

불확실성을 고려한 논벼 증발산량 기후변화 영향 평가

최순균* · 정재학** · 조재필*** · 허승오* · 최동호* · 김민경****†

*국립농업과학원 기후변화생태과, **Texas A&M AgriLife Research,
APEC 기후센터, *농촌진흥청 국제기술협력과

Assessing the Climate Change Impacts on Paddy Rice Evapotranspiration Considering Uncertainty

Choi, Soon-Kun*, Jeong, Jaehak**, Cho, Jaepil***, Hur, Seung-Oh*,
Choi, Dongho* and Kim, Min-Kyeong****†

*National Institute of Agricultural Sciences, Wanju, Korea
**Texas A&M AgriLife Research, Texas A&M University, Texas, USA
***APEC Climate Center, Busan, Korea
****Rural Development Administration, Jeonju, Korea

ABSTRACT

Evapotranspiration is a key element in designing and operating agricultural hydraulic structures. The profound effect of climate change to local agro-hydrological systems makes it inevitable to study the potential variability in evapotranspiration rate in order to develop policies on future agricultural water management as well as to evaluate changes in agricultural environment. The APEX-Paddy model was used to simulate local evapotranspiration responses to climate change scenarios. Nine Global Climate Models(GCMs) downscaled using a non-parametric quantile mapping method and a Multi-Model Ensemble method(MME) were used for an uncertainty analysis in the climate scenarios. Results indicate that APEX-Paddy and the downscaled 9 GCMs reproduce evapotranspiration accurately for historical period(1976~2005). For future periods, simulated evapotranspiration rate under the RCP 4.5 scenario showed increasing trends by -1.31%, 2.21% and 4.32% for 2025s(2011~2040), 2055s(2041~2070) and 2085s(2071~2100), respectively, compared with historical(441.6 mm). Similar trends were found under the RCP 8.5 scenario with the rates of increase by 0.00%, 4.67%, and 7.41% for the near-term, mid-term, and long-term periods. Monthly evapotranspiration was predicted to be the highest in August, July was the month having a strong upward trend while. September and October were the months showing downward trends in evapotranspiration are mainly resulted from the shortening of the growth period of paddy rice due to temperature increase and stomatal closer as ambient CO₂ concentration increases in the future.

Key words: Climate Change, GCMs, Uncertainty, Paddy Rice, APEX-Paddy Model

1. 서론

화석연료 사용에 따른 대기 중 이산화탄소 농도의 증가는 전 지구적 기온상승과 지역별 강수의 분포와 강수 특성 변화의 원인이 되었으며 이러한 변화는 농업 생산성과 농경지 수문순환 변화에 영향을 주고 있다 (IPCC, 2014; Choi et al., 2017(b)). 증발산량은 조용수량, 단위용수량 산정 등 수리구

조물의 설계·운영을 위한 가장 기본이 되는 자료이다. 증발산량은 저수지 가뭄, 토양수분 가뭄 등 가뭄 예측 및 평가를 위한 주요 요인 중 하나이며 유역 유출량에도 영향을 미친다. 또한, FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations)의 AquaCrop 모델에서는 작물 생산량 산정을 위한 지표로 사용된다 (Steduto et al., 2012). 따라서 미래 농업수 자원 계획 수립뿐만 아니라 농업 생산 환경의 변화를 평가하

† Corresponding author: kimmk72@korea.kr

Received May 10, 2018 / Revised June 11, 2018 / Accepted June 25, 2018

기 위하여 기후변화에 따른 농경지의 증발산량 변화에 대한 연구가 필요하다.

증발산량은 기준작물 증발산량 (Reference Crop Evapotranspiration)을 기준으로 작물계수 (Crop coefficient)를 적용하여 산정된다 (Allen et al., 1998). Yoo et al. (2006)은 우리나라 논벼를 대상으로 FAO Penman-Monteith 식과 FAO modified-Penman 식의 순별 작물계수를 산정하였으며, Nam et al. (2013)은 논벼 증발산량과 Tank 모델, 논 물수지 모델을 이용한 저수지가뭄지수 (RDI, Reservoir Drought Index)를 산정하고 논의 가뭄 위험도를 평가하였다. 그러나 이러한 증발산량 산정방법은 기후변화에 따른 벼의 생육특성 변화를 반영하지 못한다는 한계가 있다. 또한, 대기 중 이산화탄소 농도가 증가하면 공변세포의 ABA (Abscisic Acid)가 증가하며 ABA의 증가는 기공 닫힘을 유도하므로 증발산량이 감소한다고 보고되고 있으나 (Kimball and Idso, 1983; Xu et al., 2016) FAO의 기준작물 증발산량 산정식은 이러한 특성이 반영되지 않는 한계가 있다.

증발산량에 대한 기후변화 영향 연구로는 Hong et al. (2009)과 Yoo et al. (2012)이 SRES (Special Report on Emission Scenario) 시나리오를 바탕으로 생산한 기후정보를 이용하여 우리나라 논벼의 증발산량 변화와 논 필요수량을 예측하였다. 2013년 IPCC (Intergovernmental Panel of Climate Change)가 제5차 평가보고서를 채택한 이후에는 대표농도경로 (RCP, Representative Concentration Pathway) 시나리오를 기반으로 논벼 증발산량 및 필요수량에 관한 연구가 수행되었다 (Kim et al., 2016; Choi et al., 2017(b)).

전지구기후모형 (GCM, Global Climate Model)은 실제 기후시스템을 단순화시킨 모델로서 필연적으로 불확실성을 내포하게 된다 (NIMR, 2009). 단일 GCM만을 사용할 경우 불확실성을 반영하지 못하는 한계가 있으며 불확실한 예측 결과를 정책에 반영할 경우 정책결정자가 옳지 못한 판단을 내릴 위험이 있다. 이러한 예측 불확실성을 극복하기 위해 최근에는 여러가지 GCMs를 활용하는 MME (Multi-Model Ensemble) 방법을 적용하여 GCMs의 불확실성을 평가하고 기준증발산량의 경향을 분석하는 연구가 수행되었다 (Lee and Kim, 2012; Yoo et al., 2015).

본 연구에서는 논벼 재배환경과 생육반응을 반영할 수 있는 APEX-Paddy (Agricultural Policy/Environmental eXtender-Paddy) 모델 (Williams and Izaurralde, 2006, Choi et al., 2017(a))을 사용하고 MME 방법으로 미래 논벼의 증발산량 변화를 평가하고자 한다. 이를 위해 CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project 5)에서 제공하는 9개 GCMs를 이용

하여 RCP 4.5 및 8.5 시나리오를 대상으로 국내 논벼 증발산량의 과거 재현기간 및 미래기간에 대한 연도별 변화와 월간 변화를 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구대상지역

연구대상지역은 경기도 수원으로 선정하였다. 수원의 종관 기상관측소는 북위 37.27°, 경도 126.99°, 고도 34.8 m에 위치하고 있으며 GCMs의 기준인 1976~2005년 기간에 대하여 최고·최저기온 (°C), 일사량 (MJ/m²), 강수량 (mm), 상대습도 (%), 평균풍속 (m/s) 자료를 모두 보유하고 있다. 전국 종관기상관측시스템 (ASOS, Automated Synoptic Observing System) 중 1976~2005년 기간의 자료를 보유한 측후소는 61개 지역이며 해당 측후소들은 전 기간의 일조시간 (hr) 자료를 보유하고 있으나 일사량 자료를 보유한 측후소는 이들 중 9개 지역에 불과하다. 일사량 자료를 보유한 측후소 중에서 원주 측후소는 관측기간 중 최대 일 일사량이 69.34 MJ/m²으로 일사량 30 MJ/m²을 넘기기 어려운 국내 특성을 고려할 때 자료의 신뢰도가 떨어져 연구대상 지역에서 제외하였다. 이에 따라 연구대상

Table 1. Typical paddy management schedule of the Suwon field

Date	Operation	Amounts
10 May	Pesticide application	30 kg/ha
10 May	Fertilizer application	53 kgN/ha, 61 kgP/ha, 45 kgK/ha
10 May	Ploughing	100 mm depth
14 May	Irrigate	100 mm ponding
21 May	Puddling	80 mm depth
24 May	lower water depth	25 mm ponding
25 May	Transplanting	125 stalks/m ²
26 May	Irrigate	60 mm ponding
4 June	Pesticide application	30 kg/ha
11 June	Fertilizer application	29 kgN/ha
23 July	Stop irrigation and drain water	
31 July	Fertilizer application	15 kgN/ha, 19 kgK/ha
7 August	Irrigate	80 mm ponding
2 October	Stop irrigation and drain water	
15 October	Harvest	

후보 지역을 춘천, 강릉, 서울, 인천, 수원, 청주, 목포, 진주로 좁혔으며 생육 단계별 엽면적지수 (LAI, Leaf Area Index), 유효분얼수, 이앙시기, 수확시기 등 논벼 생육특성과 영농 자료를 보유한 수원을 최종 연구대상지역으로 선정하였다.

