

고해상도 기후변화 시나리오 기반 우리나라 평균 및 극한기후 변화의 Global Warming Level of Emergence 분석

김진옥*[†] · 강수정** · 이우섭*** · 이영석**** · 심재관***** · 부경온*****

*국립기상과학원 기후변화예측연구팀 연구사, **국립기상과학원 기후변화예측연구팀 주무관, ***아시아-태평양경제협력체 기후센터 선임연구원,
****공주대학교 대기과학과 박사과정, *****국립기상과학원 기후변화예측연구팀 연구관, *****국립기상과학원 기후변화예측연구팀 팀장

Global warming level of emergence of mean and extreme climate change over South Korea based on high-resolution climate change scenarios

Kim, Jin-Uk*[†] · Kang, Su-Jeong** · Lee, Woo-Seop*** · Lee, Youngseok**** · Shim, Jae-Kwan***** and Boo, Kyung-On*****

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

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

****Research Fellow, Climate Change Analysis Department, APEC Climate Center, Busan, Korea*

*****Ph.D. Student, Department of Atmospheric Sciences, Kongju National University, Gongju, Korea*

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

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

ABSTRACT

This study investigates changes in mean and extreme climate indices and their emergence over South Korea using 500-m-resolution climate change scenarios based on the CMIP6 Shared Socioeconomic Pathways (SSPs). Climate responses were analyzed at five global warming levels (GWLs; 1.5–5.0°C), and the Global Warming Level of Emergence (GWLoE) was evaluated to determine when climate change signals exceed natural variability. Mean temperature (TA) increases consistently with warming, reaching +4.8°C at GWL 5.0, whereas precipitation (PR) exhibits greater variability, ranging from -1.1% at GWL 1.5 to +15.5% at GWL 5.0. Extreme indices respond more strongly than mean climate indices, with TXx increasing by +6.2°C and Rx1D by +30.2% at GWL 5.0. The GWLoE analysis shows that TA emerges rapidly, with emergence across 95.1% of South Korea at GWL 2.0 and nearly all areas at GWL 3.0. In contrast, the emergence of TXx is delayed, while PR rarely emerges even at GWL 5.0 because of strong natural variability. Rx1D emerges earlier than PR, particularly in southern coastal and island regions. These results indicate that temperature-related risks become detectable at low warming levels, whereas hydrological risks may intensify through extreme precipitation before changes in mean precipitation clearly emerge. The findings highlight the importance of incorporating emergence-based metrics into climate risk assessment and adaptation planning.

Key words : IPCC AR6, GWL, Time of Emergence, South Korea

1. 서론

산업화 이후 인간 활동에 의한 온실가스 배출 증가로 인해 전 지구 평균기온은 지속적으로 상승하고 있으며,

이에 따라 강수 패턴의 변화 및 극한기후 사건의 빈도와 강도가 증가하고 있다(Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC, 2023). 이러한 기후변화는 자연 생태계뿐만 아니라 수자원, 농업, 도시 환경 등 다양한 사

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

ORCID 김진옥 0000-0001-9892-9915
강수정 0009-0002-3003-8491
이우섭 0000-0003-1677-1929

이영석 0009-0001-8337-9700
심재관 0009-0006-7808-3805
부경온 0000-0002-1505-578X

Received: April 21, 2026 / Revised: May 18, 2026 / Accepted: July 4, 2026

화·경제적 시스템에 영향을 미치고 있으며, 특히 지역 규모에서의 기후변화 영향 평가의 중요성이 점차 강조되고 있다. 한반도 지역에서도 기온 상승과 함께 강수 변동성 증가, 폭염 및 집중호우의 빈도 증가 등이 보고되고 있으며(Baek et al., 2017; Lee and Lee 2016; Lee et al., 2017; Park et al., 2017), 이와 관련하여 IPCC 제6차 평가보고서에서는 기후변화 영향평가와 적응정책 수립을 위해 지역 규모(regional scale)의 정밀한 기후정보의 중요성을 강조하였다(Ranasinghe et al., 2021).

기후변화의 미래 전망을 위해 전지구 기후모델(Global Climate Model; GCM)을 활용한 다양한 기후변화 시나리오가 생산되고 있으나, GCM은 일반적으로 수십 km 이상의 공간 해상도를 가지기 때문에 지역 규모의 기후 특성을 분석하는 데에는 한계가 있다. 이러한 한계를 보완하기 위해 지역 기후모델(Regional Climate Model; RCM)을 이용한 역학적 상세화(dynamical downscaling) 기법이 널리 활용되어 왔다. 특히 세계 기후연구 프로그램(World Climate Research Programme; WCRP) 산하의 지역 상세화 국제 프로젝트(COordinated Regional climate Downscaling Experiment; CORDEX)의 동아시아 그룹에서는 최근 IPCC AR6 (Sixth Assessment Report) 및 AR7 (Seventh Assessment Report)에 대응하여 12 ~ 25 km 해상도의 지역 기후변화 시나리오가 산출되고 있다(Kim et al., 2025; Kim, Kim, et al., 2022). 또한 최근에는 RCM 결과를 기반으로 통계적 상세화(statistical downscaling) 기법을 적용하여 수 km 수준의 고해상도 기후변화 시나리오가 생산되고 이를 활용한 기후변화 영향 연구가 점차 증가하고 있다. 특히 기상청의 AR6 기반 1 km 해상도의 남한상세 기후변화 시나리오를 활용하여 우리나라 권역별 미래 극한기후지수의 변화 전망, 여름과 겨울의 체감 온도 변화 전망 등이 연구되었다(Choi, 2024; Kim, Sang, et al., 2022). 이러한 고해상도 기후자료는 산악지역, 해안 지역 및 복잡지형과 같이 지형의 영향이 크게 나타나는 지역에서 국지적인 기후 특성을 보다 효과적으로 반영할 수 있다(Daly et al., 2008). 그러나 부문별 기후변화 영향 및 취약성 평가를 위한 초고해상도 자료 수요가 증가함에 따라 기존 시나리오보다 향상된 해상도의 기후 시나리오 제공이 요구되고 있다. 이에 따라서 최근 기상청은 IPCC AR6의 공통사회경제경로(Shared Socioeconomic Pathways; SSP) 4종을 기반으로 수평해상도 500 m의 초고해상도 남한상세 기후변화 시나리오를 개발하였다. Lee et al. (2026)은 새롭게 개발된 500 m 해상도의 남한상세 기후변

화 시나리오가 1 km 해상도 자료에 비해 복잡지형에서 극한 기온 재현성을 향상시키고, 미래 시나리오에서도 이러한 해상도 효과가 일관되게 유지됨을 밝혔다.

한편 최근 기후변화 영향 연구에서는 특정 배출 시나리오 기반 분석뿐만 아니라 전지구 온난화 수준(Global Warming Level; GWL)을 기준으로 기후변화를 평가하는 접근법이 활용되고 있다. 이러한 온난화 수준 기반 분석은 특정 배출 시나리오에 의존하지 않고 1.5℃ 또는 2.0℃와 같은 온도 상승 수준에서의 기후변화를 비교할 수 있다는 장점이 있다. Kim et al. (2023)은 우리나라에서 20년 재현 수준의 극한 기온 및 강수량이 온난화 수준에 따라 증가할 것을 전망하였고, Sung et al. (2023)은 미래 열스트레스가 급격히 증가할 수 있음을 제시하였다. 이와 같이 우리나라에 대한 상세 지역별 미래 전망 분석에서 온난화 수준에 따른 미래 전망 연구가 다양하게 진행되고 있다.

또한 기후변화 신호가 자연 변동성을 넘어 통계적으로 유의하게 나타나는 시점을 의미하는 Time of Emergence (ToE) 분석은 기후변화 영향이 실제로 나타나는 시기를 정량적으로 평가하는 방법으로 활용되고 있다. Mahlstein et al. (2011)과 Hawkins and Sutton (2012)은 각각 CMIP3 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 3)와 CMIP5 GCM을 기반으로 전지구 규모에서 지역별 기온의 ToE를 분석한 결과, 기후변화 신호가 자연 변동성을 넘는 시점이 저위도에서 빠르고 고위도 느리게 나타난다고 밝혔다. Giorgi and Bi (2009)는 CMIP3 다중모델 앙상블 평균 강수량의 ToE 시점이 지역에 따라 21세기 초·중반에 나타나며, 일부 지역은 강수의 변동성이 매우 크기 때문에 21세기 내에 ToE가 나타나지 않는다고 하였다. Lee et al. (2022)은 21개의 CMIP6 GCM을 기반으로 아시아 지역의 기온 자료를 기반으로 ToE를 분석하였고 여름철, 고탄소 시나리오에서 ToE에 빠르게 도달한다는 결과를 제시하였다. 그러나 현재까지의 ToE 관련 연구는 주로 전지구 또는 대륙 규모의 기후모델 자료를 기반으로 수행된 경우가 많다. 최근에는 GWL 기반 분석과 ToE 분석을 결합한 Global Warming Level of Emergence (GWLofE)에 대한 연구가 이루어지고 있으나(Gampe et al., 2024), 기존 연구는 주로 중·저해상도 자료를 기반으로 수행되어 왔으며, 세부 지형 특성을 고려한 국지 규모 연구는 상대적으로 제한적이다.

본 연구에서는 기상청이 개발한 신규 500 m 해상도의 남한상세 기후변화 시나리오를 활용하여 우리나라의 극

한기후지수 변화를 분석하고, 기후변화 신호가 자연 변동성을 넘어서는 시점을 평가하고자 한다. 특히 전지구 온난화 수준(+1.5℃, +2.0℃, +3.0℃, +4.0℃, +5.0℃)을 기준으로 각 온난화 단계에서의 ToE, 즉 GWLoE를 평가하였다. 이를 통해 초고해상도 기후변화 시나리오 기반의 온난화 수준별 극한기후 변화 특성과 기후변화 신호의 출현 시점과 공간적 특성을 파악하고, 향후 기후변화 적응 정책 및 재해 대응 전략 수립에 필요한 과학적 근거를 제공하고자 한다.

2. 자료 및 분석 방법

2.1. 500 m 해상도 기후변화 시나리오 산출

남한상세 기후변화 시나리오 산출에는 GCM과 RCM에 기반하여 다단계 상세화 과정이 사용되었다. 첫 번째 단계로, 국립기상과학원은 영국 기상청과의 협업을 통해 United Kingdom Earth System Model 1(UKESM1)을 이용하여 SSP 시나리오 4종(SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5)을 적용한 135 km 해상도의 전지구 시나리오를 생산하였다(Sellar et al., 2019). 두 번째 단계로, 동아시아 지역의 기후 특성을 보다 상세하게 반영하기 위해 UKESM1 자료를 입력자료로 활용하여 역학적 상세화를 수행하였다. 이를 위하여 CORDEX-East Asia 2단계 사업에서 개발된 RCM 5종이 사용되었으며, 각각 HadGEM3-RA, CCLM, WRF, RegCM, GRIMs 모델이다(Davies et al., 2005; Giorgi et al., 2012; Hong et al., 2013; Kim, Kim, et al., 2022; Powers et al., 2017; Rockel et al., 2008).

마지막으로, 우리나라 지역의 지형 및 기후 특성을 반영하기 위하여 통계적 상세화 기법을 적용하여 고해상도 기후자료를 생산하였다. 현재 기간(2000~2019년)에 대한 500 m 해상도의 기후자료 산출을 위하여 통계적 상세화 기법인 MK-PRISM (Modified Korean-Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model)를 사용하였다. MK-PRISM은 관측지점의 기온(TA) 및 강수(PR) 자료와 함께 고도, 지향면, 해안선 거리 등의 지형 정보를 반영하여 특정 지역의 기후요소를 추정하는 통계적 상세화 기법이다(Kim et al., 2012). 임의의 격자점에서 기후변수의 추정치는 다음과 같은 형태로 계산된다.

