Check for updates

Journal of Climate Change Research 2024, Vol. 15, No. 5-2, pp. 953~964
DOI: https://doi.org/10.15531/KSCCR.2024.15.5.953

농업생산기반시설 기후변화 취약성 평가를 위한 공통사회경제경로 시나리오 기반 미래 기상 데이터베이스 구축

주동혁[*] · 나라[*] · 김하영[*] · 조재필[**] · 이주형[***] · 송석호[****] · 박달주[*****] · 이윤표[*****] · 이명원[******] · 유승환[*******†]

[*]전남대학교 지역·바이오시스템공학과, BK21 기후지능형간척지농업교육연구팀 박사과정, [**]유역통합관리연구원 소장,
[***]한국농어촌공사 미래전략실 기후정책추진단 단장, [****]한국농어촌공사 미래전략실 기후정책추진단 차장,
[*****]한국농어촌공사 미래전략실 기후정책추진단 과장, [******]한국농어촌공사 미래전략실 기후정책추진단 대리,
[*******†]전남대학교 지역·바이오시스템공학과, BK21 기후지능형간척지농업교육연구팀 교수

Development of a future weather database based on Shared Socioeconomic Pathways scenarios for assessing climate change vulnerability of agricultural infrastructure

Joo, Donghyuk[*] · Na, Ra[*] · Kim, Ha-Young[*] · Cho, Jaepil[**] · Lee, JuHyoung[***] · Song, Suk-ho[****] · Park, DalJu[*****] · Lee, YunPyo[*****] · Lee, MyoungWon[******] and Yoo, Seung-Hwan[*******†]

[*]*Ph.D Student, Department of Rural and Bio-Systems Engineering & BK21 Education and Research Unit for Climate-Smart Reclaimed-Tideland Agriculture, Chonnam National University Gwangju, Korea*
[**]*Director, Convergence Laboratory for Watershed Management, Integrated Watershed Management Institute, Suwon, Korea*
[***]*Director, Climate Policy & Strategy Department, Future Strategy Office, Korea Rural Community Corporation, Naju, Korea*
[****]*Deputy Director, Climate Policy & Strategy Department, Future Strategy Office, Korea Rural Community Corporation, Naju, Korea*
[*****]*Manager, Climate Policy & Strategy Department, Future Strategy Office, Korea Rural Community Corporation, Naju, Korea*
[******]*Assistant Manager, Climate Policy & Strategy Department, Future Strategy Office, Korea Rural Community Corporation, Naju, Korea*
[*******]*Professor, Department of Rural and Bio-Systems Engineering & BK21 Education and Research Unit for Climate-Smart Reclaimed-Tideland Agriculture, Chonnam National University Gwangju, Korea*

ABSTRACT

The World Economic Forum (WEF) report predicts extreme weather and severe changes in Earth's systems as the most serious global risks in the short and long term. The agricultural sector is particularly vulnerable to climate change, and damage from extreme weather is increasing. Korea mandates climate change adaptation measures at national and local levels, and the Korea Rural Community Corporation (KRC) is leading efforts to assess climate change impacts and vulnerabilities in rural water and agricultural production infrastructure. The KRC plans to update its vulnerability assessment using Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) scenarios from the the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) sixth assessment report. This study selected Global Climate Models (GCMs) based on national climate change standard scenarios and the the Rural Development Administration's (RDA) GCMs for climate change vulnerability assessment of agricultural production infrastructure. Downscaled data based on observation stations and a 1-km grid were constructed and evaluated for reproducibility using key meteorological variables (precipitation, maximum temperature, minimum temperature, relative humidity, wind speed, and solar radiation). Downscaled data based on observation stations and grid-based data were successfully constructed using 18 GCMs and Multi-Model Ensemble (MME) data from the RDA. Scenario comparisons

†Corresponding author : yoosh15@jnu.ac.kr (61186, Yongbong-ro, Buk-gu, Gwangju, Korea. Tel. +82-62-530-5182)

ORCID
주동혁 0009-0005-3076-0945
나라 0000-0003-3641-2069
김하영 0000-0002-5461-2964
조재필 0000-0002-1369-1002
이주형 0009-0000-3749-2385
송석호 0009-0000-7635-2174
박달주 0009-0005-5530-1710
이윤표 0009-0003-8574-3670
이명원 0009-0008-3256-4042
유승환 0000-0001-8516-7384

Received: September 3, 2024 / Revised: September 27, 2024 / Accepted: October 14, 2024

(SSP2-4.5 and SSP5-8.5) were also conducted. The results of this study can serve as foundation data for national climate adaptation policies and the climate change vulnerability assessment of agricultural production infrastructure.

Key words: SSP Scenario, Downscaling Data, Vulnerability Assessment, GCM, MME

1. 서론

세계 경제 포럼의 ‘Global risk 2024’ 보고서에서는 단기(2년)와 장기(10년) 기간에 가장 심각할 가능성이 있는 글로벌 위험으로써 ‘극단적인 기상현상’과 ‘지구 시스템의 심각한 변화’를 전망하였다(WEF, 2024). 특히, 타 산업에 비해 기후 영향이 큰 산업인 농업 분야의 경우 이상기후로 인한 피해면적이 2016년 4만 ha 대비 2020년 20만 ha로 5배 넘게 증가하였으며, 해를 거듭할수록 극심한 피해가 증가하고 있다(RRI, 2023).

이에 따라 국내에서는 ‘저탄소녹색성장기본법(이하 녹색성장법)’을 시행하여 국가 및 지자체 단위의 기후변화 적응 대책 수립·시행을 의무화하였으며, 제 48조에 따라 기후변화 영향 및 취약성의 조사·평가·공표하여 각 부문의 기후변화 적응 대책을 수립하고 있다. 농업 부문에서는 ‘농업·농촌 및 식품산업 기본법’ 제 47조에 의해 5년마다 조사·평가하여 그 결과를 공표하고 이를 정책 수립의 기초자료로 활용하고 있다. 또한 농업·농촌 분야는 농촌진흥청, 임업 분야는 산림청, 농어촌용수 및 농업생산기반시설 분야는 한국농어촌공사가 위임하여 기후변화·영향 취약성 평가에 대한 세부기준 수립 및 실태조사를 추진 중에 있다(Jang et al., 2019; Kim et al., 2016, 2021). 그리고 2023년 정부에서는 ‘기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법’ 제 38조, 41조에 근거하여 「제 3차 국가 기후위기 적응 강화대책」을 수립하였으며, 사회경제적 상황을 고려한 국가기후변화 표준시나리오 생산(1 km 해상도 기반)과 지구시스템 모델 활용도(IPCC 7차 평가보고서 대비 기후변화 예측 기술 고도화) 제고의 필요성을 언급하였다(ME, 2023).

