

SSP기반 남한상세 기후변화 시나리오를 활용한 온난화 수준(1.5, 2.0, 3.0°C)별 우리나라 기후변화 전망

김진욱*† · 김민해** · 정주용*** · 변영화**** · 김태준**

*국립기상과학원 기후변화예측연구팀 연구사, **국립기상과학원 기후변화예측연구팀 연구원,
국립기상과학원 기후변화예측연구팀 연구관, *국립기상과학원 기후변화예측연구팀 팀장

High-resolution projection of future climate change over South Korea under global warming levels of 1.5°C, 2°C, and 3°C based on shared socioeconomic pathways scenarios

Kim, Jin-Uk*† · Kim, Min-Hae** · Chung, Chu-Yong*** · Byun, Young-Hwa**** and Kim, Tae-Jun**

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

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

***Senior Research Scientist, Climate Change Research Team, NIMS, Jeju, Korea

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

ABSTRACT

In this study, we projected climate change by region over South Korea under Global Warming Levels (GWL) of 1.5, 2.0, and 3.0°C using new high-resolution (1 km) simulations. We combined 5 Regional Climate Models (RCMs) and 4 Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) and used them for future projection. The findings indicate that, as global warming progresses, the annual mean temperature in South Korea will increase by +0.7, +1.4, and +2.6°C, respectively, compared to present-day (2000 ~ 2019). There is no significant change in total precipitation under the 1.5°C GWL condition. However, an increase of +4.0% (+5.8%) is expected under the 2.0°C (3.0°C) GWL condition, with a significant increase in precipitation expected during the months of July to September. The study also finds that extreme high-temperature indices are projected to increase more significantly than the annual mean temperature, suggesting that future annual temperature ranges may increase. Additionally, extreme climate indices for precipitation are projected to increase unless GWL is limited to 1.5°C, with a notable impact in the Jeju area. The results of this study are expected to be used as fundamental data for establishment of national climate change adaptation policies aimed at achieving carbon neutrality.

Key words: SSP Scenarios, South Korea, High-resolution, Global Warming Level

1. 서론

국제사회는 2015년 12월, 기후변화에 대응하기 위한 장기 목표로 산업화 이전 대비 전지구 평균기온 상승을 2.0°C보다 낮은 수준인 1.5°C로 제한하는 파리협정을 채택했다(UNFCCC, 2016). 이에 따라 기후변화에 관한 정

부 간 패널(Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC)은 1.5°C 특별보고서를 발간하였고, 온난화를 1.5°C로 제한하기 위해서는 2030년까지 2010년 대비 최소 45%의 CO₂ 배출량 감축의 필요성을 강조하였다. 또한 현재 속도로 온난화가 지속되면 2030 ~ 2052년 사이에 1.5°C를 초과할 것이라고 주장하였다(IPCC, 2022). 그러나

†Corresponding author : jukim86@korea.kr (33 Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju 63568, Korea. Tel. +82-64-780-6783)

ORCID 김진욱 0000-0001-9892-9915
김민해 0009-0009-4760-6281
정주용 0000-0001-5330-9456

변영화 0000-0002-6074-4461
김태준 0000-0002-5452-4796

IPCC 6차평가보고서(Sixth assessment report; AR6)의 종합보고서(Synthesis report)에 따르면, 최근 10년(2011 ~ 2020) 전지구 온도는 산업화 이전(1850 ~ 1900)에 비해 이미 1.09°C [0.95°C ~ 1.20°C] 상승했으며, 탄소 배출량이 매우 적은 시나리오에서도 1.5°C에 도달할 가능성이 높다고 밝혔다(IPCC, 2023). 또한 이 보고서는 지구온난화 심화에 따라 평균 및 극한 기후의 지역적 변화가 광범위해질 것이라고 하였다.

지난 수십 년 동안 동아시아 대부분 지역에서는 지구온난화에 따라 극한 현상의 발생 빈도가 증가하였으며, 이로 인해서 많은 피해가 발생하였다(Choi et al., 2009; Zhou and Ren, 2011). 따라서 미래 기후변화에 따른 극한 현상에 대응하기 위하여 온난화 수준(Global Warming Level; GWL)에 따른 동아시아 기후변화 전망 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 극한 고온에 대한 연구가 많았는데, Li et al. (2018)의 연구에서, 전지구 기온이 산업화 이전 대비 1.5°C/2.0°C 상승한 시기에, 동아시아는 전지구 평균에 비해 0.2°C 이상 더 상승할 것이며, 전지구 온난화를 1.5°C로 제한하면 2.0°C 온난화 환경에 비해 극한 고온 현상 발생의 35 ~ 46%를 억제할 수 있다고 하였다. 또한 Kharin et al. (2018)은 1.5°C 온난화에 비해 2.0°C 온난화에 도달하면 극한 고온 발생이 급증하며, 동아시아에서 현재 20년에 한 번 발생하는 극한 고온은 1.5°C/2.0°C 온난화 환경에서 약 86%/217% 증가할 것이라고 밝혔다. Lee and Min (2018)에서는 온난화 수준별로 극심한 열 스트레스 발생 지역의 분포를 분석하였으며, 2.0°C 온난화 환경에 비해 1.5°C 온난화 환경에서는 동아시아에서 극심한 열 스트레스를 겪는 지역이 약 20% 감소할 것으로 전망하였다. Shim et al. (2019)는 동아시아 극한 강수 변화에 대해서 분석하였고, 전지구 평균과 비교하여 강수량이 더 뚜렷하게 증가하며, 온난화 수준이 강해짐에 따라 동아시아의 변화 폭이 전지구 평균보다 더 증가할 수 있다는 결과를 제시하였다.

최근 우리나라에 대해서도 온난화 수준별 기후변화 전망 연구가 이루어지고 있다. Kim et al. (2020)은 기후변화에 따라 우리나라의 강 유역에서 계절에 따른 강수량의 변동성이 증가하여 물관리에 영향을 미치며, 특히 2.0°C 온난화 환경에서 이러한 현상이 뚜렷할 것이라고 밝혔다. Kim et al. (2022a)는 온난화 수준에 따라 한반도 기온과 극한 고온이 상승하며, 특히 남한에 비해 북한에서 상승 폭이 더 클 것으로 전망하였다. 이처럼 온난화 수준에 따른 기후변화 전망 연구가 지속되고 있음에도 불구하고,

기존 연구들은 자료의 해상도가 수십 km 수준이었기 때문에 우리나라에 대한 상세 지역별 미래 전망 분석에는 한계가 존재하였다. 이러한 한계를 극복하기 위해서는 보다 고해상도의 기후변화 전망 자료를 사용한 분석이 필요하다.

이 연구에서는 기상청과 국내 연구진들이 공동으로 개발한 최신의 고해상도(1 km) 남한상세 기후변화 시나리오를 사용하여 전지구 1.5°C/2.0°C/3.0°C 온난화 수준에 따른 우리나라의 기후변화를 전망하였다. 즉, 파리협정에서 합의된 1.5°C 온난화 환경에 대한 분석을 수행한 후, +0.5°C/+1.5°C 추가 온난화 환경에 대한 정보도 추가로 제시하였다. 이를 통해서 신기후체제 및 국가 기후변화 적응정책 수립을 지원할 수 있는 과학 정보를 제공하고자 한다. 이 연구의 2장에서는 남한상세 기후변화 시나리오에 대한 소개와 온난화 시점 탐지 방법을 제시하였다. 3장에는 자료의 특성 및 검증 결과와 미래 전망 결과를 기술하였으며, 4장에는 요약 및 결론을 수록하였다.

2. 자료 및 연구 방법

2.1. 사용 자료

이 연구에서는 전지구 온난화 수준에 따른 우리나라의 지역별 상세한 기후변화를 전망하기 위하여 고해상도(1 km)의 격자형 관측자료 및 기후변화 시나리오를 활용하였다. 고해상도 격자형 관측자료는 통계적 상세화 기법인 Modified Korean-Parameter elevation Regressions an Independent Slopes Model (MK-PRISM) 기법을 이용하여 산출되었으며, 이 방법은 거리, 고도, 지형면, 해양도를 고려한 것이다(Kim et al., 2012, 2013; Park et al., 2014). 통계적 상세화에 사용된 입력자료는 기상청 관측소를 통해서 최근 20년간(2000 ~ 2019) 관측된 일 평균기온(TA), 일 최고기온(TMAX), 일 최저기온(TMIN), 일 강수량(PR), 일 평균풍속(WS), 일 평균 상대습도(RH)이다. 기상청 관측소는 크게 종관기상관측소(Automated Synoptic Observing System; ASOS)와 방재기상관측소(Automatic Weather System; AWS)로 구분되며 기온, 강수, 풍속은 ASOS 97개와 AWS 508개소, 습도는 ASOS 96개와 AWS 375개소의 자료가 사용되었다(Fig. 1). 사용된 관측소 수에 차이가 있는 이유는 관측 시기 및 관측 지점에 따라 관측된 기상요소의 종류에 차이가 존재하기 때문이다. 또한 20년 동안 기상 관측소의 신설 및 결측으로 인하여 모든

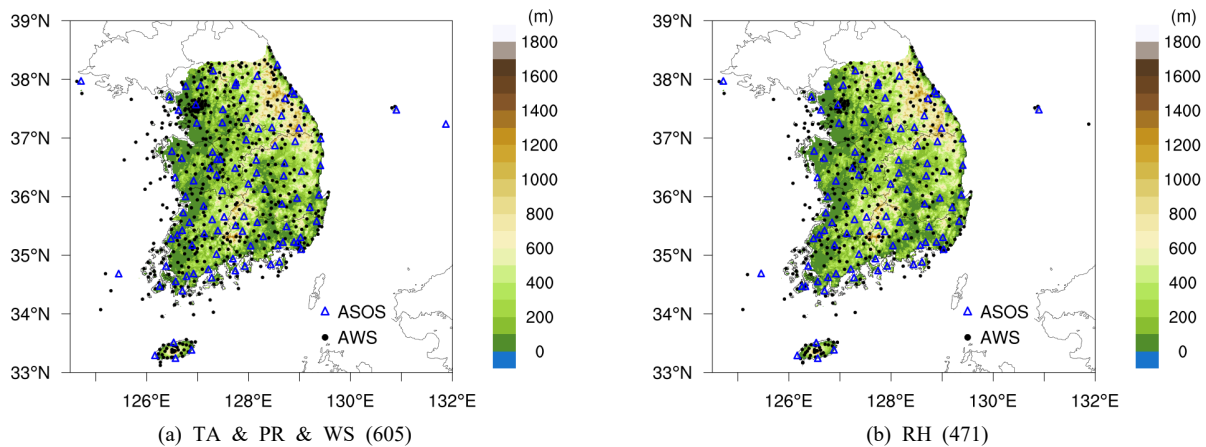


Fig. 1. Distribution of observation stations and DEM elevation (shading) with 1 km resolution over South Korea. Blue triangles and black circles indicate ASOS and AWS, respectively.

기간에 대하여 사용된 관측소 수가 다를 수 있다.

우리나라 지역에 대하여 산출된 고해상도 기후변화 시나리오는 통계모델인 PRISM-based Dynamic downscaling Error correction (PRIDE)에 기반한 “남한상세 기후변화 시나리오”이다. PRIDE 모델은 기후 모델의 계통 오차를 보정하기 위하여 모델의 계절 사이클을 관측의 계절 사이클로 대체하는 방법이며, 자세한 설명은 Kim et al. (2016, 2022b), Kim and Kim (2018)의 내용을 참고하기 바란다. PRIDE 모델의 입력자료는 격자형 관측자료와 CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) 동아시아 2단계 프로젝트의 지역기후모델 5종을 통해 산출된 현재기후 재현 및 미래기후 전망 결과이다. 지역기후모델 5종은 Hadley Centre Global Environmental Model version 3 regional climate model (HadGEM3-RA), Consortium for Small-scale Modeling (COSMO)-Climate Limited-area Modeling (CLM) (CCLM), Weather Research and Forecasting (WRF), Regional Climate Model version 4.0 (RegCM), Global/Regional Integrated Model system (GRIMs)로 구성되어있다(Davies et al., 2005; Giorgi et al., 2012; Hong et al., 2013; Kim et al., 2022c; Powers et al., 2017; Rockel et al., 2008). 이를 통하여 남한상세 기후변화 시나리오는 총 80년(2021 ~ 2100)에 대하여 생산되었다. 미래 온실가스 배출 및 사회 발전에 따른 기후변화 전망 결과를 활용하기 위하여 IPCC AR6의 새로운 공통사회경제경로 (Shared Socioeconomic Pathways; SSP) 4종을 사용하였다. 이 연구에서는 SSP 4종을 저탄소 시나리오(SSP1-2.6), 중간단계 시나리오(SSP2-4.5), 고탄소 시나리오(SSP3-7.0,

SSP5-8.5)로 구분하여 미래 변화를 나타내었다.

