

HYSPLIT 모형 입력설정에 따른 바람 이동경로 예측 결과 공간 분석

김광수^{1,2*}, 이승재³, 박진유²

¹서울대학교 농림생물자원학부, ²서울대학교 농업생명과학연구원, ³국가농림기상센터
(2021년 11월 16일 접수; 2021년 12월 29일 수정; 2021년 12월 29일 수락)

Spatial Analysis of Wind Trajectory Prediction According to the Input Settings of HYSPLIT Model

Kwang Soo Kim^{1,2*}, Seung-Jae Lee³, Jin Yu Park²

¹Department of Agriculture, Forestry and Bioresources, Seoul National University

²Research Institute Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

³National Center for AgroMeteorology

(Received November 16, 2021; Revised December 29, 2021; Accepted December 29, 2021)

ABSTRACT

Airborne-pests can be introduced into Korea from overseas areas by wind, which can cause considerable damage to major crops. Meteorological models have been used to estimate the wind trajectories of airborne insects. The objective of this study is to analyze the effect of input settings on the prediction of areas where airborne pests arrive by wind. The wind trajectories were predicted using the HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) model. The HYSPLIT model was used to track the wind dispersal path of particles under the assumption that brown plant hopper (*Nilaparvata lugens*) was introduced into Korea from sites where the pest was reported in China. Meteorological input data including instantaneous and average wind speed were generated using meso-scale numerical weather model outputs for the domain where China, Korea, and Japan were included. In addition, the calculation time intervals were set to 1, 30, and 60 minutes for the wind trajectory calculation during early June in 2019 and 2020. It was found that the use of instantaneous and average wind speed data resulted in a considerably large difference between the arrival areas of airborne pests. In contrast, the spatial distribution of arrival areas had a relatively high degree of similarity when the time intervals were set to be 1 minute. Furthermore, these dispersal patterns predicted using the instantaneous wind speed were similar to the regions where the given pest was observed in Korea. These results suggest that the impact assessment of input settings on wind trajectory prediction would be needed to improve the reliability of an approach to predict regions where airborne-pest could be introduced.

Key words: Wind trajectory, Long distance dispersal, Jet stream, Airborne insects, HYSPLIT model



* Corresponding Author : Kwang Soo Kim
(luxkwang@snu.ac.kr)

I. 서 언

주요 작물에 피해를 유발하는 해충들의 일부는 바람에 의해 해외에서 유입된다(Bae *et al.*, 1994; Kim *et al.*, 2019). 이러한 비래해충들은 하층 제트(low level jet)에 의해 중국 남부 지역과 같이 월동이 가능한 저위도 지역에서 한반도 또는 일본에 도달하는 것으로 알려져있다(Park *et al.*, 2018). 주로, 벼에 피해를 입히는 주요 해충인 벼멸구(*Nilaparvata lugens*)와 애멸구(*Laodelphax striatellus*) 등이 바람에 의해 유입된다(Son *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2016). 비래해충이 발생할 경우, 천적에 의한 자연적인 밀도 감소 및 대발생 억제에 한계가 있다(Park *et al.*, 2005). 따라서, 화학적 방제와 작물 재배관리를 포함하는 통합적인 해충 방제가 필요하지만, 비래해충이 국내에 도달하는 시점과 공간적 분포는 기류의 특성에 따라 상당한 차이가 발생하기 때문에 해충발생의 시공간적인 범위를 사전에 파악하기 어렵다(Park *et al.*, 2018b).

바람에 의한 생물체들의 장거리 이동 경로를 추정하여 비래해충이 작물 재배 지역에 도착하는 지역을 예측할 수 있는 모형들이 개발되어 왔다(Walters *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2016). 국내에서는 중국에서 비래하는 해충의 국내 도착 시기 및 이동경로를 예측하기 위한 BLayer 모형이 개발되었다(Turner *et al.*, 1999). 이 모형은 국가농작물병해충 관리시스템(National Crop Pest Management System, NCPMS)에 탑재되어 비래해충의 돌발 발생 양상 정보를 생산하기 위해 사용되고 있다. Otuka *et al.*(2005)와 Outka *et al.* (2012)는 벼멸구가 중국에서 일본으로 이동하는 경로를 추정하기 위한 모형을 보고하였다. 한편, Draxler and Hess (1997)가 개발한 HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) 모형이 바람에 의한 병해충 이동을 예측하기 위해 사용되고 있다. Kim and Beresford (2008)은 HYSPLIT 모형을 활용하여 밀 줄기녹병의 병원균인 *Puccinia striiformis*의 포자가 바람에 의해 호주에서 뉴질랜드로 이동한 것으로 보고하였다. Lander *et al.*(2014)는 HYSPLIT 모형을 사용하여 프랑스에서 국지적으로 이동하는 말벌(*Megastigmus schimitscheki*)의 이동경로를 추정하였다.

바람의 이동경로를 추정하는 모형들은 일반적으로 수치기상모형의 출력자료들을 기상 입력자료로 사용한다. Otuka *et al.*(2012)는 중규모 수치기상 모델인 MM5의 출력자료를 사용하여 중국에서 비래하는 해

충의 이동경로를 예측하였다. HYSPLIT 모형의 경우, 수치기상모형으로부터 얻어지는 NCAR Reanalysis, Eta Data and Assimilation System (EDAS), North American Regional Reanalysis (NARR) 등의 다양한 자료들을 입력자료로 사용할 수 있다(Stein *et al.*, 2015).

수치기상모형을 사용하여 대규모 지역을 대상으로 얻어지는 출력자료들은 대개 낮은 수준의 시간해상도를 가진다. NCAR 및 NARR 자료와 같은 수치기상모형의 출력자료에는 3시간이나 6시간 단위로 개별 기상요소 값이 저장된다. 반면, 바람의 경우 온도나 습도 같은 기상변수에 비해 상대적으로 시공간적 변이가 크기 때문에, 비래해충의 이동경로를 예측하기 위해 높은 수준의 시간해상도를 가진 자료를 활용하는 것이 유리하다. 또한, 시간 해상도에 영향을 받는 풍속이나 풍향의 계산 방식에 따라 비래해충의 이동경로 예측값에 상당한 불확도가 발생할 수 있다.

본 연구에서는 비래해충이 국내로 유입되는 과정을 HYSPLIT 모형을 사용하여 추정할 때 발생할 수 있는 불확도 양상을 파악하고자 하였다. 특히, 순간 풍속과 평균 풍속과 같은 입력자료 특성이 바람의 이동경로 예측 결과에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 또한, 바람의 이동경로를 예측하기 위해 사용된 시간 간격에 따라 결과값의 공간적 차이의 규모를 알아보하고자 하였다. 이를 통해, 중국에서 비래하는 해충들의 이동경로를 예측할 때, HYSPLIT 모형의 입력 설정값에 따라 발생할 수 있는 불확도를 최소화할 수 있는 방안을 마련할 수 있을 것이다

II. 재료 및 방법

2.1. 비래해충의 발원지 및 도착지 설정

비래해충이 중국 지역에서 한반도와 일본으로 이동하는 것으로 보고되었기 때문에(Otuka *et al.*, 2012), 이들 지역을 대상으로 해충의 발원지를 설정하였다(Fig. 1). 본 연구에서는 국내에서 주로 피해를 입히는 비래해충인 벼멸구의 발생 위치자료를 Global Biodiversity Information Facility (GBIF; <http://gbif.org>; accessed on 20 February 2021)에서 수집하였다. GBIF는 생물종의 공간적 분포에 대한 자료를 관리하는 공공 데이터베이스로 개별 생물종이 보고된 지점에 대한 위치 정보를 제공한다. 벼멸구가 발견된 중국 내 지점의 위도와 경도를 수집하여 해충 이동 경로 예측