연구대상지역의 농 작업 일정은 Table 1과 같다. 농 작업 일정은 국립식량과학원 본원(수원, 경기도) 시험포장을 대상으로 작성한 작황시험보고서(RDA, 2002)를 바탕으로 국립식량과학원의 자문을 통해 작성하였다. 단위면적 당 벼 개체 수는 125 개체/m²으로 작황시험보고서의 재식간격(14 cm × 30 cm)을 고려한 23.8 모/m² 보다 5배 이상 많은 양이다. 이는 APEX-Paddy 모델이 분얼(Tillering)을 반영하지 못하므로 유효분얼을 고려하여 개체수를 입력하여야하기 때문이다. 따라서 작황시험보고서의 출수기 유효분얼(약 18.4개)과 1모당 개체 수(약 3.5개)를 고려하여 단위면적 당 벼 개체 수를 적용하였다(Choi et al., 2017(a)).

2.2. 기후변화시나리오

본 연구는 IPCC 제5차 평가보고서에서 사용한 RCP 시나리오로서 RCP 4.5, RCP 8.5 시나리오를 적용하였다. GCM 자료는 CMIP5를 통해 제공되며 이중 9종의 GCM이 RCP 4.5, 8.5 시나리오를 대상으로 우리나라의 최고·최저기온, 일사량, 강수량, 상대습도, 평균풍속 자료를 모두 보유하고 있

다. 본 연구에 사용된 GCM들의 특성은 Table 2와 같다.

농업연구를 위한 모델은 일반적으로 일 단위 자료를 요구하는데 반하여 대부분의 기후변화 시나리오는 월 단위 자료로 제공된다. 또한 기후와 GCM에 계통오차 (Systematic Bias)가 있기 때문에 통계적 방법에 의한 시·공간적 상세화와 편의보정 (Bias Correction)과정이 필요하다(Chung et al., 2015).

APEC 기후센터에서는 비모수적 분위사상법(Non-Parametric Quantile Mapping)을 사용하여 시·공간적 상세화와 편의보정을 수행하였다(Cho, 2013). 비모수적 분위사상법은 과거기간에 대한 GCM 모의 결과의 계통오차를 동일 기간의 관측 자료의 확률 분호와 비교하는 방법으로서 확률분포함수 없이 모의 및 관측 자료의 실제 분포를 직접 사용한다(Cho et al., 2015). 미래기간(2011년~2100년)에 대하여 과거기간(1976년~2005년)의 분위별 오차가 동일하게 적용된다. 본 연구에서는 APEC 기후센터에서 제공하는 편의 보정된 일 단위 미래기후 자료를 증발산량 산정에 이용하였다.

2.3. 증발산량 산정모델

증발산량 산정 모델로서 APEX-Paddy 모델을 사용하였다. APEX-Paddy 모델은 논 환경조건을 모의하기 위하여 기존의 APEX(Williams and Izaurralde, 2006) 모델에 담수조건의 알고리즘을 추가한 모델로서 농촌진흥청과 Texas A&M의 공동

Table 2. Characteristics of the GCMs in CMIP5 data analyzed in this study

Model acronym	Modeling system/Country	Institute	Spatial resolution (pixels) (Lon. × Lat.)
bcc-csm1-1	Beijing Climate Center climate system model based on NCAR CCSM2.0.1, China	CMA	128 × 128
CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada	CCCMA	128 × 64
GFDL-ESM2G	GFDL Earth System Model with Generalized Ocean Layer Dynamics (GOLD) component (ESM2G), USA	GFDL	144 × 90
GFDL-ESM2M	GFDL Earth System Model with Modular Ocean Model 4 (MOM4) component (ESM2M), USA	GFDL	144 × 90
HadGEM2-CC	Hadley Centre Global Environment Model, version 2-Earth System, Met Office, United Kingdom	MOHC	192 × 145
inmcm4	Institute of Numerical Mathematics (INM) Coupled Model, Russia	INM	180 × 120
IPSL-CM5A-LR	L'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) Coupled Model, coupled with NEMO, low resolution; France	IPSL	96 × 96
MIROC-ESM	Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japan	MIROC	128 × 64
MIROC-ESM-CHEM	Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japan	MIROC	128 × 64

연구를 통해 개발된 모델이다. 낙수기와 비영농기 등의 비답수 조건에서는 기존 발작물에 대한 알고리즘을, 답수 조건에서는 논 물수지 알고리즘을 따른다 (Choi et al., 2017(b)).

APEX 모델의 증발산량 산정의 기본 공식은 Penman (Penman, 1948), Penman-Monteith (Monteith, 1964), Priestley-Taylor (Priestley and Taylor, 1972), Hargreaves (Hargreaves and Samani, 1985), Baier-Roberton (Baier and Roberton, 1965)로서 이 5개의 공식 중 하나를 선택하여 사용할 수 있다. 본 연구에서는 Penman-Monteith 공식을 증발산량 산정 기본 공식으로 사용하였다.

$$\lambda E_o = \frac{\Delta R_n + 86.66 \rho_a VPD u_{10} / 350}{\Delta + \gamma} \quad (1a)$$

$$E_p = \frac{\Delta R_n + 86.66 \rho_a VPD / r_a}{\lambda \left[\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a} \right) \right]} \quad (1b)$$

여기서, E_o 는 잠재증발량 (mm/d), Δ 는 포화수증기압 곡선의 기울기 (kPa/°C), R_n 은 순복사량 (MJ/m²/d), ρ_a 는 공기 밀도 (kg/m³), VPD 는 증기압차 (kPa), u_{10} 은 지상 10 m 지점에서의 평균풍속 (m/s), λ 는 기화잠열 (MJ/kg), γ 는 습도계상수 (kPa/°C)이다. E_p 는 식물에 의한 증산량 (mm/d), r_a 는 열과 증기이동에 대한 공기동역학적 저항 (s/m), r_c 는 증기이동에 대한 캐노피저항 (s/m)이다. 캐노피저항은 VPD 와 대기 중 CO₂ 농도의 함수로서 낮은 증기압차와 높은 CO₂ 농도는 기공유통성 (Stomatal conductance)을 낮추게 되므로 캐노피저항을 높이는 결과를 가져온다 (Stockle et al., 1992).

APEX-Paddy 모델은 논에서 증발산량 산정의 정확도를 높이기 위하여 답수조건의 경우 작물에 의한 차단과 논외의 답수 및 배수조건을 고려할 수 있는 Sakaguchi et al. (2014)의 방법을 사용한다. 논 답수조건에서의 수면증발량은 다음 식으로 산정된다.

$$V_{evap} = \eta \left(1 - \frac{LAI}{LAI_{evap}} \right) E_o \quad LAI > LAI_{evap}, \quad V_{evap} = 0 \quad (2a)$$

$$ET = V_{evap} + E_p \quad (2b)$$

여기서, V_{evap} 는 일 증발량 (mm/d), LAI 는 엽면적지수,

LAI_{evap} 는 수면에서의 증발이 일어나지 않을 때의 엽면적지수이다. ET 는 일 증발산량 (mm/d), η 는 수면증발계수로서 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모델의 저수지 모델에 적용된 수면증발계수 0.6을 적용한다 (Neitsch et al., 2011). LAI_{evap} 는 Miyazaki et al. (2005)의 연구 결과에 따라 4.0으로 설정되어있다.

