

# 미래 기후변화 시나리오에 따른 한반도 유역별 극한 강수 변화 전망

김선태\*† · 이우섭\*\* · 정일원\*\*\* · 한정민\* · 변영화\*\*\*\* · 김진욱\*\*\*\*\*

\*APEC기후센터 기후분석과 선임연구원, \*\*APEC기후센터 기후분석과 과장, \*\*\*국토안전관리원 정책연구실 실장, \*\*\*\*국립기상과학원 기후변화예측연구팀 팀장, \*\*\*\*\*국립기상과학원 기후변화예측연구팀 연구사

## Change in Extreme Precipitation by Watersheds of South Korea Under Future Shared Socio-Economic Pathway (SSP) Scenarios

Kim, Seon Tae\*† · Lee, Woo-Seop\*\* · Jung, Il-Won\*\*\* · Han, Jeong-Min\* · Byun, Young-Hwa\*\*\*\* and Kim, Jin-Uk\*\*\*\*\*

\*Research Fellow, Climate Analytics Department, APEC Climate Center, Busan, Korea

\*\*Department Head, Climate Analytics Department, APEC Climate Center, Busan, Korea

\*\*\*Department Head, Policy Research Department, Korea Authority of Land and Infrastructure Safety, Gyeongsangnam-do, Korea

\*\*\*\*Director, Climate Change Research Team, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju-do, Korea

\*\*\*\*\*Research Scientist, Climate Change Research Team, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju-do, Korea

### ABSTRACT

For the assessment of the future flood risk of 26 watersheds in South Korea, we analyze the change in extreme precipitation with a 100-year return period under global warming. We use downscaled high-resolution observation and bias-corrected future climate change scenario data from the National Institute of Meteorological Sciences for this purpose. In the high-CO<sub>2</sub> emission scenario (SSP5-8.5), the average rates of change in 100-year return period precipitation at 26 watersheds is projected to increase about 29%, 46%, and 53% in the early (2021 ~ 2040), mid (2041 ~ 2060), and late (2081 ~ 2100) 21st century, respectively, relative to the present climate. The number of watersheds with a 100-year return period precipitation increase of 50% or more compared to the present climate is predicted to increase significantly in the late 21st century. On the other hand, in the low-CO<sub>2</sub> emission scenario (SSP1-2.6), after the mid-21st century, the increase in 100-year return period precipitation is much less than that of the high-CO<sub>2</sub> emission scenario since the rate of change is projected to increase about 31%, 31%, and 29% in the early, mid, and late periods, respectively. Furthermore, most watersheds show a 100-year return period precipitation increase of 50% or less. These results imply that the possibility of flooding by extreme precipitation can be reduced through achievement of a carbon-neutral policy.

*Key words: Watershed, Extreme Precipitation, Return Period, SSP, Flood, Climate Change Scenario*

## 1. 서론

지구온난화로 지구 온도는 가파르게 상승하고 있으며, 1850 ~ 1900년 평균기온 대비 최근 20년 (2001 ~ 2020년)은 약 0.99°C 상승하였고(IPCC, 2021), 최근 5년(2018-2022) 평균기온은 1.17 ± 0.13°C 높았다(WMO, 2022). 이와 같은 지구 온난화로 인한 기후변화로 인하여 기록적인 이상기후가 세계 곳곳에서 발생하고 있다. 특히 이례적인 폭우로 인

한 재산 피해와 인명 피해가 증가하고 있다. 2021년 7월 중반 서유럽에는 기록상 가장 심각한 홍수를 겪었는데, 특히 피해가 심했던 독일 서부지역과 벨기에 동부지역에는 7월 14 ~ 15일에 100 ~ 150 mm의 비가 내렸다(WMO, 2022). 2022년 파키스탄은 건기인 3 ~ 5월에 폭염을 겪었으며, 6월 이후 우기에는 폭우 및 홍수로 수천 명의 인명 피해와 이재민이 발생하였다. 일부 지역은 월평균 강수량 보다 6-7배 이상의 강수가 내린 곳도 있으며, 8월강수는 1961년 이

†Corresponding author : seontae.kim@apcc21.org (12 Centum 7-ro, Haeundae-gu, Busan, 48058, Korea. Tel. +82 51-745-3973)

ORCID 김선태 0000-0003-2628-0904  
이우섭 0000-0003-1677-1929  
정일원 0000-0002-3978-4119

한정민 0000-0001-8261-6404  
변영화 0000-0002-6074-4461  
김진욱 0000-0001-9892-9915

후 최고를 기록한 것으로 보고 되었다(UNDP, 2022).

우리나라는 1973년 이후로 가장 긴 장마와 집중호우, 태풍으로 2020년에는 수조 원의 재산 피해 및 수십 명의 인명 피해가 발생하였으며, 이는 최근 10년(2010~2019) 대비 약 3배 이상의 피해이다(KMA, 2021). 또한, 2022년 8월 상순(8~11일)에는 수도권, 서울을 중심으로 정체전선이 위치하면서, 100 mm가 넘는 기록적인 강수가 내려 저지대 곳곳이 침수되는 등 큰 피해가 발생하였다. 특히 국립기상과학원 “한반도 100년 기후변화” 보고서(NIMS, 2018)에 따르면, 지난 106년 동안 우리나라 강수량은 증가(+16.3 mm/10년)하였으나, 강수일수에는 변화가 없었으며, 또한 강한 강수의 강도와 일수는 증가하였다고 보고되었다. 이는 우리나라에서 집중호우가 증가하는 경향성을 의미하는 것이다.

짧은 시간에 많이 내리는 집중호우는 설계 수문량을 초과하여 수공구조물에 피해를 입히게 되어 홍수를 유발하게 되는데, 최근 들어 설계 빈도를 초과하는 집중호우가 증가하고 있는 추세이다(Oh et al., 2009). 예를 들면 2020년 8월 초반에 설계 빈도를 초과하여 내린 집중호우로 섬진강 제방이 붕괴하는 사고가 있었고, 주변 농경지와 마을 수십여 가구가 침수되는 피해가 발생하였다. 더욱이 미래 기후변화 시나리오에 따른 모형 자료의 분석은 미래 기후에서 더욱더 집중호우가 증가할 것으로 전망하고 있다(NIMS, 2020). 그러므로 미래 기후변화에 따른 수공구조물의 홍수 위험성을 저감 하기 위해서, 수공구조물의 설계 시 기후변화의 영향을 고려해야 할 필요성이 증가하고 있는 것이다.

