

국내 농업기후지대 별 최적기후모형 선정을 통한 미래 벼 도열병 발생 위험도 예측

이성규 · 김광형^{**}

^{*}APEC 기후센터 기후사업본부

Predicting Potential Epidemics of Rice Leaf Blast Disease Using Climate Scenarios from the Best Global Climate Model Selected for Individual Agro-Climatic Zones in Korea

Seongkyu Lee and Kwang-Hyung Kim^{**}

^{*}Climate Services and Research Dept., APEC Climate Center, Busan, Korea

ABSTRACT

Climate change will affect not only the crop productivity but also the pattern of rice disease epidemics in Korea. Impact assessments for the climate change are conducted using various climate change scenarios from many global climate models (GCM), such as a scenario from a best GCM or scenarios from multiple GCMs, or a combination of both. Here, we evaluated the feasibility of using a climate change scenario from the best GCM for the impact assessment on the potential epidemics of a rice leaf blast disease in Korea, in comparison to a multi-model ensemble (MME) scenario from multiple GCMs. For this, this study involves analyses of disease simulation using an epidemiological model, EPIRICE-LB, which was validated for Korean rice paddy fields. We then assessed likely changes in disease epidemics using the best GCM selected for individual agro-climatic zones and MME scenarios constructed by running 11 GCMs. As a result, the simulated incidence of leaf blast epidemics gradually decreased over the future periods both from the best GCM and MME. The results from this study emphasized that the best GCM selection approach resulted in comparable performance to the MME approach for the climate change impact assessment on rice leaf blast epidemic in Korea.

Key words: agro-climatic zone, best GCM selection, rice leaf blast, multi-model ensemble

1. 서 론

최근 기후변화로 인해 한반도 전역의 기온이 지속적으로 상승함과 동시에 전에 없었던 강도와 빈도의 이상기후현상이 증가하고 있다 (KMA, 2012; KMA, 2018). 이러한 기후현상과 밀접하게 연관되어 있는 농업분야에서는 농작물의 생산성 뿐만 아니라 수량에 직접적인 영향을 미치는 병해충 발생 양상의 변화가 예상되고 있다. 실제 기후변화에 따른 국내 병해충 서식환경의 변화로 인해 벼줄무늬잎마름병, 벼흰잎마름병 등 고온성 병해충의 밀도 증가, 농작물 재배한계선의 변화 및 겨울철 따뜻한 기온으로 인한 돌발 병해충의 증가, 개방화에 따른 교역 증가로 외래 병해충의 유입에 의한 피해가 점차 확

산되고 있다 (Cho, 2009; Lee, 2014).

기후변화에 따른 작물 병해충의 발생 위험에 효과적으로 대처하기 위해 국내 주요 병해충과 잠재적 돌발 병해충을 대상으로 기후변화 영향평가 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 하지만 우리나라 대부분의 선행 연구들은 기상청에서 제공하는 단일 기후모형 (HadGEM2-AO)의 시나리오 자료를 사용하였는데 (KMA, 2012), 그 이유는 해당 시나리오 자료가 공신력 있는 국가기관에서 생산된 유일한 기후변화 시나리오였고, 개별 연구자들 차원에서 다른 기후모형의 시나리오를 확보하여 상세화까지 진행하기에는 기술적으로 경험적으로 어려움이 있었기 때문이었다. 이렇게 단일 기후모형의 시나리오 만 사용하면 수많은 기후모형의 시나리오로부터 얻

[†] Corresponding author: kh.kim@apcc21.org

Received May 02, 2018 / Revised June 04, 2018 / Accepted June 11, 2018

을 수 있는 미래 전망에 대한 불확실성을 전혀 고려하지 못하기 때문에 한편으로 치우친, 왜곡된 결과를 얻을 가능성이 높고 결과적으로 최종 결과에 대한 신뢰도를 낮추게 된다. 실제로 Kim and Cho (2016)는 국내 벼 병해충에 대한 기후변화 영향평가를 통해 기상청의 단일 기후모형 시나리오가 다중 기후모형 시나리오의 불확실성 범위 내에서 얼마나 편이 된 결과를 보여줄 수 있는지를 제시하였다. 이러한 최종 결과가 지닌 불확실성의 범위는 선정된 기후모형의 특성뿐만 아니라 편이 보정을 포함한 상세화 기법 선정과 사용된 응용분야 모형의 성능에 따라 결정이 되는데, 그 중 사용된 기후모형 관련 불확실성이 전체의 50% 이상을 차지하는 것으로 알려져 있다 (Kay et al., 2009; Lee, 2014; Wilby and Harris, 2006).

따라서 기후변화 시나리오가 가지고 있는 불확실성을 최대한 반영하기 위해 다중기후모형을 사용한 앙상블 기법 (Multi-Model Ensemble: MME)을 적용하여 불확실성 정보를 포함한 결과를 바탕으로 불확실한 의사결정을 최소화 하기 위한 연구가 최근에 활발하게 수행되고 있다 (Kim et al., 2016; Kim and Cho, 2016; Murphy et al., 2004; Semenov and Stratonovitch, 2010). 이에 더해 기후모형의 불확실성을 다루기 위한 다양한 방법들이 시도되고 있는데, 예를 들어, 적용 분야와 사용하려는 응용모형에 적합한 최적기후모형을 선정하거나, 애초부터 불필요한 불확실성을 제공하는 기후모형을 제거하고 나머지 기후모형 결과를 활용하는 방법, 또는 기후모형간 다른 가중치 (weight factor)를 적용하는 방법을 시도하기도 한다 (Cai et al., 2009; Lee, 2013; Rossman et al., 2017; Samadi et al., 2010). 이러한 방법들이 가능한 이유는 기후변화 시나리오를 생산하는 기후모형의 구조나 초기 조건이 모두 다르고 이로 인해 각 기후모형에서 생산되는 기후정보의 시공간적 성능이 다르게 나타나기 때문이다 (Semenov and Stratonovitch, 2010).

