

기후변화에 따른 벼 병해충 피해의 공간적 파급효과 분석*

김관원** 김태영***

Keywords

공간적 종속성(spatial dependence), 공간적 파급효과(spatial spillover effect), 기후 요인(climate factors), 벼(rice), 병해충(disease and insect pest), 피해율(damage rate), 공간패널토빗모형(spatial panel tobit model)

Abstract

It has been widely reported that the climate change represented by temperature increases and precipitation pattern changes is one of the key drivers of outbreaks of pests and diseases of plants. In addition, since the pests and diseases can diffuse spatially, the pest and disease outbreaks of certain sites are very likely to influence those of neighboring sites. Therefore, the purpose of this study is to elicit the causal relationship between climate factors and rice pest-disease damage rates, and to quantify the spatial spillover effects of rice pests and diseases. We construct the rice pest-disease damage models in consideration of spatial dependence of rice pests and diseases using a spatial panel tobit model. We use the site specific rice pest-disease damage data provided by Korea's Rural Development Administration from 1990 to 2015. The results show that the climatic conditions can significantly affect the rice pest-disease damages, but differently across the types of rice pests and diseases. We also found that there are significant spatial spillover effects (indirect effects) of rice pest-disease damages, and spatial spillover effects of pests are greater than those of diseases.

차례

- 1. 서론
- 2. 벼 병해충별 발생현황 및 특징
- 3. 분석 자료 및 모형
- 4. 분석 결과
- 5. 결론 및 시사점

* 이 연구는 교육부의 제원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행됨. (NRF-2016S1A5A8927913). 이 논문은 김관원(2018)의 석사학위논문 일부를 발췌하여 작성한 것이며, 2017년 농식품정책학회 하계학술대회에서 발표한 내용을 수정, 보완한 것임.

** 경상대학교 식품자원경제학과 석사과정.

*** 경상대학교 식품자원경제학과 조교수(농업생명과학연구원 책임연구원), 교신저자. e-mail : tykim74@gmail.com.

1. 서론

농업은 자연 환경의 지배를 받는 산업으로서 지구 온난화에 수반된 기후요인의 변화로 인해 작물의 생산성과 안정성 등 다방면으로 영향을 받고 있다(국립환경과학원 2015). 세계의 미래 기후변화 전망을 보면 온실가스 배출이 현 추세대로 지속될 경우, 21세기 말(2081~2100년)에는 전 지구의 평균기온이 1986~2005년 대비 3.7°C (2.6~4.8°C) 상승할 것으로 전망되었다(IPCC 2014). 특히 우리나라의 경우 지난 100년(1912~2010) 동안 기온은 1.8°C 상승, 강수량은 200mm 이상 증가하여 기후변화가 세계 평균보다 더 빠르게 진행되고 있는 것으로 알려져 있다(기상청 2012). 이러한 기후변화로 인해 우리나라 농업부문은 생산량 감소, 재배품목 및 재배적지 변화 등의 영향을 받고 있으며, 특히 주곡인 벼는 온난화에 따라 과거에 비해 생산량의 변동성도 점차 커지고 있다(이변우 2010; IPCC 2014; Challinor et al. 2014; 노재선·권오상·조승현 2012). 예를 들어 이변우(2010)에 따르면 온도가 3°C 높아질 경우 화성벼와 다산벼의 수량이 각각 8%, 30%, 5°C 높아질 경우 각각 41%, 51% 감소할 것으로 추정된다. IPCC(2014)에 따르면 기온이 1°C 정도만 상승하더라도 전 세계 대부분의 지역에서 기후변화에 대한 적절한 적응조치가 없을 경우 소맥, 쌀, 옥수수 등 주요 작물의 단수가 감소하는 것으로 나타났다. Challinor et al.(2014)은 기온 상승이 2°C 미만으로 상승할 경우 곡물 생산량 감소가 평균 5% 내외로 크지 않지만, 상승폭이 2°C 를 넘어설 경우 곡물 생산량이 크게 감소할 것으로 예측하였다. 노재선·권오상·조승현(2012)은 쌀 수량과 기후변수 간의 인과관계를 회귀분석한 결과, 강수량 증가에 따른 일조 부족은 수량변화에 부정적 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

기후변화로 인한 기상조건의 변화는 작물생육에 직접적인 영향을 미치기도 하지만 병해충 발생 가능성을 증가시키는 등의 간접적인 경로로도 작물생육환경에 영향을 미칠 수 있다. 국립환경과학원(2011)은 기후변화 자체만으로 농업생산에 직접적인 영향을 미칠 수 있지만, 기후변화는 식물체의 토지피복변화와 장마시기, 변동병해충의 월동환경에도 영향을 미칠 수 있으며, 이는 지역별 병해충 발생빈도, 발생기간, 피해면적, 병해충 종류 변화(외래병해충 출현 및 국내토착화)를 수반하게 되어 농업생산에 간접적인 영향을 줄 수 있다고 하였다. Cannon(1998)은 병해충의 월동기가 기후 변화의 영향을 받게 되는데, 높은 온도는 월동 가능성을 높여 곤충들의 생존율을 증가시킬 수 있다

고 하였다. 또한 기후변화로 인해 농업환경이 병해충이 번식하는 데 적합한 환경으로 변한다면 농가경영부담이 늘어날 수 있기 때문에 효율적인 병해충관리 및 방제는 필수적임을 언급하였다. Rao et al.(2006)은 기온 및 극한기후빈도의 증가가 병해충의 강도와 다양성을 높이게 된다고 하면서 사탕수수진딧물(sugarcane woolly aphid)의 예를 통해 병해충의 지리적 범위 확장 및 월동생존율 증가가 작물생산량 감소뿐만 아니라 생태계 균형까지 붕괴시킬 수 있다고 예측하였고, Deutsch et al.(2008)은 기후변화가 해충발생 지역을 이동시켜 고위도 지역의 해충 발생과 밀도가 증대될 것이라고 하였다. 국내연구 중 김영호(2010)는 차후 병 발생과 방제에 미치는 기후변화의 전반적인 영향을 기존의 연구와 관찰을 토대로 위험도를 평가한 후 우리나라의 작목별로 제시된 병 발생 상황을 점검하였으며, 신정욱·윤성철(2011)은 주요작물인 고추를 대상으로 기후변화에 따른 탄저병 발병위험도를 계산함으로써 남한 지역 내 2100년까지의 탄저병 변동을 예측하였다. 또한 정확균·김창길·문동현(2014)은 실제 관측데이터를 기반으로 기후변화가 벼 병해충 피해면적에 미치는 영향을 분석하고 정책적 시사점을 도출하였다.

기존 연구에서는 주로 기후변화와 병해충 발생 간의 인과관계를 살펴보고 있는데, 한 가지 간과하고 있는 점이 있다면 병해충 발생의 공간적 종속성(spatial dependence) 또는 공간적 파급효과(spillover effect) 부분이다. 병해충은 공간적으로 확산하는 특성을 지니고 있기 때문에 특정지역의 병해충 발생은 다른 주변지역에 영향을 미치게 되고, 또한 주변지역의 병해충 발생은 특정지역의 병해충 발생에 영향을 미칠 수 있다. 즉 병해충 발생에 따른 피해는 공간적으로 종속되어 있다고 할 수 있다. 만약 병해충 관찰포 간의 공간적 종속성을 반영하지 않으면, 추정량의 편이가 생기거나 비효율성의 문제가 발생할 수 있으므로 공간적 종속성을 고려하여 기후변화에 따른 병해충 피해모형을 추정할 필요가 있다(Anselin 1988; LeSage and Pace 2009). 또한 병해충 종류별로 공간적 파급효과의 정도는 다를 수 있으므로, 공간적 종속성 여부를 파악하는 것과 더불어 병해충 종류별로 주변지역에 영향을 미치는 정도를 파악하는 것도 병해충 발생에 대한 선제적 대응 전략을 마련하는데 매우 중요한 정보를 제공해 줄 것으로 기대된다.

병해충 발생의 공간적 종속성을 고려한 주요 선행연구로는 김용준·정진교·안동환(2017)과 김용준·안동환(2017) 등을 들 수 있다. 김용준·정진교·안동환(2017)은 인삼을 대상으로 기온·습도·강수량·바람 등 기후요인이 병해충에 미치는 영향을 구체화하고 포장단위의 병해충의 공간적 종속성을 고려하여 병해충 피해함수를 도출하였으며, 특히 병해충 종류별로 피해의 유효거리를 산출하였

다는 점이 중요한 기여로 판단된다. 그러나 병해충 피해의 유효거리는 지점별로 동일하다고 할 수 없다는 점에서 여전히 한계점이 존재하며, 병해충의 공간적 종속성을 고려한 모형을 이용하였으나 병해충 피해의 직접효과와 간접효과(공간적 파급효과)에 대한 고찰은 다소 부족한 측면이 있다. 또한 김용준·안동환(2017)은 병해충의 동시발생을 고려한 경제적 방제수준을 도출하는 과정에서 벼 병해충인 잎집무늬마름병과 흰잎마름병 간의 공간적인 관계를 파악하여 기후요인에 따른 병해충 피해함수를 도출하고, 이에 따라 병해충 동시 방제를 고려한 경제적 피해수준을 추정하였다는 점이 중요한 기여로 판단되며, 중요한 선행연구로서 가치가 인정된다. 그러나 벼 병해충 피해의 경중을 고려하는 피해율이 아닌 병해충 발생률을 종속변수로 한 피해모형을 도출하였으며, 공간적 종속성을 모형에 고려하는 과정에서 종속변수인 잎집무늬마름병 발생률의 공간적 종속성은 고려하지 않고, 흰잎마름병의 공간가중행렬 변수만을 독립변수에 추가하였다는 점에서 동일 병해충 피해의 공간적 파급효과는 파악할 수 없는 모형으로 판단된다. 또한 서로 다른 병해충 간에 공간적 상관관계가 존재한다고 하여 서로가 서로를 매개(인과)하는 관계라고는 할 수 없기 때문에 한 병해충이 종속 변수가 되고 다른 병해충의 공간가중변수가 독립변수가 되는 과정에서 면밀한 검토가 필요할 것으로 판단된다.¹

