

참다래 잎에서의 궤양병 감염 위험도 모형

A Forecast Model for Estimating the Infection Risk of Bacterial Canker on Kiwifruit Leaves in Korea

도기석* · 정봉남 · 좌재호

농촌진흥청 국립원예특작과학원 온난화대응농업연구소

***Corresponding author**Tel: +82-64-741-2584
Fax: +82-64-749-2066
E-mail: doki7312@gmail.com**Ki Seok Do*, Bong Nam Chung, and Jae Ho Joa**

Research Institute of Climate Change and Agriculture, National Institute of Horticultural and Herbal Science, Rural Development Administration, Jeju 63240, Korea

A forecast model for estimating the infection risk of bacterial canker caused by *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* on kiwifruit leaves in Korea was developed using the generic infection model of Magarey et al. (2005). Two-way contingency table analysis was carried out to evaluate accuracy of forecast models including the model developed in this study for estimating the infection of bacterial canker on kiwifruit using the weather and disease data collected from three kiwifruit orchards at Seogwipo in 2015. All the tested models had more than 80% of probability of detection indicating that all the tested models could be effective to manage the disease. The model developed in this study showed the highest values in proportion of correct (51.1%), probability of detection (90.9%), and critical success index (47.6%). It indicated that the model developed in this study would be the best model for estimating the infection of bacterial wilt on kiwifruit leaves in Korea. The model developed in this study could be used for a part of decision support system for managing bacterial wilt on kiwifruit leaves and help growers to reduce the loss caused by the disease in Korea.

Keywords: Bacterial canker, Disease forecast model, Infection, Kiwifruit, KVH PSA-V model

Received December 7, 2015
Revised June 16, 2016
Accepted July 31, 2016

서론

Pseudomonas syringae pv. *actinidiae*에 의해 발생하는 궤양병은 한국에서 참다래에 발생하는 주요한 병으로 때때로 참다래 과원에 치명적인 피해를 입히고 있다(Ko 등, 2002a; Koh, 1995; Koh 등, 1994, 2012). 이 병은 일본(Serizawa 등, 1989; Takikawa 등, 1989), 이탈리아(Balestra 등, 2009; Scortichini, 1994)를 비롯한 다른 여러 국가들(Balestra 등, 2010, 2011; Bastas와 Karakaya, 2012; Everett 등, 2011; Vanneste 등, 2011a)

에서도 참다래 과원에 발생하여 상당한 피해를 주고 있다. 한국에서 참다래 궤양병은 1988년 제주에서 처음으로 헤이워드 품종의 참다래에서 발견이 되었고 그 후에 다른 재배지로 빠른 전파가 일어났다(Koh 등, 1994, 2010; Lee 등, 2005). 궤양병 병원세균은 현재 상업적인 참다래 품종들(*Actinidia deliciosa*와 *A. chinensis*)뿐만 아니라 야생 참다래들(*A. arguta*와 *A. kolomikta*)에서도 분리가 되고 있다(McCann 등, 2013; Scortichini 등, 2012). 참다래 궤양병 병원세균은 4가지 계통으로 구분되는데 각각 일본, 한국, 뉴질랜드에서 주로 분리되는 계통과 최근의 이탈리아와 뉴질랜드 등에서의 대발생의 원인이 된 계통이다(McCann 등, 2013). 우리나라에서도 최근의 대발생의 원인이 되는 계통에 속한 병원세균이 분리

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.

되었다(Koh 등, 2012).

참다래 궤양병의 병징은 가지에서 수피가 갈변하고 흰색 또는 적색의 세균 진액이 흐르는 궤양증상 및 고사 증상이 나타나고 잎에서는 처음에는 황색의 작은 반점으로 나타났다가 흔히 황색의 띠를 두르고 있는 암갈색 반점으로 발전이 되며 꽃썩음 증상으로 나타나기도 한다(Scortichini 등, 2012). 가지에 나타나는 세균 진액이 흐르는 궤양증상은 이른 3월에서 4월에 나타나기 시작해서 늦은 4월에서 5월에 가장 많은 증상을 보인다(Ko 등, 2002a). 잎에서의 병징은 늦은 4월에서 5월부터 나타나기 시작한다(Ko 등, 2002a; Koh 등, 1994). 궤양병 병원세균, *P. syringae* pv. *actinidiae*는 병징이 나타나는 조직뿐만 아니라 병징이 나타나지 않은 조직에서도 검출이 되는 것으로 보아 이 세균은 식물체 표면에도 잘 정착하여 생존이 가능한 것으로 보인다(Vanneste 등, 2011b). 12°C–18°C의 온도와 습한 환경이 병원세균의 증식과 감염된 조직들에서 비감염된 조직들으로의 확산에 유리하다(Scortichini 등, 2012). 무더운 여름 동안 35°C 이상의 온도는 병원세균의 증식과 병의 확산을 억제할 수 있다. 참다래 궤양병 병원세균은 병핵활성이 없지만 추운 겨울 동안의 식물조직의 결빙은 다음해 봄에 나타나는 심한 병발생의 원인이 된다(Ferrante와 Scortichini, 2014; Ko 등, 2000a, 2000b; Serizawa 등, 1989).

참다래 궤양병의 감염을 예측하여 재배자들의 방제 의사 결정에 도움을 주기 위하여 뉴질랜드에서 KVH PSA-V 모형이 이미 개발되어 있다(Beresford와 Tyson, 2014). 이 모형은 일 강우량이 1 mm 이상인 날에만 참다래 궤양병 위험도 R값을 생성하며, 그 R값은 현재 시간부터 이전 72시간까지의 기간 동안에 그 시간의 상대습도가 81% 이상일 경우에만 온도에 따른 참다래 궤양병 병원세균의 상대적인 증가량 지수값을 계산하고 그 값들을 누적하여 구한다. 즉, 이 모형은 비로 인하여 감염이 충분히 일어날 수 있는 수분 환경을 가진 참다래 잎이 있을 때에 감염을 일으킬 수 있는 병원균의 상대적인 크기를 추정한 모형이다. 위험도 R이 5 이하면 감염위험이 없는 것으로, 5–15이면 잎에만 감염이 일어나고 15 이상이면 줄기에도 감염이 일어나는 것으로 KVH PSA-V 모형은 판별한다. 이 모형은 뉴질랜드의 봄과 여름에는 높은 정확도를 나타내지만 늦여름부터 겨울까지는 정확도가 떨어진다고 알려져 있다. 이 모형의 개발은 황색참다래 계통 품종 Hort16A와 뉴질랜드에서 참다래 궤양병의 대발생 원인이 된 계통의 병원세균을 사용한 시험 연구를 통해 개발되었다. 참다래 궤양병 대발생 원인 계통의 병원세균은 한국에서 주로 분리되는 계통의 병원세균과 달리 30°C 이상의 온도에서 성장이

정지되었고 식물독소인 caronatine을 생산하지 않는 등의 상당한 차이가 있으며, 우리나라에서 분리된 병원세균 균주들 중에 참다래 궤양병 대발생 원인 계통에 속하는 균주도 유럽 및 뉴질랜드에서 분리되는 균주들과 다른 유전적 특성과 표현형을 가지고 있음이 밝혀졌다(Choi 등, 2014). 따라서 KVH PSA-V 모형은 한국의 참다래 궤양병을 예측하는 경우에 그 예측정확도가 뉴질랜드에서 검정한 결과보다 떨어질 가능성이 크다. 한국의 참다래 궤양병의 발생을 잘 예측하기 위해서는 한국에서 주로 분리되는 계통의 병원세균과 주로 재배되는 품종의 참다래를 사용한 시험과 분석을 통해서 새로운 모형을 개발하여 적용하거나 KVH PSA-V 모형의 개선이 필요하다.