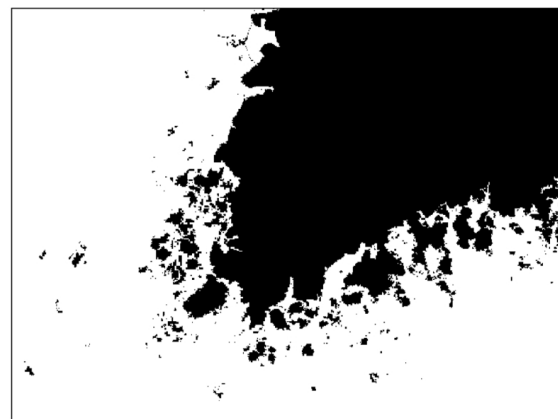
$$\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X \quad (1)$$

여기에서 X 는 고도, $\hat{Y}$ 와 고도에 따라 추정된 기후요소를 나타내고 $\hat{\beta}_0$ 와 $\hat{\beta}_1$ 는 해당 격자점에서의 가중 회귀계수를 의미한다. MK-PRISM은 각 격자 주변의 관측자료와 지형 특성을 이용한 가중 회귀를 수행함으로써 복잡한 지형조건에서도 공간적으로 연속적인 기후자료를 생산할 수 있다. 가중 회귀 계수를 계산하는 상세한 방법은 Kim et al. (2012)의 식 (4)~식 (6)을 참고하기 바란다.

기존 국가표준 기후변화 시나리오는 MK-PRISM 기반의 1 km 해상도 자료를 중심으로 구축되어 왔다. 본 연구에서는 이러한 1 km 자료를 기반으로 동일한 PRISM 기반 상세화 기법을 추가 적용하여 육지 지역의 격자수가 약 4배 증가한 500 m 해상도의 고해상도 자료를 생산하였다. 이를 통해 기존 1 km 자료에서 충분히 표현되지 못했



(a) 1 km-resolution



(b) 500 m-resolution

Fig. 1. Comparison of coastal and island representations in southwestern Korea based on (a) 1 km and (b) 500 m resolution land-sea masks. Black and white indicate land and ocean, respectively

던 복잡한 해안선, 산악지형 및 도서지역의 공간 구조를 보다 상세하게 반영하고자 하였으며, 국지 규모의 기온 및 강수 특성을 보다 정밀하게 재현할 수 있도록 하였다. Fig. 1에서는 전라남도 연안 및 도서지역을 대상으로 1 km와 500 m 해상도의 육지-해양 마스크를 비교하였다. 기존 1 km 자료는 복잡한 해안선과 소규모 섬 지역의 공간 구조를 충분히 표현하는 데 한계가 있는 반면, 500 m 자료는 연안 경계와 도서 분포를 보다 상세하게 재현하는 특징을 보인다. 이러한 고해상도 자료는 해양의 영향을 크게 받는 연안 및 도서지역에서 국지적인 기온과 강수의 공간 분포를 보다 현실적으로 표현하는 데 유리하다. 본 연구에서는 이러한 500 m 자료를 활용함으로써 남해안, 제주 및 산악지역과 같이 지형·해양 영향이 복합적으로 나타나는 지역의 공간적 기후 특성을 보다 정밀하게 고려하고자 하였다. 새롭게 산출된 500 m 자료에 대한 검증 결과는 본문의 3.1절에 상세히 제시하였다.

500 m 해상도의 미래 기후변화 시나리오 자료(2021 ~ 2100년)는 PRIDE (PRISM-based Dynamic downscaling Error correction) 기법을 이용하여 산출하였다(Kim et al., 2016; Kim and Kim, 2018). PRIDE는 지역기후모델의 미래 기후변화 신호를 고해상도 격자체계로 상세화하고, 관측 기반 자료를 활용하여 기후모델의 계통오차를 보정하는 기법이다. 즉, 기후모델의 일별 계절 사이클 대신에 관측의 일별 계절 사이클을 사용하여 기후모델에 포함된 계통오차(systematic error)를 제거하는 방법을 적용하였다. 입력자료로는 CORDEX-East Asia 2단계 프로젝트에서 생산된 5종의 RCM 자료를 사용하였다. 기온 자료는 미래 변화 신호를 유지하면서 현재 기후의 공간분포와 계절 특성이 관

측 기반 자료와 일치하도록 편의보정을 수행하였다. 이를 위해 기준기간(2000 ~ 2019)에 대한 모델과 관측자료 간의 차이를 산정한 후, 해당 편차를 미래 시나리오 자료에 적용하는 방식으로 보정하였다. 강수량의 경우에는 기후모델별 강수 강도 및 빈도 분포의 차이를 효과적으로 보정하기 위하여 QDM (Quantile Delta Mapping) 기법(Cannon et al., 2015)을 적용하였다. QDM은 분위수 기반 보정기법으로, 미래 변화 신호를 유지하면서 강수량의 확률분포 특성을 관측자료와 유사하도록 조정하는 방법이다.

2.2. 극한기후지수 정의

본 연구에서는 온난화 수준에 따른 평균 기후에 대한 미래 변화뿐만 아니라 극한기후의 변화를 정량적으로 전망하기 위하여 Expert Team of Climate Change Detection and Indices (ETCCDI)에서 제시한 극한기온지수와 극한강수지수 및 국내 기후 특성을 반영한 기후지수를 함께 사용하였다(Table 1). ETCCDI 지수로는 TXx, TNx, TX90p, TN90p, Rx1day, Rx5day, R95p, R99p를 사용하였다. 또한 폭염일수(HW), 열대야일수(TR), 호우일수(R80)는 우리나라 기후 특성을 반영한 지수로서, KMA (2012)에서 분석된 지수에 기반하여 분석하였다. 극한저온지수는 Kim, Sang, et al. (2022)과 Kim et al. (2023) 등 우리나라 미래 극한기온 전망에 대한 연구에서 미래에 감소할 것으로 분석되었고, 이에 따라 관련된 리스크가 약해질 것으로 예상되므로 본 연구의 분석에서는 제외하였다. 또한 우리나라를 6개 권역(수도권(Capital area; CP), 강원권(GangWon-do; GW), 충청권(ChungCheong-do; CC),

Table 1. Climate change Indices calculated using daily maximum temperature (TX), minimum temperature (TN), precipitation (PR)

Index	Index definition	Units
HW	The days TX is higher than 33℃ in each year	days
TR	The days TN is higher than 25℃ in each year	days
TXx	The maximum TX in each year	℃
TNx	The maximum TN in each year	℃
TX90p	The days TX is higher than 90th percentile of TX for present-day (2000–2019) in each year	days
TN90p	The days TN is higher than 90th percentile of TN for present-day (2000–2019) in each year	days
Rx1day	The maximum 1-day PR in each year	mm
Rx5day	The maximum 5-day PR in each year	mm
R95p	The wet (PR ≥ 1 mm) days PR is higher than 95th percentile of PR for present-day (2000–2019) in each year	days
R99p	The wet (PR ≥ 1 mm) days PR is higher than 99th percentile of PR for present-day (2000–2019) in each year	days
R80	The days PR is higher than 80 mm in each year	days

전라권(JeollLa-do; JL), 경상권(GyeongSang-do; GS), 제주권(JeJu-do; JJ)으로 나누어 미래 극한기후 전망 분석 결과를 정량적으로 제시하였다(Fig. 3(a)).

2.3. GWL 선정 방법

본 연구에서는 미래 기후변화를 분석하기 위하여 전지구 온난화 수준 개념을 활용하였다. GWL은 산업화 이전(1850~1900년) 대비 전지구 평균기온 상승 폭을 기준으로 미래 기후 상태를 정의하는 방법으로, 특정 시점이 아닌 온난화 수준에 도달하는 시기를 중심으로 기후변화를 분석하는 접근법이다.

GWL 산출을 위해 UKESM1 GCM에 기반하여 산업화 이전 기간을 기준으로 설정하고, 전지구 평균기온이 기준 기간 대비 +1.5℃, +2.0℃, +3.0℃, +4.0℃, +5.0℃ 상승하는 시점을 각각의 온난화 수준 도달 시점으로 정의하였다(Kang et al., 2025). 또한 연도 간 자연 변동성의 영향을 최소화하기 위하여 21년 이동평균된 전지구 평균기온 자료를 사용하여 도달 시점을 계산하였고, 이후 각 GWL 도달 시점을 중심으로 ±10년을 포함한 21년 평균 자료를 이용하여 온난화 수준별 기후 특성을 분석하였다. 각 SSP 시나리오에 따른 온난화 수준 도달 시점은 서로 다르게 나타나며, 저탄소 시나리오인 SSP1-2.6의 경우 3.0℃ 온난화 수준에 도달하지 않고 SSP2-4.5의 경우 5.0℃ 온난화에 도달하지 못하는 것으로 나타났다(Table 2). 또한 고탄소 시나리오일수록 5.0℃까지의 온난화 수준에 더 빠르게 도달한다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 1.5℃ 및 2.0℃ GWL의 분석은 20개 앙상블 멤버(기후모델 5종 × SSP 시나리오 4종)를 활용하였고, 3.0℃ 및 4.0℃ GWL의 분석은 15개 앙상블 멤버(기후모델 5종 ×

SSP 시나리오 3종)를 활용하였으며, 5.0℃ GWL의 분석은 10개 앙상블 멤버(기후모델 5종 × SSP 시나리오 2종)를 활용하였다.

2.4. GWLoE 계산 방법

ToE는 일반적으로 기후변화 신호(signal)와 자연 변동성(noise)의 비, 즉 신호대비 잡음비 (signal-to-noise ratio; SNR)를 기반으로 정의되며(Hawkins and Sutton, 2012), 임계값 설정에 따라 출현 시점이 달라진다. Giorgi and Bi (2009)는 기후변화 신호가 연 변동(interannual variability)의 표준편차(Standard Deviation; STD)를 초과하는 시점을 ToE로 정의하였으며, Gampe et al. (2024)은 각 GWL 시점에 ToE에 도달하는지 판단하는 GWLoE 분석 결과를 제시하였다. 본 연구에서는 특정 온난화 시점 t 에서의 기후변화 신호 $S_{(t)}$ 를 기준기간 평균($\bar{X}_{ref}$) 대비 각 GWL 시점에 대한 평균($\bar{X}_{(t)}$)의 차이로 정의하였다:

$$S_{(t)} = \bar{X}_{(t)} - \bar{X}_{ref} \quad (2)$$

자연 변동성은 기준기간(2000~2019년; $n=20$ 년)동안의 연 변동성으로부터 계산된 표준편차(σ)로 정의하였다:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_{ref})^2} \quad (3)$$

이에 따라 signal-to-noise ratio는 다음과 같이 정의된다:

$$SNR_{(t)} = \frac{|S_{(t)}|}{\sigma} \quad (4)$$

Table 2. Projected timings of 21-year running mean global surface temperature in UKESM1 reaching global warming level (1.5℃, 2.0℃, 3.0℃, 4.0℃, and 5.0℃) under SSP scenarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, and SSP5-8.5)

Scenario	Global warming level (GWL, ℃)				
	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0
SSP1-2.6	2021 (2011–2031)	2032 (2022–2042)	-	-	-
SSP2-4.5	2021 (2011–2031)	2031 (2021–2041)	2056 (2046–2066)	2086 (2076–2096)	-
SSP3-7.0	2024 (2014–2034)	2032 (2022–2042)	2050 (2040–2060)	2067 (2057–2077)	2083 (2063–2093)
SSP5-8.5	2021 (2011–2031)	2029 (2019–2039)	2046 (2036–2056)	2060 (2050–2070)	2072 (2062–2082)

여기에서 SNR은 기후변화 신호의 크기를 자연 변동성 대비 정규화한 값이다. 이를 기반으로 각 GWL 시점에서 SNR이 특정 임계값을 초과하고 이후에도 유지되는 경우를 GWLoE로 정의하였다. 각 GWL 시점에서 개별 앙상블 멤버에 대해 정의된 기준을 만족하는지 여부를 평가한 후, 전체 앙상블 중 60% 이상이 해당 기준을 만족하는 경우 해당 GWL에서 GWLoE가 발생한 것으로 정의하였다. 이는 Rojas et al. (2019)에 선정 기준에 기반하였으며, 다중모델 앙상블에서의 일관된 신호 출현을 고려하기 위한 것으로 개별 모델에 의존한 결과의 불확실성을 최소화하기 위한 방법이다.

