



# 농업수자원 기후변화 영향평가를 위한 CMIP5 GCMs의 기후 전망자료 경향성 분석

## Trend Analysis of Projected Climate Data based on CMIP5 GCMs for Climate Change Impact Assessment on Agricultural Water Resources

유승환\* · 김태곤\*\* · 이상현\*\*\*,† · 최진용\*\*\*\*

Yoo, Seung-Hwan · Kim, Taegon · Lee, Sang-Hyun · Choi, Jin-Yong

### Abstract

The majority of projections of future climate come from Global Circulation Models (GCMs), which vary in the way they were modeled the climate system, and so it produces different projections about conceptualizing of the weather system. To implement climate change impact assessment, it is necessary to analyze trends of various GCMs and select appropriate GCM. In this study, climate data in 25 GCMs 41 outputs provided by Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) was downscaled at eight stations. From preliminary analysis of variations in projected temperature, precipitation and evapotranspiration, five GCM outputs were identified as candidates for the climate change impact analysis as they cover wide ranges of the variations. Also, GCM outputs are compared with trends of HadGCM3-RA, which are established by the Korean Meteorological Administration. From the results, it can contribute to select appropriate GCMs and to obtain reasonable results for the assessment of climate change.

**Keywords:** GCM; RCM; CMIP5; RCP; Climate change trend

### 1. 서론

전 세계적으로 기후변화의 관심이 높아지면서 기후변화가 다양한 분야에 미칠 수 있는 영향을 평가하는 연구가 수행되어 오고 있으며, 미래 수자원 및 농업 분야와 관련된 연구에서 기후변화 자료의 선택은 가장 핵심적인 요소로 작용한다 (Vörösmarty et al., 2000; Alcamo et al., 2007; Fung et al., 2011). 기후변화에 관한 정부 간 기후변화협약체 (Intergovernmental Panel of Climate Change, IPCC)는 2013년 제5차 평가 보고서 (Fifth Assessment Report, AR5)를 채택하고, 대표 농도경로인 RCP (Representative Concentration Pathway)를 기반으로 미래 기후변화 자료의 구축을 제시하고 있다 (IPCC, 2013a; IPCC, 2013b; van Vuuren et al., 2011).

그러나 일반적으로 기후모델은 몇 개의 지배방정식과 모수화를 통해 실제 기후시스템을 단순화시킨 프로그램으로, 생산된 기후변화 자료는 필연적으로 불확실성을 내포하게 된다 (NIMR, 2009). 이에 따라 CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5)에서는 다양한 GCMs (general circulation models)기반의 미래 기후변화 시나리오를 개발, 제공하고 있다 (Taylor et al., 2011). 그러나 GCM의 선택에 따라 수자원 관련 미래 모의 결과들이 다양하게 나타날 수 있다. 이에 따라 국외에서는 다양한 GCMs을 연계하고, 기후변화의 불확실성 등을 평가하는 연구가 수행되어 오고 있다. Dubrovský et al. (2014)는 16개의 GCM의 앙상블을 활용하여 지중해 지역의 미래 기온, 강수 및 가뭄의 변동성을 평가하였고, McMahon et al. (2015)은 23개의 GCM의 미래 기온, 강수를 통한 수문 모의 결과와 과거 실측치와 비교를 통하여 GCM별 미래 모의 능력을 평가한 바 있다.

국내의 경우 기상청에서 HadGEM3-RA 지역기후모형 (Regional Climate Model, RCM)를 활용한 한반도 고해상도 기후변화 자료 및 미래 기후변화 전망을 제시하고 있고, 다양한 연구에서 기상청의 미래 기후변화 자료를 활용하고 있다 (Park et al., 2014). No et al. (2013)은 HadGEM2를 적용하여 금강유역의 용수공급의 변화를 분석하였고, Oh and Suh (2013) 역시 HadGEM2을 활용하여 남한 전역의 상세 기후변화를 분석하였다. SRES (Special Report on Emissions Sce-

\* Department of Rural and Bio-Systems Engineering, Chonnam National University

\*\* Institute on the Environment, University of Minnesota

\*\*\* Department of Biological and Agricultural Engineering, Texas A&M University

\*\*\*\* Department of Rural Systems Engineering, and Research Institute for Agriculture & Life Sciences, Seoul National University

† Corresponding author

Tel.: +1-737-346-4704, Fax: +1-979-862-3442

E-mail: sanghyun@tamu.edu

Received: May 6, 2015

Revised: May 22, 2015

Accepted: May 27, 2015

narios) 시나리오를 바탕으로 논벼의 10년 빈도 증발산량, 논용수 수요량 및 단위용수량에 대한 연구가 진행되어 있다 (Hong et al., 2009; Yoo et al., 2012a; 2012b). 그 외에 Park et al. (2013)은 CanESM2을 활용하여 농업용저수지의 내한 능력을 평가한 바 있고, Yoo et al. (2013)는 기상청에서 제공하는 고해상도 기후자료와 미래 토지이용변화 예측하여 전국 8개 농업용저수지의 연최대필요저수용량을 분석한 바 있다. Chung (2012)은 서해안 평야지대 6개 지역에 대해 논벼의 소비수량을 추정하였고, RCP 4.5보다 RCP 8.5 시나리오에서 그 증가가 클 것으로 예측하였다. 또한 Nam et al. (2015)은 9개 기후모델을 이용하여 농업기상지표에 대한 기후모델별, 시나리오별, 기간별 변화를 산정하였다.

그러나 대부분의 국내 연구가 단일 또는 소수의 GCMs를 활용하여 기후변화를 평가하고 있다. 이에 따라 동일지역, 시기일지라도 GCM의 종류에 따라 다양한 미래 모의 결과가 발생할 수 있으며 해당 GCM의 강수량 및 기온 등의 증감 경향에 의존되는 결과가 도출될 수 있다. 즉, 단일 GCM 결과를 이용하는 것은 모형의 편이(bias)가 지배적으로 결과에 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 먼저 다양한 GCM들의 기상자료의 경향성을 사전에 분석하고, 이를 바탕으로 GCM을 선정한다면 보다 합리적인 기후변화 관련 연구 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 다양한 기후변화 관련 연구를 수행함에 있어서 기본이 되는 GCM 산출물들과 기상청에서 제공하는 한반도 기후변화 시나리오의 경향성을 분석, 비교하고자 한다. 이를 위해서 CMIP5에서 제공하는 RCP 4.5 및 8.5 시나리오의 25개 GCMs의 41개 산출물을 바탕으로 전국 8개 지역의 미래 기후자료를 생성하고, GCM 산출물들간의 경향성을 분석, 비교하였다. 또한 국내연구에서 주로 활용하고 있는 기상청의 한반도 기후변화 시나리오와 GCM 산출물들의 기후변화 상대적인 경향성을 비교하였다.

## II. 연구방법

### 1. 대상 지역 선정

본 연구에서는 GCM 산출물들에 따른 경향성을 분석하기 위하여 도를 대표할 수 있는 한 지역씩을 선택하여 춘천, 수원, 청주, 대전, 대구, 전주, 광주, 진주 등 총 8개 지역을 선정하였다. 연구대상지역을 춘천, 수원, 청주, 대전은 중부 지역으로, 대구, 전주, 광주 및 진주 지역은 남부 지역으로 구분하였다. 본 연구의 대상 지역의 평년 기온, 강수량 및 기준작물증발산량 결과는 Table 1과 같다.