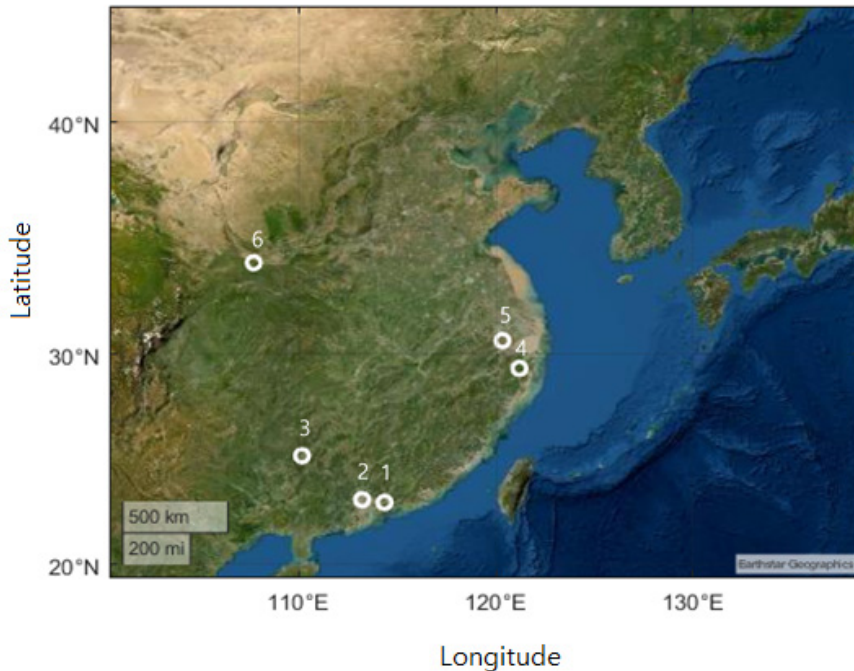


Fig. 1. The spatial distribution of the sites where *Nilaparvata lugens* was reported in China. The number in the map represents the site identification number ordered by latitude.

을 위한 발원지로 설정하였다. 또한, 비래해충이 도달할 수 있는 공간적 범위를 남한 지역에 한정하여 분석하였다.

2.2. 비래해충 관측 지역 분포

비래해충이 도착할 것으로 예측되는 지점들과 비교하기 위해 NCPMS에서 제공하는 해충피해 예찰자료를 수집하였다. 본 연구에서는 각각 2019년과 2020년 6월 초에 벼멸구가 유입되었다고 가정하였다. Choi *et al.*(2017)은 벼멸구의 산란 기간이 벼 품종에 따라 대략 24일 정도인 것으로 보고하였다. 해당 해충이 국내에 도달하여 번식까지 소요되는 시간을 고려할 때, 6월 초에 도착한 비래해충에 의한 피해는 7월 상반기부터 파악되기 시작될 것으로 가정하였다. 본 연구에서는 NCPMS에서 제공되는 병해충 예찰 정보 중에서 7월 16일에 벼멸구의 피해가 보고된 지역들을 군 단위로 수집하였다.

2.3. HYSPLIT 모형의 이동경로 예측 알고리즘

HYSPLIT 모형은 입자들이 이류(advection)에 의

한 이동 경로를 예측하기 위해 개발되었다(Draxler and Hess, 1997). 특정 입자의 평균적인 위치벡터인 P 는 다음과 같이 계산된다(Draxler and Hess, 1998):

$$P(t+\Delta t) = P(t) + 0.5 G(t, \Delta t) \quad (\text{Eq. 1})$$

여기서 $G(t, \Delta t)$ 는 특정 지점 t 에서 일정 기간 Δt 동안 바람에 의해 이동한 지점을 나타내는 벡터이며 다음과 같이 계산된다:

$$G(t, \Delta t) = [V(P(t), t) + V(Q(t+\Delta t), t+\Delta t)] \Delta t \quad (\text{Eq. 2})$$

여기서 $V(P(t), t)$ 는 주어진 지점 P 에서 t 시점의 풍속을 나타내는 벡터이다. $Q(t+\Delta t)$ 는 $P(t)$ 에서 풍향과 풍속이 Δt 동안 지속될 경우 입자가 이동하는 위치를 나타내는 벡터이며 다음과 같이 계산된다.

$$Q(t+\Delta t) = P(t) + V(P(t), t) \cdot \Delta t \quad (\text{Eq. 3})$$

개별적인 입자의 위치를 계산하기 위해 난류의 특

성을 고려하는 것이 필요하다. HYSPLIT 모형은 수평 및 연직 이동을 모의하기 위해 입자의 위치를 다음과 같이 계산한다:

$$X(t+\Delta t) = P_X(t+\Delta t) + U'(t+\Delta t) \Delta t \quad (\text{Eq. 4})$$

$$Z(t+\Delta t) = P_Z(t+\Delta t) + W'(t+\Delta t) \Delta t \quad (\text{Eq. 5})$$

여기서 $X(t)$ 와 $Z(t)$ 는 각각 해당 시점에서의 수평 및 연직 위치를 나타낸다. $P_X(t)$ 와 $P_Z(t)$ 는 각각 평균 수평 및 연직 성분상 위치이다. $U'(t)$ 과 $W'(t)$ 은 각각 난류의 수평 및 연직 성분을 나타낸다. 난류 성분을 나타내기 위해 난류 운동 에너지(Turbulent Kinetic Energy; TKE)를 계산하여 사용할 수 있다. HYSPLIT 모형에 대한 상세한 설명은 Stein *et al.*(2015)에 제시되어 있다.

HYSPLIT 모형의 장점 중의 하나는 특정 입자의 이동 경로를 역추적할 수 있다는 것이다. 비래해충은 발원지점이 알려지지 않은 경우가 많기 때문에, 역추적을 통해 추가적으로 해충이 발생했을 것으로 예상되는 위치를 파악할 수 있다. 예를 들어, Eq. 1에서 Δt 값, 즉 바람에 의해 이동한 기간이 음수일 경우에는 비래해충이 발견된 지점에서 풍향을 역방향으로 적용하여 발원지점을 파악할 수 있다. 단, 이러한 계산을 하기 위해서는, 바람 이동 경로가 역추적 되는 동안 입자의 농도가 균일하고 입자가 지면에 도달하는 않는다는 조건에서 난류에 의한 연직 이동이 이루어져야 한다. 특히, 이러한 가정이 만족되지 않은 조건에서 역추적 기능이 사용되었을 때 추정되는 발원지의 공간적 범위에 상당한 불확도가 발생할 수 있다(Stein *et al.*, 2015).

2.4. HYSPLIT 모형의 입력제어 파일

HYSPLIT 모형을 구동하기 위해 사용자 입력파일 및 설정파일인 CONTROL 파일과 SETUP 파일이 사용된다(Fig. 2). CONTROL 파일에는 입자가 이동하기 시작하는 시점과 위경도 및 고도가 저장된다. 또한, 바람의 이동경로 예측을 위한 기상자료 파일들의 저장 경로와 파일이름들이 저장된다. 이 때문에 바람 이동 경로를 예측할 때마다 새로운 CONTROL 파일이 사용된다.

