

다중모형 및 격자기반 CMIP5 기후변화 시나리오 상세화 자료를 이용한 극한기후지수 변동성 분석

조재필* · 김재욱** · 최순군*** · 황세운**** · 정휘철*****

*유역통합관리연구원 유역관리융합연구소장, **한국환경정책·평가연구원 국가기후변화적응센터 연구원,
국립농업과학원 기후변화생태과 연구사, *경상대학교 지역환경기반공학과 부교수,
*****한국환경정책·평가연구원 국가기후변화적응센터 연구위원

Variability Analysis of Climate Extreme Index using Downscaled Multi-models and Grid-based CMIP5 Climate Change Scenario Data

Cho, Jae-Pil* · Kim, Jae-Uk** · Choi, Soon-Kun*** · Hwang, Sye-Woon**** and Jung, Hui-Cheul*****†

*Director, Convergence Center for Watershed Management, Integrated Watershed Management Institute, Suwon, Republic of Korea

**Researcher, Korea Adaptation Center for Climate Change, Korea Environment Institute, Sejong, Republic of Korea

***Researcher, Climate Change and Agroecology Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju, Republic of Korea

****Associate Professor, Department of Agricultural Engineering, Institute of Agriculture and Life Science, Gyeongsang National University, Jinju, Republic of Korea

*****Senior Research Fellow, Korea Adaptation Center for Climate Change, Korea Environment Institute, Sejong, Republic of Korea

ABSTRACT

Extreme climatic events have increased in frequency and intensity over the last decades due to global warming. Our study evaluates spatial distribution of changes in climate extreme indices on the Korean Peninsula by downscaled high-resolution data based on an empirical quantile mapping technique and 29 global climate models. Grid-based observation data with 3.0 km resolution derived from weather stations with data covering 30 years from 1976 to 2005 using a modified PRISM approach were used as reference data for bias-correction. Future projections until 2100 based on two Representative Concentration Pathway (RCP) scenarios of CMIP5 were considered for the variables of daily precipitation, minimum temperature, and maximum temperature. We finally estimated spatial changes in climate extreme indices at 3.0 km resolution. The reproducibility assessment of simple precipitation intensity index (SDII) and annual total precipitation in wet days (PRCPTOT) showed applicability of techniques for downscaling, with the biggest difference of 2.66% and 1.91%, respectively, compared to the observation. The annual maximum 5-day precipitation (Rx5day) and annual maximum value of maximum temperature (TXx) showed highest increase rate under the far future period and RCP8.5 scenario. The derived spatial distribution of climate extreme indices based on a multi-model ensemble can contribute to vulnerability assessment at a national scale by reducing uncertainties caused by selecting a specific climate model.

Key words: Quantile Mapping (QM), ETCCDI, Representative Concentration Pathway (RCP), Multi-Model Ensemble (MME), Parameter-elevation Relationship on Independent Slopes Model (PRISM)

† **Corresponding author:** hchjung@kei.re.kr (370 Sicheong-daero, Sejong, 30147, Republic of Korea, Korea Environment Institute, +82-44-415-7813)

ORCID 조재필 0000-0002-1369-1002 김재욱 0000-0002-3406-8236
최순군 0000-0003-3494-5371 황세운 0000-0003-4782-5854
정휘철 0000-0002-1908-342X

1. 서론

온실가스 증가는 지구 평균 기온의 상승뿐만 아니라 지역적인 강수를 포함한 수문 순환 특성의 변화 등을 야기하고 있다. 기후변화에 관한 정부간 협의체 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)에서는 기후변화에 따른 미래 전망을 위해서 대표농도경로 (Representative Concentration Pathway, RCP) 시나리오를 적용하여 2100년까지의 미래 기후를 모의하고 이를 바탕으로 5차 평가보고서 (Fifth Assessment Report, AR5)를 제시하였다 (IPCC, 2013).

국내 기후변화 적응대책 수립에 있어서도 과학적 근거를 확보하기 위해 IPCC AR5에 활용되었던 결합모델상호비교사업 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5)의 기후변화 시나리오 미래 전망 자료를 사용하여 왔다. 우리나라 기상청에서는 2011년부터 영국 기상청과 함께 개발한 HadGEM2-AO 모형을 활용하여 CMIP5를 통해 전지구 규모의 미래 전망 자료를 공유하고 있다. 이를 바탕으로 역학적 상세화 과정을 거쳐 한반도 지역을 대상으로 하는 12.5 km 해상도의 상세화 자료와 이를 다시 통계적 기법인 PRIDE (PRIsm based Downscaling Estimation Model)에 적용하여 1.0 km 해상도의 남한지역을 대상으로 하는 국가 기후변화 표준 시나리오를 제공하고 있다 (NIMR, 2011). 남한상세 자료는 고해상도 격자형 관측 기후자료를 이용하여 일단위 시간규모의 관측 기후 값을 산출하고, 지역기후모델의 과거 기간 (historical) 및 미래 기간의 기후자료를 고해상도 관측 자료와 동일한 해상도로 변환하였다. 지역기후모델에서 도출된 과거 기간의 일단위 기후 값을 기준으로 미래기간에 대한 일 단위 변동량을 생성하여 고해상도 격자형 관측 기후 값과의 결합을 통해 남한상세 자료의 계통오차를 보정한다 (KMA, 2015). 그러나, PRIDE 모델을 이용한 남한상세 자료는 일 단위 기후 값에 대한 보정은 이루어졌지만, 강수량 범위별 빈도와 관련된 보정은 고려되지 않아 강우 일수와 관련된 기후 값에서 관측과 큰 차이를 보인다 (KMA, 2015).