2.2. 분석 방법

전지구 온난화 수준에 따른 우리나라의 기후변화를 전망하기 위해서는 전지구 평균기온이 제한온도에 도달하는 시점(1.5°C, 2.0°C, 3.0°C)을 정의하는 것이 선행되어야 한다. 이를 위하여 남한상세 시나리오의 입력자료인 동아시아 기후변화 시나리오의 경계조건으로 사용된 UK Earth System Model (UKESM1) 전지구 기후모델의 모의 자료로부터 제한온도 도달 시점을 산출하기 위해, Kim et al. (2022a)의 방법을 사용하였다. 산업혁명 이전인 1850년부터 1900년까지를 기준 기간으로 선정하였고, 기준 기간의 평균기온으로부터 전지구 기온이 +1.5°C, +2.0°C, +3.0°C 상승한 해를 제한온도 도달 시점으로 정의하였다. 또한 기온의 경년 변동성에 의한 영향을 최소화하기 위하여 21년 이동 평균된 기온자료를 사용하였다. 제한온도 도달 시점은 SSP 시나리오에 따라 다르게 나타났으며, 저탄소 시나리오(SSP1-2.6)의 경우 3.0°C 온난화에 도달하지 않을 것으로 전망되었다. 각 시나리오에 따른 제한온도 도달 시점은 Table 1에 정리되어 있다.

이 연구에서는 남한상세 기후변화 시나리오 생산에 사용된 지역 기후모델 5종(HadGEM3-RA, CCLM, WRF, RegCM, GRIMs)과 SSP시나리오 4종(SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5)을 앙상블 멤버로 구성하여 각 제한온도 도달 시점을 중심으로 21년 평균된 자료를 활용하여 미래기후를 전망하였다. 또한 우리나라를 6개 권역(수도권 (Capital area; CP), 강원권(GangWon-do; GW), 충청권

Table 1. Simulated global warming timing of 1.5°C, 2.0°C and 3.0°C from each scenario

Scenario	Global Warming Level (GWL, °C)		
	1.5	2.0	3.0
SSP1-2.6	2021 (2011 ~ 2031)	2032 (2022 ~ 2042)	-
SSP2-4.5	2021 (2011 ~ 2031)	2031 (2021 ~ 2041)	2056 (2046 ~ 2066)
SSP3-7.0	2024 (2014 ~ 2034)	2032 (2022 ~ 2042)	2050 (2040 ~ 2060)
SSP5-8.5	2021 (2011 ~ 2031)	2029 (2019 ~ 2039)	2046 (2036 ~ 2056)

(ChungCheong-do; CC), 전라권(Jeolla-do; JL), 경상권(GyeongSang-do; GS), 제주권(Jeju-do; JJ))으로 나누어 미래 전망 분석 결과를 정량적으로 제시하였으며, 6개 권역에 대한 정보는 Fig. 3a에 제시하였다.

이 연구에서는 온난화 수준에 따른 기후 요소 6종의 변화뿐만 아니라 극한 현상 변화를 정량적으로 평가하기 위하여 World Meteorological Organization (WMO)에서 제시한 Expert Team of Climate Change Detection and Indices (ETCCDI)에 기반하여 극한 고온지수 6종(HW, TR, TX90, TN90, TXx, TNx), 극한 저온지수 6종(FD, ID, TX10, TN10, TXn, TNn), 극한 강수지수 5종(RX1D, RX5D, R95, R99, D80)을 사용하였다. 하지만 ETCCDI 지수는 극한 기온과 극한 강수량의 분석에 중점을 두고 있으므로, 그 외의 극한 요소 분석을 위해서는 새로운 방법이 필요하다. 따라서 이 연구에서는 극한 풍속 및 극한 습도의 변화를 정량적으로 분석하기 위해서 ETCCDI 지수를 참고하여 풍속/상대습도가 기준기간의 90퍼센타일 값을 초과한 날의 연중 일수를 극한 풍속일(WS90)/극한 습도일(RH90)로 정의하고 온난화 수준별 전망 결과를 제시하였다. 각 극한 기후지수에 대한 설명은 Table 2에서 확인할 수 있다.

또한 이 연구에서는 극한 기후지수 외에 극단 분포를 이용하여 극한 기온 및 극한 강수량의 온난화 수준별 변화를 분석하였다. 극단 분포 정리는 임의의 독립적인 관측값 중 가장 큰 값의 분포가 관측의 원래 분포와 무관한 일정 분포에 수렴한다는 것이다(Coles, 2001). 관측값이 이론상으로 수렴하는 분포를 일반화 극단 분포(Generalized Extreme Value Distribution; GEVD)라고 하며, 이는 분포의 우측에 긴 꼬리가 형성되므로 극한 현상의 특성을 잘 나타낼 수 있다. 극한 지수 중 TXx와 RX1D

는 각각 연중 최고기온과 연중 최다 일 강수량을 의미하므로 극단 분포를 잘 따를 것으로 예상할 수 있다. 이 연구에서는 격자형 관측자료와 남한상세 기후변화 시나리오의 격자별 TXx 및 RX1D 시계열을 GEVD에 적합(fitting)시킨 후, 극한 기후지수의 변화를 정량화하였다. GEVD의 확률밀도함수(Probability Distribution Function; PDF)는 $1+(k(x-\xi)/\beta) > 0$ 일 때 다음과 같이 표현된다.

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

식 (1)에는 세 가지 모수가 있으며, ξ 는 위치(location) 모수, β 는 척도(scale) 모수, k 는 모양(shape) 모수를 의미한다. 이 연구에서는 모수들을 추정하기 위하여 표본의 수가 작은 경우에 적용하기 적절한 L-적률 추정법(Hosking and Wallis, 1997)을 사용하였다. 또한, 해당 분포의 누적분포함수(cumulative distribution function; CDF)와 백분위수(quantile) 함수로부터 극한 기후지수의 재현수준(return level; Z_p)을 확률 p 에 대하여 $k \neq 0$ 의 조건 하에서 아래와 같이 산출하였다.

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

3. 결과

3.1. 고해상도(1 km) 격자형 관측자료 특성

이 연구에서 사용한 고해상도 격자형 관측자료의 모의 성능평가를 위해서 검증 대상인 관측소의 각 기후 요소를 결측이라고 가정하고 MK-PRISM 기법을 사용하여 생산된 추정값과 실제 기상청의 관측값을 비교하는 Jack-Knife 방법을 사용하였다. 이 방법을 현재 기간(2000 ~ 2019년)에 대하여 일별로 적용하여 오차(bias)를 확인하였고, 이를 월별로 평균한 결과를 Table 3에 제시하였다. 먼저 기온 3종의 검증 결과를 살펴보면, 추정값은 관측값에 비해 0.02 ~ 0.04°C 높고 강수량 추정값은 관측값에 비해 0.07 mm^d 낮은 것으로 나타난다. 상대습도와 풍속은 각각 +0.08%, +0.01 m/s로 다소 양의 편차가 나타난다. 이러한 결과는 기상청의 “기상측기 형식승인 기준 방법 및 신청 절차 등에 관한 고시”와 관련하여 최대허용오차에 준하는

Table 2. Climate change Indices calculated using daily maximum temperature (TMAX), minimum temperature (TMIN), precipitation (PR), surface relative humidity (RH) and surface wind speed (WS)

Index	Index Definition	Units
HW	The days TMAX is higher than 33°C in each year	days
TR	The days TMIN is higher than 25°C in each year	days
TX90	The days TMAX is higher than 90th percentile of TMAX for present-day in each year	days
TN90	The days TMIN is higher than 90th percentile of TMIN for present-day in each year	days
TXx	The maximum TMAX in each year	°C
TNx	The maximum TMIN in each year	°C
FD	The days TMAX is lower than 0°C in each year	days
ID	The days TMIN is lower than 0°C in each year	days
TX10	The days TMAX is lower than 10th percentile of Tmax for present-day in each year	days
TN10	The days TMIN is lower than 10th percentile of TMIN for present-day in each year	days
TXn	The minimum TMAX in each year	°C
TNn	The minimum TMIN in each year	°C
RX1D	The maximum 1-day PR in each year	mm
RX5D	The maximum 5-day PR in each year	mm
R95	The wet (PR ≥ 1 mm) days PR is higher than 95th percentile of PR for present-day in each year	days
R99	The wet (PR ≥ 1 mm) days PR is higher than 99th percentile of PR for present-day in each year	days
D80	The days PR is higher than 80 mm in each year	days
WS90	The days WS is higher than 90th percentile of WS for present-day in each year	days
RH90	The days RH is higher than 90th percentile of RH for present-day in each year	days

Table 3. Cross-validation (Jack-knife) results of observed and estimated values for daily mean temperature (TA), maximum temperature (TMAX), minimum temperature (TMIN), precipitation (PR), surface relative humidity (RH) and surface wind speed (WS)

	Bias					
	TA (°C)	TMAX (°C)	TMIN (°C)	PR (mmd ⁻¹)	RH (%)	WS (m/s)
JAN.	+0.04	+0.02	+0.06	-0.05	+0.13	+0.02
FEB.	+0.04	+0.02	+0.06	-0.04	+0.13	+0.01
MAR.	+0.04	+0.02	+0.06	-0.04	+0.14	+0.01
ARP.	+0.03	+0.01	+0.05	-0.03	+0.13	+0.01
MAY.	+0.01	+0.01	+0.03	-0.04	+0.08	+0.01
JUN.	+0.01	+0.02	+0.01	-0.10	+0.07	+0.01
JUL.	+0.02	+0.02	+0.01	-0.14	+0.05	+0.00
AUG.	+0.03	+0.03	+0.02	-0.19	+0.04	+0.01
SEP.	+0.03	+0.02	+0.03	-0.08	+0.07	+0.01
OCT.	+0.03	+0.02	+0.05	-0.03	+0.07	+0.01
NOV.	+0.04	+0.02	+0.06	-0.03	+0.03	+0.01
DEC.	+0.04	+0.02	+0.06	-0.04	+0.02	+0.01
AVE.	+0.03	+0.02	+0.04	-0.07	+0.08	+0.01

범위에 해당하므로 추정값이 관측값을 잘 재현한 결과라고 할 수 있다.

기상청 관측자료의 특성을 잘 반영한다는 것이 확인된 격자형 관측자료를 사용하여 현재 우리나라의 기후 특성을 분석한 결과를 Fig. 2에 제시하였다. 이 그림에서 검정색 선은 현재 기간의 기후 값이며, 파란색/녹색/빨간색 선은 각각 전지구 온난화수준 1.5°C/2.0°C/3.0°C 시기의 계절 변동성을 나타낸다. 현재 기간에 대하여 격자형 관측자료에서 평균기온은 1월(-2.7°C)에 가장 낮고 8월(24.7°C)에 가장 높은 우리나라의 전형적인 기후 특성이 잘 나타난다(Fig. 2a). 강수량은 겨울철에 최소값을 보이고, 여름철에 두 번의 피크(Bimodal)가 뚜렷하며, 7월에

최대값(10.9 mm^d⁻¹)이 나타난다(Fig. 2b). 풍속은 겨울부터 봄까지 비교적 강하고 여름과 가을에 약한 특성을 보이며(Fig. 2c), 상대습도는 여름 > 가을 > 겨울 > 봄 순으로 높은 것으로 나타난다(Fig. 2d).