SETUP 파일은 바람 이동경로 예측을 위해 요구되는 선택사항들을 설정하기 위해 사용된다. 특히, 바람에 의해 입자가 이동하는 거리를 계산하기 위한 시간 간격을 설정할 수 있다. 바람의 이동은 연속적인 반면,

A	B
19 06 01 00	&SETUP
1	delt = 1.0,
34.1 107.7 1.0	mgmin = 10,
72	khmax = 9999,
0	kmixd = 2,
10000.0	kmsl = 0,
11	nstr = 0,
data/wrf_20190601/	mhrs = 9999,
wrf_d01_20190601.c1	nver = 0,
data/wrf_20190601/	tout = 60,
wrf_d01_20190602.c1	tm_tpot = 0,
data/wrf_20190601/	tm_tamb = 1,
wrf_d01_20190603.c1	tm_rain = 1,
data/wrf_20190601/	tm_mixd = 1,
wrf_d01_20190604.c1	tm_relh = 1,
/	tm_sphu = 0,
DUMP/tdump_6_2019060100	tm_mixr = 1,
	tm_dswf = 1,
	tm_terr = 0,
	dx = 1.0,
	dy = 1.0,
	dz = 0.01,
	wvert = .FALSE., /

Fig. 2. Examples of CONTROL (A) and SETUP (B) files used as inputs to HYSPLIT model.

이를 모의하는 과정은 특정 시간 간격별로 계산되는 입자의 위치를 누적하여 반영한다. 따라서, 예측에 사용되는 시간 간격에 따라 예측되는 입자의 위치에 차이가 발생할 수 있다. HYSPLIT 모형에서는 SETUP 파일에 지정된 시간 간격을 사용하여 바람 이동경로를 예측할 때의 정밀도와 계산 시간을 조절할 수 있다.

HYSPLIT 모형의 출력자료는 입자의 공간적 위치와 함께 온도, 강수와 같은 기상요소값이 포함된다. SETUP 파일에서 이러한 기상요소의 출력여부를 지정할 수 있다. 특히, 해충의 이동 중 기상조건에 따른 생존 가능성을 분석하기 위해 온도 조건이 활용될 수 있다. HYSPLIT 모형의 출력변수에는 온도가 기본 설정값으로 포함되어 있지 않아 온도 분석을 수행하기 위해서는 수동으로 출력 설정을 해야 한다.

2.5. 수치기상 모형의 출력자료 수집

입자들이 바람에 의해 이동하는 경로를 예측하기 위해서는 비교적 공간해상도가 높은 중규모 수치기상 모형 자료를 사용하는 것이 유리하다. 중국에서 국내로 비래해충이 도달하는 경로를 모의하기 위해 중국 동부지역과 한반도 및 일본을 포함하는 공간범위를 가

진 격자형 자료가 필요하다. 또한, 중국에서 비래하는 해충의 위험을 사전에 파악하기 위해 기상예측 자료가 사용되어야 한다.

본 연구에서는 국가농림기상센터 지면대기모델링 패키지(Land-Atmosphere Modeling Package, LAMP)를 사용하여 중기 예측 기상자료를 생산하였다(Fig. 3). LAMP는 기상청의 전지구 기상예측자료를 Weather Research and Forecasting (WRF) 모형의 초기 및 경계자료로 사용하여 한반도 인근 지역을 대상으로 12일의 다양한 기상 및 토양 예측자료를 생산한다 (Lee *et al.*, 2016; Lee *et al.*, 2020; So *et al.*, 2020). 지표면의 특성을 반영하기 위해 미국 지질조사국(U.S. Geological Survey)의 지형 고도 및 토지피복 자료를 Noah Multi-Parameterization (Noah MP) 모형의 지표면 자료로 활용한다. LAMP의 공간해상도와 시간해상도는 각각 약 20 km와 1시간이다. 이들 자료는 농업 및 임업 분야의 기상기후 연구와 교육 및 서비스 개발에 활용되어 왔다(Shin *et al.*, 2017; Park *et al.*, 2018; Hong *et al.*, 2021).

LAMP의 출력자료는 지상부터 대류권내 상층부까

지 고려한 3차원 변수와 지표면에서의 기상 상태를 나타내는 2차원 변수들로 구성된다. 예를 들어, $174 \times 150 \times 39$ 개의 격자에 대한 기온, 풍속 및 습도 등이 LAMP 자료에 포함된다. LAMP 자료에는 수평 및 연직 방향의 풍속이 포함되어 있어 비래해충의 이동경로 예측에 유리하다. 본 연구에서는 2019년과 2020년 6월 1일부터 12일까지 생산된 자료를 활용하여 바람의 이동경로 예측을 위한 입력자료를 수집하였다.

2.6. HYSPLIT 모형의 입력자료 생성

HYSPLIT 모형의 입력자료 형식은 일반적으로 사용되는 수치기상 모형의 출력자료 형식과 차이가 있다. 수치기상모형의 출력자료를 HYSPLIT 모형의 기상입력자료로 전환하기 위해 data2arl 도구가 사용된다. data2arl 도구에는 개별 수치기상모형별로 사용될 수 있는 실행파일들이 포함된다. WRF 모형의 출력자료인 LAMP 자료들은 arw2arl 실행파일을 사용하여 HYSPLIT 모형의 입력파일이 생성된다. 특히, arw2arl 실행파일의 경우, 사용자 선택에 따라 순간 풍속 및 평균 풍속으로 구성된 입력파일을 생성할 수 있다.

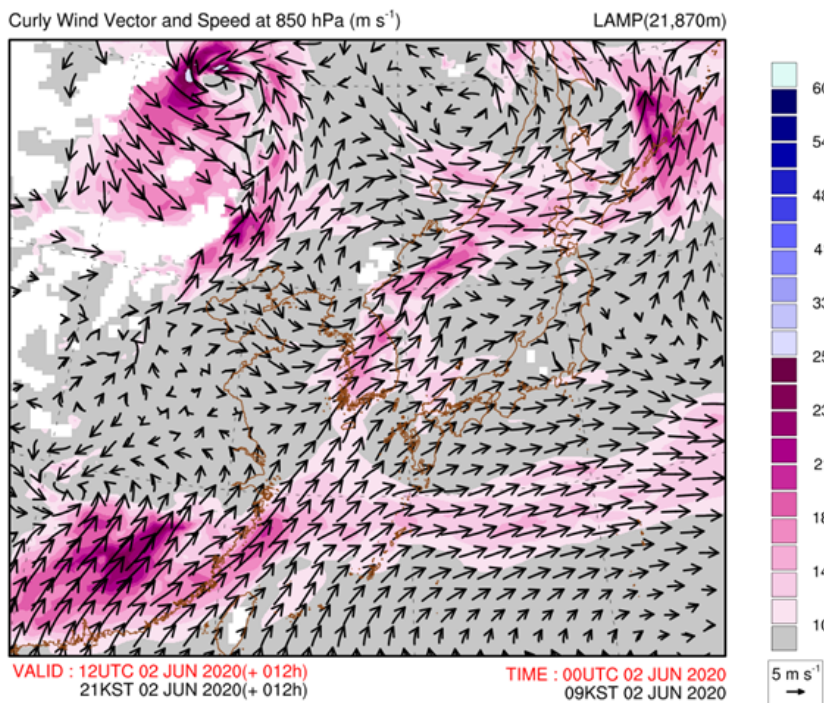


Fig. 3. The domain where the numerical weather model was used to prepare wind prediction data. The arrow indicates a wind field at 850 hPa in early June 2020.