본 연구에서는 이렇게 기후모형의 불확실성을 다루는 다양한 기후변화 영향평가 방법 중 다중모형 앙상블 기법과 최적기후모형을 선정하는 기법을 비교 평가하였다. 우선 사용자 중심 (응용분야 맞춤형) 기후변화 영향평가를 위해 개발된 AIMS (APCC Integrated Modeling Solution) 프로그램을 이용하여 다수의 기후모형 시나리오에 대한 시공간적 상세화를 진행하였다. 다음으로 상세화된 기후자료를 벼 도열병 예측 모형인 EPIRICE-LB와 연결하여 국내 농업기후지대 별 벼 도열병 발생 위험도를 시뮬레이션 하였고, 마지막으로 다중모형 앙상블 기법과 최적기후모형 선정 기법을 사용하여 도출된 결과값을 비교 평가하였다.

2. 실험방법

2.1 농업기후지대 별 기후변화 시나리오

대상 지역으로는 도서지역을 제외한 30년 평년 기상관측자료가 구축되어 있는 58개 표준기상관측소가 위치한 지역을 선정하였으며, 이들 지역을 Choi and Yun (1989)에 의해 개발된 벼 재배를 위한 19개 농업기후지대로 구분하여 분석하였다 (Fig 1). 본 연구에서 사용한 우리나라의 벼 재배 농업기후지대는 다음과 같다: 태백고냉지대 (I, Taebaek Alpine), 태백준고냉지대 (II, Taebaek Semi-Alpine), 소백산간지대 (III, Sobaek Mountainous), 노령소백산간지대 (IV, Noryeong Sobaek Mountainous), 영남내륙산간지대 (V, Yeongnam Inland Mountainous), 중북부내륙지대 (VI, Northern Central Inland), 중부내륙지대 (VII, Central Inland), 소백서부내륙지대 (VIII, Western Sobaek Inland), 노령동서내륙지대 (IX, Noryeong Eastern & Western Inland), 호남내륙지대 (X, Honam Inland), 영남분지지대 (XI, Yeongnam Basin), 영남내륙지대 (XII, Yeongnam Inland), 중서부평야지대 (XIII, Western Central Plain), 차령남부평야지대 (XIV, Southern Charyeong Plain), 남서해안지대 (XV, South Western Coastal), 남부해안지대 (XVI, Southern Coastal), 동해안북부지대 (XVII, North Eastern Coastal), 동해안중부지대 (XVIII, Central Eastern Coastal), 동해안남부지대 (XIX, South Eastern Coastal). 본 연구에서는 19개 농업기후지대 중 58개 표준기상관측소가 위치하지 않는 태백고냉지대 (I)와 영남내륙산간지대 (V)를 제외하고 나머지 농업기후지대를 대상으로 연구를 수행하였다.

미래 기후변화 시나리오 자료는 기후변화에 관한 정부 간 협의체 (Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC)의 대표농도경로 (Representative Concentration Pathways: RCP)를 바탕으로 전지구기후모형 (Global Climate Model, 이하 기후모형)에 의해서 생성된 것으로 CMIP5 (the phase five of the Couple Model Intercomparison Project)를 통해서 수집되었다. 미래 시나리오 자료의 공간해상도는 200-400km이기 때문에 농업모형에 활용할 수 있도록 공간해상도의 상세화가 필요하며, 기후모형의 계통오차 (systematic bias)에 대한 편이보정 (bias correction)도 필요하다. 따라서 본 연구에서는 APEC기후센터 (APEC Climate Center: APCC)의 AIMS에서 제공하는 기후변화 시나리오 중 비모수적 분위사상법 (Simple Quantile Mapping: SQM)에 의해 상세화된 자료를 사용하였다 (Cho et al., 2018). 해당 시나리오 자료는 11개 기후모형에서 생성된 격자형 미래 기후변화 시나리오 자료에

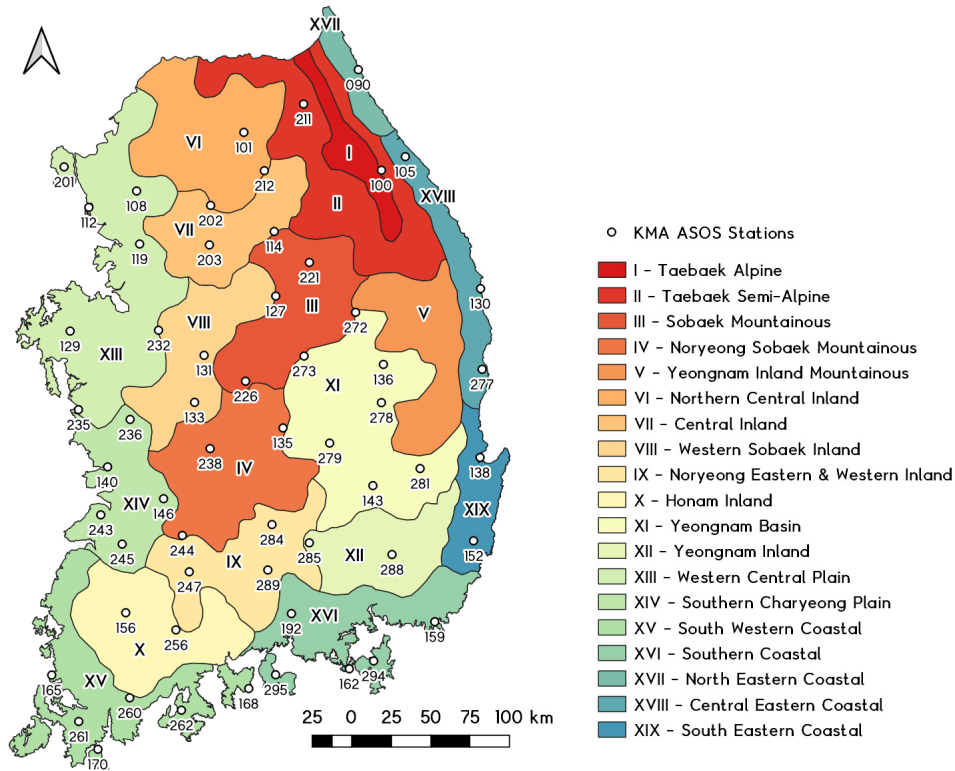


Fig. 1. Agro-climatic zones and KMA ASOS locations within the agro-climatic zones in Korea.