많은 모형들이 특정한 식물병들의 감염 확률을 예측하기 위하여 개발되어 왔다. Magarey 등(2005)은 새롭고 거의 연구되지 않은 병원균이 도입될 때에 사용 가능한 온도와 습윤기간을 바탕으로 일반 감염 모형을 만들었다. 그 모형은 적절한 계수값들이 제공되었을 때에 어떠한 병 시스템도 설명할 수 있도록 개발되었다는 점에서 유용하다. 이 모형은 결정적 발병 한계를 무제한적으로 병원균이 존재한다는 가정 아래에서 20% 발병률 또는 5% 병반면적률이라고 정의하고 특정 온도일 때에 결정적 발병 한계에 도달하는 데 필요한 습윤지속시간을 추정하는 모형이다. KVH PSA-V 모형이 감염을 일으킬 수 있는 병원균의 상대적인 크기를 추정하는 모형인 반면에 일반 감염 모형은 병원균이 항상 감염을 일으킬 수 있을 정도로 존재한다는 가정 아래에서 기상 환경조건에 따른 감염 위험성을 예측하는 모형이기 때문에 Magarey 등(2005)의 일반 감염 모형을 이용하여 새로운 참다래 궤양병 감염 위험 예측 모형을 만든다면 새롭게 개발된 모형은 KVH PSA-V 모형과 상호보완적으로 참다래 궤양병 감염 위험 예측에 활용이 가능할 수도 있을 것이다.

본 연구에서는 한국에서 가장 넓은 면적에서 재배되는 참다래 품종인 헤이워드와 한국에서 주로 분리되는 계통의 참다래 궤양병 균주를 사용하여 온도와 엽면습윤 지속시간에 따른 참다래 잎에서의 병 발생 경향과 참다래 잎에서의 건조 및 습윤지속에 따른 참다래 궤양병 병원세균의 밀도 변화를 시험하고 이 시험 결과들을 바탕으로 일반 감염 모형을 이용하여 참다래 궤양병의 감염 위험을 예측하는 새로운 모형을 개발하였다. KVH PSA-V 모형과 개발된 모형을 한국의 참다래 과원들에서 수집된 병조사 및 기상조사 자료들을 사용하여 구동하여 한국에서의 참다래 궤양병 감염에 대한 예측정확도를 평가하였다.

재료 및 방법

온도 및 엽면습윤 존재시간에 따른 참다래 궤양병 발생률. 농촌진흥청 농업유전자원정보센터에서 국내에서 분리된 참다래 궤양병 병원세균인 *P. syringae* pv. *actinidiae* KACC16843을 분양 받았다. 분양 받은 참다래 궤양병 병원세균은 200 ml tryptic soy broth (TSB, Difco; Becton, Dickinson and Company, Sparks, MD, USA)가 담긴 500 ml 삼각플라스크들을 멸균 후에 접종하여 25°C에서 48시간 동안 200 rpm으로 진탕 배양하였다. 병원 세균 배양액을 희석하여 10⁸ cell/ml 수준의 농도로 만들어 연령이 약 2-3주가 되는 헤이워드 품종의 잎들에 주사 바늘로 상처를 낸 후에 분무 접종하였다. 접종한 잎들은 10°C, 15°C, 20°C, 25°C, 30°C 항온기(12시간 광-12시간 암조건)에 두고 1, 2, 4, 8시간 동안 엽면 습윤이 유지되도록 비닐 봉지와 분무기를 사용하여 습실 처리를 하였다. 병원균을 접종한 처리 외에도 대조로 멸균수를 분무하고 8시간 동안 엽면 습윤이 유지되도록 한 처리도 각 온도마다 두었다. 습실 처리가 종료된 후에도 계속 항온기에 두면서 궤양병 병징 발현 여부를 조사하였다.

온도와 엽면습윤에 따른 참다래 잎 표면에서의 병원세균 밀도 변화시험. *P. syringae* pv. *actinidiae* KACC16843을 TSB를 사용하여 25°C에서 24시간 동안 200 rpm으로 진탕 배양하였다. 병원 세균 배양액을 생리식염수로 희석하여 10⁸ cells/ml 수준의 농도로 만들어 헤이워드 품종의 2년생 유묘의 잎들에 분무접종하였다. 엽면적을 고려하여 접종 직후에는 약 1×10⁶ cells/cm²가 되도록 접종량을 조절하였다. 접종한 유묘는 5°C, 10°C, 15°C, 20°C, 30°C 항온기(12시간 광-12시간 암조건)에 두고 48시간 계속 비닐 봉지와 분무기를 사용하여 엽면습윤이 유지되도록 처리를 하였다. 20°C, 30°C 항온기의 경우에 유묘들의 잎들 중 절반은 자연적으로 건조되도록 습실처리를 하지 않았다. 접종 후 4, 8, 24, 48시간 후에 각 처리에서 25 cm²의 잎을 채취하여 100 ml 멸균수가 든 삼각플라스크에 넣고 1분 이상 진탕한 후에 연속희석도말법으로 참다래 궤양병 병원균 반선택배지를 사용하여 생균수를 조사하였다. 참다래 궤양병 병원균 반선택배지는 *P. syringae* pv. *papulans*와 *P. syringae* pv. *syringae*의 선택배지(Burr와 Katz, 1982)를 참고하여 tryptic soy agar (Difco) 배지에 novobiocin 50 ppm, penicillin G 60 ppm, cycloheximide 100 ppm을 첨가하여 제조하였다.

모형 개발 및 평가를 위한 병 발생량 및 기상 조사. 모

형의 개발과 평가를 위하여 서귀포시 지역의 녹색참다래 헤이워드 품종 재배 과원 1개소(남원읍 소재)와 황색참다래 Hort16A 품종 재배 과원 3개소(표선면, 성산읍 신산리, 성산읍 삼달리 소재)에서 2015년 5월 14일부터 10월 27일까지 참다래 궤양병의 이병엽률과 기상을 조사하였다. 참다래 궤양병의 이병엽률은 7-14일 간격으로 주기적으로 조사하였고, 서로 간의 간격이 최소 5 m 이상 떨어진 4-5그루의 참다래 나무에서 전체 엽수 또는 200엽씩을 조사하여 과원당 최소 800엽 이상의 잎을 조사하여 측정하였다. 참다래 과원들의 기상은 엽면습윤, 기온, 상대습도 센서가 장착된 간이 자동기상관측기(Watchdog 1450; Spectrum Technologies Inc., Aurora, IL, USA)와 엽면습윤, 기온, 상대습도, 강우량, 풍향 풍속 센서가 장착된 자동기상관측기(Watchdog 2000; Spectrum Technologies Inc.)를 이용하여 매시간 측정하였다. 기상 센서들은 지상 120 cm 높이에 설치하였다.