3.2. 온난화 수준별 평균 기후 변화

이 절에서는 온난화 수준에 따른 기후 요소들의 변화를 분석한 결과를 제시하였다(Fig. 2, Fig. 3, Table 4). Fig. 2는 현재 기간뿐만 아니라 온난화 수준별 주요 기후 요소들의 계절 변동성도 제시하며, Table 4는 우리나라 평균 및 6개 권역별로 온난화 수준에 따른 기후 요소 6종(TA, TMAX, TMIN, PR, WS, RH)의 기후변화 전망 결과를 나

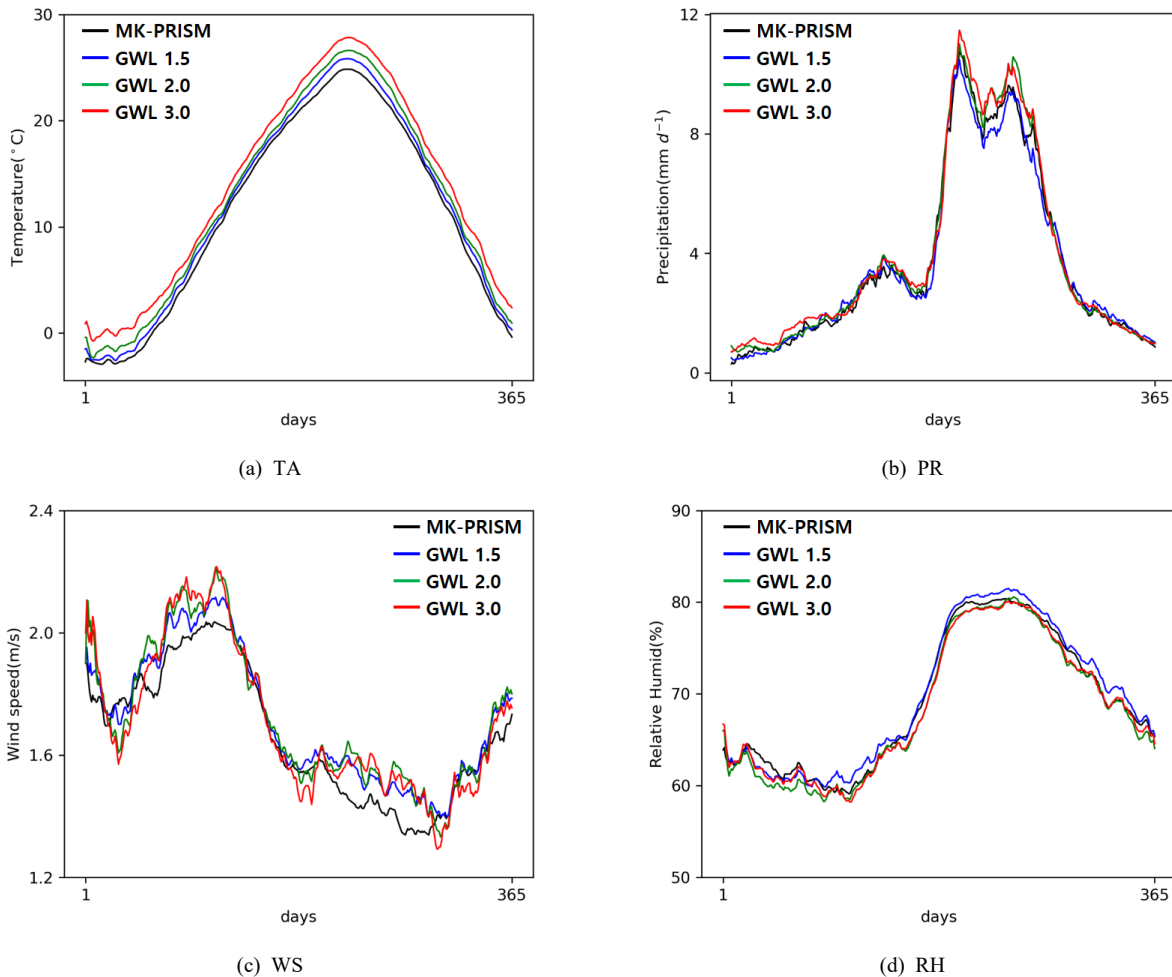


Fig. 2. The seasonal variation in mean temperature (TA), precipitation (PR), surface wind speed (WS) and relative humidity (RH) for present-day (2000 ~ 2019, MK-PRISM) and 1.5°C/2.0°C/3.0°C global warming level (GWL).

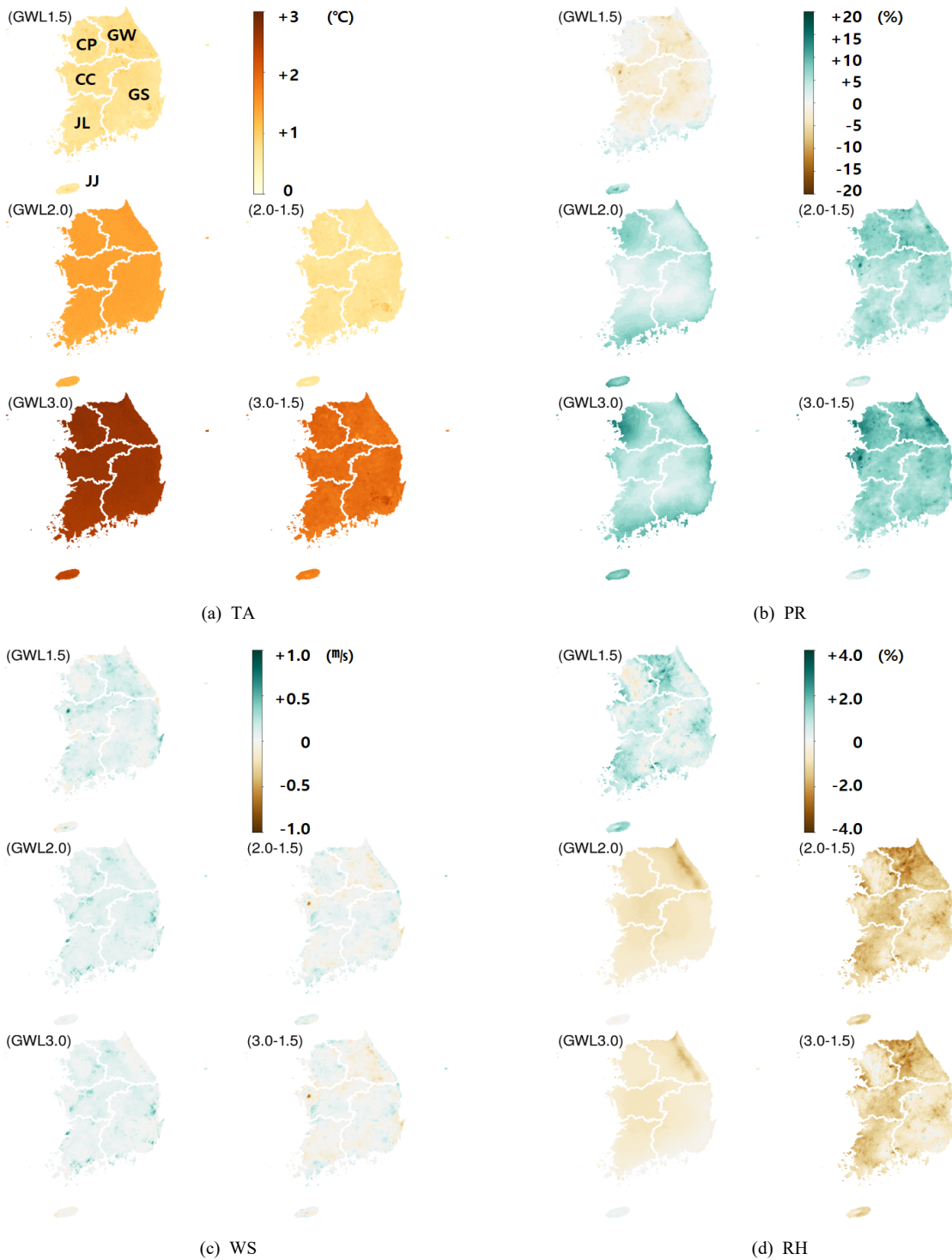


Fig. 3. Spatial distribution for anomalies of annual mean temperature (TA), precipitation (PR), surface wind speed (WS) and relative humidity (RH). The anomalies are from three global warming level (GWL) of 1.5°C, 2.0°C and 3.0°C compared to present-day (2000 ~ 2019). Differences of anomalies induced additional warming (2.0°C–1.5°C, 3.0°C–1.5°C) is also suggested.

타내며, 팔호 안의 값은 미래 전망의 불확실성을 의미한다. Fig. 3은 주요 기후 요소 4종(TA, PR, WS, RH)의 온난화 수준에 따른 상세 지역별 변화 결과를 나타내며, 1.5°C 온난화 이후 추가 온난화(+0.5°C, +1.5°C)가 진행된 경우의 편차 값도 제시하였다.

우리나라에서 연평균기온(TA)의 경우, 현재 대비 1.5°C 온난화 시기에 +0.7°C 상승하고 2.0°C(추가 온난화 +0.5°C) 및 3.0°C(추가 온난화 +1.5°C) 온난화 시기에는 각각 +1.4°C, +2.6°C 상승이 전망된다. 즉, 전지구 1.5°C 온난화 이후 추가 온난화가 +0.5°C, +1.5°C 진행된 시기에 우리나라의 추가 기온 상승 폭은 각각 +0.7°C, +1.9°C로 전지구 평균에 비해 다소 클 것으로 전망된다(Table 4). 미래 기온 상승 폭은 7월에 가장 크고 4월에 비교적 작을 것으로 전망된다(Fig. 2a). 강수량(PR)의 경우, 1.5°C 온난화 시기에 현재 대비 -1.1%로 다소 감소하며, 2.0°C(3.0°C) 온난화 시기에는 +4.0%(+5.8%)로 증가할 것으로 전망된다. 미래 강수량 증가 폭이 가장 큰 시기는 7~9월이며, 6월과 10월에는 강수량이 큰 변화가 없거나 다소 감소할 것으로 전망된다(Fig. 2b). 지역별로 살펴보면, 기온은 충청권에서 상승 폭이 크고 제주권에서 상승 폭이 작을 것으로 전망된다(Fig. 3a). 강수량은 온난화 수

준에 따라 증가 폭이 가장 큰 지역은 제주권이며, 가장 작은 지역은 충청권으로 나타났다(Fig. 3b). 특히, 제주권은 1.5°C 온난화 수준에서 강수량 증가가 전망되나, 그 외 지역은 모두 강수량이 감소할 것으로 전망된다. 강수량은 미래 변화의 폭보다 양상불 멤버 간의 불확실성 범주가 더 크게 나타나며, 온난화 수준이 높아질수록 불확실성은 더욱 증가한다(Table 4).

풍속(WS)은 현재 대비 1.5°C/2.0°C/3.0°C 온난화 시기에 +0.03 m/s 증가하여 미래 기간에 뚜렷한 변화는 없을 것으로 전망되며, 온난화 수준에 따른 차이도 매우 작을 것으로 보인다. 풍속이 비교적 많이 증가하는 시기는 4월이며, 가장 많이 감소하는 시기는 1월로 나타난다(Fig. 2c). 상대습도(RH)는 현재 대비 1.5°C 온난화 시기에 +0.4% 증가하나, 2.0°C(3.0°C) 온난화 시기에는 -0.9%(-0.6%)로 다소 감소할 것으로 전망되며, 온난화 수준에 따른 변동성이 매우 크다(Table 4). 지역별 풍속 변화를 살펴보면, 6개 권역 중에서 제주권은 온난화 수준에 따라 다소 감소하며, 그 외 지역은 모두 증가할 것으로 전망된다(Fig. 3c). 상대습도의 지역별 미래 변화는 제주권에서 비교적 증가 폭이 크고 중부지역에서 비교적 증가 폭이 작을 것으로 전망된다(Fig. 3d). 온난화 수준이 강해짐에

Table 4. Changes in regional climate element from three global warming level (GWL) of 1.5°C, 2.0°C and 3.0°C compared to present-day (2000 ~ 2019) over South Korea