따라서 이 연구는 벼의 여섯 가지 병해충(잎도열병·잎집무늬마름병·줄무늬잎마름병·애벌구·벼 물바구미·혹명나방)을 대상으로 공간적 종속성을 고려한 벼 병해충 피해모형을 도출하고, 기후요인의 변화가 벼 병해충 발생에 미치는 직접적인 영향뿐만 아니라 공간적 종속성에 의한 간접적 파급효과를 분석하는 데 주요 목적이 있다. 이를 위해 벼 병해충 발생의 특징과 병해충 피해의 경중(輕重)을 고려한 병해충별 피해율을 종속변수로 사용한 피해모형을 구축하며, 실제 병해충 피해율에 영향을 미치는 기후요소들을 살펴보고, 병해충 피해의 공간적 종속성 존재여부와 구조를 파악하여 기존 모형과 차별화된 정책적 시사점을 도출한다. 즉, 여러 기후요인이 병해충 피해율에 미치는 영향을 직접효과(direct effect)와 간접효과(indirect effect)로 분해하여 병해충 종류별로 공간적 파급효과를 정량적으로 계측함으로써, 주변지역의 병해충 발생 상황을 고려한 예방적 방제 전략을 제시한다는 점에서 기존 연구와의 차별성이 있다.

이 연구의 분석대상인 벼는 우리나라 곡물생산에서 가장 큰 비중을 차지하고 유일하게 국내생산

1 본 선행연구 검토는 익명의 심사자의 요청에 의해 작성되었으며, 익명의 심사자의 제안에 감사드린다.

에 의존하는 작물이며, 병해충 발생이 심할 경우 생산량과 품질에 큰 영향을 미쳐 심각한 경제적 피해를 유발하게 된다. 현재 농촌진흥청 국가농작물병해충관리시스템(NCPMS)에서 조사하고 있는 벼 병해충 종류만 스물두 가지이며, 최근 기후변화양상에 따라 병해충 발생의 변동성 및 정도가 증가하고 있는 상황이다. 따라서 기후변화가 벼 병해충 피해에 미치는 영향을 계량적으로 분석할 필요가 있으며, 병해충마다 발생조건이 다르기 때문에 그 특징들을 검토한 후 기후요인을 적용해야 한다.

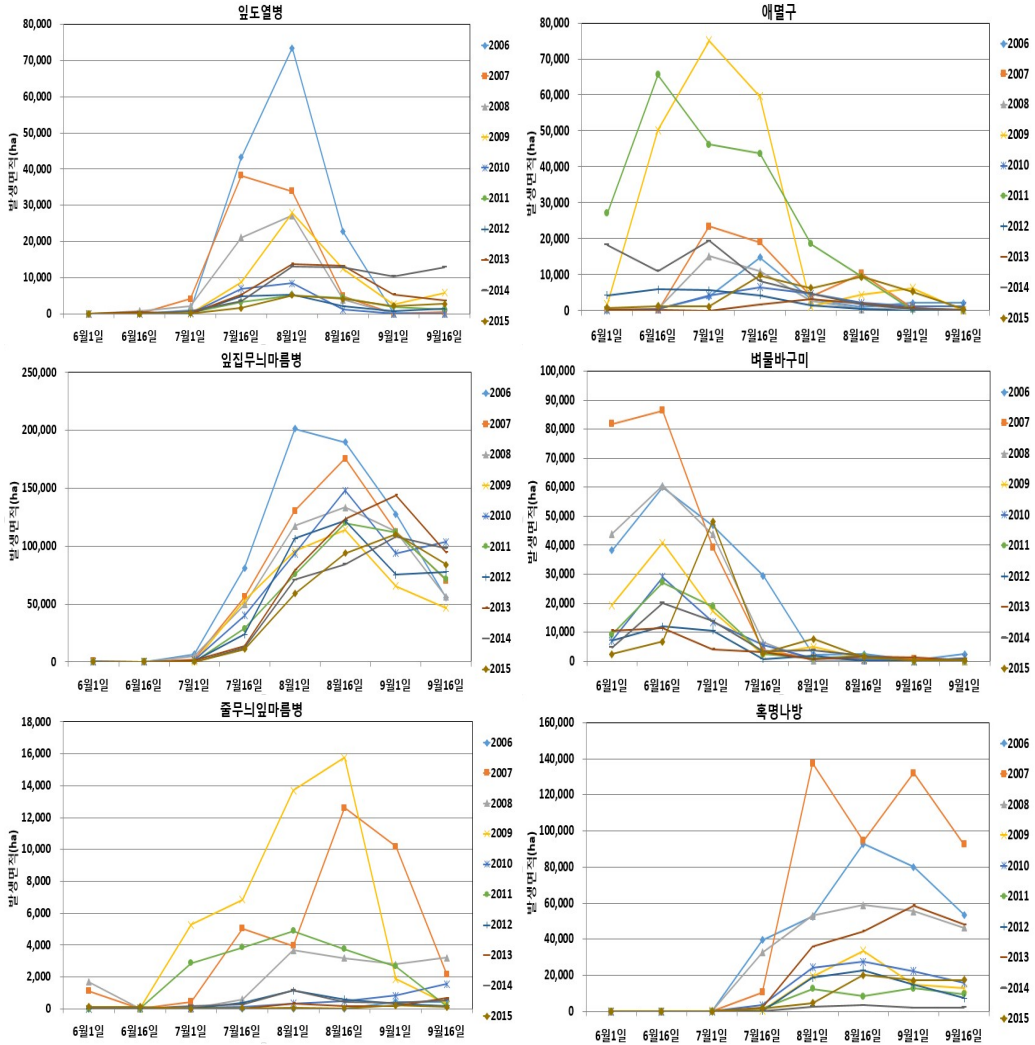
이 연구의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 벼 병해충별 발생현황 및 특징을 정리하며, 3장에서 분석 자료 및 모형에 대해 설명한다. 이어서 4장에서는 분석모형에 따른 결과를 도출하고, 5장에서 결론 및 시사점을 제시한다.

2. 벼 병해충별 발생현황 및 특징

2006년부터 2015년까지 최근 10년간 잎도열병·잎집무늬마름병·줄무늬잎마름병의 병해와 애벌레·벼물바구미·혹명나방의 해충에 대한 발생면적현황은 <그림 1>과 같다.

그림 1. 잎도열병 · 잎집무늬마름병 · 줄무늬잎마름병 · 애벌구 · 벼물바구미 · 흑명나방의 발생면적현황

단위: ha



자료: 농촌진흥청 재해대응과·국가 농작물 병해충 시스템 내부자료.

<그림 1>은 2006년부터 2015년까지의 10년간, 매년 6월 1일부터 9월 16일까지 15일간 총 8회차에 걸쳐 조사된 여섯 가지 병해충의 발생면적을 사용하여 작성하였다. 연구의 분석기간은 1990년부터 2015년이지만 1998년 이전의 병해충 자료는 조사일자와 조사회차가 없으며, 1999년에서 2005년의 기간에는 5월 20일부터 9월 20일까지 10일간 총 13회차로 구성되어있기 때문에 일정조사기간을 가진 최근 10년을 기준으로 하였다.

이 연구에서는 선행연구와 농촌진흥청 재해대응과의 내부자료를 바탕으로 현재 가장 많이 관측되며 벼 생육에 중요한 영향을 미치는 것으로 알려진 6개의 병해충(병해: 잎도열병·잎집무늬마름병·줄무늬잎마름병, 해충: 애멸구·벼물바구미·혹명나방)을 분석대상으로 한다. 각 병해충들은 발생 및 생육조건이 다르기 때문에 병해충별 특징들을 사전적으로 검토한 후 기후요인을 반영하여 분석할 필요가 있다. 이에 따라 이 연구의 분석대상 여섯 가지 벼 병해충의 발생현황과 함께 그 특징들을 농촌진흥청 및 시군농업기술센터의 정보를 참작하여 살펴보고자 한다.

우선 병해를 살펴보면, 잎도열병은 곰팡이에 의해 발병하는 병해로서 우리나라뿐만 아니라 세계적으로도 쌀을 생산하는 모든 지역에서 이 병으로 인한 피해를 많이 받고 있고, 여름철 일조 부족과 저온으로 벼가 연약할 때 많이 발병한다. 6월 중순부터 발생하기 시작해 7, 8월에 많아지고 2006년에는 전년대비 195% 많이 발생하였는데, 농촌진흥청(2006)의 병해충 예찰 방제보고서에 따르면 다른 해와 비교해서 그해 여름장마가 길었고 강수가 잦았기 때문인 것으로 나타났다. 잎집무늬마름병은 잎도열병과 마찬가지로 곰팡이에 의해 발병하며 잎도열병만큼 발병 빈도가 높다. 7월부터 발병하여 9월까지 이어지고 한여름인 7~8월 고온다습한 조건에서 발병이 심하다. 마지막으로 줄무늬잎마름병은 애멸구가 매개하여 주로 발병하는 바이러스병으로, 남부지방에 주로 발생했지만 최근 그 피해가 전국으로 확대되었으며, 다른 병해와 마찬가지로 다습한 조건에서 발병할 확률이 높다. <그림 1>을 살펴보면 6월부터 조금씩 발병하여 9월까지 이어지며, 2007년 서산·태안에는 애멸구의 월동, 2009년 김포·강화·서산·태안에는 중국으로부터 유입된 많은 양의 애멸구로 인해 서해안 지역의 병해 발생이 심한 것으로 나타났다(농촌진흥청 2009).

