기후학적 물수지를 적용한 기후변화에 따른 농업기상지표 변동예측의 불확실성

Uncertainty Characteristics in Future Prediction of Agrometeorological Indicators using a Climatic Water Budget Approach

남원호* · 홍은미** · 최진용***,† · 조재필**** · Michael J. Hayes*****

Nam, Won-Ho · Hong, Eun-Mi · Choi, Jin-Yong · Cho, Jaepil · Michael J. Hayes

Abstract

The Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5), coordinated by the World Climate Research Programme in support of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) AR5, is the most recent, provides projections of future climate change using various global climate models under four major greenhouse gas emission scenarios. There is a wide selection of climate models available to provide projections of future climate change. These provide for a wide range of possible outcomes when trying to inform managers about possible climate changes. Hence, future agrometeorological indicators estimation will be much impacted by which global climate model and climate change scenarios are used. Decision makers are increasingly expected to use climate information, but the uncertainties associated with global climate models pose substantial hurdles for agricultural resources planning. Although it is the most reasonable that quantifying of the future uncertainty using climate change scenarios, preliminary analysis using reasonable factors for selecting a subset for decision making are needed. In order to narrow the projections to a handful of models that could be used in a climate change impact study, we could provide effective information for selecting climate model and scenarios for climate change impact assessment using maximum/minimum temperature, precipitation, reference evapotranspiration, and moisture index of nine Representative Concentration Pathways (RCP) scenarios.

Keywords: climate change; climatic water budget; moisture index; RCP scenarios; reference evapotranspiration; uncertainty

1. 서 론

기후변화에 관한 정부간 협의체 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)의 제 5 차 기후변화 평가보고서 (the Fifth Assessment Report, AR5)는 2007년에서 2011년 까지 실시된 5 단계 결합모델 상호비교 프로젝트 (the phase five of the Coupled Model Intercomparison Project, CMIP5)

를 통해 신 온실가스 배출 시나리오를 기반으로 작성되었다. 전 지구 기후변화 시나리오 산출을 위한 국제사업인 CMIP5 사업은 전 세계 23 개 기후 연구 그룹이 참여하고 50 개 이상의 기후 모델을 이용하여 온실가스의 대표농도경로 (Representative Concentration Pathways, RCP) 시나리오 기반의 기후전망 자료를 제공하고 있다 (Cho, 2013; Hwang, 2014a). 현재 기후변화 관련 연구는 기후변화 시나리오를 반영한 다수의 기후 모델의 활용을 기초로 한다 (Sung et al., 2012; Oh et al., 2013). 각 분야별 미래 기후변화 시나리오에 대한 영향 및 전망을 분석하고 적응 전략을 수립하는 연구가 수행되고 있지만, 모의결과에 따라 상이한 결과를 제시하고 있어 미래 기후변화 전망에 대한 불확실성이 증대되고 있다 (Lee and Kim, 2010; Hwang et al., 2013; Moon et al., 2014; Nam et al., 2014b; Nkomozepe and Chung, 2014).

기후변화 불확실성에 대한 선행 연구는 미래 온실 가스 배출 시나리오 예측의 부정확성, 저해상도 기후모델 결과의 시공간적인 편의를 보정하는 방법에 따른 오차, 적용 모형의 선정과 매개변수 보정에 따른 오차 등 기후변화 영향평가과정의 단계별 불확실성 요소에 관한 연구가 진행되었다 (Raje and Mujumdar, 2010; Bae et al., 2011; Hwang and Kang, 2013; No et al., 2013). 또한 기후변화 영향평가 과정에서 발생하는 불확실성 중 주요 원인은 기후변화 시나리오 선택에 의한 불확실성으로 제시된 바

* National Drought Mitigation Center, School of Natural Resources, University of Nebraska-Lincoln, Lincoln, NE, USA
** USDA-ARS Environmental Microbial & Food Safety Laboratory, Beltsville Agricultural Research Center, Beltsville, MD, USA
*** Department of Rural Systems Engineering and Research Institute for Agriculture & Life Sciences, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea
**** Climate Research Department, APEC Climate Center, Busan, Republic of Korea
***** Professor/Director, National Drought Mitigation Center and School of Natural Resources, University of Nebraska-Lincoln, Lincoln, NE, USA
† Corresponding author
Tel.: +82-2-880-4583 Fax: +82-2-873-2087
E-mail: iamchoi@snu.ac.kr

Received: December 18, 2014

Revised: January 21, 2015

Accepted: January 21, 2015

있다(Harding et al., 2012; Lee and Kim, 2012; Madsen et al., 2012). 즉, 기후 모델 및 기후변화 시나리오의 선정에 따라 기후 변화 영향 및 전망 결과가 상이할 수 있기 때문에, IPCC에서 제공하는 모든 역학적 기후 모델을 활용하여 미래에 대한 모든 불확실성을 파악하는 것이 이상적인 방법이지만 실무에서 의사결정을 하기 위해서는 비현실적인 대안이다(Murdock et al., 2011; Snover et al., 2013; Rowland et al., 2014).