2.7. 바람 이동 경로의 변이 분석

비래해충의 이동경로를 예측하기 위해 사용된 풍속 특성과 계산시간 간격에 따라 도착지점의 공간적 변이를 분석하였다. 벼멸구의 도착지점을 예측하기 위해 전국적으로 벼 생육이 본격적으로 시작되는 6월 1일부터 7일까지 기간 동안 중국에서 비래해충이 출발하는 조건을 가정하였다. 또한, 중국에서 위치한 발원지에서 매 시간마다 해충이 이륙하는 것으로 가정하여 바람의 이동경로를 예측하였다. 순간 풍속과 평균 풍속으로 구성된 입력자료를 각각 사용하여 HYSPLIT 모형을 구동하였다. 또한, 계산시간 간격을 1, 30 및 60분 단위로 설정하여 바람의 이동경로를 예측하였다. 2019년과 2020년 기간 동안 개별 발원지 별로 총 1,008회의 바람 이동경로 예측을 수행하였다.

입력설정별로 비래해충이 도착할 것으로 예상되는 지점들의 공간 분포를 분석하였다. 비래해충의 이동경로를 분석하기 위해 한반도 인근 지역을 대상으로 대략 50km 수준의 공간해상도를 가진 격자를 생성하였다(Table 1). 예측된 바람 이동경로를 따라 시간별 위경도, 고도 및 이동시간을 수집하였다. 이들 중 고도와 비행시간은 비래해충의 도착 지점을 예측할 때 생물학적 요인들을 반영하기 위해 사용되었다. 예를 들어, 비래 해충이 지표면 근처에 도달할 경우 낮은 풍속으로 착륙하여 농경지에 피해를 입힐 수 있다는 가정하에 비행고도가 10m 이하로 될 때 해충이 지면에 도착한 것으로 설정하였다(Rosenberg and Magor, 1987). 섭식활동없이 이동할 수 있는 범위를 제한하기 위해 비래해충의 비행시간을 최대 72시간으로 설정하였다. 연구 대상 지역에 비래해충이 도달하였을 가능성을 정량화 하기 위해 격자별로 도착 지점들의 위경도가 포함되는 빈도를 계산하였다. 만약, 특정 격자에 높은 빈도로 도착 지점이 예측되었을 때, 비래해충 발생위험이 상대적으로 높을 것으로 추정하였다.

입력설정별로 예측된 도착 빈도의 공간적 유사도를 비교하였다. 사람이 시각적으로 두 이미지를 비교하는 방식을 차용하여 유사도를 계산하는 SSIM (Structural SIMilarity) 지수를 다음과 같이 계산하였다(Hagen-

Zanker, 2006; Wang *et al.*, 2004):

$$SSIM(x, y) = l(x, y)^{\alpha} c(x, y)^{\beta} s(x, y)^{\gamma} \quad (\text{Eq. 6})$$

여기서 l , c , 및 s 는 각각 두 이미지가 가지는 휘도 (luminance), 대조(contrast), 구조(structure)를 나타내는 지표이다. α , β 및 γ 는 이들 지표들을 조절하는 모수이다. l 값은 다음과 같이 계산된다:

$$l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1} \quad (\text{Eq. 7})$$

여기서 C_1 은 분모값이 0 으로 되는 것을 방지하기 위한 상수이다. μ 는 비교대상 픽셀과 주변 픽셀을 포함하는 영역에 대한 가중평균으로 다음과 같이 계산된다:

$$\mu_x = \sum_i w_i x_i \quad (\text{Eq. 8})$$

여기서 w 값은 다음과 같이 계산된다:

$$w_i = g(i) / \sum_i g(i) \quad (\text{Eq. 9})$$

여기서 g 는 관심 픽셀과 주변 픽셀 사이에서의 거리를 나타낸다. g 값은 가로 및 세로 방향으로 픽셀 단위의 거리를 나타내는 h 와 v 를 사용하여 다음과 같이 계산한다:

$$g(i) = e^{-\frac{h_i^2 + v_i^2}{2std^2}} \quad (\text{Eq. 10})$$

여기서 std 는 가우시안 함수의 표준편차에 해당된다. c 와 s 값은 다음과 같이 계산된다:

$$c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2} \quad (\text{Eq. 11})$$

Table 1. Spatial and temporal properties defined for analysis of wind trajectories

latitude and longitude of lower left corner	latitude and longitude of top right corner	Spatial resolution	Temporal resolution
32°N 124°W	42°N 134°W	0.5°	Hourly

$$s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x \sigma_y + C_3} \quad (\text{Eq. 12})$$

여기서 C_2 와 C_3 는 분모가 0의 값을 가지는 것을 방지하기 위한 상수이다. α_x and α_y 는 표준편차와 공분산을 나타낸다. 이들 값은 다음과 같이 계산된다:

$$\sigma_x = (\sum_i w_i (x_i - \mu_x)^2)^{1/2} \quad (\text{Eq. 13})$$

$$\sigma_{xy} = \sum_i w_i (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y) \quad (\text{Eq. 14})$$

입력설정 조합에 따라 얻어진 비래해충 도달 추정 지도들을 비교하기 위해 통계분석도구인 R을 사용하여 SSIM 값을 계산하였으며, SpatialPack 패키지에 구현된 SSIM 명령어를 사용하였다.

III. 결 과

3.1. 벼멸구 피해 지역 분포

연도별로 벼멸구가 발견된 지역 분포에 큰 차이가

있었다(Table 2). 2019년 7월 16에 보고된 벼멸구 피해 지역은 부산광역시와 인천광역시 일부 지역이 포함되었다. 반면, 2020년 같은 시기에 보고된 지역들은 전라남도 완도군을 포함하는 남부 지방에 위치하였다. 분석대상 시기에 보고된 벼멸구 피해 지역은 주로 도서 지역들로 전체적으로는 0.01%의 비교적 적은 피해가 관측되었다. 그러나, 그 중에서도 2020년에 완도군에 발생한 피해는 0.3% 이상의 피해가 발생하여 이 지역에 상대적으로 많은 벼멸구 개체가 이동한 것으로 추정되었다.

3.2. 도착예측지점의 공간 분포

입력설정에 따라 비래해충의 도착 예측지점에 상당한 차이가 발생하였다(Fig. 4 and Fig. 5). 특히, 순간 및 평균 풍속 자료를 활용하여 얻어진 비래해충의 도착지점들은 상이한 공간적 분포를 보였다. 예를 들어, 2019년에 순간 풍속을 사용하여 예측된 도착지점들은 서부 도서 지역과 남해안 지역에 높은 빈도로 분포한 반면, 평균 풍속으로 예측된 도착지점들은 주로 남해

Table 2. Observed damage (%) caused by brown plant hopper in 2019 and 2020. Observation data were obtained from the National Crop Pest Management System

Year	Province	County / City / District	Damage (%)
2019	Busan	Gangseo-Gu	0.037
2019	Incheon	Ongjin-Gun	0.003
2020	Jeollabuk-Do	Iksan-Si	0.001
2020	Jeollanam-Do	Wando-Gun	0.333
2020	Gyeongsangnam-Do	Tongyeong-Si	0.080
2020	Gyeongsangnam-Do	Hadong-Gun	0.006

Table 3. The values of similarity in spatial distribution of deposition area by input setting to HYSPLIT model

Wind Type ^a	Time Step ^b	SSIM ^c	Wind Type	Time Step	SSIM	Wind Type	Time Step	SSIM
Year = 2019								
I x A	1	0.32	I	1 x 30	0.91	A	1 x 30	0.97
I x A	30	0.35	I	1 x 60	0.85	A	1 x 60	0.67
I x A	60	0.57	I	30 x 60	0.86	A	30 x 60	0.75
Year = 2020								
I x A	1	0.92	I	1 x 30	0.98	A	1 x 30	0.98
I x A	30	0.94	I	1 x 60	0.97	A	1 x 60	0.98
I x A	60	0.95	I	30 x 60	0.98	A	30 x 60	0.98

a. Wind type indicates the property of wind input data including instantaneous and average wind, which are denoted by I and A, respectively.

b. Time step represents the fixed time interval for calculation of wind trajectory for HYSPLIT model.

c. SSIM indicates structural and similarity index.