전지구모형 (Global Climate Model, GCM)을 이용하여 생산된 자료의 불확실성이 높은 점을 고려할 때, 미래 전망 자료의 신뢰성 확보를 위해 다중모형앙상블 (Multi-Model Ensemble, MME)을 활용한 연구가 다양한 분야에서 많이 진행되었다 (Xu and Xu, 2012; Cho et al., 2015; Choi et al., 2018a; 2018b; Noor et al., 2019; Rahimi et al., 2019). 미래 기후변화 시나리오에 대한 MME 자료를 여러 분야의 적응대책 수립에 활용하기 위해서는 200~300 km GCM 해상도를 우리나라에서 사용할 있도록 편의보정 (Bias Correction, BC)

을 포함하는 상세화 (Downscaling, DS) 기법을 이용해야 한다. 현재 우리나라에서는 Spatial Disaggregation and Quantile Delta Mapping (SDQDM)과 Simple Quantile Mapping (SQM) 등의 통계적 방법을 이용하여 60개 중관기상관측소 (Automated Surface Observing System, ASOS)를 대상으로 편의보정된 미래 전망 자료를 생산한 후 표준 시나리오 인증을 거쳐 사용하고 있다 (Cho et al., 2018a; Eum and Cannon, 2017).

최근 들어 기후변화에 의한 극한 사상 (Extreme event)의 발생 빈도 및 강도는 증가하는 경향을 보이지만 불규칙하게 발생하고 있어 이와 관련된 극한기후지수 등을 활용한 대비가 필요하다 (Joh et al., 2012; Kim et al., 2018; KMA, 2019). 국내·외에서 STARDEX (EU, 2005; Kim et al., 2008; Kim and Kim, 2009; Kim et al., 2011; Jeung et al., 2013; Raghavan et al., 2017) 및 ETCCDI (Klein Tank et al., 2009; Kim et al., 2013; Song et al., 2013; Kang et al., 2014; Kim et al., 2015; Eum and Cannon, 2017; Cho et al., 2018a; Jung et al., 2018; Yin and Sun, 2018; Kim et al., 2019)를 활용한 극한기후지수 연구가 수행되어 왔다.

국가 기후변화 표준 시나리오로 인증을 받은 자료 중에서 SDQDM 및 SQM 자료는 기후값과 분포값을 고려하여 다중모형에 기반을 둔 60개 관측소에 대한 자료만을 제공하고 있다. PRIDE 기반 남한상세 자료는 단일 GCM을 통해 생산된 5개 RCM (Regional Climate Model)에 대한 자료를 1.0 km 고해상도로 제공하고 있지만 모델 자료와 실제 자료의 누적 확률 분포가 갖는 편의를 고려하지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 CMIP5에서 제공하는 다중모형에 자료의 누적 확률 분포를 고려한 편의보정과 공간적인 상세화 과정을 거쳐 생산된 3.0 km 해상도의 격자기반 자료를 활용하여 극한기후지수를 산출하고 우리나라의 미래 변동성을 분석하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 관측 자료

통계적 기법을 이용한 격자기반 기후변화 시나리오 상세화 자료를 생산하기 위해서는 최종적으로 생산될 결과물과 동일한 공간해상도를 갖는 격자기반 관측 자료가 필요하다. 통계적 보정을 위해 필요한 관측장으로는 60개 ASOS 지점의 관측 자료와 고도, 경사, 향, 해안으로부터의 거리 등의 정보를 바탕으로 IDW-IGISM 기법을 적용하여 생산된 3.0 km 해상도의 격자형 관측 자료를 사용하였다 (Jeong and

Eum, 2015). 우선 Improved GIS-based Regression Model (IGISRM)은 PRISM (Parameter-elevation Relationships on Independent Slopes Model) 기법의 영향반경 선정 알고리즘을 개선한 방법으로 남한 지역을 대상으로 3.0 km 해상도의 일단위 격자 기후자료를 생산하는데 활용되었다 (Eum et al., 2018). IGISRM 기법으로 생산된 자료는 사용된 회귀식 방법의 특성에 의해 한반도에서 발생하는 기후의 임계값을 초과하는 극값이 발생하였다. 본 연구에 사용된 IDW-IGISRM 자

료는 IGISRM 기법에 의해 임계값을 초과하는 극값이 발생하는 격자에 대하여 주변 격자 정보를 IDW (Inverse distance weighting) 보간법으로 산출한 후 대체하는 통계적 후처리 절차를 거쳐 생산된 자료이다.

2.2 기후변화 시나리오 자료 및 통계적 상세화

미래 기후변화 전망 자료는 Table 1에서와 같이 AR5에 활용된 CMIP5 자료 중 60개 ASOS 자료를 SQM 기법으로 생

Table 1. Bias corrected and downscaled CMIP5 Global Climate Models (GCMs)

No	GCMs	Resolution (degree)	Institution
1	BCC-CSM1-1	2.813×2.791	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration
2	BCC-CSM1-1-m	1.125×1.122	
3	CanESM2	2.813×2.791	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis
4	CCSM4	1.250×0.942	National Center for Atmospheric Research
5	CESM1-BGC	1.250×0.942	
6	CESM1-CAM5	1.250×0.942	
7	CMCC-CM	0.750×0.748	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici
8	CMCC-CMS	1.875×1.865	
9	CNRM-CM5	1.406×1.401	Centre National de Recherches Meteorologiques
10	CSIRO-Mk3-6-0	1.875×1.875	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation in collaboration with the Queensland Climate Change Centre of Excellence
11	FGOALS-g2	2.8125×3	LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences; and CESS, Tsinghua University
12	FGOALS-s2	2.813×1.659	LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences
13	GFDL-CM3	2.5×2	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
14	GFDL-ESM2G	2.500×2.023	
15	GFDL-ESM2M	2.500×2.023	
16	HadGEM2-AO	1.875×1.250	Met Office Hadley Centre
17	HadGEM2-CC	1.875×1.250	
18	HadGEM2-ES	1.875×1.250	
19	INM-CM4	2.000×1.500	Institute for Numerical Mathematics
20	IPSL-CM5A-LR	3.750×1.895	Institut Pierre-Simon Laplace
21	IPSL-CM5A-MR	2.500×1.268	
22	IPSL-CM5B-LR	3.750×1.895	
23	MIROC-ESM-CHEM	2.813×2.791	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute and National Institute for Environmental Studies
24	MIROC-ESM	2.813×2.791	
25	MIROC5	1.406×1.401	
26	MPI-ESM-LR	1.875×1.865	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)
27	MPI-ESM-MR	1.875×1.865	
28	MRI-CGCM3	1.125×1.122	Meteorological Research Institute
29	NorESM1-M	2.500×1.895	Norwegian Climate Centre

