

RCP 시나리오 기반 WRF를 이용한 CORDEX-동아시아 2단계 지역의 가까운 미래 극한기온 변화 전망

서가영 · 최연우 · 안중배*

부산대학교 지구환경시스템학부

(접수일: 2019년 9월 14일, 수정일: 2019년 12월 2일, 게재확정일: 2019년 12월 3일)

Near Future Projection of Extreme Temperature over CORDEX-East Asia Phase 2 Region Using the WRF Model Based on RCP Scenarios

Ga-Yeong Seo, Yeon-Woo Choi, and Joong-Bae Ahn*

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

(Manuscript received 14 September 2019; revised 2 December 2019; accepted 3 December 2019)

Abstract This study evaluates the performance of Weather Research and Forecasting (WRF) model in simulating temperature over the COordinated Regional climate Downscaling EXperiment-East Asia (CORDEX-EA) Phase 2 domain for the reference period (1981~2005), and assesses the changes in temperature and its extremes in the mid-21st century (2026~2050) under global warming based on Representative Concentration Pathway (RCP) scenarios. MPI-ESM-LR forced by two RCP scenarios (RCP2.6 and RCP8.5) is used as initial and lateral boundary conditions. Overall, WRF can capture the observed features of temperature distribution reflecting local topographic characteristic, despite some disagreement between the observed and simulated patterns. Basically, WRF shows a systematic cold bias in daily mean, minimum and maximum temperature over the entire domain. According to the future projections, summer and winter mean temperatures over East Asia will significantly increase in the mid-21st century. The mean temperature rise is expected to be greater in winter than in summer. In accordance with these results, summer (winter) is projected to begin earlier (later) in the future compared to the historical period. Furthermore, a rise in extreme temperatures shows a tendency to be greater in the future. The averages of daily minimum and maximum temperatures above 90 percentiles are likely to be intensified in the high-latitude, while hot days and hot nights tend to be more frequent in the low-latitude in the mid-21st century. Especially, East Asia would be suffered from strong increases in nocturnal temperature under future global warming.

Key words: WRF, CORDEX-East Asia Phase 2, RCP Scenarios, climate change, extreme temperature

*Corresponding Author: Joong-Bae Ahn, Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea.
Phone: +82-51-514-1932, Fax: +82-51-514-1932
E-mail: jbahn@pusan.ac.kr

1. 서 론

기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 발간한 5차 평가보고서에 따르면 기후변화가 점점 가속화되는 것으로 나타났다(IPCC, 2013). 기후변화로 인해 한반도에서는 강한 강수가 증가하는 추세이고, 한반도의 2018년 여름철 평균기온은 1973년 이후 최고치를 기록하였다(NIMS, 2018; KMA, 2019). 뿐만 아니라 아시아 지역 곳곳에서도 기온의 증가 경향이 나타난다(Deng et al., 2014; Pingale et al., 2014; Park et al., 2017). 지구온난화와 동반되는 열과 강도의 증가는 인간에게 치명적인 영향을 줄 수 있고(Im et al., 2017a), 기후변화가 인간생존에 미치는 영향은 심각할 수 있어 이에 대비하기 위한 기후변화 전망은 중요하다.

WCRP (World Climate Research Program)에서는 CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project, Phase 5)를 통해 전지구후모형이 생산한 기후변화 전망자료를 전 세계적으로 공유하고 있다(Taylor et al., 2012). 하지만 이 자료는 낮은 해상도로 인해 지역규모의 상세한 기후변화를 전망하기에는 한계가 있다. 반면 지역기후모델은 한정된 영역에 대해 지형효과와 중규모 현상의 영향이 반영된 고해상도의 기후자료를 생산하는데 유용한 도구이다(Torma et al., 2015; Kim et al., 2018). Park et al. (2016)은 동아시아의 여름철에 대하여 5개 지역기후모델(HadGEM3-RA, RegCM4, SNU-MM5, SNU-WRF, YSU-RSM)의 극한기후 모의성능을 평가하였다. 그 결과 대체적으로 지역기후모델은 전지구기후모델보다 동아시아 지역의 기온 및 극한 강수를 모의하는데 강점을 보였다.

최근에 국제공동연구인 CORDEX (COordinated Regional climate Downscaling Experiment) 프로젝트가 진행되고 있다. CORDEX 프로젝트는 주어진 지역에 대해 지역기후모델을 이용한 역학적 상세화를 통하여 지역기후의 현상 및 변동성을 예측하는 프로젝트이다. 최근 우리나라에서는 5개의 지역기후모델을 이용하여 CORDEX 동아시아 1단계 영역에 대한 역학적 상세화 프로젝트를 수행하였다(Park et al., 2013; Oh et al., 2014; Lee et al., 2014). 이에 더하여 한반도 지역에 대해서 12.5 km의 해상도로 역학적 상세화 실험을 수행하여 한반도 국가표준 기후변화 시나리오를 산출하였다(Im et al., 2015, 2017a, 2017b, 2019; Ahn et al., 2016; Cha et al., 2016; Choi et al., 2016; Suh et al., 2016; Lee et al., 2017; Kim et al., 2018). 하지만 한반도 지역은 실험영역이 좁고 동아시아 1단계 영역은 해상도가 다소 낮다는 단점이 있다. 이를 극복하고자 최근에 국내 연구진들은 CORDEX 동아시아 2단계 영역에 대해 실험을 진행하고 있다(Choi and Ahn,

2017; Ahn et al., 2018). CORDEX 동아시아 2단계 영역은 1단계에 비해 영역은 좁아지고 해상도는 높아졌다.

여러 선행 연구들은 21세기 전반보다는 기온의 증가가 크게 나타나는 21세기 후반을 중점적으로 분석하였다(Hong and Ahn, 2015; Cha et al., 2016; Im et al., 2017a, 2017b, 2019). 예를 들어, Hong and Ahn (2015)는 WRF 모델을 이용하여 21세기 후반에 대한 장마의 특성 변화를 분석하였고, Im et al. (2017a, 2017b)는 4개 지역기후모델의 앙상블 예측 결과를 이용하여 21세기 후반 수문기후강도 및 폭염의 미래 변화 경향을 분석하였다. 하지만 최근 파리 기후변화 협약에서는 산업혁명 이전을 기준으로 기온 상승 폭을 2°C 아래로 낮추자고 제안하고 있으며, 2018년에는 평균기온 1.5°C 상승을 제한하기 위한 '지구온난화 1.5°C 특별보고서(IPCC, 2018)'를 채택하였다. 이에 따라 21세기 후반뿐만 아니라 21세기 중반의 기후변화에 대한 관심도도 높아지고 있다. 따라서 본 연구에서는 WRF (Weather Research and Forecast) 모형을 이용하여 CORDEX 동아시아 2단계 영역에 대해 RCP (Representative Concentration Pathway) 시나리오에 따른 21세기 중반의 기온변화를 전망하고자 하였다. 이에 더해 단순한 평균기온 변화만이 아닌 극한기온에 대한 변화를 보기 위해 다양한 극한지수들을 사용하여 분석하였다. 2장에서는 본 연구에서 사용한 WRF 모형의 실험설계 및 사용한 자료에 대해 설명하였고 3장에서는 CORDEX 동아시아 2단계 지역에 대해 WRF가 모의한 현재기후의 기온 및 21세기 중반의 기온변화를 분석하였다. 마지막으로 4장에서 본 연구의 결과에 대해 요약하였다.

2. 자료 및 방법

본 연구에서는 NCAR (National Center for Atmospheric Research)에서 개발한 WRF version 3.7을 활용하여 CORDEX 동아시아 2단계 지역의 미래 기후변화를 전망하였다. 모의 영역 내에서 아시아 문순의 직·간접적인 영향을 받는 6개의 지역(한국, 일본, 북중국, 남중국, 몽골 그리고 인도)을 선정 후(Fig. 1; Oh et al., 2014; KMA, 2018), 각 지역별 미래 기후변화 특성을 분석하였다.

