



Assessment of CMIP5 GCMs for future extreme drought analysis

Hong, Hyun-Pyo^a · Park, Seo-Yeon^a · Kim, Tae-Woong^b · Lee, Joo-Heon^{a*}

^aDepartment of Civil Engineering, Joongbu University

^bDepartment of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

Paper number: 18-010

Received: 30 January 2018; Revised: 28 March 2018 / 9 April 2018; Accepted: 9 April 2018

Abstract

In this study, CMIP5 GCMs rainfall data (2011~2099) based on RCP scenarios were used to analyze the extreme drought evaluation for the future period. For prospective drought assessment, historical observations were used based on the Automated Surface Observing System (ASOS) data (1976~2010) of the Korea Meteorological Administration. Through the analysis of various indicators, such as average annual rainfall, rainy days, drought spell, and average drought severity was carried out for the drought evaluation of the five major river basins (Han river, Nakdong river, Geum river, Sumjin river, and Youngsan river) over the Korean peninsula. The GCMs that predicted the most severe future droughts are CMCC-CMS, IPSL-CM5A-LR and IPSL-CM5A-MR. Moderate future droughts were predicted from HadGEM2-CC, CMCC-CM and HadGEM2-ES. GCMs with relatively weak future drought forecasts were selected as CESM1-CAM5, MIROC-ESM-CHEM and CanESM2. The results of this study might be used as a fundamental data to choose a reasonable climate change scenario in future extreme drought evaluation.

Keywords: CMIP5 GCMs, RCP scenario, Extreme drought, SPI

미래 극한 가뭄 전망을 위한 CMIP5 GCMs 평가

홍현표^a · 박서연^a · 김태웅^b · 이주현^{a*}

^a중부대학교 공과대학 토목공학과, ^b한양대학교 공과대학 건설환경공학과

요지

본 연구에서는 미래 기간의 극한 가뭄을 분석하기 위하여 RCP 시나리오 기반의 CMIP5 GCMs 강우자료(2011~2099)를 활용하였으며, 과거 관측치의 경우 기상청 ASOS자료(1976~2005)를 이용하여, 미래 가뭄 평가를 하였다. 한반도 5대강(한강, 낙동강, 금강, 섬진강, 영산강)을 대상으로 연평균 강우량, 무강우일수, Drought Spell, Average Severity를 비교 분석한 결과, 가장 심한 수준의 미래 가뭄을 전망하는 GCM은 CMCC-CMS, IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5A-MR로 나타났으며, 보통 수준의 미래 가뭄을 전망하는 GCM은 HadGEM2-CC, CMCC-CM, HadGEM2-ES, 상대적으로 미래의 가뭄을 약하게 전망하는 GCM은 CESM1-CAM5, MIROC-ESM-CHEM, CanESM2로 선정되었다. 극한 가뭄을 전망하는 모델로는 CMCC-CMS, 가장 약한 가뭄을 전망하는 모델은 CanESM2를 선정하여 한반도에 적용한 결과 CMCC-CMS는 과거 대비 가뭄의 심도 및 빈도가 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, CanESM2는 과거 대비 심도는 증가하였지만 발생빈도는 적어지는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구 결과는 미래 극한 가뭄 평가에 있어서 합리적인 기후변화 시나리오를 선정하는 기초 자료로 활용될 것으로 판단된다.

핵심용어: CMIP5 GCMs, RCP 시나리오, 극한 가뭄, SPI

*Corresponding Author. Tel: +82-31-8075-1615
E-mail: leejh@joongbu.ac.kr (J.-H. Lee)

1. 서론

지구온난화로 인한 기후변화로 수문환경이 변화하고 있으며, 이에 따른 극한 기후사상의 발생빈도가 증가하고 있는 실정이다. 단편적으로 우리나라의 경우 2014년부터 발생한 극심한 가뭄이 이어져 2017년에는 최악의 가뭄이라 기록될 만큼 가뭄피해가 발생함에 따라 수자원 관리에 있어서 어려움을 겪었다. 이렇듯 수문 및 기상분야의 급격한 변화는 미래 세대에 커다란 위기를 초래할 수 있다(Van Pelt and Swart *et al.*, 2011; Willhite *et al.*, 2014). 수자원의 지속 가능한 관리를 위해서는 극한 수문 현상의 발생빈도와 심각성이 미치는 영향을 이해하는 것이 매우 중요하다. 이를 위해 우리나라를 포함, 세계 각국의 기상연구기관에서는 기후변화에 따른 영향분석 및 적응대책을 마련하기 위해 다양한 연구들이 활발하게 진행되고 있다.

Park *et al.* (2014)은 SWAT 모형에 HadGEM3-RA에 의한 RCP 4.5와 RCP 8.5 기후변화 시나리오를 적용하여 용담댐 유역의 수문요소별 변동성을 분석하였으며, Dubrovsky *et al.* (2014)은 16개의 GCM의 앙상블을 활용하여 지중해 지역의 미래 기후변화 변동성을 평가하였다.

McMahon *et al.* (2015)은 23개의 GCM별로 전망된 미래 기온 및 강우를 과거 실측치와 수문 모의 결과자료와의 비교를 통해 GCMs별 미래 모의 능력을 평가하였으며, Chung *et al.* (2012)은 RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오 기반의 HadGEM2-AO 자료를 활용하여 서해안 평야지대에 대한 미래의 벼 소비수량을 평가하였다.

전 지구 모델을 활용한 미래 기후변화 평가를 위해, Shin *et al.* (2015)은 RCP (2.6, 4.5, 6.0, 8.5) 시나리오 기반 34개의 GCMs 자료를 활용하여 동북아시아 지역을 중심으로 기온, 강수량, 일사량의 미래 변화를 평가하였으며, Yoo *et al.* (2015)은 RCP 시나리오 기반 25개 GCMs 산출물에 대한 경향성 분석과 기상청에서 제공하는 RCM과의 경향성 분석을 통해 농업수자원관련 적절한 GCMs 선정을 위한 평가를 진행하였다. Wójcik *et al.* (2014)은 45개의 CMIP5 GCMs를 계절적 측면에서 분석하여 통계적 상세화에 적합한 GCMs의 신뢰성 평가를 하였으며, Rhee *et al.* (2016)은 17개 GCM을 RCP 4.5와 RCP 8.5의 미래 기온과 강우자료를 활용하여 SPI 및 SPEI를 산정, 그 결과를 바탕으로 하여 미래 가뭄을 평가하였다.

