Check for updates

Journal of Climate Change Research 2024, Vol. 15, No. 6, pp. 1233~1244
DOI: https://doi.org/10.15531/KSCCR.2024.15.6.1233

고해상도 기후변화 시나리오 기반의 남한 기후 지역 분류 및 미래 전망

김진욱*† · 김태준** · 김도현* · 심재관*** · 변영화****

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

Classification of climate zones and future projections of regional climate based on high-resolution scenarios over South Korea

Kim, Jin-Uk*† · Kim, Tae-Jun** · Kim, Do-Hyun* · Shim, Jae-Kwan*** and Byun, Young-Hwa****

*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 classified climate zones over South Korea using high-resolution (1 km × 1 km) observational grid data (2000 ~ 2019) and projected future regional climate changes based on high-resolution climate change scenarios (2081 ~ 2100). We applied the K-means clustering method to observational annual mean temperature and total precipitation data to classify South Korea into the following six regions: mountainous-central-high/low elevation (A1/A2), plain-central/southern (B1/B2), and mountainous-southern-high/low elevation (C1/C2). Currently, mean temperatures are highest/lowest at B2/A1 (12.4°C/8.0°C) and total precipitation is highest/lowest at C1/B1 (3312 mm/1182 mm). During the late 21st century, under a low-emission scenario (SSP1-2.6), annual mean temperatures are projected to increase by 2.3 ~ 2.4°C across the six climate zones; under a high-emission scenario (SSP5-8.5), temperature is expected to increase by 5.9°C (C1) to 6.5°C (A2). Total precipitation is projected to increase most in C1 (209 mm/456 mm) and least in B1 (21 mm/155 mm) under SSP1-2.6/SSP5-8.5. Extreme heat events (TXx) will increase across all regions, especially in central areas (A1, A2, B1) of South Korea. Heavy rainfall events (RX1D) will increase most in southern areas (B2, C1, C2), especially in C1, with increases exceeding 100 mm/day. Finally, extreme climate events are projected to occur more frequently across most regions. The intensities of future extreme climate events are expected to increase not only under high-carbon scenarios, but also under low-carbon scenarios. The results of this study are fundamental data for establishing region-specific climate change adaptation strategies.

Key words: Climate Zones, SSP Scenarios, South Korea, High-Resolution

1. 서론

최근 10년(2014 ~ 2023년) 전 지구 평균온도는 인간 활동으로 인해서 산업화 이전 시기(1850 ~ 1900년) 대비 약 1.19℃ 상승했으며, 특히 2023년은 약 1.31℃ 상승하는 등 가장 더운 해의 기록이 계속해서 경신되고 있다(Forster et al., 2024). 그러나 남반구와 북반구로 나누어 기후변화를 살펴보면 기온은 공통 적으로 상승하는 가운데, 기후 특성과 대기 순환 추세 등은 서로 다른 변화 양상을 보인다(Chemke et al., 2022; Coumou et al., 2015; Kang et al., 2023; Shaw et al., 2024). Coumou et al. (2015)은 북극의

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

ORCID 김진욱 0000-0001-9892-9915 김태준 0000-0002-5452-4796 김도현 0000-0002-3829-5532 심재관 0009-0006-7808-3805 변영화 0000-0002-6074-4461

Received: September 23, 2024 / Revised: October 23, 2024 / Accepted: December 9, 2024

급격한 온난화가 북반구 중위도 순환에 영향을 미쳐 여름철 풍속과 에디 운동 에너지 등이 약해질 수 있다고 하였고, Kang et al. (2023)과 Shaw et al. (2024)은 북극 해빙 감소가 북반구 여름철 중위도 스톰트랙을 약화시키고 있다고 하였다. 반면에 Chemke et al. (2022)은 온난화로 인해 남반구 중위도의 겨울철 스톰트랙이 강화될 수 있다고 밝혔다. 이러한 분석 결과들을 통해 기후변화를 분석하고 전망함에 있어서 지역별 특성을 살피는 과정은 매우 중요하다는 것을 알 수 있다.

한반도는 북반구 중위도의 대륙 동안에 위치하여 계절에 따라 다양한 기후시스템의 영향을 받으며, 남북방향으로 길게 뻗은 산맥으로 인해 지역별로 기후적 특성이 비교적 뚜렷하게 나뉘는 지역이다. 이러한 한반도의 기후 특성을 지역적으로 구분하는 연구는 꾸준히 수행되고 있다. 경험을 토대로 기후대 또는 기후형을 구분하는 블라드미르 쾨펜(Wladimir Köppen)과 그렌 트레와다(Glenn T. Trewartha)의 기준은 기후 지역을 분류하는 방법의 대표적인 예이다. 그러나 이러한 방법은 전 지구를 대상으로 한 대규모 지역의 구분 연구에는 적합하나, 우리나라와 같이 좁은 지역에 적용하기에는 어려운 부분이 있다(Kang et al., 2021). 기후 지역을 구분하는 다른 방법은 통계적인 기법인 군집분석(Clustering Analysus), 주성분분석(Principal Component Analysis) 등을 예로 들 수 있다. 이는 한반도의 복잡한 지형 조건을 반영하여 지역을 구분하는 방법으로 활발하게 사용되고 있다(Cha and Suh, 2022; Kim et al., 2017; Moon et al., 2023; Park et al., 2009; Yeo, 2011). 그러나 기존 연구는 평지 위주로 분포된 수십개의 기상 관측소 자료를 기반으로 이루어졌기 때문에 우리나라의 지형 조건을 모두 반영하기 어렵다는 한계가 있으므로 더욱 상세한 자료를 반영한 연구가 필요하다.

한편, 기상청 국립기상과학원은 한반도 기후위기에 대응하기 위하여 학계와 협력하여 통계적 상세화 기법인 Modified Korean-Parameter elevation Regressions an Independent Slopes Model (MK-PRISM)를 기반으로 고해상도(수평해상도 1 km) 관측 격자 자료를 개발하였다. 또한 기후변화에 관한 정부 간 패널(Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC) 6차평가보고서(Sixth assessment report; AR6)의 신규 공통사회경제경로(Shared Socioeconomic Pathways; SSP)를 반영한 고해상도(수평해상도 1 km) 남한상세 기후변화 시나리오를 산출하였다. 이들 자료는 우리나라의 복잡한 지형효과를 반영하기 위해서 고도, 해양도, 지향면 등을 고려하여 산출되었다(Kim et al., 2012, 2013, 2023; Kim JU, Sang J, et al., 2022).

이 연구에서는 기후변화에 따른 상세 지역별 대응 전략을 수립하고 적응력을 강화하기 위한 기초 자료를 제공하는 것을 목표로 하며, 우리나라의 지형 특성을 더욱 상세하게 반영하여 유사 기후 지역을 분류하기 위해서 고해상도 관측 격자 자료를 분석에 적용하였다. 이를 통해 분류된 각 기후 지역에 대한 기후적 특성을 살펴보았다. 또한 각 지역의 기후적, 지리적 특성에 따라 미래 기후변화의 패턴이 다르게 나타날 수 있으므로, 분류된 기후 지역을 고해상도 남한상세 기후변화 시나리오에 적용하여 지역별 미래 기후변화 전망 정보를 분석하였다.