APEX-Paddy 모델의 작물 생육은 다음 식을 따른다.

$$DDM = 0.001 \times PAR (RUE - WAVP \times \max(VPD - 1, -0.5)) \quad (3a)$$

$$PAR = 0.5 R_a (1.0 - e^{-0.65 LAI}) \quad (3b)$$

$$LAI = LAI_0 + \Delta HUF \cdot XLAI \cdot \sqrt{REG} \cdot \frac{LAI_0}{TLAI} \quad (3c)$$

$$HUF = \frac{HUI}{HUI + e^{\alpha - \beta \cdot HUI}} \quad (3d)$$

$$HUI = \frac{\sum_j HU_j}{PHU}, \quad (3e)$$

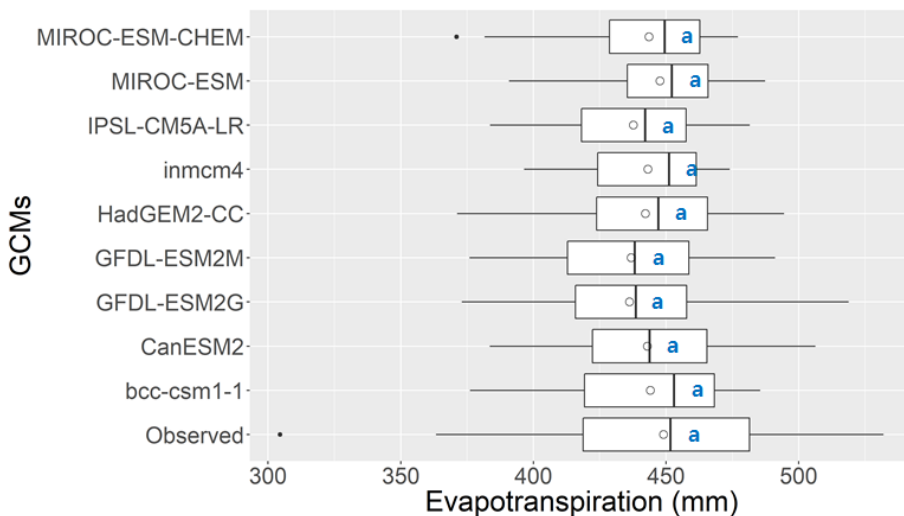
$$HU_j = \frac{T_{max,j} - T_{min,j}}{2} - T_b, \quad HU > 0$$

여기서, DDM 은 일 단위 바이오매스의 잠재적인 증가량 (ton/ha/d), RUE 는 복사에너지 사용효율 (kg/ha · m²/MJ), PAR 은 광합성 활성 복사선 (MJ/m²/d), $WAVP$ 는 RUE 와 VPD 와 관련된 작물매개변수, R_a 는 외기복사량 (MJ/m²/d), LAI 는 엽면적지수이다. LAI_0 는 작물의 일 초기 엽면적지수이며 $XLAI$ 는 작물 최대 엽면적지수, $TLAI$ 는 생장기간 중 총 엽면적지수, ΔHUF 는 열단위의 일 변화량이다. HUI 는 작물의 열단위지수 (Heat unit index), HUF 는 작물의 열단위 (Heat unit factor)이며 α 와 β 는 작물의 생육특성에 따른 계수이다. j 는 재배일 (day), HU 는 열단위, T_{max} 는 일 최고기온 (°C), T_{min} 는 일 최저기온 (°C), T_b 는 생육기온도 (°C), PHU 는 작물이 출현하여 생리적 성숙에 도달하기까지의 열단위의 총량이다. 이외의 작물 생육 및 증발산에 대한 자세한 내용은 APEX 모델 설명서 (Williams and Izaurralde, 2006)에 수록되어있다.

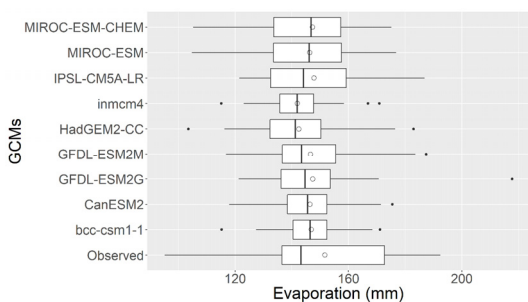
2.4. 기후변화 영향평가

기상관측소의 관측 자료 통해 산정한 증발산량 결과와 기후변화 시나리오의 과거 관측기간 (Historical, 1976~2005)에 대한 재현자료를 통해 산정한 증발산량 결과가 용인할 수 없는 수준의 차이를 보인다면, 기후변화시나리오에 의한 미래

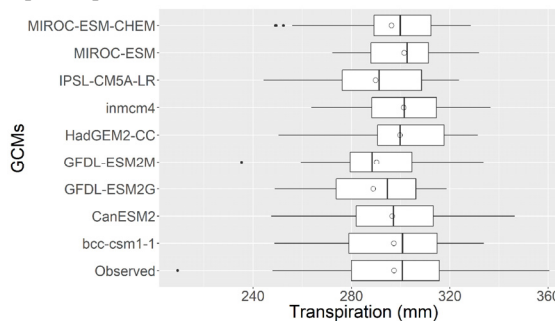
증발산량 예측 결과도 신뢰하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 기후변화 영향평가에 앞서 APEX-Paddy 모델에 의한 증발산량 산정의 재현성 (Reproducibility)을 평가하였다. 재현성 평가의 기준년도는 관측기간인 1976~2005년이며 증발산량, 증산량, 증발량을 대상으로 하였다. 모델입력 자료로서



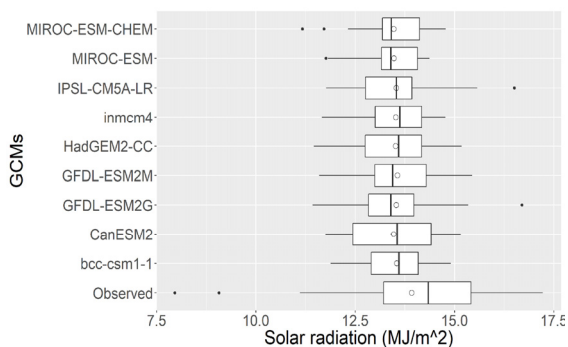
(a) Reproducibility of evapotranspiration



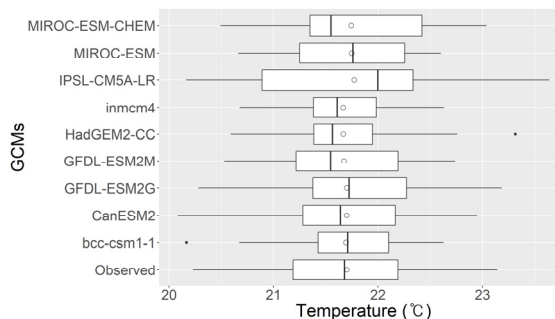
(b) Reproducibility of evaporation



(c) Reproducibility of transpiration



(d) Reproducibility of solar radiation



(e) Reproducibility of average temperature

Fig. 1. The evaluation of the reproducibility of climatic factor and evapotranspiration from observed to each nine individual GCM climate sets during paddy rice cultivation. As a result of LSD analysis by Bonferroni method, observed values and all GCMs were classified into one group(see Fig. 1(a)).

최고 · 최저기온, 일사량, 강수량, 상대습도, 평균풍속을 모두 사용하였다. 일부 결측값은 30년 월 평균값으로 대체하였다.

GCM 기술이 지속적으로 발전하면서 자연적인 기후현상을 보다 현실성 있게 모의하게 되었지만 미래 기후 예측 결과는 여전히 많은 불확실성 (Uncertainty)을 내포하고 있다 (Chung et al., 2015). 어떠한 GCM을 선정하는가에 따라 증발산량, 관개 수수량, 유출량 등의 예측에 상반된 결과를 도출하기도 한다 (Cho et al., 2015). 따라서 본 연구에서는 여러 가지 GCM을 이용하는 MME 접근방법을 이용하였다. 미래 기후변화 시나리오 (2011년~2100년)의 연중 논벼 재배기간의 증발산량 변화 경향을 9개의 GCM의 결과를 이용하여 평가하였으며, 9개의 전지구 기후모형의 결과를 반영하여 불확실성의 범위를 제시하였다.