Var.	GWL	KOR	CP	GW	CC	JL	GS	JJ
TA (°C)	1.5	+0.7(±0.1)	+0.7(±0.1)	+0.7(±0.1)	+0.8(±0.1)	+0.6(±0.1)	+0.7(±0.1)	+0.6(±0.1)
	2.0	+1.4(±0.1)	+1.3(±0.1)	+1.3(±0.1)	+1.4(±0.1)	+1.3(±0.1)	+1.3(±0.1)	+1.2(±0.1)
	3.0	+2.6(±0.2)	+2.6(±0.2)	+2.6(±0.2)	+2.6(±0.2)	+2.5(±0.2)	+2.6(±0.2)	+2.4(±0.1)
TMAX (°C)	1.5	+0.8(±0.1)	+0.8(±0.1)	+0.8(±0.1)	+0.8(±0.1)	+0.7(±0.1)	+0.8(±0.1)	+0.6(±0.1)
	2.0	+1.4(±0.1)	+1.5(±0.1)	+1.4(±0.1)	+1.5(±0.1)	+1.4(±0.1)	+1.5(±0.1)	+1.2(±0.1)
	3.0	+2.7(±0.2)	+2.8(±0.2)	+2.6(±0.2)	+2.7(±0.2)	+2.6(±0.3)	+2.7(±0.2)	+2.3(±0.2)
TMIN (°C)	1.5	+0.7(±0.1)	+0.7(±0.1)	+0.8(±0.1)	+0.7(±0.1)	+0.6(±0.1)	+0.6(±0.1)	+0.6(±0.1)
	2.0	+1.3(±0.1)	+1.3(±0.1)	+1.3(±0.1)	+1.3(±0.1)	+1.3(±0.1)	+1.3(±0.1)	+1.2(±0.1)
	3.0	+2.6(±0.1)	+2.6(±0.1)	+2.6(±0.2)	+2.6(±0.1)	+2.5(±0.2)	+2.5(±0.1)	+2.3(±0.1)
PR (%)	1.5	-1.1(±3.9)	-0.8(±5.8)	-2.4(±4.0)	-2.4(±4.9)	-0.2(±4.0)	-1.1(±4.3)	+6.0(±4.1)
	2.0	+4.0(±5.9)	+6.1(±8.6)	+4.3(±6.6)	+2.6(±6.8)	+4.3(±5.9)	+3.3(±6.1)	+8.0(±4.3)
	3.0	+5.8(±7.9)	+7.9(±8.1)	+6.2(±7.4)	+4.6(±8.3)	+5.6(±9.7)	+5.2(±8.3)	+8.9(±6.4)
WS (m/s)	1.5	+0.03(±0.02)	+0.01(±0.02)	+0.12(±0.03)	+0.1(±0.02)	+0.06(±0.02)	+0.07(±0.02)	-0.03(±0.04)
	2.0	+0.03(±0.02)	+0.11(±0.03)	+0.02(±0.04)	+0.1(±0.03)	+0.06(±0.03)	+0.07(±0.03)	-0.03(±0.07)
	3.0	+0.03(±0.03)	+0.01(±0.03)	+0.02(±0.04)	+0.1(±0.03)	+0.06(±0.03)	+0.07(±0.03)	-0.03(±0.07)
RH (%)	1.5	+0.4(±0.3)	+0.2(±0.4)	+0.7(±0.3)	+0.5(±0.4)	+0.6(±0.3)	+0.4(±0.3)	+1.1(±0.3)
	2.0	-0.9(±0.4)	-0.9(±0.6)	-1.1(±0.5)	-0.9(±0.5)	-0.7(±0.5)	-0.7(±0.4)	-0.1(±0.5)
	3.0	-0.6(±0.6)	-0.7(±0.6)	-0.8(±0.5)	-0.7(±0.6)	-0.5(±0.8)	-0.4(±0.6)	+0.1(±0.5)

Table 5. Changes in regional extreme temperature indices from three global warming level (GWL) of 1.5°C, 2.0°C and 3.0°C compared to present-day (2000 ~ 2019) over South Korea

Var.	GWL	KOR	CP	GW	CC	JL	GS	JJ
HW (days)	1.5	+5.8(±2.7)	+7.1(±3.4)	+3.5(±2.0)	+7.4(±3.3)	+6.7(±3.3)	+5.3(±2.4)	+1.9(±1.7)
	2.0	+11.4(±4.7)	+13.8(±5.5)	+7.1(±3.4)	+14.3(±5.6)	+12.6(±5.9)	+10.9(±4.3)	+3.9(±2.7)
	3.0	+23.0(±6.2)	+28.2(±6.4)	+14.7(±4.9)	+27.9(±7.4)	+25.7(±7.7)	+22.0(±5.7)	+12.1(±3.3)
TR (days)	1.5	+6.4(±1.1)	+8.2(±1.3)	+1.8(±0.3)	+7.8(±1.2)	+8.7(±1.5)	+6.1(±1.2)	+6.9(±1.2)
	2.0	+12.7(±1.7)	+15.5(±2.0)	+3.9(±0.6)	+15.4(±1.9)	+17.2(±2.4)	+12.2(±1.8)	+14.7(±1.7)
	3.0	+22.7(±2.7)	+27.3(±2.9)	+9.1(±1.5)	+26.8(±3.1)	+29.2(±3.7)	+22.2(±2.8)	+27.6(±2.2)
TX90 (days)	1.5	+10.5(±2.6)	+11.4(±2.7)	+9.5(±2.4)	+12.0(±2.6)	+11.9(±3.0)	+9.0(±2.5)	+10.7(±2.4)
	2.0	+21.3(±3.3)	+23.1(±2.7)	+19.1(±2.7)	+24.0(±3.3)	+23.5(±4.3)	+19.0(±3.5)	+22.0(±2.5)
	3.0	+38.2(±4.1)	+42.3(±3.0)	+35.2(±3.6)	+41.7(±4.1)	+41.0(±5.2)	+34.8(±4.6)	+36.9(±2.6)
TN90 (days)	1.5	+10.6(±1.8)	+11.5(±1.7)	+10.5(±1.8)	+11.0(±1.6)	+10.8(±1.8)	+10.2(±2.0)	+10.3(±1.6)
	2.0	+19.7(±2.1)	+20.9(±1.9)	+18.7(±2.2)	+19.7(±2.0)	+20.3(±2.3)	+19.6(±2.4)	+21.1(±1.9)
	3.0	+32.7(±3.0)	+34.6(±2.9)	+31.6(±3.1)	+32.3(±3.1)	+33.1(±3.2)	+32.6(±3.3)	+34.4(±2.3)
TXx (°C)	1.5	+1.5(±0.7)	+1.3(±0.8)	+1.4(±0.7)	+1.5(±0.8)	+1.5(±0.8)	+1.6(±0.7)	+0.5(±0.6)
	2.0	+2.7(±1.2)	+2.5(±1.3)	+2.7(±1.0)	+2.7(±1.3)	+2.6(±1.3)	+2.9(±1.0)	+1.1(±0.9)
	3.0	+3.9(±1.3)	+3.8(±1.4)	+4.0(±1.2)	+4.0(±1.4)	+3.7(±1.4)	+4.0(±1.2)	+2.2(±1.1)
TNx (°C)	1.5	+1.3(±0.2)	+1.6(±0.2)	+1.2(±0.2)	+1.5(±0.2)	+1.2(±0.2)	+1.2(±0.2)	+0.6(±0.2)
	2.0	+2.5(±0.2)	+2.8(±0.4)	+2.3(±0.1)	+2.8(±0.3)	+2.4(±0.3)	+2.3(±0.2)	+1.2(±0.3)
	3.0	+3.6(±0.3)	+4.1(±0.5)	+3.4(±0.3)	+3.9(±0.4)	+3.5(±0.4)	+3.4(±0.3)	+2.2(±0.3)
ID (days)	1.5	-2.0(±1.2)	-2.2(±1.7)	-4.6(±1.5)	-1.9(±1.5)	-1.5(±1.0)	-0.9(±0.9)	-1.5(±0.5)
	2.0	-4.0(±2.3)	-4.7(±3.2)	-8.6(±3.1)	-3.7(±3.0)	-3.0(±1.8)	-2.0(±2.0)	-2.6(±0.7)
	3.0	-8.6(±1.5)	-10.8(±2.4)	-16.4(±2.3)	-8.6(±2.0)	-5.7(±1.0)	-5.4(±1.2)	-3.7(±0.5)
FD (days)	1.5	-9.4(±1.8)	-8.7(±2.0)	-10.3(±2.1)	-9.8(±1.9)	-8.8(±2.0)	-9.6(±2.1)	-5.1(±1.9)
	2.0	-16.5(±2.3)	-15.8(±2.4)	-15.8(±3.0)	-16.4(±2.3)	-17.2(±2.5)	-17.1(±2.7)	-10.0(±3.3)
	3.0	-29.5(±2.5)	-28.2(±2.6)	-28.4(±3.3)	-29.5(±2.9)	-31.6(±2.5)	-30.0(±2.8)	-18.8(±2.5)
TX10 (days)	1.5	-4.5(±1.6)	-3.6(±1.8)	-5.0(±1.7)	-4.4(±1.7)	-5.2(±1.8)	-4.0(±1.6)	-5.9(±2.2)
	2.0	-8.7(±3.1)	-7.4(±3.6)	-9.0(±3.3)	-8.5(±3.4)	-10.1(±3.3)	-8.2(±2.9)	-11.7(±3.9)
	3.0	-17.2(±2.4)	-16.0(±2.8)	-17.0(±2.7)	-17.0(±2.7)	-18.7(±2.8)	-16.6(±2.2)	-20.6(±3.6)
TN10 (days)	1.5	-2.9(±1.8)	-2.3(±2.0)	-3.9(±2.3)	-3.2(±1.9)	-3.1(±2.0)	-1.9(±1.7)	-6.6(±2.8)
	2.0	-6.9(±3.4)	-6.1(±3.6)	-6.7(±4.0)	-7.0(±3.6)	-8.9(±3.5)	-5.6(±3.4)	-13.2(±4.9)
	3.0	-16.6(±2.6)	-16.0(±2.9)	-16.2(±3.0)	-16.9(±2.6)	-18.6(±2.7)	-15.3(±2.6)	-23.6(±3.5)
TXn (°C)	1.5	+0.3(±0.7)	+0.6(±0.8)	+0.3(±0.8)	+0.4(±0.7)	+0.7(±0.6)	+0.1(±0.7)	+0.8(±0.6)
	2.0	+0.8(±1.0)	+1.1(±1.2)	+0.5(±1.3)	+1.0(±1.0)	+1.4(±0.8)	+0.5(±1.1)	+1.8(±0.9)
	3.0	+2.2(±0.8)	+2.7(±0.9)	+2.1(±1.0)	+2.4(±0.8)	+2.7(±0.8)	+1.9(±0.8)	+3.0(±1.0)
TNn (°C)	1.5	+0.3(±0.6)	+0.7(±0.7)	+0.5(±0.7)	+0.6(±0.7)	+0.5(±0.6)	-0.3(±0.7)	+0.6(±0.4)
	2.0	+0.8(±0.9)	+1.2(±1.0)	+0.9(±1.1)	+1.2(±0.9)	+1.2(±0.9)	-0.2(±1.0)	+1.2(±0.6)
	3.0	+2.3(±0.9)	+2.9(±0.9)	+2.6(±1.0)	+2.8(±0.8)	+2.7(±0.7)	+1.3(±0.9)	+2.3(±0.5)

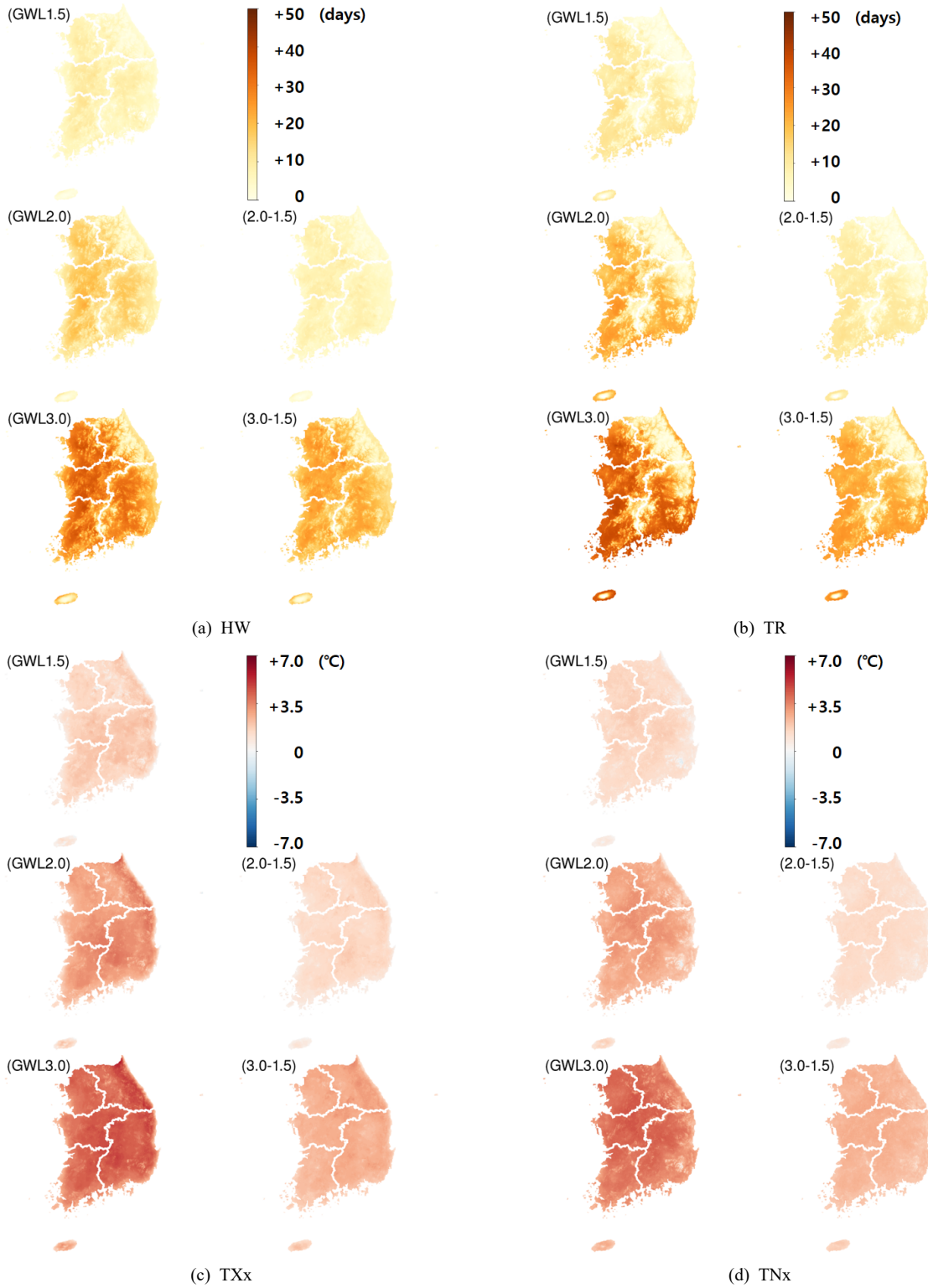


Fig. 4. Same as in Fig. 3 but for high temperature indices (HW, TR, TXx, TNx).