### 2. General Circulation Model (GCM) 수집 및 상세화 과정

본 연구에서는 CMIP5에서 제공하는 과거기간 (historical, 2006-2010), RCP 4.5 및 8.5 시나리오 (2011-2100)에 대한 25개 GCMs의 41개 산출물 (이하 41 GCMs)을 수집하였다. Table 2에 본 연구에서 수집한 GCM의 모델 이름, 구현번호 (realization number)<sup>1)</sup>, 기관명, 해상도 및 GCM 산출물 식별번호 (ID)를 제시하였다. GCMs별 기상 패턴을 분석하기 위한 기상변수는 강수, 기온, 습도, 풍속 및 일사량 관련 인자로 하였는데, 자세한 항목은 다음과 같다 ([http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/data\\_description.html](http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/data_description.html)).

- 강수 인자: pr (precipitation at the 2 meter height)
- 기온 인자: tas (near-surface air temperature at the 2 meter height), tasmax (maximum near-surface air temperature), tasmin (minimum near-surface air temperature)
- 습도 인자: rhs (near-surface relative humidity)
- 풍속 인자: uas (eastward near-surface wind), vas (northward near-surface wind), sfcWind (near-surface wind)

Table 1 Climatic characteristics by study stations during 1976–2005

Code	Station	annual mean temperature (°C)	annual total precipitation (mm/yr)	annual total ETo (mm/yr)	annual rainy days (days/yr)
101	Chuncheon	11,0	1,290,0	793,0	104
119	Suwon	11,8	1,268,8	808,7	107
131	Cheongju	12,2	1,253,0	858,9	114
133	Daejeon	12,6	1,372,3	851,7	116
143	Daegu	13,9	1,058,6	1012,6	95
146	Jeonju	13,2	1,302,7	838,3	122
156	Gwangju	13,6	1,373,2	889,9	124
192	Jinju	13,1	1,490,1	855,3	99

Table 2 GCM modeling groups participating in CMIP5

Model name	Realization number*	ID number	Institute ID	Resolution	Country
BCC-CSM1.1 <sup>1)</sup>	1	1	BCC	64×128	China
BCC-CSM1.1-m <sup>1)</sup>	1	2		160×320	
BNU-ESM <sup>1)</sup>	1	3	GCESS	64×128	China
CanESM2 <sup>1)</sup>	1,2,3,4,5	4-8	CCCMA	64×128	Canada
CMCC-CM <sup>2)</sup>	1	9	CMCC	240×480	Italy
CMCC-CMS <sup>2)</sup>	1	10		96×192	Italy
CNRM-CM5 <sup>2)</sup>	1	11	CNRM-CERFACS	128×256	France
CSIRO-Mk3.6.0 <sup>1)</sup>	1	12	CSIRO-QCCCE	96×192	Australia
FGOALS-g2 <sup>1)</sup>	1	13	LASG-IAP	108×128	China
FGOALS-s2 <sup>1)</sup>	1,2,3	14-16	LASG-CESS		
GFDL-ESM2G <sup>1)</sup>	1	17	NOAA GFDL	90×144	USA
GFDL-ESM2M <sup>1)</sup>	1	18			
HadGEM2-CC <sup>3)</sup>	1	19	MOHC	145×192	UK
HadGEM2-ES <sup>3)</sup>	1,2,3,4	20-23			
INM-CM4 <sup>1)</sup>	1	24	INM	120×180	Russia
IPSL-CM5A-LR <sup>1)</sup>	1,2,3,4	25-28	IPSL	96×96	France
IPSL-CM5A-MR <sup>1)</sup>	1	29		143×144	
IPSL-CM5B-LR <sup>1)</sup>	1	30		96×96	
MIROC5 <sup>1)</sup>	1,2,3	31-33	MIROC	128×256	Japan
MIROC-ESM <sup>2)</sup>	1	34		64×128	
MIROC-ESM-CHEM <sup>2)</sup>	1	35			
MPI-ESM-LR <sup>2)</sup>	1,2,3	36-38	MPI-M	96×192	Germany
MPI-ESM-MR <sup>2)</sup>	1	39			
MRI-CGCM3 <sup>2)</sup>	1	40	MRI	160×320	Japan
NorESM1-M <sup>1)</sup>	1	41	NCC	96×144	Norway

- Source: <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/availability.html>

1) calendar: 365 days (without a leap day)

2) calendar: Standard (with a leap day)

3) calendar: 360 days (every month is 30 days)

\* "realization" number is used to distinguish among members of an ensemble typically generated by initializing a set of runs with different, but equally realistic, initial conditions.

speed at the 10 meter height)

- 일사량 인자: rsds (surface downwelling shortwave radiation), rsus (surface upwelling shortwave radiation)

본 연구에서는 Ho et al. (2012)이 제안한 편차 보정 기법을

1) 기후모델은 기본적으로 추계학적 모델로써 동일한 초기조건 하에서도 모의 종류별로 서로 다른 결과를 산출할 수 있다. 이에 따라 CMIP5에서는 동일한 초기조건에 대한 모의 결과를 구분하기 위해 'r1', 'r2', 'r3' 등과 같은 앙상블 번호를 제공한다. 앙상블 번호에 대한 구체적인 설명은 [http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/docs/cmip5\\_data\\_reference\\_syntax.pdf](http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/docs/cmip5_data_reference_syntax.pdf)에 수록되어 있다.

이용한 상세화 과정을 통하여 일별 최고, 최저, 평균 기온 및 강수량, 상대습도, 풍속, 일사량 등의 미래 기후변화 자료를 생성하였다. 편차보정은 현재 기후의 공간패턴이 미래에는 변화가 없다고 가정하고, 각 GCM에서 제공하는 기상변수별 historical (1976-2005년) 자료와 동기간에 관측된 자료와의 통계치 (평균, 표준편차 등)의 차이를 이용하여 미래 기후변화자료를 생성하는 방법이다. 본 연구에서는 미래 90년 기간을 2011-2040년 (2025s), 2041-2070년 (2055s), 2071-2100년 (2085s)으로 구분하였고, 현재를 나타내는 1990s (기준기간)는 1976-2005년을 기준으로 하였다.

### 3. 기준작물증발산량 산정

GCM 산출물별 경향성을 분석하기 위하여 국제식량농업 기구에서 1998년에 추천한 FAO Penman-Monteith 공식을 이용하여 기준작물증발산량을 산정하였다(Allen et al., 1998). 이 방법은 1965년에 제안된 Penman 공식을 보완한 방법으로 공기동역학 조건에 작물형(crop type)에 따른 기공저항(stomatal resistance)을 포함하여 수정한 방법이다. 기공 저항은 엽온과 밀접한 관련이 있는 것으로 공기동역학항에 온도에 의한 식이 추가되어 있다. 이 공식은 다음과 같다(Allen et al., 1998).

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

여기서,  $ET_0$ 는 기준작물증발산량 (mm/day),  $\Delta$ 는 증기압 곡선의 기울기 (kPa/°C),  $R_n$ 은 순일사량 (MJ/m<sup>2</sup>/day),  $G$ 는 토양 열 유속 밀도 (MJ/m<sup>2</sup>/day),  $\gamma$ 는 건습계수 (kPa/°C),  $T$ 는 2 m 높이에서 일평균기온 (°C),  $u_2$ 는 2 m 높이에서 풍속 (m/s),  $e_s$ 는 포화증기압(kPa),  $e_a$ 는 실제증기압 (kPa)이다.

