



APCC
APEC CLIMATE CENTER

RESEARCH REPORT

PREFACE

It is our pleasure to present this report on the APEC Climate Center (APCC)'s research activities in 2013, which has been a very productive year for our Center.

APCC has expanded its research scope, in response to regional societal and scientific needs. While building expertise in climate prediction remains a priority, we are extending our reach to include policy-relevant climate applications and value-added climate information products.

APCC has accelerated efforts to better our service to the region. As one of the main services provided by APCC, the MME 3-month prediction information has been productively applied by scientists in developing countries that are unable to produce their own prediction information. Furthermore, in order to better prepare for climate-related hazards in a timely manner, APCC launched its 6-month MME prediction service in September 2013. We also began to release forecasts of the Boreal Summer Intraseasonal Oscillation (BSISO), starting from July 2013, as the world's first operational BSISO forecast service. Our researchers also achieved great success in publishing their papers in noted academic journals. Dr. Ok-Yeon Kim, for example, published a paper in *Climate Dynamics* and her research was later selected as one of the Research Highlights by another distinguished journal, *Nature Climate Change*. The following research report provides more information about our research outcomes from 2013.

We will continue to promote the best use of our research outcomes in various scientific and application areas. Our successes and achievements would not have been possible without the support of our valued partners. In this regard, I extend my thanks to you and I hope you enjoy this 2013 Research Report.

Chin-Seung Chung
Director, APEC Climate Center

CONTENTS

아태지역 쌀 생산성에 대한 기후변화 영향평가

■ 신용희 | 기후변화연구팀

1. 서론	5
2. 연구 자료 및 방법	8
2.1 기후데이터	8
2.2 글로벌 작물 수확량 예측 모델	14
3. 연구내용	19
3.1 기후변화에 따른 쌀 수확량 전망	19
3.2 쌀 수확량 예측 불확실성 평가	38
3.3 쌀 생산 적지 이동 분석	41
4. 결론 및 토론	45



아태지역 쌀 생산성에 대한 기후변화 영향평가

신용희 | 기후변화연구팀

ABSTRACT

The Fourth Assessment Report (AR4) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) projects that a rise in the global mean temperature due to anthropogenic greenhouse gas (GHG) emissions will have a large effect on crop yields. Crop yields change mainly due to the influence of agroclimatic factors, such as temperature, precipitation and insolation, and technological factors, such as agrichemicals, fertilizer use, cultivar improvement, and irrigation water supply. Crop yields have continued to increase with sustainable investment in and development of crop cultivation technologies since human beings began cultivating agricultural crops. However, some regions are projected to experience a large decrease in crop yields in the future due to climate change. Therefore, an understanding of the regions that are vulnerable to climate change through quantitative assessments of the projected changes in crop yields is necessary.

The impacts of climate change on crop yields have been assessed by impact simulations, in which climate projections, obtained from simulations using General Circulation Models (GCMs), are input into crop models, which estimate crop yields, using predominantly information about climatic and soil conditions. Unfortunately, the GCM climate projections developed by research institutes around the world vary in their results, due to differences in the semi-empirical parameters and the process formulations used for each model; therefore, there are uncertainties in the outputs of the impact assessment models. Quantifying the uncertainty of the estimates of changes in crop yields due to differences in the climate projections is of great importance to aid in the understanding of which regions are most vulnerable to future climate change and in using this understanding as supporting information to investigate effective measures against climate change.

Impact assessment studies on the changes in crop yields under climate change have been carried out at the regional or global levels based on the characteristics of the models used and the purposes of each study. Except for some comprehensive studies, only a small number of GCM climate predictions and socioeconomic scenarios were used in these impact assessment studies due to the large data size of the climate projections and the extended computation time.

The impact of climate change on crop yields is closely related to global food security. Because the agricultural producing countries in the Asia-Pacific region are vulnerable even under the current climate system and extreme events, crop yield change is projected to have serious impacts under future climate change. A quantitative assessment is necessary to determine which climatic elements influence yield changes and to ascertain the amount of uncertainty associated with using multiple climate projections for a study region. Given this background, the purpose of this study is to quantitatively assess the change in rice yields using a global scale crop model, considering the uncertainty of climate change projections using data from the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5) GCM climate projections under 4 RCP scenarios (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 and RCP 8.5) for 3 time periods (2020s, 2050s and 2080s) for agricultural countries in the Asia-Pacific region.

The M-GAEZ model was modified for better assessment of climate change impacts from the GAEZ model, which is an model for estimating potential crop yields at a global scale that was



developed by the Food and Agriculture Organization (FAO) and the International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). The potential crop yields are calculated based on conditions, such as the climate, soil, and input level. Specific climate conditions, such as the daily mean temperature [°C], daily precipitation [mm/day], daily mean irradiation [W/m²], and daily mean windspeed [m/s], are used as input information. The M-GAEZ model can estimate the potential yields for 8 varieties of rice. Some varieties of rice differ in their growth periods, depending on the cultivated area. Four varieties (growing periods of 105, 120, 135 and 150 days) for Japonica and four varieties (105, 120, 135 and 150 days) for Indica were treated distinctively. We then calculated the potential rice yields based on the rice variety at each site with the 1990s (1991-2000) as the reference years and determining the most productive variety and its planting day. To conduct the impact assessment, the M-GAEZ model requires daily climate scenarios at a spatial resolution of 1°×1° latitude/longitude for each climate condition as input data. We created each mesh of a daily climate scenario using the GCM climate projections. The crop yield calculation flow consists of 4 modules: the climate module, the crop growth module, the soil constraint module, and the CO₂ fertilization module. The crop growth and soil constraint modules were based on formulating the existing M-GAEZ model. For the CO₂ fertilization effect, multipliers intended specifically for each plant type were used to consider the fertilization effect. The results obtained from this study are summarized below.

After calculating each mesh of rice yield from multiple climate projections based on the simulation periods, we calculated the country-specific yield average using data on the area of rice cultivated areas and country-boundary data to find the rate of rice yield change by country. Changes in rice yields were predicted for major 20 countries located in the Asia-Pacific region. As a result, after we considered adaptation measures, in Russia and North Korea, which are located at relatively high-latitudes for the region, rice yields are predicted to increase in the 2020s, 2050s and 2080s, under all RCP scenarios, both in the current rice cultivated area and relative to the 1990s, under all emissions scenarios, due to temperature rise. It was predicted that rice yields will increase more as we approach the end of the 21st century, the RCP 8.5 scenario, in particular. When we did not consider adaptation measures, it was predicted that rice yields decreased in most countries, except for the districts in high latitude areas, by many GCMs. After having predicted rice yield changes for each GCM according to RCP scenarios, there was still a large of uncertainty in the predicted results, due to the choice of GCM climate projections. When we did not consider adaptation measures, the uncertainty ranges were 13.5% (-5.7% to -19.2%) in the 2020s, 18.0% (-4.2% to -22.2%) in the 2050s, and 37% (-7.1% to -44.1%) in the 2080s under the RCP 8.5 scenario. As mentioned above, because the prediction results for rice yield change vary greatly depending on the choice of the GCM, uncertainty of prediction must be considered when examining climate change adaptation policy in many countries. In addition, 14% (-10.8% to -24.9%) of the uncertainty range was predicted, due to the choice of an RCP scenario in the 2080s, when we did not consider adaptation measures.

1. 서론

기후변화에 관한 정부간협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 제 4차 평가보고서(AR4)에서는 지구온난화로 인한 지구 평균기온 상승의 영향으로 전 세계 작물 수확량이 지역에 따라 크게 변할 것으로 예측하고 있다. 지구온난화로 인한 중·고위도 지역에서의 1-3°C 기온 상승은 작물 수확량을 증가시키는 역할을 하지만 그 이상의 기온 상승에서는 수확량이 오히려 감소하는 것으로 예측되고 있다. 또한 저위도 지역을 중심으로 한 반건조·건조지역에서의 1-2°C 기온 상승은 한계고온 환경 내에서 재배되고 있는 작물을 작물재배에 적합하지 않은 고온 환경으로 바꾸어 작물의 수확량 감소에 영향을 주는 것으로 나타났다(Easterling et al., 2007; Long et al., 2005; Jaggard et al., 2010). 최근 지구촌 곳곳에서 빈번히 발생하고 있는 폭우와 폭설, 이상고온, 가뭄 등과 같은 기상이변의 원인이 지구온난화로 인한 영향일 가능성이 상당히 높은 것으로 밝혀지고 있으며 지구온난화에 따른 기후변화는 21세기 인류 생존에 가장 큰 위협 요소로 꼽히고 있다. 특히 기후에 민감한 농업분야에서 기후변화에 따른 작물 재배환경의 악화는 작물 수확량 감소로 이어지고 전 세계 인구증가 및 개발도상국의 생활수준 향상에 따른 식량소비량 증가와 더불어 안정적인 식량수급에 심각한 위협이 될 수 있다. 기후변화로 인한 피해를 최소화하기 위해서는 지역특성을 고려한 적절한 적응정책 수립에 대한 검토가 필요하며 미래 기후변화 시나리오를 활용한 분야별 피해예측 및 영향평가 연구에 대한 중요성이 점점 커져가고 있다.

기후변화가 미래 작물 수확량 변화에 얼마나 영향을 미칠 것인가에 대한 평가는 주로 작물모델에 기후변화 시나리오를 입력해 작물별 수확량을 예측하는 방식으로 실시되어 왔다(Parry et al., 2004; Masutomi et al., 2009; Shin et al., 2011). 작물모델은 작물 생육 과정에 대한 물리적 프로세스를 배경으로 한 모델과 과거 생육단계별 기후자료와 수확량 통계자료를 배경으로 한 모델이 개발되어 이용되고 있다(Tsuji et al., 1994; Jones et al., 2003; Willams et al., 1984; Guoxin et al., 2003; Fischer et al., 2002). 기후변화와 같이 과거에 경험해 본 적이 없는 기후 상황에서 작물 수확량을 예측할 경우에는 주로 프로세스 배경의 작물모델이 이용된다. 작물 수확량 추정을 위한 프로세스 배경의 작물모델은 연구목적에 따라 다양한 공간스케일로 개발되어 왔으며 최근에 들어 기후변화



에 따른 농업분야 영향평가 연구에 자주 이용되고 있다.

전지구 규모의 기후변화에 따른 작물 수확량 변화 예측에 대한 연구를 살펴보면 Tan et al.,(2003)은 작물별 식재일(이앙일)과 수확시기를 고려한 작물 수확량 예측모델인 EPIC을 이용해 주요 농작물에 대한 수확량 예측을 실시해 지구온난화가 작물생산에 미치는 영향을 평가했다. Takahashi et al.,(1997)은 전지구 규모로 작물 수확량 변화에 대한 기후변화 영향평가를 실시해 전지구 평균기온이 2°C에서 5°C 상승할 경우 중국지역의 밀 생산량이 약 60% 감소하고 옥수수 생산량이 약 40% 감소하는 것으로 예측해 기후변화가 아시아 곡물생산에 큰 타격을 줄 것이라고 추정했다. Masutomi et al.,(2009)은 CMIP3의 SRES시나리오를 기반으로 작성된 기후변화 시나리오를 이용해 GCM에 의한 작물 수확량 예측의 불확실성을 평가함과 동시에 기후변화가 아시아 지역의 쌀 수확량에 미치는 영향을 평가했다. Shin et al.,(2011)은 다양한 CMIP3의 기후변화 시나리오를 이용해 전지구 옥수수 수확량의 변화를 예측하고 그에 따른 불확실성을 정량적으로 평가했다. 상기와 같이 기후변화에 따른 작물 수확량 예측에 관한 다양한 연구가 실시되어 왔으며 RCP 배출시나리오 기반의 기후변화 시나리오가 새롭게 작성되어 이것을 활용한 농업분야 기후변화 영향평가 연구에 대한 기대가 높아지고 있다.

농업분야에 대한 기후변화 영향평가 연구를 수행하기 위해 다양한 기후변화 시나리오가 작성되어 이용되어 왔고 최근까지 연구에서는 주로 IPCC AR4를 위해 작성된 SRES (Special Report on Emissions Scenarios) 배출 시나리오 기반의 기후변화 시나리오가 이용되었다(Nakicenovic and Swart, 2000). 현재 전 세계 많은 국가들이 지구온난화 방지를 위한 국제적인 협의를 통해 온실가스 배출량을 제한하도록 하는 완화책이 실시 또는 준비되고 있으나 SRES 시나리오에는 이와 같은 완화책의 노력이 고려되어 있지 않아 현실성이 좀 떨어진다는 평가를 받아왔다. 이에 IPCC는 AR5를 위해 SRES 시나리오의 단점을 개선한 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP) 시나리오를 개발했고 이 RCP 시나리오를 기반으로 작성된 기후변화 시나리오가 공개되고 있다(Taylor et al., 2009). 국제사회에 온실가스 농도 완화를 위한 국가 간 노력의 중요성을 주장하기 위해서는 먼저 상기 새로운 기후변화 시나리오를 활용한 영향평가 연구의 수행이 무엇보다 중요하다.

작물의 수확량은 기온, 강수량, 일사량 등의 기후요소에 의한 영향과 비료사용, 관개 시설 보급, 기계화와 같은 기술적인 요인에 의한 영향을 받는다. 기후변화 아래서의 작물에 대한 수확량 예측이나 재배 적합지역에 대한 판정은 각국이 미래 식량수급 계획 및 토지 이용계획을 세우는데 있어 중요한 정보로서 활용될 것으로 기대된다. 기후변화가 국가 및 지역 규모의 작물 수확량에 미치는 영향에 대해서는 많은 선행 연구가 이루어져 왔으나 전지구 규모에서의 다양한 기후변화 시나리오를 이용한 글로벌 영향평가 연구에 대해서는 아직 충분한 연구가 이루어졌다고 말할 수 없다(Benhin, 2008; Knox et al., 2010; Jerry et al., 2012). 농업 분야에 대한 전지구 규모의 영향평가 연구 결과를 바탕으로 지역 특성에 맞는 적절한 적응 정책을 수립하기 위해서는 먼저 기후변화 시나리오 입력 자료에 따른 작물 수확량 예측의 불확실성에 대해 충분히 고려할 필요가 있다.

본 연구에서는 전 세계 쌀 생산량의 90% 이상을 차지하고 있는 아시아·태평양 지역의 주요 쌀 생산국 20개국을 대상으로 글로벌 스케일의 작물모델인 M-GAEZ에 RCP 시나리오를 기반으로 한 CMIP5의 기후변화 시나리오를 입력해 기후변화가 미래 쌀 수확량 변화에 미치는 영향에 대해 정량적으로 평가하고자 한다. 또한 기후변화에 대한 적응 대책의 고려가 미래 쌀 수확량 변화에 어느 정도 영향을 미치는지에 대해 평가하고 쌀 수확량 변화 예측 결과에 포함되어있는 예측의 불확실성에 대해 GCM 기후예측의 차이에 따른 불확실성과 RCP 시나리오에 따른 불확실성으로 나누어 평가하는 것을 목적으로 한다. 나아가 쌀 수확량 변화 예측 결과를 바탕으로 미래 어느 지역이 쌀 생산에 적합해지고 어느 지역이 부적합해지는지에 대한 분석을 통해 우리나라와 같은 주요 곡물 수입국에서 안정적인 식량공급 지역을 확보하는데 있어 선제적으로 대응할 수 있도록 작물 재배적지 분석 정보를 제공하고자 한다.

2. 연구 자료 및 방법

2.1 기후데이터

2.1.1 RCP 시나리오

IPCC는 기존의 제 4차 평가보고서에서 이용된 SRES 시나리오에 완화책·적응책과 같은 정책주도적인 배출 삭감 대책이 고려되어 있지 않다는 문제점과 시나리오의 노후화 및 공간해상도 등의 문제점을 보완하기 위해 통합평가모델 컨소시엄을 중심으로 복사강제력 시나리오인 대표적 농도경로(Representative Concentration Pathway, RCP)를 개발했다. RCP 시나리오는 미래 온실가스 농도 안정화 레벨 목표를 설정하고 온실가스 배출 완화정책을 통해 그 목표를 달성하기까지의 여러 가지 시나리오 경로 중에서 대표적인 시나리오 선택을 통해 작성되었다. RCP에는 Figure 1에 나타내진 것 같이 대표적인 4개 시나리오(RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5)가 개발되어 있고 온실가스 농도가 복사강제력 상승에 미치는 영향의 크기를 바탕으로 특성화 되어 있다(Taylor et al., 2009). RCP 시나리오에 대한 개요를 Table 1에 정리했다. RCP 2.6은 강력한 온실가스 저감 정책을 통해 지구 기온 상승을 약 2°C로 제한시키는 시나리오로 복사강제력이 산업화 이전과 비교해 3 W/m² 상승을 정점으로 2100년까지 2.6 W/m²로 감소하는 시나리오다. RCP 4.5는 온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 시나리오로 2100년까지 복사강제력이 4.5 W/m²로 상승하고 이후 안정화 되는 시나리오다. RCP 6.0은 온실가스 저감 정책이 어느 정도 실현되는 시나리오로 2100년이 지나서 복사강제력이 6.0 W/m²로 안정화 되는 시나리오다. RCP 8.5는 온실가스 저감 정책 없이 현재와 같은 추세로 온실가스가 배출되는 시나리오로 2100년까지 복사강제력이 8.5 W/m²로 상승하고 이후로도 지속적으로 상승해 2200년이 지나서야 안정화 된다. IPCC의 제 5차 평가보고서에는 RCP 시나리오를 기반으로 한 미래 기후 전망 결과와 이를 활용한 영향 및 적응에 대한 평가연구 등이 보고된다.

