

고추 역병 방제시기 결정을 위한 PBcast 예측모델 타당성 포장 평가

Field Validation of PBcast in Timing Fungicide Sprays to Control Phytophthora Blight of Chili Pepper

***Co-corresponding authors**

E. W. Park
Tel: +82-33-333-2887
Fax: +82-33-333-2886
E-mail: ewpark@snu.ac.kr

S. C. Yun
Tel: +82-41-530-2282
Fax: +82-41-530-2393
E-mail: scyun@sunmoon.ac.kr

ORCID
<https://orcid.org/0000-0001-8305-5709>
<https://orcid.org/0000-0001-6295-8642>

안문일^{1,2} · 도기석³ · 이경희⁴ · 윤성철^{2*}  · 박은우^{5,6*} 

¹주식회사 에피넷, ²선문대학교 생명공학과, ³주식회사 넥스트온,
⁴충청북도농업기술원, ⁵서울대학교 농림기상학 협동과정, ⁶국가농림기상센터

Mun-Il Ahn^{1,2}, Ki Seok Do³, Kyeong Hee Lee⁴, Sung Chul Yun^{2*}, and Eun Woo Park^{5,6*}

¹EPINET Co., Ltd., Anyang 14056, Korea

²Department of Life Science and Biochemical Engineering, Sunmoon University, Asan 31460, Korea

³NEXTON Co., Ltd., Seoul 05605, Korea

⁴Chungcheongbuk-do Agricultural Research and Extension Services, Ochang 28130, Korea

⁵Interdisciplinary Program in Agricultural and Forest Meteorology, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

⁶National Center for Agrometeorology, Seoul 08826, Korea

Field validation of PBcast, an infection risk model for Phytophthora blight of pepper, was conducted through a designed field experiment in 2012 and 2013. Conduciveness of weather conditions at 26 locations in Korea in 2014–2017 was also evaluated using PBcast. The PBcast estimated daily infection risk (IR) of *Phytophthora capsici* based on weather and soil texture data. In the designed field experiment, four treatments including routine sprays at 7-day intervals (RTN7), forecast-based sprays when IR reached 200 (IR200) and 224 (IR224), and no spray (CTRL) were compared in terms of disease incidence and number of sprays recommended for disease control. In 2012, IR had reached over 200 twice, but never reached 224. In 2013, IR had reached over 200 three times and once higher than 224. The RTN7 plots were sprayed 17 and 18 times in 2012 and 2013, respectively. Weather conditions throughout the country were generally conducive for Phytophthora blight and 3–4 times of fungicide sprays would have been reduced if the PBcast forecast information was adopted in the decision-making for fungicide sprays. In conclusion, the PBcast forecast would be useful to reduce fungicide applications without losing the disease control efficacy to protect pepper crop from Phytophthora blight.

Keywords: Chili pepper, Control efficacy, Disease forecast, PBcast model, *Phytophthora capsici*

Received September 22, 2020
Revised October 31, 2020
Accepted October 31, 2020

서 론

고추(*Capsicum annuum* Linne)는 국내에서 열매와 가루로

유통되고 있고, 재배면적 대비 소득이 높은 작물이다. 하지만 최근 10년 동안 재배면적은 농촌의 고령화로 인한 인력부족과 병해충에 따른 피해 그리고 기상재해 등으로 지속적으로 감소하고 있다(Hong와 Kim, 2013). 특히 고추에서 *Phytophthora capsici*에 의해 발생하는 역병은 방제가 어려운 병 중의 하나이다. 2003년 우리나라 역병 발생률은 전국 평균 54.5%였으며, 고추 주산지인 전북, 경북, 전남 지역의 피해율은 69–82%로 경제

Research in Plant Disease

pISSN 1598-2262, eISSN 2233-9191
www.online-rpd.org

© The Korean Society of Plant Pathology

© This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

적 피해가 심각하였다(Kim, 2004). 고추 역병에 대한 저항성 품종은 2005년부터 농가에 보급되기 시작하였는데, 2008년 보급된 70개 품종에 대한 역병 저항성 연구 결과 26개 품종에서는 병징이 없었으나, 상품명에 역병 저항성 고추 품종을 의미하는 'PR' 또는 '역강' 접두사를 포함하는 품종 중 'PR-태평', 'PR-불타나', 'PR-열정', '역강홍장군' 등 다수의 역병 저항성 품종에서도 역병이 관찰되었다(Kim 등, 2010). 따라서 여전히 고추 역병은 저항성 품종 재배뿐만 아니라 다른 방제전략 마련이 필요한 병이다.

식물병 발생 예측 정보를 농가 현장에서 활용하려면 방제 의사결정을 지원하는 정보로서 가치가 있어야 한다(De Wolf와 Isard, 2007). 즉 방제 실시 여부를 결정하기 위한 기준이 필요하고, 이 기준에 따라 방제를 하였을 때 방제 효과를 검증해야 한다. 예를 들면 고추 탄저병 예측모델의 경우 2005년과 2006년에 충남 아산 포장에서 실시한 모델 검증 연구를 통해 감염위험도(infection risk, IR) 3이라는 기준에 근거하여 예찰방제를 실시한 결과 모델 예측에 따라 작기 중 살균제를 3회 살포한 방제가가 8-10회 살포한 정기방제의 방제가와 비슷하였다(Ahn 등, 2008).

*Phytophthora*의 많은 종들은 감염 과정 중 유주자낭에서 유주자가 방출되어 확산되기 위해서는 물이 필요하다(Duniway, 1983; Schlub, 1983). 역병균은 균사체나 난포자로 월동한 후 봄에 발아하여 유주자낭을 형성하는데, 이때 전염원은 포장의 토양 온도와 수분 상태에 따라 병원균의 토양 내 생존력과 발병률이 달라진다(Ferrin와 Mitchell, 1986). 이러한 고추 역병의 역학적 특성을 기반으로 월동 후 첫 병징 발생일(초발일)을 추정하는 예측모델인 PBcast가 개발되었다(Do 등, 2012). PBcast 모델은 기온, 상대습도, 강수량 그리고 토성 자료를 이용하여 토양 온도와 수분 상태를 추정한 후, 토양 온도에 따라 유주자낭의 형성량을 결정하고, 토양 내의 수분 함수량에 따라 활성 전염원의 양을 추정하여 일일 IR을 계산한다. PBcast는 일일 IR이 224에 도달하면 8 ± 3 일 후 병징이 발생하는 것으로 예측한다.

본 연구는 PBcast 모델을 이용하여 포장에서 역병 발생위험을 예측하고 모델 경보에 따라 살균제를 살포함으로써 역병을 늦추는 예찰방제의 효과를 검증하고자 한다. 또한 현장에서 활용가능한 PBcast 모델의 일일 IR의 적정한 수준을 새롭게 제시하고자 한다. 2014-2017년 동안 전국 26 지점에서 관측된 기상청 종관기상자료를 이용하여 PBcast 모델을 구동하여 각 지점별 고추 역병 IR을 예측하고 이들 지점에서 살균제 살포 추천횟수를 구함으로써 우리나라의 고추 역병 발생 환경을 평가하고자 한다.

