우리나라 신고배 화상병 꽃감염 확산 가능성 및 미래 감염위험 예측을 위한 MARYBLYT 연구

MARYBLYT Study for Potential Spread and Prediction of Future Infection Risk of Fire Blight on Blossom of Singo Pear in Korea

*Corresponding author

Tel: +82-41-530-2282

Fax: +82-41-530-2393

E-mail: scyun@sunmoon.ac.kr

ORCID

<https://orcid.org/0000-0001-6295-8642>김민선 · 윤성철 *

선문대학교 제약생명공학과

Min-Sun Kim and Sung-Chul Yun *

Department of Pharmaceutical Engineering and Biotechnology, Sunmoon University, Asan 31460, Korea

Since fire blight (*Erwinia amylovora*) firstly broke out at mid-Korea in 2015, it is necessary to investigate potential spread of the invasive pathogen. To speculate environmental factors of fireblight epidemic based on disease triangle, a fire blight predicting program, MARYBLYT, was run with the measured meteorological data in 2014–2017 and the projecting future data under RCP8.5 scenario for 2020–2100. After calculating blossom period of Singo pear from phenology, MARYBLYT was run for blossom blight during the blossom period. MARYBLYT warned “Infection” blossom blight in 2014–15 at Anseong and Cheonan as well as Pyungtak and Asan. In addition, it warned “Infection” in 2016–17 at Naju. More than 80% of Korean areas were covered “Infection” or “High”, therefore Korea was suitable for fire blight recently. Blossom blight for 2020–2100 was predicted to be highly fluctuate depending on the year. For 80 years of the future, 20 years were serious with “Infection” covered more than 50% of areas in Korea, whereas 8 years were not serious covered less than 10%. By comparisons between 50% and 10% of the year, temperature and amount of precipitation were significantly different. The results of this study are informative for policy makers to manage the alien pathogen.

Keywords: *Erwinia amylovora*, Infection warning, Oriental pear, Phenology of blossom period, RCP8.5 scenario

Received June 1, 2018

Revised June 21, 2018

Accepted June 23, 2018

서 론

배는 전국적으로 재배되고(Han 등, 2008), 이들 중 88%가 화상병(fire blight)에 감수성인 '신고(*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. Singo)' 품종이다(Korean Statistical Information Service, 2017). 화상병은 *Erwinia amylovora* 세균이 병원균이며, 우리나라

라 식물방역법에서 금지병으로 지정되어 있다. 이 병의 기주는 장미과 39속 180여 종의 인과류, 핵과류 과수, 관상용 식물 등 광범위하다. 배에서 나타나는 병징은 꽃, 잎, 가지(신초), 열매, 줄기 등이 흑갈색으로 마르고 심하면 궤양을 생성해서 나무 전체가 고사되어 과실을 수확할 수 없다. 건전한 기주로 화상병 감염 시작은 주로 꽃 암술머리나 상처를 통한 침입이며(Wilson 등, 1989), 개화 초기에 감염되기 쉽다(Oh와 Beer, 2005). 현재까지 알려진 효과적인 화상병 방제는 개화기간 중 꽃감염 시기를 예측하여 감염 직후 농용 항생제인 스트렙토마이신을 살포하는 것이다(Johnson과 Stockwell, 1998; Pusey와 Smith, 2004).

Research in Plant Disease

pISSN 1598-2262, eISSN 2233-9191

www.online-rpd.org

식물방역법에 근거한 화상병 공적방제는 우리나라에서 첫 발병이 확인된 2015년 5월부터 지금까지 수행 중이며, 발견 지점을 중심으로 반경 100 m 이내에 위치한 기주식물을 모두 뽑아 매몰하고 폐기된 과원은 향후 5년간 기주식물 식재를 금지하는 것으로써 병원균 조기박멸을 목표로 한다(Park 등, 2017). 최근 3년간 우리나라 화상병 발생 및 공적방제 시행 면적은 2015년에 안성, 천안, 제천의 총 42.9 ha (43 농가)에서 발병하였고 59.9 ha (68 농가)에 공적방제를 시행했다. 2016년에는 안성, 천안에서 총 15.1 ha (17 농가)에 발병했고 19.7 ha (32 농가)를 매몰하였다. 2017년에는 경기도에서 총 16.94 ha (26 농가)가 발병했고 총 23.15 ha (42 농가)에 공적방제를 시행하였다.

공적방제가 병원균 확산 방지에 효과적이었는지를 평가하는 방안으로 병 삼각형 개념을 활용할 수 있다. 즉, 감수성 기주인 신고배가 식재된 배 생산지에서 기온, 습도 등 환경이 화상병 발병에 적합하다면, 대발병에 필요한 기주와 환경 두 요소가 충족되므로 세 번째 요소인 병원성이 강한 화상병원균 존재 여부가 발병을 결정할 것이다. 2015년 화상병 최초 발병지인 안성, 천안, 제천은 기주와 병원균이 동시에 존재했을 뿐만 아니라 화상병 발병에 적합한 환경이었을 것으로 추론된다. 화상병 발생지인 안성과 천안 주변에는 신고배 재배 면적이 200 ha 이상인 우리나라 배 주산지 12 지역 중 평택, 아산, 예산, 세종 등이 분포하는데(Korean Statistical Information Service, 2017) 아직까지는 이 지역들에서 화상병 발병은 없었다. 만일, 주변 지역 환경이 발병지와 같은 적합한 환경이라면, 발병에 필요한 기주와 환경 요소는 충족됐지만 병원균이 없었던 것이므로 발병지로부터 주변 지역으로 병원균은 확산되지 않았다는 추론이 가능하며, 결과적으로 공적방제는 효과적이었다고 평가할 수 있다. 한편, 전남 나주, 경남 진주, 경북 상주 등 발병지에서 멀리 떨어진 주요 생산지 환경이 화상병 발병에 적합하다면, 병원균만 유입되면 언제든 발병 가능하므로 병원균 존재를 확인하기 위한 모니터링을 지속적으로 시행해야 한다. 그러므로 최근 화상병 병원균이 침입한 우리나라 화상병 발병 환경 연구는 아직까지 전국적으로 분포하지 않은 병원균의 확산을 판단하고, 발병 전 선제적 대응을 위한 공적방제 방안으로서 발병에 적합한 환경을 가진 주요 생산지의 집중적인 모니터링의 필요성을 알려준다.

