



SSP 시나리오에 따른 CMIP6 GCM 기반 미래 극한 가뭄 전망

Projected Future Extreme Droughts Based on CMIP6 GCMs under SSP Scenarios

김송현^a · 남원호^{b,†} · 전민기^c · 홍은미^d · 오찬성^e
Kim, Song-Hyun · Nam, Won-Ho · Jeon, Min-Gi · Hong, Eun-Mi · Oh, Chansung

ABSTRACT

In recent years, climate change has been responsible for unusual weather patterns on a global scale. Droughts, natural disasters triggered by insufficient rainfall, can inflict significant social and economic consequences on the entire agricultural sector due to their widespread occurrence and the challenge in accurately predicting their onset. The frequency of drought occurrences in South Korea has been rapidly increasing since 2000, with notably severe droughts hitting regions such as Incheon, Gyeonggi, Gangwon, Chungbuk, and Gyeongbuk in 2015, resulting in significant agricultural and social damage. To prepare for future drought occurrences resulting from climate change, it is essential to develop long-term drought predictions and implement corresponding measures for areas prone to drought. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Sixth Assessment Report outlines a climate change scenario under the Shared Socioeconomic Pathways (SSPs), which integrates projected future socio-economic changes and climate change mitigation efforts derived from the Coupled Model Intercomparison Project 6 (CMIP6). SSPs encompass a range of factors including demographics, economic development, ecosystems, institutions, technological advancements, and policy frameworks. In this study, various drought indices were calculated using SSP scenarios derived from 18 CMIP6 global climate models. The SSP5-8.5 scenario was employed as the climate change scenario, and meteorological drought indices such as the Standardized Precipitation Index (SPI), Self-Calibrating Effective Drought Index (scEDI), and Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) were utilized to analyze the prediction and variability of future drought occurrences in South Korea.

Keywords: Climate change; drought index; future drought projection; SSP scenarios; SPEI; scEDI; SPI

1. 서론

최근 전 세계적으로 기후변화는 이상기후를 유발하며, 가뭄, 폭염과 같은 기상학적 재해의 강도와 빈도가 증가하는 원인이 된다 (Tao et al., 2003; Wilhite et al., 2014). 가뭄정보분석 연간보고서에 따르면 국내 가뭄은 2000년 이전에는 20년 중

6개년 발생하였으며, 2000년 이후에는 20년 중 12개년에 발생하는 등 가뭄 발생 빈도가 증가하는 추세이다 (ME, 2019). 우리나라의 경우 연 강수량의 60~70%가 여름에 집중되는 몬순기후 지역이며, 강우의 계절적 변동성이 점차 증가하는 추세에 따라 강우일수는 감소함에도 불구하고 강우강도는 증가하고 있다 (Choi, 2013; Bang et al., 2018; Chae et al., 2021). 가뭄은 발생 시점을 정확히 관측할 수 없을 뿐만 아니라 발생 면적이 광범위하기 때문에 농작물 생육과 농업 시스템 전반을 비롯한 사회경제적 측면에서 심각한 영향을 줄 수 있다. 또한, 가뭄은 앞으로 미래 기후변화에 따른 기온 및 강수량의 증가함에 따라 피해 및 규모가 급증할 것으로 예상된다 (Nam et al., 2015a; Jeon et al., 2022; Jo et al., 2023). 따라서 가뭄을 전망하고 예측하여 대응하기 위해서는 가뭄의 진행상황과 강도를 정의할 수 있는 객관적 기준을 통해 과거 가뭄의 양상을 파악하여 (Wilhite et al., 2007), 미래 기후변화 시나리오를 반영함으로써 장기적인 가뭄전망을 통해 가뭄 대응 방안을 수립하는 것이 필요하다.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)의 6차 평가보고서 (Assessment Report, AR6)에서는 기존 5차 보고서에 수록된 CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project 5) RCP (Representative Concentration Pathways)의 대표농도 시

^a Graduate Student, School of Social Safety and Systems Engineering, Hankyong National University, Anseong, Republic of Korea
^b Associate Professor, School of Social Safety and Systems Engineering, Institute of Agricultural Environmental Science, National Agricultural Water Research Center, Hankyong National University, Anseong, Republic of Korea
^c Ph.D. Candidate, Department of Convergence of Information and Communication Engineering, Hankyong National University, Anseong, Republic of Korea
^d Associate Professor, School of Natural Resources and Environmental Science, Kangwon National University, Kangwon, Republic of Korea
^e Associate Research Fellow, Integrated Watershed Management Institute, Seoul, Republic of Korea

† Corresponding author

Tel.: +82-31-670-5137, Fax: +82-31-670-5139

E-mail: wonho.nam@hknu.ac.kr

Received: February 26, 2024

Revised: April 20, 2024

Accepted: April 23, 2024

나리오에 미래의 사회 및 경제적 변화를 추가로 반영한 시나리오인 공통사회경제경로 SSP (Shared Socioeconomic Pathways)에 따라 산출된 전지구 기후변화 시나리오를 제공하고 있다 (IPCC, 2021). CMIP6 SSP 시나리오는 기존 CMIP5 RCP 시나리오 결과와 비교하여 평균 기온과 강수량의 증가폭이 큰 것으로 알려져 있으며, 특히 SSP5-8.5의 경우 RCP 8.5보다 더 높은 온실가스 배출 정도를 나타낸다 (NAAS, 2021; Kim et al., 2021b; An et al., 2022; Kim et al., 2023).

2000년대 이후로 급증하고 있는 기상 재해로 인해 기후변화 시나리오를 이용하여 미래 가뭄의 적응 전략을 수립하기 위한 다양한 연구가 이루어졌다. Park et al. (2013)은 SRES (Special Report on Emission Scenario)와 RCP 시나리오를 적용한 GCMs (General Circulation Models)를 통해 생산된 기상 자료를 이용해 가뭄지수를 산출하여 기상관측소별 SDF (Severity-Duration-Frequency) 곡선으로 남한지역의 가뭄 우려 지역을 도식화하였다. Kim et al. (2017)은 RCP 8.5 기후변화 시나리오를 바탕으로 코펜의 기후구분을 통해 우리나라의 기후지대 변화를 분석하였으며, 21세기 후반으로 갈수록 기온이 증가하여 전국적으로 난온대의 기후특성이 나타날 것으로 예측하였다. Kwon et al. (2020)은 국내 농업용 저수지를 대상으로 RCP 시나리오를 적용하여 미래 이수안전도를 평가하고 기후변화 적응 대책인 주수원공의 수혜구역과 저수용량에 대한 경제성 분석을 통해 농업용 저수지의 이수안전도 증진을 위한 대응방안을 제시하였다.

미래 기후변화 시나리오 자료의 불확실성을 고려하기 위해 18개 개별 전지구기후모델 (Global Climate Model, GCM)로부터 제공된 자료를 활용하였다. 하지만 개별 GCM은 지구시스템을 모의하는 과정에서 모델간 상이한 성능을 갖기 때문에 (Jung et al., 2018) 다중모델앙상블 (Multi Model Ensemble, MME) 접근방법을 활용하여 미래 영향을 평가하는 것이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 CMIP6 기반 18개 GCMs 및 MME 기반 SSP 시나리오를 활용하여 3종의 가뭄 지수를 산정하였다. 산정한 가뭄지수는 기상학적 가뭄지수인 SPI (Standardized Precipitation Index), scEDI (self-calibrating Effective Drought Index)와 강수량과 증발산량을 활용하는 SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index)이며, GCMs의 가뭄 지수별 우리나라의 미래 기간별 가뭄 다수감지 지역을 분석하여 가뭄 대응을 위한 의사결정의 범위를 확장하고자 한다.