일부 GCM 산출물 중에서 평균상대습도, 일사량 또는 풍속 관련 인자를 제공하지 않는 경우에는 FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56 (Allen et al., 1998)에서 제안한 방법을 이용하여 기준작물증발산량 산정하였다. 식 (2)를 이용하여 실제증기압 및 평균상대습도를 추정하였고, 식 (3)을 이용

하여 일사량과 일조시간을 추정하였다. 풍속 자료가 없는 경우에는 기준기간(1990s)의 월별 평년 풍속으로 대체하였다.

$$e_a = e^o(T_{dew}) = 0.611 \exp \left[ \frac{17.27(T_{min} - K_o)}{(T_{min} - K_o) + 237.3} \right] \quad (2)$$

여기서  $e_a$ 는 실제증기압 (kPa),  $T_{dew}$ 는 이슬점 온도 (°C),  $T_{min}$ 은 최저기온 (°C)이다.

$$R_s = k_{Rs} \sqrt{(T_{max} - T_{min})} \times R_a \quad (3)$$

여기서,  $R_a$ 는 외기복사 (MJ/m<sup>2</sup>/day),  $T_{max}$ 는 최고기온 (°C),  $T_{min}$ 은 최저기온 (°C),  $k_{Rs}$ 는 조정계수(°C<sup>-0.5</sup>)이다.

### III. GCM별 미래 기후변화 경향 분석

#### 1. GCM 산출물의 연평균기온 증가 경향

미래 기후변화에 따른 기온의 변화는 GCM의 종류에 따라 다르게 나타나며 단일 GCM을 사용하기 위해서는 먼저 다양한 GCM 산출물들의 기온 변화의 범위를 살펴볼 필요가 있다. 본 연구에서는 41 GCMs 자료를 적용하여 과거 대비 미래 시기의 연평균기온의 증가량의 지역별, 41 GCMs별 분포를 Fig. 1과 같이 나타내었다. GCMs별 과거 대비 미래 연평균기온

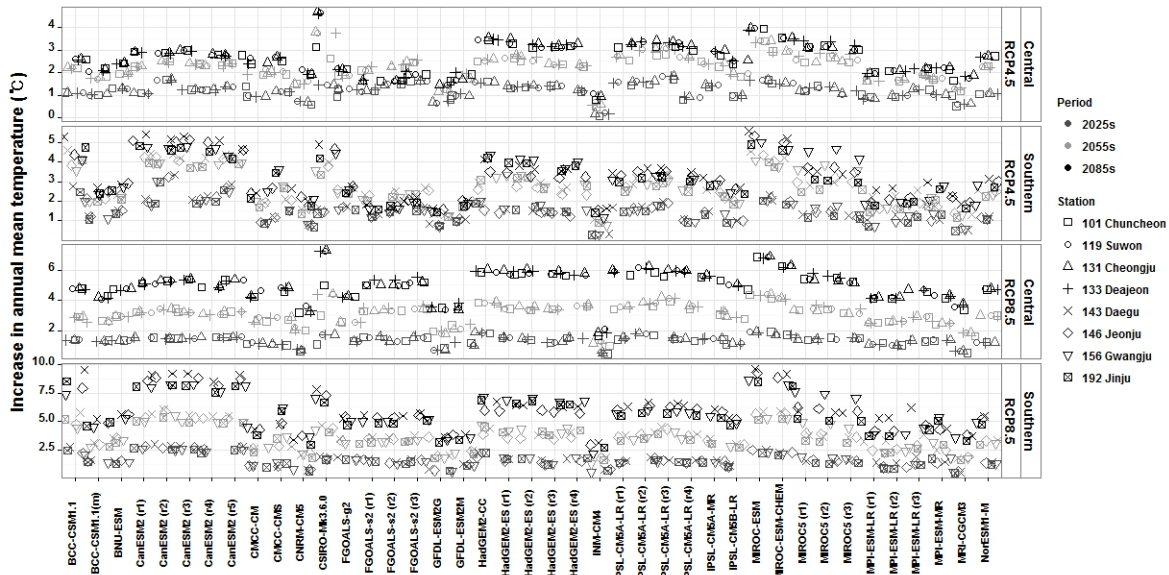


Fig. 1 Trends in annual mean temperature increase of 25 GCMs 41 model outputs under RCP 4.5 and 8.5 scenarios at 8 meteorological stations

**Table 3** Statistics on annual mean temperature of 25 GCMs 41 model outputs under RCP 4.5 and 8.5 scenarios at 8 meteorological stations.

Scenarios / Periods			Central region				Southern region			
			101	119	131	133	143	146	156	192
RCP 4.5	2025s	Max.	12.7	13.6	14.1	14.4	17.3	16.4	16.6	16.1
		Avg.	12.2	13.0	13.5	13.8	15.5	14.6	15.1	14.5
		Min.	11.1	12.0	12.4	12.8	14.2	13.5	13.9	13.4
	2055s	Max.	14.4	15.6	16.0	16.4	18.5	17.6	17.7	17.3
		Avg.	13.2	14.1	14.5	14.9	16.7	15.9	16.3	15.7
		Min.	11.5	12.5	12.8	13.2	15.0	14.2	14.4	14.1
	2085s	Max.	15.0	16.5	16.9	17.2	19.5	18.5	18.6	18.0
		Avg.	13.6	14.5	14.9	15.3	17.3	16.4	16.8	16.2
		Min.	11.8	12.9	13.2	13.5	15.5	14.7	14.8	14.6
RCP 8.5	2025s	Max.	12.9	13.7	14.2	14.5	16.9	16.0	16.3	15.8
		Avg.	12.3	13.1	13.6	14.0	15.6	14.8	15.2	14.7
		Min.	11.5	12.4	12.7	13.1	14.5	13.9	14.2	13.7
	2055s	Max.	15.4	16.2	16.7	17.0	20.0	19.1	19.2	18.5
		Avg.	14.1	14.9	15.4	15.7	17.8	16.8	17.3	16.6
		Min.	12.0	13.0	13.4	13.7	15.7	15.0	15.0	14.8
	2085s	Max.	17.9	19.1	19.6	19.8	23.5	22.4	22.3	21.7
		Avg.	15.9	16.8	17.3	17.7	20.1	19.1	19.5	18.7
		Min.	12.7	13.9	14.1	14.5	17.1	16.2	15.8	15.9

의 증가량을 살펴보면 RCP 4.5 시나리오의 경우 중부지역의 연평균기온의 GCMs간의 차이는 최대 4.4 °C의 차이를 보이고 있고, 남부지역의 경우 GCMs간의 연평균기온의 최대 차이값은 4.2 °C로 나타났다. 또한 동일 GCM에 대한 지역 간의 차이를 살펴보면 중부지역의 경우 GCM 중에서도 CSIRO-Mk3.6.0 (r1)의 지역 간 연평균기온의 증가량이 가장 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있고, 남부지역의 경우 MIROC5 (r2)의 지역 간 차이가 가장 큰 것으로 나타났다. RCP 8.5 시나리오의 경우 GCMs간의 연평균기온의 최대차이는 중부지역에서 5.0 °C, 남부지역에서 5.1 °C인 것으로 나타났고, CSIRO-Mk3.6.0 (r1)과 MIROC5 (r1), (r2) 등의 산출물은 연평균기온의 지역별 차이가 가장 큰 것으로 나타났다. 이처럼 GCMs에 따라 지역별 연평균기온의 차이가 다양하게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 동일한 지역과 시기일지라도 GCMs의 종류에 따라 연평균기온의 증가량이 다양하게 나타날 수 있음을 확인할 수 있다.