일반 감염 모형식을 이용한 참다래 잎에서의 궤양병 감염위험도 모형의 개발 및 평가. Magarey 등(2005)의 일반 감염 모형식은 다음과 같다.

$$W(T) = \begin{cases} \frac{W_{min}}{f(T)}, & \frac{W_{min}}{f(T)} \leq W_{max} \\ W_{max}, & \frac{W_{min}}{f(T)} > W_{max} \end{cases}$$

$$f(T) = \begin{cases} \left(\frac{T_{max} - T}{T_{max} - T_{opt}} \right) \left(\frac{T - T_{min}}{T_{opt} - T_{min}} \right)^{\frac{(T_{opt} - T_{min})}{(T_{max} - T_{opt})}}, & T_{min} \leq T \leq T_{max} \\ 0, & T < T_{min} \text{ 또는 } T > T_{max} \end{cases}$$

W(T)=온도 T일 때에 결정적 발병 한계에 도달하기 위해 필요한 습윤지속기간(습윤요구기간, 단위: 시간)

Wmin=최소습윤요구기간(시간)

Wmax=최대습윤요구기간(시간)

f(T)=온도 T일 때의 감염확률(0-1)

Tmin, Topt, Tmax=감염을 위한 최소, 최적, 최대온도값(°C)

T=시간 평균 온도(°C)

온도 T일 때의 감염확률 f(T)의 식은 원래 Yin 등(1995)이 작물 발달 속도에서 대한 온도의 효과를 설명하기 위해서 도입한 식으로 Magarey 등(2005)은 온도에 따른 감염 확률 계산식으로 사용하였다. 이 모형은 베타 함수에 근거하는데 흔히 통계에서 확률 함수로 사용되어 편향된 분포를 설명하는 데 사용된다. 그것이 확률을 설명하기 때문에 그것은 0과 1 사이의 값을 가진다. 그래서 T=Tmin와 T=Tmax일 때는 f(T)=0이고 T=Topt일 때는 f(T)=1이다. 참다래 궤양병의 경우

에 결정적 발병 한계를 무제한적으로 병원균이 존재한다는 가정 아래에서 20% 발병률로 정의하고, 감염을 위한 최적 온도에서 최소습윤요구기간은 회귀분석을 통해 습윤시간과 발병률의 관계식을 구한 후에 20%의 발병률을 나타내는 습윤시간을 계산함으로써 구하였다(SAS Institute Inc., 2011). 그 외에 이 모형을 구동하는 데 필요한 계수값으로 최대습윤요구기간, 감염을 위한 최소, 최대 온도값이 필요하다. 이들 계수값들은 온도와 엽면습윤에 따른 참다래 궤양병의 발병률 및 밀도 변화 시험 결과를 고려하여 결정하였다. 일반 감염 모형의 결과값인 $W(T)$ 의 역수는 그 시간에서 증가되는 감염위험도 크기로 볼 수 있고 $W(T)$ 의 역수값의 누적값은 그 시각의 감염이 성공할 가능성의 크기로 볼 수 있다. 따라서, $W(T)$ 의 역수값의 누적값으로 감염위험도를 계산하는 모형을 개발하였다. 한편, 계속적으로 잎이 건조된 상태가 되면 병원세균의 활성이 떨어져서 감염의 가능성이 없어질 것이므로 잎에 존재하는 병원세균의 밀도변화를 고려하여 감염위험도 값을 초기화하는 조건을 정하였다.

일반 감염 모형식을 이용한 참다래 잎에서의 궤양병 감염위험도 모형과 KVH PSA-V 모형의 감염 판단 기준 설정 및 모형의 정확도 평가. 일반 감염 모형식을 이용한 참다래 잎에서의 궤양병 감염위험도 모형과 뉴질랜드에서 개발된 KVH PSA-V 모형을 2015년 서귀포시 성산읍 삼달리에 위치한 황색참다래 Hort16A 품종 재배 과원에서 수집한 기상자료를 이용하여, 모형들을 구동하고 조사된 이병엽률의 증감과 비교하여 한국의 참다래 과원에서 잎에 감염이 일어난 것으로 판별할 각 모형의 구동 결과값의 크기를 정하였다. 참다래 궤양병의 이병엽률의 증가는 그 전의 잎에서 감염이 발생함으로 인해서 생긴 결과이고, 참다래 궤양병 병원세균을 접종한 후에 3-8일 후가 되면 대부분 병징을 관찰할 수 있다(Balestra 등, 2011; Ko 등, 2002b; Serizawa와 Ichikawa, 1993). 따라서 이병엽률이 증가한 경우에 직전 조사일의 7일 전부터 해당 조사일의 3일 전까지의 구간에 나타나는 일반 감염 모형식을 이용한 참다래 잎에서의 궤양병 감염위험도 모형의 감염위험도의 최대값들과 뉴질랜드 KVH PSA-V 모형의 위험도 R값의 최대값들을 구하여 이들 값들 중의 최소값으로 한국에서의 참다래 궤양병 잎 감염을 판단하는 기준으로 정하였다. 일반 감염 모형식을 이용한 참다래 잎에서의 궤양병 감염위험도 모형과 KVH PSA-V 모형의 예측 정확도는 2015년 서귀포시 남원읍의 녹색참다래 헤이워드 품종 재배 과원과 표선면과 성산읍 신산리의 황색 참다래 Hort16A 품종 재배 과원들에서 수집된 병조사 및

기상 조사 자료를 사용하여 병의 증감과 모형들이 예측하는 감염 발생 여부를 분할표로 만들어 분할표 분석을 통하여 각 모형별로 추정의 정확도를 나타내는 범주형 지수들(probability of detection, false alarm ratio, proportion of correct, critical success index)을 구하고 이를 비교하는 방법을 사용하였다(Wilks, 1995). 병발생 예측 모형의 정확도를 나타내는 범주형 지수들을 구하는 식은 다음과 같다.

$$\text{Probability of detection} = \frac{H}{H+M}$$

$$\text{False alarm ratio} = \frac{F}{H+F}$$

$$\text{Proportion of correct} = \frac{H+C}{H+M+F+C}$$

$$\text{Critical success index} = \frac{H}{H+M+F}$$

H=hit, 병발생량의 증가가 관찰되었고 모형도 감염이 발생했다고 추정한 횟수

M=miss, 병발생량의 증가가 관찰되었으나 모형은 감염이 없었다고 추정한 횟수

F=false alarm, 병발생량의 증가가 관찰되지 않았으나 모형은 감염이 발생했다고 추정한 횟수

C=correct rejection, 병발생량의 증가가 관찰되지 않았고 모형도 감염이 없었다고 추정한 횟수

결과 및 고찰

온도 및 엽면습윤 존재시간에 따른 참다래 궤양병 발생률. 멸균증류수를 접종하고 8시간 동안 습실처리한 시험구들과 궤양병원세균 배양현탁액을 접종하고 1시간 동안 습실처리를 한 시험구들은 모든 처리온도에서 병징을 관찰할 수 없었다(Table 1). 궤양병원세균 배양현탁액을 접종하고 2시간 이상 습실 처리를 한 경우에는 15°C-25°C 온도 범위에서 궤양병 병징의 발현을 접종 3일 후부터 관찰할 수 있었다. 15°C에서 가장 높은 발병을 보였는데 이는 12°C-18°C의 온도와 습한 환경이 병원세균의 증식과 감염된 조직들에서 비감염된 조직들로 확산에 유리하다는 알려진 사실에 부합한다(Scortichini 등, 2012).

