

## 고해상도(1km) SSP-RCP시나리오 기반 한반도의 벼 기후생산력지수 변화 전망

조세라<sup>1</sup>, 김용석<sup>1\*</sup>, 허지나<sup>1</sup>, 이준리<sup>2</sup>, 김응섭<sup>1</sup>, 심교문<sup>1</sup>, 강민구<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>국립농업과학원 기후변화평가과, <sup>2</sup>울산과학기술원 지구환경도시건설공학과  
(2023년 11월 09일 접수; 2023년 12월 03일 수정; 2023년 12월 03일 수락)

## Climatic Yield Potential Changes Under Climate Change over Korean Peninsula Using 1-km High Resolution SSP-RCP Scenarios

Sera Jo<sup>1</sup>, Yong-Seok Kim<sup>1\*</sup>, Jina Hur<sup>1</sup>, Joonlee Lee<sup>2</sup>,  
Eung-Sup Kim<sup>1</sup>, Kyo-Moon Shim<sup>1</sup>, Mingu Kang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Climate change Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, 166, Nongsaengmyeong-ro,  
Iseo-myeon, Wanju-gun, Jeollabuk-do 55365, Republic of Korea

<sup>2</sup>School of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology, Ulsan,  
Republic of Korea

(Received November 09, 2023; Revised December 03, 2023; Accepted December 03, 2023)

### ABSTRACT

The changes in rice climatic yield potential (CYP) across the Korean Peninsula are evaluated based on the new climate change scenario produced by the National Institute of Agricultural Sciences with 18 ensemble members at 1 km resolution under a Shared Socioeconomic Pathway (SSP) and Representative Concentration Pathways (RCP) emission scenarios. To overcome the data availability, we utilize solar radiation for CYP instead of sunshine duration which is relatively uncommon in the climate prediction field. The result show that maximum CYP(CYPmax) decreased, and the optimal heading date is progressively delayed under warmer temperature conditions compared to the current climate. This trend is particularly pronounced in the SSP5-85 scenario, indicating faster warming, except for the northeastern mountainous regions of North Korea. This shows the benefits of lower emission scenarios and pursuing more efforts to limit greenhouse gas emissions. On the other hand, the CYPmax shows a wide range of feasible futures, which shows inherent uncertainties in future climate projections and the risks when analyzing a single model or a small number of model results, highlighting the importance of the ensemble approach. The findings of this study on changes in rice productivity and uncertainties in temperature and solar radiation during the 21st century, based on climate change scenarios, hold value as fundamental information for climate change adaptation efforts.

**Key words:** SSP-RCP scenario, Climatic yield potential, Climate change



\* Corresponding Author : Yong-Suk Kim  
(cyberdoli@korea.kr)

## I. 서 론

기후는 농업에 직접적으로 영향을 주는 요소로, 기후변화에 따른 농업환경의 변화는 농업의 형태, 생산성, 품질, 등 농업 전반에 영향을 미친다(Lee, 2012). 최근 발표된 기후변화에 관한 정부간협의체(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change) 제6차 평가보고서(AR6, The Sixth Assessment Report)에 따르면 산업화 이전 대비 현재(2011~2020년)의 지구 표면 온도는 1.1℃ 상승하였으며 가까운 미래(2021~2040년)에 1.5℃ 상승에 도달할 것으로 전망하였다(IPCC, 2023). 또한, 지난 IPCC 제5차 평가보고서(AR5, The Fifth Assessment Report)에서 21세기 후반(2081~2100년) 전지구 지표온도 증가의 범위를 1.0~3.7℃로 보고한 것에 반해 AR6에서는 새로운 온실가스 배출시나리오를 이용하여 1.4~4.4℃로 더 높은 지구온도상승을 전망하고 있다. 이러한 지구온도상승에 따른 지역적 기후 변화는 농업환경의 변화와 밀접한 연관이 있기 때문에 상세하고 정확한 미래예측정보를 바탕으로 변화에 따른 피해를 최소화할 필요가 있다.

한편, 아시아 지역의 주요 식량작물인 벼 가운데 한국 및 일본 지역에서 주로 재배되는 자포니카 품종은 계절에 따른 기온차가 큰 온대지역의 기후특성에 알맞은 품종으로 등숙기간의 적정 기온은 20~23℃로 알려져 있으며 일장에 민감한 특징을 가진다. 현재의 벼 작부 체계 및 재배활동, 품종의 선택 등 재배형태는 벼의 출수 후 최적의 등숙환경에 노출될 수 있도록 지역적 기후특성에 맞춰져 있다. 이러한 벼의 생육특징을 반영하여 등숙기 평균기온과 일조시간을 종합적으로 고려하는 기후생산력지수(CYP, Climatic Yield Potential)는 농업부문의 기후변화 영향평가에 자주 사용되었다. 관측 기반의 연구에서는 비교적 짧은 기간인 12년(2001~2012년)의 기간에 대해 CYP지수의 감소가 관측됨을 설명하였고 이와 관련된 기후요인의 변화로 등숙기의 고온 증가 및 일조시간 부족을 원인으로 분석하였다(Shim *et al.*, 2014). Ahn *et al.* (2016a)에서는 제 5차 국제 결합모델 상호비교 프로젝트 Coupled Model Inter comparison Project, CMIP 5) 자료를 역학적 상세화 한 기후변화 시나리오 자료를 이용하여 CYP의 미래변화를 분석하였다. 연구에 따르면 한반도 북동쪽 및 러시아의 극동지역에서 기온상승의 효과로 기후생산성이 증가할 것으로 전망되었으

며 이외의 한반도를 포함한 동아시아지역에서는 CYP의 감소를 전망하였다. 한편 해당 논문은 단일모형(HadGEM2-AO, Hadley Center Global Environment Model version 2 - Atmosphere Ocean)이 모의한 결과를 분석하였으므로 전망자료에 대한 불확실성을 분석하기에는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 Ahn *et al.* (2021)에서는 CMIP5 참여 전지구모형(General Circulation Model, GCM) 두 개를 각각 두 개의 지역기후모형으로 역학적 규모축소하여 총 4개의 앙상블 멤버를 이용한 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP) 2종(RCP4.5, RCP8.5)에 대해 벼 기후생산력 변화를 살펴보았다. 해당 연구에 따르면 현재의 최적출수일에 출수가 이루어질 경우 한반도 북동해안지역을 제외한 대부분의 지역(서부 및 남부)에서 현재기후보다 약 93 (RCP8.5)~95 (RCP4.5) % 감소할 것으로 전망되지만 최적출수일은 약 12일가량 늦어지고, 쌀 생산량은 한반도 남동해안지역을 제외한 대부분의 지역에서 현재기후대비 약 104 (RCP 8.5)~105 (RCP 4.5) % 증가할 것으로 전망하였다.

또한, CYP지수 보다 조금 더 벼의 생태형과 생육단계를 고려할 수 있는 벼 생육모델에 기후변화 시나리오 자료를 적용한 연구도 있다(Lee *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2015). 비교적 최신의 시나리오인 RCP시나리오를 기반으로 분석한 Kim *et al.* (2015)에서는 CMIP5 참여 GCM의 하나인 HadGEM2-AO모형으로부터 산출된 시나리오 자료를 지역기후 모형인 Hadley Centre Global Environmental Model version 3 regional climate model을 통해 12.5km 해상도로 역학적 규모축소한 단일 앙상블자료를 벼 생육모형인 ORYZA2000모형의 입력자료로 활용하여 미래 벼 생산성의 변화를 설명하였다. 그 결과 RCP8.5 시나리오 하에서 내륙 평야지역의 쌀 생산성이 2020년까지 현재 대비 25%가량 증가한 후 크게 감소하여 21세기 말에는 80%이상 감소할 것으로 전망되었다. 이처럼 RCP시나리오를 기반으로 제한된 앙상블 멤버를 이용해 기후변화가 쌀 생산성에 미치는 영향을 평가한 선행연구들은 미래에 발생할 수 있는 변화의 범위 및 불확실성을 설명하기에 앙상블 멤버의 수가 작으며, 한반도영역에 대해 지리적 특성이 반영된 농업환경을 설명하기에 공간적 해상도에 한계를 지녔다. 또한, RCP시나리오가 아닌 사회경제적 경로를 포함한 최신의 기후변화 시나리오로 업데이트하여 분석할 필요가 있다.

최근 국립농업과학원에서는 신기후변화 시나리오에 대응하고 농업 및 응용분야의 활용성을 높이기 위해 한반도지역에 대하여 AR6에서 사용한 공통사회경제경로(Shared Socioeconomic Pathway, SSP)-RCP 배출량 시나리오(van Vuuren *et al.*, 2014) 기반 기후변화 시나리오 자료를 생산하였다(RDA, 2021). 본 연구에서는 최신의 신기후변화 시나리오를 기반 1km 고해상도로 생산된 다양한 앙상블 멤버들을 이용하여 남한을 포함한 한반도 전체의 벼 기후생산성 변화를 평가하였다.