서 58개의 표준기상관측소가 위치한 격자의 중앙 기후값을 추출하고 여기에 편이보정 및 공간특성 등을 반영하여 지점 단위로 상세화한 자료인데, EPIRICE-LB 모형을 구동하기 위해 필요한 일별 최고/최저 기온, 강수량, 상대습도 자료가 모두 제공되는 시나리오 자료이기 때문에 사용하였다. 또한 각 표준기상관측소의 30년 평년 기상관측자료는 SQM을 위한 기준 자료로 사용하였다. 본 연구에서 사용된 11개 기후모형과 기후변화 시나리오 자료에 대한 자세한 내용은 Table 1을 참고하면 된다.

2.2 벼 병해충 모형

농촌진흥청 국가 병해충 관리시스템 (<http://ncpms.rda.go.kr/>)에서는 우리나라 벼 병해충에 대한 예찰, 예측, 진단, 방제 정보를 제공하고 있다. 그 중 도열병은 연간 발생면적이 19%, 무방제시 감수율이 15.4%에 이르는 주요 벼 병해로써 국가 병해충 관리시스템의 예찰, 예측, 진단, 방제 정보가 모두 제공되는 대표적인 병해충 중 하나이다 (Kim, 2014; Lee, 2012). 이러한 벼 도열병의 중요성을 감안하여 Kim et al. (2015)은 필리핀 국제미작연구소 (International Rice Research Institute: IRRI)의 Savary et al. (2012)에 의해 개발된 EPIRICE 모형을

도입하여 국내 벼 도열병 발생 위험도를 예측할 수 있도록 모수화 (parameterization)와 새로운 모듈추가 등의 과정을 거쳐 국내 특성에 맞는 EPIRICE-LB 모형을 개발하였다. EPIRICE-LB의 기본구조는 SEIR (Susceptible - Exposed - Infected - Removed) 구조로서 각 병해 별 전형적인 병징을 바탕으로 고유의 개별 병징 단위인 site 개념이 정의되고, 각 site가 병원균에 노출되어 감염이 일어나고 일정시간 후에 치료가 되거나 제거가 되는 일련의 과정을 각 단계별 site 개수의 비율로 설명하는 구조이다. 모형 입력값은 벼 재배기간 전체에 해당하는 일별 기상값 (최고/최저 기온, 강수량, 상대습도)과 그 외 경종적 모수들 (품종저항성, 이앙시기 등)이다. 이러한 값들이 입력되면 SEIR 모듈의 site 개수가 시간에 따라 일정 속도로 변화하는데, 이는 모형의 핵심요소인 감염속도, 즉 Rc값에 의존적이다. 모형의 출력값은 시간에 따른 전체 site당 병든 site의 누적비율인 병반면적율로 나타나며, 이는 도열병의 잠재적 발생 위험도로 볼 수 있다. 이보다 자세한 모형 및 모수에 대한 설명은 Kim et al. (2015)을 참고하면 된다.

Table 1. Climate change scenarios from 11 global climate models (GCM) used in this study

Model	Model Provider	Latitude-Longitude Grid
BCC-CSM1.1	Beijing Climate Center	128 × 64
CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada	128 × 64
GFDL-CM3	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	144 × 90
GFDL-ESM2G	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	144 × 90
GFDL-ESM2M	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	144 × 90
HadGEM2-CC	Met Office Hadley Centre, UK	192 × 145
HadGEM2-ES	Met Office Hadley Centre, UK	192 × 145
INM-CM4	Institute for Numerical Mathematics, Russia	180 × 120
IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre Simon Laplace, France	96 × 96
MIROC-ESM	Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japan	128 × 64
MIROC-ESM-CHEM	Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japan	128 × 64

2.3 벼 도열병 기후변화 영향평가

2.3.1 농업기후시대 별 최적기후모형 선정

각 농업기후시대 별로 상세화된 각 기후모형의 기후변화 시나리오 중 과거기간 (1976-2005) 동안의 기상자료를 입력값으로 하여 EPIRICE-LB를 구동하였다. 농업모형인 EPIRICE-LB 결과를 직접 비교하여 입력값으로 쓰인 개별 기후모형에 대한 과거 재현성을 평가하기 위해 동일 기간의 과거 기상관측자료를 입력값으로 EPIRICE-LB를 함께 구동하였다. EPIRICE-LB를 구동하기 위해 매년 벼 재배기간 동안의 일별 기상자료 (최고/최저 기온, 강수량, 상대습도)뿐만 아니라 벼의 도열병에 대한 품종저항성과 이앙시기를 모형의 입력값으로 사용하였다. 비록 우리나라 지역 별 (또는 기후시대 별) 주요 벼 재배품종이나 이앙시기 정보를 관련 기관이나 문헌조사를 통해 파악할 수 있으나, 본 연구에서는 기후모형의 불확실성을 고려한 기후변화 시나리오 활용 방법에 대한 비교 평가가 주된 목적이었기 때문에 통일된 품종과 이앙시기를 적용하여 모형을 구동하였다. 도열병에 대한 저항성 정도로는 국내 벼 품종의 절반 이상을 차지하는 중간저항성 (Moderately resistant) 품종을 대푯값으로 사용했고, 이앙시기는 Lee et al. (2012)에 의해 제안된 과거 기간 중간생종 품종의 최적 파종시기인 4월 27일에 25일간의 표준 육묘기간을 더한 5월 22일을 대표 이앙시기로 사용하여 모형을 구동하였다. EPIRICE-LB의 최종 출력값인 재배기간 중 최대 병반면적을 (peak severity)을 해당 농업기후시대 별로 매년 평균한 뒤, 과거 30년간의 최대 병반면적을 농업기후시대 별로 분석하여 상자그래프 (box

plot)로 표현하였다. 과거 30년 관측기상자료와 기후모형 시나리오 자료를 입력값으로 EPIRICE-LB의 결과인 최대 병반면적을 중간값 (median)을 비교하여 관측기상자료로부터 얻은 중간값과 가장 가까운 중간값을 나타내는 기후모형을 최적기후모형으로 선정하였다.