한편, 한국농어촌공사에서는 CMIP5 (Coupled model intercomparison project phase 5)의 RCP (Representative concentration pathways) 시나리오 기반 농업생산기반시설의 기후변화 취약성 평가를 IPCC (Intergovernmental panel on climate change) 6차 보고서의 SSP (Shared socioeconomic pathways) 시나리오로 갱신 및 활용하고자 농업생산기반정비사업 기후변화 영향조사의 방법론 개발 및 가이드라인을 수립하고 있으며, 취약지역에 대한 관련 대책 수립 및 근거를 마련하고 있다(Song et al., 2023). 이에 따라 농업생산기반시설 취약성 평가를 위한 SSP 시나리오 기반의 미래 기상 데이터베이스 구축이 필요하며, 농업생산기반시설의 특성을 반영할 수 있는 관측소 기반, 격자 기반의 상세화 자료가 구축되어야 하는 시점이다.

국내·외에서는 SSP 시나리오 기반의 기상 데이터베이스 구축 및 기후 전망과 관련된 다양한 연구가 진행되고 있다. Kim et al. (2021)은 농업용 저수지의 농업가뭄에 대한 기후변화 영향을 평가하기 위해 시도별로 기후노출, 민감도, 잠재 영향을 평가하였으며, Jang (2006) 농업가뭄 영향 인자의 주성분 분석(Principal component analysis, PCA)으로 시군단위의 농업 가뭄 취약성 평가를 수행하였다. Kim et al. (2022)은 MK-PRISM 기법을 통해 산출된 수평해상도 1 km의 고해상도 남한상세 기후변화 시나리오를 활용하여 저탄소 시나리오(SSP1-2.6), 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)를 대상으로 남한의 6개 권역에 대한 미래 기후변화를 전망하였다. 또한 Hur, Jo, et al. (2024)는 농촌진흥청의 18개 다중모형 GCM (Global climate model) 기반의 SSP-RCP 기후변화 시나리오를 이용하여 한반도 기온 및 온량지수의 미래 변화를 분석하였다. Hur, Kim, et al. (2024)는 농촌진흥청에서 생산한 SSP 기후변화 시나리오 기반의 1 km 해상도 전망 자료 및 기술을 소개하고, 근미래(2011 ~ 2040), 중간미래(2041 ~ 2070), 먼미래(2071 ~ 2100)에 대한 과거(1981 ~ 2010) 대비 기후요소(강수량, 평균기온, 최고기온, 풍속, 일사량)별 변화를 전망하고 비교·분석하였다. Su et al. (2021)은 CMIP6의 4가지 기후모델과 7가지 SSP-RCP를 활용하여 중국의 단기미래, 중기미래, 장기미래 가뭄 특성을 분석하고 가뭄을 전망하였다. Elsadek et al. (2024)는 이집트 나일강 삼각주의 벼 수확량에 대한 기후변화 영향을 평가를 위해 CMIP6의 10개 GCM을 활용 및 SSP2-4.5 시나리오 및 SSP5-8.5 시나리오를 활용하였다. Mohammed et al. (2024)는 CMIP6 SSP 시나리오 자료 및 머신러닝을 활용하여 중부 유럽의 1900 ~ 2100년의 단기 농업 가뭄을 모니터링 및 예측하였다. 선행연구를 살펴보면 대부분 SSP 시나리오 중 상반되는 시나리오를 선택하여 취약성 평가 및 주요 기상변수, 기후지표 분석을 수행하였으며, 미래 기간을 근미래, 중간미

래, 먼미래로 나누어 분석한 결과를 제시하였다. 또한 다중 GCM을 활용하여 기후변화 자료의 불확실성을 해소하고자 하였다. 하지만 대부분 농업생산기반시설에 대한 취약성 평가를 목적으로 한 연구는 적었으며, 특히 관측소 및 격자 기반의 상세화 자료를 함께 구축하여 미래 기후를 전망한 사례는 미비하였다.

본 연구에서는 농업생산기반시설 기후변화 취약성 평가를 위해 SSP 기후변화 시나리오기반의 국가 기후변화 표준 시나리오, 농촌진흥청 GCM을 활용하여 적용가능한 GCM을 선정하였다. 또한 농업생산기반시설에서 중요하게 고려되는 필요수량 산정 인자 관련 자료를 구축하기 위해 관측소 및 1 km 격자 기반의 상세화 자료를 구축하고, 구축된 자료의 신뢰성 확보를 위해 퍼센트 에러(Percent error)를 통해 재현성을 평가하였으며, 주요 기상변수(강수량, 최고기온, 최저기온, 상대습도, 풍속, 일사량)에 대한 시나리오 및 기간별 결과를 비교·분석하였다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 SSP 미래 기후변화 시나리오 기반의 농업생산기반시설 기후변화 취약성 평가를 위해 기상청의 국가 기후변화 표준 시나리오, 농촌진흥청에서 제공하는 GCM을 활용하여 적용 가능한 GCM 목록을 선정하고 관측소 및 1 km 격자 기반의 상세화 자료를 구축하였다. 또한 구축된 데이터베이스의 신뢰성을 확보하기 위해 퍼센트 에러를 통한 재현성을 평가하였으며, 주요 기상 변수(강수량, 최고기온, 최저기온, 상대습도, 풍속, 일사량)를 활용하여 시나리오 및 기간별 결과를 비교·분석하였다. 연구 흐름도는 Fig. 1과 같다.

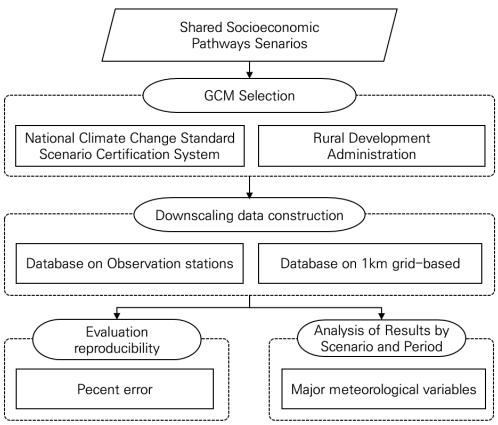


Fig. 1. Flow chart of the study

2.1. SSP 기후변화 시나리오

기후변화 적응 대책 수립에 있어 기후 모델링 기술의 발달과 함께 사회경제 및 온실가스 배출량 등을 고려하여 전망자료를 활용하는 것이 바람직하며, 이에 따라 IPCC 6차 평가 보고서(AR6)에서는 1.5℃로 온난화를 제한하는 기후변화 시나리오가 필요하여 RCP2.6보다 낮은 복사강제력을 포함하여 다양한 복사강제력에 대한 SSP 시나리오가 개발되었다. SSP 시나리오에서는 SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5 등 4개를 일반적으로 사용하고 있으며, SSP 시나리오의 첫 번째 숫자는 사회경제지표를 나타내며, 두 번째 숫자는 RCP 시나리오와 같이 2100년 기준의 복사강제력(1.9, 2.6, 4.5, 7.0, 8.5 W/m^2)을 나타낸다. 각 시나리오의 구분은 기후변화 적응 및 완화를 위한 사회적 노력에 따라 Table 1, Fig. 2와 같이 구분된다 (O'Neill et al., 2016).