또한 MME 접근방법을 이용하여 월간 증발산량 변화를 평가하고 불확실성의 범위를 제시하였다. 분석기간은 1976년~2005년 기간을 Historical, 2011년~2040년 기간을 2025s, 2041년~2070년 기간을 2055s, 2071년~2100년 기간을 2085s로 30년 단위로 구분하였으며 해당 기간의 월 증발산량 합계의 연도별 평균값을 이용하여 월간 증발산량 변화를 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 증발산량 재현성 평가

논벼 증발산량의 재현성 평가 결과는 Fig. 1과 같다. 9개의 개별 GCM의 과거기간 논벼 작기 중 증발산량은 모두 기상 관측소 관측 자료를 이용하여 산정한 증발산량의 범위 (box and whisker plot의 inner-fence 범위) 안에 들어가는 것으로 나타났다 (Fig. 1(a)). 또한 본페로니 (Bonferroni) 방법에 의한

최소유의차검정 (Least Significant Difference test, LSD test) 결과 관측값을 사용한 경우와 9개의 GCM에 의한 증발산량 산정 결과가 모두 하나의 그룹으로 분류되었다 (box 안의 a). 중위값과 평균값 (box 안의 \bar{x}) 또한 관측 자료를 이용하여 산정한 증발산량 결과와 유사한 결과를 보였다.

한편, 관측 자료를 이용한 결과 증발산량이 특이값 (Fig. 1(a)의 \circ)을 보였다. 이는 수원 측후소의 일사량 측정값이 원인인 것으로 판단된다. 1985년도의 논벼 재배기간 중 기온, 풍속, 상대습도는 평년과 유사한 값을 보였으나 평균 일사량이 7.96 MJ/m^2 로 평년 13.92 MJ/m^2 에 비해 매우 낮게 측정되었다 (Fig. 1(d)). 따라서 1985년도의 증산량은 209 mm 로 평년 297 mm 에 비해 매우 낮게 평가되었다 (Fig. 1(c)). 같은 연도에 서울, 인천, 청주, 서산 측후소의 일사량은 각각 14.51 MJ/m^2 , 13.42 MJ/m^2 , 9.37 MJ/m^2 , 15.86 MJ/m^2 로 측후소 간에도 다른 값을 보여 연도 간 차이뿐만 아니라 지역 간 측정값의 차이 역시 매우 큰 것으로 나타났다. 이러한 차이를 측정오차로 단정할 수 없지만 기준년도 대비 기후변화의 영향을 평가할 경우 지역별 기후관측 결과의 특징을 염두에 두고 평가해야 할 것이다.

3.2. 증발산량 연 단위 시계열 분석

논벼 재배기간의 증발산량에 대한 시계열 분석 결과 RCP 4.5, 8.5 시나리오 모두 증발산량이 증가하는 경향을 보였다. 9개의 기후변화 시나리오를 이용한 증발산량 예측 값들의 평균은 RCP 4.5의 경우 과거 관측기간 441.6 mm 에 비하여 2025s 435.8 mm , 2055s 451.0 mm , 2085s 460.7 mm 로 각각 -1.3% , 2.2% , 4.3% 가 증감하는 것으로 나타났다. RCP 8.5의 경우 2025s 441.6 mm , 2055s 462.3 mm , 2085s 474.4 mm 로 각각 0.0% , 4.7% , 7.4% 가 증가하는 경향을 나타냈다.

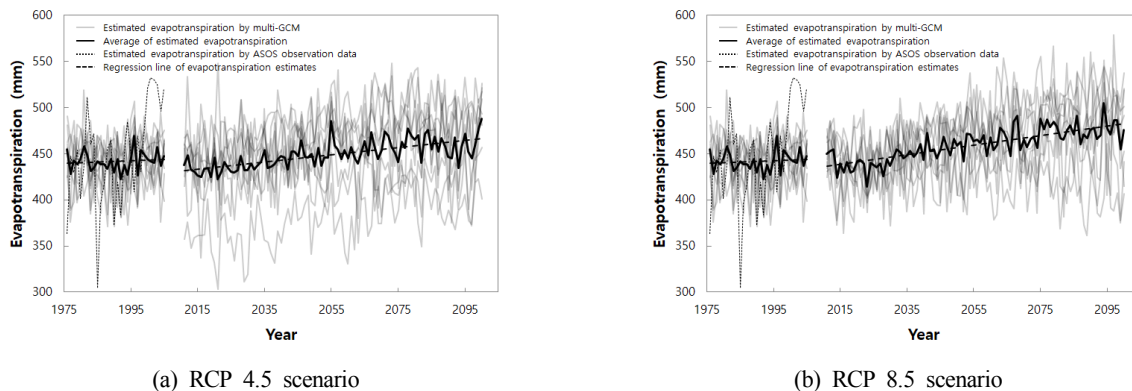


Fig. 2. Annual changes in evapotranspiration according to climate change scenario.

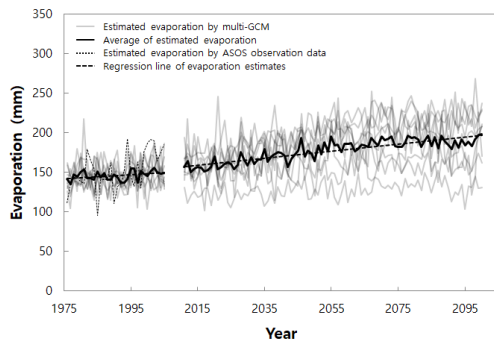
기온상승으로 인한 증발량의 증가가 증발산량 증가의 주요 원인인 것으로 판단된다. RCP 4.5, 8.5 시나리오 모두 논 증발량이 크게 상승하는 것으로 분석되었다. RCP 4.5 시나리오의 경우 2025s 162.5 mm, 2055s 180.4 mm, 2085s 189.1 mm로 각각 과거 관측기간 145.9 mm에 비하여 11.4%, 23.7%, 29.6%가 증가하는 것으로 나타났다. RCP 8.5 시나리오의 경우 2025s 165.1 mm, 2055s 196.6 mm, 2085s 217.1 mm로 기준년도에 비하여 각각 13.2%, 34.7%, 48.8%가 증가하는 것으로 예측되었다.

논벼 증산량은 기후변화에 따라 감소하는 경향을 보였다. RCP 4.5와 8.5 시나리오 모두 논벼 증산량이 감소하는 것으로 분석되었다. RCP 4.5 시나리오의 경우, 2025s 273.3 mm, 2055s 270.6 mm, 2085s 271.6 mm로 각각 과거 관측기간 295.7 mm에 비하여 -7.6%, -8.5%, -8.1%가 감소하는 것으로 나타났다. RCP 8.5 시나리오의 경우, 2025s 276.5 mm, 2055s 265.7 mm, 2085s 257.2 mm로 기준년도에 비하여 각각 -6.5%, -10.2%, -13.0%가 감소하는 것으로 예측되었다. 논벼

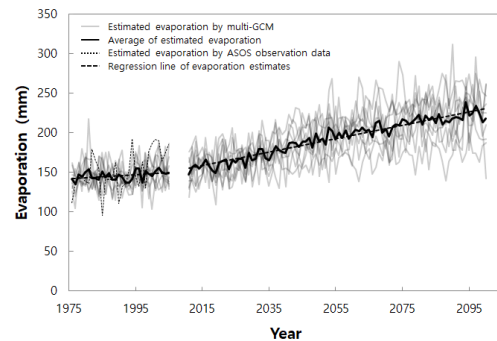
증산량 감소의 원인은 대기 중 이산화탄소 농도 상승에 따른 기공 닫힘과 (Xu et al., 2016) 기온상승에 따른 생육기간 단축이 원인으로 판단된다 (Choi et al., 2017(b)).

Table 3는 최소유의차검정에 의하여 관측값을 이용한 증발산량 산정결과와 기후변화 시나리오에 따른 미래 기간별 증발산량 산정결과와의 통계적 유의성을 검정한 결과이다. RCP 4.5 시나리오의 경우 2055s 기간에 대하여 MIROC-ESM이 유의한 차이를 보였고, 2085s 기간에 대하여 HadGEM2-CC, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM이 유의한 차이를 보이는 것으로 나타났다. RCP 8.5 시나리오의 경우 2055s 기간에 대하여 HadGEM2-CC, MIROC-ESM이 상당히 유의한 차이를 보였고, inmcm4가 어느 정도 유의한 차이를 나타냈다. 2085s 기간에 대하여 bcc-csm1-1, GFDL-ESM2G, GFDL-ESM2M을 제외한 모든 GCM에서 상당히 유의한 차이를 보이는 것으로 나타났다.