수공구조물은 설계 홍수량을 기반으로 하여 설계가 이루어지지만, 관측 자료가 충분하지 않아서, 재현 빈도 강수량을 활용하고 있다(ME, 2019). 수공 구조물의 설계 빈도는 과거의 강수량 분석을 통해서 산정된 재현빈도 강수량을 기반으로 결정된다. 그러나, 우리나라는 최근 기후변화로 인해 설계 빈도를 초과하는 극한 강수량이 증가하고 있기 때문에 미래 지구 온난화에 대한 대응을 위해서는 미래 기후변화에 따른 재현 빈도 강수량 변화 분석이 필요하다.

이 연구에서는 국립 기상과학원에서 제공하고 있는 1 km 관측 및 두 종류의 미래 시나리오 자료(SSP, Shared Socio-economic Pathway; O'Neill et al. 2014)를 활용하여 남한 권역별로 100년 재현 빈도 강수량을 산정하였으며, 현재 기후 대비 미래 기후변화에 따른 재현 빈도 강수량 변화율로서 정량화하여 하천 권역별 홍수 위험성을 평가하였다.

## 2. 자료 및 연구방법

### 2.1. 고해상도 남한 상세 관측 및 기후변화 격자 자료

남한 극한 강수 분석을 위해서 우리나라의 지형효과를 고려하는 1km의 고해상도 격자형 관측자료 및 SSP 기반 미래 기후 변화 시나리오 자료를 사용하였다(Kim et al. 2022b). 남한 상세 고해상도 관측자료는 고도, 거리, 지향면, 해양도 등을 고려한 통계적 상세화 방법인 MK-PRISM (Modified Korean - Parameter elevation Regressions on Independent Slopes Model) (Kim et al. 2012; 2013a; 2013b)을 적용하여 생산되었다. PRISM 상세화 방법은 다른 상세화 방법(KRIGING, Inverse Distance Weighting 등)에 비해서 산악 지역이 많은 우리나라의 지형적인 특성을 잘 나타낸다고 알려져 있다(Lee et al. 2014). MK-PRISM의 입력 자료로서 2000~2019 기간 동안 중관기상관측소(ASOS, Automated Synoptic Observing System) 97개소와 자동기상관측소(AWS, Automatic Weather System) 508개, 총 605개 관측소자료가 사용되었다.

수평해상도 1 km의 고해상도 기후변화 시나리오는 MK-PRISM에 기반한 PRIDE (PRISM-based Dynamic downscaling Error correction) 기법을 사용하여 산출되었다(Kim et al., 2016). 자료 산출 과정을 간략하게 소개하자면 [자세한 방법 및 검증 결과는 Kim et al.(2022b), Kim et al.(2021), Kim and Kim (2018) 참조], CORDEX (COordinated Regional climate Downscaling Experiment) 동아시아 2단계 프로젝트의 5개의 지역 기후 모델들(HadGEM3-RA, CCLM, WRF, RegCM, GRIMs) 통해 생산된 CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) 온실가스 경로인 SSP 기반 25 km 해상도의 기후변화 시나리오 자료를 Barnes 객관 분석 기법(Koch et al., 1983) 적용하여 남한 상세 관측자료와 같은 1 km 해상도로 내삽하였다. 내삽된 고해상도 기후변화 시나리오 자료의 계통오차[지역기후 모델들의 계통오차 분석은 Kim et al.(2020, 2022a) 참조]는 제거하고 기후변화 강제력에 대한 반응은 유지하기 위해서 자료의 일별 계절 사이클을 남한 상세 관측자료의 일별 계절 사이클로 교체하였다. 그리고, 계통오차가 비교적 큰 강수량에 대해서는 QDM (Quantile Delta Mapping, Cannon et al. 2015) 방법으로 추가적으로 편의 보정을 수행하였다. 여기서 미래 기후 시나리오에 대한 지역 기후 모델들의 적분을 위한 경계장은 CMIP6 모형들 중 하나인

UKESM (UK Earth System Model)의 6시간 간격, 37층의 모의자료가 사용되었다(Sellar et al., 2019). CMIP6 온실가스 표준 경로는 총 5개의 종류가 있으며, 남한 상세 기후 변화 자료는 SSP1-2.6과 SSP5-8.5 경로를 기반으로 생산되었다. 전자는 재생에너지 기술 발달로 화석연료 사용이 최소화되고 친환경적으로 지속한 경제성장을 가정하는 저탄소 시나리오이며, 후자는 산업기술의 빠른 발전에 중점을 두어 화석연료 사용이 높고 도시 위주의 무분별한 개발 확대를 가정하는 고탄소 시나리오이다.

**2.2. 재현빈도 극한 강수량 분석**

한반도에서 재현 빈도 극한 강수량 분석을 위해서 먼저 확률 분포형을 정의하고, 시계열 자료를 활용하여 정의된 확률 분포형의 매개변수들을 평가하게 된다. 일반적으로 극값이 양으로 왜곡되어있는 강수량 자료에 자주 선정되는 분포형은 Gumbel과 GEV (Generalized Extreme Value) 분포형이며, 전자의 분포형은 후자 분포형의 위치 매개변수가 0인 경우에 해당하는 2변수 확률 분포형이다.

GEV 분포의 누가분포함수 와 확률 밀도함수는 다음과 같이 나타난다.

$$F(x) = \exp\left[-\left(\frac{\beta(x-x_0)}{\alpha}\right)^{(1/\beta)}\right] \quad (1)$$

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left[1 - \frac{\beta(x-x_0)}{\alpha}\right]^{(1/\beta)-1} \cdot F(x)$$

여기서  $\alpha$ 는 규모 매개변수,  $\beta$ 는 형상 매개변수,  $x_0$ 는 위치 매개변수이다. 위의 식에서  $\beta=0$  일 때, Gumbel 분포의 다음과 같은 누가분포함수와 확률 밀도 함수를 얻을 수 있다.

$$F(x) = \exp\left[-\exp\left[\frac{(x-x_0)}{\alpha}\right]\right] \quad (2)$$

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[-\frac{(x-x_0)}{\alpha} - \exp\left[-\frac{(x-x_0)}{\alpha}\right]\right],$$

$-\infty < x < \infty$

두 확률 분포의 매개변수를 추정하는 방법으로서 모멘트법, 최우도법, 확률 가중 모멘트 법이 있으며, 이 연구에서는 환경부 홍수량 산정 표준지침(ME, 2019)에서 추천하고 있는 확률 가중 모멘트 법을 사용하여, 매개변수를 추정하였다. 재현빈도  $T$ 에 대한 강수량  $x_T$ 은 위에서 GEV 와 Gumbel 분포형의 누가분포함수의 역함수를 사용하여 다음과 같이 각각 계산할 수 있다.