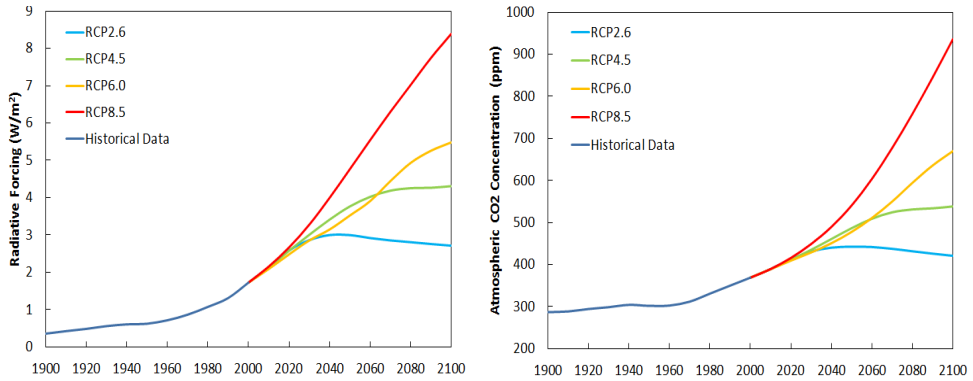


Figure 1 Radiative forcing and atmospheric CO₂ concentration change for historical period and future scenarios in CMIP5

Table 1 RCPs scenario summary

Scenario	Total CO ₂ equivalent concentration	IAM ^a (Institute)	Reference
RCP2.6	Peak at ~490 ppm and decreasing in 2100	IMAGE (PBL)	Van Vuuren et al. (2007)
RCP4.5	~650 ppm in 2100	GCAM (PNNL)	Wise et al. (2009)
RCP6.0	~850 ppm in 2100	AIM (NIES)	Fujino et al. (2006)
RCP8.5	~1370 ppm in 2100	MESSAGE (IIASA)	Riahi et al. (2007)

^a Integrated Assessment Model

2.1.2 CMIP5 기후변화 시나리오

IPCC의 제 5차 평가보고서를 위해 작성된 미래 기후변화 시나리오는 세계기후연구계획(World Climate Research Programme, WCRP)의 주도로 2007년에서 2011년에 걸쳐 실시된 5단계 결합모델 상호비교 프로젝트(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5)를 통해 작성되었다. CMIP5 사업에는 전 세계 23개 기후 연구 그룹이 참여했으며 50개가 넘는 기후모델을 이용해 과거기후 모의실험과 RCP 시나리오를 기반으로 한 미래 기후변화 전망 실험을 실시해 모델간의 차이와 문제점에 대해 검토했다.

CMIP5의 기후변화 시나리오는 Earth System Grid(<http://earthsystemgrid.org>)



/home.htm)라 불리는 분산시스템에 의해 공개되고 있으며 이것을 활용한 농업 및 수자원 과 같은 기후응용분야에 대한 새로운 기후변화 영향·적응 평가 연구에 기대가 높아지고 있다. 본 연구에서는 CMIP5의 기후변화 시나리오에 대해 Earth System Grid로부터 국내 타 연구기관 보다 우선적으로 자료를 취득 축적하고 있는 APEC 기후센터의 기후데이터 서비스 시스템과 일본 국립환경연구소의 Global Meteorological Data Server를 통해 CMIP5의 32개 기후모델(General Circulation Model, GCM)에 의한 20세기 기후 모의실험 및 21세기 기후변화 전망 자료를 다운로드해 이용했다. CMIP5의 각 GCM에서는 복수의 Ensemble run으로 기후모의 실험을 실시했지만 본 연구에서는 Ensemble r1i1p1의 자료만을 다운로드해 이용했다. 연구에 이용된 CMIP5의 GCM 종류와 특성에 대해서는 Table 2에 정리해 나타냈다. CMIP5에 적용된 4개 RCP 시나리오 중에서 RCP 4.5와 8.5 시나리오는 32개 GCM 모두에 적용되어 기후변화 시나리오가 작성되었으나 RCP 2.6 시나리오는 25개 GCM에 적용되었고 RCP 6.0 시나리오는 18개 GCM에만 적용되어 기후변화 시나리오가 작성되었다. CMIP5의 기후변화 시나리오는 GCM에 따라 Table 2와 같이 공간 분해능이 각각 다르게 작성되어 있으며 본 연구에 이용된 32개 GCM 중에서는 CMCC-CM(cccm) 모델의 공간분해능이 480×240으로 가장 높았고 FGOALS-g2(fgg2) 모델의 공간분해능이 128×60으로 가장 낮았다.

Table 2 Characteristics of the GCMs in the CMIP5 data

Model	Code	RCP Scenario				Institute	Country	Spatial Resolution (lon. × lat.)
		2.6	4.5	6.0	8.5			
ACCESS1-0	ac10	×	⊙	×	⊙	CAWCR	Australia	192 × 145
ACCESS1-3	ac13	×	⊙	×	⊙	CAWCR	Australia	192 × 145
BCC-CSM1-1-M	b11m	⊙	⊙	⊙	⊙	BCC	China	320 × 160
BNU-ESM	bne1	⊙	⊙	×	⊙	BNU	China	128 × 64
CanESM2	ce21	⊙	⊙	×	⊙	CCCMA	Canada	128 × 64
CCSM4	csm4	⊙	⊙	×	⊙	NCAR	USA	288 × 192
CESM1-BGC	c1bg	×	⊙	×	⊙	NCAR	USA	288 × 192
CESM1-CAM5	c1ca	⊙	⊙	⊙	⊙	NCAR	USA	288 × 192
CMCC-CM	cccm	×	⊙	×	⊙	CMCC	Italy	480 × 240
CNRM-CM5	cc51	⊙	⊙	×	⊙	CNRM/CERFACS	France	256 × 128
CSIRO-Mk3-6-0	cm36	⊙	⊙	⊙	⊙	CSIRO/QCCCE	Australia	92 × 96

Model	Code	RCP Scenario				Institute	Country	Spatial Resolution (lon. × lat.)
		2.6	4.5	6.0	8.5			
FGOALS-g2	fgg2	⊙	⊙	×	⊙	LASG/IAP	China	128 × 60
FGOALS-s2	fgs2	⊙	⊙	⊙	⊙	LASG/IAP	China	128 × 108
FIO-ESM	fie1	⊙	⊙	⊙	⊙	FIO	China	128 × 64
GFDL-CM3	gc31	⊙	⊙	⊙	⊙	GFDL	USA	144 × 90
GFDL-ESM2G	ge2g	⊙	⊙	⊙	⊙	GFDL	USA	144 × 90
GFDL-ESM2M	ge2m	⊙	⊙	⊙	⊙	GFDL	USA	144 × 90
GISS-E2-R	ge2r	⊙	⊙	⊙	⊙	GISS	USA	144 × 90
HadGEM2-A0	hg2a	⊙	⊙	⊙	⊙	NMR/KMA	Korea/UK	192 × 145
HadGEM2-CC	hg2c	×	⊙	×	⊙	MOHC	UK	192 × 145
HadGEM2-ES	hg2e	⊙	⊙	⊙	⊙	MOHC	UK	192 × 145
INM-CM4	in40	×	⊙	×	⊙	INM	Russia	180 × 120
IPSL-CM5A-LR	ic5l	⊙	⊙	⊙	⊙	IPSL	France	96 × 96
IPSL-CM5A-MR	ic5m	⊙	⊙	⊙	⊙	IPSL	France	144 × 142
IPSL-CM5B-LR	icbl	×	⊙	×	⊙	IPSL	France	96 × 96
MIROC5	m501	⊙	⊙	⊙	⊙	MIROC	Japan	256 × 128
MIROC-ESM	mes1	⊙	⊙	⊙	⊙	MIROC	Japan	128 × 64
MIROC-ESM-CHEM	mesc	⊙	⊙	⊙	⊙	MIROC	Japan	128 × 64
MPI-ESM-LR	mpel	⊙	⊙	×	⊙	MPI-M	Germany	192 × 96
MPI-ESM-MR	mpem	⊙	⊙	×	⊙	MPI-M	Germany	192 × 96
MRI-CGCM3	mc31	⊙	⊙	⊙	⊙	MRI	Japan	320 × 160
NorESM1-M	ne1m	⊙	⊙	⊙	⊙	NCC	Norway	144 × 96

2.1.3 기후데이터 작성방법

농업분야에서 작물 수확량 변화에 대한 기후변화 영향평가 연구를 실시하기 위해서는 일반적으로 일평균 기온[°C], 일평균 최고기온[°C], 일평균 최저기온[°C], 일평균 강수량[mm/day], 일평균 일사량[W/m²], 일평균 풍속[m/s] 등의 기후입력 자료가 요구된다. 본 연구에서는 글로벌 스케일의 작물 수확량 예측모델에 CMIP5의 각 GCM별 미래 기후변화 시나리오를 입력 자료로 활용하기 위해 먼저 GCM에 따라 서로 다른 공간분해능을 하나의 공간분해능으로 통일시켜주고 다음으로 GCM의 미래 기후변화 시나리오에 포함되어 있는 Bias(편이)를 보정해 주는 과정을 거쳐 맞춤형 기후변화 시나리오 데이터를 작성했다.

취득한 기후변화 시나리오는 GCM에 따라 그 공간 분해능이 다르기 때문에 효율적인 모델 시뮬레이션 작업을 위해 기하학적 선형내삽 방법을 이용해 각 기후변화 시나리오의 공간분해능을 위도방향 1°, 경도방향 1°로 통일시켜 다시 작성했다. 또한 32 개 GCM에 의한 과거기후 모의실험 결과와 CRU 관측기후 자료(New et al., 1999; Mitchell and Jones, 2005)를 가지고 1961-1990년의 전지구 연평균기온 변화를 Figure 2와 같이 나타낸 결과 GCM에 따라 차이는 있지만 각 GCM의 과거기후 모의 결과에 계통적인 Bias가 존재하는 것을 확인했다. 여기서 나타나는 Bias는 GCM별 미래 기후변화 시나리오에도 포함되어 있기 때문에 농업 및 수자원과 같은 기후응용 연구에 기후변화 시나리오 자료를 활용하기 위해서는 반드시 사용 전에 Bias를 제거하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 CRU 기후관측 자료의 1961-1990년에 대한 30년 평균의 월평균 기후 값과 각 GCM의 1961-1990년에 대한 30년 평균의 월평균 기후 값 사이의 차를 이용해 기후변화 시나리오에 대한 Bias 보정 작업을 실시했다. Figure 3은 Bias 보정을 위한 CRU 기후관측 자료의 베이스라인 기간(1961-1990년)에 대한 30년 평균의 8월 평균 기온(왼쪽)과 강수량(오른쪽)의 분포를 나타내고 있다.

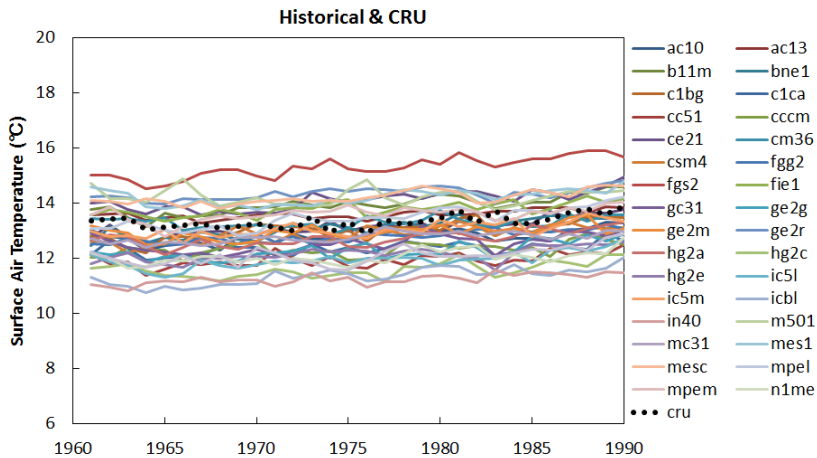


Figure 2 Global annual mean surface air temperature change

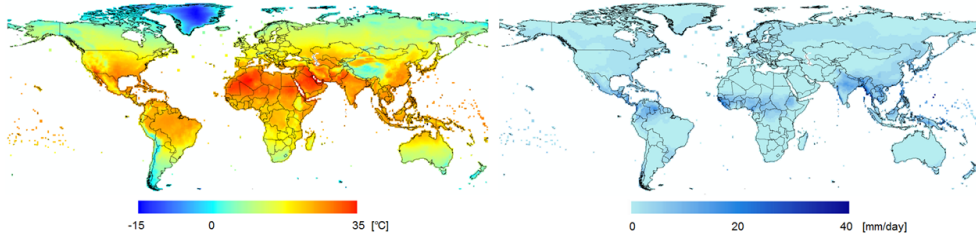


Figure 3 Average temperature and precipitation in August (1961-90 average)

$$T'_{y,m} = (T_{y,m} - T_{61_90,m}) + CRU_T_{61_90,m} \quad (1)$$

$$V'_{y,m} = \begin{cases} (V_{y,m} - V_{61_90,m}) + CRU_V_{61_90,m} & \text{for } V_{y,m} \geq V_{61_90,m} \\ (V_{y,m} / V_{61_90,m}) \times CRU_V_{61_90,m} & \text{for } V_{y,m} < V_{61_90,m} \end{cases} \quad (2)$$

CMIP5의 32개 GCM에 의해 모의된 각 기후변수에 대한 기후변화 시나리오의 Bias 보정은 식 (1)과 (2)에 의해 이루어졌다. 여기서, T 는 월평균 기온[$^{\circ}\text{C}$]을 나타내고 V 는 그 외의 기후변수인 월평균 강수량[mm/day], 월평균 일사[W/m^2], 월평균 풍속[m/s] 중 하나를 나타낸다. 기온의 경우 베이스라인 기간의 CRU 월평균 관측값과 GCM 출력의 월평균값의 차를 기후변화 시나리오에 가산해 주고 기온 이외의 기후요소에 대해서는 GCM 출력값이 베이스라인 기간의 평균 GCM 출력값 이상일 경우에는 기후변화 시나리오에 가산을 해주고 반대로 미만일 경우에는 Bias 보정한 값이 음의 값이 되지 않게 하기 위해 승산을 해줘서 Bias 보정된 기후변화 시나리오를 작성한다. “'” 는 각각의 기후변수에 대해 기후변화 시나리오라는 의미로서 나타낸다. 첨자 y 와 m 은 시뮬레이션 기간인 year와 month를 나타내며 “61_90, m ”은 1961년부터 1990년까지의 30년 평균에 대한 m 월의 기후 평균값을 나타낸다. $CRU_T_{61_90,m}$ 와 $CRU_V_{61_90,m}$ 는 CRU 관측기후 자료의 1961년부터 1990년까지의 30년 평균에 대한 m 월의 기후 평균값을 나타낸다. 또한 작물 수확량 예측 모델에서는 각 기후요소에 대한 일평균 데이터를 입력데이터로 이용하기 때문에 Bias 보정을 마친 월평균 기후 데이터는 Spline 보간법을 이용해 일평균 데이터로 변환시켜 다시 작성했다.



2.2 글로벌 작물 수확량 예측 모델

2.2.1 M-GAEZ 모델 개요

일본 국립환경연구소(National Institute for Environmental Studies, NIES)에서는 국제연합식량농업기구(Food and Agriculture Organization of the UN, FAO)와 국제응용시스템분석연구원(International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA)이 공동 개발한 GAEZ(Global Agro-Ecological Zones) 모델을 기후변화 영향평가 및 적응 대책 연구에 적합하도록 개선과정을 거쳐 전지구 작물 수확량 예측모델인 M-GAEZ을 개발했다(Masutomi et al., 2009). M-GAEZ 모델은 기후데이터와 토양특성, 관개정보, 입력레벨 등의 조건에 기초해 작물의 성장을 이론적으로 추정하고 나아가 FAO에서 전지구 경작지를 대상으로 장기간에 걸친 조사를 통해 작성한 다양한 경험적인 파라메타를 이용해 작물의 잠재 수확량을 산출한다. 여기서 입력레벨이란 자본, 노동력, 토양비옥도, 기술개발 레벨 등과 같은 작물 수확량에 영향을 미치는 요소의 총체적인 지표를 말한다. 기후 조건으로는 일평균 기온[°C], 일 강수량[mm/day], 일평균 복사[W/m²], 일평균 풍속[m/s] 이 모델의 입력 정보로서 이용된다. 기후 이외의 입력 정보로는 Table 3에 나타난 각종 데이터가 이용된다. 이상의 다양한 모델 입력 공간정보의 효율적인 활용을 위해 M-GAEZ 모델의 작물 수확량 계산은 지리정보시스템(Geographic Information System, GIS) 상에서 이루어진다.

M-GAEZ 모델은 밀, 옥수수, 콩, 쌀 등의 다양한 작물에 대한 수확량 계산이 가능하도록 설계되어있다. 본 연구의 대상작물인 쌀은 크게 건조지대 품종과 습윤지대 품종으로 구분되나 생산량 대부분이 아시아태평양지역을 중심으로 재배되고 있는 습윤지대 품종에 의해 생산되고 있어 이 품종에 대해서만 고려했다. 습윤지대 품종에는 동남아시아와 인도를 중심으로 재배되고 있는 Indica 종과 우리나라와 중국, 일본, 미국을 중심으로 재배되고 있는 Japonica 종이 있다. M-GAEZ 모델에서는 성장기간에 따라 Indica 종에 대해 다시 4개의 품종(105, 120, 135, 150일의 성장기간), Japonica 종에 대해 4개의 품종(105, 120, 135, 150일의 성장기간)으로 구분해 수확량을 예측한다.