CMIP5 참여 모델 중 동아시아 지역 기후모의에서 우수한 모의 성능을 보이는 MPI-ESM-LR (Giorgetta et al., 2013; Su et al., 2013; Gu et al., 2015) 전 지구 기후모형 자료를 WRF의 배경강제력으로 처방하여 동아시아 지역의 미래 기후변화 정보를 산출하였다. 이 자료의 수평 해상도는 약 1.875° × 1.875°이고 시간 해상도는 6시간 간격이다.

WRF의 복사 모수화는 CAM (Community Atmospheric

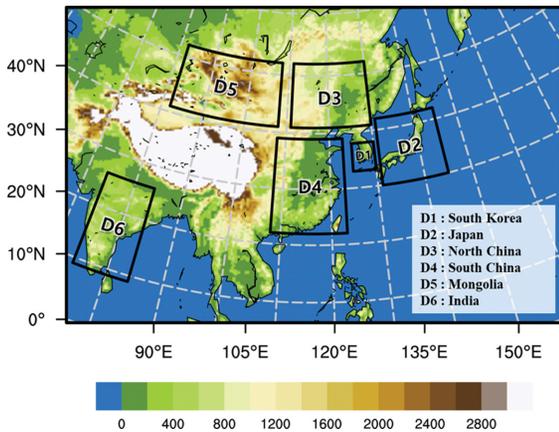


Fig. 1. CORDEX-East Asia phase 2 domain for WRF simulation. Boxed area indicates analysis region.

Table 1. Configurations of WRF model used in this study.

Parameter	Configuration
Domain	CORDEX-East Asia phase 2
Resolution	395 × 250 (25 km), 30 levels
Microphysics	WSM3
Radiation (LW/SW)	CAM
Land Surface	Noah
PBL	YSU
Cumulus	BMJ
Spectral Nudging	Applied

Model scheme; Collins et al., 2002), 지표는 Noah (Noah Land Surface Model; Chen and Dudhia, 2001), 행성경계층은 YSU scheme (Yonsei University; Hong et al., 2006)을 사용하였다. 구름 모수화 방안은 WSM3 (WRF-Single-Moment 3-class; Hong et al., 2004), 적운 모수화 방안은 BMJ (Betts-Miller-Janjic; Betts and Miller, 1986; Janjić, 1994)를 사용하였다. 여러 선행연구들은 스펙트럴 넷징 기법이 지역기후모델의 예측성을 향상시킬 수 있음을 보였다(Cha and Lee, 2009; Lee et al., 2016; Tang et al., 2017). 이에 따라 본 연구에서도 모델의 계통적 오차를 줄이기 위해 스펙트럴 넷징 기법을 적용하였다(von Storch et al., 2000). 스펙트럴 넷징은 대기경계층 상층에서 동서(남북) 방향으로 9 (6) 파수 이내 수평바람장에 대해 적용하였다. 실험 설계에 대한 자세한 설명은 Table 1에 나타내었다.

본 연구에서는 IPCC에 의해 제공되는 2종의 RCP 시나리오(RCP2.6, RCP8.5)를 이용하여 동아시아 지역의 미래 기후변화를 전망하였다. 모델 적분은 현재(미래)기후에 대해 1979년부터 2005년까지(2006년부터

2100년까지) 수행하였다. 본 연구에서는 21세기 중반 기후를 분석하기 위해 현재 기후(미래 기후) 분석 기간을 1981년부터 2005년까지(2026년부터 2050년까지)로 설정하였다. 또한 현재기후 대비 미래기후의 변화에 대해 통계적 유의성을 검증하기 위해 Student t-test를 수행하였다(Bretherton et al., 1999). 본 연구에서는 95% 신뢰구간에 포함되면 유의한 변화가 나타난다고 간주하였다.

현재기후에 대한 WRF 모형의 모의성능을 검증하기 위해 관측자료로 0.5° 간격의 CRU (Climatic Research Unit; Harris et al., 2014) 월평균 자료를 사용하였으며, 관측과 모델자료의 공간 일치를 위해 이중선형보간법을 이용해 모델 결과를 CRU 격자로 내삽하였다. 검증에 하기 위해 사용한 변수는 월평균 기온, 일 최고/최저기온의 월평균 값이다.

3. 결 과

기온 관련 변수(계절평균 기온/일 최고기온/일 최저기온)에 대한 WRF의 현재기후 모의성능을 검증하기 위해 배경강제력으로 사용된 MPI-ESM-LR과 WRF 모델 결과를 CRU 자료와 비교 분석하였다(Figs. 2, 3, and 4). Figure 2는 여름(6, 7, 8월) 및 겨울철(12, 1, 2월) 평균기온에 대한 MPI-ESM-LR과 WRF의 계통적 오차를 보여주는 그림이다. 우선 관측 자료를 보면 계절에 상관없이 인도 반도와 동남아시아 지역에서 기온이 높게 나타나고 고지대에 속하는 티벳 고원에서는 주변 지역보다 기온이 낮게 분포한다(Figs. 2a, d). 선정된 6개 지역에 대해 MPI-ESM-LR은 여름철 평균 기온의 편차(-1.3~0.6°C)와 평균제곱근오차(RMSE, Root mean square error) (1.3~3.2)를 작게 모의하는 경향을 보이지만, 겨울철 평균 기온 모의에서는 지역에 따라 크게 다른 편차(-2.4~4.1°C)와 RMSE (1.9~4.8)를 보인다. 겨울철에는 한국, 일본, 그리고 몽골 지역에서 뚜렷한 양의 편차가 분포하고, 인도, 티벳고원 및 동남아시아 지역에서 음의 편차가 나타난다(Figs. 2b, e). 이와 달리 WRF 모형은 여름 및 겨울철 평균 기온을 관측에 비해 전반적으로 낮게 모의하는 경향이 있다. 여름철 평균기온 모의에서 WRF는 MPI-ESM-LR 보다 낮은 RMSE를 보여 상대적으로 우수한 모의수준을 보인다(Fig. 2c). 겨울철의 경우 여름철에 비해 큰 음의 편차 및 RMSE가 대부분 지역에 나타나며(Fig. 2f), 남중국, 북중국, 인도(한국, 일본, 몽골) 지역에서 비교적 큰(작은) 편차와 RMSE가 존재한다. 이러한 결과는 WRF가 계통적으로 기온을 낮게 모의한다는 선행 연구 결과와도 일치한다(Heikkilä et al., 2011; Choi et al., 2012; Dasari et al., 2014; Choi and Ahn, 2017). 지역에 따라 다소 차이는 있지만 전반적

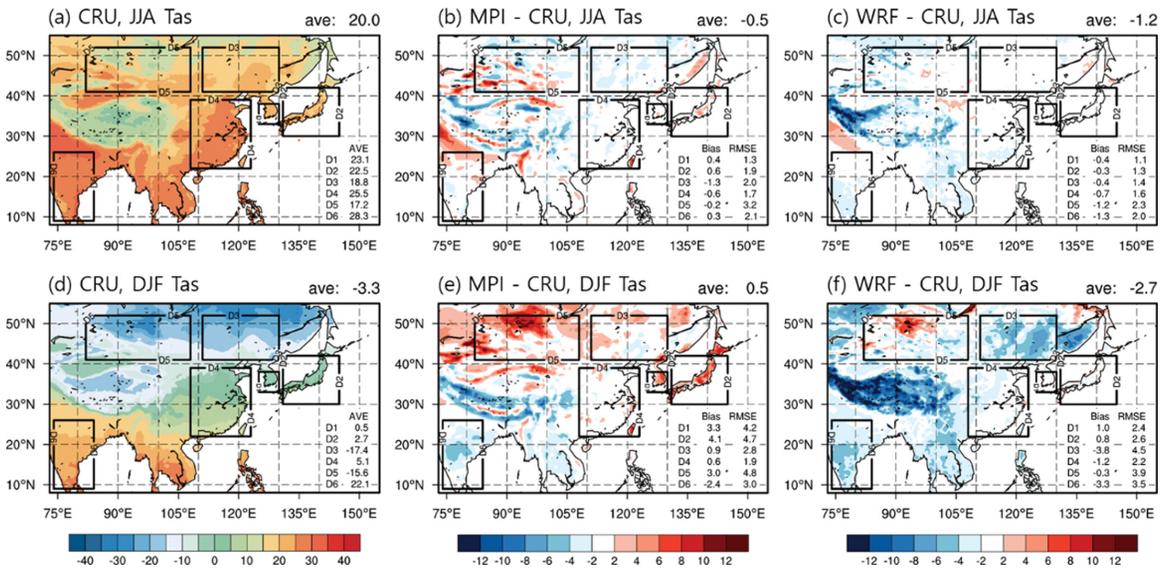


Fig. 2. Spatial distribution of summer (a-c) and winter (d-f) mean 2m temperature ($^{\circ}\text{C}$) for historical period (1981~2005) derived from CRU (a, d) and their biases of MPI-ESM-LR (b, e), WRF (c, f) compared with CRU.

