

## Maryblyt 기반 참다래 꽃썩음병 예측모형 개발

## Development of a Maryblyt-based Forecasting Model for Kiwifruit Bacterial Blossom Blight

김광형<sup>1</sup> · 고영진<sup>2\*</sup><sup>1</sup>APEC기후센터, <sup>2</sup>순천대학교 식물외과**\*Corresponding author**

Tel : +82-61-750-3865

Fax : +82-61-750-3208

E-mail: youngjin@sunchon.ac.kr

Kwang-Hyung Kim<sup>1</sup> and Young Jin Koh<sup>2\*</sup><sup>1</sup>APEC Climate Center, Busan 612-020, Korea<sup>2</sup>Department of Plant Medicine, Suncheon National University, Suncheon 540-950, Korea

Bacterial blossom blight of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) caused by *Pseudomonas syringae* pv. *syringae* is known to be largely affected by weather conditions during the blooming period. While there have been many studies that investigated scientific relations between weather conditions and the epidemics of bacterial blossom blight of kiwifruit, no forecasting models have been developed thus far. In this study, we collected all the relevant information on the epidemiology of the blossom blight in relation to weather variables, and developed the Pss-KBB Risk Model that is based on the Maryblyt model for the fire blight of apple and pear. Subsequent model validation was conducted using 10 years of ground truth data from kiwifruit orchards in Haenam, Korea. As a result, it was shown that the Pss-KBB Risk Model resulted in better performance in estimating the disease severity compared with other two simple models using either temperature or precipitation information only. Overall, we concluded that by utilizing the Pss-KBB Risk Model and weather forecast information, potential infection risk of the bacterial blossom blight of kiwifruit can be accurately predicted, which will eventually lead kiwifruit growers to utilize the best practices related to spraying chemicals at the most effective time.

**Keywords :** Bacterial blossom blight, Disease forecasting model, Kiwifruit, *Pseudomonas syringae* pv. *syringae*

Received May 19, 2015

Revised May 21, 2015

Accepted June 1, 2015

## 서론

꽃썩음병은 궤양병과 과실무름병과 더불어 참다래에 발생하는 가장 중요한 병 중 하나이다(Koh 등, 1993). 꽃썩음병은 보통 참다래 꽃봉오리부터 감염이 시작되고 개화가 되어 수분이 이루어지더라도 열매까지 감염되어 과실이 작거나 기형이 되고 많은 경우 도중에 낙과해 버린다. 때때로 개화기에 강우가 겹치면 꽃썩음병이 급격하게 증가하여 적절한 관리가 이루어지지 않을 경우 엄청난 수확량 감소를 초래하기도 한다(Koh 등, 2001).

꽃썩음병의 지속적 발생은 과수원에 전염원을 양산시켜 해

마다 꽃썩음병의 발생을 증가시키는 악순환을 불러온다. 그럼에도 불구하고 일정량의 적뢰, 적화, 적과 등을 해야 하는 참다래 결실관리 특성상 일정 수준 이하의 꽃썩음병 발생은 수확량에 영향을 미치지 않는다고 판단하여 참다래 재배농가에서는 꽃썩음병을 심각하게 생각하지 않는 경향이 있다(Shin, 2004). 하지만 최근 기후변화로 인한 잦은 강우로 꽃썩음병의 대발생을 초래할 가능성이 높아지고 있어 지속적인 사전 관리와 적절한 방제가 요구되고 있는 실정이다.

뉴질랜드에서는 꽃썩음병을 일으키는 병원세균으로 *Pseudomonas viridiflava*가, 미국에서는 *P. viridiflava*와 *P. syringae*가, 일본에서는 *P. syringae*를 비롯한 *P. viridiflava*, *P. marginalis*도 꽃썩음병을 일으킨다고 보고되었다(Conn 등, 1993; Everett과 Henshall, 1994; Miyoshi와 Tachibana, 1994; Morita, 1995; Tachibana, 1988). 하지만 국내에서 발생하는 참다래 꽃썩음병

## Research in Plant Disease

©The Korean Society of Plant Pathology

pISSN 1598-2262, eISSN 2233-9191

은 *P. syringae* pv. *syringae*(이후 Pss)가 주요 병원세균으로 보고 되었다(Koh 등, 1993; Shin 등, 2004).