따라 상대습도가 감소하는 가운데, 6월에 가장 큰 감소가 전망된다(Fig. 2d).

3.3. 온난화 수준별 극한 기후 변화

이 연구에서 고온 극한 기후지수는 절대적 기준 극한 현상인 폭염일(HW)과 열대야일(TR), 상대적 기준 극한 현상인 온난일(TX90)과 온난야(TN90), 극한 기온 지수인 일 최고기온 연 최대값(TXx)과 일 최저기온 연 최대값(TNx)으로 구분된다. HW/TR은 현재 대비 1.5°C 온난화 시기에 +5.8일/+6.4일 증가하며, 2.0°C(3.0°C) 온난화 시기에 +11.4일(+23.0일)/+12.7일(+22.7일) 증가하여, 온난화 수준이 높아질수록 증가 폭이 커진다(Table 5). 지역별 변화를 살펴보면, HW는 충청권에서 가장 크게 증가하고 제주권에서 가장 증가 폭이 작으며, 이는 기온 변화의 지역적 특성과 같다(Fig. 4a). TR은 전라권에서 가장 크게 증가하며, 강원권에서 증가 폭이 가장 작을 것으로 전망된다(Fig. 4b). 또한 HW와 TR은 모두 강원 산간 지역과 한라산 지역에서 증가 폭이 작은 것으로 나타난다.

TX90/TN90은 현재 대비 1.5°C 온난화 시기에 +10.5일/+10.6일 증가하며, 2.0°C(3.0°C) 온난화 시기에 +21.3일(+38.2일)/+19.7일(+32.7일) 증가하여, 온난화 수준이 높아질수록 TX90의 증가 폭이 특히 더 커진다(Table 5). 지역별 변화 특성을 살펴보면, TX90은 충청권에서 증가 폭이 크고 경상권에서 증가 폭이 가장 작으며, TN90은 수도권에서 크게 증가하고 강원권에서 증가 폭이 가장 작다. TXx/TNx는 현재 대비 1.5°C 온난화 시기에 +1.5°C/+1.3°C 상승하며, 2.0°C(3.0°C) 온난화 시기에 +2.7°C(+3.9°C)/+2.5°C(+3.6°C) 상승하여, 연평균기온에 비해 극한 고온의 상승 폭이 더 클 것으로 전망된다(Table 5). 6개 권역 중에서 TXx는 경상권(제주권)에서 상승 폭이 가장 크(작)고, TNx는 수도권(제주권)에서 상승 폭이 가장 큰(작은)것으로 나타났다(Fig. 4c, d).

저온 극한 기후지수는 절대적 기준 극한 현상인 결빙일(ID)과 서리일(FD), 상대적 기준 극한 현상인 한랭일(TX10)과 한랭야(TN10), 극한 기온 지수인 일 최고기온 연 최소값(TXn)과 일 최저기온 연 최소값(TNn)으로 구분된다. ID/FD은 현재 대비 1.5°C 온난화 시기에 -2.0일/-9.4일 감소하며, 2.0°C(3.0°C) 온난화 시기에 -4일(-8.6일)/-16.5일(-29.5일) 감소하여, 온난화 수준이 높아질수록 FD의 감소 폭이 뚜렷하게 커진다(Table 5). 지역별 변화를 살펴보면, ID는 중부지역, 특히 강원권에서 가장 크게

감소하고 경상권과 제주권에서 감소 폭이 가장 작다(Fig. 5a). FD는 전라권에서 가장 크게 감소하며, 제주권(특히 제주 해안지역)에서 감소 폭이 가장 작을 것으로 전망된다(Fig. 5b).

TX10/TN10은 현재 대비 1.5°C 온난화 시기에 -4.5일/-2.9일 감소하며, 2.0°C(3.0°C) 온난화 시기에 -8.7일(-17.2일)/-6.9일(-16.6일) 감소하여, 온난화 수준이 높아질수록 감소 폭이 더 커진다(Table 5). 지역별 변화 특성을 살펴보면, TX10은 수도권, TN10은 경상권에서 감소 폭이 가장 작으며, 두 지수 모두 제주권에서 감소 폭이 가장 크다. TXn/TNn는 현재 대비 1.5°C 온난화 시기에 +0.3°C/+0.3°C 상승하며, 2.0°C(3.0°C) 온난화 시기에 +0.8°C(+2.2°C)/+0.8°C(+2.3°C) 상승하여, 연평균기온에 비해 상승 폭이 작을 것으로 전망된다(Table 5). 6개 권역 중에서 TXn은 제주권(경상권)에서 상승 폭이 가장 크(작)고, TNn은 수도권에서 상승 폭이 가장 크고 경상권에서는 2.0°C 온난화 시기까지는 오히려 감소할 것으로 전망되었다(Fig. 5c, d). 두 지수는 공통적으로 1.5°C 및 2.0°C 온난화 수준에서 경상권 및 영동 일부 지역에서 겨울철 극한 저온의 감소가 전망되었다. 이는 앞서 언급된 미래 여름철 극한 기온 상승과는 반대의 결과이므로, 우리나라 동부 일부 지역에서는 온난화 수준에 따라 연교차가 증가할 수 있음을 시사한다.

기온 극한 기후지수 변화 전망 결과를 종합해보면, 온난화 수준에 따라 고온 극한 현상(HW, TR, TX90, TN90)은 모든 권역에서 증가하며, 저온 극한 현상(ID, FD, TX10, TN10)은 모든 권역에서 감소한다. 여름철 극한 고온(TXx, TNx)은 모든 권역에서 상승하고, 겨울철 극한 저온(TNx, TNn)은 우리나라 평균적으로는 상승하나, 동쪽의 일부 지역에서 비교적 가까운 미래에 감소할 수 있다. 또한 여름철 극한 고온은 평균기온보다 상승 폭이 크고 겨울철 극한 저온은 평균기온보다 상승 폭이 작다. 특히 여름철 낮 시간 동안의 극한 현상(HW, TX90, TXx) 및 기온의 변화가 가장 뚜렷할 것으로 전망된다.

강수 극한 기후지수는 극한 강수량 지수인 1일 최다 강수량(RX1D)과 5일 최다 강수량(RX5D), 상대적 기준 극한 현상인 상위 5% 극한 강수일(R95)과 상위 1% 극한 강수일(R99), 절대적 기준 극한 현상인 호우일수(D80)로 구분된다. RX1D/RX5D는 현재 대비 1.5°C 온난화 시기에 +6.4%/+3.2% 증가하며, 2.0°C(3.0°C) 온난화 시기에 +16.8%(+22.5%)/+13.9%(+18.0%) 증가할 것으로 전망된다(Table 6). 이는 온난화가 진행됨에 따라 극한 강수량은

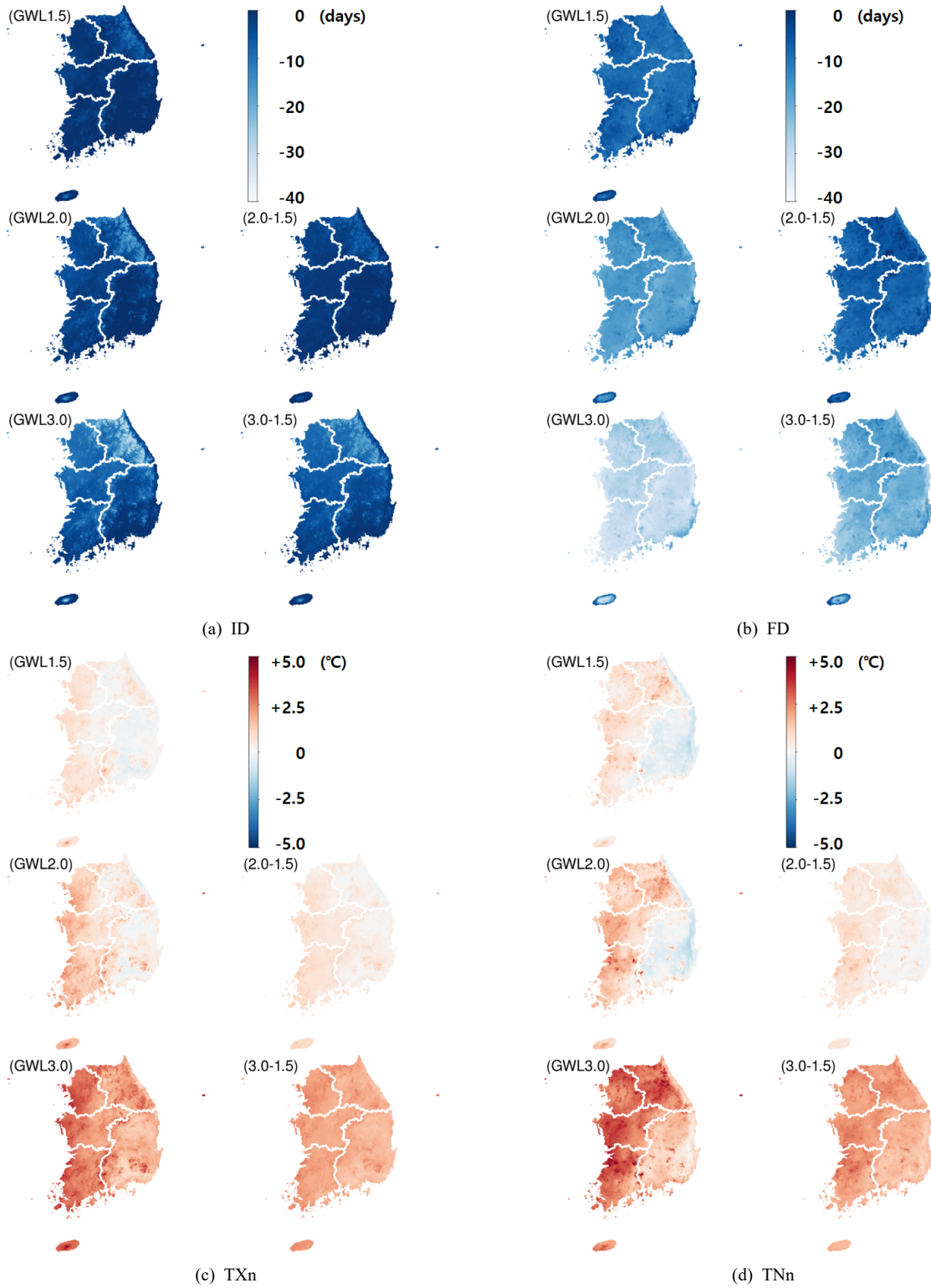


Fig. 5. Same as in Fig. 3 but for low temperature indices (ID, FD, TXn, TNn).