2. 자료 및 연구 방법

이 연구에는 기상청-국립기상과학원에서 산출 및 제공하는 MK-PRISM 기법에 기반한 수평해상도 1 km의 고해상도 관측 격자 자료(2000 ~ 2019년)와 PRISM-based Dynamic downscaling Error correction (PRIDE) 기법에 기반한 수평해상도 1 km의 남한상세 기후변화 시나리오(2081 ~ 2100년) 자료가 사용되었다(www.climate.go.kr). PRIDE 기법에 입력자료로 사용된 미래 전망자료는 기상청 동아시아 기후변화 시나리오로, CORDEX (Coordinated Regonal Climate Downscaling Experiment) 동아시아 2단계의 지역기후모델 5종(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))을 통해 산출된 자료이다. 동아시아 기후변화 시나리오는 사용된 지역 기후모델에 따라 각각의 계통 오차를 포함하고 있다(Kim JU, Kim TJ, et al., 2022). PRIDE 모델은 기후모델의 계통 오차를 보정 하기 위하여 모델의 계절 사이클을 관측의 계절 사이클로 대체하는 통계적 상세화 방법이며, 자세한 설명은 Kim et al. (2016)과 Kim and Kim (2018)에 기술되어있다. 미래 전망 분석에 사용된 시나리오는 IPCC AR6의 시나리오 중에서 재생에너지 기술 발달로 화석연료 사용이 최소화되고 친환경적으로 지속 가능한 경제성장을 가정하는 저탄소 시나리오(SSP1-2.6)와 산업기술의 빠른 발전에 중심을 두어 화석연료 사용이 높고 도시 위주의 무분별한 개발 확대를 가정하는 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)이다.

우리나라의 유사 기후 지역을 구분하기 위하여 군집분석 방법 중에서 가장 보편적으로 사용되는 K-평균(K-means clustering analysis) 방법을 사용하였다. K-평균 군집분석은 비계층적(nonhierarchical) 군집분석 방법의 하나로, 자료 형태에 상관없이 적용하기 쉽고 계산속도가 빨라서 대용량 자료를 활용하기에 적합하다고 알려져 있다. K-평균 군집분석을 위해서는 최적 군집의 수를 설정해야 하며, 이에 대한 설명은 3장 1절에 자세히 수록하였다. 군집화에 입력자료로 사용된 기후 요소는 관측 격자 자료의 연평균기온과 연간 총강수량이며, 20년(2000～2019) 평균 된 자료이다. 각 기후 지역별 미래 기후변화를 전망하기 위하여 21세기 말(2081～2100년)의 평균기후 및 극한기후 지수에서 현재의 기후 평균을 뺀 값을 미래 기후변화폭으로 정의하였다. 각 기후 지역에 대한 극한 고온 및 극한 강수 변화에 대한 분석 요소는 CCl/CLIVAR/JCOMM Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI) 지수 중에서 연중 일 최고기온(TXx)와 연중 일 최다강수량(RX1D)를 사용하였으며, 이를 통해 현재 대비 미래의 극한기후 변화를 전망하였다(Table 1). 극한기후 변화 분석은 남한상세 기후변화 시나리오의 각 격자점에 대하여 극한지수를 계산한 후, 이를 각 기후 지역에 대하여 공간 평균하여 사용하였다. 또한 미래 TXx와 RX1D의 재현 수준 분석을 위하여 Generalized Extreme Value Distribution (GEVD) 방법을 적용하였고, 이에 대한 자세한 설명은 3장 2절에 기술하였다.

Table 1. Climate change Indices calculated using daily maximum temperature (TMAX) and precipitation (PR)

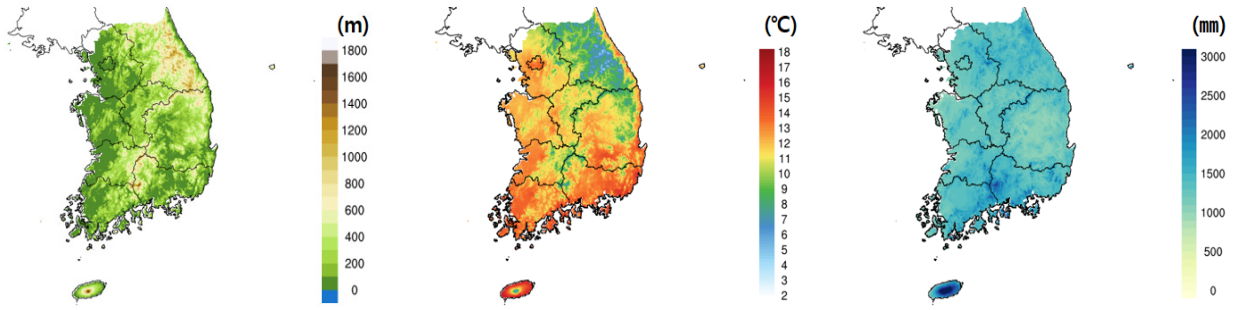
Index	Index Definition	Units
TXx	The maximum TMAX in each year	℃
RX1D	The maximum 1-day PR in each year	mm

3. 결과

3.1. 유사 기후 지역 구분 및 지역별 특성

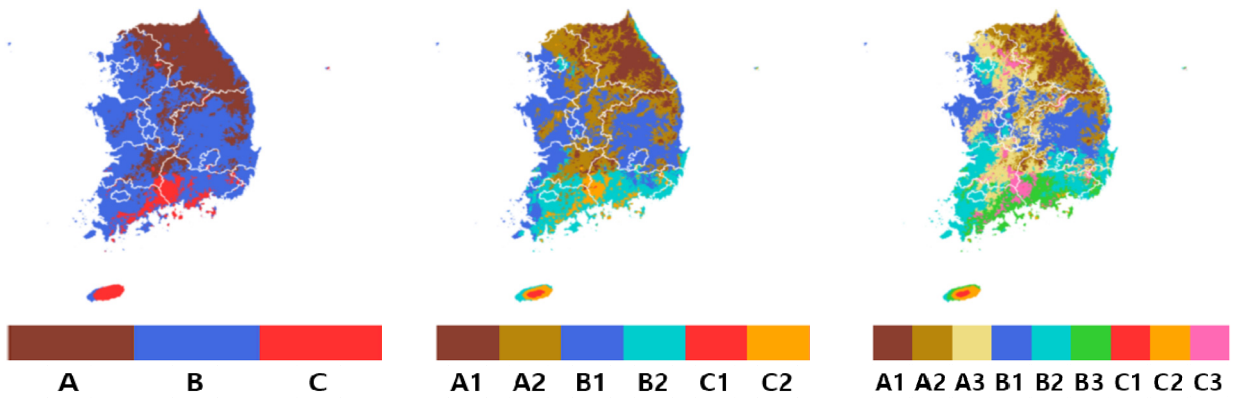
MK-PRISM 기반의 고해상도 관측 격자 자료는 기상청 관측소의 자료와 비교하여 평균기온은 +0.03℃, 강수량은 −0.07 mmd-1 수준의 편차가 나타나므로, 관측 결과가 잘 재현 되고 복잡한 지형효과가 비교적 잘 반영된 자료로 알려져 있다(Kim JU, Sang J, et al., 2022). 이 자료를 기반으로 우리나라의 상세한 지형 고도 및 현재 기간(2000～2019년)에 대한 연평균기온, 연간 총강수량을 Fig. 1에 제시하였다. 우리나라 전체 영역에 대한 연평균기온은 약 11.9℃이고 강수량은 약 1328 mm로 나타났다. 지역별 평균기온은 남부지역 및 제주지역에서 높고 평균고도가 높은 강원지역에서 낮게 나타난다. 지역별 강수량은 남해안과 산악지역인 한라산, 지리산 정상 부근에서 가장 많으며, 영남과 서해안 중부지역에서 가장 적은 것으로 확인된다.