현재 기후변화 시나리오를 선정하는 객관적 기준은 명확하지 않고 연구자의 주관적 판단에 따라 임의의 시나리오를 선정하고 있으며, 기존의 연구들은 한정된 시나리오만을 이용하여 시나리오 혹은 기후변화 영향평가 과정의 단계별 적용 인자의 평균 또는 분산의 변화를 불확실성의 크기로 가정하여 비교함으로써 불확실성을 판단하고 있다(Chung and Nkomozepe, 2012; Nam et al., 2014a). 기후모델별 산출물의 불확실성에 대한 연구의 경우 Nkomozepe and Chung (2014)은 12 개 GCM 모형을 선정하여 5 대강 유역의 유출량 변화를 예측함으로써 수자원 영향평가 결과의 불확실성에 대해 고찰한 바 있으며, Hwang (2014b)은 미국 남동부 지역을 대상으로 17 개의 CMIP5 GCM의 강수량, 최대/최저기온, 풍속 등의 기후요소와 기후 통계량, 시간 변동성, 극한 사상 빈도 등의 평가 지표를 활용하여 전지구 기후모델의 다양성을 분석하였다. 최근에는 통계적 기법을 활용하여 기후변화 영향평가 단계별로 불확실성을 정량화하는 연구가 수행되고 있다(Lee and Kim, 2012). 국외의 경우 적용 지역과 연구 목적에 따른 기후변화 시나리오 선정 방법에 대한 연구(Gober et al., 2010), 적합한 기후변화 시나리오를 선정을 위한 지수의 개발(Collins et al., 2006; Garcia-Garizabal et al., 2014) 및 불확실성을 정량화하는 지표 개발(Collins et al., 2012) 등의 연구가 진행되었다.

본 연구에서는 기후변화 영향 및 적응평가 연구를 수행하기 위한 사전 연구로서 기후변화에 따른 농업기상학적 예측을 위

한 불확실성을 정량적으로 평가하고자 한다. 기후변화 시나리오 선정을 위하여 9 개 기후 모델과 미래 대표농도경로 시나리오를 활용하여 73개 기상관측소를 대상으로 기후인자(최대/최소기온, 강수량) 및 기준증발산량, 기후학적 물수지를 활용한 습윤인자 등 농업기상지표(agrometeorological indicators)에 대한 기후 모델별, 시나리오별, 미래 기간별 변화를 산정하였다.

II. 재료 및 방법

1. 분석자료

본 연구에서는 CMIP5의 ESGF (Earth System Grid Federation)에서 제공하는 GCM 자료 중 RCP 4.5 및 8.5 시나리오에 대한 강수량 및 기준증발산량 분석에 필요한 주요 기상 변수(최고기온, 최저기온, 평균풍속, 상대습도, 일사량)를 포함하고 있는 9 개 전 지구 모형(Global Climate Model, GCM)을 선정하였다. 시간적 상세화 과정이 필요하지 않는 일(daily) 자료를 사용하였으며, 관측지점의 특성을 살리기 위한 공간적 상세화 과정과 편의보정을 동시에 할 수 있도록 분위사상법(quantile mapping)을 사용하였다. 비모수적 분위사상법(non-parametric quantile mapping method)을 월별로 적용하여 공간적 상세화(downscaling) 과정과 편의보정(bias correction)을 수행하였으며(Cho, 2013), 기상청 종관 기상관측시스템(Automated Synoptic Observing System, ASOS) 관측지점 73곳의 자료를 사용하였다. 자료기간은 미래의 경우 전기(2025s, 2011-2030년), 중기(2055s, 2031-2070년), 후기(2085s, 2071-2100년)로 분류하였다. 분석자료는 공간적 상세화 과정과 편의보정을 수행한 관측소에 대한 모의값으로 한정하였다. Table 1은 사용된 기후자료와 기후 자료 별 공간해상도를 도시한 것이다.

Table 1 CMIP5 models analyzed in this study

Model acronym	Modeling center	Resolution (horizontal x vertical)
CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada	128 x 64
GFDL-ESM2G	GFDL Earth System Model with Generalized Ocean Layer Dynamics (GOLD) component (ESM2G)	144 x 90
GFDL-ESM2M	GFDL Earth System Model with Modular Ocean Model 4 (MOM4) component (ESM2M)	144 x 90
HadGEM2-CC	Hadley Centre Global Environment Model, version 2-Earth System; Met Office, United Kingdom	192 x 144
INM-CM4	Institute of Numerical Mathematics (INM) Coupled Model, Russia	180 x 120
IPSL-CM5A-LR	L'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) Coupled Model, coupled with NEMO, low resolution; France	96 x 96
MIROC-ESM	Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japan	128 x 64
MIROC-ESM-CHEM		
MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute (MRI) Coupled Atmosphere-Ocean General Circulation Model, Japan	320 x 160

Table 2 Description of thermal and moisture types in terms of annual reference evapotranspiration and moisture index (I_m) (Feddema, 2005)

Thermal type	Annual ET_0 (mm)	Moisture type	I_m (mm)
Torrid	> 1,500	Arid	-1.00 ~ -0.66
Hot	1,200 ~ 1,500	Semiarid	-0.66 ~ -0.33
Warm	900 ~ 1,200	Dry	-0.33 ~ 0.0
Cool	600 ~ 900	Moist	0.0 ~ 0.33
Cold	300 ~ 600	Wet	0.33 ~ 0.66
Frigid	0 ~ 300	Saturated	0.66 ~ 1.00

2. 기준증발산량 산정

농업수자원계획을 수립하는 과정에서 중요한 인자인 증발산량은 수문기상학적 특성을 분석하여 기후변화에 따른 농업수자원의 지속적인 관리를 위하여 정확한 측정 및 정량적 분석이 요구된다(Hong et al., 2009; Nam et al., 2014c). 하지만 실측된 증발산량 자료는 매우 제한적으로 존재하기 때문에 일반적으로 증발산량에 대한 분석은 기상자료를 이용하여 이론적인 방법에 의해 산정된다(Moon et al., 2013; Nam et al., 2015). 기준증발산량(reference evapotranspiration)은 충분한 물의 공급이 있을 경우에 기준작물(알파파 또는 잔디)에 의한 증발산량으로 정의되며, 증발산 분석을 위한 표준 값으로 사용하도록 권고되고 있다. 따라서 본 연구에는 FAO Penman-Monteith 공식(FAO PM)을 이용하여 식(1)과 같이 기준증발산량을 산정하였다.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

여기서, ET_0 는 기준증발산량(mm/day), Δ 는 증기압 곡선의 기울기($kPa/^\circ C$), R_n 은 지구(작물)표면에서 순수하게 축적되는 에너지(순일사량)(MJ/m^2day), G 는 토양 열 유속 밀도(MJ/m^2day), γ 는 건습계 상수($kPa/^\circ C$), T 는 평균기온($^\circ C$), u_2 는 2 m 높이에서 풍속(m/s), e_s 는 포화증기압(kPa), e_a 는 실제증기압(kPa)이다.