## II. 자료 및 방법

### 2.1. 한반도 고해상도 기후변화 시나리오

한반도 지역의 기후변화에 따른 기후생산력지수의

변화를 분석하기 위하여 국립농업과학원의 CMIP6 1km 고해상도 SSP-RCP 시나리오자료를 이용하였다. 국립농업과학원의 SSP-RCP 시나리오는 국가 표준시나리오로 인정받은 기후변화 전망자료로, CMIP6 참여 GCM중 18개의 GCM (Table 1)을 통해 생산된 전지구 기후변화 시나리오자료를 SQM (simple quantile mapping)방법을 이용해 통계적 규모축소한 지역기후변화 시나리오로(CMIP6-SQM) 한반도 전역에 대한 고해상도 앙상블 기후변화정보를 제공한다. 시나리오의 종류는 현재기후(1980~2010)의 historical시나리오, 미래기후(2021~2100년)의 SSP-RCP 시나리오 4종(SSP1-26, SSP2-45, SSP3-70, SSP5-85)를 제공한다. 제공 변수는 농업분야에서 자주 쓰이는 최고기온, 최저기온, 강수량, 일사량, 상대습도, 풍속이며, 자세한 상세화 과정 및 자료에 대한 설명은 RDA (2021)에

**Table 1.** List of 18 Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 participating General Circulation Models

Institute	GCM	Reference
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	GFDL-ESM4	Dunne <i>et al.</i> , 2020
Meteorological Research Institute, Japan	MRI-ESM2-0	Yukimoto <i>et al.</i> , 2019
Centre National de Recherches Meteorologiques, France	CNRM-CM6-1	Voldoire <i>et al.</i> , 2019
	CNRM-ESM2-1	Séférian <i>et al.</i> , 2019
Institute Pierre-Simon Laplace, France	IPSL-CM6A-LR	Boucher <i>et al.</i> , 2018
Max Planck Institute for Meteorology, Germany	MPI-ESM1-2-HR	Müller <i>et al.</i> , 2018
	MPI-ESM1-2-LR	Mauritsen <i>et al.</i> , 2019
Met office Hadley Centre, UK	UKESM1-0-LL	Sellar <i>et al.</i> , 2019
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australian Research Council Centre of Excellence for Climate System Science, Australia	ACCESS-CM2	Bi <i>et al.</i> , 2020
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia	ACCESS-ESM1-5	Ziehn <i>et al.</i> , 2019
Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis, Canada	CanESM5	Swart <i>et al.</i> , 2019
Institute for Numerical Mathematics, Russia	INM-CM4-8	Volodin <i>et al.</i> , 2019a
	INM-CM5-0	Volodin <i>et al.</i> , 2019b
EC-Earth-Consortium	EC-Earth3	Döscher <i>et al.</i> , 2022
Japan Agency of Marine-Earth Science and Technology/Atmosphere and Ocean Research Institute/National Institute for Environmental Studies/RIKEN Center for Computational Science, Japan	MIROC6	Tatebe <i>et al.</i> , 2019
	MIROC-ES2L	Hajima <i>et al.</i> , 2020
NorESM Climate modeling Consortium consisting of CICERO, Norway	NorESM2-LM	Seland <i>et al.</i> , 2020
National Institute of Meteorological Sciences/Korean Meteorological Administration, Rep. Korea	KACE-1-0-G	Lee <i>et al.</i> , 2020

소개 되어있다. 본 연구에서는 이들 시나리오 가운데 현재기후 실험인 historical시나리오(HIS)와 기후변화 완화 및 사회경제 발전 정도가 중간 단계를 가정하는 경우인 SSP2-45 (SSP245) 시나리오, 그리고 산업기술의 빠른 발전에 중점을 두어 화석연료 사용이 높고 도시 위주의 무분별한 개발이 확대될 것으로 가정하는 경우인 SSP5-85 (SSP585) 시나리오를 분석대상으로 선정하였다(O'Neill et al., 2014). 분석 기간은 현재 기간(REF, 1981~2010년), 21세기 중반(MID, 2041~2070년), 21세기 후반(LATE, 2071~2100년)으로 정의하였다. 분석영역은 고해상도 기후변화시나리오가 제공되는 한반도 전제영역(Korean Peninsula, KP) 및 남한(South Korea, SK)과 북한(North Korea, NK)영역으로 선정하였다.

## 2.2. 일사량 및 일조시간 관측자료

일조시간(sdur, hr/day)과 일사량(srad, MJ/m<sup>2</sup>)의 관계를 파악하고, HIS 실험의 현재기후 CYP 재현성을 평가를 위해 기상청의 일사량 및 일조시간 관측 자료를 수집하였다. 관측 지점은 두 변수를 모두 관측하는 16개 기상청 종관기상관측지점(춘천, 강릉, 서울, 인천, 원주, 수원, 서산, 청주, 포항, 대구, 전주, 광주, 부산, 목포, 진주, 천안)을 선정하였다. 수집 기간은 REF기간에 해당되는 1981~2010년이며, 해당 기간에 대한 일별 sdur 및 srad를 수집하였다. 해당 자료는 기상청의 기상자료개방포털(<https://data.kma.go.kr>)에 공개되어 있다.

## 2.3. 기후생산력지수 (Climatic Yield Potential, CYP)

기후생산력지수는 벼의 등숙에 가장 중요한 요소인 일사조건과 벼 생육 적정기온을 고려한 기후적 잠재생산량을 나타내는 지수로(Hanyu et al., 1966; Ahn et al., 2021), 식은 다음과 같다.

$$CYP_{sdur} = S_{sdur}(4.14 - 0.13(T - 21.4)^2) \dots (1)$$

여기서  $S_{sdur}$ 는 출수일로부터 40일 동안의 누적 일조시간, T는 출수일로부터 40일 동안의 평균기온을 나타낸다. 해당 식은 실제 쌀의 단위면적당 생산량(kg/10<sup>3</sup>m<sup>2</sup>)관측에 접합(fitting)한 경험식이며, 단위는 kg/10<sup>3</sup>m<sup>2</sup>이다.

한편, 기후예측 모형에서는 일사량이 일조시간보다

일반적인 변수로, CMIP6의 공식적인 변수가이드에도 일조시간은 포함되어 있지 않다(<https://pcmdi.llnl.gov/CMIP6/Guide/dataUsers.html>). 본 연구에서는 등숙기간 동안의 일사조건을 나타낼 수 있는 일사량 자료를 일조시간을 대신하여 활용하였다(식 2).

$$CYP_{srad} = S_{srad}(4.14 - 0.13(T - 21.4)^2) \dots (2)$$

$S_{srad}$ 는 출수일로부터 40일동안의 누적 일사량이고,  $CYP_{srad}$ 값의 단위는 MJ C<sup>2</sup>m<sup>-2</sup>이다. 이렇게 일조시간을 대신하여 일사량을 사용한 결과 차이는 3장에서 자세히 설명하였다. 평균기온은 최고기온과 최저기온의 평균으로 정의하였으며, 일사량과 평균기온을 이용하여 기후생산력지수(CYP)가 최대가 되는 최적출수일(optimal heading date)을 추정하기 위해 7월 1일~9월 30일을 각각 출수일로 가정하여 CYP를 구한 후 가장 큰 CYP가 나타나는 최적출수일을 maxdate, 그때의 CYP 값을  $CYP_{max}$ 로 정의하였다.

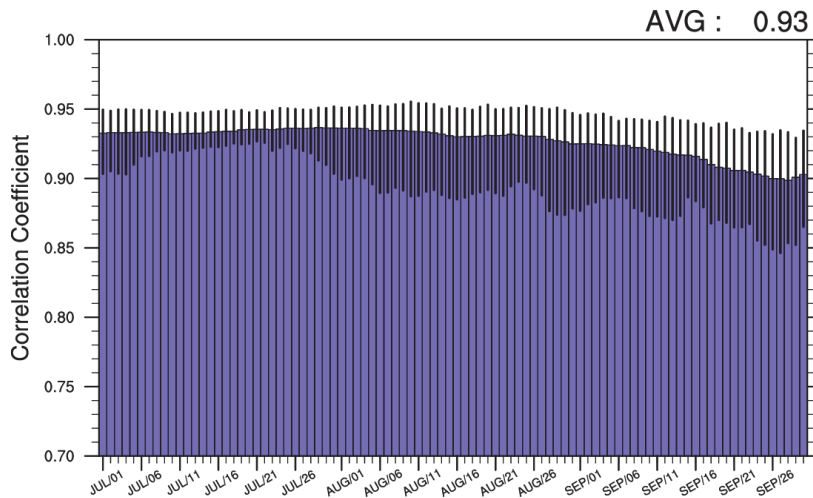
일반적으로 기후값에 대하여 일정한 패턴을 가지며 나타내는 편차를 모형의 계통적 오차라 하며, 이러한 계통적 오차를 효과적으로 제거하고 미래기후를 분석하기 위해 현재 대비 미래 변화량을 분석한다(Chen and Sun, 2013; Oh et al., 2014; Ahn et al., 2016b). 그러므로 기후생산력지수 및 관련 변수의 변화를 분석하기 위해 REF기간 기후값으로부터 변화량(%)을 분석하였다. 변화량(%)식은 다음과 같다(식3).

$$FUT_{change} = \frac{FUT - HIS}{HIS} \times 100 \dots (3)$$

## III. 결 과

### 3.1. 일사량을 이용한 기후잠재생산력 지수

CYP를 계산하기에 앞서 일조시간(sdur)과 일사량(srad)의 관계를 파악하기 위해 관측자료를 이용하여 출수일별 출수 후 40일 동안의 sdur과 srad의 시간상관계수를 분석해 보았다(Fig. 1). 막대그래프는 각 년도별 시간상관계수의 30년 평균, 선으로 나타낸 범위는 30년동안의 시간상관계수의 90%가 분포하고 있는 범위를 나타낸다. sdur과 srad는 전체 기간에 대해 평균 0.93의 높은 시간상관성을 가지며 출수일이 늦어질 수록 sdur과 srad의 40일동안의 상관관계는 낮아지는 경

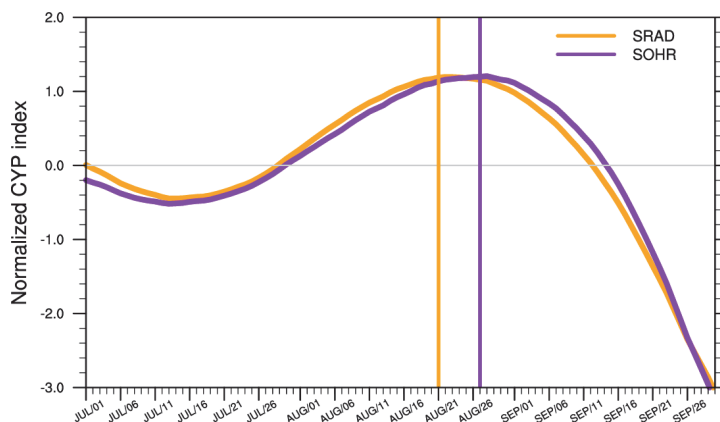


**Fig. 1.** Temporal correlation coefficient (TCC) between observed solar radiation and sunshine duration during the ripening period (40 days after the heading date) with respect to each heading date (X-axis). The bar denotes 30-year averaged TCC, and the lines show the 90% range of TCCs within 30 years.