이 관측 격자 자료를 바탕으로 K-평균 방법을 사용하여 우리나라를 임의의 군집 수 3개, 6개, 9개에 대하여 분류하였다(Fig. 2). 3개 군집의 경우, 우리나라는 크게 산지-중부(A), 평지(B), 산지-남부(C)로 지역이 구분된다(Fig. 2a). 우리나라를 6개 군집과 9개 군집으로 분류하는 경우에는 세 종류의 기후 지역(A, B, C)이 고위, 위도에 따라 더욱 상세하게 분류되는 형태를 보인다(Fig. 2b, 2c). 이러한 분류 결과 중에서 우리나라를 가장 적절한 수의 군집으로



(A) Elevation (B) Mean temperature (C) Precipitation

Fig. 1. Distribution of DEM elevation (a), observed annual mean temperature (b) and total precipitation (c) over South Korea (2000-2019)



(a) 3 clusters (b) 6 clusters (c) 9 clusters

Fig. 2. Classification of Climate Zones over South Korea by number of clusters. A, B and C refer to the central mountains, plains, and southern mountains, respectively. As the number of clusters increases, A, B and C become further subdivided according to the terrain

구분하기 위하여, 기온과 강수량에 대하여 Explained Cluster Variance (ECV)를 계산하여 최적 군집 개수를 산출하였다(Beak and Philipp, 2010; Hoffmann and Schlunzen, 2013; Philipp et al., 2007). ECV는 각 군집에 포함된 값들을 군집 내 평균이 얼마나 잘 설명하는지 나타내며, 아래와 같이 계산된다:

$$ECV = 1 - \frac{WSS}{TSS} \quad (1)$$

식 (1)에서 Within cluster Sum of Squares (WSS)는 군집 수에 따른 기후 요소 차이의 합을 의미하며, 아래와 같이 계산된다:

$$WSS = \sum_{j=1}^{k} \sqrt{\sum_{i \in C_j} |C_j - x_i|^2} \quad (2)$$

식 (2)에서 Cj는 각 군집의 중심, xi는 군집 내의 i번째 데이터, k는 군집의 개수를 의미한다. 따라서 특정 군집의 중심으로부터 군집에 속한 데이터와의 거리가 가까울수록 군집이 잘 이루어졌다고 판단할 수 있으며, WSS는 0에 가까운 값을 갖는다. 식 (1)에 제시된 Total Sum of Squares (TSS)는 군집 수가 1개일 때, 기후 요소 차이의 합을 의미한다. 최종적으로 ECV는 1에서 WSS와 TSS의 비를 뺀 값으로, WSS의 군집 수를 순차적으로 증가시켜 계산하게 된다. 이 연구에서는 ECV의 기울기 변화가 비교적 급격하게 감소하는 군집 수 6을 최적 군집의 수로 정의하였다(Fig. 3).

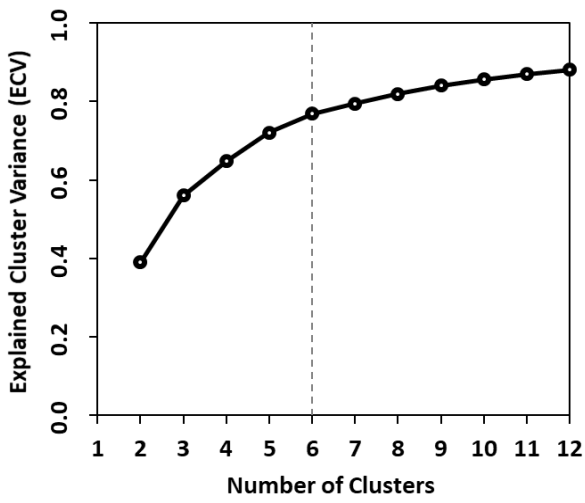
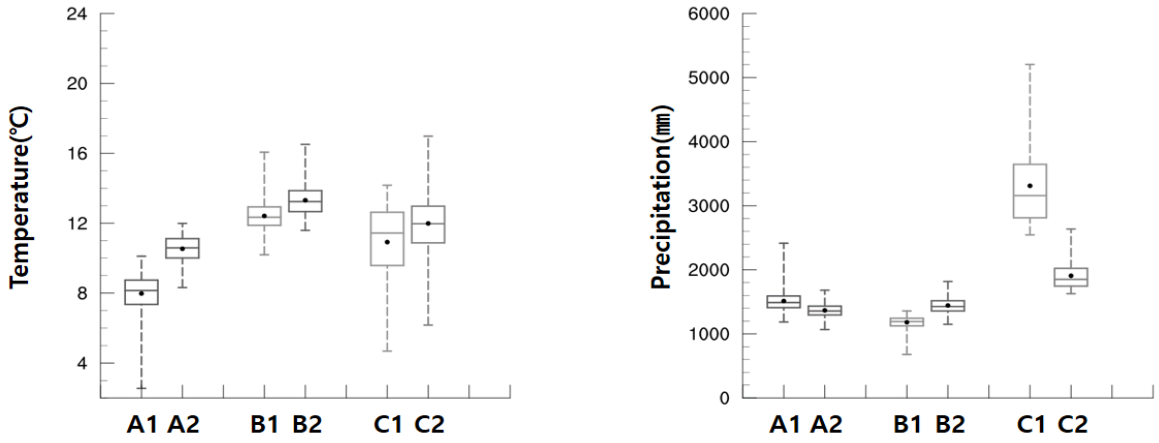


Fig. 3. ECV on the number of clusters

우리나라를 6개 군집으로 분류한 결과, 유사 기후 지역은 산지-중부-높은고도(A1), 산지-중부-낮은고도(A2), 평지-중부(B1), 평지-남부(B2), 산지-남부-높은고도(C1), 산지-남부-낮은고도(C2)로 구분되었다(Fig. 2b). A1은 주로 태백산맥 고지대가 포함되고, A2는 태백산맥, 차령산맥, 노령산맥 등 주요 산맥의 줄기 및 강원, 경기 북부 지역이 포함된다. B1은 수도권 남서부, 충남과 전북 서부 지역, 경북 지역과 동해안 지역이 포함되며, B2는 전남, 경남 및 남부 해안과 제주 북서 해안지역이 포함된다. C1은 한라