RCP 4.5 시나리오의 경우 bcc-csm1-1 GCM의 예측 신뢰도가 떨어지는 것으로 나타났는데(Fig. 5(a)), 이는 bcc-csm1-1

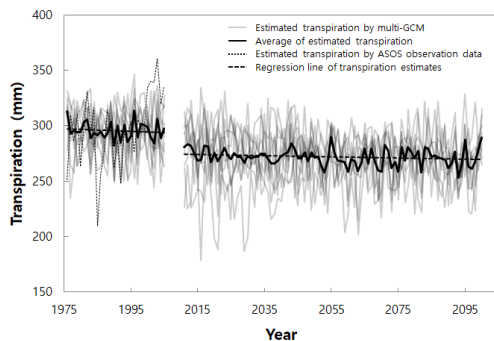


(a) RCP 4.5 scenario

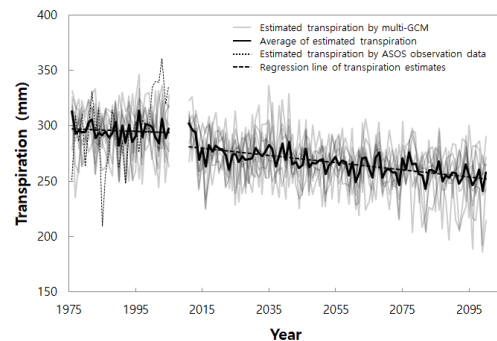


(b) RCP 8.5 scenario

Fig. 3. Annual changes in evaporation according to climate change scenario.



(a) RCP 4.5 scenario



(b) RCP 8.5 scenario

Fig. 4. Annual changes in transpiration according to climate change scenario.

Table 3. Significance test results of changes in future evapotranspiration compared with observed values by LSD method

Period	GCMs	RCP4.5			RCP8.5		
		Diff.	pvalue	signif.	Diff.	pvalue	signif.
2025s (2011~2040)	bcc-csm1-1	92.2	0.000	***	4.7	1.000	
	CanESM2	0.2	1.000		3.4	1.000	
	GFDL-ESM2G	19.0	1.000		9.7	1.000	
	GFDL-ESM2M	8.9	1.000		6.9	1.000	
	HadGEM2-CC	-4.5	1.000		15.5	1.000	
	inmcm4	10.1	1.000		15.5	1.000	
	IPSL-CM5A-LR	-8.9	1.000		-1.3	1.000	
	MIROC-ESM	-14.0	1.000		-6.4	1.000	
2055s (2041~2070)	MIROC-ESM-CHEM	16.2	1.000		18.6	1.000	
	bcc-csm1-1	67.5	0.000	***	-9.9	1.000	
	CanESM2	-5.3	1.000		-7.0	1.000	
	GFDL-ESM2G	9.0	1.000		-1.4	1.000	
	GFDL-ESM2M	-8.9	1.000		-0.2	1.000	
	HadGEM2-CC	-21.7	1.000		-37.6	0.000	***
	inmcm4	27.4	0.108		30.5	0.020	*
	IPSL-CM5A-LR	-22.7	0.990		-28.1	0.074	.
2085s (2071~2100)	MIROC-ESM	-40.8	0.000	***	-38.2	0.000	***
	MIROC-ESM-CHEM	-21.9	1.000		-26.9	0.142	
	bcc-csm1-1	50.1	0.000	***	-13.2	1.000	
	CanESM2	-16.9	1.000		-36.2	0.001	***
	GFDL-ESM2G	5.9	1.000		10.6	1.000	
	GFDL-ESM2M	-8.1	1.000		-16.7	1.000	
	HadGEM2-CC	-43.5	0.000	***	-58.9	0.000	***
	inmcm4	28.5	0.061	.	36.2	0.001	***
IPSL-CM5A-LR	-40.0	0.000	***	-53.1	0.000	***	
MIROC-ESM	-47.3	0.000	***	-58.8	0.000	***	
MIROC-ESM-CHEM	-33.4	0.004	**	-37.4	0.000	***	

의 재현성이 검증되었으나 2011년 이후의 예측 결과부터 1976년~2005년의 재현 결과에 비하여 증발산량이 매우 저평가 되는 것으로 나타났기 때문이다. 본페로니 방법에 의한 최소유역차검정결과에서도 bcc-csm1-1은 모든 기간에 대하여 다른 8개의 GCM과 차이를 보였다 (Fig. 6). 만약 bcc-csm1-1의 기후예측 결과만을 사용하여 미래 증발산량 변화를 평가할 경우 미래 기간에 대하여 증발산량이 지속적으로 증가할 것으로 평가할 수는 있으나, 과거 관측기간에 비하여 증발산량이 감소되는 것으로 평가할 우려가 있다. 따라서 MME 접근방법을 이용한 분석이 이러한 불확실성을 줄일 수 있는 방안이라 할 수 있다.

MME 접근방법에 대하여 예측 신뢰도가 떨어지는 GCM을 제거하고 MME 접근방법을 사용하는 것과 모든 GCM을 사용하는 것에 대해 연구자들 간에 서로 다른 의견이 있다. Fig. 5(b)는 RCP4.5 시나리오에 대하여 bcc-csm1-1 GCM을 제거한 증발산량 예측 결과이다. 이는 Fig. 5(a)의 예측 결과에 비하여 과거기간과 미래기간의 증발산량 추세의 연속성이 개선되는 것으로 보인다. 특히 증산량의 경우에서(Fig. 5(e), (f)) 이러한 현상이 뚜렷하게 나타났다. 예측 신뢰도가 명백히 떨어지는 GCM을 제거할 경우, MME 방법에 의한 증발산량 평가의 신뢰도가 높아질 것으로 판단된다. 따라서 MME 방법에 의한 기후변화 영향평가 시 목적에 맞추어 GCM을 검

토하고 적합한 GCM을 선정할 필요가 있다.

한편, IPCC에서는 4차 보고서에서 다양한 GCM 시나리오를 발표하면서 이들 모두 동등한 발생 가능성이 있음을 발표하였기 때문에 모의 능력이 좋은 GCM만을 선택적으로 사용하는 것은 IPCC의 기본원칙에 위배된다는 의견이 있다 (Lee and Kim, 2012). 증발산량 예측에 대하여 bcc-csm1-1 GCM의 예측 신뢰도가 떨어지나 다른 물 순환적 요소 (관개 요구량, 배수량 등)와 생산량에 대한 예측 신뢰도는 높을 수 있다.

또한, bcc-csm1-1은 4개의 격자가 우리나라 전 국토와 인접 해양의 기후를 대변한다. 우리나라와 조건이 다른 지역에 대해서는 bcc-csm1-1의 예측 신뢰도가 높을 가능성이 있다.

3.3. 월간 증발산량 변화

기후변화에 따른 월별 증발산량의 변화를 9개의 GCM에 대하여 분석하였으며 MME 접근방법으로서 GCM 결과의 평균값을 실선으로 표시하였다 (Fig. 7 and Fig. 8). 월별 증발산

