

# CORDEX-EA Phase 2 다중 지역기후모델 앙상블을 이용한 전지구 온난화 제한 목표(1.5, 2.0°C)하에서의 한반도 미래 기온 전망

김도현\*<sup>†</sup> · 김진욱\*\* · 김태준\* · 변영화\*\*\* · 장은철\*\*\*\* · 차동현\*\*\*\*\* · 안중배\*\*\*\*\* · 민승기\*\*\*\*\*

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

## Future Projection of Temperature over The Korean Peninsula under Global Warming Targets of 1.5 and 2.0°C, Using the Multi-RCM Ensemble in CORDEX-EA Phase 2

Kim, Do-Hyun\*<sup>†</sup> · Kim, Jin-Uk\*\* · Kim, Tae-Jun\* · Byun, Young-Hwa\*\*\* · Chang, Eun-Chul\*\*\*\*  
· Cha, Dong-Hyun\*\*\*\*\* · Ahn, Joong-Bae\*\*\*\*\* and Min, Seung-Ki\*\*\*\*\*

\*Researcher, Climate Change Research Team, National Institute of Meteorological Sciences (NIMS), Seogwipo, Korea

\*\*Research Scientist, Climate Change Research Team, NIMS, Seogwipo, Korea

\*\*\*Director, Climate Change Research Team, NIMS, Seogwipo, Korea

\*\*\*\*Professor, Department of Atmospheric Science, Kongju National University, Gongju, Korea

\*\*\*\*\*Professor, Department of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology, Ulsan, Korea

\*\*\*\*\*Professor, Department of Atmospheric Science, Pusan National University, Busan, Korea

\*\*\*\*\*Professor, Division of Environmental Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology, Pohang, Korea

### ABSTRACT

This study presents a future projection of temperature over the Korean Peninsula (KP) under the global warming targets of 1.5°C and 2.0°C set in the 2015 Paris Agreement. For projection, simulation data from the multi-Regional Climate Model (RCM) ensemble in Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX)-East Asia (EA) Phase 2 are used. Under the 2.0°C (1.5°C) global warming condition, mean temperature over KP would increase 2.13°C (1.51°C) compared to the present period (1985~2005 years). Extreme minimum and maximum temperature intensity indices (TNn and TXx) would also increase 2.61°C (1.91°C) and 2.38°C (1.58°C). In addition, changes in probabilities of extreme temperature events that occurs once in 20 years during the present period are investigated. Extreme cold events would occur once in 28.9 years (22.6 years) and warm events once in 5.9 years (7.2 years). Meanwhile, there are several noteworthy points about the future projection. The temperature over KP would increase more over the northern KP than the southern KP and this feature is more distinct in TNn. The uncertainties of the projection are higher for the 1.5°C warming condition than the 2.0°C warming condition and for extreme temperature versus mean temperature. The spatial pattern of change in extreme temperature frequency is different from that of intensity. In other words, a smaller increase in the frequency of extreme cold events is expected over the inland KP.

*Key words: Global Warming Target, Multi-RCM ensemble, CORDEX-EA Phase 2, The Korean Peninsula, Projection of Temperature*

### 1. 서론

2021년에 발간된 기후 변화에 관한 정부간 협의체

(Intergovernmental Panel on Climate Change)의 6차 평가 보고서(Sixth Assessment Report)에 따르면 산업혁명 전 (1850~1900년)에 비하여 21세기의 첫 20년(2001~2020

<sup>†</sup>Corresponding author : [dall201@korea.kr](mailto:dall201@korea.kr) (NIMS, 33, Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju-do, 63568, Korea. Tel. +82-64-780-6790)

ORCID 김도현 0000-0002-3829-5532  
김진욱 0000-0001-9892-9915  
김태준 0000-0002-5452-4796  
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

년)의 전지구 기온이 0.99℃ 상승하였으며, 이는 인간의 온실가스 배출에 기인한 것이 명백하다(IPCC, 2021). 2018년 8월 서울 39.6℃ 및 홍천 41.0℃의 최고 기온 기록 경신과 함께, 2021년 북서 아메리카 폭염 등 전 세계 곳곳에서 이상 기후 현상이 일어나고 있다(KMA, 2018; Philip et al., 2021). 이상 기후 현상으로 인한 피해를 막고자, 2015년 파리 협약에서는 전지구 기온 상승을 산업혁명 대비 2.0℃로 제한하고, 이를 되도록 1.5℃까지 제한할 수 있도록 전세계 195개국이 온실가스 배출을 감축하기로 합의한 바 있다(UNFCCC 2015). 따라서 온난화 제한 목표(1.5℃ 및 2.0℃)에 따른 효과적인 대응을 위해서는 정확한 한반도 기후 변화 전망이 필요한 상황이다.

여러 선행 연구에서는 전지구모델(Global Climate Model; GCM)의 모의자료를 이용하여 온난화 제한 목표하에서의 전지구 및 지역 규모의 기온 변화를 전망하였다(King et al., 2017; Kharin et al., 2018; Lee and Min, 2018). 하지만 GCM의 수평 해상도는 최대 100 km 정도로, 한반도의 기온을 전망하기에는 한계가 있다. 이러한 한계점에 대하여, GCM의 모의자료를 경계장으로 사용하여 여러 지형효과를 더하고 해상도를 향상시키는 역학적 상세화 과정을 거쳐 산출된 지역기후모델(Regional Climate Model; RCM)의 모의자료를 사용하는 것이 해결책이 될 수 있다. 따라서 여러 선행 연구에서는 다중 RCM 모의자료를 사용하여 온난화 제한 목표하에서의 지역 규모의 기온을 전망하였다(Vautard et al., 2014; Dosio and Fischer, 2018; Im et al., 2019; Jo et al., 2019).

표준화된 RCM의 모의자료 산출 및 관리를 위하여, 세계 기후 연구계획(World Climate Research Program)에서는 국제 지역기후 상세화 프로젝트(Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment; CORDEX)를 발족하였다(Giorgi et al., 2009). CORDEX 프로젝트는 대륙 규모의 지역으로 나뉘어 해당 지역의 RCM 모의자료를 산출하며, 동아시아 지역에 대해서는 국립기상과학원을 비롯한 CORDEX-EA (East Asia) 참여 연구진에 의해서 모의자료가 산출되었다(Kim et al., 2014). 가장 첫번째 프로젝트였던 CORDEX-EA Phase 1에서는 접합 모델 상호 비교 프로젝트(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5; CMIP5) (Taylor et al., 2012)의 GCM 모의자료를 경계장으로 하여 동아시아 지역에 대해 50 km의 수평 해상도를 가지는 RCM 모의자료가 산출되었다. 최근 프로젝트인 CORDEX-EA Phase 2에서는 CMIP5와 더불어 최신 GCM인 CMIP6 (Eyring et al., 2016)의 모의자료를

경계장으로 하여 수평 해상도가 25 km로 향상된 RCM 모의자료가 산출되었다. 한편, RCM의 미래 전망에는 RCM 자체의 불확실성뿐만 아니라 경계장으로 사용된 GCM의 불확실성에도 영향을 받을 수 있다(Kim et al., 2020). 이에 따라, 여러 선행 연구에서는 다중 GCM, RCM 및 시나리오 모의자료를 이용하여 구축된 다중 RCM 앙상블을 토대로 온난화 제한 목표하에서의 동아시아 및 타 지역의 기온 변화를 전망한 바 있으며, 이렇게 구축된 다중 RCM 앙상블을 이용한다면 전망의 불확실성이 줄어들 것으로 기대할 수 있다.

본 연구에서는 RCM의 미래 기후 모의자료를 이용하여 파리 협약에서 제시된 온난화 제한 목표하에서의 한반도 기온 변화를 전망하고자 한다. 이때, 다중 RCM 앙상블의 모의자료를 이용하여 기온 전망의 불확실성을 줄이고자 하였다. 일부 RCM 앙상블만을 이용한 선행 연구(Im et al., 2019; Jo et al., 2019)와 비교하여, 본 연구에서는 CORDEX-EA Phase 1 및 Phase 2의 모든 앙상블 모의자료를 사용하여 한반도 기온 전망의 신뢰성을 제고하였다.

## 2. 자료 및 연구 방법

### 2.1. 자료

본 연구에서는 다중 RCM 앙상블 구축을 위하여, GCM 4종과 이를 경계장으로 한 CORDEX-EA Phase 2 하의 RCM 6종의 모의자료를 이용하였다. 이때, GCM 3종은 CMIP5하의 UKESM (Sellar et al., 2019) 및 CMIP6 하의 HadGEM2-AO (Martin et al., 2011), MPI-ESM-LR (Giorgetta et al., 2013), GFDL-ESM2M (Dunne et al., 2012)이며, RCM 6종은 HadGEM3-RA (Davies et al., 2005), CCLM (Rockel et al., 2008), WRF (Powers et al., 2017), GRIMs (Hong et al., 2013), RegCM (Giorgi et al., 2012), SNU-MM5 (Cha and Lee, 2009)이다. 각 GCM에 따라 산출된 RCM의 종류는 서로 다르며, 이는 Table 1에 상세히 기술되어 있다.

이와 함께, 온실가스 배출량에 따른 미래 전망을 위하여, 본 연구에서는 CMIP5의 대표 농도 경로(Representative Concentration Pathway; RCP) (van Vuuren et al., 2011) 시나리오 2종(RCP2.6, RCP8.5) 및 CMIP6의 공동 사회 경제 경로(Shared Socioeconomic Pathways; SSP) (Riahi et al., 2017) 시나리오 4종(SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5)

Table 1. Simulated global warming timing of 1.5°C and 2.0°C from each GCM, RCM and scenario

Project	GCM		Scenario	Global warming target	
	Model	Members		1.5°C	2.0°C
CMIP6	UKESM	HadGEM3-RA, CCLM, WRF, GRIMs and RegCM	SSP1-2.6	2021	2031
			SSP2-4.5	2021	2031
			SSP3-7.0	2023	2032
			SSP5-8.5	2021	2029
CMIP5	HadGEM2-AO	HadGEM3-RA, CCLM and RegCM	RCP2.6	2045	-
			RCP8.5	2033	2044
CMIP5	MPI-ESM-LR	HadGEM3-RA, CCLM, WRF and SNU-MM5	RCP2.6	2023	-
			RCP8.5	2017	2036
CMIP5	GFDL-ESM2M	WRF and RegCM	RCP2.6	-	-
			RCP8.5	2038	2053
Total samples				36	29

자료를 사용하였다. CMIP6의 UKESM을 경계장으로 사용한 지역기후모델에 대해서는 SSP 시나리오 자료를 이용하였으며, CMIP5의 나머지 GCM을 경계장으로 사용한 지역기후모델에 대해서는 RCP 시나리오 자료를 이용하였다 (Table 1). 이때, 대기 중 온실가스 양에 따라, SSP1-2.6 및 RCP2.6은 저농도 온실가스 시나리오, SSP3-7.0, SSP5-8.5 및 RCP8.5는 고농도 온실가스 시나리오, SSP2-4.5 시나리오 오는 중간 농도 온실가스 시나리오로 구분할 수 있다. 또한, 온난화 제한 목표하에서의 기온 변화 계산 및 방법론에서 소개할 RCM 모의자료의 편차 보정을 위하여 현재 기후 모의 실험(Historical) 자료를 사용하였다.