다음으로 41 GCMs의 시기별 연평균기온 시기별 최대, 평균, 최소값을 Table 3에 나타내었다. 먼저 RCP 4.5 시나리오를 적용할 경우, 중부지역의 41 GCMs의 2025s 시기의 연평균기온들은 11.1 °C-14.4 °C 사이에 분포하는 것으로 나타났고, 남부지역의 경우 13.5-16.1 °C에서 분포하는 것으로 나타

났다. 시기가 지날수록 기온 상승은 커지는 것으로 나타났는데 2085s에는 중부지역에서는 11.8-17.2 °C, 남부지역에서는 14.6-19.5 °C에서 연평균기온이 분포하는 것으로 나타났다. RCP 8.5 시나리오의 경우 2025s의 연평균기온은 중부지역에서는 11.5-14.5 °C, 남부지역에서는 13.7-16.0 °C의 범위에서 분포하는 것으로 나타났고, 2085s에는 중부지역에서는 12.7-19.8 °C, 남부지역에서는 15.8-23.5 °C에서 분포하는 것으로 나타났다. GCMs별 연평균기온의 최저값보다는 최대값의 시기별 변화가 더 큰 것을 확인할 수 있다. 그러므로 단일 GCM을 선정하여 기후변화 연구를 수행할 경우 연평균기온의 최대값의 GCM별 차이를 신중하게 고려할 필요가 있음을 보여준다.

## 2. GCM 산출물의 연강수량 증가 경향 분석

미래 기후변화에 따른 연강수량 역시 GCMs 종류에 따라 다양하게 나타나는 것을 알 수 있다(Fig. 2). 먼저 RCP 4.5 시나리오의 경우 동일 지역의 GCMs간의 차이에 따른 연강수량의 증가량을 살펴보면 중부지역에서는 수원 지역에서 GCMs 간에 가장 큰 연강수량의 차이를 나타냈었다. MIROC5 r(2)에 의하면 수원 지역의 연강수량은 1623.9 mm로 나타났으나 FGOALS-s2 (r3)에 따르면 연강수량은 1265.2 mm으로 나타

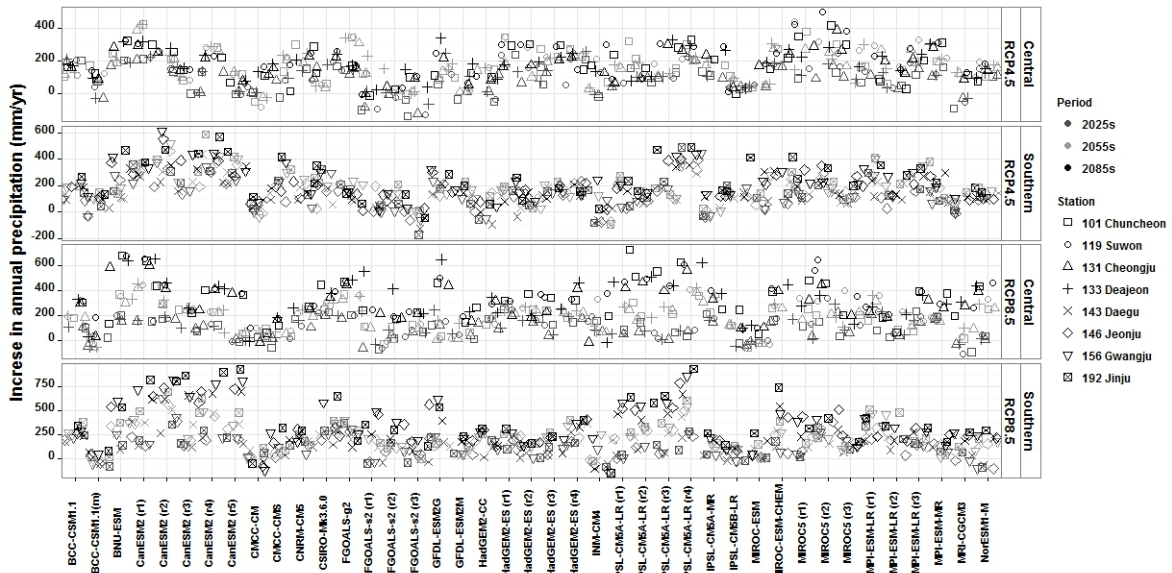


Fig. 2 Trends in annual precipitation increase of 25 GCMs 41 model outputs under RCP 4.5 and 8.5 scenarios at 8 meteorological stations

났다. 그 외의 중부지역에서는 CanESM2 (r1)이 가장 큰 연강수량을 모의하는 것으로 나타났고, FGOALS-s2 (r3)가 가장 적은 연강수량을 모의하는 것으로 나타났다. 중부지역에서는 동일한 지역일지라도 GCMs에 따라 약 300 mm 이상의 연강수량의 차이가 나타나는 것을 알 수 있다. 남부지역의 경우 모든 지역에서 CanESM2 (r2)와 (r4)를 적용하였을 때 가장 많은 연강수량이 모의되는 것으로 나타났고, 전주 지역을 제외한 지역에서의 최소 연강수량은 FGOALS-s2 (r3)에 의해 모의되는 것으로 나타났다. 남부지역에서는 GCM의 차이에 따라 동일지역에서 최대 558.9 mm까지 연강수량이 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 동일한 GCM에 대한 지역 간의 연강수량 차이를 살펴보면 CMCC-CMS (r1)의 경우 중부와 남부 지역 간에 연강수량의 차이가 약 619.6 mm로 최대값을 보이고 있고, HadGEM2-ES (r2)의 경우 중부와 남부 지역 간의 연강수량의 차이는 389.1 mm로 CMCC-CMS (r1)과는 대조적인 차이를 보이고 있다.

RCP 8.5 시나리오를 적용할 경우 동일 지역의 GCMs간의 차이에 따른 연강수량의 증가량을 살펴보면 중부지역에서는 동일지역의 GCMs에 따른 연강수량의 최대 차이는 대전 지역에서 447.3 mm로 나타났고, 최대 연강수량은 CanESM2 (r1)에서 1794.8 mm, 최소 연강수량은 BCC-CSM1.1(m) (r1)에서 1347.5 mm로 나타났다. 청주 지역은 대전 지역과 동일한 GCM에서 최대, 최소 연강수량이 모의되는 것으로 나타났다. 반면에 춘천 지역에서는 GCMs별 최대 연강수량이 BNU-ESM (r1)에서 1705.5 mm로 모의되었고, 최소 강수량은 MIROC-ESM (r1)에서 1283.6 mm로 모의되었다. 남부지

역에서는 GCMs간에 가장 큰 연강수량의 차이는 진주 지역에서 711.9 mm로 나타났고, 최대 연강수량은 CanESM2 (r2)에서 2113.4 mm, 최소 연강수량은 INM-CM4 (r1)에서 1401.5mm로 나타났다. 이처럼 RCP시나리오에 따라서도 최대, 최소 연강수량이 모의되는 GCMs의 종류가 다양하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 동일한 GCM에 대한 지역 간의 최대 연강수량 차이를 살펴보면 CSIRO-Mk3.6.0 (r1)에서 지역 간 연강수량의 차이가 647.3 mm로 나타났고, 최소 연강수량의 지역 간 차이는 MPI-ESM-MR (r1)에서 351.4 mm로 나타났다.