(a) Temperature (b) Precipitation

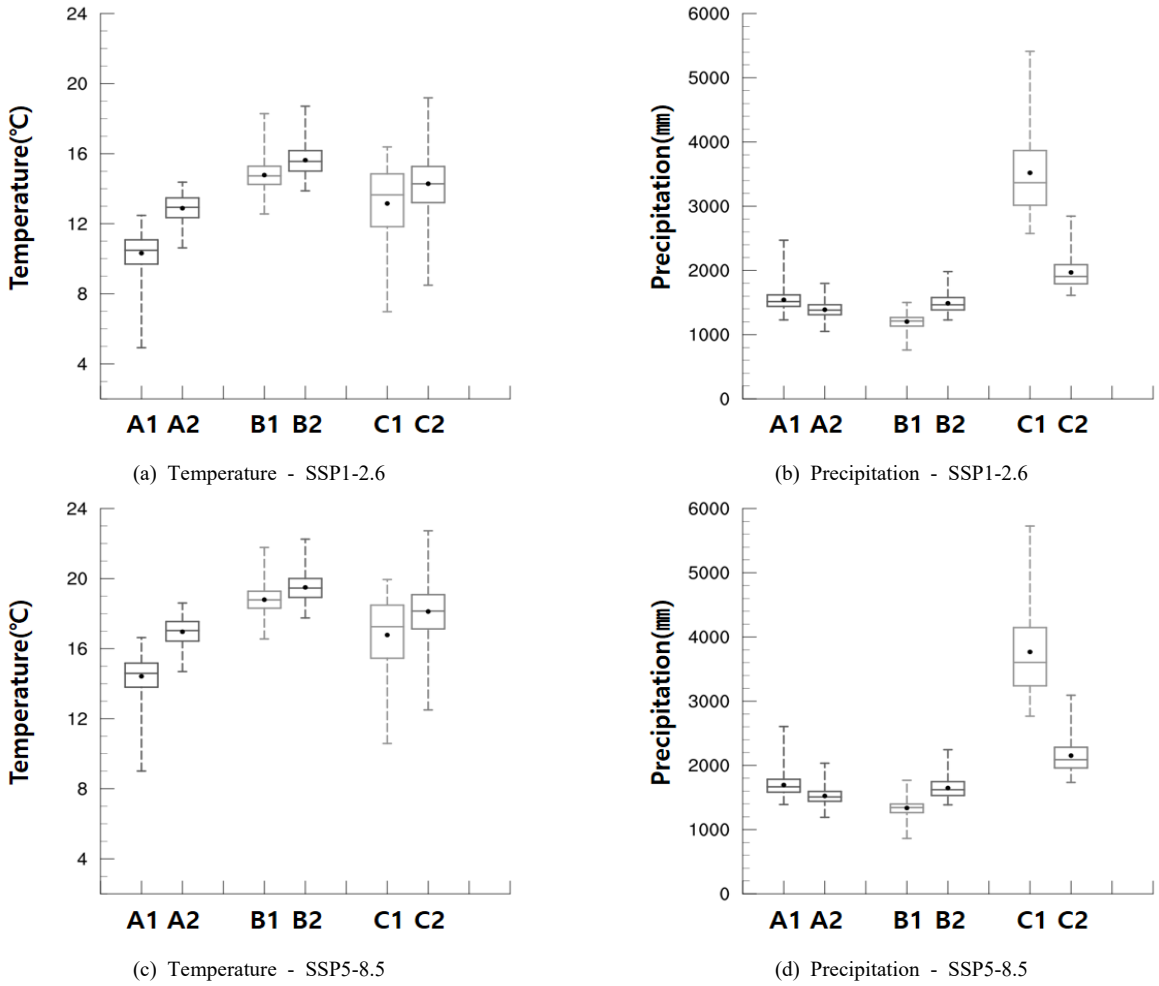
Fig. 4. Climatic characteristics of annual mean temperature and total precipitation by climate zones under present-day (2000 ~ 2019) over South Korea

Table 2. Annual mean temperature, total precipitation, extreme high temperature index (TXx) and extreme precipitation index (RX1D) by climate zones under present-day (2000 ~ 2019) over South Korea. The climate zones are classified as follows: mountainous-central-high/low elevation (A1/A2), plain-central/southern (B1/B2), and mountainous-southern-high/low elevation (C1/C2)

	A1	A2	B1	B2	C1	C2
Temperature (℃)	8.0	10.5	12.4	13.3	10.9	12.0
Precipitation (mm)	1513	1367	1182	1443	3312	1908
TXx (℃)	32.5	34.5	35.5	35.2	29.9	33.7
RX1D (mm)	140	128	114	136	285	167

산 고지대와 지리산 정상 지역이며, C2는 한라산 중산간, 지리산 일대 지역과 남해안 일부 지역으로 나타난다. 남한 전체 영역에 대하여 각 기후 지역의 면적 비율은 B1(33.9%), A2(28.9%), B2(17.7%), A1(13.8%), C2(5.3%), C1(0.4%)의 순서대로 크게 나타났으며, 이는 다시 평지(51.6%) > 산지-중부(42.7%) > 산지-남부(5.7%) 순으로 많이 분포한다고 정리할 수 있다. 기후 지역별 평균고도는 C1(801 m), A1(664 m), C2(385 m), A2(311 m), B2(124 m), B1(98 m) 순으로 높게 나타난다(Fig. 1a).

6개 기후 지역에 대한 기후적 특성을 살펴보면, 연평균 기온은 평지(B), 산지-남부(C), 산지-중부(A) 순으로 높으며 특히 평지-남부(B2)에서 13.3℃로 가장 높고 산지-중부-높은고도(A1)에서 8.0℃로 가장 낮다(Fig. 4a, Table 2). 강수량은 대체로 남부 고지대에서 많고 중부 저지대에서 적다. 강수량이 가장 많은 지역은 C1(3312 mm)으로 A와 B 지역들에 비해서 두배 이상 많은 강수가 발생하는 지역으로 분석되며, 반면에 강수량이 가장 적은 지역은 B1(1182 mm)으로 강수량이 가장 많은 C1 지역의 1/3 수준에 그쳤다(Fig. 4b, Table 2). 극한 고온 지수인 TXx는 연평균기온과는 다르게 B1 지역에서 35.5℃로 가장 높게 나타났고 C1 지역에서 29.9℃로 가장 낮게 나타났다(Table 2). 이는 TXx가 경상권과 충청권에서 높고 제주권에서 낮다고 밝힌 NIMS (2021)와 유사한 결과이다. 또한 TXx는 고도가 낮은 지역일수록 높게 나타나는 특성을 보인다. 극한 강수 지수인 RX1D가 가장 높은 지역과 가장 낮은 기후 지역은 각각 C1(285 mm), B1(114 mm)으로, 두 지역 사이에 RX1D는 약 2.5배 차이가 나타난다. 극한 기후지수 분석 결과를 종합해 보면, B1은 여름철 극한 고온이 높고 극한 강수는 적은 지역이며 C1은 여름철 극한 고온이 비교적 낮고 극한 강수량이 많은 지역이라고 할 수 있다.