Table 3 Input data for GAEZ model

Items	Data Names
Soil data	Digital Soil Map of the World (FAO, 1995; FAO, 2002)
Elevation data	GTOPO30 (USGS, 1998)
Cultivated area rate	Major Crop Dataset (Leff et al., 2004)
Irrigated area rate	Global Map of Irrigation Areas (Siebert et al., 2005)
Country boundary	Gridded Population of the World (CIESIN, 2005)
Fertilization use	World Development Indicators (World Bank, 2006)

2.2.2 작물 수확량 추정 방법

M-GAEZ 모델에 의한 작물 수확량 계산은 Figure 4와 같은 흐름으로 이루어진다. 작물 수확량 계산은 크게 기후 모듈, 작물성장 모듈, 토양제약 모듈, 이산화탄소(CO₂) 시비 효과 모듈의 4개 모듈을 통해 이루어진다. 먼저 기후 모듈에서는 CMIP5의 기후변화 시나리오 자료와 CRU 기후관측 자료를 이용해 Bias 보정된 기후변화 시나리오가 작성되고 FAO-56 Penman-Monteith 방법으로부터 작물 수확량 추정에 중요한 파라메타인 잠재 증발산량(mm/day)이 계산된다(FAO, 1998). 작물성장 모듈에서는 기후 모듈에서 작성된 기후 시나리오와 작물 파라메타를 근거로 작물이 성장 가능한 기온요건을 충족하는 지역을 판단한다. 작물 성장이 가능한 지역에 대해서는 토양에 의한 제약이 없는 상태에서 기후 조건만을 고려한 작물 수확량이 산출되지만 기온요건을 충족하는 일수가 작물 성장기간에 미치지 못할 경우에는 재배 부적합 지역으로 판정돼 작물 수확량 계산이 이루어지지 않는다. 지구표면은 다양한 토양으로 구성되어 있어 작물 생육에 적합한 토양이 있는 반면 작물 생육이 불가능한 토양 또는 작물 생육은 가능하나 생산성이 낮은 토양도 분포하기 때문에 작물 수확량 예측의 현실성을 높이기 위해서는 토양환경에 의한 제약을 고려해야만 한다. 토양제약 모듈에서는 작물성장 모듈에서 산출된 잠재 작물 수확량에 토양에 의한 제약을 고려하기 위해 세계 토양 데이터를 이용한다. 이 토양 데이터에는 세계 각 지역에 대한 토양성분, 형태, 분포에 대한 정보와 작물 종류에 따라 토양제약을 고려한 106 가지 토양단위에 대한 정보가 포함되어 있다.

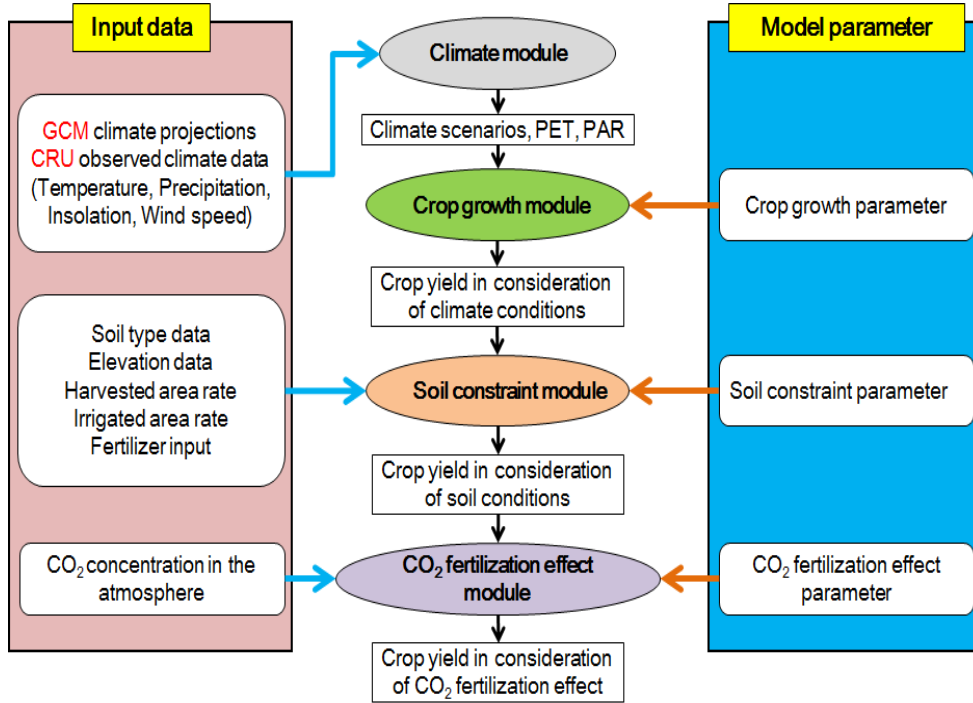


Figure 4 Flow of calculating crop yield

이산화탄소(CO₂) 시비효과 모듈에서는 RCP 시나리오별 대기 중 CO₂ 농도의 변화에 따른 시비효과를 고려한다. CO₂ 시비효과란 대기 중 CO₂ 농도가 증가함으로써 인해 작물의 광합성에 유리하게 작용해 작물에 비료를 주는 것과 같이 작물의 생육이나 수확량을 증대시키는 효과를 의미한다. CO₂ 시비효과는 식물 타입에 따라 다르며 벼와 같은 C3 식물에 대해서는 Table 4와 같은 효과를 갖는 것으로 알려져 있다(Tubiello et al. 2007). 본 연구에서는 RCP 시나리오에 따른 CO₂ 시비효과의 차이가 작물 수확량에 미치는 영향에 대해 평가했다.

Table 4 CO₂ fertilization effect parameter

	RCP 2.6		RCP 4.5		RCP 6.0		RCP 8.5	
	CO ₂ [ppm]	Parameter	CO ₂ [ppm]	Parameter	CO ₂ [ppm]	Parameter	CO ₂ [ppm]	Parameter
1961-1990	338.3	1.000	338.3	1.000	338.3	1.000	338.3	1.000
1990s	361.0	1.006	361.0	1.006	361.0	1.006	361.0	1.006
2020s	412.1	1.020	411.1	1.020	409.4	1.019	415.8	1.021
2050s	442.7	1.029	486.5	1.057	477.7	1.052	540.5	1.092
2080s	431.6	1.025	531.1	1.086	594.3	1.118	758.2	1.165

이상과 같은 계산 흐름으로 작물 수확량을 추정하는 M-GAEZ 모델에 대한 검증은 Masutomi et al.(2009)에 의해 CRU 관측기후 자료를 이용한 1980년대 아시아 지역에 대한 쌀 수확량 예측 결과와 FAO의 곡물 통계자료를 비교를 통해 Figure 5와 같은 검증 결과를 얻었고 모델 시뮬레이션 결과가 수확량 변동을 어느 정도 잘 재현하는 것으로 확인됐다. Shin et al.(2011)은 Masutomi et al.(2009)와 같은 방법으로 전 세계 옥수수 수확량에 대해 1971-2000년간의 모델 시뮬레이션을 실시해 M-GAEZ 모델의 수확량 재현성을 검증했다.

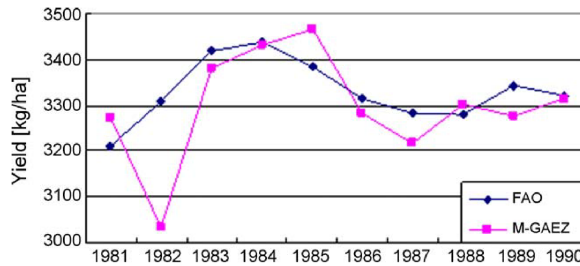


Figure 5 Validation of the M-GAEZ model [Masutomi et al. 2009]

2.2.3 실험설정

본 연구에서는 Table 5와 같은 실험설정으로 미래 기후변화에 따른 아시아태평양 지역의 쌀 수확량 변화율을 예측했다. 미래 쌀 수확량 변화율은 1990년대(1991-2000년)의



10년 평균 수확량을 기준으로 가까운 미래인 2020년대(2021-2030년), 2050년대(2051-2060년) 그리고 먼 미래인 2080년대(2081-2090년)에 대한 10년 평균 수확량을 비교해 산출했다. M-GAEZ 모델에 입력되는 기후변화 시나리오는 총 32개 GCM에 4가지 RCP 시나리오를 적용해 작성되었지만 각각의 GCM에 모든 RCP 시나리오가 적용된 것은 아니다. 이번 실험에서는 RCP 2.6을 기반으로 작성된 25개 기후변화 시나리오와 RCP 4.5 기반의 32개, RCP 6.0 기반의 18개 그리고 RCP 8.5 기반의 32개 기후변화 시나리오가 이용되어 총 107개의 기후변화 시나리오가 쌀 수확량 산정에 이용되었다. 지구온난화로 인해 미래 기후가 점점 온난해짐에 따라 최적의 이앙일은 앞당겨질 것이고 재배 품종도 현재 재배지역보다 따뜻한 지역에서 재배되고 있는 품종이 적합해질 것으로 예상된다. M-GAEZ 모델에서는 기후변화에 대한 적응 대책 고려 수단으로 작물 재배지역에 대한 최적의 식재일 및 품종을 매해 선택해 미래 수확량을 산정한다. 적응 대책을 고려하지 않는 경우란 1990년대의 최적의 식재일 및 품종을 선택해 이 정보를 미래 작물 수확량 계산에 고정시키는 것을 말한다.

Table 5 Simulation settings of this study

Items	Settings
Model	M-GAEZ model
Area studied	Asia-Pacific region
Crop studied	Rice (4 varieties: indica, 4 varieties: japonica)
Periods	1990s(1991-2000), 2020s(2021-2030), 2050s(2051-2060), 2080s(2081-2090)
GCM	CMIP5 GCMs(32 GCMs)
Scenarios	RCP2.6(25 GCMs), RCP4.5(32 GCMs), RCP6.0(18 GCMs), RCP8.5(32 GCMs)
Climate observations	CRU time-series datasets
Climate conditions	Surface air temperature (°C), Precipitation (mm/day), Surface downwelling shortwave radiation (W/m ²), Wind speed (m/s)
Adaptation measures	Planting dates, Varieties
Major producing countries	China, India, Indonesia, Bangladesh, Viet Nam, Thailand, Myanmar, Philippines, Cambodia, Japan, USA, South Korea, Pakistan, Nepal, Sri Lanka, Laos, Malaysia, Peru, North Korea, Russia

본 연구에서는 먼저 전 세계 쌀 생산량의 약 90%를 차지하는 아시아·태평양 지역의 주요 쌀 생산국가 20개국에 대한 쌀 수확량변화를 파악하기 위해 적응 대책을 고려했을 때와 적응 대책을 고려하지 않았을 때로 나누어 국가별 쌀 수확량 변화를 나타냈고 전 세계 쌀 생산량 상위 5개 국가(중국, 인도, 인도네시아, 방글라데시, 베트남)와 우리나라에 대한 쌀 수확량 변화율을 RCP 시나리오별로 GCM 평균해 나타냈다(3.1.1절). 여기서 국가별 쌀 수확량 변화율은 1990년대의 10년간의 평균 수확량을 기준으로 2020년대와 2050년대 그리고 2080년대의 10년간의 평균 수확량의 변화로 계산된다. 다음으로 각각의 GCM 기후 전망에 따른 쌀 수확량 변화 예측 결과의 차이를 파악하기 위해 아시아·태평양 지역의 20개국에 대한 평균 쌀 수확량을 GCM별로 평균해 RCP 시나리오별로 나타냈다(3.1.2절). 또한 3.2절에서는 3.1절의 쌀 수확량 분석 결과로부터 GCM에 의한 예측의 불확실성 및 RCP 시나리오에 의한 예측의 불확실성을 정량적으로 파악했다. 마지막으로 3.3절에서는 현재의 쌀 생산 가능지역이 기후변화로 인해 어느 정도 확장되고 감소되는지 RCP 시나리오별로 2020년대, 2050년대 그리고 2080년대에 대해 분석을 실시했다.

3. 연구내용

3.1 기후변화에 따른 쌀 수확량 전망

3.1.1 주요 생산국별 쌀 수확량 변화 분석

FAO 국제 곡물 통계 자료에 따르면 2011년 전 세계 쌀 생산량은 약 7억 2천만 톤(조곡) 이었고 그 중 약 90%는 아시아 지역에서 생산된 것으로 조사되었다. Figure 6에서와 같이 생산량이 가장 많은 것으로 나타난 중국과 인도의 생산량은 각각 2억 톤, 1억 6천만 톤으로 전 세계 쌀 생산량의 절반을 차지하고 있는 것으로 나타났다. 그 뒤를 이어 인도네시아와 방글라데시, 베트남의 쌀 생산량이 각각 6천 5백만 톤, 5천만 톤, 4천 2백만 톤으로 많았고 이 다섯 개 국가에서 전 세계 쌀 생산량의 약 70% 이상이 생산된 것으로 나타났다. 우리나라의 쌀 생산량은 630만 톤으로 전 세계 쌀 생산량의 약 0.9%를 차지하는 것으로 나타났다. 현재 우리나라에서 주로 생산·소비되는 쌀은 자포니카(Japonica) 품종으로 우리나라

이외에도 중국, 일본 그리고 미국 등에서 주로 생산되고 있으며 이 품종은 전 세계에서 생산되는 쌀의 약 10% 밖에 되지 않는다.

본 절에서는 아시아·태평양지역의 주요 쌀 생산국가 20개국을 대상으로 CMIP5의 4개 RCP 시나리오를 기반으로 작성된 총 107개 기후변화 시나리오를 이용해 1990년대를 기준으로 한 2020년대, 2050년대 그리고 2080년대의 쌀 수확량 변화를 분석한 결과에 대해 정리했다. 먼저 국가별로 기후변화에 대한 최적 이앙일 선택과 최적 품종 선택의 적응 대책에 대한 고려가 쌀 수확량 변화에 얼마나 영향을 미치는지에 대해 분석했다.

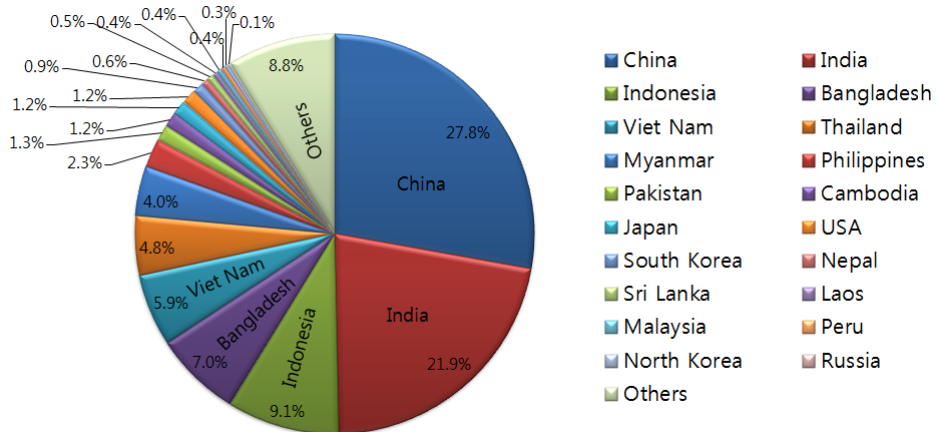


Figure 6 Ratio of rice production in the Asia-Pacific region countries
Source: FAOSTAT data 2011. <http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx#ancor>

3.1.1.1 적응대책 고려 결과

지구 온난화의 진행으로 쌀 재배지역의 평균기온이 점점 상승하고 있는 상황에서 중·고위도 지역에서는 파종일 및 식재일(이앙일)이 점점 빨라질 것으로 예상되고 있다. 또한 현재 쌀 재배가 이루어지고 있는 대부분의 지역에서는 기후에 적합하고 병해충에 의한 피해를 최소화 할 수 있도록 개량된 품종의 쌀이 재배되고 있으나 앞으로는 기후변화의 영향으로 현재 기후에 적합 품종이 적합하지 않은 품종으로 바뀌고 새로운 종의 병해충이 발현할 것으로 예상되기 때문에 이에 따른 적절한 대응대책을 세우지 않으면 수확량 감소는 피할 수 없는 현실이 될 것이다.

본 절에서는 기후변화 상황에서 최적의 이양일과 최적의 품종 선택이라는 적응대책을 고려했을 경우에 대한 미래 쌀 수확량 변화의 예측 결과를 정리했다. Figure 7은 상기 적응 대책을 고려했을 경우 각 RCP 시나리오 하에서 주요 쌀 생산국가 20개국에 대한 GCM별 쌀 수확량의 변화를 나타내고 있다. 20개 대상국 중에서는 가장 고위도 지역에 위치하고 있는 러시아에서 GCM에 따라 차이는 있지만 전체적으로 쌀 수확량이 가장 크게 증가하는 것으로 나타났다. FAO의 곡물 통계 자료에 따르면 2011년 전 세계 쌀 생산량 중에서 러시아가 차지하는 비율은 약 0.15 %로 20개 주요 쌀 생산국 중에서도 생산량이 가장 낮은 것으로 나타났지만 수확량 변화율 그래프를 통해 알 수 있듯이 지구 온난화와 더불어 현재 러시아의 쌀 재배 지역이 쌀 생산에 적합한 환경으로 바뀌어 적응 대책 효과와 더불어 쌀 수확량이 급격하게 증가하는 것으로 전망되고 있다. 특히 2080년대 RCP 8.5 시나리오 하에서는 GCM에 따라 큰 예측의 차이를 나타내고 있지만 모든 GCM에서 쌀 생산량이 증가하는 것으로 예측되고 있다. 페루와 북한에서도 모든 RCP 시나리오 하의 모든 GCM에서 예측의 차이(불확실성)는 있지만 지구 온난화와 더불어 쌀 수확량이 크게 증가할 것으로 예측되고 있다. 전 세계 쌀 생산량의 약 50 % 생산하고 있는 중국과 인도에서는 모든 RCP 시나리오 하에서 2020년대에 모든 GCM의 쌀 수확량 예측 결과가 $\pm 20\%$ 내에서 골고루 분포하는 것으로 나타났지만 2080년대로 갈수록 수확량이 증가할 것으로 예측되는 GCM이 많아지고 증가 크기도 크게 나타났다. 우리나라의 경우에도 대부분의 RCP 시나리오에서 2080년대로 갈수록 쌀 수확량이 대체로 증가하는 것으로 나타났다. 특히 RCP 8.5 시나리오 하에서 2080년대에 HadGEM2-AO(hg2a) 모델은 우리나라 쌀 수확량이 약 34.3% 증가하는 것으로 예측하고 있고 MIROC-ESM(mes1) 모델은 약 12.5% 감소하는 것으로 예측하고 있다. 캄보디아나 태국, 인도네시아와 같은 일부 동남아시아 지역에서는 2080년대에 RCP 8.5 시나리오 하에서 쌀 수확량이 감소할 것으로 예측되는 GCM이 다른 RCP 시나리오에 비해서 많은 것으로 나타났다. 이는 적응대책을 고려하더라도 과도한 기온 상승을 예측하는 GCM에서는 수확량이 감소한다는 것을 나타낸다.