재료 및 방법

실험포장 설계. PBcast 모델의 현장 평가를 위한 야외 포장 실험은 충청북도 청주시 충청북도농업기술원 고추시험포장(36°43'30.44"N, 127°27'54.08"E; 41.12 m above sea level)에서 2012년과 2013년에 수행하였다. 두 해에 걸쳐 수행된 포장 타당성 검증 실험은 4처리 4반복 난괴법(randomized block design)으로 설계하였다. 4처리는 (1) 살균제를 살포하지 않는 무방제 처리구(CTRL), (2) PBcast 모델이 예측하는 일일 IR이 200에 도달하면 살균제를 살포하는 예찰방제 처리구(IR200), (3) 일일 IR이 224에 도달하면 살균제를 살포하는 예찰방제 처리구(IR224), 그리고 (4) 정식 후 30일 이후 7-10일 간격으로 살균제를 살포하는 정기방제 처리구(RTN7)로 구성하였다. IR 224는 Do 등(2012)이 고추 역병 초발일을 예측하기 위해 제안된 수준이며, IR 200은 최근 PBcast 모델이 제안한 임계값보다 더 낮게 기준을 만들어 살균제를 보다 선제적으로 살포함으로써 방제 효과를 높이기 위해 임의로 설정하였다. 살균제는 fluopicolide 5%+propamocarb hydrochloride 50% (인피니트 액상수화제, Bayer Korea, Seoul, Korea), Cyazofamid 10% (미리카트 액상수화제, Kyung Nong, Seoul, Korea), Mandipropa-mid 22.59% (래버스 액상수화제, Syngenta Korea, Seoul, Korea)를 사용하였고, 살균제 저항성 출현을 방지하기 위해 미리카트, 인피니트, 래버스 순서로 교호 살포하였다. 모든 살균제의 살포농도는 작물보호제지침서(Korea Crop Protection Association, 2012)에 준하여 설정하였다.

재식한 고추 품종은 역병에 감수성인 왕대박(FarmHannong, Seoul, Korea)이었고, 고추 모종(7엽기)을 2012년 5월 7일과 2013년 5월 8일에 시험포장에 정식하였다. 고추밭의 줄 간격은 1.2 m였고, 고추 포기 간격은 40 cm였다. 한 시험구 크기는 2줄의 두둑에 줄 당 30주씩 총 60주의 고추를 정식하였다. 시험구 사이에는 1줄의 두둑을 두어 처리 간 간섭효과를 줄였다.

기상정보 수집. 시험포장 중앙에 무인기상관측기(automated weather stations, AWS)를 설치하여 필요한 기상자료를 수집하였다. AWS는 Datalogger (CR10X, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA)와 다음의 센서들로 구성되었고, 1분 단위로 측정하여 매시간 단위로 관측 자료를 가공하여 datalogger에 저장하였다. 측정을 위한 센서로는 지표면으로부터 1.2 m 높이에 기온(°C)과 상대습도(%)센서(HMP45C)와 토양 깊이 0.1 m 및 0.3 m에 토양온도(°C) 센서(107-L), 토양 깊이 0.3 m에 토양수분(m^3/m^3) 센서(CS616), 지상 2 m 위에 풍향(degree)과 풍속(m/sec) 센서(034A) 그리고 일사량(MJ/m^2) 센서(LI200X)를

설치하였다. 강수량은 0.1 mm와 0.5 mm 단위로 관측하는 두 가지 센서(TE525MM과 WL-RP5)를 설치하였다. 저장된 자료는 CDMA 무선 모뎀(Raven100 CDMA Airlink Cellular Modem, Campbell Scientific, Inc.)을 통해 1시간 간격으로 전송되어 서울대학교 식물병역학실험실의 기상자료 수집 서버에 저장하였다. 미기상자료 수집 기간은 2012년과 2013년 두 해 모두 5월 1일부터 9월 30일까지였다. 토성 자료는 농촌진흥청 토양정보 시스템(<http://soil.rda.go.kr>)에서 제공받았다. 그리고 2014년부터 2017년까지 우리나라 주요 고추 생산지의 기상자료는 기상청 종관관측 지점의 기상자료를 기상자료개방포털(<http://data.kma.go.kr>)에서 수집하였다.

역병 방제용 살균제 처리. 인피니트와 미리카트는 관주처리를 하였고, 래버스는 엽면살포를 하였다. 2012년도에 정기방제(RTN7) 처리는 6월 5일부터 9월 16일까지, 2013년도에는 5월 30일부터 9월 30일까지 살균제 약효 지속기간과 날씨를 고려하여 7-10일 주기로 살포하였다. IR200 예찰방제 처리는 PBcast 모델이 계산한 일일 IR이 200 이상일 때, IR224 예찰방제 처리는 일일 IR이 224 이상일 때 살균제를 살포하였다. 두 예찰방제(IR200과 IR224) 처리구의 경우 PBcast 모델의 정보 다음날 살균제를 살포하였다. 작물보호제지침서에 따르면 공시 살균제들은 10일 간격 살포를 추천하지만 본 연구에서는 PBcast 모델의 정보가 발생한 후 7일 이내에 다시 정보가 발생할 경우까지만 앞서 살포한 살균제의 약효가 지속되고 있는 것으로 간주하고, 8일이 지나 정보가 다시 발생하면 살균제를 살포했다.

고추 역병 조사와 통계 분석. 고추 역병 발병률은 2012년 6월 5일과, 2013년 5월 30일부터 7-10일 간격으로 육안 조사하였다. 시험구 전체 60주 중 주변 시험구 처리 영향을 배제하기 위해 가운데 34주를 대상으로 지재부 근처 줄기가 암갈색으로 변색되는 기주를 이병주로 판단하였다. 조사한 34주 중 이병주 비율을 발병률(incidence)로 계산하였다. 처리 효과의 통계 분석은 R 프로그램 버전 4.0.2 'stats' 패키지를 사용하여 이원분산분석(two-way ANOVA)을 하였고, 처리 간 비교는 contrast statement를 활용하여 직교대비(orthogonal comparison)로 분석하였다(The R Foundation, 2020).

고추역병 발생환경 분석. 고추는 전국 어디든 노지재배가 가능하기 때문에 2014년부터 2017년도까지 기상청 종관관측 76개 지점 중 26지점을 선정하여 PBcast 모델로 고추 역병의 일일 IR을 계산하였다(Fig. 1). 재배 기간 중 역병의 감염위험 정보 발생을 결정하는 기준은 PBcast 모델의 검증 연구 결과에 따라