또한, 기후변화 시나리오 기반의 미래 가뭄을 전망하는 연구는 많은 학자들에 의해서 시도되었다. Kim *et al.* (2014)은 과거 관측 자료와 SRES (Special Report on Emission Scenarios) 기반 4개 GCMs의 미래강우자료를 활용한 가뭄빈도해석을 통해 SDF (Severity - Duration - Frequency) 곡선을 산정, 이

를 활용하여 산출한 가뭄우심도를 바탕으로 하여 한반도의 미래 가뭄취약지역을 추정하였다. Lee *et al.* (2013)은 4개의 GCMs 과거자료를 활용하여 SDF를 산출하고 비교·분석을 통해 미래에 발생할 수 있는 가뭄을 정량적으로 전망하였으며, Park *et al.* (2013)은 A2시나리오(CO₂: 830 ppm)를 적용한 4개의 GCMs 자료를 활용하여 가뭄우심도를 구축, 한반도 미래의 가뭄을 정량적으로 평가하였다. Lee *et al.* (2016)은 3개월 표준간수 지수를 활용하여 한국의 가뭄 특성을 분석하였으며, 4개의 GCMs 자료를 활용하여 기후변화에 따른 미래 가뭄 빈도 및 심도의 변화를 평가하였다.

이렇듯 미래 가뭄 전망에 앞서 어떠한 GCMs 자료를 선정하느냐에 따라 그 결과가 매우 상이하게 나타나기 때문에 극한 수문사상에 대한 연구를 수행하는 경우에는 GCMs 선정에 매우 신중해야 한다. 하지만 여러 가지의 극한 수문사상 중에서 극한 가뭄의 경우에는 아직까지 여러 가지의 GCM에 대한 적절한 평가 방법 및 결과가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 RCP 시나리오 기반의 CMIP5 GCMs를 활용하여 연평균강수량, 무강우일수, 가뭄발생빈도(Drought Spell), 평균가뭄심도 등의 분석을 통해 미래 극한가뭄 평가에 가장 적합한 GCMs에 대한 정보를 제공하고자 한다.

2. 대상 자료 및 분석 방법

2.1 GCMs 및 가뭄지수

본 연구에서는 한반도 5개의 대권역(한강, 낙동강, 금강, 영산강, 섬진강)을 대상으로 기후변화 시나리오를 활용하여 미래 극한가뭄을 분석하였다(Fig. 1).

IPCC 제 5차 평가보고서에서 사용된 온실가스 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP) 기반의 CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) GCM 자료를 활용하였으며, Table 1에는 본 연구에 활용된 CMIP5 GCM의 상세정보를 나타내었다.

CIMIP5 GCM으로부터 생산되는 자료는 공간해상도가 낮기 때문에 5대강 유역 규모에서의 가뭄 분석이 불가능하므로 공간적 상세화 과정이 필요하다. 공간상세화를 위한 MOS (Model Output Statistics) 기법 중 BCSD (Bias Correction/Spatial Disaggregation)와 기후시나리오 내 장기추세를 반영하기 위한 QDM (Quantile Delta Mapping) 방법을 결합한 SDQDM (BCSD with quantile delta mapping)을 통해 공간적 상세화를 수행한 자료를 활용하였으며(Eum and Cannon, 2016), 기상청 중관 관측 시스템(Automated Synoptic Obser-

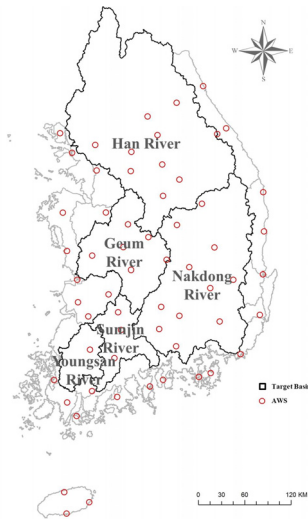


Fig. 1. The study area including the 5 Korean major river basins and 60 weather observation stations

ving System, ASOS) 자료 중 기간이 30년 이상이 되는 관측지점 60곳의 자료를 활용하였다(Fig. 1).

미래 극한가뭄 전망을 위하여 강우를 유일한 변수로 하는 대표적인 기상학적 가뭄지수인 SPI (Standardized Precipitation Index)를 선정하였다. SPI는 가뭄지수를 산정하기 위한 시간단위를 1, 3, 6, 9, 12개월로 설정하고, 시간단위별로 누적강수량의 시계열을 구성하여 정규화 된 확률분포형을 기반으로 가뭄지수를 산정하는 방법으로(McKee *et al.*, 1995), SPI(1)과 SPI(3)은 단기간의 극심한 강수부족으로 발생하는 단기가뭄을 평가하는데 사용될 수 있으며, SPI(6), SPI(9) 및 SPI(12)는 긴 주기성으로 장기간의 연속적인 강수부족으로 발생하는 장기가뭄을 평가하는데 효율적으로 활용가능하다.

미래의 기후변화에 의한 가뭄의 공간적 변화를 전망하기 위한 시간적 범위는 과거 30년(S0: 1976~2005) 관측 자료를 활용하였으며, 기후변화 시나리오 적용기간에 대해서는 미래

Table 1. CMIP5 GCMs information

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

30년씩 3개 기간 (S1: 2011~2040, S2: 2041~2070, S3: 2071~2099)으로 설정하여 한반도 미래 가뭄전망 분석에 활용하였다.

2.2 분석방법

기후변화 시나리오에 따른 미래 극한 가뭄을 평가하기 위하여 미래구간(2011~2099년)의 월강우자료를 활용하여 SPI(6)을 산정하였다. 26개의 GCM 중 극한 가뭄을 전망하는 모델을 선정하기 위해 4가지 지표(연평균강수량, 무강우일수, 가뭄 발생빈도, 평균가뭄심도)를 활용하여 평가하였다.