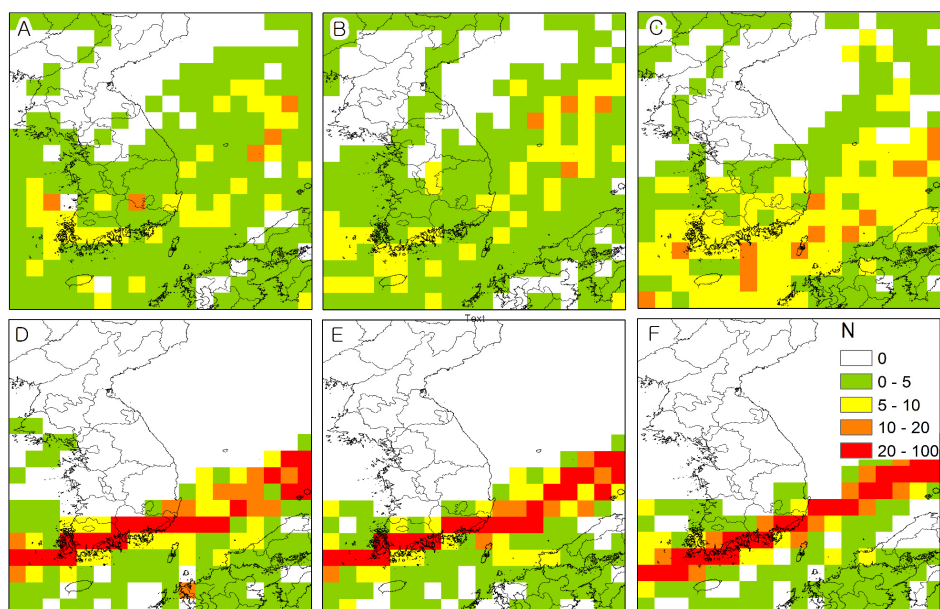


Fig. 4. The number of events where the altitude of air-borne particles was less than 10 m using different options for wind trajectory simulations in 2019. The weather input data were prepared using instantaneous (A-C) and average wind (D-F). The time steps for trajectory simulations were set by 1 minute (A, D), 30 minutes (B, E) and 60 minutes (C, F). N indicates the number of trajectories where the deposition site is located within the given cell.

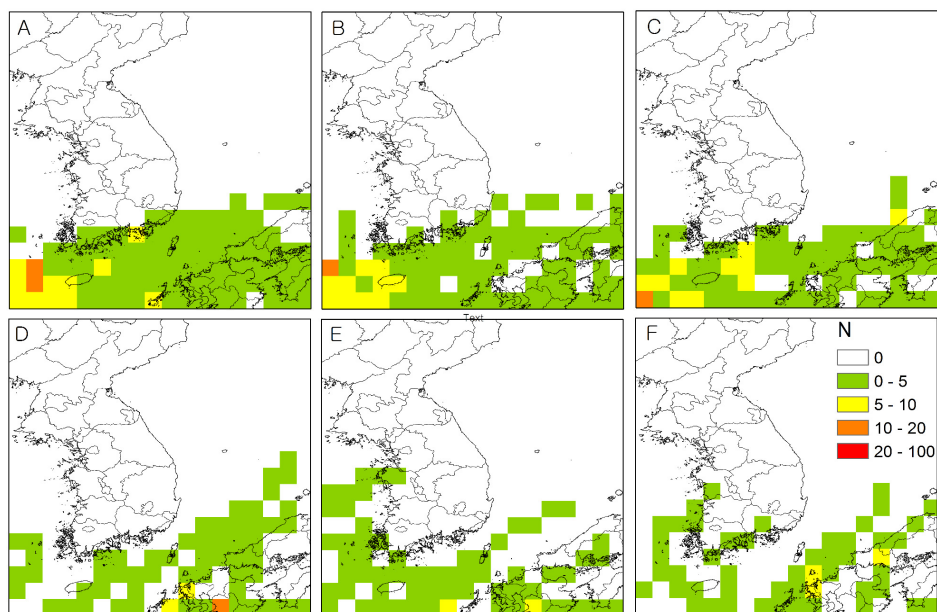


Fig. 5. The number of events where the altitude of air-borne particles was less than 10 m using different options for wind trajectory simulations in 2020. The weather input data were prepared using instantaneous (A-C) and average wind (D-F). The time steps for trajectory simulations were set by 1 minute (A, D), 30 minutes (B, E) and 60 minutes (C, F). N indicates the number of trajectories where the deposition site is located within the given cell.

안 지역에서 상대적으로 높은 빈도로 나타났다. 계산 시간 간격에 따라 예측된 도착지점의 공간적 분포는 비교적 적은 차이가 있었다. 예를 들어, 똑같이 순간 풍속을 입력자료로 사용하고 1분간의 계산 간격을 적용하였을 때, 2020년의 도착 예측 지점들은 높은 빈도로 전라남도 완도군과 경상남도 통영군 인근 지역에 위치하였다. 반면, 30분 간격으로 이동 경로를 예측하였을 때에는 도착 지점들이 이보다 서쪽인 전라남도 진도군 인근 지역에 분포하였다.

입력설정에 따라 비례 해충이 도착할 것으로 예측된 지점들의 공간적 분포 차이를 SSIM 값을 사용하여 확인하였다(Table 3). 동일한 풍속 입력과일을 사용하였을 때, 계산시간 간격에 상관없이 도착예측지점의 공간적 분포는 상대적으로 높은 유사도를 보였다. 예를 들어, 순간 풍속이나 평균 풍속자료가 입력자료로 사용된 경우, 시간 간격 설정에 따른 SSIM 값은 대체로 0.85 이상이였다. 그러나, 평균 풍속을 입력자료로 사용했을 때에는 계산 시간 간격에 설정에 따른 유사도가 순간 풍속 자료를 사용한 것에 비해 상대적으로 낮았다. 특히, 순간 풍속을 사용한 2019년의 예측 결과들은 1분과 60분으로 계산 시간이 설정되었을 때 SSIM 값이 0.85이었으나 평균 풍속을 사용한 조건에서는 SSIM값이 0.67이었다.

IV. 고 찰

본 연구를 통해, HYSPLIT 모형의 입력설정에 따라 바람의 이동 예측지점의 공간적 분포에 상당한 변이가 발생함을 확인하였다. 특히, 계산 시간 간격을 달리한 것보다 순간 풍속과 평균 풍속을 사용하여 얻어진 예측 결과에 상대적으로 큰 차이가 발생하였다. 또한, 순간 풍속을 사용하여 예측된 결과들은 대체로 벼멸구가 발견된 지역 인근에 도착 지점들이 예측되었다. 이는 비례해충의 이동경로 및 도착지점들을 예측할 때, 순간 풍속을 사용하는 것이 유리함을 시사한다. 그러나, 본 연구에서 분석된 기간이 짧고 해충의 발원지가 과거 기록에 의존하여 설정되었기 때문에 추가적인 연구가 필요하다.