기온, 강우 등 농업 기상환경 변화는 기주뿐만 아니라 병원균의 생활사와 병 발달에 영향을 미치는 중요한 요인이다(Chakraborty 등, 2000; Shin과 Yun, 2011). 온도와 수분은 화상병 감염 과정에서 가장 중요한 환경요인이며(Chen 등, 2007), 특히 온대지방에서 기온 및 강수량 변화는 꽃감염 후 화상병원균 증식을 억제하기 위한 관리에 최우선 고려 대상이다(Johnson과 Stockwell, 1998; Pusey, 2000). 한편, 미래에는 CO₂ 상승에

따른 온도 상승이 예측되는데, 이러한 기후변화는 바이러스와 세균 등 고온이 적온인 식물병 발생을 증가한다는 연구결과를 보고한 총설이 있다(Chakraborty 등, 2000). 또한, 기후변화에 따른 과수 생육시기 변동은 현재와 다른 재배적지를 만들 것이다(Lee 등, 2008). 이외에도 기후변화는 식물생리에 영향을 주어 식물 유도저항성 발현을 감소시켜 병에 대한 감수성 증가의 원인이 된다(Pangga 등, 2004). 기후변화로 인해 미래 환경이 변화됨에 따라 신고배 개화기간도 변동될 것으로 예측되며, 이와 마찬가지로 화상병 발병에 적합한 환경 요소도 변동될 것이다.

우리나라와 비슷한 기후인 메릴랜드에서 1986년 개발된 MARYBLTY는 발병에 충분한 병원균이 존재하고, 감수성 기주 식물이 식재되었다는 가정 하에서 온도와 수분조건에 따라 꽃, 껍, 잎, 외상, 뿌리줄기의 화상병 감염을 예측하는 프로그램이다(Turechek과 Biggs, 2015). MARYBLTY는 개화기간 동안 매일 화상병 꽃감염 위험을 출력하는데, 이를 위해서는 일별 최고, 최저 기온과 강수량뿐만 아니라 생물계절 자료인 개화기간 입력이 필요하다. 꽃감염 결과 중 가장 위험한 단계는 "Infection"이며, 그 다음 단계는 "High"인데, 미국에서는 이들 두 위험 단계 경보가 발령되면 항생제 방제를 권고한다. 감염모델은 정확한 방제시기를 알려줌으로써 불필요한 정기방제를 줄여 방제 비용을 절감시키고 항생제 남용에 따른 내성균주 발생을 억제함으로써 효율적 방제가 가능하다. MARYBLTY는 현재 미국, 이스라엘, 스페인, 캐나다, 스위스 등에서 화상병 연구와 방제에 활용 중이다(Palacio-Bielsa 등, 2012; Shtienberg 등, 2003; Tancos 등, 2016).

식물병 모델을 활용한 미래 식물병 변화 예측 연구에서 일부 병모델은 환경과 병원균 증식만을 고려하므로(Shin과 Yun, 2011) 환경 변화에 따른 기주 변동은 감안되지 않는 반면, 생물계절 변수인 개화기간 입력이 요구되는 MARYBLTY는 기주 생육 변동에 근거해 화상병 발병을 예측하므로 보다 정확한 꽃감염 시기를 예측할 수 있다. 한편, 신고배 개화에는 휴면타파를 위한 저온충족기간이 필요하며, 휴면 완료 후 개화까지 고온이 요구된다(Kim 등, 2009; Sugiura, 2002). 그러므로 미래 기후변동 자료를 활용한 MARYBLTY 구동은 우리나라 미래의 화상병 꽃감염 예측뿐만 아니라 미래 신고배 개화시기 예측과 동절기간 중 휴면타파 유무를 예측할 수 있다.

본 연구는 아직까지는 화상병원균이 전국적으로 확산되지 않았고 신고배는 우리나라 전역에 골고루 분포하지는 않으나, 병원성이 강한 화상병원균과 감수성 기주가 우리나라 전역에 분포한다는 가정 하에 MARYBLTY를 구동하여 신고배 개화기간 중 화상병 꽃감염에 적합한 환경을 지역과 연도에 따라 Geo-

graphic Information System (GIS)로 표현하고자 한다. 이를 통해, 최근 2014–2017년 발병지인 경기 안성, 충남 천안의 환경은 발병에 적합했다는 예측을 확인하고, 공적방제가 발병지 주변 지역으로 병원균 확산을 차단하였음을 추론하고, 남부지방 주요 생산지의 환경이 화상병 발병에 적합한지를 알아보고자 한다. 또한, RCP8.5 시나리오를 활용하여 미래 2020–2100년 우리나라 신고배 개화 기간 변동과 화상병 꽃감염 위험 환경을 예측함으로써, 미래 기후변화가 화상병 꽃감염 위험을 어떻게 변동시키는지를 파악하고자 한다. 본 연구 주제인 화상병 발병 환경 연구의 목적은 발생지 주변 병원균 분포 추정을 통한 공적방제 평가, 주요 생산지의 발병 전 모니터링을 위한 예찰 방안 수립, 발병지 이외의 주요 배 생산지의 병원균 부재 확인 등 화상병 조기 박멸을 위한 정책 수립에 필요한 자료를 제공하고, 나아가 미래 화상병 변동을 예측하는 것이다.

재료 및 방법

2014–2017년 기후자료. 우리나라 시, 군 단위 행정구역 중 재배 면적이 적은 광역시의 구 단위는 하나로 통합하여 최종적으로 남한을 158 지역의 시군 행정구역으로 나누고, 측정된 기후관측 자료를 수집하여 분석 및 지도표현에 사용하였다. 2014–2017년 과거 기상자료는 기상청 기상자료개방포털(<https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>)에서 종관기상관측장비(ASOS; Automated Synoptic Observing System)와 방재기상관측장비(AWS; Automatic Weather System)로부터 관측된 기상자료 중 일별 최고·최저기온과 강수량을 정리해 MARYBLTY™7.1 형식에 맞게 입력하여 구동했다.

2020–2100년 기후자료. 정부간 기후변화협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)에서 발간한 IPCC 5차 기후변화 평가 보고서(IPCC, 2014)에 따르면 4 종류(RCP2.6/4.5/6.0/8.5)의 표준 온실가스 시나리오가 대표농도경로(Representative Concentration Pathway, RCP)로 선정되었다. 본 연구에서는 특별한 저감 노력없이 현재 추세로 온실가스를 배출한다면 2100년에는 CO₂ 농도가 940 ppm까지 도달한다는 RCP8.5 시나리오를 사용했다. 이 시나리오에 따르면 우리나라의 기온은 현재(1980–2009년)와 비교하여 21세기 후반(2070–2099년)에 약 5.6°C까지 상승하고 강우는 18.7% 증가할 것으로 전망한다(Park 등, 2014). 미래 기후자료는 기상청 기후정보포털(www.climate.go.kr)에서 얻었는데, 이는 한반도 기후변화 시나리오를 통계적 상세화(PRISM)를 적용하여 고해상도(1 km) 단위로 산출한 것이다. 미래 기후자료는 남한 230 지역

중 광역시 구, 군 단위는 하나로 통합해 최종 163 지역의 시, 군, 행정구역으로 변환하여 2020–2100년 동안(80년)의 일 최저, 최고기온과 강수량 자료만을 산출해서 MARYBLTY를 구동할 수 있도록 준비하였다.