온도와 엽면습윤에 따른 참다래 잎 표면에서의 병원세균 밀도 변화시험. 엽면습윤을 계속 유지시킬 경우에 5°C-15°C의 온도 범위에서는 접종 후 48시간까지 접종 농도

와 동일한 수준의 병원세균 밀도가 관찰되었다(Fig. 1). 20°C, 30°C의 습윤지속처리의 경우에 접종 후 4-24시간까지 접종 농도의 10배 수준의 병원세균 밀도가 관찰되었으며 48시간에서는 처리농도와 동일한 수준의 병원균 밀도가 관찰되었다. 이런 온도에 따른 병원세균의 밀도변화 차이는 한국에서 주로 분리되는 계통의 참다래 궤양병 병원세균은 생육이 18°C-30°C의 온도 범위에서 일어나기 때문에 나타나는 현상일 것이다(Choi 등, 2014). 접종 직후부터 자연 건조시킨 시험구의 경우에는 20°C에서 접종 8시간 뒤에는 접종농도에 비슷한 수준으로 병원세균의 밀도가 관찰되었고 24시간 뒤에는 1/10 수준의 병원세균 밀도가 관찰이 되었고 30°C에서는 20°C에 비하여 더 빨리 병원세균의 밀도가 떨어졌다. 30°C의 건조 지속시간에 따른 병원세균의 밀도 감소 추세를 볼 때에 접종 후 8시간이 되면 초기 접종 농도의 1/10 수준이 되는 것으로 보인다.

Table 1. Disease occurrence of bacterial canker on kiwifruit leaves at 3 days after the inoculation in different temperatures and wetness durations

Inoculum - wetness duration	Treatment temperature				
	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C
Sterilized distilled water - 8 h	0/8*	0/15	0/15	0/8	0/10
Psa suspension [†] - 1 h	0/10	0/10	0/14	0/14	0/10
Psa suspension - 2 h	0/18	6/15	1/12	0/12	0/9
Psa suspension - 4 h	0/8	7/15	1/12	0/12	0/9
Psa suspension - 8 h	0/6	10/10	7/12	4/11	0/6

*Values are presented as number of diseased sites/number of inoculated sites.

[†]*Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* KACC16843 culture suspension with a density of 10⁸ cell/ml.

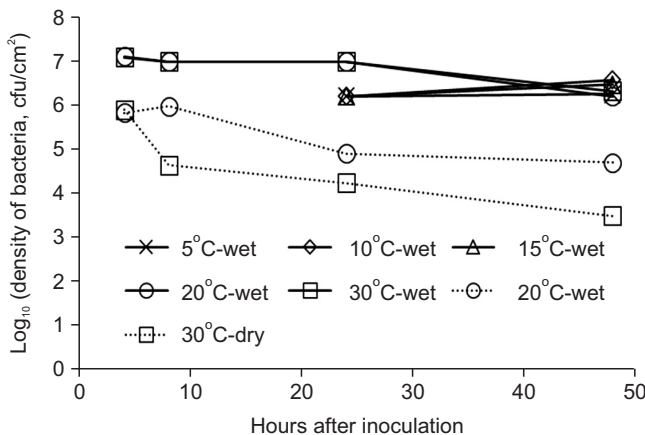


Fig. 1. Changes in the density of pathogen causing bacterial canker on dry or wet kiwifruit leaves at different temperatures.

일반 감염 모형식을 이용한 참다래 잎에서의 궤양병 감염위험도 모형의 개발. 일반 감염 모형식의 구동에 필요한 계수는 최소습윤요구기간(Wmin), 최대습윤요구기간(Wmax), 감염이 발생하는 최소 온도값(Tmin), 감염을 위한 최적 온도값(Topt), 감염이 발생하는 최대 온도값(Tmax)이다. 온도 및 엽면습윤 존재시간에 따른 참다래 궤양병 발생률 시험 결과인 Table 1을 바탕으로 감염이 발생하는 최소(Tmin), 최적(Topt), 최대(Tmax) 온도값은 각각 10°C, 15°C, 30°C로 하였다. 최소습윤기간(Wmin)은 감염이 발생하는 최적온도인 15°C에서 발병률과 습윤시간 사이의 관계식을 회귀분석을 통해 구한 다음에 발병률이 20%일 때의 습윤시간을 계산하여 얻은 1.66으로 하였다. 20°C, 30°C의 온도에서 참다래 궤양병 병원세균이 엽면이 습윤이 유지될 경우에 생장이 일어나서 접종 후에 증가가 일어났다가 48시간이 지나면 최초 접종 농도 수준으로 떨어지는 결과로 볼 때에 병원세균의 활성은 최소한 48시간 동안은 습윤이 지속되는 경우에 유지되는 것으로 판단된다(Fig. 1). 이를 참고하여 최대습윤요구기간(Wmax)을 48시간으로 정하였다. 이렇게 정한 계수들을 사용하여 일반 모형식의 곡선을 그려보면 10°C-15°C의 온도 범위에서는 매우 급격하게 감소가 일어나고 15°C-30°C의 온도 범위에서는 비교적 완만한 증가가 일어나는 형태가 된다(Fig. 2). 20°C, 30°C의 온도에서 참다래 궤양병 병원세균이 엽면이 계속 건조할 경우에 빠른 경우에 8시간이 지나면 접종 농도의 1/10, 약 10⁵ cfu/cm² 수준으로 밀도 감소가 일어나는 것을 참조하여(Fig. 1), 감염위험도를 초기화하는 조건을 연속건조시간이 8시간 이상으로 정하였다. 이렇게 개발된 일반모형식을 이용한 참다래 잎에서의 궤양병 감염위험도 모

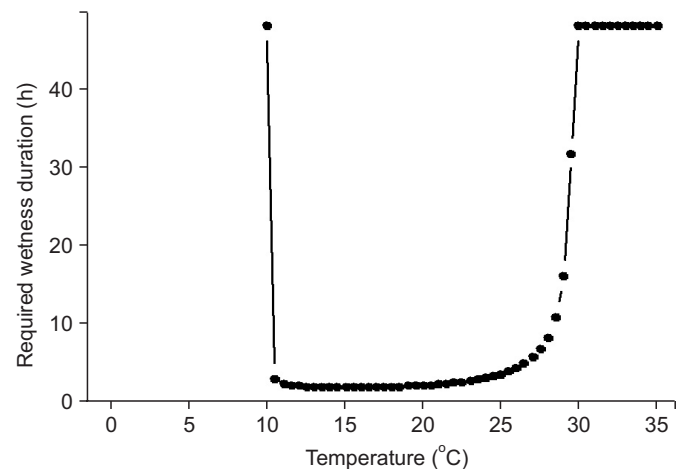


Fig. 2. Estimated required wetness durations for infection at different temperatures by the pathogenic bacteria causing bacterial canker on kiwifruit leaves.