II. 연구재료 및 방법

1. 연구방법

단일 GCM 전망자료를 활용하는 경우 기후모델의 구조적 및 처리 과정에서의 불확실성이 존재하기 때문에 CMIP6 시나리오 중 6개의 기후변수 자료 (강수량, 최고기온, 최저기온, 풍속, 일사량, 상대습도)가 존재하는 18개 GCM 자료를 수집하였다 (Table 1). CMIP6 기후변화 시나리오는 SSP5-8.5로 인

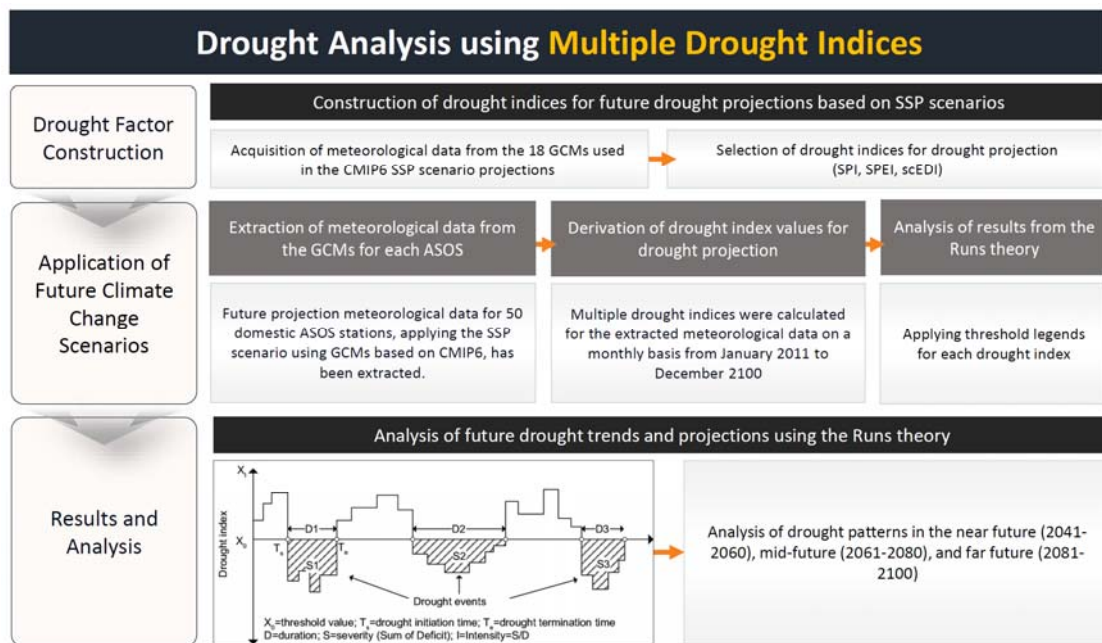


Fig. 1 Flowchart for drought analysis utilizing multiple drought indices

Table 1 Specifications of 50 ASOS including their locations and code names

Local	Station Name	Code	Local	Station Name	Code
KW ¹⁾	SOKCHO	SOK	GN ⁵⁾	TONGYEONG	TNY
	DAEGWALLYEONG	DGR		JINJU	JNJ
	CHUNCHEON	CHC		GEOCHANG	GCH
	GANGNEUNG	GNU		HAPCHEON	HPC
	WONJU	WOJ		MIRYANG	MRY
	INJE	INJ		SANCHEONG	SAC
	HONGCHEON	HOC		GEOJE	GEJ
CB ²⁾	CHUNGJU	CNJ		BUSAN	BUS
	CHEINGJU	CUJ		ULSAN	ULS
	CHUPUNGNYEONG	CPY		NAMHAE	NMH
	JECHEON	JEC	GUNSAN	GNS	
CN ³⁾	BOEUN	BOE	JB ⁶⁾	JEONJU	JJU
	SEOSAN	SES		BUAN	BUN
	DAEJEON	DAJ		IMSIL	IMS
	CHEONAN	CHN		JEONGEUP	JEP
	BORYEONG	BRN		NAMWON	NAM
	BUYEO	BYO		MOKPO	MOK
	GEUMSAN	GES		YEOSU	YEO
GB ⁴⁾	ULJIN	ULJ	JN ⁷⁾	GWANGJU	GWA
	POHANG	POH		WANDO	WAN
	DAEGU	DGU		JANGHEUNG	JNH
	YEONGJU	YNJ		HAENAM	HNM
	MUNGYEONG	MGY		GOHEUNG	GOH
	YEONGDEOK	YND			
	UISEONG	UIS			
	GUMI	GUM			
	YEONGCHEON	YNC			

1) KW Kangwon-do

2) CB Chungcheongbuk-do

3) CN Chungcheongnam-do

4) GB Gyeongsangbuk-do

5) GN Gyeongsangnam-do

6) JB Jeollabuk-do

7) JN Jeollanam-do

구, 도시화 수준, 정책 및 제도, 토지이용 규제 관련 기후정책의 부재로 완화를 위한 노력과 비용이 커지는 시나리오 (O'Neill et al., 2017)를 선택하여, 미래 극한 가뭄에 대한 평가를 할 수 있도록 하였다. 또한 GCM별 전망의 불확실성을 고려하기 위해 다중모형 기반의 평균인 MME 방법을 사용하여 단일 모형 선택에 따른 미래 전망에 대한 신뢰성을 높이고자 하였다.

기상 관측소에 대한 상세화 자료는 기상청의 50개 종관기상관측소 (Automated Synoptic Observing System, ASOS) 지점의 6개 기후변수 자료를 대상으로 SQM (Simple Quantile Mapping) 기법을 적용한 자료를 수집·활용하였다 (Kim et al., 2021a). 자료기간의 경우 과거 기간 (historical period)은

1981년부터 2010까지 30년 기간을 사용하였으며 해당 기간의 재현성 평가 (reproducibility)를 수행하였다. 기후변화 시나리오를 위한 미래 기간 (future period)의 경우, 20년 기간으로 분류한 근미래 (2041~2060), 중간미래 (2061~2080), 먼미래 (2081~2100)로 선정하였다.

가뭄 분석 방법은 Fig. 1에 도시하였다. 일반적으로 가뭄 분석은 가뭄지표를 활용하여 가뭄기준으로부터 가뭄의 지속 기간 (Duration), 크기 (Magnitude), 심도 (Severity)를 정의한 후에 시계열로 분석하여 가뭄의 특성을 평가한다 (Byun and Wilhite, 1999). Yevjevich (1967)은 절단수준 (truncation level)을 선정하고 가뭄사상을 정의할 수 있는 연속이론 (runs theory)을 개발하였으며, 시작과 끝을 정확히 파악할 수 없는

가뭄을 시작과 끝을 명확하게 구분할 수 있기 때문에 가뭄의 지속기간, 심도, 간격 등 가뭄의 특성을 산정하는데 유용하다 (Nam et al., 2015b; Sung et al., 2023).

18개 GCMs 시나리오별로 산출한 미래 기상 변수들을 기반으로 가뭄지수들을 산정하여 20년 기간으로 구분한 근미래 (2041~2060), 중간미래 (2061~2080), 먼미래 (2081~2100)의 가뭄 사상을 분석하였다. 여기서, 각 가뭄지수별로 0 이하의 값을 절단수준으로 정의하여 가뭄이 시작되는 시점, 가뭄의 종료는 각 가뭄지수의 값이 0 이상의 값이 나타나는 시점으로 하나의 가뭄 사상으로 정의하였다. 가뭄의 지속기간 동안 절단수준 이하로 내려간 누적 값을 심도로 정의하여 18개 개별 GCM과 MME 기반 가뭄의 심도와 가뭄의 발생 횟수를 각 미래 기간별로 분석하였다.

2. 기후변화 시나리오 상세화 자료의 과거 재현성 평가 및 미래 가뭄 전망자료 생산

기후변화 시나리오는 온실가스, 에어로졸, 토지이용 변화 등과 같이 인위적인 요인으로 유발되는 복사강제력의 변화를 이용하여 GCM이 산출한 기온, 풍속, 습도, 강수량과 같은 기후변수들에 대한 미래 전망자료이다 (NAAS, 2021). IPCC 6차

평가보고서에서는 SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5를 표준경로로 제시하였으며 본 연구에서는 가장 큰 폭으로 강수량과 기온이 증가하여 급격한 기후 변화가 예상되는 SSP5-8.5 시나리오를 활용하여 분석하였다.

농촌진흥청의 Empirical Quantile Mapping 기법을 사용하여 월별로 30년 기후 평균과 분포를 동시에 보정하는 Simple Quantile Mapping (SQM) 상세화 기법을 적용한 지역기후모델의 기상변수 데이터들을 수집하였다 (Kim et al., 2021a; Hur et al., 2023). 수집한 통계적 기후변화 상세화 자료의 신뢰성 확보를 위해 과거기간 (1981~2010년) 관측자료를 활용하여 재현성 평가를 수행하였다. 재현성 평가는 미래 가뭄 특성 전망을 수행하기 앞서 과거 관측자료로 추출된 종관기상관측소 기후변수 (Table 1)와 GCM별로 추출된 기후변수를 비교함으로써 사용된 상세화 기법이 기후특성을 잘 반영하고 있는지를 평가하기 위한 목적이다. 미래 기후변화 전망 자료는 Table 2의 CMIP6 18개 GCMs이 산출한 SSP5-8.5의 미래기간 (2015~2100)에 대하여 수집하였으며, 6개 기상변수 (강수량, 최고기온, 최저기온, 상대습도, 일사량, 풍속)를 통해 가뭄지수를 산출하여 미래 가뭄을 전망하였다.