신고배 만개기 및 개화기 추정. 신고배 개화기 추정을 위해 먼저 우리나라 160여 지역의 전년도 10월 1일부터 당해 연도 6월 1일까지의 일별 최고·최저 기온을 Sugiura와 Honjo (1997)의 방법으로 시간별 기온으로 변환하였다. 생육모형에 따르면 신고배 개화는 자발휴면 타파, 이행기, 종료 후 만개기 단계로 이행되는데, 만개기 추정을 위해 시간별 기온을 -6, 0, 6, 9, 12, 12°C 이상 등 6개로 구분하여 다르게 계산하였다(Sugiura, 2002; Sugiura와 Honjo, 1997). 자발휴면 타파 시기는 10월 1일부터 발육속도를 적산하여 발육지수(ΣDVR_1)가 1이 되었을 때로 결정하였다. 이행기는 자발휴면과 타발휴면이 겹치는 시기로서 발육지수(ΣDVR_1)가 2.2일 때 이행기를 종료하였다. 이행기가 끝난 후 만개기 추정을 위해서 20°C 이상과 이하는 각각 다른 계산식으로 계산하여 누적하였다. Han 등(2010)이 제시한 만개기 실측치 범위인 두 번째 발육지수(ΣDVR_2)가 0.8948–1.0668 사이에 해당하는 시기를 만개기로 정하였는데 만개기간은 대략 7–9일이었다. 개화기간은 만개기 이전 5일과 이후 3일을 붙여 대략 13–15일의 기간으로 결정한 후 MARYBLTY 모델에 입력하여 사용하였다(Han 등, 2008, 2010). 개화일은 Julian day로 표시하였다.

화상병 예측프로그램 –MARYBLTY™7.1. 화상병의 꽃감염위험도를 확인하기 위해 메릴랜드 대학교 홈페이지에서 제공하는 화상병 예측 프로그램인 MARYBLTY™7.1 (<http://www.caf.wvu.edu/kearneysville/MARYBLTY/index.html>)을 사용했다. 입력데이터에 3월 1일부터 8월 7일 동안(최대 160일 입력가능) 일별 최저, 최고기온, 일 강수량 그리고 만개기 계산으로부터 추정된 신고배 개화기간을 입력했다. 예측프로그램의 출력 값은 평균온도, EIP (Epiphytic Infection Potential, %), BHWT [꽃이 열려있고(B), EIP(H), 습도(W) 및 일평균온도(T)] 등의 정해진 임계값에 도달했는지 여부를 +/-로 표시한다. 출력값 중 EIP는 온도와 습도를 근거로 꽃표면에 발병이 일어날 환경을 표현하는 값이다. BHWT 4개의 조건 중 충족되는 조건이 몇 개인가에 따라 “Low”, “Moderate”, “High”, “Infection”으로 꽃감염 위험등급(R)을 개화기간 중 매일 표시한다. 즉, 개화를 필수적인 전제조건으로 개화기간 동안 매일 경보(cutpoint)가 출력되는데, “Low” (cutpoint 0)는 개화 조건만 충족, “Moderate” (cutpoint 1–3)는 EIP(H), 습도(W), 평균온도(T) 중 1개, “High” (cutpoint

4-6)는 HWT 중 2개, "Infection" (cutpoint 7)은 HWT 3가지 조건을 모두 충족한 날의 감염위험 단계들이다. 이 프로그램은 꽃감염 외에도 CBS (canker blight symptom), SBS (shoot blight symptom), TBS (trauma blight symptom) 화상병 발병도 예측 가능하는데, 본 연구에서는 꽃감염 예측 정보만을 화상병 위험 수준으로 표현하여 매년 해당 지역의 개화기간 중 매일 감염정보 결과를 누적하였다.

GIS 표현. 테블로(Tableau) 프로그램을 이용, Geographic Information System (GIS)로 표현해서 매년 우리나라 160여 지역 내의 꽃감염 위험도를 지도화하였다. 해당 연도에 각 지역의 꽃감염 위험이 "Infection" 또는 "High" 정보가 뜨는 날을 감염 위험일(infection risk day, ID)로 지도에 표현하였다.

통계분석(t-test). 2020-2100년 기간 중 특정 해에 하루 이

상 "Infection" 정보가 발령되는 지역이 우리나라 160여 지역 중 50%을 넘는 연도와 "Infection" 정보 지역이 10% 이하인 연도인 두 그룹 사이의 개화기간 중 환경을 비교하였다. 특히 우리나라에서 50%가 넘는 지역이 "Infection" 정보가 발령되는 연도의 발병 환경 수준은 화상병이 처음 발병했던 2015년과 같은 수준으로서 최근 4년 중 가장 발병에 적합한 환경이다. 두 그룹간의 통계적 비교는 개화기간 내 평균온도, 누적 강수량, 강우 횟수, 개화기간, 개화시작일 등 환경변수에 대해 두 모평균 차의 검정(t-test)을 실시하였다(ver. 2.2; S-link, Seoul, Korea).

결 과

2014-2017 우리나라 화상병 꽃감염 위험 지역. 화상병 발병 직전 연도인 2014년부터 2017년까지 4년 동안 개화기간 중 꽃감염 위험 지역을 감염위험일(Infection days, ID)로 표기하

Fig. 1. Nationwide distribution of the predicted blossom blight of fire blight warning from MARYBLYT outputs. "Infection" areas (A) and "Infection+High" areas (B) among 158 sites from 2014 to 2017 in Korea by Geographic information system (GIS) mapping are shown. During the blossoming period, the day of "Infection" warning was accumulated to 0-5 days. Fire blight was only occurred at Anseong, Cheonan and Jecheon (black line), and major pear producing area in southern part are Naju, Yeongam, Sangju, Gimcheon, and Jinju (yellow line).