연평균 강수량과 무강우일수는 강우자료를 이용하였고, 가뭄 발생빈도(Drought Spell)와 평균가뭄심도(Average severity)는 SPI(6)를 활용하여 미래 극한 가뭄을 평가하였다. 무강우일수의 경우에는 일강우량이 0 mm 일 때만 무강우로 간주하였으며, 가뭄발생빈도와 평균가뭄심도를 추정하기 위해 Drought Spell 기법을 적용하였다. Drought Spell 기법은 가뭄, 기상, 수문학적 현상 등에 대한 발생빈도해석에 일반적으로 사용되는 방법으로 특정 기상 및 수문현상에 대하여 Daily 또는 Monthly 기반으로 해당사상을 카운팅하여 분석하는 방법이다(Lee *et*

al., 2012). 미래기간의 GCM별 SPI를 산정하기 위해서 과거 (S0) 기간에 추정된 확률분포의 매개변수를 적용하여 미래구간의 SPI를 산정하였으며, 산정된 SPI 값이 -1 이하인 값을 적용하여 가뭄발생빈도를 추정하였다. 평균가뭄심도 또한 SPI 값이 -1 이하인 값들을 평균하여 추정하였다.

선정된 4가지 평가지표의 산정 결과가 서로 다른 차원을 갖게 되므로 표준화를 통해 0~1 사이로 나타내었다. 연평균 강우와 Average Severity는 숫자가 작은 것을 1로 가장 큰 것을 0으로 두었으며, 무강우 일수와 Drought Spell은 숫자가 가장 큰 것을 1, 가장 낮은 것을 0으로 설정하였다.

3. CMIP5 GCMs 평가

3.1 연평균 강수량

26개 GCMs의 연평균 강수량을 RCP 4.5 및 RCP 8.5에 대해서 Fig. 2와 같이 도시하였다. 연평균 강수량은 RCP 4.5에서는 CMCC-CMS, RCP 8.5에서는 INM-CM4가 가장 적은

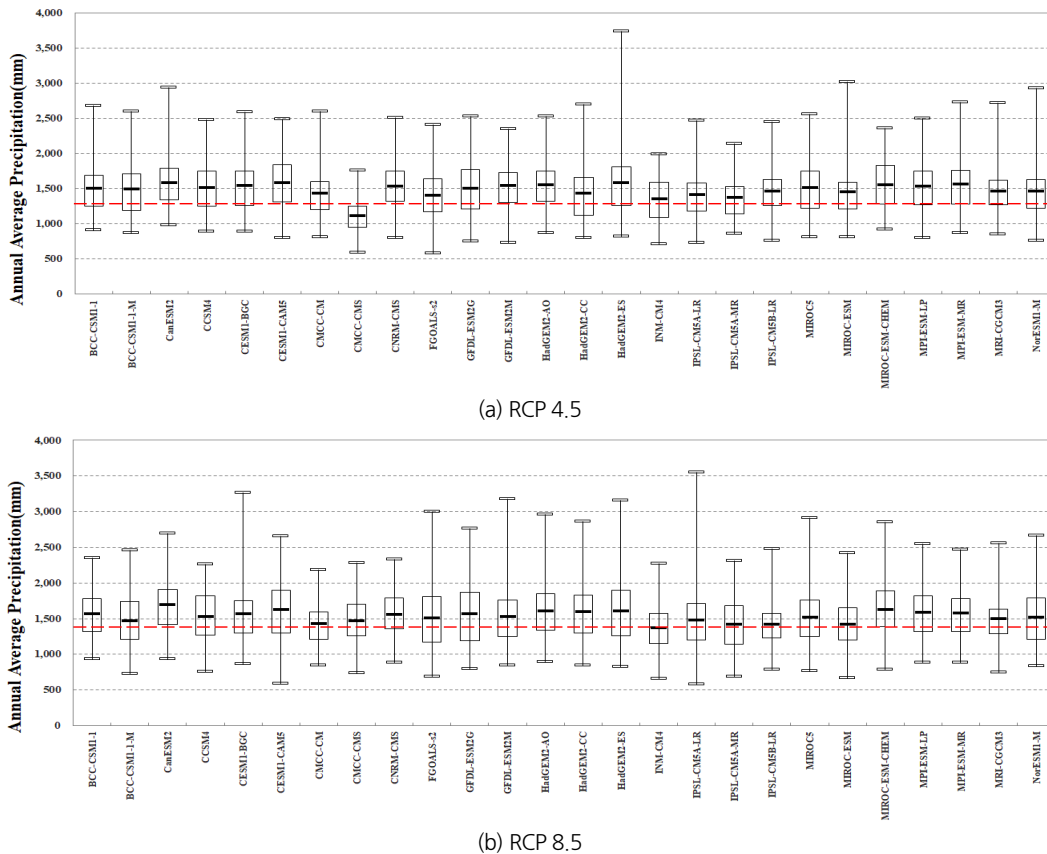


Fig. 2. Changes in annual average precipitation according to climate change scenarios by 26 CMIP5 GCMs (2011~2099) (It is annual average precipitation in past period that red dotted line)

것으로 나타났으며, 반대로 RCP 4.5에서는 CESM1-CAM5, RCP 8.5에서는 CanESM2가 연평균강수량이 가장 많은 것으로 나타났다. RCP 4.5에서는 CMCC-CMS, RCP 8.5에서는 CMCC-CM이 강우량의 변화가 가장 적은 것으로 나타났으며, RCP 4.5에서는 HadGEM2-ES, RCP 8.5에서는 IPSL-CM5A-LR이 변화가 가장 큰 것으로 나타났다.

3.2 무강우일수

기후변화 시나리오를 적용하여 산정된 일 강우량이 0인 경우만을 무강우일수로 간주하였으며 극한 가뭄을 나타내기 위

해서 Park *et al.* (2006)에서 제시된 연속무강우일수가 21일 이상인 경우만 카운팅하여 미래 구간 무강우일수의 발생빈도를 GCM별로 분석하였다. 21일 연속무강우의 경우 RCP 4.5, RCP 8.5에서 GFDL-ESM2G가 가장 많이 발생하는 것으로 나타났으며, CMCC-CM이 가장 적게 발생하는 것으로 확인되었다(Table 2).