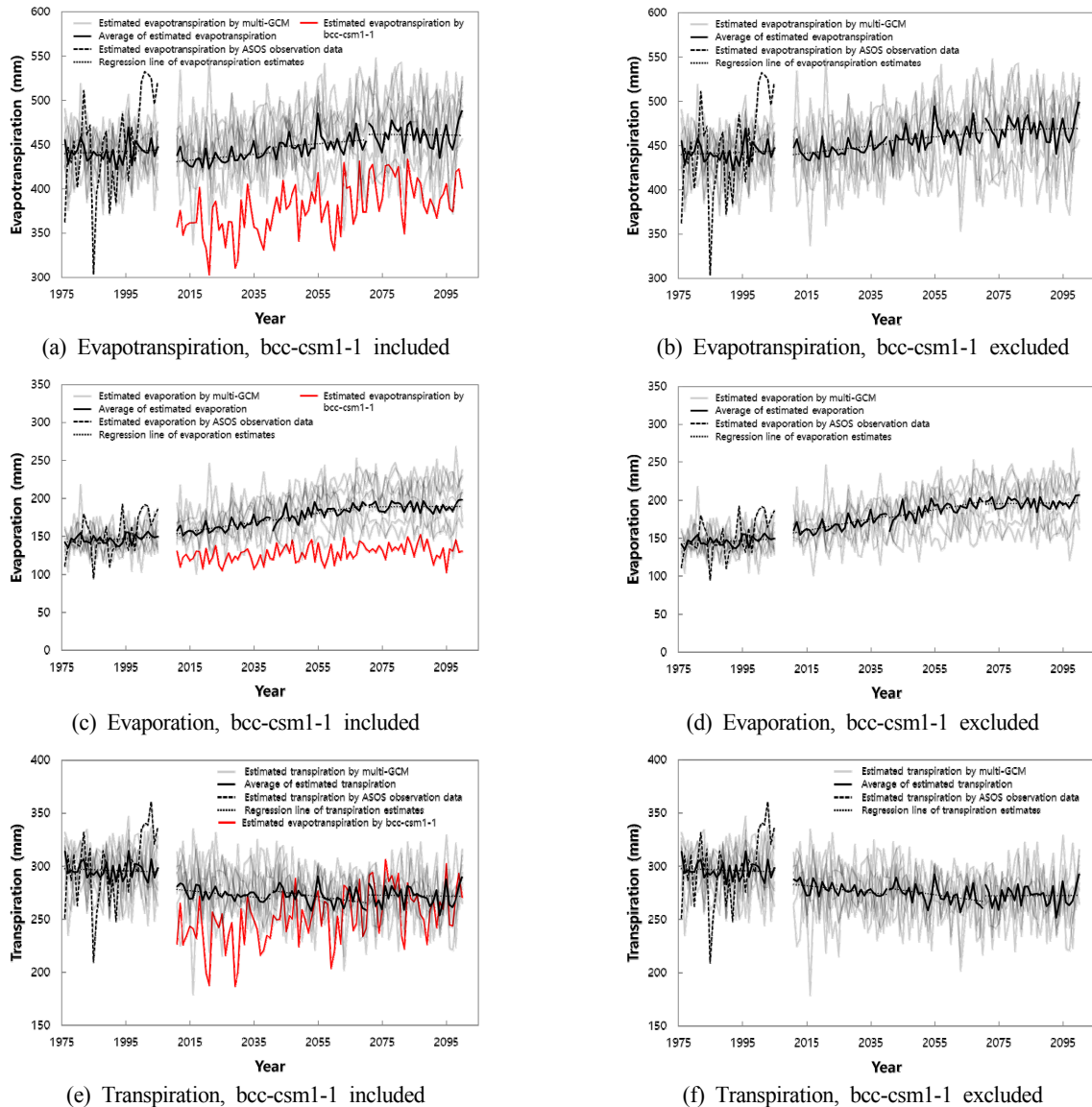


Fig. 5. Change in time series of evapotranspiration by MME approach when bcc-csm1-1 GCM is included or excluded. If bcc-csm1-1 (red line) is excluded, the continuity of historical and future trend lines are improved (See (a), (b), (e), and (f)).

량은 대상연대 (과거 관측기간, 2025s, 2055s, 2085s)의 30년 평균값이다. 과거 관측기간 (1976~2005)에 대하여 월별 증발산량을 비교한 결과 기상 관측 값을 이용하여 산정한 월별 증발산량 (접선)과 9개의 GCM에 의해 재현된 기상자료를 이

용하여 산정한 증발산량이 매우 유사한 것으로 나타났다. 이는 월 기상관측자료의 통계값을 이용하여 GCM 편의보정이 이루어졌기 때문인 것으로 판단된다.

기준년도의 경우 8월의 증발산량이 가장 많은 것으로 나타

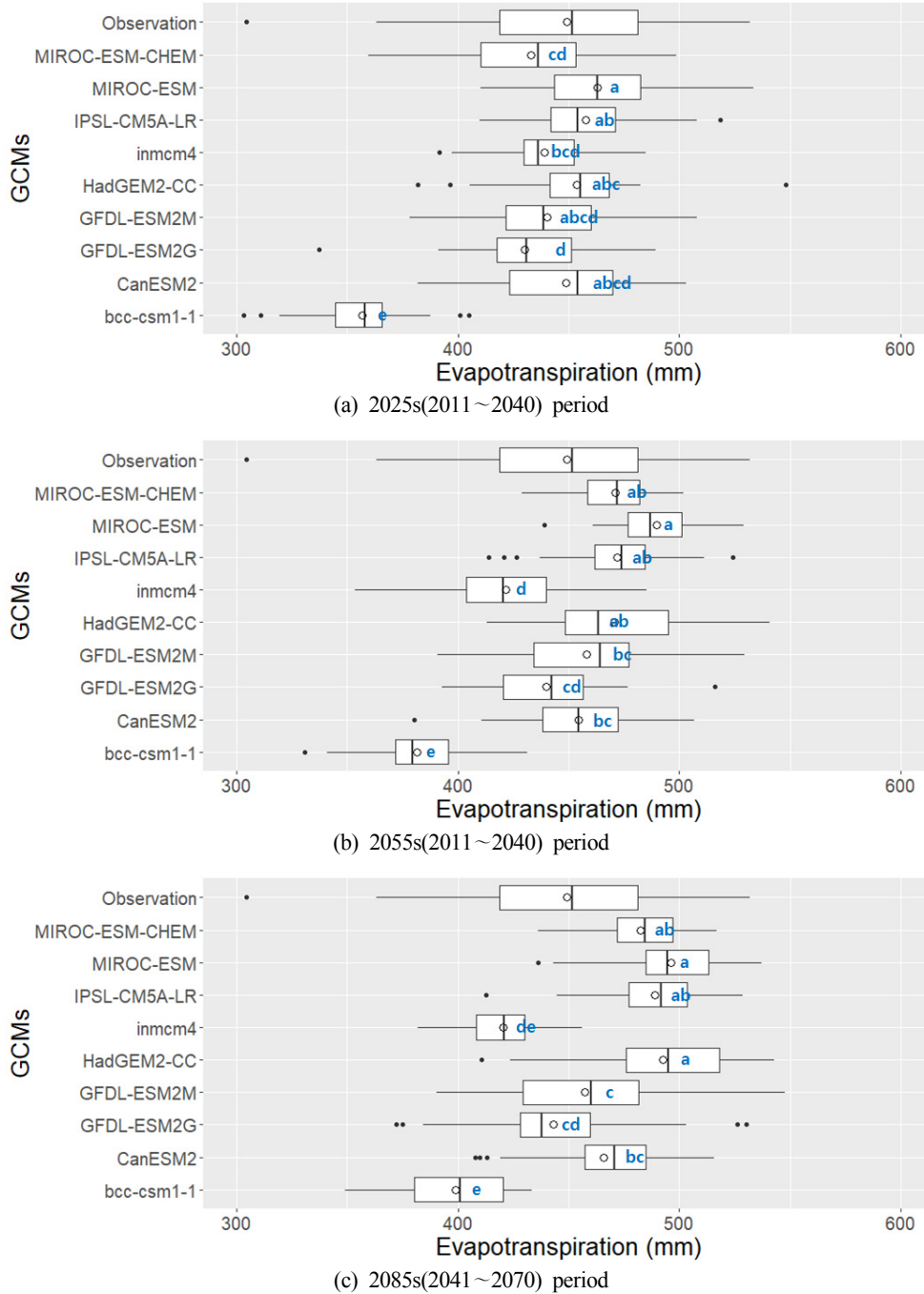


Fig. 6. LSD test result for GCMs. For the historical period, the observation and all GCMs were classified in the same group. For the future period, bcc-csm1-1 was classified as a different group from other GCMs.