Table 1. Classification of SSP scenarios

SSP scenarios	Explanation
SSP1	Sustainability – Taking the green road (Low challenges to mitigation and adaptation)
SSP2	Middle of the road (Medium challenges to mitigation and adaptation)
SSP3	Regional rivalry – A rocky road (High challenges to mitigation and adaptation)
SSP4	Inequality – A road divided (Low challenges to mitigation, high challenges to adaptation)
SSP5	Fossil-fueled development – Taking the highway (High challenges to mitigation, low challenges to adaptation)

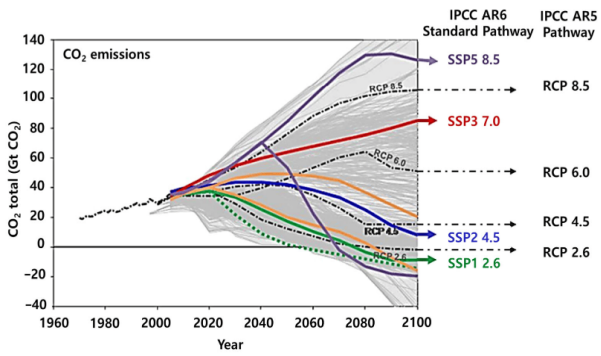


Fig. 2. SSP-RCP scenario pathways

2.2. GCM 선정

IPCC 5차 평가 보고서 발간에 따라 2011년 정부에서는 국가 기후변화 적응 대책 기본계획을 수립 시 환경부 등 관계부처에서는 기상청 시나리오를 기준으로 사용하기로 합의하였으며, 시나리오 생산 방법과 객관성에 대한 최소한의 기준 여부를 확인하여 다양한 시나리오를 활용 가능하도록 국가 기후변화 표준시나리오 인증제도를 운영 중에 있다. 기상청 국가 기후변화 표준시나리오 인증에 등록된 SSP 기반 GCM으로는 한국기상청에서 개발 및 생산한 K-ACE (Korea atmosphere-ocean-coupled earth system model) 모델과 한국 기상청과 영국기상청이 함께 개발 및 생산한 UKESM1 (UK earth system model 1) 모델과 두 모델의 평균 자료인 앙상블 자료가 존재한다. 기상청 모델의 경우 공간 해상도가 135 km로 공간 상세화 및 편이 보정이 필요함과 동시에 앙상블 자료의 경우 K-ACE모델과 UKESM1 모델 자료의 단순 일평균 자료로 일단위 패턴 등의 분석이 필수적인 농업생산기반시설 취약성 평가에서는 부적합한 모델로 판단된다. 한편, GCM 자료 기반의 고해상도 자료의 지역별 상세화를 연구하는 국제적인 과학프로젝트인 CORDEX (Coordinated regional climate downscaling experiment)에서는 동아시아 지역의 역학적 상세화를 수행하였다. 기상청에서는 역학적 상세화 자료 중 HadGEM3-RA 모델 자료 및 5개의 RCM (Regional climate model) 앙상블 자료를 통계적 상세화를 통해 편이가 보정된 1 km 단위의 공간분해능에 대한 표준 시나리오 인증 자료를 생성하였다. 하지만 본 자료의 경우 재현기간이 WMO (World meteorological organization)에서 권장하는 30년보다 짧으며, 산출 변수 또한 강수량 및 기온만을 포함하고 있어 농업생산기반시설 기후변화 취약성 평가에 있어 부적합한 자료로 판단하였다.

농촌진흥청에서는 IPCC가 제공한 CMIP6의 SSP 시나리오 기반 18개 GCM 자료를 수집하였으며, 재현기간이 최소 30년(1981 ~ 2014)을 만족하며, 공간 분해능이 1 km, 시간 분해능은 일단위 6개의 주요 기상 변수(강수량, 최고기온, 최저기온, 상대습도, 풍속, 일사량)가 포함된 모델로 취약성 평가에 적합할 것으로 판단하였다(Hur, Kim, et al., 2024). Table 2는 SSP 기반 기상청 및 농촌진흥청의 통계학적 상세화 자료를 비교한 내용이며, Table 3은 본 연구에 활용한 농촌진흥청의 18개 GCM 목록을 나타내었다.

2.3. 관측소 및 격자 기반 상세화 자료 구축 및 재현성 평가

농업용 저수지의 경우 약 17,000개소로 전국 각지에 산재해 있으며, 주로 산림 지역에 유역이 존재한다. 또한 한국농어촌공사 및 지방자치단체로 나누어 관리하고 있으며, 용수구역도 및 행정구역에 따른 농업용저수지의 기후변화 취약성 평가가 필요한 상황이다. 이에 따라 관측소 기반의 상세화 자료뿐만 아니라 산림이 많은 지역과 같은 고도의 영향을 많이 받는 기상변수 생성에 적합한 격자 기반의 상세화 자료를 활용하였다. 이와 더불어 농업생산

Table 2. List of statistical downscaling data for SSP-based national climate change standard scenario certification

Institution	Meteorological administration	Rural development administration	
Initial conditions	HadGEM3-RA, CCLM, WRF, RegCM, GRIMs (SSP 1-2.6/5-8.5)	18 GCMs (SSP 1-2.6/2-4.5/3-7.0/5-8.5)	18 GCMs (SSP 1-2.6/2-4.5/3-7.0/5-8.5)
Spatial domain	South Korea	Korean peninsula	Korean peninsula
Spatial resolution	1 km	1 km	60 ASOS station
Used model	PRIDEV2.0	SQM-Grid	SQM
Temporal resolution	Daily	Daily	Daily
Reproduction· forecast period	Reproduction (2000 ~ 2019) Forecast (2021 ~ 2100)	Reproduction (1981 ~ 2014) Forecast (2021 ~ 2100)	Reproduction (1981 ~ 2020) Forecast (2021 ~ 2100)
Output variable	Average temperature, Max temperature, Min temperature, Precipitation	Maximum temperature, Minimum temperature, Precipitation, Average relative humidity, Solar radiation, Average wind velocity	Maximum temperature, Minimum temperature, Precipitation