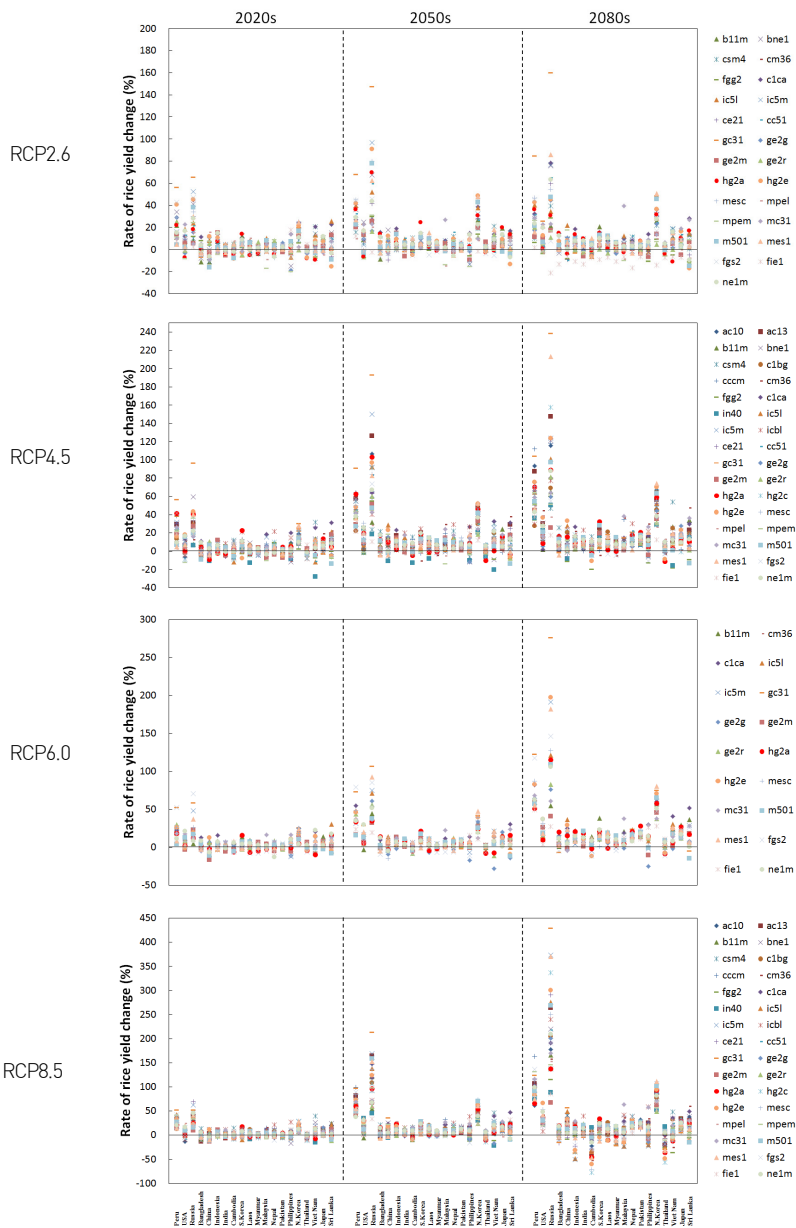


Figure 7 Rate of rice yield change in the Asia-Pacific region countries (considered adaptation measures)

3.1.1.2 적응대책 무(無)고려 결과

기후변화의 진행으로 인해 작물 수확량이 점점 감소하는 상황에서 인류사회가 아무런 대책을 마련하지 않는다는 것은 현실성이 떨어진다고 볼 수 있다. 앞 절에서와 같은 최적의 이앙시기와 품종 선택이라는 적응 대책을 고려하지 않고 현재 작물 재배 상태에서 기후변화를 맞이한다면 미래 쌀 수확량이 어떻게 될 것인가에 대해 분석한 결과를 정리했다.

먼저 미래 벼 이앙시기와 품종에 대해 현재 상태를 미래에 고정시키는 방법으로 기후변화에 대한 적응 대책을 고려하지 않는 것으로 했다. 여기서는 1990년대에 쌀 수확량이 가장 좋았던 이앙일과 품종을 선택해 2020년대와 2050년대, 2080년대의 수확량을 계산할 때 적용하였다. Figure 8은 상기 적응 대책을 고려하지 않았을 경우에 대해 각 RCP 시나리오 하에서 주요 쌀 생산국가 20개국에 대한 GCM별 쌀 수확량의 변화를 나타내고 있다. 러시아와 북한에서는 적응대책을 고려하지 않더라도 적당한 기온상승의 영향으로 현재 쌀 재배 지역이 쌀 생산에 보다 적합한 환경으로 바뀌어 수확량이 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 전지구 평균기온 상승이 약 3.7°C (2.6°C – 4.8°C) 상승할 것으로 예상되고 있는 RCP 8.5 시나리오의 2080년대에서는 쌀 생산에 적합한 기온보다 그 이상으로 기온이 상승할 것으로 예측되는 GCM에 의해 쌀 수확량이 감소할 것으로 예측되기도 한다. 이 경우 러시아에서는 CNRM-CM5(cc51) 모델에서 쌀 수확량이 90.7% 증가하는 것으로 예측되었으나 MIROC-ESM-CHEM(mesc) 모델에서 71.4% 감소하는 것으로 예측되고 있어 상당한 불확실성이 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 중국과 인도에서는 모든 RCP 시나리오에서 대부분의 GCM이 쌀 수확량 감소를 예측하는 것으로 나타났다. 우리나라의 경우 대부분의 RCP 시나리오에서 쌀 수확량이 증가할 것으로 예측되는 GCM과 감소할 것으로 예측되는 GCM이 비슷하게 분포되어있으나 RCP 8.5 시나리오의 2080년대에는 FIO-ESM(fie1) 모델에서 최대 9.1% 증가하고 GFDL-CM3(gc31) 모델에서 70.7% 감소하는 등 대체로 쌀 수확량이 감소하는 것으로 나타나고 있다. 적응대책을 고려하지 않을 경우 문제가 가장 심각한 곳은 동남아시아 지역으로 대부분의 동남아시아 국가에서 쌀 수확량이 크게 감소하는 것으로 나타나고 있다. 특히 캄보디아와 태국, 베트남에서는 모든 RCP 시나리오에서 대부분의 GCM이 쌀 수확량 감소를 예측하고 있으며 RCP 8.5 시나리오의 2080년대에 캄보디아에서는 32개 GCM 중에서 8개 GCM에서 쌀 수확량이 90% 이상 감소할 것으로 예측하고 있는 것으로 나타났다. 또한 네팔의 경우에는 본 연구에서 이용된 107개 기후변



화 시나리오 중에서 RCP 2.6 시나리오의 2050년대 CNRM-CM5(cc51) 모델(1.4 % 증가)과 RCP 4.5 시나리오의 2020년대 HadGEM2-CC(hg2c) 모델(0.1 % 증가)의 결과를 제외한 모든 RCP 시나리오의 모든 GCM에서 쌀 수확량이 감소할 것이라고 예측하고 있다.

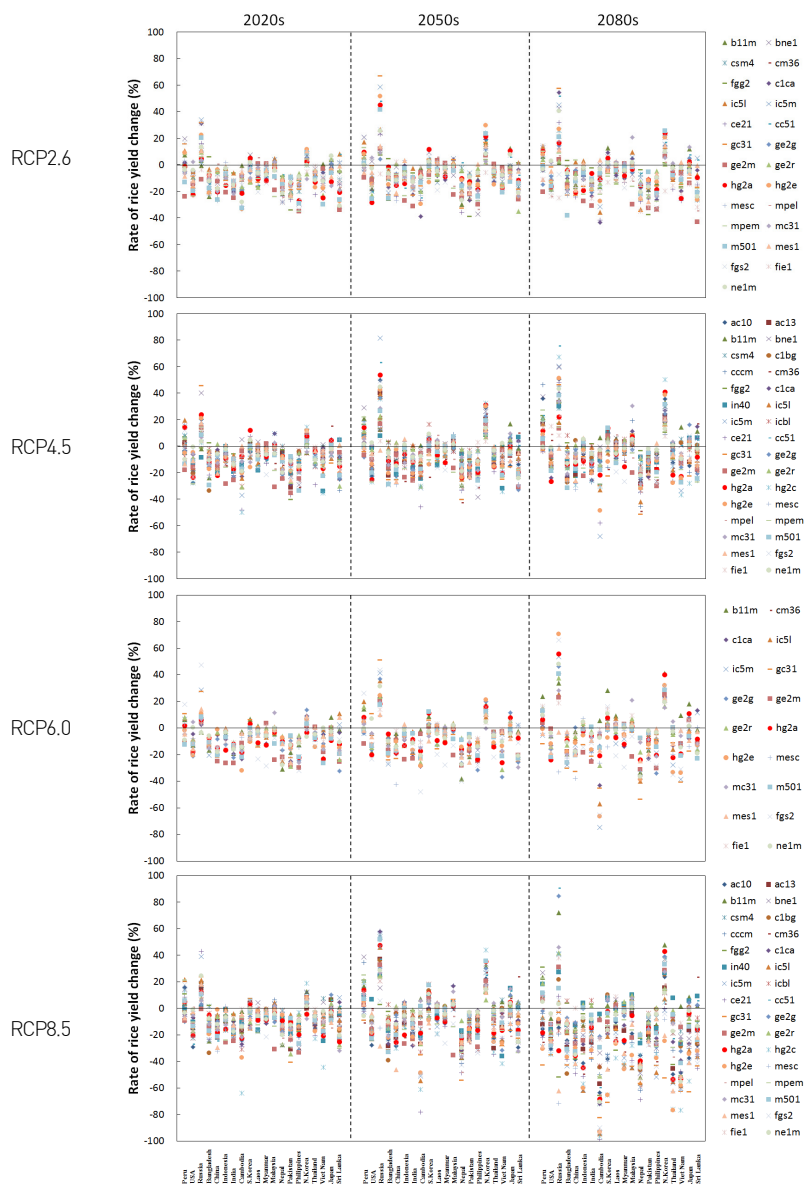


Figure 8 Rate of rice yield change in the Asia-Pacific region countries (unconsidered adaptation measures)

3.1.1.3 주요 쌀 생산국 및 우리나라 쌀 수확량 변화

전 세계 주요 쌀 생산국 중에서 총 생산량의 5% 이상을 차지하고 있는 5개 국가(중국, 인도, 인도네시아, 방글라데시, 베트남)와 우리나라를 대상으로 기후변화에 따른 미래 쌀 수확량 변화를 적응 대책의 고려 유무와 RCP 시나리오별로 GCM 평균한 값을 정리했다 (Figure 9). 세계에서 쌀 생산량이 가장 많은 중국의 경우 적응 대책을 고려했을 때 가까운 미래인 2020년대에는 수확량이 1~3% 감소하는 것으로 나타났지만 먼 미래인 2080년대에는 약 3~21% 수확량이 증가하는 것으로 예측되고 있다. 반면 적응 대책을 고려하지 않았을 경우에는 2080년대에 RCP 2.6 시나리오에서 약 11%의 수확량 감소가 그리고 RCP 8.5 시나리오에서는 약 25%의 수확량 감소가 예측되고 있다. 중국 이외의 국가에서도 적응 대책을 고려했을 경우에는 대체적으로 21세기 말로 갈수록 쌀 수확량이 증가하는 것으로 나타나고 있으며 적응 대책을 고려하지 않을 경우에는 수확량이 감소하는 것으로 나타나고 있다. 특히 기온 상승이 가장 높은 RCP 8.5 시나리오의 2080년대에는 모든 국가에서 쌀 수확량이 급격히 감소하는 것으로 나타나고 있으며 우리나라의 경우에도 17.6% 감소하는 것으로 나타났다.

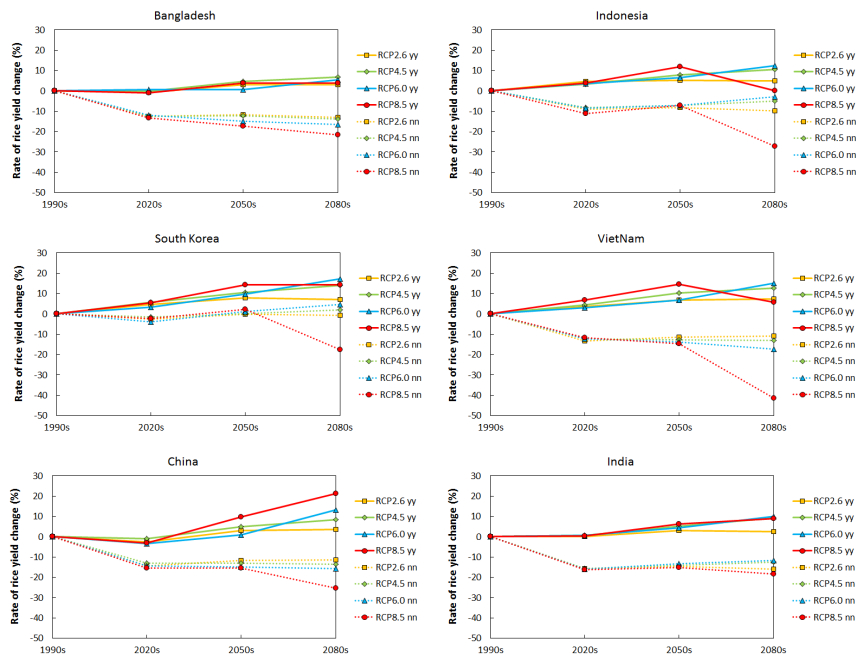


Figure 9 Rate of rice yield change in the main rice production countries



3.1.2 주요 쌀 생산국 평균 쌀 수확량 변화 분석

아시아·태평양 지역의 주요 쌀 생산지역에 대한 미래 쌀 수확량 변화를 분석하기 위해 3.1.1절에서 예측한 아시아·태평양 지역의 주요 쌀 생산국 20개국에 대한 국가별 GCM 쌀 수확량 변화율 예측 결과를 20개국 전체에 대해 평균한 다음 RCP 시나리오별로 나누어 정리했다.

3.1.2.1 RCP 2.6 시나리오 결과

본 절에서는 RCP 2.6 시나리오를 기반으로 작성된 25개 GCM의 기후변화 시나리오 자료를 이용해 쌀 수확량의 미래 변화를 예측했다. Figure 10은 아시아·태평양 지역의 주요 쌀 생산국에 대해 평균한 쌀 수확량 변화를 나타내는 것으로 적응 대책을 고려했을 경우(왼쪽 RCP2.6yy)와 고려하지 않았을 경우(오른쪽 RCP2.6nn)를 나타내고 있다. 최적의 이양일과 품종 선택이라는 적응 대책을 고려했을 경우 RCP 2.6 시나리오의 25개 GCM에 대한 쌀 수확량 변화는 각 GCM에 따라 예측 결과에 불확실성이 존재하지만 21세기 말로 갈수록 대부분의 GCM에서 쌀 수확량 증가를 예측하고 있다. 각각의 GCM에 의한 수확량 변화율을 평균한 결과(점선)는 2020년대에 약 0.4% 증가, 2050년대에 약 3.5% 증가 그리고 2080년대에 약 3.3% 증가하는 것으로 예측하고 있다. 반면 적응 대책을 고려하지 않았을 경우 시뮬레이션 기간 동안 모든 GCM의 쌀 수확량 예측 결과는 감소하는 것으로 예측되었다. 각각의 GCM에 의한 수확량 변화를 평균한 결과를 보면 2020년대에 약 12.8% 감소, 2050년대에 약 11.1% 감소 그리고 2080년대에 약 12.0% 감소하는 것으로 예측되었다. 2020년대에서 2080년대에 걸친 쌀 수확량 변화가 크지 않은 반면 1990년대에서 2020년대에 걸친 쌀 수확량 변화가 크게 나타나고 있는 것은 적응 대책을 고려하지 않은 영향이 나타난 것으로 생각된다. 1990년대에는 최적의 이양일과 최적의 품종 선택에 의해 수확량이 산출되지만 2020년대 이후로는 기후변화의 영향으로 최적의 이양일과 최적의 품종이 바뀌고 있음에도 불구하고 1990년대의 그것에 고정(적응 대책 無)되어 수확량이 산출된다.