3. 기후학적 물수지

기후학적 물수지는 기후구분을 위하여 Thornthwaite (1948)에 의해 개발된 이래, 물의 공급(강수량)과 기후학적 물수요(증발산량)와의 비교에 통해 수문기상학적 문제의 정량적 정보를 획득하기 위한 하나의 방법으로 응용되었으며, (Willmott and Feddema, 1992; Shin et al., 2008), 최근에는 기후변화에 의한 기후지역의 변화 연구에 활용되고 있다(Elguindi et al.,

2014; Greve et al., 2014). 기후학적 물수지를 산정하기 위한 입력 자료로는 강수량 및 증발산량 자료가 필요하며, 임의 시점에서의 강수량과 증발산량의 대소 관계에 따라 식(2)와 같이 습윤지표(Moisture Index)를 산정한다.

$$I_m = \frac{P}{ET_0} - 1 \text{ for } P < ET_0$$

$$I_m = 1 - \frac{ET_0}{P} \text{ for } P > ET_0 \quad (2)$$

$$I_m = 0 \text{ for } P = ET_0$$

여기서, I_m 는 습윤지표, P 는 연강수량(mm)이며, 기준증발산량 및 습윤지표에 대응하는 기후 형태를 Table 2와 같이 분류하였다. 습윤지표의 범위는 -1부터 +1까지의 값을 갖게 되며, 기후학적 물수지로부터 부족량이 발생하는 경우 부(-)의 값을 나타내고, 이는 물부족 현상과 밀접한 관련이 있는 것으로 판단할 수 있다.

III. 적용 및 고찰

1. 기후인자(최대/최소기온)를 활용한 기후변화 시나리오 비교

CMIP5 기후 모델의 RCP 4.5 및 RCP 8.5 시나리오에 대한 최대기온과 최소기온의 73개 관측소 평균값의 경향성을 분석하였다. Fig. 1과 Fig. 2는 CanESM2 모델을 대표 모델로 선정하여 최소기온과 최대기온의 시계열 변화를 도시한 것으로 각각 관측소의 값을 회색 실선, 73개 관측소의 평균값을 검은색 실선으로 표현하였다. CanESM2 모델의 경우 관측소에 따라 최대 10 $^\circ C$ (최소: 대관령 관측소, 최대: 서귀포 관측소)의 차이가 나타났다.

Table 3은 9 개 CMIP5 기후 모델에 대한 미래 전기, 중기, 후기의 최대기온과 최소기온의 평균 및 표준편차를 도시한

Fig. 1 Time series of minimum temperature in RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios (2011–2100) using CanESM2 model for 73 meteorological stations

Fig. 2 Time series of maximum temperature in RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios (2011–2100) using CanESM2 model for 73 meteorological stations

것이다. RCP 4.5에서 미래 전기(2025s)와 후기(2085s)의 최대기온 차이는 MIROC-ESM 모델 (2.89 °C 증가)에서 최댓값을 나타냈으며, CanESM2 모델 (2.79 °C 증가), MIROC-ESM-CHEM 모델 (2.76 °C 증가) 순으로 분석되었다. 또한 최솟값은 GFDL-ESM2G 모델 (0.88 °C 증가), GFDL-ESM2M 모델 (0.99 °C 증가), INM-CM4 모델 (1.16 °C 증가) 순이었다. 가장 큰 차이를 나타낸 RCP 8.5에서의 미래 전기와 후기의 최소기온 차이는 MIROC-ESM-CHEM 모델 (6.72 °C 증가)에서 최댓값을 나타냈으며, MIROC-ESM 모델 (6.67 °C 증가), CanESM2 모델 (5.13 °C 증가) 순으로 분석되었다. 또한 최솟값은 INM-CM4 모델 (1.76 °C 증가), GFDL-ESM2M

모델 (2.63 °C 증가), GFDL-ESM2G 모델 (3.13 °C 증가) 순이었다. RCP 4.5의 최소기온의 차이, RCP 8.5에서의 최대기온의 차이의 기후 모델간의 비교 경우에도 유사한 결과가 도출되었다.

