

기후 원격상관 기반 통계모형을 활용한 국내 벼멸구 발생 예측

김광형* · 조재필 · 이용환¹

APEC 기후센터, ¹농촌진흥청

Forecasting Brown Planthopper Infestation in Korea using Statistical Models based on Climatic tele-connections

Kwang-Hyung Kim*, Jeapil Cho and Yong-Hwan Lee¹

Climate Research Department, APEC Climate Center, Busan 48058, Korea

¹Disaster Management Division, Rural Development Administration, Jeonju 54875, Korea

ABSTRACT: A seasonal outlook for crop insect pests is most valuable when it provides accurate information for timely management decisions. In this study, we investigated probable tele-connections between climatic phenomena and pest infestations in Korea using a statistical method. A rice insect pest, brown planthopper (BPH), was selected because of its migration characteristics, which fits well with the concept of our statistical modelling – utilizing a long-term, multi-regional influence of selected climatic phenomena to predict a dominant biological event at certain time and place. Variables of the seasonal climate forecast from 10 climate models were used as a predictor, and annual infestation area for BPH as a predictand in the statistical analyses. The Moving Window Regression model showed high correlation between the national infestation trends of BPH in South Korea and selected tempo-spatial climatic variables along with its sequential migration path. Overall, the statistical models developed in this study showed a promising predictability for BPH infestation in Korea, although the dynamical relationships between the infestation and selected climatic phenomena need to be further elucidated.

Key words: Seasonal outlook, Brown planthopper, Moving window regression, Statistical model

조 록: 작물 재배 시 주요 해충 발생에 대해 한두 달 이상 앞선 계절전망이 가능하다면 농가의 해충관리 의사결정이 보다 효율적으로 이루어질 수 있을 것이다. 본 연구에서는 국내 해충 발생과 통계적으로 유의미한 원격상관관계에 있는 기후현상을 찾기 위해 Moving Window Regression (MWR) 기법을 활용하였다. 벼멸구의 발생과 비래는 장기간에 걸쳐 여러 지역에서 연속적으로 일어나는 사건이기 때문에 비슷한 시공간적 규모를 갖는 기후현상과 통계적인 연관성을 가질 가능성이 높아 본 연구의 대상 해충으로 선택하였다. MWR 통계 분석의 반응변수로써 1983년부터 2014년까지 국내 벼멸구 발생면적 자료를 사용하였고, 10개의 기후모형에서 생산되는 10개의 기후변수를 예보 선행시간별로 추출하여 설명변수로 사용하였다. 최종적으로 선정된 각 MWR 모형의 특정 시기와 지역의 기후변수는 연간 벼멸구 발생면적 자료와 통계적으로 유의한 상관관계를 보였다. 결론적으로, 본 연구에서 개발한 MWR 통계 모형을 통해 국내 벼멸구 발생 위험도에 따른 선제적 대응을 위한 벼멸구 계절전망이 가능할 것으로 보인다.

검색어: 계절전망, 벼멸구, Moving window regression, 통계 모형

벼멸구는 우리나라를 비롯한 아시아의 주요 벼 재배국가에 광범위하게 분포하고 있는 벼의 주요 해충이다. 생육환경이 기온에 제한적이어서 적도 근처 열대지방에서는 연중 발생하지

만 중국 본토나 한국, 일본 등 온대지역에서는 월동하지 못하고 중국 남부, 동남아 등에서 저기압 기류를 타고 비래하여 피해를 일으킨다(Park et al., 1975; Song and Lee, 2007). 비래 시 저기압과 같은 대기현상이나 저층 제트기류 분석을 통해 벼멸구 비래의 근원을 추측하는 많은 연구들이 이루어졌다. 현재까지의 연구결과들은 베트남 남부지역이 벼멸구 비래의 근원지라고 지적하고 있는데, 중국의 남동부와 베트남의 Red River 이북

*Corresponding author: kh.kim@apcc21.org

Received April 4 2016; Revised May 3 2016

Accepted May 12 2016

일부지역에서 생성된 기류가 한국이나 일본 쪽으로 발전하는 형태일 때 이 기류를 타고 벼멸구가 비래한다고 추정하고 있다 (Choi, 1998; Kisimoto and Sogawa, 1995; Sogawa, 1997). 벼멸구가 우리나라로 비래하는 시기는 연도에 따라 다소 차이가 있으나 6월말부터 7월에 걸쳐 비래하기 시작하여 국내 논 포장에서 3-4세대를 거치면서 8월 전후로 심각한 피해를 일으킨다. 비래하는 시기와 양, 당시의 기상조건 등에 따라 그 해의 발생 정도가 결정되는데, 국내에서는 1975년, 1983년, 1985년에 전국적인 대발생 기록이 있다. 이후 1997년과 1998년, 그리고 2005년에 남부지방을 중심으로 대발생하였는데 같은 시기에 중국 남동부 지역에서도 벼멸구가 대발생하였으므로 중국으로부터의 비래가 주요 원인으로 지적되었다(Hu et al., 2014; RDA, 2010; Song and Lee, 2007).

벼멸구와 같은 장거리 비래해충의 발생과 이동은 비래경로 상에 있는 지역의 벼 재배관리, 특히 방제 방법 및 정도 등과 밀접한 관련이 있다. 실제로 벼멸구의 경우 살충제 사용여부에 따라 급격한 변화를 보였는데, 1990년대 초반 Imidacloprid와 Fipronil과 같은 새로운 살충제가 대량으로 적용되기 이전과 이후에 벼멸구 발생 정도에 확연한 차이가 있음을 알 수 있다(Hu et al., 2014; Matsumura et al., 2009). 또한 저항성 품종의 도입으로 인한 벼멸구 피해 감소가 또 다른 예이다. 1970년대 많은 종류의 벼멸구 저항성 품종이 국제미작연구소(International Rice Research Institute, IRRI)에 의해 아시아 여러 국가에 제공되어 이전에 방제가 어려웠던 벼멸구의 피해를 상당부분 줄일 수 있었다(Sidhu and Khush, 1978). 따라서 1970년대 중후반을 기점으로 벼멸구의 발생 정도는 저항성 품종의 도입여부에 따라 변화를 겪게 된다. 이 외에도 비료시비와 재식밀도, 이앙시기 등이 벼멸구의 발생에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Choi, 1998).