Table 3. List of target GCMs

GCMs	Production institution	Resolution
ACCESS-CM2	Federal scientific and Industrial research organization, Australian research council centre of excellence for climate system science	192×144
ACCESS-ESM1-5	Commonwealth scientific and Industrial research organisation (CSIRO)	192×145
CanESM5	Canadian centre for climate modelling and analysis, Environment and climate change canada	128×64
EC-Earth3	EC-Earth consortium	512×256
IPSL-CM6A-LR	Pierre-simon laplace Institute	144×143
CNRM-CM6-1	National center for Meteorological research, European centre for advanced research and education in scientific computation	24572 grids distributed over 128 latitude circles
CNRM-ESM2-1	National center for meteorological research, European centre for advanced research and education in scientific computation	24572 grids distributed over 128 latitude circles
MPI-ESM1-2-HR	Max planck institute for meteorology	384×192
MPI-ESM1-2-LR	Max planck institute for meteorology	192×96
MIROC6	Agency for marine-earth science and technology	256×128
MIROC-ES2L	Agency for marine-earth science and technology	128×64
MRI-ESM2-0	Japan meteorological agency (JMA)	320×160
KACE-1-0-G	Korea meteorological administration (KMA)	192×144
NorESM2-LM	NorESM climate modeling consortium	144×96
INM-CM4-8	Institute of numerical mathematics, Russian academy of sciences	180×120
INM-CM5-0	Institute of numerical mathematics, Russian academy of sciences	180×120
UKESM1-0-LL	Met office hadley centre	192×144
GFDL-ESM4	National oceanic and atmospheric administration (NOAA), Institute of geophysical fluid dynamics	360×180

기반시설 취약성 평가에서는 76개 기상관측소에 대하여 과거 자료를 활용하고 있어 기존 농진청 생산자료와 동일 기법을 적용하되 16개 관측소에 대해서 추가로 구축하였으며, 취약성 평가 시 활용되는 지표인 필요수량 산정을 위해 주요 변수인 일조시간 및 증발산량을 구축하였다.

재현성 평가의 경우 단일 GCM에 따른 모델 특유의 오차 및 한계가 결과에 직접적인 영향을 미칠 수 있으므로 다중 모형 앙상블(MME, Multi-model ensemble)을 통해 평가하였다. 기후변화 상세화 자료 구축 과정은 Fig. 3과 같다.

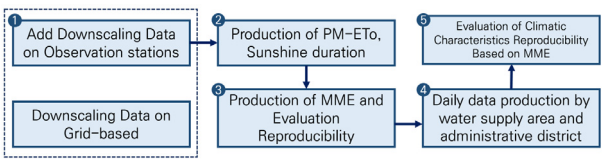


Fig. 3. Flow of the downscaling data production

2.3.1. 관측소 및 격자 기반 상세화 자료 구축

관측소 기반 상세화 자료의 경우 통계적 보정에 필요한 장기간 자료가 존재하는 62개 관측소에 대해서는 과거기간(Historical)으로 1981~2010년의 30년 기간을 활용하였으며, 장기간 자료가 없는 14개 관측소에 대해서는 과거기간으로 1991~2020년의 30년 기간을 활용하였다. 자료 구축을 위한 변수 리스트로는 일 강수량, 기준증발산량, 증발량, 일 최저기온, 일 최고기온, 일 평균기온, 상대습도, 일조시간, 풍속을 선정하였다. Table 4는 데이터베이스 구축을 위한 변수 리스트를 나타내었다. 또한, 통계적 보정으로는 SQM (Simple quantile mapping)을 사용하였으며, 일사량 자료가 없는 관측소에 대해서는 티센폴리곤망을 활용하여 자료를 구축하였다. 기준증발산량(ETo)의 경우 FAO Penman-Monteith 방법, 증발량은 기상청 방식을 활용하였으며, 일조시간을 추정하는 식이 명확하게 존재하지 않은 점을 고려하여 기준증발산량 계산식을 통

Table 4. Variable list for database construction

Column name	Detailed description
Date	Date (YYYYMMDD)
Prec	Daily precipitation (mm/day), calculated using the simple quantile mapping (SQM) technique from daily precipitation data of GCM
ETo	ETo (mm), calculated from the FAO Penman-Monteith reference evapotranspiration (ETo) using the bias-corrected maximum temperature, minimum temperature, solar radiation, relative humidity, and wind speed variables from GCM
EV	Evaporation (mm), calculated from the previously computed reference evapotranspiration (ETo) using the conversion formula based on the pan coefficient used by the meteorological agency
Tmin	Daily minimum temperature (℃), derived directly from GCM with bias correction applied
Tmax	Daily maximum temperature (℃), derived directly from GCM with bias correction applied
Tavg	Daily average temperature (℃), calculated as the arithmetic mean of the maximum temperature (Tmax) and minimum temperature (Tmin) obtained from GCM with bias correction applied
Rhum	Relative humidity (%), derived directly from GCM with bias correction applied
Shine	Daily sunshine duration (hr), calculated using the values produced during the computation of ETo and solar radiation data
Wspd	Wind velocity (m/s), derived directly from GCM with bias correction applied

해 일사량에서 일조시간을 추정하였다. 일조시간의 계산 과정은 식 (1)과 같다.

$$n = N \times \left(\frac{R_s}{R_a} - a_s\right) \times \frac{1}{b_s} \quad (1)$$

여기서, n은 실제 일조시간, R_s는 태양 또는 단파 복사, R_a는 외계 방사선, N은 가능한 최대 일조시간 또는 일광시간, a_s는 회귀상수(0.25), b_s는 맑은날(n=N) 지구에 도달하는 외계 방사선의 비율이다. Fig. 4는 일사량 자료 제공 관측소 및 티센폴리곤망을 나타내었으며, 붉은색 관측소의 경우 일사량을 계측하고 있는 관측소이다.

격자 기반 상세화 자료의 경우 농촌진흥청에서 생산한 1 km 해상도의 상세화 자료로부터 광역시 행정구역이 통합된 시군구 경계도(167 polygon) 및 한국농어촌공사 용수구역도(511 polygon)에 대하여 고유 ID를 부여한 후 폴리곤 내 격자값들의 면적 평균을 통해 일단위 상세화 자료를 구축하였다. 또한 관측소 기반 상세화 자료 구축에 사용된 FAO Penman-Monteith 방법으로 1 km 해상도의 기준증발산량을 구축하였다. Fig. 5는 격자 기반 상세화 자료 구축 과정을 나타내었다.