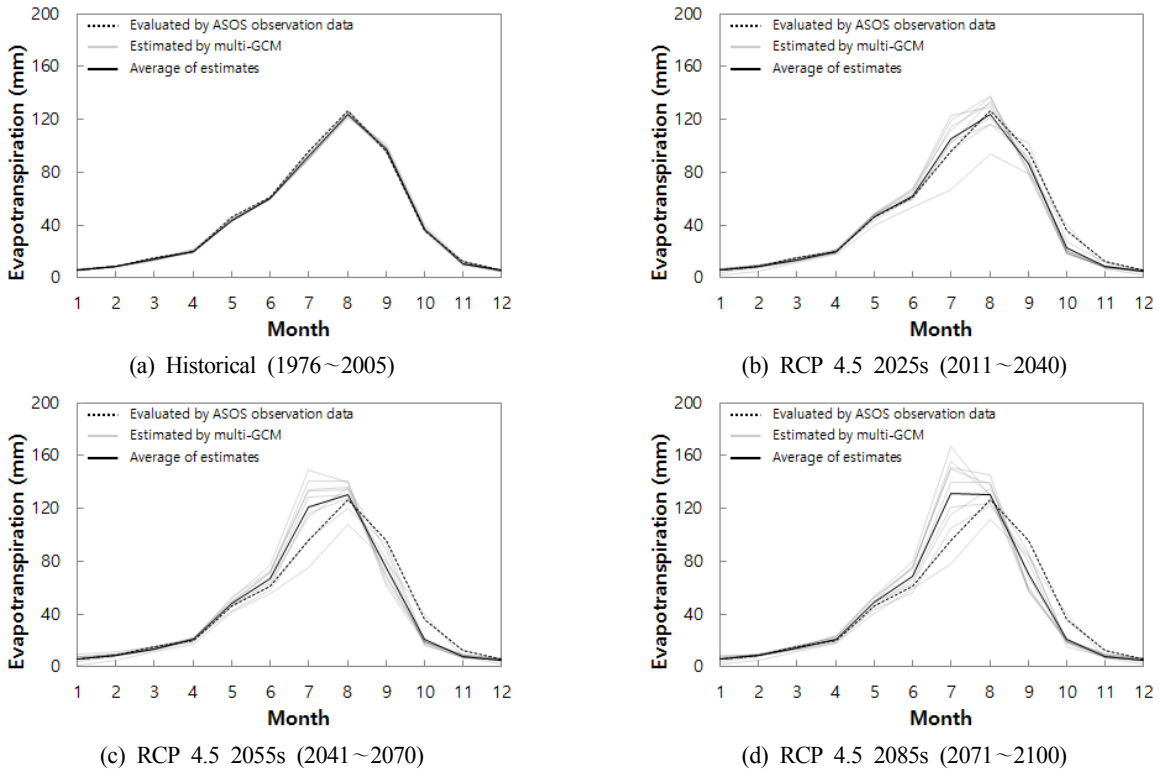


Fig. 7. Monthly evapotranspiration changes with RCP 4.5 climate change scenarios.

났으나 기후변화에 따라 7월의 증발산량이 급격히 증가하는 것으로 예측되었으며 9, 10월의 증발산량은 감소하는 것으로 예측되었다. 이러한 변화는 대기 중 이산화탄소 농도와 기온의 증가가 상대적으로 높은 RCP 8.5 시나리오에서 큰 것으로 나타났다.

증발산량이 가장 많은 시기가 7월로 옮겨가는 원인은 논벼 생육기간 단축이 원인으로 판단된다. 기온이 상승하면 식물이 생육종료에 도달하는데 필요한 온도인 잠재열단위 (PHU, Potential Heat Unit)를 빠르게 채우게 된다 (Choi et al., 2017(b)). 따라서 논벼는 빠른 기간 내에 성숙에 도달하므로 증발산량이 가장 많은 시기가 앞당겨지는 것으로 판단된다. 한편, 9, 10월의 증발산량이 기준년도보다 감소하는 원인은 엽면적의 감소시기가 앞당겨지기 때문이다. PHU의 80%를 채운 이후부터 광합성을 하는 엽면적 (Green LAI)이 감소함에 따라 LAI가 감소하며 PHU를 모두 채우면 식물은 더 이상 증산을 하지 않는다.

4. 요약 및 결론

기후변화 시나리오는 불확실성을 내포하고 있다. MME 접

근방법은 기후변화 시나리오의 불확실성 범위를 제시하고 보다 신뢰도 있는 예측 결과를 제시할 수 있다. 본 연구에서는 APEC 기후센터에서 생산한 상세화된 일 단위 기후변화 시나리오를 사용하여 MME 접근방법으로 논벼 증발산량의 기후변화 영향을 평가하였다. 증발산량 산정모델은 논 생산 환경과 작물 생육반응을 반영할 수 있는 APEX-Paddy 모델을 사용하였으며 9개의 GCM을 적용하였다.

기후변화 영향평가에 앞서 증발산량의 재현성을 평가한 결과 9개의 GCM 모두 과거 재현기간의 증발산량이 과거 관측결과와 유사한 분포를 보이는 것으로 나타났다. 증발산량의 연 단위 시계열평가를 수행한 결과 증발량은 증가하는 경향을, 증산량은 감소하는 경향을 나타냈다. 증발산량은 기후변화에 따라 지속적으로 증가하는 것으로 나타났으며 월간 증발산량 변화의 경우 기후변화로 인하여 증발산량이 가장 많은 시기가 8월에서 7월로 옮겨가는 것으로 나타났다. 9월과 10월의 증발산량은 오히려 줄어드는 경향을 보였다. 이러한 결과는 고온으로 인해 벼의 생육이 앞당겨지기 때문인 것으로 판단된다. 변화량은 RCP 8.5 시나리오가 RCP 4.5 시나리오에 비하여 큰 것으로 나타났다.

전국 종관기상관측소의 관측자료 중 본 연구에서 활용 가

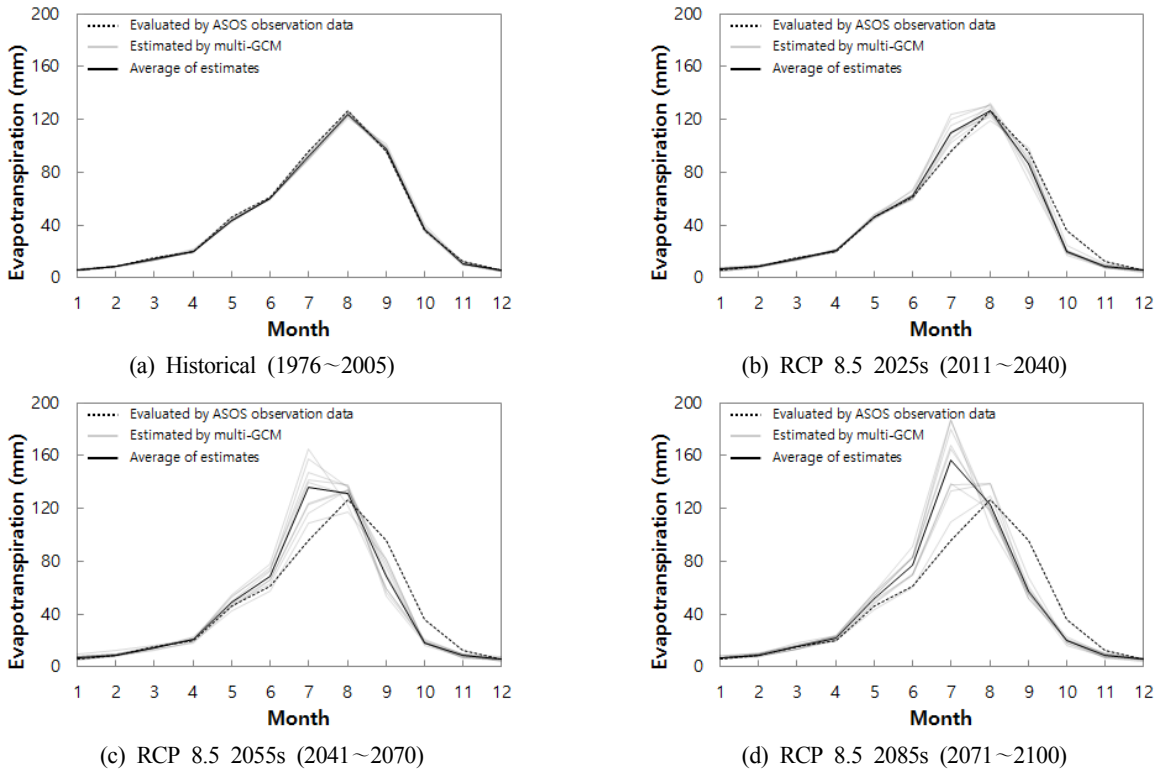


Fig. 8. Monthly evapotranspiration changes with RCP 8.5 climate change scenarios.