이와 같은 기준을 바탕으로 변수별 물리적 특성과 자연 변동성의 차이를 고려하여 상이한 SNR 임계값을 적용하였다. 기온의 경우 자연 변동성이 상대적으로 작고 신호가 명확하게 나타나므로, 보다 보수적인 기준 적용이 가능하다. 선행 연구에서는 기온에 대한 SNR 임계값으로 2를 적용하여 ToE의 출현 시점을 평가한 바 있으므로 (Hawkins and Sutton, 2012; Lee et al., 2022), 본 연구에서도 GWL별로 기온의 SNR이 2를 초과하는 경우를 GWLoE에 해당하는 것으로 정의하였다. 반면 PR은 자연 변동성이 매우 크기 때문에 기온과 동일한 임계값을 적용할 경우 GWLoE가 과도하게 지연되는 등 변수 간 비교가 왜곡될 수 있다. Giorgi and Bi (2009)와 Rojas et al. (2019)은 강수 변화 신호가 자연 변동성의 표준편차를 초과하는 시점을 ToE로 정의하였으며, 이는 통계적으로 $SNR > 1$ 에 해당한다. 따라서 본 연구에서는 강수의 SNR이 1을 초과하는 경우를 GWLoE에 해당된다고 정의하였다. 정리하면, 기온의 SNR 임계값은 2이고 강수의 SNR 임계값은 1로 선정하였다.

이와 같은 변수별 임계값 설정은 기온과 강수의 상이한 자연 변동성 규모를 반영하기 위한 것으로, 단일 기준 적용 시 발생할 수 있는 과도한 GWLoE 지연 또는 미검출 문제를 완화한다. 결과적으로 기온에 대해서는 보수적이고 신뢰도 높은 탐지를, 강수에 대해서는 현실적이고 물리적으로 타당한 출현 시점 평가를 가능하게 한다. 한편, GWLoE 분석에서는 TA, PR 외에 TXx와 Rx1D도 사용하였다. HW, TR 등의 극한기후의 발생 일수를 나타내는 지수는 고지대에서 현재 기간 발생 빈도가 0회에 수렴하여 기준기간 변동성 추정이 불안정하게 나타났다. 이에 따라 SNR 기반 GWLoE 계산의 신뢰성이 저하될 수 있으므로 본 연구에서는 GWLoE 분석에서 제외하였다.

3. 결과

3.1. 고해상도 시나리오 자료 특성

본 연구에서 사용한 500 m 해상도 기후 격자자료의 성능을 평가하기 위해, 현재기간(2000~2019년) 동안 Fig. 3(c)에 표시된 605개 기상청 관측소(ASOS 97개, AWS 508개) 자료와 비교 분석을 수행하였다. 성능 평가 방법은 bias, root mean square error (RMSE), 상관계수 (correlation coefficient; corr)를 이용하여 수행하였으며, 관측 지점과 가장 가까운 기후 격자자료의 격자점을 추출하여 비교하였다. 추가적으로 기존에 구축된 1 km 해상도 자료와의 비교를 통해 상대적인 성능을 함께 검토하였다. 이에 대한 상세 결과는 Table 3에 연평균과 월별로 제시하였다. Table 3에서 나타난 바와 같이, 500 m 해상도 자료는 TA와 PR에 대해 전반적으로 낮은 bias와 RMSE, 그리고 높은 상관계수를 보였다. 특히 TA는 관측자료와 매우 높은 상관성을 나타내었으며, PR 또한 비교적 안정적인 재현성을 보였다. 이러한 결과는 본 연구에서 구축한 500 m 고해상도 자료가 기존 1 km 자료의 특성을 유지하면서도 통계적으로 신뢰 가능한 수준의 기후정보를 제공할 수 있음을 시사한다. 따라서 본 자료는 우리나라 지역 규모의 평균 및 극한기후 변화 분석에 활용 가능성이 높은 것으로 판단된다.

상세하게는, TA의 경우 bias는 500 m 자료에서 +0.023 수준으로 비교적 0에 근접하고 1 km 자료에서는 -0.125로 음의 편차가 나타나며, 비교적 bias의 절대값이 높게 나타난다. RMSE 또한 500 m 자료에서 0.439로 1 km 자료의 0.625에 비해 안정적인 수준을 보였으며, 상관계수는 해상도에 따른 차이가 크지 않은 것으로 나타나 관측값의 시간 변동성을 매우 잘 모의하는 것으로 확인되었다. 또한 기후 격자자료는 해상도에 상관없이 겨울철에 다소 오차가 크고, 여름철에 작은 것으로 나타났다. PR의 경우 TA에 비해 상대적으로 오차가 크게 나타났으며, 이는 PR의 높은 시공간 변동성에 기인한 것으로 판단된다. PR의 RMSE는 500 m 자료에서 1.483으로 1 km 자료의 1.584에 비해 다소 낮으며, 7월과 8월에 RMSE가 3 이상으로 가장 큰 오차를 보인다. 상관계수는 0.99 전후로, 전반적으로 높은 값을 유지하여 PR의 시간적 변동 특성을 적절히 재현하며, 강수량이 많은 7월과 8월에 다소 낮은 상관성을 보였다. 이러한 결과는 기상청의 새로운 500 m

Table 3. Monthly statistical comparison of 500 m and 1 km resolution climate data for daily mean (TA), maximum (TX), minimum (TN) temperatures and precipitation (PR) under present-day (2000–2019)

	Bias						RMSE						Corr					
	TA		TX		TN		PR		TA		TX		TN		TA		TX	
	500 m		1 km		500 m		1 km		500 m		1 km		500 m		1 km		500 m	
	500 m	1 km	500 m	1 km	500 m	1 km	500 m	1 km	500 m	1 km	500 m	1 km	500 m	1 km	500 m	1 km	500 m	1 km
Jan	0.026	-0.121	0.028	-0.150	0.021	-0.110	-0.002	0.009	0.469	0.659	0.468	0.695	0.617	0.794	0.475	0.522	0.996	0.994
Feb	0.026	-0.126	0.028	-0.152	0.022	-0.109	-0.004	0.015	0.451	0.645	0.472	0.697	0.594	0.771	0.639	0.701	0.997	0.994
Mar	0.024	-0.131	0.029	-0.154	0.021	-0.104	-0.006	0.021	0.452	0.650	0.504	0.726	0.591	0.762	0.831	0.866	0.995	0.993
Apr	0.023	-0.127	0.027	-0.145	0.019	-0.104	-0.004	0.042	0.433	0.618	0.526	0.725	0.59	0.751	1.305	1.367	0.992	0.991
May	0.022	-0.125	0.026	-0.142	0.019	-0.107	-0.01	0.042	0.425	0.601	0.549	0.738	0.547	0.703	1.374	1.467	0.989	0.987
Jun	0.024	-0.136	0.023	-0.143	0.022	-0.122	-0.015	0.043	0.422	0.612	0.546	0.746	0.488	0.654	1.874	1.930	0.986	0.980
Jul	0.025	-0.128	0.025	-0.141	0.021	-0.115	-0.025	0.133	0.414	0.601	0.530	0.736	0.421	0.587	3.555	3.718	0.991	0.985
Aug	0.024	-0.132	0.024	-0.147	0.018	-0.119	-0.014	0.146	0.419	0.610	0.520	0.736	0.443	0.608	3.494	3.810	0.991	0.987
Sep	0.020	-0.133	0.026	-0.149	0.01	-0.122	-0.006	0.069	0.423	0.607	0.491	0.709	0.504	0.663	2.183	2.318	0.992	0.988
Oct	0.019	-0.119	0.029	-0.142	0.006	-0.111	-0.007	0.022	0.446	0.616	0.463	0.681	0.597	0.752	0.841	0.980	0.994	0.991
Nov	0.02	-0.111	0.028	-0.142	0.014	-0.098	-0.005	0.020	0.456	0.635	0.442	0.669	0.609	0.772	0.699	0.762	0.996	0.994
Dec	0.023	-0.116	0.026	-0.144	0.019	-0.108	-0.004	0.012	0.460	0.650	0.451	0.678	0.590	0.769	0.524	0.563	0.996	0.994
AVE	0.023	-0.125	0.027	-0.146	0.018	-0.111	-0.009	0.048	0.439	0.625	0.497	0.706	0.549	0.716	1.483	1.584	0.993	0.990

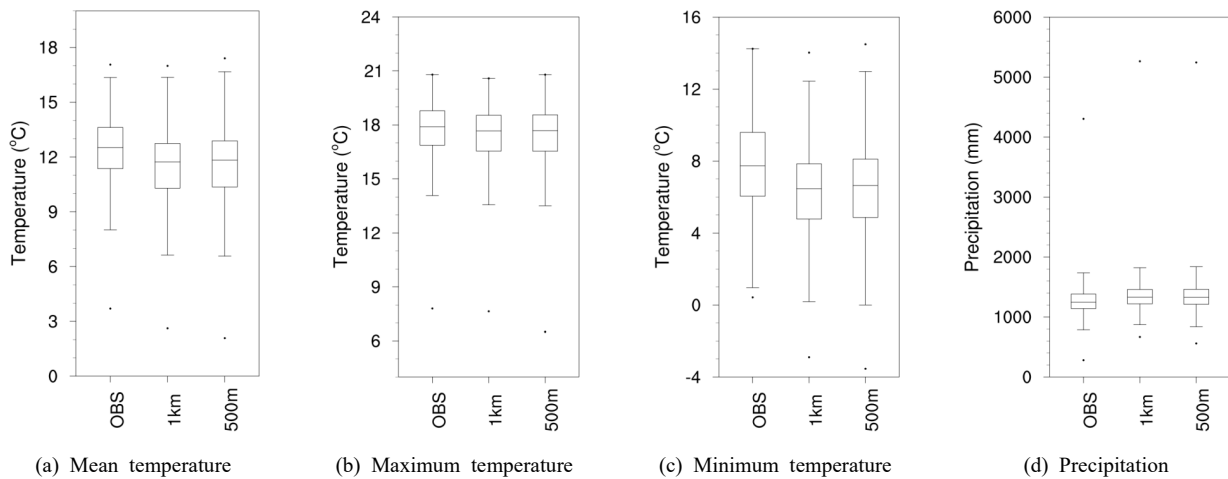


Fig. 2. Box plots of mean temperature (TA; a), maximum temperature (TX; b), minimum temperature (TN; c), and precipitation (PR; d) for the present-day period (2000–2019). In each panel, the left, middle, and right boxes represent observations, 1 km resolution data, and 500 m resolution data, respectively

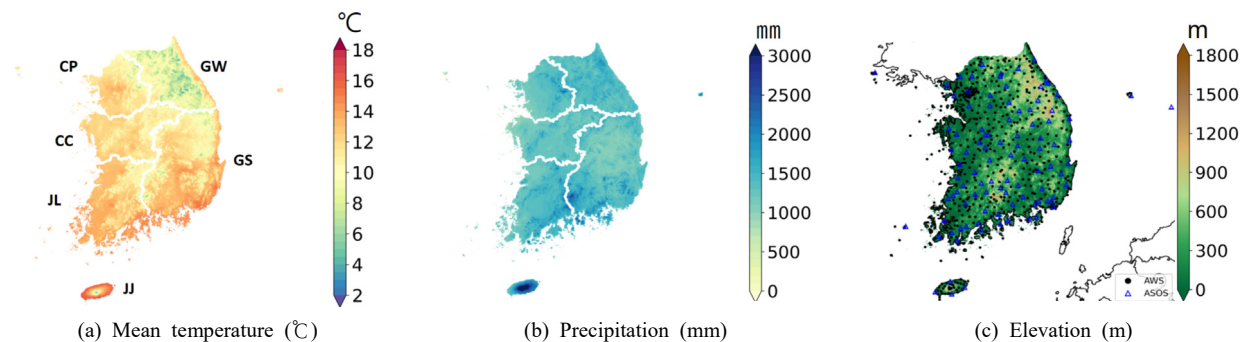


Fig. 3. Spatial distribution of 500 m resolution climate data for mean temperature (TA; a), precipitation (PR; b), DEM elevation (c) under present-day (2000–2019)

해상도 기후 격자자료가 관측 기반의 기후 특성을 신뢰성 있게 재현하며, 기존 1 km 자료와 비교하여 동등 이상의 향상된 성능을 보임을 시사한다.