2.3.2 다중모형 앙상블 및 최적기후모형 시나리오를 활용한 미래 기후변화 영향평가

다중모형 앙상블 기법과 앞서 농업기후시대 별로 선정된 최적기후모형을 사용하는 기법을 비교 평가하기 위해 두 방법을 모두 사용하여 미래 기후변화에 따른 벼 도열병 발생 위험도를 예측하였다. 이를 위해 AIMS에서 11개 기후모형의 기후변화 시나리오를 시공간적 상세화하고 상세화된 기후자료를 입력값으로 EPIRICE-LB를 구동하였다. 모든 기후모형의 EPIRICE-LB 결과값을 합산한 다중모형 앙상블 결과를 농업기후시대 별로 분석하였고, 각 농업기후시대 별로 선정된 최적기후모형의 EPIRICE-LB 결과값을 함께 비교 평가하였다. 이를 위해 미래 기후변화에 대한 모의기간은 근미래 (2011-2040)와 먼미래 (2041-2070)로 구분하였고 과거 기간 (1976-2005) 대비 미래기간 동안의 변화패턴을 분석하였다. 이러한 기후변화 영향평가의 근미래 결과의 경우 현재시점을 포함한 향후 10-20년간의 단기 및 중기 농업 정책을 수립하는 근거로 활용될 수 있고, 먼미래 결과는 향후 30-50년 후의 장기적인 국가 농업 정책 및 연구 계획 수립에 활용될 수 있을 것이다. 다중모형 앙상블과 최적기후모형 결과를 비교하기 위해 농업기후시대 별로 과거, 근미래, 먼미래 기

간으로 나눠 최대 병반면적을 30년 평균을 지도에 표시하거나 30년 병반면적을 통계를 상자그래프 (box plot)로 표현하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 최적기후모형 선정

과거 30년 기간 동안의 관측기상자료와 각 기후모형의 시나리오 자료를 입력값으로 하여 EPIRICE-LB를 구동하였고,

이렇게 얻은 최대 병반면적의 30년 통계 결과에 대한 중간값 (median)을 비교하여 관측기상자료의 결과와 가장 가까운 결과를 나타내는 기후모형을 각 농업기후지대에 대한 최적기후모형으로 선정하였다 (Fig 2). Fig 2A는 19개 농업기후지대 중 남부에 걸쳐 고르게 위치한 3개의 농업기후지대에 대한 최적기후모형 선정 예를 보여주는데, 중북부내륙지대 (VI), 소백서부내륙지대 (VIII), 남서해안지대 (XV)에 대해 각각 관측기상자료 결과 (Observed)의 중간값과 가장 가까운 중간값을 나타내는 IPSL-CM5A-LR, INM-CM4, IPSL-CM5A-LR 모형이 최적기후모형으로 선정되었다.

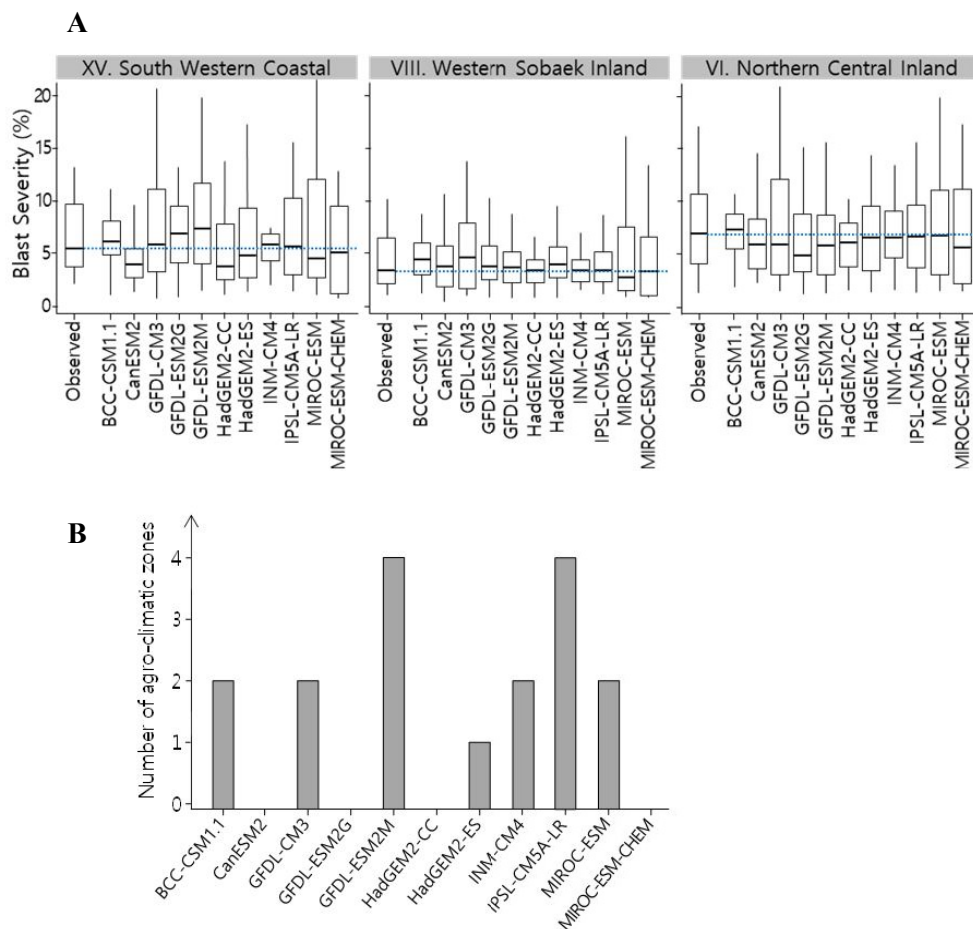


Fig. 2. Best GCM selection for individual agro-climatic zones. (A) Comparison of the EPIRICE-LB results from observed climate data and climate scenarios from 11 global climate models (GCM) to select the best GCM for each agro-climatic zone. Note that to compare the observed and individual GCM results, epidemics of rice leaf blast for the historical period (1976-2005) were simulated using the EPIRICE-LB. Blue dotted lines in A indicate observed results intended for comparison with the results of historical period from 11 GCMs. (B) Number of agro-climatic zones that selected each GCM as the best GCM.