참다래 꽃썩음병균인 Pss는 전년 수확기에 수확하고 남은 죽은 과경지, 포장 내 전정가지나 낙엽 등의 식물체 잔존물, 또한 신초와 눈을 비롯하여 주간, 주지 등의 식물체에서도 월동하는 것으로 알려졌다(Shin, 2004; Shin 등, 2004). 특히 참다래 과실을 수확하고 남은 죽은 과경지에서 가장 높은 밀도를 나타낸다.

Pss는 참다래 꽃봉오리가 형성되는 4월 중순을 기해 개화가 이루어지는 5월 하순 사이에 생육적온과 일치되어 각 월동부위에서 가장 높은 밀도의 전염원을 이루게 되고, 꽃봉오리, 꽃, 어린과실에서 5월 초순부터 6월 초까지 발병하며, 주로 개화기인 5월 중순부터 만개기인 5월 하순 사이 2주간에 걸쳐 집중적으로 발병한다(Shin, 2004). 감염초기에는 꽃잎이 가장자리로부터 수침상으로 갈변되고 대개 암술을 제외한 수술 부위가 흑갈색으로 변색된다(Koh 등, 1993). 이후 약 2주부터는 꽃잎도 함께 변색되는 전형적인 증상을 보이게 된다. 심하게 감염된 경우에는 꽃잎이 전개되기 전 꽃봉오리 자체가 갈변되거나, 개화가 되더라도 수분이 이루어지지 않은 상태에서 꽃이 갈변하여 낙화되고 꽃자루만 남게 된다.

꽃썩음병의 발병율은 기상조건에 의해 크게 좌우되는 것으로 알려져 있는데(Fang 등, 1999; Koh 등, 2001; Young, 1984), 재배지역과 개화기 전후의 날씨에 따라 해마다 큰 차이가 있지만 과거에 50% 넘는 피해를 입은 농가도 보고되었다(Shin, 2004). 특히 개화기에 강우가 겹치면 빗물은 키위 잎이나 가지 등에 존재하는 Pss를 꽃 속으로 옮겨줌으로써 감염 2-3일 안에 꽃썩음 증상을 일으키고 조기 낙화나 낙과를 초래하기도 한다.

Pss는 빗물을 따라 전파되고 상처를 통해 쉽게 침입한다. 또한 통풍이 잘 안되는 과수원에서는 습도가 높아 감염이 잘 일어난다. 하지만 병원세균이 기주식물체 외부나 내부에서 감염을 일으키는데 영향을 주는 미세기상환경에 대한 연구는 아직까지 전무한 형편이다. 꽃썩음병 병원세균과 같은 종에 속하는 *P. syringae*에 의해 일어나는 다른 식물병의 경우 일부 연구결과가 보고되었다. *P. syringae* pv. *syringae*가 일으키는 체리 궤양병(bacterial canker)의 경우, 15°C 이상의 기온에서 6시간 이상 습윤상태가 유지되면 90% 이상 발병율을 보이는 것으로 알려져 있고(Latorre 등, 2002), *P. syringae* pv. *tomato*에 의한 토마토 흑점병(bacterial speck)은 10-30°C 범위의 기온과 100% 상대습도에 1시간 정도 노출되었을 때 약 45.6%까지 발병율이 높아지는 것으로 알려졌다(Gullino 등, 2009).

Maryblyt는 사과와 배의 화상병(fire blight)을 기온과 강수를 이용해 예측하는 모형으로 1988년 메릴랜드대학에서 처음으로 개발된 화상병 예측모형이다(Lightner와 Steiner, 1992). 화상병균인 *Erwinia amylovora*는 꽃 부위를 감염시킬 때 그 병원이나 병원생태학적 특징이 참다래의 꽃썩음병을 일으키는 Pss와 유사한 것으로 알려져 있어 Maryblyt 모형을 기반으로 하여 참다래 꽃썩음병 예측모형을 개발하는 것이 가능할 것이라 생

각하였다.