Table 2 Specifications of 18 CMIP GCMs including their reporting institutions and countries, along with grid increment horizontal resolutions

GCMs	Modeling Center/Nation	Reference
ACCESS-CM2	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australian Research Council Centre of Excellence for Climate System Science (Australia)	Dix et al. (2019)
ACCESS-ESM1-5	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (Australia)	Ziehn et al. (2019)
CanESM5	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (Canada)	Swart et al. (2019)
CNRM-CM6-1	Centre National de Recherches Meteorologiques (France)	Voltaire (2019)
CNRM-ESM2-1		Seferian (2019)
EC-Earth3	EC-Earth-Consortium	EC-Earth Consortium (2019)
GFDL-ESM4	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (USA)	John et al. (2018)
INM-CM4-8	Institute for Numerical Mathematics (Russia)	Volodin et al. (2019a)
INM-CM5-0		Volodin et al. (2019b)
IPSL-CM6A-LR	Institute Pierre-Simon Laplace (France)	Boucher et al. (2019)
KACE-1-0-G	National Institute of Meteorological Sciences/Korea Meteorological Administration (Korea)	Byun et al. (2019)
MIROC6	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology/Atmosphere and Ocean Research Institute/National Institute for Environmental Studies/RIKEN Center for Computational Science (Japan)	Tatebe et al. (2019)
MIROC-ES2L		Hajima et al. (2020)
MPI-ESM1-2-HR	Max Planck Institute for Meteorology (Germany)	Schupfner et al. (2019)
MPI-ESM1-2-LR		Wieners et al. (2019)
MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute (Japan)	Yukimoto et al. (2019)
NorESM2-LM	NorESM Climate modeling Consortium consisting of CICERO (Norway)	Graff and Schulz (2019)
UKESM1-0-LL	Met Office Hadley Centre (UK)	Good et al. (2019)

3. 가뭄지수를 활용한 가뭄 판단

가. SPI (Standardized Precipitation Index)

SPI는 강수량이 감소하기 시작하면 상대적으로 물 수요에 비해 물 공급 부족을 유발하게 되면서 가뭄 발생의 발단이 된다는 것에 착안하여 개발된 가뭄지수이다 (McKee et al., 1993). SPI는 강수량 자료만을 입력 자료로 활용하여 가뭄을 직관적으로 판단할 수 있어 전세계적으로 가뭄 모니터링에서 활용되고 있다. SPI는 특정 시간별로 누적된 강수 시계열을 사용함으로써 시간 단위별로 강수 부족량을 산정하며, 수문 기상가뭄정보시스템의 Table 3과 같은 범례를 적용하여 가뭄을 분류한다. SPI로 판단하는 가뭄 사상은 SPI 값이 -1.0 보다 작은 값에서 시작하여 0보다 클 때 가뭄이 끝나게 된다. SPI 산정에 적용되는 시간 단위는 3, 6, 9, 12개월 등으로 설정할 수 있으며, 설정된 시간 단위에 대한 누적 강수량 시계열 자료를 구성한다. 이 시계열 자료를 월별로 분석하여 식 (1)과 식 (2)의 Gamma분포의 확률밀도 함수와 누적분포함수를 이용하여 산정한다. 본 연구에서는 우리나라의 기후 환경을 고려하여 기상청에서 사용하고 있는 6개월 시간척도를 적용한 SPI (이하 SPI6)을 산출하였다.

$$f(x) = \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta)} \left(-\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\frac{x}{\alpha}\right) \quad (1)$$

$$F(x) = \int_0^x f(x) dx = \int_0^x \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta)} \left(-\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\frac{x}{\alpha}\right) \quad (2)$$

나. SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index)

SPEI (Vicente-Serrano et al., 2010)는 SPI의 계산 과정에서 강수 이외의 기온과 관련된 변수를 고려하지 않아 이를 보완하기 위해 잠재증발산량 (Potential evapotranspiration)을 고려한 가뭄지수이다. 본 연구에서는 월평균 기온 자료를 활용하고자 Thornthwaite 방법 (Thornthwaite, 1948)을 사용하여 SPEI를 산출하였다.

$$PET = 16K \left(\frac{10T}{I}\right)^m \quad (3)$$

여기서, T 는 월평균 기온 ($^{\circ}\text{C}$), I 는 열지수 (heat index), K 는 위도 (latitude)와 월단위의 함수로 산정하는 계수, m 은 설정한 월단위 시간 척도를 의미한다. 6개월 시간 척도를 적용한 SPEI (이하 SPEI6)를 산정하였으며, Table 3과 같은 범례를 적용하여 가뭄 심도를 분류하였다 (Nam et al., 2015c).

다. scEDI (self-calibrating effective drought index)

scEDI는 Byun and Wilhite (1999)의 EDI를 보완한 scEDI를 제안하였으며 (Park et al., 2022), 강수량 뿐만 아니라 강수의 시간적 집중도, 지속성의 개념을 적용한 가뭄지수이다 (Fig. 2). EDI는 강우의 발생으로 생긴 수자원을 시간에 따른 손실을 감안하면서 일년 이상의 기간 동안 누적된 수자원을 평년치와 비교하는 방법으로 가뭄 강도를 계산한다 (Oh et al., 2011). EDI는 SPI와 마찬가지로 강수량만을 입력자료로 계산되며, 산정식은 식 (4)~식 (6)과 같다.

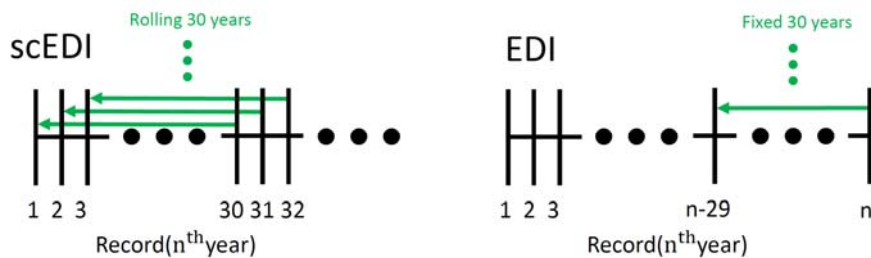


Fig. 2 Methods for establishing reference periods for rMEP and MEP calculations in scEDI and EDI (Park et al., 2022)

Table 3 Categories of multiple drought indices

Category	SPI6	SPEI6	scEDI
Moderate drought	-1.49 to -1.00	-1.49 to -1.00	-1.50 to -0.50
Severe drought	-1.99 to -1.50	-1.99 to -1.50	-2.50 to -1.50
Extreme drought	Less than -2.00	Less than -2.00	Less than -2.50

$$EP = \sum_{n=1}^i \left[\left(\sum_{m=1}^n P_m \right) / n \right] \quad (4)$$

$$DEP = EP - MEP \quad (5)$$

$$EDI = DEP / STDEP \quad (6)$$

여기서, *EP* (Effective Precipitation)는 유효강우량으로 365일 혹은 그 이상 동안 누적된 강우량을 의미한다. P_m 은 특정 일로부터 m 일 전의 강우량을 의미하며, 일별로 다른 값을 갖는다. *MEP* (Mean of Effective Precipitation)은 *EP*의 30년 평균이며, *DEP* (Deviation of Effective Precipitation)는 *MEP*로부터 *EP*의 편차를 의미한다. *STDEP*는 평년 기간 동안의 *DEP* 표준편차이며, x 는 기존 EDI와 scEDI의 *MEP* 차이를 나타낸다. EDI는 표준편차에 의해 표준화된 지수로 작은 값일수록 가뭄이 심함을 의미한다.

III. 적용 및 결과

1. GCMs의 가뭄 단계별 가뭄 최다 감지 지역

Table 4와 Table 5는 2041년부터 2100년까지 18개 GCMs이 산출한 가뭄지수별 가뭄 단계의 최다 감지 지역 및 관측소를 나타낸다. Table 4에서 SPI6, SPEI6, scEDI는 가장 다수의 GCMs이 KW 지역에서 가장 많은 일반 가뭄을 감지하였다. 심한 가뭄의 경우 SPI6는 KW 지역, SPEI6는 GB 지역, scEDI는 CB 지역이 가장 다수의 GCMs이 가뭄을 감지하였다. 극심한 가뭄의 경우 SPI6는 JN 지역, SPEI6는 CB 지역, scEDI는 KW 지역이 가장 다수의 GCMs이 가뭄을 감지하였다.

Table 5에서 18개 GCMs 중 가장 다수의 GCMs이 산출한 SPI6가 SOK, YND, BOE 지역에서 가장 많은 일반 가뭄을 감지하였다. 심한 가뭄은 YNJ, JEC 지역에서 가장 많이 감지되었으며, 극심한 가뭄은 SES, ULJ 지역에서 가장 많이 감지되었다. SPEI6의 경우, 가장 다수의 GCMs에서 일반 가뭄이 SPI6와 마찬가지로 SOK 지역에서 가장 많이 감지되었으며, 심한 가뭄의 경우 YND 지역, 그리고 극심한 가뭄의 경우 GNU 지역에서 가장 많이 감지되었다. scEDI의 경우, 가장 다수의 GCM에서 일반 가뭄이 TNY, SOK POH 지역에서 가장 많이 감지되었으며, 심한 가뭄은 MGY, GWA 지역에서 가장 많이 감지되었고, 극심한 가뭄은 MGY 에서 가장 많이 감지되었다.