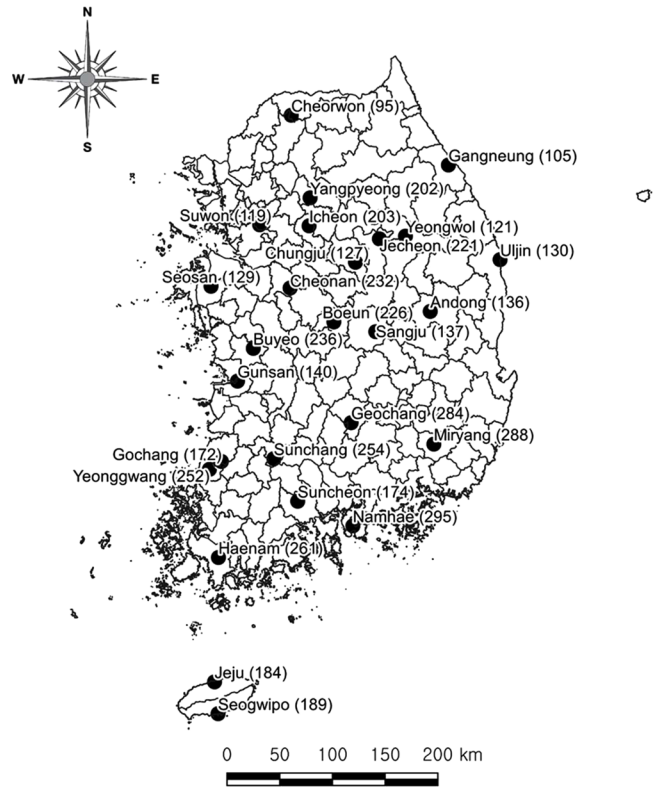


Fig. 1. Twenty-six locations in South Korea where conduciveness for *Phytophthora* blight of pepper was evaluated by PBcast using daily weather data during May 1–September 30 in 2014–2017. The numbers in parenthesis after location names are the identification numbers of weather stations of the Korea Meteorological Administration.

일일 IR이 200 이상인 날로 설정하였다. PBcast 모델의 정보에 따라 한 작기 중 총 살균제 살포 추천횟수를 결정하기 위해서는 약효 지속기간을 7일로 간주하고 정보 발생 후 7일 이내에 정보가 다시 발생할 경우에는 살균제 살포일로 간주하지 않았다. 방제 기간은 5월 1일부터 9월 30일이었고, 26개 지점별 PBcast 모델이 추천하는 살균제 살포횟수를 구하였다. 지점별 역병 발생 환경 평가를 위하여 연도와 지점별로 역병 감염위험 정보횟수와 살균제 살포 추천횟수를 비교하였다.

결 과

기상환경 분석. 실험포장에 설치한 AWS로 관측된 매시간 기상자료로부터 일일 강수량과 일평균 기온과 강수량을 분석하였다(Fig. 2). 2012년 5월 8일부터 9월 30일까지의 충북 시험포장의 기온은 $23.1 \pm 3.7^\circ\text{C}$ 이었고, 같은 기간 동안 2013년에는 기온이 $23.2 \pm 3.4^\circ\text{C}$ 이었다. 계절적인 기온 변화 추이도 두 해가 전반적으로 비슷하였다.

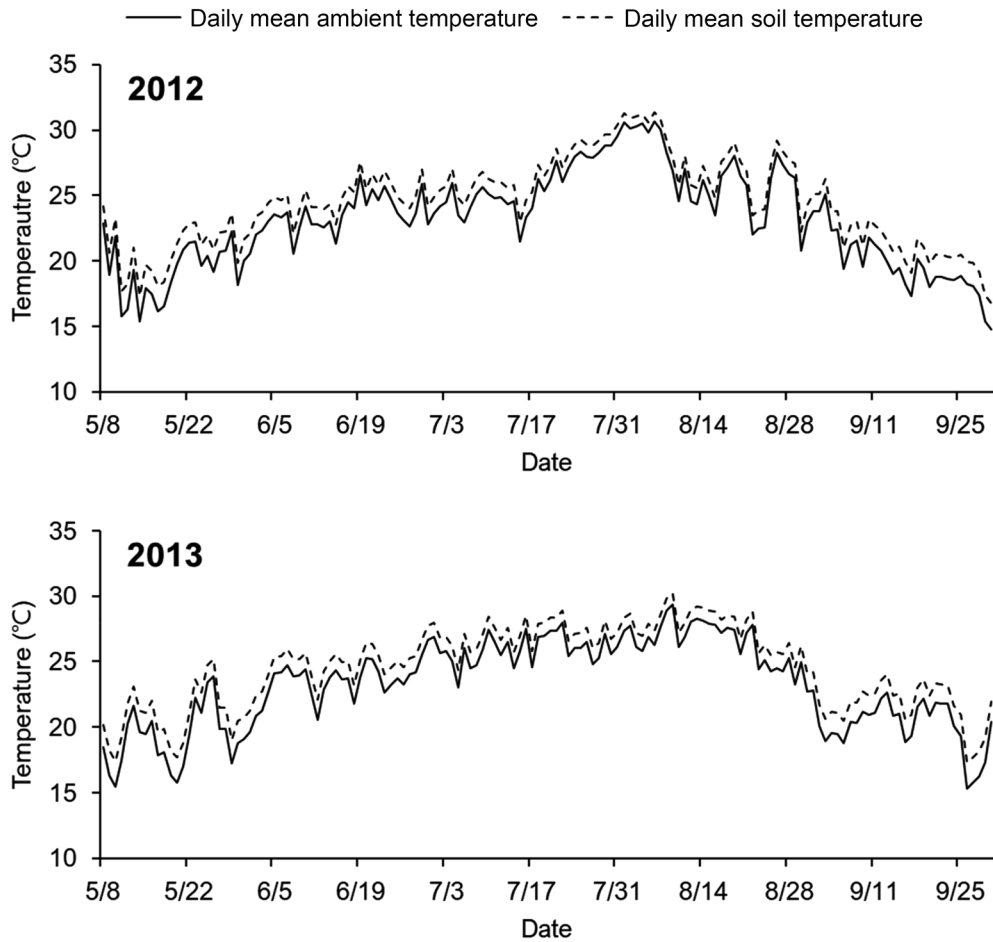


Fig. 2. Daily mean ambient temperature and soil temperature monitored by an automated weather station installed at the chili pepper field of Chungcheongbuk-do Agricultural Research and Extension Services during the growing seasons of 2012 and 2013. Daily mean soil temperature were estimated by a sub-model of PBCast (Do et al., 2012) based on observed ambient temperature.

강수량, 강우일수 및 강우분포는 두 해 간에 뚜렷한 차이가 있었다. 2012년에는 5월 8일부터 9월 30일까지 강우일수가 49 일이었으며 강우량이 총 1,054.2 mm이었다. 2013년에는 같은 기간 동안 강우일수는 58일로 전년보다 많았으나, 총 강우량은 832.3 mm로 전년도보다 적었다. 강우분포의 경우 2012년에는 8월 1일 이후에 총 강우일수의 53.1%인 26일이 분포하였고, 이 기간 동안 총 강우량의 63.5%인 668.9 mm의 비가 내렸다. 반면에 2013년에는 8월 이전에 더 많은 강우일수와 강수량이 분포하였는데 총 강우일수의 60.3% (35일)와 총 강수량의 62.0% (515.9 mm)가 5월 8일부터 7월 31일이었다.