3.3 가뭄발생빈도

CMIP5 GCM별 가뭄의 발생빈도를 파악하기 위하여 월 강우자료를 활용하여 지속기간 6개월의 SPI가 -1 이하의 값을

Table 2. Dry days of climate change scenarios for 26 CMIP5 GCMs (2011~2099)

GCM	Scenario	RCP 4.5	RCP 8.5	GCM	Scenario	RCP 4.5	RCP 8.5
BCC-CSM1-1		30,160	35,371	HadGEM2-CC		43,272	38,727
BCC-CSM1-1-M		37,119	33,614	HadGEM2-ES		40,381	45,097
CanESM2		27,865	31,468	INM-CM4		41,504	36,828
CCSM4		30,936	38,028	IPSL-CM5A-LR		51,046	56,013
CESM1-BGC		34,263	37,991	IPSL-CM5A-MR		41,119	46,405
CESM1-CAM5		37,166	38,398	IPSL-CM5B-LR		43,993	48,978
CMCC-CM		27,074	28,678	MIROC5		39,849	35,449
CMCC-CMS		33,116	50,449	MIROC-ESM		32,524	32,067
CNRM-CM5		31,497	33,951	MIROC-ESM-CHEM		27,569	34,126
FGOALS-s2		42,289	52,112	MPI-ESM-LR		48,919	44,575
GFDL-ESM2G		57,017	60,170	MPI-ESM-MR		42,053	40,634
GFDL-ESM2M		48,381	50,113	MRI-CGCM3		27,436	32,158
HadGEM2-AO		44,636	41,201	NorESM1-M		47,602	56,333

Table 3. Frequency of drought occurrence (SPI(6) < -1.0) of climate change scenarios for 26 CMIP5 GCMs (2011~2099)

GCMs	Drought spell	SPI < -1		GCMs	Drought spell	SPI < -1	
		RCP 4.5	RCP 8.5			RCP 4.5	RCP 8.5
BCC-CSM1-1		804	833	HadGEM2-CC		1,239	809
BCC-CSM1-1-M		1,146	1,194	HadGEM2-ES		973	930
CanESM2		793	682	INM-CM4		1,521	1,405
CCSM4		951	948	IPSL-CM5A-LR		1,352	1,317
CESM1-BGC		948	838	IPSL-CM5A-MR		1,425	1,685
CESM1-CAM5		722	809	IPSL-CM5B-LR		843	1,055
CMCC-CM		1,083	1,083	MIROC5		1,057	1,068
CMCC-CMS		2,425	951	MIROC-ESM		996	1,212
CNRM-CM5		932	841	MIROC-ESM-CHEM		802	772
FGOALS-s2		1,211	1,356	MPI-ESM-LR		736	724
GFDL-ESM2G		1,191	1,138	MPI-ESM-MR		768	651
GFDL-ESM2M		941	1,035	MRI-CGCM3		880	886
HadGEM2-AO		888	836	NorESM1-M		1,139	1,106

카운팅하여 분석하였다. RCP 4.5에서는 CMCC-CMS가 2,425개, RCP 8.5에서는 IPSL-CM5A-MR이 1,685개로 발생 빈도가 가장 많은 것으로 나타났으며, RCP 4.5에서는 CESM1-CAM5가 722개, RCP 8.5에서는 MPI-ESM-MR이 651개로 가장 적게 발생하는 것으로 나타났다(Table 3).

3.4 평균가뭄심도(Average severity)

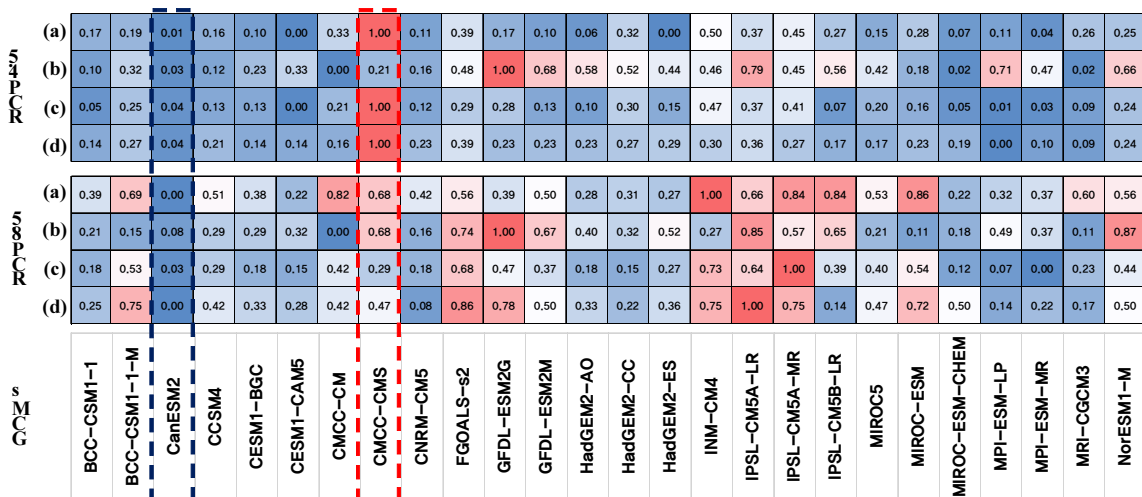
CMIP5 GCM별 미래기간의 평균가뭄심도를 파악하기 위하여 산정한 SPI(6)에서 -1 이하의 값을 평균하여 분석하였다.

평균가뭄심도는 RCP 4.5에서는 CMCC-CMS가 -2.23, RCP 8.5에서는 IPSL-CM5A-LR이 -1.90으로 평균심도가 작게 나타났다으며, RCP 4.5에서는 MPI-ESM-LR이 -1.53, RCP 8.5에서는 CanESM2가 -1.54로 평균심도가 다른 모델에 비해 크게 나타났다(Table 4).

위에서 산정한 4 가지 지표의 분석 결과 값의 단위를 통일하기 위하여 0~1사이로 표준화 하였으며(Eq. (1)), 동일한 가중치를 적용 후 합산하여 결과가 높은 순으로 CMIP5 GCMs 자료의 순위를 도출하였다(Fig. 3).