한편, 평균 기온(mean temperature) 뿐만 아니라 극한 기온(extreme temperature)의 전망도 살펴보기 위하여 일 평균 기온(tas)과 함께 일 최저 기온(tasmin) 및 일 최고 기온(tasmax)의 기온 3종 변수를 사용하였다. 이와 함께, RCM 모의자료의 성능평가 및 편차 보정을 위하여 남한 59개 및 북한 27개의 총 86개 종관 기상 관측(Automated Synoptic Observing System; ASOS) 지점의 기온 3종 자료를 사용하였으며, 관측 지점에 대한 상세 정보는 Table S1에 기술되어 있다.

## 2.2. 연구 방법

전지구 온난화 제한 목표에 따른 한반도 기온 전망을 위해서는 전지구 지역에 대한 제한 온도 도달 시점을 정의하는 것이 필요하다. 하지만 RCM의 모의자료는 동아시아 지역에 대해서만 적분 되었으므로, 도달 시점의 산출에는 각 RCM의 경계장으로 사용된 GCM의 모의자료를 사용하였다. 이때, 제한 온도 도달 시점에 대한 기준 기간은 산업혁명 전인 1861년부터 1901년이며, 해당 기준 시점으로부터

전지구 기온이 1.5°C 및 2.0°C에 도달하는 시점을 제한 온도 도달 시점으로 정의하였다. 이와 함께, 기온의 경년 변동성이 아닌 온실가스 배출로 인한 전반적인 제한 온도 도달 시점이 산출되어야 하므로, 21년 이동 평균된 기온자료를 사용함으로써 경년 변동성으로 인한 영향을 줄여주었다. 이러한 방법론은 RCM의 모의자료를 이용한 여러 선행 연구에서 사용된 바 있다(Vautard et al., 2014; Dosio and Fischer, 2018; Li et al., 2018; Jo et al., 2019). 산출된 제한 온도 도달 시점은 각 GCM 및 시나리오에 따라 다르게 나타났으며, 일부 GCM의 저농도 온실가스 시나리오에서는 온난화에 도달하지 못할 것으로 전망되었다. 각 GCM 및 시나리오에 따른 제한 온도 도달 시점은 Table 1에 정리되어 있다.

다음으로, 여러 선행 연구에서는 극한 기온의 변화를 두 가지 방법으로 정량화 한 바 있다. 첫 번째 방법은 특정 지수를 이용하는 방법이고, 두 번째 방법은 극한 분포 정리(extremal types theorem)를 이용한 방법이다. 본 연구에서는 두 가지 방법 모두를 이용하여 극한 기온의 변화를 정량화하고 이에 대한 전망을 제시하였다.

### 2.2.1. 특정 지수 이용 방법

극한 기온의 변화를 정량화하기 위해 ETCCDI (Expert Team of Climate Change Detection and Indices) 극한 기후 지수를 사용하였다(Zhang et al., 2011). ETCCDI 극한 기후 지수는 관측 자료(Donat et al., 2013) 및 모델 자료(Sillmann et al., 2013; Kim et al., 2020)를 이용한 분석에서 극한 기후의 특징을 잘 나타낸 바 있다. 본 연구에서는 극한 기온 강도 지수 2종(TNn, TXx)과 극한 기온 빈도 지수 2종(TN10p, TX90p)을 이용하였으며, 지수의 상세 내용은 Table 2에 기술되어 있다.

Table 2. Specification of extreme climate indices calculated using daily minimum temperature (TN) and maximum temperature (TX). The percentile for Historical experiment is based on present period (1985 ~ 2005 years)

Label	Index Name	Index Definition	Units
TNn	Min TN	The minimum TN in each year	℃
TXx	Max TX	The maximum TX in each year	℃
TN10p	Cold nights	The days TN is lower than 10 <sup>th</sup> percentile of TN for Historical experiment in each year	day
TX90p	Warm days	The days TX is higher than 90 <sup>th</sup> percentile of TX for Historical experiment in each year	day

2.2.2. 극한 분포 정리 이용 방법

극한 분포 정리는 관측치 중 가장 큰 값의 분포가 관측치의 원래 분포와 상관없이 일정한 분포에 수렴한다는 정리이다. 이때, 수렴되는 분포를 일반화 극단 분포 (Generalized Extreme Value Distribution; GEVD)라고 하며, 분포의 우측(극단값)에 긴 꼬리를 가지기 때문에 극한 기온의 특성을 잘 나타낼 수 있다(Coles, 2001). 앞서 소개된 극한 기후 지수인 TXx는 일 최고 기온의 연 최고값을 뜻하므로 해당 분포를 따른다고 예상할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 격자별 TXx 시계열을 GEVD에 적합(fitting)시킨 후, 해당 분포를 통해 극한 기온의 변화를 정량화하려고 한다. GEVD의 확률밀도함수(probability distribution function)는  $1 + \left(\frac{k(x-\xi)}{\beta}\right)$ 이 0이고  $k \neq 0$ 일 때 최대값 변수  $x$ 에 대하여 다음과 같이 표현된다.

$$f(x) = \frac{1}{\beta} t(x)^{k+1} e^{-t(x)}, \tag{1}$$

$$\text{where } t(x) = \left\{ 1 + k \left( \frac{x - \xi}{\beta} \right) \right\}^{-\frac{1}{k}}$$

이때,  $\xi$ 는 위치(location) 모수,  $\beta$ 는 척도(scale) 모수,  $k$ 는 모양(shape) 모수를 나타낸다. 본 연구에서는 최대우도추정법(maximum likelihood estimation)을 이용하여 각 격자 및 앙상블에 대한 모수들을 추정하였다(Martins and Stedinger, 2000). 이와 함께, 해당 분포의 누적분포함수(cumulative distribution function) 및 백분위수(quantile) 함수를 이용하여 재현 수준(return level;  $z_p$ )을 산출할 수 있으며, 이는  $k \neq 0$ 의 조건일 때 확률  $p$ 에 대하여 다음과 같다.

$$z_p = \xi + \frac{\beta}{k} \left[ \{-\ln(p)\}^{-k} - 1 \right] \tag{2}$$

한편,  $Y_n = -X_n$ 라고 하고,  $\widetilde{M}_n = \min\{X_1, \dots, X_n\}$ ,  $M_n =$

$\max\{Y_1, \dots, Y_n\}$ 이면,  $\widetilde{M}_n = -M_n$ 이므로, 최대값에 대한 모수 추정치를  $(\xi, \beta, k)$ 라고 하면, 최소값에 대한 모수 추정치는  $(-\xi, \beta, k)$ 이다. 따라서 본 연구에서는 일 최저 기온의 연 최저값을 뜻하는 TNn에 대하여 모수를 추정하여 극한 저온 분포의 변화도 살펴보았다.

한편, CMIP6 하에서의 Historical 실험 적분 기간은 2014년까지이나, CMIP5 하에서의 적분 기간은 2005년까지이다. 따라서 본 연구에서는 모든 RCM 모의자료를 이용하기 위해 아노말리 계산의 기준 기간을 1985년부터 2005년까지로 설정하였으며, 이를 현재 기간으로 명명하였다. 이와 함께, 현재 기간의 한반도 ASOS 관측 자료와 Historical 실험 모의 자료와의 비교를 통하여 각 RCM 앙상블의 편차를 보정하였다. 이때 편차 보정을 위하여 RCM의 모의 자료를 각 ASOS 지점의 위치에 맞게 선형 내삽 작업을 실시하였으며, 사용된 편차 보정 기법은 Variance Scaling 기법이다(Chen et al., 2011). 해당 기법은 자료의 평균만 보정해주는 Linear Scaling 기법에 비해 자료의 분산까지 보정해준다는 장점이 있으며, 보정 기법의 자세한 사항은 Teutschbein and Seibert (2012) 및 Kim et al.(2021)에 기술되어 있다.

3. 연구 결과

3.1. 현재 기후 모의

온난화 제한 목표하에서의 한반도 기온을 전망하기 앞서, 본 절에서는 전망에 사용된 RCM 모의자료의 현재 기후 성능을 평가하였다. 이때, 시간 분포 평가를 위하여 일 기후값을, 공간 분포 평가를 위하여 공간 상관 계수(pattern correlation coefficient)와 공간 표준 편차를 나타내는 테일러 선도(Taylor diagram) (Taylor, 2001)를 이용하였다(Fig. 1).

Fig. 1a는 관측과 RCM 모의 자료에 대한 일평균기온의 시간 분포를 나타낸 것이다. 점선은 편차보정 전의 값을 나타내

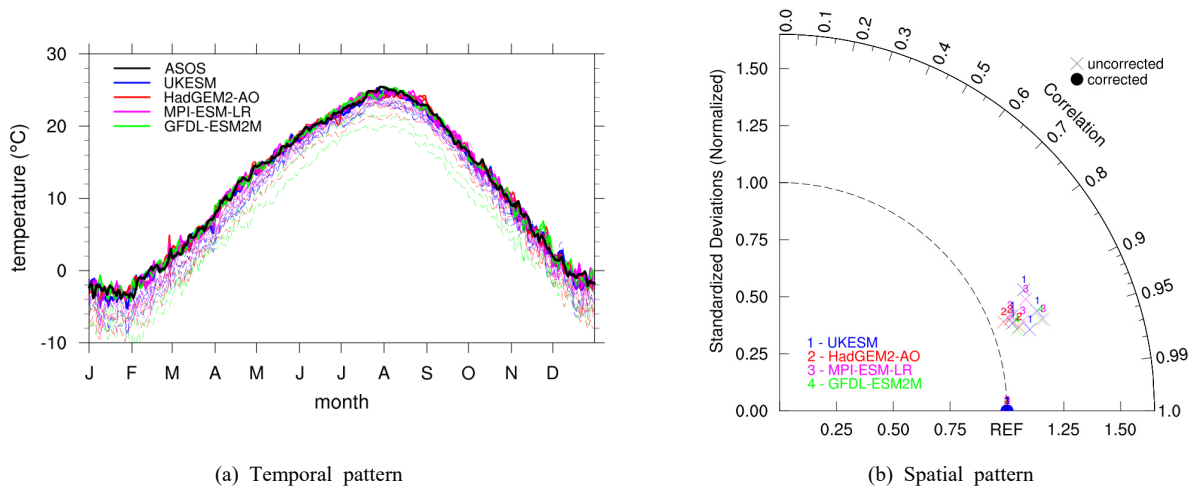


Fig. 1. (a) Daily climatology and (b) Taylor diagram of daily mean temperature for Multi-RCM ensemble (MME) and ASOS data. The ensemble is grouped as corresponding GCM. Bias uncorrected (corrected) simulation data is indicated dashed (solid) line in (a) and cross (dot) in (b). Historical experiment and ASOS data during present period (1985 ~ 2005 years) are used

며, 실선은 편차 보정 후의 값을 나타낸다. ASOS 관측 자료의 값을 보면, 8월에 일 평균기온이 최대값을 가지며, 1월에 최소 값을 보인다. 이러한 한반도의 시간 분포를 RCM 모의자료가 잘 모의하고 있는 것을 확인할 수 있다. 하지만, RCM 모의자료는 ASOS에 비하여 낮은 기온을 모의함으로써 음의 편차(-4.6 ~ -0.8°C)가 발생하였다. 한편, 이러한 시간 분포 편차는 VS 편차 보정 기법을 통하여 해소된 것을 확인할 수 있다. 다음으로 공간 분포에 대하여(Fig. 1b), RCM 모의자료와 ASOS 간의 공간 상관계수는 0.90 ~ 0.95로 나타났으며, 표준화된 표준편차는 1.06 ~ 1.23으로 나타났다. 즉, RCM 모의자료가 한반도의 기온 공간 분포를 잘 모의하고 있으나, 약간의 편차를 가지고 있음을 의미한다. 한편, 이러한 공간 분포의 편차도 본 연구에서 사용한 편차 보정 기법을 통하여 해소된 것을 확인할 수 있다.