2. GCMs의 가뭄 지수별 미래 가뭄 분석

Fig. 3~Fig. 5는 각각 18개 GCMs의 SPI6와 SPEI6, scEDI에 따른 미래 기간별 가뭄 발생 횟수 및 가뭄의 심도를 나타내며, SPI6와 SPEI6는 비슷한 추세를 보였다. 미래 전기간에 걸쳐 SPEI6가 가장 많은 가뭄 사상을 감지하였으며, 가뭄의 심도 또한 SPI6에 비해 상대적으로 더 크게 나타났다. 반면, scEDI는 세 가뭄지수에서 가장 적은 수의 가뭄 사상과 상대적으로 가뭄의 심도가 작게 감지되었다.

CanESM5, EC-Earth3, MIROC6, MRI-ESM2-0, IPSL-CM6A-LR GCMs의 경우 세 가뭄지수 모두 미래로 갈수록 전국적으로 가뭄의 심도가 낮아질 것으로 예측하였다. IPSL-CM6A-LR GCM의 경우, 중간 미래에 가뭄의 발생 횟수가 증가하나, 가뭄의 심도는 감소하면서 가뭄의 양상이 변화될 것으로 예측하였다. ACCESS-CM2, CNRM-CM6-1, CNRM-ESM2-1, KACE-1-0-G, NorESM2-LM, INM-CM5-0 GCMs의 경우 세 가뭄지수 모두 중간 미래에서 가뭄의 심도가 크게 증가하였다가 먼 미래에서 감소하는 양상을 보였다. 대부분의 지역에서 가뭄의 발생 횟수가 중간 미래에서 증가하였다가 먼 미래에서 감소하는 모습을 보이나, ACCEE-CM2, NorESM2-LM GCM의 JB 지역과 같은 일부 지역은 가뭄의 발생 횟수가 먼 미래에서 증가하며 가뭄의 양상이 변화될 것으로 예측되었다.

ACCESS-ESM1-5, GFDL-ESM4, MPI-ESM1-2-HR GCMs의 경우 세 가뭄지수 모두 중간 미래에서 가뭄의 심도가 감소하나 먼 미래에 증가하는 추세를 보였다. ACCESS-ESM1-5 GCM은 모든 미래 구간에서 전국적인 가뭄의 발생 횟수의 차이가 크지 않아 먼 미래에 가뭄 발생 시, 가뭄의 심도에 변화가 있을 것으로 예측하였다. GFDL-ESM4의 scEDI는 세 가뭄 지수 중 각 미래 기간의 가뭄 발생 횟수와 가뭄의 심도가 가장 큰 폭으로 변화하였다. INM-CM4-8 GCM의 SPI6와 SPEI6는 가뭄의 발생 횟수와 가뭄의 심도가 중간 미래에서 증가하고 먼 미래에서 감소하였으나, scEDI의 경우 KW, GB, GN 지역을 제외한 지역은 먼 미래로 갈수록 가뭄의 심도가 증가하였다. MPI-ESM1-2-LR GCM의 SPI6와 SPEI6는 먼 미래로 갈수록 대부분의 지역에서 가뭄의 발생 횟수와 가뭄의 심도가 꾸준히 감소하나, scEDI는 대부분의 지역에서 가뭄 발생 횟수와 가뭄의 심도가 증가하였다. MIROC-ES2L, UKESM1-0-LL GCM은 세 가뭄지수 모두 KW 지역의 가뭄의 심도가 중간 미래에서 증가하고 먼 미래에서 감소하는 경향을 공통적으로 감지하였다.

Table 4 The most drought-prone areas (comprising 8 administrative districts) calculated by each GCM's multiple drought indices

Category	Moderate drought			Severe drought			Extreme drought		
	SPI	SPEI	scEDI	SPI	SPEI	scEDI	SPI	SPEI	scEDI
ACCESS-CM2	KW	KW	KW	KW	CB	CN	CN	GN	
ACCESS-ESM1-5	GB	GB	GN	KW	GN	CB	JN	GN	CN, JB
CanESM5	JN	JB	GB	JB	KW	KW	GB	CB	
CNRM-CM6-1	GB	GB	JB	CB	JB	CB	JB	CB	
CNRM-ESM2-1	KW	KW	KW	KW	KW	KW	JN	CB	CB
EC-Earth3	GN	GN	GB	KW	KW	GN	GB	GB	
GFDL-ESM4	KW	CN	JN	CN, GN	GN	CB	GN	GN	KW
INM-CM4-8	GN	KW	GN	KW	GB	CB	CB	KW	CN
INM-CM5-0	CN	CN	KW	GB	CB	GN	CB	KW	KW
IPSL-CM6A-LR	JB	JB	GN	JN	JN	JN	JN	JN	
KACE-1-0-G	JN	JN	KW	GB	GB	JB	JN	JN	CN
MIROC6	JB	JB	KW	JN	JN	GN	GB	CB	GB
MIROC-ES2L	JN	JN	JN	JB	JB	CB	GB	GB	GB
MPI-ESM1-2-HR	CB	CB	CN	CB	GB	GB	JN	JN	KW
MPI-ESM1-2-LR	KW	KW	KW	CB	GB	GB	GB	KW	KW
MRI-ESM2-0	CB	GB	KW	JB	JN	GN	GN	GB	
NorESM2-LM	KW	KW	GN	CN	CN	CN	CB	JB	
UKESM1-0-LL	KW	CN	CB	KW	GN	CN	GN	JB	GB

* KW: Kangwon-do, GN: Gyeongsangnam-do, CB: Chungcheongbuk-do, JB: Jeollabuk-do, CN: Chungcheongnam-do, JN: Jeollanam-do, GB: Gyeongsangbuk-do

Table 5 The most drought-prone station for each GCM's multi-drought index

Category	Moderate drought			Severe drought			Extreme drought		
	SPI	SPEI	scEDI	SPI	SPEI	scEDI	SPI	SPEI	scEDI
ACCESS-CM2	SOK	GCH	INJ	WOJ, HOC	YND	CUJ	SES	YND	
ACCESS-ESM1-5	YND	GEJ	TNY	JNJ	GEJ	CNJ	SES	GEJ	MGY
CanESM5	JEP, GWA	CPY	GNU	BUN	CPY	WOJ	MGY	CPY	
CNRM-CM6-1	UIS	UIS	CPY, SAC	JEC	HOC, MOK	BOE	BUN	WOJ, CUJ	
CNRM-ESM2-1	SOK	SOK	SOK	SOK	SOK	MGY	INJ	ULS	INJ, JEC
EC-Earth3	YND	SOK	POH	DGR	GNU	ULJ	ULJ	GNU	
GFDL-ESM4	CHC, HOC	CHC, GCH	HNM	SES, ULS	GCH	CHC	YNC	MIY	GNU, WOJ
INM-CM4-8	TNY	TNY	WAN	ULJ	YND	MGY	DGR, CHC	POH, YND	DAJ, GES
INM-CM5-0	DAJ	ULJ	HOC	YND	YND	SES	CNJ, GWA	CHC, HOC	HOC
IPSL-CM6A-LR	MIY, IMS	GEJ	TNY	YEO	YNC, YEO	GWA	YNC	YNC	
KACE-1-0-G	HNM	ULJ	SOK	JEC	ULJ	MGY	GWA	NMH, GWA	BRN, WAN
MIROC6	MOK	BRN, GNS	CHC	HNM	GOH	GWA	HOC	BOE	MGY
MIROC-ES2L	YEO, WAN	GWA, GOH	JNH	IMS	MIY	CPY	GUM	JEC, GUM	YNC
MPI-ESM1-2-HR	CHC	CHC	SES	JEC	YEO, JNH	DGR, GNU	YEO, JNH	HNM	INJ
MPI-ESM1-2-LR	GNU	SOK	DGR	CPY	ULJ	YND, GEJ	ULJ	WOJ, INJ	DGR
MRI-ESM2-0	BOE	UIS	DGR, INJ	NAM	MIY, BUS, HNM, GOH	YNC	DGU, HPC	ULJ	
NorESM2-LM	INJ	CHC	BUN	BYO	BYO	BYO	CNJ, JEC	GNU	
UKESM1-0-LL	BOE	BRN	POH	DGR, GWA	BRN	GWA	YNC, GCH	GNU	MGY