국내 벼멸구 발생은 비래 근원지로부터의 순차적 발생과 이동의 결과물로 볼 수 있다. 이와 같이 장기간의 선행시간을 가지고 광범위한 지역에 걸쳐 연속적으로 일어나는 사건은 남한 지역 내 기상·기후현상 뿐만 아니라 이동경로 상에 있는 지역의 선행기간 동안의 기후현상, 그리고 이동에 관여하는 대기의 흐름 등을 모두 고려해야 한다(Xiaoqing et al., 2007). 이동경로 상에 있는 지역의 기후조건은 해당 지역에서의 벼멸구 증식 정도에 영향을 미치기 때문이고, 이전 지역에서 대량 발생에 성공했을 때 다음 비래지역에 도달하는 초기 농도가 높아 대발생의 가능성이 높아지기 때문이다. 이러한 일련의 사실들을 바탕으로 장기간 동안 여러 지역에서 연속적으로 일어나는 벼멸구의 발생과 비래 같은 생물학적 현상은 장기간 동안 여러 지역에 영향을 주는 기후현상의 조합으로 설명이 가능하다는 가설을 세

울 수 있다. 또한 특정 시기, 특정 지역의 기후조건은 일정 시간의 지체시간(lag-time)을 가지는, 지리적으로 떨어진 지역에서 일어나는 기후현상과 연관이 있을 수 있다. 그간 여러 연구자들에 의해 한반도를 포함한 다양한 동아시아 지역의 기상, 기후가 지구상의 어떤 지역에서 일어나는 대규모의 기후현상과 원격상관관계(tele-connection)에 있을 가능성에 대해 많은 통계적 연구들이 수행되었다(Choi and Moon, 2013; Kim et al., 2007; Kim et al., 2008; Kim and Kim, 2010; Peng et al., 2014; Schepen et al., 2012). 이러한 선행연구들을 바탕으로, 벼멸구의 이동경로 상에 있는 인도차이나 반도나 동아시아 지역들의 기후조건, 더 나아가 해당 지역의 벼멸구 발생과 비래도 El Niño/Southern Oscillation (ENSO)과 같은 다른 지역의 어떤 대규모 기후현상과 연결되어 있을 가능성이 있다. 실제로 인도네시아의 벼멸구 대발생과 라니냐 현상과의 연관성이나 ENSO 지수와 같은 기후인자와 벼멸구의 초기 이동 간에 원격상관관계를 활용해 중장기 예보가 가능함을 제시하기도 하였다(Stigter, 2012; Xiaoqing et al., 2007). 하지만 여전히 벼멸구의 비래현상이 지리학적, 시계적으로 정확히 밝혀지지 않았기 때문에 원인지역과 결과지역이 명확해야 하는 기후학적인 원격상관에 관한 연구를 수행하기는 어려운 상황이다. 따라서 본 연구에서는 통계적 기법을 활용하여 국내 벼멸구의 발생과 연관성이 높은 특정 시기, 특정 지역의 기후현상을 우선 선정하고 해당 정보를 바탕으로 벼멸구의 발생과 이동을 설명하는 후향적(retrospective) 연구를 시도하였다.

Moving Window Regression (MWR) 기법은 Kang et al. (2009)에 의해 APEC Climate Center (APCC)의 다중모형앙상블(multi-model ensemble, MME) 자료를 이용한 한반도 강수 및 온도의 예측성 향상을 위한 방법으로 제시된 이후 여러 관련 연구에서 활용되고 개선된 통계적 예측방법이다(Cho, 2014; Kang et al., 2014). MWR 기법은 기후모형의 전 지구 격자 내 예측정보 변수들을 회귀분석의 설명변수로 이용하여 마치 일정 크기의 창(window)이 전 지구를 훑어 지나가면서(moving) 가장 연관성이 높은 변수를 찾아내게 된다. 비록 계산시간과 컴퓨터 리소스를 많이 필요로 하지만 전 격자를 지나면서 얻는 수많은 변수들로부터 특정 반응변수와의 가장 강력한 연관성을 가진 설명변수를 찾아내는데 효과적인 방법이다.

본 연구에서는 장기간의 선행시간을 가지고 인도차이나, 동아시아 지역 등 광범위한 지역에 걸쳐 연속적으로 일어나는 벼멸구의 발생과 비래 사건을 예측하기 위해 MWR 기법을 이용한 통계적 원격상관 분석을 수행하였다. 벼멸구의 국내 발생 패턴을 설명하기 위해서는 남한지역의 기상기후현상 뿐만 아니라 이동경로 상에 있는 지역의 선행기간 동안의 기후현상, 그리

고 이동에 관여하는 대기의 흐름 등을 모두 고려해야 한다. MWR은 계절기후예측정보의 제공시점과 선행시간, 그리고 기후인자의 지체시간 등을 고려하기 때문에 이러한 벼멸구의 비례현상을 설명하는데 적합하다고 판단하였다. 본 연구는 기후모형이 모의하는 기후변수들을 예측인자로 벼멸구의 초기발생부터 타 지역으로의 이동, 최종적으로 남한지역으로 비례하는 일련의 사건들을 설명하려는 최초의 시도이다. 이를 위해 MWR 통계기법을 활용한 벼멸구의 통계적 예측모형 개발과 관련된 연구결과를 제시하였다.

재료 및 방법

남한지역 벼멸구 조사자료 선정 및 가공

농촌진흥청에서는 국가농작물병해충관리시스템(National Crop Pest Management System, NCPMS)을 통해 국내 주요 농작물의 병해충 발생정보를 수집·관리하고 있다(<http://ncpms.rda.go.kr/ncpms/>). 본 연구에서는 남한지역 전체 병해충 발생정도에 직간접적으로 영향을 미치는 지역규모의 기후현상을 활용하는 것이 목표였기 때문에 시도별 병해충 발생면적 자료를 추출하여 통계모형 개발에 사용하였다. NCPMS의 병해충 발생면적 자료는 해당 병해충이 최대 발생한 시기의 자료를 토대로 작성되었으므로 그 해의 최대 발생면적으로 볼 수 있다. 벼멸구의 발생과 비례는 장기간에 걸쳐 여러 지역에서 연속적으로 일어나는 사건이기 때문에 비슷한 시공간적 규모를 갖는 기후현상과 통계적인 연관성을 가질 가능성이 높아 본 연구의 대상 해충으로 선택하였다. 따라서 시도 단위로 정리된 벼멸구 발생면적 자료를 연도별로 합하여 1983년부터 2014년까지 남한지역 전체 발생면적 자료를 준비하였다. 하지만 벼멸구 발생면

적은 기후 뿐 아니라 다른 재배·기술·사회적 요인에 의해서도 영향을 받기 때문에, 국내 문헌조사를 통해 1983년 이후로 벼멸구 방제나 약제 저항성, 저항성 품종의 도입 등 특이적인 변화가 있었는지를 확인하였다(Choi, 1998; Matsumura et al., 2009; Song and Lee, 2007). 1992년을 전후로 국내 벼멸구 발생면적의 양상이 크게 바뀌었는데, 이는 1990년대 초부터 인도 차이나 반도와 중국, 한국, 일본을 포함하는 동아시아 지역에 대대적으로 도입되어 사용된 Imidacloprid라는 살충제로 인한 영향임을 확인하였다(Hu et al., 2014; Matsumura et al., 2009). 따라서 본 연구에서는 Imidacloprid를 본격적으로 사용하기 시작한 1992년을 기준으로 이전 데이터에 대한 일종의 표준화(normalization)를 수행하였다(Selvin, 2004). 1992년 이전, 즉 1983년부터 1991년까지의 평균 발생면적과 1992년부터 2014년까지의 평균 발생면적의 차이를 새로운 살충제의 도입으로 인한 기술적인 요인으로 인해 발생면적에 인위적인 조정이 생긴 결과로 간주하고 두 평균 발생면적의 차이만큼을 1983년부터 1992년까지의 연도별 발생면적에서 나누어 발생면적 자료를 표준화 하였다. Fig. 1은 조정 전과 후의 연도별 벼멸구 발생면적에 대한 그래프를 나타낸다.