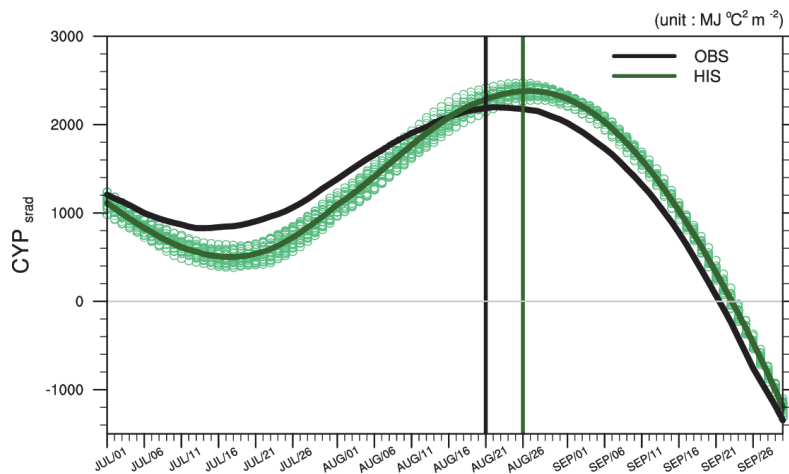
향이 나타나지만, 여전히 평균 0.9 이상의 높은 시간상관을 가지는 것으로 나타났다. 그러므로, 작물의 생리학적 관점에서 일사량과 일조시간은 서로 다른 작용을 하는 환경요소이지만, 본 연구에서는 기후변화 시나리오자료에서 제공하는 제한적인 변수를 활용하기 위해 두 변수 간의 통계적 관계성을 고려하여 일사량을 등속기 일조환경을 나타내는 지표로써 활용하였다.

그렇다면, 일사량으로 일조시간 자료를 대신했을 때 CYP 결과의 차이가 어떻게 달라지는지 확인해 보

기 위해 기상청 ASOS관측지점의 REF 기간에 대해 출수일 별 CYP 값의 30년 평균 기후값을 그려보았다 (Fig. 2). 단,  $S_{sch}$ 과  $S_{srad}$ 의 단위가 서로 다르므로 구해진 CYP는 30년간의 평균과 표준편차로 표준정규화하여 나타내었다. 그 결과 일사량으로 추정된 CYP 그래프와 일조시간으로 추정된 CYP 그래프의 형태가 서로 유사하게 나타났으며, maxdate이 나타나는 시점은  $CYP_{sch}$ 을 사용하였을 때 241일, 보다  $CYP_{srad}$ 을 사용하였을 때 235일로 일사량을 사용하였을 최적출수



**Fig. 2.** Normalized CYP climatology curve during REF period derived from observed solar radiation(orange) and sunshine duration (purple).



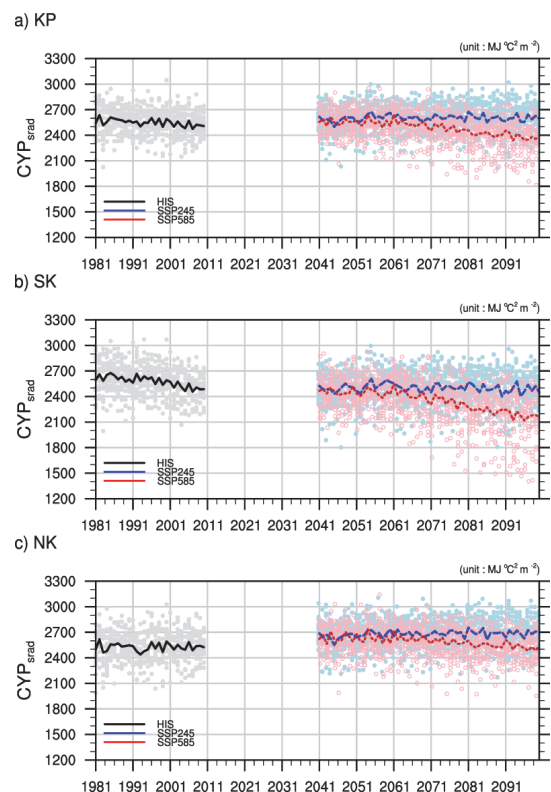
**Fig. 3.** CYP climatology curve of observation (black line) and HIS experiment (ensemble mean: green line, ensemble members: green dot) during REF period.

일을 6일가량 빠르게 모의하는 경향이 나타났다.

일조시간은 기상·기후 모델링 분야에서 불확실성이 큰 변수이고 제공되는 경우가 많지 않아, 농업분야에서 가장 중요한 변수 중 하나임에도 불구하고 기상·기후 모델링 자료의 활용 시 제약이 많은 변수이다. 그러므로  $CYP_{srad}$ 는 실제 쌀 생산량( $kg\ 10^3m^2$ )과 정확히 일치하지 않지만 기후요인에 따른 쌀 생산성의 지표로서 여전히 활용 가능한 것으로 판단된다(단,  $CYP_{srad}$ 의 단위  $MJ\ ^\circ C^2m^{-2}$ 는 분석에서 언급을 생략함).

### 3.2. 현재기후 모의성능 평가

기후변화량 분석에 앞서 모형의 기후생산력지수에 대한 모의 성능을 평가하기 위해, HIS 실험에 대하여 출수일 별 CYP 기후값을 관측과 비교해 보았다(Fig. 3). 검증자료는 일사량관측이 존재하는 16개 ASOS지점이며, 모형자료의 경우 1km 해상도의 고해상도 자료 이므로 다른 내삽법을 적용하지 않고 ASOS지점과 가장 가까운 격자 값을 추출하였다. 먼저 관측과 양상 불 평균을 비교해 보았을 때 모형이 관측의 CYP 기후값 곡선을 유사하게 모의하는 것으로 나타났으며, 점으로 나타낸 각 양상불멤버들 역시 REF기간의 기후값에 대해 비교적 높은 일치성을 나타내어 현재기간에 대해 복합적인 기후지수인 기후생산력지수의 변동을 관측과 유사하게 모의할 수 있는 것으로 나타났다. 한편, maxdate의 경우 관측이 235일인데 비해 5일 늦은 240일로 모의하여 관측에 비해 maxdate를 늦게 모의



**Fig. 4.** Time-series of the CYPmax under HIS (black), SSP245 (blue), and SSP585 (red) scenarios during the 21st century. The dots indicate the spread of each ensemble member (18 models) of HIS (grey), SSP245 (light blue), and SSP585 (light red) scenarios.



하는 경향을 확인할 수 있다. 이러한 모형의 모의 경향을 고려하여 미래 기후 변화 분석을 하기 위해 3.3절에서는 REF기간 기후값으로부터 변화량(%)을 분석하였다.

### 3.3. 기후변화에 따른 기후생산력 변화

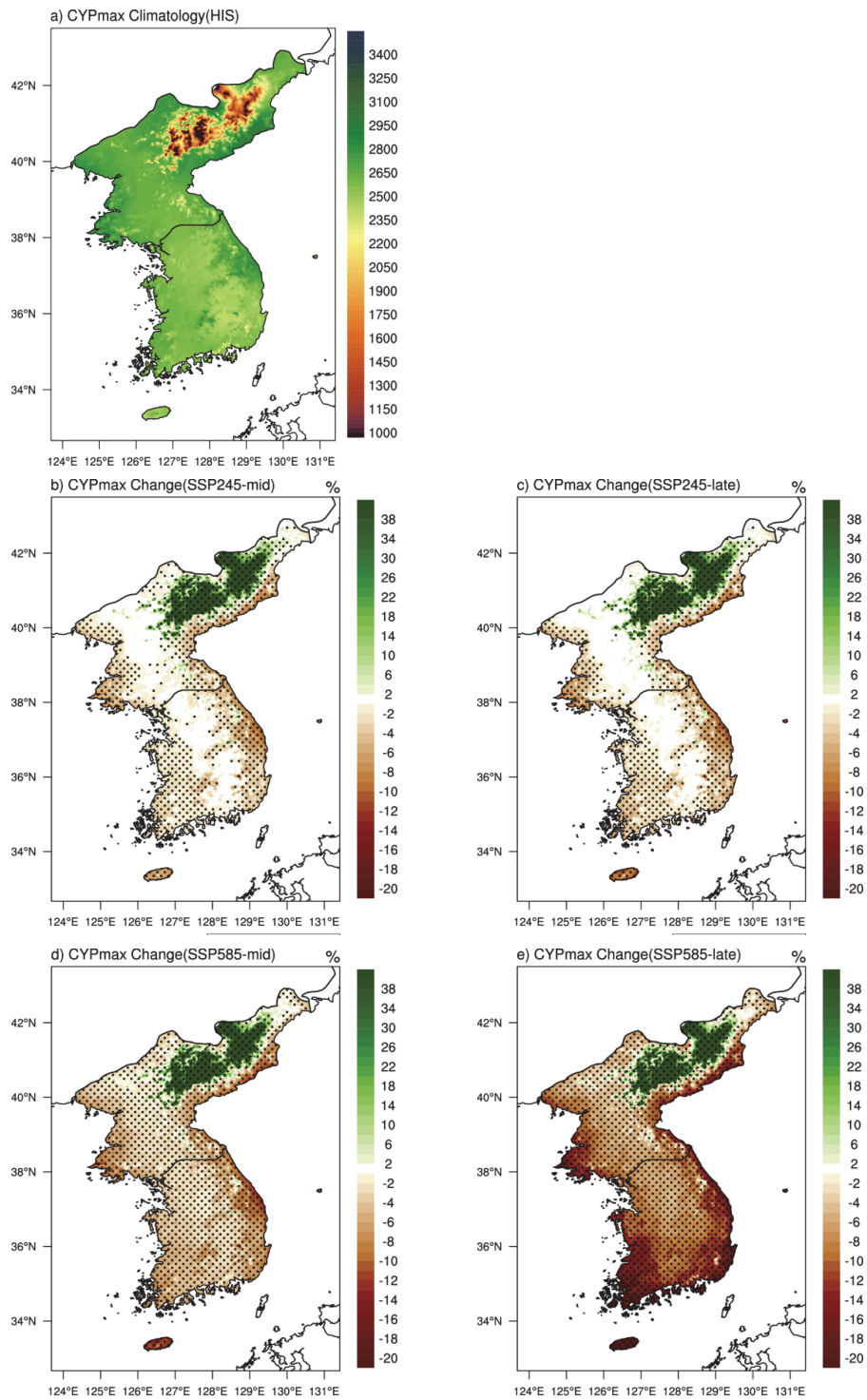
벼의 기후생산력지수가 각 시나리오 하에서 어떻게 변하는지 살펴보기 위해 REF 기간과 MID, LATE 기간에 대하여 각 년도 별 CYPmax 값을 SSP245, SSP585 두 가지 시나리오에 대해 한반도 전체, 남한, 그리고 북한 지역에 대한 면적평균값을 각각 시계열로 나타내었다(Fig. 3). 먼저 한반도 전체영역에 대한 CYPmax의 변화는 REF 기간에 감소하는 추세를 나타냈으며(Fig. 4a) 이는 남한지역에서의 뚜렷한 감소추세 때문인 것으로 분석된다(Fig. 4b). REF 기간 한반도 전체 영역의 CYPmax 변화경향은  $-2.40/\text{year}$ , 남한 지역은  $-5.52/\text{year}$ 로 북한지역( $+0.09/\text{year}$ )을 제외하고 95% 신뢰수준에서 통계적으로 유의한 감소추세가 나타났다(Table 2). 이러한 감소 추세는 Shim *et al.* (2014) 에서의 결과와도 일치한다. 한반도 전역에 대한 미래기후의 경우 SSP245 시나리오를 따를 경우 21세기 중반 및 후반 모두 통계적으로 유의한 변화경향을 나타내진 않았으며 SSP585시나리오하에서는 21세기 후반 통계적으로 유의한 감소추세( $-5.03/\text{year}$ )가 나타났다(Table 2). 이를 남한과 북한의 지역으로 나눠서 분석할 경우 서로 다른 경향성을 나타내었는데, 남한의 경우 REF 기간의 감소 추세가 모든 시나리오에서 모두 유지되어 현재보다 기후생산력이 감소할 것으로 전망되었으며(Fig. 4b), SSP245에서의 기온기는 통계적으로 유의하지 않은 반면 SSP585 시나리오 하에서는 분석영역(한반도전체, 남한, 북한) 가운데 가장 가파르고 통계적으로 유의한 감소경향( $-8.01/\text{year}$ )이 나타났다(Table 2). 북한의 경우 현재, 그리고 SSP245