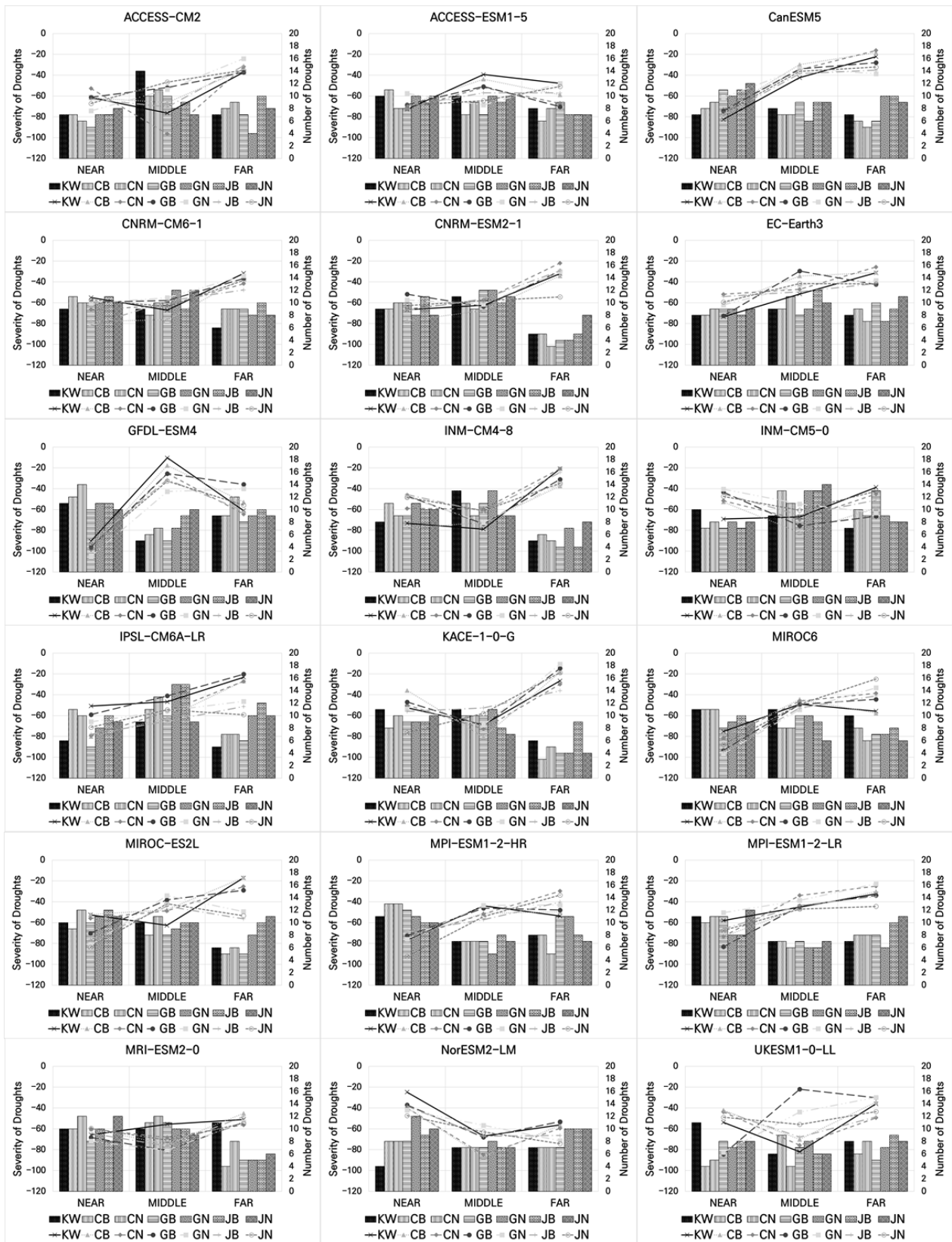


Fig. 3 The count of drought events and severity of droughts in each future period as per the SPI6 of 18 GCMs

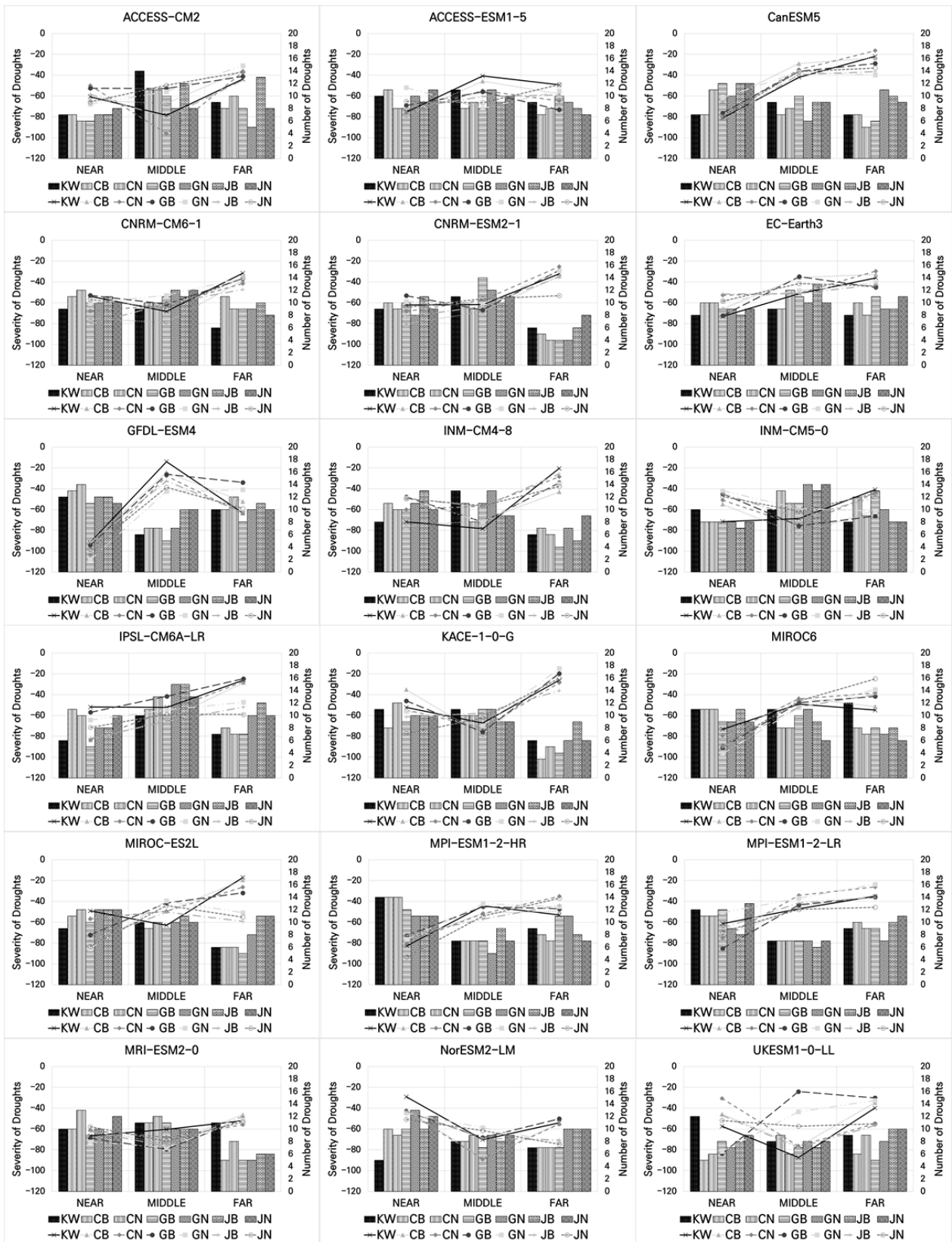


Fig. 4 The count of drought events and severity of droughts in each future period as per the SPEI6 of 18 GCMs