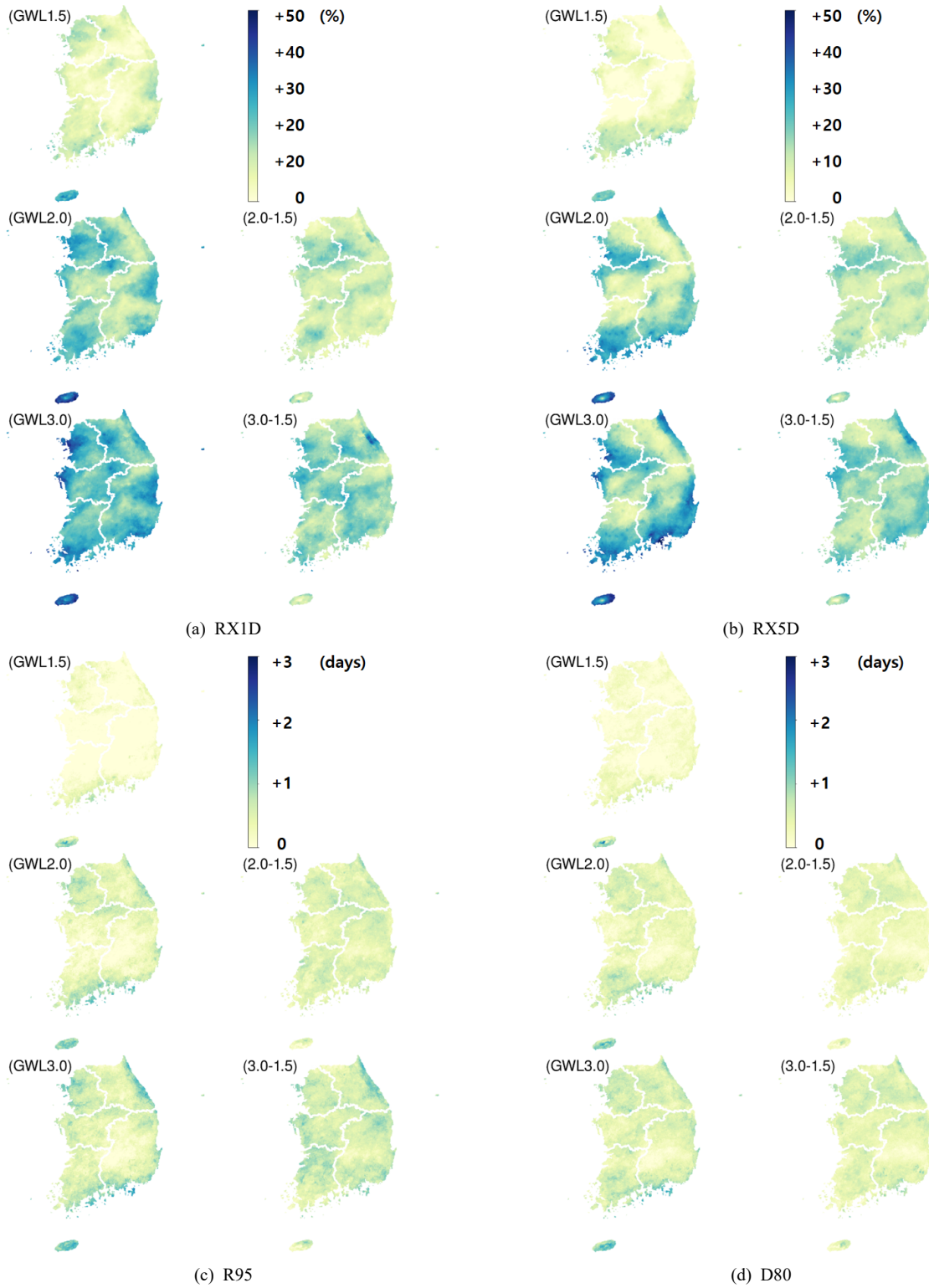


Fig. 6. Same as in Fig. 3 but for extreme precipitation indices (RX1D, RX5D, R95, D80).

평균 강수량보다 증가 폭이 커질 수 있음을 의미한다. 지역별 변화 특성을 살펴보면, RX1D와 RX5D는 모두 제주권에서 증가 폭이 가장 크고 강원권에서 증가 폭이 가장 작다(Fig. 6a,b).

R95/R99는 현재 대비 1.5°C 온난화 시기에 ±0.1일 수준으로 뚜렷한 변화가 없으며, 2.0°C(3.0°C) 온난화 시기에 +0.3일(+0.5일)/+0.3일(+0.4일)로 다소 증가할 것으로 전망된다(Table 6). D80은 현재 대비 1.5°C 온난화 시기에 뚜렷한 변화가 없으며, 2.0°C(3.0°C) 온난화 시기에 +0.4일(+0.5일) 증가가 전망된다. 즉, 기후변화를 1.5°C 온난화 수준으로 제한하지 못하면 미래 강수 극한 현상은 온난화가 강해질수록 증가하는 것을 확인할 수 있다. 온난화 수준에 따른 강수 극한 현상의 지역별 변화를 살펴보면, R95/D80은 모두 제주권(경상권)에서 증가 폭이 가

장 크(작)다(Fig. 6c,d).

강수 극한 기후지수 변화 전망 결과를 종합해보면, 온난화 수준이 1.5°C로 제한되지 못하면 극한 강수량 및 극한 강수 현상이 모두 급증할 것으로 전망된다. 또한 극한 강수량은 평균 강수량 증가에 비해 증가 폭이 매우 크며, 특히 제주권에서 증가가 뚜렷할 것으로 전망된다.

이 연구에서는 ETCCDI에서 제시한 극한 기후 지수 외에 미래 온난화 수준에 따른 풍속과 상대습도의 극한 현상의 변화를 정량적으로 제시하기 위하여 상위 10% 극한 풍속일(WS90)/습도일(RH90)을 분석하였다. WS90은 현재 대비 1.5°C 온난화 시기에 +24.4일 증가하며, 2.0°C(3.0°C) 온난화 시기에 +40.9일(+39.4일) 증가가 전망된다(Table 6). 이는 극한 풍속은 미래 1.5°C 온난화 이후, 추가 온난화가 진행되는 경우에 더 많이 발생할 수 있다는

Table 6. Changes in regional extreme precipitation, wind speed and relative humidity indices from three global warming level (GWL) of 1.5 °C, 2.0 °C and 3.0 °C compared to present-day (2000 ~ 2019) over South Korea

Var.	GWL	KOR	CP	GW	CC	JL	GS	JJ
RX1D (%)	1.5	+6.4(±6.3)	+8.3(±9.9)	+3.9(±6.1)	+4.8(±8.3)	+8.1(±7.9)	+5.3(±8.7)	+25.2(±10.4)
	2.0	+16.8(±10.1)	+21.3(±15.5)	+15.1(±12.1)	+15.4(±13.2)	+18.2(±11.6)	+14.1(±12.0)	+36.0(±15.1)
	3.0	+22.5(±12.4)	+24.7(±11.4)	+20.7(±12.7)	+22.2(±13.2)	+22.9(±19.0)	+21.5(±15.5)	+35.3(±18.7)
RX5D (%)	1.5	+3.2(±6.0)	+4.3(±9.8)	-1.6(±5.2)	+1.2(±6.7)	+5.4(±7.8)	+4.2(±8.7)	+19.2(±10.3)
	2.0	+13.9(±7.6)	+15.2(±13.4)	+8.9(±9.7)	+12.2(±9.5)	+17.0(±9.6)	+14.3(±9.8)	+31.0(±12.3)
	3.0	+18.0(±9.7)	+18.6(±9.5)	+13.3(±10.5)	+16.2(±11.4)	+18.4(±14.1)	+20.5(±12.5)	+32.7(±14.5)
R95 (days)	1.5	-0.1(±0.4)	0.0(±0.5)	-0.1(±0.4)	-0.2(±0.4)	-0.1(±0.4)	-0.2(±0.4)	+0.7(±0.5)
	2.0	+0.3(±0.6)	+0.5(±0.7)	+0.4(±0.6)	+0.2(±0.6)	+0.4(±0.7)	+0.2(±0.6)	+0.9(±0.5)
	3.0	+0.5(±0.7)	+0.6(±0.6)	+0.5(±0.7)	+0.4(±0.8)	+0.5(±0.9)	+0.4(±0.7)	+1.2(±0.5)
R99 (days)	1.5	+0.1(±0.1)	+0.1(±0.2)	0.0(±0.1)	+0.1(±0.2)	+0.2(±0.2)	+0.1(±0.2)	+0.4(±0.3)
	2.0	+0.3(±0.2)	+0.4(±0.3)	+0.3(±0.2)	+0.3(±0.3)	+0.3(±0.2)	+0.3(±0.2)	+0.4(±0.3)
	3.0	+0.4(±0.2)	+0.5(±0.2)	+0.4(±0.3)	+0.4(±0.3)	+0.4(±0.3)	+0.4(±0.3)	+0.4(±0.2)
D80 (days)	1.5	0.0(±0.2)	0.0(±0.4)	+0.0(±0.2)	0.0(±0.3)	+0.1(±0.3)	0.0(±0.3)	+0.7(±0.4)
	2.0	+0.4(±0.4)	+0.5(±0.6)	+0.4(±0.4)	+0.3(±0.4)	+0.4(±0.4)	+0.3(±0.4)	+0.8(±0.5)
	3.0	+0.5(±0.4)	+0.5(±0.5)	+0.5(±0.5)	+0.4(±0.4)	+0.5(±0.6)	+0.4(±0.4)	+1.0(±0.5)
WS90 (days)	1.5	+24.4(±3.4)	+26.9(±3.7)	+26.0(±5.7)	+25.1(±3.4)	+22.7(±3.0)	+23.6(±4.4)	+18.8(±7.9)
	2.0	+40.9(±4.6)	+46.6(±4.7)	+39.7(±8.3)	+41.4(±4.9)	+38.4(±4.2)	+40.8(±6.7)	+34.9(±12.6)
	3.0	+39.4(±4.7)	+45.8(±4.8)	+38.4(±8.3)	+40.1(±5.1)	+36.9(±4.0)	+39.0(±6.5)	+33.2(±12.4)
RH90 (days)	1.5	+10.9(±4.2)	+8.7(±5.3)	+14.7(±5.5)	+12.2(±4.4)	+13.3(±3.3)	+8.2(±4.1)	+0.4(±2.5)
	2.0	+7.7(±6.2)	+8.4(±8.1)	+10.1(±8.5)	+9.6(±6.6)	+9.6(±4.7)	+4.6(±6.0)	-6.6(±3.2)
	3.0	+8.3(±5.6)	+9.0(±8.2)	+11.4(±8.2)	+10.1(±5.6)	+10.3(±3.8)	+5.2(±5.5)	-7.2(±3.0)

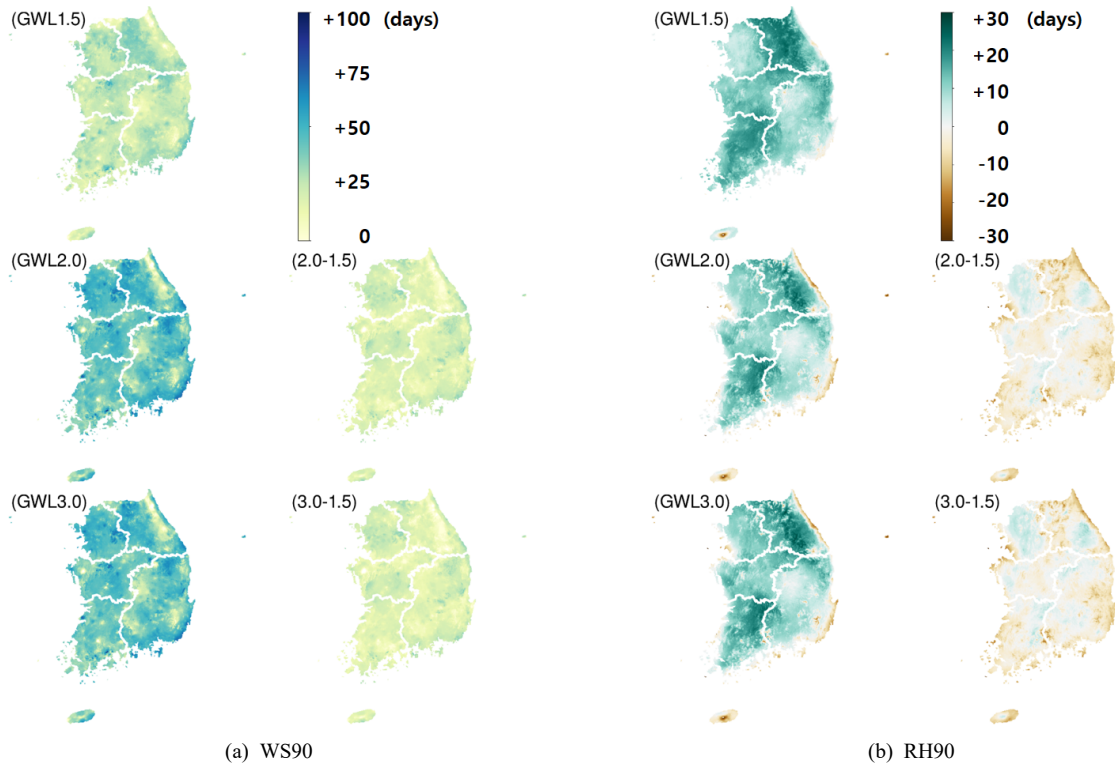


Fig. 7. Same as in Fig. 3 but for extreme wind speed and relative humidity indices (WS90, RH90).