시나리오 하에서는 유의하지 않은 수준의 감소 혹은 SSP245-MID기간에 유의한 수준의 증가가 전망된 반면, SSP585 시나리오를 따를 경우 21세기 후반 CYPmax의 경향이 감소( $-3.04/\text{year}$ )하는 것으로 나타났다(Fig. 4c). 한편, 21세기 후반으로 갈수록 모든 영역에 대하여 SSP585 시나리오의 양상불 스프레드가 커지는 것으로 나타났다(Fig. 4). 이는 미래 예측자료의 분석 시 단일모형을 선택할 경우 발생할 수 있는 불확실성을 의미하며, 발생할 수 있는 변화의 범위를 제시함으로써 양상불 연구의 중요성을 확인할 수 있다.

각 분석 기간별 기후생산력을 공간적 분포에 따라 좀 더 자세히 살펴보면(Fig. 5), 먼저 HIS 시나리오 하에서 REF 기간에는 전체 영역 평균 2548.94, 남한 지역 평균 2577.10, 북한지역평균 2526.25로 나타났으며 북한에서 가장 고도가 높고 기온이 낮은 개마고원을 포함한 함경산맥 지역이 다른 지역에 대해 상대적으로 낮은 CYPmax 값을 보였다. 미래 변화값을 살펴보면 북한의 개마고원을 포함한 고산지대를 제외한 대부분의 영역에서 통계적으로 유의한 CYPmax의 감소가 나타났으며, SSP245 시나리오의 경우 21세기 중반과 후반 모두 중산간 지대를 제외한 주요 쌀 생산지역인 중부평야, 호남평야 및 서남부해안지역, 동해안 지역을 중심으로 더욱 뚜렷한 감소를 나타내었다(Fig. 5b, 5c). 북한 역시 현재의 주요 논 분포 지역인 황해남북도 및 평안남북도의 해안지역에서 통계적으로 유의한 쌀 생산량의 감소가 나타났고 함경남도 및 함경북도의 해안지역에서도 기후학적 쌀의 생산성은 감소할 것으로 전망되었다(Fig. 5b, 5c). 한편, SSP585 시나리오 하에서는 개마고원 및 함경산맥의 고산지대를 제외한 한반도 모든 지역에서 통계적으로 유의한 감소가 나타났으며 특히 남한지역에서는 20%이상 감소하는 지역도 나타났다. 이러한 결과는 CMIP5 GCM 2종을 이용한 Ahn *et al.* (2021)에서 최적출수일부터 등숙이 시작될 경우 CYP 최대값이 증가할 것으로 전망된 것

**Table 2.** The slope of the ensemble mean CYPmax time series in the REF, MID, and LATE future under the HIS, SSP245 and SSP585 scenarios. The asterisk (\*) indicates a 90% confidence level and \*\* indicates 95% confidence level

	HIS	SSP245		SSP585	
	REF	MID	LATE	MID	LATE
KP	-2.40**	1.10	-0.60	-1.17	-5.03*
SK	-5.52**	0.58	-1.37	-2.02*	-8.01*
NK	0.09	1.49*	-0.02	-0.51	-3.04*



**Fig. 5.** CYPmax climatology during REF period (a) and their changes with respect to HIS during MID, and LATE 21<sup>st</sup> century under SSP245(b,c) and SSP585(d,e) scenario.



과 상반된 결과로, RCP 시나리오보다 높은 기온증가가 전망되는 SSP-RCP 시나리오의 특성 및 선행연구보다 많은 시나리오(18개 앙상블멤버)를 고려한 결과로 판단된다. 면적평균값으로 살펴보면 SSP245의 경우 남한지역은 21세기 중반(후반) 2.64 % (3.1 %) 감소할 것으로, 북한지역은 5.67 % (6.52 %) 증가할 것으로 전망되었으며, 북한 지역 특히 북부 고산지역의 영향으로 한반도 전체 평균은 증가하는 것으로 나타났다(Table 3). SSP585 시나리오의 경우 남한의 경우 중반 및 후반 모두 각각 5.22%, 12.54% 감소할 것으로 전망되어 고농도 시나리오일수록, 기후변화가 진행될수록 생산성의 감소가 증가하는 특징을 보였다. 한편 북한의 경우 SSP245보다 낮은 증가를 나타내었고, 21세기 중반이 21세기 후반에 비해 현재대비 생산성의 증가량이 더 높은 것으로 나타났는데(Table 3), 이는 산악지역을 제외한 지역의 감소추세가 온실가스 강제력이 높은 시나리오일수록, 그리고 기후변화가 진행될수록 크기 때문인 것으로 분석된다(Fig. 5d, de).

기후에 따른 잠재적 생산력뿐만 아니라 기후변화 적응을 위한 벼의 생태형 및 농업활동 결정에 기초정보로 활용될 수 있는 maxdate의 변화를 시계열을 통해 분석해 보았다(Fig. 6). 최적출수일의 경우 모든 지역, 시나리오, 기간에서 뚜렷한 증가 추세를 보이고 있으며, 고농도 시나리오일수록, 기후변화가 진행되면 될

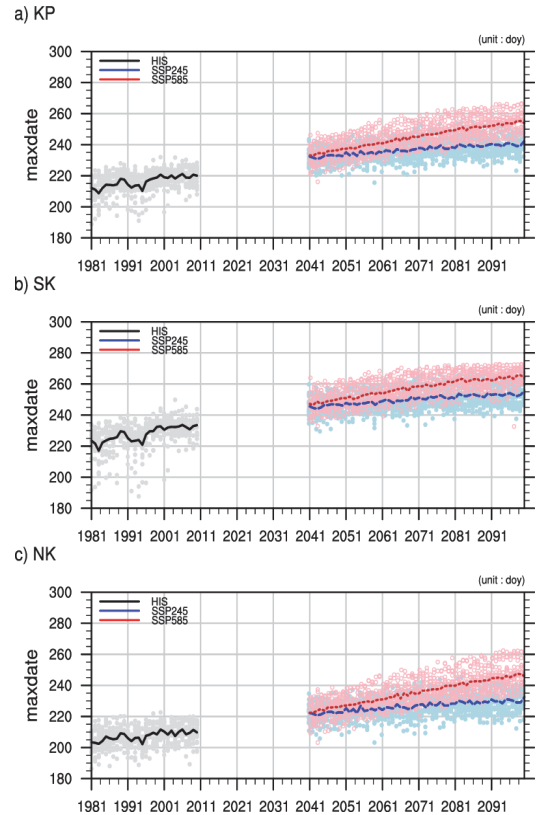


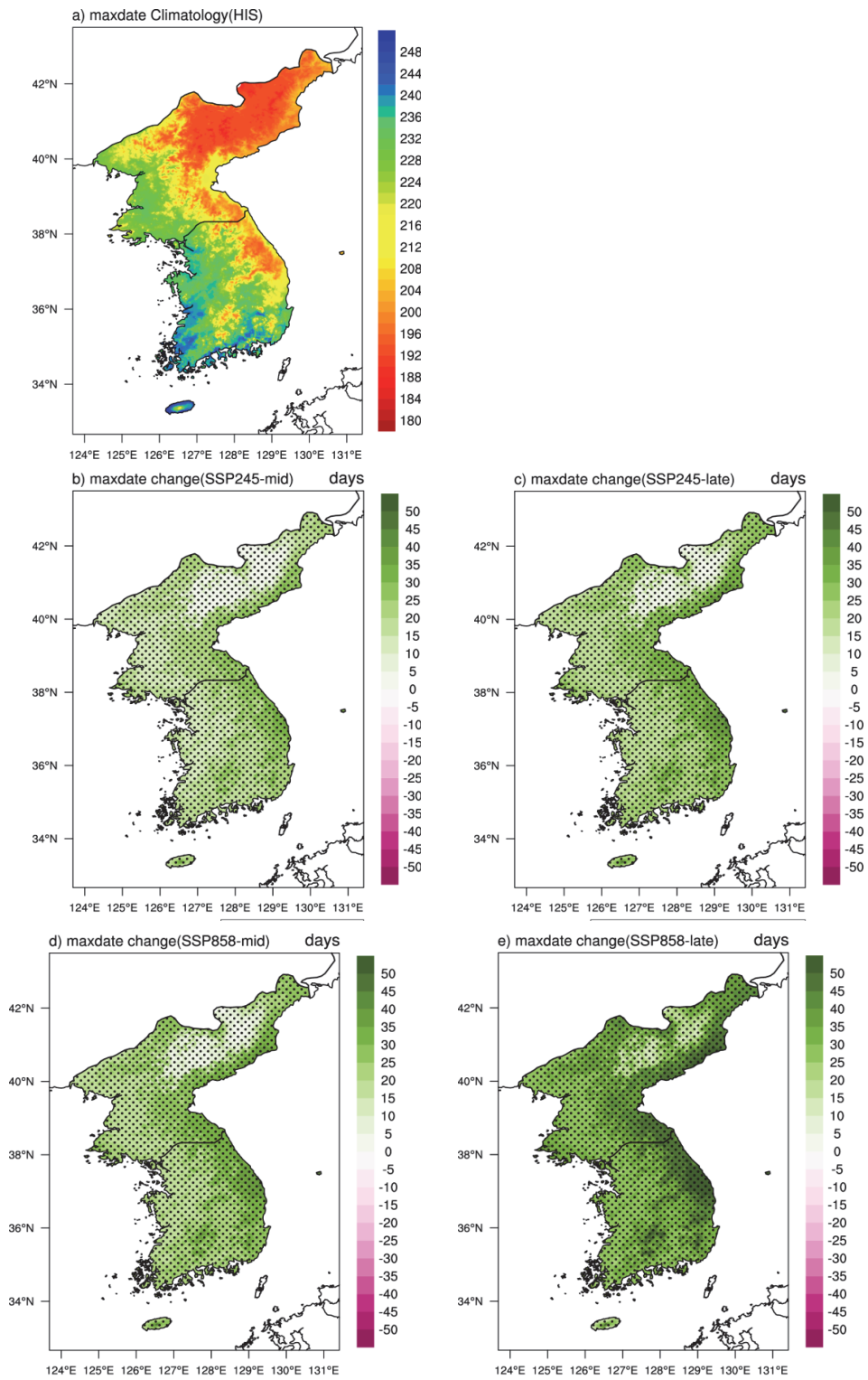
Fig. 6. Same as Fig. 4 but for the optimal heading date of the rice. (units: Day of Year)