본 절에서는 RCM 모의 자료가 가지는 시간 및 공간 편차를 확인하였으며, 해당 편차가 편차 보정 기법을 통하여 해소된 것을 확인하였다. 따라서 산출된 편차 보정 계수를 미래 시나리오 자료에 적용하였으며, 편차 보정된 시나리오 자료를 이용함으로써 온난화 제한 목표하에서의 한반도 미래 기온 전망의 신뢰성을 제고하였다.

### 3.2. 온난화 제한 목표에 따른 평균 기온 전망

본 절에서는 온난화 제한 목표에 따른 한반도 평균 기온

전망에 대해 서술하였다. Fig. 2는 전지구 1.5°C 및 2.0°C 온난화 환경하에서의 한반도 일 평균 및 최저, 최고 기온의 변화(anomaly; 아노말리)를 나타내며, 추가 온난화(2.0°C ~ 1.5°C)로 인한 아노말리 차이도 제시되어 있다. 이때, 아노말리는 현재 기간을 기준으로 계산되었으며, 다중 RCM 앙상블의 평균(Multi-RCM Ensemble; MME)에 대해서 제시되어 있다.

전지구 2.0°C 온난화 환경하에서, 한반도의 일 평균 및 최저, 최고 기온은 현재 기간에 비해 각각 2.13°C, 2.14°C, 2.08°C 증가할 것으로 전망되었다(Fig. 2b,e,h). 이때, 일 최저 기온에 대하여, 남한 지역(2.04°C)에 비하여 북한 지역(2.36°C)의 기온 상승이 더 크게 나타날 것으로 전망되었다. 일 최고 기온에 대해서는 이러한 지역 편차가 약하게 나타날 것으로 확인되었다. 또한, 한반도의 일 최고 기온(2.08°C)보다 일 최저 기온(2.14°C)이 더 크게 상승하는 것으로 전망되었다.

한편, 전지구 1.5°C 온난화 환경하에서는 한반도의 일 평균 및 최저, 최고 기온은 현재 기간에 비해 각각 1.51°C, 1.53°C, 1.44°C 상승할 것으로 전망되었다(Fig. 2a,d,g). 즉, 1.5°C 온난화 하에서도 한반도의 평균 기온은 상승하나, 그 규모는 2.0°C 온난화 환경과 비교하여 작을 것으로 확인되었다. 또한, 1.5°C 환경에서도 남한 지역에 비해 북한 지역의 기온이 더 크게 상승하고, 일 최고 기온에 비해 일 최저 기온이 더 크게 상승할 것으로 전망되었다.

마지막으로, 0.5°C 추가 온난화로 인한 한반도 기온 전망을 살펴보았다(Fig. 2c,f,i). 추가 온난화로 인하여, 한반

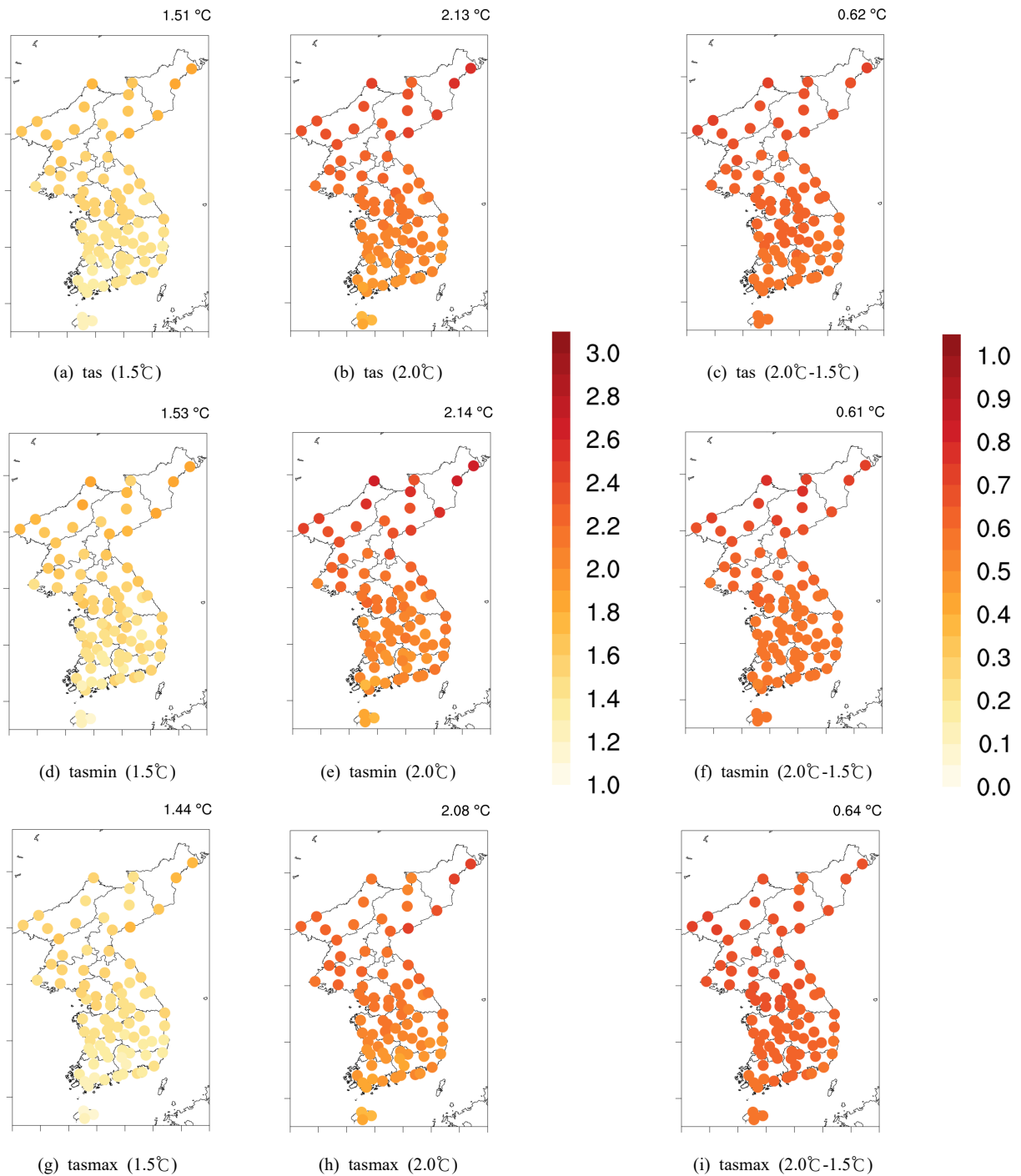


Fig. 2. Geographical distributions for anomalies of daily mean temperatures (tas, tasmin and tasmax) from MME. The anomalies are from two global warming targets of 1.5°C and 2.0°C. Differences of anomalies induced additional warming (2.0°C ~ 1.5°C) is also suggested. The anomalies are based on Historical experiment during present period. The anomaly spatially averaged for a corresponding variable is located at upper right in each plot

도의 일 평균, 최고 및 최저 기온은 각각  $0.62^{\circ}\text{C}$ ,  $0.61^{\circ}\text{C}$ ,  $0.64^{\circ}\text{C}$  추가 상승할 것으로 전망되었다. 이때, 지역 및 기온 종류에 따른 편차는 추가 상승에 대하여 작게 나타날 것으로 확인되었다.

### 3.3. 온난화 제한 목표에 따른 극한 기온 전망

#### 3.3.1. 극한 기온 강도 지수

본 절에서는 앞서 전망한 평균 기온의 변화와 더불어 극한 기온의 변화를 전망하였다. 이를 위하여 극한 기온 강도 지수 2종의 변화를 살펴보았다. Fig. 3는 각 제한 목표하에서의 극한 기온 강도 지수의 아노말리 전망 및 제한 목표 간의 전망 차이를 나타내고 있다.

전지구  $2.0^{\circ}\text{C}$  온난화 환경에 대해서 살펴보면, 현재 기간에 비하여 극한 저온 강도 지수는  $2.61^{\circ}\text{C}$  증가하고, 극한 고온 강도 지수는  $2.38^{\circ}\text{C}$  증가할 것으로 전망되었다(Fig. 3b,e). 해당 전망치는 평균 기온( $2.13^{\circ}\text{C}$ ) 보다 더 크며, 이는 동일한 온실

가스 강제력에 대하여 평균 기온에 비해 극한 기온이 더 크게 반응할 것임을 시사한다. 한편, 평균 기온에 대해서 전망되었던 편차가 극한 기온에 대해서도 나타날 것으로 확인되었다. 즉, 극한 저온 강도 지수에 대하여, 북한 지역( $3.04^{\circ}\text{C}$ )이 남한 지역( $2.41^{\circ}\text{C}$ )에 비해 더 크게 증가하는 지역 편차가 전망되었다. 이러한 지역 편차는 극한 고온 강도 지수에 대해서는 비교적 약하게 나타날 것으로 확인되었다. 이와 함께, 극한 저온 강도 지수( $2.61^{\circ}\text{C}$ )가 극한 고온 강도 지수( $2.38^{\circ}\text{C}$ )에 비해 더 크게 상승하는 기온의 종류에 따른 편차가 전망되었다.

다음으로, 전지구  $1.5^{\circ}\text{C}$  온난화 환경하에서의 한반도 극한 기온 강도 지수의 변화 전망을 살펴보았다(Fig. 3a,d).  $1.5^{\circ}\text{C}$  온난화 환경에서 극한 저온 강도 지수는  $1.91^{\circ}\text{C}$  상승하고, 극한 고온 강도 지수는  $1.58^{\circ}\text{C}$  상승할 것으로 확인되었다. 이와 함께,  $1.5^{\circ}\text{C}$  온난화 환경에 대해서도 지역 및 기온의 종류에 따른 반응의 편차가  $2.0^{\circ}\text{C}$  온난화 환경과 유사하게 나타날 것으로 전망되었다.