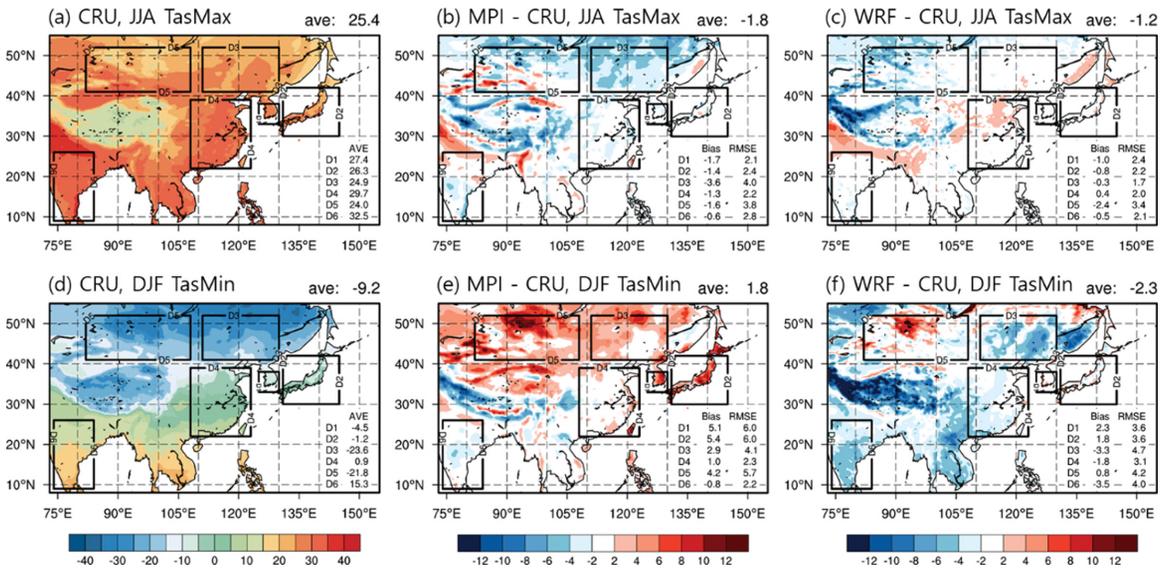


Fig. 3. Same as Fig. 2 but for daily maximum temperature ($^{\circ}\text{C}$) in summer (a-c) and daily minimum temperature ($^{\circ}\text{C}$) in winter (d-f).

으로 WRF는 MPI-ESM-LR보다 동아시아 지역 기온 모의에 우수한 모의성능을 보인다.

Figure 3은 여름철 일 최고기온과 겨울철 일 최저기온의 공간분포를 나타낸 그림이다. CRU 자료의 여름철 일 최고기온과 겨울철 일 최저기온의 공간분포는 Fig. 2에서 보여준 평균기온의 공간분포와 유사하

다(Figs. 3a, d). 즉, 고위도(저위도) 및 고지대(저지대)로 갈수록 여름철 일 최고기온 및 겨울철 일 최저기온은 낮게(높게) 분포한다. 전반적으로 MPI-ESM-LR은 동아시아 지역의 여름철 일 최고기온을 낮게 모의하는 반면, 겨울철 일 최저기온은 높게 모의하는 경향을 보인다. 북중국(한국, 일본, 그리고 몽골)지역의

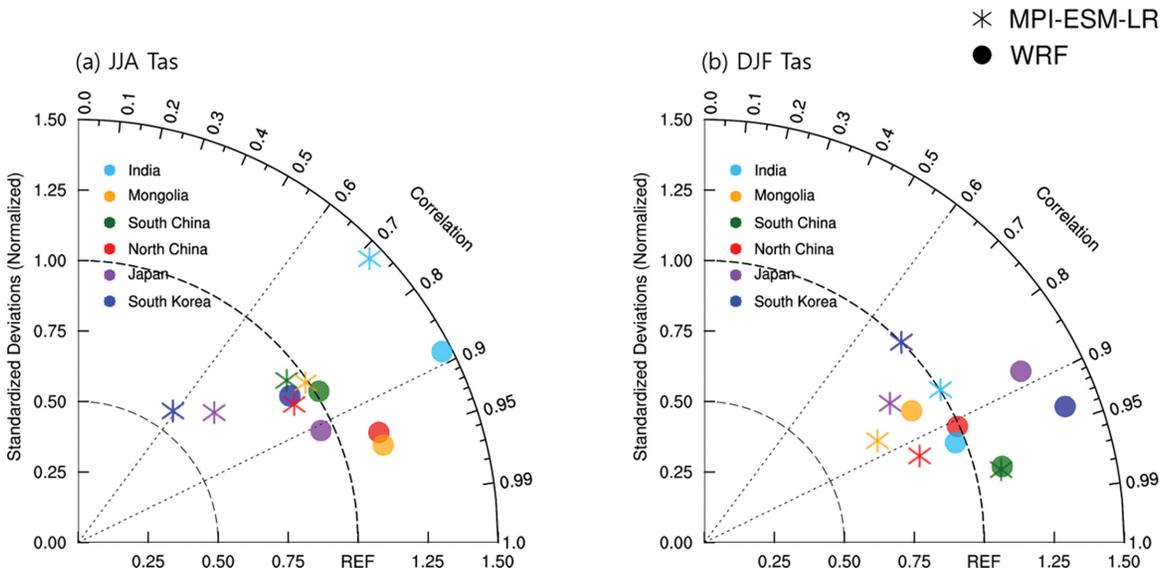


Fig. 4. Taylor diagram of summer (a) and winter (b) mean 2 m temperature (°C) for historical period (1981~2005).

여름철 일 최고기온(겨울철 일 최저기온)은 관측보다 약 3°C (4°C) 이상 낮게(높게) 나타난다(Figs. 3b, e). 선정된 대부분의 지역(남중국을 제외한 5개 지역)에서 WRF는 MPI-ESM-LR과 유사하게 여름철 일 최고기온을 관측보다 낮게 모의하고, 특히 일본, 남중국, 북중국, 몽골 그리고 인도지역에서 MPI-ESM-LR 보다 우수한 모의성능을 보인다(Fig. 3c). 또한, 이 모델은 MPI-ESM-LR과는 다르게 겨울철 일 최저기온을 전반적으로 낮게 모의하는 특성을 보인다. 이러한 음의 편차는 북중국, 남중국, 티벳고원, 동남아시아, 그리고 인도지역에서 두드러지게 나타난다. 북중국과 인도의 겨울철 최저 기온은 관측보다 약 3°C 이상 낮게 나타난다.