**Table 3.** The climatology of CYPmax during REF, mid, and late 21st century under the HIS, SSP245 and SSP585 scenarios and their changes (%) with respect to HIS. The asterisk (\*) denotes significant changes at 95% confidence level

	HIS			SSP245		SSP585			
	REF	MID	LATE	MID	LATE	MID	LATE	MID	LATE
	CYPmax	CYPmax	Change (%)	CYPmax	Change (%)	CYPmax	Change (%)	CYPmax	Change (%)
KP	2548.94	2599.78	1.99*	2606.11	2.24*	2549.53	0.02	2426.32	-4.81*
SK	2577.10	2509.00	-2.64*	2495.43	-3.17*	2442.59	-5.22*	2253.86	-12.54*
NK	2526.25	2669.42	5.67*	2691.01	6.52*	2631.56	4.17*	2555.63	1.16*

**Table 4.** Same as Table 2 but for the maxdate

	HIS	SSP245		SSP585	
	REF	MID	LATE	MID	LATE
KP	0.33**	0.18**	0.11**	0.40**	0.32**
SK	0.44**	0.18**	0.10**	0.38**	0.22**
NK	0.24**	0.17**	0.12**	0.43**	0.40**



**Fig. 7.** Same as Fig. 5 but for optimal heading date (maxdate).

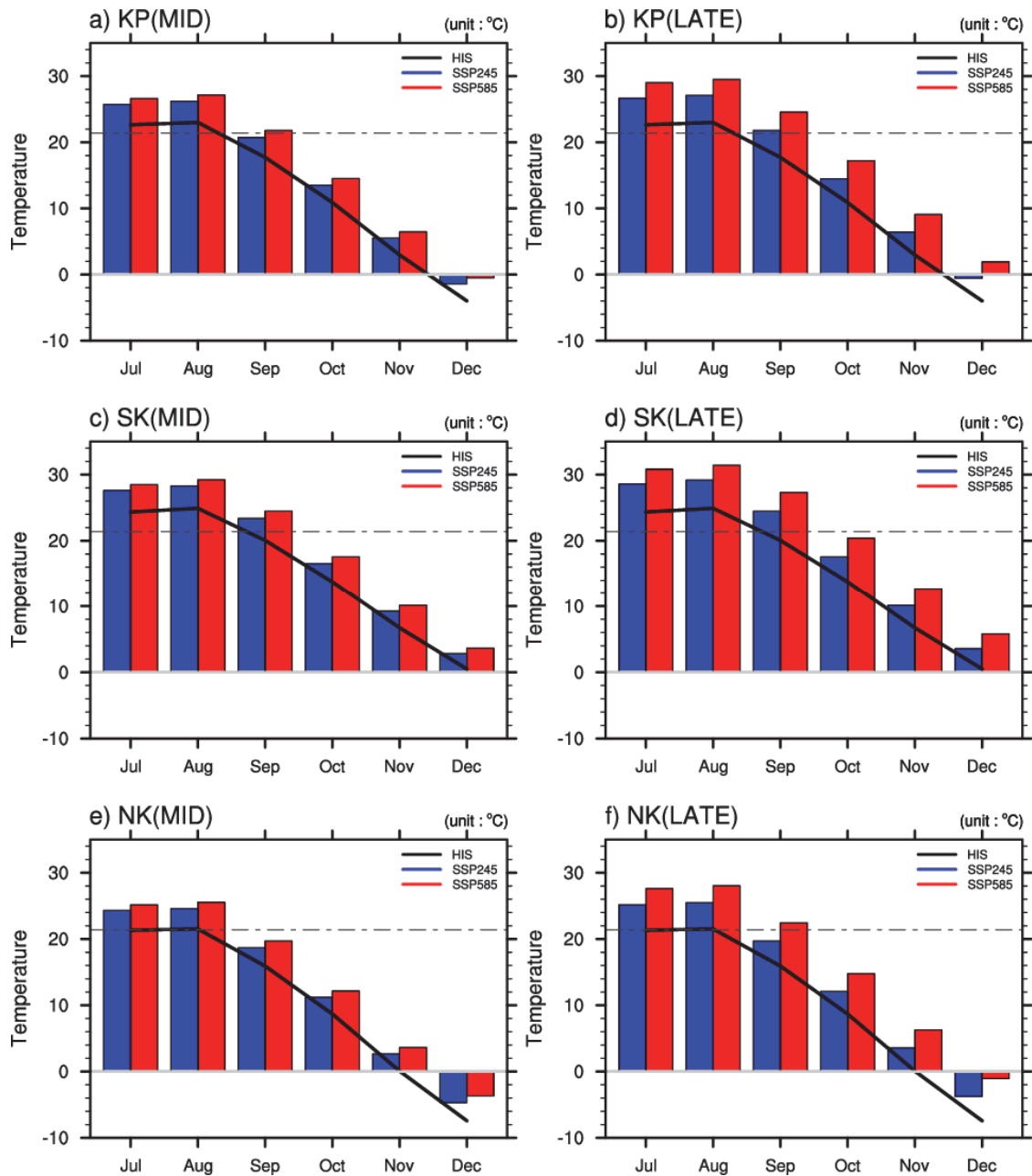
수목 최적출수일이 늦춰지는 선형적 반응을 보였다. 양상별 스프레드는 SSP245, SSP585 시나리오 모두 비슷한 수준에서 양상을 평균과 유사한 경향성을 나타냈다. 각 분석기간 별 양상별 평균의 기울기는 모든 기간, 모든 시나리오 하에서 통계적으로 유의미한 경향성을 나타내었다(Table 4). 최적출수일의 변화를 공간적으로 살펴보기 위해 Fig. 6에서는 한반도 전체의 REF 기간 maxdate의 기후값(Fig. 7a) 및 SSP245, SSP585 시나리오 하에서의 21세기 중반, 후반의 maxdate 변화일수를 나타내었다(Fig. 7b~7e). 먼저 REF 기간의 한반도 maxdate 기후값을 살펴보면 기온이 낮은 산간지역과 평야지역의 최적출수일의 차이가 뚜렷한 것을 알 수 있으며, 산간지역을 모두 포함한 면적 평균값은 한반도 전체는 216일, 남한은 227일, 북한은 207일로 추정되었다(Table 5). 미래변화를 살펴보면 한반도 전역에서 통계적으로 유의한 maxdate의 증가가 나타났고, 한반도 북부의 고도가 높은 산맥지역에서는 상대적으로 작은 maxdate 변화가 나타난 반면, 중간산지 및 태백산맥을 따라서 더욱 뚜렷한 maxdate의 증가가 전망되었다. 이러한 변화의 공간적 분포는 서로 유사하였으나 그 크기는 SSP585 시나리오에서, 그리고 21세기 후반에서 더욱 뚜렷하게 나타났다(Fig. 7e). 면적 평균된 기후값의 변화를 살펴보면, SSP245 시나리오의 경우 REF에 비하여 21세기 중반 약 8일, 후반에는 약 10일 늦춰질 것으로 전망되었고, SSP585 시나리오의 경우 21세기 중반에 약 10일, 21세기 후반에는 약 15일가량 늦춰질 것으로 나타났으며 모든 시나리오 및 분석기간에 대해 분석영역(한반도, 남한, 북한)에 따른 차이는 뚜렷하지 않았다(Table 5).