다음으로 GCMs의 연강수량을 시기별로 산정하고, 그중에서 최대, 평균, 최소값을 Table 4에 나타내었다. 먼저 RCP 4.5 시나리오를 적용할 경우, 중부지역의 41 GCMs의 2025s 시기의 연강수량은 1128.4-1628.8 mm에서 분포하는 것으로 나타났고, 남부지역의 경우 932.1-1979.1 mm에서 분포하는 것으로 나타났다. 2055s 시기에는 중부지역의 GCMs별 연강수량은 최소 1184.8 mm에서 최대 1793.9 mm 사이에 분포하며, 남부지역에서는 최소 991.2 mm와 최대 2079.8 mm 사이에 분포하는 것으로 나타났다. 전반적으로 남부지역의 GCMs별 최대, 최소 연강수량의 차이가 중부지역보다 크게 나타나는 것을 알 수 있다. RCP 8.5 시나리오의 경우 최대, 최소 연강수량이 모두 RCP 4.5 시나리오보다 증가하는 것으로 나타났고, 2085s 시기에 중부지역의 GCMs별 연강수량은 1238.5-2023.3 mm, 남부지역의 경우 919.4-2430.5 mm에서 분포하는 것으로 나타났다.

이처럼 시기 및 지역별 GCMs의 연강수량의 차이가 발생

**Table 4** Statistics on annual precipitation of 25 GCMs 41 model outputs under RCP 4.5 and 8.5 scenarios at 8 meteorological stations

Scenarios / Periods			Central region				Southern region			
			101	119	131	133	143	146	156	192
RCP 4.5	2025s	max.	1527.3	1513.4	1485.2	1628.4	1411.6	1701.5	1820.7	1979.1
		avg.	1368.9	1369.1	1333.6	1473.6	1155.6	1413.8	1505.9	1633.3
		min.	1150.1	1136.1	1128.4	1307.0	932.1	1227.4	1312.0	1316.3
	2055s	max.	1713.6	1713.9	1639.9	1793.9	1497.1	1765.4	1890.1	2079.8
		avg.	1466.9	1458.0	1409.0	1547.0	1207.8	1475.2	1563.2	1695.4
		min.	1237.5	1184.8	1227.6	1344.7	991.2	1230.8	1335.7	1397.7
	2085s	max.	1708.4	1769.6	1643.9	1711.6	1486.2	1855.1	1987.7	2061.4
		avg.	1470.7	1479.1	1426.9	1562.0	1244.6	1512.2	1605.7	1749.6
		min.	1276.5	1263.6	1248.7	1393.8	1016.8	1313.2	1386.8	1445.1
RCP 8.5	2025s	max.	1538.3	1608.8	1478.1	1661.0	1336.5	1690.8	1808.6	1863.2
		avg.	1388.0	1377.8	1336.5	1470.9	1150.1	1410.2	1497.6	1620.5
		min.	1198.6	1161.8	1193.6	1323.3	987.1	1197.5	1272.7	1395.4
	2055s	max.	1725.3	1712.8	1672.7	1828.0	1573.2	1870.3	2006.0	2189.5
		avg.	1470.9	1483.5	1431.9	1580.9	1250.8	1513.2	1613.1	1760.3
		min.	1236.9	1238.7	1202.2	1317.7	1038.5	1270.7	1340.9	1462.4
	2085s	max.	2013.2	1947.1	1849.7	2023.3	1761.5	2094.1	2239.7	2430.5
		avg.	1625.5	1623.8	1547.0	1707.7	1341.6	1640.6	1747.5	1892.9
		min.	1342.9	1364.4	1238.5	1357.4	949.4	1166.3	1252.8	1339.0

하는 것을 확인할 수 있다. 강수량은 미래 기후변화에 따른 가뭄 등 농업수자원 관련 연구에서 중요한 자료로 활용되기 때문에 GCM을 선택할 때 각 산출물의 연강수량의 특징을 사전에 살펴볼 필요가 있다.

### 3. GCM들의 강우량 및 강우일수 변화 분석

기후변화는 강수량의 변화뿐만 아니라 강우일수의 변화를 동반한다. 강수량이 증가하면서 강우일수가 감소하는 경우 집중호우가 증가함을 의미하게 되며 이는 미래 농업수자원 관리에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 이에 따라 미래의 강우강도는 수자원관리의 중요한 요소로 볼 수 있다. 그러나 기후변화에 따른 강우일수와 강우량의 증가율을 GCM의 선택에 따라 차별적인 결과를 나타낼 수 있음을 Fig. 3을 통하여 알 수 있다.

강우일수의 경우 일부지역에서는 GCM에 따라 강우일수의 증가율이 최대 20% 이상 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 강우량의 경우 강우일수보다 산출물간의 더 큰 차이를 보여준다. 일부 지역에서는 강우량의 증가율이 GCM의 선택에 따라 약 40% 이상 차이가 발생할 수 있다. 이러한 GCMs별 강우일수, 강우량의 증가율의 차이로 인하여 강우강도 역시 큰 차이가 발생할 수 있다. 대부분 GCMs의 강수량 증가율이

강우일수의 증가율보다 높게 나타났지만, 일부 GCM에서는 강우일수의 증가율이 더 높게 나타났다. 지역별로 GCM에 따른 강우강도의 변화는 경향성이 없이 무작위로 분포하는 것을 확인할 수 있다. 예를 들어 대부분의 지역에서 약 50%의 산출물이 강우일수가 감소하고, 강우량이 증가하는 것으로 나타났는데 이는 강우강도의 변화가 산출물에 따라 전혀 다르게 나타날 수 있음을 보여준다.

### IV. 기상청 RCM과 GCM 산출물의 기후변화 경향 비교

우리나라 기상청은 전 지구 대기-해양 결합모델인 Had GEM2-AO에 RCP 시나리오를 입력자료로 도입하여 약 135 km 해상도의 전지구 기후변화자료를 생산하였으며, 이 자료에 기초한 지역기후모델인 HadGEM3-RA (이하 KMA-RCM)를 이용하여 지역기후변화 시나리오를 산출하였다 (NIMR, 2011). KMA-RCM은 단일 GCM을 활용한 자료이기 때문에, 이를 적용하기 전에 다른 GCM 산출물과의 차이를 검토하여 본다면, 기후변화 영향평가 해석 시 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