기온 공간분포에 대한 WRF의 모의성능을 정량적으로 평가하기 위해 Taylor Diagram 분석을 수행하였다(Fig. 4). Taylor diagram의 호는 공간상관계수를 나타내고 가로·세로축은 표준편차비(모형의 표준편차를 관측의 표준편차로 나눈 값)를 나타낸다. 상관계수가 1이고 표준편차비가 1인 지점(REF in Fig. 4)에 가까울수록 모형의 모의성능이 우수함을 뜻한다. 그림에서 별표는 MPI-ESM-LR, 동그라미는 WRF를 나타낸다. 전반적으로 WRF가 MPI-ESM-LR 보다 여름 및 겨울철 평균 기온 모의에 우수한 모의성능을 보인다. 여름철 평균기온의 경우 MPI-ESM-LR의 상관계수는 0.59~0.84의 값을 보이지만 지역기후모델의 상관계수는 0.82 이상의 높은 값을 보인다. 또한, MPI-ESM-LR의 표준편차비는 지역에 따라 큰 차이를 보이지만 WRF의 표준편차비는 인도를 제외한 5개 지역에서 1

에 가깝게 위치한다. 지역기후모델은 북중국, 몽골, 그리고 인도(한국, 일본, 남중국)지역의 표준편차를 관측보다 크게(작게) 모의하는 경향을 보인다. 겨울철 평균 기온을 살펴보면, WRF는 인도, 한국, 일본 지역에서 MPI-ESM-LR 보다 높은 상관계수 값을 보인다. 그리고 지역기후모델의 표준편차비는 한국과 일본지역을 제외한 4개 지역에서 1에 근사하는 것을 확인할 수 있다. 여름철과 반대로 WRF는 북중국, 몽골, 그리고 인도지역의 표준편차를 관측보다 작게 모의하는 특성을 보이지만, 한국, 일본, 남중국 지역의 표준편차는 관측보다 크게 모의하는 경향을 보인다. 여름철 일 최고기온과 겨울철 일 최저기온 분석에서도 WRF가 MPI-ESM-LR 보다 우수한 모의수준을 보이는 것을 확인할 수 있다(data not shown). 분석결과를 종합해 보면 지역기후모델 WRF는 분석 계절 및 지역에 따라 다소 차이가 있지만 전반적으로 배경강제력인 MPI-ESM-LR보다 기온 모의에 우수한 모의성능을 보인다.

앞선 결과들을 통해 WRF의 현재기후 모의능력이 우수하다는 점을 확인하였다. 이 지역기후모델을 사용하여 RCP 시나리오 2종(RCP2.6, RCP8.5)에 따른 21세기 중반(2026년~2050년)의 미래기후변화를 전망하였다. Figure 5는 WRF가 전망한 현재기후 대비 21세기 중반의 기온 변화를 나타낸 그림이다. 기온변화의 통계적 유의성을 검증하기 위해 신뢰구간 95%에 포함되는 영역에 대해서 검은색 점으로 표시하였다. 결과를 살펴보면, 분석 계절, 지역 및 시나리오에 상관없이 21세기 중반의 기온은 현재기후 대비 뚜렷이

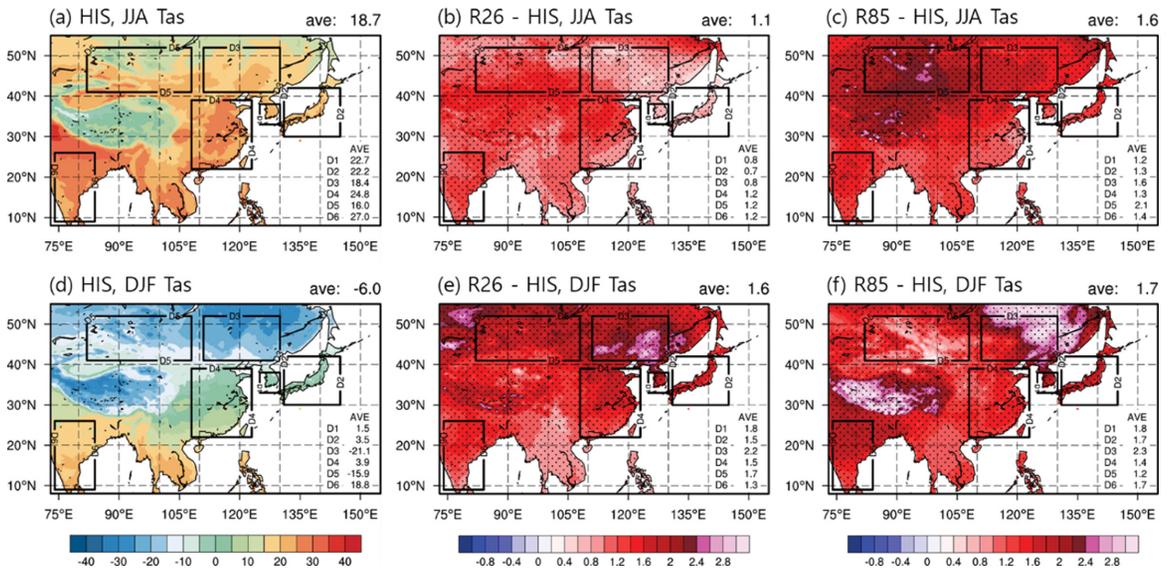


Fig. 5. Spatial distribution of summer (a-c) and winter (d-f) mean 2 m temperature (°C) for historical period (1981~2005) (a, d) and their changes (2026~2050 relative to 1981~2005) in response to RCP2.6 scenario (b, e) and RCP8.5 scenario (c, f). Dots denote statistically significant changes at the 95% confidence level.

Table 2. Definition of extreme temperature indices used in this study.

Index	Definition	Unit
T90max	The average of daily maximum temperature above 90th percentile in a year	°C
T90min	The average of daily minimum temperature above 90th percentile in a year	°C
Hot Days (HD)	The count of days with at least six consecutive days when maximum temperatures exceeding the local 90th percentile of the control period	Days
Hot Nights (HN)	The count of days with at least six consecutive days when minimum temperatures exceeding the local 90th percentile of the control period	Days

증가할 것으로 전망된다. 특히, 기온의 증가는 고위도 및 고지대에서 크게 나타나고, 분석영역 전체에서 통계적으로 유의하게 나타난다. 이는 WRF의 경계조건으로 사용된 MPI-ESM-LR이 전망한 기온 증가량과 비슷한 공간패턴을 보이지만 전체적으로 WRF가 MPI-ESM-LR보다 더 낮은 값을 나타낸다(Figure not shown). 하지만 티벳고원 지역에서는 WRF가 MPI-ESM-LR보다 더 높은 기온 증가량을 전망한다. 즉, 본 실험에서 WRF는 RCP2.6 (RCP8.5) 시나리오 하에서 동아시아지역 여름 및 겨울철 평균기온이 각각 1.1°C, 1.6°C (1.6°C, 1.7°C) 증가할 것으로 전망한다. 대체적으로 여름철보다 겨울철 또는 저농도 시나리오 보다는 고농도 시나리오에 기온의 증가폭이 클 것으로 전망된다. 선행 연구에서 보여준 RCP8.5 시나리오에 따른 21세기 후반에 몽골 및 중국의 평균 기온 증가량이 3°C 이상인 것에 비해 WRF가 전망한 가까운 미래의 기온 증가량은 1~2.5°C 사이의 값을 보인다(Ozturk

et al., 2017). 예외적으로 몽골과 남중국지역의 21세기 중반 겨울철 평균기온은 고농도 시나리오로 갈수록 기온의 증가폭이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 MPI-ESM-LR에서도 같은 모습이 나타난다. 이 결과를 통해 WRF가 전망한 결과는 경계조건에 영향을 다분히 받는다는 점을 확인할 수 있다. 또한 이는 온실가스 농도의 증가가 단순히 동아시아 기온의 더 큰 상승으로 직결되지 않고 다른 기후장에 변동을 주어 또 다른 기온 변화 패턴이 나타날 수 있음을 의미한다.