산된 국가 기후변화 표준 시나리오 자료와 동일한 29개 GCM 자료를 사용하였다 (Cho et al., 2016; 2018a). 사용된 미래 기후변화 시나리오 자료는 과거 기간 (1976~2005) 및 미래 기간 (2006~2100)을 포함하는 3개 변수 (강수량, 최고 기온, 최저기온)에 대하여 Representative Concentration Pathway (RCP) 시나리오의 핵심인 RCP4.5 및 RCP8.5 시나리오 자료를 사용하였다.

앞서 선정된 3.0 km 해상도의 개별 격자에 대한 기후변화 시나리오 자료의 편의보정은 국가 기후변화 표준 시나리오로 자료 생산에 활용된 통계적 상세화 기법 중에서 Simple Quantile Mapping (SQM) 기법을 사용하였다. SQM 기법은 R 기반 qmap 패키지 중에서 이론적 누적분포함수 (cumulative distribution function, CDF) 대신에 경험적 누적분포의 비교를 기반으로 하는 fitQmapQUANT 함수를 이용하여 개발되었다 (Gudmundsson, 2016). 이는 CMIP5 자료를 비모수적인 분위사상법 (Empirical Quantile Mapping)을 기반으로 편의를 보정하기 위해 개발된 rSQM 패키지에 포함되어 있다 (Cho et al., 2018b). SQM 편의보정은 관측소에 대하여 월별로 독립적으로 적용되며 GCM 원시 자료의 기후 특성과 일단위 자료의 누적분포 (distribution)를 동시에 보정할 수 있는 기법이다.

편의 보정된 상세화 자료는 29개 GCM, 2종의 RCP 시나리오, 3개의 기후변수, 그리고 한반도상의 13,505개의 격자에 의하여 생성되는 모든 조합에 대하여 SQM 기법을 독립적으로 적용함으로써 생산하게 된다. 이를 위해서 3.0 km 해상도의 관측 자료로부터 격자별 30년 일단위 시계열 자료를 추출하고, GCM 자료의 경우도 관측 자료의 격자가 포함되어 있는 GCM 격자로부터 과거 기간 및 미래 기간에 대한 일단위 시계열 자료를 추출한다. 이후 SQM 기법을 이용한 편의보정은 월단위로 30년 기간씩 구분하여 아래의 절차를 적용하여 수행하게 된다. SQM 기법의 한반도 적용 가능성을 비교하기 위해 CMIP5 과거 기간의 마지막 연도인 2005년을 기준으로 과거 30년 (1976~2005)을 고려하였고, 미래 기간에 대해서는 가까운 미래 (2011~2040), 중간 미래 (2041~2070), 먼 미래 (2071~2100)의 30년 기간을 사용하였다 (Cho et al., 2016).

Step 1: 특정 월의 동일한 과거 30년 (1976~2005) 기간에 대해 특정 격자의 일단위 관측 자료와 이에 대응하는 일단위 GCM 자료를 크기순으로 정렬한 후 관측 자료와 GCM 자료의 비교를 통해 분위 (Quantile)별 편의 (bias)를 비율을 이용하여 산정한다. 강수량의 경우에는 GCM 자료의 무강우 일

수가 관측 자료의 무강우 일수와 동일하게 되는 강수의 임계값을 결정하여 임계값 이하의 값은 무강우로 처리한다.

Step 2: 동일 격자점을 대상으로 선정된 미래 기간에 대해 GCM으로부터 추출된 특정 월의 일단위 전망자료를 크기순으로 정렬한다. Step 1에서 과거기간 자료를 이용하여 산정한 분위별 비율을 미래 기간의 동일한 분위에 대하여 적용하여 편의를 보정한다. 편의를 보정 이후 원자료의 순서대로 복원한다.

Step 3: Step 1~2의 과정을 월 (12개) 및 미래 기간 (3개)에 대해 반복하여 적용한다.

SQM 기법은 분위별 관측 자료와 GCM 자료 사이의 편의 (bias)를 산정하는데 있어서 분포식을 우선 산정한 후 동일한 분위에서의 분포식을 통해 계산된 차이를 이용하는 모수적 (parametric) 기법과는 달리 분포식을 사용하지 않는 비모수적 (non-parametric) 방법이다. 비모수적 방법을 사용하는 이유는 자료에 적합한 분포식이 선정되지 않는 경우 극값 구간에서 선정된 분포식에 의해 차이가 과도하게 산정될 수 있기 때문이다 (Cho et al., 2016).

또한 SDQDM (Spatial Disaggregation and Quantile Delta Mapping) 기법을 이용한 국가 기후변화 표준 시나리오 자료의 경우에는 각 관측소에 해당되는 GCM의 모의 값을 산정할 때 해당 관측소 주위의 GCM 격자값을 기반으로 IDW 보간 방법을 이용하였다 (Eum and Cannon, 2017). 반면에 본 연구에서 사용된 SQM 기법의 경우에는 각 관측소에 해당되는 GCM 값을 보간 없이 직접 사용하였다. IDW 보간 방법을 이용하는 경우 200~300 km 공간 해상도를 갖는 GCM의 특성상 남한지역의 60개 ASOS 관측 지점에 사용되는 GCM 격자가 동일할 수밖에 없다. 이러한 경우에는 실제 관측 자료의 공간 상관성 보다 GCM으로부터 산정된 상세화 자료의 공간 상관성이 과도하게 높게 나타날 수 있다.