$$x_T = x_0 + \frac{\alpha}{\beta} \left[1 - \left\{ -\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right) \right\}^\beta\right] \quad (3)$$

$$x_T = x_0 - \alpha \ln - \ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)$$

환경부 홍수량 산정 표준 지침(ME, 2019)에서는 한반도 강수 자료에 적합한 확률 분포형으로서 지역 빈도 해석을 위해서 GEV 분포형을, 지점 빈도 해석을 위해서 Gumbel

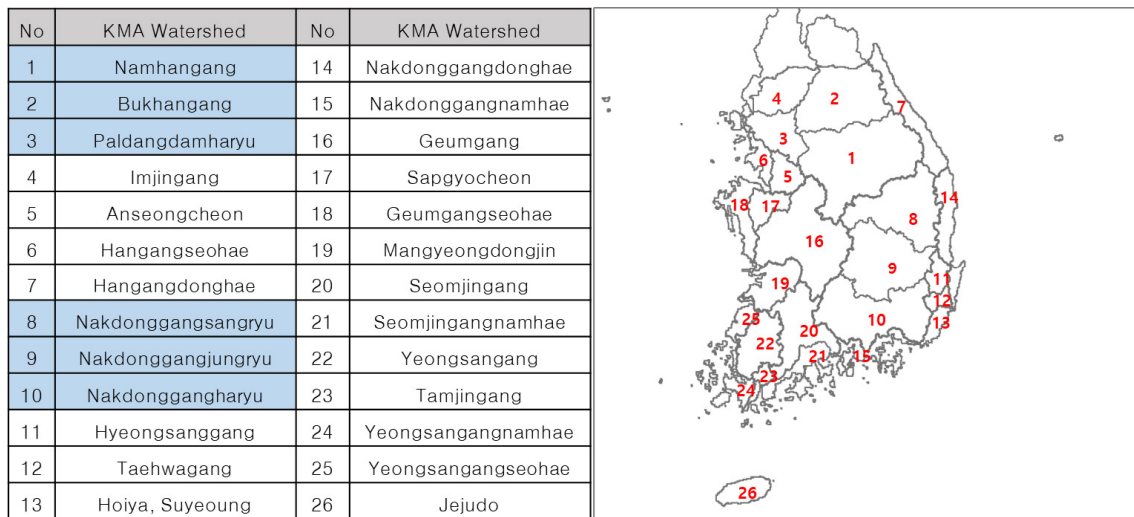


Fig. 1. Spatial distribution of 26 watersheds over South Korea

분포형을 추천하고 있다. 이 연구에서는 두 개의 확률 분포형을 적용하여 재현빈도 강수량을 비교하였으며, 이 연구의 주요 결론에는 영향을 미치지 않음을 확인하였다. 그러므로 대부분의 연구결과는 Gumbel 분포형의 분석결과를 중심으로 기술되었다. 아울러 20년, 50년, 100년 재현 빈도 강수량에 대한 분석이 수행되었는데, 미래 기후변화에 따른 재현빈도 강수량 변화에 대하여 재현빈도 년 수에 상관없이 일치하는 결과를 보였다. 그러므로 본 논문에서는 100년 재현빈도 결과를 중심으로 다루었다.

환경부에서 수자원의 효율적인 개발, 관리 및 기간 간 자료의 공동활용을 위해 유역을 세분화하여 설정한 수자원 단위지도를 정의하였는데, 대권역 21개, 중권역 117개, 표준유역 850개로 분할 되어있다. 대권역은 5대강(한강, 낙동강, 영산강, 금강, 섬진강)과 지형 및 인문사회학적 특성에 따른 수질, 환경오염의 균역경계 등을 고려하였고, 중권역은 대권역 내 하천의 분류를 기준 자연하천의 합류점 등을 고려하여 구분되었다. 표준유역은 중권역 내 자연하천의 합류점과 수자원의 주요시설물 및 홍수 통계지점 등을 고려하여 분할 되었다. 기상청은 환경부 수자원 단위 지도의 21개 대권역 중 가장 면적이 큰 한강 유역(남한강, 북한강, 팔당댐 하류, 임진강)과 낙동강 유역(낙동강상류, 낙동강중류, 낙동강하류)을 세분화한 26개의 하천 대권역으로 구분하였는데, 본 연구에서는 기상청의 26개 대권역별로 분석을 수행하였다(Fig. 1). 하천 대권역 내에 각 격자 지점에서 연 최대 일 강수량들을 영역 평균한 값을 사용하여, 현재 기후 대비 (2000~2019년) 기후 변화 시나리오 별 21세기 전반기 (2021~2040), 중반기(2041~2060), 후반기(2081~2100)에 대해서 재현빈도 강수량 변화를 계산하여 극한 강수 발생에 의한 권역별 홍수 발생 위험성을 정량화 하였다. 여기서 미래 기후변화에 따른 재현빈도 강수량은 5개의 지역 모형에 대해서 개별적으로 계산하여 평균한 값으로 평가되었다.

Fig. 2는 일 누적 강수량의 연 최댓값이 존재하는 달을 보여준다. 대부분 연 최대 일 누적 강수량은 여름철인 6~8월에 존재하였다. 일부 권역에서는 봄철과 가을철에 연 최대 일 누적 강수량을 기록하기도 하였는데, 특히 2000년 중·후반(즉 2012년 이후)에는 9월에 최댓값이 나타나는 권역들이 증가하였다. 2014년에 금강, 삼교천, 금강서해 권역에서 10월에 일 누적 최대 강수량을 기록하였고, 삼교천, 금강서해 권역은 2019년 11월에 최대 강수량을 기록하였다. 제주도 권역에서는 2005년과 2009년 4월에, 2013년 5월에 나타났다. 2008년에는 많은 권역에서 5월에 일 년 중 일 누적 최대 강수를 기록하였는데, 섬진강남해, 영산

강, 탐진강, 영산강남해, 영산강서해, 회야/수영, 낙동강남해 권역이 포함된다. 이들 권역 중에 탐진강, 영산강남해, 섬진강남해, 회야/수영, 낙동강남해 권역에서 2013년에서도 5월에 일 누적 최대 강수량을 보였다. 2012년 이후 많은 권역에서 연 최대 일 누적 강수량이 가을에 나타나는 경향성에 대해서는 가을 장마, 가을 태풍 등과 관련 지을 수 있을 것으로 보이거나 추후 연구가 필요해 보인다.