Fig. 3은 기후 모델에 대한 2011년부터 2100년까지 90년간의 연평균 최소기온과 최대기온의 비를 점묘도로 도시한 것이다. 대부분 기후 모델의 경우 미래 전체기간의 RCP 4.5와 비교하여 RCP 8.5의 최대기온과 최소기온의 비가 높은 것 (1:1 실선의 위부분)을 확인할 수 있다. 최대기온 대비 최소기온 비율의 변화로부터 계절간의 온도 차이 변화를 판단할 수 있다. 즉 최대기온과 최소기온의 비가 높아지는 것은 온난

Table 3 Comparison of the average and standard deviation (in parentheses) of maximum temperature and minimum temperature under different climate change models in RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios at 73 meteorological stations

Models	Variable	$T_x^{(1)}$ (°C)		$T_t^{(2)}$ (°C)	
		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
CanESM2	2025s	19.56 (0.88)	20.39 (0.93)	9.33 (0.92)	10.22 (0.93)
	2055s	21.57 (0.61)	22.58 (0.88)	11.47 (0.68)	12.67 (1.06)
	2085s	22.35 (0.66)	24.93 (0.66)	12.38 (0.81)	15.35 (0.78)
GFDL-ESM2G	2025s	18.70 (0.57)	18.69 (0.62)	8.43 (0.48)	8.42 (0.63)
	2055s	19.27 (0.55)	19.98 (0.67)	9.03 (0.50)	9.72 (0.65)
	2085s	19.58 (0.62)	21.62 (0.83)	9.36 (0.57)	11.55 (0.86)
GFDL-ESM2M	2025s	18.93 (0.47)	19.11 (0.66)	8.71 (0.54)	8.87 (0.61)
	2055s	19.89 (0.66)	20.34 (0.60)	9.62 (0.57)	10.18 (0.59)
	2085s	19.92 (0.48)	21.69 (0.75)	9.67 (0.42)	11.50 (0.70)
HadGEM2-CC	2025s	20.07 (0.73)	20.33 (1.07)	9.55 (0.68)	10.05 (0.90)
	2055s	21.25 (0.72)	22.81 (1.49)	10.72 (0.55)	12.28 (1.42)
	2085s	22.51 (0.77)	25.17 (0.93)	11.88 (0.67)	14.63 (0.94)
INM-CM4	2025s	18.08 (0.59)	18.54 (0.61)	7.87 (0.43)	8.25 (0.49)
	2055s	18.76 (0.56)	19.54 (0.65)	8.40 (0.45)	9.12 (0.49)
	2085s	19.24 (0.47)	20.74 (0.68)	8.89 (0.35)	10.01 (0.56)
IPSL-CM5A-LR	2025s	19.56 (0.85)	19.49 (0.97)	9.28 (0.90)	9.17 (0.89)
	2055s	20.81 (0.69)	21.79 (0.81)	10.57 (0.64)	11.50 (0.78)
	2085s	21.47 (0.64)	24.31 (0.76)	11.14 (0.57)	14.06 (0.76)
MIROC-ESM	2025s	19.89 (0.96)	20.22 (0.98)	9.85 (0.99)	10.24 (0.98)
	2055s	21.99 (0.89)	23.23 (1.05)	12.19 (0.94)	13.48 (1.11)
	2085s	22.78 (0.55)	26.13 (0.98)	13.16 (0.59)	16.91 (1.07)
MIROC-ESM-CHEM	2025s	19.78 (0.98)	20.04 (1.09)	9.84 (1.04)	10.11 (1.13)
	2055s	21.71 (0.81)	23.28 (0.68)	12.08 (0.90)	13.72 (0.77)
	2085s	22.54 (0.57)	26.04 (1.18)	13.06 (0.61)	16.83 (1.22)
MRI-CGCM3	2025s	18.43 (0.51)	18.43 (0.66)	8.24 (0.46)	8.25 (0.66)
	2055s	19.25 (0.37)	19.79 (0.87)	9.09 (0.36)	9.62 (0.80)
	2085s	19.81 (0.51)	21.85 (0.72)	9.62 (0.42)	11.71 (0.67)

※ 1) T_x : maximum temperature, 2) T_t : minimum temperature

※ standard deviation in parentheses

화 현상으로 인하여 최대기온(여름)과 최소기온(겨울)의 차이가 줄어든다는 것을 의미한다. 9개 기후 모형의 평균값은 미래 전기, 중기, 후기의 경우 RCP 4.5에서 0.47, 0.50, 0.52 값을 나타냈으며, RCP 8.5에서는 0.48, 0.53, 0.57 값을 나타내어, 미래 후기로 갈수록 비율이 증가하는 경향을 보였다. INM-CM4 모형의 경우 미래 전기, 중기, 후기의 평균값이 RCP 4.5에서 0.43, 0.45, 0.46, RCP 8.5에서 0.45, 0.47, 0.48 값을 나타내어 미래 기간별 비율의 변화가 가장 적은 것으로 분석되었다. 또한 MIROC-ESM-CHEM 모형의 경우 미래 전기, 중기, 후기의 평균값이 RCP 4.5에서 0.50, 0.56, 0.58,

RCP 8.5에서 0.50, 0.59, 0.65 값을 나타내어 미래 기간별 비율의 변화가 가장 큰 것으로 분석되었다. 또한 최대기온 및 최소기온이 상대적으로 낮게 모의된 GFDL 계열 모델, INM-CM4 모델, MRI-CGCM3 모형의 경우, 최대기온 대비 최소기온 비율의 변화율이 작게 모의되었다. 대조적으로 최대기온 및 최소기온이 상대적으로 높게 모의된 MIROC 계열 모형의 경우, 미래 기간별 변화율이 크게 모의된 것을 확인할 수 있다.