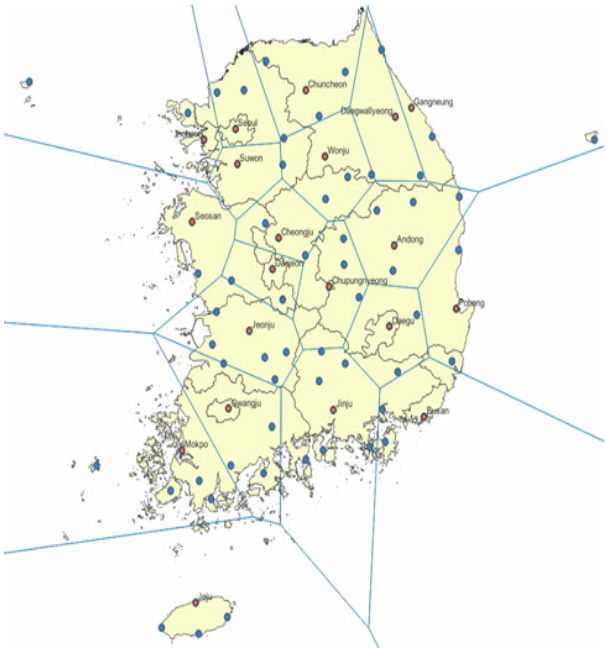


Fig. 4. Solar radiation data providing observation stations and thiessen polygon network

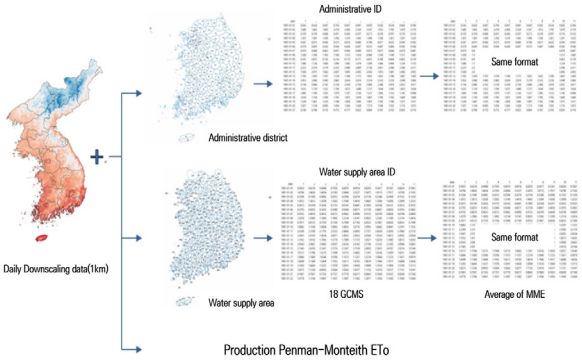


Fig. 5. Flow of the downscaling data production

2.3.2. 재현성 평가

재현성 평가는 과거의 기후 데이터 활용에 있어 기후모델을 통해 생성된 Historical 데이터와 실제 기상관측소를 통해 얻은 실제 관측 데이터인 Observed 데이터를 이용한 결과를 비교하는 것을 말하며, 기후모델의 정확성과 신뢰성을 높일 수 있다.

정성적인 재현성 평가는 관측소별 또는 격자별로 계산된 기후 값의 공간 분포 맵을 비교함으로써 가능하고, 정량적인 평가를 위해서는 관측소별 또는 격자별로 계산된 퍼센트 에러를 활용하여 평가할 수 있다. 본 연구에서는 격자 기반 기준증발산량의 경우 정성적인 공간 분포의 비교를 통해 재현성을 평가하였으며, 주요 기상변수의 경우에는 관측소 자료를 이용하여 용수구역 폴리곤별 극한기후지수를 산정한 후 용수구역별로 퍼센트 에러를 산정하여 정량적인 재현성을 평가하였다. 정량적인 재현성 평가의 계산과정은 식 (2)와 같다(Song et al., 2019).

$$\mathrm{Percenterror} = (\mathrm{His}-\mathrm{Obs})/\mathrm{Obs} \times 100 \quad (2)$$

여기서 His는 모델의 과거 데이터를 의미하고, Obs는 관측자료의 과거 데이터를 의미한다.

3. 관측소 기반 상세화 자료 구축 결과

3.1. GCM 우선순위

본 연구에서는 통계적 상세화 이전의 GCM이 갖는 시공간적 패턴이 실제 관측자료에 의한 패턴과 비교하여 얼마나 잘 재현하는지를 평가하고 기후의 특성을 현저하게 반영하지 못하는 GCM들을 판단하기 위해 GCM 자료의 우선순위를 선정하였다. GCM 선정은 30년 이상 자료가 존재하는 60개 ASOS (Automated surface observing system) 관측자료와 비교하였으며, 강수량 및 평균기온에 대해 ASOS 관측지점에 해당하는 편이보정 이전의 GCM 값을 추출한 후 근미래(2011 ~ 2040), 중간미래(2041 ~ 2070), 먼미래(2071 ~ 2100) 30년 평균을 계산 후 관측자료와의 비교를 통해 시간 및 공간적 상관계수를 산정하여 종합적인 상관도가 높은 GCM을 순서대로 정렬하여 GCM의 순위를 제시하였다. 시공간적 재현성은 해상도가 가장 높은 EC-Earth3가 가장 우수한 것으로 나타났으며, 그다음으로 해상도가 높은 MPI-ESM1-2-HR 및 GFDL-ESM4 모델은

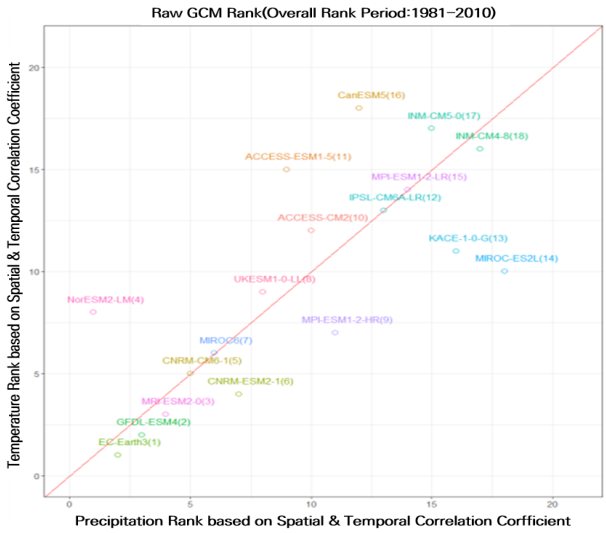


Fig. 6. Ranking of spatiotemporal reproducibility of GCMs before bias correction compared to ASOS observation stations

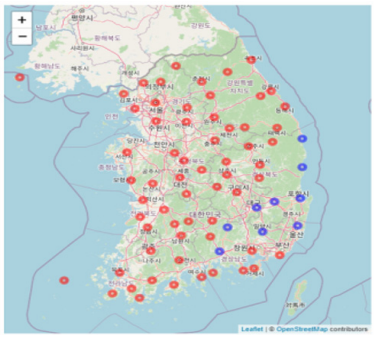
각각 9위 및 2위의 결과를 나타내었다. GCM 우선순위를 선정하는 것은 모델의 안정성 및 불확실성을 줄이기 위해 다중모델앙상블에 대한 검증 모델을 제시함에 있어 의미가 있다. Fig. 6은 시공간적 재현성이 높은 GCM의 순위를 나타내었다.