결과적으로 본 연구에서는 Maryblyt 모형의 기본 감염알고리즘을 시작점으로 지금까지 보고된 기상조건에 따른 참다래 꽃썩음병의 발병원리 등을 참고하여 꽃썩음병 예측모형을 개발하였다. 이를 위해 먼저 문헌조사를 통해 Pss를 비롯한 꽃썩음병균의 증식 및 식물체 감염기작과 기상요소들과의 관계를 조사하였다. 다음으로 Maryblyt의 모형구조 및 감염알고리즘을 기반으로 앞서 조사된 꽃썩음병의 병원생태와 기상요소와의 관계를 알고리즘화하여 참다래 꽃썩음병 예측모형에 적용하였다. 마지막으로 실제 과수원의 꽃썩음병 발병조사자료를 바탕으로 꽃썩음병 예측모형(Pss-KBB Risk Model으로 명명함)을 검증하고 동시에 다른 간단한 모형들과 예측성능을 비교 평가한 결과를 제시하였다.

## 재료 및 방법

참다래 꽃썩음병 예측모형 개발을 위해 문헌조사를 실시하여 기상조건과 꽃썩음병의 병원생태와 연관된 자료들을 수집하였다. 우선 다른 세균성 병해와 마찬가지로 꽃썩음병 역시 강우와 밀접한 상관관계를 보이고 있음이 이전의 많은 연구에서 공통적으로 보고되었으므로(Fang, 1999; Koh 등, 2001; Pennycook과 Triggs, 1992; Shin, 2004), 본 연구에서는 이전 연구결과로부터 강우량이나 강우빈도, 병 발생에 영향을 미치는 일 강우량 임계치(threshold) 등의 정보를 수집하고 이를 모형개발에 참고하였다. 꽃썩음병의 발병과 온도와의 상관관계는 실제 포장조건에서 보고된 바가 없어 실험실 환경에서 측정된 꽃썩음병 병원세균의 온도에 따른 성장속도를 측정한 결과를 그대로 활용하였다. Shin(2004)은 Pss의 최적 생장온도 조건을 규명하기 위하여 5°C부터 40°C까지 5°C 간격으로 배양온도를 설정하여 12시간동안 Luria Broth(LB) 배지에서 진탕배양 시킨 후 각 온도별 성장 정도를 OD<sub>600</sub> 흡광도 결과를 바탕으로 설명하였다. 본 연구에서는 위 결과를 Pss-KBB Risk Model 개발에 활용하기 위해 온도에 따른 상대적 성장속도(Max. growth rate = 1)로 변환하여 그래프로 나타내었고(Fig. 1), 이를 가장 잘 설명할 수 있는 상관관계 추정식을 R 통계프로그램의 lm()함수를 이용한 회귀분석을 통해 아래와 같이 구하여 모형 개발에 사용하였다.

$$G(t) = -14.09 + 2.030 * t - 0.09950 * t^2 + 0.002114 * t^3 - 0.00001681 * t^4$$

$$G(t): \text{온도 } t \text{에서의 상대적 성장속도, } R^2 = 0.99$$

사과와 배의 화상병은 *E. amylovora*라는 병원세균에 의해 발생하는데 일반적으로 꽃을 비롯해 어린 순, 가지, 뿌리 등 나무의 전신을 감염시키는 것으로 알려져 있다. 따라서 화상병 예측 모형인 Maryblyt는 온도와 강수 정보를 이용해 모든 종류의 화상병을 예측할 수 있도록 감염부위별 적용 모형이 나뉘어져 있

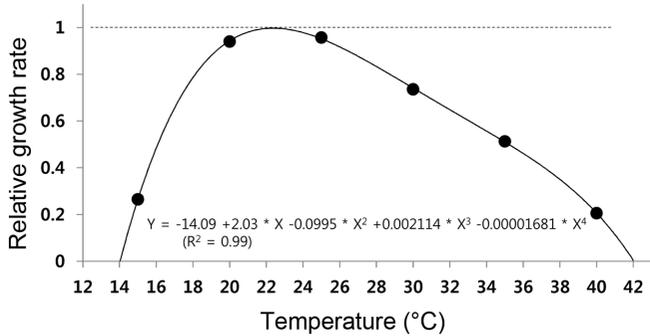


Fig. 1. Relative growth rate responding to temperature (solid line) and its equation, derived from *in vitro* experimental data (dots) obtained with OD<sub>600</sub> measurement of *Pseudomonas syringae* pv. *syringae* (Pss) after incubation for 12 hrs in LB media (Shin, 2004).