Table 2. Best GCMs selected for 17 agro-climatic zones in Korea

Agro-Climatic Zones	Best GCM	Agro-Climatic Zones	Best GCM
II. Taebaek Semi-Alpine	MIROC-ESM	XII. Yeongnam Inland	GFDL-ESM2M
III. Sobaek Mountainous	HadGEM2-ES	XIII. Western Central Plain	BCC-CSM1.1
IV. Noryeong Sobaek Mountainous	BCC-CSM1.1	XIV. Southern Charyeong Plain	INM-CM4
VI. Northern Central Inland	IPSL-CM5A-LR	XV. South Western Coastal	IPSL-CM5A-LR
VII. Central Inland	GFDL-CM3	XVI. Southern Coastal	IPSL-CM5A-LR
VIII. Western Sobaek Inland	INM-CM4	XVII. North Eastern Coastal	GFDL-ESM2M
IX. Noryeong Eastern & Western Inland	GFDL-ESM2M	XVIII. Central Eastern Coastal	GFDL-ESM2M
X. Honam Inland	IPSL-CM5A-LR	XIX. South Eastern Coastal	MIROC-ESM
XI. Yeongnam Basin	GFDL-CM3		

과거기간을 대상으로 EPIRICE-LB를 활용해 관측기상자료와 기후모형의 시나리오 자료를 비교한 결과, 각 기후모형에 따라 그리고 농업기후지대에 따라 다양한 결과를 볼 수 있었다 (Fig 2A). 관측기상자료 결과와 가장 근접한 중간값을 보인 INM-CM4를 최적기후모형으로 선정했던 소백서부내륙지대 (VIII)의 경우, HadGEM2-ES나 IPSL-CM5A-LR과 같이 상당히 근접한 중간값을 보였지만 최적기후모형에 비해 상대적으로 낮은 성능을 보였기 때문에 제외된 기후모형도 다수 존재했다. 따라서 최적기후모형을 반드시 한 개만 선정해야 할 이유가 없다면 불확실성 정보 표출 및 개별 모형에 비해 일관되고 안정적인 결과를 생산하는 다중모형 앙상블이 가진 장점을 최대한 활용할 수 있는 다른 대안을 사용할 수 있다. 예를 들어, 일정 범위 내에서 합리적인 성능을 보이는 기후모형의 시나리오를 모두 활용하거나 가장 성능이 낮은 기후모형을 제외한 나머지 기후모형을 모두 사용하는 선택적 다중모형 앙상블 기법을 활용하는 것이다 (APEC Climate Center, 2006). 다만 이렇게 기후모형을 선정하는 기준을 세울 때에는 연구 목적을 바탕으로 보다 객관적이고 합리적인 기준을 제시해야 할 필요가 있다.

다음으로 서로 다른 농업기후지대에서 각각의 기후모형이 가지고 있는 성능에 따라 중간값의 변동폭이 다양하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 소백서부내륙지대 (VIII)나 중북부내륙지대 (VI)의 경우 개별 기후모형간 중간값의 변동폭이 극히 일부를 제외하고 일반적으로 작게 나타난 반면, 남서해안지대 (XV)의 경우 기후모형간 중간값의 변동폭이 상대적으로 크게 나타났다. 이러한 기후모형간 변동폭의 차이는 AIMS에서 사용한 SQM 상세화 기법이 과거 기후자료를 바탕으로 공간 상세화 및 편이보정을 할 때 해당 농업기후지대의 기후지리학적 특성을 제대로 반영하지 못한 결과일 것으로 추정된다. 그리고 모든 농업기후지대에서 유사하게 큰 변

동폭을 보이지 않았기 때문에 EPIRICE-LB의 모델링 알고리즘에 중요한 특정 기후인자 (기온, 강수량, 또는 상대습도)에 대한 SQM 상세화 기법의 편이보정 성능이 낮다고는 단정할 수 없다.

결과적으로 본 연구에서 사용된 58개 표준기상관측소를 포함하지 않는 농업기후지대 I과 V를 제외하고 나머지 17개 농업기후지대에 대해 EPIRICE-LB의 결과값을 바탕으로 관측기상자료의 결과와 가장 가까운 결과를 보인, 즉 가장 재현성이 높았던 한 개의 최적기후모형을 선정하여 Table 2에 나타내었다. 농업기후지대 별로 선정된 최적기후모형을 분석한 결과, 일부 기후모형이 다수의 농업기후지대를 대상으로 고르게 재현성을 보인 것을 알 수 있다 (Fig 2B). 가장 많은 농업기후지대에서 선정된 기후모형은 IPSL-CM5A-LR와 GFDL-ESM2M으로 각각 4개의 지대에서 높은 재현성을 보였다. 기후모형은 개발된 목적과 대상지역에 따라 우수한 성능을 보이는 지역 및 기후변수, 기후현상 등이 존재하기 때문에, 한반도를 포함한 동아시아 지역이나 한반도와 같이 복잡한 지형적 특성을 가진 곳에서 높은 성능을 보이는 기후모형을 선정하는 것은 합리적인 이유와 그만큼 가치가 있을 것으로 생각된다 (Cai et al., 2009; Lee, 2013; Pierce et al., 2009; Samadi et al., 2010; Walsh et al., 2008).

3.2 농업기후지대 별 미래 도열병 발생 위험도 평가

다중모형 앙상블과 최적기후모형의 결과를 비교 평가하기 위해 농업기후지대 I과 V를 제외한 나머지 17개 농업기후지대에 대해 과거 (1976-2005), 근미래 (2011-2040), 먼미래 (2041-2070) 기간 동안의 도열병 최대 병반면적율을 우리나라 지도 상에 표시하였다 (Fig 3). 농업기후지대 별로 최적기후모형의 시나리오를 사용하여 EPIRICE-LB를 구동한 결과