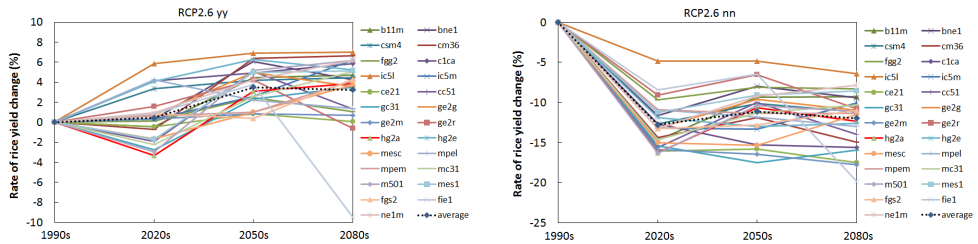


Figure 10 Rice yield change on RCP 2.6 scenario (adaptation on: yy, off: nn)

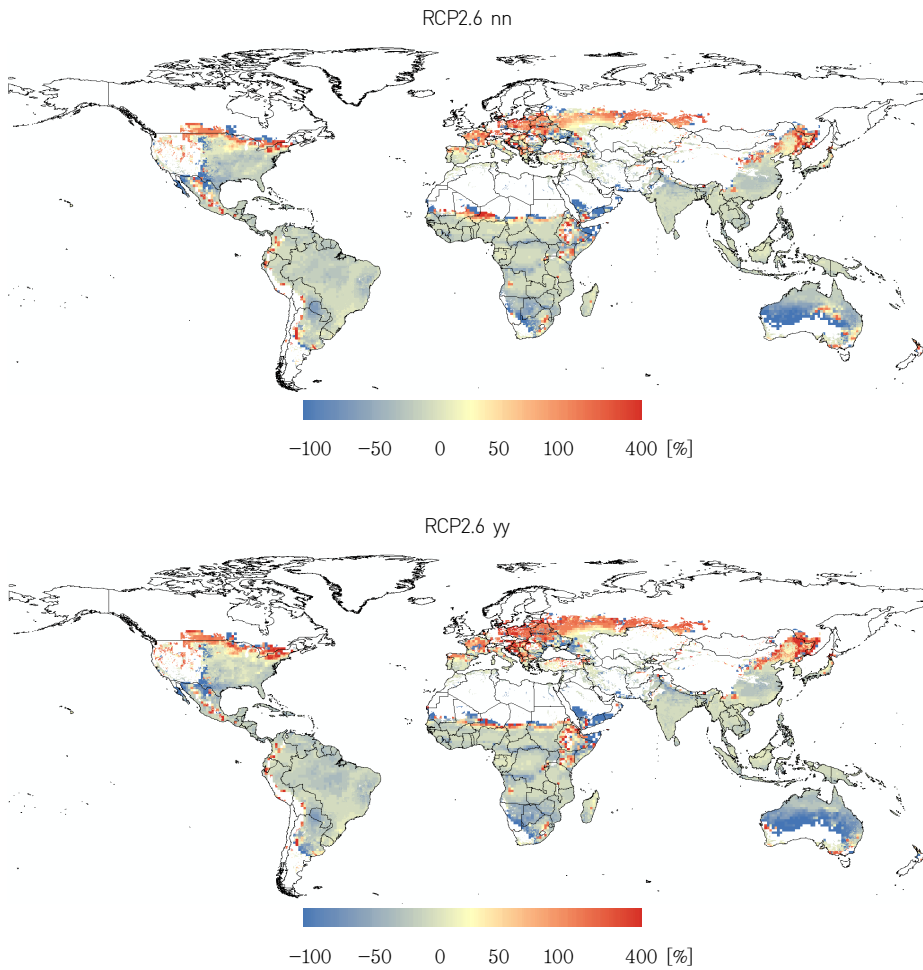


Figure 11 Rice yield change of GCM average in 2080s on RCP 2.6 scenario

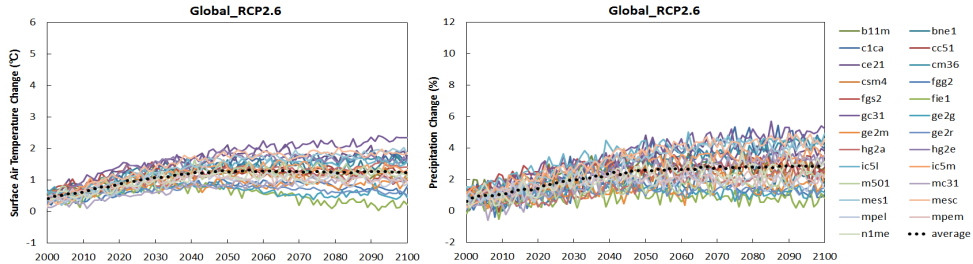


Figure 12 Global change of temperature and precipitation on RCP 2.6 scenario

RCP 2.6 시나리오에 대한 GCM 평균 쌀 수확량 변화율의 공간분포 특성을 분석하기 위해 RCP 2.6 시나리오 기반의 25개 GCM 기후변화 시나리오로부터 산출된 2020년대와 2050년대 그리고 2080년대의 쌀 수확량 결과에 대해 GCM 평균을 실시했다. Figure 11은 적응 대책을 고려했을 경우(위쪽)와 고려하지 않았을 경우(아래쪽)에 대한 2080년대 GCM 평균의 전지구 쌀 수확량 변화율 예측 분포도를 나타낸 것으로 1990년대의 쌀 생산 가능 지역에 대한 2080년대의 쌀 수확량 변화가 예측되었다. 쌀 수확량 변화율 분포도에서는 고위도 지역을 중심으로 수확량이 크게 증가(붉은색)하는 것으로 나타나고 있지만 이것은 1990년대 고위도 지역의 쌀 수확량이 다른 중위도나 저위도 지역보다 상대적으로 작은 상태에서 수확량이 증가했기 때문으로 수확량 자체가 다른 지역보다 큰 것을 나타내는 것은 아니다. 적응 대책의 고려 유무를 놓고 2080년대의 쌀 수확량 변화율을 비교해 보면 적응 대책을 고려했을 때 고위도 지역에 대한 수확량 변화율이 더 큰 것을 붉은 색의 농도 변화로 확인 할 수 있다. 마찬가지로 수확량이 감소(푸른색)하는 지역에 대해서도 확인이 가능하다.

쌀 수확량의 변화는 기후요소 중에서 기온과 강수량의 변화에 특히 민감하기 때문에 본 연구에서는 RCP 시나리오별 전지구 평균의 기온과 강수량의 변화를 분석했다(Shin et al., 2012). Figure 12는 RCP 2.6 시나리오를 기반으로 작성된 25개 GCM의 전지구 평균에 대한 1990년대 대비 연평균 기온의 변화와 연평균 강수량의 변화를 나타낸 것이다. 기온의 경우 각 GCM에 따라 예측의 불확실성이 나타나지만 GCM 평균한 기온은 21세기 초부터 점차적으로 증가하다 2056년 1.3 °C 증가를 기점으로 21세기 말의 약 1.2 °C까지 조금씩 감소하는 경향을 나타내고 있다. 강수량의 경우 기온과 마찬가지로 각 GCM에 따라

예측의 불확실성이 나타나지만 GCM 평균한 강수량은 증가폭은 크지 않지만 21세기 말까지 약 2.9% 증가하는 것으로 나타났다. RCP 2.6 시나리오에서 2050년대에 기온 증가가 상대적으로 크게 나타나고 있는 것과 Figure 10의 적응대책을 고려한 GCM 평균 쌀 수확량 변화에서 2050년대에 수확량 증가가 가장 크게 나타난 것을 볼 때 다른 기후요소의 영향도 있겠으나 전지구 평균 약 1.3 °C의 기온 상승이 쌀 수확량 증가에 영향을 미쳐 나타난 결과라고 해석이 가능하다.

3.1.2.2 RCP 4.5 시나리오 결과

본 절에서는 RCP 4.5 시나리오를 기반으로 작성된 32개 GCM의 기후변화 시나리오 자료를 이용해 쌀 수확량의 미래 변화를 예측했다. Figure 13은 아시아·태평양 지역의 주요 쌀 생산국에 대해 평균한 쌀 수확량 변화를 나타내는 것으로 적응 대책을 고려했을 경우(왼쪽 RCP4.5yy)와 고려하지 않았을 경우(오른쪽 RCP4.5nn)를 나타내고 있다. 적응 대책을 고려했을 경우 RCP 4.5 시나리오의 32개 GCM에 대한 쌀 수확량 변화율 중에는 감소를 예측하는 GCM도 있지만 대부분의 GCM에서 21세기 말로 갈수록 쌀 수확량이 증가하는 것으로 나타났다. 쌀 수확량 변화율에 대한 32개 GCM의 평균값(점선)을 보면 2020년대에 약 0.8% 증가, 2050년대에 약 5.6% 증가 그리고 2080년대에 약 8.7% 증가하는 것으로 나타나 21세기 말로 갈수록 수확량이 점차 증가하는 것으로 나타났다. 반면 적응 대책을 고려하지 않았을 경우 RCP 4.5 시나리오의 32개 모든 GCM에서 쌀 수확량이 감소하는 것으로 예측되었고 GCM 평균값을 보면 2020년대에 약 12.2% 감소, 2050년대에 약 11.3% 감소 그리고 2080년대에 약 10.7% 감소하는 것으로 나타났다. 여기서 2020년대와 2050년대 그리고 2080년대에 대한 쌀 수확량 변화율을 상대적으로 비교해보면 2080년대로 갈수록 수확량이 조금씩 증가하는 경향이 나타났다.

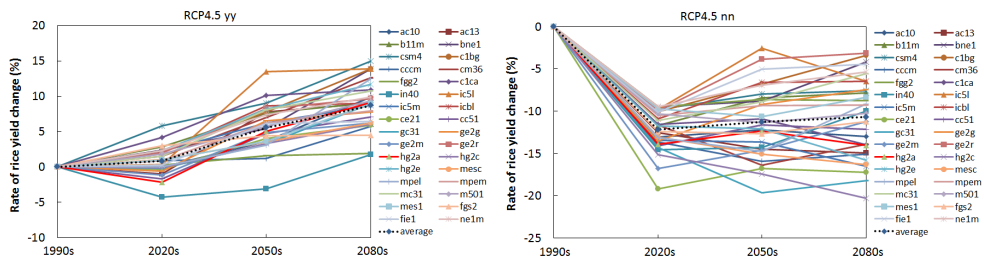


Figure 13 Rice yield change on RCP 4.5 scenario (adaptation on: yy, off: nn)

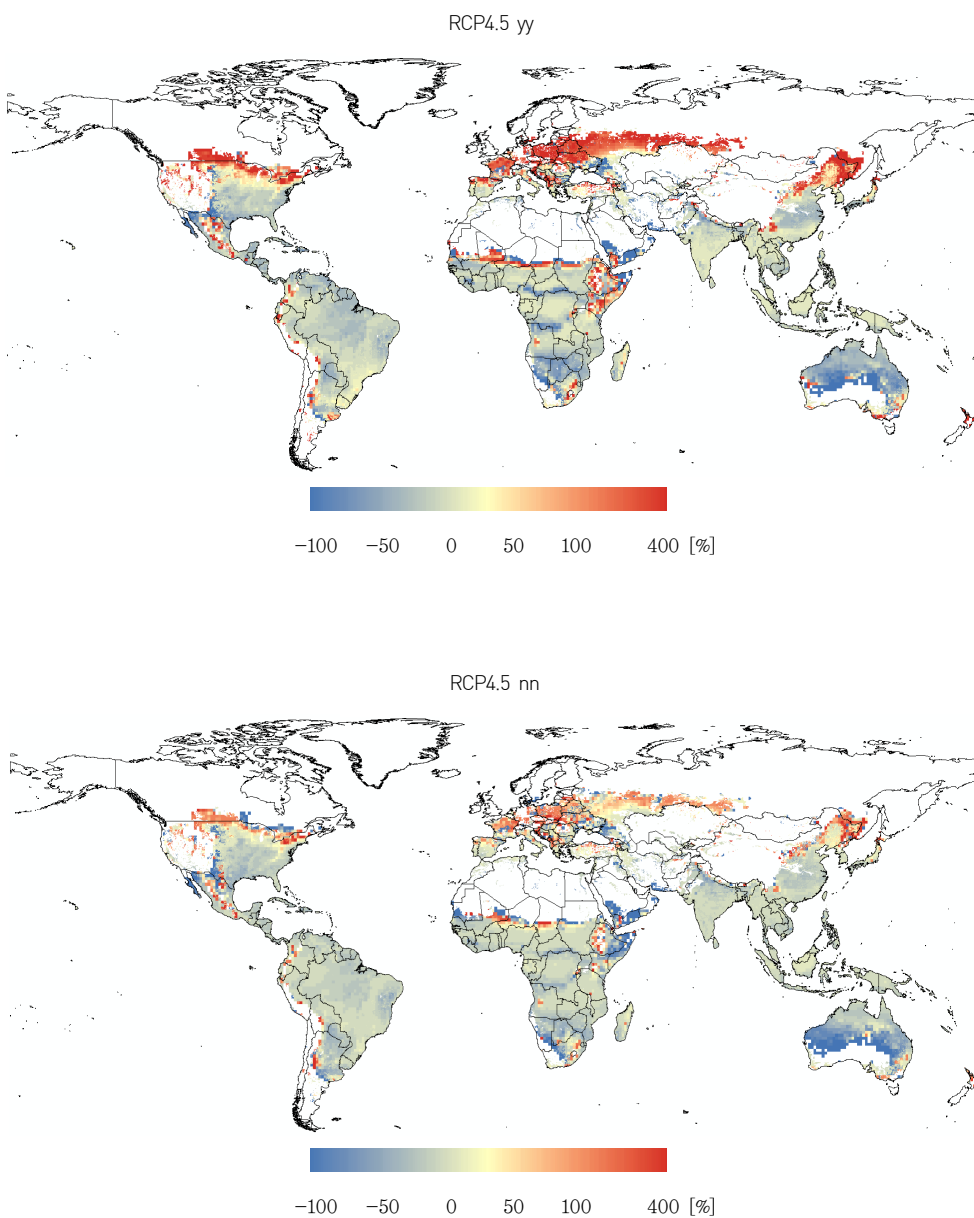


Figure 14 Rice yield change of GCM average in 2080s on RCP 4.5 scenario

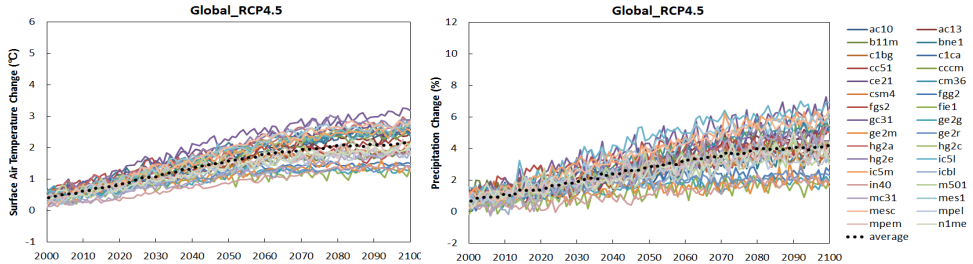


Figure 15 Global change of temperature and precipitation on RCP 4.5 scenario

RCP 4.5 시나리오에 대한 GCM 평균 쌀 수확량 변화율의 공간분포 특성을 분석하기 위해 RCP 4.5 시나리오 기반의 32개 GCM 기후변화 시나리오로부터 산출된 2020년대와 2050년대 그리고 2080년대의 쌀 수확량 결과에 대해 GCM 평균을 실시했다. Figure 14은 적응 대책을 고려했을 경우(위쪽)와 고려하지 않았을 경우(아래쪽)에 대한 RCP 4.5 시나리오의 2080년대 GCM 평균의 전지구 쌀 수확량 변화율 예측 분포도를 나타내고 있다. 적응 대책을 고려했을 경우 RCP 2.6 시나리오와 마찬가지로 쌀 수확량 변화율 분포도에서 고위도 지역을 중심으로 수확량이 크게 증가(붉은색)하는 것으로 나타나고 있으며 RCP 2.6 시나리오(Figure 11)보다 수확량 증가가 크게 나타나고 있다. 특히 러시아를 포함한 동유럽 지역과 중국 동북부 지역을 포함한 동북아시아에서 쌀 수확량이 크게 증가하는 것으로 나타나고 있으며 이들 지역에 대해서는 적응 대책을 고려하지 않더라도 다른 지역에 비해 높은 수확량 증가가 예상된다.

Figure 15는 RCP 4.5 시나리오를 기반으로 작성된 32개 GCM의 전지구 평균에 대한 1990년대 대비 연평균 기온의 변화와 연평균 강수량의 변화를 나타낸 것이다. 기온의 경우 각 GCM에 따라 예측의 불확실성이 나타나지만 GCM 평균한 기온은 21세기 초부터 점차적으로 증가해 21세기 말에는 약 2.2 °C까지 증가하는 것으로 나타났다. 강수량의 경우 각 GCM에 따라 예측의 불확실성이 나타나지만 GCM 평균한 강수량은 21세기 말까지 약 4.2% 증가하는 것으로 나타났다.

3.1.2.3 RCP 6.0 시나리오 결과

본 절에서는 RCP 6.0 시나리오를 기반으로 작성된 18개 GCM의 기후변화 시나리오 자료를 이용해 쌀 수확량의 미래 변화를 예측했다. Figure 16은 적응 대책을 고려했을 경우(왼쪽 RCP6.0yy)와 고려하지 않았을 경우(오른쪽 RCP6.0nn)에 대한 각 GCM별 쌀 수확량 변화율과 GCM 평균한 값(점선)을 나타내고 있다. 적응 대책을 고려했을 경우 18개 GCM에 대한 쌀 수확량 변화율은 GCM에 따라 증가 혹은 감소를 예측하고는 있으나 전체적으로 21세기 말로 갈수록 쌀 수확량이 증가하는 것으로 나타났다. GCM의 평균값을 보면 2020년대에 약 0.4% 증가, 2050년대에 3.3% 증가 그리고 2080년대에 10.6% 증가를 나타내고 있어 RCP 6.0 시나리오 하에서 기후변화에 대한 적응 대책을 고려한다면 아시아-태평양 지역의 주요 쌀 생산국에서는 수확량이 증가할 것으로 예상된다. 반면 적응 대책을 고려하지 않았을 경우 RCP 6.0 시나리오의 18개 모든 GCM에서 쌀 수확량이 감소하는 것으로 예측되었고 GCM 평균값을 보면 2020년대에 약 12.3% 감소, 2050년대에 약 12.1% 감소 그리고 2080년대에 약 11.9% 감소하는 것으로 나타났다. 미래 시뮬레이션 기간에 대한 쌀 수확량 변화를 상대적으로 비교해보면 수확량 변화가 상당히 적은 것으로 나타났다.