결과적으로 최대기온, 최소기온을 활용한 기후인자 분석의 경우 미래기간에 따른 편차에 따라 최대기온 대비 최소기

Fig. 3 Comparison of the ratio between minimum temperature (dividend) and maximum temperature (divisor) under different climate change models (the average of 73 meteorological stations). The X-axis is RCP 4.5 scenario and the Y-axis is RCP 8.5 scenario

온 비율의 변화율이 큰 MIROC-ESM-CHEM 모델, MIROC-ESM 모델, CanESM2 모델, 변화율이 작은 INM-CM4 모델, GFDL-ESM2M 모델, GFDL-ESM2G 모델로 구분 할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 강수량 및 기준증발산량을 활용한 기후변화 시나리오 비교

CMIP5 기후 모델의 RCP 4.5 및 RCP 8.5 시나리오에 대한 강수량과 기준증발산량의 73개 관측소 평균값의 경향성을 분석하였다. Fig. 4는 Fig. 5는 CanESM2 모델의 강수량과 기준증발산량의 시계열 변화를 도시한 것으로 각각 관측소의 값을 회색 실선, 73개 관측소의 평균값을 검은색 실선으로 표현하였다. CanESM2 모델의 경우 기준증발산량은 대관령 관측소에서 최솟값을 대구 관측소에서 최댓값을 나타냈으며, 최솟값과 최댓값의 편차는 2011년-2100년간 평균 약 360

mm로 분석되었다.

Table 4는 9 개 CMIP5 기후 모델에 대한 미래 전기, 중기, 후기의 강수량과 기준증발산량의 평균 및 표준편차를 도시한 것이다. 강수량의 경우 RCP 4.5에서 미래 전기(2025s)와 후기(2085s)의 차이는 MIROC-ESM 모델(233 mm 증가)에서 최댓값을 나타냈으며, MIROC-ESM-CHEM 모델(189 mm 증가), MRI-CGCM3 모델(165 mm 증가) 순으로 분석되었다. 또한 차이의 최솟값은 GFDL-ESM2G 모델(89 mm 증가), GFDL-ESM2M 모델(109 mm 증가), CanESM2 모델(118 mm 증가) 순이었다. 하지만 RCP 8.5에서는 차이의 최댓값은 CanESM2 모델(555 mm 증가), IPSL-CM5A-LR 모델(552 mm 증가), MIROC-ESM-CHEM 모델(432 mm 증가) 순으로 분석되었으며, 최솟값은 INM-CM4 모델(116 mm 증가), GFDL-ESM2M 모델(150 mm 증가), HadGEM2-CC 모델(160 mm 증가) 순이었다. 강수량의 경우 기후 모델 별 관측소에 따라 지역적인 편차가 큰 것으로 판단된다.

Fig. 4 Time series of precipitation in RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios (2011–2100) using CanESM2 model for 73 meteorological stations

Fig. 5 Time series of reference evapotranspiration in RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios (2011–2100) using CanESM2 model for 73 meteorological stations

기준증발산량의 경우 RCP 8.5에서의 미래 전기와 후기의 차이는 MIROC-ESM-CHEM 모델 (176 mm 증가)에서 최댓값을 나타냈으며, HadGEM2-CC 모델 (175 mm 증가), MIROC-ESM 모델 (172 mm 증가), IPSL-CM5A-LR 모델 (171 mm 증가) 순으로 분석되었다. 또한 차이의 최솟값은 GFDL-ESM2G 모델 (80 mm 증가), INM-CM4 모델 (82 mm 증가), GFDL-ESM2M 모델 (86 mm 증가) 순이었다. 또한 최대기온 및 최소기온이 상대적으로 낮게 모의된 GFDL 계열 모델, INM-CM4 모델, MRI-CGCM3 모델에서 기준증발산량이 작게 모의된 것을 확인할 수 있다. RCP 4.5의 기준증발산량의 차이의 기후 모델간의 비교 경우에도 유사한 결과가 도출되었다.

Fig. 6은 기후 모델에 대한 2011년부터 2100년까지 90년

간의 연평균 강수량과 기준증발산량의 비를 도시한 것이다. Fig. 4와 Fig. 5에 도시한 바와 같이 기준증발산량의 경우 단조 증가하는 경향을 나타냈지만, 강수량의 경우 시나리오별, 미래 기간별 편차가 크기 때문에 기온인자와 비교하여 기후 모델 및 미래 기간별, RCP 시나리오별로 다양한 결과가 도출되었다. 9개 기후 모형의 평균값은 미래 전기, 중기, 후기의 경우 RCP 4.5에서 0.73, 0.70, 0.69 값을 나타냈으며, RCP 8.5에서는 0.72, 0.71, 0.69 값을 나타내어, 기후인자와 대조적으로 미래 후기로 갈수록 비율이 감소하는 경향을 보였다. CanESM2 모델의 경우 미래 전기, 중기, 후기의 평균 값이 RCP 4.5에서 0.64, 0.62, 0.64, RCP 8.5에서 0.69, 0.61, 0.57 값을 나타내어 미래 기간별 비율의 변화가 가장 적은 것으로 분석되었다. 또한 MIROC-ESM 모델의 경우 미래 전기, 중

Table 4 Comparison of the average and standard deviation (in parentheses) of precipitation and reference evapotranspiration under different climate change models in RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios at 73 meteorological stations