형의 모형식을 정리하면 아래와 같다.

$$IR_n = \begin{cases} IR_{n-1} + \frac{1}{W(T)}, & CDH < 8 \\ 0, & CDH \geq 8 \end{cases}$$

$$W(T) = \begin{cases} \frac{1.66}{f(T)}, & \frac{1.66}{f(T)} \leq 48 \\ 48, & \frac{1.66}{f(T)} > 48 \end{cases}$$

$$f(T) = \begin{cases} \left(\frac{30-T}{15}\right)\left(\frac{T-5}{5}\right)^{1/3}, & 10 \leq T \leq 30 \\ 0, & T < 10 \text{ 또는 } T > 30 \end{cases}$$

IR_n =현재 시각 n에서의 감염위험도

CDH=현재 시각에 잎이 건조할 때에 건조가 지속되었던 시간

$W(T)$ =온도 T일 때에 결정적 발병 한계에 도달하기 위해 필요한 습윤지속기간(습윤요구기간, 단위: 시간)

$f(T)$ =온도 T일 때의 감염확률(0-1)

T=시간 평균 온도(°C)

한편, Magarey 등(2005)의 일반 감염 모형식이 진균 및 유사진균에 의한 공기전염성 병해에 대하여 개발된 식이지만 작물 발달 속도에서 대한 온도의 효과를 설명하기 위해서 도입한 식으로부터 유래되었기 때문에 무제한의 전염원이 존재한다는 가정, 즉 전염원의 밀도 수준이 감염에 영향을 주지 않을 정도로 높다는 가정에 적합하다면 세균병해에 대해서도 적용 가능할 것이다. 참다래 궤양병 병원세균은 식물체 표면에도 잘 정착하여 생존이 가능하고, 생육기 초기에 가지에 나타나는 세균 진액과 같이 고농도의 전염원도 존재하며, 더운 여름을 제외한 모든 시기에서 쉽게 과원내 또는 과원들 간의 전염이 발생한다(Ko 등, 2002a; Koh 등, 1994; Scortichini 등, 2012; Vanneste 등, 2011b). 즉, 참다래 궤양병은 특정한 시기에만 감염을 일으킬 수 있는 수준의 병원세균 밀도가 존재한다는 가정보다는 항상 감염을 일으킬 수 있는 수준의 병원세균의 밀도가 존재한다는 가정에 가까운 병이라고 할 수 있고, Magarey 등(2005)의 일반 감염 모형식은 참다래 궤양병에 대해서도 적용 가능할 것이다. 또, 이 연구에서 온도 및 엽면습윤 존재시간에 따른 참다래 궤양병 발생률 시험에 사용된 병원세균의 48시간 배양액의 현탁액은 온도와 엽면습윤에 따른 참다래 잎 표면에서의 병원세균 밀도 변화시험에 사용된 24시간 배양액의 현탁액에 비해서 병원세균의 활성이 낮아서 엽면에서 병원세균의 밀도 증가가 매우 적거나 거의 없을 것이다. 즉, 이 연구의 온도 및 엽

면습윤 존재시간에 따른 참다래 궤양병 발생률 시험에 얻은 식은 병원세균의 밀도에 따른 병발생 영향이 거의 고려되지 않은 식이 되며 일반 감염 모형식의 가정에 적합하다.

일반 감염 모형식을 이용한 참다래 잎에서의 궤양병 감염위험도 모형과 KVH PSA-V 모형의 감염 판단 기준 설정. 일반 감염 모형식을 이용한 참다래 잎에서의 궤양병 감염위험도 모형과 뉴질랜드에서 개발된 KVH PSA-V 모형을 2015년 서귀포시 성산을 삼달리에 위치한 황색참다래 Hort16A 품종 재배 과원에서 수집한 기상자료를 이용하여 모형들을 구동하여 보니 대부분의 경우에 KVH PSA-V 모형의 결과값인 위험도 값들이 일반 감염 모형식을 이용한 참다래 잎에서의 궤양병 감염위험도 모형의 결과값인 감염위험도 값들보다 크게 나타났다(Fig. 3). 2015년 서귀포시 성산을 삼달리에 위치한 황색참다래 Hort16A 품종 재배 과원에서 이 병엽률이 증가한 경우에 직전 조사일의 7일 전부터 해당 조사일의 3일 전까지의 구간에 나타나는 참다래 잎에서의 궤양병 감염위험도 모형이 산출하는 감염위험도의 최대값들은 10.2-35.3의 범위에서 나타났으며 뉴질랜드 KVH PSA-V 모형의 위험도 R값의 최대값들은 31.9-69.4의 범위로 나타났다(Table 2). 따라서 각 모형들이 산출하는 결과값들의 최소값을 참고하여 한국에서의 참다래 궤양병 잎 감염을 판단하는 기준은 참다래 잎에서의 궤양병 감염위험도 모형은 10 이상의 감염위험도값으로, 뉴질랜드 KVH PSA-V 모형은 31 이상의 위험도값으로 정하였다.

모형의 정확도 평가. 이 연구를 통해 새로 개발된 참다래 잎에서의 궤양병 감염위험도 모형과 KVH PSA-V 모형의

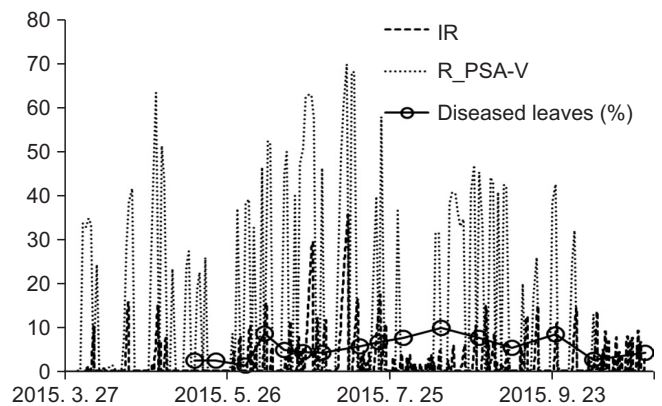


Fig. 3. Infection risk (IR) values calculated by the forecast model that was developed in this study, risk values calculated by the KVH PSA-V model (R_PSA-V), and percentages of diseased leaves at a kiwifruit orchard in Samdal-ri, Seongsan-eup, Seogwipo-si.