여 연도별로 우리나라 158 시군 지역 지도에 표현하였다(Fig. 1A). 감염위험일(ID)은 2014–2017년 동안 매년 개화기간 중 *MARYBLYT*가 발령하는 가장 높은 위험수준인 “Infection” 정보가 발령되었던 날의 한해동안의 누적값인데, 구동결과 최소 0일부터 최대 5일까지 감염위험일이 나타났다. 중부지방인 경기, 충청, 강원 75 지역 중 2014년은 29 지역에서, 2015년은 59 지역에서 최소 하루 이상 “Infection” 정보가 발령되었던 반면, 같은 시기에 남부지방인 경상, 전라 83 지역 중에서는 2014년에는 10 지역, 2015년은 20 지역에서만 최소 하루 이상 “Infection” 정보가 발령되어 우리나라 화상병 도입 직전 및 당해 연도였던 2014–2015년에는 꽃감염 위험 지역이 중부지방이 더 많았다. 한편, 2016–2017년 중부지방에서 최소 하루 이상 “Infection” 정보가 발령된 지역은 각각 9 지역과 7 지역에 불과한 반면, 남부지방은 38 지역과 34 지역이어서 꽃감염 위험 지역은 남부지방이 더 많았다(Fig. 1A). 우리나라 최초로 화상병이 발병했던 2015년에는 최소 하루 이상 “Infection” 정보가 발령된 지역이 전국 158 지역 중 50%가 넘어 최근 4년 중 가장 높았고 2014, 2016, 2017년은 25–30% 지역에서 꽃감염 정보가 발령되었다(Fig. 1A). Cutpoint 4, 5, 6에 해당하는 “High” 정보(준위험지역으로 표시)와 cutpoint 7에 해당하는 “Infection” 정보(위험지역) 지역을 통합하여 2014년부터 17년까지 매년 158 지역을 GIS로 표현하였다(Fig. 1B). “Infection” 및 “High”를 통합하여 매년 하루 이상 두 정보가 발령된 지역은 우리나라 158 시군 중 80–97% 지역이었다(Fig. 1B). 한편, 꽃감염 위험이 낮은 지역은 대체로 해안가였는데 특히 남해안지역은 “High” 정보가

거의 없었다.

화상병 발병지로부터 주변 지역으로 확산 가능성. 2015년은 안성, 천안, 제천에서 화상병이 최초 발생했는데, 본 연구의 *MARYBLYT* 결과에 따르면 2015년 안성, 천안, 제천 지역은 “Infection” 정보를 보였다(Fig. 1A). 충남 천안과 경기 안성은 전국 최대 재배지인 전남 나주에 이어 각각 국내 배 재배면적 2, 3위의 배 주산지이며(Table 1), 두 발병지 인근에서 재배면적이 200 ha가 넘는 배 주산지는 경기 화성, 충남 아산, 공주, 충북 청주, 세종특별자치시 등이 있다(Table 1, Fig. 2). 특히 경기 안성에 접한 평택과 이천의 *MARYBLYT* 꽃감염 위험 정보 결과는 4년 내내 안성과 같았다(Fig. 2). 또한 안성과 천안 주변 지역 중 청주를 제외하면 꽃감염 위험 정보는 “High” 이상이였다. 따라서 최근 4년간 발생지 주변 경기, 충남의 배 주산지들의 환경도 발생지와 같이 화상병 발병에 적합하여 병원균이 주변으로 확산되기 쉬운 환경이었다.

우리나라 배 주산지 화상병 꽃감염 위험도. 배 재배면적이 200 ha 이상인 우리나라 배 주산지 12 지역을 연도별로 개화기간 내 “Infection” 정보가 발령된 감염위험일(ID)과 해당연도의 개화기간 중 최대 EIP를 Table 1에 정리했다. 최근 4년간 연도별 합계를 보면 최초 발병한 2015년의 12 지역의 총 감염위험일은 11일로 나머지 3년의 3–5일 보다 높았다. 2016년과 2017년에는 남부지방의 전남 나주, 경북 상주, 경북 김천에서만 감염위험일이 1–3일이었고 나머지 지역은 0일이였다(Table 1). 한해 최대

Table 1. Number of Infection Days (ID) and the maximum Epiphytic Infection Potential (EIP) from *MARYBLYT* results among the major oriental pear cultivating area in Korea

Rank	Pear production site (Area)	2014		2015		2016		2017	
		ID	EIP	ID	EIP	ID	EIP	ID	EIP
1	Jeonnam, Naju (1,992 ha)	0	117	0	57	1	158	1	182
2	Chungnam, Cheonan (1,078 ha)	1	145	1	206	0	121	0	145
3	Gyeonggi, Anseong (948 ha)	1	145	2	206	0	101	0	158
4	Gyeongbuk, Sangju (631 ha)	0	158	0	170	1	182	1	206
5	Gyeongnam, Jinju (514 ha)	0	148	0	109	0	97	0	170
6	Chungnam, Asan (507 ha)	0	97	2	206	0	73	0	145
7	Gyeonggi, Pyeongtaek (504 ha)	1	121	2	194	0	97	0	121
8	Jeonnam, Yeongam (398 ha)	0	97	0	28	0	97	0	182
9	Chungnam, Yesan (227 ha)	1	158	1	206	0	133	0	133
10	Gyeonggi, Namyangju (217 ha)	0	109	2	291	0	194	0	158
11	Gyeongbuk, Gimcheon (206 ha)	0	121	0	315	1	113	3	182
12	Sejong (195 ha)	0	133	1	267	0	145	0	170
Yearly total		4	1549	11	2255	3	1511	5	1952

Fig. 2. Predicted blossom blight of fire blight outputs from *MARYBLYT* blossom blight warning around Anseong and Cheonan where the disease has been occurred from 2015.

EIP가 100%를 넘으면 비록 “Infection” 경보가 발령되지 않더라도 감염 위험을 고려해야 하는데, 2015년 12 지역 배 주산지의 EIP 합계가 2,255%로 다른 해의 합계인 1,511–1,952% 보다 높았고, 2017년은 주산지 12 지역 모두 EIP가 100%이상이었다 (Table 1).