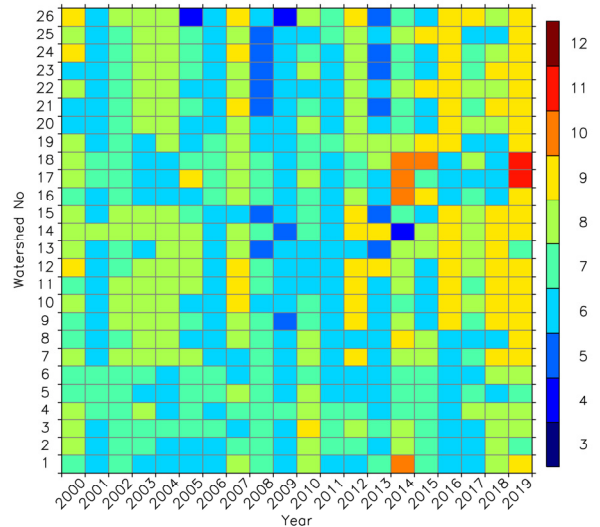


Fig. 2. Color charts for the calendar month in which the annual maximum of daily total precipitations occurs in the 26 watersheds from 2000 to 2019

### 3. 연구결과

#### 3.1. MK-PRISM 강수 자료 검증

미래 기후변화에 따른 재현빈도 강수량 변화를 분석하기 앞서 관측 자료인 ASOS 강수 자료와 비교를 통해서 PRISM 강수 자료의 검증을 수행하였다. 먼저 Fig. 3에서 보여주는 것처럼 ASOS 38개 지점에서 2000~2019 기간 동안 연 최대 일 누적 강수량의 상관계수와 평균 제곱근 오차(RMSE, Root Mean Squared Error) 분석을 수행하였다. 3개의 관측소 지점 즉, 춘천, 대구, 천안 지점(각각 0.82, 0.83, 0.81)을 제외하고 상관계수는 대부분 지역에서 0.9 이상의 값을 보였다. 평균 제곱근 오차는 위의 세 개 지점을 포함 서울, 부산 관측소 지점에서 15 mm d<sup>-1</sup> 이상의 값을 보인 것을 제외하고 모든 관측소 지점에서 10 mm d<sup>-1</sup> 이하로 작았다.

Fig. 4는 ASOS 38개 지점에서 관측 자료와 PRISM 자

료에서 평가된 100년 재현 빈도 강수량 분포 및 두 자료 사이의 차이를 보여준다. 관측 자료는 남한 북부와 남부 및 해안 지역의 관측소 지점에서 남한 중부 내륙 지역의 관측소 지점 보다 더 큰 재현 빈도 강수량을 갖는 특징을 보였다. 이와 같은 지역적인 편차 분포의 특징을 PRISM 자료에서도 비슷하게 나타났다. 그런데 관측과 차이를 살펴보면, PRISM 자료에서 대부분 지점의 100년 재현빈도 강수량이 다소 과소 평가되었다. 특히 Fig. 3에서 대구 지점을 제외하고 상관계수가 상대적으로 작고, 오차가 컸던 관측소 지점에서 관측 보다 PRISM 자료에서 약 9% 이상 작게 평가되었다. 그 중에서 천안 지점에서 과소 평가 정도가 가장 컸는데 ASOS 자료에서  $270.9 \text{ mm d}^{-1}$  이고, PRISM 자료에서는  $35 \text{ mm d}^{-1}$  작은  $253.9 \text{ mm d}^{-1}$  (즉 관측 보다 13% 과소 평가)로 100년 재현빈도 강수량이 산출되었다. 4개의 지점들 이외에는 ASOS 자료에 비해 PRISM 자료에서 평

가된 재현 빈도 강수량의 차이가 평균적으로 2.7% 정도로 작았다. 이와 같이 PRISM 자료에서 100년 재현 빈도 강수량이 과소 평가되는 이유는 PRISM 자료의 일 강수량이 관측에 비해 특히 6~8월에 크게 과소 평가되는 것과 관련되어 있다(Kim et al. 2022a). 그러므로 다음 절의 미래 기후 변화에서 100년 재현빈도 강수량의 정확한 증가/감소 값을 활용하는데 있어서 다소 주의가 요구된다. 하지만 이 같은 오차가 재현빈도 강수량의 미래 변화 경향성에 대한 주요 결과에는 영향을 미치지 않을 것으로 보인다.

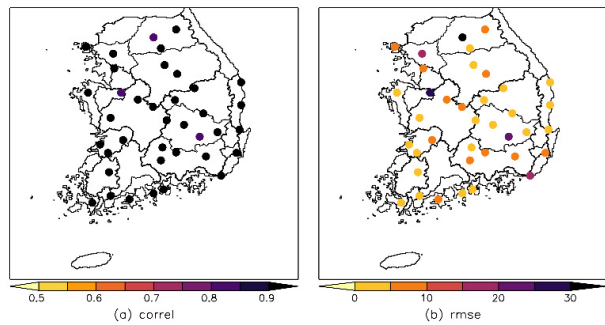


Fig. 3. Spatial distribution of correlation coefficients and root mean squared errors between ASOS data and PRISM data

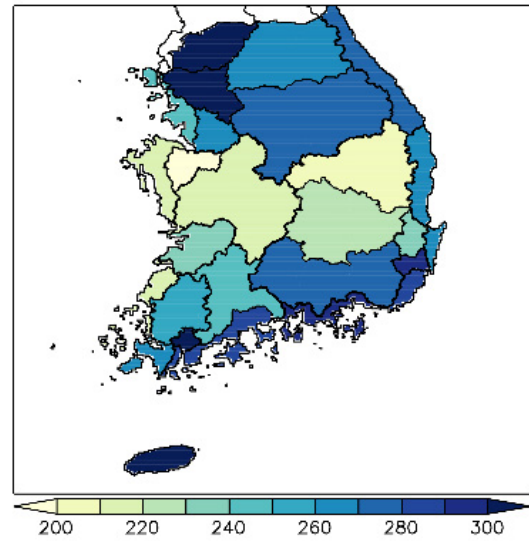


Fig. 5. Spatial distribution of the 100-year return period precipitation ( $\text{mm d}^{-1}$ ) in the 26 watersheds estimated over 2000~2019