지금까지의 분석을 통해 한반도 전체의 CYPmax와 maxdate의 변화를 분석해 보았다. 그렇다면 이러한 변화가 어떤 요인의 변화에 의해 주도되는지를 살펴보기

위해 Fig. 8, 9에서는 시나리오별 평균기온 및 일사량의 변화를 분석해 보았다. Fig. 8은 월평균기온의 기간별 기후값을 분석영역별, 분석기간별로 나타낸 그림으로, 회색 점선은 CYP<sub>stad</sub>에서 등속 최적온도로 설정한 21.4°C이다. 검은색 실선으로 나타낸 REF 기간의 HIS 시나리오결과를 살펴보면 한반도영역 월평균 기온이 21.4°C와 가장 가까운 월은 7, 8월, 남한은 6월과 9월이며, 북한의 경우 7월과 8월이며 최난월의 평균기온이 21.4°C를 넘지 않는 특징을 보였다. 지역별로 좀 더 자세히 살펴보면, 먼저 남한지역의 경우 기온이 높아짐에 따라 7월과 8월의 평균기온이 30도에 가까워져 SSP245, SSP585 시나리오 모두 21세기 중반에는 9월이, 21세기 후반에는 SSP245 시나리오의 경우 9월, SSP585 시나리오하에서는 9~10월이 벼 등속 적정기온의 범위에 해당될 것으로 전망되었다(Fig. 8c, 8d). 일사조건의 경우 7~8월의 일사량이 증가할 것으로 전망되었고 9~10월의 경우 21세기 후반 비교적 작은 폭의 증가가 전망되었으며, SSP245 시나리오 하에서 SSP585 시나리오보다 일사량이 더 클 것으로 전망되었다(Fig. 9). 즉, 일사량은 강수현상, 구름물리현상, 대기불안정 등 다양한 영향이 반영되는 복합적인 변수이므로 기온과 같이 온실가스 강제력에 대해 선형적으로 반응하지 않음을 의미한다. 결과적으로, SSP245 시나리오 하에서의 9~10월의 일사량 증가 및 고농도시나리오(SSP585)의 급격한 등속기온 증가의 영향으로 남한지역의 CYPmax는 SSP585하에서 감소(-12.54%)이 가장 큰 것으로 분석된다(Fig. 4b, Table 3). 북한지역의 경우 REF 기간의 등속 적정 온도는 7~8월에 나타나는 반면, 21세기 중, 후반에는 온난화에 의해 9월이 가장 기온조건이 좋은 월이 될 것으로 전망되었으며, 고농도 시나리오 일수록, 21세기 후반이 될수록 9월의 기온조건이 좋아질 것으로

**Table 5.** The climatology of maxdate during REF, MID, and LATE 21st century under the HIS, SSP245 and SSP585 scenarios and their changes (days) with respect to HIS. The asterisk (\*) denotes significant changes at 95% confidence level

	HIS	SSP245				SSP585			
	REF	MID		LATE		MID		LATE	
	Maxdate (doy)	Maxdate (doy)	Change (days)	Maxdate (doy)	Change (days)	Maxdate (doy)	Change (days)	Maxdate (doy)	Change (days)
KP	216.26	234.31	8.35*	239.1	10.56*	239.15	10.58*	250.56	15.86*
SK	227.77	247.62	8.71*	252.36	10.80*	252.46	10.84*	262.03	15.04*
NK	207.43	224.09	8.03*	228.92	10.36*	228.94	10.37*	241.77	16.55*



**Fig. 8.** The monthly temperature climatology under HIS (black line), SSP245 (blue bar) and SSP585 (red bar) scenarios over KP, SK, NK during MID (a, c, e) and LATE (b, d, f) 21st century.

나타났다. 한편 일사량의 경우 REF 기간에는 남한에 비해 7~8월뿐만 아니라 9월까지 일사가 풍부한 기후 패턴을 가지고 있으며, 특히 9월 일사량의 경우 SSP245시나리오 하의 21세기 후반에 가장 많은 가장 증가가 전망되었기 때문에 기온과 일사량의 복합적 영

향으로 해당 시기의 CYPmax 값도 가장 많이 증가 (6.52%)한 것으로 해석된다(Table 5). 한편, maxdate의 변화는 남한과 북한 모두 온실가스 강제력에 선형적으로 반응하는 변화 양상을 나타내었으며(Fig. 6) 일사량의 변화보다(Fig. 9) 최적기온이 나타나는 시점이

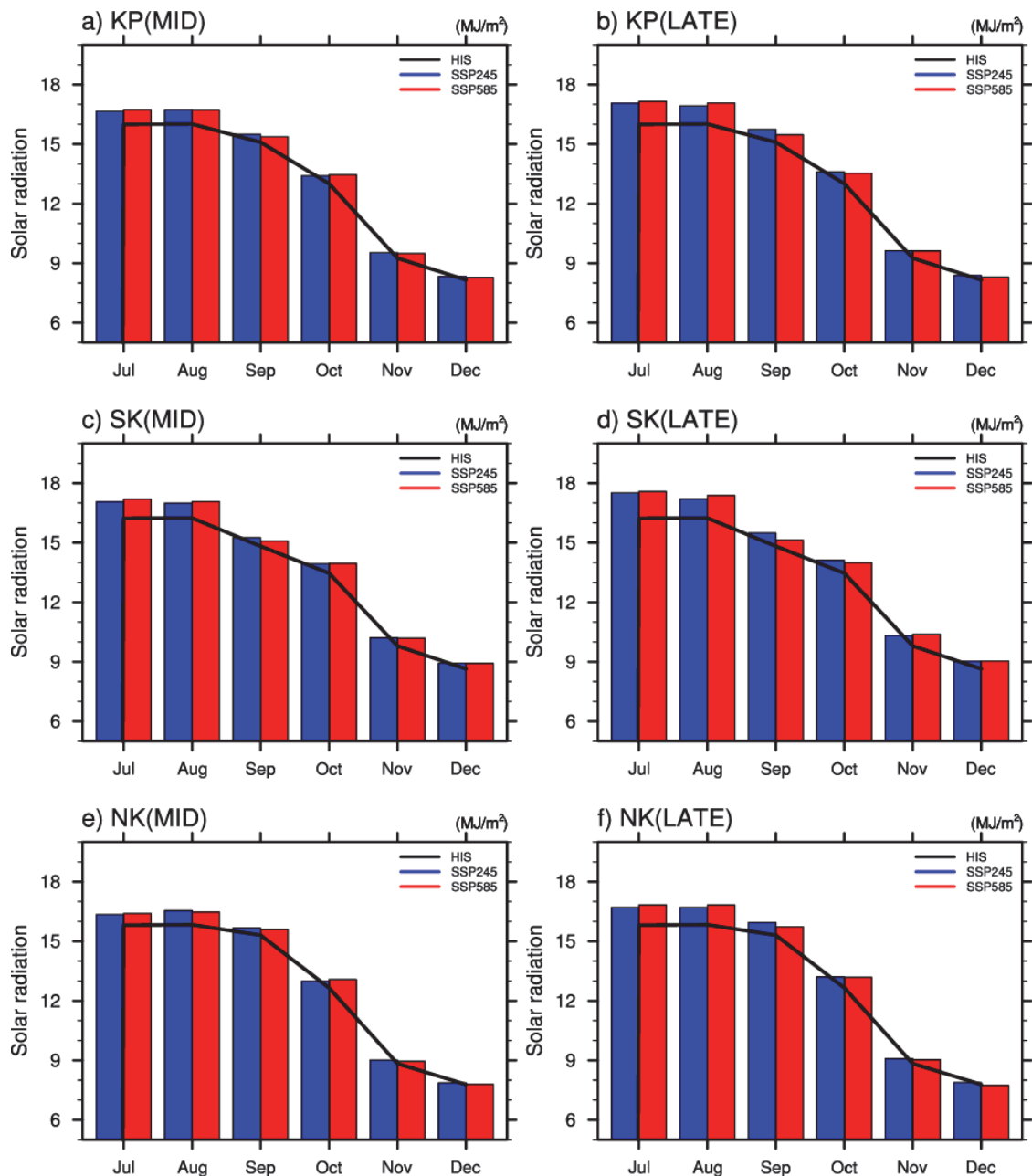


Fig. 9. Same as Fig. 8 but for solar radiation.

현재기후보다 늦춰지는 경향이 뚜렷하므로, 기온증가의 영향이 큰 것으로 분석된다.

#### IV. 결론 및 고찰

기후변화에 따른 농업환경의 변화는 현재 기후에

최적화 되어있는 재배방식 및 품종에 불리한 조건으로 작용하여 작물의 수량 및 품질저하를 야기한다. 본 연구에서는 벼의 출수 후 40일 간의 기온 및 일사 조건을 복합적으로 고려하여 기후학적 잠재 생산성을 평가할 수 있는 지수인 기후생산력지수(CYP)를 이용하여 벼 생산성에 미치는 기후변화의 영향을 분석하였다. 분석

에 사용된 기후변화 시나리오 자료는 IPCC AR6에 활용된 SSP-RCP 시나리오 중 2종(SSP245, SSP585)이며, CMIP6 GCM 가운데 18개의 모형자료를 기반으로 양상불 분석을 수행해 모형선택에 따른 불확실성을 함께 분석하였다. 이 자료는 한반도 전체에 대한 1km의 고해상도 시나리오 자료이기 때문에 상세한 지역 및 지형특성이 반영되어야 하는 농업분야에 활용성이 높은 자료이다. 한편, CMIP6 GCM 기반의 기후변화 시나리오 자료의 경우 일조시간 변수를 제공하지 않으므로 본 연구에서는 일사량으로 기후생산력지수를 구하였다(CYP<sub>srad</sub>). 이 경우 벼가 일장에 반응하는 감광성을 반영할 수 없는 한계가 있으며 출수일에 따른 CYP값의 평년 패턴은 유사하였으나 최적출수일의 경우 6일가량 빠르게 추정하는 계통적 오차를 보였다. 하지만 선행연구에 따르면 등숙기의 환경 조건 중 일조시간뿐만 아니라 일사량은 벼의 종실중에 영향을 주는 주요 요인으로 알려져 있으며(Lee et al., 2009), 실제로 일조시간과 일사량을 각각 벼 수량 예측 인자로 사용한 Hong et al. (2012)에서는 일사량이 일조시간보다 벼 수량에 더 높은 상관성을 나타내었다. 또한 CYP의 경우 출수 후 40일 동안 누적된 기후조건이 벼의 생산성에 미치는 영향을 평가하는 지수이므로, 일조시간과 일사량 사이의 관계성을 고려할 때 CYP<sub>srad</sub>는 여전히 장기간에 걸친 기후요인에 따른 벼 생산성의 지표로써 활용 가능할 것으로 보인다. 기후변화의 관점에서 또한 일조시간은 일사량에 비해 기상·기후 모델링 분야에서 불확실성이 크고 제공되지 않는 경우가 많아 기상·기후 모델링 자료의 활용 시 제약이 많은 변수이다. 그러므로 일조시간을 대신하여 일사량을 활용한 기후생산력지수는 여전히 유의미한 지수로 판단된다. 한편, 일조시간이나 일사량의 경우 주변 지형지물 및 관측환경에 의해 영향을 크게 받는 변수이다(Kim and Yun, 2015). 기후변화시나리오의 통계적 상제화 단계에서는 이러한 지면피복 및 지형지물의 변화가 고려되지 않으므로 이에 따른 결과를 해석할 때에 불확실성이 잠재되어 있음을 유의하여야 한다.