MWR 통계기법 활용 벼멸구 예측모형 개발 및 검증

Moving Window Regression (MWR) 기법은 전 지구 격자로 이루어진 계절기후예측정보를 활용해 기후학적 원격상관관계를 찾아내는 통계적 기법이다. 본 연구에서는 해당 기법을 적용해 남한지역 벼멸구 발생면적을 예측하기 위한 통계 모형으로 활용하였다. MWR 기법은 Table 1에 제시된 APEC Climate Center (APCC) 계절기후예측자료의 10개 변수를 회귀분석의 설명변수(predictor)로 이용한다. APCC 계절기후예측자료는

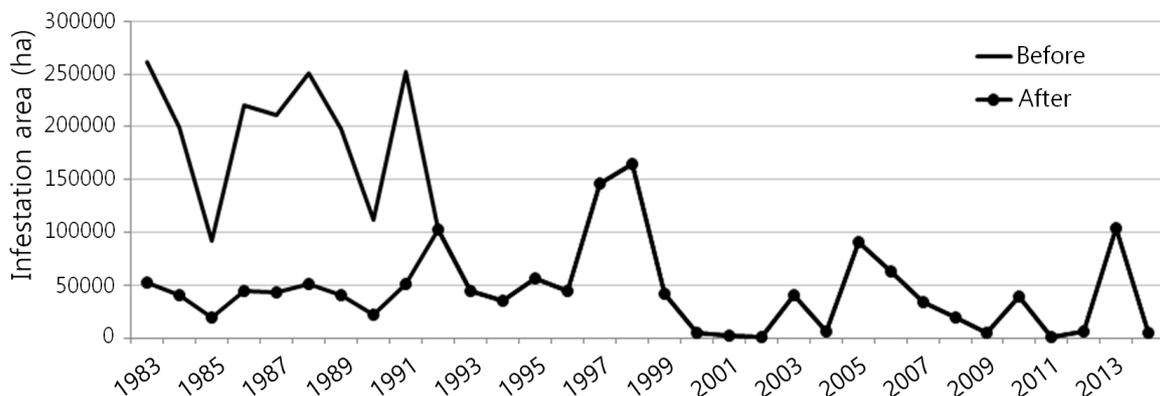


Fig. 1. Annual infestation area of brown planthopper in South Korea before adjustment (Before) and after adjustment (After). Data adjustment was made for the period of 1983-1991 based on the critical impact of a new pesticide introduction around 1992.

Table 1. 10 climate variables of the APCC seasonal climate forecast used in the study

Variable	Description
PREC	Precipitation
T2M	Temperature at 2 m
T850	Temperature at 850 hPa
U200	Zonal wind at 200 hPa
V200	Meridional wind at 200 hPa
U850	Zonal wind at 850 hPa
V850	Meridional wind at 850 hPa
Z500	Geopotential height at 500 hPa
SLP	Sea level pressure
SST	Sea surface temperature

10개의 전 지구 기후모형에서 생산되는데 기후모형들에 대한 대략적인 정보는 Table 2에 나타내었다.

MWR 통계모형 개발의 대략적인 절차는 다음과 같다. 좀 더 자세한 내용은 Cho (2014)의 보고서를 참고할 것을 권한다. 먼저 비열구의 남한지역 발생면적 자료를 1983년부터 2014년까지 연도별로 정리하여 반응변수(predictand)로 사용하였다. 다음으로 1983년부터 2014년의 APCC 계절기후예측정보의 hindcast 자료로 부터 Table 1에 제시된 2.5°격자의 개별 기후변수(예측인자)들을 추출하여 각각을 설명변수(predictor)로 사용하였다. 계절기후예측정보는 현재부터 3개월 이후의 기후변수를 월 단위로 매달 예측한 값이기 때문에 선행시간의 개념이 적용된다. 즉, 이번 달에 생산되는 3개월 계절기후예측정보는 1달부터 3달까지의 선행시간을 갖는 3개의 월별 기후예측정보로 구성이

된다. 설명변수로 사용되는 기후변수 역시 3개 선행시간별로 모두 다르기 때문에 모든 선행시간별 자료를 이용해 분석을 수행하였다.

MWR은 전 지구 면적을 대상으로, 즉 25°×20°(대략 2,500 km × 2,000 km)의 사용자 정의 창을 일정크기의 표준화된 격자로 이동하면서 모든 설명변수들에 대하여 반응변수와의 상관관계를 계산하는 기법이다. 하지만 극지로 갈수록 기후현상의 원격 상관성이 거의 존재하지 않기 때문에, 본 연구에서는 적도를 중심으로 위도 ±40° 높이의 사용자 정의 창을 지정하여 2.5°크기로 표준화된 이동 격자를 이동하면서 해당 격자점의 기후변수를 설명변수로 하여 반응변수인 남한지역 비열구 발생면적과의 상관계수를 구하였다. 가장 높은 상관계수를 보인 설명변수와 표준격자점의 위치를 best predictor로 선정하여 회귀모형을 구성하였다.

통계모형 구축 시 고질적 문제인 과대적합(overfitting)을 방지하기 위해 교차검정(cross validation) 및 분할검정(split validation) 방법을 적용하였다. 교차검정은 비열구 조사자료의 기간(1983-2014)에 대하여 실제 예측과 동일한 조건을 재현하기 위해서 예측하고자 하는 연도와 동일시점의 예측인자를 모두 제거한 후 통계모형을 구축하는 leave-one-out-cross-validation 방법을 사용하였다. 즉 1983년 비열구 발생면적을 예측하기 위한 회귀모형을 구성하는데 있어서 1983년을 제외한 1984-2014년 기간의 예측인자를 이용하여 회귀모형을 구성하여 1983년 비열구 발생면적을 예측한다. 나머지 기간에 대해서도 동일한 방법으로 예측을 수행한다. 이 경우 실시간 예측에서 예측성이 확보되기 위해서는 매년 독립적으로 선정된 예측인자가 동일한 변수이어야 하며 동일한 지역에 반복적으로 위

Table 2. List of global climate models comprising the APCC seasonal climate forecast

Global climate model	Institution (country)	Model resolution	Ensemble size ¹
CWB	Central Weather Bureau (Taipei)	T42L18 ²	10
GDAPS_F	Korea Meteorological Administration (Korea)	T106L21	20
HMC	Hydrometeorological Centre of Russia (Russia)	1.125° × 1.40625°	20
JMA	Japan Meteorological Agency (Japan)	T95L40	31
CANCM3	Meteorological Service of Canada (Canada)	1.41° × 0.94°	10
CANCM4	Meteorological Service of Canada (Canada)	1.41° × 0.94°	10
NASA	National Aeronautics and Space Administration (USA)	288 × 181	9
NCEP	NCEP Climate Prediction Center (USA)	T62L64	15
PNU	Pusan National University (Korea)	T42L18	5
POAMA	Centre for Australian Weather and Climate Research /Bureau of Meteorology (Australia)	T47L17	10

¹Ensemble size: Repeated simulations with nearly identical initial and boundary conditions from each global climate model

²T: Horizontal resolution, L: Vertical resolution

치해야 한다. 만약 매년 선정된 예측인자로 기후변수의 종류가 바뀌거나 동일한 변수가 선정되더라도 위치가 바뀐다면 예측성을 담보하기가 어렵다.