능한 자료는 8개 지역에 불과하였다. 1976년부터 일사량 자료를 확보한 측후소가 10개 지역에 불과하며 다른 여러 지역에서 여름철 일사량이 외기복사량을 상회하는 값이 도출되는 등의 문제가 발생하였다. 또한 연구대상 지역인 수원의 1985년 일사량 관측결과는 인접 측후소의 관측결과와 비교하였을 때 신뢰도가 떨어지는 것으로 판단하였다. 따라서 기후변화 영향평가는 기준이 되는 과거 관측 자료의 품질에 대한 부분을 충분히 검토한 후에 이루어져야 할 것이다.

논벼 증발산량의 증가는 논벼 생산을 위해 더 많은 물이 소요됨을 의미한다. 논에 관개하기 위한 수리구조물의 규모가 지금과 같다면 미래에는 가뭄의 빈도가 증가하고 가뭄심도가 깊어질 우려가 있다. 또한 최대 증발산량 시기의 변화는 가뭄의 발생 시기에도 영향을 줄 것으로 판단된다. 한편, 기존의 기후변화 영향에 대한 정책적 연구는 국가 기후변화 표준시나리오로서 단일 GCM에 의한 분석이 주를 이루었다. 하지만 단일 시나리오를 사용하여 정책을 결정할 경우 예측불확실성에 의한 과다 혹은 과소설계의 위험성이 뒤따른다. 따라서 기후변화 적응을 위한 정책 수립 시 다양한 기후변화 시나리오를 고려한 수리구조물 설계 및 운영 기준을 사용하는 안을 채택할 필요가 있다.

RCP 4.5 시나리오에 대하여 bcc-csm1-1 GCM의 예측결과는 과거 재현기간의 값을 고려하였을 경우 신뢰도가 떨어지는 것으로 나타났다. bcc-csm1-1 적용 결과를 제거할 경우 불확실성의 범위가 줄어드는 것은 명백하나, 해당 GCM을 기후변화 영향평가 시 제거하는 것이 옳은 판단인지 혹은 분석 목적 (생산량, 유출량 등)에 따라 예측 신뢰도가 떨어지는 GCM들을 포함하거나 제외할 것인가에 대한 부분은 연구자들 간에 논의가 필요하다.

본 연구는 기후변화에 따른 논벼 증발산량 평가 시 기후에 따른 작물생육반응을 고려하였다는 것과 기후변화 시나리오의 불확실성을 고려하여 MME 방법을 적용하여 논벼 증발산량을 평가하였다는데 의의가 있다. 한편 본 연구는 농작업이 현재와 같이 유지된다는 가정 하에 분석을 수행하였다. 그러나 기후가 변함에 따라 논벼 재배방법이 변할 것으로 예상된다. 품종을 중생종에서 만생종으로, 만생종에서 극만생종으로 바꾸거나 이앙시기를 늦출 수도 있다. 향후에는 이러한 기후변화 적응 방안으로서의 벼 품종의 변화, 재배시기의 변화 등을 고려한 기후변화 영향분석이 이루어져야 할 것이다. 또한 본 연구에서는 MME 적용 시 각 GCM 분석결과를 단순 평균하여 사용하였으나 예측 신뢰도를 지수화하고 이를 가중

치로서 적용하여 평균을 할 경우 향후 bcc-csm1-1과 같이 예측 신뢰도가 떨어지는 GCM에 의한 영향을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업 (과제번호: PJ010063)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. 1998. FAO Irrigation and drainage paper No. 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome., 56(97).
- Baier W, Robertson GW. 1965. Estimation of latent evaporation from simple weather observations. Canadian Journal of Plant Science 45(3): 276-284.
- Cho J. 2013. Assessing the Climate Change Impacts on Agricultural Reservoir considering Uncertainty, APEC Climate Center, Busan, Korea. (in Korean with English abstract)
- Cho J, Hwang S, Go G, Kim KY, 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)
- Choi SK, Jeong J, Kim MK. 2017(a). Simulating the Effects of Agricultural Management on Water Quality Dynamics in Rice Paddies for Sustainable Rice Production –Model Development and Validation. Water, 9(11): 869.
- Choi SK, Kim MK, Jeong J, Choi D, Hur SO. 2017(b). Estimation of Crop Yield and Evapotranspiration in Paddy Rice with Climate Change using APEX-Paddy Model. Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers, 59(4): 27-42. (in Korean with English abstract)
- Chung U, Cho J, Lee EJ. 2015. Evaluation of agro-climatic index using multi-model ensemble downscaled climate prediction of CMIP5. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 17(2): 108-125. (in Korean with English abstract)
- Hargreaves GH, Samani ZA. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. American Society of Agricultural Engineers 1(2):96-99.
- Hong, EM, Choi JY, Lee SH, Yoo SH, Kang MS. 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 with English abstract)
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Kim TG, Suh K, Nam WH, Lee J, Yoo SH, Hong SO. 2016. Design and Implementation of Reference Evapotranspiration Database for Future Climate Scenarios, Journal of Korean Society of Rural Planning 22(4): 71-80. (in Korean with English abstract)
- Kimball, BA, Idso SB. 1983. Increasing atmospheric CO₂: Effects on crop yield, water use, and climate. Agri. Water Manage. 7: 55 - 72.
- Lee JK, Kim YO. 2012. Selecting Climate Change Scenarios Reflecting Uncertainties, Atmosphere 22(2): 149-161. (in Korean with English abstract)
- Miyazaki N, Kamewada K, Iwasaki S. 2005. Quality changes of agricultural water passing through paddy fields. Bull. Tochigi Prefect. Agric. Exp. Stn. 55: 45-55.
- Monteith JL. 1964. Evaporation and environment. Symposia of the society for experimental biology 19: 205-234.
- Nam WH, Choi JY, Jang MW, Hong EM. 2013. Agricultural drought risk assessment using reservoir drought index. Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, 55(3): 41-49. (in Korean with English abstract)
- National Institute of Meteorological Research (NMIR). 2009. Understanding of Climate Change 2, Climate change in the Korean Peninsula: Present and future: Focused on research performance by National Institute of Meteorological Research, Seoul (in Korean)
- Neitsch SL, Arnold JG, Kiniry JR, Williams JR. 2011. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009; Texas Water Resources Institute Technical Report No. 406, Texas Water Resources Institute, Texas A&M University, Temple, TX, USA.

- Penman HL. 1948. Natural evaporation from open, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 193(1032): 120-145.
- Priestley CHB, Taylor RJ. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly weather review* 100(2): 81-92.
- Rural Development Administration (RDA). 2002. Crop Test Report, Rural Development Administration, Wanju-gun, Korea.
- Sakaguchi A, Eguchi S, Kato T, Kasuya M, Ono K, Miyata A, Tase N. 2014. Development and evaluation of a paddy module for improving hydrological simulation in SWAT. *Agric. Water Manag.*, 137, 116-122.
- Steduto P, Hsiao TC, Fereres E, Raes D. 2012. Crop yield response to water, FAO, Rome. 1028.
- Stockle CO, Williams JR, Rosenberg NJ, Jones CA. 1992. A method for estimating the direct and climatic effects of rising atmospheric carbon dioxide on growth and yield of crops: Part I—Modification of the EPIC model for climate change analysis. *Agricultural Systems* 38(3): 225-238.
- Williams JR, Izaurralde RC. 2006. The APEX model. In: Singh VP, Frevert DK (ed) *Watershed Models*, CRC Press, Taylor & Francis: Boca Raton, FL, USA, pp.437-482.
- Xu Z, Jiang Y, Jia B, Zhou G. 2016. Elevated-CO₂ response of stomata and its dependence on environmental factors. *Frontiers in plant science* 7: 657.
- Yoo SH, Choi JY, Jang MW. 2006. Estimation of Paddy Rice Crop Coefficients for FAO Penman-Monteith and Modified Penman Method, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 56(4): pp.59-68. (in Korean with English abstract)
- Yoo SH, Choi JY, Lee SH, Oh YG, Park NY. 2012. 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 with English abstract)
- Yoo SH, Kim T, Lee SH, Choi JY. 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*, 57(5): pp.69-80. (in Korean with English abstract)