S., and Chang, E. C., 2019, Prospect of climate changes for the mid and late 21st century using RegCM4.0 over CORDEX East Asian region, *Atmosphere*, 29(2), 1-17 (in Korean with English abstract).
- Kimoto, M., 2005, Simulated change of the East Asian circulation under the global warming scenario, *Geophysical Research Letters*, 32(16), L16701.

- KMA, 2020, *Climate Change Forecast Report on the Korean Peninsula 2020*, National Institute of Meteorological Research, 38p (in Korean).
- Krishnamurti, T. N., Kishtawal, C. M., LaRow, T., Bachiochi, D., Zhang, Z., Williford, E., Gadgil, S., and Surendran, S., 1999, Improved weather and seasonal climate forecasts from multimodel superensemble, *Science*, 285(5433), 1548-1550.
- Lee, D. K. and Suh, M. S., 2000, Ten-year east asian summer monsoon simulation using a Regional Climate Model (RegCM2), *Journal of Geophysical Research*, 105(22), 29565-29577.
- Lee, D. K., Cha, D. H., and Choi, S. J., 2005, A sensitivity study of regional climate simulation to convective parameterization schemes for 1998 East Asian summer monsoon, *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 16(5), 989-1015.
- Lee, D. K., Cha, D. H., and Kang, H. S., 2004, Regional climate simulation of the 1998 summer flood over East Asia, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 82(6), 1735-1753.
- Lee, J. W., Hong, S. Y., Chang, E. C., Suh, M. S., and Kang, H. S., 2014, Assessment of future climate change over East Asia due to the RCP scenarios downscaled by GRIMs-RMP, *Climate Dynamic*, 42(3-4), 733-747.
- Meehl, G. A., Zwiers, F., Evans, J., Knutson, T., Mearns, L., and Whetton, P., 2000, Trends in extreme weather and climate events: issues related to modeling extremes in projections of future climate change, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(3), 427-436.
- Oh, S. G., Suh, M. S., Cha, D. H., and Choi, S. J., 2011, Simulation skills of RegCM4 for regional climate over CORDEX East Asia driven by HadGEM2-AO, *Journal of Earth Science Society*, 32(7), 732-749 (in Korean with English abstract).
- Park, C., Cha, D. H., Kim, G., Lee, G., Lee, D. K., Suh, M. S., Hong, S. Y., Ahn, J. B., and Min, S. K., 2019, Evaluation of summer precipitation over Far East Asia and South Korea simulated by multiple regional climate models, *International Journal of Climatology*, 40(4), 2270-2284.
- Park, C., Min, S. K., Lee, D., Cha, D. H., Suh, M. S., Kang, H. S., Hong, S. Y., Lee, D. K., Baek, H. J., Boo, K. O., and Kwon, W. T., 2015, Evaluation of multiple regional climate models for summer climate extremes over East Asia, *Climate Dynamics*, 46(7-8), 2469-2486.
- Rockel, B., Will, A., and Hense, A., 2008, The regional climate model COSMO-CLM (CCLM), *Meteorologische Zeitschrift*, 17(4), 347-348.
- Seong, M. G., Suh, M. S., and Kim, C., 2017, Intercomparison of prediction skills of ensemble methods using monthly mean temperature simulated by CMIP5 Models, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 53(3), 339-351.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., and Powers, J. G., 2008, *A description of the Advanced Research WRF Version 3*, In NCAR Tech 15 Note NCAR/TN-475+STR., 113p.
- Suh, M. S., Kim, T. J., and Chang, E. C., 2019, Future projections of climate changes in extreme temperature over South Korea for the mid and late 21C using RegCM4.0 simulations over CORDEX East Asia, *Journal of Climate Research*, 14(2), 1-26 (in Korean with English abstract).
- Suh, M. S., Oh, S. G., and Kim, T. J., 2018, Simulation skills of RegCM4 for diurnal variations of temperature and precipitation over South Korea according to the boundary conditions, *Journal of Climate Research*, 13(1), 51-69 (in Korean with English abstract).
- Suh, M. S., Oh, S. G., Lee, D. K., Cha, D. H., Choi, S. J., Jin, C. S., and Hong, S. Y., 2012, Development of new ensemble methods based on the performance skills of regional climate models over South Korea, *Journal of Climate*, 25(20),

- 7067-7082.
- Suh, M. S., Oh, S. G., Lee, Y. S., Ahn, J. B., Cha, D. H., Lee, D. K., Hong, S. Y., Min, S. K., Park, S. C., and Kang, H. S., 2016, Projection of high resolution climate change for South Korea using multiple-regional climate models based on four RCP scenarios. part 1: surface air temperature, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 52(2), 151-169.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., and Meehl, G. A., 2012, An overview of CMIP5 and the experiment design, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485-498.
- van der Linden, P., Mitchell, J. F., Murphy, J., Collins, M., Doblas-Reyes, F., Palmer, T., Royer, J. F., Roeckner, E., Cubasch, U., Hollweg, H. D., Johns, T., May, W., van Vuuren, D., Christensen, J. H., Rummukainen, M., Lenderink, G., Goodess, C. M., Jacob, D., Déqué, M., Gutiérrez, J. M., Huth, R., Kendon, E., Leckebusch, G. C., Lorenz, P., Pavan, V., Dong, B., Dufresne, J. L., Gualdi, S., Friedlingstein, P., Keenlyside, N., Maheras, P., Salas, D., Sutton, R., Terray, L., Klein Tank, A. M. G., Manzini, E., Braconnot, P., Buishand, T. A., Morse, A., Prentice, C., Carter, T., Bosello, F., and Kovats, S., 2009, *ENSEMBLES: Climate Change and Its Impacts: Summary of Research and Results from the ENSEMBLES Project*, Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK, 160 pp.
- Wang, S. Y., Gillies, R. R., Takle, E. S., and Gutowski Jr., W. J., 2009, Evaluation of precipitation in the inter-mountain region as simulated by NARCCAP regional climate models, *Geophysical Research Letters*, 36(11), L11704.

책임편집: 이은걸

영문교열: 정지훈