한편,  $0.5^{\circ}\text{C}$  추가 온난화에 의하여, 한반도의 극한 저온

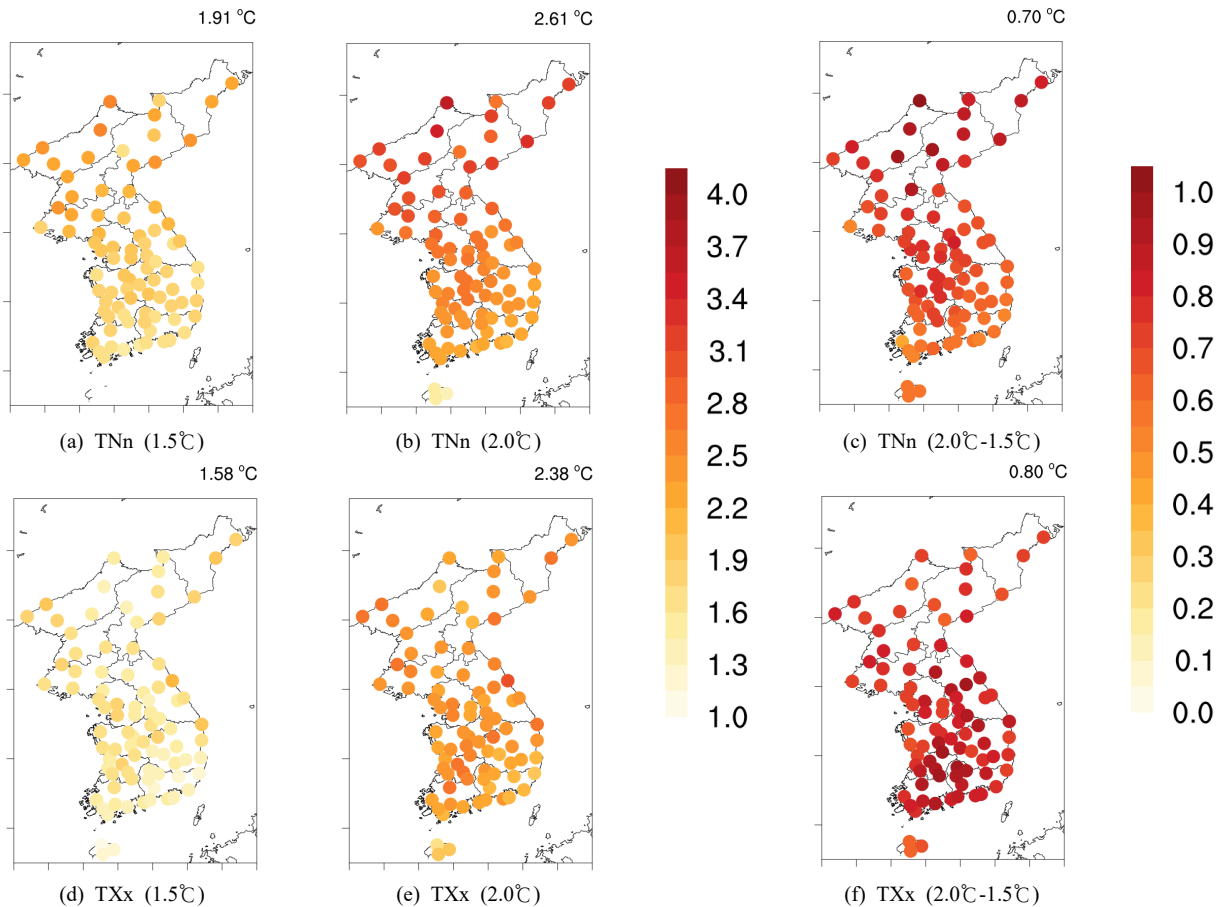


Fig. 3. Same as Fig. 2 except for extreme climate indices of TNN and TXx

강도 지수는 0.70°C 추가 증가하고, 극한 고온 강도 지수는 0.80°C 추가 증가할 것으로 전망되었다(Fig. 3c,f). 전지구 추가 온난화로 인하여 극한 저온 강도 지수에 대해서는 북한 지역이 남한 지역에 비해 더 크게 추가 상승할 것으로 전망 되었지만, 극한 고온 강도 지수에 대해서는 남한 지역이 북

한 지역에 비해 더 크게 추가 상승할 것으로 확인되었다.

마지막으로, 평균 기온 및 극한 기온 전망에 대한 불확실성 분석을 수행하였다. 이를 위하여 일 평균 기온(tas) 및 극한 기온 강도 지수 2종(TNn, TXx)에 대한 RCM 앙상블별 전망의 표준 편차를 산포도(scatter plot)을 이용하

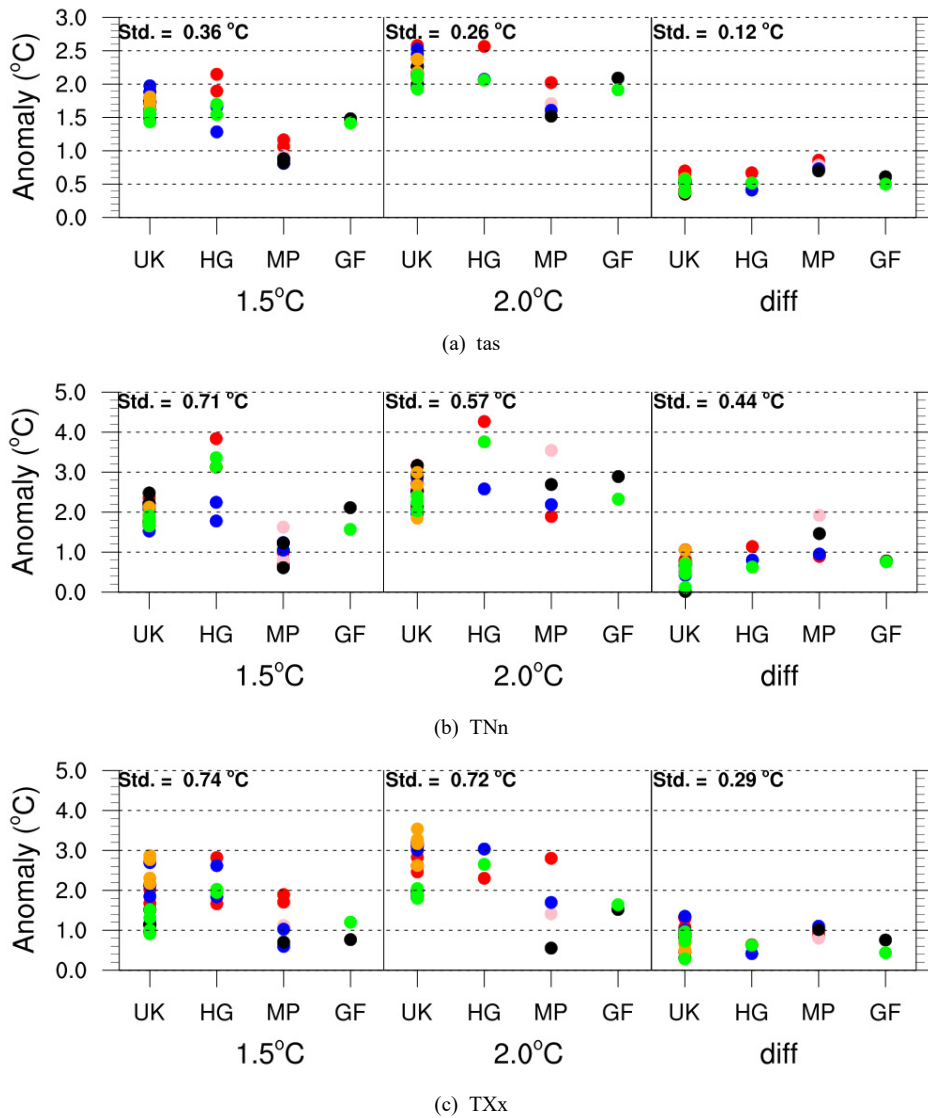


Fig. 4. Scatter plots for anomalies of a mean temperature (tas) and extreme climate indices (TNn and TXx). The anomalies are arranged as ensembles of GCMs, RCMs, target temperatures and additional warming. The GCMs are indicated as labels, UK (UKESM), HG (HadGEM2-AO), MP (MPI-ESM-LR) and GF (GFDL-ESM2M). The RCMs are indicated as colors, red (HadGEM3-RA), blue (CCLM), black (WRF), orange (GRIMs), green (RegCM) and pink (SNU-MM5). The additional warming is indicated as “diff”. Inter-ensemble variability is calculated using standard deviation of ensemble and it is indicated as “Std.” on upper-left side of the corresponding section



여 제시하였다(Fig. 4).

평균 기온의 경우, 2.0°C 온난화 환경의 표준편차는 0.26°C이었으나, 1.5°C 온난화 환경의 표준편차는 0.36°C로 확인되었다. 이는 2.0°C 온난화 환경에 비해 1.5°C 온난화 환경의 불확실성이 다소 크게 나타날 것임을 시사한다. 제한 목표에 따른 불확실성의 차이는 극한 저온 강도 지수에 대해서도 동일한 양상으로 나타날 것으로 전망되었으며, 극한 고온 강도 지수의 경우에는 온난화 환경에 따른 전망의 불확실성은 제한 목표 간에 비슷할 것으로 확인되었다. 마지막으로, 추가 온난화에 대해서는 앙상블의 표준편차가 비교적 작게 나타날 것으로 전망되었다. 즉, 평균 기온에 대해서는 해당 표준편차가 0.12°C로 확인되었으며, 이러한 결과는 극한 기온에 대해서도 동일한 양상으로 나타날 것으로 확인되었다.

한편, GCM, RCM 및 시나리오에 대하여 전망의 경향성을 분석하였다(Table S2). 첫 번째로, GCM에 대해서는 MPI-ESM-LR 모델이 타 GCM에 비하여 평균 기온

의 상승을 작게 전망하고, MPI-ESM-LR 및 GFDL-ESM2M 모델은 극한 저온 강도 지수의 상승을 작게 전망할 것으로 확인되었다. 또한, HadGEM2-AO 모델에 대해서는 타 GCM에 비해 극한 고온 강도 지수의 상승이 클 것으로 확인되었다. 두 번째로, RCM에 대해서는 타 RCM에 비하여 HadGEM3-RA 모델이 평균 기온의 상승을 크게 전망하였고, SNU-MM5 모델은 극한 저온 강도 지수를, GRIMs 모델은 극한 고온 강도 지수의 상승을 크게 전망할 것으로 확인되었다. 마지막으로 시나리오에 대해서는, 저농도 온실가스 시나리오에 비하여 고농도 온실가스 시나리오가 평균 및 극한 저온 강도 지수를 더 크게 전망할 것으로 확인되었다.