(a) Temperature - SSP1-2.6 (b) Precipitation - SSP1-2.6

(c) Temperature - SSP5-8.5 (d) Precipitation - SSP5-8.5

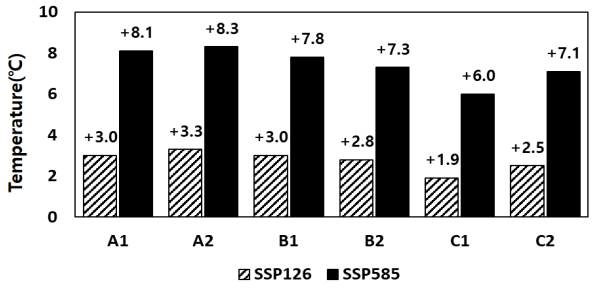
Fig. 5. Climatic characteristics of annual mean temperature and total precipitation by climate zones under late 21st century (2081 ~ 2100) over South Korea

3.2. 기후 지역별 미래 기후 전망

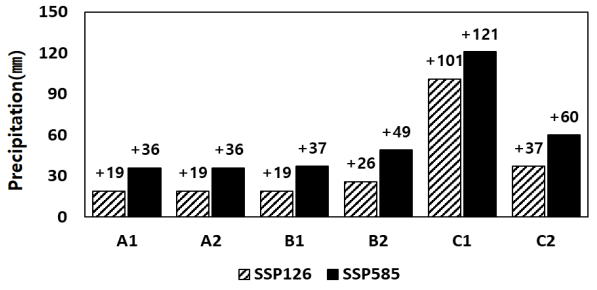
이 절에서는 6개 기후 지역별 기후적 특성의 미래 변화를 전망하였다. 먼저 평균기온의 변화를 살펴보면, 21세기 말(2081 ~ 2100년) 저탄소 시나리오(SSP1-2.6)에서 지역에 따라 기온 변화 폭은 현재(2000 ~ 2019년) 대비 2.3℃ ~ 2.4℃ 상승이 전망되어 지역별 차이가 작을 것으로 나타났다(Fig. 5a, Table 3). 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)에서는 A2 지역에서 +6.5℃로 가장 크게 상승하고 C1 지역에서 +5.9℃로 가장 작게 상승하여, 지역에 따른 기온 상승 폭의 차이가 비교적 클 것으로 전망된다(Fig. 5c). 이에 따라 21세기 말에 A2 지역의 연평균기온은 17.0℃로 C1 지역의 16.8℃를 추월하여 더 따듯한 지역이 될 것으로 분석된다. 21세기 말, 저탄소 시나리오에서 나타나는 연간 총강수량 변화는 남부 및 제주 지역(B2, C1, C2)에서 비교적 많은 증가가 있을 것으로 전망된다(Fig. 5b, Table 3). 특히 C1 지역의 강수량 증가 폭은 209 mm로 다른 지역 변화에 비해 3배 이상 많다. 고탄소 시나리오의 경우에는 저탄소 시나리오에 비해 미래 강수량 증가 폭이 모든 지역에서 두 배 이상 크며, 150 mm 이상의 강수량 증가가 예상된다(Fig. 5d). 현재 강수량이 많은 지역에서 미래 강수량 증가 폭이 크며, 남부지역은 200 mm 이상 증가하고 특히 C1 지역은 456 mm의 강수량 증가가 전망된다. 또한 강수량의 경우 시나리오에 상관없이 현재와 비교하여 21세기 말 같은 기후 지역 내 강수량 편차가 커지는 것으로 나타난다(Fig. 4b, Fig. 5b, 5d).

Table 3. Annual mean temperature, total precipitation, extreme high temperature index (TXx) and extreme precipitation index (RX1D) by climate zones under late 21st century (2081 ~ 2100) over South Korea. The parentheses indicate the future changes compared to the present-day (2000 ~ 2019)

	Scenario	A1	A2	B1	B2	C1	C2
Temperature (℃)	SSP1-2.6	10.3 (+2.3)	12.9 (+2.4)	14.8 (+2.4)	15.6 (+2.3)	13.2 (+2.3)	14.3 (+2.3)
	SSP5-8.5	14.4 (+6.4)	17.0 (+6.5)	18.8 (+6.4)	19.5 (+6.2)	16.8 (+5.9)	18.1 (+6.1)
Precipitation (mm)	SSP1-2.6	1542 (+29)	1389 (+22)	1203 (+21)	1489 (+46)	3521 (+209)	1970 (+62)
	SSP5-8.5	1695 (+182)	1525 (+158)	1337 (+155)	1648 (+205)	3768 (+456)	2154 (+246)
TXx (℃)	SSP1-2.6	35.5 (+3.0)	37.8 (+3.3)	38.5 (+3)	38 (+2.8)	31.8 (+1.9)	36.2 (+2.5)
	SSP5-8.5	40.6 (+8.1)	42.8 (+8.3)	43.3 (+7.8)	42.5 (+7.3)	35.9 (+6.0)	40.8 (+7.1)
RX1D (mm)	SSP1-2.6	159 (+19)	147 (+19)	133 (+19)	162 (+26)	386 (+101)	204 (+37)
	SSP5-8.5	176 (+36)	164 (+36)	151 (+37)	185 (+49)	406 (+121)	227 (+60)



(a) TXx



(b) RX1D

Fig. 6. Changes in extreme high temperature index (TXx, a) and extreme precipitation index (RX1D, b) between present-day (2000 ~ 2019) and late 21st century (2081 ~ 2100) under SSP1-2.6 and SSP5-8.5 over South Korea

Fig. 6은 현재 대비 21세기 말 6개 기후 지역에 대한 기후변화 시나리오별 극한기후지수의 변화를 전망한 결과이다. 먼저 극한 고온 지수 TXx는 미래에 모든 시나리오, 모든 지역에서 상승한다(Fig. 6a, Table 3). 저탄소 시나리오의 경우, A2 지역에서 상승 폭이 +3.3℃로 가장 크고 C1 지역에서 상승 폭이 +1.9℃로 가장 가장 작은 것으로 전망되어 극한 고온의 변화는 평균기온의 변화와는 다르게 저탄소 시나리오에서도 지역별 차이가 큰 것으로 나타났다. 고탄소 시나리오의 경우, 미래 TXx의 상승 폭은 중부지역(A1, A2, B1)에서 +7.8℃ ~ +8.3℃로 남부지역(B2, C1, C2)의 +6.0℃ ~ +7.3℃ 비해 크다. 이에 따라 A2 지역의 TXx는 42.8℃로 B2 지역(42.5℃)보다 높아질 것으로 전망되며, C1을 제외한 모든 지역에서 TXx가 평균기온보다 상승 폭이 크다. 극한 강수 지수 RX1D는 미래에 모든 시나리오, 모든 지역에서 증가가 전망된다(Fig. 6b, Table 3). 모든 시나리오에서 RX1D는 TXx와는 반대로 중부지역에 비해 남부지역에서 큰 증가 폭을 보이며, C1, C2, B2 순으로 크게 증가하는 것으로 나타난다. 특히 C1 지역