해충의 경우, 우선 애멸구는 병독을 몸에 지니고 있기 때문에 앞서 설명한 줄무늬잎마름병뿐만 아니라 검은줄오갈병 등 바이러스병을 매개하며, 벼멸구나 흰등멸구처럼 중국에서 날아오기도 하지만 국내에서 약충 상태로 겨울을 지나면서 월동하기도 한다. 본답 초기인 6월의 고온다습한 기후가 멸구류 발생에 호조건으로 작용하며, 애멸구는 국내에서도 월동할 수 있기 때문에 동절기 기온 상승으로 많이 발생하게 된다. <그림 1>을 보면 6월부터 발생하여 발생조건에 부합하는 모습을 보이고 8월 중순까지 발생한다. 2007년에는 월동, 2009년과 2011년에는 중국으로부터 많이 날아와 다른 해에 비해 많이 발생한 것으로 보이며(농촌진흥청 2009, 2011), 이는 애멸구가 매개하는 줄무늬잎마름병 발병이 심했던 연도와도 일치한다. 다음으로 벼물바구미는 4월 하순부터 이르게 활동하기 시작하며, 5월 중하순경 산란을 위해 논으로 이동하기 전까지 월동처에서 지내고 초기저온성

해충이기 때문에 여름철 저온에 영향을 받는다. <그림 1>에서 2007년에 상대적으로 많이 발생하였으며, 이른 초봄부터 활동하기 때문에 주로 8월까지만 발생하는 경향을 보인다. 마지막으로 흑명나방은 주로 중국남부지역에서 비래하는 해충으로서 남해안 및 충남 서해안 지방을 중심으로 피해가 크며, 다른 해에 비해 2007년에 발생 빈도가 높게 나타났다. 외래병해충이기 때문에 날아오는 시기인 6월 중하순부터 7월 중하순의 기온이 높을수록 생존율이 높아지며, 8월 이후로도 많이 발생할 수 있다.

3. 분석자료 및 모형

3.1. 분석자료

3.1.1. 연구의 시공간적 범위

이 연구의 시간적 범위는 농촌진흥청에서 병해충 관측정보가 꾸준히 수집된 1990년부터 2015년까지 연도별로 설정하였으며, 관측된 병해충 발생률의 공간적 범위는 병해충 관찰포가 전국 대부분의 시군 단위로 분포하고 있어 시군 단위로 설정하였다. 공간적 종속성의 엄격한 고려를 위해서는 개별 관측치를 실제 관찰포 단위로 파악하는 것이 더욱 바람직하나, 1990년부터 2015년까지의 관찰포의 정확한 위치 파악이 불가능한 경우가 다소 존재하였고, 제공된 좌표 중의 일부가 실제 관찰포 위치와 일치하지 않는 경우나 주소가 불분명한 경우도 존재하여, 부득이하게 연구기간 동안 해당 시군 내에 병해충 발생기록이 존재하는 135개 시군을 대상으로 설정하였다. 실제 농촌진흥청에서 제시하는 병해충 발생률과 피해율 계산 시 시군 단위 식부면적을 기준으로 하기 때문에 시군 단위로 분석하는 것에 큰 문제는 없을 것으로 사료된다. 농촌진흥청이 제공한 기간 내의 관찰포의 대략적인 위치와 해당 시군의 경계는 다음 <그림 2>와 같다.

그림 2. 벼 병해충 관찰포 위치 및 시군 경계 (1990~2015)



주: 자료의 위치정보를 이용하여 ArcGIS를 이용하여 작성함.
자료: 농촌진흥청 재해대응과·국가 농작물 병해충 시스템 내부자료.

3.1.2. 병해충 자료

벼에 대한 병해충별 피해 관련 자료는 농촌진흥청 국가농작물병해충관리시스템의 내부자료를 제공받아 활용하였으며, 이는 <표 1>과 같다.

표 1. 병해충 자료의 기초통계량

통계량		병해충별	잎도열병	잎집무늬 마름병	줄무늬 잎마름병	애멸구	벼물 바구미	흑명 나방
피해 면적(ha)	평균		84.941	877.421	5.421	73.892	142.049	228.414
	표준편차		166.095	1074.501	44.901	253.747	260.338	386.117
피해율 (%)	평균		0.005	1.061	0.001	0.121	0.091	0.219
	표준편차		0.019	1.109	0.010	0.560	0.195	0.499

자료: 농촌진흥청 재해대응과·국가 농작물 병해충 시스템 내부자료.

병해충 발생면적은 조사필지면적 대비 소·중·다·심으로 구분한 발생필지면적을 기준으로, 시군 내의 총 논 식부면적 대비 발생면적으로 환산 후 나타내기 때문에 시군별로 피해 정도를 분석하는 것이 바람직하다. 다음 식 (1)은 농작물 병해충예찰 방제요강(농촌진흥청 2016)에 명시된 발생면적 추산공식이다.

$$(1) \text{ 발생면적} = \sum_{\text{시}} \frac{\text{발생필지면적}}{\text{조사필지면적}} \times \text{총 논면적}$$

한편 병해충별 피해 정도는 발생면적과 피해율로 구분할 수 있는데, 발생면적은 병해충별로 소·중·다·심 발생면적이 나온 것을 단순히 합한 것이기 때문에 피해 정도를 반영하기 힘들다. 그러나 피해율은 소·중·다·심의 발생면적에 각각의 발생 정도별 피해율을 곱한 후 계산하기 때문에 피해 정도를 정확하게 반영할 수 있으며, 농작물 병해충예찰 방제 요강(농촌진흥청 2016)에 있는 피해율 추산공식과 병해충의 정도별 피해율 기준은 식 (2)와 <표 2>에 나타나 있다.

$$(2) \text{ 피해율}(\%) = \sum_{\text{시}} \frac{(\text{정도별 발생면적} \times \text{피해율})}{\text{식부면적}}$$

표 2. 벼 병해충별 피해율 기준

병해충별		정도별	발생 정도별 피해율 기준			
			소	중	다	심
병해	잎도열병	병무늬면적률(%)	0.25	1.3	6.0	15
	잎집무늬마름병	피해도	7.5	10	20	40
	줄무늬잎마름병	병든줄기율(%)	1.1	3.5	7.5	15
해충	애멸구	20포기당 마릿수(마리)	10	30	50	70
	벼물바구미	20포기당 마릿수(마리)	3.2	14.8	32	54
	흑명나방	피해잎률(%)	5	20	40	60

자료: 농촌진흥청(2016).

3.1.3. 기후자료

관찰포 주변의 기후변화를 반영하기 위해서는 병해충 관찰포 주변의 지리적 특성을 반영하는 기후변수가 필요하다. 따라서 관찰포 주변의 기후변수는 관찰포 주변의 기상관측소에서 관측된 자료를 이용하며, 기상관측소 주변의 지리적 특성(고도, 경위도, 평균 경사도 등)을 고려하여 기후변수를 추정한 후, 보간법을 이용하여 관찰포 주변의 지리적 특성에 맞는 기후변수를 활용하게 된다. 보간법을 통해 각 관측소에서 제공하는 기후정보를 계산할 때 관측소별로 미치는 영향을 차별화할 수 있고, 분석대상지역의 중앙에서부터 관측소까지 거리의 제곱근만큼 가중치를 두어 계산하면 된다(김창길 외 2008). 기상청에서 제공하는 전국 59개 기상관측소 기후자료를 활용하기 전에 ArcGIS 프로그램을 통해 대상이 되는 시군별 관찰포와 기상관측소의 지리적 정보를 결합한 후 적절한 기후자료를 사용하였다. 이에 따라 병해충 발생에 영향을 미칠 수 있는 것으로 기대되는 기후변수들을 농촌진흥청 및 시군농업기술센터의 정보를 참작한 후 벼 병해충별로 발생현황과 생육특징을 고려하여 선정하였다. 이와 관련된 근거는 앞서 2장에 제시하였으며, 분석에 사용한 기후변수와 기초통계량을 살펴보면 <표 3>과 같다.

표 3. 기후변수 기초통계량

변수	기초통계량	평균	표준편차
평균 기온 (Avg Temp) (°C)	6월	21.4851	1.1479
	7월	24.6902	1.4739
	12월	1.1065	2.6061
평균 상대습도 (Humidity) (%)	6월	72.3334	6.5371
	7월	79.4303	5.7186
	12월	65.3487	9.6037
합계 일강수량 (Rainfall) (mm)	6월	157.5025	99.9915
	7월	297.4829	168.2827
	12월	27.3395	22.0830
합계 일조시간 (Sunshine) (hr)	6월	182.2975	42.6661
	7월	150.9976	48.0953
	12월	161.8759	29.1670
평균 강수계속시간 (Rain Duration) (hr)	6월	4.5652	3.3680
	7월	4.3432	3.1311
	12월	3.5023	3.0461

주: 기후변수의 기초통계량은 1995년부터 2015년까지의 월별 기후변수의 평균임.

자료: 기상청 기상자료개방포털(<https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>: 2017. 3. 7.).

3.1.4. 기술진보효과의 반영

병해충의 발생에 따른 피해 정도는 농약개발 및 효과적인 방제법과 같은 기술진보효과에 따라 달라질 수 있다. 기술진보효과를 모형에 반영하기 위해서는 병해충 방제를 위해 사용된 농약의 사용량이나 연도별 농약의 효능과 같은 변수가 필요하나, 이러한 변수를 구하기는 사실상 불가능하다. 따라서 선행연구를 참고하여 기술진보효과를 모형에 반영하기 위해 연도변수를 활용하였다(정학균·김창길·문동현 2014).