Fig. 2에는 앞서 비교한 기상청 관측자료(OBS), 1 km 및 500 m 해상도 기후 격자자료의 분포 특성을 box plot 형태로 제시하였다. 전반적으로 기후 격자자료는 관측자료와 유사한 중심 값을 나타내며, 변동성도 유사하게 재현되고 있다. TA와 TX(최고기온)의 경우, 500 m 자료의 중앙값은 관측자료와 유사한 수준을 보이며 1 km 자료와도 큰 차이를 보이지 않았다. 또한 사분위 범위(interquartile range; IQR) 역시 세 자료 간 유사하게 나타나, 기온 변동성이 적절히 재현됨을 확인할 수 있다. 그러나 최댓값과 최솟값은 가장 상세한 지형효과가 반영된 500 m 자료에서 가장 넓게 분포하고 있다. TN(최저기온)

의 경우, 관측에 비해 기후 격자자료의 중앙값, IQR이 다소 낮은 범위에 형성되어 있다. 이는 MK-PRISM에서 고도 상승에 따른 기온 감률 효과가 일 최저기온에 더 적극적으로 반영되고 있는 것으로 해석된다. PR의 경우에도 500 m 자료는 관측자료 및 1 km 자료와 전반적으로 유사한 분포를 보이며, 더 큰 변동성을 보이고 있다.

Fig. 3은 TA와 PR, 지형 고도에 대한 500 m 기후 격자자료의 공간분포(2000~2019)를 나타낸다. TA는 남부 및 저지대에서 높은 값을 보이고, 북부 및 산악지역에서 낮은 값을 나타내는 뚜렷한 공간 경향을 보인다(Fig. 3(a)). 이는 위도 및 지형의 영향을 반영한 결과로 해석된다. 권역별 TA는 수도권(CP) 11.4°C, 강원권(GW) 9.0°C, 충청권(CC) 11.5°C, 전라권(JL) 12.7°C, 경상권(GS) 12.0°C, 제주권(JJ) 14.4°C로 나타났다(Table 4). PR은 지역에 따라 큰

Table 4. Present-day climate indices for South Korea (KOR) and six subregions

	KOR	CP	GW	CC	JL	GS	JJ
TA (°C)	11.5	11.4	9.0	11.5	12.7	12.0	14.4
TX (°C)	17.3	17.1	15.0	17.4	18.2	18.0	18.1
TN (°C)	6.5	6.5	3.8	6.4	8.0	6.8	11.0
PR (mm)	1365.3	1301.1	1398.3	1259.9	1408.5	1349.4	2200.9
HW (days)	9.4	9.3	3.9	9.4	9.7	12.4	2.1
TR (days)	2.3	2.6	0.3	1.4	4.1	1.9	9.9
TXx (°C)	34.6	35.0	33.3	34.7	34.6	35.1	32.5
TNx (°C)	24.5	25.0	23.0	24.7	25.2	24.6	25.6
TX90p (days)	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5
TN90p (days)	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5
Rx1day (mm)	128.5	135.8	137.5	112.5	127.5	126.5	187.6
Rx5day (mm)	227.7	251.8	255.4	203.9	222.2	216	300.7
R95p (days)	4.3	3.9	4.5	4.3	4.5	4.1	5.5
R99p (days)	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	1.1
R80 (days)	2.2	2.4	2.4	1.7	2.2	2.1	5.0

Table 5. Changes in mean temperature (TA) and precipitation (PR) over South Korea in the late 21st century (2081–2100) compared to 2000–2019, based on MME. Values indicate ensemble means for SSP1-2.6 ~ SSP5-8.5, with individual model ranges (min–max of five models) in parentheses

	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
TA (°C)	+2.4 (+2.3 ~ +2.5)	+3.6 (+3.4 ~ +3.9)	+5.5 (+5.2 ~ +5.9)	+6.4 (+6.0 ~ +7.1)
PR (%)	+3.7 (-6.9 ~ +16.6)	+13.7 (+5.8 ~ +29.3)	+12.4 (-3.8 ~ +32.1)	+14.9 (+0.8 ~ +41.0)

공간적 변동성을 보이며, 지형 효과(지형성 강수)에 의해 산지 등의 지역에서 높은 값을 나타낸다(Fig. 3(b), Fig. 3(c)). 반면 내륙 또는 평지 지역에서는 상대적으로 PR이 적게 나타난다. 권역별 PR은 CP 1301.1 mm, GW 1398.3 mm, CC 1259.9 mm, JL 1408.5 mm, GS 1349.4 mm, JJ 2200.9 mm로 나타났다(Table 4). 500m 자료는 기존 1 km 자료의 공간적 패턴과도 유사하며(Kim et al., 2023), 전반적으로 TA와 PR 모두 물리적으로 타당한 공간 분포를 나타낸다고 할 수 있다. 극한고온지수의 경우, 위도가 낮고 해양의 영향을 받는 JJ에서 일 최저기온 기반인 TR과 TNx가 높고 위도가 낮고 내륙에 위치한 GS에서 일 최고기온 기반인 HW와 TXx가 가장 높으며, GW는 전반적으로 극한고온 관련 지수가 낮게 나타난다(Table 4). 극한강수지수는 JJ에서 모든 지수가 가장 높고 CC에서 가장 낮게 나타난다.

또한 상세한 지형효과가 반영된 500 m 기후 격자자료를 기반으로 SSP 시나리오별 21세기 말까지의 기후변화를 살펴보았다. Fig. 4와 Table 5에 따르면, 우리나라의

TA는 모든 SSP 시나리오에서 21세기 말로 갈수록 상승 추세를 보인다. 시계열에서도 시간에 따라 비교적 일관된 증가 경향이 나타나며, 시나리오 간 차이는 중·후반으로 갈수록 확대된다(Fig. 4). 21세기 말(2081 ~ 2100년) TA는 현재 대비 SSP1-2.6에서 약 +2.3°C, SSP5-8.5에서 약 +6.4°C까지 상승하여 온실가스 배출 수준에 따라 온난화 강도가 크게 달라짐을 확인할 수 있다(Table 5). Fig. 4에서 기후모델 별 TA 상승 추세를 보면, HadGEM3-RA (파란색)에서 기온 상승 폭이 가장 크고, WRF (주황색)에서 기온 상승 폭이 가장 작다. 반면, PR의 경우 시계열에서 연도 간 변동성이 매우 크게 나타나 뚜렷한 장기 추세를 식별하기는 어렵다. 21세기 말 PR 변화는 SSP 4종에 따라서 약 +3.7%에서 +14.9% 수준의 증가를 보이나, 개별 모델간 편차의 범위가 넓어 불확실성이 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 개별 모델 중에서 GRIMs (보라색)는 PR 증가가 가장 크게 나타나며, CCLM (초록색)은 미래 PR에 큰 변화가 없을 것으로 전망한다.

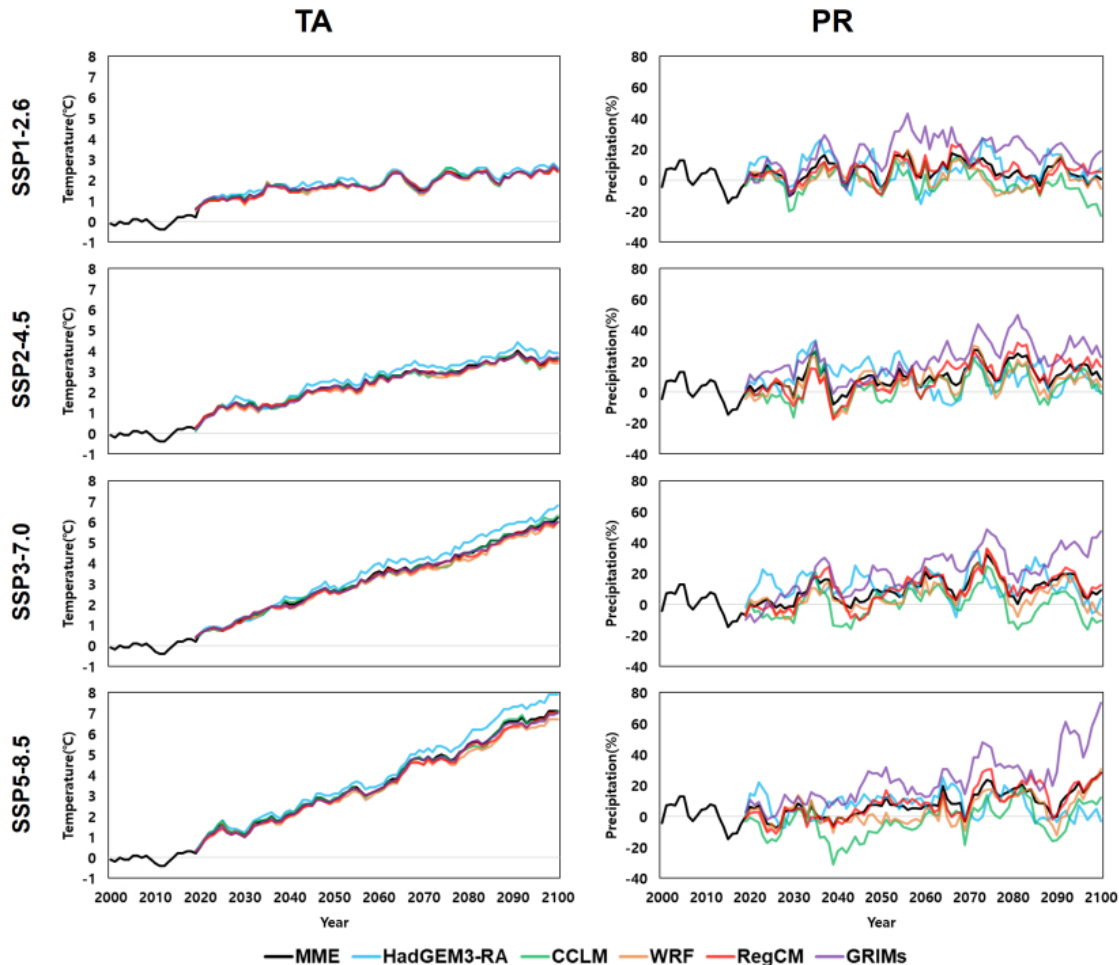


Fig. 4. Time series of temperature (TA; left column) and precipitation (PR; right column) anomalies simulated by six regional climate models under four SSP scenarios (rows: SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, and SSP5-8.5) for 2000–2100. Anomalies are relative to the 2000–2019 baseline period. Colored lines indicate individual models, and the black line represents the ensemble mean

3.2. GWL에 따른 기온, 강수, 극한 지수의 미래 전망

Table 6은 평균 및 극한 기후지수에 대해서 각 GWL 시기에 따른 변화 폭을 나타내며, 이를 통해 TA, TX, TN은 유사한 증가가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 특히 5.0 시기에서는 모두 4.8℃ 증가가 전망되며, 이는 기온 상승이 특정 시간대가 아닌 전반적으로 균일하게 진행되고 있음을 의미한다. 지역별 미래 변화 특성을 살펴보기 위하여, Fig. 5에 6개 권역에 대하여 각 기후요소의 변화 폭을 제시하였고 Fig. 6에는 500 m 해상도에서 각 격자별 변화 폭을 제시하였다. TA는 CP, GW, CC 등 내륙 지역의 경우 GWL 5.0에서 약 4.8~4.9℃ 증가로 가장 큰 상

승 폭을 보이며, JJ는 4.4℃로 상대적으로 낮은 증가 폭을 보인다. 이는 저위도일수록 기온이 작게 상승하는 특성과 해양의 완충 효과에 기인한 것으로 해석된다. PR은 남한에서 평균적으로 GWL 1.5에서 -1.1%로 감소하였으나, GWL 2.0 이후 증가로 전환되어 GWL 5.0에서는 15.5% 증가가 전망된다. 특히 지역 간 편차가 크게 나타나, GWL 5.0 기준 CP와 JJ에서 모두 19% 이상 증가하는 반면, GS에서 13.9% 증가에 그칠 것으로 전망되며, 다른 지역도 16% 미만의 PR 증가가 예상된다.