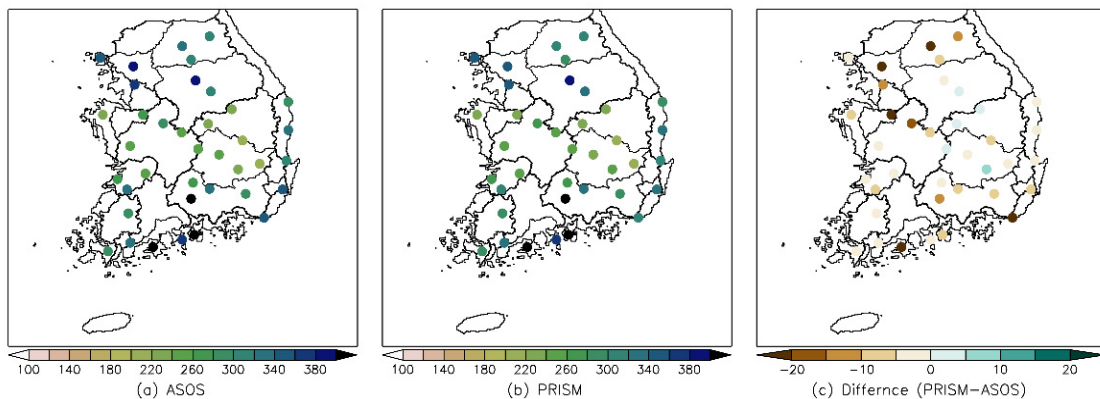


Fig. 4. The 100-year return period precipitations ( $\text{mm d}^{-1}$ ) estimated from ASOS and PRISM data, and their difference. The return period precipitations are estimated over 2000~2019

### 3.2. 미래 기후에서 남한 하천 대권역별 극한 강수량 전망

Fig. 5는 현재기후(2000~2019)에서 26개 하천 권역별로 평가된 100년 재현빈도 강수량의 공간 분포를 보여준다(평가된 값은 Table 1 참조). 전반적인 남한 지역 사이의 재현빈도 강수량 차이 특징은 이전 절에서 평가된 관측소 지점에서 평가된 재현빈도 강수량의 지역간 차이와 상당히 유사하였다. 즉 남한 내륙에서 권역들 중 서북부의 권역들 즉 임진강(314.4 mm d<sup>-1</sup>), 팔당댐 하류(308.1 mm d<sup>-1</sup>), 남해에 인접한 권역들 즉 태화강(296.8 mm d<sup>-1</sup>),

해(288.4 mm d<sup>-1</sup>), 낙동강남해(296.9 mm d<sup>-1</sup>), 회야-수영(287.2 mm d<sup>-1</sup>) 권역에서 상대적으로 상당히 큰 재현 빈도 강수량이 평가되었다. 남한 중부 지역의 권역에서 상대적으로 작은 재현 빈도 강수량이 평가되었는데, 삽교천(187.1 mm d<sup>-1</sup>), 낙동강상류(200.7 mm d<sup>-1</sup>), 금강서해(211.9 mm d<sup>-1</sup>), 금강(213.5 mm d<sup>-1</sup>) 권역이 포함된다. 26개 권역 중 제주도 권역(431.3 mm d<sup>-1</sup>)에서 가장 큰 재현빈도 강수량이 평가되었다.

미래 기후변화에서는 두가지 시나리오 즉 고탄소/저탄소 시나리오 경우 모두 현재 기후대비 모든 권역에서 미래 전반기(2021~2040), 중반기(2041~2060), 후반기(2081~

Table 1. Lists of 100-year return period precipitations (mm d<sup>-1</sup>) over a current climate period (P<sub>obs</sub>, 2000~2019) and future scenario periods (2021~2040, 2041~2060, 2081~2100) in the 26 watershed regions. P<sub>SSP126</sub> and P<sub>SSP585</sub> indicate SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenario, respectively

No.	2000~2019	2021~2040	2041~2060	2081~2100	2021~2040	2041~2060	2081~2100
	P <sub>obs</sub>	P <sub>SSP126</sub>			P <sub>SSP585</sub>		
1	271.8	270.4	325.7	246.9	291.3	296.6	280.2
2	262.4	249.4	230.2	231.7	248.4	288.1	311.7
3	308.1	277.7	330.9	259.5	273.6	292.3	322.4
4	318.4	249.1	268.8	232.4	263.4	299.6	284.3
5	264	364.2	357.2	300.8	280.0	322.5	339.1
6	246.5	275.3	252.3	276.2	247.6	320.8	342.9
7	270.6	308.0	327.2	315.1	253.0	339.6	332.0
8	200.7	299.0	280.6	353.4	313.7	358.9	389.4
9	220.1	360.4	348.1	316.7	329.1	430.5	374.8
10	278	330.1	356.4	301.3	321.3	347.4	392.2
11	239.9	398.0	287.8	274.2	347.4	313.4	370.2
12	296.8	312.2	356.5	351.1	323.0	361.3	380.8
13	287.2	310.8	341.2	305.8	344.8	398.0	369.0
14	269.3	360.1	364.8	386.7	367.5	468.0	407.9
15	296.9	283.7	301.8	321.6	347.7	382.1	457.3
16	213.5	345.7	327.9	377.1	352.3	362.3	467.4
17	187.1	305.5	320.4	298.8	336.0	329.8	375.4
18	211.9	363.1	317.8	348.4	328.0	416.8	407.3
19	231.6	369.0	350.5	338.9	318.9	385.7	449.9
20	244.7	391.8	388.1	424.2	423.0	462.9	479.1
21	288.4	398.2	348.3	373.5	331.6	393.3	399.0
22	254.5	381.5	374.9	394.6	411.8	472.1	476.2
23	304	430.1	334.5	440.0	416.4	431.7	470.1
24	266.9	390.7	436.3	384.6	402.3	417.0	449.7
25	218.7	412.7	464.5	409.1	404.3	425.2	496.5
26	431.3	593.9	599.3	711.9	605.6	766.1	743.1

2100)에서 100년 재현빈도 강수량 크기가 증가하였다 (Table 1, 2와 Fig. 6). 고탄소 시나리오에서 현재 기후대비 미래 우리나라 하천 대권역 100년 재현빈도 강수량은 현재 기후(187.1 mm d<sup>-1</sup> ~ 431.4 mm d<sup>-1</sup>) 대비 21세기 전반기에 21.36 ~ 174.26 mm d<sup>-1</sup>(평균 76.9 mm d<sup>-1</sup>), 중반기에 57.96 mm d<sup>-1</sup> ~ 334.84 mm d<sup>-1</sup>(평균 123.0 mm d<sup>-1</sup>), 후반기에 70.8 ~ 311.8

mm d<sup>-1</sup>(전 권역 평균 141.7 mm d<sup>-1</sup>) 증가할 것으로 전망된다. 즉 현재기후 대비 전/중/후반기에 각각 9.2 ~ 55.7%(평균 29% 증가), 21.3 ~ 77.6%(평균 46%), 33.2 ~ 72.7%(평균 53%) 증가하였으며, 고탄소 시나리오 전반기에서 중반기까지 상당한 증가경향을 보이고, 후반기에 다소 증가폭이 완화된 경향을 보였다. 이에 반해 저탄소 시나리오의 경우