것을 의미한다. 극한 풍속 변화를 지역별로 살펴보면, 수도권에서 증가 폭이 다소 크고 제주권에서 증가 폭이 가장 작다(Fig. 7a). RH90은 현재 대비 1.5°C 온난화 시기에 +10.9% 증가하며, 2.0°C(3.0°C) 온난화 시기에 +7.7%(+8.3%) 증가할 것으로 전망된다(Table 6). 즉, 온난화 수준에 따라 변화 폭의 차이는 있지만 온난화 환경에서 미래 극한 습도는 증가 한다고 볼 수 있다. 이러한 결과는 평균 습도의 변화와는 차이가 있으므로 향후 평균 및 극한 풍속의 미래 전망에 대한 자세한 분석이 필요할 것으로 보인다. 극한 습도 변화를 지역별로 살펴보면, 강원권에서 가장 크게 증가하고 제주권에서는 감소할 것으로 전망된다(Fig. 7b).

이 절에서는 극한 기후지수 뿐만 아니라 극한 기온(TXx) 및 극한 강수량(RX1D)을 사용하여 온난화 수준에 따른 우리나라 극한 기후의 재현 수준 등의 전망 결과도 제시하였다(Fig. 8). 먼저 극한 기온의 변화를 살펴보면, 식 (1)과 식 (2)에 의해서 현재 기간의 20년 재현 수준의 TXx는 36.6°C로 나타났다(Fig. 8a). 이는 1.5°C/2.0°C/3.0°C 온난화 시기에 각각 39.6°C, 40.6°C, 41.6°C로 온난화가 진행됨에 따라 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있

다. 현재 기준의 20년 재현 빈도 TXx는 1.5°C 온난화 시기에 2.8년마다 발생하며, 2.0°C/3.0°C 온난화 시기에는 1.6년/1.2년으로 미래에 극한 기온의 발생 빈도가 매우 잦아질 것으로 전망된다. 이는 한반도 전체에서 TXx 재현 빈도가 온난화 수준에 따라 증가할 것이라는 Kim et al. (2022a)의 연구와도 유사한 결과이다.

RX1D의 경우 20년 재현 수준의 강수량은 216.4 mm로 나타났다. 이는 온난화 수준에 따라서 증가하는데, 1.5°C 온난화 시기에 현재 대비 +30.4 mm 증가하여 246.7 mm에 달할 것으로 전망된다(Fig. 8b). 2.0°C/3.0°C 온난화 시기에는 20년 재현 수준의 강수량이 285.1 mm(+68.7 mm)/302.5 mm(+86.1 mm)까지 증가할 것으로 전망된다. 이는 미래 우리나라에서 기온 상승에 따라 극한 강수의 발생 빈도가 증가한다는 Kim et al. (2020)와 Kim et al. (2023)의 연구 결과와 유사하다. 현재를 기준으로 20년 재현 빈도의 강수량은 1.5°C 온난화 시기에 11.4년에 한 번 꼴로 발생하여, 현재의 극한 강수량이 미래에 더 자주 발생할 것으로 전망된다. 2.0°C/3.0°C 온난화 시기에는 20년 재현 빈도 강수량이 7.5년/6.3년으로 추가 온난화가 진행될수록 현재 수준의 극한 강수량이 약 3배 정도 더 자주

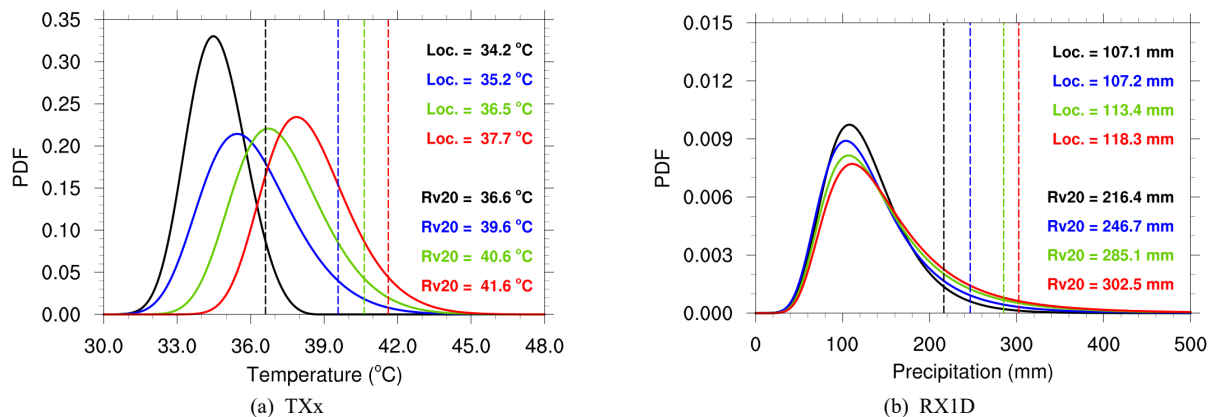


Fig. 8. Probability distribution functions (PDF) for extreme climate indices under present-day (black) and 1.5°C (blue) / 2.0°C (green) / 3.0°C (red) global warming level (GWL) over South Korea. A location parameter (Loc.) and 20 years return value (Rv20) are located on the upper side. The return value is also indicated by the dotted vertical line.

발생할 것으로 전망된다.

3.4. 미래 전망의 불확실성 범위

이 연구에서는 온난화 수준에 따른 기후변화 전망을 위하여 5개의 지역 기후모델(RCM)과 4개의 SSP 시나리오에 기반한 남한상세 기후변화 시나리오를 사용하였고 주로 이들 자료를 앙상블 평균하여 분석한 결과를 제시하였다. 이 절에서는 평균기온과 강수량에 대하여 각각의 앙상블 멤버별 결과를 제시하여 미래 전망의 불확실성 범위를 제시하였다. Table 1에 제시된 바와 같이 1.5°C 및 2.0°C 온난화 시기 분석에는 20개 앙상블 멤버(5개 RCM × 4개 SSP)를 사용하였다. 3.0°C 온난화 시기 분석에는 15개 앙상블 멤버(5개 RCM × 3개 SSP)를 사용하였으며, 이는 2.2절에서 밝힌 바와 같이 저탄소 시나리오(SSP1-2.6)는 3.0°C 온난화에 도달하지 않기 때문이다.

Fig. 9는 온난화 수준별로 미래 전망에 사용된 앙상블 멤버들의 기온과 강수량 전망 결과이다. Fig. 9a는 평균기온의 앙상블 멤버별 변화이며, Fig. 9b는 강수량의 앙상블 멤버별 변화이다. 기온 전망에 대한 RCM별 특성을 살펴보면, 전반적으로 HadGEM3-RA에서 기온 상승 폭이 크고 WRF에서 기온 상승 폭이 작다. SSP별 특징은 SSP3-7.0과 SSP5-8.5에서 비교적 상승 폭이 크고 SSP1-2.6과 SSP2-4.5에서 상승 폭이 작으나, 큰 차이는 없다. 1.5°C 및 2.0°C 온난화 수준에서 기온의 불확실성을 살펴본 결과, RCM 및 SSP에 따른 불확실성이 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 미

만으로 매우 작게 나타났다. 3.0°C 온난화 수준에서는 1.5°C 온난화 수준에 비해 기온 전망의 불확실성이 다소 증가하며, 특히 상승 폭이 큰 HadGEM3-RA·SSP3-7.0 조합(+3.0°C)과 상승 폭이 가장 작은 WRF·SSP2-4.5 조합(+2.3°C) 사이의 편차가 약 0.7°C 로 나타났다.

강수량 전망에 대한 RCM별 특징은 전반적으로 HadGEM3-RA와 GRIMs에서 증가 폭이 크고 CCLM에서 증가 폭이 가장 작다. SSP별 특징은 SSP2-4.5에서 비교적 강수량 증가 폭이 크고 SSP5-8.5에서 증가 폭이 가장 작은 것으로 나타난다. 이는 우리나라에서 강수량의 미래 변화는 변동성이 매우 크며, 21세기 전반기(2021 ~ 2040년)에 강수량이 저탄소 시나리오에서 증가하고 고탄소 시나리오에서 다소 감소할 수 있다는 연구와 유사한 결과이다(Kim et al., 2022b). 온난화 수준별 강수 변화의 불확실성을 살펴보면, 1.5°C 온난화 수준에 비해 2.0°C 및 3.0°C 온난화 수준에서 더 큰 불확실성이 나타난다(Fig. 8). 특히 RCM에 의한 불확실성이 SSP에 의한 불확실성보다 크게 나타나며, 각각의 불확실성은 온난화가 강해짐에 따라 모두 증가한다. 각 앙상블 멤버에 대하여 가장 크게 증가하는 멤버와 가장 크게 감소하는 멤버 간 미래 전망의 차이는 1.5°C/2.0°C/3.0°C 온난화 수준에서 14%/21%/31%로 온난화 수준이 강해짐에 따라 증가할 것으로 전망된다.

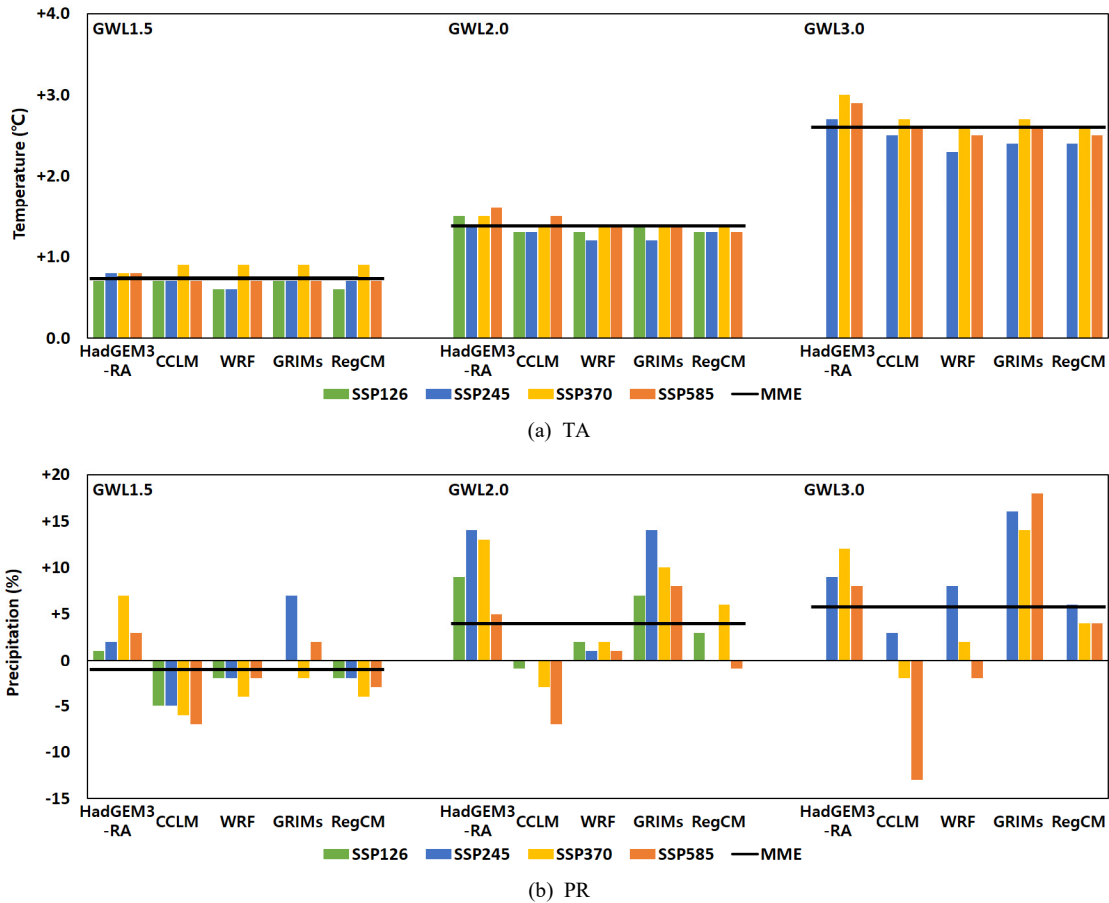


Fig. 9. Changes in mean temperature (TA) and precipitation (PR) of ensemble members from three global warming level (GWL) of 1.5°C, 2.0°C and 3.0°C compared to present-day (2000 ~ 2019) over South Korea.