Griffiths et al. (2005)는 기후 평균값의 변화를 통한 극값의 변화를 파악하는 것이 기후변화를 이해하는데 중요하다고 언급하였다. 극한 기후는 기후변화로 인해 사회에 가장 큰 영향을 주는 주요 요소중의 하나이다(Katz and Brown, 1992). 따라서 본 연구에서는 기후 평균값의 변화와 더불어 극한기후의 변화도 분석하였다. 기온과 관련된 극한기후의 변화를 보기 위해 여러 극한지수들을 정의하여 이를 분석하였다.

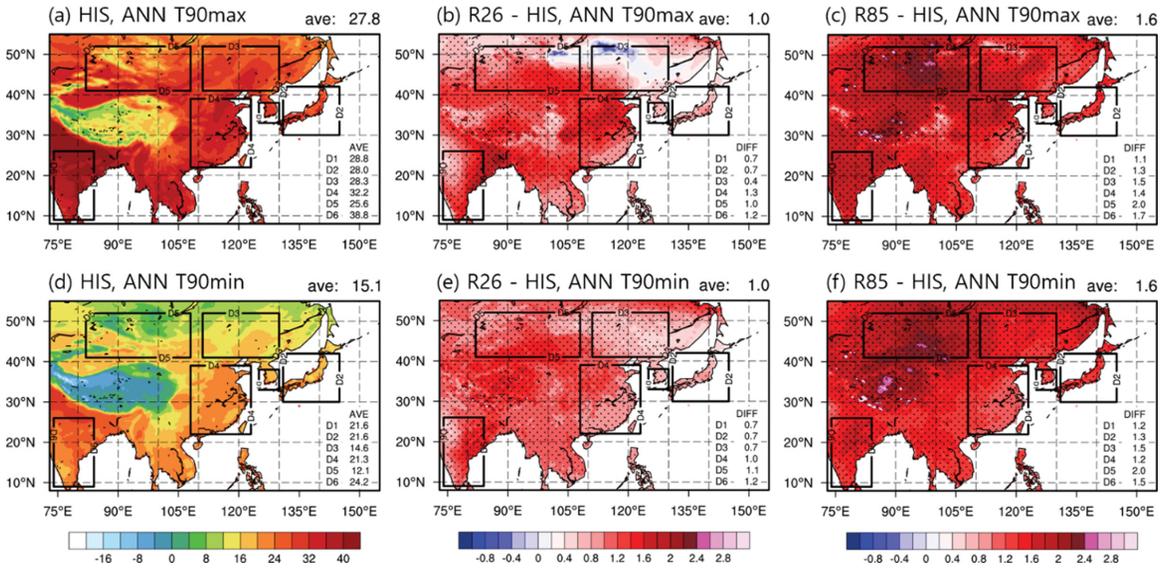


Fig. 6. Same as Fig. 5 but for annual T90max index (a-c) and annual T90min index (d-f).

선행연구를 참고하여 총 4가지[T90max, T90min, Hot Days (HD), Hot Nights (HN)]의 극한지수를 선정하였다(Moberg and Jones, 2005; Della-Marta et al., 2007; Fischer and Schär, 2010). 각 지수에 대한 정의는 Table 2에 나타나 있다. HD와 HN의 정의에서 연속일수의 기준은 Fischer and Schär (2010)을 참고해 6일로 지정하였다.

WRF가 모의한 T90max (T90min)의 공간분포 및 그 미래 변화를 Figs. 6a-c (6d-f)에 제시하였다. 우선 현재기후를 분석해 보면, T90max는 앞선 결과(Figs. 2, 3)와 유사하게 저위도로 갈수록 높은 값이 분포하는 특징을 보이며, 티벳 고원을 제외한 대부분 지역에서 25°C 이상의 값을 보인다(Fig. 6a). T90min도 이와 유사하게 티벳고원에서 상대적으로 낮은 값을 보이는 지형적인 특성이 있다(Fig. 6d). T90min은 몽골, 북중국 지역을 제외한 나머지 분석 지역에서 21~25°C의 값이 나타난다. 한국 및 일본과 인도지역의 T90min의 값 차이는 약 3°C 정도로 나타나는데, 이는 동일지역의 T90max 값 차이가 10°C 이상 나는 결과와 차이가 있다. 21세기 중반에는 시나리오에 상관없이 WRF가 모의한 T90max의 값이 전반적으로 증가될 것으로 전망되며(RCP2.6 시나리오의 북중국 일부 지역 제외), 특히 RCP8.5 시나리오에서 그 증가폭(1.1~2.0°C)이 크게 나타난다. 그 예로서, 몽골 지역의 T90max는 현재기후 대비 약 2°C 정도 증가할 것으로 보인다. 이와 유사하게 T90min도 가까운 미래에 현재기후 대비 크게 증가할 것으로 전망되며(Figs. 6e, f), 그 증가폭은 T90max과 유사할 것으로 보인다. 이는 WRF가 모의

한 21세기 중반 평균기온의 변화 경향과 일맥상통하는 결과이다. 위 결과를 통해 WRF가 모의한 21세기 중반의 미래기후에서는 주간(T90max)과 야간 기온(T90min)이 증가할 것으로 전망된다.

여름철은 사계절 중 고온으로 인한 영향이 가장 큰 계절이다. 따라서 분석기간을 여름철로 한정하여 이상고온 현상의 미래 변화 전망을 분석하였다. Figure 7은 현재기후 및 21세기 중반에 대한 HD와 HN의 공간분포를 나타낸 그림이다. WRF가 모의한 현재기후의 HD (HN)는 저위도 해안가 지역(인도지역 및 티벳 고원)에서 높게 나타나며(Figs. 7a, d), 북중국과 몽골 지역에서는 HD와 HN이 비교적 낮게 나타난다. RCP2.6 (RCP8.5) 시나리오 하에서 동아시아 지역의 HD는 현재기후 대비 약 6(9)일 정도 증가할 것으로 전망되며(Figs. 7b, c), 특히, 북위 40° 이하의 지역에서 통계적으로 유의하게 나타난다. 이와 유사하게 HN도 시나리오 및 지역에 관계없이 전반적으로 증가할 것으로 예측된다. 그리고 그 증가량은 인도, 티벳고원 및 동남아시아 지역에서 뚜렷하게 나타난다. 종합적으로 살펴보면, 저농도 시나리오 보다 고농도 시나리오에서, 고위도 보다 저위도 지역에서, 그리고 주간보다는 야간에 대체적으로 이상기온으로 인한 피해가 증가할 것으로 사료된다.

위의 결과들에 의하면 기후변화에 따라 한반도 지역의 평균기온과 극한기온은 현재기후 대비 크게 증가할 것으로 전망된다. 이러한 기온의 변화는 단순히 이상기상 현상을 초래할 뿐만 아니라 계절 길이의 변화도 초래할 수 있다. 이를 심층 분석하기 위해 기상

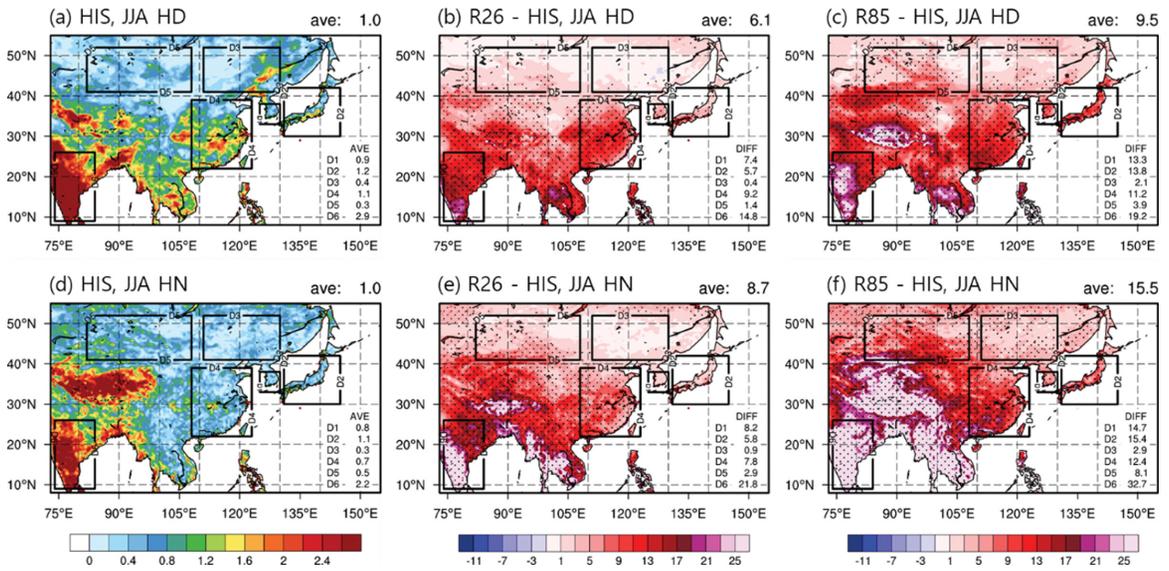


Fig. 7. Same as Fig. 5 but for summer HD index (a-c) and summer HN index (d-f).