Models	Variable	$P_p^{1)}$ (mm)		$ET_0^{2)}$ (mm)	
		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
CanESM2	2025s	1573 (333)	1499 (288)	968 (28)	991 (31)
	2055s	1704 (263)	1784 (286)	1025 (21)	1058 (26)
	2085s	1691 (290)	2054 (345)	1054 (20)	1135 (25)
GFDL-ESM2G	2025s	1476 (431)	1514 (449)	937 (30)	940 (29)
	2055s	1462 (378)	1439 (388)	956 (32)	982 (34)
	2085s	1565 (337)	1835 (497)	964 (29)	1020 (36)
GFDL-ESM2M	2025s	1389 (316)	1389 (381)	939 (25)	947 (31)
	2055s	1492 (366)	1432 (369)	968 (34)	979 (27)
	2085s	1498 (300)	1539 (352)	970 (30)	1033 (38)
HadGEM2-CC	2025s	1268 (295)	1453 (348)	944 (31)	987 (41)
	2055s	1432 (295)	1485 (266)	1036 (40)	1082 (53)
	2085s	1388 (308)	1613 (333)	1081 (34)	1162 (36)
INM-CM4	2025s	1285 (292)	1342 (323)	922 (22)	928 (26)
	2055s	1338 (303)	1401 (344)	941 (25)	968 (26)
	2085s	1431 (351)	1458 (304)	954 (17)	1010 (27)
IPSL-CM5A-LR	2025s	1380 (387)	1393 (336)	972 (29)	972 (39)
	2055s	1558 (299)	1613 (423)	1017 (28)	1056 (29)
	2085s	1515 (345)	1945 (460)	1046 (28)	1143 (29)
MIROC-ESM	2025s	1353 (226)	1299 (262)	975 (39)	980 (37)
	2055s	1386 (296)	1334 (274)	1037 (25)	1074 (30)
	2085s	1586 (456)	1477 (398)	1051 (21)	1152 (38)
MIROC-ESM-CHEM	2025s	1460 (310)	1463 (313)	951 (34)	960 (32)
	2055s	1623 (344)	1668 (353)	1006 (28)	1052 (24)
	2085s	1649 (354)	1894 (407)	1028 (22)	1136 (45)
MRI-CGCM3	2025s	1305 (211)	1334 (225)	919 (21)	919 (21)
	2055s	1446 (335)	1420 (262)	942 (17)	960 (29)
	2085s	1470 (260)	1585 (356)	959 (21)	1007 (27)

※ 1) P_p : precipitation, 2) ET_0 : reference evapotranspiration

※ standard deviation in parentheses

기, 후기의 평균 값이 RCP 4.5에서 0.74, 0.78, 0.71, RCP 8.5에서 0.78, 0.84, 0.85 값을 나타내어 미래 기간별 비율의 변화가 가장 큰 것으로 분석되었다.

3. 습윤지표를 활용한 기후변화 시나리오 분석

Fig. 7은 9 개 기후 모델에 대한 기후학적 물수지를 적용하여 산출된 증발산량과 습윤지표의 결과로부터 분류된 기후 구분도를 도시한 것이다. 미래 기후변화에 따른 기후학적 물수지 결과, 남한지역은 증발산량을 기준으로 대부분 Warm 또는 Hot 지역에 포함되며, 습윤지표의 경우 Wet 또는 Moist

지역으로 구분되었다. 따라서 Table 2의 기준에 따라 증발산량 범위를 800 mm 이상 1200 mm 이하, 습윤지표의 범위를 0.4 이상 0.8 이하로 한정하였다.

Fig. 8과 Fig. 9는 기후 모델에 대한 RCP 4.5 및 RCP 8.5의 2011년부터 2100년까지 90년간의 기후학적 물수지 적용 결과를 점모도로 도시한 것이다. 증발산량의 경우 GFDL-ESM2M 모델과 INM-CM4 모델을 제외한 대부분 기후 모델의 경우 Hot 지역으로 나타났으며, 미래 기간에 따라 증발산량의 편차가 작은 기후 모델은 MRI-CGCM3 모델, INM-CM4 모델, GFDL-ESM2G 모델로 분석되었다.

Fig. 6 Comparison of the ratio between reference evapotranspiration (dividend) and precipitation (divisor) under different climate change models (the average of 73 meteorological stations). The X-axis is RCP 4.5 scenario and the Y-axis is RCP 8.5 scenario

Fig. 7 Classification of thermal types using reference evapotranspiration and moisture types using moisture index in this study

Fig. 8 Comparison of reference evapotranspiration and moisture index in RCP 4.5 scenario under different climate change models (the average of 73 meteorological stations). The X-axis is reference evapotranspiration and the Y-axis is moisture index

Fig. 9 Comparison of reference evapotranspiration and moisture index in RCP 8.5 scenario under different climate change models (the average of 73 meteorological stations). The X-axis is reference evapotranspiration and the Y-axis is moisture index

습윤지표의 경우 미래 기간별, 시나리오별로 9개 기후 모형의 평균 비율은 대부분 Wet, Moist, Dry 지역으로 구분되었으며, RCP 8.5의 미래 후기의 경우 Saturated, Semiarid 지역이 발생하였다. RCP 4.5에서 Wet 지역의 평균 비율은 미래 전기, 중기, 후기의 경우 각각 38.5%, 50.4%, 49.6% 값을 나타냈으며, Moist 지역의 평균 비율은 53.7%, 45.2%, 44.8% 값을 나타냈다. 또한 RCP 8.5에서는 Wet 지역의 평균 비율은 미래 전기, 중기, 후기의 경우 각각 44.8%, 43.7%, 52.2% 값을 나타냈으며, Moist 지역의 평균 비율은 46.7%, 48.9%, 39.6% 값을 나타냈다. RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오 및 미래 기간에 따라 유사한 결과를 도출하였으며, 미래 후기로 갈수록 Wet 지역의 비율이 증가하고, Moist 지역의 비율은 감소하는 경향을 보였다. CanESM2 모형의 경우 미래 전기, 중기, 후기의 습윤지표 평균 값이 RCP 4.5에서 0.36, 0.38, 0.36, RCP 8.5에서 0.31, 0.39, 0.43 값을 나타내어 미래 기간별 습윤지표의 평균 값이 가장 큰 것으로 분석되었다. 또한 MIROC-ESM 모형의 경우 미래 전기, 중기, 후기의 평균 값이 RCP 4.5에서 0.26, 0.22, 0.29, RCP 8.5에서 0.22, 0.16, 0.17 값을 나타내어 미래 기간별 습윤지표의 평균 값이 가장 작은 것으로 분석되었다.