예측 정확도를 평가하기 위하여 2015년 서귀포시 남원읍의 녹색참다래 헤이워드 품종 재배 과원과 표선면과 성산읍 신

산리의 황색 참다래 Hort16A 품종 재배 과원들에서 수집된 기상 조사 자료를 사용하여 각 모형을 구동한 결과와 조사된 병조사 결과는 Fig. 4와 같다. 남원읍의 녹색참다래 헤이워드 재배 과원은 나머지 두 과원에 비하여 높은 고도에 위치하고 있으며 비교적 높은 이병엽률을 관찰할 수 있었다. 남원읍의 녹색참다래 헤이워드 재배 과원의 모형결과값의 곡선들과 나머지 두 과원의 곡선들의 모양의 차이도 나머지 두 과원의 곡선들 사이의 경우보다 많은 차이를 보였다. 따라서 모형의 평가가 서귀포 지역의 참다래 과원들의 2015년에 수집된 자료들이라는 지역적, 시간적 동일성이 있기는 하지만 재배 품종의 차이와 고도의 차이에 의한 기상 및 발병이 상당한 차이가 있는 자료를 사용한 평가이므로 적어도 지역 및 연도의 차이가 있는 2개의 병조사 및 기상 자료들을 이용한 것과 동일하거나 더 나은 수준의 평가라고 할 수 있다. 2015년 서귀포시 남원읍의 녹색참다래 헤이워드 품종 재배 과원과 표선면과 성산읍 신산리의 황색 참다래 Hort16A 품종 재배 과원들에서 수집된 기상 조사 자료와 병조사 자료를 이용한 모형의 감염 예측과 이병엽률의 증감을 비교한 분할표 분석을 수행하였을 때에 모형이 일어나는 현상을 정확히 예측하는 지표인 proportion of correct는 이 연구

Table 2. Observed increases in the percentage of diseased leaves and the maximum model outputs during the estimated periods of infections causing the increases at a kiwifruit orchard in Samdal-ri, Seongsan-eup, Seogwipo-si

Period that the increase in percentage of diseased leaves observed	Maximum model outputs during the estimated period of infection causing the increase	
	Estimated infection period	IR* R_PSA-V†
2015. 6. 3–2015. 6. 9	2015. 5. 26–2015. 6. 6	10.2 38.9
2015. 7. 1–2015. 7. 14	2015. 6. 23–2015. 7. 11	35.3 69.4
2015. 7. 15–2015. 7. 21	2015. 7. 7–2015. 7. 18	35.3 69.4
2015. 7. 22–2015. 7. 30	2015. 7. 14–2015. 7. 27	17.3 57.6
2015. 7. 31–2015. 8. 13	2015. 7. 23–2015. 8. 10	10.4 36.3
2015. 9. 9–2015. 9. 24	2015. 9. 1–2015. 9. 21	14.6 42.4
2015. 10. 9–2015. 10. 27	2015. 10. 1–2015. 10. 24	14.2 31.9

*Infection risk (IR) value calculated by a forecast model that was developed in this study.

†Risk (R) value calculated by KVH PSA-V model.

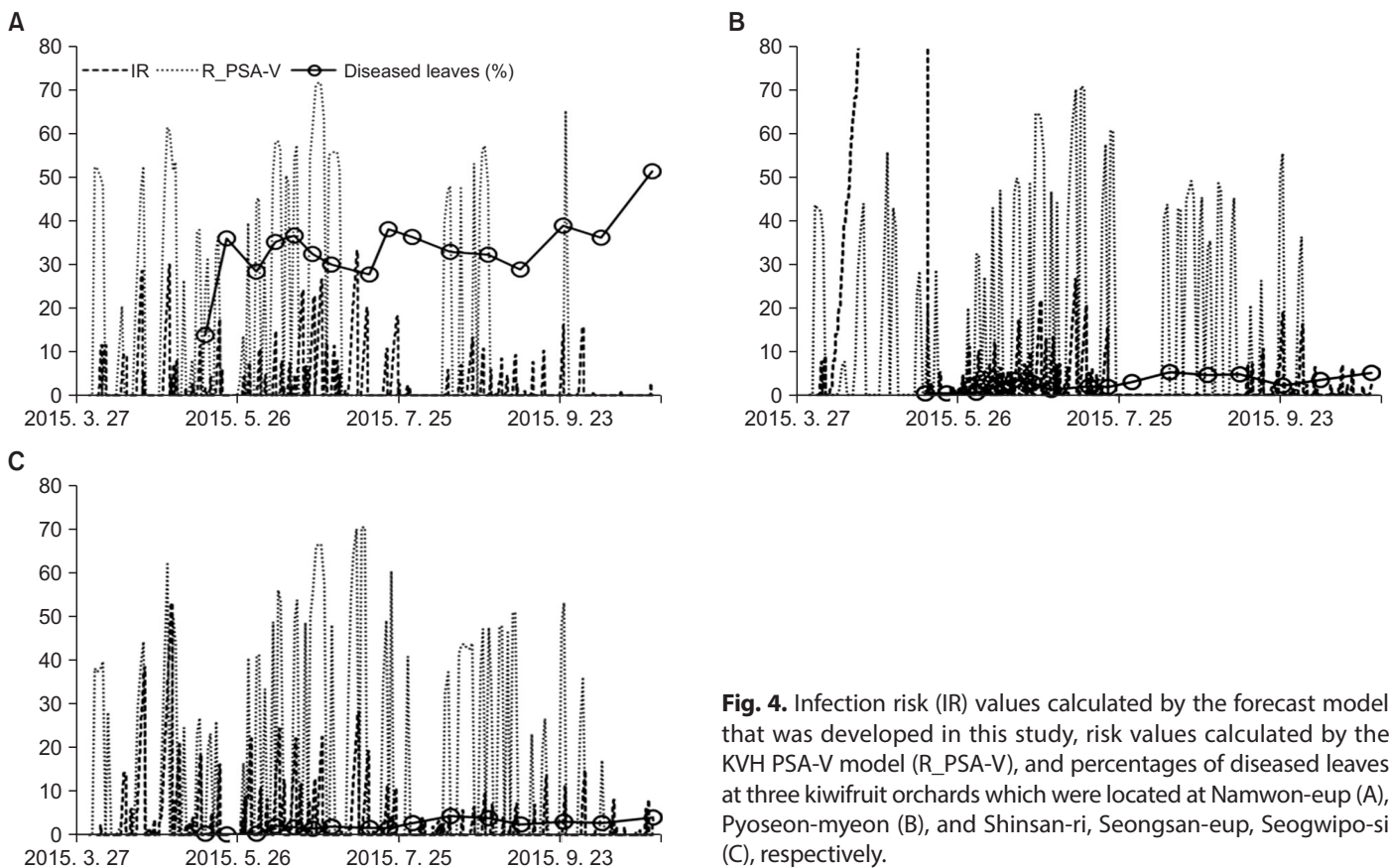


Fig. 4. Infection risk (IR) values calculated by the forecast model that was developed in this study, risk values calculated by the KVH PSA-V model (R_PSA-V), and percentages of diseased leaves at three kiwifruit orchards which were located at Namwon-eup (A), Pyoseon-myeon (B), and Shinsan-ri, Seongsan-eup, Seogwipo-si (C), respectively.