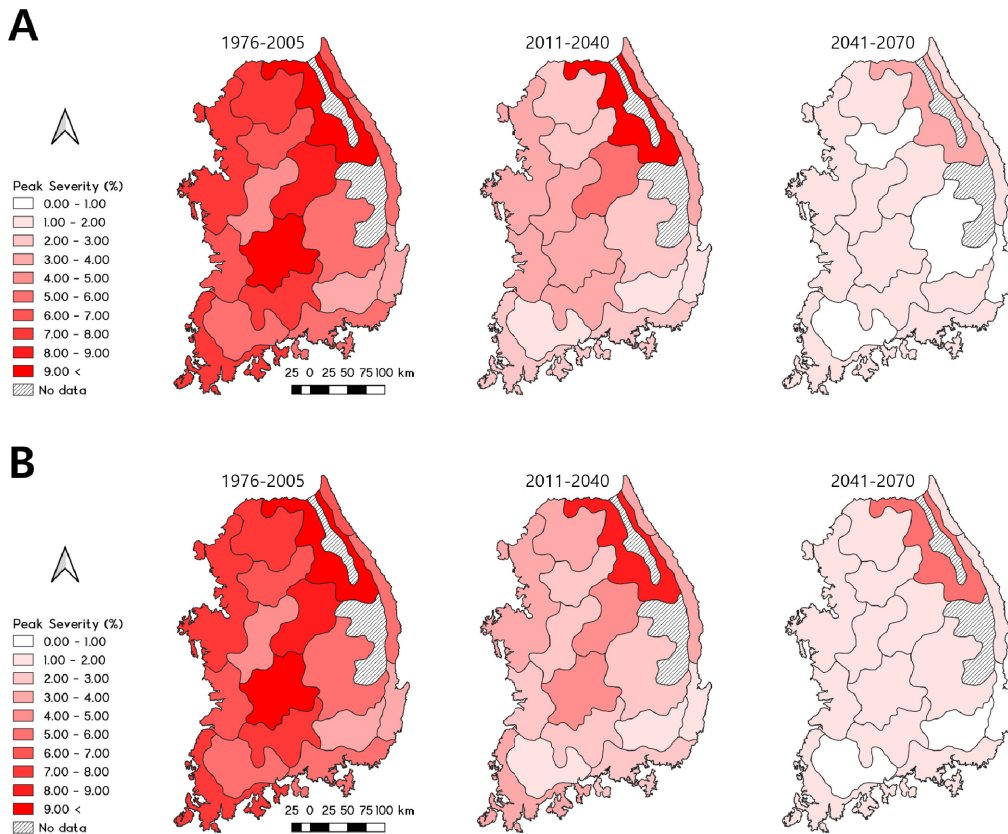


Fig. 3. Maps of the potential epidemics of rice leaf blast for the historical period (1976 - 2005), near future period (2011 - 2040), and distant future period (2041 - 2070) based on climate change scenarios from the best GCM selected for each agro-climatic zone (A) and multi-model ensembles constructed from the 11 GCM results (B).

(Fig 3A)와 다중모형 앙상블 결과 (Fig 3B) 사이에 눈에 띄는 공간적 차이를 발견할 수 없었다. 농업기후시대 별로 1-3% 정도의 병반면적을 차이를 보였을 뿐, 전체적인 공간적 패턴은 유사하게 모의함을 알 수 있다. 이를 좀더 수치적으로 해석하기 위해 각 농업기후시대 별로 과거, 근미래, 먼미래 기간에 대한 병반면적을 상자그래프로 그려서 비교하였다 (Fig 4). 앞서 지도 상의 결과와 마찬가지로 대부분의 농업기후시대에서 최적기후모형과 다중모형 앙상블을 사용한 근미래와 먼미래 결과 사이에 통계적으로 유의미한 차이가 나타나거나 병반면적을 변화 패턴이 상반되게 나오는 경우를 발견할 수 없었다. 결과적으로 본 연구에서 EPIRICE-LB를 활용하여 최적기후모형과 다중모형 앙상블 결과를 비교 평가한 결과 두 방법이 유사한 성능을 보임을 확인하였다.

태백준고냉지대 (II)를 제외하고 모든 농업기후시대에서 미래의 도열병 발생 위험도가 점차 감소하는 것으로 나타났다. 태백준고냉지대 (II)의 경우 과거 기간에 비해 근미래에

평균 12% 도열병 발생 위험도가 증가했으나 먼미래에는 60% 정도 발생 위험도가 감소했다. 이는 최근 Kim et al. (2015)과 Kim and Cho (2016) 연구결과와 유사한데, 향후 근미래까지는 도열병 발생의 최적 온도범위로 기온이 상승함에 따라 태백 고냉지 지역에서는 도열병 발생이 증가할 것으로 예측되었다. 하지만 먼미래에는 기온이 지속적으로 상승하여 도열병 발생의 최적 온도범위를 벗어나는 것으로 나타났다. 나머지 농업기후시대에서는 과거 기간에 비해 근미래에 평균 27-68% 도열병 발생 위험도가 감소하였다. 이후 먼미래에는 평균 62-88% 까지 발생 위험도가 급격하게 감소되었다.

도열병의 병반면적율과 벼의 최종 생산량과는 유의한 부의 상관이 있으며 병반면적율이 증가될수록 수량이 감소하는 것으로 알려져 있다 (Yeh et al., 2008). 하지만 대규모의 예방 방제가 주기적으로 이루어지고 있는 국내 벼 재배에서는 해당 비율만큼의 수량 손실이 실제로 일어나지는 않는다. 그럼에도 불구하고 대규모 예방 방제에는 상당한 경제적인 비용