결과적으로 기후학적 물수지를 활용한 습윤지표 분석의 경우 미래기간에 따른 습윤지표의 편차에 따라 변화율이 상대적으로 큰 MIROC-ESM 모형, IPSL-CM5A-LR 모형, 변화율이 작은 CanESM2 모형, MRI-CGCM3 모형로 구분할 수 있을 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 기후변화에 따른 농업기상학적 예측을 위한 불확실성을 평가하기 위하여 9개 기후 모형 (CanESM2, GFDL-ESM2G, GFDL-ESM2M, HadGEM2-CC, INM-CM4, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, MRI-CGCM3 모형) 및 미래 대표농도경로 시나리오 (RCP 4.5, RCP 8.5)를 대상으로 기후인자 (최대/최소기온, 강수량) 및 기준증발산량, 기후학적 물수지를 활용한 습윤인자 등 농업기상지표에 대한 기후 모형별, 시나리오별, 미래 기간별 변화를 정량적으로 비교하였다.

기후인자인 최대기온 및 최소기온의 경우 모든 기후 모형에서 미래 후기로 갈수록 단조 증가하였으며, 미래 기간별 최대기온과 최소기온의 차이에 따라 상대적으로 변화율이 큰 MIROC-ESM-CHEM 모형, MIROC-ESM 모형, CanESM2 모형, 변화율이 작은 INM-CM4 모형, GFDL-ESM2M 모형, GFDL-ESM2G 모형로 구분할 수 있었다. 강수량의 경우 기후

모형별 관측소에 따라 지역적인 편차가 큰 것으로 분석되었다. 기준증발산량의 경우 미래 전기와 후기의 차이에 따라 상대적으로 변화율이 큰 MIROC-ESM-CHEM 모형, HadGEM2-CC 모형, 변화율이 작은 INM-CM4 모형, GFDL-ESM2G 모형로 구분할 수 있었으며, 습윤지표의 경우 미래 기간에 따른 습윤지표의 차이에 따라 변화율이 상대적으로 큰 MIROC-ESM 모형, IPSL-CM5A-LR 모형, 변화율이 작은 CanESM2 모형, MRI-CGCM3 모형로 분석되었다. 결과적으로 농업수자원계획을 수립하는 과정에서 중요한 인자인 기후인자 및 기준증발산량, 습윤인자에 따라 각 기후모형 및 시나리오별로 미래의 변화가 상이하게 분석되었다.

특정 또는 다수 GCM을 활용한 연구 결과의 신뢰도와 실효성을 제고하기 위해서는 기후모형 산출물의 상이성에 대한 분석과 활용 목적에 적합한 지표 선정에 이용한 모형 분석이 우선적으로 수행되어야 한다. 따라서, 증발산량 및 기후학적 물수지 분석은 기후모형의 사전 불확실성의 평가 지표로서 활용이 적합하다고 판단된다. 또한, 기후모형 및 기후변화 시나리오 평가 결과는 향후 기후변화 영향 및 적응 대책 수립을 위한 사전 기초자료 및 향후 농업수자원 장기종합개발계획 및 수공구조물 설계에 반영에 활용가능 할 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 2013년도 정부 (교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (2013R1A6A3A03019009).

REFERENCES

1. Bae, D.H., I.W. Jung, B.J. Lee, and M.H. Lee, 2011. Future Korean water resources projection considering uncertainty of GCMs and hydrological models. *Journal of the Korean Water Resources Association* 44(5): 389-406 (in Korean).
2. Cho, J.P., 2013. *Impact assessment of climate change for agricultural reservoirs considering uncertainty*. Research Report, APEC climate Center, Busan, Republic of Korea (in Korean).
3. Chung, S.O., and T. Nkomozepi, 2012. Uncertainty of paddy irrigation requirement estimated from climate change projections in the Geumho river basin, Korea. *Paddy Water Environment* 10: 175-185.
4. Collins, M., B.B.B. Booth, G.R. Harris, J.M. Murphy, D.M.H. Sexton, and M.J. Webb, 2006. Towards quantifying uncertainty