지온과 토양수분은 Do 등(2012)이 제시한 모델을 활용하여 관측된 기온과 강수량 자료로부터 추정하였다(Fig. 3). 2012년에는 토양수분이 5월-6월에는 매우 낮았고, 7월과 8월 중순 이후에는 비교적 잦은 비로 인하여 토양수분의 변동폭이 컸으나 토양 중 가용수분이 어느 정도 유지된 것으로 추정되었다. 다만 7월 말부터 8월 초순까지는 토양수분이 매우 낮았고, 이 시기의

지온은 25°C 이상으로 높게 유지되었다. 8월 말 이후에는 토양 중 가용수분이 10% 이상 유지되었고, 지온은 대부분 25°C 이하로 유지된 것으로 추정되었다. 2013년에는 2012년에 비하여 총 강우량은 적지만 상대적으로 잦은 강우로 인하여 가용 토양수분이 어느 정도 유지되고 변동 폭이 적었다. 2012년과 비교할 때 5월에 토양수분이 높았고, 6월 하순 이후 대체로 토양수분은 10% 이상 유지되었고, 7월-8월 동안 지온이 25°C 이상으로 약 2개월 동안 고온 상태가 지속되다 9월에 들어서 25°C 이하로 떨어졌다.

역병 발생과 PBCast 모델 예측. 고추 역병 발생 양상(Fig. 4)과 PBCast 모델이 제시하는 일일 역병 IR이(Fig. 5) 2012년과 2013년에 뚜렷한 차이가 있었다. 무방제 처리구에서 2012년 8월 29일에 처음 역병 감염 개체를 발견하였고 발병주율은 3.7%였다. 이후 병진전이 빠르게 진행되어 9월 26일에는 발병주율이 68.4%까지 증가하였다. 반면에 살균제를 6월 15일에 살포한

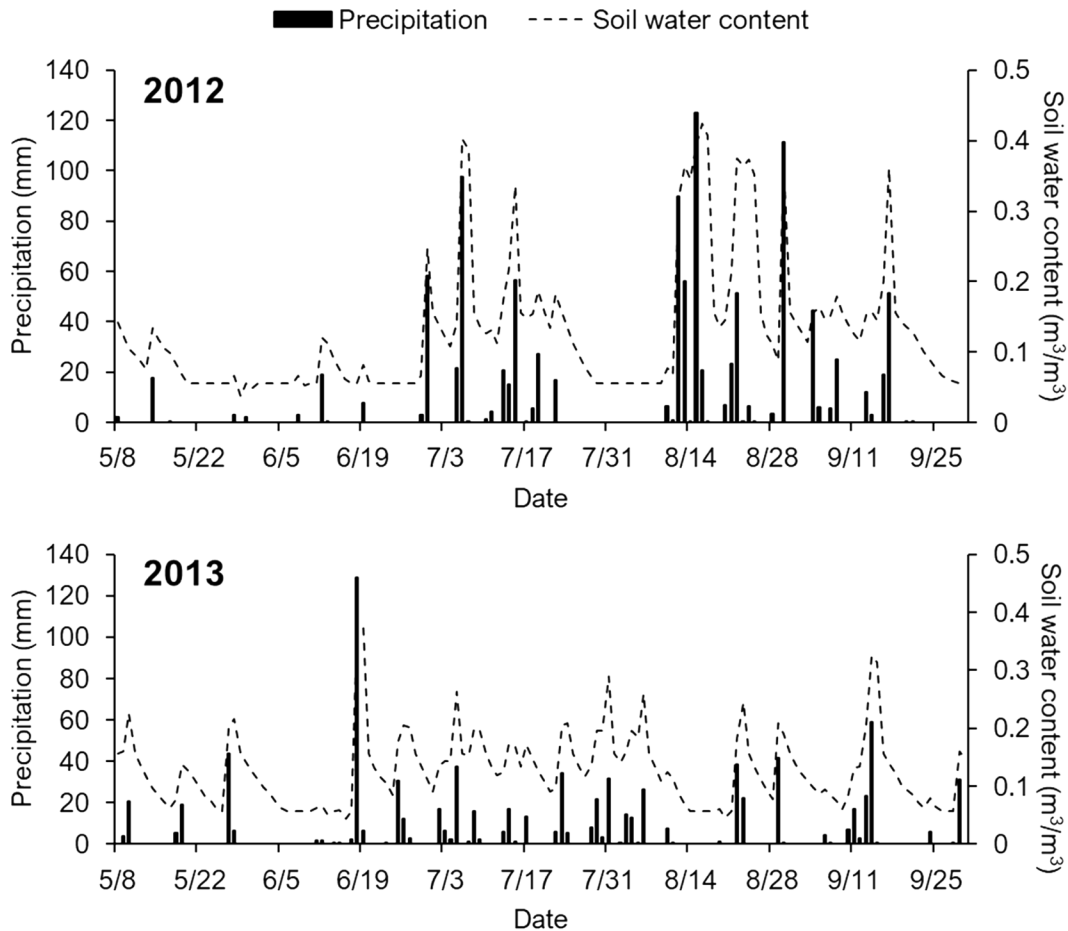


Fig. 3. Daily precipitation and soil water content of the experimental field which were estimated by sub-models of PBcast (Do et al., 2012) based on observed ambient temperature, precipitation and soil texture data in 2012 and 2013. Soil texture data were obtained from the National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration of Korea.

IR200 예찰방제 처리구에서는 무방제 처리구 발생 2주 후에 병징을 처음 발견하였으나 이후 병진전은 없었다. 2013년에는 무방제 처리구에서 7월 11일에 역병이 처음 관찰되었고 발병주율은 1.5%였다. 2012년에 비해 초발일이 한 달 반 이상 빨랐고, 이후 병진전이 천천히 진행되어 마지막 병 조사일인 9월 23일에 발병주율이 21.3%였다. 5월 30일과 6월 21일에 살균제를 살포한 IR200 예찰방제 처리구의 역병 초발일은 8월 16일이었고, IR224 예찰방제 처리구에서는 8월 30일에 역병 병징이 처음 발견되었으며, 이후 병진전이 거의 되지 않았다(Fig. 4).

2012년에는 PBcast 모델이 계산한 역병 IR이 224보다 높은 날은 없었고, 6월 13-14일에 IR=202.8-214.6, 그리고 8월 24일에 IR=211.0을 기록하였다(Fig. 5). 따라서 IR224 예찰방제 처리구에는 살균제를 한번도 살포하지 않았다. IR200 예찰방제 처리구는 위의 결과에 따라 살균제를 2회(6월 15일, 8월 26일) 살포하였다. IR224 예찰방제 처리구는 살균제를 전혀 살포하지 않아 무방제구(CTRL)의 발병주율인 64.8%와 유사한 수준인 61.8%

이었다. 반면, 7일 간격 정기방제 처리구(RTN7)에는 6월 4일부터 9월 25일까지 총 17회 살균제를 살포하였고 최종 발병주율은 2.2%였다. IR200 예찰방제 처리구의 최종 발병주율은 3.7%였다(Fig. 4).

2013년에는 역병 IR이 5월 29일에 222.5, 6월 18-20일에 292.6-324.1, 9월 15-16일에 204.7-209.7이었다(Fig. 5). 이러한 예측결과에 따라 IR200 예찰방제 처리구에는 살균제를 3회(5월 29일, 6월 20일, 9월 16일) 살포하였고, IR224 예찰방제 처리구에는 1회(6월 20일) 살포하였다. 7일 간격 정기방제 처리구(RTN7)에는 5월 29일부터 9월 30일까지 총 18회 살균제를 살포하였다. 두 예찰방제 처리구(IR200와 IR224)와 정기방제 처리구(RTN7)에서는 최종 발병주율이 각각 3.0%, 3.4%, 1.5%였다(Fig. 4). 처리구 및 날짜별로 처리된 살균제 목록은 Table 1에 제시하였다.