고 각 부위별로 서로 다른 감염알고리즘을 사용하고 있다. 화상병 중 꽃 부위가 감염되는 꽃 화상병(blossom blight)의 전반적인 병환이나 병원생태가 참다래 꽃썩음병과 유사하기 때문에 본 연구에서는 Maryblyt 모형의 기본 감염알고리즘을 분석하여 Pss-KBB Risk Model의 감염알고리즘 개발에 적용할 수 있는지를 확인하였다. Maryblyt 모형에서 일반적인 세균성 병의 감염기작을 설명할 수 있는 알고리즘 또는 모듈을 중심으로 Pss-KBB Risk Model에 적용하였고, 참다래 꽃썩음병 특이적인 부분은 추가로 알고리즘화 하여 모형의 기본 구조를 완성하였다. 이후 과수원이나 실험포장에서 조사된 참다래 꽃썩음병의 현장 병해조사자료를 바탕으로 모형 모수화(parameterization)와 보정(calibration) 작업을 실시하였다. Pss-KBB Risk Model의 모수화 및 보정을 위해 Shin(2004)의 1997년부터 1999년까지 3년 동안 전남 고흥 두원면에서 수집한 꽃썩음병 조사자료를 사용하였다. 모형구동을 위한 기상자료는 조사 과수원과 근거리(3 km 이내)에 위치한 전라남도 고흥군 고흥읍 행정리에 위치한 기상청 고흥 종합기상관측소의 동일기간 과거기상자료를 사용하였다.

Pss-KBB Risk Model과 직접적인 비교 평가를 위해, 기온 또는 강우를 입력값으로 꽃썩음병을 예측할 수 있는 알고리즘들을 문헌조사를 통해 선정하였다. 대부분의 방법들은 꽃썩음병 발병 정도와 기상조건과의 경험적 상관관계를 이용한 경험적 모형들이나, 감염과정의 병원생태학적 현상을 모두 알고리즘화하여 병의 위험도를 산출하는 과정기반 경험적 모형에 비해 비교적 간단한 방법으로 병해에 대한 위험도를 얻을 수 있다. 먼저 기온정보만을 활용해 꽃썩음병의 피해율을 예측하는 뉴질랜드 Plant & Food Research 연구소의 개화 전 10일간의 온도와 꽃썩음병 피해율의 경험적 상관관계를 선정하였다(Everett과 Henshall, 2012). 이를 이용해 Fig. 2와 같이 개화 전 10일간의 평균온도와 꽃썩음병 피해율과의 그래프를 그리고, 이를 가장 잘 설명할 수 있는 상관관계 추정식을 R 통계프로그램을 이용해 아래와 같이 구한 후 이를 개화전평균온도 모형으로 명명하였다.

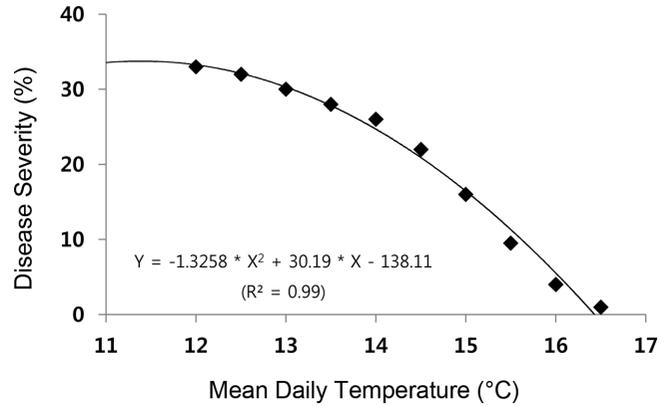


Fig. 2. Disease severity of kiwifruit blossom blight predicted using mean daily temperatures over the 10 days before one percent flowering.

$$S(t) = -1.3258 * t^2 + 30.19 * t - 138.11$$

S(t): 개화 전 10일 간의 평균온도 t에서의 꽃썩음병 피해율

위 개화전평균온도 모형은 개화가 시작되는 개화시점이 결정이 되어야 사용할 수 있다는 문제점이 있다. 즉 모형에서 사용하는 개화 전 10일간 평균온도는 개화시점이 먼저 입력되어야 결정할 수 있는 종속변수이기 때문에 사용자가 개화시점을 매번 입력해야 한다. 결과적으로 자동화 보다는 사용자가 매뉴얼에 의해 직접 계산하는 방법을 감안해 개발된 알고리즘이다.