극한고온지수는 TA보다 큰 폭의 증가가 예상된다 (Table 6, Fig. 5). KOR 기준, HW는 GWL 1.5 시기에 +5.5일 증가로 그치지만 GWL 5.0 시기에서 +48.7일 증가

하며, TR은 GWL 1.5 시기에 +6.3일에서 GWL 5.0 시기에 +44.4일로 전망된다. 즉 이러한 극한고온현상이 발생하는 날의 수를 집계하는 지수들은 1.5℃ 온난화 이후에 극한고온지수가 급격하게 증가할 것으로 나타난다. TXx는 GWL 1.5 시기에 +1.4℃ 증가하고, 전 지구 평균 온도가 추가로 +0.5℃ 상승하는 GWL 2.0 시기에는 +2.6℃로 급증이 예상되며, GWL 5.0 시기에는 +6.2℃ 증가하여 40.8℃까지 도달할 것으로 전망된다. TNx은 GWL 1.5에

+1.3℃ 증가하고 GWL 5.0에는 +5.5℃로 30℃에 도달할 것으로 예상된다. 또한 고온 빈도 지수인 TX90p과 TN90p은 GWL 5.0 시기에 각각 106.2일, 93.7일 발생하여 현재 대비 발생 빈도가 각각 1.9배와 1.6배 증가할 것으로 전망된다. 특히 일 최고기온 기반의 지수(HW, TXx, TX90p)의 증가가 일 최저기온 기반의 지수(TR, TNx, TN90p)의 증가보다 클 것으로 전망된다. Fig. 5와 Fig. 7을 통해서 지역별 특성을 보면, GWL 5.0 시기를 기준으

Table 6. Changes in mean (TA), maximum (TX), minimum (TN) temperatures, precipitation (PR) and extreme indices over South Korea at different global warming levels (GWLs; 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, and 5.0℃) compared to the present-day (2000–2019). Values represent the mean over South Korea, with regional ranges (min–max across six subregions) shown in parentheses

	Global warming level (GWL, ℃)				
	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0
TA (℃)	+0.7 (+0.6 ~ +0.8)	+1.4 (+1.2 ~ +1.4)	+2.6 (+2.4 ~ +2.7)	+3.6 (+3.3 ~ +3.7)	+4.8 (+4.4 ~ +4.9)
TX (℃)	+0.8 (+0.6 ~ +0.8)	+1.4 (+1.2 ~ +1.5)	+2.7 (+2.3 ~ +2.7)	+3.6 (+3.3 ~ +3.7)	+4.8 (+4.3 ~ +4.9)
TN (℃)	+0.7 (+0.6 ~ +0.8)	+1.3 (+1.2 ~ +1.4)	+2.6 (+2.4 ~ +2.7)	+3.7 (+3.4 ~ +3.8)	+4.8 (+4.4 ~ +5.0)
PR (%)	-1.1 (-2.5 ~ +6.0)	+4.1 (+2.6 ~ +8.5)	+6.0 (+4.8 ~ +9.3)	+13.0 (+11.9 ~ +17.9)	+15.5 (+13.9 ~ +19.7)
HW (days)	+5.5 (+1.8 ~ +7.1)	+10.8 (+3.8 ~ +13.6)	+22.2 (+12.0 ~ +26.9)	+31.7 (+20.5 ~ +37.1)	+48.7 (+33.0 ~ +57.1)
TR (days)	+6.3 (+1.7 ~ +8.6)	+12.6 (+3.7 ~ +17.0)	+22.7 (+8.8 ~ +29.2)	+31.4 (+14.5 ~ +39.2)	+44.4 (+23.8 ~ +53.4)
TXx (℃)	+1.4 (+0.6 ~ +1.6)	+2.6 (+1.1 ~ +2.8)	+3.8 (+2.2 ~ +3.9)	+4.6 (+2.9 ~ +4.8)	+6.2 (+4.1 ~ +6.4)
TNx (℃)	+1.3 (+0.6 ~ +1.5)	+2.4 (+1.2 ~ +2.8)	+3.5 (+2.2 ~ +4.0)	+4.4 (+3.0 ~ +4.8)	+5.5 (+4.1 ~ +6.1)
TX90p (days)	+10.5 (+9.1 ~ +12.0)	+21.5 (+19.1 ~ +24.1)	+38.4 (+35.0 ~ +42.6)	+50.7 (+46.6 ~ +54.7)	+69.7 (+66.1 ~ +73.8)
TN90p (days)	+10.8 (+10.3 ~ +11.7)	+20.0 (+18.8 ~ +21.4)	+33.1 (+31.7 ~ +35.0)	+43.3 (+42.1 ~ +45.8)	+57.2 (+55.7 ~ +59.7)
Rx1day (%)	+6.4 (+3.9 ~ +24.9)	+16.9 (+14.5 ~ +37.5)	+22.7 (+20.7 ~ +36.4)	+28.2 (+24.1 ~ +51.7)	+30.2 (+26.7 ~ +64.2)
Rx5day (%)	+3.6 (-1.5 ~ +19.4)	+14.7 (+9.3 ~ +33.6)	+19.0 (+13.7 ~ +35.0)	+22.1 (+15.3 ~ +45.1)	+24.1 (+15.3 ~ +56.3)
R95p (days)	-0.1 (-0.2 ~ +0.7)	+0.4 (+0.2 ~ +0.9)	+0.5 (+0.4 ~ +1.2)	+1.0 (+0.9 ~ +1.9)	+1.2 (+1.0 ~ +1.9)
R99p (days)	+0.1 (0 ~ +0.4)	+0.3 (+0.2 ~ +0.4)	+0.4 (+0.4 ~ +0.5)	+0.6 (+0.5 ~ +0.7)	+0.6 (+0.5 ~ +0.7)
R80 (days)	+0.1 (0 ~ +0.7)	+0.4 (+0.3 ~ +0.9)	+0.5 (+0.4 ~ +1.1)	+0.8 (+0.7 ~ +1.8)	+0.9 (+0.7 ~ +1.8)

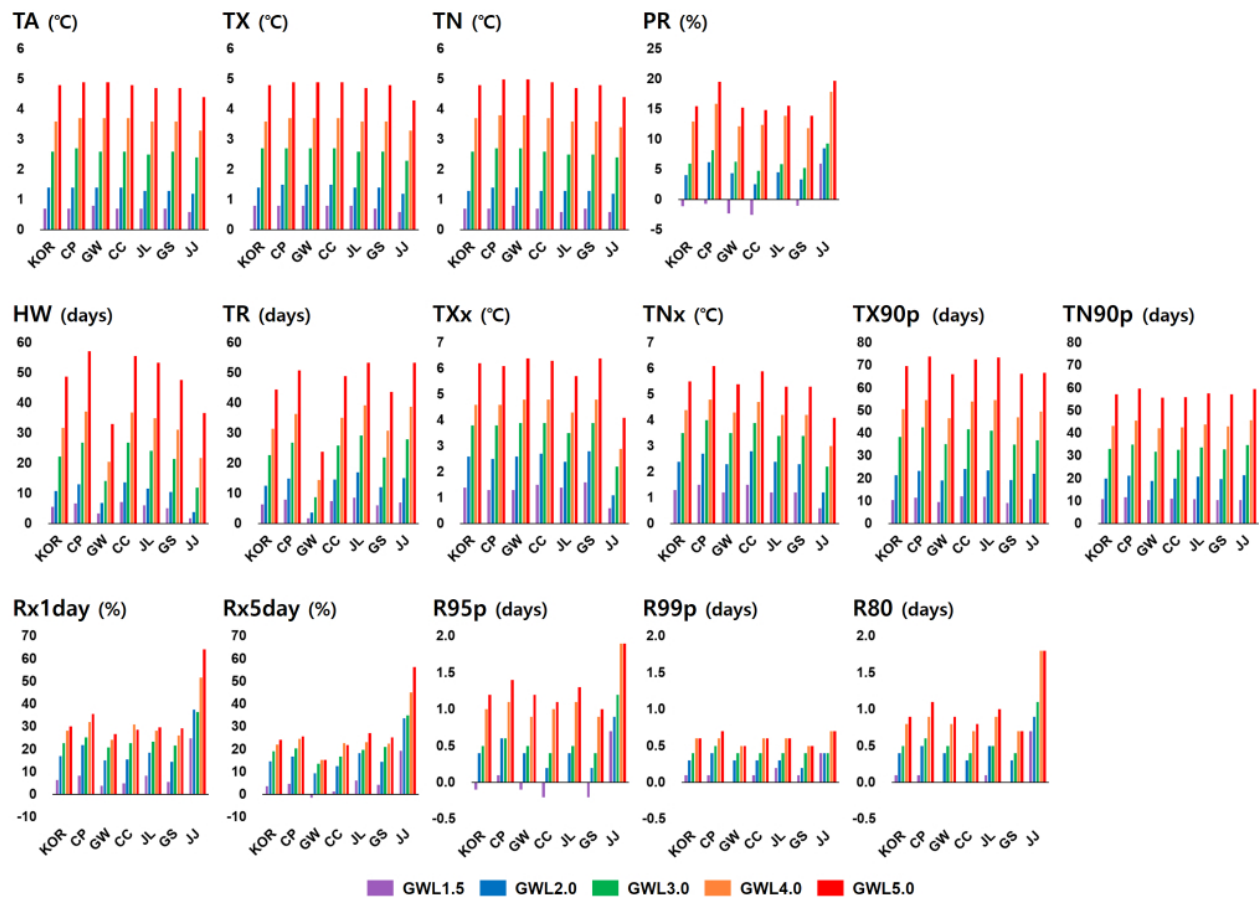


Fig. 5. Regional changes in mean and extreme climate indices across global warming levels (GWLs) relative to present-day period (2000–2019). Bars indicate changes for South Korea and six subregions

로 CP에서 HW (+57.1일), TX90p (+73.8일), TN90p (+59.7일)이 가장 크게 증가할 것으로 전망된다. 해양의 영향으로 현재 TR이 가장 많이 발생하는 JJ 지역은 미래에도 TR이 크게 증가(+53.4일)하여 야간 고온 강화가 두드러지며, 산지가 많이 분포하는 GW 지역은 TR 증가 폭(+23.8일)이 상대적으로 작을 것으로 보인다. 지역에 따른 HW의 미래 증가 범위는 33.0~57.1일, TR은 23.8~53.4일로 지역 간 편차가 매우 크게 나타났다.

극한강수지수 역시 GWL 상승에 따라 뚜렷한 증가가 전망된다(Table 6, Fig. 5). KOR 기준, 극한 강수량의 지수인 Rx1day는 GWL 시기에 따라서 +6.4%, +16.9%, +22.7%, +28.2%, +30.2%로 점진적으로 증가할 것으로 예상된다. Rx5day도 GWL 1.5의 +3.6%부터 GWL 5.0의 +24.1%까지 지속적인 극한 강수의 강화가 확인된다. 특히 GWL 5.0 시기에 Rx1day의 +30.2%는 PR의 15.5%의 약 두 배에 해당하는 증가 폭으로 미래 극한 강수의 위험

성 증가를 시사한다. Fig. 5와 Fig. 8에 따르면 Rx1day가 가장 크게 증가하는 지역은 제주도과 남부 해안 등의 지역이며, 이들 지역은 남한상세 시나리오의 입력자료인 동아시아 기후변화 시나리오에서 미래 850 hPa 하층 수증기가 대량으로 수송되는 지역과 대체로 일치한다(Kim et al., 2023).