방제효과 분석. 살균제 살포 방제효과에 대한 이원분산분

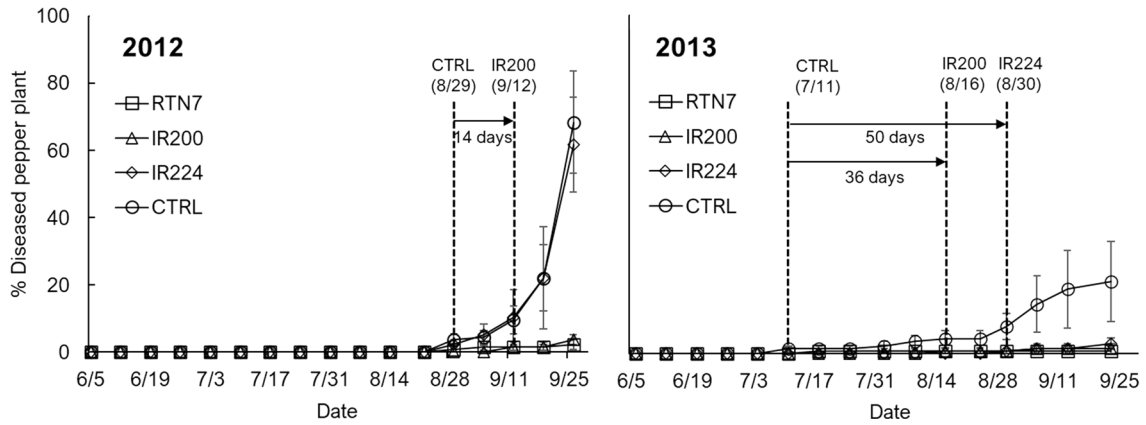


Fig. 4. Disease progress curves of *Phytophthora* blight of chili pepper in 2012 and 2013. Error bars were the standard errors of 4 replications. The dashed vertical lines represent the dates of first symptom observation in CTRL, IR200, and IR224 treatment plots, respectively.

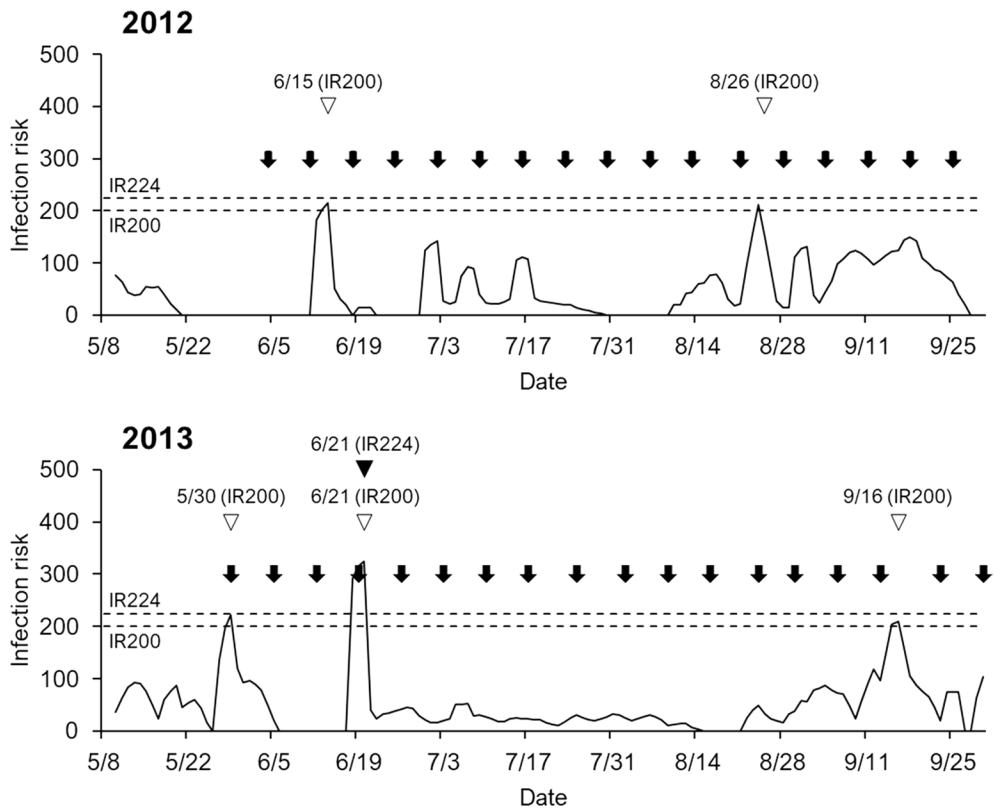


Fig. 5. Daily infection risk (IR) of *Phytophthora* blight estimated by PBCast at the experimental field during the growing seasons of 2012 and 2013. The dates of fungicide applications were indicated for RTN7 (↓), IR200 (▽), and IR224 (▼).

석(two-way analysis of variance)과 처리구 간 직교대비 결과는 다음과 같다(Tables 2, 3). 살균제를 살포한 처리구와 살포하지 않은 처리구 간의 비교는 2012년($P < 0.01$)과 2013년($P < 0.05$) 모두 방제효과가 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 2012년도 IR224 예찰방제 처리구는 살균제 살포가 전혀 없었으므로 무방제 처리구와 함께 살균제를 살포하지 않은 처리구에 포함시

켜 살균제 살포구(RTN7+IR200) 대 무살포구(CTRL+IR224)의 직교대비로 분석한 결과였다. 한편 예찰방제 처리구와 7-10일 간격 정기방제 처리구 간의 방제효과는 2012년에 예찰방제 처리구(IR200)와 정기방제 처리구(RTN7), 2013년 예찰방제 처리구(IR200+IR224)와 정기방제 처리구(RTN7) 모두 통계적으로 유의한 차이가 없었다($P > 0.05$). 따라서 PBCast 모델의 경보에 따

Table 1. Schedules of fungicide applications for routine sprays at 7-day intervals (RTN7), forecast-based sprays when infection risk estimated by PBcast reached 200 (IR200) and 224 (IR224), and no spray (CTRL) in 2012 and 2013

Year	Month	Monthly number of fungicide sprays (date)			
		RTN7 (date)	IR200 (date)	IR224 (date)	CTRL
2012	Jun	4 (5th●, 12th▲, 19th■, 26th●)	1 (15th●)	0	0
	Jul	5 (3rd▲, 10th■, 17th●, 24th▲, 31st)	0	0	0
	Aug	4 (7th●, 14th▲, 22nd■, 29th●)	1 (26th▲)	0	0
	Sep	4 (5th▲, 12th■, 19th●, 26th▲)	0	0	0
	Total number of sprays	17	2	0	0
2013	May	1 (30th■)	1 (30th■)	0	0
	Jun	4 (6th●, 13th▲, 20th■, 27th●)	1 (21st●)	1 (21st●)	0
	Jul	4 (4th▲, 11th■, 18th●, 25th▲)	0	0	0
	Aug	5 (2nd■, 9th●, 16th▲, 24th, 30th●)	0	0	0
	Sep	4 (6th▲, 13th■, 23rd●, 30th▲)	1 (16th▲)	0	0
Total number of sprays	18	3	1	0	

The fungicides were alternately sprayed using cyazofamid 10% (●), fluopicolide 5%-propamocarb hydrochloride 50% (▲), and mandipropamid 22.59% (■).