Table 4. Average drought severity (SPI(6) < -1.0) for climate change scenarios for 26 CMIP5 GCMs (2011~2099)

GCMs	SPI	SPI < -1		GCMs	SPI	SPI < -1	
		RCP 4.5	RCP 8.5			RCP 4.5	RCP 8.5
BCC-CSM1-1	-1.63	-1.63	-1.63	HadGEM2-CC	-1.72	-1.62	
BCC-CSM1-1-M	-1.72	-1.81	-1.81	HadGEM2-ES	-1.73	-1.67	
CanESM2	-1.56	-1.54	-1.54	INM-CM4	-1.74	-1.81	
CCSM4	-1.68	-1.69	-1.69	IPSL-CM5A-LR	-1.78	-1.90	
CESM1-BGC	-1.63	-1.66	-1.66	IPSL-CM5A-MR	-1.72	-1.81	
CESM1-CAM5	-1.63	-1.64	-1.64	IPSL-CM5B-LR	-1.65	-1.59	
CMCC-CM	-1.64	-1.69	-1.69	MIROC5	-1.65	-1.71	
CMCC-CMS	-2.23	-1.71	-1.71	MIROC-ESM	-1.69	-1.80	
CNRM-CM5	-1.69	-1.57	-1.57	MIROC-ESM-CHEM	-1.66	-1.72	
FGOALS-s2	-1.80	-1.85	-1.85	MPI-ESM-LR	-1.53	-1.59	
GFDL-ESM2G	-1.69	-1.82	-1.82	MPI-ESM-MR	-1.60	-1.62	
GFDL-ESM2M	-1.69	-1.72	-1.72	MRI-CGCM3	-1.59	-1.60	
HadGEM2-AO	-1.69	-1.66	-1.66	NorESM1-M	-1.70	-1.72	



(a) Average annual rainfall, (b) Dry days, (c) Drought spell, (d) Average severity

Fig. 3. Results of 26 GCMs assessment (2011~2099) considering 4 indicators (average annual rainfall, No. of dry days, drought occurrence frequency, and average drought severity). The 4 indicators were standardized ranging from 0 to 1, and the results were shown by summing the same weight values

$$\frac{Indicator - Indicator_{min}}{Indicator_{max} - Indicator_{min}} \quad (1)$$

26개의 CMIP5 GCM 중에서 가뭄을 가장 심하게 전망하는 GCM은 CMCC-CMS, IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5A-MR로 나타났으며, 보통 수준의 가뭄을 전망하는 GCM은 HadGEM2-CC, CMCC-CM, HadGEM2-ES, 상대적으로 미래 가뭄을 약하게 전망하는 GCM은 CESM1-CAM5, MIROC-ESM-CHEM, CanESM2로 나타났다(Fig. 3). 본 연구에서는 가뭄을 가장 심하게 전망하는 CMCC-CMS 모델과 가장 약하게 전망하는 CanESM2 모델을 활용하여 한반도 미래 가뭄 평가를 실시하였다.

4. GCM을 활용한 한반도 미래 가뭄 전망

4.1 가뭄발생빈도 변화

3절에서 선정된 2개의 GCM을 활용하여 가뭄발생빈도 변화를 분석한 결과 RCP 4.5 시나리오 기반의 CMCC-CMS의 경우 과거에 비해 시·공간적으로 가뭄의 발생빈도가 증가한 것을 확인 할 수 있었으며, CanESM2의 경우 S1 기간의 금강 및 낙동강 유역을 제외한 나머지 유역에서 과거에 비해 가뭄 발생빈도가 감소한 것으로 나타났다. RCP 8.5 시나리오 기반

의 CMCC-CMS의 경우 S2 낙동강 유역을 제외하고는 과거와 유사하거나 발생빈도가 약해지는 것을 확인할 수 있었으며, CanESM2의 경우 과거에 비해 발생빈도가 감소한 것으로 나타났다(Fig. 4).

4.2 평균가뭄심도 변화

평균가뭄심도 분석 결과 CMCC-CMS 모델의 경우 RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오에서 전 기간, 전 유역에 대해 과거에 비해 가뭄심도가 심해지는 것을 확인할 수 있었으며, 특히 RCP 4.5의 경우 일부 지역을 제외하고 평균 심도가 -2.0 이하로 가뭄심도가 극심해지는 것을 확인 할 수 있었다. CanESM2의 경우 RCP 4.5 시나리오에서는 S1 기간에서, RCP 8.5 시나리오에서는 S2 기간에서 과거에 비해 심해지는 것을 확인할 수 있었으나, 그 외의 지역에서는 과거와 비슷한 가뭄심도를 보였다(Fig. 5).

미래 기간에서 평균가뭄심도와 가뭄발생빈도의 과거 대비 증감량을 정량적으로 파악하고자 미래기간(S1, S2, S3)의 평균가뭄심도를 과거 기간(S0)의 평균가뭄심도로 나누어 분석하였다(Fig. 6). 평균가뭄심도의 경우 CanESM2의 일부 기간에서 과거에 비해 가뭄심도가 완화되는 것으로 나타났으나, 두 모델 대부분의 기간에서 과거에 비해 가뭄심도가 심해지는 것을 확인할 수 있었다.

특히 CMCC-CMS의 경우 RCP 4.5 시나리오에서 한강유

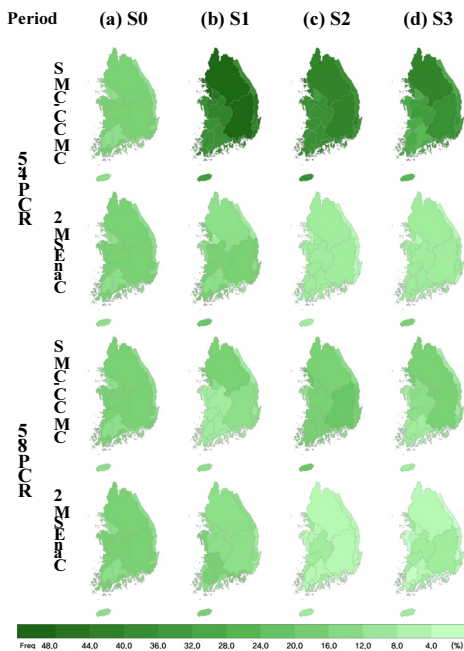


Fig. 4. Changes in drought occurrence frequency for selected 2 GCMs (SPI(6) < -1.0)