Table 2. Lists of the increase rate (%) of the 100-year return period precipitations in the 26 watershed regions estimated over future scenario periods (2021 ~ 2040, 2041 ~ 2060, 2081 ~ 2100) relative to those estimated over 2000 ~ 2019 (P<sub>obs</sub>). P<sub>SSP126</sub> and P<sub>SSP585</sub> indicate SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenario, respectively

No.	2021 ~ 2040	2041 ~ 2060	2081 ~ 2100	2021 ~ 2040	2041 ~ 2060	2081 ~ 2100
	$\Delta P (= P_{SSP126} - P_{obs})/P_{obs}$			$\Delta P (= P_{SSP585} - P_{obs})/P_{obs}$		
1	12.4%	17.9%	9.9%	23.6%	21.3%	38.1%
2	19.0%	35.9%	33.8%	23.1%	37.7%	45.1%
3	26.8%	41.6%	24.8%	30.6%	35.3%	46.0%
4	29.6%	45.9%	28.5%	27.0%	33.6%	55.9%
5	17.7%	29.2%	15.8%	30.6%	50.8%	39.8%
6	33.9%	44.6%	22.3%	30.3%	40.9%	59.1%
7	27.7%	21.2%	39.4%	30.2%	33.9%	72.7%
8	24.3%	14.7%	15.4%	23.8%	43.6%	55.3%
9	25.1%	14.6%	25.5%	12.5%	45.8%	55.8%
10	30.6%	14.3%	25.3%	18.0%	49.9%	46.5%
11	24.7%	17.0%	47.3%	30.8%	49.6%	62.3%
12	34.2%	17.4%	25.8%	11.7%	32.5%	34.4%
13	28.5%	22.0%	18.0%	11.0%	34.3%	56.6%
14	5.3%	12.1%	19.4%	29.1%	41.9%	69.8%
15	28.5%	26.3%	32.9%	38.7%	59.0%	60.4%
16	16.7%	25.9%	8.9%	23.4%	40.3%	33.2%
17	44.5%	74.1%	32.0%	55.7%	58.5%	49.8%
18	31.1%	56.2%	22.5%	29.1%	38.0%	52.1%
19	33.0%	41.3%	36.1%	9.2%	46.6%	43.3%
20	47.3%	42.3%	29.4%	34.5%	75.9%	53.2%
21	35.9%	34.6%	47.1%	46.7%	60.5%	66.1%
22	56.4%	13.1%	7.8%	36.5%	23.1%	45.5%
23	41.5%	10.0%	44.7%	37.0%	42.0%	54.6%
24	34.9%	36.7%	44.9%	37.7%	75.4%	52.8%
25	66.5%	63.3%	37.5%	28.0%	47.5%	55.1%
26	37.7%	39.0%	65.1%	40.4%	77.6%	72.3%

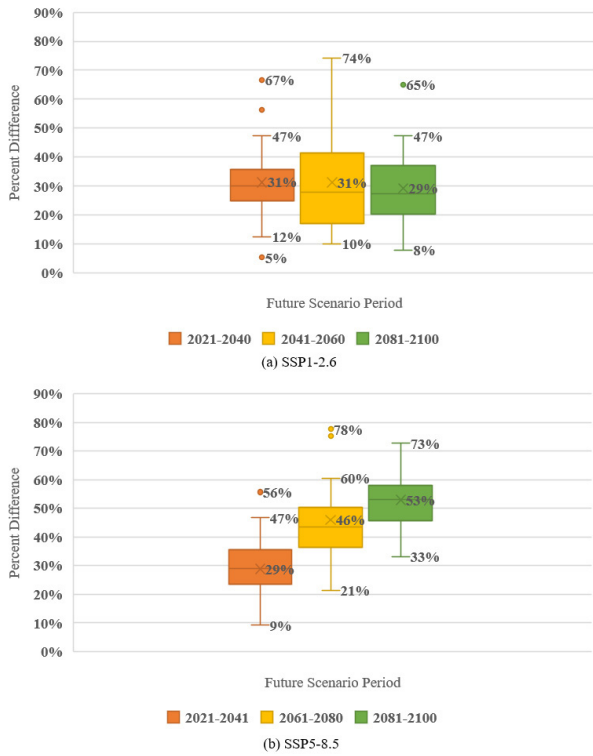


Fig. 6. The whisker–box plots for the increase rate (%) of the 100-year return period precipitations in the 26 watershed regions estimated over future scenario periods (2021 ~ 2040, 2041 ~ 2060, 2081 ~ 2100) relative to those estimated over 2000 ~ 2019

에는 고탄소 시나리오 경우보다 100년 재현 빈도 강수량 증가가 상당히 감소하였는데, 현재 대비 21세기 전반기에 14.4 ~ 162.6 mm d<sup>-1</sup>(평균 82.6 mm d<sup>-1</sup>), 중반기에 29.5 ~ 168.0 mm d<sup>-1</sup>(평균 81.1 mm d<sup>-1</sup>), 후반기 18.9 ~ 280.6 mm d<sup>-1</sup>(평균 80.4 mm d<sup>-1</sup>) 증가할 것으로 전망되었다. 즉 전/중/후반기에 증가 경향성이 나타나지 않았으며, 각각 현재 기후 대비 전 권역 평균 31%/31%/29% 증가하는 것으로 예상되었다.

좀 더 자세하게 권역별로 살펴보면, 고탄소 시나리오에 대하여 현재기후 대비 100년 재현빈도 극한 강수량 증가율이 50% 이상인 권역의 수가 21세기 후반기로 갈수록 점차로 증가하는 경향을 보였는데(Fig. 7), 전, 중, 후반기 각각 1개, 7개, 16개 권역에서 50% 이상 증가하였다. 현재기후에서 가장 작은 재현 빈도 강수량을 보였던, 삼교천 권역에서 전반기에 현재 기후 대비 55.7% 증가하여 26개의 권역 중에서 가장 큰 증가 폭을 보였지만, 중/후반기에는 증가폭이 크지 않았으며(각각 58.5%와 49.8%), 오히려 후반기에는 증가폭이 다소 감소하였다. 영산강남해, 섬진강남해, 섬진강, 제주도 권역에서는 21세기 중반기에 60% 이상 대폭 증가하였다. 섬진강과 영산강 남해 권역에서 중반기에 폭증하여 현재 기후 대비 각각 75.3, 75.9% 증가하여 재현 빈도 강수량이 430.5, 468.0 mm d<sup>-1</sup>으로 평가되었고, 후반기에는 증가 폭(각각 53.2, 52.8%)이 감소하여 374.8, 407.9 mm d<sup>-1</sup>으로 재현빈도 강수량이 중반기에 비해 작게 전망되었다. 섬진강 남해 권역은 중반기에 60.5% 증가하여 462.9 mm d<sup>-1</sup>으로 평가되었고, 후반기에