또 다른 과대적합 방지 장치로 매년 교차검정을 수행하는 과정에서 분할검정을 동시에 적용하였다. 예를 들어 1983년 1월 시점을 예측하는 경우 전체 관측기간(1983-2014)을 훈련기간(1983-2007)과 검정기간(2008-2014)으로 구분하였다. 먼저, 훈련기간 동안에는 훈련기간의 3분의 2에 해당되는 샘플을 훈련기간의 자료 수(25번)만큼 무작위로 선정한다. 무작위로 선정된 각각의 샘플 기간에 대하여 설명변수(기후변수)와 반응변수(남한지역 벼멸구 발생면적)와의 상관계수를 계절기후예측자료의 격자별로 구한다. 상관계수는 음의 상관관계를 갖는 지역과 양의 상관관계를 갖는 지역으로 구분하여 두 가지의 경우를 모두 고려하였다. 각각의 부호에 대하여 샘플 수에 따른 통계적으로 유의한(5% 신뢰수준) 상관계수 최저값보다 큰 값이 반복적으로 나타나는 지역을 선정한다. 일반적으로 통계적으로 유의미한 상관관계를 갖는 지역은 여러 지역에 분산되어 위치할 수 있다. 이중 공간적으로 가장 넓게 분포하는 지역을 공간군집 분석을 통해 추출하였는데, 이때 사용자에게 의해서 주어진 최대 임계값(80개 격자)을 넘지 않도록 선정하였다. 검정 과정에서 동일한 격자에 동일한 기후변수가 몇 번 예측인자로 선정되었는지를 선택된 지역과 함께 지도상에 표시하였다. 두 번째 과정으로 훈련기간 동안에 선정된 잠재 예측인자들을 이용하여 나머지 검정기간에 대하여도 반응변수와의 상관계수를 구한다. 이 결과 훈련기간 및 검정기간의 상관계수들의 부호가 동일한

경우(양의 상관계수)로 예측인자의 범위를 좁힌다. 만약 여러 변수들이 선정된 경우에는 선정된 예측인자들 중에서 훈련기간 동안의 샘플들에 대한 상관계수의 평균값이 가장 높은 변수를 최종적인 예측인자로 선정하였다. 위 교차검정 및 분할검정 방법을 통해 가장 예측성이 높은 변수 및 지역을 선정하는 경우, 특정 연도에는 선정된 예측인자가 없을 수도 있다.

최종적으로 선정된 통계모형의 예측성을 평가하기 위해 전체 기간(1983-2014) 동안의 관측된 남한지역 벼멸구 발생면적과 해당 통계모형을 통해 예측된 예측값과 비교하였다. 예측성 평가를 위해서는 TCC (Temporal Correlation Coefficient)를 사용하였다. 아래 식에서 O 는 관측치, P 는 모의치, \bar{O} 는 관측 평균, \bar{P} 는 모의평균, n 은 자료의 개수를 나타낸다.

$$TCC = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \quad (1)$$

결과 및 고찰

국내 벼멸구 발생면적 예측을 위한 MWR 통계모형 개발

APCC 계절기후예측정보를 활용하여 남한지역 전체 벼멸구 발생면적을 예측하기 위해 MWR 통계모형을 개발하였다. Table 3는 MWR 기법을 사용하여 개발된 통계모형에서 월

Table 3. Selected MWR models (climate model - climate variable) with the model equations for each month and lead-time

Month	1 month lead	2 month lead	3 month lead
JAN	PNU - PREC ($y = -35263 \times \text{PREC} + 153564.4$)		
FEB	PNU - U200 ($y = 55746.1 \times \text{U200} - 102707$)	CWB - SLP ($y = 49052.3 \times \text{SLP} - 46406178.6$)	NASA - PREC ($y = 32050 \times \text{PREC} - 43944.3$)
MAR		CWB - Z500 ($y = -200896 \times \text{Z500} + 58569143.6$) MSC_CANCM4 - V200 ($y = -20263.8 \times \text{V200} + 17750.5$)	
APR			NASA - PREC ($y = 17640.7 \times \text{PREC} + 164774.3$)
MAY	JMA - SST ($y = -158758 \times \text{SST} + 48107353.6$)		
JUN	NCEP - V200 ($y = 27259 \times \text{V200} + 97504.6$)		
JUL	POAMA - T2M ($y = -48849.6 \times \text{T2M} + 13957746$)		

(month)별, 선행시간(lead-time)별로 선택된 기후모형과 기후변수를 나타낸다(기후모형-기후변수). 1월(JAN)에 선정된 PNU 기후모형의 PREC 기후변수의 선행시간은 1달이다. 다시 말해서, 여기서 선택된 통계모형(PNU-PREC)은 당해 1월에 PNU 기후모형에서 생산되는 계절기후예측정보 중 1달 앞선 2월의 PREC 기후변수 정보를 바탕으로 그 해 8-9월쯤의 국내 벼멸구 발생면적을 예측하는 모형을 이른다. 같은 방식으로, 2월에 PNU 모형에서 생산되는 3월 U200 예측정보를 바탕으로 그 해의 벼멸구 발생면적을 예측하는 모형이 바로 2월(FEB), 1달 선행시간(1 month lead)의 PNU-U200 모형이다. 2월(FEB), 2달 선행시간(2 month lead)의 CWB-SLP 모형은 2월에 CWB 모형에서 생산되는 4월 SLP 기후변수를 바탕으로 그 해의 벼멸구 발생면적을 예측할 수 있음을 나타낸다. 즉, moving window를 통해 선택된 지역의 4월 SLP 기후변수와 국내 7-8월 벼멸구 발생면적과의 상관성을 바탕으로 선택된 모형인 것이다. 4월에 발생하는 기후현상을 설명변수로 이용하지만, 2개월의 선행시간을 가진 계절기후예측정보를 활용하기 때문에 2월에 예측이 가능하다.