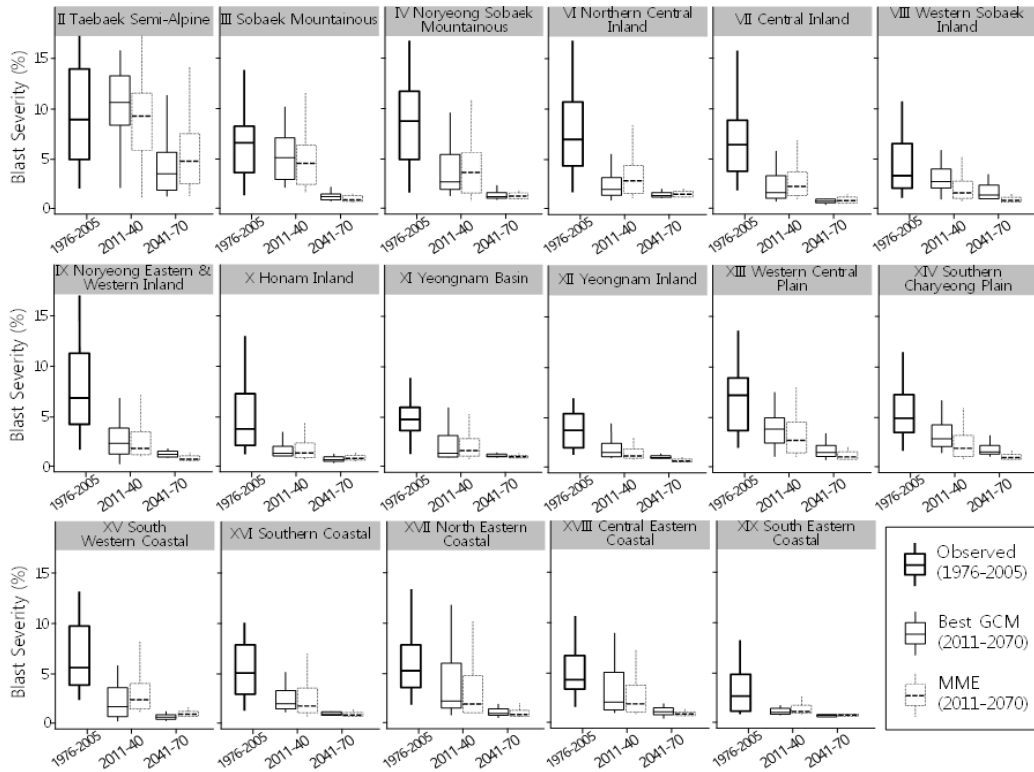


Fig. 4. Box plots of the potential epidemics of rice leaf blast for the historical period (1976 - 2005), near future period (2011 - 2040), and distant future period (2041 - 2070) based on climate change scenarios from the best GCM selected for each agro-climatic zone and multi-model ensembles (MME) constructed from the 11 GCM results. Note that the epidemics calculated from the best GCM and MME were compared for the near future and distant future periods in each agro-climatic zone.

이 들기 때문에 경제적인 방제수준을 정하여 일정 수준 이하의 발병 정도에서는 방제를 안 하는 것이 더 경제적일 수 있다. 실제로 Yeh et al. (2008)은 도열병 피해해석에 의한 경제적 방제수준을 2.7% 병반면적율로 제시하였다. 따라서 본 연구의 결과를 경제적 방제수준의 관점에서 해석하게 되면 근 미래 기간에는 호남내륙지대 (X), 영남내륙지대 (XII), 동해안남부지대 (XIX)를 비롯한 일부 농업기후지대에서는 경제적 방제수준 이하의 도열병 발생이 예측되기 때문에 현재 국내에서 이루어지고 있는 대규모 예방적 방제 정책에 대해 지역 별로 다르게 적용할 필요가 있다. 물론 먼미래 기간에는 태백준고냉지대 (II)를 제외하고 모든 지대에서 경제적 방제 수준 미만 도열병이 발생할 것으로 예측되었다.

본 연구를 통해 우리나라 벼 도열병의 미래 발생 위험도를 예측하였지만, 결과에 영향을 미치는 모든 인자를 통제하여 불확실성을 최대한 줄이는 노력이 추후 뒤따라야 할 것이다.

기후모형이 기여하는 불확실성이 가장 크에도 불구하고 EPIRICE-LB 모델로부터 추가되는 불확실성 또한 고려해야 한다. 우선 대표 입력값으로 선택된 벼 품종에 따른 저항성 정도와 지역별 이앙시기가 현재에 기반한 가정이기 때문에 일부 불확실성이 더해졌을 것이고, EPIRICE-LB의 감염알 고리즘이 CO₂의 영향을 전혀 고려하지 못하기 때문에 더해지는 불확실성도 존재한다. 실제 FACE (free-air CO₂ enrichment)를 활용한 필드시험에서 현재보다 200μmol mol⁻¹ 높은 CO₂ 상태에서 도열병 발생이 2배 이상 증가하였는데 (Kobayashi et al., 2006), 이러한 알고리즘이 EPIRICE-LB와 같은 병해충 모형에 적용이 되어야 좀더 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있을 것이다.

본 연구에서는 기후변화 영향평가 시 기후모형이 기여하는 불확실성을 서로 다른 방식으로 고려하는 다중모형 앙상블 기법과 최적기후모형 선정 기법을 비교 평가하였다. 본 연

구의 결과와 같이 최적기후모형과 다중모형 앙상블 간에 현저한 결과의 차이가 보이지 않는다면 리소스를 적게 사용하는 최적기후모형 선정이 더 나은 선택이 될 것이다. 다만 기후모형 간에 존재하는 불확실성의 정보를 사용자에게 전달하고 보다 안정적이고 보수적인 결과를 도출해야 되는 경우 다중모형 앙상블 방법을 선택하는 것이 필요하다. 앞서 언급한 것처럼, 재현성 평가를 통해 일부 과도하게 성능이 떨어지는 기후모형을 제외하고 나머지 기후모형을 활용하여 2개 방법의 장점을 최대한 활용하는 방안 역시 생각해 볼만 하다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내 병해충 발생 위험도에 대한 기후변화 영향평가를 위해 사용자 중심의 기후변화 영향평가를 위해 개발된 AIMS 프로그램을 이용하였다. 이를 위해 AIMS의 SQM 상세화 기법을 통해 우리나라 58개 표준기상관측지점으로 공간적 상세화 및 편이보정이 이루어진 기후변화 시나리오 자료를 기반으로 각 농업기후시대에 적합한 최적기후모형을 선정하였다. 다음으로 다중모형 앙상블 기법과 최적기후모형 선정 기법을 비교하기 위해, 최적기후모형에서 생산된 시나리오와 11개 기후모형의 다중모형 시나리오를 입력값으로 EPIRICE-LB 모형을 구동하여 기후변화에 따른 미래 벼 도열병 발생 위험도를 각 농업기후시대 별로 나타내어 비교 평가하였다.