3.2. 분석 모형

3.2.1. 병해충 발생의 공간적 종속성에 대한 논의

병해충의 발생은 해당 지점의 여러 기후요인들(온도, 습도, 강수, 일조량 등)이 직접적으로 영향을 미치겠지만, 이러한 조건이 만족한다고 해서 항상 병해충이 발생하는 것은 아니며, 주변 지역에서 발생한 병해충이 바람이나 사람의 이동을 매개로 하여 옮겨감으로써 간접적인 요인에 의해서도 발생한다. 이 연구에서 특히 중요하게 비중을 두는 부분은 특정 지점에서 병해충이 발생할 때 주변 지점과 얼마나 공간적으로 종속되어 있으며, 이러한 공간적 종속성으로 인해 특정 지점이 이웃 지점과 얼마나 영향을 주고받는지를 분석하는 것이다. 우리나라에서 전국적으로 재배되는 작물인 벼의 병해충도 역시 공간적 확산의 특성을 지니고 있기 때문에, 병해충 발생에 의한 피해 면적 또는 확률을 추정함에 있어서 관찰포 간의 공간적 종속성 및 자기상관을 고려할 필요가 있다.

3.2.2. 공간적 종속성을 고려한 벼 병해충 피해모형 설정

이 연구에서 사용하는 자료는 병해충 피해모형 추정을 위해 병해충 관측이 시작된 1990년 이후 시점부터, 각 지역별로 분포되어 있는 관찰포에서 관찰된 병해충 피해율로 구성되어 있기 때문에 시계열 및 횡단면 자료가 융합된 패널모형을 구축해야 한다. 또한 병해충 피해율은 항상 0%보다 크거나 같고 100%보다 작거나 같은 값으로 표현되므로, 0%보다 작거나 100%보다 큰 값은 관찰할 수 없다. 그러나 실제로 피해율이 100%에 이르는 경우는 거의 존재하지 않기 때문에 0%에서 절삭된(censored) 패널 토빗모형(Panel Tobit Model)을 구축하는 것이 바람직하다(Kim and Langpap 2016).

우선 공간적 종속성을 고려하지 않은 패널토빗모형은 다음 식 (3)과 같다.

$$(3) \quad D_{it} = \max(0, X_{it}\beta + \iota_n\alpha + \mu_i + \varepsilon_{it})$$

$$\varepsilon_{it}|X_i \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2), \mu_i \sim N(0, \sigma_\mu^2)$$

$$E(\mu_i\mu_j) = 0, E(\mu_i\varepsilon) = 0, E(\varepsilon_{it}\varepsilon_{ij}) = 0 \quad \forall i \neq j.$$

i 는 시군으로 대표되는 벼 관찰포, t 는 연도, D_{it} 는 시군별 연도별 각 여섯 가지 벼 병해충의 피해율을 의미하며, X_{it} 는 설명변수로서 주로 파종기나 출하기의 기온, 강수량, 일조량 등을 사용한다. μ_i 는 관측 불가능한 횡단효과를 의미하며, ε_{it} 는 교란항을 의미한다.

통상적인 패널모형은 크게 고정효과모형(Fixed effect model)과 확률효과모형(Random effect model)으로 나눌 수 있으나, 토빗모형의 경우 부수적 모수의 문제(incidental parameter problem)로 고정효과모형의 추정량은 불일치추정량(inconsistent estimator)이 되기 때문에 확률효과 토빗

모형을 구축해야 하며(Wooldridge 2010), 모형의 추정은 최우추정법(maximum likelihood estimator: MLE)을 이용한다.

위에서 제시된 일반적인 패널토빗모형에 공간적 종속성을 고려한 모형은 크게 종속변수 간의 공간적 종속성을 고려한 공간시차모형(spatial lag model: SLM), 오차항 간의 공간적 종속성을 고려한 공간오차모형(spatial error model: SEM), 그리고 공간시차모형과 공간오차모형의 일반화된 모형으로 공간적 종속성과 이질성을 동시에 다루는 공간종속모형(spatial autocorrelation model: SAC)으로 구분되며(Anselin 1988; LeSage and Pace 2009; Kim and Langpap 2016), 식 (4)~(6)과 같다.

- 공간시차모형

$$(4) D_{it} = \max(0, \rho WD_{it} + X_{it}\beta + \iota_n\alpha + \mu_i + \varepsilon_{it})$$

- 공간오차모형

$$(5) D_{it} = \max(0, X_{it}\beta + \iota_n\alpha + \mu_i + u_{it}), \\ u_{it} = \lambda Wu_{it} + \varepsilon_{it}$$

- 공간종속모형

$$(6) D_{it} = \max(0, \rho WD_{it} + X_{it}\beta + \iota_n\alpha + \mu_i + u_{it}), \\ u_{it} = \lambda Wu_{it} + \varepsilon_{it}$$

여기서 W 는 관측치(observation) 간 공간적 종속성(spatial dependency)의 구조(structure)를 설정하는 $N \times N \times T$ 공간가중행렬(spatial weight matrix)이며, 주로 인접성(contiguity)이나 역거리(inverse distance)로 나타나는 행렬을 사용하게 된다. WD 는 공간시차종속변수(spatial lag dependent variable), Wu 는 공간오차변수(spatial lag error term), β , ρ , λ 는 각각 X , WD , Wu 의 추정치를 의미한다. 여기서 만약 ρ 나 λ 가 0보다 크면 주변지역의 병해충 피해발생이 다른 주변지역의 병해충 피해발생에 양(+)의 파급효과를 미치고 있음을 의미한다. WD 와 Wu 는 공간계량 모형에서 공간적 종속성을 고려하는 역할을 한다(김태영·안경애 2014).²

2 본 연구에서 제시된 병해충 피해모형과 기존 연구와의 차별성을 살펴보면, 우선 정학균·김창길(2014)의 연구와는 달리 공간적 종속성을 고려하고, 병해충 발생면적 대신 병해충 피해의 정도를 고려해 계산한 피해율을 종속변수로 고려하였다는 점이다. 또한 김용준·안동환(2017)의 병해충 피해모형과는 달리 병해충 발생률이 아닌 피해의 정도를 고려한 피해율을 종속변수로 사용한 점과 종속변수의 공간적 종속성을 고려하여 주변지역에서 발생한 동일 병해충의 공간적 파급효과를 추정할 수 있도록 설정하였다는 점, 그

위에서 제시된 식 (4)~(6)을 기본 모형으로 각 병해충별로 2장에서 파악한 병해충 발생의 특성을 고려하여 기후요인 변수를 적용한다. 특히 줄무늬잎마름병의 경우 기후요인 이외에 애벌구가 매개하기도 하므로, 애벌구 매개효과를 고려하기 위해 1단계에서 애벌구의 피해율을 추정하여 2단계에서 애벌구 피해율의 예측값을 고려한 줄무늬잎마름병 피해모형을 구축한다.

3.2.3. 공간적 종속성 검정을 통한 모형 선택

위에 제시된 모형 중 적절한 실증모형을 선택하기 위해서는 벼 병해충 발생의 공간적 종속성 존재 여부와 특성을 파악해야 한다. 따라서 병해충 피해율의 공간시차변수(spatial lag variable)와 오차항의 공간시차변수에 대한 유의성 검정을 실시하였으며, 결과는 <표 4>와 같이 나타난다.

표 4. 공간종속성 검정과 최종 모형 선택

		잎도열병	잎집무늬 마름병	줄무늬 잎마름병	애벌구	벼물 바구미	혹명나방
W1 = $\frac{1}{d_{ij}}$	LM-Lag	72.68	73.34	4.36	68.84	177.42	705.60
	(p-value)	(0.000)	(0.000)	(0.037)	(0.000)	(0.000)	(0.000)
	LM-Error	0.143	1.633	5.219	0.134	0.650	1.174
	(p-value)	(0.706)	(0.201)	(0.074)	(0.864)	(0.420)	(0.241)
	Log-likelihood	-381.4	-4884.9	-185.9	-3733.9	-799.2	-2794.2
W2 = $\frac{1}{d_{ij}^2}$	LM-Lag	27.680	41.522	1.382	26.181	77.798	230.647
	(p-value)	(0.000)	(0.000)	(0.240)	(0.000)	(0.000)	(0.000)
	LM-Error	0.148	1.671	1.723	0.106	0.549	0.761
	(p-value)	(0.701)	(0.196)	(0.423)	(0.743)	(0.459)	(0.383)
	Log-likelihood	-400.3	-4898.0	-187.6	-3750.8	-836.3	-2931.5
W3 = $K5 \odot \frac{1}{d_{ij}}$	LM-Lag	29.382	47.903	1.867	35.539	90.768	299.108
	(p-value)	(0.000)	(0.000)	(0.172)	(0.000)	(0.000)	(0.000)
	LM-Error	0.150	1.682	0.263	0.101	0.475	0.560
	(p-value)	(0.699)	(0.195)	(0.608)	(0.751)	(0.491)	(0.454)
	Log-likelihood	-399.6	-4895.8	-187.3	-3763.4	-830.9	-2906.6
Selected model		W1,SLM	W1,SLM	W1,SAC	W1,SLM	W1,SLM	W1,SLM

리고 매개관계가 있는 병해충의 경우(줄무늬잎마름병과 애벌구) 이를 고려하여 분석하였다는 점에서 차이가 있다.