3.2. SSP2-4.5 및 SSP5-8.5 시나리오의 비교

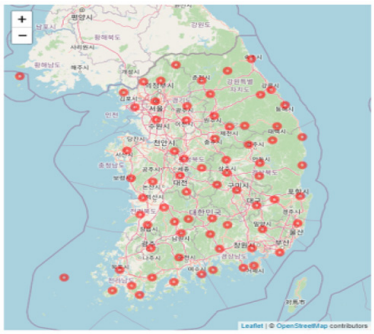
본 연구에서는 기후완화정책의 실행 유무에 따른 비교를 위해 SSP 시나리오 중 현재 기후완화정책과 가장 유사하며, 다양한 사회경제적 문제와 불균형이 존재하는 SSP2-4.5 시나리오와 경제성장을 우선시하며, 화석연료 사용이 증가하는 고탄소 시나리오인 SSP5-8.5 시나리오를 대상으로 근미래 기간의 강수량 및 기온(최고, 최저,

Table 5. Average percentage differences by observation station for by target variable

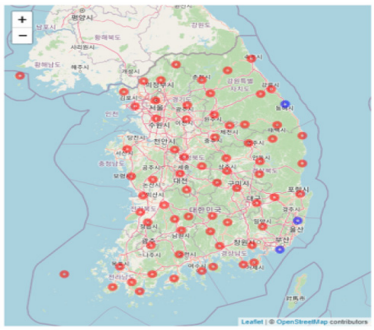
Meteorological variable	Average percentage difference (%)
Precipitation	1.35
Average temperature	1.80
Maximum temperature	1.38
Minimum temperature	2.81
Average relative humidity	-0.02
Average wind velocity	-0.69
ETo	0.85



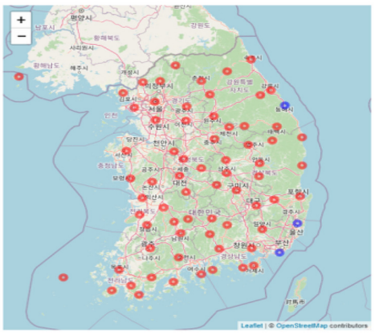
(a) Percent difference in precipitation by SSP scenarios in the near future



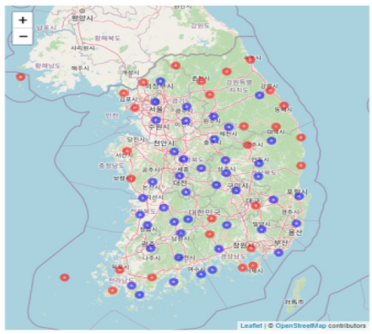
(b) Percent difference in average temperature by SSP scenarios in the near future



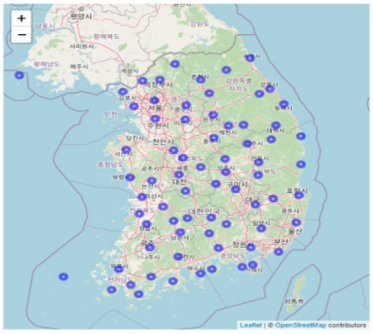
(c) Percent difference in maximum temperature by SSP scenarios in the near future



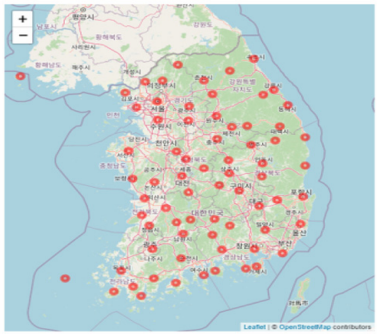
(d) Percent difference in Minimum temperature by SSP scenarios in the near future



(e) Percent difference in average relative humidity by SSP scenarios in the near future



(f) Percent difference in average wind velocity by SSP scenarios in the near future



(g) Percent difference in ETo by SSP scenarios in the near future

Fig. 7. Percent difference by major meteorological variables according to SSP scenarios

평균), 습도, 풍속 및 기준증발산량 차이를 비교·분석하였다. 또한 각 GCM별 불확실성 및 시나리오 간 단순 비교를 고려하여 18개 GCM의 MME 값에 대해 퍼센트 증가량을 비교·분석하였으며, 증가하는 경우 붉은색, 감소하는 경우 파란색으로 표출하였다. 주요 기상변수에 대한 관측소별 퍼센트 증가량은 Table 5, Fig. 7과 같다.

분석 결과 대부분의 관측소에서 평균기온은 평균 1.80%, 기준증발산량 0.85%, 최고기온 1.38%, 강수량 1.35%, 최저기온은 2.81%로 증가하였으며, 상대습도는 −0.02%, 풍속은 −0.69%로 감소한 것으로 나타났다. 이는 SSP5-8.5 시나리오에서 최저기온이 전체적으로 증가함에 따라 평균기온에 미치는 영향 정도가 큰 것으로 판단되며, 평균기온 및 기준증발산량의 증가, 강수량 증가로 극단적인 기상이 발생할 확률이 높음을 의미한다.

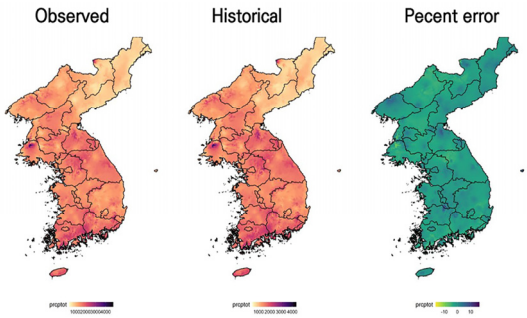
4. 격자 기반 상세화 자료 구축

4.1. 기후특성 재현성 평가 결과

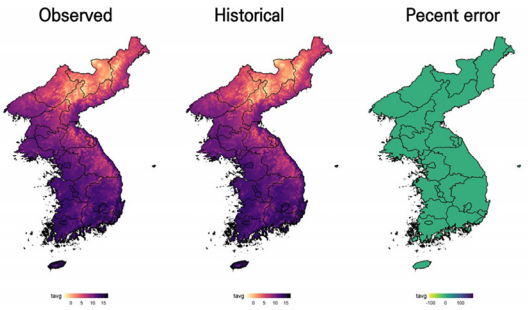
격자 기반 관측자료를 사용하여 생산된 연 기준증발산량(Observed)와 동일한 기간에 대해 18개 GCM을 이용하여 구축된 연 기준증발산량(Historical)의 재현성은 매우 높은 결과를 보였으며, 동일한 SSP 시나리오에서는 근미래에서 먼미래로 갈수록 기준증발산량이 전체적으로 증가하는 경향을 보였다. 또한 동일한 미래 기간에서는 SSP2-4.5에서 SSP5-8.5 시나리오로 갈수록 연 단위 기준증발산량이 증가하는 경향을 나타내었다. 평균 연강수량 및 평균기온의 경우 각각 −1.74%, −0.001%의 높은 재현성 평가 결과를 나타내었다. 본 결과는 농업생산기반시설의 물수지분석에 가장 중요한 인자인 평균기온, 평균강수량 및 기준증발산량의 재현성을 확보하는 것으로 농업생산기반시설 기후적응정책 수립의 신뢰도를 향상시킬 수 있다. 기준증발산량, 평균 연 강수량, 평균기온의 재현성 평가 결과는 Fig. 8과 같다.