RCP 8.5시나리오에 따른 미래 신고배 개화일 변동. 신고배의 만개기를 직전해의 휴면 및 휴면타파, 이후 성장 등 생물계절 변동으로 추정한 후, 개화개시일부터 꽃이 떨어지는 날까지를 각 지역별로 Julian day로 표현하였다(Fig. 3). 2020년대부터 2090년대까지 매 10년간 해당지역의 평균 개화개시일은 Fig. 3 수직선의 아랫부분이며, 꽃이 떨어지는 날은 수직선의 윗부분이다. 미래 만개 및 개화일은 지역에 따라 다르지만 대체로 경기, 충남, 경북이 비슷하였고 전남, 전북, 충북, 그리고 경남과 강원 지역은 각각 따로 표현하였다(Fig. 3). 최근 경기, 충남 지방의 신고배 개화개시일은 107일(Julian day)로 4월 17일이다. 미래로 갈수록 개화개시일은 점차 앞당겨져 일찍 개화한다. 경기, 충남, 경북의 개화개시일은 2030년대 평균 107.6일에서 점차 앞당겨져 2090년대에는 95일(3월 26일)에 개화가 시작할 것으로 예측되었다. 전남, 전북, 충북은 2040년대 98.7일과 2050년대 92.8일 사이로 급격히 앞당겨진 후 2090년대에는 94.5일로 약간 늦춰졌다. 경남은 2030년대 100.3일에서 2060년대 93.4일까지 앞당겨지다가 그 후로 다시 늦춰져 2090년대에는 102.4일이었다.

Fig. 3. Changes in blossoming period of oriental pear (*Pyrus pyrifolia* cv. Shingo) from 2020 to 2100 under RCP 8.5 scenario. The periods were calculated based on the phenology accumulating index of the developments, such as dormancy, transition and estimation of full blossom. Pear flowers will start to open from the bottom of the bars and fall at the top of the bars.

Fig. 4. The number of area among the total 163 in Korea covering Infection Days (ID) from *MARYBLTY* results according to the projecting future under RCP 8.5 scenario from 2020 to 2100. Different colors are showing different Infection days, that is ID are increased 1 to 5 to from the bottom to the top of the line.

강원은 2020년대에 119.6일로 남부지방에 비해 개화개시일이 약 18일 늦지만 미래로 갈수록 급격히 앞당겨져 2090년대에는 105.1일로 현재 중부지방 배 주산지 개화개시일과 비슷해졌다 (Fig. 3). 미래 기후 중 따뜻한 겨울은 신고배 휴면타파를 완료시키지 못했는데, 부산, 울산, 전남, 경남, 제주 등 남해안을 중심으로 2070년대부터 90년대까지 만개일 계산이 불가능한 지역들이 발생했고, 개화기간을 계산할 수 없는 년도에는 이들 지역의 화상병 꽃감염 위험 예측도 불가능했다. 꽃감염 예측이 불가능한 지역은 연도에 따라 달랐는데 최소 한 지역에서 최대 22 지역이었으며, 대부분 제주 및 남해안 지역이었다(Supplementary data 1).

미래 우리나라 꽃감염 위험 지역. 2020년부터 2100년까지 매년 우리나라 160여 지역 중 개화기간 동안 *MARYBLTY*가 "Infection" 경보를 하루 이상 발령한 지역을 연도 별로 표시하였다(Fig. 4, Supplementary data 2). 하루 이상 "Infection" 경보가 발령되는 지역이 10 지역 이하인 연도부터 130 지역 이상인 연도까지 감염 위험 지역은 연도에 따라 다양했으며 미래로

갈수록 점진적으로 증가되거나 감소하는 것이 아니라 매년 급변하였다. 예컨대 2025년에는 121 지역에서 경보가 발령되었으나 2026년에는 13 지역에서만 경보가 발령되었다(Fig. 4). 하루 이상 "Infection" 경보를 발령한 지역이 우리나라 160여 지역 중 110 지역 이상으로 예측되는 해는 2021, 2023, 2025, 2037, 2038, 2044, 2064, 2073년이었는데 대부분 2020–2040년대에 분포하였다. "Infection" 경보 지역이 10 지역 이하인 해는 2026, 2029, 2032, 2045, 2051, 2066, 2083, 2085년 등이었는데(Fig. 4, Table 2), 위험지역이 상대적으로 많이 분포했던 2020–2030년 도에도 10 지역 이하인 해가 3년이나 포함되어서 향후 10년 이내의 가까운 미래에 화상병 꽃감염 위험 지역은 연도에 따라 급변할 것으로 예측되었다.

미래 꽃감염 위험도가 높은 해와 낮은 해 비교. 미래 2020년부터 2100년까지 80년 중에서 하루 이상 "Infection" 경보가 발령된 지역이 우리나라 전 지역 중 50% 이상에서 나타나리라 예측된 해는 총 20년이었고, "Infection" 경보 지역이 10% 이하에서 나타나리라 예측된 해는 총 8년이였다(Table 2). 다

Table 2. The years covered with more than 50% areas of blossom blight of fire blight infection and less than 10% areas of the infection in Korea during predicting 2020–2100 by RCP 8.5 scenario

Infection risk area	2020's	2030's	2040's	2050's	2060's	2070's	2080's	2090's	Total (years)
More than 50% risk of infection	2021	2033	2042	2052	2060	2073		2090	20
	2023	2037	2043	2057	2064	2076	–	2097	
	2025	2038	2044		2069	2078		2098	
Less than 10% risk of infection	2026	2032	2045	2051	2066	–	2083	–	8
	2029						2085		

Table 3. Comparing t-tests of the environmental parameters during the blossoming period. The comparisons of the two groups were the years of more than 50% and less than 10% covering “Infection” warning areas of blossom blight from *MARYBLYT* results in Korea for 2020–2100 projected by RCP 8.5 scenario

Environmental parameters	More than 50%	Less than 10%	p values
Mean temperature (°C)	14.56±0.63	12.81±0.85	< 0.0001
Number of precipitation (Days)	4.40±1.31	3.75±1.98	0.3170
Accumulate of precipitation (mm)	55.19±31.57	29.25±15.55	0.0367
Epiphytic Infection Potential (EIP)	96.39±21.93	51.93±16.09	< 0.0001
Days of flowering period (Days)	13.93±0.43	15.32±0.85	< 0.0001
Starting date of flowering (Julian day)	108.27±4.96	107.33±4.06	0.6378