Fig. 8. First day of the seasons and seasonal length (unit: days) in South Korea for historical period (1981~2005) and mid of 21st century (2026~2050) under the two RCP scenarios (RCP2.6, RCP8.5).

청 기준 계절 시작일(일평균 기온을 사용; NIMS, 2018)을 이용하여 가까운 미래 계절 길이 변화를 분석하였다. Figure 8은 현재기후와 RCP 시나리오 2종에 따른 21세기 중반의 계절 시작일 및 계절 길이를 나타낸 그림이다. RCP2.6 (RCP8.5) 시나리오에 따른 21세기 중반 기후에서는 현재기후에 비해 봄과 여름의 시작일이 약 7(4~7)일 빨라지고 가을과 겨울의 시작일이 1(7)일에서 최대 11(14)일까지 늦어진다. 이 때문에 미래에는 봄의 길이는 짧아지고 가을이 길이는 길어질

전망이다. 또한 고농도 시나리오로 갈수록 여름(겨울)의 길이는 더 길어진다(짧아진다). RCP8.5 시나리오에 따르면 여름철 길이는 현재기후에 비해 14일 증가하고 겨울철의 길이는 무려 약 20일이 감소한다. 앞선 결과들을 통해, 여름철 HN의 증가가 21세기 중반에 뚜렷하게 나타나는 점을 확인할 수 있다. 이에 더해 여름철 최저기온과 관련된 극한기온의 발생 빈도를 분석하기 위해, 선정된 6개 지역에 대한 여름철 일 최저기온의 확률밀도함수를 분석하였다(Fig. 9).

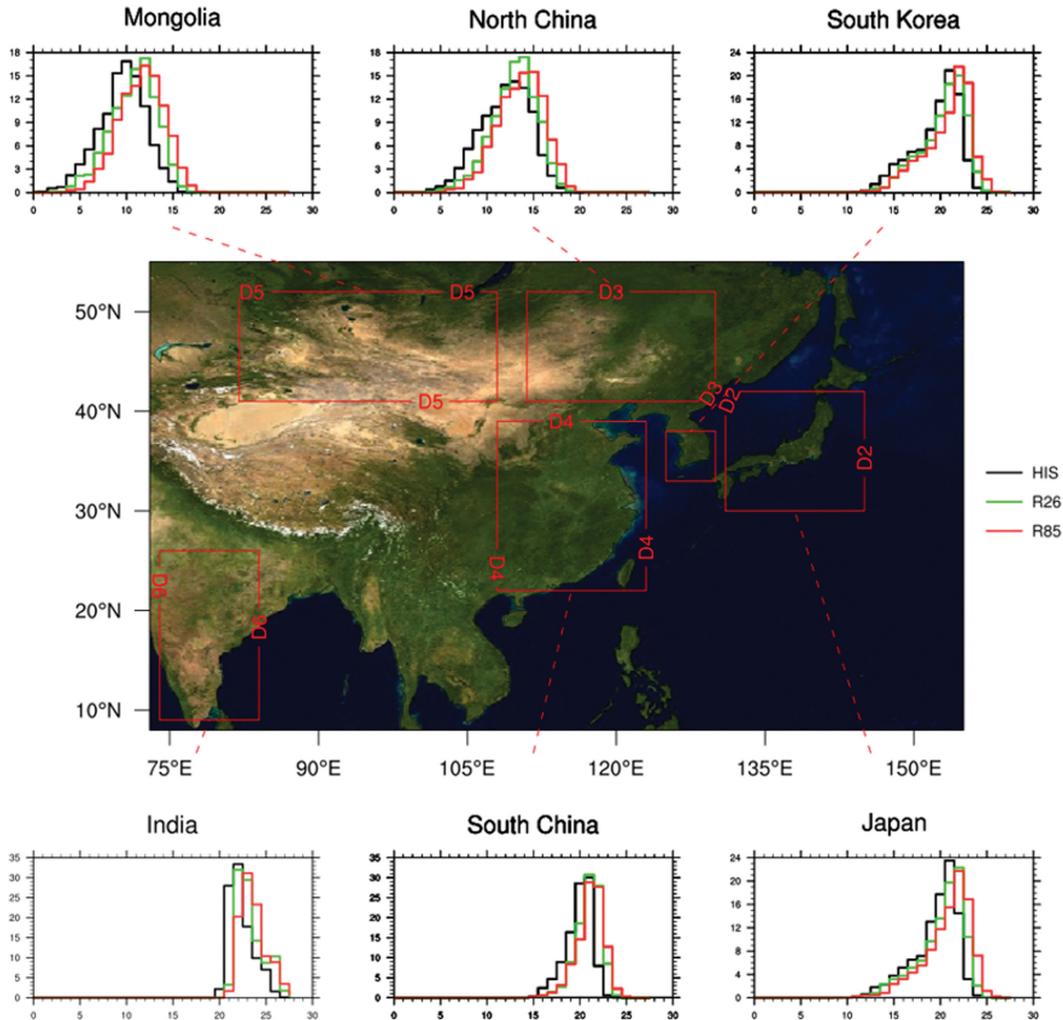


Fig. 9. Probability density function (PDF) of summer daily minimum temperature for historical period (1981~2005) and mid-21st century (2026~2050) under the two RCP scenarios (RCP2.6, RCP8.5).

현재기후를 살펴보면, 북중국과 몽골 지역의 확률밀도함수는 정규분포의 형태에 가까운 반면에, 한국, 일본, 남중국에는 정규분포에서 음의 왜도를 보이며, 인도의 경우에는 정규분포에서 양의 왜도를 보인다. 북위 40° 이하의 지역(한국, 일본, 남중국)에서는 대체적으로 확률밀도의 최대치가 20°C 이상에서 위치하고 북위 40° 이상의 지역(몽골, 북중국)에서는 전반적으로 확률밀도의 최대치가 15°C 이하에서 나타난다. 이는 앞선 공간장 분석 결과(Figs. 3, 6)와도 잘 일치한다. 분석 지역에 상관없이 최저기온과 관련된 극한기온은 미래로 갈수록 또는 고농도 시나리오로 갈수록 확률밀도함수의 상위 꼬리부분으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 즉 HN의 발생 빈도가 미래에 증가함을 의

미한다. 특히, RCP8.5 시나리오에서 일 최저기온의 확률밀도함수는 현재기후 및 RCP2.6 시나리오보다 상위 꼬리부분으로 이동해 있어 동아시아지역 야간 기온이 높은 확률로 증가하게 된다. 따라서 온실가스 농도의 증가 경향은 동아시아 6개 지역의 야간 기온 상승에 큰 영향을 준다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 RCP 2종 시나리오 및 MPI-ESM-LR-WRF 체인을 활용하여 CORDEX 동아시아 2단계 지역의 미래 기온 변화를 전망하였다. 신뢰성 있는 기후변화 전망을 산출하기 위해, 기준 시나리오의 검증

이 선행되었고 이를 토대로 평균 및 극한기온의 미래 변화를 전망하였다. 미래(2026~2050년)와 현재(1981~2005년) 시나리오의 차이를 이용하여 21세기 중반 기후변화를 분석하였다.