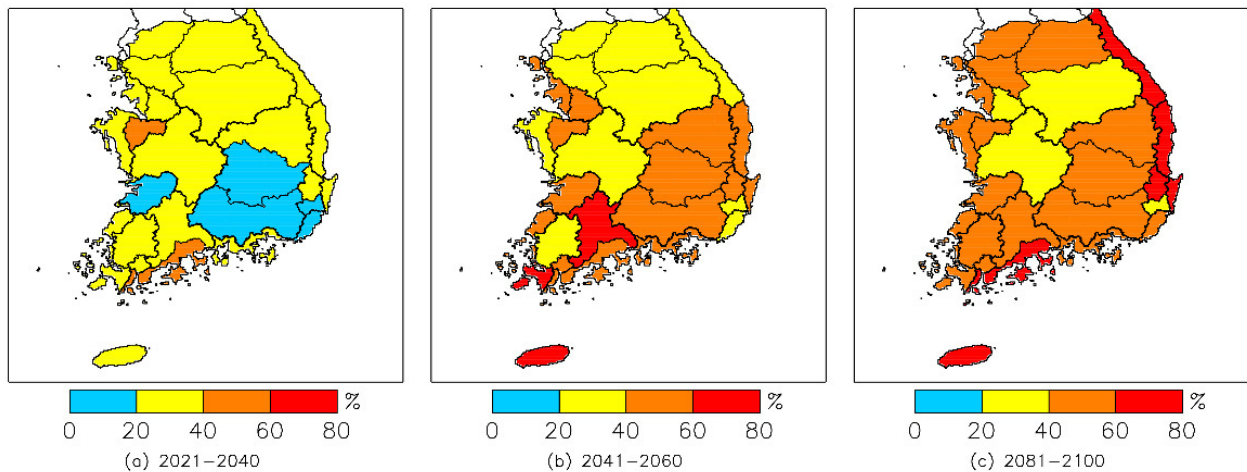


Fig. 7. The spatial distribution of the increase rate (%) of the 100-year return period precipitations in the 26 watersheds estimated over future scenario (SSP5-8.5) periods (2021 ~ 2040, 2041 ~ 2060, 2081 ~ 2100) from those estimated over 2000 ~ 2019



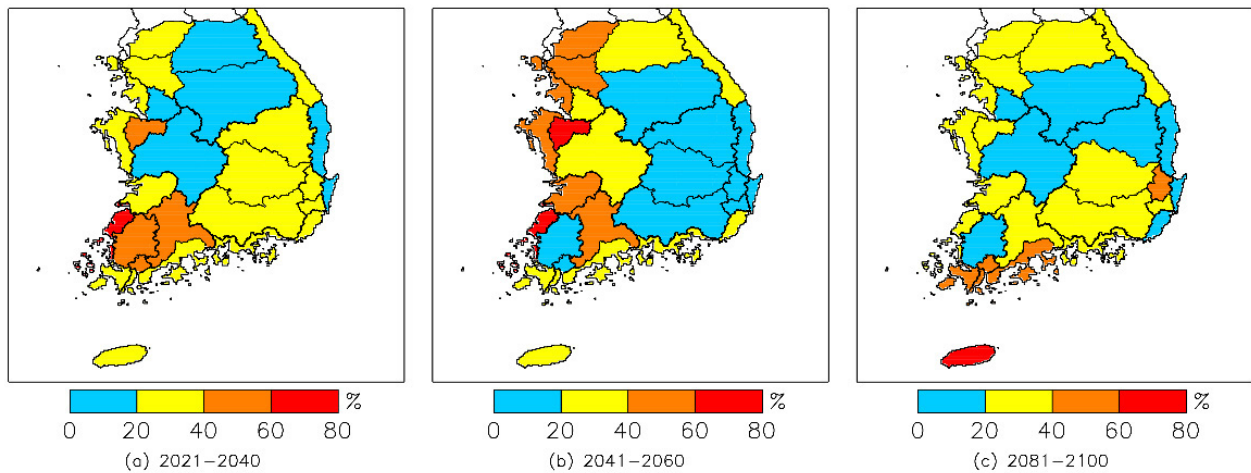


Fig. 8. The spatial distribution of the increase rate (%) of the 100-year return period precipitations in the 26 watersheds estimated over future scenario (SSP1-2.6) periods (2021 ~ 2040, 2041 ~ 2060, 2081 ~ 2100) from those estimated over 2000 ~ 2019

66.1% 증가하여 재현빈도 강수량이 479.1 mm d<sup>-1</sup>으로 평가되었다. 제주도 권역은 26개 권역 중에 가장 크게 증가하였는데, 중반기에 77.6% 후반기에 72.3% 증가하여 각각 766.1 mm d<sup>-1</sup>, 743.1 mm d<sup>-1</sup>으로 전망되었다. 즉 제주도는 현재기후에서 가장 큰 재현빈도 강수량이 평가된 권역이고, 또한 고탄소 미래 기후변화에서도 가장 많이 증가하는 권역이기도 하다. 현재 기후에서 다른 권역에 비해서 상당히 큰 재현 빈도 강수량을 보였던 임진강(전/중/후반기에 27.0, 33.5, 55.9% 증가)과 팔당댐하류 권역(30.6, 35.4, 46.0% 증가)에서 21세기 후반기에 45% 이상 상당히 큰 폭으로 증가하였다. 고탄소 시나리오에 대하여 미래 후반기에 가장 큰 증가를 보인 권역은 동해에 접한 권역으로서 낙동강동해와 한강동해에서 후반기에 각각 69.8, 72.7% 증가하여, 재현빈도 강수량이 457.3 mm d<sup>-1</sup>, 467.3 mm d<sup>-1</sup>으로 전망되었다.

이에 반해, 저탄소 시나리오 경우(Fig. 8), 현재기후 대비 재현빈도 강수량의 증가폭이 21세기 전반기에 12개 권역에서 고탄소 시나리오 경우보다 다소 컸지만 중반기에는 6개의 권역으로 감소하였고, 후반기에는 모든 권역에서 고탄소 시나리오 경우보다 작았다. 그리고 100년 빈도 극한 강수량의 증가율이 50% 이상인 권역의 수가 21세기 전/중/후반기 각각 2개/3개/1개로, 21세기 하반기 대부분의 권역에서 50% 이하가 될 것으로 예상되었다. 특히 미래 고탄소 시나리오에 대하여 전반기부터 큰 폭으로 증가한 권역(즉, 영산강남해, 섬진강남해, 낙동강남해)에서는

그 증가 정도가 상당히 감소하였다. 예를 들면, 낙동강남해에서 21세기 전/중/후반기에 100년 재현 빈도 강수량이 28.5, 26.3, 32.9% 증가하였다. 그리고 고탄소 시나리오에서 후반기에 69% 이상 증가했던 한강동해 권역과 낙동강동해 권역은 21세기 후반기에 각각 약 39.4%와 19.4%로 증가폭이 크게 감소하는 것으로 전망되었다.