시 말해, 최근 4년 중 발병 위험이 가장 높았던 2015년과 같은 수준의 발병 위험이 예측된 해가 향후 80년 중 20년이었다. 이 두 그룹의 개화기간 중 환경요인을 비교하면, 꽃감염 위험지역이 50% 이상인 해의 EIP 평균은 96.4%, 위험지역이 10% 이하인 해의 평균은 51.9%로 통계적으로 유의하였다(Table 3). 위험지역 50% 이상인 해의 개화기간 내 평균온도는 14.6°C, 위험지역 10% 이하인 해의 평균온도는 12.8°C로 감염위험이 높았던 해의 개화기간 내 평균 온도도 통계적으로 유의하게 높았다($p < 0.0001$). 개화기간 내 누적 강수량은 50% 이상인 해는 표준편차가 컸으나 평균 55.2 mm으로 10% 이하인 해의 29.3 mm보다 개화기간 내 누적 강수량이 높았다($p = 0.0367$). 반면, 개화기간 내 강우 횟수는 두 그룹 모두 평균 약 4 일로 감염위험도가 높은 해와 낮은 해의 차이는 없었다. 따라서 개화기간 중 온도가 높고 강우량이 많은 환경이 화상병 발병에 적합한 환경이었다. 50% 이상인 해와 10% 이하인 해의 개화기간은 각각 13.9 일과 15.3일로 꽃감염 위험이 높은 해의 개화 기간이 통계적으로 유의하게 짧았고($p < 0.0001$), 개화 개시일은 108.3일(Julian day)과 107.3일로 비슷하였다(Table 3).

고 찰

최근(2014–2017년)과 미래(2020–2100년) 총 84년 동안

*MARYBLYT*를 구동해 신고배 개화기간 중 화상병 꽃감염에 적합한 환경 요인을 충족하는 지역을 살펴본 결과, 최초 발병한 2015년 발병지인 경기 안성, 충남 천안, 충북 제천의 꽃감염 정보 결과는 “Infection”이었다. 이는 연구 전에 예상한 것과 같이 최초 발병 당시 이들 세 발병지들은 모두 꽃감염에 적합한 환경이었다. 미래 화상병 감염위험 예측 결과 꽃감염 정보가 발령된 지역은 미래로 갈수록 증가하거나 감소하는 점진적인 변동이 아니라 해마다 급변하였다. 특히 최근 4년 동안 화상병 정보 발령 결과를 보면, 미국에서 항생제 방제를 권고하는 “Infection” 또는 “High” 정보(감염위험 + 감염 준위험)가 발령되었던 지역이 전국 80% 이상이므로 최근 우리나라는 화상병 발병에 적합한 환경이었다. 또한 미래 80년 중 2015년의 발병 위험 환경 수준보다 같거나 높으리라 예측된 해가 20년이었다.

화상병은 미국, 유럽 등 40개국 이상에서 발병하여 사과와 배 산업에 연간 약 100억 달러 상당의 경제적 손실을 초래한다(Robert 등, 1998). 화상병 발병 국가에서 미발병 국가로 과수 수출시 까다로운 검역 절차가 불가피한데, 그동안 우리나라뿐만 아니라 일본, 뉴질랜드 등 미발병국에서 식물검역은 효과적인 수입장벽이었다(Robert 등, 1998). 화상병 조기 박멸에 실패하여 향후 병원균이 국내에 정착한다면 사과와 배의 수출이 연간 약 30% 이상 감소되리라 예상되며(Palacio-Bielsa 등, 2012), 이보다 더 심각한 것은 이들 과실의 수입 장벽이 낮아져 국내

과수 산업에 큰 타격이 예상된다.

북미 동부지역은 화상병균이 전역에 확산되어 있고 기상자료와 과수원의 병발생 자료가 꾸준히 축적되어 있어 MARYBLYT가 실제 발병을 얼마나 잘 예측하는지를 평가할 수 있다(Dewdney 등, 2007). Cutpoint 7로 "Infection" 정보가 발령된 해에 해당 지역에서 화상병이 실제 발병한 확률은 52%였고, 발병 가능성이 희박한 Cutpoint 1, 2, 3인 "Moderate" 결과였던 해의 해당 지역 중 실제 8%는 발병하였다. 즉 가장 위험수준이 높은 "Infection" 정보가 발령되더라도 실제 과수원에서 화상병이 발생하지 않을 확률(false-positive)도 48%는 되며, 발병에 적합하지 않은 환경(Moderate)에서도 낮은 확률(8%)이나마 발병(false-negative)할 수도 있다. 본 연구에서 MARYBLYT 꽃감염 예측 결과가 의미하는 것은 병원균과 기주가 전국적으로 분포한다는 가정 하에서 개화기간 동안 대상 지역의 환경이 발병에 적합한지를 판단하여 건전한 기주로 꽃감염 확산이 어느 해에 어떤 지역에서 개화기간 중 며칠 동안 지속되는지를 꽃감염 위험으로 표현한 것이다. 즉 화상병 꽃감염 예측은 발생량을 예측하는 것이 아니라 개화기간 중 건전한 기주로 꽃감염에 적합한 환경인 날이 며칠인지를 보여주는 것이다. 실제 경기 안성과 충남 천안의 정보는 2014-2015년 "Infection"에서 이후 2016-2017년에는 "High"로 위험 수준은 떨어졌지만 여러 해살이 과수 특성상 이미 감염된 나무에서 발병이 지속됨으로써 2016년과 2017년도에도 이들 발병지에서 화상병은 15-17 ha에서 여전히 발병하였다.

화상병 기주는 배뿐만 아니라 사과를 포함하여 자두, 살구, 복숭아, 매실 등이 있다. 현재 우리나라에서 재배되는 다양한 품종의 사과들은 감수성이 다르므로 우리나라 환경에서 화상병 꽃감염 위험을 표현하는데 감수성이면서도 배 재배 품종 중 88%인 신고배가 화상병 감염 확산 위험을 파악하는 본 연구 목적에 가장 적합한 기주였다. 현재 발병이 확인된 경기 안성 및 천안 지역에서 병원균이 타 지역으로 확산된다면 사과, 복숭아, 살구, 자두, 매실 등 과수를 포함하여 산림 및 조경지에 식재된 모과나무 등 대부분의 장미과 식물이 기주가 된다. 결국 다양한 기주 범위가 화상병 병원균의 공급처가 되므로 화상병 공적 방제 대상 지역은 농경지뿐만 아니라 산림지까지 확대되어야 하고, 예찰을 위한 모니터링 지역도 확장될 수밖에 없어 공적방제에 필요한 비용과 인력이 증가될 것이다.