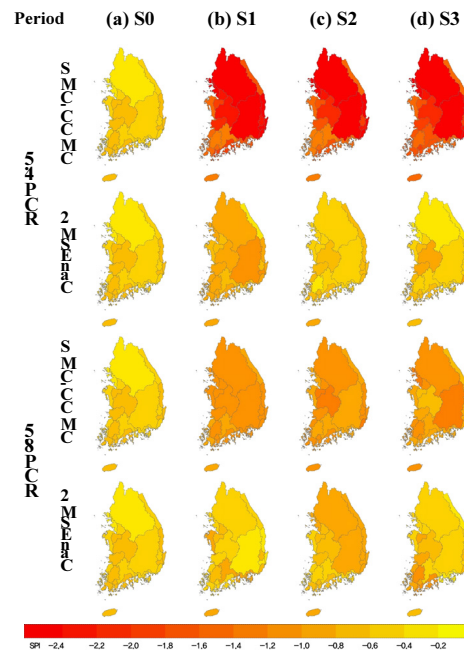


Fig. 5. Changes in average drought severity for selected 2 GCMs (SPI(6) < -1.0)

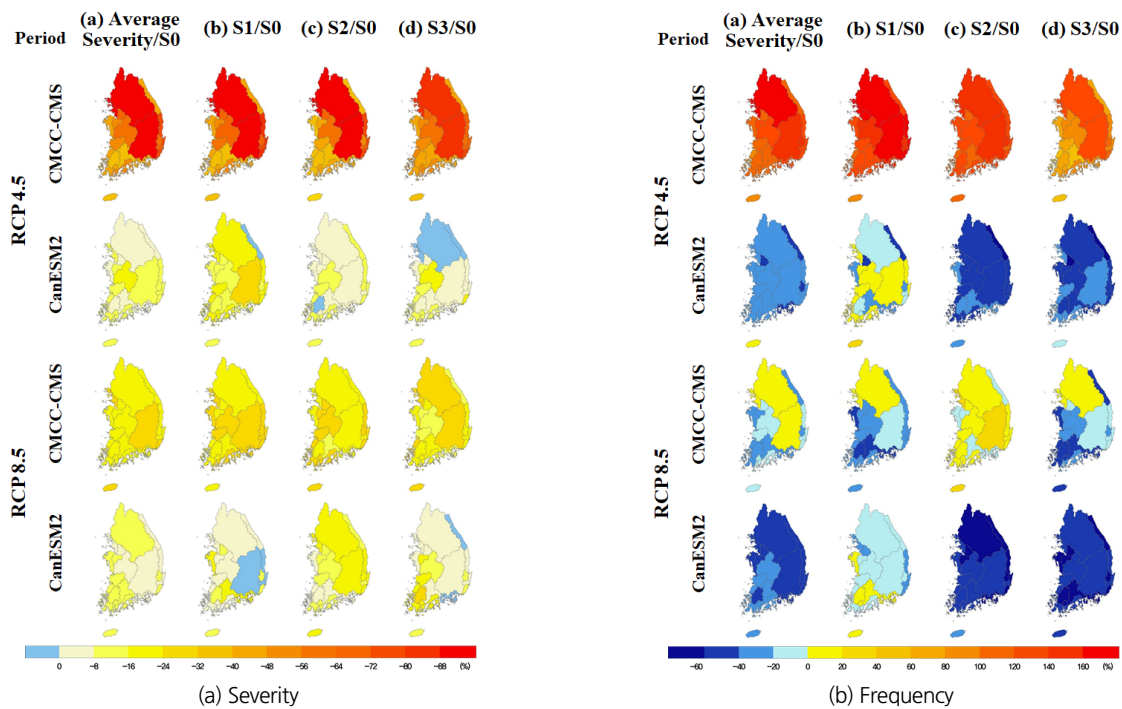


Fig. 6. Changes in average drought severity and drought occurrence frequency between the past period (1976~2010) and the future period (2011~2099) for 2 selected GCMs

Table 5. Changes in average drought severity and drought occurrence frequency between the past period (1976~2010) and the future period (2011~2099)

	Basin	CMCC-CMS (%)				CanESM2 (%)				
		Average/So	S1/So	S2/So	S3/So	Average/So	S1/So	S2/So	S3/So	
Severity	(a) RCP 4.5	Han-river	-92.50	-100.81	-93.11	-83.59	-7.67	-19.82	-4.21	1.03
		Nakdong-river	-94.01	-102.83	-93.78	-85.41	-10.90	-28.35	-2.15	-2.19
		Geum-river	-62.95	-69.27	-61.02	-58.56	-16.30	-14.90	-12.59	-21.42
		Sumjin-river	-36.84	-32.60	-34.18	-43.74	-7.62	-11.01	-6.18	-5.66
		Youngsan-river	-35.20	-33.45	-32.06	-40.09	-6.24	-14.91	0.40	-4.23
	(b) RCP 8.5	Han-river	-23.90	-22.11	-23.70	-25.88	-10.12	-1.87	-21.44	-7.04
		Nakdong-river	-24.99	-25.03	-20.29	-29.67	-7.12	0.91	-20.83	-1.43
		Geum-river	-22.65	-26.89	-30.71	-10.35	-7.84	-2.97	-9.50	-11.06
		Sumjin-river	-17.19	-17.99	-15.64	-17.92	-9.03	-16.43	-5.20	-5.46
		Youngsan-river	-21.15	-22.23	-18.14	-23.08	-15.15	-14.10	-6.19	-25.14
Frequency	(a) RCP 4.5	Han-river	161.11	203.33	146.67	133.33	-35.00	-5.00	-51.67	-48.33
		Nakdong-river	160.00	198.33	151.67	130.00	-27.78	3.33	-48.33	-38.33
		Geum-river	125.00	151.67	123.33	100.00	-29.44	10.00	-48.33	-50.00
		Sumjin-river	100.56	126.67	120.00	55.00	-36.11	-21.67	-36.67	-50.00
		Youngsan-river	112.22	131.67	135.00	70.00	-32.78	-15.00	-38.33	-45.00
	(b) RCP 8.5	Han-river	10.56	1.67	20.00	10.00	-41.67	-6.67	-61.67	-56.67
		Nakdong-river	5.56	-5.00	23.33	-1.67	-40.56	-10.00	-58.33	-53.33
		Geum-river	-16.67	-31.67	3.33	-21.67	-38.33	-11.67	-51.67	-51.67
		Sumjin-river	-32.22	-41.67	-3.33	-51.67	-36.67	20.00	-53.33	-76.67
		Youngsan-river	-28.89	-43.33	8.33	-51.67	-40.56	13.33	-55.00	-80.00

역 및 낙동강 유역에서 과거에 비해 가뭄심도가 매우 극심해지는 것을 확인 할 수 있었으며, 대부분의 유역에서 -30% 이하로 가뭄심도가 심해지는 것으로 나타났다.