### 3.3.2. 극한 기온 빈도 지수

3.3.1 절에서는 극한 기온의 강도 지수인 TNn과 TXx를 이용하여 한반도 극한 기온의 강도 변화를 전망하였다. 이번 절에서는 극한 기온 빈도 지수인 TN10p와 TX90p를 이용하여 한반도의 극한 저온 및 고온 빈도의 변화를 전

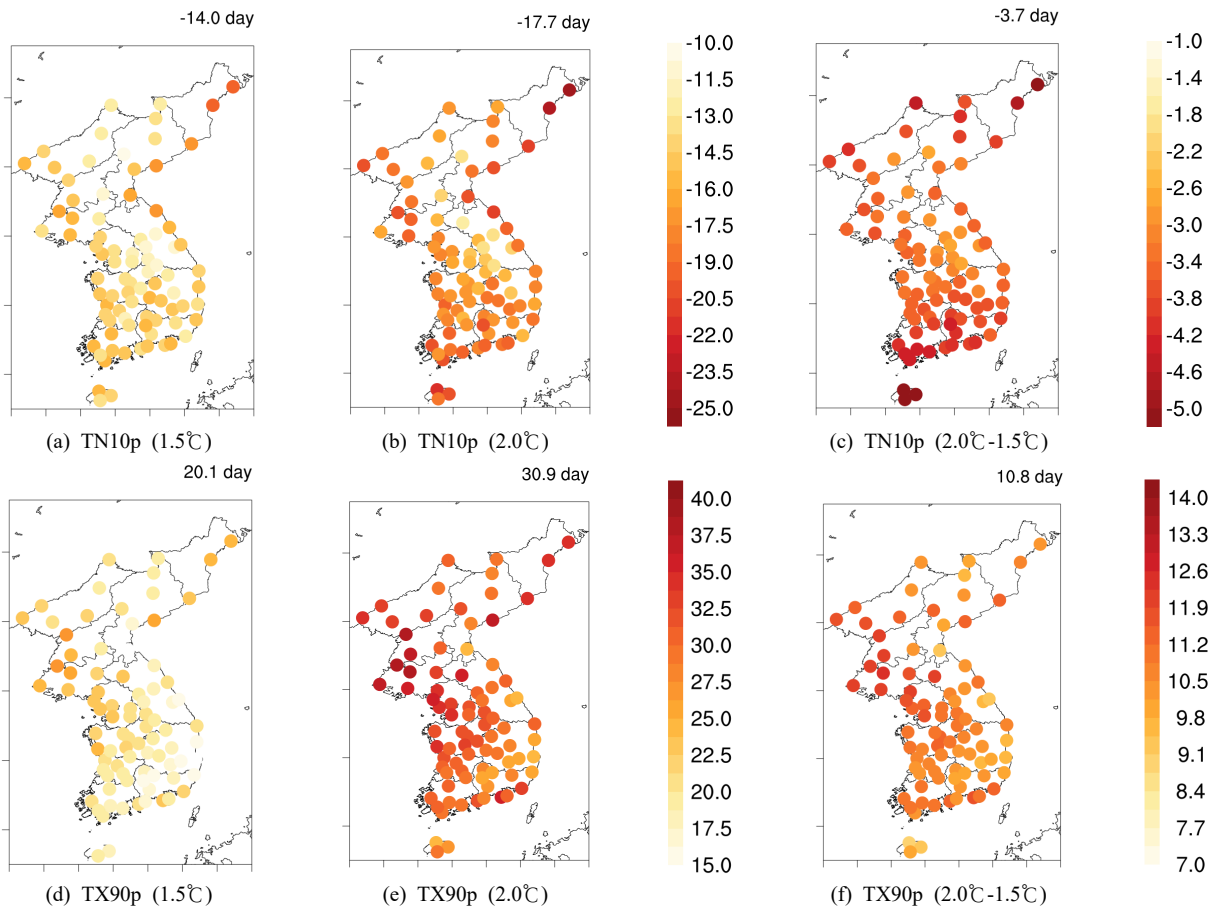


Fig. 5. Same as Fig. 2 except for extreme climate indices of TN10p and TX90p

망하였다(Fig. 5).

현재 기간에 연중 36.5일이었던 극한 기온 빈도 지수와 비교하여, 전지구 2.0°C 온난화 환경하의 한반도 극한 저온 빈도 지수는 17.7일 감소할 것으로 전망되었다(Fig. 5b). 이는 2.0°C 온난화 환경에서 현재 기간에 비해 극한 저온 빈도 지수가 48.5% 감소할 것임을 시사한다. 이때, 극한 저온 빈도 지수는 타 지역에 비해 한반도 내륙에서는 비교적 적게 증가하고, 해안 지역에서는 많이 증가할 것으로 전망되었다. 이는 앞서 나타난 극한 저온 강도 지수의 지역 편차와는 다른 양상을 보일 것임을 의미한다. 이와 함께, 2.0°C 온난화 환경에서 극한 고온 빈도 지수는 30.9일 증가할 것으로 전망되었다(Fig. 5e). 이는 한반도의 극한 고온 빈도 지수가 현재 기간에 비하여 84.7% 증가할 것임을 의미한다. 또한 극한 고온 빈도 지수는 타 지역에 비해 한반도의 서부 일부 지역에서 비교적 많이 상승할 것으로 확인되었다.

한편, 1.5°C 온난화 환경에서 한반도의 극한 저온 빈도 지수는 14.0일 감소하고 극한 고온 빈도 지수는 20.1일 증가할 것으로 전망되었다(Fig. 5a,d). 이는 1.5°C 온난화 환경에서 현재 기간에 비해 극한 저온 빈도 지수가 38.4% 감소하고, 극한 고온 빈도 지수는 55.1% 증가할 것임을 시사한다. 마지막으로, 0.5°C 추가 온난화로 인하여 한반도의 극한 저온 빈도 지수는 3.6일(9.9%) 추가 감소하고 극한 고온 빈도 지수는 10.8일(29.6%) 추가 증가할 것으로 확인되었다(Fig. 5c,f). 이때, 추가 온난화로 인하여 극한 저온 빈도는 한반도 해안 지역에서, 극한 고온 빈도는

한반도 서부 지역에서 타 지역에 비해 많이 상승할 것으로 전망되었다.

### 3.3.3. 극한 기온 분포(GEVD)

앞선 절(3.2.1 및 3.2.2)에서는 극한 기후 지수를 이용하여, 전지구 2.0°C 온난화 환경에서의 한반도 극한 기온의 강도가 강해지고 빈도가 잦아질 것임을 확인하였다. 이와 함께, 0.5°C 추가 온난화로 인하여 극한 기온의 강도 및 빈도가 모두 추가 상승할 것으로 전망되었다. 본 절에서는 다중 앙상블 모의자료를 방법론에서 소개한 GEVD에 적합시켜 한반도 극한 기온의 분포 및 재현 수준 등의 전망을 수행하였다(Fig. 6, Table 3).

현재 기간의 극한 저온 강도 지수(TNn)를 GEVD에 적합시켜 산출된 극한 저온 분포의 확률밀도함수를 살펴보았다(Fig. 6a, Table 3a). 극한 저온 분포의 경우, 모양 모수( $k$ )는 0.17, 위치 모수( $\epsilon$ )는 -14.4°C, 규모 모수( $\beta$ )는 1.77°C로 확인되었다. 극한 저온 분포의 경우 극한 고온 분포와는 반대의 모양이므로, 왼쪽에 극단 값의 꼬리를 갖는 분포를 가지게 된다. 이러한 현재 기간에서의 극한 저온 분포는 전지구 2.0°C 온난화 환경에서 크게 변화할 것으로 전망되었다. 즉, 2.0°C 온난화 환경에서 극한 저온 분포의 모양 모수는 0.25, 위치 모수는 -11.8°C, 규모 모수는 1.79°C로 변화할 것으로 확인되었다. 이때, 현재 기간에 비하여 모양 모수가 0.08 증가하게 되어 (동일 위치 및 규모 모수를 가정했을 때) 극한 저온의 발생 기회가 증가하였지만, 분포의 전반적인 위치를 나타내는 위치 모수가

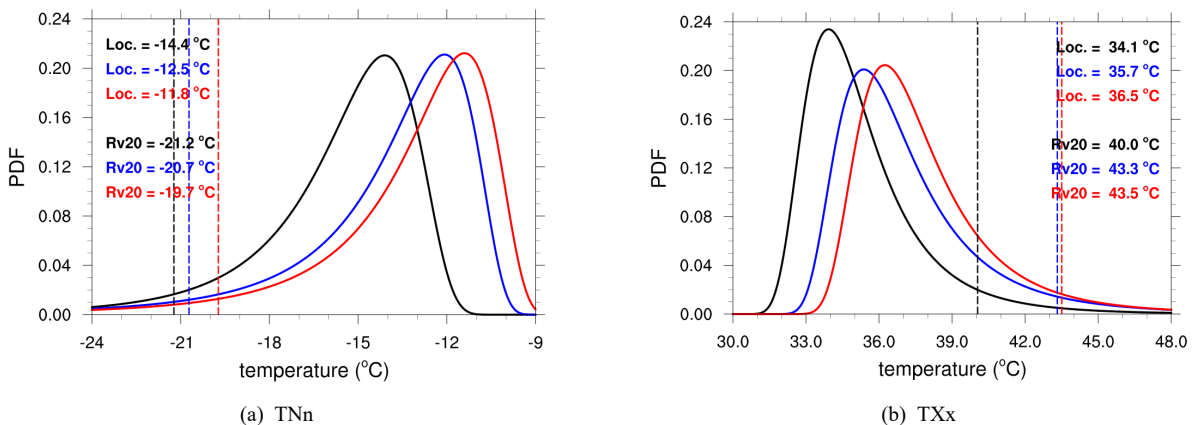


Fig. 6. Probability distribution functions for extreme climate indices under present condition (black), global warming target of 2.0°C (red) and 1.5°C (blue). A location parameter (Loc.) and 20-year return value (Rv20) of TNn (Tx) is located on upper-left (right) side. The return value is also indicated as dotted vertical line

Table 3. Statistics of GEVD for extreme temperature under present and global warming target condition. Return value are for 20 years reoccurrence event. The return period is calculated using 20 years return value during present period. Changes of the statistics induced by 0.5°C additional warming are also suggested

	Present Period	Global warming target		Additional warming	
		1.5°C	2.0°C		
(a) Extreme cold temperature (TNn)					
Parameter	Shape	0.17	0.27	0.25	-0.02
	Location (°C)	-14.4	-12.5	-11.8	0.7
	Scale (°C)	1.77	1.8	1.79	-0.01
Return value (°C)		-21.2	-20.7	-19.7	1.0
Return period (years)		20.0	22.6	28.9	6.3
(b) Extreme warm temperature (TXx)					
Parameter	Shape	0.15	0.2	0.17	-0.03
	Location (°C)	34.1	35.7	36.5	0.8
	Scale (°C)	1.59	1.87	1.82	-0.05
Return value (°C)		40.0	43.3	43.5	0.2
Return period (years)		20.0	7.2	5.9	-1.3