SQM 기법을 이용한 국가 기후변화 표준 시나리오 자료의 경우에는 60개 ASOS 관측 지점에 대한 상세화 자료를 생산하기 때문에 병렬화가 고려되지 않았다. 하지만 3.0 km 해상도의 격자 기반 관측 자료를 사용하는 경우 한반도에 13,505개의 격자가 존재하게 된다. 따라서 본 연구에서는 격자형 자료를 기반으로 병렬 연산이 가능하도록 R 기반의 SQM-Grid 코드를 개발하여 상세화 자료를 생산하였다.

Table 2. Selected extreme indices for temperature and precipitation among the 27 ETCCDI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices)

ID	Description	Unit
TXx	Annual maximum value of TMAX	°C
PRCPTOT	Annual total PRCP in wet days (daily PRCP \geq 1mm)	mm
Rx5day	Annual maximum 5-day precipitation (PRCP)	mm
SDII	Annual precipitation divided by the number of wet days	mm/day

2.3 극한기후지수 (Climate Extreme Indices)

본 연구에서는 WMO (World Meteorological Organization) 가 극한기후지수와 관련된 가이드라인에서 제시한 ETCCDI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices)를 이용하였다 (Klein Tank et al., 2009; Zhang et al., 2011). 실제 계산은 ETCCDI의 27개 극한기후지수 (Climate Extreme Index)와 평균기온의 변화를 포함한 28개 항목에 대해 수행하였으며, 상세화와 동일하게 병렬 분산 기법을 적용하여 계산하였다. 극한기후지수의 분석 결과는 격자점 및 GCM별 편차의 보정된 일단위 시계열 자료를 이용하여 연도별 극한기후지수를 계산하여 30년 평균값을 구한 후 최종적으로 29개 GCM의 평균을 사용하였다. 본 연구에서는 27개 기후지수 중에서 PRIDE 기반 남한상세 자료에서 재현성이 낮은 것으로 알려진 강우일수와 관련하여 연강수량 (Annual total precipitation in wet days, PRCPTOT) 및 연강수량을 강우일수로 나눈 단순강우강도지수 (Simple Precipitation Intensity Index, SDII)와 미래 기간에서의 강수 및 기온의 극한값의 변화를 살펴보기 위해 5일 최대강수량 (Annual maximum 5-day precipitation, Rx5day) 및 연최고기온 (Annual maximum value of maximum temperature, TXx)에 대해서만 결과를 제시하였다. 사용된 극한기후지수에 대한 설명은 Table 2에서와 같다.

3. 결과 및 고찰

3.1 강수 특성의 과거 재현성 평가

PRIDE 기반의 상세화 기법이 갖는 단점을 극복하기 위해 적용된 SQM 기법의 강우일수 관련 과거 재현성은 단순강우강도지수 (SDII)를 중심으로 살펴보았다. SDII는 연강수량 (PRCPTOT)을 연간 강우일수로 나누어 계산되는 값으로 좋은 과거 재현성 결과를 보여주기 위해서는 연강수량 총량과 강우 일수의 재현성이 담보되어야 한다.

과거 재현성 평가는 미래 기간에 대한 기후변화 전망 분석

과 동일하게 GCM 선정에 따라 발생할 수 있는 불확실성을 고려하기 위해 29개 GCM을 이용하여 계산한 MME 기반의 전망 값을 사용하였다. Fig. 1은 연강수량 (PRCPTOT)의 과거 기간에 대한 재현성 평가 결과를 보여 준다. IDW-IGISRM 3.0 km 격자형 관측 자료를 이용하여 계산된 30년 평균 연강수량의 공간적 분포 (a)는 동일한 과거 기간에 대해 29개의 개별 GCM으로부터 계산된 30년 평균 연강수량 값의 다중모형 평균 (b)과 비교하여 유사한 공간적인 분포를 보였다. 관측 및 GCM 기반 결과 사이의 편차는 그림 (c)에서와 같이 대부분의 지역에서 0.5% 미만의 값을 보였으나 강원도 동해안 부근에서 상대적으로 높은 편차를 보였으나 가장 큰 값은 1.91%로써 좋은 재현성 결과를 보여주었다.

SDII의 과거 기간에 대한 재현성 평가 결과는 Fig. 2에 제시되어 있다. PRCPTOT와 마찬가지로 단순강우강도지수의 경우에도 IDW-IGISRM의 격자형 관측자료를 이용하여 계산된 30년 평균값의 공간적 분포와 29개의 개별 GCM의 30년 평균값을 다시 평균한 MME 값의 공간적인 분포는 서로 유사한 결과를 나타냈다. 편차의 공간적 분포 또한 PRCPTOT의 편차가 크게 나타난 강원도 동해안 부분에서 높게 나타나 PRCPTOT와 유사한 결과를 보이고 있으며 편차의 범위는 -1.66%~2.66%의 범위를 보여 과거 재현성 평가에서 우수한 결과를 보였다.

PRCPTOT 및 SDII의 과거 재현성 평가 결과를 종합해 볼 때, 강우일수 또한 과거재현성이 우수할 것으로 예측되며 이는 본 연구에서 제공하는 자료가 일단위 기후값을 보정하는 PRIDE 기법과 비교하여 일단위 강수의 빈도 및 누적 분포가 중요하게 고려되어야 하는 취약성 평가에 있어서 보다 신뢰할 수 있는 결과를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 강수량 관련 기후변화 미래 전망 분석

MME 기반의 강수량 전망은 다수의 모형들이 과거 기간 대비 강수량의 증가를 전망하고 있지만 일부 모형들의 경우 감소하는 것으로 전망하고 있어 모형 선정에 따른 불확실성