가뭄발생빈도의 경우 CMCC-CMS 모델은 RCP 4.5 시나리오에서 100% 이상으로 과거에 비해 가뭄이 빈번하게 발생하는 것으로 나타났으며, RCP 8.5 시나리오의 경우 S1과 S3의 경우 한강 유역에서 S2 기간에서는 일부 유역을 제외한 전 유역에서 과거에 비해 가뭄이 빈번하게 발생하는 것으로 나타났다. CanESM2 모델의 경우 RCP 4.5 시나리오에서 S1 기간의 낙동강 및 금강 일부 유역을 제외하고는 과거에 비해 가뭄 발생빈도가 적어지는 것으로 확인 할 수 있었다(Table 5).

4.3 계절별 가뭄 발생빈도 변화

미래 기간에서 계절별 가뭄발생빈도 분석 결과, RCP 4.5에서 CMCC-CMS는 여름철과 가을철에 가뭄발생이 집중되는 것으로 나타났으며 여름철과 가을철에는 한반도 전 유역에서 가뭄발생빈도가 높은 것으로 나타났다. CanESM2는 다른 계절에 비해 겨울철에 한반도 전 유역에서 가뭄발생이 심한 것으로 나타났다.

RCP 8.5에서는 CMCC-CMS는 가을철 한강과 낙동강에서 심한 가뭄을 보이고 있으며, CanESM2는 전 계절 전 유역에 대해서 가뭄발생빈도가 유사하게 나타나는 것을 확인 할 수

있었다. 계절별 가뭄 발생빈도에서 CMCC-CMS는 CanESM2에 비하여 여름과 가을철에 가뭄의 발생빈도가 많아지는 것을 확인 할 수 있었다(Fig. 7).

4.4 계절별 평균 가뭄심도의 변화

미래 구간에서 계절별 평균가뭄심도를 분석한 결과, RCP 4.5에서는 CMCC-CMS의 경우 봄철을 제외한 나머지 계절에서 평균 가뭄심도가 심해지는 것을 확인 할 수 있었다. CanESM2는 CMCC-CMS 비해 봄철을 제외한 나머지 계절에서 가뭄심도가 심하지는 않은 것으로 나타났다.

RCP 8.5에서 CMCC-CMS는 모든 계절에서 비슷한 가뭄심도를 나타냈으며, CanESM2의 경우 일부유역을 제외하고 CMCC-CMS 보다 가뭄심도가 약해지는 것으로 나타났다 (Fig. 8).

5. 결론

본 연구에서는 기후변화 시나리오를 기반으로 한반도의 미래 극한 가뭄을 가장 심하게 전망하는 GMIP5 GCMs 정보를 제공하고자 미래 기간에 대한 가뭄분석을 실시하였으며, 다음과 같이 주요 결과를 도출하였다.

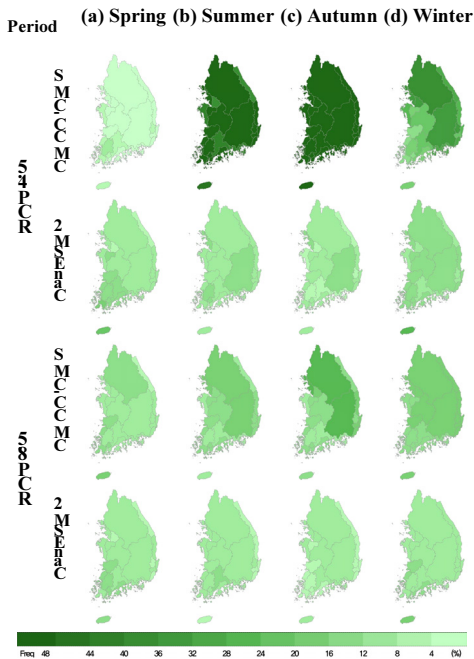


Fig. 7. Changes in seasonal drought occurrence frequency of 2 GCMs for the 5 major river basins in Korea according to RCP scenarios (SPI(6) < -1.0)

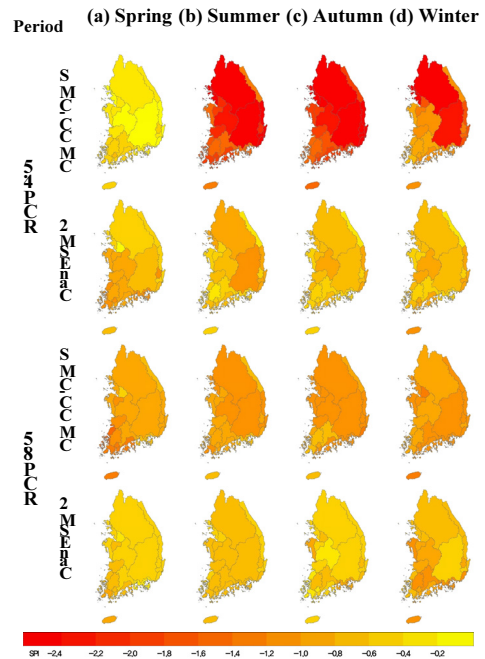


Fig. 8. Changes in seasonal average drought severity of 2 GCMs for the 5 major river basins in Korea according to RCP scenarios (SPI(6) < -1.0)

미래 극한 가뭄 평가를 위해 CMIP5 GCMs을 4가지 지표 (연평균 강우량, 무강우일수, 가뭄발생빈도, 평균가뭄심도)를 활용하여 분석한 결과, 미래 가뭄을 가장 심하게 전망하는 GCM은 CMCC-CMS, IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5A-MR로 나타났으며, 보통 수준의 미래 가뭄을 전망하는 GCM은 HadGEM2-CC, CMCC-CM, HadGEM2-ES, 상대적으로 미래의 가뭄을 약하게 전망하는 GCM은 CESM1-CAM5, MIROC-ESM-CHEM. CanESM2로 선정되었다.