극한 강수의 빈도를 나타내는 지수인 R95p와 R99p는 GWL 1.5에는 큰 변화가 없으나, GWL 5.0에는 각각 +1.2일, +0.6일 증가가 전망되며, R80 역시 GWL 5.0에 현재 대비 약 40% 증가가 예상된다. 지역별로는 JJ에서 Rx1day가 64.2%, Rx5day가 56.3%로 가장 크게 증가하며, 이는 PR의 증가 폭인 +19.7%의 약 3배에 달하는 수치이다. PR 증가폭이 큰 CP 지역에서도 Rx1day 35.7%, Rx5day 25.7% 증가로 다른 내륙 지역에 비해서 강한 증가가 전망된다. 반면 GW 지역은 Rx1day +26.7%, Rx5day +15.3%, R99p +0.5일 등 상대적으로 극한강수지

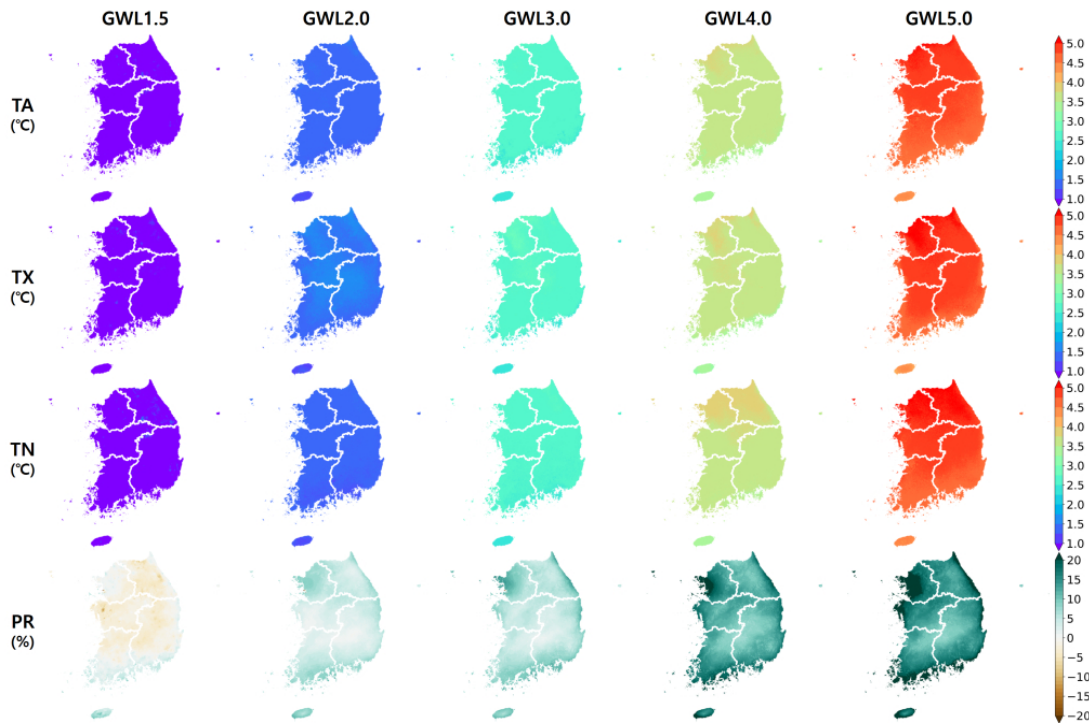


Fig. 6. Spatial distribution for anomalies of mean temperature (TA), maximum temperature (Tx), minimum temperature (TN), precipitation (PR). The anomalies are from five global warming levels (GWLs) of 1.5°C, 2.0°C, 3.0°C, 4.0°C and 5.0°C compared to present-day (2000–2019)

수의 증가 폭이 낮을 것으로 예상된다. 특히 Rx5day의 지역별 증가 범위가 +15.3 ~ +56.3%로 PR의 지역별 증가 범위인 +15.3 ~ +19.7%에 비해 현저히 높게 나타난다.

Fig. 9는 GWL 상승에 따라 평균기후와 극한기후의 지역적인 분포 특성이 어떻게 변화하는지를 비교하기 위해 제시하였다. 여기서는 단순 평균 변화뿐 아니라 지역 간 변동성의 확대 여부를 함께 평가하기 위하여 중앙값과 IQR의 변화를 중심으로 분석하였다. 평균기후 변화를 보면, TA의 IQR은 현재 기후에서 약 2.5°C 수준이며 GWL 증가에 따라 큰 변화 없이 유지되거나 소폭 감소하는 경향을 보인다. 이는 평균기온 상승이 전국적으로 비교적 균일하게 나타남을 의미한다. PR은 GWL 증가에 따라 중위값이 점진적으로 증가하지만, IQR 변화는 상대적으로 제한적으로 나타난다. 특히 GWL 1.5에서는 PR 중위값이 소폭 감소하는 특징이 확인되며, 이는 낮은 온난화 수준에서는 강수 변화 신호보다 자연 변동성의 영향이 상대적으로 크다는 점을 나타낸다. 반면 극한기후에서는 평균기후와 다른 특징이 나타난다. TXx의 IQR은 현재 약 1.6°C에서 GWL 5.0 시기에 약 2.2°C까지 증가하며, Rx1day의

IQR 역시 현재 약 27 mm에서 GWL 5.0 시기에 약 42 mm까지 56%가량 확대된다. 이는 GWL 상승에 따라 기온과 강수에서 모두 극한기후의 강도뿐 아니라 지역 간 편차 또한 함께 증가함을 의미한다. 특히 Rx1day는 PR에 비해 훨씬 큰 IQR 증가를 보이며, 제주 및 남해안과 같은 수증기 공급이 풍부한 지역에서 극한강수 증가가 집중적으로 나타나는 특징과 연결된다. 즉, 평균기후 변화는 주로 분포 전체의 이동 형태가 주로 나타나는 반면, 극한기후 변화는 분포 폭 자체의 확대를 동반한다. 이러한 결과는 미래 기후위험이 단순한 평균 상태 변화보다 극한 현상의 지역적 불균등성 증가를 통해 더욱 크게 나타날 수 있음을 시사한다.

3.3. 기온의 GWLoE

Fig. 10과 Table 7은 우리나라에서 TA와 TXx에 대한 GWLoE의 공간적 분포와 면적 비율을 나타낸다. 전반적으로 기온 변수는 낮은 온난화 수준에서 빠르게 GWLoE에 도달하는 특징을 보인다. TA의 경우, GWL 1.5 시기에 이미 일부 지역에서 GWLoE에 도달하기 시작하며, GWL

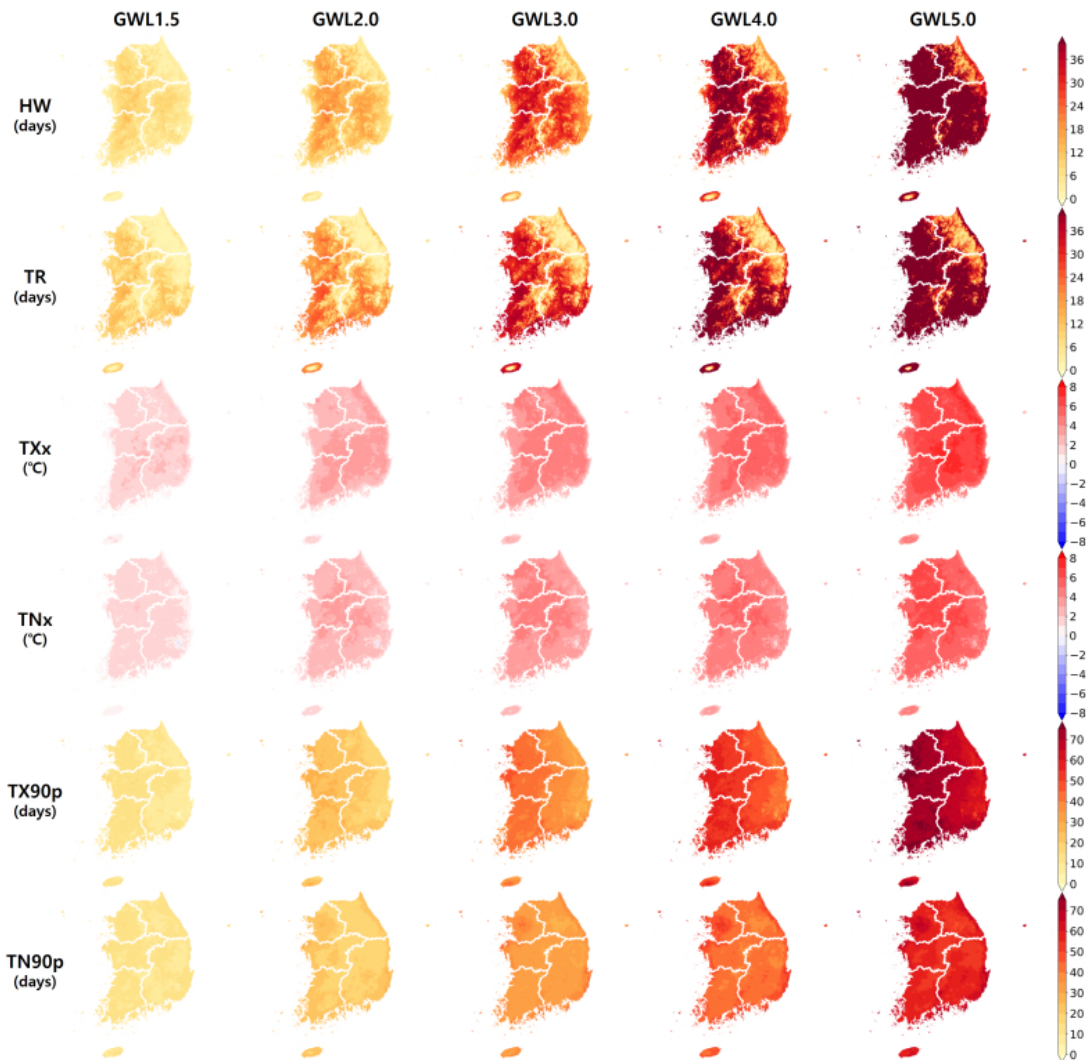


Fig. 7. Same as Fig. 6, but for extreme temperature indices

2.0 시기에는 약 95% 이상의 지역이 GWLoE에 도달하는 것으로 나타났다(Table 7). 이후 GWL 3.0 시기에는 거의 전 영역(약 99.8%)에서 GWLoE가 나타나며, GWL 4.0 이후에는 남한 전역에서 GWLoE에 도달하는 것으로 분석되었다. 이는 TA의 변화 신호가 자연 변동성에 비해 매우 빠르게 증가하여, 비교적 낮은 온난화 수준에서도 명확하게 검출됨을 의미한다. 공간적으로는 고도가 높은 산악지역에서 GWLoE 도달이 상대적으로 지연되는 경향이 나타난다. Fig. 3(c)의 지형 고도 분포를 고려하면, 강원 산지 및 내륙 고지대에서는 기온의 자연 변동성이 비교적 크기 때문에 GWLoE 도달 시점이 다소 늦어지는 것으로 판단된다. 반면 저지대 및 남부 해안 지역에서는 비교적 빠른 시기에 GWLoE에 도달하는 특징이 확인된다.

TXx는 TA에 비해 ToE 도달이 상대적으로 지연되는 특징을 보인다. Fig. 10에서 TXx의 GWLoE 공간 분포를 보면, GWL 2.0 단계에서 일부 산지 및 내륙을 중심으로 ToE가 나타나며, GWL 3.0 이후에 전국적으로 확산되는 경향이 확인된다. Table 7에서도 TXx의 ToE 도달 면적은 GWL 2.0에서 약 28.1%, GWL 3.0에서 72.6%, GWL 4.0에서 90.8%로 증가하는 것으로 나타났다. 이는 극한기온의 경우 TA에 비해 자연 변동성이 상대적으로 크고, 극값 특성으로 인해 신호 검출에 더 높은 온난화 수준이 요구되기 때문으로 해석된다. 이를 더 자세하게 이해하기 위해, TXx의 GWLoE가 뚜렷하게 나타나기 시작하는 GWL 2.0 시기를 기준으로 미래 TXx 변화폭과 TXx의 현재 자연 변동성(STD)의 공간적 특성을 비교하였다. TXx_STD