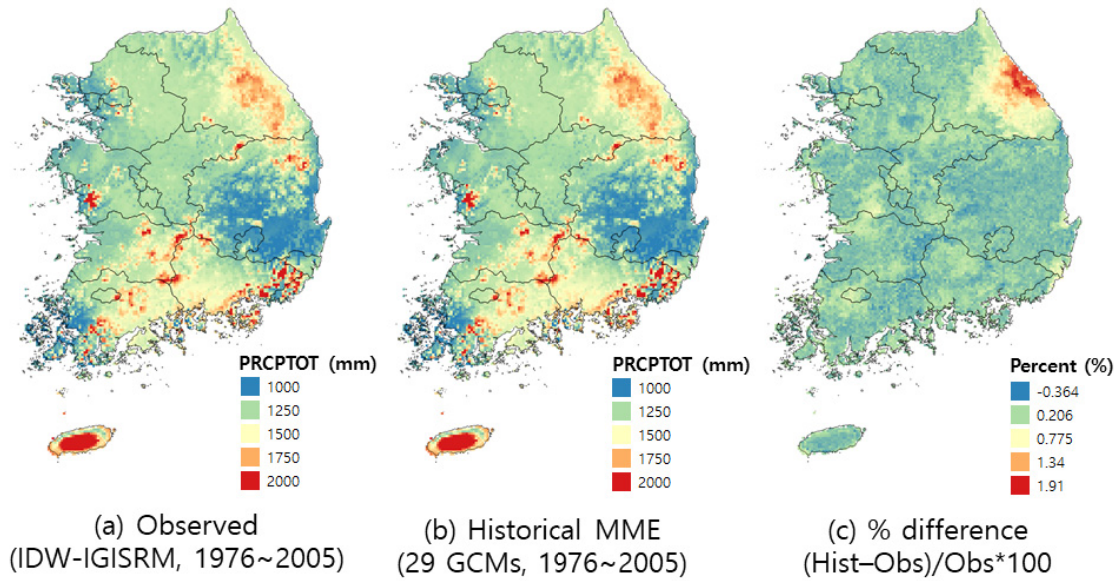


Fig. 1. Spatial patterns of annual total precipitation (PRCPTOT) estimated using. (a) 3.0 km IDW-IGISRM observation, (b) multi-model ensemble (MME) derived from 29 GCMs, and (c) percent difference between observation and MME

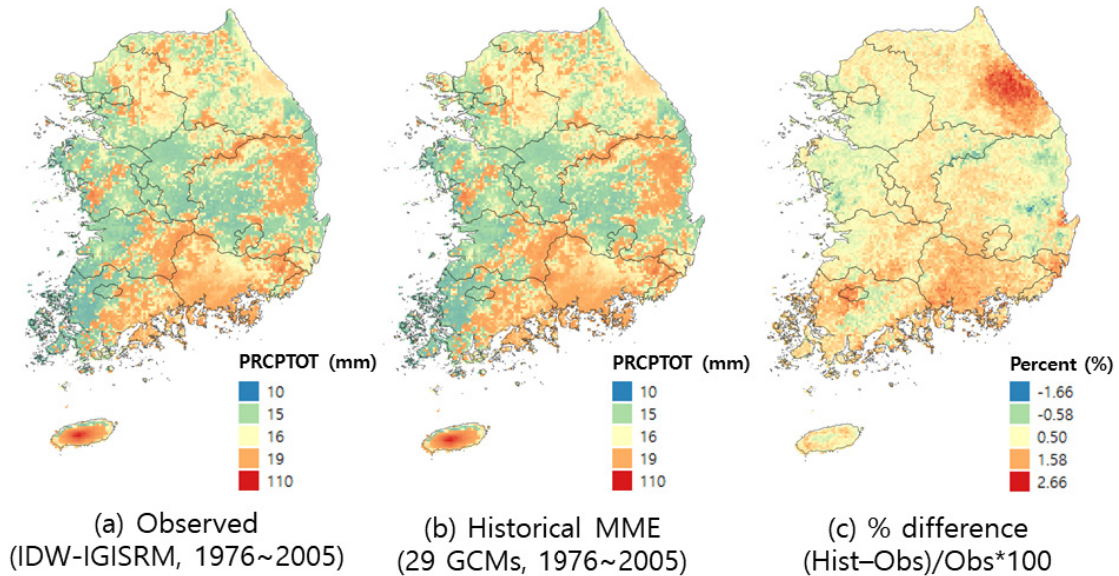


Fig. 2. Spatial patterns of simple precipitation intensity index (SDII) estimated using. (a) 3.0 km IDW-IGISRM observation, (b) multi-model ensemble (MME) derived from 29 GCMs, and (c) percent difference between observation and MME

범위가 넓은 결과를 보였다. 다중모형 평균을 이용한 미래 전망의 경우 RCP4.5 및 RCP8.5 시나리오 모두 먼 미래로 갈수록 연강수량이 증가하는 경향이 나타났다 (Fig. 3). 강수량은

가까운 미래 (2011~2040)에서 중간 미래 (2041~2070) 및 먼 미래 (2071~2100)로 갈수록 증가폭이 크게 나타났으며, RCP4.5 시나리오 보다 RCP8.5 시나리오에서 증가폭이 클 것

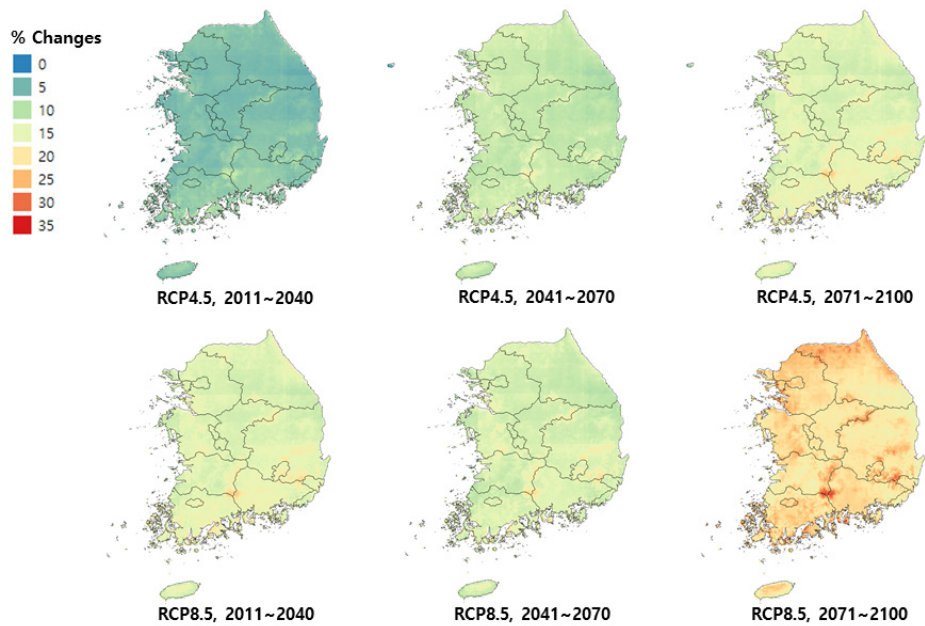


Fig. 3. Spatial distribution of percent changes in annual total precipitation (PRCPTOT) according to different future periods and RCP scenarios in comparison to the historical period (1976~2005).