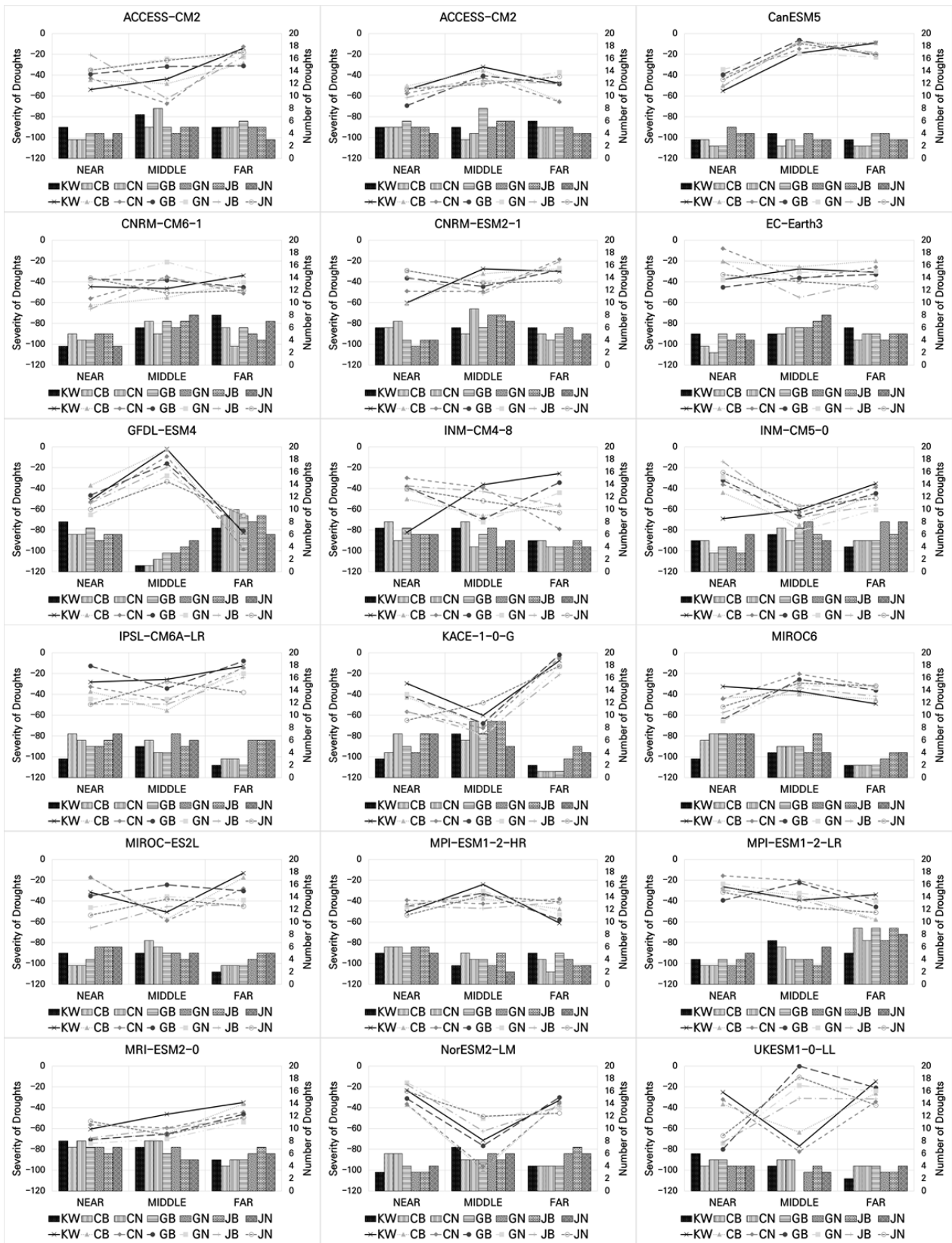


Fig. 5 The count of drought events and severity of droughts in each future period as per the scEDI of 18 GCMs

3. GCM별 전국 가뭄 심도 및 빈도

Fig. 6은 18개 GCMs별 가뭄지수의 미래 기간별 가뭄 심도 및 빈도를 나타낸 것이다. SPI6와 SPEI6의 경우, GCMs의 전국적 가뭄 심도 및 빈도가 유사한 경향을 보였다. 가뭄의 심도의 경우 먼 미래로 갈수록 감소하는 추세로 나타났다. 하지만, scEDI는 모든 미래에서 가뭄의 빈도가 다른 가뭄지수보다 상대적으로 낮게 감지되었다. 또한 가뭄의 심도는 먼 미래에서 다른 가뭄지수보다 상대적으로 크게 감지되었다.

근미래에서는 모든 가뭄 지수의 전국적 가뭄 심도와 빈도가 GFDL-ESM4 GCM이 가장 높게 나타났다. 중간 미래에서는 전국적인 가뭄의 심도가 크게 감소하였다가 먼 미래에서 다시 증가하였다. scEDI는 GFDL-ESM4 GCM의 가뭄 심도 및 빈도 변동이 가장 극단적으로 나타났다. KACE-1-0-G GCM은 모든 가뭄지수의 가뭄 심도 및 빈도가 근미래에서 가장 낮게 나타났다가 중간 미래에서 크게 증가하며 먼 미래

에서 다시 크게 감소하는 것으로, GFDL-ESM4 GCM과 정반대의 경향을 보였다.

IV. 결론 및 고찰

본 연구에서는 CMIP6 기반 18개 GCMs과 이로부터 도출된 MME로 산정한 기후변화 시나리오 (SSP5-8.5)를 활용하여 기상학적 가뭄지수인 SPI6, SPEI6, scEDI를 산정하였다. CMIP6 재현기간을 고려하여 평년에 해당하는 1981~2010년(30년) 관측 자료가 존재하는 50개 기상청의 종관기상관측지점을 활용하였다. 관측 자료를 통해 재현성 평가를 수행한 18개 GCMs의 강수량, 최고기온, 최저기온 등 기상 변수 데이터를 이용하였으며, 2041년부터 2100년까지 18개의 GCMs의 다중 가뭄지수의 지역별 가뭄 발생 횟수를 산출하였다. 또한 GCMs의 다중 가뭄지수가 미래 전기간에 걸쳐 가뭄 단계별

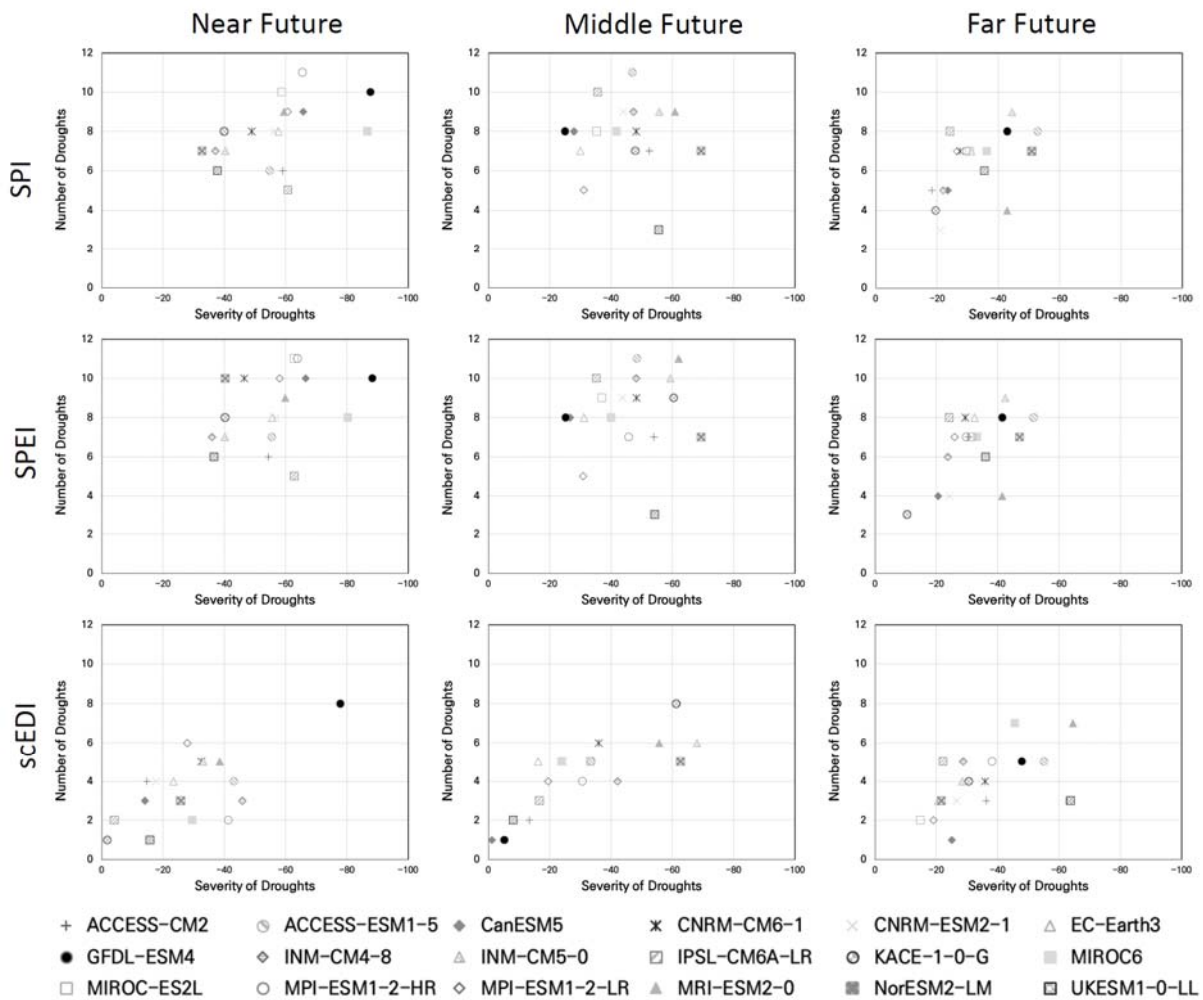


Fig. 6 Drought severity and number of drought events according to drought indices from GCMs

가뭄 최다 발생 지역을 분석하였다.