먼저 KMA-RCM의 과거 대비 미래시기 (2011-2100년)의

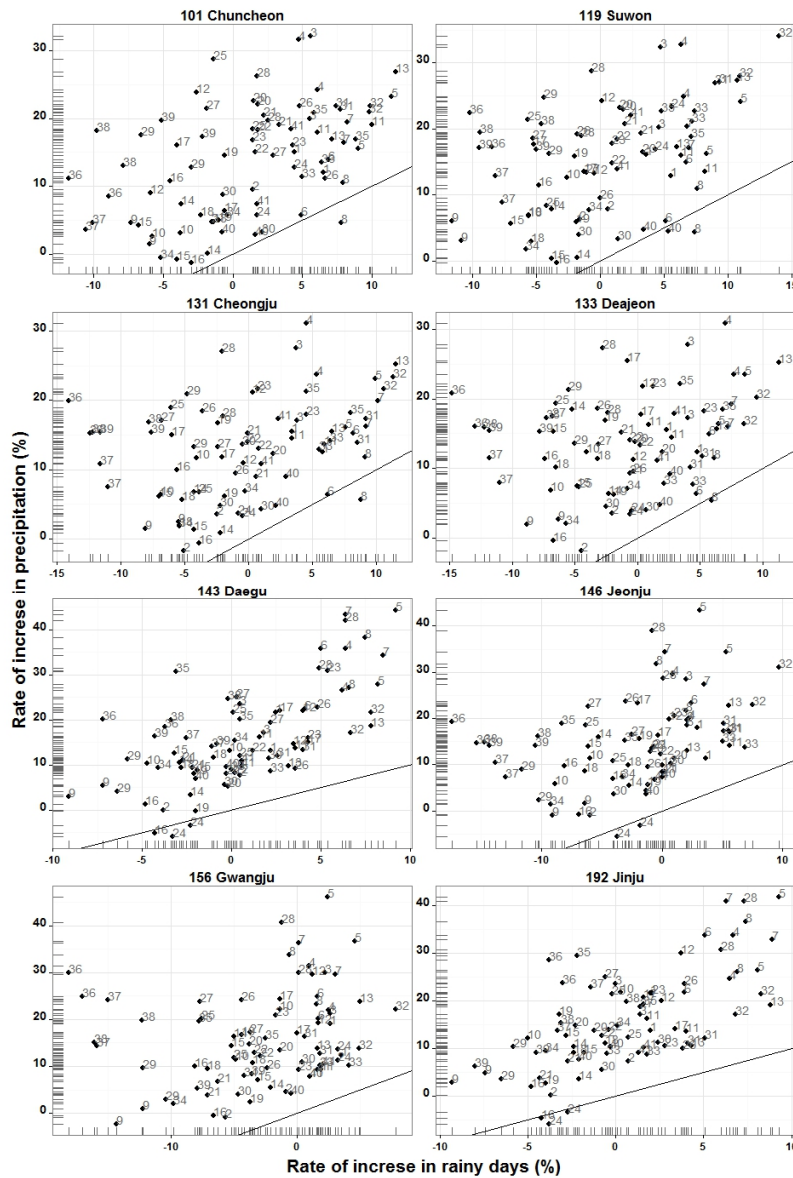


Fig. 3 Trends in annual precipitation and rainy days increase rates of 25 GCMs 41 model outputs under RCP 4,5 and 8,5 scenarios at 8 meteorological stations

연평균기온의 증가량과 연강수량의 증가율을 분석하였는데, 그 결과는 Fig. 4와 같다. KMA-RCM의 연평균기온 증가량을 살펴보면 RCP 4.5 시나리오의 경우, 중부 지역은 4.3 °C (춘천)-4.5 °C (청주), 남부 지역은 3.5 °C (진주)-5.2 °C (대구)가 증가하고, RCP 8.5 시나리오의 경우, 중부 지역은 6.0 °C (수원)-6.5 °C (청주), 남부 지역은 5.0 °C (진주)-7.1 °C (대구)씩 증가하는 것으로 나타났다. 연강수량의 증기비율을 살펴보면, RCP 4.5 시나리오의 경우에 중부 지역은 26.8 % (춘천)-30.7 % (대전), 남부 지역은 22.7 % (진주)-32.4 % (대구)씩 증가하고, RCP 8.5 시나리오에서는 중부 지역은 26.0 %

(춘천)-35.9 % (청주), 남부 지역은 20.1 % (진주)-35.7 % (대구)씩 증가하는 것으로 나타났다.

KMA-RCM의 기후전망결과를 농업수자원 분야에서 중요한 요소로 적용되는 2011년부터 2100년까지의 연강수량과 기준작물증발산량을 대상으로 하여 KMA-RCM과 41 GCMs와의 차이를 비교하였다. 먼저 RCP 4.5 시나리오를 적용했을 경우 중부지역의 KMA-RCM과 GCMs의 차이는 Fig. 5에 나타내었다. KMA-RCM IC200 (제어적분 200년)의 기준작물증발산량은 GCMs의 중간 부분에 위치하였지만 연강수량은 다른 GCMs 보다 상당히 많은 쪽에 위치하는 것을 확



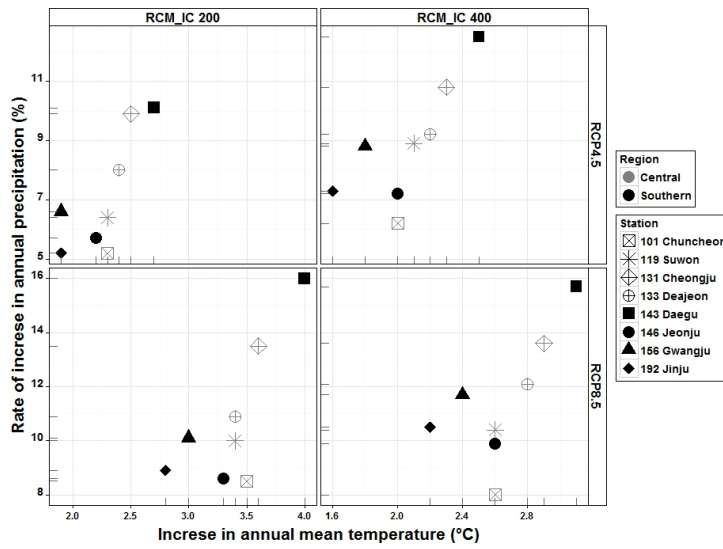
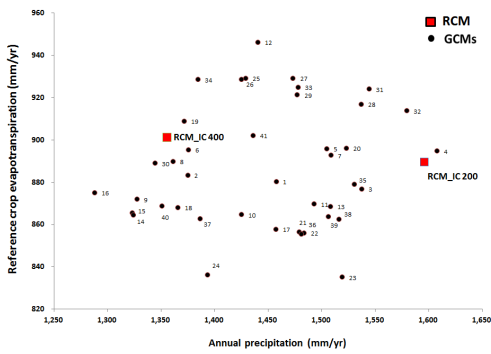
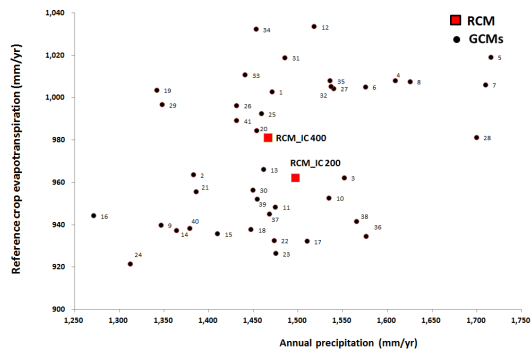


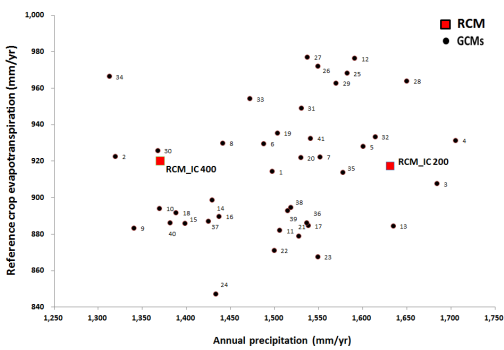
Fig. 4 Trends in annual mean temperature increases and precipitation increase rates of KMA-RCM (12.5 km) under RCP 4.5 and 8.5 scenarios



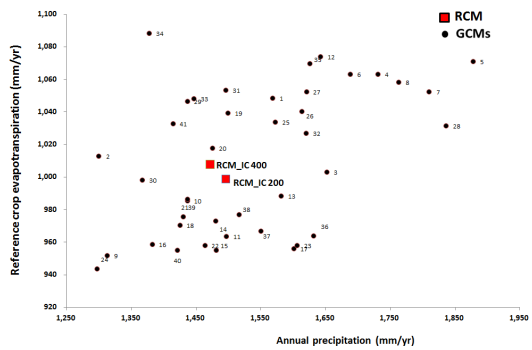
(a) Central region (RCP 4.5)



(b) Southern region (RCP 4.5)



(c) Central region (RCP 8.5)



(d) Southern region (RCP 8.5)

Fig. 5 Trends in annual precipitation and reference crop evapotranspiration (ETo) of 25 GCMs 41 model outputs and KMA-RCM under RCP 4.5 and 8.5 scenarios.