MWR 통계모형은 전 지구 사용자 정의 창의 4,608개(경도 144개 × 위도 32개) 격자에 해당하는 10개 기후모형의 3개 선행시간을 가지는 10개 기후변수를 바탕으로 개발되었기 때문에, 상당히 많은 수의 통계분석을 바탕으로 개발이 되었다. 그만큼 과대적합의 가능성이 높았기 때문에 여러 가지 검정 장치를 이용해서 과대적합을 최대한 줄이기 위해 노력한 결과, Table 3의 결과와 같이 상당히 제한된 수의 통계모형이 선정되었다. 그 중 3월(MAR), 2달 선행시간(2 month lead)의 경우와 같이, 특정 월의 특정 선행시간에 2개 이상의 모형이 선택된 경우도 있었다. 이와 반대로 1월(JAN), 2달 선행시간(2 month lead)의 경우와 같이 통계모형 선정과정에서 교차검정과 분할검정을 통해 예측성이 낮게 나타난 경우 특정 월, 특정 선행시간에서 회귀모형이 선택이 안 될 수 있는데 그런 경우에는 공란으로 남겨두었다. 벼멸구의 발생이 매년 초부터 따뜻한 동남아시아 지역에서부터 시작되는 것으로 가정하여, 1월부터 우리나라에 영향을 미치는 7월까지의 모든 MWR 통계모형을 뽑았다.

본 연구를 통해 통계적으로 선택된 특정 시공간의 기후변수를 설명변수로 하여 반응변수인 남한지역 벼멸구 발생면적을 추정할 수 있는 MWR 통계모형의 회귀식을 각각의 모형과 함께 Table 3에 나타내었다.

MWR 통계모형의 예측성 검증

Fig. 2는 각 MWR 모형의 월별, 선행시간별 평균 예측성을

나타낸다. 예측성은 1983년부터 2014년까지의 관측값(남한지역 벼멸구 발생면적)과 해당 통계모형이 예측한 예측값과의 Temporal Correlation Coefficient (TCC)를 바탕으로 평가하였다. 모든 모형에서 0.4-0.6 TCC 정도를 보이고 있으며, 각 월별 모형에서 다양한 선행시간을 가지는 통계모형이 선택되었다. 특히 2월은 1개월에서 3개월까지의 선행시간을 가진 모형이 모두 선택되었고 그 중 3개월 선행시간을 가진 모형이 가장 높은 예측성을 보여주었다. 벼멸구의 대규모 방제가 대부분 7월 이후에 이루어지는 것을 감안하면 5월과 6월의 1개월 선행시간을 가지는 모형, 즉 JMA-SST와 NCEP-V200의 잠재적 효용성이 클 것으로 판단하였다. 특히 2개 모형 모두 0.55 이상의 상대적으로 높은 예측성을 보이고 있어 실제 현장에서의 활용 가능성 또한 높을 것으로 예상하였다.

Fig. 3은 가장 높은 예측성을 보였던 1개월 선행시간을 가지는 6월 모형인 NCEP의 V200 변수에 의해 예측된 벼멸구 발생면적 예측값과 관측자료를 1983년부터 2014년까지 연도별로 비교한 결과를 나타낸다. 그래프를 보면 대부분의 대발생 연도 패턴을 통계모형이 비슷하게 따라가고 있는 반면, 일부 연도에서는 과소모의하거나 과대모의하는 결과를 보여준다. 특히 최근에 과대 혹은 과소 모의의 경향성이 강해지는데, 2010년에는 예측값이 실제 관측된 발생면적을 2배 이상 과대모의하였고, 2013년의 경우 모형의 예측값이 실제 발생면적의 1/2 이하로 과소모의하였다. 이러한 통계모형이 가지는 한계는 한 가지 설명변수가 아닌 2개 이상의 설명변수를 사용해 다중회귀모형을 이용하여 극복할 수도 있고, 통계모형 결과에 더해 과정기반 해충모형의 결과를 통합적으로 분석하여 해결할 수도 있을 것이다.

마지막으로, 통계모형에 적용된 알고리즘이 예측성을 실제

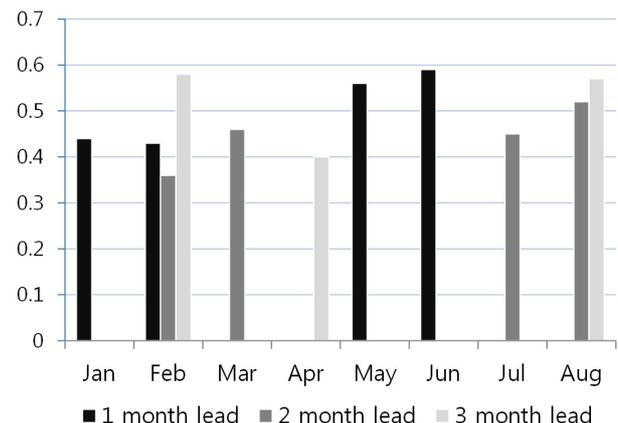


Fig. 2. Temporal correlation coefficients of MWR models selected for each month and lead-time. Temporal correlation of the predicted infestation area of brown planthopper by each MWR model was examined by comparing with the observed infestation area for the period of 1983-2014.

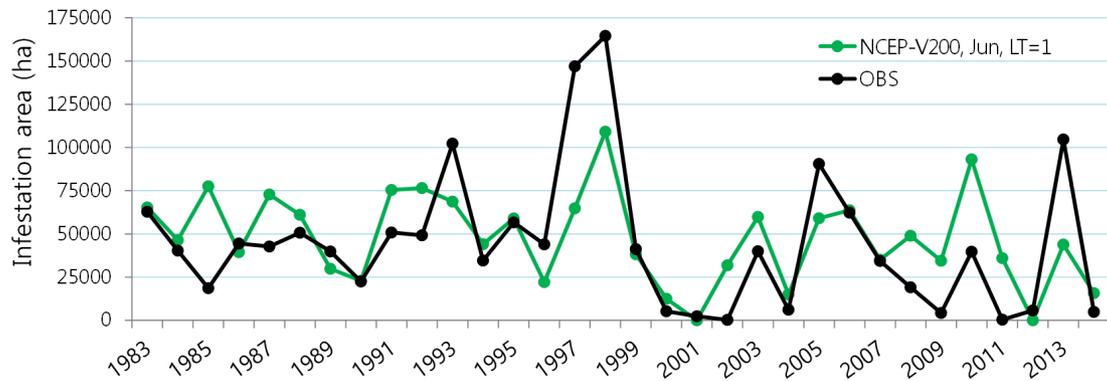


Fig. 3. Comparison between predicted infestation area of brown planthopper by a MWR model (NCEP-V200, Jun, LT=1) and observed infestation area (OBS) for the period of 1983-2014.