2.6°C 증가하여 극한 저온의 발생 기회가 크게 적어질 것임을 확인할 수 있다. 이에 따라, 20년 재현 수준은 현재 기간에 -21.2°C였으나, 2.0°C 온난화 환경에서는 -19.7°C로 상승할 것으로 전망되었다. 이는 곧, 현재 기간에 20년에 한 번 꼴로 발생하는 극한 저온 사건이 2.0°C 온난화 환경하에서는 28.9년에 한 번 꼴로 발생하는 사건으로 바뀌게 될 것임을 의미한다. 한편, 1.5°C 온난화 환경에서는 극한 저온 분포의 모양 모수는 0.27, 위치 모수는 -12.5°C, 규모 모수는 1.80°C로 변화할 것으로 전망되었다. 즉, 현재 기간과 비교하여, 모양 모수가 증가하였지만, 위치 모수도 증가하여 극한 저온의 발생 기회가 감소할 것으로 전망되었다. 이로 인하여 1.5°C 온난화 환경하에서의 20년 재현 수준은 -20.7°C로 변화하였으며, 이는 20년 빈도의 극한 저온 사건이 22.6년 빈도 사건으로 변화할 것임을 시사한다. 마지막으로, 0.5°C 추가 온난화에 의하여 극한 저온 분포의 위치 모수는 0.7°C 추가 증가하고, 20년 재현 수준은 1.0°C 추가 증가할 것으로 전망되었다. 이는 곧 추가 온난화로 인하여, 20년 빈도의 극한 저온 사건에 대해 6.3년의 추가 빈도 변화가 생길 것임을 의미한다.

다음으로, 극한 고온 강도 지수(TXx)를 GEVD에 적용시켜 산출된 극한 고온 분포의 확률밀도함수를 살펴보았다(Fig. 6b, Table 3b). 현재 기간 하에서의 극한 고온 분

포의 모양 모수는 0.15, 위치 모수는 34.1°C, 규모 모수는 1.59°C로 확인되었다. 해당 분포는 극한 고온 분포이므로 양의 극단값에 대하여 긴 꼬리를 가지는 모양을 나타내게 된다. 이러한 한반도의 극한 고온 분포도 전지구 2.0°C 온난화 환경에서 크게 변화할 것으로 전망되었다. 즉, 2.0°C 온난화 환경하에서 최고 기온 분포의 모양 모수는 0.17, 위치 모수는 36.5°C, 규모 모수는 1.82°C로 변화할 것으로 확인되었다. 현재 기간과 비교하여 위치 모수가 2.4°C 증가하고 규모 모수가 0.23°C 증가함으로써 분포가 현재 기간에 비해 우측으로 크게 이동하고, 분포 오른쪽의 극한 고온 빈도도 크게 증가할 것으로 확인되었다. 즉, 현재 기간 하에서의 20년 재현 수준은 40.0°C였으나, 2.0°C 온난화 환경하에서는 43.5°C로 전망되었다. 이는 현재 기간에 20년에 한 번 꼴로 발생하는 극한 고온 사건이 2.0°C 온난화 환경하에서는 5.9년에 한 번 꼴로 발생하는 사건으로 변화할 것임을 의미한다. 다음으로, 1.5°C 온난화 환경하에서는 극한 고온 분포의 모양 모수는 0.20, 위치 모수는 35.7°C, 규모 모수는 1.87°C로 변화할 것으로 확인되었다. 이에 따라, 1.5°C 온난화 환경에서도 현재 기간에 비해 분포가 오른쪽으로 이동하며, 20년 재현 수준이 43.3°C로 변화할 것으로 전망되었다. 이는 곧, 20년 빈도의 극한 고온 사건이 7.2년의 빈도를 가지는 사건으로 변화

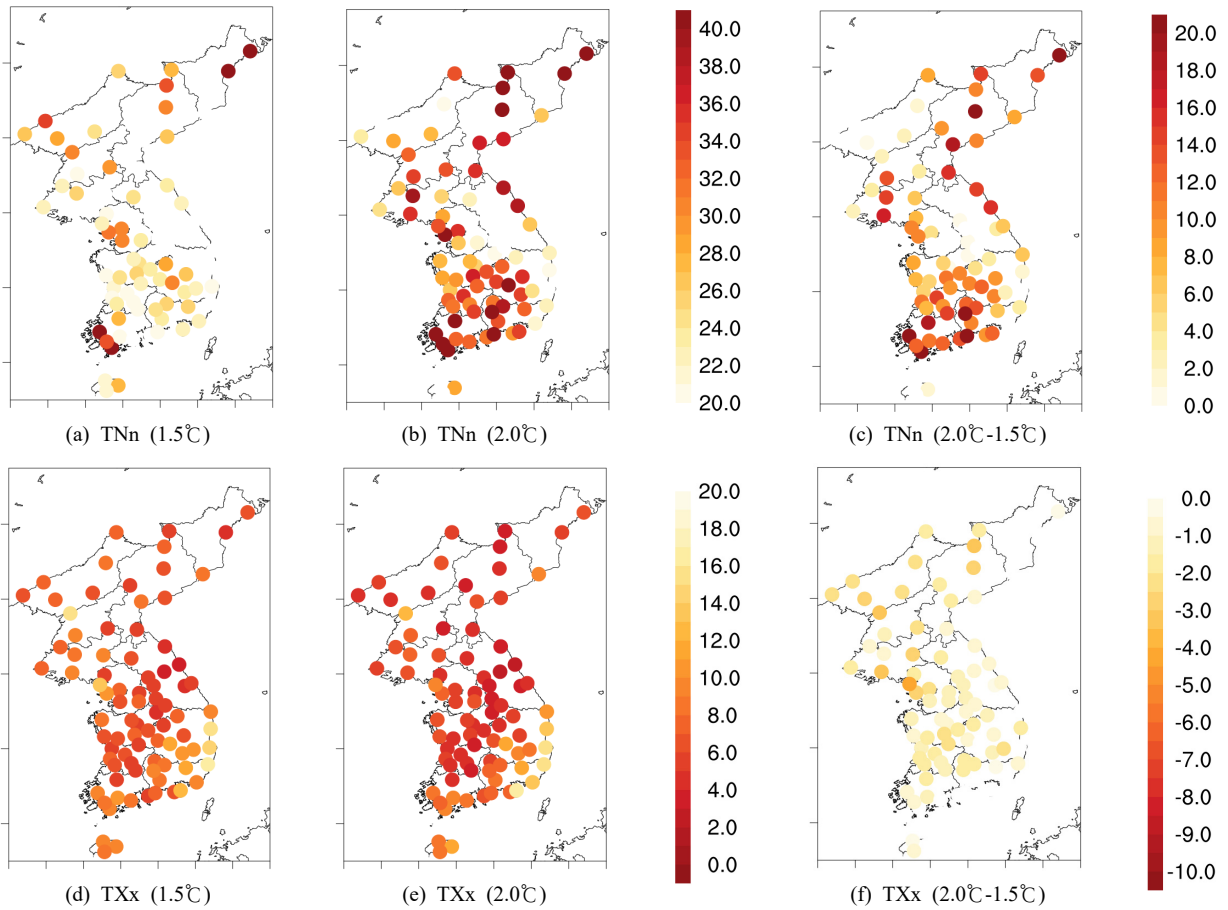


Fig. 7. Geographical distributions for return period for extreme climate indices of TNn and TXx under warming target of 1.5°C and 2.0°C. The return period is calculated using 20-year return value during present period. Difference of return period induced by additional warming is also suggested. The unit is year

할 것임을 의미한다. 한편, 0.5°C 추가 온난화로 인하여 극한 고온 분포의 위치 모수는 0.8°C 추가 증가하고, 20년 재현 수준은 0.2°C 추가 증가할 것으로 전망되었다. 이는 추가 온난화로 인하여, 20년 빈도의 극한 고온 사건에 대하여 1.3년의 추가 빈도 변화가 생길 것임을 의미한다. 이때, 추가 온난화로 인하여 전망된 극한 저온 및 극한 고온 분포의 위치 및 모양 모수의 변화는 서로 비슷했음에도 불구하고 20년 재현 수준의 변화는 극한 저온(1.0°C)에 비해 고온(0.2°C)에 대해서 작게 나타날 것으로 확인되었다. 이는 추가 온난화에 의한 극한 고온 빈도 분포의 규모 모수의 감소(-0.05°C)가 극한 저온 빈도 분포(-0.01°C)에 비해 크게 나타날 것으로 전망되는 것에 기인한다.

마지막으로, 극한 기온 분포의 한반도 86개 격자별 변화를 전망하였다. 이를 위하여, 현재 기간에 20년 빈도로 나

타난 극한 기온 사건이 미래 온난화 환경하에서는 몇 년 빈도로 나타날 것인지를 공간상으로 나타내었다(Fig. 7).

가장 먼저, 극한 저온 사건의 재현 빈도 변화는 지역 편차가 클 것으로 전망되었다. 즉, 2.0°C 온난화 환경에서 극한 저온 사건은 북한 및 남부 일부 지역에서 40년 빈도로 나타날 것으로 확인되었다(Fig. 7b). 이에 반해, 일부 내륙 지역에서는 극한 저온 사건의 빈도 변화가 2.0°C 온난화 환경임에도 불구하고 빈도 변화가 적게 나타날 것으로 전망되었다. 다음으로, 극한 고온 사건의 재현 빈도 변화를 살펴보았으며, 이에 대해서는 지역 편차가 작을 것으로 확인되었다(Fig. 7e). 즉, 경상 지역을 제외한 한반도 전역에서는 극한 고온 사건이 5년 내외로 나타나고, 경상 지역에서는 10년 내외로 나타날 것으로 전망되었다.

한편, 1.5°C 온난화 환경에서는 2.0°C 온난화 환경과 비교하여 극한 저온 및 고온 사건 모두 재현 빈도의 변화가 적을 것으로 확인되었다(Fig. 7a,d). 하지만 1.5°C 온난화 환경임에도 불구하고 전라 해안 및 북한 동부 지역에서 극한 저온 사건의 빈도가 40년 내외로 나타날 것으로 예상되었다. 마지막으로, 0.5°C 추가 온난화로 인하여 발생된 빈도 변화는 극한 저온 사건에 대해서는 많이 나타나나, 극한 고온 사건에 대해서는 비교적 적게 나타날 것으로 전망되었다(Fig. 7c,f). 즉, 극한 저온 사건에 대하여 2.0°C 온난화 환경에서 빈도 변화가 많았던 지역을 중심으로 추가 온난화로 인한 빈도 변화가 20년 내외로 많이 나타나나, 극한 고온 사건에 대해서는 한반도 전역에서 2년 내외의 비교적 적은 빈도 변화가 나타날 것으로 전망되었다.