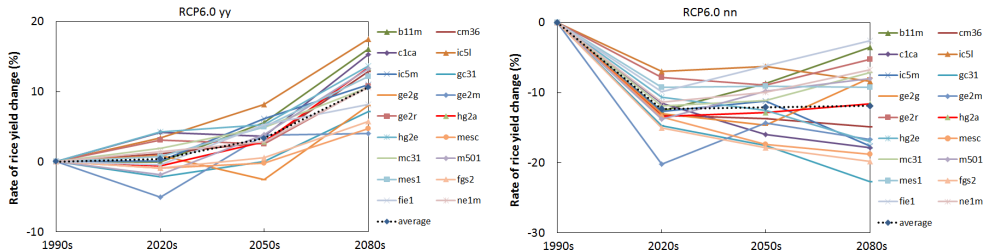


Figure 16 Rice yield change on RCP 6.0 scenario (adaptation on: yy, off: nn)

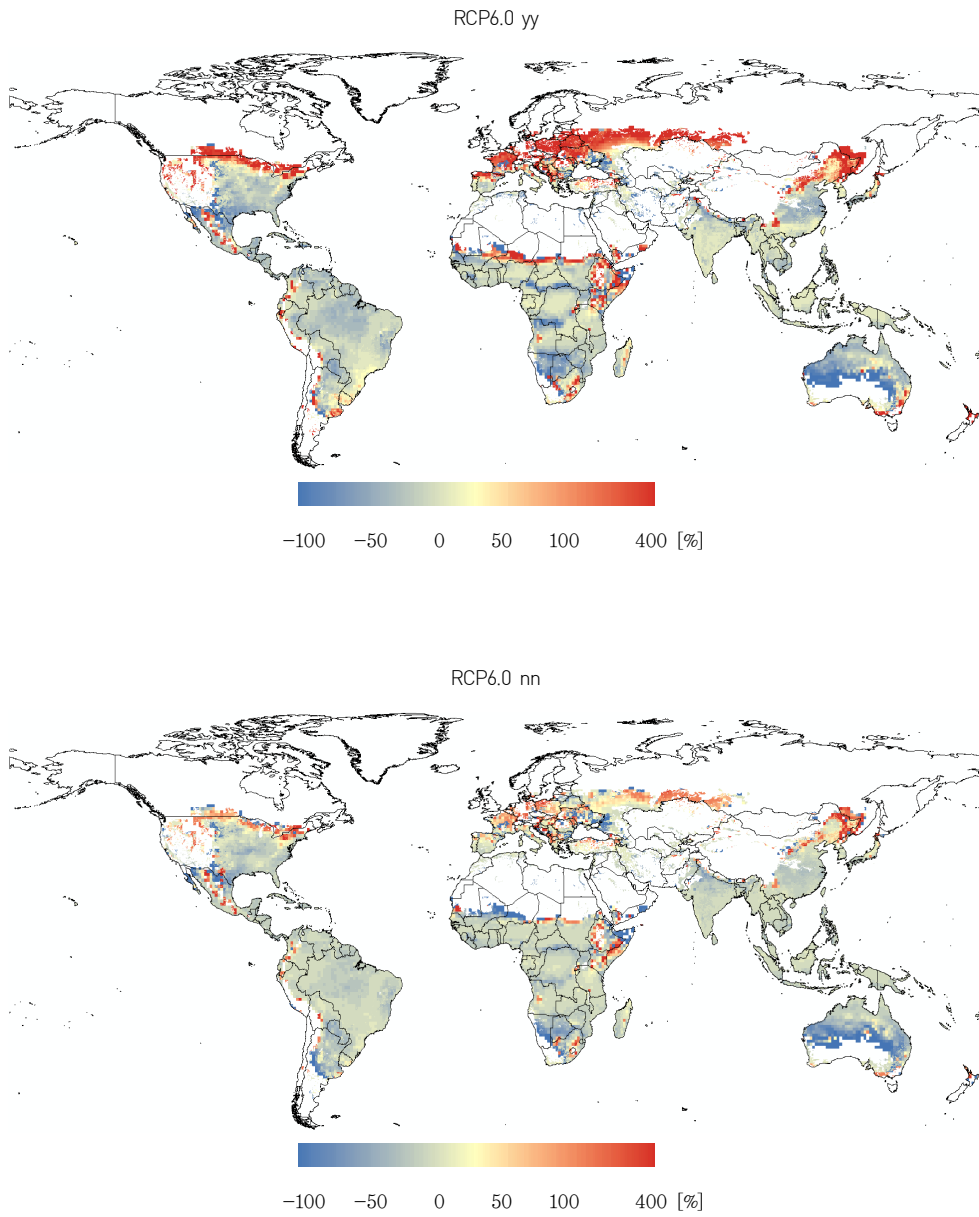


Figure 17 Rice yield change of GCM average in 2080s on RCP 6.0 scenario

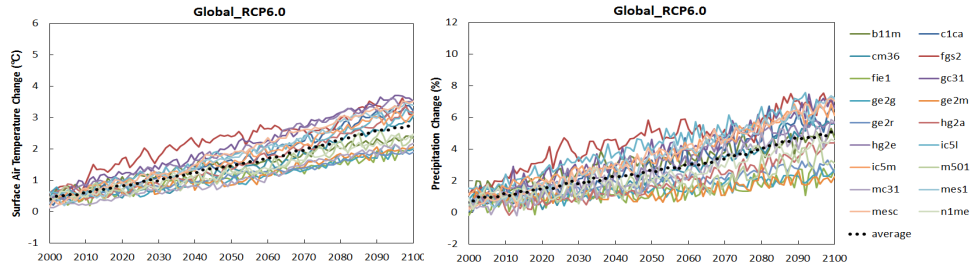


Figure 18 Global change of temperature and precipitation on RCP 6.0 scenario

RCP 6.0 시나리오에 대한 GCM 평균 쌀 수확량 변화율의 공간분포 특성을 분석하기 위해 RCP 6.0 시나리오 기반의 18개 GCM 기후변화 시나리오로부터 산출된 2020년대와 2050년대 그리고 2080년대의 쌀 수확량 결과에 대해 GCM 평균을 실시했다. Figure 17은 적응 대책을 고려했을 경우(위쪽)와 고려하지 않았을 경우(아래쪽)에 대한 RCP 6.0 시나리오의 2080년대 GCM 평균의 전지구 쌀 수확량 변화율 예측 분포도를 나타내고 있다. 적응 대책을 고려했을 경우 RCP 4.5 시나리오의 쌀 수확량 변화율 분포도와 큰 차이는 나타나지 않았고 마찬가지로 고위도 지역을 중심으로 수확량이 크게 증가(붉은색)하는 것으로 나타났다.

Figure 18은 RCP 6.0 시나리오를 기반으로 작성된 18개 GCM의 전지구 평균에 대한 1990년대 대비 연평균 기온의 변화와 연평균 강수량의 변화를 나타낸 것이다. 기온의 경우 각 GCM에 따라 예측의 불확실성이 나타나지만 GCM 평균한 기온은 21세기 초부터 점차적으로 증가해 21세기 말에는 약 2.7 °C까지 증가하는 것으로 나타났다. 강수량의 경우 각 GCM에 따라 예측의 불확실성이 나타나지만 GCM 평균한 강수량은 21세기 말까지 약 5.0% 증가하는 것으로 나타났다. 연평균 기온 변화 그래프에서 2050년대에 기온 상승이 가장 크게 예측된 FGOALS-g2(fgs2) 모델과 GFDL-CM3(gc31) 모델에 의한 쌀 수확량 변화율을 분석해본 결과 적응 대책을 고려했을 때와 고려하지 않았을 때 모두 두 모델의 쌀 수확량이 다른 모델들에 비해 크게 감소하는 것으로 나타나 기온상승이 수확량 감소에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

3.1.2.4 RCP 8.5 시나리오 결과

본 절에서는 RCP 8.5 시나리오를 기반으로 작성된 32개 GCM의 기후변화 시나리오 자료로부터 산출된 아시아·태평양지역 주요 쌀 생산국에 대한 쌀 수확량의 미래 변화 예측에 대해 정리했다. Figure 19는 주요 쌀 생산국에 대한 평균 쌀 수확량 변화를 적응 대책의 유무로 구분해 나타내고 있다. 적응 대책을 고려했을 경우(RCP8.5 yy) 32개 GCM에 대한 쌀 수확량 변화율은 2080년대까지 지속적으로 증가하는 GCM과 2050년대까지 증가하다 2080년대에 증가율이 급감하는 GCM으로 나뉜다. 32개 GCM 중에서 2050년대와 비교해 2080년대에 수확량이 감소하는 것으로 나타난 GCM은 14개였고 CanESM2(ce21)모델은 11.3%나 감소하는 것으로 나타났다. 이는 RCP 8.5 시나리오의 2080년대 급격한 기온 상승이 쌀 생산에 부의 영향을 미치기 때문으로 판단된다. GCM의 평균값을 보면 2020년대에 약 0.5% 증가, 2050년대에 8.0% 증가 그리고 2080년대에 8.4% 증가하는 것으로 나타났다. 반면 적응 대책을 고려하지 않았을 경우(RCP8.5 nn) RCP 8.5 시나리오의 32개 모든 GCM에서 쌀 수확량이 감소하는 것으로 예측되었다. 특히 RCP 8.5 시나리오의 2080년대에는 쌀 수확량이 다른 RCP 시나리오의 같은 기간보다 크게 감소하는 것으로 나타났으며 HadGEM2-CC(hg2c)모델에서는 무려 44.1% 감소하는 것으로 나타났다. GCM의 평균값을 보면 2020년대에 약 13.4% 감소, 2050년대에 약 13.2% 감소 그리고 2080년대에 약 24.9% 감소하는 것으로 나타났다.

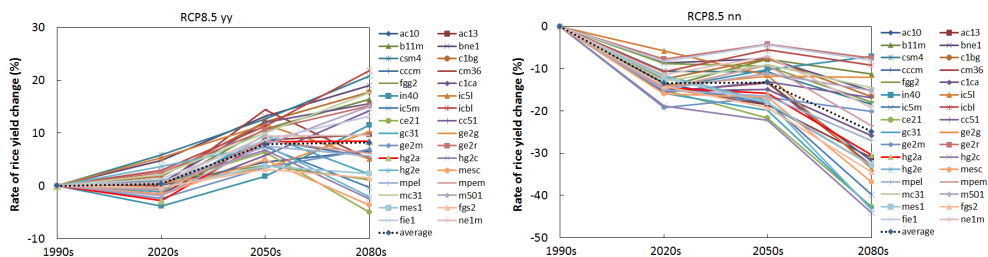


Figure 19 Rice yield change on RCP 8.5 scenario (adaptation on: yy, off: nn)

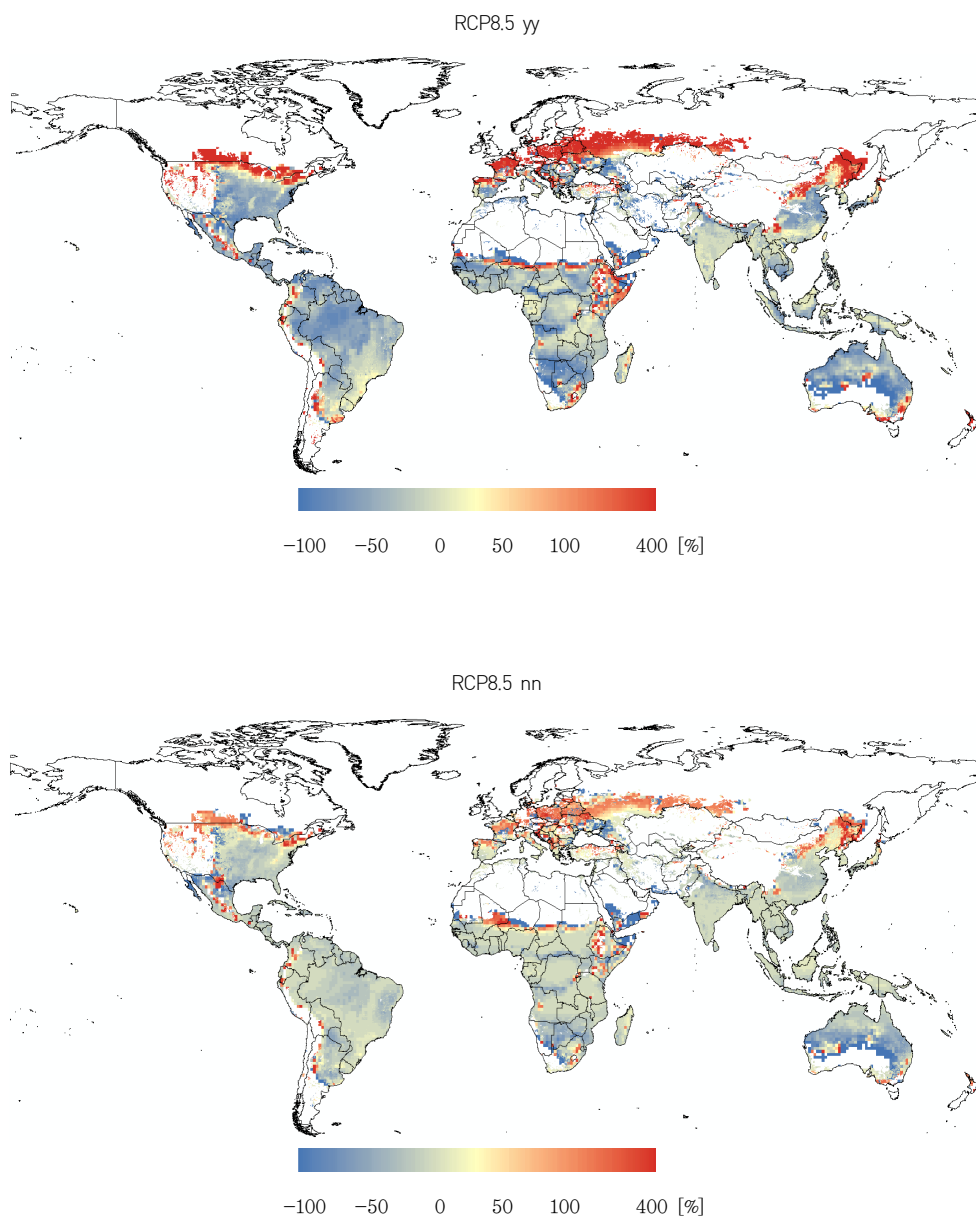


Figure 20 Rice yield change of GCM average in 2080s on RCP 8.5 scenario

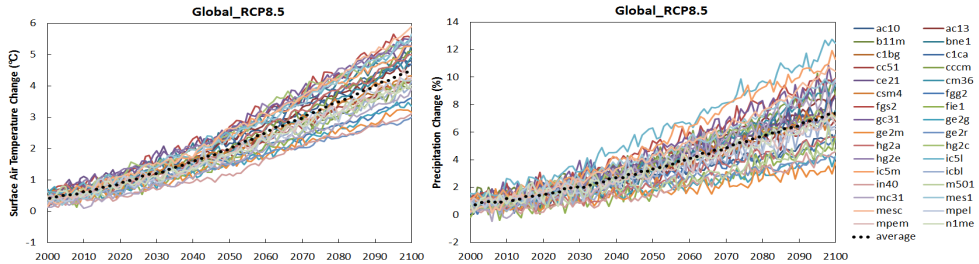


Figure 21 Global change of temperature and precipitation on RCP 8.5 scenario

RCP 8.5 시나리오에 대한 GCM 평균 쌀 수확량 변화율의 공간분포 특성을 분석하기 위해 RCP 8.5 시나리오 기반의 32개 GCM 기후변화 시나리오로부터 산출된 쌀 수확량 결과에 대해 GCM 평균을 실시했다. Figure 21은 적응 대책을 고려했을 경우(위쪽)와 고려하지 않았을 경우(아래쪽)에 대한 RCP 8.5 시나리오의 2080년대 GCM 평균의 전지구 쌀 수확량 변화율 예측 분포도를 나타내고 있다. 적응 대책을 고려했을 경우 고위도 지역에서 수확량이 증가하는 것으로 나타났지만 다른 RCP 시나리오와 비교해 남아메리카와 북아메리카 지역 그리고 중국 동부지역에서 쌀 수확량이 급격히 감소(푸른색)하는 것으로 나타났다.

Figure 21은 RCP 8.5 시나리오를 기반으로 작성된 32개 GCM의 전지구 평균에 대한 1990년대 대비 연평균 기온의 변화와 연평균 강수량의 변화를 나타낸 것이다. 기온의 경우 각 GCM에 따라 예측의 불확실성이 나타나지만 GCM 평균한 기온은 21세기 초부터 점차적으로 증가해 21세기 말에는 약 4.5 °C까지 증가하는 것으로 나타났다. 강수량의 경우 각 GCM에 따라 예측의 불확실성이 나타나지만 GCM 평균한 강수량은 21세기 말까지 약 6.0% 증가하는 것으로 나타났다. 연평균 기온 변화 그래프에서 2080년대에 기온 상승이 크게 예측된 CanESM2(ce21) 모델과 GFDL-CM3(gc31) 모델, HadGEM2CC(hg2c) 모델, HadGEM2-ES(hg2e) 모델 그리고 MIROC-ESM-CHEM(mesc) 모델에 의한 쌀 수확량 변화율을 분석해본 결과 적응 대책을 고려했을 때와 고려하지 않았을 때 이들 모델의 쌀 수확량이 다른 모델들에 비해 크게 감소하는 것으로 나타났다.