#### 4. 요약 및 결론

이 연구에서는 국립 기상과학원 한반도 상세 기후변화 시나리오를 활용하여 우리나라에서 재난 및 인명피해의 주요 원인 중의 하나인 하천 홍수 발생과 관련된 기상청 26개 대권역별 극한 강수량의 미래 변화를 분석하였다. 극한 강수량은 Gumbel 분포형을 가정하여 100년 재현 빈도 강수량으로서 평가되었으며, 현재 기후 대비 미래 기후 변화 시나리오에서 변화량으로서 권역별 홍수 발생 가능성을 정량화하여 분석하였다. 고탄소 시나리오의 경우 우리나라 하천 대권역에서 100년 재현 빈도 강수량은 현재기후 대비 21세기 전반기(2021 ~ 2040년), 중반기(2041 ~ 2160년), 후반기(2061 ~ 2100년)에 26개 대권역 평균으로 21세기 약 29%, 46%, 53% 각각 증가하는 것으로 전망되었다. 이에 반해 저탄소 시나리오의 경우 전/중/후반기에 31%, 31%, 29% 증가하는 것으로 전망되었다. 결국 저탄소 시나리오에서 전반기 이후에는 고탄소 시나리오의 극한 강수량 증가에 비해 상당히 감소할 것으로 전망되었

다. 권역별로 살펴보면, 고탄소 시나리오에서 100년 재현 빈도 강수량 증가율이 50% 이상의 권역 수는 21세기 전/중/후반기에 각각 1개/7개/16개로 점차 증가하는 것으로 전망되었으며, 저탄소 시나리오에서 재현빈도 강수량 증가율이 50% 이상인 권역의 수가 2개/3개/1개로 21세기 후반기 대부분의 권역에서 50% 이하인 것으로 분석되었다. 위와 같은 결과는 탄소 중립 정책의 효과로 지구온난화를 감소시켜서, 홍수 원인이 되는 극한 강수의 감소로 인한 홍수 발생 가능성을 낮출 수 있다는 것을 암시한다. 향후 극한 강수량 강도의 증가로 홍수위험도가 높아질 것으로 전망되는 바, 수문 구조물의 방재계획 및 미래 극한 홍수 대비 정책 수립에도 이번 미래 전망의 결과가 반영되어야 할 것으로 보인다.

흥미롭게도 이 연구에서 고탄소/저탄소 시나리오에 따른 재현빈도 강수량의 변화 경향성이 상이한 결과를 보여주었다. 이 연구에서는 권역별로 변화 경향성이 다른 이유에 대해서는 다루지는 않았지만, 권역별 극한 강수 발생 감시 및 전망을 위해서 원인분석에 대한 연구가 필수적이며, 추후 연구가 진행될 예정이다.

## 사사

본 연구는 APCC의 지원을 통해 수행되었습니다.

## References

- Cannon AJ, Sobie SR, Murdock TQ. 2015. Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping. How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate* 28: 6938-6959.
- IPCC. 2021. *Climate Change 2021. The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* [Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors SL, Pean C, Berger S, Caud N, Chen Y, Goldfarb L, Gomis MI, Huang M, Leitzell K, Lonnoy E, Matthews JBR, Maycock TK, Waterfield T, Yelekci O, Yu R, Zhou B (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391pp.
- Kim DH, Kim JU, Byun YH, Kim TJ, Kim JW, Kim YH, Ahn, JB, Cha DH, Min SK, Chang EC. 2021. Future projection of extreme climate over the Korean peninsula using multi-RCM in CORDEX-EA Phase 2 Project. *Atmosphere* 31: 607-623 (in Korean with English abstract).
- Kim JU, Kim TJ, Kim DH, Kim JW, Cha DH, Min SK, Kim YH. 2020. Evaluation of performance and uncertainty for Multi-RCM over CORDEX-East Asia Phase 2 region. *Atmosphere* 30: 361-376 (in Korean with English abstract).
- Kim JU, Kim MK, Kim YH. 2013a. Improvement of modified Korean parameter-elevation regressions an independent slopes model based on independent temperature lapse rate. *Journal of Climate Research* 8: 203-215 (in Korean with English abstract).
- Kim JU, Kim TJ, Kim DH, Byun YH, Chang EC, Cha DH, Ahn JB, Min SK. 2022a. 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: 339-354.
- 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: 89-106 (in Korean with English abstract).
- 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: 55-68 (in Korean with English abstract).
- Kim MK, Lee DH, Kim JU. 2013b. Production and validation of daily grid data with 1km resolution in South Korea. *Journal of Climate Research* 8: 12-25 (in Korean with English abstract).
- Kim S, Kim MK. 2018. Verification of PRIDE model version 2.0. *Journal of Climate Research* 13: 71-86 (in Korean with English abstract).
- 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-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* 52(2): 79-89.
- Koch SE, DesJardins M, Kocin PJ. 1983. An interactive Barnes objective map analysis scheme of use with satellite and conventional data. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 22: 1487-1503.
- KMA. 2021: Extreme climate report 2020, 212pp.
- Lee WS, Chun JA, Kang K. 2014. Development and application of GIS-based PRISM integration through a plugin approach. *Journal of Hydrology* 513: 58-67.
- ME. 2019. Standard guidelines for flooding estimation. 52pp.
- NIMS. 2018. 100 years of climate change on the Korean Peninsula. 31pp.
- NIMS. 2020. Climate change projection report on the Korean Peninsula: climate change projection based on SSP1-2.6/SSP5-8.5. 38pp.
- Oh TS, Kim MS, Moon YI, Ahn JH. 2009. An analysis of the characteristics in design rainfall according to the data periods. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.* 115-127.
- O'Neill BG, Kriegler E., Riahi K., Ebi KL, Hallegatte S, Carter TR, Mathur R, van Vuuren DP. 2014. A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change* 122: 387-400.
- Seller AA, Jones CG, Mulcahy JP, coauthors. 2019. UKESM1: Description and evaluation of the U.K. earth system model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 11: 4513-4558.
- UNDP. 2022: Pakistan floods 2022: Post-disaster needs assessment. 69pp.
- WMO. 2022: United in Science 2022: A multi-organization high-level compilation of the most recent science related to climate change, impacts and responses. [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=11308](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=11308).