미래 가뭄 전망 결과, SPI6와 SPEI6의 경우 18개 GCMs에서 유사한 추세를 보였지만, scEDI의 경우, 두 가뭄지수에 비해 상대적으로 작은 횡수의 가뭄과 가뭄의 심도를 나타내었다. MPI-ESM1-2-LR GCM의 scEDI는 미래로 갈수록 가뭄의 발생 횡수와 가뭄의 심도가 지속적으로 증가하며, GFDL-ESM4 GCM의 scEDI는 SPI6와 SPEI6의 변화 양상은 유사하나 먼 미래에서 가뭄의 심도가 큰 폭으로 증가하는 등 SPI6와 SPEI6와 다른 양상을 보였다. scEDI는 모든 미래에서 전국 평균 가뭄의 빈도가 다른 가뭄지수보다 상대적으로 낮게 감지되었다. 그러나, 전국 평균 가뭄의 심도는 먼 미래에서 다른 가뭄지수보다 상대적으로 크게 감지되었으며, 이는 가뭄 발생 시 가뭄의 크기가 미래로 갈수록 커지는 경향을 보였다. 기후변화에 따라 강수량이 전반적으로 증가함에 따라서 가뭄 빈도가 감소하는 경향을 보이지만 가뭄 심도가 증가하는 것은 평균적인 강수량은 증가하지만 월 및 계절 변동성은 증가할 수 있음을 시사한다. 즉, 국내 가뭄특성 전망은 강수량의 증가로 미래 기간동안 가뭄의 발생횡수는 감소하지만 가뭄심도는 증가하므로 향후 근미래에는 극한가뭄에 대한 대비가 필요한 것으로 판단된다. 또한 가뭄에 대한 평가는 GCM별 가뭄의 미래 전망 지수가 다르게 평가되므로 30년 기간의 관측자료와 GCM의 평균값(MME)의 비교를 통해 평가해야 할 것으로 판단된다.

기후변화 시나리오는 미래 기후변화로 인한 영향을 평가하고 피해를 최소화하는데 활용될 수 있는 선제적인 정보로 활용되며, 상세 기후변화 전망은 기후변화 대응과 적응대책 수립을 위한 필수적인 정보이다 (Zhou et al., 2023). 본 연구의 다중 가뭄지수가 산출한 미래 가뭄 다수 발생 지역과 공통적으로 감지한 가뭄 기간을 통해 가뭄의 피해를 최소화할 수 있는 선제적인 정보로 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 본 연구의 목표는 단순히 미래의 가뭄을 예측하는 것이 아니라 광범위하게 발생할 수 있는 모든 범위의 미래를 고려하여 신뢰할 수 있는 의사결정을 위해 불확실성을 이해할 수 있도록 하는 것이다. 18개 GCMs에 의해 산출된 다중 가뭄지수 통해 우리나라의 가뭄 다수 발생 지역과 추세, 변화 양상의 범위를 확장하였지만, 기상학적 요소만 고려되어 미래 기후 변화 예측에 한계가 있다. 즉 상기에서 살펴본 기후변화에 따른 기상학적 가뭄뿐 아니라 수문학적 가뭄 평가 병행을 통해 국내 가뭄에 대한 노출도, 민감도 및 적응력을 함수로 나타낼 필요가 있으며, 향후 MME 기반 CMIP6 기후변화 시나리오를 통해 미래 가뭄 전망을 평가를 수행할 필요가 있다고 판단된다. 따라서, 향후 과거 재현성과 미래 불확실성을 고려한 SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 기후변화 시나리오의 추가적인 분석이 후속되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 가뭄대응 물관리 혁신기술 개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다 (RS-2023-00230286).

REFERENCES

1. An, S. H., G. T. Park, H. N. Jung, and D. W. Jang, 2022. Assessment of future drought index using SSP scenario in Rep. of Korea. *Sustainability* 14(7): 4252. doi: 10.3390/su14074252.
2. Bang, N. K., W. H. Nam, E. M. Hong, M. J. Hayes, and M. D. Svoboda, 2018. Assessment of the meteorological characteristics and statistical drought frequency for the extreme 2017 spring drought event across South Korea. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 60(4): 37-48. doi: 10.5389/KSAE.2018.60.4.037. (in Korean).
3. Boucher, O., S. Denvil, G. Levasseur, A. Cozic, A. Caubel, M. A. Foujols, Y. Meurdesoif, P. Cadule, M. Devilliers, E. Dupont, and T. Lurton, 2019. IPSL IPSL-CM6A-LR model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP. *Earth System Grid Federation*.
4. Byun, H. R., and D. A. Wilhite, 1999. Objective quantification of drought severity and duration. *Journal of Climatology* 12: 2747-2756. doi: 10.1175/1520-0442(1999)012<2747:OQODSA>2.0.CO;2
5. Byun, Y. H., Y. J. Lim, S. Shim, H. M. Sung, M. Sun, J. Kim, B. H. Kim, J. H. Lee, and H. Moon, 2019. NIMS-KMA KACE1.0-G model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP. *Earth System Grid Federation*.
6. Chae, S. T., Y. H. Song, and E. S. Chung, 2021. Comparison of MIROC5 and MIROC6 projections for precipitation over South Korea. *Journal of Korea Water Resources Association* 54(4): 229-240. doi: 10.3741/JKWRA.2021.54.4.229. (in Korean).
7. Choi, M. H., J. M. Jacobs, M. C. Anderson, and D. D. Bosch, 2013. Evaluation of drought indices via remotely sensed data with hydrological variables. *Journal of Hydrology* 476: 265-273. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.10.042.
8. Dix, M., D. Bi, P. Dobrohotoff, R. Fiedler, I. Harman, R. Law, C. Mackallah, S. Marsland, S. O'Farrell, H. Rashid, J. Srbinovsky, A. Sullivan, C. Trenham, P. Vohralik, I. Watterson, G. Williams, M. Woodhouse, R. Bodman, F.

- B. Dias, and R. Yang, 2019. CSIRO-ARCCSS ACCESS-CM2 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP. *Earth System Grid Federation*.
9. EC-Earth Consortium, 2019. EC-Earth-Consortium EC-Earth3 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP. *Earth System Grid Federation*.
 10. Good, P., A. Sellar, Y. Tang, S. Rumbold, R. Ellis, D. Kelley, T. Kuhlbrodt, and J. Walton, 2019. MOHC UKESM1.0-LL model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP. *Earth System Grid Federation*.
 11. Graff, L. S., and M. Schulz, 2019. NCC NorESM2-LM model output prepared for CMIP6 CMIP abrupt-4xCO₂. *Earth System Grid Federation*.
 12. Hajima, T., M. Watanabe, A. Yamamoto, H. Tatebe, A. Maki, M. Noguchi, Abe, R. Ohgaito, A. Ito, D. Yamazaki, H. Okajima, A. Ito, K. Takata, K. Ogochi, S. Watanabe, and M. Kawamiya, 2020. Development of the MIROC-ES2L Earth system model and the evaluation of biogeochemical processes and feedbacks. *Geoscientific Model Development* 13: 2197-2244. doi: 10.5194/gmd-13-2197-2020.
 13. Hur, J., J. P. Cho, K. M. Shim, S. Jo, Y. S. Kim, M. G. Kang, C. S. Oh, S. B. Seo, and E. S. Kim, 2023. Production of digital climate maps with 1km resolution over Korean Peninsula using statistical downscaling model. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 25(4): 404-414. doi: 10.5532/KJAFM.2023.25.4.404.
 14. IPCC, 2021. Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157896.
 15. Jeon, M. G., W. H. Nam, Y. S. Mun, D. H. Yoon, M. H. Yang, H. J. Lee, J. H. Shin, E. M. Hong, and X. Zhang, 2022. Climate change impacts on reference evapotranspiration in South Korea over the recent 100 years. *Theoretical and Applied Climatology* 150: 309-326. doi: 10.1007/s00704-022-04152-y.
 16. John, J. G., C. Blanton, C. McHugh, A. Radhakrishnan, K. Rand, H. Vahlenkamp, C. Wilson, N. T. Zadeh, J. P. Dunne, R. Dussin, L. W. Horowitz, J. P. Krasting, P. Lin, S. Malyshev, V. Naik, J. Ploshay, E. Shevliakova, L. Silvers, C. Stock, and Y. Zeng, 2018. NOAA-GFDL GFDL-ESM4 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP. *Earth System Grid Federation*.
 17. Jung, I., H. I. Eum, E. J. Lee, J. Park, and J. Cho, 2018. Development of representative GCMs selection technique for uncertainty in climate change scenario. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 60(5): 149-162. doi: 10.5389/KSAE.2018.60.5.149. (in Korean).
 18. Jo, S. R., Y. S. Kim, J. N. Hur, J. L. Lee, E. S. Kim, K. M. Shim, and M. G. Kang, 2023. Climatic yield potential changes under climate change over Korean Peninsula using 1-km high resolution SSP-RCP Scenarios. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 25(4): 284-301. doi: 10.5532/KJAFM.2023.25.4.284. (in Korean).
 19. Kim, Y. S., K. M. Shim, M. P. Jung, I. T. Choi, and K. K. Kang, 2017. Study on the change of climate zone in South Korea by the climate change scenarios. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 19(2): 37-42. doi: 10.5532/KJAFM.2017.19.2.37. (in Korean).
 20. Kim, K. H., K. H. Mun, S. K. Choi, J. P. Cho, J. H. Jeong, M. K. Kim, S. J. Yeob, S. R. Jo, O. D. Eric and J. H. Bang, 2021a. Assessing future water demand for irrigating paddy rice under Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) scenario using the APEX-Paddy model. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 63(6): 1-16. doi: 10.5389/KSAE.2021.63.6.001.
 21. Kim, M. H., S. K. Choi, and J. P. Cho, 2021b. First cycle report on climate impact vulnerability assessment in the agricultural environment and ecology sector. National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration (in Korean).
 22. Kim, S. N., D. H. Kim, S. H. Kim, S. H. Hwang, and M. S. Kang, 2023. Future runoff characteristics of Ganwol estuary reservoir watershed based on SSP scenarios. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 65(5): 25-35. doi: 10.5389/KSAE.2023.65.5.025. (in Korean).
 23. Kwon, H. J. W. H., Nam, and G. S. Choi, 2020. An irrigation reliability assessment of agricultural reservoir to establish response plan of future climate change adaptation. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 62(2): 111-120. doi: 10.5389/KSAE.2020.62.2.111. (in Korean).
 24. McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist, 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *8th Conference on Applied Climatology*, Anaheim,