각 시나리오별 CYPmax와 maxdate의 변화를 분석한 결과 분석지역에 따라 변화 경향이 다르게 분석되었는데, 먼저 남한의 경우 현재 기후에 비해 온난화된 기온조건에 의해 CYPmax값은 감소하고 maxdate는 점차 늦춰지는 경향이 나타났으며 이는 온난화가 빠르게 진행되는 SSP585 시나리오 하에서 더욱 뚜렷하게 나타났다. 한편, CYPmax의 시계열에서 넓은 폭의 양

상불 스프레드가 나타났는데, 이는 단일모형 혹은 작은 수의 모형을 선택하였을 때 미래 변화 분석에 얼마나 큰 불확실성이 있을 수 있는지를 보여주며 양상불 예측의 중요성을 확인하였다. 북한의 경우 현재기간이나 SSP245 시나리오 하에서는 현재와 유사한 수준 혹은 생산성의 증가가 전망되지만 이는 고도가 높은 산지 지역에서 증가한 생산성에 의한 것이고 현재 기후의 주요 벼 생산 지역에서는 북한 역시 생산성이 감소할 것으로 분석되었다. SSP585 시나리오의 경우 SSP245시나리오보다 넓은 면적에서 생산성의 감소가 전망되어, 온실가스감축정책을 수행에 따르는 효과를 확인할 수 있었다. 최적출수일의 경우 모든 분석 지역에 대하여 고농도 시나리오일수록, 기후변화의 진행이 깊어질수록 늦추어지는 것으로 나타나, 온실가스 강제력에 선형적인 반응을 확인하였고, 이는 온실가스 강제력에 선형적으로 반응하는 기온의 변화 추이와 일치하므로, 최적출수일이 늦추어지는 것은 지구온난화에 따른 기온 증가가 주요 원인인 것으로 분석된다.

CYP지수는 평균적인 기온과 일사 조건만을 고려하기 때문에, 극한기상 증가에 따른 재해피해 증가가 야기할 생산성 및 품질의 저하는 고려되지 않았다. 뿐만 아니라 최적출수일에 출수할 수 있도록 최적 이양기를 추정하기 위해서는 식물생장 기간의 생육조건변화에 의한 수량 및 품질 변화가 고려되어야 한다. Fig. 3에서 남한의 경우 7, 8월의 월 평균기온이 30℃를 넘어설 것으로 전망되었고, 전반적인 기온의 증가로 인해 이앙기로부터 출수기까지 생육기간이 단축되어 수량감소, 육묘시기 중의 고온피해, 병해충 및 잡초 피해 등 기후변화에 따라 파생되는 여러가지 요인을 종합적으로 고려한 분석이 필요로 하다. 그럼에도 기후는 수십 년 이상 지속되는 평균적인 기후상태임을 감안하였을 때 신기후변화 시나리오인 SSP-RCP시나리오 기반으로 21세기 전반에 거친 기온 및 일사 조건에 따른 벼 생산성 변화와 불확실성에 대한 분석은 기후변화 대응을 위한 기초정보로써 가치가 있다. 본 연구에서 제시한 CYPmax의 감소는 보수적인 수준의 생산성 감소를 의미하며, 이보다 더욱 심각한 벼 생산성의 감소가 있을 것으로 추정된다. 그러므로 미래 기후변화에 대응하기 위해서는 온실가스 배출량 감축을 통해 현재수준과 비교적 비슷한 수준의 기후생산력을 가지는 시나리오를 따르기 위해 노력이 요구되며, 재배 지역 및 시기 조정, 재배기술 개발, 고온스트레스에 강한 품종 개발 등 기후변화 적응을 위한 대책이 요구된다.



## 감사의 글

이 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업(과제번호: RS-2020-RD009291)의 지원으로 수행되었습니다

## 적 요

본 연구에서는 1km 고해상도 앙상블 신기후변화 시나리오(공통사회 경제경로 시나리오) 자료를 기반으로 하여 남한을 포함한 한반도 전체의 벼 기후생산성(CYP) 변화를 평가하였다. 이때, 기후변화 시나리오 자료에서 제공하는 제한적인 변수를 활용하기 위해 일조시간을 대신하여 일사량을 이용하였다. 연구 결과에 따르면, 현재 기후에 비해 온난화된 미래 기후조건에서 CYPmax 값은 감소하고 최적출수일은 점차 늦춰지는 경향이 나타났다. 이는 고도가 높은 한반도 북동부의 산악 지역을 제외하고 모든 지역에서 나타나는 현상이며, 특히 온난화가 빠르게 진행되는 SSP585 시나리오 일수록 더욱 뚜렷하게 나타났다. 이러한 결과는 낮은 배출 시나리오의 이점을 보여주는 동시에 온실 가스 배출을 제한하기 위해 더 많은 노력을 기울일 필요가 있음을 강조한다. 한편, CYPmax의 시계열에서 넓은 폭의 앙상블 스프레드가 나타났는데, 이는 단일모형 혹은 작은 수의 모형을 선택하였을 때 미래 변화 분석에 내재된 불확실성을 보여주며 앙상블 예측의 중요성을 보여준다. 본 연구를 통해 분석된 장기간의 기온 및 일사 조건의 변화에 따른 기후학적 벼 생산성 변화 및 불확실성에 대한 분석은 기후변화 대응을 위한 기초정보로써 가치가 있다.

## REFERENCES

- Ahn, J. B., J. Y. Hong, and K. M. Shim, 2016a: Agro-climate changes over Northeast Asia in RCP scenarios simulated by WRF. *International Journal of Climatology* **36**(3), 1278-1290.
- Ahn, J. B., S. Jo, M. S. Suh, D. H. Cha, D. K. Lee, S. Y. Hong, S. K. Min, S. C. Park, S. H. Kang, and K. M. Shim, 2016b: Changes of precipitation extremes over South Korea projected by the 5 RCMs under RCP scenarios. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* **52**, 223-236.
- Ahn, J. B., Y. H. Kim, K. M. Shim, M. S. Suh, D. H. Cha, D. K. Lee, S. Y. Hong, S. K. Min, S. C. Park, and H. S. Kang, 2021: Climatic yield potential of Japonica-type rice in the Korean Peninsula under RCP scenarios using the ensemble of multi-GCM and multi-RCM chains. *International Journal of climatology* **41**, E1287-E1302.
- Bi, D., M. Dix, S. Marsland, S. O'farrell, A. Sullivan, R. Bodman, R. Law, I. Harman, J. Srbinovsky, H. A. Rashid, P. Dobrohotoff, C. Mackallah, H. Yan, A. Hirst, A. Savita, F. B. Dias, M. Woodhouse, R. Fiedler, and A. Heerdegen, 2020: Configuration and spin-up of ACCESS-CM2, the new generation Australian community climate and earth system simulator coupled model. *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science* **70**(1), 225-251.
- Boucher, O., S. Denvil, G. Levavasseur, A. Cozic, A. Caubel, M. A. Foujols, Y. Meurdesoif, P. Cadule, M. Devilliers, J. Ghattas, N. Lebas, T. Lurton, L. Mellul, I. Musat, J. Mignot, and F. Cheruy, 2018: IPSL IPSL-CM6A-LR model output prepared for CMIP6 CMIP. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1534>
- H. Chen and J. Sun, 2013: Projected change in east Asian summer monsoon precipitation under RCP scenario. *Meteorology and Atmospheric Physics* **121**, 55-77.
- Döscher, R., M. Acosta, A. Alessandri, P. Anthoni, A. Arneth, and T. Arsouze, 2022: The EC-Earth3 Earth system model for the Coupled Model Intercomparison Project 6. *Geoscientific Model Development* **15**, 2973-3020.
- Dunne, J. P., L. W. Horowitz, A. J. Adcroft, P. Ginoux, I. M. Held, J. G. John, J. P. Krasting, S. Malyshev, V. Naik, F. Paulot, E. Shevliakova, C. A. Stock, N. Zadeh, V. Balaji, C. Blanton, K. A. Dunne, C. Dupuis, J. Durachta, R. Dussin, P. P. G. Gauthier, S. M. Griffies, H. Guo, R. W. Hallberg, M. Harrison, J. He, W. Hurlin, C. McHugh, R. Menzel, P. C. D. Milly, S. Nikonov, D. J. Paynter, J. Ploshay, A. Radhakrishnan, K. Rand, B. G. Reichl, T. Robinson, D. M. Schwarzkopf, L. T. Sentman, S. Underwood, H. Vahlenkamp, M. Winton, A. T. Wittenberg, B. Wyman, Y. Zeng, and M. Zhao, 2020: The GFDL Earth System Model version 4.1 (GFDL-ESM 4.1): Overall coupled model description and simulation characteristics. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* **12**(11), e2019MS002015.
- Hajima, T., M. Watanabe, A. Yamamoto, H. Tatebe, M. A. Noguchi, M. Abe, R. Ohgaito, A. Ito, D.