No.	GCMs
1	BCC-CSM1.1
2	BCC-CSM1.1(m)
3	BNU-ESM
4	CanESM2 (r1)
5	CanESM2 (r2)
6	CanESM2 (r3)
7	CanESM2 (r4)
8	CanESM2 (r5)
9	CMCC-CM
10	CMCC-CMS
11	CNRM-CM5
12	CSIRO-Mk3.6.0
13	FGOALS-g2
14	FGOALS-s2 (r1)
15	FGOALS-s2 (r2)
16	FGOALS-s2 (r3)
17	GFDL-ESM2G
18	GFDL-ESM2M
19	HadGEM2-CC
20	HadGEM2-ES (r1)
21	HadGEM2-ES (r2)
22	HadGEM2-ES (r3)
23	HadGEM2-ES (r4)
24	INM-CM4
25	IPSL-CM5A-LR (r1)
26	IPSL-CM5A-LR (r2)
27	IPSL-CM5A-LR (r3)
28	IPSL-CM5A-LR (r4)
29	IPSL-CM5A-MR
30	IPSL-CM5B-LR
31	MIROC5 (r1)
32	MIROC5 (r2)
33	MIROC5 (r3)
34	MIROC-ESM
35	MIROC-ESM-CHEM
36	MPI-ESM-LR (r1)
37	MPI-ESM-LR (r2)
38	MPI-ESM-LR (r3)
39	MPI-ESM-MR
40	MRI-CGCM3
41	NorESM1-M

인할 수 있다. 그러나 KMA-RCM IC400 (제어적분 400년)의 경우 연강수량은 오히려 다른 GCMs과 비교하여 상단이 적은 양이 모의 되는 것으로 나타났다. 그러나 남부지역의 경우

KMA-RCM IC200과 IC400 모두 GCMs의 모의 결과 중앙에 위치하는 것을 볼 수 있다(Fig. 5). 요약하면 중부지역의 경우 KMA-RCM은 제어적분에 따라 상당한 연강수량의 차이를

**Table 5** Classification of GCM outputs by precipitation and evapotranspiration

Region	Scenario	Prec		L	M	H
		ETo				
Central region	RCP4,5	H		HadGEM2-CC MIROC-ESM	-	MIROC5 (r1)
		M		-	BCC-CSM1,1	-
		L		FGOALS-s2 (r1) FGOALS-s2 (r2)	-	HadGEM2-ES (r4)
	RCP8,5	H		MIROC-ESM	-	IPSL-CM5A-LR (r4)
		M		-	HadGEM2-ES (r1)	-
		L		CMCC-CM	-	FGOALS-g2
Southern region	RCP4,5	H		HadGEM2-CC	-	CanESM2 (r2)
		M		-	FGOALS-g2	-
		L		INM-CM4	-	MPI-ESM-LR (r1)
	RCP8,5	H		MIROC-ESM	-	CanESM2 (r2)
		M		-	FGOALS-g2 HadGEM2-ES (r1)	-
		L		INM-CM4 CMCC-CM	-	MPI-ESM-LR (r1)

L: below 10<sup>th</sup> percentile rank of increase rates in annual precipitation or ETo  
 M: between 45<sup>th</sup> and 55<sup>th</sup> percentile rank of increase rates in annual precipitation or ETo  
 H: over 90<sup>th</sup> percentile rank of increase rates in annual precipitation or ETo

보여주고 있으며, 다른 GCMs과 비교하여 상당히 편향된 결과를 보여주고 있다. 반면에 남부지역의 경우 GCMs의 평균에 가까운 모의값을 보여주고 있다. RCP 8.5 시나리오를 적용할 경우도 RCP 4.5 시나리오와 유사한 경향을 보여준다 (Fig. 5). 전체적으로 연강수량과 기준작물증발산량 모의값이 증가하였으나 GCMs과 KMA-RCM의 차이는 RCP 4.5 시나리오와 유사하게 나타났다.

이처럼 KMA-RCM 자료는 다른 GCMs과 비교할 때 일부 지역에서 상당한 차이를 나타낼 수 있으므로 기후변화와 농업수자원 분야의 연구에 적용할 때 이와 같은 차이를 고려할 필요가 있다.

### V. 기후변화 영향 평가를 위한 GCM 산출물 후보군

다수의 GCM 산출물을 이용하여 기후변화 영향 평가를 실시하여, GCM 산출물에 따른 결과를 상호비교 한다면 미래 기후변화의 일관된 신호를 찾고 변화 가능 범위를 정량화할 수 있을 것이다. 즉, GCM 선택에 따른 불확실성을 감소시킬 수 있다. 하지만 다수의 GCM 산출물을 이용하여 기후변화 영향 평가를 실시한다는 많은 연구 과정을 요구하기 때문에 현실적인 어려움이 있을 수 있다. 따라서 본 연구에서

는 41 GCMs의 강수량(P)과 기준작물증발산량(ETo)의 증가 경향성을 포괄할 수 있는 5가지 후보군을 지역별, 시나리오별로 제시하였는데, 후보군의 선정하기 위한 기준은 다음과 같다.

- HH: P와 ETo 증가율이 모두 백분위수 90 이상인 경우
- HL: P 증가율이 백분위수 90 이상, ETo 증가율이 백분위수 10 이하인 경우
- MM: P와 ETo 증가율이 백분위수 45-55인 경우
- LH: P 증가율이 백분위수 10 이상, ETo 증가율이 백분위수 90 이하인 경우
- LL: P와 ETo 증가율이 모두 백분위수 10 이하인 경우

단, 위 범위를 만족하는 GCM 산출물이 없는 경우에는 백분위수 범위를 5씩 증가하여 선정하였다.

상기 기준에 따라 선정된 GCM 후보군을 살펴보면 (Table 5 참조), HH 후보군에는 MIROC5 (r1), IPSL-CM5A-LR (r4) 및 CanESM2 (r2), HL 후보군에는 HadGEM2-ES (r4), FGOALS-g2 및 MPI-ESM-LR (r1), MM 후보군에는 BCC-CSM1.1, FGOALS-g2, HadGEM2-ES (r1), LH 후보군에는 HadGEM2-CC과 MIROC-ESM, LL 후보군에는 FGOALS-s2 (r1, 2), CMCC-CM 및 INM-CM4으로 선정되었다. 본 후보

군은 농업수자원과 관련된 기후변화 영향 평가에서 GCM 선정 시 참고자료 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## VI. 요약 및 결론

기후변화 영향 평가에 있어서 어떠한 기후변화 전망자료를 사용하느냐에 따라서 상이한 결과를 도출할 수 있다. 즉, 합리적인 기후변화 영향 평가를 위해서는 GCM 산출물에 대한 경향성을 파악 후, 적절한 선정이 필요할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 다양한 기후변화 관련 연구를 수행함에 있어서 기본이 되는 25개 GCMs의 41개 산출물과 기상청에서 제공하는 한반도 기후변화 시나리오의 경향성을 분석하고, 상호 비교하였다. 또한 GCM 산출물의 강수량과 기준작물증발산량의 증가 경향성을 포괄할 수 있는 5가지 후보군을 제시하였다.