- 179-184.
25. Ministry of Environment (ME), 2019. Drought information analysis annual report. National Drought Information-Analysis Center (in Korean).
 26. Nam, W. H., E. M. Hong, and J. Y. Choi, 2015a. Has climate change already affected the spatial distribution and temporal trends of reference evapotranspiration in South Korea?. *Agricultural Water Management* 150: 129-138. doi: 10.1016/j.agwat.2014.11.019.
 27. Nam, W. H., M. J. Hayes, M. D. Svoboda, T. Tadesse, and D. A. Wilhite, 2015b. Drought hazard assessment in the context of climate change for South Korea. *Agricultural Water Management* 160: 106-117. doi: 10.1016/j.agwat.2015.06.029.
 28. Nam, W. H., M. J. Hayes, D. A. Wilhite, and M. D. Svoboda, 2015c. Projection of temporal trends on drought characteristics using the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) in South Korea. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 57(1): 37-47. doi: 10.5389/KSAE.2015.57.1.037. (in Korean).
 29. National Institute of Agricultural Sciences (NAAS), 2021. Technical guide for producing detailed data on SSP climate change scenarios for use in agriculture. Rural Development Administration (in Korean).
 30. Oh, T. S., Y. I. Moon, S. S. Kim, and G. S. Park, 2011. Frequency analysis of meteorologic drought indices using boundary kernel density function. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 31(2B): 87-98. doi: 10.12652/KSCE.2011.31.2B.087. (in Korean).
 31. O'Neill, B. C., E. Kriegler, K. L. Ebi, E. Kemp-Benedict, K. Riahi, D. S. Rothman, B. J. van Ruijven, D. P. van Vuuren, J. Birkmann, K. Kok, M. Levy, and W. Solecki, 2017. The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change* 42: 169-180. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004.
 32. Park, B. S., J. H. Lee, C. J. Kim, and H. W. Jang, 2013. Projection of future drought of Korea based on probabilistic approach using multi-model and multi climate change scenarios. *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research* 33(5): 1871-1885. doi: 10.12652/KSCE.2013.33.5.1871.
 33. Park, C. K., J. H. Kam, H. R. Byun, and D. W. Kim, 2022. A self-calibrating effective drought index (scEDI): Evaluation against social drought impact records over the Korean Peninsula (1777-2020). *Journal of Hydrology* 613(Part A): 12835. doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.128357.
 34. Seferian, R., 2019. CNRM-CERFACS CNRM-ESM2-1 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP. *Earth System Grid Federation*.
 35. Schupfner, M., K. H. Wieners, F. Wachsmann, C. Steger, M. Bittner, J. Jungclaus, B. Früh, K. Pankatz, M. Giorgetta, C. Reick, S. Legutke, M. Esch, V. Gayler, H. Haak, P. de Vrese, T. Raddatz, T. Mauritsen, J. S. von Storch, J. Behrens, V. Brovkin, M. Claussen, T. Crueger, I. Fast, S. Fiedler, S. Hagemann, C. Hohenegger, T. Jahn, S. Kloster, S. Kinne, G. Lasslop, L. Kornblueh, J. Marotzke, D. Matei, K. Meraner, U. Mikolajewicz, K. Modali, W. Müller, J. Nabel, D. Notz, K. Peters, R. Pincus, H. Pohlmann, J. Pongratz, S. Rast, H. Schmidt, R. Schnur, U. Schulzweida, K. Six, B. Stevens, A. Voigt, and E. Roeckner, 2019. DKRZ MPI-ESM1.2-HR model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP. *Earth System Grid Federation*.
 36. Sung, H. M., J. U. Kim, J. H. Lee, M. H. Kim, S. B. Shim, C. Y. Chung, and Y. H. Byun, 2023. A study on the future projections for climate change adaptation in Korea -Focusing on research reports from NIMS. *Journal of Climate Change Research* 14(6-2): 929-939. doi: 10.15531/KSCCR.2023.14.6.929. (in Korean).
 37. Swart, N. C., J. N. S. Cole, V. V. Kharin, M. Lazare, J. F. Scinocca, N. P. Gillett, J. Anstey, V. Arora, J. R. Christian, Y. Jiao, W. G. Lee, F. Majaess, O. A. Saenko, C. Seiler, C. Seinen, A. Shao, L. Solheim, K. von Salzen, D. Yang, and M. Sigmond, 2019. CCCma CanESM5 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP. *Earth System Grid Federation*.
 38. Tao, F., M. Yokozawa, Y. Hayashi, and E. Lin, 2003. Changes in agricultural water demands and soil moisture in China over the last half-century and their effects on agricultural production. *Agricultural and Forest Meteorology* 118(3-4): 251-261. doi: 10.1016/S0168-1923(03)00107-2.
 39. Tatebe, H., T. Ogura, T. Nitta, Y. Komuro, K. Ogochi, and T. Takemura, 2019. Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6. *Geoscientific Model Development* 12(7): 2727-2765. doi: 10.5194/gmd-12-2727-2019.
 40. Thornthwaite, C. W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review* 38(1): 55-94. doi: 10.2307/210739.

41. Vicente-Serrano, S. M., S. Beguería, and J. I. López-Moreno, 2010. A multiscale drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate* 23(7): 1696-1718. doi: 10.1175/2009JCLI2909.1.
42. Voldoire, A., 2019. CNRM-CERFACS CNRM-CM6-1 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP. *Earth System Grid Federation*.
43. Volodin, E., E. Mortikov, A. Gritsun, V. Lykossov, V. Galin, N. Diansky, A. Gusev, S. Kostykin, N. Iakovlev, A. Shestakova, and S. Emelina, 2019a. INM INM-CM4-8 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP. *Earth System Grid Federation*.
44. Volodin, E., E. Mortikov, A. Gritsun, V. Lykossov, V. Galin, N. Diansky, A. Gusev, S. Kostykin, N. Iakovlev, A. Shestakova, and S. Emelina, 2019b. INM INM-CM5-0 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP. *Earth System Grid Federation*.
45. Wieters, K. H., M. Giorgetta, J. Jungclaus, C. Reick, M. Esch, M. Bittner, V. Gayler, H. Haak, P. de Vrese, T. Raddatz, T. Mauritsen, J. S. von Storch, J. Behrens, V. Brovkin, M. Claussen, T. Crueger, I. Fast, S. Fiedler, S. Hagemann, and E. Roeckner, 2019. MPI-M MPIESM1.2-LR model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP. *Earth System Grid Federation*.
46. Wilhite, D., M. Svoboda, and M. Hayes, 2007. Understanding the complex impacts of drought: A key to enhancing drought mitigation and preparedness. *Water Resources Management* 21: 763-774. doi: 10.1007/s11269-006-9076-5.
47. Wilhite, D. A., M. V. K. Sivakumar, and R. Pulwarty, 2014. Managing drought risk in a changing climate: The role of national drought policy. *Weather and Climate Extremes* 3: 4-13. doi: 10.1016/j.wace.2014.01.002.
48. Yevjevich, V., 1967. An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. *Hydrology Paper No. 23, Colorado State University*.
49. Yukimoto, S., T. Koshiro, H. Kawai, N. Oshima, K. Yoshida, S. Urakawa, H. Tsujino, M. Deushi, T. Tanaka, M. Hosaka, H. Yoshimura, E. Shindo, R. Mizuta, M. Ishii, A. Obata, and Y. Adachi, 2019. MRI MRI-ESM2.0 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP. *Earth System Grid Federation*.
50. Zhou, Z., Y. Ding, Q. Fu, C. Wang, Y. Wang, H. Cai, S. Liu, S. Huang, and H. Shi, 2023. Insights from CMIP6 SSP scenarios for future characteristics of propagation from meteorological drought to hydrological drought in the Pearl River Basin. *Science of the Total Environment* 899: 165618. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.165618.
51. Ziehn, T., M. Chamberlain, A. Lenton, R. Law, R. Bodman, M. Dix, and K. Druken, 2019. CSIRO ACCESS-ESM1.5 model output prepared for CMIP6 CMIP. *Earth System Grid Federation*.