Table 2. Incidence of Phytophthora blight pepper plants under different fungicide spray schemes

Treatment ^a	Incidence (%) ^b	
	2012	2013
RTN7	2.2±2.4	0.7±1.3
IR200	3.7±2.4	1.5±2.6
IR224	61.8±21.4	3.0±3.0
CTRL	68.4±26.4	21.3±20.6

^aRTN7, routine sprays at 7-day intervals; IR200 and IR224, PBcast forecast-based sprays when infection risk (IR) reached 200 and 224, respectively; and CTRL, no spray.

^bMean of four replications and standard deviation.

른 예측방제 효과는 정기방제와 차이가 없다고 판단되었다. 또한 2013년의 경우 총 4회 살포한 IR200과 총 1회 살포한 IR224 예찰방제 처리구들 간에도 방제효과의 차이는 통계적으로 유의하지 않았다($P>0.05$).

전국 고추역병 발병환경 분석. 전국 주요 고추재배 지역에서 2014년-2017년 동안 관측된 기상청 종관기상 자료를 활용하여 PBcast 모델을 구동하여 26개 지점의 역병 감염위험 경보 횟수와 살균제 살포 추천횟수를 구하였다(Table 4). 감염위험 경보횟수의 전국 평균값이 2014년에는 27.1회로 가장 높았고, 2016년 21.4회, 2015년 18.3회, 2017년 11.8회였다. 해마다 경보

횟수의 차이도 컸지만, 같은 해에 지점 간에도 차이를 보였다. 대체적으로 해안에 인접한 지점에서 경보횟수가 많았다. 2014년-2017년 평균 감염위험 경보횟수가 적게는 7.3회(충북 청주)였고, 많게는 36회(경북 울진)였다. 이는 예측기간(5월 1일-9월 30일) 동안 청주의 경우 약 20일에 한 번 경보가 발생했고, 울진에서는 약 4일에 한 번씩 감염위험 경보가 발생한 셈이다. 고추 역병 방제용 살균제의 약효지속기간을 7일로 가정할 때 지역별로 살균제 살포횟수는 1-11회까지 추천되었다. 살균제 살포 추천횟수의 전국 평균값은 2014년 6.2회, 2015년 4.2회, 2016년 5.2회, 2017년 4회로 나타났다.

고 찰

식물병 관리를 위해 예측모델을 활용하는 목적은 기상 등 환경자료를 기반으로 감염 가능성을 예측하고 적기에 농약을 살포함으로써 정기방제 대비 살포 횟수를 줄이기 위함이다(Gent 등, 2013). 이 연구에서는 Do 등(2012)이 개발한 PBcast 모델이 예측하는 일일 IR을 활용하여 고추 역병 방제를 위해 살균제 살포시기를 결정하는 예찰방제의 효과를 포장실험을 통하여 검증하였다. Do 등(2012)은 PBcast 모델의 일일 IR 임계값을 IR=224로 설정하여 병원균이 월동 후 초기감염일을 예측하였다. 이 연구에서는 동일한 알고리즘을 활용하여 고추 재배기간 동안 역병 방제용 살균제 살포시기를 결정하였다. 예찰방제 시

Table 3. Analysis of variance with orthogonal comparisons on the treatment effects

Year	Source of variation	df	SS	MS	F ^a
2012	Block effect	3	1,978.6	659.5	1.83 ^{ns}
	Treatment effect	3	15,534.3	5,178.1	14.35 ^{**}
	(RTN7+IR200) vs. (CTRL+IR224)	1	15,442.4	15,442.4	37.70 ^{**}
	RTN7 vs. IR200	1	4.3	4.3	0.01 ^{ns}
	Error	9	3,248.7	361.0	-
2013	Block effect	3	263.8	87.9	0.53 ^{ns}
	Treatment effect	3	1,160.8	386.9	2.31 ^{ns}
	(RTN7+IR200+IR224) vs. CTRL	1	1,150.5	1,150.5	7.80 [*]
	RTN7 vs. (IR200+IR224)	1	5.9	5.9	0.04 ^{ns}
	IR200 vs. IR224	1	4.4	4.4	0.03 ^{ns}
Error	9	1,506.1	167.4	-	

^ans, *, and ** indicate not significant, significant at $P < 0.05$, and highly significant at $P < 0.01$, respectively.

기 결정을 위한 일일 IR 기준을 IR=200과 IR=224로 설정하여 방제수준이 다른 두 가지 예찰방제 처리구를 두었다. 일반적으로 영농현장에서 수용될 수 있는 병발생 위험수준이 매우 낮은 점을 고려할 때 IR200 예찰방제 처리구를 포함함으로써 Do 등(2012)이 제시한 IR224 예찰방제 처리구에 비하여 좀 더 보수적인 예찰방제체계를 평가하였다. 경제적이며 살균제 사용을 최소화시킬 수 있는 식물병 관리체계를 구축하기 위해서 살균제 살포 여부를 판단하는 필요한 감염위험 수준(infection risk threshold, 감염위험 임계값)을 결정해야 한다(Hughes, 2017).

약제방제 포장실험에서 살균제 살포 효과에 대한 처리간 직교대비 결과를 보면 약제방제 효과는 뚜렷하였다. 또한 정기방제 처리구와 예찰방제 처리구 간에는 직교대비 결과는 살균제 살포를 적시에 한다면 살포횟수를 크게 줄이더라도 7-10일 간격으로 정기방제를 한 경우와 마찬가지로 병방제를 효과적으로 할 수 있다는 것을 보여준다.

무방제 처리구에서 관찰된 역병 발생 상황을 보면 2012년과 2013년 간에 뚜렷한 차이는 기상 환경 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 2012년에는 높은 지온 또는 낮은 토양수분으로 인하여 역병이 늦게 발생하기 시작하였으나 8월 말 이후에는 역병 발생에 적합한 지온과 토양수분 조건이 충족되어 빠른 병진전이 이루어졌던 것으로 판단된다. 한편 2013년에는 5월-6월 동안 역병 발생에 적합한 지온과 토양수분 조건이 제공되어 병발

Table 4. Number of warnings and recommended sprays that would have been issued by PBcast to control Phytophthora blight based on daily weather data observed at 26 locations over S. Korea during May 1–September 30 in 2014–2017^a