본 연구 결과를 바탕으로 기후변화 영향평가를 위해 기상청에서 배포하는 단일 기후모형의 기후변화 시나리오를 사용하는 경우 (Kim et al., 2015)와 가용한 다중 기후모형의 시나리오 자료를 모두 사용하여 기후모형에서 기인한 불확실성 정보를 제공하는 경우 (Kim and Cho, 2016), 그리고 대상지역과 사용하는 농업모형의 특색을 가장 잘 반영하는 최적기후모형의 기후변화 시나리오를 사용하는 경우에 대한 직접적인 비교가 가능하게 되었다. 또한 본 연구를 통해 각 농업기후시대 별로 과거부터 향후 약 50년 이후인 2070년까지 도열병의 발병 위험도의 시기 별 변화 패턴을 예측하였으며, 이를 바탕으로 경제적 방제수준에 기반한 종합적인 방제 계획 수립과 같은 정부 차원에서의 의사결정에 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 다만 향후 병해충에 대한 CO₂ 효과나 품종 및 이앙시기와 같은 경종적인 요인들이 정확하게 농업모형에 반영이 된다면 보다 현실적인 결과를 생산하는데 도움이 될 것이다.

사 사

본 연구는 APEC 기후센터 지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- APEC Climate Center. 2006. Assessment of the climate forecasts produced by individual models and MME methods, APCC Technical Report, 1(1).
- Cai X, Wang D, Laurent R. 2009. Impact of climate change on crop yield: a case study of rainfed corn in central Illinois, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(9), p1868-1881.
- Cho EY. 2009. The effects of climate change on agricultural production, MS dissertation, Sookmyung Women's University, Seoul, Korea, (in Korean with English abstract).
- Cho J, Cho W, Jung I. 2018. rSQM: Statistical Downscaling Toolkit for Climate Change Scenario using Non Parametric Quantile Mapping, Available from: <https://cran.r-project.org/web/packages/rSQM/index.html>.
- Choi DH, Yun SH. 1989. Agroclimatic zone and characters of the area subject to climatic disaster in Korea, *Korean Journal of Crop Science*, 34, p13-33.
- Kay AL, Davies HN, Bell VA, Jones RG. 2009. Comparison of uncertainty sources for climate change impacts: flood frequency in England, *Climatic Change*, 92, p41 - 63.
- Kim KH. 2014. Development of a seasonal rice disease and pest forecast and spray decision support model, APCC Research Report, 2014-11, (in Korean with English abstract).
- Kim KH, Cho J, Lee YH, Lee WS. 2015. Predicting potential epidemics of rice leaf blast and sheath blight in South Korea under the RCP 4.5 and RCP 8.5 climate change scenarios using a rice disease epidemiology model, EPIRICE, *Agricultural and forest meteorology*, 203, p191-207.
- Kim KH, Cho J. 2016. Predicting potential epidemics of rice diseases in Korea using multi-model ensembles for assessment of climate change impacts with uncertainty information, *Climatic change*, 134(1-2), p327-339.
- Kim KH, Jeong YM, Cho YS, Chung U. 2016. Preliminary

- Result of Uncertainty on Variation of Flowering Date of Kiwifruit: Case Study of Kiwifruit Growing Area of Jeonlanam-do, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 18(1), p42-54.
- Korea Meteorological Administration (KMA), (2012), *Climate Change Outlook Report for the Korean Peninsula*, 151p, (in Korean with English abstract).
- KMA. 2018. 2017 Extreme Climate Report, 218p, (in Korean with English abstract).
- Kobayashi T, Ishiguro K, Nakajima T, Kim HY, Okada M, Kobayashi K. 2006. Effects of elevated atmospheric CO₂ concentration on the infection of rice blast and sheath blight, *Phytopathology*, 96, p425 - 431.
- Lee CK, Kim J, Shon J, Yang WH, Yoon YH, Choi KJ, Kim KS. 2012. Impacts of Climate Change on Rice Production and Adaptation Method in Korea as Evaluated by Simulation Study, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 14(4), p207-221.
- Lee EJ. 2013. Future changes and the selection of best models for East Asian summer monsoon using CMIP5 models, *APCC Research Report*, 2013-06, (in Korean with English abstract).
- Lee JH. 2014. Evaluation of impact on the essential problem according to the new scenario of climate change, *RDA Research Report*, 2014.
- Lee JK. 2014. Scenario selection and uncertainty quantification for climate change impact assessments in water resource, Available from: <http://www.ndsl.kr/ndsl/search/detail/article/articleSearchResultDetail.do?cn=DIKO0013439455>.
- Lee YH. 2012. One-stop processes of monitoring, forecast and diagnosis of pests and diseases, *Agrochemical News Magazine*, May, p22-25.
- Murphy JM, Sexton DM, Barnett DN, Jones GS, Webb MJ, Collins M, Stainforth DA. 2004. Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations, *Nature* 430, p768 - 772.
- Pierce DW, Barnett TP, Santer BD, Gleckler PJ. 2009. Selecting global climate models for regional climate change studies, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(21), p8441-8446.
- Rossmann NR, Zlotnik VA, Rowe CM. 2017. Using cumulative potential recharge for selection of GCM projections to force regional groundwater models: A Nebraska Sand Hills example, *Journal of Hydrology*, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.019>.
- Samadi SZ, Sagareswar G, Tajiki M. 2010. Comparison of general circulation models: methodology for selecting the best GCM in Kermanshah Synoptic Station, Iran, *International Journal of Global Warming*, 2(4), p347-365.
- Savary S, Nelson A, Willocquet L, Pangga I, Aunario J. 2012. Modeling and mapping potential epidemics of rice diseases globally, *Crop Protection*, 34, p6 - 17.
- Semenov MA, Stratonovitch P. 2010. Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts, *Climate research*, 41, p1-12.
- Walsh JE, Chapman WL, Romanovsky V, Christensen JH, Stendel M. 2008. Global climate model performance over Alaska and Greenland, *Journal of Climate*, 21(23), p6156-6174.
- Wilby RL, Harris I. 2006. A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames, UK, *Water Resource Research*, 42(2).
- Yeh WH, Park HH, Nam YJ, Kim SA, Lee JH, Shim HS, Kim YK, Lee YH, Lee YH. 2008. Establishment of economic threshold by evaluation of yield component and yield damages caused by Rice Leaf Blast (*Magnaporthe grisea*), *Research in Plant Disease*, 14(1), p21-25.