공간적 종속성 검정은 Anselin(1988)의 Lagrange Multiplier(LM) 통계량을 이용하였으며, 가설검정에 사용된 공간가중행렬은 역거리행렬(Inverse distance matrix, W1)과 역거리제곱행렬(W2), 이웃하는 5개 지점에서 거리에 반비례하여 공간적 종속성을 부여하는 K nearest neighbor matrix와 역거리행렬의 곱(여기서 K=5, W3) 등을 행 표준화(row-standardization)하여 각 병해충별로 적용하였다.³⁴ 가설검정 결과 모든 병해충 피해모형에서 공간시차종속변수(WD)에 대해 공간적 종속성이 유의하게 존재하였고, 공간오차변수(Wu)에 대해서는 줄무늬잎마름병만 유의한 공간적 종속성이 존재하는 것으로 나타났다. 최종모형은 여러 공간가중행렬 중에서 로그우도값(Log-likelihood value)이 가장 높은 것을 선택하였으며, 그 결과 잎도열병, 잎집무늬마름병, 애멸구, 벼물마구미, 흑명나방은 역거리행렬(W1)을 사용한 공간시차모형(SLM), 줄무늬잎마름병은 역거리행렬(W1)을 사용한 공간종속모형(SAC)을 최종모형으로 선택하였다.

3.2.4. 한계효과: 전체효과, 직접효과, 간접효과(공간적 파급효과)

토빗모형에서 추정된 계수 그 자체는 한계효과로 해석될 수 없으며, 또한 공간토빗모형에서는 한계효과를 직접효과와 간접효과, 이를 합한 전체효과로 나누어 설명할 수 있다. 따라서 공간토빗모형에서의 한계효과는 다음 식 (7)과 같이 계산된다.

$$(7) \partial E(D|X)/\partial X_k = \phi[(I - \rho W)^{-1} \bar{X} \beta] \odot (I - \rho W)^{-1} I \beta$$

여기서 X_k , \bar{X} , $\phi(\cdot)$, \odot , β 은 각각 k번째 설명변수, 설명변수의 평균, 표준정규분포함수, 그리

3 공간가중행렬의 적용은 인위적인 요소가 존재하므로, 다양한 공간가중행렬을 적용하여 가장 적합한 공간가중행렬을 찾아내는 과정이 필요하다. 이 연구에서는 각 병해충별로 3개의 공간가중행렬에 대한 가설검정을 실시하였다. 공간적 종속성 검정을 위한 공간가중행렬 구성 시 김용준·정진교·안동환(2017)에서 사용한 유효거리를 고려한 공간적 종속성 모형을 익명의 심사자가 제안을 하였으나, 본 연구에서는 병해충별 유효거리를 지점별로 동일하게 설정하는 것에 합당한 근거를 찾기 어려워, 개별 관측치의 거리에 반비례하는 공간종속성 행렬과 일정 인접범위 내에서 거리에 따라 반비례하는 복합(hybrid)구조의 공간가중행렬을 고려하였으며, 역거리 공간가중행렬의 적합도가 가장 좋은 것으로 나타나 역거리 공간가중행렬(W1)을 최종적으로 채택하였다. 벼의 경우 지역적으로 서로 단절된 공간이 적고 비교적 대부분 시군에 분포하고 있으며, 거리가 멀어질수록 파급효과가 기하급수적으로 줄어들기 때문에 무리한 가정은 아니라고 판단된다. 그러나 추후 유효거리를 고려한 기존 연구와 차별화된 공간적 파급효과 계측은 필요하며 후속연구를 진행하고 있다.

4 시군별 역거리 공간가중행렬 구성 시 거리는 시군별 관찰포 위치가 정확히 파악되는 경우 해당 관찰포 위치를 사용하고, 관찰포 위치를 정확히 파악하기 어려운 경우 해당 시군의 중앙점을 기준으로 하였다. 1995년부터 2015년까지 전 기간에 걸쳐 관찰포 기록이 존재하는 135개 시군을 대상으로 하였으므로, 공간가중행렬은 모든 연도에서 동일하게 적용하였다.

고 행렬의 요소별 곱, 계수를 의미한다.

위 식 (7)의 한계효과는 전체효과로서 이는 직접효과와 간접효과(공간적 파급효과)로 나뉜다. 식 (7)의 대각요소(diagonal elements)의 평균을 평균 직접효과(Average direct effect)라고 하며, 이는 특정 지점에서의 설명변수 변화가 직접적으로 병해충 피해율의 변화에 미치는 영향을 의미한다. 또한 비대각요소(off-diagonal elements)의 평균을 평균 간접효과(Average indirect effect)라고 하며, 이는 주변지역에서의 설명변수의 변화로 인해 발생한 병해충 피해율의 변화가 간접적으로 특정 지점의 병해충 피해율에 영향을 주는 정도, 즉 공간적 파급효과(spatial spillover effect)로 해석할 수 있다. 전체효과는 직접효과와 간접효과를 합친 것을 의미한다.

4. 분석 결과

4.1. 피해모형 분석

기후변화에 따른 병해충 피해발생을 설명하기 위한 피해모형은 기온·습도·강수량 등 기후변수와 병해충 피해율 간의 관계를 추정하여 이를 병해충별 발생 및 생육조건과 연계하여 분석하고, 공간적 종속성도 함께 고려함으로써 정확하게 도출할 수 있다.

피해모형 분석에서 앞서, 벼 병해충별로 공간분석을 실시한 공간모형과 실시하지 않은 일반모형 간 예측정확성 정도를 서로 비교하여 병해충 모형에 대한 공간분석의 타당성을 검증하고자 한다. 모형 선택의 세 가지 기준을 비교한 결과 공간종속모형이 일반모형보다 모형의 적합도 측면에서 더 우수한 것으로 나타났으며 이는 <표 5>와 같다.

표 5. 벼 병해충별 공간분석의 타당성 검증결과

	공간모형(Spatial model)			일반모형(Non-Spatial model)		
	Log-likelihood	AIC	BIC	Log-likelihood	AIC	BIC
LB	-381.4	780.8	836.3	-396.2	810.3	865.8
SB	-4,884.9	9,789.8	9,851.4	-5,111.8	10,243.5	10,305.2
STR	-186.1	388.2	437.5	-180.2	376.4	425.7
SBP	-3,733.9	7,497.8	7,590.3	-3,823.6	7,677.2	7,769.7
RWW	-799.2	1,618.4	1,680.0	-815.1	1,650.1	1,711.8
RLR	-2,794.2	5,608.4	5,670.0	-2,989.2	5,998.5	6,060.1

주 1) LB, Leaf Blast(잎도열병); SB, Sheath Blight(잎집무늬마름병); STR, Stripe(줄무늬잎마름병); SBP, Small Brown Planthopper(애멸구); RWW, Rice Water Weevil(벼물바구미); RLR, Rice Leaf Roller(흑명나방).

2) Log-likelihood, AIC(Akaike Information Criterion), BIC(Bayesian information criterion)는 모형의 적합도를 비교할 수 있는 척도이며, RMSE, AIC, BIC는 작을수록 모형의 적합도가 높으며, Log-likelihood는 클수록 모형의 적합도가 높다(Babu and Rao 2004; Bhatti, Ai-Shanfari, and Hossain 2006).

다음으로 벼 병해충별로 피해율과 기후변수 간 관계를 살펴본 후, 한계효과<표 5~11> 및 탄력성 <부표 1>을⁵ 통해 직접효과와 간접효과로 구분한 공간적 종속성 분석 결과를 도출한다.

4.1.1. 잎도열병(Leaf blast)

잎도열병 피해율의 분석 결과는 <표 6>에 제시한 바와 같이 7월의 기온과 강수계속시간이 유의하게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 전체한계효과를 기준으로 7월 기온이 1°C 상승하면 잎도열병 피해율이 0.02%p 감소하며, 7월 강수계속시간이 1시간 증가하면 피해율이 0.0037%p 증가하는 것으로 나타났다. 이는 앞서 설명한 것처럼 벼가 여름철 저온과 일조 부족, 강수로 인해 이슬이 마르지 않고 장기간 지속되는 등 연약한 상황에서 많이 발생하는 잎도열병의 성장요건에 부합하는 결과라고 생각되며, 잎도열병으로 인한 벼 피해율에 기후조건이 미치는 영향 정도인 한계효과는 공간적 종속성을 고려하지 않은 일반모형보다 공간모형에서 더 높게 나타났다. 또한 공간시차변수의 계수인 ρ 가 유의하게 0보다 컸는데, 이는 주변지역의 잎도열병 피해율 증가가 특정지역의 잎도열병 피

5 <부표 1>에서는 기후요소 변화에 따른 병해충 피해율의 탄력성을 제시하였는데, 이는 병해충 피해율의 한계효과가 대부분 0에 가까워 기후요소 변화가 병해충 피해율에 미치는 영향이 매우 작아 보이는 문제가 있어, 탄력성으로 환산하여 실제 기후요소 변화가 병해충 피해율에 미치는 영향이 결코 작지 않음을 알려주기 위함이다.

해율을 증가시킴을 의미한다. 따라서 한계효과를 직접효과와 간접효과로 나누어 보면 62.4%의 직접효과와 37.6%의 간접효과로 나타나, 비록 직접효과가 간접효과보다 더 높았지만 주변지역의 기온상승에 따른 간접적인 피해율 변화도 상당부분 존재함을 알 수 있다.