- in transient climate change. *Climate Dynamics* 27: 127-147.
5. Collins, M., R.E. Chandler, P.M. Cox, J.M. Huthnance, J. Rougier, and D.B. Stephenson, 2012. Quantifying future climate change. *Nature Climate Change* 25: 403-409.
 6. Elguindi, N., A. Grundstein, S. Bernardes, U. Turuncoglu, and J. Feddema, 2014. Assessment of CMIP5 global model simulations and climate change projections for the 21st century using a modified Thornthwaite climate classification. *Climatic Change* 122: 523-538.
 7. Feddema, J.J., 2005. A revised thornthwaite-type global climate classification. *Physical Geography* 26(6): 442-466.
 8. Garcia-Garizabal, I., J. Causape, R. Abrahao, and D. Merchan, 2014. Impact of climate change on mediterranean irrigation demand: historical dynamics of climate and future projections. *Water Resources Management* 28: 1449-1462.
 9. Gober, P., C.W. Kirkwood, R.C. Balling Jr., A.W. Ellis, and S. Deitrick, 2010. Water planning under climatic uncertainty in Phoenix: why we need a new paradigm. *Annals of the Association of American Geographers* 100(2): 356-372.
 10. Greve, P., B. Orlowsky, B. Mueller, J. Sheffield, M. Reichstein, and S.I. Seneviratne, 2014. Global assessment of trends in wetting and drying over land. *Nature Geoscience* 7: 716-721.
 11. Harding, B.L., A.W. Wood, and J.R. Prairie, 2012. The implications of climate change scenario selection for future streamflow projection in the upper Colorado river basin. *Hydrology and Earth System Sciences* 16: 3989-4007.
 12. Hong, E.M., J.Y. Choi, S.H. Lee, S.H. Yoo, and M.S. Kang, 2009. Estimation of paddy rice evapotranspiration considering climate change using LARS-WG. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 51(3): 25-35 (in Korean).
 13. Hwang, S.W., and M.S. Kang, 2013. Uncertainty of climate change impact assessment methodology and process. *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(1): 30-39 (in Korean).
 14. Hwang, S.W., Y.G. Her, and S.W. Chang, 2013. Uncertainty in regional climate change impact assessment using bias-correction technique for future climate scenarios. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(4): 95-106 (in Korean).
 15. Hwang, S.W., 2014a. Summary and comparison of the climate change predictions of IPCC climate change scenarios and assessment report. *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(2): 26-32 (in Korean).
 16. Hwang, S.W., 2014b. Assessing the performance of CMIP5 GCMs for various climatic elements and indicators over the Southeast US. *Journal of the Korean Water Resources Association* 47(11): 1039-1050 (in Korean).
 17. Lee, J.K., and Y.O. Kim, 2010. A study on selection of standard scenarios in Korea for climate change. *Climate Change Research* 1(1): 59-73 (in Korean).
 18. Lee, J.K., and Y.O. Kim, 2012. Selecting climate change scenarios reflecting uncertainties. *Atmosphere. Korean Meteorological Society* 22(2): 149-161 (in Korean).
 19. Madsen, M.S., C.F. Maule, N. MacKellar, J.E. Olesen, and J.H. Christensen, 2012. Selection of climate change scenario data for impact modelling. *Food Additives & Contaminants: Part A* 29(10): 1502-1513.
 20. Moon, H.J., B.H. Kim, H.E. Oh, J.Y. Lee, and K.J. Ha, 2014. Future change using the CMIP5 MME and best models: I. near and long term future change of temperature and precipitation over East Asia. *Atmosphere. Korean Meteorological Society* 24(3): 403-417 (in Korean).
 21. Moon, J.W., C.G. Jung, and D.R. Lee, 2013. Parameter regionalization of hargreaves equation based on climatological characteristics in Korea. *Journal of the Korean Water Resources Association* 46(9): 933-946 (in Korean).
 22. Murdock, T.Q., and D.L. Spittlehouse, 2011. *Selecting and using climate change scenarios for British Columbia*. Pacific Climate Impacts Consortium, University of Victoria, Victoria, BC.
 23. Nam, W.H., E.M. Hong, and J.Y. Choi, 2014a. Uncertainty of water supply in agricultural reservoirs considering the climate change. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(2): 11-23 (in Korean).
 24. Nam, W.H., E.M. Hong, T.G. Kim, and J.Y. Choi, 2014b. Projection of future water supply sustainability in agricultural reservoirs under RCP climate change scenarios. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(4): 59-68 (in Korean).
 25. Nam, W.H., E.M. Hong, M.W. Jang, and J.Y. Choi, 2014c. Projection of consumptive use and irrigation water for major upland crops using soil moisture model under climate change. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(5): 77-87 (in Korean).
 26. Nam, W.H., E.M. Hong, and J.Y. Choi, 2015. Has climate change already affected the spatial distribution and temporal trends of reference evapotranspiration in South Korea?. *Agricultural Water Management* 150: 129-138.
 27. Nkomozepi, T., and S.O. Chung, 2014. Uncertainty of hydro-meteorological predictions due to climate change in the Republic of Korea. *Journal of the Korean Water Resources Association* 47(3): 257-267.
 28. No, S.H., K.S. Jung, J.H. Park, and K.S. Ryoo, 2013. Water supply change outlook for Geum river basin considering RCP climate change scenario. *Journal of the Korean Water Resources Association* 46(5): 505-517 (in Korean).

29. Oh, S.G., and M.S. Suh, 2013. Projection of fine-scale climate changes over South Korea based on the RCP (2.6, 4.5, 6.0, 8.5) scenarios using RegCM4. *Journal of Climate Research* 8(4): 291-307 (in Korean).
30. Raje, D., and P.P. Mujumdar, 2010. Reservoir performance under uncertainty in hydrologic impacts of climate change. *Advances in Water Resources* 33: 312-326.
31. Rowland, E.R., M.S. Cross, and H. Hartmann, 2014. *Considering multiple futures: scenario planning to address uncertainty in natural resource conservation*. Washington, DC, US Fish and Wildlife Service.
32. Shin, S.C., M.H. Hwang, and I.H. Ko, 2008. Development of a monitoring technique of dryness and wetness in watershed using climatic water budget. *Journal of the Korean Water Resources Association* 41(2): 173-184 (in Korean).
33. Snover, A.K., N.J. Mantua, J.S. Littell, M.A. Alexander, M.M. McClure, and J. Nye, 2013. Choosing and using climate-change scenarios for ecological-impact assessments and conservation decisions. *Conservation Biology* 27: 1147-1157.
34. Sung, J.H., H.S. Kang, S.H. Park, C.H. Cho, D.H. Bae, and Y.O. Kim, 2012. Projection of extreme precipitation at the end of 21st century over South Korea based Representative Concentration Pathways (RCP). *Atmosphere. Korean Meteorological Society* 22(2): 221-231 (in Korean).
35. Thornthwaite, C.W., 1948. Approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review* 38: 55-94.
36. Willmott, C.J., and J.J. Feddema. 1992. A more rational climatic moisture index. *The Professional Geographer* 44(1): 84-88.