4.2. 시나리오 및 기간별 자료 구축

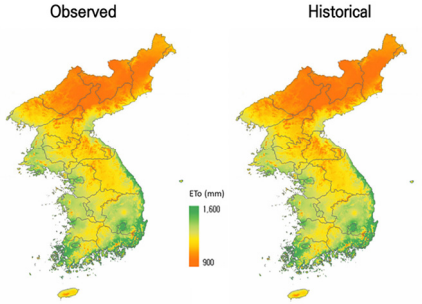
1 km 격자 기반 상세화 자료의 시나리오 및 기간별 기후 전망은 강수량, 최고기온, 최저기온, 일사량, 풍속, 상대습도에 대한 일 단위 자료를 분석하였다. 연 강수량의 경우 과거기간 대비 미래 기간으로 갈수록 증가 경향을 보이나, 근미래 기간에는 큰 변화가 없으며, 먼미래 기간 및 SSP5-8.5 시나리오에서 급격하게 증가하는 나타났다. 최고기온 및 최저기온의 경우 모든 시나리오에서 근미래 기간에 상승폭이 비슷하나, 먼미래 기간에서 증가폭이 크며, SSP5-8.5 시나리오에서는 급격한 상승폭을 보였다. 특히, 최고기온 및 기준증발산량의 경우 해안가를 중심으로 가장 높은 값을 보이는 것으로 나타났다. 풍속 및 상대습도의 경우 모든 시나리오 및 기간에서 현재 대비 미래에 다소 감소 경향을 보였으나, 전반적으로 큰 변화폭은 없는 것으로 전망되었으며, 일사량은 모든 시나리오 및 기간에서 현재 대비 다소 증가하는 것으로 전망되었



(a) Evaluation of reproducibility 30-year (1981~2010) average annual precipitation

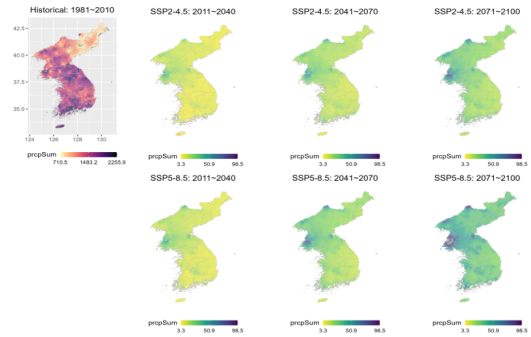


(b) Evaluation of reproducibility 30-year (1981~2010) average annual average temperature

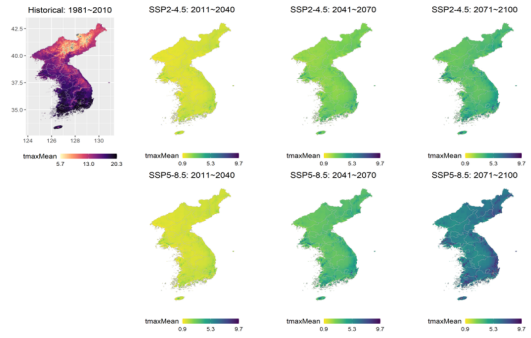


(c) Evaluation of reproducibility 30-year (1981~2010) average annual ETo

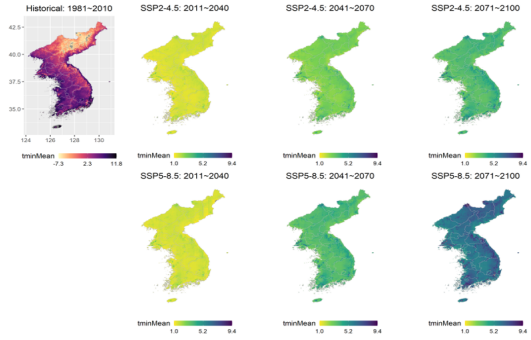
Fig. 8. Evaluation result of climate characteristics reproducibility



(a) Result data of annual precipitation



(b) Result data of annual average maximum temperature



(c) Result data of annual average minimum temperature

Fig. 9 Result data by scenario and period

다. Fig. 9는 시나리오 및 기간별 자료 구축 결과를 나타내었다.

5. 결론 및 요약

본 연구에서는 SSP 시나리오 기반의 농업생산기반시설 기후변화 취약성 평가를 위해 기상청의 국가 기후변화 표준시나리오 및 농촌진흥청에서 생산한 GCM을 활용하여 적용 가능한 GCM 목록을 선정하고, 관측소 및 1 km 격자 기반의 상세화 자료를 구축하였다. 또한 구축된 자료의 신뢰성을 확보하기 위해 퍼센트 에러를 통한 재현성을 평가하고, 주요 기상변수(강수량, 최고기온, 최저기온, 상대습도, 풍속 등)의 시나리오 및 기간별 결과를 비교·분석하였다.

관측소 기반 상세화 자료 구축은 먼저 각 GCM이 갖는 시공간적 패턴 및 재현성을 판단하기 위해 편이보정 전의 GCM 값을 근미래, 중간미래, 먼미래로 분류하였다. 그 후 30년 평균값을 관측자료와 비교하여 시공간적 상관계수가 높은 GCM 우선순위를 제시하였으며, 시공간적 재현성은 해상도가 가장 높은 EC-Earth3가 가장 우수한 것으로 나타났다. 다음으로는 SSP 시나리오 중 상반된 기후변화 시나리오인 SSP2-4.5와 SSP5-8.5 시나리오의 18개 GCM에 대한 MME에 대해 퍼센트 증가량을 비교·분석하였다. 분석 결과 대부분 관측소에서 강수량, 최고 기온, 최저 기온, 평균 기온, 기준증발산량은 SSP5-8.5 시나리오에서 높게 나타났으며, 상대습도, 풍속은 낮은 것으로 나타났다. GCM의 우선순위 선정은 MME에 대한 검증 모델을 제시하여 모델의 안전성 및 신뢰성 검증에 있어 그 의미가 있다.