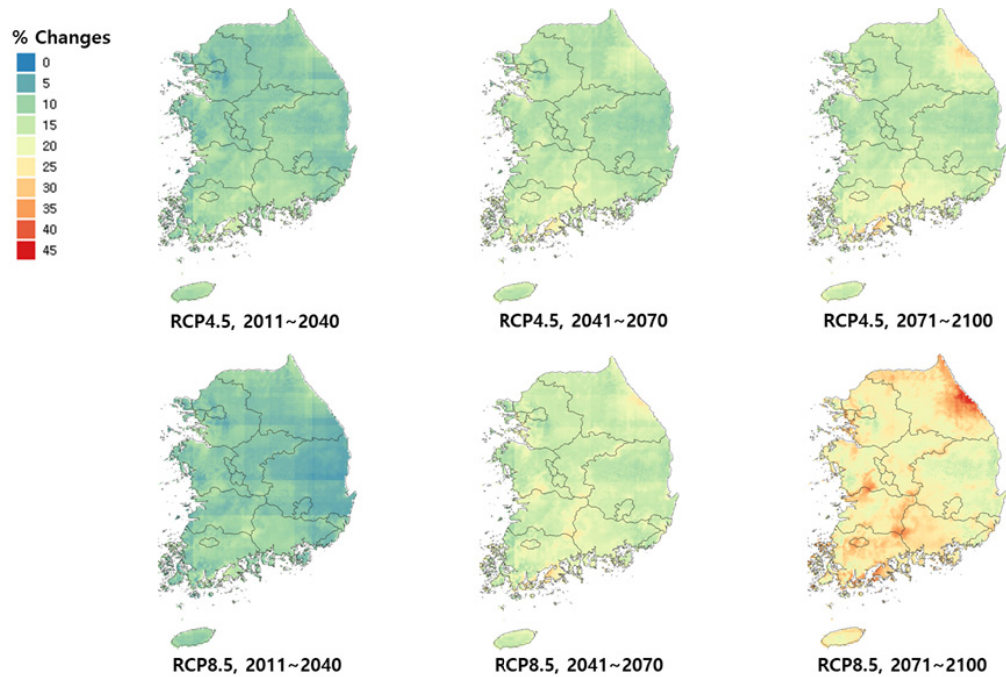


Fig. 4. Spatial distribution of percent changes in 5-day maximum precipitation (Rx5day) according to different future periods and RCP scenarios in comparison to the historical period (1976~2005).

으로 전망되었다.

강우와 관련된 극한기후지수 중 홍수 취약성과 밀접한 5일

최대강수량 (Rx5day)의 미래 기간 및 RCP 시나리오에 따른 변화율 분석 결과는 Fig. 4와 같다. Rx5day는 동일한 RCP 시

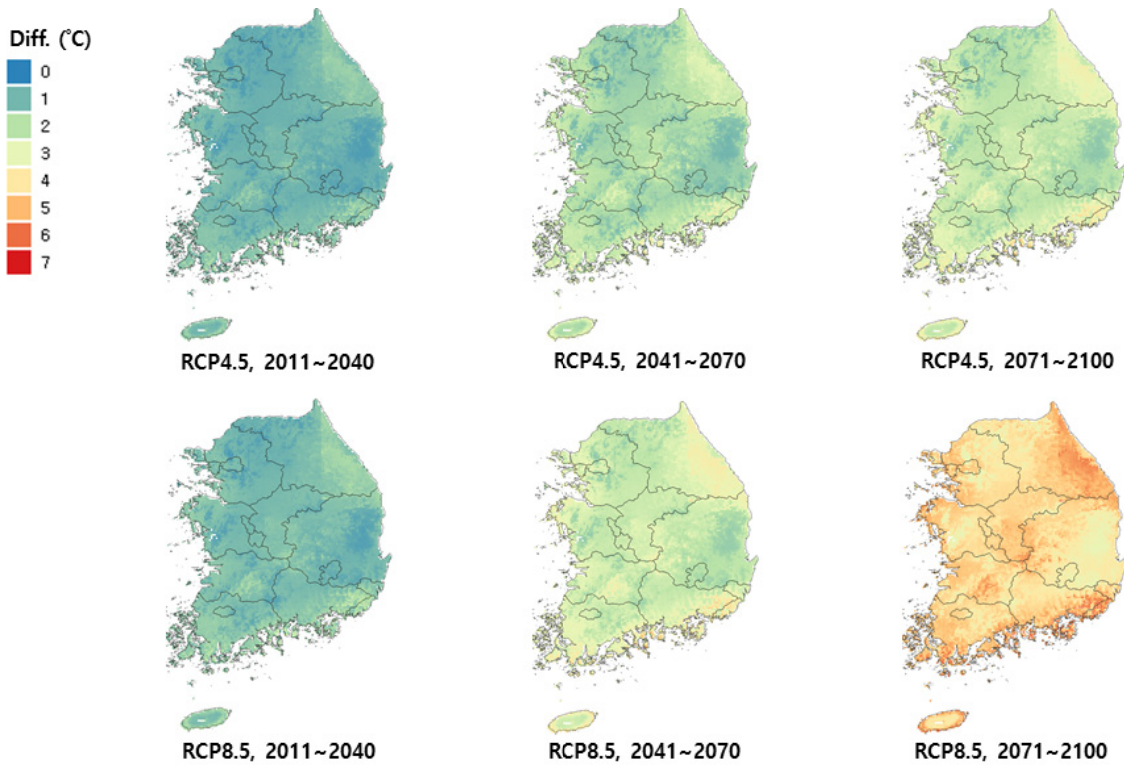


Fig. 5. Spatial distribution of percent changes in annual maximum value of maximum temperature (TXx) according to different future periods and RCP scenarios in comparison to the historical period (1976~2005).