화상병 발생지 주변 평택, 아산, 예산, 세종 지역으로 화상병 유입을 방지를 위한 공적방제는 현재까지 매우 성공적이었다고 여겨진다. 왜냐하면 Fig. 1과 Table 1 결과에 따르면 경기 이천은 최근 4년간 MARYBLYT 정보 결과가 경기 안성과 같은 수준을 보였음에도 발생지 주변 지역에서 발병 보고가 없었으므로 연구

전 예상했던 것처럼 병원균은 주변으로 확산하지 않았다고 추정된다. 하지만 안성, 천안은 꽃감염 위험도가 줄었음에도 발생은 지속되고 있어 병원균은 계속 공급될 수 있고, 배뿐만 아니라 사과를 비롯한 화상병 기주인 장미과 과수 및 관상식물이 광범위하게 재배되므로 확산 위험은 여전히 존재한다. 한편, 남부지방 배 주산지인 전남 나주, 경북 상주, 김천의 꽃감염 위험은 2016년과 2017년에 "Infection" 정보를 발령했지만 실제 발병은 없었던 것은 병 삼각형의 기주, 환경 요소는 충족하나 병원균이 이들 지역까지 유입되지 않았기 때문이라고 추론된다. 결국 최근 4년간 우리나라 배 주산지들은 대부분 화상병 발병에 적합한 환경이었으므로 병원균 유입과 존재 여부를 지속적으로 확인하는 모니터링은 중부뿐만 아니라 남부지방까지 전국의 모든 배 주산지로 확대 시행할 필요가 있다. 개화한 꽃을 농장단위로 샘플링하여 병원균을 검출함으로써 병원균 존재를 확인하는 모니터링을 제안한다. 모니터링 자료는 향후 화상병원균 조기박멸을 국제기구에 보고할 때 발병지 주변 및 기타 주산지에서 화상병원균이 없었다는 증거 자료로 활용할 수 있다.

Shin과 Yun (2011)은 A1B시나리오에 따라 미래 탄저병 발병을 확인한 결과 우리나라 전국에서 탄저병 발병이 증가한다고 예측하였다. 또한 Do 등(2016)은 RCP 8.5시나리오에 따라 미래 참다래 궤양병의 발병도(incidence)는 미래로 갈수록 해안에서 내륙으로 확산되어 증가함을 예측한 바 있다. 반면에 본 연구에서 RCP8.5시나리오 하에서 미래 화상병 예측에서는 10년 단위의 년대별 꽃감염 위험지역은 전국적으로 약 40%였는데 (Supplimentary data 2A-D), 온도와 이산화탄소가 꾸준히 증가하는 미래 80년 동안 꽃감염 위험지역은 미래로 갈수록 확대되는 것이 아니라 해에 따라 기상 환경에 영향을 받아 큰 변동을 보이며 "Infection" 정보를 나타내는 감염위험 지역은 10년 단위의 평균으로 계산시 전국 160여 시군 중 평균 40% 지역이 감염 위험지역으로 예측되었다는 의미이다.

미래 기후에서 신고배 개화일 추정은 배 화상병 예측을 보다 정확하게 할 수 있는 선결과제였다. 미래 기후는 지역에 따라 신고배 개화 개시일을 10-15일 앞당겼으나, 남해안 지역에서는 기온 상승으로 인해 2060년대부터 점차 신고배 휴면을 충족하지 못해 2080년대와 90년대에는 이 지역들 중 개화일을 추정할 수 없는 지역이 최대 22 지역까지 확산되었고 이에 따라 화상병 감염 예측도 불가능하였다. 따라서 Fig. 4에서 표현했던 연도별 "Infection" 정보 발령지역 중 꽃감염 예측이 불가능한 2060-2090년대의 남해안 지역(Supplimentary data 1)들은 감염 예측 대상지역에서 빠질 수밖에 없어 이 시기 감염위험 대상 지역은 전국 160여 지역 중 해에 따라 최대 22 지역이 제외될 수밖에

에 없었다. 강원지역의 미래 개화 개시일은 현재 주산지의 개화 개시일과 비슷해지면서 우리나라 신고배 재배적지는 2060년 이후부터 강원도로 이동할 것으로 예측된다. 특히, 현재 재배 면적이 가장 넓은 전남 나주 역시 2060년 이후로 저온이 충족되지 않아 휴면타파가 불가능하며 결국 개화를 할 수 없는 지역으로 예측되었다. 또한 경기, 충남 지역 등 현재 2-12위의 배주산지도 현재부터 2080년까지는 재배 가능하나 이후 기후 변화로 인해 신고배 재배지역은 강원도를 중심으로 차츰 축소될 전망이다.

화상병 피해가 심각한 발병국가에서 MARYBLTY 활용은 방제 시기를 판단하여 적기 방제를 실현할 수 있는 효율적 방제 방안인 반면, 아직 병원균이 전국적으로 확대되지 않은 우리나라에서 MARYBLTY는 화상병원균 확산 추정 및 집중 모니터링이 필요한 지역 선정 등 정책 결정에 활용할 수 있다. 비록 MARYBLTY 분석 결과가 많은 인력과 예산이 소요되는 공적방제 및 모니터링 작업을 대체할 수는 없지만, 공적방제의 중요성과 미발병지에 대한 모니터링 필요성을 알릴 수 있어 효과적인 화상병 예방 정책 수립에 유용하다. 즉, 화상병 발생 후 확산방지를 위한 공적방제도 중요하지만, 발병 전에 선제적 대응을 위한 전략 수립이 가능할 것이다.

요 약

화상병은 우리나라에서 그동안 존재하지 않았던 금지병으로서 2015년 최초로 발병한 후 아직 박멸되지 않아, 국내 확산 연구가 필요하다. 병 삼각형 원리를 바탕으로 화상병 발병에 적합한 환경 요인을 추론하기 위해서, 최근 4년(2014-2017년) 우리나라 기상관측 자료 및 미래(2020-2100년) 기후변화 시나리오 RCP8.5 예측 기상자료를 입력하여 화상병 발병 예측프로그램인 MARYBLTY로 꽃감염을 예측하였다. 이 예측 프로그램은 신고배 개화기간을 먼저 계산한 후, 개화기간 중 매일매일의 화상병 꽃감염 위험 경보를 출력하였다. 최근 4년 동안 꽃감염 결과 화상병 발생지인 경기 안성과 천안뿐만 아니라 인근 주산지인 평택, 아산 모두 2014년과 2015년에 "Infection" 경보가 나타났다. 또한 배 주산지인 전남 나주는 2016-2017년 "Infection" 경보가 나타났다. 최근 4년간 방제 권고 수준인 "Infection" 또는 "High" 경보 발령은 우리나라 전체 중 80% 지역에서 나타나 우리나라는 화상병 발병에 적합한 환경이었다. 80년간 미래 기후변화 기상자료로 개화기간 동안 화상병 꽃감염을 예측한 결과 해마다 감염위험 지역이 급변하였다. 하루 이상 "Infection" 경보가 발령되는 지역이 전국의 50%가 넘는 정도로 광범위할 것으로 예측되는 해는 총 20년이었던 반면 "Infection" 경보가 전

국의 10% 미만 지역일 것으로 예측된 해는 8년이었던 이들 두 그룹의 환경요인 비교분석 결과, 개화기간 중 평균온도와 누적 강수량이 유의하게 달랐다. 본 연구 결과는 외래 침입균인 화상병 관리를 담당하는 정책 당국에 적절한 정보를 제공할 것이다.