보다 과대모의하는지를 검증하기 위해 무작위 예측인자(random predictor) 테스트를 실시하였다. 본 연구에서 사용된 교차검증 알고리즘 자체에서 과대적합이 발생하는지를 확인하기 위해 통계적 기법인 MWR에 대해 3000번 무작위로 생성된 예측인자와 반응변수들을 이용하여 계산된 TCC값들의 분포를 확인하였다. 결과적으로 총 100회 모의로 부터 얻은 3000개 개별 결과(100회 × 10개 개별모형의 예측인자 × 3개 선행시간)를 바탕으로 TCC가 0값을 중심으로 정규분포하는 결과를 보여 교차검정 알고리즘에서 과대적합이 발생하지 않는 것으로 판단하였다(관련 결과 생략함).

MWR 통계모형 결과의 해석

Otuka (2013)에 의해 추정된 벼멸구의 비래 경로와 시기에 대한 정보와 MWR 통계모형의 월별 지점과 선택된 기후변수 정보를 비교하여 각 시기별 선택된 모형의 의미를 추론하였다(Fig. 4). 일정 수준 이상의 예측성이 확보된 MWR 통계모형을 대상으로, 즉 0.5 이상의 상관계수를 보이는 NASA - PREC (FEB, LT=3), JMA - SST (MAY, LT=1), NCEP - V200 (JUN, LT=1) 모형의 결과만을 활용하였다. 이 외에 예측성이 낮았던 나머지 MWR 통계모형의 예측인자 및 공간분포 결과는 그림으로 따로 제시하지 않았다.

Otuka (2013)에 따르면 벼멸구는 대략 2-3월쯤에 인도차이나 반도에서 발생하기 시작해 3월이 되면 북동쪽으로 이동을 시작하게 된다(Fig. 4A). 특히 벼멸구는 4월부터 5월초 베트남 중부와 중국 하이난성에서 대발생하고 이중 일부가 중국 남부 지방으로 비래하게 된다. 실제로 중국남부의 2기작 지대에서는 4-5월 중 첫 번째 벼 재배시기에 베트남에서 날아온 벼멸구가 발생원이 되어 벼멸구가 증식하는 것으로 알려져 있다.

MWR 통계모형에서 이 시점에 선택된 모형은 NASA - PREC (FEB, LT=3) 모형이다(Fig. 4B-May). 2월 모형이지만 선행시간이 3개월이기 때문에, 5월의 적도 동태평양 한류 해역의 강수량에서 상관계수 0.58 정도의 예측성을 가지고 남한지역의 벼멸구 발생면적과 연관성을 보임을 알 수 있다. 같은 지역의 해수면 온도가 엘니뇨 현상을 나타내는 지표로 사용되고 해수면 온도에 따라 해당 지역의 강수량에 변화가 생긴다는 사실을 고려하면(Trenberth, 1997), 전 지구적인 엘니뇨 현상과의 연관 가능성을 생각해 볼 수 있다. 실제로 벼멸구 발생과 엘니뇨 현상과의 과학적 연관성은 기존의 연구들을 통해서 꾸준히 제기되어 왔다(Stigter, 2012; Xiaoqing et al., 2007). 하지만 NASA - PREC (FEB, LT=3) 모형이 가리키는 지역의 기후변수가 벼멸구의 비래과정에서 어떤 시기와 방식으로 영향을 미치는지는 추정할 수 있는 길은 없다. 이러한 연관성을 명확하게 제시하기 위해서는 여러 가능성에 대해 기후 역학적으로 접근하여 분석해야 할 필요가 있다.

초기 벼멸구의 비래 시점과 지역에 가장 근접하게 일치하는 MWR 모형은 오히려 4월에 인도양과 인도차이나 반도에 걸쳐 나타나는 해면기압(sea level pressure, SLP)을 이용한 CWB-SLP (FEB, LT=2) 모형이었다(관련 그림 생략함). 비록 0.4 정도의 낮은 예측성을 나타내지만, 해당 시기의 벼멸구 이동경로 상에 있는 지역의 기후조건과 직접적인 연관이 있어 해당 지역의 벼멸구 이동이나 증식에 영향을 미쳤을 가능성도 생각해 볼 수 있다.

이후 5월 중순부터 6월 초순까지 베트남 북부와 남중국, 미얀마에서 발생한 벼멸구는 북쪽으로 몬순을 따라 이동하게 되는데, 이 때 선택된 MWR 통계모형은 필리핀과 인도네시아를 경계로 하는 남서태평양 지역의 해수면 온도(sea surface temperature, SST) 변수를 통해 상관계수 0.56의 예측성을 보이는 것으로 나타났다(Fig. 4B-June). 동아시아 몬순의 북진과 이 지역의 SST

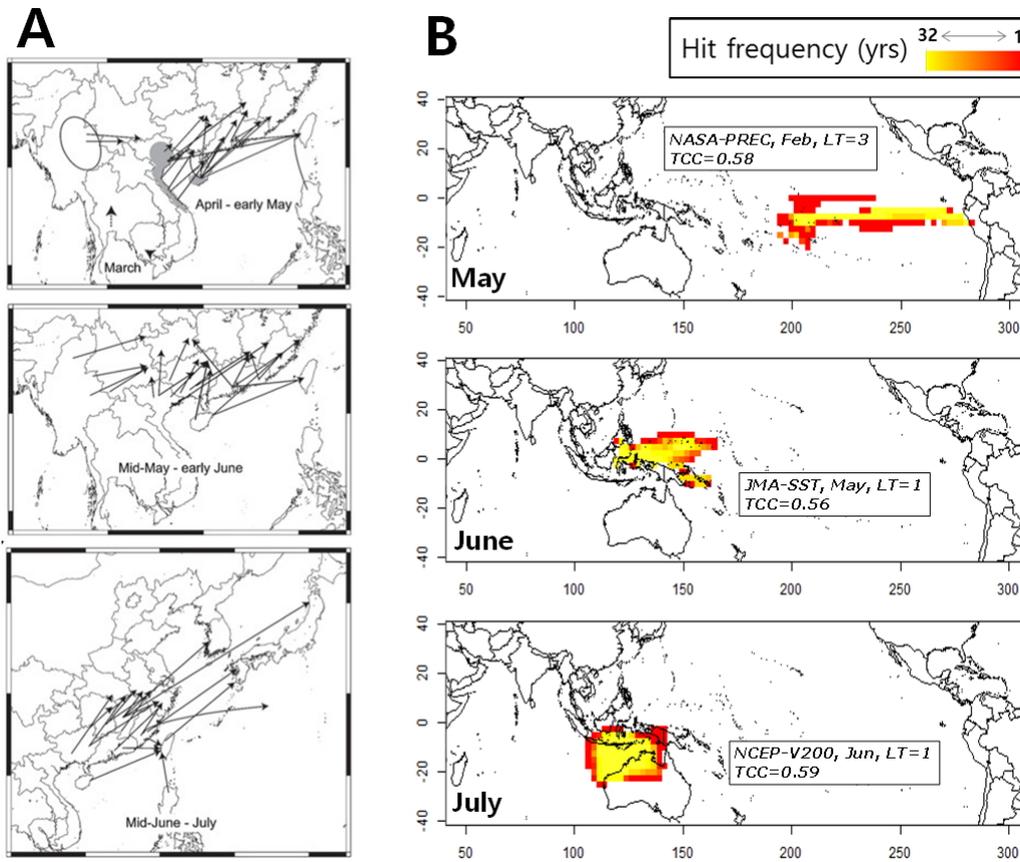


Fig. 4. (A) Migration routes obtained by trajectory analyses by Otuka(2013) and (B) selected climate variables and locations of the MWR models that are temporally coinciding with the estimated migration routes of brown planthopper. Hit frequency on the map indicates the number of years hit the specific location with the selected MWR models during each cross-validation.