나리오에서는 가까운 미래에서 중간 미래 및 먼 미래로 갈수록 증가폭이 크게 나타났다. 동일한 미래 기간에 대해서는 가까운 미래의 경우 최대 증가율이 RCP4.5 시나리오에서 높게 나타났지만 중간 및 먼 미래 기간의 경우에는 RCP8.5 시나리오에서 증가율이 더 높은 결과를 보였다. 증가율이 가장 높게 나타난 먼 미래 기간 RCP8.5 시나리오의 경우 Rx5day의 증가율은 지역별로 12%~46%의 범위 내에서 변화하는 특성을 보였다. 모든 경우에 대해서 지리산 지역과 강원도 동해안 지역에서 증가율이 상대적으로 높게 나타났다.

3.3 기온 관련 기후변화 미래 전망 분석

남한지역 평균 최고기온 및 최저기온의 경우 선정된 GCM 모두 과거 기간과 비교하여 미래 기간 및 RCP 시나리오에 대하여 증가하는 일관된 전망 결과를 보여 강수와 비교하여 모형 선정에 따른 불확실성 범위가 좁게 나타났다. 최고기온의 경우도 강수량과 마찬가지로 가까운 미래에서 먼 미래로 갈수록 증가폭이 크게 나타났으며, RCP4.5 시나리오 보다 RCP8.5 시나리오에서 증가폭이 크게 나타났다.

극한기후지수 중 연최고기온 (TXx)의 미래 기간 및 RCP 시나리오에 따른 변동량의 공간적 분포 특성은 Fig. 5에 제시되어 있다. 연최고기온의 경우에는 동일한 RCP 시나리오에서 가까운 미래에서 먼 미래로 갈수록 증가폭이 크게 나타났으며, 동일한 미래 기간 내에서는 RCP8.5 시나리오에서 RCP4.5 시나리오와 비교하여 온도의 증가가 높게 나타났다. 온도의 증가량이 가장 높게 나타난 먼 미래 기간에 대한 RCP8.5 시나리오의 경우 증가량이 지역별로 3°C~7°C의 범위 내에서 변화하였다. 공간적으로는 강원도 지역이 모든 경우에 있어서 증가량이 보편적으로 높게 나타나는 특성을 보였다.

4. 결론

본 연구는 국가 기후변화 적응대책 수립 시 지자체별 행정 구역 단위의 기후노출인자 도출과 농업 분야에서 전국의 농경지 규모에서의 모델링을 통한 기후변화 영향 및 취약성 분석 등 공간적인 분포를 필요로 하는 경우 현재 가용한 자료의 불확실성과 관련된 미흡한 점을 보완하기 위해 수행되었다.

ASOS 기반의 30년 자료를 이용하여 기존에 10년 기간을 사용할 경우에 제기되었던 기후 특성의 대표성 관련 내용 (Jeong and Eum, 2015) 및 29개 GCM 자료를 기반으로 하는 상세화 자료를 생산함으로써 단일 모형 사용에 따른 불확실성을 보완하고자 하였다. 또한 누적분포를 고려한 편의보정 기법을 적용함으로써 기후 값뿐만 아니라 자료의 분포 특성을 고려하였다.

ETCCDI의 27개 극한기후지수 중에서 연강수량 (PRCPTOT) 및 간단강우강도지수 (SDII)의 과거 기간에 대한 재현성은 우수한 것으로 나타나 강우일수 등이 중요한 취약성 평가에 활용성이 높을 것으로 기대된다. 또한 홍수 및 폭염과 관련된 5일 최대강수량 (Rx5day), 연최고기온 (TXx)의 변동 특성은 가까운 미래에서 먼 미래로 갈수록 증가하는 경향과 동일한 기간 내에서는 RCP4.5 시나리오 보다 RCP8.5 시나리오에서 증가율이 높은 결과를 나타냈다. 다중 모형 기반의 공간적 변동 특성 결과는 향후 기후노출 인자를 이용한 취약성 평가에서 지역적 우선순위 선정에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 연구개발사업 (과제번호: PJ014932)과 환경부의 재원을 통한 한국환경산업기술원의 기후변화대응환경기술개발사업 (2018001310004)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Cho J, Cho W, Jung I. 2018b. rSQM: Statistical Downscaling Toolkit for Climate Change Scenario using Non-Parametric Quantile Mapping for CMIP5, CMIP6, and CORDEX. R package version 2.0. <https://CRAN.R-project.org/package=rSQM>
- Cho J, Hwang S, Go G, Kim K, Kim J. 2015. Assessing the Climate Change Impacts on Agricultural Reservoirs using the SWAT model and CMIP5 GCMs. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 57 (5): 1-12. (in Korean with English abstract)
- Cho J, Jung I, Cho W, Hwang S. 2018a. User-Centered Climate Change Scenarios Technique Development and Application of Korean Peninsula. *Journal of Climate Change Research* 9 (1): 13-29. (in Korean with English abstract)
- Cho J, Ko G, Kim K, Oh C. 2016. Climate Change Impacts on Agricultural Drought with Consideration of Uncertainty in CMIP5 Scenarios. *Irrigation and Drainage* 65 (S2): 7-15.
- Choi S, Jeong J, Cho J, Hur, S, Choi D, Kim M. 2018a. Assessing the Climate Change Impacts on Paddy Rice Evapotranspiration Considering Uncertainty. *Journal of Climate Change Research* 9 (2): 143-156. (in Korean with English abstract)
- Choi Y, Lim C, Ryu J, Jeon S. 2018b. Analysis of Future Bioclimatic Zones Using Multi-Climate Models. *Journal of Environmental Impact Assessment* 27 (5): 489-508. (in Korean with English abstract)
- Eum H, Cannon AJ. 2017. Intercomparison of projected changes in climate extremes for South Korea: application of trend preserving statistical downscaling methods to the CMIP5 ensemble. *International Journal of Climatology* 37 (8): 3381-3397.
- Eum H, Kim JP, Cho J. 2018. High-resolution Climate Data from an Improved GIS-based Regression Technique for South Korea. *KSCE Journal of Civil Engineering* 22 (12): 5215-5228.
- European Union (EU). 2005. STARDEX, STATistical and Regional dynamical Downscaling of EXtremes for European regions.
- Gudmundsson L. 2016. qmap: Statistical transformations for post-processing climate model output. R package version 1.0-4.
- IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change. edited by: Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM, Cambridge University Press. Cambridge. UK.
- Jeong YM, Eum H. 2015. Application of a Statistical Interpolation Method to Correct Extreme Values in High-Resolution Gridded Climate Variables. *Journal of Climate Change Research* 6 (4): 331-344. (in Korean with English abstract)
- Jeung S, Sung JH, Kim B. 2013. Change Projection of Extreme Indices using RCP Climate Change Scenario. *Journal of Korea water resources association* 46 (11): 1089-1101. (in Korean with English abstract)
- Joh C, Lee S, Jang DH. 2012. Extreme Climate Indices Appropriate for Climate Studies in Korea. *Journal of*