표 6. 잎도열병 피해모형 추정결과

Variable	Coefficient (Std.err)	Marginal Effect			Marginal Effect of Non spatial
		Total	Direct	Indirect	
Avg Temp of July	-0.02075*** (0.00280)	-0.0205	-0.0128	-0.0077	-0.01048*** (0.00122)
Humidity of July	-0.00060 (0.00066)	-0.0006	-0.0004	-0.0002	0.00010 (0.00029)
Rainfall of July	-0.00001 (0.00002)	-0.00001	-0.000006	-0.000004	-0.00001 (0.00001)
Sunshine of July	0.00013 (0.00009)	0.00013	0.00008	0.00005	0.00006 (0.00003)
Rain Duration of July	0.00371*** (0.00116)	0.0037	0.0023	0.0014	0.00212*** (0.00051)
cons	0.46894*** (0.09487)	-	-	-	-
ρ	0.38187*** (0.04479)	-	-	-	-
σ	-0.18448*** (0.00305)	-	-	-	-

주: *, **, ***는 각각 10%, 5%, 1%의 유의수준에서 통계적으로 유의함.

4.1.2. 잎집무늬마름병(Sheath blight)

잎집무늬마름병 피해율에 대한 분석 결과를 살펴보면 <표 7>과 같다. 7월 기온이 1°C 증가하면 잎집무늬마름병 피해율은 0.045%p 증가하고, 7월에 일조시간이 1시간 증가하면 피해율은 0.0013%p 감소하고 매년 병해충이 감소하는 것으로 나타나 기술진보의 효과가 있는 것으로 나타났다. 잎집무늬마름병은 한여름인 7~8월에 기온이 높고 습한 조건에서 많이 발병하기 때문에 이러한 추정결과가 현실을 잘 반영하고 있는 것으로 보이며, 연도변수를 제외한 모든 기후요인과 잎집무늬마름병 간의 한계효과가 일반모형에 비해 공간모형에서 더 높게 나타났다. 공간시차변수의 계수도 양의 값으로 유의하게 영향을 미치며, 기온과 일조시간에 대한 직접효과와 간접효과가 각각 67.2%, 32.8%로, 직접효과가 더 높게 나타났다.

표 7. 잎집무늬마름병 피해모형 추정결과

Variable	Coefficient (Std.err)	Marginal Effect			Marginal Effect of Non spatial
		Total	Direct	Indirect	
Avg Temp of July	0.04543*** (0.01370)	0.0451	0.0303	0.0148	0.04111*** (0.01224)
Humidity of July	-0.00217 (0.00326)	-0.0022	-0.0014	-0.0007	-0.00032 (0.00293)
Rainfall of July	-0.00015 (0.00012)	-0.00015	-0.0001	-0.00005	-0.00016 (0.00009)
Sunshine of July	-0.00133*** (0.00047)	-0.0013	-0.0009	-0.0004	-0.00132*** (0.00037)
Rain Duration of July	0.00430 (0.00636)	0.0043	0.0029	0.0014	-0.00296 (0.00566)
year	-0.05191*** (0.00402)	-0.0515	-0.0346	-0.0169	-0.06331*** (0.00226)
cons	103.9098*** (8.05647)	-	-	-	-
ρ	0.33389*** (0.03899)	-	-	-	-
σ	-0.99854*** (0.01237)	-	-	-	-

주: *, **, ***는 각각 10%, 5%, 1%의 유의수준에서 통계적으로 유의함.

4.1.3. 줄무늬잎마름병(Stripe)

다음으로 줄무늬잎마름병 피해율의 분석 결과를 살펴보면 <표 8>과 같다.⁶

표 8. 줄무늬잎마름병 피해모형 추정결과

Variable	Coefficient (Std.err)	Marginal Effect			Marginal Effect of Non spatial
		Total	Direct	Indirect	
Avg Temp of July	0.00227 (0.00170)	0.00224	0.00194	0.00030	0.00061 (0.00188)
Humidity of July	0.00093*** (0.00041)	0.00091	0.00079	0.00012	0.00037 (0.00045)
Rainfall of July	0.00003** (0.00001)	0.00003	0.000026	0.000004	0.000028** (0.000014)
Sunshine of July	-0.00014** (0.00006)	-0.00012	-0.00010	-0.00002	-0.00017** (0.000063)
Predicted Avg SBP Damage Rate	0.01861*** (0.00330)	0.01855	0.01606	0.00249	0.01578*** (0.00334)
cons	-0.21854*** (0.05967)	-	-	-	-
ρ	0.13399** (0.06396)	-	-	-	-
λ	0.02084 (0.06504)	-	-	-	-
σ	-0.05689*** (0.00350)	-	-	-	-

주: *, **, ***는 각각 10%, 5%, 1%의 유의수준에서 통계적으로 유의함.

<표 8>에서 줄무늬잎마름병 피해율의 분석 결과를 보면, 전체한계효과를 기준으로 먼저 7월 상대습도의 1%p 증가는 줄무늬잎마름병 피해율을 0.0009%p 증가시키는 것으로 나타났다. 그 외 강수량의 1mm 증가는 피해율 0.00003%p 증가, 일조시간의 1시간 증가는 피해율 0.00012%p 감소로 이어졌으며, 이처럼 줄무늬잎마름병의 발생조건은 다른 병해처럼 습도가 높을 때 발병확률이 증가했으며, 줄무늬잎마름병을 매개하는 애벌레 피해율의 예측값(predicted value)을 변수로 넣은 결

6 줄무늬잎마름병의 추정결과 λ 의 추정치가 유의하지 않은 것으로 나타나 공간종속모형(SAC) 대신에 공간사차모형(SLM)이 타당하다는 결론이 나올 수 있으나, 모형의 적합도 비교 결과 공간종속모형이 미세하게 우수한 것으로 나타나 현재의 분석 결과를 사용하였다. 그러나 모형 선택에 있어서 robust spatial LM 검정을 실시하여 적합한 모형을 선택할 필요가 있음을 밝힌다.

과도 그 계수값이 양으로 유의하게 나오기 때문에, 앞서 언급한 줄무늬잎마름병 성장요건과 추정결과가 일치하는 것으로 보인다.⁷ 또한 일반모형에서 유의하지 않은 상대습도변수를 제외하고 기후요인이 줄무늬잎마름병 피해율에 미치는 영향은 공간분석을 하지 않은 일반모형보다 공간모형에서 더 높은 것으로 나타났으며, 유의한 변수들에 대한 직접효과가 86.5%, 간접효과가 13.5%로 나타나면서 직접효과의 비중이 다른 병해충에 비해 더 큰 것으로 나타났다.

4.1.4. 애멸구(Small brown planthopper)

<표 9>에서 애멸구에 대한 피해율 추정결과를 살펴보면, 연도변수의 계수가 음의 부호로 나타나 기술진보의 효과가 존재하는 것으로 나타났다. 한계효과를 보면 증식기인 6월 기온이 1°C 상승할 때 애멸구 피해율이 0.27%p, 6월 상대습도가 1% 상승할 때는 0.095%p 증가하였고, 동절기인 12월 기온과 상대습도가 각각 한 단위씩 상승할 때에도 애멸구 피해율이 각각 0.6%p, 0.03%p씩 증가하는 것으로 나타났다. 결과적으로 다습한 조건이 애멸구 발생에 영향을 주며, 앞서 애멸구의 발생요건에서 말했듯이 기본적으로 멸구류는 매개충증식기인 6월이 고온일 때 주로 발생하였다. 특히 애멸구는 다른 멸구류와 달리 약충 상태로 국내에서 월동기를 보내기 때문에 동절기 기온이 상승하는 조건에서도 많이 발생할 수 있어 이와 같은 결과가 현실을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 공간분석을 실시한 공간모형과 그렇지 않은 일반모형을 비교해보면 부호가 반대이거나 유의하게 영향을 미치는 기후변수가 서로 다르기도 했으며, 공간모형이 일반모형보다 더 큰 한계효과를 보여주었다. 또한 직접효과와 간접효과의 비중으로 봤을 때 직접효과와 간접효과가 각각 61%, 39%로 나타나 병해에 비해 간접효과가 차지하는 비중이 높았다.

7 줄무늬잎마름병 피해모형 구축에 있어서, 애멸구가 줄무늬잎마름병을 매개하는 해충이며, 애멸구도 여러 기후요인에 영향을 받고 있기 때문에, 다음 <표 9>에서 제시된 애멸구 피해모형을 통해 추정된 애멸구 피해율의 예측값을 줄무늬잎마름병의 피해모형에 사용한 2단계 추정모형을 사용하여 구하였다. 익명의 심사자의 제안에 감사드린다.

표 9. 애멸구 피해모형 추정결과

Variable	Coefficient (Std.err)	Marginal Effect			Marginal Effect of Non spatial
		Total	Direct	Indirect	
Avg Temp of June	0.27820*** (0.10061)	0.2749	0.1678	0.1071	-0.04849 (0.03091)
Humidity of June	0.09618*** (0.01887)	0.095	0.058	0.037	0.01569*** (0.00526)
Rainfall of June	-0.00004 (0.00116)	-0.00004	-0.000024	-0.000016	0.00021 (0.00028)
Sunshine of June	0.00232 (0.00283)	0.0023	0.0014	0.0009	0.00207*** (0.00073)
Rain Duration of June	0.00657 (0.04563)	0.0065	0.004	0.0025	0.01728 (0.01101)
Avg Temp of Dec	0.60861*** (0.04953)	0.6013	0.367	0.2343	0.03339* (0.01717)
Humidity of Dec	0.03227** (0.01345)	0.0319	0.0195	0.0124	0.00080 (0.00389)
Rainfall of Dec	0.00516 (0.00566)	0.0051	0.0031	0.002	0.00110 (0.00135)
Sunshine of Dec	0.00213 (0.00418)	0.0021	0.0013	0.0008	-0.00199* (0.00113)
Rain Duration of Dec	-0.03228 (0.04801)	-0.0319	-0.0195	-0.0124	0.00708 (0.01139)
year	-0.08472*** (0.01801)	-0.0837	-0.0511	-0.0326	-0.01573*** (0.00443)
cons	149.525*** (35.4102)	-	-	-	-
ρ	0.39702*** (0.04785)	-	-	-	-
σ	-4.33489** (0.10796)	-	-	-	-

주: *, **, ***는 각각 10%, 5%, 1%의 유의수준에서 통계적으로 유의함.