수치기상모형은 3차원의 공간에서 다수의 변수들을 출력하기 때문에 짧은 시간 간격으로 개별 변수값들을 저장할 경우 상당한 저장공간이 사용되어야 한다(Kain *et al.*, 2010). 이로 인해 수치기상모형의 출력자료들은 바람의 순간적인 변화를 오차없이 추적할 수

있는 수준의 시간해상도를 가지기 어렵다. 이러한 한계를 보완하기 위해 HYSPLIT 모형은 semi-Lagrangian 방식을 적용하여 바람의 이동 경로를 예측한다(Draxler and Hess, 1997). 이 방식은 계산 시간 간격을 짧게 할수록 신뢰도는 높아질 수 있으나 계산량이 많아지기 때문에 전산자원의 요구도와 예측 결과의 신뢰도를 동시에 만족할 수 있는 설정값을 찾는 것이 필요하다. 본 연구 결과에서는 시간 단위로 저장된 수치기상모형의 출력자료를 사용하여 1분 간격으로 이동경로를 계산하였을 때, 예측된 도착지점들이 실제 비례해충에 의해 피해가 발생한 지역 인근에 분포하는 결과를 얻을 수 있었다. 따라서, 전산처리 요구도가 높아지더라도 1분 간격으로 계산하는 것이 도착지점의 예측 신뢰도를 높일 수 있음을 시사한다.

바람에 의한 이동경로를 예측하는 것은 초기 조건의 작은 차이가 최종 결과값에 큰 영향을 미치는 초기 값 문제(initial value problem)로 분류할 수 있다(Ghil *et al.*, 1981). 본 연구에서 사용된 비례해충의 발원지는 벼멸구가 과거에 관측된 지점들로 구성되었기 때문에 최근 기간 국내에서 발견된 해충이 해당 지점에서 출발한 것으로 단정할 수 없다. 또한, 비례해충의 이륙 시점이 24시간에 걸쳐 설정되었기 때문에 실제 벼멸구의 출발 시점과 차이가 있을 수 있다(Rosenberg and Magor, 1983). 이러한 부분을 감안하더라도 바람의 이동경로를 예측하여 얻어진 도착 지점들은 벼멸구의 실제 관측 지역과 유사한 것으로 나타났다. 이는 본 연구 결과와 중국에서 실제 관측된 벼멸구 발생 지점에 해당하는 공간자료를 확보하고 이를 이동경로 예측의 입력값으로 활용하였을 때 나타난 결과들과의 비교가 필요함을 시사한다. 특히, 과거 관측 지점을 사용하더라도 의미 있는 결과를 도출할 수 있다면, 기존에 알려진 발원지를 기준으로 이동경로를 예측하여 비례해충 위험을 사전에 파악할 수 있는 조기경보 시스템을 구축할 수 있을 것이다.

입력값에 따른 모델링 불확도는 여러 모형의 출력값을 사용하는 앙상블 예측을 통해 줄일 수 있다(Yoo *et al.*, 2020). 예를 들어, Chung *et al.*(2015)은 농작물의 생산성을 추정하기 위한 지수를 계산하기 위해 9개의 전주기후모형 자료를 입력자료로 사용하는 다중 모델 앙상블 방식을 활용한 바 있다. 한 종류의 순간 풍속 자료를 HYSPLIT 모형의 입력자료로 사용하여 예측된 바람의 이동경로는 해당 입력자료가 가지는 불확도에 의해 영향을 받을 수 있다. 따라서, 여러 종류의

수치기상모형 출력자료를 기상입력자료로 활용하는 것이 비래해충의 이동경로를 예측할 때 발생할 수 있는 불확도를 최소화하기 위해 유리할 것으로 보인다.

예측 오차가 적은 재분석 자료들을 HYSPLIT 모형의 입력자료로 사용하여 앙상블 예측을 수행할 경우, 비래해충 이동경로 예측 신뢰도를 높일 수 있을 것으로 전망된다. ERA5는 유럽중기예보센터(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)가 생산하는 최신의 전지구 기상 및 기후 재분석 자료로서 약 25km 에 해당하는 공간해상도를 가지고 있다 (Hersbach *et al.*, 2020). 특히, 순간 풍속을 포함하는 다양한 기상 요소들에 대해 개별 파일 형태로 1시간 간격의 자료가 제공된다. Lee *et al.*(2021)은 ERA5 자료를 포함하는 여러 기후 재분석 자료들을 비교하여 이 중 ERA5 자료가 국내 연구에 활용도가 높을 것으로 보고하였다. 추후 연구에서는 ERA5 자료와 같은 재분석 자료들을 사용하여 앙상블 기법으로 얻어진 도착 예측지점들의 신뢰도를 비교하여야 할 것이다.

특정 생물종이 바람에 의해 이동할 때, 이들의 생존 조건을 추가로 고려한다면 예측 오차를 줄일 수 있다. Kim and Beresford (2008)은 균류 포자의 바람에 의한 장거리 이동을 예측할 때 자외선 노출 시간을 누적하여 생존 가능성을 분석하였다. 본 연구에서는 해충의 이동 기간을 제한한 것으로 생존 조건에 대한 일정 부분의 제약을 두었으나, 차후 이 부분에 대한 추가적인 조건 설정이 필요한 것으로 보인다. 예를 들어, Vennila *et al.*(2021)는 기온이 10°C 이하로 떨어졌을 때 해충의 섭식활동이 저하되는 것으로 보고하였다. 중국에서 비래하는 해충의 경우, 2000km 이상의 장거리 이동이 요구되기 때문에 대기 상층부의 빠른 바람을 타고 한반도 인근 지역에 도달할 가능성이 높다 (Rosenberg and Magor, 1987). 특히, 기온이 10°C 이상인 조건에서 이동을 한다면, 비래해충의 생존 및 유입 가능성이 높아진다(Pender, 1994). 후속 연구에서는 온도의 변화를 고려하여 비래해충의 이동경로를 예측할 수 있는 기법들이 개발되어야 할 것이다.

국내에 피해를 입히는 비래해충들은 국경 이동에 제한을 받지 않기 때문에 한반도 인근 지역을 포함하는 예측 시스템을 구축해야 할 것이다. 특히, 해충을 방제할 수 있는 물자들이 부족한 북한지역으로 비래해충들이 유입된다면 대발생이 초래될 수 있다 (Furlong *et al.*, 2008). 이는 북한의 식량 안보 상황을 악화시킬 뿐만 아니라, 인근한 남쪽으로 유입되어 국내에도 영

향을 미칠 수 있다. 북한 지역을 대상으로 병해충 발생 예측에 필요한 데이터들이 부족하기 때문에, 국내에서 이들을 보완할 수 있는 체계들이 구축되어야 할 것이다. 예를 들면, 위성자료를 사용하여 지표면 근처의 고해상도 기온자료를 생산할 수 있다(Yoo *et al.*, 2019). 해충의 개체군 모형에 기온이 유일한 기상입력 요소로 사용될 수 있기 때문에(Kim *et al.*, 2019) 북한 지역을 대상으로 위성영상으로부터 추정된 기온을 사용한다면, 해충 모형을 구동할 수 있을 것으로 판단되며, 이에 따라 비래해충 예측 시스템을 확대할 수 있을 것이다.