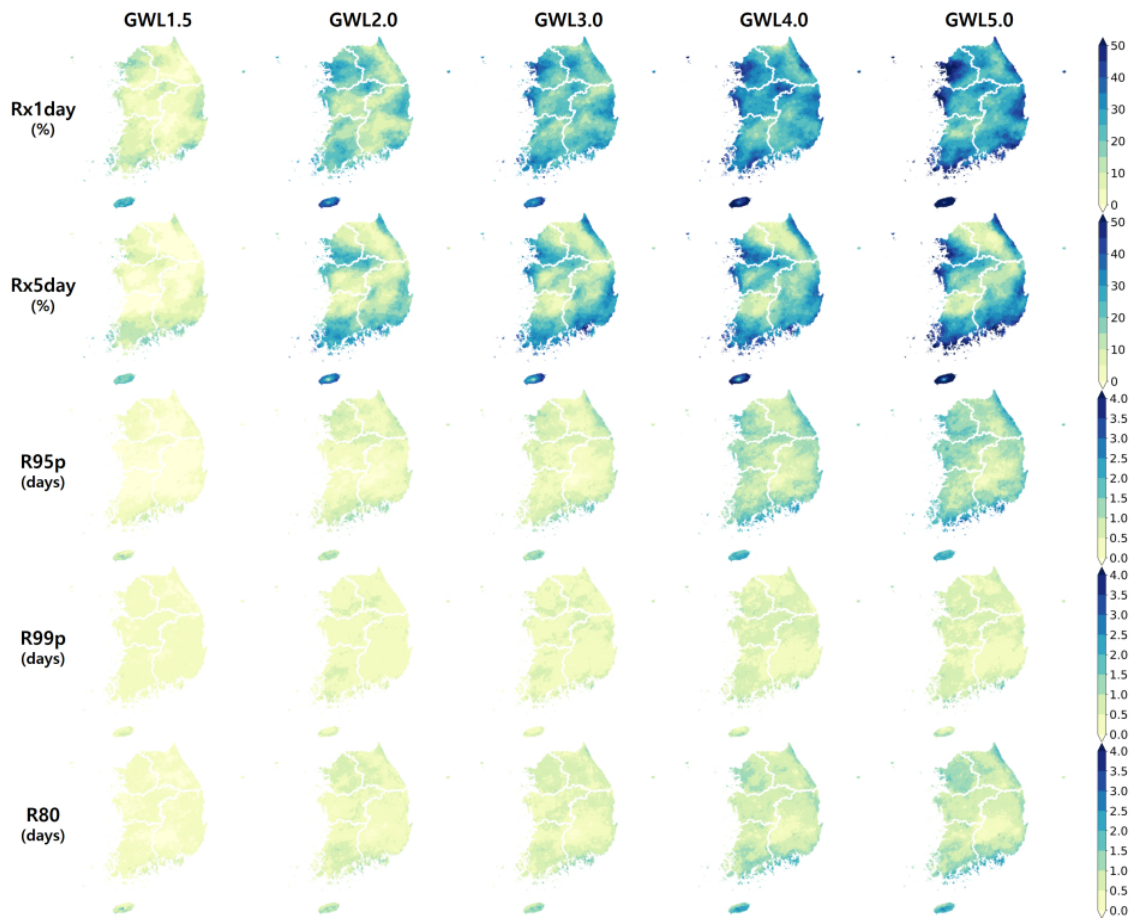


Fig. 8. Same as Fig. 6, but for extreme precipitation indices

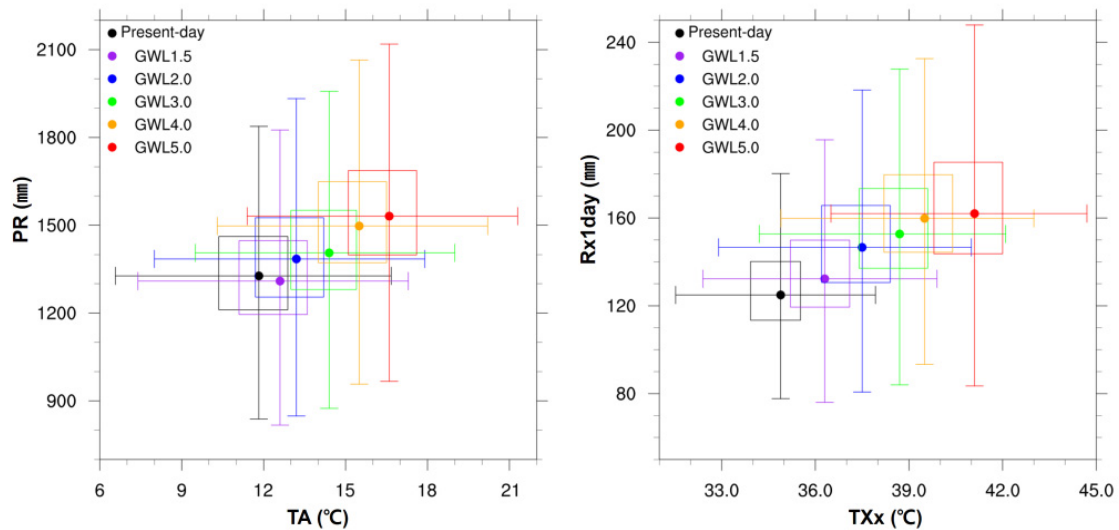


Fig. 9. Distributional changes in mean and extreme climate indices across global warming level (GWL)

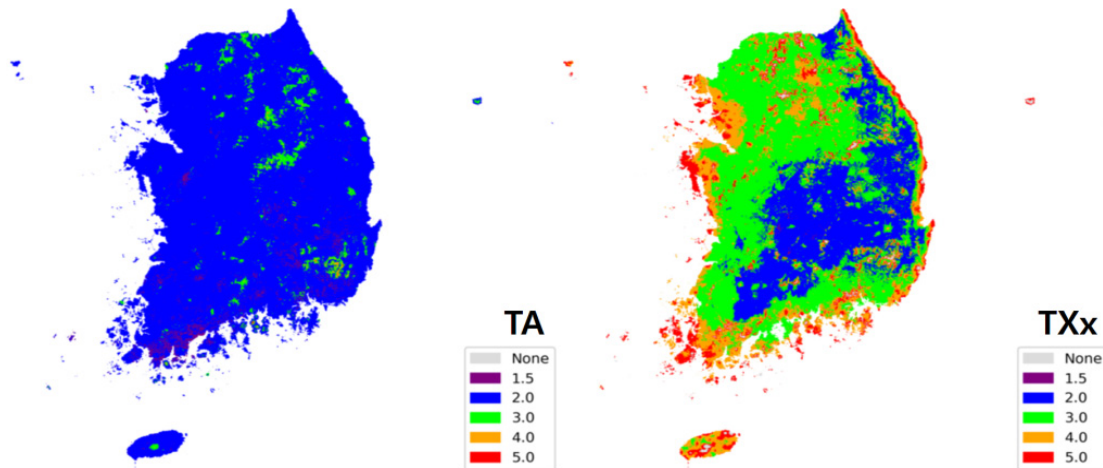


Fig. 10. Spatial distribution of the global warming level of emergence (GWLoE) for (left) TA and (right) TXx. Colors indicate the GWL at which ToE occurs (1.5–5.0°C), with gray indicating no emergence

Table 7. Cumulative percentage (%) of the total area of South Korea by global warming level of emergence (GWLoE; 1.5–5.0°C) for TA, TXx, PR, and Rx1D

	Global warming level (GWL, °C)				
	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0
TA	2.7	95.1	99.8	100	100
TXx	0.1	28.1	72.6	90.8	98.9
PR	0	0	0	0	0.7
Rx1day	0	0.1	0.6	2.4	7.6

는 고도와 유의한 양의 상관관계($r = 0.35$)를 보였으며, 고도 구간 평균 또한 저지대(0 ~ 200 m)의 1.16°C에서 고지대(1000 ~ 2000 m)의 1.69°C까지 대체로 선형적으로 증가하였다. 미래 TXx 증가폭은 고도와 약한 양의 상관관계($r = 0.28$)를 보였으나, 공간 분포에서는 내륙 산악지역에서 큰 증가가 나타난 반면, 해안지역에서는 상대적으로 작은 증가가 나타나는 등 고도뿐 아니라 해양으로부터의 거리 효과가 복합적으로 확인된다. 또한 TXx STD의 공간적 범위는 10 ~ 90 백분위수 기준 1.0 ~ 1.5°C (범위 0.5°C)로 비교적 제한적이었던 반면, 미래 TXx 변화는 1.5 ~ 3.3°C (범위 1.8°C)로 비교적 큰 공간적 변동성을 나타냈다. 이는 GWLoE 산정에 사용되는 SNR에서 Noise에 해당하는 현재 변동성보다 Signal에 해당하는 미래 변화량의 공간적 차이가 더 크게 나타남을 의미한다. 따라서 Fig. 10에서 제시된 TXx의 GWLoE 공간분포는 현재 변동성의 차이보다는 미래 TXx 변화량의 공간적 이질성에 의해 주로 결정되는 것으로 해석할 수 있다.

이러한 결과는 TA 변화가 기후변화 신호를 가장 먼저

반영하는 지표이며, 극한고온은 TA 변화 이후에 점진적으로 강화됨을 시사한다. 즉, 기온 기반의 기후변화 위험성은 낮은 온난화 수준에서도 빠르게 현실화될 수 있으며, 특히 TA 상승은 초기 단계에서 이미 광범위한 영향을 미칠 가능성이 높다.

3.4. 강수의 GWLoE

Fig. 11과 Table 7은 PR과 Rx1day에 대한 GWLoE의 공간적 분포 특성과 면적 비율을 보여준다. 기온과 달리 PR은 전반적으로 ToE 도달이 크게 지연되며, 일부 지역에서는 분석 기간 내에서도 ToE가 나타나지 않는 특징을 보인다. PR의 경우, 대부분의 지역에서 ToE가 거의 발생하지 않으며, GWL 5.0 단계에서도 ToE 도달 면적이 약 0.7%에 불과하다(Table 7). Fig. 11에서도 PR은 대부분의 영역에서 회색(미도달)으로 나타나며, 이는 PR의 높은 자연 변동성으로 인해 기후변화 신호가 통계적으로 유의하게 나타나기까지 더 긴 시간이 필요함을 의미한다.

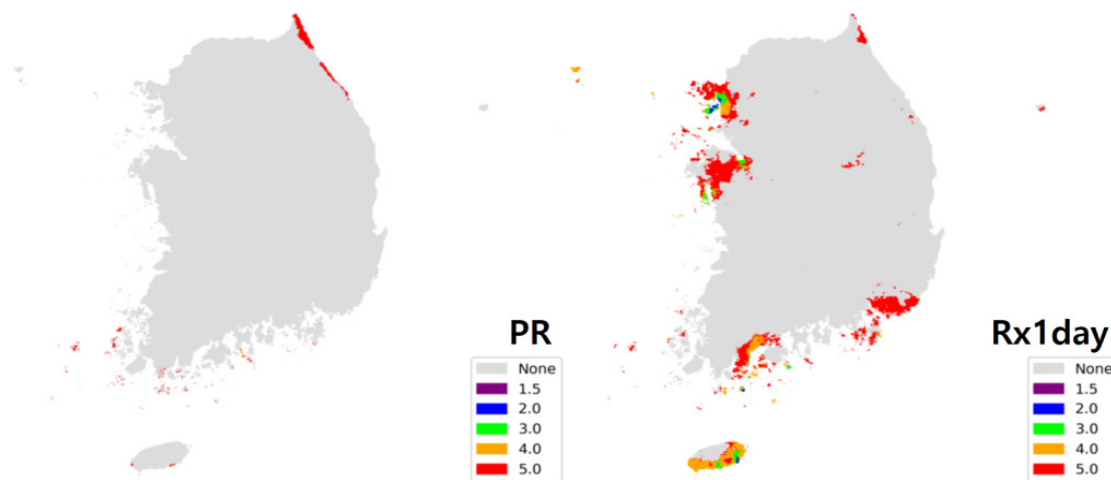


Fig. 11. Same as Fig. 10, but for (left) PR and (right) Rx1D

반면 Rx1day는 PR에 비해 상대적으로 빠르게 ToE에 도달하는 특징을 보인다. Table 7에서 Rx1day는 GWL 3.0에서 일부 지역(0.6%)에서 ToE가 나타나기 시작하며, GWL 5.0에서는 약 7.6%의 면적에서 ToE에 도달하는 것으로 분석되었다. Fig. 11에서도 Rx1day는 국지적으로 ToE가 나타나는 영역이 점진적으로 확대되는 경향을 보이며, 특히 제주도 및 남부 해안 지역에서 비교적 빠른 ToE 도달이 확인된다. 이러한 공간적 분포는 Fig. 3(c)의 지형 특성에도 밀접하게 연관된다. 산악지역에서는 지형 효과에 의해 PR 변동성이 크게 나타나 ToE 도달이 지연되는 반면, 해안 및 저지대에서는 극한강수의 증가 신호가 상대적으로 빠르게 검출되는 경향이 나타난다. 특히 Fig. 8에 나타나는 바와 같이 제주도 및 남해안 지역과 같이 수증기 공급이 풍부한 지역에서는 극한강수 증가가 뚜렷하게 나타나면서 ToE 도달 가능성이 높아지는 것으로 해석된다.

종합적으로, PR은 TA와 달리 기후변화 신호가 늦게 나타나며, PR보다 Rx1day에서 상대적으로 빠른 ToE 도달이 나타난다. 이는 PR의 경우에 기후변화가 평균 상태 변화보다 극한 현상의 변화로 먼저 나타날 수 있음을 의미하며, 특히 집중호우와 같은 극한강수 위험이 평균강수 변화보다 선행하여 증가할 가능성을 시사한다.

4. 결론 및 요약

본 연구에서는 기상청의 500 m 해상도 남한상세 기후변화 시나리오를 활용하여, 온난화 수준에 따른 평균 및 극한 기온·강수의 변화를 분석하고, 기후변화 신호의 출현 시점인 GWLoE를 정량적으로 평가하였다.