와 연관성이 있어 벼멸구의 비래에까지 영향을 미칠 가능성이 있음을 추정할 수 있다. 실제로 동아시아 몬순과 적도부근 태평양의 SST와의 연관성은 기존에 많은 기후학 연구에서 다루어져 왔다(Chang et al., 1999; Wu et al., 2009). 또는 남서태평양 적도부근 해양의 SST가 벼멸구의 북동 방향 비래에 직접적인 영향을 미치는 것이 아니라 비래지역의 기후조건과 어느 정도의 지체시간을 가진 원격상관관계를 가지고 있을 가능성도 배제할 수 없다.

인도차이나 반도에서 중국 남서부까지 비래한 벼멸구는 6월 중순부터 7월에 이르면 중국 남서부에서 발생을 하게 된다. 이때 대량 증식에 성공한 벼멸구가 하층부 제트기류를 타고 한국이나 일본으로 비래하게 되는데, 이 시기에 선택된 MWR 통계 모형은 인도네시아와 호주에 걸친 대양지역의 200 hPa 높이의 자오선 바람(meridional wind at 200 hPa, V200) 변수로써 0.59의 예측성을 보인다(Fig. 4B-July). 모형에서 선택된 지역은 중국이나 한반도와 상당히 거리가 떨어진 지역으로 남한지역으로의 벼멸구 비래와 크게 연관이 없어 보이지만 어느 한 지역의

기후 변동이 한참 동떨어진 다른 지역의 기후에 영향을 미치는 기후의 원격상관 현상이 존재하고 있음을 고려하면 충분히 설명이 가능한 결과이다.

이렇게 타 지역 기후현상과의 원격상관관계가 성립하기 위해서는 몇 가지 중요한 가정이 필요하다. 먼저 각 통계모형에서 선택된 기후현상은 우리나라의 병해충 발생과는 직접적인 연관이 없을 수 있다. 다만 통계모형의 기후현상은 일정 지체시간을 가지면서 대상 해충인 벼멸구의 비래경로 상에 있는 어떤 지역의 기후나 다른 지역으로의 비래 정도에 영향을 끼칠 수 있다. 또한 어떤 지역의 기후는 벼멸구의 증식에 직접적인 영향을 주기 때문에 기후조건이 우호적이지 않을 경우 벼멸구가 적게 발생하여 다음 지역으로의 비래 정도, 즉 비래에 성공하는 개체 수에도 영향을 주게 된다. 따라서 선 지역의 기후조건과 상관성을 가지고 있는 원격 기후현상이 결과적으로 최종 지역인 남한의 벼멸구 발생면적과도 상관성을 가질 수 있는 것이다. 이러한 가정들을 바탕으로 특정 시공간의 벼멸구 발생 또는 비래와 직접적인 연관성이 있는 지역 기후조건과 높은 원격상관관계를

가지고 있는 대규모 기후현상을 통계적인 방법을 활용해 무작위로 찾아내어 그 중에서 유의미한 통계모형을 찾을 수 있다.

국내 벼멸구의 발생 정도는 비래 후 우리나라의 지역적인 기후조건에 영향을 받는데, 평년에 비해 따뜻하고 습하면 대발생한다고 알려져 있다(Park et al., 1975). 따라서 벼멸구가 주로 증식하는 7-9월 사이의 기후조건을 바탕으로 국내 벼멸구의 발생을 설명하려는 지속적인 노력이 있었으나 대부분 통계적인 유의성을 얻지 못한 채 일반적인 경향성만을 제시하였다(Choi, 1998; Lee, 2012). 본 연구에서도 남한지역 전체의 7-9월 평균 기온과 강수량 또는 강수빈도를 이용해 남한지역 벼멸구 발생면적과의 통계적 상관성을 분석하였으나 통계적으로 유의미한 ($p \leq 0.05$) 결과를 얻을 수 없었다(관련 결과 생략함). 이 때문에 오히려 개체군동태 모형과 같은 과정기반 모형을 이용한 벼멸구의 발생 동태 분석에 대한 연구가 그 대안으로 제시되었으나 이 또한 지속적인 연구가 되고 있지 못한 실정이다(Song and Lee, 2007).

비래해충인 벼멸구는 비래한 이후의 국내 기후조건에도 영향을 받지만, 얼마나 빨리 중국으로부터 비래를 하는지, 얼마나 많은 양의 벼멸구가 비래 하는지를 바탕으로 그 해의 발생 정도를 예측할 수 있다. 벼멸구의 비래경로를 따라 다시 되짚어 가게 되면, 국내로 비래하기에 앞서 얼마나 많은 양의 벼멸구가 중국의 벼 재배지에서 발생했었는지 그리고 비래에 관여하는 하층 제트기류의 발달시기와 정도에 따라 국내 발생면적이 좌우된다고도 할 수 있다(Hyun, 1982; Park and Hyun, 1983). 중국 남서부에 대발생한 벼멸구는 거꾸로 남중국이나 베트남 지역에서 바로 이전에 발생했던 벼멸구가 비래해서 생겨난 결과일 수 있다. 그 이전에는 인도차이나 반도의 특정 지역으로부터 베트남 북부나 남중국으로 벼멸구가 비래하여 초기 전염원이 되었을 것이다. 이러한 비래경로에 대한 연구는 여전히 진행이 되고 있어 그 경로가 확정적이지 않지만, 인도차이나 반도와 동아시아의 벼멸구 발생은 서로 연관성이 있다는 것만은 확실하다(Hu et al., 2014; Otuka, 2013). 본 연구를 통해 개발된 MWR 통계모형은 통계적인 상관관계를 바탕으로 특정 지역의 기후변수를 선정한 것이기 때문에, 현 시점에서는 벼멸구의 발생 및 이동과 물리적으로 연관되어 있음을 보이는 것이 불가능하다. 따라서 후향적(retrospective) 연구의 첫 단계로써 통계적 기법을 활용하여 벼멸구의 비래와 연관성이 높은 특정 지역의 기후현상이 우선 선정되었다면 이를 바탕으로 한 기후역학적인 후속 연구가 반드시 뒤따라야 한다. 후속 연구는 기후과학과 농학의 융합연구로써 벼멸구의 발생생태에 영향을 미치는 기후조건 및 기후현상과의 원격상관관계를 밝히는 연구가 이루어져야 할 것이다. 이와 더불어, 벼멸구의 발생 정도에 기여하는 매

우 다양한 요소를 종합적으로 고려한다면 좀 더 정확한 예측이 가능할 것으로 생각된다. 실제 국내 벼멸구 발생에는 기후요소뿐만 아니라 약제방제, 천적과 같은 생물적 요인, 그 외 재배기술이나 사회경제적 요인 등이 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 따라서 기후요소만을 고려한 MWR 통계모형을 통해 국내 벼멸구 발생면적을 예측하기에는 명확한 한계점이 존재한다. 결과적으로 계절기후예측정보를 활용한 벼멸구 계절전망의 예측성을 높이기 위해서는 추후 다양한 요소들의 상호작용을 통합하여 시뮬레이션 할 수 있는 기술이 개발되어야 할 것이다.