격자 기반 상세화 자료 구축 결과, 기후 특성 재현성 평가에서는 연 기준증발산량이 동일 기간에 대해 관측자료 대비 18개 GCM의 MME 생산 자료 대비 매우 높은 재현성을 보였으며, 평균 연 강수량 및 연 평균 기온에서도 각각 −1.74%, −0.001%의 높은 재현성 평가 결과를 나타냈다. 시나리오 및 기간별 기후 전망 결과, 연 강수량, 최고기온, 최저기온의 경우 먼미래 기간에서 증가폭이 크며, SSP5-8.5 시나리오에서 급격한 상승폭을 보인 반면, 풍속 및 상대습도의 경우 모든 시나리오 및 기간에 현재 대비 미래에 다소 감소 경향을 보이며, 전반적으로 큰 변화폭이 없는 것으로 전망되었으며, 일사량은 모든 시나리오 및 기간에서 현재 대비 다소 증가하는 것으로 나타났다. 농업생산기반시설의 취약성평가 중 필요수량 산정을 위한 가장 중요한 인자인 평균기온, 평균강수량 및 기준증발산량의 재현성을 확보하는 것은 농업생산기반시설 기후정책정책 수립의 신뢰도를 향상시킬수 있다.

격자 기반 상세화 자료와 다르게 관측소 기반 상세화 자료의 경우, 농업생산기반시설 취약성 평가를 위해 기존 관측소 대비 14개의 관측소 기상 자료를 추가로 구축하는 과정에서 장기간 자료가 부재하여 과거기간의 불일치로 인한 불확실성이 존재하며, 특히, 일사량 자료가 없는 관측소에 대해 티센폴리곤망을 활용하여 일사량 자료를 구축하였기에 관측소별 일사량 및 일조시간 자료의 신뢰성

을 보장하기에는 한계가 있으며, 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 18개의 다중 GCM 및 MME 자료를 활용함으로써, 각 모델의 장점을 활용 및 약점을 상쇄시켜 신뢰성 높은 기후 전망을 가능하게 하였으며, 특정 지역의 기후 특성이나 환경변화를 전망할 시 특정 모델 선정에 따른 편이를 최소화하여 보다 신뢰할 수 있는 적응 정책 수립에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 관측소 기반 상세화 자료 및 1 km 격자 기반 상세화 자료를 구축함으로써 지형적인 요소의 영향이 큰 농업생산기반시설의 기후변화 취약성 평가와 농업용 저수지 물수지 분석 프로그램의 기초자료 역할을 할 것으로 판단된다. 또한 1 km 기반 자료를 통해 지역 특성에 기반한 지역 맞춤형 모델의 개발을 위한 기초자료 및 작물 생육 모델링 등의 기초자료로써 활용가능할 것으로 사료된다.

사사

본 연구는 한국농어촌공사 “농업생산기반정비사업 기후변화 영향조사 방법론 개발 및 가이드라인 수립 연구용역”의 지원으로 수행되었습니다.

References

Elsadek E, Zhang K, Hamoud Y, Mousa A, Awad A, Abdallah M, Shaghaleh H, Hamad A, Jamil M, Elbeltagi A. 2024. Impacts of climate change on rice yields in the Nile River Delta of Egypt: A large-scale projection analysis based on CMIP6. Agric Water Manag 292: 108673. doi: 10.1016/j.agwat.2024.108673

Hur J, Jo JP, Jo S, Shim KM, Kim YS, Kang MG, Oh CS, Seo SB, Kim ES. 2024. SSP climate change scenarios with 1km resolution over Korean peninsula for agricultural uses (in Korean with English abstract). Korean J Agric For Meteorol 26(1): 1-30. doi: 10.5532/KJAFM.2024.26.1.1

Hur J, Kim Y, Jo S, Kim E, Kang M, Shim K, Hong S. 2024. Changes in mean temperature and warmth index on the Korean peninsula under SSP-RCP climate change scenarios (in Korean with English abstract). Atmosphere 34(2): 123-138. doi: 10.14191/Atmos.2024.34.2.123

Jang M. 2006. County-based vulnerability evaluation to agricultural drought using principal component analysis -The case of Gyeonggi-do- (in Korean with English abstract). J Korean Soc Rural Plan 12(1): 37-48.

Jang MW, Kim SJ, Bae SJ, Yoo SH, Jung K, Hwang S. 2019. Assessing vulnerability to agricultural drought of pumping stations for preparing climate change (in Korean with English abstract). J Korean Soc Agric Eng 61(6): 31-40. doi: 10.5389/KSAE.2019.61.6

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 SJ, Bae SJ, Kim S, Yoo SH, Choi J, Jang MW. 2021. Assessing the potential impact of climate change on irrigation by reservoir (in Korean with English abstract). J Korean Soc Agric Eng 63(6): 141-150. doi: 10.5389/KSAE.2021.63.6.141

Kim SJ, Bae SJ, Kim S, Yoo SH, Jang MW. 2016. Assessing sensitivity of paddy rice to climate change in South Korea. Water 8(12): 554. doi: 10.3390/w8120554

ME (Ministry of Environment). 2023. The enhanced 3rd national climate crisis adaptation plan. Sejong, Korea: Author.

Mohammed S, Arshad S, Alsilibe F, Moazzam M, Bashir B, Prodhan F, Alsalman A, Vad A, Ratonyi T, Harsanyi E. 2024. Utilizing machine learning and CMIP6 projections for short-term agricultural drought monitoring in central Europe (1900–2100). J Hydrol 633: 130968. doi: 10.1016/j.jhydrol.2024.130968

O'Neill B, Tebaldi C, Vuuren D, Eyring V, Friedlingstein P, Hurtt G, Knutti R, Kriegler E, Lamarque J, Lowe J, et al. 2016. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. Geosci Model Dev 9(9): 3461-3482. doi: 10.5194/gmd-9-3461-2016

RRI (Rural Research Institute). 2023. A Research on application of design standards reflecting future climate

change scenarios. Ansan, Korea: Author.

Song SH, Lee JH, Park DJ, Lee MW, 2023. A study on climate change vulnerability assessment for agricultural water and Korea Rural Community Corporation (KRC) climate adaptation measures (in Korean with English abstract). J Clim Change Res 14(6-2): 1005-1011. doi: 10.15531/KSCCR.2023.14.6.1005

Song YH, Chung ES, Sung JH. 2019. Selection framework of representative general circulation models using the selected best bias correction method (in Korean with English abstract). J Korea Water Resour Assoc 52(5): 337-347. doi: 10.3741/JKWRA.2019.52.5.337

Su B, Huang J, Mondal S, Zhai J, Wang Y, Wen S, Gao M, Lv Y, Jiang S, Jiang T, et al. 2021. Insight from CMIP6 SSP-RCP scenarios for future drought characteristics in China. Atmos Res 250: 105375. doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105375

WEF (World Economic Forum). 2024. The global risks perceptions survey. Cologny, Switzerland: Author.