Location		No. of warnings (No. of recommended sprays)			
		2014	2015	2016	2017
Inland					
Gangwon-do	Cheorwon	19 (8)	9 (4)	16 (6)	12 (5)
	Yeongwol	23 (7)	6 (4)	10 (5)	12 (3)
Gyeonggi-do	Suwon	10 (3)	3 (1)	13 (6)	4 (2)
	Yangpyeong	15 (4)	7 (3)	14 (4)	8 (3)
	Icheon	12 (6)	4 (2)	12 (4)	12 (5)
Chungcheongnam-do	Buyeo	27 (7)	7 (2)	18 (3)	15 (5)
	Cheonan	14 (4)	4 (2)	16 (6)	9 (3)
Chungcheongbuk-do	Jecheon	39 (8)	4 (2)	16 (5)	6 (2)
	Chungju	17 (5)	2 (1)	6 (3)	4 (3)
	Boeun	36 (8)	16 (4)	16 (6)	26 (5)
Jeollabuk-do	Sunchang	24 (7)	26 (6)	28 (6)	13 (5)
Gyeongsangnam-do	Geochang	35 (9)	40 (9)	21 (6)	11 (4)
	Miryang	14 (4)	21 (5)	17 (4)	8 (3)
Gyeongsangbuk-do	Andong	23 (6)	10 (3)	13 (3)	6 (3)
	Sangju	22 (6)	10 (3)	21 (6)	11 (5)
Seashore					
Gangwon-do	Gangneung	24 (6)	17 (4)	31 (7)	8 (2)
	Chungcheongnam-do	Seosan	28 (6)	5 (3)	31 (8)
Jeollanam-do	Yeonggwang	21 (5)	19 (6)	27 (7)	13 (4)
	Haenam	35 (5)	46 (7)	37 (6)	7 (4)
Jeollabuk-do	Suncheon	43 (8)	36 (7)	24 (4)	18 (5)
	Gochang	37 (6)	31 (5)	30 (4)	29 (6)
Gyeongsangnam-do	Gunsan	39 (7)	26 (5)	29 (4)	14 (6)
	Namhae	31 (6)	29 (5)	15 (5)	9 (5)
Gyeongsangbuk-do	Ulsan	57 (11)	22 (5)	47 (7)	18 (5)
Jeju-do	Jeju	20 (3)	26 (5)	23 (5)	6 (4)
	Seogwipo	40 (5)	49 (7)	25 (5)	20 (4)

^aDaily weather data were obtained from the Korea Meteorological Administration (<http://data.kma.go.kr>).

생이 상대적으로 빨리 시작되었으나 7월-8월에는 병발생 환경이 좋지 않아 병진전 속도가 늦어졌던 것으로 생각된다.

일반적으로 *Phytophthora* spp.에 의한 역병은 토양 중 물로 전

파되며, 유주자낭이 직접 발아해서 식물체를 감염시키는 경우 보다 다수의 유주자를 방출하여 식물체를 감염시키면 역학적으로 병발생 속도가 크게 높아진다(Duniway, 1976, 1979; Hord와 Ristaino, 1992). *Phytophthora* spp.의 유주자낭은 높은 온도에서는 발아관을 형성하여 직접 발아하지만 낮은 온도에서는 다수의 유주자를 방출한다. 고추 역병균인 *P. capsici*는 10–24°C에서 유주자 형성이 잘 되는데(Katsura, 1971), 12°C에서 유주자 형성이 가장 잘 되며 24°C에서 직접 발아하는 유주자낭이 많아진다(Erwin과 Ribeiro, 1996). 한편 *P. capsici*가 22–24°C에서는 유주자를 형성하는 유주자낭이 50% 미만이라는 보고도 있다(Bernhardt와 Grogan, 1982). 이러한 온도에 따른 유주자낭의 발아 방법 차이와 가용 토양수분 여부에 따른 병원균의 확산 능력의 차이로 인하여 2012년과 2013년 간의 역병의 경시적 진전 양상이 달라졌을 것으로 판단된다.

2012년에는 일일 IR이 224까지 올라간 적이 없어 예찰방제 처리구 간 비교가 불가능하였다. 2013년에는 살균제를 3회 살포한 IR200 예찰방제 처리구와 1회 살포한 IR224 예찰방제 처리구 간에 방제효과에는 통계적 유의성이 없었다. 이 결과로 볼 때 방제의사결정의 기준이 되는 IR 임계값(infection risk threshold)을 IR=224로 정해 살균제 살포횟수를 1회로 줄여도 IR=200을 기준으로 약제방제를 3회 실시한 경우와 방제효과에는 큰 차이가 없을 수 있다는 것을 의미한다. 하지만 2012년도 실험결과를 볼 때 IR 임계값을 높게 잡을 경우 역병 방제에 실패할 수도 있음을 알 수 있다. 따라서 PBcast 모델을 사용하여 예찰방제를 할 경우 방제의사결정을 위한 적정 IR 임계값 설정이 매우 중요하며, 고추 재배농가의 입장에서 확실한 예방을 위하여 보수적으로 임계값을 낮출 수 있다.

방제의사결정을 위한 적정 기준 설정은 보다 많은 병발생 자료를 바탕으로 근거를 확보해야 한다(Hughes, 2017). 특히 PBcast 모델과 같이 기상과 토양 환경요소를 위험요소(risk factors)로 활용하는 병발생 예측 모델의 경우 방제의사결정 기준을 설정하기 어렵다. 병발생은 다양한 생물-물리적 환경요인과의 상호작용의 결과로 나타나므로 소수의 환경요인에 대한 제한된 자료를 이용하여 병발생을 예측하는 것이 일반적으로 쉽지 않기 때문이다. 따라서 앞으로 PBcast 모델을 다양한 지역과 다년도에 걸쳐 평가하여 IR 임계값을 설정할 필요가 있다. 현재로서는 본 연구와 Do 등(2012)의 결과를 종합할 때 IR=200을 기준으로 고추 역병에 대한 약제방제 의사를 결정하는 것을 추천한다.

전국 26개 지점에 대한 PBcast 모델의 역병 감염위험 정보 자료를 통하여 2014–2017년 동안 국내의 고추 역병 발생 환경에 대해 추정할 수 있다. 역병 발생 가능성은 연도와 지역에 따라 큰 차이가 있었다. 전국적으로 볼 때 정보횟수는 해마다 12–27

회(평균 20회)였다. 지점별로는 2014–2017년 동안 서로 차이가 크지만 지점당 매년 평균 20회 정도 역병 발생 정보가 발생했고, 이는 5월 1일–9월 30일 동안 전국적으로 7–8일마다 병발생 위험 정보가 발생했다는 뜻이다. 결국 우리나라의 고추 재배환경으로 볼 때 역병 발생 위험은 전국적으로 상시 존재하는 것으로 간주해야 한다. 또한 역병 방제용 살균제의 약효지속기간을 7일로 가정할 때 4년 동안 전국 26개 지점의 한 해 평균 살균제 살포 추천횟수는 4.9회였다. 한편 2006년에 발표된 자료에 영농 현장에서 2005년 고추 역병 방제용 살균제 살포횟수가 8.3회로 보고되었다(Bae, 2006). 따라서 만약 PBcast 모델을 활용하여 예찰방제를 하였다면 살균제 살포횟수를 3–4회 줄일 수 있었다는 가능성이 있다.