전반적으로 WRF는 기온 관련 변수(평균/일 최고/일 최저 기온)들을 관측에 비해 다소 낮게 모의하는 특성을 보인다. 이러한 음의 편차는 주로 여름철 보다 겨울철에 두드러지게 나타난다. 반면, WRF는 분석 계절 및 지역에 따라 다소 차이가 있지만 배경강제력인 MPI-ESM-LR보다 동아시아 지역의 현재기후를 현실적으로 모의하는 것으로 나타났다. 특히, 기온 관련 변수의 공간분포에 대하여, WRF의 우수한 모의 성능이 검증되었다. 이러한 결과는 Taylor diagram 분석에도 동일하게 나타났다. 즉, 계절에 상관없이 MPI-ESM-LR는 낮은 공간상관계수의 분포를 보이지만 WRF는 비교적 높은 값을 보인다. 또한, MPI-ESM-LR의 표준편차비는 지역에 따라 큰 차이를 보이지만 WRF의 표준편차비는 대부분의 지역에서 1에 가깝게 위치하는 것을 확인할 수 있다.

21세기 중반의 기온은 분석 계절, 지역 및 시나리오에 상관없이 현재기후 대비 뚜렷이 증가할 것으로 전망된다. 특히, 기온의 증가는 고위도 및 고지대에서 크게 나타나고, 분석영역 전체에서 통계적으로 유의하게 나타난다. 대체적으로 여름철보다 겨울철에, 저농도 시나리오 보다 고농도 시나리오에 기온의 증가폭이 클 것으로 전망된다.

이어서 기온과 관련된 극한기후의 변화를 보기 위해 4종의 극한지수(T90max, T90min, HD, HN)들을 정의하여 이를 분석하였다. 21세기 중반에는 시나리오에 상관없이 T90max의 값이 전반적으로 증가될 것으로 전망되며, 특히 RCP8.5 시나리오에서 그 증가폭이 크게 나타난다. 그 예로서, 몽골 지역의 T90max는 현재기후 대비 약 2°C 정도 증가할 것으로 보인다. T90min도 가까운 미래에 현재기후 대비 T90max 변화와 비슷하게 증가할 것으로 전망된다. 또한, 동아시아 지역의 HD는 RCP2.6 (RCP8.5) 시나리오 하에 현재기후 대비 약 6(9)일 정도 증가할 것으로 전망되며 특히, 북위 40° 이하의 지역에서 통계적으로 유의하게 나타난다. 이와 유사하게 HN도 시나리오 및 지역에 관계없이 전반적으로 증가할 것으로 전망된다. 종합적으로, 저농도 시나리오 보다 고농도 시나리오에서, 고위도 보다 저위도 지역에서, 그리고 주간보다는 야간에 대체적으로 이상기온으로 인한 피해가 증가할 것으로 사료된다.

위 결과들의 종합적인 영향으로 인해 21세기 중반에는 현재기후에 비해 여름(겨울)의 시작일이 빨라지고(늦어지고) 계절길이는 길어진다(짧아진다). 또한 봄철 길이는 줄어들고 가을철 길이는 길어질 것으로 사

료된다. 더 나아가 여름철 일 최저기온의 확률밀도함수를 분석한 결과, 최저기온과 관련된 극한기온은 분석 지역에 상관없이 고농도 시나리오로 갈수록 확률밀도함수의 상위 꼬리부분으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 특히, RCP8.5 시나리오에서 일 최저기온의 확률밀도함수는 현재기후 및 RCP2.6 시나리오보다 더 상위 꼬리부분에 위치해 있어 동아시아지역 야간 기온이 높을 확률로 증가할 것을 전망된다. 따라서 온실가스 농도의 증가 경향은 동아시아 6개 지역의 야간 기온 상승으로 직결될 수 있다.

본 연구결과는 기존의 CORDEX 동아시아 기후변화 연구보다 더 고해상도의 기후변화 정보를 산출하고 분석했다는 점에서 고무적인 결과로 판단된다. 하지만 앙상블 실험이 아닌 단일 실험만을 통한 기후변화자료 산출결과는 불확실성이 크다. 또한 다중 모델이 아닌 단일 전지구모델과 지역기후모델을 사용했다는 점에서 신뢰성 있는 미래 기후변화 정보를 도출하는데 여전히 한계를 가진다. 향후 다중 전지구모델 및 지역기후모델을 이용한 연구를 통해 추가 분석을 수행할 예정이다.

감사의 글

이 연구는 기상청 「기상·지진See-At기술개발연구」(KMI2018-01213)의 지원으로 수행되었습니다. 그리고 이 연구에 기상청 슈퍼컴퓨터가 활용되도록 지원해준 기상청 슈퍼컴퓨터 운영과에 감사드립니다.

REFERENCES

- Ahn, J.-B., and Coauthors, 2016: Changes of precipitation extremes over South Korea projected by the 5 RCMs under RCP scenarios. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **52**, 223–236, doi:10.1007/s13143-016-0021-0.
- _____, Y.-W. Choi, and S. Jo, 2018: Evaluation of reproduced precipitation by WRF in the region of CORDEX-East Asia phase 2. *Atmosphere*, **28**, 85–97, doi:10.14191/Atmos.2018.28.1.085 (in Korean with English abstract).
- Betts, A. K., and M. J. Miller, 1986: A new convective adjustment scheme. Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, ATEX and arctic air-mass data sets. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **112**, 693–709.
- Bretherton, C. S., M. Widmann, V. P. Dymnikov, J. M. Wallace, and I. Bladé, 1999: The effective number of spatial degrees of freedom of a time-varying field. *J. Climate*, **12**, 1990–2009.
- Cha, D.-H., and D.-K. Lee, 2009: Reduction of systematic errors in regional climate simulations of the summer