농촌진흥청에서 운영하고 있는 NCPMS에서 비래해충의 도착 지점과 시점에 대한 정보를 제공할 수 있다면, 예찰 활동을 증가시켜 비래해충이 농가에 상당한 피해를 입히는 것을 사전에 방지할 수 있다. 이러한 정보 서비스를 운영하기 위해, HYSPLIT 모형을 구동할 수 있는 시스템과 기상입력자료를 지속적으로 생산 및 관리하는 체계가 갖추어져야 한다. 특히, 현업 수준으로 기상입력자료들을 생산하기 위해, 동아시아 지역을 대상으로 고해상도 기상자료를 생산할 수 있는 기관들과 협력관계를 구축하는 것이 필요하다. 예를 들어, 비래해충의 이동경로 예측에 사용되는 입력자료들은 본 연구에서 보인 바와 같이 국가농림기상센터에서 운영하는 LAMP 자료가 활용될 수 있다.

바람이동 경로 예측을 통해 비래해충에 대한 생태-사회 시스템의 적응력 및 회복탄력성을 높일 수 있을 것으로 전망된다. Whitehorn *et al.*(2012)는 살충제 사용이 꿀벌과 같은 화분매개충의 군집 형성 및 유지를 방해할 수 있는 것으로 보고하였다. 비래해충들은 일정한 시기에 유입되는 것이 아니기 때문에, 작물 재배 관리보다는 살충제에 의존한 해충 방제가 수행될 것으로 예상된다. 이는 비래해충의 도착 지점 및 시점을 정확하게 예측할 경우, 살충제의 사용을 최소화하여 생태계의 적응력을 높일 수 있음을 시사한다. 따라서, 동아시아 지역에서 발생하는 비래해충에 의한 피해를 최소화하기 위해 비래해충의 이동경로를 예측할 때 발생할 수 있는 불확도에 대한 이해를 높이고 이를 줄여 나가기 위한 연구가 계속되어야 할 것이다. 특히, 국내 다수 지역에서 수집되는 병해충 예찰 자료와 예측 자료를 비교하는 생태-사회시스템과의 피드백 과정을 통해 비래해충 예측 시스템을 개선하여 농업 생태계의 지속가능성을 제고할 수 있을 것이다. 비래해충에 의해 발생하는 농업 생태계의 문제를 해결하기 위한 비

저니어링(Visioneering)을 통해 시스템적인 접근 방법과 비전을 제시하는 노력이 선행되어야 할 것이다.

적 요

바람에 의해 해외지역에서 국내로 유입되는 비래해충들은 주요 작물에 상당한 피해를 초래할 수 있다. 바람에 의한 비래해충의 이동 경로를 추정하기 위해 기상 모형들이 사용되는데, 본 연구에서는 비래해충이 도달할 수 있는 지역을 예측할 때 입력설정이 미치는 영향을 분석하였다. 벼멸구가 중국에서 국내로 유입된다는 가정하에 입자의 바람이동 경로를 추적하기 위해 개발된 Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPPLIT) 모형을 사용하여 바람의 이동 경로를 예측하였다. 중국, 한국 및 일본이 포함된 중규모 수치기상모형 자료를 사용하여 순간 및 평균 풍속 자료가 포함된 기상입력자료를 생성하였다. 또한, 이동 경로 계산을 위해 계산 시간 간격을 1, 30, 60분으로 설정하였다. 중국에서 벼멸구가 관측된 지점에서 2019년과 2021년 6월 상순 기간 동안 바람의 이동 경로를 계산한 결과, 순간 풍속과 평균 풍속자료를 사용함에 따라 비래해충 도달지점에 큰 차이가 나타났다. 계산 시간에 따른 이동 경로 결과값들의 공간적 분포는 상대적으로 유사도가 높았으며, 순간풍속을 사용한 경우 벼멸구 관측지역과 비교적 유사한 경향이 나타났다. 이러한 결과는 바람 경로를 추적하여 비래해충 도착지점을 추정할 때 사용되는 입력자료의 특성을 파악하고 이들로부터 발생하는 불확도에 대한 고려가 필요함을 시사한다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ015620022021)의 지원으로 수행되었음

REFERENCES

- Bae, Y. H., J. H. Lee, and J. S. Hyun, 1994: A systematic application of insecticides of manage early season insect pests and migratory planthoppers on rice. *Korean Journal of Applied Entomology* **33**(4), 270-280.
- Choi, N. J., I. H. Jeong, D. H. Kwon, M. Y. Choi, and C. H. Baik, 2017: Life table analysis of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* Stål (Hemiptera: Delphacidae) on rice of resistant cultivars. *Korean Journal of Environmental Biology* **35**(4), 526-532.
- Chung, U., J. Cho, E.-J. Lee, 2015: Evaluation of agro-climatic index using multi-model ensemble downscaled climate prediction of CMIP5. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **17**, 108-125. <https://doi.org/10.5532/KJAFM.2015.17.2.108>
- Draxler, R. R., and G. D. Hess, 1998: An overview of the HYSPLIT_4 modeling system for trajectories, dispersion, and deposition. *Australian Meteorological Magazine* **47**, 295-308.
- Draxler, R. R., and G. D. Hess, 1997: *Description of the Hysplit_4 modeling system*. NOAA Tech. Memo. ERL ARL-224.
- Furlong, M. J., K. H. Ju, P. W. Su, J. K. Chol, R. C. Il and M. P. Zalucki, 2008: Integration of endemic natural enemies and *Bacillus thuringiensis* to manage insect pests of Brassica crops in North Korea. *Agriculture, ecosystems & environment* **125**(1-4), 223-238. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.01.003>
- GBIF (Global Biodiversity Information Facility), 2021: GBIF Occurrence Download. <https://doi.org/10.15468/dl.eb5mbe>
- Ghil, M., S. Cohn, J. Tavantzis, K. Bube, and E. Isaacson, 1981: Applications of estimation theory to numerical weather prediction. In *Dynamic meteorology: Data assimilation methods*, 139-224. Springer, New York, NY.
- Hagen-Zanker, 2006: Comparing Continuous Valued Raster Data: A Cross Disciplinary Literature Scan.
- Hersbach, H., B. Bell, P. Berrisford, S. Hirahara, A. Horányi, J. Muñoz-Sabater, J. Nicolas, C. Peubey, R. Radu, D. Schepers, A. Simmons, C. Soci, S. Abdalla, X. Abellan, G. Balsamo, P. Bechtold, G. Biavati, J. Bidlot, M. Bonavita, G. Chiara, P. Dahlgren, D. Dee, M. Diamantakis, R. Dragani, J. Flemming, R. Forbes, M. Fuentes, A. Geer, L. Haimberger, S. Healy, R. J. Hogan, E. Hólm, M. Janisková, S. Keeley, P. Laloyaux, P. Lopez, C. Lupu, G. Radnoti, P. Rosnay, I. Rozum, F. Vamborg, S. Villaume, and J. Thépaut, 2020: The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **146**, 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hong, M., S. H. Lee, S.-J. Lee, and J. Y. Choi, 2021: Application of High-Resolution Meteorological Data from NCAM-WRF to Characterize Agricultural