3.2 쌀 수확량 예측 불확실성 평가

3.2.1 GCM에 의한 불확실성

CMIP5의 각 GCM에 의해 전망된 기후변화 시나리오에는 예측의 불확실성이 존재하고 이는 작물모델을 이용해 산출한 쌀 수확량 변화 예측 결과에도 불확실성을 야기한다. 본 절에서는 각 GCM에 의한 쌀 수확량 변화 예측의 불확실성을 RCP 시나리오별로 정리했다. Table 6은 주요 쌀 생산국 20개국을 평균한 GCM별 쌀 수확량 변화율 예측에 대한 불확실성의 폭을 나타내고 있다. RCP 2.6 시나리오에 대한 분석은 Figure 10을 통해 실시되었다. 적응 대책을 고려한 2080년대의 쌀 수확량 변화율 예측 결과에서는 GCM에 따라 최소 9.5%의 감소를 예측하는 GCM에서 최대 7.0%의 증가를 예측하는 GCM까지 16.5%의 불확실성폭이 나타났다. 적응 대책을 고려하지 않은 경우에는 모든 GCM에서 쌀 수확량이 감소하는 것으로 나타났으며 특히 2080년대에는 최소 19.8% 감소에서 최대 6.4% 감소까지 13.4%의 불확실성폭이 나타났다. 그 외 RCP 4.5, RCP 6.5, RCP 8.5 시나리오에 대해서는 각각 Figure 13, Figure 16, Figure 19를 통해 분석이 실시되었다. RCP 4.5 시나리오의 적응 대책을 고려한 2050년대를 제외하면 모든 RCP 시나리오에서는 2080년대에 불확실성폭이 크게 나타났다. 특히 RCP 8.5 시나리오의 경우 적응 대책을 고려하지 않았을 때 44.1%의 감소를 예측하는 GCM에서 7.1%의 감소를 예측하는 GCM까지 불확실성폭이 37.0%로 가장 크게 나타났다. 적응 대책을 고려했을 경우에는 대부분의 RCP 시나리오에서 최소값에서 쌀 수확량이 감소하고 최대값에서 증가하는 특징을 나타내거나 최소값에서도 쌀 수확량이 증가하고 최대값에서도 증가하는 특징을 나타내지만 적응 대책을 고려하지 않을 경우에는 전체적으로 최소값에서도 쌀 수확량이 감소하고 최대값에서도 감소하는 특징을 나타낸다. Figure 22, 23은 적응대책을 고려했을 경우와 고려하지 않았을 경우에 대한 주요 쌀 생산국 20개국 평균 쌀 수확량 변화에 대한 RCP 시나리오별 GCM 평균값(막대 그래프)과 쌀 수확량 변화가 최대인 GCM과 최소인 GCM의 값을 나타내고 있다. 적응대책을 고려했을 경우(Figure 22) 쌀 수확량의 GCM 평균값은 RCP 4.5, 6.0, 8.5 시나리오에서 21세기 말로 갈수록 증가하는 것으로 나타내고 있으며 RCP 6.0 시나리오의 2080년대에 쌀 수확량이 가장 증가하는 것으로 나타났다. RCP 8.5 시나리오에서는 2050년대에 다른 RCP 시나리오보다 쌀 수확량이 크게 증가하는 것으로 나타나고 있으나 2080년대에

는 2050년대보다 평균값이 크게 상승하지 않은 반면 최대인 GCM과 최소인 GCM의 값 차이(불확실성)가 크게 나타나고 있다. 적응대책을 고려하지 않을 경우(Figure 23) 쌀 수확량의 GCM 평균값은 대체로 모든 RCP 시나리오에서 10%에서 15% 사이의 수확량 감소를 나타내고 있는데 비해 RCP 8.5시나리오의 2080년대에 약 25%에 가까운 수확량 감소를 나타내고 있으며 불확실성 폭도 가장 크게 나타나고 있다.

Table 6 Uncertainty range of rice yield by GCMs

	Considered Adaptation			Unconsidered Adaptation		
	2020s min/max (range)	2050s min/max (range)	2080s min/max (range)	2020s min/max (range)	2050s min/max (range)	2080s min/max (range)
RCP2.6	-3.3/5.9 (9.2)	0.4/6.9 (6.5)	-9.5/7.0 (16.5)	-16.3/-4.8 (11.5)	-17.5/-4.8 (12.7)	-19.8/-6.4 (13.4)
RCP4.5	-4.3/5.8 (10.1)	-3.1/13.5 (16.6)	1.7/14.9 (13.2)	-19.2/-9.5 (9.7)	-19.6/-2.6 (17.0)	-20.3/-3.1 (17.2)
RCP6.0	-5.1/4.3 (9.4)	-2.6/8.2 (10.8)	4.0/17.5 (13.5)	-20.2/-7.0 (13.2)	-17.9/-6.2 (11.7)	-22.7/-2.6 (20.1)
RCP8.5	-3.8/5.9 (9.7)	1.9/14.4 (12.5)	-5.0/21.8 (26.8)	-19.2/-5.7 (13.5)	-22.2/-4.2 (18.0)	-44.1/-7.1 (37.0)

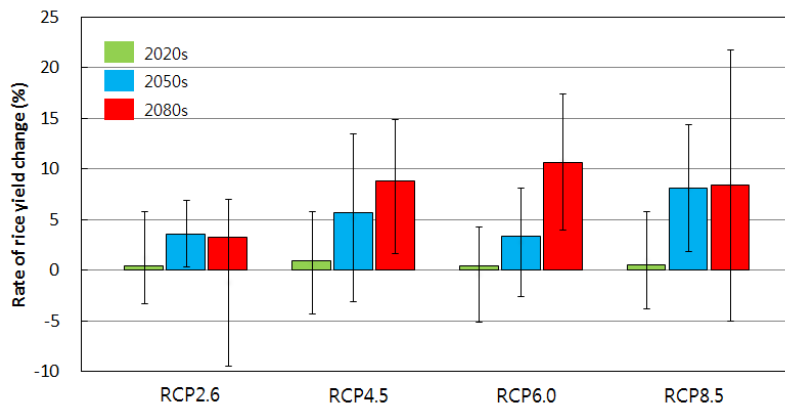


Figure 22 Average rice yield change and uncertainty range considered adaptation measures under the each RCP scenario (adaptation on)

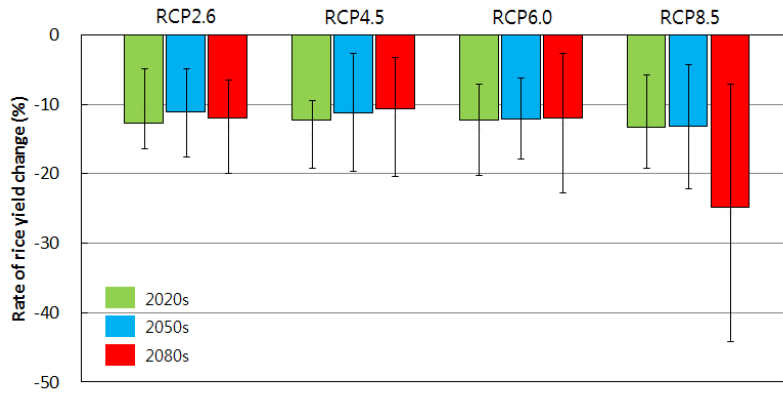


Figure 23 Average rice yield change and uncertainty range unconsidered adaptation measures under the each RCP scenario (adaptation off)

3.2.2 RCP 시나리오에 의한 불확실성

주요 쌀 생산국 20개국의 평균 수확량에 대해 RCP 시나리오별로 GCM 평균한 값을 정리해 RCP 시나리오에 따른 쌀 수확량 변화의 불확실성을 나타냈다. Figure 24는 적응 대책을 고려했을 경우와 고려하지 않았을 경우의 RCP 시나리오별 쌀 수확량 변화율을 나타내고 있으며 Table 7은 RCP 시나리오에 따른 쌀 수확량 변화율 예측의 불확실성을 나타내고 있다. 주요 쌀 생산국 20개국에서는 적응 대책을 고려할 때 대부분의 RCP 시나리오에서 21세기 말로 갈수록 쌀 수확량이 증가하는 것으로 나타났으며 2020년대에는 RCP 4.5 시나리오에서 0.8% 증가로 가장 큰 수확량 증가가 예측되었고 2050년대에는 RCP 8.5 시나리오에서 7.9% 증가로 가장 큰 수확량 증가가 2080년대에는 RCP 6.0 시나리오에서 10.6% 증가로 가장 큰 수확량 증가가 예측되었다. 반면 적응 대책을 고려하지 않을 경우 모든 RCP 시나리오에서 쌀 수확량이 감소하는 것으로 예측되었으나 2020년대에서 2080년대까지의 변화는 크지 않은 것으로 나타났다. 하지만 RCP 8.5 시나리오 하에서 2080년대의 쌀 수확량은 2050년대에 비해 약 11.8%(-13.2%에서 -25%)로 감소하는 것으로 예측되고 있다. RCP 시나리오에 따른 쌀 수확량 변화 예측의 불확실성 폭은 적응 대책을 고려했을 경우와 고려하지 않았을 경우 모두 2080년대에 가장 컸으며 각각 7.4%(3.2%~10.6%)와 14.2%(-10.8%~-25%)로 나타났다.

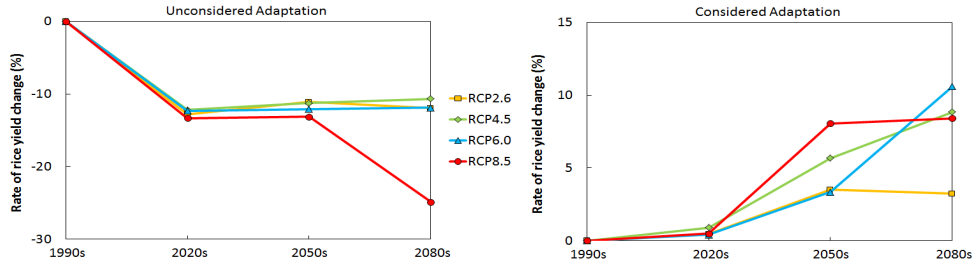


Figure 24 Rate of rice yield change on RCP scenarios

Table 7 Uncertainty range of rice yield by RCPs

	Uncertainty Range		
	2020s min/max (range)	2050s min/max (range)	2080s min/max (range)
Considered Adap.	0.4/0.9 (0.5)	3.3/8.1 (4.8)	3.2/10.6 (7.4)
Unconsidered Adap.	-13.4/-12.2 (1.2)	-13.2/-11.1 (2.1)	-24.9/-10.7 (14.2)

3.3 쌀 생산 적지 이동 분석

3.3.1 쌀 재배 가능 지역

전 세계 쌀 생산량의 대부분은 주로 아시아를 중심으로 생산이 이루어지고 있으나 Leff et al.(2004) 등이 FAO의 농업통계 자료를 바탕으로 작성한 전 세계 쌀 수확면적용 데이터(Figure 25)를 보면 아시아 지역 이외의 지역에서는 재배 밀도는 높지 않더라도 다양한 지역에서 쌀 생산이 이루어지고 있음을 확인할 수 있다. 아시아에서도 농업 중심국 가인 방글라데시와 캄보디아의 쌀 재배밀도가 상당히 높은게 나타나고 있으며 동남아시아 지역과 중국남부에서도 높은 쌀 재배밀도를 나타내고 있다.

Figure 26는 CMIP5의 32개 GCM 중에서 우리나라 기상청이 영국 기상청의 기후변화 예측모델인 HadGEM2-AO(hg2a)를 이용해 시뮬레이션한 과거실험결과 자료(Historical)를 M-GAEZ 모델에 입력하여 산출한 1990년대 잠재 쌀 수확량 예측 분포도를 나타내고 있다. 이 분포도는 기후조건과 토양조건만으로 쌀 수확량을 계산하기 때문에 현재 쌀 재배 면적보다 넓은 범위에서 생산이 이루어지는 것으로 나타낸다.

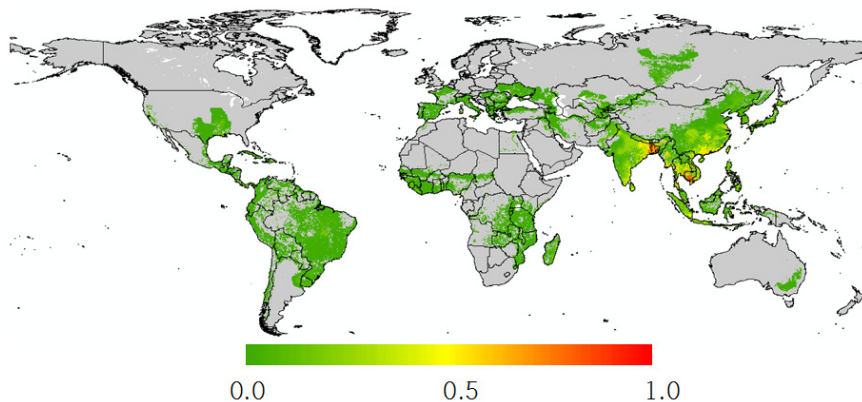


Figure 25 Rate of harvested rice area in the world (Leff et al., 2004)

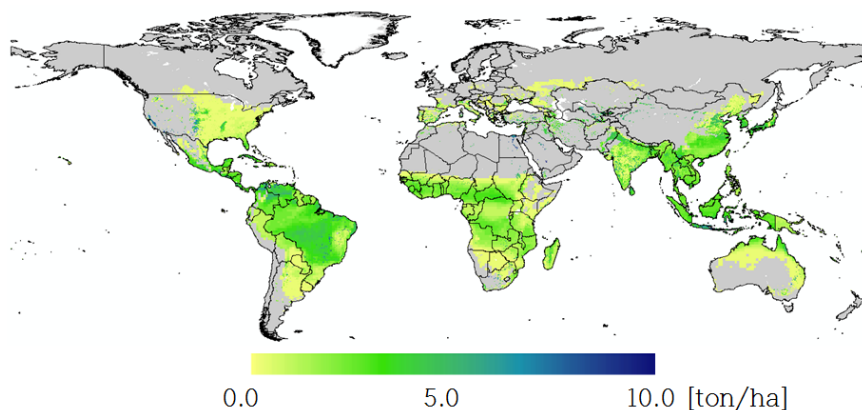


Figure 26 Distribution map of potential rice yield in 1990s (HadGEM2-AO)

3.3.2 쌀 재배 가능 지역 확대

본 절에서는 기후변화의 영향으로 쌀 재배 가능 지역이 어느 정도 확장하고 감소하는 지에 대해 HadGEM2-AO(hg2a) 모델의 미래 기후변화 시나리오 자료를 이용해 산출한 쌀 수확량 예측 결과 분석을 통해 정리했다. Figure 25는 1990년대의 쌀 생산 가능지역과 비교해 각 RCP 시나리오 하에서 2020년대와 2050년대 그리고 2080년대에 쌀 생산 가능 지역이 어느 정도 확장하는지 색상을 통해 나타내고 있다. 여기서는 2020년대에 대해 진한 분홍색으로 2050년대에 대해 진한 갈색으로 2080년대에 대해 빨간색으로 확장된 쌀 재배

가능 지역을 나타냈다. 미래 기후변화로 인해 어느 지역이 쌀 생산이 가능해지는지 Figure 27 으로부터 확인 할 수 있었다. Table 8은 쌀 재배 가능 지역이 얼마나 늘어나는지에 대해 RCP 시나리오별로 정량적으로 나타내고 있다. RCP 8.5 시나리오의 2080년대에서 1,412만 km²로 쌀 재배 가능 지역이 가장 넓게 확장할 것으로 예측되고 있다. 2050년대의 RCP 4.5 시나리오에서 쌀 재배 가능 지역이 712만 km²로 RCP 6.0 시나리오의 500만 km²보다 넓게 나타났는데 이는 아시아태평양지역 주요 쌀 생산국에 대한 HadGEM2-AO 모델의 2050년대 수확량 변화 예측 결과 RCP 4.5 시나리오 하에서 5.0% 증가하고 RCP 6.0 시나리오 하에서는 2.8% 증가하는 것으로 나타나고 있어 RCP 4.5 시나리오 하에서의 쌀 재배 환경이 RCP 6.0 시나리오보다 적합하기 때문인 것으로 판단된다.

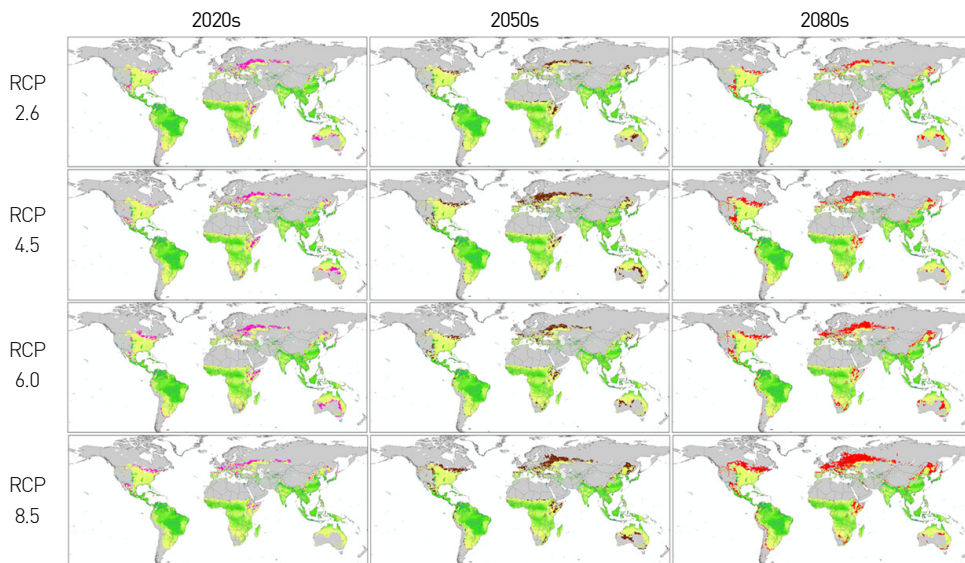


Figure 27 Shift of available rice production by climate change

Table 8 Expansion area of available rice production

RCP scenario	2020s	2050s	2080s
RCP2.6	416만 km ²	432만 km ²	477만 km ²
RCP4.5	420만 km ²	712만 km ²	747만 km ²
RCP6.0	462만 km ²	500만 km ²	929만 km ²
RCP8.5	447만 km ²	883만 km ²	1412만 km ²



기후변화의 영향은 쌀 재배 가능지역의 확장을 기대하지만 쌀 재배가 불가능해 지는 지역도 발생하게 된다. 특히 적도를 중심으로 한 열대 지역 및 호주 지역에서 쌀 재배 불가능 지역이 증가하는 것으로 나타났다(Figure 28). 여기서는 2020년대에 대해 진한 분홍색으로 2050년대에 대해 진한 갈색으로 2080년대에 대해 빨간색으로 쌀 재배 불가능 지역을 나타냈다. 쌀 재배가 불가능해 졌다고는 하지만 실제 쌀 수확량이 많은 지역에서 재배가 불가능해지는 것은 아니고 수확량이 적은 재배한계 지역이 기후변화의 영향으로 재배가 불가능해 지는 것으로 생각된다. Table 9는 쌀 재배 불가능 지역이 얼마나 늘어나는지에 대해 RCP 시나리오별로 나타내고 있다. RCP 4.5 시나리오의 2080년대에는 쌀 재배 불가능 지역이 200만 km²로 가장 넓게 확장할 것으로 예측되고 있다. 하지만 Table 8의 쌀 재배 가능 지역의 확장 면적과 비교하면 기후변화로 인해 쌀 재배 불가능지역이 증가하지만 지구 전체적으로 보면 21세기 말로 갈수록 쌀 재배 가능 지역이 점점 늘어날 것으로 예측되고 있다.