4. 요약 및 결론

이 연구에서는 새로운 고해상도(1 km) 격자형 관측자료(2000 ~ 2019년)와 남한상세 기후변화 시나리오(2021 ~ 2100년)를 기반으로 전지구 온난화 수준(1.5°C/2.0°C/3.0°C)에 따른 우리나라 권역별 기후변화를 전망하였다. 전지구 제한온도에 도달하는 시점은 UKESM1 전지구 기후모델의 모의 결과로부터 산업화 이전 기간(1850 ~ 1900년)과 비교하여 전지구 기온이 1.5°C, 2.0°C, 3.0°C 상승하는 해로 정의하였다. 또한 기온의 경년 변동에 의한 영향을 최소화하기 위하여 21년 이동 평균된 기온자료를 사용하였다. 미래 전망에 사용된 지역 기후모델은 5종(HadGEM3-RA, CCLM, WRF, RegCM, GRIMs)이며, SSP 시나리오는 4종(SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0,

SSP5-8.5)으로 총 20개 앙상블 멤버로 구성된다. 이를 기반으로 우리나라 평균 및 6개 권역에 대한 전망 결과를 정량적으로 평가하였다.

MK-PRISM에 의해 추정된 관측자료의 일별 모의 결과에 대하여 기상청 관측자료와 교차검증한 결과, 두 자료 사이에 뚜렷한 차이가 나타나지 않았다. 추정된 관측자료와 기상청 관측자료 사이의 계절별 오차를 평가한 결과, 기온은 겨울에 오차가 다소 크고 강수는 여름에 크며 풍속과 상대습도는 연초에 비교적 크게 나타났다. 격자형 관측자료를 통해 우리나라의 현재 월별 기후 특성을 살펴보면, 기온은 1월에 최저값(-2.7°C), 8월에 최고값(24.7°C)을 보이며, 강수는 7월에 최대값(10.9 mm^d⁻¹)이 나타나고 여름철 두 번의 피크(Bimodal)가 뚜렷하다. 풍속은 겨울과 봄에 강하고 여름과 가을에 약하며, 상대습도는 여름

에 높고 봄에 낮은 특성이 잘 나타난다.

우리나라에서 연평균기온(TA)은 현재(2000 ~ 2019년)와 비교하여 1.5°C 온난화 시기에 +0.7°C 상승하며, 2.0°C(추가 온난화 0.5°C) 및 3.0°C(추가 온난화 1.5°C) 온난화 시기에는 각각 +1.4°C, +2.6°C 상승할 것으로 전망된다. 강수량(PR)은 1.5°C 온난화 시기에 -1.3%로 다소 감소하나, 2.0°C(3.0°C) 온난화 시기에는 각각 +4.0% (+5.8%)로 증가할 것으로 전망되며, 특히 7 ~ 9월에 크게 증가할 것이다. 충청권은 미래 기온 상승 폭은 크나 강수 증가 폭이 작고 제주권은 미래 기온 상승 폭이 작으나 강수 증가 폭이 클 것으로 전망된다. 강수량은 미래 변화의 폭보다 앙상블 멤버 간의 불확실성 범주가 더 크게 나타나며, 온난화 수준이 높아질수록 불확실성은 더욱 증가할 것이다. 풍속은 온난화가 진행되어도 뚜렷한 변화가 없을 것으로 전망된다. 상대습도는 현재 대비 1.5°C 온난화 시기에 +0.4% 증가하나, 2.0°C/3.0°C 온난화 시기에는 -0.9%/-0.6%로 감소할 것으로 예상되며, 온난화 시기에 따른 변동성이 크다. 제주권은 온난화에 따라 풍속은 감소하고 상대습도는 가장 크게 증가할 것으로 전망된다.

온난화가 진행됨에 따라 기온 극한 기후지수 중 고온 극한 현상(HW, TR, TX90, TN90)은 모든 권역에서 증가하며, 저온 극한 현상(ID, FD, TX10, TN10)은 모든 권역에서 감소할 것으로 전망된다. 여름철 극한 고온(TXx, TNx)은 모든 권역에서 상승하고, 겨울철 극한 저온(TNx, TNn)은 우리나라 평균적으로는 상승하나, 동쪽의 일부 지역에서 1.5°C/2.0°C 온난화 수준에서 감소할 것으로 보인다. 이러한 극한 기온의 미래 변화를 평균기온의 상승과 결부시키면 여름철 극한 고온은 평균 기온 상승보다 그 폭이 크고, 겨울철 극한 저온은 평균기온 상승보다 그 폭이 작아 미래 연교차가 증가할 수 있음을 시사한다. 또한 여름철 낮 시간 동안의 극한 현상(HW, TX90, TXx) 및 기온의 변화가 가장 뚜렷할 것으로 전망된다. 강수 극한 기후지수의 경우, 온난화 수준이 1.5°C로 제한되지 못하고 추가 온난화가 진행되면 극한 강수량 및 극한 강수 현상이 모두 급증할 것으로 전망된다. 또한 극한 강수량은 평균 강수량 증가에 비해 증가 폭이 매우 크며, 특히 제주권에서 증가가 뚜렷할 것으로 전망된다. 또한 현재 20년 재현 수준의 극한 강수량(RX1D)은 216.4 mm이나, 1.5°C/2.0°C/3.0°C 온난화에 따라 +30.4 mm/+68.7 mm/+86.1 mm 증가할 것으로 전망되며, 재현 수준 20년의 극한 고온(TXx)은 현재 36.6°C에서 온난화 수준에 따라 39.6°C/40.6°C/41.6°C로 상승이 전망된다. 극한 풍속(WS90)/극한

습도(RH90)는 대체로 온난화에 따라 증가하며, 평균 풍속과 평균 습도에 비해서 증가 폭이 크다. 특히 상대습도는 미래에 감소할 것으로 전망되는 반면, 극한 습도는 증가가 전망된다.

온난화 수준별로 20개 앙상블 멤버별(RCM 5종 × SSP 4종)로 평균기온과 강수량 전망 결과 분석을 통해 미래 전망의 불확실성을 제시하였다. 기온의 경우, RCM에 따른 불확실성과 SSP에 따른 불확실성에 큰 차이는 없다. 3.0°C 온난화 시기에 비교적 불확실성이 커지며, 기온 상승 폭이 가장 큰 멤버(HadGEM3-RA·SSP3-7.0)와 가장 작은 멤버(WRF·SSP2-4.5) 간 차이는 0.7°C로 나타났다. 강수량의 경우, 전반적으로 RCM 중에서 HadGEM3-RA와 GRIMs에서 증가 폭이 크고 CCLM에서 증가 폭이 작다. 강수량은 온난화가 강해질수록 불확실성이 더 커지며, SSP에 따른 불확실성보다 RCM에 따른 불확실성이 더 크게 나타난다. 온난화 수준별로 강수량 증가 폭이 가장 큰 멤버와 가장 작은 멤버 간 미래 전망의 차이는 1.5°C/2.0°C/3.0°C 시기에 14%/21%/31%로 점차 증가할 것으로 전망된다.

이 연구에서는 전지구 1.5°C 온난화 제한 목표를 달성한 경우와 달성하지 못한 경우에 대하여 우리나라의 기후 변화를 전망하였다. 그 결과 1.5°C 온난화 이후, 추가 온난화가 진행되면 우리나라에 더 강한 극한 기후 현상이 발생할 수 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 탄소중립을 달성해야 하는 근거의 하나로, 국가 기후변화 적응 정책 수립 등에 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사사

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

References

- Choi G, Collins D, Ren G, Trewin B, Baldi M, Fukuda Y, ... Zhou Y. 2009. Changes in means and extreme events of temperature and precipitation in the Asia-Pacific network region, 1955-2007. *International Journal of Climatology*. 29(13): 1906-1925. doi: 10.1002/joc.1979

- Coles S. 2001. An introduction to statistical modeling of extreme values. London: Springer. doi: 10.1007/978-1-4471-3675-0
- 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
- Giorgi F, Coppola E, Solmon F, Mariotti L, Sylla MB, Bi X, ... Brankovic C. 2012. RegCM4: Model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Climate Research*. 52: 7-29. doi: 10.3354/cr01018
- Hong SY, Park H, Cheong HB, Kim JEE, Koo MS, Jang J, ... Li H. 2013. The Global/Regional Integrated Model system (GRIMs). *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*. 49(2): 219-243. doi: 10.1007/s13143-013-0023-0
- Hosking JRM, Wallis JR. 1997. Regional frequency analysis. Cambridge: Cambridge University Press. doi: 10.1017/CBO9780511529443
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2022. Summary for policymakers. In: Global warming of 1.5°C: An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Geneva, Switzerland: Author. doi: 10.1017/9781009157940.001
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2023. Summary for policymakers. In: Climate change 2023: Synthesis report. Geneva, Switzerland: Author. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001
- 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 DH, Kim JU, Kim TJ, Byun YH, Chang EC, Cha DH, ... Min SK. 2022a. 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. *Journal of Climate Change Research*. 13(5): 525-543. doi: 10.15531/KSCCR.2022.13.5.525
- Kim JB, Im ES, Bae DH. 2020. Intensified hydroclimatic regime in Korean basins under 1.5 and 2°C global warming. *International Journal of Climatology*. 40(4): 1965-1978. doi: 10.1002/joc.6311
- Kim JU, Kim MK, Kim YH. 2013. Improvement of modified Korean parameter-elevation regressions an independent slopes model based on independent temperature lapse rate. *Journal of Climate Research*. 8(3): 203-215. doi: 10.14383/crj.2013.8.3.203
- Kim JU, Sang J, Kim MK, Byun YH, Kim DH, Kim TJ. 2022b. Future climate projection in South Korea using the high-resolution SSP scenarios based on statistical downscaling. *Journal of Climate Research*. 17(2): 89-106. doi: 10.14383/crj.2022.17.2.89
- Kim JU, Kim TJ, Kim DH, Byun YH, Chang EC, Cha DH, ... Min SK. 2022c. Performance evaluation and future projection of East Asian climate using SSP scenario-based CORDEX-East Asia phase 2 Multi-RCM simulations. *Journal of Climate Change Research*. 13(3): 339-354. doi: 10.15531/KSCCR.2022.13.3.339
- Kim MK, Han MS, Jang DH, Baek SG, Lee WS, Kim YH, Kim S. 2012. Production technique of observation grid data of 1km resolution. *Journal of Climate Research*. 7(1): 55-68.
- Kim MK, Kim S, Kim JU, Heo J, Park JS, Kwon WT, Suh MS. 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 Journal of Atmospheric Sciences*. 52(2): 79-89. doi: 10.1007/s13143-016-0010-3
- Kim S, Kim MK. 2018. Verification of PRIDE model version 2.0. *Journal of Climate Research*. 13(1): 71-86.

- doi: 10.14383/cri.2018.13.1.71
- Kim ST, Lee WS, Jung IW, Han JM, Byun YH, Kim JU. 2023. Change in extreme precipitation by watersheds of South Korea under future Shared Socio-economic Pathway (SSP) scenarios. *Journal of Climate Change Research*. 14(2): 83-93. doi: 10.15531/KSCCR.2023.14.2.083
- Lee SM, Min SK. 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 D, Zhou T, Zou L, Zhang W, Zhang L. 2018. Extreme hightemperature events over East Asia in 1.5°C and 2°C warmer futures: Analysis of NCAR CESM low-warming experiments. *Geophysical Research Letters*. 45(3): 1541-1550. doi: 10.1002/2017GL076753
- Park J, Lim YJ, Jang DH. 2014. Improvement of a modified Korean parameter-elevation regressions on independent slopes model for wind speed interpolation. *Journal of Climate Research*. 9(3): 225-241. doi: 10.14383/cri.2014.9.3.225
- Powers JG, Klemp JB, Skamarock WC, Davis CA, Dudhia J, Gill DO, ... Duda MG. 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*. 17(4): 347-348. doi: 10.1127/0941-2948/2008/0309
- Shim SB, Kwon SH, Lim YJ, Yum SS, Byun YH. 2019. Understanding climate change over East Asia under stabilized 1.5 and 2.0°C global warming scenarios. *Atmosphere*. 29(4): 391-401. doi: 10.14191/Atmos.2019.29.4.391
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). 2016. 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>
- Zhou Y, Ren G. 2011. Change in extreme temperature event frequency over mainland China, 1961-2008. *Climate Research*. 50(2): 125-139. doi: 10.3354/cr01053