를 통해 새로 개발된 모형이 가장 높은 51.1%를 나타내고 실제 병이 일어났을 경우에 감염이 일어났다고 경고하는 비율인 probability of detection과 모형의 경고에 따라 방제를 결정하였을 때에 효율성 지표인 critical success index도 각각 가장 높은 수치인 90.9%와 47.6%를 나타내어서 한국에서 발생하는 참다래 궤양에 대해서는 가장 우수한 모형으로 판단되었다(Table 3). Proportion of correct 지표는 감염판단 기준을 31로 조정된 KVH PSA-V 모형이 48.8%, 원래 뉴질랜드에서 사용하는 감염판단 기준인 5를 사용한 KVH PSA-V 모형이 46.7%로 나타나 감염판단 기준을 31로 조정된 KVH PSA-V 모형이 예측 정확도면에서는 우수하지만, probability of detection과 critical success index 지표가 원래 감염판단 기준인 5를 사용하였을 경우가 더 우수하여 실제 한국의 참다래 궤양병의 방제를 위한 의사결정 지원용으로는 원래 감염판단 기준인 5를 사용하는 것이 효과적임을 보여주었다. 모든 시험한 모형들이 80% 이상의 probability of detection값을 보인다는 것은 실제 병 예찰에 사용할 경우에 실제 병 발생의 80%를 예측하여 알려준다는 의미로 한국의 참다래 궤양병에 시험한 모든 모형이 충분히 활용 가능하다는 것을 보여주었다.

Table 3. Results of the two-way contingency table analysis to evaluate accuracy of forecast models for estimating the infection risk of bacterial canker on kiwifruit as compared with the observed data collected from three kiwifruit orchard at Seogwipo in 2015

Index*	Score of forecast models (%)		
	IRBCK [†]	PSA-V_31 [‡]	PSA-V_5 [‡]
Hit	44.4	40.0	42.2
Miss	4.4	8.9	6.7
False alarm	44.5	42.2	46.7
Correct rejection	6.7	8.9	4.4
Probability of detection	90.9	81.8	86.9
False alarm ratio	50.0	51.3	52.5
Proportion of correct	51.1	48.8	46.7
Critical success index	47.6	43.9	44.2

A total of 45 data points were included in the comparison.
 *Hit, miss, false alarm, correct rejection are relative frequencies that the percentage of diseased leaves increased when the infection was estimated by a model, the percentage of diseased leaves increased though the infection was not estimated by a model, the percentage of diseased leaves did not increase though the infection was estimated by a model, and the percentage of diseased leaves did not increase when the infection was not estimated by a model, respectively.
[†]The forecast model for estimating the infection risk of bacterial canker on kiwifruit that were developed in this study.
[‡]KVH PSA-V model. The thresholds for determining the infection were set to 31 and 5, respectively.

다. 시험을 한 모든 모형들이 43%–51%의 낮은 proportion of correct와 critical success index를 보이는 것은 false alarm ratio가 높기 때문이다. 이것은 병조사 및 기상자료 수집지역이 실제 재배가 이뤄지고 있는 과원이기 때문에 방제 활동 또는 작물 관리 활동으로 전정작업이 수차례 진행되었고 이병엽률 조사 결과에 영향을 미쳤기 때문에 나타난 것으로 보인다. 따라서 전정작업을 하지 않은 시험 포장에서 수집한 병발생 조사 및 기상자료를 사용하여 모형을 검정할 경우에는 false alarm rate가 감소하여 proportion of correct와 critical success index가 증가할 가능성이 클 것으로 예상된다.

결론적으로 정확도 검정을 수행한 자체 개발한 모형과 뉴질랜드에서 개발한 KVH PSA-V 모형, 감염 판단기준을 31로 조정된 KVH PSA-V 모형들은 모두 높은 probability of detection값을 보여 한국의 참다래 궤양병 방제 의사 결정 지원용으로 사용하기에는 충분하였으며 자체 개발한 모형이 가장 우수한 판별 지표값을 보여서 한국의 참다래 궤양병 방제 의사 결정 지원용 활용하기에는 가장 좋은 모형으로 판단되었다. 이 연구를 통해 새로 개발된 모형에서 생성되는 참다래 잎에서의 궤양병 감염 위험도 값은 참다래 재배자들의 궤양병 방제를 위한 의사 결정에 도움을 주어 궤양병으로 인한 피해를 줄이는 데에 도움이 될 것이다.

요 약

한국에서 발생하는 참다래 잎에서의 궤양병의 감염위험도를 예측하는 모형을 Magarey 등(2005)의 일반 감염 모형식을 이용하여 개발하였다. 이 연구를 통해 개발한 모형과 뉴질랜드에서 개발된 KVH PSA-V 모형을 2015년 서귀포시 남원읍의 녹색참다래 헤이워드 품종 재배 과원과 표선면과 성산읍 신산리의 황색 참다래 Hort16A 품종 재배 과원들에서 수집된 기상 조사 자료와 병조사 자료를 사용하여 분할표 분석을 통해 평가하였다. 자체 개발한 모형과 뉴질랜드에서 개발한 KVH PSA-V 모형, 감염 판단기준을 31로 조정된 KVH PSA-V 모형들은 실제 병이 일어났을 경우에 감염이 일어났다고 경고하는 비율인 probability of detection값이 모두 80% 이상으로 한국의 참다래 궤양병 방제 의사 결정 지원용으로 사용하기에는 충분하였다. 모형이 일어나는 현상을 정확히 예측하는 지표인 proportion of correct는 이 연구를 통해 개발된 감염 위험 예측 모형이 가장 높은 51.1%를 나타내고 실제 병이 일어났을 경우에 감염이 일어났다고 경고하는 비율인 probability of detection과 모형의 경고에 따라 방제를 결정하였을 때에 효율성 지표인 critical success index도 각각

장 높은 수치인 90.9%와 47.6%를 나타내어 한국에서 발생하는 참다래 궤양에 대해서는 KVH PSA-V 모형보다 더 우수한 모형으로 판단되었다. 이 연구를 통해 새로 개발된 모형은 한국의 참다래 재배자들의 궤양병 방제를 위한 의사 결정에 도움을 주어 궤양병으로 인한 피해를 줄이는 데에 도움이 될 것이다.