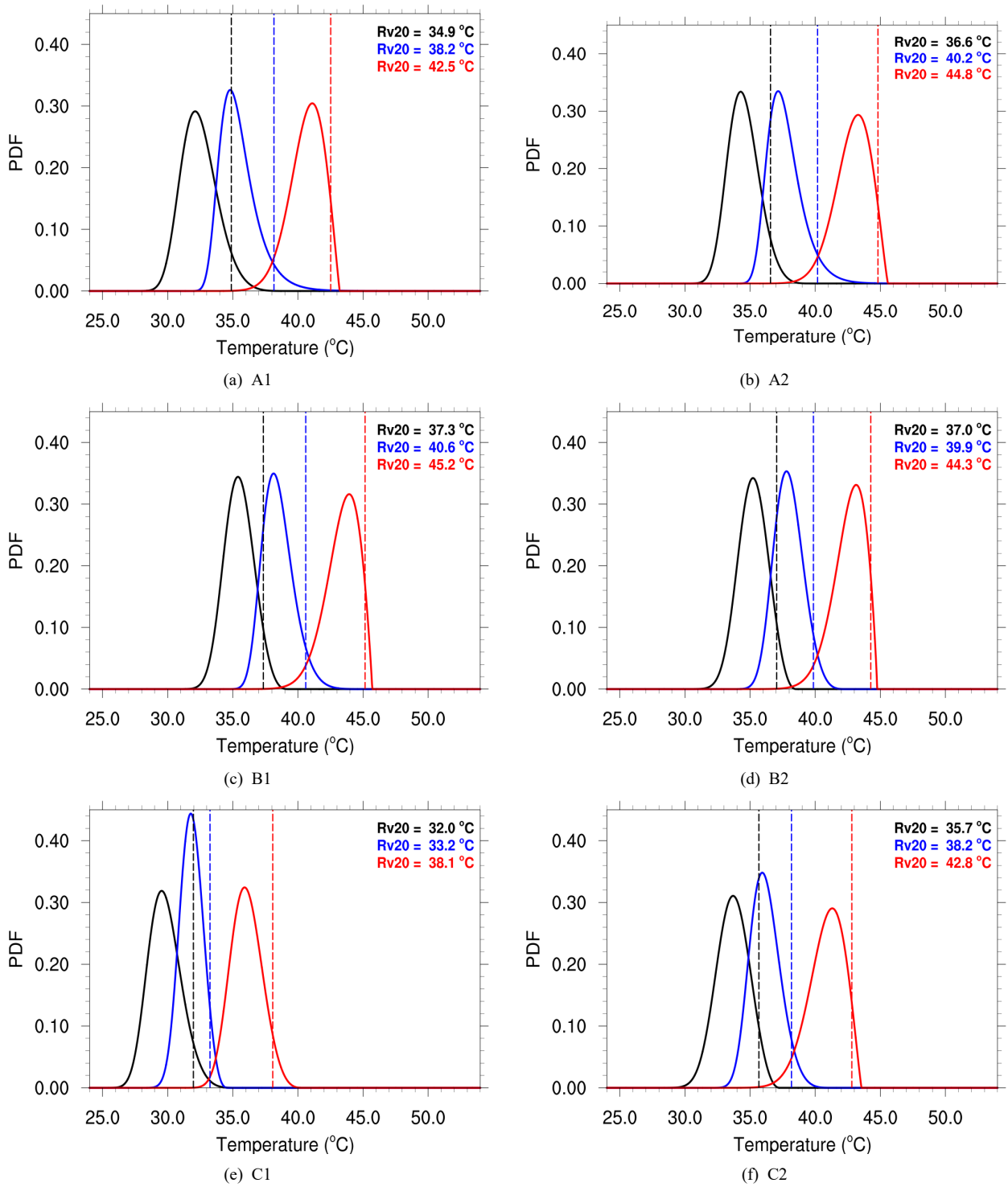
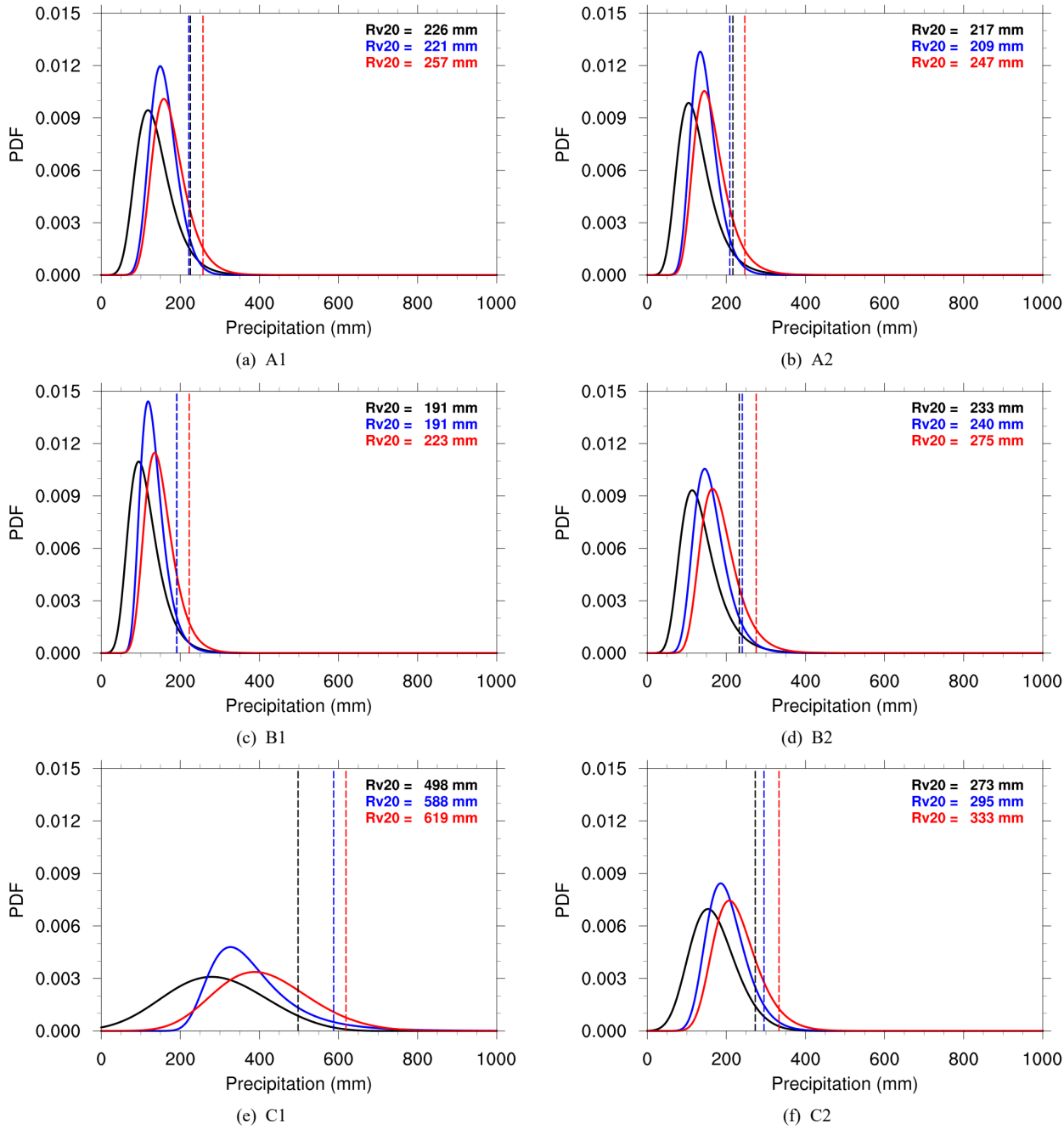


Fig. 7. Probability distribution functions (PDF) for extreme high temperature index (TXx) under present-day (2000 ~ 2019) and late 21st century (2081 – 2100) over South Korea. In this figure, black line denotes observed data for the present-day, blue line denotes SSP1-2.6 scenario, and red line denotes SSP5-8.5 scenario. The 20 years return value (RV20) is indicated by the dotted vertical line

은 현재 대비 21세기 말에 RX1D가 100 mm 이상 증가하여 다른 지역에 비해 극한 강수량이 최소 2배 이상 더 증가할 것으로 전망된다.