- Yamazaki, H. Okajima, A. Ito, K. Takata, K. Ogochi, S. Watanabe, and M. Kawamiya, 2020: Development of the MIROC-ES2L Earth system model and the evaluation of biogeochemical processes and feedbacks. *Geoscientific Model Development* **13**(5), 2197-2244.
- Hanyu, J., T. Uchijima, and S. Sugawara, 1966: Studies on the agro-climatological method for expressing the paddy rice products. I. an agro-climatic index for expressing the quantity of ripening of the paddy rice. *Bulletin of Tohoku National Agricultural Experimental Station* **34**, 27-36.
- Hong, S. Y., J. Hur, J. B. Ahn, J. M. Lee, B. K. Min, C. K. Lee, Y. Kim, K. D. Lee, S.-H. Kim, G. Y. Kim and K. M. Shim, 2012: Estimating rice yield using MODIS NDVI and meteorological data in Korea. *Korean Journal of Remote Sensing* **28**(5), 509-520. (in Korean with English abstract)
- IPCC, 2023, *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 35-115.
- Kim, J., W. Sang, P. Shin, H. Cho, M. Seo, B. Yoo, and K. S. Kim, 2015: Evaluation of regional climate scenario data for impact assessment of climate change on rice productivity in Korea. *Journal of Crop Science and Biotechnology* **18**(4), 257-264.
- Kim, S. O., and J. I. Yun, 2015: Improving the usage of the Korea Meteorological Administration's digital forecasts in agriculture: IV. Estimation of daily sunshine duration and solar radiation based on 'Sky Condition' product. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **17**(4), 281-289. (in Korean with English abstract)
- Lee B. W., 2012, Climate change impacts and responses to global agriculture. *World Agriculture* **146**(0), 79-94. (in Korean with English abstract)
- Lee, C. K., D. S. Kim, Y. U. Kwon, J. E. Lee, J. H. Seo, and B. W. Lee, 2009: The effect of temperature and radiation on grain weight and grain nitrogen content in rice. *Korean Journal of crop science* **54**(1), 36-44. (in Korean with English abstract)
- Lee, C. K., K. S. Kwak, J. H. Kim, J. Y. Son, and W. H. Yang, 2011: Impacts of Climate Change and Follow-up Cropping Season Shift on Growing Period and Temperature in Different Rice Maturity Types. *Korean journal of crop science* **56**(3), 233-243. (in Korean with English abstract)
- Lee, J., J. Kim, M. A. Sun, B. H. Kim, H. Moon, H. M. Sung, J. Kim, and Y. H. Byun, 2020: Evaluation of the Korea meteorological administration advanced community earth-system model (K-ACE). *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* **56**, 381-395.
- Mauritsen, T., J. Bader, T. Becker, J. Behrens, M. Bittner, R. Brokopf, V. Brovkin, M. Claussen, T. Crueger, M. Esch, I. Fast, S. Fiedler, D. Fläschner, V. Gayler, M. Giorgetta, D. S. Goll, H. Haak, S. Hagemann, C. Hedemann, C. Hohenegger, T. Ilyina, T. Jahns, D. Jimenéz-de-la-Cuesta, J. Jungclaus, T. Kleinen, S. Kloster, D. Kracher, S. Kinne, D. Kleberg, G. Lasslop, L. Kornblueh, J. Marotzke, D. Matei, K. Meraner, U. Mikolajewicz, K. Modali, B. Möbis, W. A. Müller, J. E. M. S. Nabel, C. C. W. Nam, D. Notz, S.-S. Nyawira, H. Paulsen, K. Peters, R. Pincus, H. Pohlmann, J. Pongratz, M. Popp, T. J. Raddatz, S. Rast, R. Redler, C. H. Reick, T. Rohrschneider, V. Schemann, H. Schmidt, R. Schnur, U. Schulzweida, K. D. Six, L. Stein, I. Stemmler, B. Stevens, J.-S. Storch, F. Tian, A. Voigt, P. Vrese, K.-H. Wiener, S. Wilkenskjaeld, A. Winkler, and E. Roeckner, 2019: Developments in the MPI-M Earth System Model version 1.2 (MPI-ESM1. 2) and its response to increasing CO<sub>2</sub>. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **11**(4), 998-1038. <https://doi.org/10.1029/2018MS001400>
- Müller, W. A., J. H. Jungclaus, T. Mauritsen, J. Baehr, M. Bittner, R. Budich, F. Bunzel, M. Esch, R. Ghosh, H. Haak, T. Ilyina, T. Kleine, L. Kornblueh, H. Li, K. Modali, D. Notz, H. Pohlmann, E. Roeckner, I. Stemmler, F. Tian, and J. Marotzke, 2018: A higher-resolution version of the max planck institute earth system model (MPI-ESM1. 2-HR). *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* **10**(7), 1383-1413. <https://doi.org/10.1029/2017MS001217>
- O'Neill, B. C., E. Krieglner, K. Riahi, K. L. Ebi, S. Hallegatte, T. R. Carter, R. Marthur, and D. P. van Vuuren, 2014: A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic change* **122**, 387-400.
- Oh, S. G., J. H. Park, S. H. Lee, and M. S. Suh, 2014: Assessment of the RegCM4 over East Asia

- and future precipitation change adapted to the RCP scenarios. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **119**(6), 2913-2927.
- RDA, 2021, Guideline on produce high-resolution climate change data based on SSP scenarios for Agricultural Applications. Rural Development Administration, Rep. Korea, <https://www.korea.kr/archive/expDocView.do?docId=39829>
- Séférián, R., P. Nabat, M. Michou, D. Saint-Martin, A. Voldoire, J. Colin, B. Decharme, C. Delire, S. Berthet, M. Chevallier, S. Sénési, L. Franchistéguy, J. Vial, M. Mallet, E. Joetzjer, O. Geoffroy, J.-F. Guérémy, M.-P. Moine, R. Msadek, A. Ribes, M. Rocher, R. Roehrig, D. Salas-y-Mélia, E. Sanchez, L. Terray, S. Valcke, R. Waldman, O. Aumont, L. Bopp, J. Deshayes, C. Ethé, and G. Madec, 2019: Evaluation of CNRM Earth System Model, CNRM-ESM2-1: Role of Earth system processes in present-day and future climate. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* **11**(12), 4182-4227.
- Seland, Ø., M. Bentsen, D. Olivié, T. Toniazzo, A. Gjermundsen, L. S. Graff, J. B. Debernard, A. K. Gupta, Y.-C. He, A. Kirkevåg, J. Schwinger, J. Tjiputra, K. S. Aas, I. Bethke, Y. Fan, J. Griesfeller, A. Grini, C. Guo, M. Ilıcak, I. H. H. Karset, O. Landgren, J. Liakka, K. O. Moseid, A. Nummelin, C. Spensberger, H. Tang, Z. Zhang, C. Heinze, T. Iversen, and M. Schulz, 2020: Overview of the Norwegian Earth System Model (NorESM2) and key climate response of CMIP6 DECK, historical, and scenario simulations. *Geoscientific Model Development* **13**(12), 6165-6200.
- Sellar, A. A., C. G. Jones, J. P. Mulcahy, Y. Tang, A. Yool, A. Wiltshire, F. M. O'Connor, M. Stringer, R. Hill, J. Palmieri, S. Woodward, L. de Mora, T. Kuhlbrodt, S. T. Rumbold, D. I. Kelley, R. Ellis, C. E. Johnson, J. Walton, N. L. Abraham, M. B. Andrews, T. Andrews, A. T. Archibald, S. Berthou, E. Burke, E. Blockley, K. Carslaw, M. Dalvi, J. Edwards, G. A. Folberth, N. Gedney, P. T. Griffiths, A. B. Harper, M. A. Hendry, A. J. Hewitt, B. Johnson, A. Jones, C. D. Jones, J. Keeble, S. Liddicoat, O. Morgenstern, R. J. Parker, V. Predoi, E. Robertson, A. Siahann, R. S. Smith, R. Swaminathan, M. T. Woodhouse, G. Zeng, and M. Zerroukat, 2019: UKESM1: Description and evaluation of the UK Earth System Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* **11**(12), 4513-4558.
- Shim K. M., Y. -S. Kim, M.-P. Jung, and I.-T. Choi, 2014: Change of Climatic Productivity Index for Rice under Recent Climate Change in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **16**(4), 384-388. (in Korean with English abstract)
- Swart, N. C., J. N. Cole, V. V. Kharin, M. Lazare, J. F. Scinocca, N. P. Gillett, V. V. Kharin, M. Lazare, J. F. Scinocca, N. P. Gillett, J. Anstey, V. Arora, J. R. Christian, S. Hanna, Y. Jiao, W. G. Lee, F. Majaess, O. A. Saenko, C. Seiler, C. Seinen, A. Shao, M. Sigmond, L. Solheim, K. von Salzen, D. Yang, and B. Winter, 2019: The Canadian earth system model version 5 (CanESM5. 0.3). *Geoscientific Model Development* **12**(11), 4823-4873.
- Tatebe, H., T. Ogura, T. Nitta, Y. Komuro, K. Oguchi, T. Takemura, K. Sudo, M. Sekiguchi, M. Abe, F. Saito, M. Chikira, S. Watanabe, M. Mori, N. Hirota, Y. Kawatani, T. Mochizuki, K. Yoshimura, K. Takata, R. O'ishi, D. Yamazaki, T. Suzuki, M. Kurogi, T. Kataoka, M. Watanabe, and M. Kimoto, 2019: Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6. *Geoscientific Model Development* **12**(7), 2727-2765.
- van Vuuren, D. P., E. Kriegler, B. C. O'Neill, K. L. Ebi, K. Riahi, T. R. Carter, J. Edmonds, S. Hallegatte, T. Kram, R. Mathur, and H. Winkler, 2014: A New Scenario Framework for Climate Change Research: Scenario Matrix Architecture. *Climatic Change* **122**, 373-386.
- Voldoire, A., D. Saint-Martin, S. Sénési, B. Decharme, A. Alias, M. Chevallier, J. Colin, J.-F. Guérémy, M. Michou, M.-P. Moine, P. Nabat, R. Roehrig, D. Salas y Méliá, R. Séférián, S. Valcke, I. Beau, S. Belamari, S. Berthet, C. Cassou, J. Cattiaux, J. Deshayes, H. Douville, C. Ethé, L. Franchistéguy, O. Geoffroy, C. Lévy, G. Madec, Y. Meurdesoif, R. Msadek, A. Ribes, E. Sanchez-Gomez, L. Terray, and R. Waldman, 2019: Evaluation of CMIP6 deck experiments with CNRM-CM6-1. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* **11**(7), 2177-2213.
- Volodin, E., E. Mortikov, A. Gritsun, V. Lykossov, V. Galin, N. Diansky, A. Gusev, S. Kostykin, N. Iakovlev, A. Shestakova and S. Emelina, 2019a: INM INM-CM4-8 model output prepared for CMIP6 CMIP.
- Volodin, E., E. Mortikov, A. Gritsun, V. Lykossov,

- V. Galin, N. Diansky, A. Gusev, S. Kostykin, N. Iakovlev, A. Shestakova and S. Emelina, 2019b: INM INM-CM5-0 model output prepared for CMIP6 CMIP.
- Yukimoto, S., H. Kawai, T. Koshiro, N. Oshima, K. Yoshida, S. Urakawa, H. Tsujino, M. Deushi, T. Tanaka, M. Hosaka, S. Tabu, H. Yoshimura, E. Shindo, R. Mizuta, A. Obata, Y. Adachi, and M. Ishii, 2019: The Meteorological Research Institute Earth System Model version 2.0, MRI-ESM2. 0: Description and basic evaluation of the physical component. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II* **97**(5), 931-965.
- Ziehn, T., M. Chamberlain, A. Lenton, R. Law, R. Bodman, M. Dix, Y. Wang, P. Dobrohotoff, J. Srbinovsky, L. Stevens, P. Vohralik, C. Mackallah, A. Sullivan, S. O'Farrell, and K. Druken, 2019: IPCC DDC: CSIRO ACCESS-ESM1. 5 model output prepared for CMIP6 CMIP.