가장 극심한 가뭄을 나타내는 CMCC-CMS와 가장 약하게 가뭄을 전망하는 CanESM2를 한반도 5대 유역(한강, 낙동강, 영산강, 금강, 섬진강)에 적용하여 미래 기간별 가뭄을 비교한 결과, CMCC-CMS 모델의 경우 가뭄의 발생빈도는 RCP 8.5 시나리오에서 S1 및 S3 기간의 일부 유역을 제외하고 모든 기간에서 과거대비 증가하는 것을 볼 수 있었으며, CanESM2 모델의 경우 RCP 4.5 시나리오 S1 기간의 금강 및 낙동강 유역과 RCP 8.5 시나리오의 섬진강 유역을 제외하고는 과거 대비 가뭄의 발생빈도가 감소하는 것을 확인 할 수 있었다. 평균 가뭄심도는 CMCC-CMS의 경우, 과거 대비 미래 전 기간에서 심해지는 것으로 나타났으며, CanESM2 모델의 경우, RCP 4.5 시나리오의 S1 기간 및 RCP 8.5 시나리오에서 S2 기간이 과거 대비 가뭄심도가 증가하는 것을 볼 수 있었으나 이를 제외한 나머지 구간에서 과거와 유사하거나 가뭄심도가 약해지는 것으로 나타났다. 두 개 모델의 평균가뭄심도는 RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오에서 일부 유역을 제외한 전 유역에서 과거에 비해서 심해지는 것을 확인할 수 있었으나, 가뭄의 발생빈도는 상이하게 나타나는 특징을 보였다.

계절별 발생빈도 및 평균 가뭄심도의 경우, CanESM2는 CMCC-CMS보다 RCP 4.5 및 RCP 8.5 시나리오에서 봄철 일부 유역을 제외하고는 상대적으로 가뭄이 약할 것으로 전망하고 있다.

다양한 기후 모델을 활용한 미래의 가뭄전망은 기후 변화 전망에 있어서 합리적인 결과 도출을 위한 필수적인 연구과제라고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 결과는 향후 미래 극한 가뭄 평가에 있어서 적절한 기후변화 시나리오를 선정하는데 기초 자료로 활용될 것으로 판단된다.

감사의 글

This research was supported by grant (18AWMP-B08 3066-05) from the Water Management Research Program and Basic Science Research Program through the National

Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (NRF - 2017R1D1A1A02018546).

References

- Chung, S. O. (2012). "Projection of paddy rice consumptive use in the major plains of the Korean peninsula under the RCP scenarios." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineer*, Vol. 54, No. 5, pp. 35-41.
- Dubrovský, M., Hayes, M., Duce, P., Trnka, M., Svoboda, M., and Zara, P. (2014). "Multi-GCM projections of future drought and climate variability indicators for the Mediterranean region." *Regional Environmental Change*, Vol. 14, No. 5, pp. 1907-1919.
- Eum, H. I., and Cannon, A. J. (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*, Vol. 37, pp. 3381-3397.
- Kim, C. J., Park, M. J., and Lee, J. H. (2014). "Analysis of climate change impacts on the spatial and frequency patterns of drought using a potential drought hazard mapping approach." *International Journal of Climatology*, Vol. 34, pp. 61-80.
- Lee, J. H., Cho, K. J., Kim, C. J., and Park, M. J. (2012). "Analysis on the spatio-temporal distribution of drought using potential drought hazard map." *Journal of the Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 10, pp.983-995.
- Lee, J. H., and Kim, C. J. (2013). "A multimodel assessment of the climate change effect on the drought severity-duration-frequency relationship." *Hydrological Processes*, Vol. 27, No. 19, pp. 2800-2813.
- Lee, J. H., Kwon, H. H., Jang, H. W., and Kim, T. W. (2016). "Future changes in drought characteristics under extreme climate change over South Korea." *Advances in Meteorology*, Vol. 2016, Article ID 9164265, 19 pages.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., and Kleist, J. (1995). "Drought monitoring with multiple time scales." *Proceedings 9th Conference on Applied Climatology*, 15-20 January 1995, Dallas, TX, American Meteorological Society, pp. 233-236.
- McMahon, T. A., Peel, M. C., and Karoly, D. J. (2015). "Assessment of precipitation and temperature data from CMIP3 global climate models for hydrologic simulation." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 19, No. 1, pp. 361-377.
- Park, K. W., Kim, J. T., and Lee, J. N. (2006). "Evaluation of the drought indicator for regional drought assessment." *Proceedings Korea Water Resources Association Annual Conference 2006*, pp. 214-220.
- Park, B. S., Lee, J. H., Kim, C. J., and Jang, H. W. (2013). "Projection of future drought of Korea based on probabilistic approach using multi-model and multi climate change scenarios." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 5, pp. 1871-1885.

- Park, J. Y., Jung, H., Jang, C. H., and Kim, S. J. (2014). "Assessing climate change impact on hydrological components of Yongdam dam watershed using RCP emission scenarios and SWAT model." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 56, No. 3, pp. 19-29.
- Rhee, J., and Cho, J. (2016). "Future changes in drought characteristics: regional analysis for South Korea under CMIP5 projections." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 17, No. 1, pp. 437-451.
- Shin, Y. H., and Jung, H. C. (2015). "Assessing uncertainty in future climate change in Northeast Asia using multiple CMIP5 GCMs with four RCP scenarios." *Journal of Environmental Impact Assessment*, Vol. 24, No. 3, pp. 205-216.
- Van Pelt, S. C., and Swart, R. J. (2011). "Climate change risk management in transnational river basins: the Rhine." *Water Resources Management*, Vol. 25, No. 14, p. 3837.
- Willhite, D. A., Sivakumar, M. V., and Pulwarty, R. (2014). "Managing drought risk in a changing climate: The role of national drought policy." *Weather and Climate Extremes*, Vol. 3, pp. 4-13.
- Wójcik, R. (2015). "Reliability of CMIP5 GCM simulations in reproducing atmospheric circulation over Europe and the North Atlantic: a statistical downscaling perspective." *International Journal of Climatology*, Vol. 35, No. 5, pp. 714-732.
- Yoo, S. H., Kim, T., Lee, S. H., and Choi, J. Y. (2015). "Trend analysis of projected climate data based on CMIP5 GCMs for climate change impact assessment on agricultural water resources." *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 57, No. 5, pp. 69-80.