4.1.5. 벼물바구미(Rice water weevil)

벼물바구미 또한 기술진보효과가 존재하는 것으로 나타났으며, 벼물바구미 피해율에 대한 6월 기온과 상대습도의 한계효과를 보면 기온과 상대습도가 각각 한 단위 증가했을 때 0.024%p, 0.0049%p 감소하는 것으로 나타났다. 습도에도 영향을 받고 온도가 증가할수록 피해율 발생이 감소하는 추정결과에 따라 초기저온성해충인 벼물바구미의 생장요건을 잘 반영한다고 판단되며, 벼물바구미 피해율에 기후요인이 미치는 영향 정도도 일반모형보다 공간모형에서 더 높았다. 또한 공

간시차변수의 계수가 양의 값으로 유의했으며, 이에 따른 한계효과를 구분해서 살펴보면 직접효과가 49.4%, 간접효과가 50.6%로 간접효과가 직접효과보다 더 큰 결과로 나타났다. 벼물바구미에 대한 추정결과는 <표 10>과 같다.

표 10. 벼물바구미 피해모형 추정결과

Variable	Coefficient (Std.err)	Marginal Effect			Marginal Effect of Non spatial
		Total	Direct	Indirect	
Avg Temp of June	-0.02457*** (0.00436)	-0.0241	-0.0119	-0.0122	-0.01288*** (0.00275)
Humidity of June	-0.00497*** (0.00081)	-0.0049	-0.0024	-0.0025	-0.00269*** (0.00048)
Rainfall of June	0.00002 (0.00005)	0.00002	0.000009	0.000011	0.00002 (0.00003)
Sunshine of June	0.00005 (0.00012)	0.00005	0.000024	0.000026	0.00007 (0.00006)
Rain Duration of June	0.00008 (0.00167)	0.00008	0.00004	0.00004	-0.00039 (0.00096)
year	-0.00273*** (0.00082)	-0.0027	-0.0013	-0.0014	-0.00257*** (0.00044)
cons	6.16033*** (1.62510)	-	-	-	-
ρ	0.51671*** (0.03879)	-	-	-	-
σ	-0.24160*** (0.00373)	-	-	-	-

주: *, **, ***는 각각 10%, 5%, 1%의 유의수준에서 통계적으로 유의함.

4.1.6. 흑명나방(Rice leaf roller)

마지막으로 흑명나방 피해율에 대한 분석 결과는 <표 11>을 통해 확인할 수 있다.

표 11. 흑명나방 피해모형 추정결과

Variable	Coefficient (Std.err)	Marginal Effect			Marginal Effect of Non spatial
		Total	Direct	Indirect	
Avg Temp of July	0.01548* (0.00842)	0.0147	0.0043	0.0104	-0.01190** (0.00538)
Humidity of July	0.00875*** (0.00196)	0.0083	0.0024	0.0059	0.00541*** (0.00128)
Rainfall of July	-0.00003 (0.00007)	-0.00003	-0.000009	-0.000021	0.00005 (0.00004)
Sunshine of July	-0.001002*** (0.00029)	-0.0009	-0.0003	-0.0007	-0.00065*** (0.00017)
Rain Duration of July	0.00221 (0.0038)	0.0021	0.0006	0.0015	-0.00587** (0.00248)
year	-0.01365*** (0.00177)	-0.0129	-0.0038	-0.0092	-0.01211*** (0.00105)
cons	26.20330*** (3.50460)	-	-	-	-
ρ	0.72482*** (0.02729)	-	-	-	-
σ	-0.55969*** (0.0083)	-	-	-	-

주: *, **, ***는 각각 10%, 5%, 1%의 유의수준에서 통계적으로 유의함.

흑명나방 또한 연도에 따라 감소하여 기술진보의 효과가 유의하게 존재하는 것으로 나타났다. 주요 변수의 한계효과를 살펴보면 7월 기온과 상대습도의 각각 한 단위 증가가 흑명나방 피해율을 0.015%p, 0.008%p 증가시키고, 7월 일조시간의 1시간 증가는 피해율을 0.0009%p 감소시킨다. 추정결과를 보면 흑명나방은 다습한 조건에도 많이 발생하는 것으로 나타났으며, 6월 중하순부터 7월 하순까지 중국에서부터 늦게 날아오는 이 시기의 온도가 상승할수록 생존율이 높아지는 것으로 예상되므로, 추정된 결과가 흑명나방이 발생하는 기후조건에 부합하는 것으로 보인다. 공간모형과 일반모형을 비교해보면 기온변수는 두 모형 모두 유의했지만 부호가 반대였고 일반모형에서 강수 계속시간이 유의미한 결과로 나타나기도 하였으며, 다른 병해충의 경우처럼 한계효과가 공간모형

에서 더 높게 나타났다. 또한 공간시차변수의 계수도 양의 값으로 나타났으며, 직접효과(29%)에 비해 간접효과(71%)의 비중이 상당히 높았는데, 이는 주변지역의 흑명나방 피해율 증가가 특정지역의 흑명나방 피해율을 증가시키는 정도가 매우 강한 것을 의미한다.

전반적으로 간접효과의 강도는 병해보다는 해충의 피해에서 더 크게 나타났는데, 이는 해충이 병해보다 이동성이 강하기 때문으로 사료된다.

5. 결론 및 시사점

변화하는 기후에 따라 병해충 발생을 정확하게 예측하고 피해를 최소화하는 데 어려움이 따르는 최근 상황에서, 기온·습도·강수량 등으로 대표되는 기후요인을 포함하면서도 병해충 공간적 확산 여부를 분석하여 이를 반영한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 이 연구를 통해 병해충의 공간적 종속성을 고려하여 발생조건이 각기 다른 병해충별로 특징을 사전적으로 검토한 후 기후요인의 변화에 어떠한 영향을 받는지 분석하고, 주요 변수가 병해충 피해에 미치는 직접효과와 공간적 파급효과를 나타내는 간접효과를 제시하였다.

분석 결과를 보면 잎도열병·잎집무늬마름병·줄무늬잎마름병의 병해는 공통적으로 일조시간 감소, 상대습도 증가, 강수시간계속 등 다습한 상황에서 많이 발생하며, 애멸구·벼물바구미·흑명나방의 해충은 월동기를 포함한 이동시기와 증식기의 고온에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한 벼물바구미를 제외한 해충은 서식환경 습도가 높을 때도 발생하였다.

앞서 병해충 발생현황을 보면 매년 감소하는 병해충이 존재하는 것으로 나타났는데, 연도변화에 따른 병해충 피해율 추정결과로 미루어볼 때 기술진보의 효과가 긍정적으로 존재함을 알 수 있었다. 그럼에도 불구하고 특정 기후요인에 따른 병해충 발생이 통계적으로 유의하게 나타나면서 그 영향력이 존재하기 때문에, 기술연구개발의 투자확대뿐만 아니라 향후 기후변화에 대비하여 정밀한 지역별 기후예측을 통해 병해충별로 좀 더 효율적인 방제와 시비가 필요하다고 판단된다.

벼 병해충 피해율에 대한 공간적 종속성이 모든 병해충에서 유의하게 존재하는 것으로 나타났으며, 공간적 종속성을 고려한 병해충 피해모형이 공간적 종속성을 고려하지 않은 모형보다 모형의

적합도가 더 높은 것으로 확인되었다. 또한 실제 벼 병해충 성장요건에 부합하는 기후요인들과 병해충 피해율의 관계는 공간적 종속성을 고려한 모형에서 더 유의하게 나타났으며, 기후요인이 벼 병해충 피해율에 미치는 영향 정도를 나타내는 한계효과의 경우, 공간적 종속성을 고려한 모형이 그렇지 않은 모형에 비해 더 높게 나타났다. 이는 병해충 피해의 공간적 종속성에 의한 파급효과(간접효과)가 모형에 고려된 결과로 판단된다.

한편 병해보다 해충피해의 공간적 파급효과(간접효과)가 상대적으로 더 높았으며, 특히 벼물바구미와 흑명나방의 경우 직접효과보다 간접효과가 더 높은 결과를 보여주었다. 이는 해충의 이동성이 공간적 파급효과를 더욱 크게 하는 것으로 판단된다. 따라서 병해충 발생이 공간적으로 종속되어 특정지역의 병해충 발생이 주변지역 병해충 피해율을 높이기 때문에, 초기 방제의 중요성이 강조되며, 초기 방제가 잘 이루어질 경우 다른 주변 지역의 병해충 피해와 방제부담을 줄일 수 있을 것이다. 따라서 병해충 종류별로 초기 발병 시 신속히 대응하여 확산을 막기 위한 초기 방제 매뉴얼의 작성과 보급이 매우 효과적일 것으로 생각된다.