#### 4. 토의 및 결론

본 연구에서는 CORDEX-EA Phase 2 프로젝트하에서 산출된 RCM 모의 자료를 이용하여 전지구 1.5°C 및 2.0°C 온난화 제한 목표 환경에서의 한반도 기온을 전망하였다. 전망의 신뢰성을 제고하기 위하여 본 연구에서는 GCM 4종, RCM 6종 및 시나리오 5종의 모의자료를 이용하여 다중 RCM 앙상블을 구축하였다. 이때, 다중 앙상블 자료는 기온 관측자료와 비교하여 약간의 편차가 있는 것이 확인되었으며, 한반도 ASOS 86개 지점 관측 자료를 이용하여 RCM 앙상블 자료의 편차 보정을 실시하였다. 그다음, 편차 보정된 자료를 이용하여 한반도의 기온을 평균 및 극한 기온 관점으로 나누어 전망하였다. 이때, 극한 기후 지수 및 GEVD 두 가지 방법을 이용하여 극한 기온의 변화를 정량화하였다.

전지구 2.0°C 온난화 환경에서 한반도의 평균 기온 및 극한 기온은 현재 기간에 비하여 모두 온난화될 것으로 전망되었다. 즉, 평균 기온은 2.13°C, 극한 저온 강도 지수는 2.61°C, 극한 고온 강도 지수는 2.38°C 상승할 것으로 확인되었다. 이와 함께, 현재 기간에 20년에 한 번 꼴로 일어나던 극한 기온 사건이 극한 저온의 경우 28.9년에 한 번, 극한 고온의 경우 5.9년에 한 번 꼴로 일어나는 사건으로 변화할 것으로 전망되었다. 한편, 1.5°C 온난화 환경하에서는 한반도의 기온이 평균 및 극한 측면에서 모두 2.0°C 온난화 환경에 비해 그 변화가 작을 것으로 확인되었다.

온난화 제한 목표하에서의 한반도의 기온 상승 전망과 더불어 다음과 같은 주목할 만한 점이 전망되었다. 첫번째로, 한반도의 기온은 남한 지역에 비해 북한 지역에서 더

크게 증가할 것으로 확인되었으며, 해당 특징은 극한 저온 강도 지수(TNn)에 대해서 더 뚜렷하게 나타날 것으로 전망되었다. 이는 선행 연구에서 저위도 지역에 비해 중위도 및 고위도 지역의 극한 저온 강도 지수가 온난화 환경하에서 더 크게 상승할 것으로 전망되는 모습과 일치하며 (Vautard et al., 2014; Dosio and Fischer, 2018), 눈덮임과 관련된 반사도 되먹임(snow cover albedo feedback)과 관련 있는 것으로 알려져 있다(Pithan and Mauritsen, 2014).

두 번째로, 본 연구에서 제시한 한반도의 기온 전망에는 불확실성이 내포되어 있다. 즉, 평균 기온에 비하여 극한 기온 전망에 대한 불확실성이 더 크게 나타나고, 2.0°C 온난화 환경에 비해 1.5°C 온난화 환경 전망에 대한 불확실성이 더 크게 나타날 것으로 확인되었다. 이와 함께, 일부 GCM, RCM, 시나리오에 대해 전망의 경향성이 나타날 것으로 전망되었다. 특히, GCM인 MPI-ESM-LR을 이용하여 산출된 RCM 앙상블의 경우 타 GCM에 비해 기온이 낮게 증가할 것으로 확인되었다. 이는 현재 기간 동안의 온실가스 강제력에 대한 MPI-ESM-LR의 낮은 민감도에 기인한 것으로 추정되며, Im et al.(2019) 등에서 사용된 GCM의 민감도를 고려한 현재 기간 산정 방법론의 적용이 기온 전망의 불확실성 감소에 도움이 될 수 있을 것으로 보인다.

마지막으로, 극한 저온의 빈도 변화의 경우 지역 편차가 크게 나타나며, 극한 저온 강도 지수와는 다른 양상의 편차가 나타날 것으로 전망되었다. 즉, 현재 기간에 20년 빈도로 나타나던 극한 저온 사건이 2.0°C 환경하에서는 북한 지역 및 일부 남부 지역에서 40년 빈도의 사건으로 변화하나, 중부 내륙 지역에서는 빈도 변화가 비교적 적게 나타날 것으로 확인되었다. 현재까지 한반도 상세 지역의 극한 기온 연구는 주로 극한 고온에 대하여 이루어진 상태이다(Park et al., 2016; Im et al., 2019; Park and Min 2019). 따라서, 추후 한반도 상세 지역의 극한 저온 연구가 진행될 필요가 있으며, CORDEX-EA Phase 2 모의자료를 통계화 기법인 PRIDE (PRISM based Downscaling Estimation model)를 이용하여 상세화시킨 1km 해상도의 남한 상세 시나리오 사용이 해당 연구에 도움이 될 것으로 사료된다(Kim et al., 2012; Kim et al., 2016).

본 연구를 통하여 제시된 온난화 제한 목표하에서의 한반도 미래 기온 전망은 향후 진행될 한반도 기온 전망 연구에 참고가 될 뿐만 아니라 미래 온난화에 대한 사회, 경제적 정책 및 대응 방안 수립에 도움이 될 수 있을 것이다. 또한 0.5°C 추가 온난화로 인한 한반도 기온 변화 전

망은 전지구 1.5°C 온난화로의 억제 필요성을 다시 한번 더 상기시키고 있다.

## 사사

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두 분의 심사위원님들께 감사의 말씀을 드립니다. 이 연구는 기상청 국립기상과학원 『기상업무지원기술개발연구』 “신기후 체제 대응 기후변화 시나리오 개발·평가(KMA2018-00321)”의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- Cha D-H, Lee D-K. 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. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 114(D14). doi:10.1029/2008JD011176.
- Chen J, Brissette FP, Leconte R. 2011. Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology. *Journal of Hydrology* 401(3):190-202. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.02.020.
- Coles S. 2001. *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. London: Springer.
- Davies T, Cullen MJP, Malcolm AJ, Mawson MH, Staniforth A, White AA, Wood N. 2005. A new dynamical core for the Met Office's global and regional modelling of the atmosphere. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 131(608): 1759-1782. doi:10.1256/qj.04.101.
- Donat MG, Alexander LV, Yang H, Durre I, Vose R, Caesar J. 2013. Global Land-Based Datasets for Monitoring Climatic Extremes. *Bull Amer Meteor Soc*. 94(7):997-1006. doi:10.1175/BAMS-D-12-00109.1.
- Dosio A, Fischer EM. 2018. Will Half a Degree Make a Difference? Robust Projections of Indices of Mean and Extreme Climate in Europe Under 1.5°C, 2°C, and 3°C Global Warming. *Geophysical Research Letters* 45(2):935-944. doi:10.1002/2017GL076222.
- Dunne JP, John JG, Adcroft AJ, Griffies SM, Hallberg RW, Shevliakova E, Stouffer RJ, Cooke W, Dunne KA, Harrison MJ. 2012. GFDL's ESM2 Global Coupled Climate-Carbon Earth System Models. Part I: Physical Formulation and Baseline Simulation Characteristics. *Journal of Climate* 25(19):6646-6665. doi:10.1175/JCLI-D-11-00560.1.
- Eyring V, Bony S, Meehl GA, Senior CA, Stevens B, Stouffer RJ, Taylor KE. 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development* 9(5):1937-1958. doi:10.5194/gmd-9-1937-2016.
- Giorgetta MA, Jungclaus J, Reick CH, Legutke S, Bader J, Böttinger M, Brovkin V, Crueger T, Esch M, Fieg K. 2013. Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 5(3):572-597. doi:10.1002/jame.20038.
- Giorgi F, Coppola E, Solmon F, Mariotti L, Sylla MB, Bi X, Elguindi N, Diro GT, Nair V, Giuliani G. 2012. RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Climate Research* 52:7-29. doi:10.3354/cr01018.
- Giorgi F, Jones C, Asrar GR. 2009. Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. *Bulletin - World Meteorological Organization* 58(3):175-183.
- Hong S-Y, Park H, Cheong H-B, Kim J-EE, Koo M-S, Jang J, Ham S, Hwang S-O, Park B-K, Chang E-C. 2013. The Global/Regional Integrated Model system (GRIMs). *Asia-Pacific J Atmos Sci*. 49(2):219-243. doi:10.1007/s13143-013-0023-0.
- Im E-S, Thanh N-X, Kim Y-H, Ahn J-B. 2019. 2018 summer extreme temperatures in South Korea and their intensification under 3 °C global warming. *Environ Res Lett*. 14(9):094020. doi:10.1088/1748-9326/ab3b8f.
- IPCC. 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth

- Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. In press. doi:10.1017/9781009157896.
- Jo S, Ahn J-B, Cha D, Min S-K, Suh M-S, Byun Y-H, 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):14030-14041. doi:10.1029/2019GL085452.
- Kharin VV, Flato GM, Zhang X, Gillett NP, Zwiers F, Anderson KJ. 2018. Risks from Climate Extremes Change Differently from 1.5°C to 2.0°C Depending on Rarity. *Earth's Future* 6(5):704-715. doi:10.1002/2018EF000813.
- 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, Chang E-C. 2021. Future projection of extreme climate over the Korean Peninsula using Multi-RCM in CORDEX-EA Phase 2 project (in Korean with English abstract). *Atmosphere* 31(5):607-623. doi:10.14191/Atmos.2021.31.5.607
- Kim G, Kim J, Kim C-J, Jin C-S, Cha D-H, Suh M-S, Park C. 2014. Climate Change Projections over CORDEX East Asia Domain using Multi-RCMs (in Korean with English abstract). *Journal of Climate Research* 9:257-268. doi:10.14383/crj.2014.9.4.257.
- Kim J-U, Kim T-J, Kim D-H, Kim J-W, Cha D-H, Min S-K, Kim Y-H. 2020. Evaluation of Performance and Uncertainty for Multi-RCM over CORDEX-East Asia Phase 2 region (in Korean with English abstract). *Atmosphere* 30(4):361-376. doi:10.14191/Atmos.2020.30.4.361.
- Kim M-K, Kim S, Kim J, Heo J, Park J-S, Kwon W-T, Suh M-S. 2016. Statistical downscaling for daily precipitation in Korea using combined PRISM, RCM, and quantile mapping: Part 1, methodology and evaluation in historical simulation. *Asia-Pacific J Atmos Sci*. 52(2):79-89. doi:10.1007/s13143-016-0010-3.
- Kim M-K, Han M-S, Jang D-H, Baek S-G, Woo-Seop L, Kim Y-H, Kim S. 2012. Production Technique of Observation Grid Data of 1km Resolution (in Korean with English abstract). *Journal of Climate Research* 7(1):55-68.
- Kim Y-H, Min S-K, Zhang X, Sillmann J, Sandstad M. 2020. Evaluation of the CMIP6 multi-model ensemble for climate extreme indices. *Weather and Climate Extremes* 29:100269. doi:10.1016/j.wace.2020.100269.
- King AD, Karoly DJ, Henley BJ. 2017. Australian climate extremes at 1.5 °C and 2 °C of global warming. *Nature Clim Change* 7(6):412-416. doi:10.1038/nclimate3296.
- KMA. 2018. Abnormal climate report in 2018 years over Republic of Korea (in Korean); [accessed 2022 Aug 25]. [http://www.climate.go.kr/home/cc\\_data/2019/2018\\_abnormal\\_climate\\_report\\_low.pdf](http://www.climate.go.kr/home/cc_data/2019/2018_abnormal_climate_report_low.pdf).
- Lee S-M, Min S-K. 2018. Heat Stress Changes over East Asia under 1.5° and 2.0°C Global Warming Targets. *Journal of Climate* 31(7):2819-2831. doi:10.1175/JCLI-D-17-0449.1.
- Li H, Chen H, Wang H, Yu E. 2018. Future precipitation changes over China under 1.5°C and 2.0°C global warming targets by using CORDEX regional climate models. *Science of The Total Environment* 640-641:543-554. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.05.324.
- Martins ES, Stedinger JR. 2000. Generalized maximum-likelihood generalized extreme-value quantile estimators for hydrologic data. *Water Resources Research* 36(3):737-744. doi:10.1029/1999WR900330.
- Martin G. M., Bellouin N, Collins WJ, Culverwell ID, Halloran PR, Hardiman SC, Hinton TJ, Jones CD, McDonald RE, McLaren AJ. 2011. The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations. *Geoscientific Model Development* 4(3):723-757. doi:10.5194/gmd-4-723-2011.
- Park C, Min S-K. 2019. Multi-RCM near-term projections of summer climate extremes over East Asia. *Clim Dyn*. 52(7):4937-4952. doi:10.1007/s00382-018-4425-7.
- 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. 2016. Evaluation of multiple regional climate models for summer climate extremes over East Asia. *Clim Dyn*.