- monsoon over East Asia and the western North Pacific by applying the spectral nudging technique. *J. Geophys. Res.*, **114**, D14108, doi:10.1029/2008JD011176.
- _____, and Coauthors, 2016: Future changes in summer precipitation in regional climate simulations over the Korean Peninsula forced by multi-RCP scenarios of HadGEM2-AO. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **52**, 139-149, doi:10.1007/s13143-016-0015-y.
- Chen, F., and J. Dudhia, 2001: Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part II: preliminary model validation. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 587-604.
- Choi, S.-J., D.-K. Lee, and S.-G. Oh, 2012: Regional climate simulations over East-Asia by using SNURCM and WRF forced by HadGEM2-AO. *J. Kor. Earth Sci. Soc.*, **32**, 750-760, doi:10.5467/JKES.2011.32.7. 750 (in Korean with English abstract).
- Choi, Y.-W., and J.-B. Ahn, 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**, 105-118 (in Korean with English abstract).
- _____, _____, M.-S. Suh, D.-H. Cha, D.-K. Lee, S.-Y. Hong, S.-K. Min, S.-C. Park, and H.-S. Kang, 2016: Future changes in drought characteristics over South Korea using multi regional climate models with the standardized precipitation index. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **52**, 209-222, doi:10.1007/s13143-016-0020-1.
- 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**, ACL17-1-ACL17-20.
- Dasari, H. P., R. Salgado, J. Perdigo, and V. S. Challala, 2014: A regional climate simulation study using WRF-ARW model over Europe and evaluation for extreme temperature weather events. *Int. J. Atmos. Sci.*, **2014**, 704079, doi:10.1155/2014/704079.
- Della-Marta, P. M., M. R. Haylock, J. Luterbacher, and H. Wanner, 2007: Doubled length of western European summer heat waves since 1880. *J. Geophys. Res.*, **112**, D15103, doi:10.1029/2007JD008510.
- Deng, H., Y. Chen, X. Shi, W. Li, H. Wang, S. Zhang, and G. Fang, 2014: Dynamics of temperature and precipitation extremes and their spatial variation in the arid region of northwest China. *Atmos. Res.*, **138**, 346-355, doi:10.1016/j.atmosres.2013.12.001.
- Fischer, E. M., and C. Schär, 2010: Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heat waves. *Nature Geosci.*, **3**, 398-403, doi:10.1038/ngeo866.
- Giorgetta, M. A., and Coauthors, 2013: Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. *J. Adv. Model. Earth Sy.*, **5**, 572-597, doi:10.1002/jame.20038.
- Griffiths, G. M., and Coauthors, 2005: Change in mean temperature as a predictor of extreme temperature change in the Asia-Pacific region. *Int. J. Climatol.*, **25**, 1301-1330.
- Gu, H., Z. Yu, J. Wang, G. Wang, T. Yang, Q. Ju, C. Yang, F. Xu, and C. Fan, 2015: Assessing CMIP5 general circulation model simulations of precipitation and temperature over China. *Int. J. Climatol.*, **35**, 2431-2440, doi:10.1002/joc.4152.
- Harris, I., P. D. Jones, T. J. Osborn, and D. H. Lister, 2014: Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset. *Int. J. Climatol.*, **34**, 623-642, doi:10.1002/joc.3711.
- Heikkilä, U., A. Sandvik, and A. Sorteberg, 2011: Dynamical downscaling of ERA-40 in complex terrain using the WRF regional climate model. *Climate Dyn.*, **37**, 1551-1564, doi:10.1007/s00382-010-0928-6.
- Hong, J.-Y., and J.-B. Ahn, 2015: Changes of early summer precipitation in the Korean Peninsula and nearby regions based on RCP simulations. *J. Climate*, **28**, 3557-3578, doi:10.1175/JCLI-D-14-00504.1.
- 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.
- Im, E.-S., J.-B. Ahn, and S.-R. Jo, 2015: Regional climate projection over South Korea simulated by the HadGEM2-AO and WRF model chain under RCP emission scenarios. *Climate Res.*, **63**, 249-266, doi:10.3354/cr01292.
- _____, Y.-W. Choi, and J.-B. Ahn, 2017a: Worsening of heat stress due to global warming in South Korea based on multi-RCM ensemble projections. *J. Geophys. Res.*, **122**, 11444-11461, doi:10.1002/2017JD026731.
- _____, _____, and _____, 2017b: Robust intensification of hydroclimatic intensity over East Asia from multi-model ensemble regional projections. *Theor. Appl. Climatol.*, **129**, 1241-1254, doi:10.1007/s00704-016-1846-2.

- _____, N.-X. Thanh, Y.-H. Kim, and J.-B. Ahn, 2019: 2018 summer extreme temperatures in South Korea and their intensification under 3°C global warming. *Environ. Res. Lett.*, **14**, 094020, doi:10.1088/1748-9326/ab3b8f.
- IPCC, 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*. T. F. Stocker et al. Eds., Cambridge University Press. 1535 pp.
- _____, 2018: 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. V. Masson-Delmotte et al. Eds., World Meteorological Organization, 616 pp.
- Janjić, Z. I., 1994: The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 927-945.
- Katz, R. W., and B. G. Brown, 1992: Extreme events in a changing climate: Variability is more important than averages. *Climatic Change*, **21**, 289-302.
- Kim, G., D.-H. Cha, and C. Park, 2018: Estimation of uncertainties and projection for bias-corrected outputs of multi-regional climate models. *J. Climate Res.*, **13**, 263-273, doi:10.14383/cri.2018.13.4.263 (in Korean with English abstract).
- KMA, 2018: *Projection of fine resolution future climate change over Korean Peninsula and East Asia based on RCP Scenarios*. Korea Meteorological Administration, 945 pp (in Korean).
- _____, 2019: *2018 Abnormal Climate Report*. Korea Meteorological Administration, 198 pp (in Korean).
- Lee, D., and Coauthors, 2017: Thermodynamic and dynamic contributions to future changes in summer precipitation over Northeast Asia and Korea: a multi-RCM study. *Climate Dyn.*, **49**, 4121-4139, doi:10.1007/s00382-017-3566-4.
- _____, C. Park, Y.-H. Kim, and S.-K. Min, 2016: Evaluation of the COSMO-CLM for East Asia climate simulations: sensitivity to spectral nudging. *J. Climate Res.*, **11**, 69-85, doi:10.14383/cri.2016.11.1.69 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.-W., S.-Y. Hong, E.-C. Chang, M.-S. Suh, and H.-S. Kang, 2014: Assessment of future climate change over East Asia due to the RCP scenarios downscaled by GRIMs-RMP. *Climate Dyn.*, **42**, 733-747, doi:10.1007/s00382-013-1841-6.
- Moberg, A., and P. D. Jones, 2005: Trends in indices for extremes in daily temperature and precipitation in central and western Europe, 1901-99. *Int. J. Climatol.*, **25**, 1149-1171.
- NIMS, 2018: *Climate changes of Korean Peninsula over 100 years*. National Institute of Meteorological Sciences, 31 pp (in Korean).
- Oh, S.-G., 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**, 2913-2927, doi:10.1002/2013JD020693.
- Ozturk, T., M. T. Turp, M. Türkeş, and M. L. Kurnaz, 2017: Projected changes in temperature and precipitation climatology of Central Asia CORDEX Region 8 by using RegCM4.3.5. *Atmos. Res.*, **183**, 296-307, doi:10.1016/j.atmosres.2016.09.008.
- Park, B.-J., Y.-H. Kim, S.-K. Min, M.-K. Kim, Y. Choi, K.-O. Boo, and S. Shim, 2017: Long-term warming trends in Korea and contribution of urbanization: an updated assessment. *J. Geophys. Res.*, **122**, 10637-10654, doi:10.1002/2017JD027167.
- Park, C., and Coauthors, 2016: Evaluation of multiple regional climate models for summer climate extremes over East Asia. *Climate Dyn.*, **46**, 2469-2486, doi:10.1007/s00382-015-2713-z.
- Park, J.-H., S.-G. Oh, and M.-S. Suh, 2013: Impacts of boundary conditions on the precipitation simulation of RegCM4 in the CORDEX East Asia domain. *J. Geophys. Res.*, **118**, 1652-1667, doi:10.1002/jgrd.50159.
- Pingale, S. M., D. Khare, M. K. Jat, and J. Adamowski, 2014: Spatial and temporal trends of mean and extreme rainfall and temperature for the 33 urban centers of the arid and semi-arid state of Rajasthan, India. *Atmos. Res.*, **138**, 73-90, doi:10.1016/j.atmosres.2013.10.024.
- Su, F., X. Duan, D. Chen, Z. Hao, and L. Cuo, 2013: Evaluation of the global climate models in the CMIP5 over the Tibetan Plateau. *J. Climate*, **26**, 3187-3208, doi:10.1175/JCLI-D-12-00321.1.
- Suh, M.-S., and Coauthors, 2016: Projections of high resolution climate changes for South Korea using multiple-regional climate models based on four RCP scenarios. Part 1: surface air temperature. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **52**, 151-169, doi:10.1007/s13143-016-0017-9.
- Tang, J., S. Wang, X. Niu, P. Hui, P. Zong, and X. Wang,

- 2017: Impact of spectral nudging on regional climate simulation over CORDEX East Asia using WRF. *Climate Dyn.*, **48**, 2339-2357, doi:10.1007/s00382-016-3208-2.
- Taylor, K. E., R. J. Stouffer, and G. A. Meehl, 2012: An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 485-498, doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1.
- Torma, C., F. Giorgi, and E. Coppola, 2015: Added value of regional climate modeling over areas characterized by complex terrain—precipitation over the Alps. *J. Geophys. Res.*, **120**, 3957-3972, doi:10.1002/2014JD022781.
- von Storch, H., H. Langenberg, and F. Feser, 2000: A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 3664-3673.