이 연구는 병해충이 공간적으로 확산되는 특성을 고려하여 기후요인과 병해충 피해율 간의 관계를 파악함으로써 좀 더 현실을 반영하는 피해모형을 도출할 수 있었다는 점에 의의가 있다. 그러나 사람이나 바람 등 병해충을 확산시키는 매개역할에 대한 분석이 이루어지지 않았으며, 최근 빈번하게 나타나고 있는 돌발병해충을 다루지 않은 것도 이 연구의 한계라고 할 수 있다. 따라서 병해충이 공간적으로 종속되어있는 특징을 효율적으로 분석하기 위해서는 병해충 확산의 매개체와 병해충별 이동패턴에 대한 내용을 전문가의 견해와 문헌을 참고하여 추가적으로 연구할 필요가 있다. 또한 벼 관찰포의 실제 위치가 아닌 시군 단위로 공간적 종속성을 고려하였다는 점, 벼 병해충 피해모형에서 지역별 품종의 차이에 의한 피해 정도의 차이가 발생할 수 있다는 점을 고려하지 않고 단지 지역별 이분산성의 가능성만 고려하였다는 점, 병해충 피해 해소를 위한 기술적인 노력을 연도변수로만 고려하였다는 점에서 한계가 있으며, 향후 자료구축 등 추가적인 모형의 개선노력이 필요하다.

끝으로 분석 결과를 통해 기후변화 및 공간적 종속성이 벼의 병해충 피해발생에 미치는 영향과 병해충별로 피해의 공간적 파급효과 정도를 파악하는 데 기여하고 있지만, 병해충 피해를 벼 생산 함수로 연결시키는 것과 관련된 경제적인 분석은 진행되지 않았다는 점에서 한계가 있다. 추후 연구에서는 벼의 병해충 발생이 벼의 생산에 실질적으로 어떠한 영향을 미치는지 파악할 계획이며, 이에 따라 의미 있고 폭넓은 정책적 시사점을 제시할 수 있을 것이다.

참고 문헌

- 국립환경과학원. 2011. 『한국 기후변화 평가보고서 2010 - 기후변화 영향 및 적응』.
발간등록번호 11-1480523-000707-01. p. 463.
- 국립환경과학원. 2015. 『한국 기후변화 평가보고서 2014 - 기후변화 영향 및 적응』.
발간등록번호 11-1480523-002031-01. p. 157.
- 기상청. 2012. 『한반도 기후변화 전망보고서』. p. 151.
- 기상청 기상자료개방포털. 종관기상관측자료. <<https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>>. 접속일: 2017. 3. 7.
- 김관원. 2018. 『공간계량기법을 이용한 기후변화가 벼 병해충 피해에 미치는 영향 분석』. 경상대학교 석사학위 논문.
p. 42.
- 김관원, 김태영. 2017. “공간적 종속성을 고려한 기후변화가 벼 병해충 발생에 미치는 영향 분석.” 『2017년 한국농식
품정책학회 하계학술대회 논문집』. pp. 891-914.
- 김영호. 2010. “기후변화에 대한 농수산분야의 현황과 대책(병리분야).” 『기후변화에 대한 농수산학 분야의 현황과
대책』. 연구보고서 66. pp. 61-106. 한국과학기술한림원.
- 김용준, 정진교, 안동환. 2017. “병해충의 공간자기상관을 고려한 인삼 피해함수 추정.” 『농촌경제』 제40권 제4호. pp.
75-95.
- 김용준, 안동환. 2017. “병해충의 동시발생을 고려한 경제적 방제수준 설정.” 『2017년 한국농업경제학회 하계학술대
회 논문집』. pp. 710-723.
- 김태영, 안경애. 2014. “WTO 무역원활화가 양국간 무역에 미치는 영향- 공간중력모형을 이용한 분석.” 『한국무역학
회』 제39권 제5호. pp. 161-183.
- 김창길, 박현태, 이상민, 주현정, 권오상, 로버트멘델존. 2008. 『기후변화에 따른 농업부문 영향분석』. R565. pp.
89-94. 한국농촌경제연구원.
- 노재선, 권오상, 조승현. 2012. “기후변수와 쌀 단수간의 인과성 및 이상기후가 쌀 단수에 미치는 영향분석.” 『농업경
제연구』 제53권 제1호. pp. 21-39.
- 농촌진흥청. 2006. 2006년도 농작물 병해충 예찰 방제보고서. 발간번호 11-1390000-001007-10. pp. 138.
- 농촌진흥청. 2009. 2009년도 농작물 병해충 예찰 방제보고서. 발간번호 11-1390000-001007-10. pp. 52, 102.
- 농촌진흥청. 2011. 2011년도 농작물 병해충 예찰 방제보고서. 발간번호 11-1390000-001007-10. p. 79.
- 농촌진흥청. 2016. 『농작물 병해충예찰 방제 요강』. pp.48-49.
- 농촌진흥청 재해대응과 국가 농작물 병해충 시스템 내부자료.
- 신정욱, 윤성철. 2011. “한국의 2011-2100년 기후변화가 고추 탄저병 살균제 살포에 미치는 영향.” 『한국농림기상학
회』 제13권 제1호. pp. 10-19.
- 이범우. 2010. “기후변화에 대한 농수산분야의 현황과 대책(병리분야).” 『기후변화에 대한 농수산학 분야의 현황과
대책』. 연구보고서 66. p. 48. 한국과학기술한림원.
- 정학균, 김창길, 문동현. 2014. “기후변화가 벼 병해충 피해면적 발생에 미치는 영향분석.” 『한국환경농학회』 제33권
제1호. pp. 52-56.
- Anselin, L.. 1988. *Spatial Econometrics: Methods and Models*. Kluwer, Dordrech.
- Babu, G. J., and Rao, C. R.. 2004. Goodness-of-fit tests when parameters are estimated. *Sankhy* a. vol. 66, no. 1, pp.
63-74.

- Bhatti, M.I., H. Ai-Shanfari, M.Z. Hossain. 2006. *Econometric Analysis of Model Selection and Model Testing*. Ashgate Publishing Limited, England.
- Cannon, R.J.C.. 1998. "The implications of predicted climate change for insect pests in the UK, with emphasis on non-indigenous species." *Global Change Biology*. vol. 4, no. 7, pp. 785-796.
- Challinor, A., J. Watson, D. Lobell, S. Howden, D. Smith, and N. Chhetri. 2014. A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. *Nat Clim Change* vol. 4, no. 4, pp. 287-291.
- Deutsch, A.A., J.J. Tewksbury, R.B. Huey, K.S. Sheldon, C.K. Ghalambor, D.C. Haak and P.R. Martin. 2008. "Impacts of climate warming on terrestrial ectotherms across latitude." *PNAS*. vol. 105, no. 18, pp. 6668-6672.
- IPCC. 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.
- LeSage, J.P., and R.K. Pace. 2009. *Introduction to spatial econometrics*, Chapman & Hall/CRC.
- Rao, G.G.S.N., A.V.M.S. Rao, and V.U.M. Rao. 2009. "Trends in rainfall and temperature in rainfed India in previous century, In: *Global climate change and Indian Agriculture case studies from ICAR network project*, (Ed.: PK Aggarwal)." ICAR Publication New Delhi. pp. 71-73.
- Kim, T.Y. and C. Langpap. 2016. "Agricultural Landowners' Response to Incentives for Afforestation." *Resource and Energy Economics*. vol. 43, pp. 93-111.
- Wooldridge, J.M.. 2010. *Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data*, 2nd ed. The MIT Press.

원고 접수일: 2018년 2월 7일
원고 심사일: 2018년 2월 9일
심사 완료일: 2018년 3월 20일

부표 1. 병해충별 피해율과 설명변수 간 탄력성

병해충 종류	변수명	탄력성		
		전체효과 (Total effect)	직접효과 (Direct effect)	간접효과 (Indirect effect)
잎도열병	Avg Temp of July	-18.243	-11.402	-6.8413
	Humidity of July	-1.6986	-1.0616	-0.637
	Rainfall of July	-0.1366	-0.0854	-0.0512
	Sunshine of July	0.672	0.42	0.252
	Rain Duration of July	0.5729	0.3581	0.2149
잎집무늬 마름병	Avg Temp of July	1.0484	0.7041	0.3443
	Humidity of July	-0.1613	-0.1084	-0.053
	Rainfall of July	-0.0415	-0.0279	-0.0136
	Sunshine of July	-0.1872	-0.1258	-0.0615
	Rain Duration of July year	0.0174 -97.161	0.0117 -65.253	0.0057 -31.907
줄무늬 잎마름병	Avg Temp of July	52.987	45.957	7.0293
	Humidity of July	83.106	72.081	11.025
	Rainfall of July	8.9146	7.7319	1.1826
	Sunshine of July	-19.113	-16.577	-2.5355
	Avg SBP Damage Rate	0.9844	0.8538	0.1306
애멸구	Avg Temp of June	10.699	6.5291	4.1693
	Humidity of June	12.452	7.5991	4.8526
	Rainfall of June	-0.0117	-0.0071	-0.0046
	Sunshine of June	0.7572	0.4621	0.2951
	Rain Duration of June	0.0537	0.0328	0.0209
	Avg Temp of Dec	1.2059	0.7359	0.4699
	Humidity of Dec	3.7738	2.3031	1.4707
	Rainfall of Dec	0.2523	0.154	0.0983
	Sunshine of Dec	0.616	0.3759	0.2401
	Rain Duration of Dec year	-0.2023 -303.65	-0.1235 -185.31	-0.0788 -118.33
벼물바구미	Avg Temp of June	-5.7105	-2.8217	-2.8888
	Humidity of June	-3.8858	-1.9201	-1.9657
	Rainfall of June	0.0383	0.0189	0.0194
	Sunshine of June	0.0949	0.0469	0.048
	Rain Duration of June	0.0042	0.0021	0.0021
	year	-59.184	-29.244	-29.939
흑명나방	Avg Temp of July	1.6534	0.4803	1.1731
	Humidity of July	3.0078	0.8738	2.134
	Rainfall of July	-0.0393	-0.0114	-0.0279
	Sunshine of July	-0.6545	-0.1901	-0.4643
	Rain Duration of July year	0.0414 -118.26	0.012 -34.355	0.0294 -83.899