- 46(7):2469–2486. doi:10.1007/s00382-015-2713-z.
- Philip SY, Kew SF, van Oldenborgh GJ, Anslow FS, Seneviratne SI, Vautard R, Coumou D, Ebi KL, Arrighi J, Singh R. 2021. Rapid attribution analysis of the extraordinary heatwave on the Pacific Coast of the US and Canada June 2021. *Earth System Dynamics Discussions* 1–34. doi:10.5194/esd-2021-90.
- Pithan F, Mauritsen T. 2014. Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models. *Nature Geoscience* 7(3):181–184. doi:10.1038/ngeo2071.
- Riahi K, van Vuuren DP, Kriegler E, Edmonds J, O'Neill BC, Fujimori S, Bauer N, Calvin K, Dellink R, Fricko O. 2017. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change* 42:153–168. doi:10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009.
- Powers JG, Klemm JB, Skamarock WC, Davis CA, Dudhia J, Gill DO, Coen JL, Gochis DJ, Ahmadov R, Peckham SE. 2017. The Weather Research and Forecasting Model: Overview, System Efforts, and Future Directions. *Bulletin of the American Meteorological Society* 98(8):1717–1737. doi:10.1175/BAMS-D-15-00308.1.
- Rockel B, Will A, Hense A. 2008. The regional climate model COSMO-CLM (CCLM). *Meteorologische Zeitschrift - METEOROL Z.* 17:347–348. doi:10.1127/0941-2948/2008/0309.
- Sellar AA, Jones CG, Mulcahy JP, Tang Y, Yool A, Wiltshire A, O'Connor FM, Stringer M, Hill R, Palmieri J. 2019. UKESM1: Description and Evaluation of the U.K. Earth System Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 11(12):4513–4558. doi:10.1029/2019MS001739.
- Sillmann J, Kharin VV, Zhang X, Zwiers FW, Bronaugh D. 2013. Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 1. Model evaluation in the present climate. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 118(4):1716–1733. doi:10.1002/jgrd.50203.
- Taylor KE. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 106(D7):7183–7192. doi:10.1029/2000JD900719.
- Taylor KE, Stouffer RJ, Meehl GA. 2012. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bull Amer Meteor Soc.* 93(4):485–498. doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1.
- Teutschbein C, Seibert J. 2012. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology* 456–457:12–29. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.05.052.
- UNFCCC. 2015. Report of the Conference of the Parties on its twenty-first session, held in Paris from 30 November to 11 December 2015; [accessed 2022 Aug 25]. <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/10a01.pdf>
- Vautard R, Gobiet A, Sobolowski S, Kjellström E, Stegehuis A, Watkiss P, Mendlik T, Landgren O, Nikulin G, Teichmann C. 2014. The European climate under a 2°C global warming. *Environ Res Lett.* 9(3):034006. doi:10.1088/1748-9326/9/3/034006.
- van Vuuren DP, Edmonds J, Kainuma M, Riahi K, Thomson A, Hibbard K, Hurtt GC, Kram T, Krey V, Lamarque J-F. 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* 109(1):5. doi:10.1007/s10584-011-0148-z.
- Zhang X, Alexander L, Hegerl GC, Jones P, Tank AK, Peterson TC, Trewin B, Zwiers FW. 2011. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *WIREs Climate Change* 2(6):851–870. doi:10.1002/wcc.147.



## 부록

Table S1. Information of 86 ASOS station used for bias correction in this study

Station number	Station name	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Altitude (m)
3	Senbong	42.32	130.40	3
5	Samjiyon	41.82	128.30	1386
8	Chongjin	41.78	129.82	43
14	Chunggang	41.78	126.88	332
16	Hyesan	41.40	128.17	714
20	Kanggye	40.97	126.60	306
22	Pungsan	40.82	128.15	1206
25	Kimchaek	40.67	129.20	23
28	Supung	40.45	124.93	83
31	Changjin	40.37	127.25	1081
35	Sinuiju	40.10	124.38	7
37	Kusong	39.98	125.25	99
39	Huichon	40.17	126.25	155
41	Hamheung	39.93	127.55	38
46	Sinpo	40.03	128.18	19
50	Anju	39.62	125.65	27
52	Yangdok	39.22	126.65	279
55	Wonsan	39.18	127.43	36
58	Pyongyang	39.03	125.78	38
60	Nampo	38.72	125.38	47
61	Changjon	38.73	128.18	35
65	Sariwon	38.52	125.77	52
67	Singye	38.50	126.53	100
68	Ryongyon	38.15	124.88	5
69	Haeju	38.03	125.70	81
70	Kaesong	37.97	126.57	70
75	Pyongyang	38.42	127.28	371
90	Sokcho	38.25	128.56	18
100	Daegwallyeong	37.68	128.72	772
101	Chuncheon	37.90	127.74	76
105	Gangneung	37.75	128.89	27
108	Seoul	37.57	126.97	86
112	Incheon	37.48	126.62	69
114	Wonju	37.34	127.95	150
119	Suwon	37.26	126.98	40
127	Chungju	36.97	127.95	115
129	Seosan	36.78	126.49	25
130	Ulsan	36.99	129.41	49
131	Cheongju	36.64	127.44	59
133	Daejeon	36.37	127.37	70
135	Chupungnyeong	36.22	127.99	245
138	Pohang	36.03	129.38	4

Table S1. Information of 86 ASOS station used for bias correction in this study (Continued)

Station number	Station name	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Altitude (m)
140	Gunsan	36.01	126.76	28
143	Daegu	35.88	128.65	54
146	Jeonju	35.84	127.12	60
152	Ulsan	35.58	129.33	81
156	Gwangju	35.17	126.89	70
159	Busan	35.10	129.03	70
162	Tongyeong	34.85	128.44	31
165	Mokpo	34.82	126.38	45
168	Yeosu	34.74	127.74	66
170	Wando	34.40	126.70	35
184	Jeju	33.51	126.53	21
188	Seongsan	33.39	126.88	20
189	Seogwipo	33.25	126.57	52
192	Jinju	35.16	128.04	29
201	Ganghwa	37.71	126.45	48
202	Yangpyeong	37.49	127.49	47
203	Icheon	37.26	127.48	80
211	Inje	38.06	128.17	202
212	Hongcheon	37.68	127.88	140
221	Jecheon	37.16	128.19	265
226	Boeun	36.49	127.73	171
232	Cheonan	36.76	127.29	85
235	Boryeong	36.33	126.56	10
236	Buyeo	36.27	126.92	13
238	Geumsan	36.11	127.48	173
243	Buan	35.73	126.72	12
244	Imsil	35.61	127.29	247
245	Jeongeup	35.56	126.84	69
247	Namwon	35.42	127.40	133
260	Jangheung	34.69	126.92	44
261	Haenam	34.55	126.57	16
262	Goheung	34.62	127.28	52
272	Yeongju	36.87	128.52	211
273	Mungyeong	36.63	128.15	173
277	Yeongdeok	36.53	129.41	41
278	Uiseong	36.36	128.69	81
279	Gumi	36.13	128.32	49
281	Yeongcheon	35.98	128.95	96
284	Geochang	35.67	127.91	228
285	Hapcheon	35.57	128.17	27
288	Miryang	35.49	128.74	8
289	Sancheong	35.41	127.88	138
294	Geoje	34.89	128.60	45
295	Namhae	34.82	127.93	46

Table S2. Anomaly from each ensemble of GCM, RCM and scenario under global warming target of 2.0°C (1.5°C). The anomaly is based on present period. The unit is Celsius temperature

Ensemble	tas	TNn	TXx
(GCM)			
UKESM	2.21 (1.68)	2.48 (1.96)	2.57 (1.74)
HadGEM2-AO	2.23 (1.70)	3.53 (2.91)	2.66 (2.15)
MPI-ESM-LR	1.71 (0.93)	2.58 (1.03)	1.62 (0.90)
GFDL-ESM2M	2.00 (1.45)	2.61 (1.84)	1.58 (0.98)
(RCM)			
HadGEM3-RA	2.31 (1.64)	2.78 (2.09)	2.68 (1.80)
CCLM	2.16 (1.48)	2.36 (1.78)	2.87 (1.86)
WRF	2.02 (1.39)	2.73 (1.79)	1.62 (0.83)
GRIMs	2.25 (1.73)	2.48 (1.90)	3.15 (2.53)
RegCM	2.01 (1.54)	2.50 (2.16)	1.99 (1.42)
SNU-MM5	1.71 (0.91)	3.54 (1.21)	1.41 (0.87)
(Scenario)			
Low (SSP1-2.6)	2.09 (1.54)	2.36 (1.71)	2.61 (1.60)
Low (RCP2.6)	- (1.25)	- (1.80)	- (1.59)
Middle (SSP2-4.5)	2.05 (1.67)	2.02 (2.05)	2.59 (1.81)
High (SSP3-7.0)	2.32 (1.73)	2.62 (1.95)	2.58 (1.57)
High (SSP5-8.5)	2.37 (1.79)	2.91 (2.13)	2.50 (1.87)
High (RCP8.5)	1.95 (1.31)	2.90 (1.87)	1.96 (1.21)