41 GCMs의 연평균기온 증가 경향을 살펴보면 다음과 같다. RCP 4.5 시나리오에서의 중부 지역은 평균 1.2 °C (2025s), 2.2 °C (2055s) 및 2.7 °C (2085s), 남부 지역은 평균 1.5 °C (2025s), 2.7 °C (2055s) 및 3.2 °C (2085s)씩 증가하였고, RCP 8.5 시나리오에서는 중부 지역은 평균 1.3 °C (2025s), 3.1 °C (2055s) 및 5.0 °C (2085s), 남부 지역은 평균 1.6 °C (2025s), 3.6 °C (2055s) 및 5.9 °C (2085s)씩 상승하는 것으로 분석되었다. 한편 연강수량의 증가 비율을 살펴보면, RCP 4.5 시나리오에서의 중부 지역은 평균 7.0 % (2025s), 13.5 % (2055s) 및 14.6 % (2085s), 남부 지역은 평균 9.2 % (2025s), 13.7 % (2055s) 및 17.0 % (2085s)씩 증가하였고, RCP 8.5 시나리오에서는 중부 지역은 평균 7.5 % (2025s), 15.1 % (2055s) 및 25.5 % (2085s), 남부 지역은 평균 8.7 % (2025s), 17.5 % (2055s) 및 26.7 % (2085s)씩 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 동일 시나리오의 경우에 중부 지역보다는 남부 지역에서 기온과 강수량 증가가 더 뚜렷한 것으로 나타났다.

KMA-RCM의 기후전망결과를 연강수량과 기준작물증발산량의 KMA-RCM과 41 GCMs와의 차이를 비교한 결과, 중부지역의 경우 KMA-RCM은 제어적분에 따라 상당한 연강수량의 차이를 보여주었는데, 특히 IC 200의 강수량 전망 결과는 GCM 산출물과 비교하여 상당히 편향된 결과를 나타내었다. 반면에 남부지역의 경우 GCM 산출물들의 평균에 가까운 모의값을 보여주었는데, RCP 8.5 시나리오를 적용할 경우도 RCP 4.5 시나리오와 유사한 경향을 보여주었다. 한편 본 연구에서 설정한 기준에 따라 선정된 경향성별 후보군을 살펴보면, HH 후보군에는 MIROC5 (r1), IPSL-CM5A-LR (r4) 및 CanESM2 (r2), MM 후보군에는 BCC-CSM1.1, FGOALS-g2, HadGEM2-ES (r1), LL 후보군에는 FGOALS-s2 (r1, r2),

CMCC-CM 및 INM-CM4으로 선정되었다.

다양한 기후 모델 경향성 분석은 합리적인 기후변화 예측을 위한 필수 선행 과제라 할 수 있다. 미래 기후전망 자료의 경우, 동일한 GCM 산출물이라도 상세화기법에 따라 서로 상이한 결과를 나타낼 수 있기 때문에 다른 기법을 적용했을 경우 본 연구 결과와 차이가 날 수 있다. 하지만 GCM 산출물간의 상대적인 차이에 있어서는 큰 차이가 없을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 제시한 결과는 향후 농업수자원과 관련된 다양한 기후변화 영향 평가 시 GCM 산출물에 대한 경향성을 사전에 파악이 가능하고, 더 나아가 합리적인 연구 결과를 위한 GCM 산출물 선정에 있어서 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

## 사 사

이 논문은 2011년도 및 2012년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (NRF-2011-355-D00105 및 2012R1A6A3A03040456)

## REFERENCES

1. Alcamo, J., M. Flörke, and M. Märker, 2007. Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes. *Hydrological Sciences Journal* 52(3): 247-275.
2. Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements. FAO Irrigation and Drainage. Paper No. 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
3. 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*. 54(5): 35-41 (in Korean).
4. Dubrovský, M., M. Hayes, P. Duce, M. Trnka, M. Svoboda, and P. Zara, 2014. Multi-GCM projections of future drought and climate variability indicators for the Mediterranean region. *Regional Environmental Change* 14(5): 1907-1919.
5. Fung, F., A. Lopez, and M. New, 2011. Water availability in +2C and +4C worlds. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 369(1934): 99-116.
6. Ho, C. K., D. B. Stephenson, M. Collins, C. A. T. Ferro, and S. J. Brown, 2012. A source of additional uncertainty in climate change projections. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93(1): 21-26.

7. 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).
8. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013a. Summary for Policy makers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
9. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013b. Technical Report, In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
10. McMahon, T. A., M. C. Peel, and D. J. Karoly, 2015. Assessment of precipitation and temperature data from CMIP3 global climate models for hydrologic simulation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(1): 361-377.
11. Nam, W. H., E. M. Hong, J. Y. Choi, J. Cho and, M. J. Hayes, 2015. Uncertainty characteristics in future prediction of agrometeorological indicators using a climatic water budget approach. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 57(2): 1-13 (in Korean).
12. National Institute of Meteorological Research (NIMR), 2009. Understanding of Climate Change (Ⅱ) –Climate change in the Korean Peninsula: Present and future- (in Korean).
13. National Institute of Meteorological Research (NIMR), 2011. Climate change scenario report for IPCC AR5 (in Korean).
14. 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, *Korea Water Resources Association* 46(5): 505-517 (in Korean).
15. 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): 297-307 (in Korean).
16. Park, J. Y., H. Jung, C. H. Jang, and S. J. Kim, 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* 56(3): 19-29 (in Korean).
17. Park, N. Y., J. Y. Choi, S. H. Yoo, and S. H. Lee, 2013. Assessment of Anti-Drought Capacity for Agricultural Reservoirs using RCP Scenarios, *Korean Society of Agricultural Engineers* 55(3): 13-24 (in Korean).
18. Taylor, K. E., R. J. Stouffer, and G. A. Meehl, 2011. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93(4): 485-498.
19. van Vuuren, D. P., J. Edmonds, M. Kainuma, K. Riahi, A. Thomson, K. Hibbard, G. C. Hurtt, T. Kram, V. Krey, J. F. Lamarque, T. Masui, M. Meinshausen, N. Nakicenovic, S. J. Smith, and S. K. Rose, 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* 109: 5–31.
20. Vörösmarty, C. J., P. Green, J. Salisbury, and R. B. Lammers, 2000. Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth. *Science* 289(5477): 284-288.
21. Yoo, S. H., J. Y. Choi, S. H. Lee, Y. G. Oh, and N. Y. Park, 2012a. The impacts of climate change on paddy water demand and unit duty of water using highresolution climate scenarios. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(2): 15-26 (in Korean).
22. Yoo, S. H., J. Y. Choi, W. H. Nam, and E. Hong, 2012b. Analysis of design water requirement of paddy rice using frequency analysis affected by climate change in South Korea, *Agricultural Water Management* 112: 33-42.
23. Yoo, S. H., J. Y. Choi, S. H. Lee, Y. G. Oh, D. K. Yun, 2013. Climate change impacts on water storage requirements of an agricultural reservoir considering changes in land use and rice growing season in Korea. *Agricultural Water Management* 117: 43-54.