또한 이 연구에서는 극단 분포를 이용하여 극한 고온과 극한 강수량의 21세기 말 변화를 분석하였고, 이를 위해 극한 현상의 특성을 잘 나타내는 극단 분포 분석 방법으로 알려진 Generalized Extreme Value Distribution (GEVD) 방법을 활용하였다. 이는 한반도 미래 극한기후 분석에 이미 사용된 방법이며, 기후 지역별 극단 분포 분석을 위해 관측과 미래 전망자료의 격자별 TXx 및 RX1D 시계열을 GEVD에 적합(fitting)시킨 후 이들의 변화를 정량화하였다(Kim et al., 2023; Kim DH, Kim JU, et al.,



(a) A1 (b) A2

(c) B1 (d) B2

(e) C1 (f) C2

Fig. 8. Same as in Fig. 7 but for extreme precipitation index (RX1D)

2022). 분석에 사용된 GEVD의 확률밀도함수(Probability Distribution Function; PDF)는 1+(k(x-ξ)/β) > 0이면 다음과 같이 표현할 수 있다:

$$f(x) = \frac{1}{\beta} t(x)^{k+1} e^{-t(x)},$$
$$\text{where } t(x) = \left\{1 + k\left(\frac{x-\xi}{\beta}\right)\right\}^{-\frac{1}{k}} \quad (3)$$

식 (3)에서 ξ는 위치(location) 모수, β는 척도(scale) 모수, k는 모양(shape) 모수를 나타낸다. 다음으로 표본의 수가 작은 경우에 사용하기 적합한 L-적률 추정법(Hosking and Wallis, 1997)을 사용하여 식 (3)의 모수들을 추정하였다. 또한, 누적분포함수(cumulative distribution function; CDF)와 백분위수(quantile) 함수로부터 TXx와 RX1D에 대한 20년 재현수준(return level; Z_p)을 확률 p에 대하여 k ≠0에서 다음과 같이 산출하였다:

$$Z_p = \xi + \frac{\beta}{k}\left[\{-\ln(p)\}^{-k} - 1\right] \quad (4)$$

Fig. 7은 식 (3), 식 (4)를 통해 분석된 우리나라 기후 지역별 현재와 미래에 대한 TXx의 확률밀도함수이다. 현재 기준 20년 재현 수준의 TXx는 B1 지역에서 37.3℃로 가장 높고 C1 지역에서 32.0℃로 가장 낮게 나타났다. 미래에도 저탄소/고탄소 시나리오에서 20년 재현 수준의 TXx는 B1 지역에서 40.6℃/45.2℃로 가장 높고 C1 지역에서 33.2℃/38.1℃로 가장 낮을 것으로 전망된다(Fig. 7c, 7e). 현재 기준 20년 재현 수준의 TXx는 21세기 말, 저탄소 시나리오에서 지역에 따라 1.1년 ~ 1.5년마다 한 번씩 발생하며, 고탄소 시나리오에서는 모든 지역에서 거의 매년 발생할 것으로 전망된다. 이는 우리나라에서 미래 폭염과 관련된 적응 대책이 모든 지역에 대해서 강화되어야 함을 시사한다.

Fig. 8은 우리나라 기후 지역별 현재와 미래에 대한 RX1D의 확률밀도함수이다. 현재 기준 20년 재현 수준의 RX1D는 C1 지역에서 498 mm로 가장 많고 B1 지역에서 191 mm로 가장 적게 나타나며, 이는 TXx와는 반대의 결과이다. 대부분의 지역에서 미래 온실가스 배출에 따라 현재 기준 20년 재현 수준의 RX1D는 더 자주 발생할 것으로 전망된다. 특히 C1/C2 지역의 경우는 현재 20년에 한 번 발생하는 극한 호우가 저탄소 시나리오에서 7.9년/10.7년에 한 번 발생하고 고탄소 시나리오에서 4.4년/5.0년에 한 번 발생하며, 네 배 이상 극한 호우가 자주 발생할 것으로 전망된다(Fig. 8e, 8f). 반면에 A1/A2 지역은 21세기말 저탄소 시나리오에서 20년 재현 수준의 극한 호우의 발생 빈도가 현재 보다 다소 줄어들 것으로 전망되었다. 이는 강원 산간 지역에서는 RX1D가 증가하여 극한 강수가 평균적으로 증가하나, 20년에 한 번 발생하는 매우 강한 극한 강수는 오히려 줄어들 수 있는 것을 의미한다. 이러한 지역적인 극한 호우의 미래 변화 특성은 방재와 관련한 기후변화 적응 대책 수립 시에 고려해야 할 사항으로 사료 되며, 향후 추가적인 분석이 더 필요할 것으로 보인다.

4. 요약 및 결론

이 연구에서는 수평해상도 1 km의 관측 격자 자료(2000 ~ 2019년)를 기반으로 우리나라의 유사 기후 지역을 구분하고, IPCC AR6의 사회경제경로(SSP)를 반영하여 새롭게 산출된 남한상세 기후변화 시나리오(2081 ~ 2100년)를 활용해서 기후 지역별 미래 기후변화 전망 결과를 분석하였다. 우리나라의 유사 기후 지역을 분류하기 위하여 비계층적 군집분석 방법인 K-평균 방법을 사용하였고, 고해상도 관측 격자 자료의 연평균기온과 연간 총강수량을 입력자료로 활용하였다. 우리나라를 가장 적절한 수의 기후 지역으로 분류하기 위해서 기온과 강수에 대한 ECV를 계산하였고, 최적 군집의 수는 6개로 확인되었다. K-평균 기법을 기반으로 우리나라를 6개 군집으로 분류한 결과, 우리나라는 산지-중부-높은고도(A1), 산지-중부-낮은고도(A2), 평지-중부(B1), 평지-남부(B2), 산지-남부-높은고도(C1), 산지-남부-낮은고도(C2)로 분류되었다.

6개 기후 지역별 현재 기후 특성을 분석한 결과, 연평균기온은 B > C > A 순으로 높으며, 특히 B2에서 13.3℃로 가장 높고 A1에서 8.0℃로 가장 낮게 나타났다. 강수량은 대체로 남부 고지대에서 비교적 많고 중부 저지대에서 적다. C1은 강수량이 3312 mm로 가장 많은 지역이며, 강수량이 1182 mm로 가장 적은 B1 지역과 비교하면 연간 총강수량이 3배가량 차이가 난다. 극한 고온 지수 TXx는 고도가 낮은 지역일수록 높게 나타나며, 이에 따라 B1 지역에서 35.5℃로 가장 높고 C1 지역에서 29.9℃로 가장 낮은 것으로 분석된다. 극한 강수 지수 RX1D는 총강수량과 비슷한 분포 특성을 보이며, C1에서 285 mm로 가장 많고 B1에서 144 mm로 가장 적게 나타난다. 즉, 남부의 평지(B1)에서 여름철 극한 고온이 높고 극한 강수는 적으

며, 남부의 고산지대(C1)에서 극한 고온은 낮고 극한 강수가 매우 강하다고 할 수 있다.

6개 기후 지역의 미래 변화를 살펴보면, 21세기 말에 연평균기온은 현재 대비 저탄소 시나리오(SSP1-2.6)에서 지역에 따른 차이가 거의 없으나, 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)에서 기온 상승 폭은 5.9℃ ~ 6.5℃로 지역별 편차가 비교적 클 것으로 전망된다. 이에 따라 21세기 말에는 A2 지역의 기온이 가장 크게 상승하여 C1 지역보다 기온이 더 높아질 것으로 예상된다. 지역별 총강수량 변화는 저탄소/고탄소 시나리오의 경우, C1 지역에서 209 mm/ 456 mm로 가장 크게 증가하고 B1 지역에서 21 mm/155 mm로 가장 작게 증가한다. 현재 강수량이 많은 지역에서 미래 강수량 증가 폭이 더 크며, 같은 지역 내의 강수량 편차는 미래에 모든 지역에서 증가한다.