먼저, 500 m 고해상도 기후자료는 기존 1 km 자료 대비 기온과 강수 모두에서 관측값을 비교적 정확하게 재현하였으며, 특히 지형 효과가 반영된 공간분포 특성이 잘 나타났다. 또한 복잡한 해안선과 소규모 섬 지역의 공간 구조를 더 정밀하게 표현하며, 복잡한 지형을 가진 한반도에서 지역 규모 기후변화 분석에 있어 고해상도 자료의 활용 가치가 높음을 보여준다.

GWL에 따른 미래 기후변화 분석 결과, 기온은 모든 온난화 단계에서 일관된 증가를 보였으며, 강수는 GWL 1.5에서는 감소 경향을 보이다가 이후 증가로 전환되며, 지역 및 모델 간 변동성이 크게 나타났다. 극한기후의 경우, 평균 상태보다 더 뚜렷한 변화가 나타났다. 극한고온지수(HW, TR, TXx, TNx 등)는 GWL 증가에 따라 급격히 증가하며, 특히 일 최고기온 관련 지수는 온난화 초기 이후 빠르게 증가하는 특성을 보였다. 극한강수지수(Rx1day, Rx5day 등) 또한 평균강수보다 큰 증가율을 보이며, 특히 남부 및 해안 지역에서 증가 폭이 크게 나타났다. 또한 평균기후에서는 지역에 따른 변동성이 크게 변하지 않는 반면, 극한기후에서는 분포의 폭인 IQR이 확대되어 지역 간 변동성이 증가하는 특징이 확인되었다.

GWLoE 분석에서는 기온과 강수 간에 뚜렷한 차이가 나타났다. TA는 GWL 2.0 수준에서 이미 대부분의 지역(약 95%)에서 GWLoE에 도달하며, GWL 3.0에서는 거의 전 영역에서 기후변화 신호가 명확하게 나타난다. 반면 극한기온(TXx)은 평균기온보다 GWLoE 도달이 지연되어 GWL 3.0 이후에 본격적으로 기후변화 신호가 확산되는 특징을 보였다. 강수의 경우, PR은 높은 자연 변동성으로 인해 GWL 5.0에서도 대부분 지역에서 GWLoE에 도달하

지 않는 것으로 나타났으며, 극한강수(Rx1day) 역시 일부 지역에서만 제한적으로 GWLoE에 도달했다. 다만 Rx1day는 PR보다 상대적으로 이른 시점에 GWLoE에 도달하며, 특히 남부 및 해안 지역에서 그 경향이 뚜렷하였다.

이러한 결과는 다음과 같은 중요한 시사점을 제공한다. 기온 기반 변화는 낮은 온난화 수준에서도 빠르게 현실화 되므로, 폭염 및 고온 관련 위험은 비교적 초기 단계부터 대응이 필요하다. 특히 TA는 저지대 해안부터 기후변화 신호가 명확해지나, TXx는 반대의 특성이 나타나서 지역 맞춤형 기후변화 적응 전략이 필요하다. 또한 PR은 평균 변화보다 극한 현상의 변화가 먼저 나타나며, 이는 집중 호우와 같은 재해 위험이 평균강수 변화보다 선행하여 증가할 가능성을 의미한다.

본 연구는 GWLoE 분석을 통해 기후변화 신호의 출현 시점을 온난화 수준 기준으로 제시함으로써, 기존의 시간 기반 전망을 보완하고 정책 활용 가능성을 확대하였다. 특히 기존 연구들이 주로 대륙 규모의 자료를 활용한 반면, 본 연구는 우리나라 영역에 대하여 고해상도 자료를 기반으로 복잡 지형에서 기후변화 신호의 공간적 이질성을 제시하였다. 이를 통해 집중호우 등 미래 극한기후현상에 대한 대응 정책 수립 시에 집중적으로 대응할 지역 및 시점에 대해 참고 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 다만 ToE 산정 시 자연 변동성을 산업화 이전이 아닌 현재 기간(2000~2019)을 기준으로 정의한 점은 자료 기간의 한계에서 비롯된 것으로, 향후 장기 자료를 활용한 추가 연구가 필요하다.

사사

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

References

- Baek HJ, Kim MK, Kwon WT. 2017. Observed short-and long-term changes in summer precipitation over South Korea and their links to large-scale circulation anomalies. *Int J Climatol* 37(2): 972-986. doi: 10.1002/joc.4753
- Cannon AJ, Sobie SR, Murdock T Q. 2015. Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *J Clim* 28(17): 6938-6959. doi: 10.1175/JCLI-D-14-00754.1
- Choi G. 2024. Projections of Changes in Human-Sensible Temperature in South Korea in the 21st Century under SSP Scenarios (in Korean with English abstract). *J Korean Assoc Reg Geogr* 30(3): 321-338. doi: 10.26863/JKARG.2024.8.30.3.321
- Daly C, Halbleib M, Smith JI, Gibson WP, Doggett MK, Taylor GH, Curtis J, Pasteris PP. 2008. Physiographically sensitive mapping of climatological temperature and precipitation across the conterminous United States. *Int J Climatol* 28(15): 2031-2064. doi: 10.1002/joc.1688
- 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. *Q J R Meteorol Soc* 131(608): 1759-1782. doi: 10.1256/qj.04.101
- Gampe D, Schwingshackl C, Böhnisch A, Mittermeier M, Sandstad M, Wood R. 2024. Applying global warming levels of emergence to highlight the increasing population exposure to temperature and precipitation extremes. *Earth Syst Dynam* 15: 589-605. doi: 10.5194/esd-15-589-2024
- Giorgi F, Bi X. 2009. Time of emergence (TOE) of GHG-forced precipitation change hot-spots. *Geophys Res Lett* 36: L06709. doi: 10.1029/2009GL037593
- Giorgi F, Coppola E, Solmon F, Mariotti L, Sylla MB, Bi X, Elguindi N, Diro GT, Nair V, Giuliani G, et al. 2012. RegCM4: Model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Clim Res* 52: 7-29. doi: 10.3354/cr01018
- Hawkins E, Sutton R. 2012. Time of emergence of climate signals. *Geophys Res Lett* 39: L02702. doi: 10.1029/2011GL050087
- Hong SY, Park H, Cheong HB, Kim JEE, Koo MS, Jang J, Ham S, Hwang SO, Chang EC, et al. 2013. The global/regional integrated model system (GRIMs).

- Asia-Pac J Atmos Sci 49(2): 219-243. doi: 10.1007/s13143-013-0023-0
- IPCC. 2023. Summary for policymakers. In: Climate change 2023: Synthesis report. A report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Lee H, Romero J (eds)]. Geneva: IPCC. p. 1-34. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001
- Kang SJ, Sung HM, Kim JU, Lee JH, Chung CY, Boo KO. 2025. Projections of cultivation area for summer Kimchi cabbage in South Korea under different global warming levels (in Korean with English abstract). J Clim Change Res 16(5-1): 919-933. doi: 10.15531/KSCCR.2025.16.5.919
- Kim JU, Kim MH, Chung CY, Byun YH, Kim TJ. 2023. 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 (in Korean with English abstract). J Clim Change Res 14(4): 501-210. doi: 10.15531/KSCCR.2023.14.4.501
- Kim JU, Kim TJ, Kim DH, Byun YH, Chang EC, Cha DH, Ahn JB, Min SK. 2022. Performance evaluation and future projection of East Asian climate using SSP scenario-based CORDEX-East Asia phase 2 multi-RCM simulations (in Korean with English abstract). J Clim Change Res 13(3): 339-354. doi: 10.15531/KSCCR.2022.13.3.339
- Kim JU, Kim TJ, Shim JK, Chun CY, Kim DH, Boo KO, Min SK, Cha DH, Chang EC, Shim SB. 2025. Development of a next-generation regional climate scenario system toward IPCC AR7 for East Asia (in Korean with English abstract). J Clim Change Res 14(4): 501-210. doi: 10.15531/KSCCR.2025.16.5.1047
- Kim JU, Sang J, Kim MK, Byun YH, Kim DH, Kim TJ. 2022. Future climate projection in South Korea using the high-resolution SSP scenarios based on statistical downscaling (in Korean with English abstract). J Clim Res 17(2): 89-106. doi: 10.14383/cr.2022.17.2.89
- Kim MK, Han MS, Jang DH, Baek SG. 2012. Production technique of observation grid data of 1km resolution (in Korean with English abstract). J Clim Res 7(1): 55-68.
- Kim MK, Kim S, Kim J, 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-Pac J Atmos Sci 52(2): 79-89. doi: 10.1007/s13143-016-0010-3
- Kim S, Kim MK. 2018. Verification of PRIDE model version 2.0 (in Korean with English abstract). J Clim Res 13(1): 71-86. doi: 10.14383/cr.2018.13.1.71
- KMA (Korea Meteorological Administration). 2012. The prospect report of climate change in Korean peninsular (In Korean).
- Lee JH, Sung HM, Kim J, Sun MA, Shim SB, Byun YH. 2022. Time of emergence in Asia based on the CMIP6 multi-model ensemble. J Clim Change Res 13(4): 479-489. doi: 10.15531/KSCCR.2022.13.4.479
- Lee JY, Kwon M, Yun KS, Min SK, Park IH, Ham YG, Yim SY. 2017. The long-term variability of Changma in the East Asian summer monsoon system: A review and revisit. Asia-Pac J Atmos Sci 53(2): 257-272. doi: 10.1007/s13143-017-0032-5
- Lee WS, Lee MI. 2016. Interannual variability of heat waves in South Korea and their connection with large-scale atmospheric circulation patterns. Int J Climatol 36: 4815-4830. doi: 10.1002/joc.4671
- Lee WS, Lee S, Kim JU, Lee Y. 2026. Comparison of temperature reproducibility and extreme projections over South Korea by grid resolution (1km vs 500m) (in Korean with English abstract). J Clim Change Res 17(2): 399-411. doi: 10.15531/KSCCR.2026.17.2.399
- Mahlstein I, Knutti R, Solomon S, Portmann RW. 2011. Early onset of significant local warming in low latitude countries. Environ Res Lett 6: 034009. doi: 10.1088/1748-9326/6/3/034009
- Park BJ, Kim YH, Min SK, Kim MK, Choi Y, Boo KO,

- Shim S. 2017. Long-term warming trends in Korea and contribution of urbanization: An updated assessment. *J Geophys Res: Atmos* 122: 10637-10654. doi: 10.1002/2017JD027167
- Powers JG, Klemp JB, Skamarock WC, Davis CA, Dudhia J, Gill DO, Coen JL, GOchis DJ, Ahmadov R, Peckham SE, et al. 2017. The weather research and forecasting model: Overview, system efforts, and future directions. *Bull Am Meteorol Soc* 98(8): 1717-1737. doi: 10.1175/BAMS-D-15-00308.1
- Ranasinghe R, Ruane AC, Vautard R, Arnell N, Coppola E, Cruz FA, Dessai S, Islam AS, Rahimi M, Ruiz Carrascal D, Sillmann J, Sylla MB, Tebaldi C, Wang W, Zaaboul R. 2021. Climate change information for regional impact and for risk assessment. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors SL, Péan C, Berger S, Caud N, Chen Y, Goldfarb L, Gomis MI, Huang M, Leitzell K, Lonnoy E, Matthews JBR, Maycock TK, Waterfield T, Yelekçi O, Yu R, Zhou B (eds). *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. p. 1767-1926. doi: 10.1017/9781009157896.014
- 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
- Rojas M, Lambert F, Ramirez-Villegas J, Challinor AJ. 2019. Emergence of robust precipitation changes across crop production areas in the 21st century. *PNAS* 116(4): 6673-6678. doi: 10.1073/pnas.1811463116
- Sellar AA, Jones CG, Mulcahy JP, Tang Y, Yool A, Wiltshire A, O'Connor FM, Stringer M, Hill R, Palmieri J, et al. 2019. UKESM1: Description and evaluation of the U.K. earth system model. *J Adv Model Earth Syst* 11: 4513-4558. doi: 10.1029/2019MS001739
- Sung HM, Lee JH, Kim JU, Shim SB, Chung CY, Byun YH. 2023. Changes in thermal stress in Korea using climate-based indicators: Present-day and future projections from 1 km high resolution scenarios. *Int J Environ Res Public Health* 20: 6694. doi: 10.3390/ijerph20176694