우리나라에서는 2005년부터 고추 역병 저항성 품종이 상업적으로 보급되기 시작했다(Kim 등, 2010; Kwon 등, 2017). 이후 대부분의 고추농가가 역병 저항성 품종을 재배하고 있어 약제방제의 필요성이 크게 감소하였다. 하지만 앞서 2014–2017년 전국 26개 지점의 기상자료를 이용하여 분석한 결과에서 보는 바와 같이 역병 발생에 적합한 환경은 여전히 상존하고 있고, 저항성으로 등록된 고추 품종 중에도 풋트실협에서 인공 접종시 발병도가 20% 이상인 품종들도 확인되었다(Kwon 등, 2017). 따라서 역병 저항성 고추 품종을 재배하더라도 역병 방제를 위한 살균제 살포 여부에 대한 의사결정을 위하여 병발생 위험수준 예측이 여전히 중요한 상황이다.

결론적으로 PBcast 모델의 역병 발생 위험 예측 능력은 우수하며, 이 예측정보를 활용할 경우 살균제 살포횟수를 크게 줄이면서 역병 방제효과를 높게 유지할 수 있다. 한편 고추 품종과 재배환경 등에 따라 역병 발생 가능성도 크게 달라지므로 앞으로 다양한 품종과 지역 등에 대한 IR 임계값 설정에 관한 연구가 필요하다. 또한 PBcast 모델의 활용성을 높이기 위해서는 고추 재배 현장에서 역병과 더불어 탄저병, 담배나방 등 다른 주요 병해충 방제를 함께 고려하는 의사결정 구조 속에서 PBcast 모델의 예측정보를 활용하는 방안에 대한 연구가 필요하다.

요 약

고추 역병의 감염위험도 예측모델인 PBcast 포장검증 연구를 2012–2013년 동안 수행하였다. 그리고 2014–2017년 동안 우리나라 26개 지점에서 PBcast 모델을 이용하여 발병환경을 평가하였다. PBcast 모델은 기상과 토성자료를 이용하여 *Phytophthora capsici*의 일일 감염위험도를 추정한다. 시험포장에서 7일 간격으로 살균제를 살포하는 정기방제(RTN7) 처리, 예측된 감염위험도가 200 이상(IR200), 224 이상(IR224)일 때 살포하는 예찰방제

처리, 무방제(CTRL) 처리를 발병주율과 살균제 살포횟수로 비교하였다. 2012년에 감염위험도가 200 이상이 2회였지만, 224 이상인 경우는 없었다. 2013년은 200이상 3회, 224 이상 1회였다. RTN7 처리구는 2012년과 2013년에 17회, 18회 살포하였다. 우리나라의 기상조건은 고추 역병 발생에 유리하였고 방제의사 결정에 PBCast 예측 정보를 활용할 경우 살포횟수를 3-4회 감소시킬 수 있다. 결과적으로 PBCast 모델은 고추 역병으로부터 보호를 위해 병방제 효과의 감소없이 살균제 살포횟수를 줄일 수 있을 것으로 생각된다.

Conflicts of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

References

- Ahn, M.-I., Kang, W. S., Park, E. W. and Yun, S.-C. 2008. Validation of an anthracnose forecaster to schedule fungicide spraying for pepper. *Plant Pathol. J.* 24: 46-51.
- Bae, D. H. 2006. The disease epidemic of pepper anthracnose and importance of controlling anthracnose. In: Proceeding of Workshop for the Disease Epidemic and Control of Chili Pepper Anthracnose, ed. by National Institute of Agricultural Science and Technology, pp. 2-7. Rural Development Administration, Wanju, Korea. (In Korean)
- Bernhardt, E. A. and Grogan, R. G. 1982. Effect of soil matric potential on the formation and indirect germination of sporangia of *Phytophthora parasitica*, *P. capsici*, and *P. cryptogea*. *Phytopathology* 72: 507-511.
- De Wolf, E. D. and Isard, S. A. 2007. Disease cycle approach to plant disease prediction. *Annu. Rev. Phytopathol.* 45: 203-220.
- Do, K. S., Kang, W. S. and Park, E. W. 2012. A Forecast model for the first occurrence of phytophthora blight on chili pepper after overwintering. *Plant Pathol. J.* 28: 172-184.
- Duniway, J. M. 1976. Movement of zoospores of *Phytophthora cryptogea* in soils of various textures and matric potentials. *Phytopathology* 66: 877-882.
- Duniway, J. M. 1979. Water relations of water molds. *Annu. Rev. Phytopathol.* 17: 431-460.
- Duniway, J. M. 1983. Role of physical factors in the development of *Phytophthora* diseases. In: *Phytophthora: Its Biology, Taxonomy, Ecology, and Pathology*, eds. by D. C. Erwin, S. Bartnicki-Garcia and P. H. Tsao, pp. 175-187. American Phytopathological Society, St. Paul, MN, USA.
- Erwin, D. C. and Ribeiro, O. K. 1996. *Phytophthora Diseases Worldwide*. American Phytopathological Society, St. Paul, MN, USA. 592 pp.
- Ferrin, D. M. and Mitchell, D. J. 1986. Influence of soil water status on the epidemiology of tobacco black shank. *Phytopathology* 76: 1213-1217.
- Gent, D. H., Mahaffee, W. F., McRoberts N. and Pfender W. F. 2013. The use and role of predictive systems in disease management. *Annu. Rev. Phytopathol.* 51: 267-289.
- Hong, S. and Kim, S. 2013. The analysis on the production and consumption of red-pepper in Korea. *CNU J. Agric. Sci.* 40: 405-410.
- Hord, M. J. and Ristaino, J. B. 1992. Effect of the matric component of soil water potential on infection of pepper seedlings in soil infested with oospores of *Phytophthora capsici*. *Phytopathology* 82: 792-798.
- Hughes, G. 2017. The evidential basis of decision making in plant disease management. *Annu. Rev. Phytopathol.* 55: 41-59.
- Katsura, K. 1971. Some ecological studies on zoospore of *Phytophthora capsici* Leonian. *Rev. Plant Prot. Res.* 4: 58-70.
- Kim, B.-S., Kwon, T.-R., Hwang, J.-E., Lee, J.-M., Park, D.-G., Ahn, J.-H. et al. 2010. Resistance to *Phytophthora* blight of commercial pepper cultivars in Korea. *Res. Plant Dis.* 16: 141-147. (In Korean)
- Kim, C.-H. 2004. Review of disease incidence of major crops in 2003. *Res. Plant Dis.* 10: 1-7. (In Korean)
- Korea Crop Protection Association. 2012. *Guideline of Crop Protection Products*. Korea Crop Protection Association, Seoul, Korea. 1352 pp. (In Korean)
- Kwon, O. H., Lee, K.-H., Jang, K.-S., Kim, C.-Y., Jeon, S.-G., Kwon, J.-B. et al. 2017. Reevaluation of phytophthora blight resistance cultivars by inoculation of isolates of *Phytophthora capsici*. *Hortic. Sci. Technol.* 35(Suppl. I): 199. (In Korean)
- Schlub, R. L. 1983. Epidemiology of *Phytophthora capsici* on bell pepper. *J. Agric. Sci.* 100: 7-11.
- The R Foundation. 2020. The R project for statistical computing. URL <http://www.r-project.org/index.html> [10 December 2020].