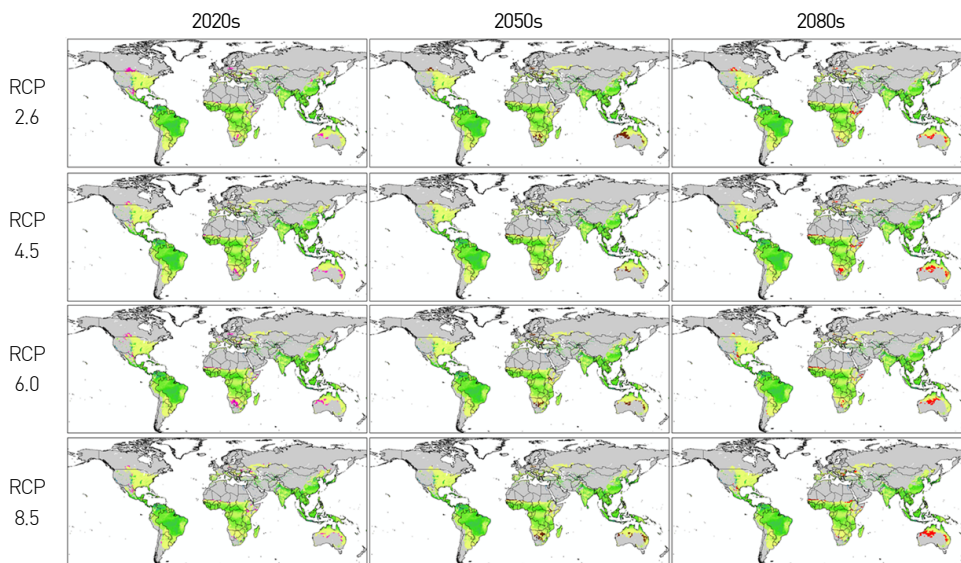


Figure 28 Shift of unavailable rice production by climate change

Table 9 Reduction area of available rice production

RCP scenario	2020s	2050s	2080s
RCP2.6	182만 km ²	210만 km ²	152만 km ²
RCP4.5	126만 km ²	122만 km ²	200만 km ²
RCP6.0	181만 km ²	135만 km ²	145만 km ²
RCP8.5	109만 km ²	142만 km ²	186만 km ²

4. 결론 및 토론

본 연구에서는 전지구 규모의 작물 수확량 예측모델인 M-GAEZ에 RCP 시나리오를 기반으로 작성된 CMIP5의 기후변화 시나리오를 입력하여 아시아·태평양 지역의 주요 쌀 생산국에 대한 미래 쌀 수확량을 전망하고 기후변화가 쌀 수확량 변화에 미치는 영향에 대해 기후예측의 불확실성을 고려한 정량적인 평가를 실시했다. 또한 안정적인 쌀 생산을 위한 기후변화 적응 대책의 일환으로 M-GAEZ 모델에 각 재배지점에 대한 최적의 이앙일 및 최적의 품종 선택이라는 적응 대책을 고려했을 경우와 고려하지 않았을 경우에 대한 아시아·태평양 지역 주요 쌀 생산국의 미래 쌀 수확량 변화를 비교했으며 쌀 수확량 변화의 예측결과에 포함되어있는 GCM의 선택과 RCP 시나리오의 선택에 의한 불확실성에 대해서도 비교를 실시했다. 나아가 쌀 수확량 변화 예측 결과를 바탕으로 쌀 생산 적합지역의 확대와 감소에 대한 분석을 실시했다. 본 연구에서 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

아시아태평양 지역의 주요 쌀 생산국 20개 국가에 대해 미래 쌀 수확량 변화를 예측한 결과 적응 대책을 고려할 경우 러시아와 북한과 같이 고위도에 위치한 국가에서는 모든 RCP 시나리오 하에서 2020년대와 2050년대 그리고 2080년대의 쌀 수확량이 1990년대와 비교해 GCM에 따라 그 정도의 차이는 있지만 대부분의 GCM에서 수확량이 상당히 증가하는 것으로 나타났다. 특히 이들 국가에서 RCP 8.5 시나리오에서 21세기 말로 갈수록 쌀 수확량이 급격히 증가하는 것은 기온 상승의 영향으로 쌀 생산에 적합한 기후대로 바뀌기 때문인 것으로 해석된다. 적응 대책을 고려하지 않을 경우 고위도 지역을 제외한 대부분의 국가에서 쌀 수확량이 감소하는 GCM이 많은 것으로 나타나고 있으며 특히 동남아시아 지역의 국가에서 쌀 수확량 감소가 심각할 것으로 예측되고 있다. 이 분석 결과로부터 수확

량 감소가 심각한 국가 대부분은 기후변화에 취약한 사회시스템을 갖는 개발도상국가인 것으로 나타났으며 농업이 주요 산업인 이들 국가에서는 지속가능한 쌀 산업 유지를 위해 적절한 기후변화 적응 대책 마련이 필요하다는 것을 시사하고 있다.

SRES 시나리오를 기반으로 작성된 기후변화 시나리오를 이용해 아시아 지역의 쌀 생산성을 평가한 Masutomi et al.(2009)의 결과에서는 A2 시나리오 하에서 2080년대에 약 9.9%의 쌀 수확량 감소를 예측한 반면 본 연구에서는 SRES A2 시나리오와 상대적으로 비슷한 온실가스 배출 시나리오인 RCP 8.5 시나리오 하에서 아시아태평양 지역 주요 쌀 생산지역의 쌀 수확량이 2080년대에 24.8% 감소하는 것으로 나타나 적용된 배출 시나리오와 GCM이 서로 다른 것으로부터 전체적으로 본 연구의 결과가 보다 큰 수확량 감소를 예측하고 있다. 우리나라에서도 SRES의 A2 시나리오 하에서 기후변화가 쌀 수확량에 미치는 영향에 대한 평가를 실시했는데 2030년대, 2050년대, 2080년대의 평균 쌀 수확량은 기준년도(1971-2000년)에 비해 각각 약 5.7%, 8.7%, 16.5% 감소하는 것으로 예측되었다(유가영과 김정은 2007). 본 연구에서는 RCP 8.5 시나리오 하에서 우리나라의 2020년대, 2050년대, 2080년대에 대한 32개 GCM 평균의 쌀 수확량이 기준년도(1991-2000년)에 비해 각각 약 2.3% 감소, 2.3% 증가, 17.6% 감소하는 것으로 나타나고 있어 2080년대의 쌀 수확량 변화가 비슷하게 예측되었다. 아시아·태평양 지역의 주요 쌀 생산국에 대한 평균 쌀 수확량 변화를 분석하기 위해 RCP 시나리오별로 각 GCM의 수확량 변화를 예측한 결과, 수확량 예측 결과는 전제하고 있는 GCM 기후예측의 선택에 따라 예측 값에 큰 불확실성이 존재하는 것을 확인했다. 예를 들어 적응 대책을 고려하지 않을 경우에 대한 RCP 8.5 시나리오의 불확실성 폭은 2020년대에 13.5%(-5.7%~-19.2%), 2050년대에 18.0%(-4.2%~-22.2%), 2080년대에 37.0%(-7.1%~-44.1%)로 21세기 말로 갈수록 불확실성 폭이 크게 나타났는데 이는 각 GCM에서 예측하고 있는 기온 상승 및 강수량 증가에 대한 예측 폭이 21세기 말로 갈수록 커지지 때문인 것으로 설명이 가능하다. 이상과 같이 GCM의 선택에 따라 쌀 수확량 변화 예측 결과가 크게 다르게 나타나기 때문에 국가별 기후변화 적응 정책을 검토할 때 이러한 GCM 간 예측의 불확실성에 대해 충분한 고려를 해야만 할 것이다. 또한 RCP 시나리오의 선택에 따른 쌀 수확량 예측의 불확실성에 대해 분석한 결과 GCM의 선택에 의한 불확실성 보다는 작았지만 적응 대책을 고려하지 않을 경우 2080년대에 14%(-10.8%~-24.9%)의 불확실성 폭을 나타냈다. 이러한 분석 결과는 인류

사회가 앞으로 어느 정도의 완화정책을 실현해나가야 할 것인가에 대한 방향을 제시하는데 있어 농업분야에 대한 기초 정보로서 활용될 수 있을 것이다.

기후변화 시나리오 자료를 활용한 전지구 미래 작물 수확량 변화 예측에 대한 정보는 토양침식과 사막화, 도시화 등의 진행으로 작물 생산가능 면적이 줄어들고 있는 상황에서 고위도 지역에 대한 작물 경작지 개발의 가능성에 대해 의미 있는 정보를 제시할 수 있을 것이다. 특히 우리나라와 같이 곡물소비량의 대부분을 수입에 의존하고 있는 국가에서는 안정적인 식량공급을 위해 기후변화에 보다 적극적으로 대응해 나가야 할 것이고 해외 곡물 생산기지 운영과 같은 대응 방법에 대해서도 심도 있는 고려가 필요할 것으로 생각된다.

본 연구에서는 최종 결과물로서 아시아·태평양 지역의 주요 쌀 생산국에 대한 미래 쌀 수확량 변화 예측의 불확실성 정보를 제공하고 있다. 여기서 얻어지는 쌀 수확량 변화 예측 결과 정보는 미래 인구 변화와 국가별 GDP 변화 등의 사회경제조건과 결합되어 식량 소비량이나 기아인구의 변화 등을 예측하는데 있어 기본적인 입력 자료로 그 활용도가 높게 평가될 것으로 기대된다(Haseegawa et al., 2012). 또한 GCM 선택에 따른 쌀 수확량 변화 예측에 대한 불확실성 평가 결과는 비록 전지구 규모로 이루어졌지만 각 GCM이 나타내는 우리나라 쌀 수확량 변화 예측에 대해 GCM별 차이가 분명히 존재하고 있으며 우리나라에서 농업분야에 대한 기후변화 적응 정책을 수립하기에 앞서 반드시 참고해야할 정보로서의 가치가 있다고 판단된다. 만일 국가 기후변화 적응 정책을 수립하는데 있어 어느 한 가지 GCM에 의한 영향평가 결과만을 고려하게 된다면 기후변화로 인한 리스크가 그만큼 증가하게 될 것이다. 이상의 본 연구에서 실시한 미래 기후변화에 따른 아시아·태평양 지역의 쌀 수확량 변화 예측의 불확실성 평가 결과를 바탕으로 보다 과학적이고 합리적인 국가별 기후변화 적응 정책 수립에 공헌할 수 있길 희망하는 바이다.

**REFERENCES**

- 유가영, 김정은, 2007: 기후변화가 농업생태계에 미치는 영향분석 -벼 생산 취약성 평가방법론 연구-, 한국 환경정책평가연구원.
- Benhin, J.K.A., 2008: South African crop farming and climate change: an economic assessment of impacts *Glob. Environ. Change.* 18, 666-78.
- CIESIN, 2005: Gridded Population of the World (Version 3); Center for International Earth Science Information Network, Palisades. [available at <http://sedac.ciesin.org/gpw/>]
- Easterling, W.E., Aggarwal, P.K., Batima, P., Brander, K.M., Erda, L., Howden, S.M., Kirilenko, A., Morton, J., Soussana, J., Schmidhuber, J. and Tubiello, F.N., 2007. Food, fibre and forest products. In: Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., Van der Linden, P.J. and Hanson, C.E. (Eds.), *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- FAO, 1995: Digital Soil Map of the World (Version 3.5). Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- FAO, 1998: Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- FAO, 2002: Maximum available soil moisture. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. [available at <http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/main.home>]
- Fischer, G., van Veldhuizen, H., Shah, M. and Nachtergaele, F., 2002: Global Agro-ecological Assessment for Agriculture in the 21st Century: Methodology and Results [Research Report RR-02-02]. IIASA, Laxenburg, Austria.
- Fujino, J., Nair, R., Kainuma, M., Masui, T. and Matsuoka, Y., 2006: Multigas mitigation analysis on stabilization scenarios using aim global model. *The Energy Journal Special issue* 3, 343-354.
- Guoxin, T. and Shibasaki, R., 2003: Global estimation of crop productivity and the impacts of global warming by GIS and EPIC integration. *Ecol. Modell.* 168, 357-370.
- Hasegawa, T., Fujimori, S., Shin, Y.H., Takahashi, K. and Masui, T., 2012: Global food security and economic impact analysis caused by climate change impact on agricultural productivity. *J. JSCE Ser.G.* 68(5), 221-226.
- Jaggard, K.W., Qi, A. and Ober, E.S., 2010: Possible changes to arable crop yields by 2050. *Phil. Trans. R. Soc. B* 365, 2835-2851.
- Jerry, K., Tim, H., Andre, D. and Tim, W., 2012: Climate change impacts on crop productivity in Africa and South Asia. *Environ. Res. Lett.* 7, 034032.
- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J. and Ritchie J.T., 2003: The DSSAT cropping system model. *European J. Agro.* 18, 235-265.
- Knox, J.W., Rodríguez Díaz, J.A., Nixon, D.J. and Mkhwanazi, M., 2010: A preliminary assessment of climate change impacts on sugarcane in Swaziland. *Agric. Syst.* 103, 63-72.

- Leff, B., Ramankutty, N. and Foley, J.A., 2004: Geographic distribution of major crops across the world. *Global Biogeochem. Cycles* 18, GB1009.
- Long, S.P., Ainsworth, E.A., Leakey, A.D.B. and Morgan, P.B., 2005: Global food insecurity. Treatment of major food crops with elevated carbon dioxide or ozone under large-scale fully open-air conditions suggests recent models may have overestimated future yields. *Phil. Trans. R. Soc. B* 360, 2011-2020.
- Masutomi, Y., Takahashi, K., Harasawa, H. and Matsuoka, Y., 2009: Impact assessment of climate change on rice production in Asia in comprehensive consideration of process/parameter uncertainty in general circulation models. *Agric. Ecos. Environ.* 131, 281-291.
- Mitchell, T.D. and Jones, P.D., 2005. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *Int. J. Climatol.* 25, 693-712.
- Nakicenovic, N. and Swart, R., 2000: *Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- New, M., Hulme, M. and Jones, P.D., 1999: Representing twentieth century space-time climate variability. Part1: Development of a 1961-90 mean monthly terrestrial climatology. *J. Clim.* 12, 829-856.
- Parry, M.L., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Livermore, M. and Fischer, G., 2004: Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios, *Global Env. Cha.* 14, 53-67.
- Riahi, K., Grubler, A. and Nakicenovic, N., 2007: Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technol Forecast Soc Chang.* 74, 887-935.
- Shin, Y.H., Takahashi, K., Hijioka, Y., Hanasaki, K., Yamamoto, T. and Masutomi, Y., 2011: Assessment of climate change impact on maize productivity that considered the uncertainty of the climate projections. *J. JSCE Ser.G.* 67(5), 61-70.
- Shin, Y.H., Takahashi, K., Hanasaki, K. and Hijioka, Y., 2012: Climate projections of around Japan – Comparison between CMIP3 and CMIP5 model-. *J. JSCE Ser.G.* 68(5), 159-169.
- Siebert, S., Döll, P., Hoogeveen, J., Faures, J.M., Frenken, K. and Feick, S., 2005: Development and validation of the global map of irrigation areas. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 9, 535-547.
- Takahashi, K., Harasawa, H. and Matsuoka, Y., 1997: Climate change impact on global crop production. *J. Global Env. Eng.* 3, 145-161.
- Tan, G. and Shiasaki, R., 2003: Global estimation of crop productivity and the impacts of global warming by GIS and EPIC integration. *Ecolog. Mod.* 168, 357-370.
- Taylor K.E., Stouffer R.J. and Meehl G.A. 2009: A summary of the CMIP5 experiment design. *World.* 4, 1-33. [available at <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>]
- Tsuji, G.Y., Uehara, G. and Balas, S., 1994: *Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 3.* Hawaii University Press, Honolulu, Hawaii.
- Tubiello, F.N., Amthor, J.S., Boote, K.J., Donatelli, M., Easterling, W., Fischer, G., Gifford, R.M., Howden, M., Reilly, J. and Rosenzweig, C., 2007: Crop response to elevated CO₂ and world food supply.



- Eur. J. Agron. 26, 215-223.
- USGS, 1998: GTOPO30 United States Geological Survey. [available at <https://lta.cr.usgs.gov/GTOPO30>]
- Van Vuuren, D.P., Den Elzen, M.G.J., Lucas, P.L., Eickhout, B., Strengers, B.J., Van Ruijven, B., Wonink, S. and Van Houdt, R., 2007: Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs. *Clim Chang.* 81, 119-159.
- Willams, J.R., Jones, C.A. and Dyke, P.T., 1984: A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Trans. ASAE* 27, 129-144.
- Wise, M., Calvin, K., Thomson, A., Clarke, L., Bond-Lamberty, B., Sands, R., Smith, S.J., Janetos, A. and Edmonds, J., 2009: Implications of limiting CO₂ concentrations for land use and energy. *Science.* 324, 1183-1186.
- World Bank, 2006: World Development Indicators 2006. World Bank, Washington D.C.



APCC RESEARCH REPORT 2013-05

- Assessment of Climate Change Impacts on Rice Productivity in the Asia-Pacific Region
- Assessment of Climate Change Impacts on Agricultural Reservoirs in Consideration of Uncertainty
- Estimation of GHG Fluxes by Landcover Type Including Rice Paddy Fields

APEC Climate Center

12, Centum 7-ro, Haeundae-gu, Busan 612-020,
Republic of Korea
Tel: +82-51-745-3900 Fax: +82-51-745-3949
www.apcc21.org

비매품



ISBN 978-89-97333-97-4
ISBN 978-89-97333-92-9 (세트)