Conflicts of Interest

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

Acknowledgement

This study was supported by 2015 Postdoctoral Fellowship Program of National Institute of Horticultural and Herbal Science; and Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No. PJ009461012015), Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Balestra, G. M., Mazzaglia, A., Quattrucci, A., Renzi, M. and Rossetti, A. 2009. Current status of bacterial canker spread on kiwifruit in Italy. *Australas. Plant Dis. Notes* 4: 34-36.
- Balestra, G. M., Renzi, M. and Mazzaglia, A. 2010. First report of bacterial canker of *Actinidia deliciosa* caused by *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* in Portugal. *New Dis. Rep.* 22: 10.
- Balestra, G. M., Renzi, M. and Mazzaglia, A. 2011. First report of *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* on kiwifruit plants in Spain. *New Dis. Rep.* 24: 10.
- Bastas, K. K. and Karakaya, A. 2012. First report of bacterial canker of kiwifruit caused by *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* in Turkey. *Plant Dis.* 96: 452.
- Beresford, R. and Tyson, J. L. 2014. Seasonal accuracy of the Psa risk model. *N. Z. Kiwifruit J.* 228: 18-19.
- Burr, T. J. and Katz, B. 1982. Evaluation of a selective medium for detecting *Pseudomonas syringae* pv. *papulans* and *P. syringae* pv. *syringae* in apple orchards. *Phytopathology* 72: 564-567.
- Choi, E. J., Lee, Y. S., Kim, G. H., Koh, Y. J. and Jung, J. S. 2014. Phenotypic characteristics of *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* strains from different geographic origins. *Korean J. Microbiol.* 50: 245-248. (In Korean)
- Everett, K. R., Taylor, R. K., Romberg, M. K., Rees-George, J., Fullerton, R. A., Vanneste, J. L. and Manning, M. A. 2011. First report of *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* causing kiwifruit bacterial canker in New Zealand. *Australas. Plant Dis. Notes* 6: 67-71.
- Ferrante, P. and Scortichini, M. 2014. Frost promotes the pathogenicity of *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* in *Actinidia chinensis* and *A. deliciosa* plants. *Plant Pathol.* 63: 12-19.
- Ko, S. J., Kang, B. R., Cha, K. H., Kim, Y. H. and Kim, K. C. 2000b. Effects of freezing-thawing on bacterial canker development in dormant canes of kiwifruit. *Res. Plant Dis.* 6: 82-87. (In Korean)
- Ko, S. J., Kang, B. R., Lee, Y. H., Kim, Y. H. and Kim, K. C. 2000a. Effects of freezing temperatures, freezing durations and cane diameters on bacterial canker development in kiwifruit vines and on migration of bacterial pathogen in cortical tissue. *Res. Plant Dis.* 6: 76-81. (In Korean)
- Ko, S. J., Lee, Y. H., Cha, K. H., Lee, S. D. and Kim, K. C. 2002a. Occurrence of kiwifruit bacterial canker disease and control by cultivation type. *Res. Plant Dis.* 8: 179-183. (In Korean)
- Ko, S. J., Lee, Y. H., Cha, K. H., Park, K. B., Park, I. J. and Kim, Y. C. 2002b. An improved method for testing pathogenicity of *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* causing bacterial canker of kiwifruit. *Res. Plant Dis.* 8: 250-253. (In Korean)
- Koh, Y. J. 1995. Economically important diseases of kiwifruit. *Plant Dis. Agric.* 1: 3-13. (In Korean)
- Koh, Y. J., Cha, B. J., Chung, H. J. and Lee, D. H. 1994. Outbreak and spread of bacterial canker in kiwifruit. *Korean J. Plant Pathol.* 10: 68-72. (In Korean)
- Koh, Y. J., Kim, G. H., Jung, J. S., Lee, Y. S. and Hur, J. S. 2010. Outbreak of bacterial canker on Hort16A (*Actinidia chinensis* Planchon) caused by *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* in Korea. *N. Z. J. Crop Hortic. Sci.* 38: 275-282.
- Koh, Y. J., Kim, G. H., Koh, H. S., Lee, Y. S., Kim, S. C. and Jung, J. S. 2012. Occurrence of a new type of *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* strain of bacterial canker on kiwifruit in Korea. *Plant Pathol. J.* 28: 423-427.
- Lee, J. H., Kim, J. H., Kim, G. H., Jung, J. S., Hur, J. S. and Koh, Y. J. 2005. Comparative analysis of Korean and Japanese strains of *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* causing bacterial canker of kiwifruit. *Plant Pathol. J.* 21: 119-126.
- Magarey, R. D., Sutton, T. B. and Thayer, C. L. 2005. A simple generic infection model for foliar fungal plant pathogens. *Phytopathology* 95: 92-100.
- McCann, H. C., Rikkerink, E. H., Bertels, F., Fiers, M., Lu, A., Rees-George, J., Andersen, M. T., Gleave, A. P., Haubold, B., Wohlers, M. W., Guttman, D. S., Wang, P. W., Straub, C., Vanneste, J., Rainey, P. B. and Templeton, M. D. 2013. Genomic analysis of the kiwifruit pathogen *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* provides insight into the origins of an emergent plant disease. *PLoS Pathog.* 9: e1003503.
- SAS Institute Inc. 2011. SAS/STAT 9.3 user's guide: the REG procedure (chapter). SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.
- Scortichini, M. 1994. Occurrence of *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* on kiwifruit in Italy. *Plant Pathol.* 43: 1035-1038.
- Scortichini, M., Marcelletti, S., Ferrante, P., Petriccione, M. and Firrao, G. 2012. *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae*: a re-emerging, multi-faceted, pandemic pathogen. *Mol. Plant Pathol.* 13: 631-640.
- Serizawa, S. and Ichikawa, T. 1993. Epidemiology of bacterial canker of kiwifruit. I. infection and bacterial movement in tissue of new canes. *Ann. Phytopath. Soc. Jpn.* 59: 452-459.

- Serizawa, S., Ichikawa, T., Takikawa, Y., Tsuyumu, S. and Goto, M. 1989. Occurrence of bacterial canker of kiwifruit in Japan: description of symptoms, isolation of the pathogen and screening of bactericides. *Ann. Phytopathol. Soc. Jpn.* 55: 427-436.
- Takikawa, Y., Serizawa, S., Ichikawa, T., Tsuyumu, S. and Goto, M. 1989. *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* sp. nov., the causal bacterium of canker in kiwifruit in Japan. *Ann. Phytopathol. Soc. Jpn.* 55: 437-444.
- Vanneste, J. L., Poliakoff, F., Audusseau, C., Cornish, D. A., Pailard, S., Rivoal, C. and Yu, J. 2011a. First report of *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae*, the causal agent of bacterial canker of kiwifruit in France. *Plant Dis.* 95: 1311.
- Vanneste, J. L., Yu, J., Cornish, D. A., Max, S. and Clark, G. 2011b. Presence of *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae*, the causal agent of bacterial canker of kiwifruit, on symptomatic and asymptomatic tissues of kiwifruit. *N. Z. Plant Prot.* 64: 241-245.
- Wilks, D. S. 1995. Statistical methods in the atmospheric sciences: an introduction. Academic Press, San Diego, CA, USA. 467 pp.
- Yin, X., Kropff, M. J., McLaren, G. and Visperas, R. M. 1995. A nonlinear model for crop development as a function of temperature. *Agric. For. Meteorol.* 77: 1-16.