미래 극한 고온 지수 TXx는 모든 시나리오와 모든 지역에서 상승한다. 특히 고탄소 시나리오의 중부지역(A1, A2, B1)에서 상승 폭이 크다. 저탄소/고탄소 시나리오의 경우, A2 지역에서 3.3℃/8.3℃로 가장 크게 상승하고 C1 지역에서 1.9℃/6.0℃로 가장 작게 상승할 것으로 전망된다. 현재 기준 20년 재현 수준의 TXx는 21세기 말, 모든 지역에서 최소 1.5년에 한 번 발생하여 미래에 폭염 피해가 극심해질 것으로 예상된다. RX1D도 미래에 증가가 예상되며, 고탄소 시나리오의 남부지역(B2, C1, C2)에서 증가 폭이 크다. 특히 미래에 C1 지역의 RX1D는 100 mm 이상 증가하여 증가 폭이 다른 지역 대비 두 배 이상 클 것으로 전망된다. 현재 기준 20년 재현 수준의 RX1D는 저탄소 시나리오에서는 지역에서 따라 변화 특성이 다르지만, 고탄소 시나리오에서는 발생 빈도가 크게 증가할 것으로 전망된다. 특히 C1과 C2 지역에서는 현재 20년에 한 번 발생하는 극한 호우가 네 배 이상 더 자주 발생하며, 다른 지역도 극한 호우가 두 배 이상 더 자주 발생할 것으로 전망된다.

이 연구에서는 우리나라를 6개 기후 지역으로 분류하고 이들의 특성과 미래 변화를 전망하였다. 우리나라는 크게 위도와 고도에 따라 유사 기후 지역이 상세하게 분류되었다. 미래 기온은 중부지역, 강수는 남부지역에서 크게 변화할 것으로 전망하였다. 극한 기후 현상은 미래에 온실가스 농도에 따라서 모든 지역에서 더 자주 발생할 수 있음을 확인하였고, 지역에 따라 극한 기후 현상의 변화 폭에 차이가 클 수 있음을 제시하였다. 또한, 온실가스 배출이 계속 증가하는 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)뿐만 아니라 2070년대에 탄소 중립에 이르는 저탄소 시나리오(SSP1-2.6)에서도 현재 대비 21세기 말에 극한 기온과 강수의 강도가 다소 증가할 수 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 우리나라의 지역별 기후변화 적응 정책 수립 시에 고려해야 할 사항으로 사료 되며, 이와 관련하여 향후 더욱 자세한 상세한 지역별 기후변화 특성의 분석이 필요하다.

사사

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

References

Beak C, Philipp A. 2010. Evaluation and comparison of circulation type classifications for the European domain. Phys Chem Earth 35(9-12): 374-387. doi: 10.1016/j.pce. 2010.01.001

Cha SY, Suh MS. 2022. Spatio-temporal distribution characteristics and clustering of relative humidity in the Korean Peninsula (in Korean with English abstract). J Clim Res 17(3): 135-153. doi: 10.14383/cri.2022.17.3.135

Chemke R, Ming Y, Yuval J. 2022. The intensification of winter mid-latitude storm tracks in the Southern Hemisphere. Nat Clim Change 12(6): 553-557. doi: 10.1038/s41558-022-01368-8

Coumou D, Lehmann J, Beckmann J. 2015. The weakening summer circulation in the Northern Hemisphere mid-latitudes. Science 348(6232): 324-327. doi: 10.1126/ science.1261768

Forster PM, Smith C, Walsh T, Lamb WF, Lamboll R, Hall B, Hauser M, Ribes A, Rosen D, Gillett NP, et al. 2024. Indicators of global climate change 2023: Annual update of key indicators of the state of the climate system and human influence. Earth Syst Sci Data 16(6): 2625-2658. doi: 10.5194/essd-16-2625-2024

Hoffmann P, Schlunzen KH. 2013. Weather pattern classification to represent the urban heat island in present and future climate. J Appl Meteorol Climatol 52: 2699-2714. doi: 10.1175/jamc-d-12-065.1

Hosking JRM, Wallis JR. 1997. Regional frequency analysis. Cambridge: Cambridge University Press. doi: 10.1017/CBO9780511529443

Kang JM, Shaw TA, Sun L. 2023. Arctic Sea ice loss weakens Northern Hemisphere summertime storminess but not until the late 21st century. Geophys Res Lett 50(9): e2022GL102301. doi: 10.1029/2022GL102301

Kang K, Choi Y, Kim Y, Min S, Choi D, Kim K, Lee D. 2021. The classification of climate types and the delineation of their climatic characteristics using new normals (1991-2020) in the Republic of Korea (in Korean with English abstract). J Clim Res 16(3): 179-195. doi: 10.14383/cri.2021.16.3.179

Kim DH, Kim JU, Kim TJ, Byun YH, Chang EC, Cha DH, Ahn JB, Min SK. 2022. 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 (in Korean with English abstract). J Clim Change Res 13(5): 525-543. doi: 10.15531/KSCCR.2022.13.5.525

Kim HK, Kim KS, Lee JW, Lee YS. 2017. Cluster analysis by month for meteorological stations using a gridded data of numerical model with temperatures and precipitation (in Korean with English abstract). J Korean Data Inf Sci Soc 28(5): 1133-1144.

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, 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/cri.2022.17.2.89

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℃, 2℃, and 3℃ 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 MK, Han MS, Jang DH, Baek SG, Lee WS, Kim YH, Kim S. 2012. Production technique of observation grid data of 1 km resolution (in Korean with English abstract). J Clim Res 7(1): 55-68.

Kim MK, Lee DH, Kim JU. 2013. Production and validation of daily grid data with 1 km resolution in South Korea (in Korean with English abstract). J Clim Res 8(1): 12-25.

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/cri.2018.13.1.71

Moon N, Yeom W, Park DH, Ahn JH. 2023. A study on the segmentation of heat wave warning zones using cluster analysis (in Korean with English abstract). J Korean Soc Hazard Mitig 23(1): 27-36. doi: 10.9798/ KOSHAM.2023.23.1.27

NIMS (National Institute of Meteorological Sciences). 2021. The prospect report of climate change over South Korea.

Park C, Choi Y, Moon JY, Yun WT. 2009. Classification of climate zones in South Korea considering both air temperature and rainfall (in Korean with English abstract). J Korean Geogr Soc 44(1): 1-16.

Philipp A, Marta PM, Jacobeit J, Fereday DR, Jones PD, Moberg A, Wanner H. 2007. Long-term variability of daily North Atlantic-European pressure patterns since 1850 classified by simulated annealing clustering. J Clim 20(16): 4065-4095. doi: 10.1175/jcli4175.1

Shaw TA, Arias PA, Collins M, Coumou D, Diedhiou A, Garfinkel CI, Jain S, Roxy MK, Kretschmer M, Leung LR. 2024. Regional climate change: Consensus, discrepancies, and ways forward. Front Clim 6: 1391634. doi: 10.3389/ fclim.2024.1391634

Yeo IK. 2011. Clustering analysis of Korea's meteorological data (in Korean with English abstract). J Korean Data Inf Sci Soc 22(5): 941-949.