- Drought in Small-Scale Farmlands Based on Soil Moisture Deficit. *Agricultural Water Management* **243**, 106494.
- Kain, J. S., S. R. Dembek, S. J. Weiss, J. L. Case, J. J. Levit, and R. A. Sobash, 2010: Extracting unique information from high-resolution forecast models: Monitoring selected fields and phenomena every time step. *Weather and forecasting* **25**(5), 1536-1542. <https://doi.org/10.1175/2010WAF2222430.1>
- Kim, S. I., K. B. Uhm, D. Y. Jin, and H. M. Park, 2019: Comparison on the time of occurrence of major rice insect pests based on growing degree day in northern part of Korean Peninsula. *Korean Journal of Applied Entomology* **58**(3), 239-249. <https://doi.org/10.5656/KSAE.2019.08.8.029>
- Kim, K. S., and R. M. Beresford, 2008: Use of a spectrum model and satellite cloud data in the simulation of wheat stripe rust (*Puccinia striiformis*) dispersal across the Tasman Sea in 1980. *Agricultural and Forest Meteorology* **148**, 1374-1382. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.04.004>
- Kim, K.-H., J. Cho, Y.-H. Lee, 2016: Forecasting brown planthopper infestation in Korea using statistical models based on climatic tele-connections. *Korean Journal of Applied Entomology* **55**, 139-148. <https://doi.org/10.5656/KSAE.2016.05.0.019>
- Lander, T. A., E. K. Klein, S. Oddou-Muratorio, J.-N. Candau, C. Gidoin, A. Chalon, A. Roig, D. Fallour, M.-A. Auger-Rozenberg, and T. Boivin, 2014: Reconstruction of a windborne insect invasion using a particle dispersal model, historical wind data, and Bayesian analysis of genetic data. *Ecology and Evolution* **4**(24), 4609-4625. <https://doi.org/10.1002/ece3.1206>
- Lee, S., S.-J. Lee, K. Jang, and J.-H. Chun, 2021: Drought monitoring based on vegetation type and reanalysis data in Korea. *Atmosphere* **12**(2), 170. <https://doi.org/10.3390/atmos12020170>
- Lee, S. J., S.-J. Lee, and J. S. Koo, 2020: Database construction of high-resolution daily meteorological and climatological database using NCAM-LAMP: sunshine hour data. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **22**(3), 135-143.
- Lee, S.-J., J. Song, and Y.-J. Kim, 2016: The NCAM Land-Atmosphere Modeling Package (LAMP) Version 1: Implementation and evaluation. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **18**(4), 307-319. <https://doi.org/10.5532/KJAFM.2016.18.4.307>
- Otuka, A., Y. Zhou, G.-S. Lee, M. Matsumura, Y. Zhu, H.-H. Park, Z. Liu, and S. Sanada-Morimura, 2012: Prediction of overseas migration of the small brown planthopper, *Laodelphax striatellus* (Hemiptera: Delphacidae) in East Asia. *Applied Entomology and Zoology* **47**, 379-388. <https://doi.org/10.1007/s13355-012-0130-x>
- Otuka, A., J. Dudhia, T. Watanabe, and A. Furuno, 2005: A new trajectory analysis method for migratory planthoppers, *Sogatella furcifera* (Horvath) (Homoptera: Delphacidae) and *Nilaparvata lugens* (Stal), using an advanced weather forecast model. *Agricultural Forest Entomology* **7**(1), 1-9. <https://doi.org/10.1111/j.1461-9555.2005.00236.x>
- Park, H.-H., J.-H. Lee, and S.-T. Kim, 2005: Occurrence and population dynamics of spiders in transplanting rice fields under different levels of pest management. *The Korean Journal of Ecology* **28**(5), 287-293.
- Park, B. Y., S. K. Lee, H. H. Park, S. W. Jeon, I. H. Jeong, S. K. Park, M. Hossain, C. Sovandeth, W. Rattanakarmg, P. T. Vuong, and H. V. Chien, 2018a: Occurrence Patterns of Three Planthopper Species in Rice Fields in Bangladesh, Cambodia, Thailand and Vietnam. *Korean Journal of Organic Agriculture* **26**(3), 489-500.
- Park, T., H. Choe, H. Jeong, H. Jang, K. H. Kim, and J. J. Park, 2018b: Spatial pattern analysis for distribution of migratory insect pests at paddy field in jeolla-province. *Korean journal of applied entomology* **57**(4), 361-372.
- Park, J., H.-S. Kim, S.-J. Lee, and T. Ha, 2018: Numerical evaluation of JULES surface tiling scheme with high-resolution atmospheric forcing and land cover data. *SOLA* **14**, 19-24.
- Pender, J., 1994: Migration of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stal.) with special reference to synoptic meteorology. *Grana* **33**(2), 112-115. <https://doi.org/10.1080/00173139409427843>
- Rosenberg, L. J., and J. I. Magor, 1983: Flight duration of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Homoptera: Delphacidae). *Ecological Entomology* **8**(3), 341-350. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2311.1983.tb00514.x>
- Rosenberg, L. J., and J. I. Magor, 1987: Predicting windborne displacements of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* from synoptic weather data. 1. Long-distance displacements in the north-east monsoon. *The Journal of Animal Ecology* **56**(1), 39-51. <https://doi.org/10.2307/4798>
- Shin, Y. H., J. Y. Choi, S.-J. Lee, and S. H. Lee, 2017: Estimation of irrigation requirements for red

- pepper using soil moisture model with high resolution meteorological data. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* **59**(5), 31-40.
- So, Y., S. J. Lee, S. W. Choi, and S.-J. Lee, 2020: Construction of NCAM-LAMP precipitation and soil moisture database to support landslide prediction. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **22**(3), 152-163.
- Son, B.-I., J.-K. Jung, and J.-H. Lee, 2014: Wing Morphs and Parasitism Rates of the Small Brown Planthopper, *Laodelphax striatellus* (Hemiptera: Delphacidae) in Korea. *Korean journal of applied entomology* **53**, 497-501. <https://doi.org/10.5656/KSAE.2014.11.0.064>
- Stein, A. F., R. R. Draxler, G. D. Rolph, B. J. B. Stunder, M. D. Cohen, and F. Ngan, 2015: NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System. *Bulletin of the American Meteorological Society* **96**, 2059-2077. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>
- Turner, R., Y.-H. Song, and K.-B. Uhm, 1999: Numerical model simulations of brown planthopper *Nilaparvata lugens* and white-backed planthopper *Sogatella furcifera* (Hemiptera: Delphacidae) migration. *Bulletin of Entomological Research* **89**(6), 557-568. <https://doi.org/10.1017/S0007485399000711>
- Vennila, S., S. Nisar, A. Islam, M. N. Bhat, S. Sharma, P. S. Sarao, Anandhi P., M. Srinivasa rao and M. Prabhakar, 2021: Future scenarios of rice brown plant hopper *nilaparvata lugens* (stal.) under changing climate. *Journal of Agrometeorology* **23**(1), 74-81.
- Walters, R. J., M. Hassall, M. G. Telfer, G. M. Hewitt, J. P. Palutikof, 2006: Modelling dispersal of a temperate insect in a changing climate. *Proceeding of Royal Society B: Biological Sciences* **273**, 2017-2023. <https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3542>
- Wang, Z., A. C. Bovik, H. R. Sheikh, and E. P. Simoncelli, 2004: Image quality assessment: From error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Process* **13**, 600-612. <https://doi.org/10.1109/TIP.2003.819861>
- Whitehorn, P. R., S. O'Connor, F. L. Wackers, D. Goulson, 2012: Neonicotinoid pesticide reduces bumble bee colony growth and queen production. *Science* **336**, 351-352.
- Yoo, B. H., J. Kim, B.-W. Lee, G. Hoogenboom, and K. S. Kim, 2020: A surrogate weighted mean ensemble method to reduce the uncertainty at a regional scale for the calculation of potential evapotranspiration. *Scientific Reports* **10**, 870. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-57466-0>
- Yoo, B. H., K. S. Kim and J. Lee, 2019: The use of MODIS atmospheric products to estimate cooling degree days at weather stations in South and North Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **21**(2), 97-109. <https://doi.org/10.5532/KJAFM.2019.21.2.97>