사 사

본 연구는 APEC 기후센터의 지원에 의하여 수행되었습니다.

Literature Cited

- Chang, C.-P., Zhang, Y., Li, T., 1999. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. Part II: Meridional structure of the monsoon. *J. Climate* 13, 4326-4340.
- Cho, J., 2014. Development of integrated methods for long-term water quantity and quality prediction using seasonal climate prediction. APCC Research Report 2015-13.
- Choi, G.M., 1998. Occurrence and control methods for brown planthopper and white backed planthopper. Rural Development Administration, Korea, 193pp. (In Korean)
- Choi, K.-S., Moon, I.-J. 2013. Two climate factors in May that affect Korean rainfall in September. *Acta Oceanol. Sin.* 32, 32-47.
- Hu, G., Lu, F., Zhai, B.-P., Lu, M.-H., Liu, W.-C., Zhu, F., et al., 2014. Outbreaks of the Brown Planthopper *Nilaparvata lugens* (Stål) in the Yangtze River Delta: Immigration or Local Reproduction? *PLoS ONE* 9, e88973.
- Hyun, J.S., 1982. Meteorological condition and pest management. *Korean J. Crop Sci.* 27, 361-370.
- Kang, H., Park, C.-K., Hameed, S. N., Ashok, K., 2009. Statistical downscaling of precipitation in Korea using multimodel output variables as predictors. *Mon. Weather Rev.* 137, 1928-1938.
- Kang, S., Hur, J., Ahn, J. B., 2014. Statistical downscaling methods based on APCC multi-model ensemble for seasonal prediction over South Korea. *International J. Climatol.* 34, 3801-3810.
- Kim, M.-K., Kim, Y.-H., Lee, W.-S., 2007. Seasonal prediction of Korean regional climate from preceding large-scale climate indices. *Int. J. Climatol.* 27, 925-934.
- Kim, M.-K., Kim, Y.-H., 2010. Seasonal prediction of monthly precipitation in China using large-scale climate indices. *Adv. Atmos.*

- Sci. 27, 47-59.
- Kim, Y.-H., Kim, M.-K., Lee, W.-S., 2008. An Investigation of Large-Scale Climate Indices with the influence on Temperature and Precipitation Variation in Korea. *Atmosphere* 18, 85-97.
- Kisimoto, R., Sogawa, K., 1995. Migration of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* and the white-backed planthopper *Sogatella furcifera* in East Asia: the role of weather and climate, pp. 67-91. In V. A. Drake and A. G. Gatehouse (eds.), *Insect migration: tracking resources through space and time*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Lee, S.W., 2012. Moving simulation of migratory insects and surveillance system of their occurrence. Rural Development Administration, Korea, 73pp. (In Korean)
- Matsumura, M., Takeuchi, H., Satoh, M., Sanada-Morimura, S., Otuka, A., Watanabe, T., Van Thanh, D., 2009. Current status of insecticide resistance in rice planthoppers in Asia, In Heong KL, Hardy B, editors. 2009. *Planthoppers: new threats to the sustainability of intensive rice production systems in Asia*. Los Banos (Philippines): International Rice Research Institute. pp 233-244.
- Otuka, A., 2013. Migration of rice planthoppers and their vectored re-emerging and novel rice viruses in East Asia. *Front. Microbiol.* 4, Article 309.
- Park, C.G., Hyun, J.S., 1983. Effects of temperatures and relative humidities on the development of brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stål). *Kor. J. Pl. Prot.* 22, 262-270.
- Park, J.S., Park, K.T., Choi, K.R., Paik, J.C., 1975. Studies on the investigating method on migratory insects. *Ann. Rept. Inst. Agric. Sci.* 2, 85-91.
- Peng, Z., Wang, Q.J., Bennett, J.C., Pokhrel, P., Wang, Z., 2014. Seasonal precipitation forecasts over China using monthly large-scale oceanic-atmospheric indices. *J. Hydrol.* 519, 792-802.
- RDA, 2010. *Crop Diseases and Pests Monitoring Management Report (1979-2010)*. Rural Development Administration, Korea.
- Schepen, A., Wang, Q.J., Robertson, D., 2012. Evidence for using lagged climate indices to forecast Australian seasonal rainfall. *J. Climate* 25, 1230-1246.
- Selvin, S., 2004. *Statistical analysis of epidemiologic data* (No. Ed. 3). Oxford University Press.
- Sidhu, G.S., Khush, G.S., 1978. Genetic analysis of brown planthopper resistance in twenty varieties of rice, *Oryza sativa* L. *Theor. Appl. Genet.* 53, 1999-2003.
- Sogawa, K., 1997. Overseas immigration of rice planthoppers into Japan and associated meteorological systems. pp. 13-35 in China National Rice Research Institute (Ed.) *Proceedings of China-Japan Joint Workshop on "Migration and Management of Insect Pest of Rice in Monsoon Asia"*, November 27-29, 1997, Hangzhou, P.R. China.
- Song, Y., Lee, J.H., 2007. Studies on the prediction models for the outbreaks of the long range migratory planthoppers on rice. Rural Development Administration, Korea, 90pp.
- Stigter, J., 2012. Climate-smart agriculture can diminish planthopper outbreaks, but a number of bad habits are counterproductive. <http://ricehoppers.net/2012/02/29/climate-smart-agriculture-can-diminish-planthopper-outbreaks-but-a-number-of-bad-habits-are-counterproductive/> (accessed on 23 March, 2016).
- Trenberth, K.E., 1997. The definition of el nino. *B. Am. Meteorol. Soc.* 78, 2771-2777.
- Wu, Z., Wang, B., Li, J., Jin, F.-F., 2009. An empirical seasonal prediction model of the East Asian summer monsoon using ENSO and NAO. *J. Geophys. Res.* 114, D18120.
- Xiaoqing, X., Baoping, Z., Xiaoxi, Z., Xianian, C., Jianqiang, W., 2007. Teleconnection between the early immigration of brown planthopper (*Nilaparvata lugens* Stål) and ENSO indices: implication for its medium- and long-term forecast. *Acta Ecol. Sin.* 27, 3144-3154.