Conflicts of Interest

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

References

- Chakraborty, S., Tiedemann, A. V. and Teng, P. S. 2000. Climate change: potential impact on plant diseases. *Environ. Pollut.* 108: 317-326.
- Chen, C., Chen, J., Hu, B., Jiang, Y. and Liu, F. 2007. Potential distribution of alien invasive species and risk assessment: a case study of *Erwinia amylovora* in China. *Agri. Sci. China* 6: 688-695.
- Dewdney, M. M., Biggs, A. R. and Turechek, W. W. 2007. A statistical comparison of the blossom blight forecasts of MARYBLTY and *Courgarblight* with receiver operating characteristic curve analysis. *Phytopathology* 97: 1164-1176.
- Do, K. S., Chung, B. N., Choi, K. S., Ahn, J. J. and Joa, J. H. 2016. Impact of climate change on yield loss caused by bacterial canker on kiwifruit in Korea. *Korean J. Agric. For. Meteorol.* 18: 65-73. (In Korean)
- Han, J. H., Lee, S. H., Choi, J. J., Jung, S. B. and Jang, H. I. 2008. Estimation of dormancy breaking time by development rate model in 'Niitaka' pear (*Pyrus pirifolia* Nakai). *Korean J. Agric. For. Meteorol.* 10: 58-64. (In Korean)
- Han, J. H., Cho, K. S., Choi, J. J., Hwang, H. S., Kim, C. G. and Kim, T. C. 2010. Estimation of changes in full bloom date of 'Niitaka' pear tree with global warming. *Korean J. Hortic. Sci. Technol.* 28: 937-941. (In Korean)
- IPCC. 2014. Climate change 2014 - synthesis report - summary for policymaker. Korea Meteorological Administration, Korea. 35 pp. (In Korean)
- Johnson, K. B. and Stockwell, V. O. 1998. Management of fire blight: a case study in microbial ecology. *Annu. Rev. Phytopathol.* 36: 227-248.
- Lee, S. H., Heo, I. H., Lee, K. M., Kim, S. Y., Lee, Y. S. and Kwon, W. T. 2008. Impacts of climate change on phenology and growth of crops: In the case of Naju. *J. Korean Geogr. Soc.* 43: 20-35. (In Korean)
- Kim, S. O., Kim, J. H., Chung, U. R., Kim, S. H., Park, G. H. and Yun, J. I. 2009. Quantification of temperature effects on flowering date determination in Niitaka pear. *Korean J. Agric. For. Meteorol.* 11: 61-71. (In Korean)

- Korean Statistical Information Service. 2017. Pear main producing areas and cultivation area. Deajeon, Korea. (In Korean). URL http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1ET0068&vw_cd=MT_ZTITLE&list_id=&seqNo=&lang_mode=ko&language=kor&obj_var_id=&itm_id=&conn_path=K2 [27 July 2015].
- Oh, C. S. and Beer, S. V. 2005. Molecular genetics of *Erwinia amylovora* involved in the development of fire blight. *FEMS Microbiol. Lett.* 253: 185-192.
- Palacio-Bielsa, A., Lopez-Quilez, A., Llorente, I., Ruz, L., López, M. M. and Cambra, M. A. 2012. Criteria for efficient prevention of dissemination and successful eradication of *Erwinia amylovora* (the cause of fire blight) in Aragón, Spain. *Phytopathol. Mediterr.* 51: 505-518.
- Pangga, I. B., Chakraborty, S. and Yates, D. 2004. Canopy size and induced resistance in *Stylosanthes scabra* determine anthracnose severity at High CO₂. *Phytopathology* 94: 221-227.
- Park, I. S., Woon, Y., Chung, K. W., Lee, G., Owen, J. S., Kwon, W. T. et al. 2014. In-depth review of IPCC 5th assessment report. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.* 30: 188-200.
- Pusey, P. L. 2000. The role of water in epiphytic colonization and infection of pomaceous flowers by *Erwinia amylovora*. *Phytopathology* 90: 1352-1357.
- Pusey, P. L. and Smith, T. J. 2004. Relation of pomaceous flower age to infection by *Erwinia amylovora*. *Proc. the Xth International Workshop on Fire Blight*. Bolonga, Italy. pp. 127-129.
- Robert, R. G., Hale, C. N., van der Zwet, T., Miller, C. E. and Redlin, S. C. 1998. The potential for spread of *Erwinia amylovora* and fire blight via commercial apple fruit; a critical review and risk assessment. *Crop Prot.* 17: 19-28.
- Shin, J. W. and Yun, S. C. 2011. Impact of climate change on fungicide spraying for anthracnose on hot pepper in Korea during 2011-2100. *Korean J. Agric. For. Meteorol.* 13: 10-19. (In Korean)
- Shtienberg, D., Shwartz, H., Oppenheim, D., Zilberstaine, M., Herzog, Z., Manulis, S. et al. 2003. Evaluation of local and imported fire blight warning systems in Israel. *Phytopathology* 93: 356-363.
- Sugiura, T. 2002. Dormancy and chilling requirement of deciduous fruit tree. *Ser. Agric. Technol.* 8: 2-50.
- Sugiura, T. and Honjo, H. 1997. The effects of temperature on endodormancy completion in Japanese pear (*Pyrus pyrifolia* Nakai) and modeling the relationship. *J. Agric. Meteorol.* 53: 285-290.
- Tancos, K. A., Villani, S., Kuehne, S., Borejsza-Wysocka, E., Breth, D., Carol, J. et al. 2016. Prevalence of streptomycin-resistant *Erwinia amylovora* in New York apple orchards. *Plant Dis.* 100: 802-809.
- Turechek, W. W. and Biggs, A. R. 2015. MARYBLT v. 7.1 for windows: An improved fire blight forecasting program for apples and pears. *Plant Health Prog.* 16: 16-22.
- Wilson, M., Sigee, D. and Epton, H. A. S. 1989. *Erwinia amylovora* infection of hawthorn blossom. I: The anther. *J. Phytopathol.* 127: 1-14.