- climate research 7 (2): 136-145. (in Korean with English abstract)
- Jung I, Eum H, Lee E, Park J, Cho J. 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. (in Korean with English abstract)
- Kang KK, Lee DS, Hwang SH, Kim BS. 2014. Analysis of Extreme Weather Characteristics Change in the Gangwon Province Using ETCCDI Indices. *Journal of Korea Water Resources Association* 47 (12): 1107-1119. (in Korean with English abstract)
- Kim BK, Kim BS, Kim HS. 2008. On the Change of Extreme Weather Event using Extreme Indices. *Journal of the Korean society of civil engineers B* 28 (1B): 41-53. (in Korean with English abstract)
- Kim BK, Kim BS. 2009. Analysis of Impact Climate Change on Extreme Rainfall Using B2 Climate Change Scenario and Extreme Indices. *Journal of the Korean society of civil engineers B* 29 (1B): 23-33. (in Korean with English abstract)
- Kim BS, Yoon YH, Lee HD. 2011. Analysis of Changes in Extreme Weather Events Using Extreme Indices. *Environmental Engineering Research* 16 (3): 175-183.
- Kim DH, Jang T, Hwang S, Cho J. 2019. Assessing Hydrologic Impacts of Climate Change in the Mankyung Watershed with Different GCM Spatial Downscaling Methods. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 61 (6): 81-92. (in Korean with English abstract)
- Kim DH, Kim YS, Hong SJ, Ly S, Jung Y, Kim HS. 2013. The ETCCDI and Frequency Analysis using RCP Scenarios. *Journal of Wetlands Research* 15 (4): 595-607. (in Korean with English abstract)
- Kim J, Kwon W, Byun Y. 2015. Monthly Changes in Temperature Extremes over South Korea Based on Observations and RCP8.5 Scenario. *Journal of Climate Change Research* 6 (2): 61-72. (in Korean with English abstract)
- Kim YW, Lee JW, Kim SJ. 2018. Analysis of extreme cases of climate change impact on watershed hydrology and flow duration in Geum river basin using SWAT and STARDEX. *Journal of Korea Water Resource Association* 51 (10): 905-916. (in Korean with English abstract)
- abstract)
- Klein Tank AM, Zwiers FW, Zhang X. 2009. Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation. WCDMP-72, WMO-TD/No.1500, WMO, Geneva.
- Korea Meteorological Administration (KMA). 2015. Production of Fine-Scale Climate Change Data over the Korean Peninsula Using RCP scenarios.
- Korea Meteorological Administration (KMA). 2019. 2018 Abnormal Climate Report. Seoul, Korea.
- National Institute of Meteorological Research (NIMR). 2011. Development and Application of Methodology for Climate Change Prediction (III). National Institute of Meteorological Research Report.
- Noor M, Ismail TB, Shahid S, Ahmed K, Chung E, Nawaz N. 2019. Selection of CMIP5 multi-model ensemble for the projection of spatial and temporal variability of rainfall in peninsular Malaysia. *Theoretical and Applied Climatology* 138 (1-2): 999-1012.
- Raghavan SV, Vu MT, Liong SY. 2017. Ensemble climate projections of mean and extreme rainfall over Vietnam. *Global and Planetary Change* 148: 96-104.
- Rahimi J, Khalili A, Butterbach-Bahl K. 2019. Projected changes in modified Thornthwaite climate zones over Southwest Asia using a CMIP5 multi model ensemble. *The International Journal of Climatology* 39 (12): 4575-4594.
- Song CW, Kim YS, Kang NR, Lee DR, Kim HS. 2013. Regional Frequency Analysis for Rainfall Under Climate Change. *Journal of Wetlands Research* 15 (1): 125-137. (in Korean with English abstract)
- Xu C, Xu Y. 2012. The Projection of Temperature and Precipitation over China under RCP Scenarios using a CMIP5 Multi-Model Ensemble. *Atmospheric and Oceanic Science Letters* 5 (6): 527-533.
- Yin H, Sun Y. 2018. Characteristics of extreme temperature and precipitation in China in 2017 based on ETCCDI indices. *Advances in Climate Change Research* 9 (4): 218-226.
- Zhang X, Alexander L, Hegerl GC, Jones P, Klein Tank A, Peterson TC, Trewin B, Zwiers FW. 2011. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *WIREs Climate change* 2 (6): 851-870.