꽃썩음병과 강우와의 경험적 관계는 Shin(2004)에 의해 보고된 개화기 강우량과 꽃썩음병 발병율과의 상관관계를 참고하였다. 1997년부터 2002년까지 조사된 병해조사자료를 이용해 개화기 동안의 강우량과 통계분석을 하면 상관관계수 0.596으로 95% 신뢰수준에서 유의한 양의 상관관계를 보이는 것을 알 수 있었다. Pennycook과 Triggs(1992)의 연구결과에 따르면 개화기 동안의 강우 빈도(강우일수)가 발병율에 영향을 미치는 것으로 보고되었으므로 본 연구에서는 강우량과 강우일수 모두를 사용해 꽃썩음병 조사자료와의 상관관계 분석을 실시하였다. 개화 첫날부터 만개가 되기까지 평균 7일 정도 개화기가 지속되기 때문에 만개일 추정모형을 바탕으로 추정된 만개일 전 7일 동안을 개화기로 볼 수 있지만 개화기 전 Pss가 급격히 증식하면 꽃봉오리 상태부터 증상이 시작되는 것을 감안하여 만개기 전 10일간의 강우량과 강우일수를 계산하는 대상 기간으로 정하였다.

Pss-KBB Risk Model의 검증 및 비교 평가를 위해 선정된 개화전평균온도 모형과 강우일수 모형과의 상대적인 성능 비교를 위해 전남농업기술원 과수연구소에서 Lim(2009)에 의해 2007년을 제외한 1999-2009년 동안 수집된 해남지역 과수원의 꽃썩음병 조사자료를 사용하였다. 꽃썩음병 외에도 개화시점과 만개기에 대한 정보가 함께 조사되었기 때문에 개화시점 정보가 필요한 개화전평균온도 모형과 만개기 정보가 필요한

Pss-KBB Risk Model과 강우일수 모형에 각각 입력값으로 사용하였다. 모형구동을 위한 기상자료는 전라남도 해남군 해남읍 남천리에 위치한 기상청 해남 종관기상관측소의 동일기간 과거기상자료를 사용하였다.

## 결과 및 고찰

**Pss-KBB Risk Model 개발.** Maryblyt 모형의 꽃 화상병 (blossom blight) 알고리즘을 기반으로 참다래 꽃썩음병 예측 모형인 Pss-KBB Risk Model을 개발하였다. Maryblyt 모형에서 병원세균에 의해 감염이 일어나기 위해서는 다음의 4가지 조건을 모두 만족시켜야 하는데, 각 조건별로 Pss-KBB Risk Model에서 필요한 알고리즘을 취해 모형개발에 활용하였다.

먼저 꽃이 개화된 상태여야 한다. 즉, Maryblyt 모형에서는 개화기만을 대상으로 꽃 화상병을 예측하기 때문에 사용자가 개화시점과 만개기에 대한 정보를 예측모형에 직접 넣어줘야 한다. 참다래 꽃썩음병 역시 개화기에 중점적으로 발생하기 때문에 개화기에 대한 정보가 주어져야 한다. Pss-KBB Risk Model에서는 참다래의 생육시기를 예측할 수 있는 휴면시계모형(Kwon 등, 2012)에 의해 예측된 만개기 정보를 입력값으로 사용하였다. 하지만 꽃썩음병은 월동한 전염원이 기상조건에 의해 급격하게 밀도가 증가하다가 꽃봉오리 상태에서도 감염이 시작되는 경우가 있기 때문에 통상의 개화시점을 그대로 적용하여 모형을 구동한다면 실제 감염 상황을 제대로 재현하지 못하는 경우가 발생할 것이다(Everett과 Henshall, 1994). 이를 감안하여 만개기 전 14일부터 7일까지 하루씩 줄여가며 가장 좋은 예측성을 보이는 최적의 모형구동기간을 선정하는 모수보정 과정을 통해 만개기 전 10일을 최종 모수로 정하였다.

두 번째로 Maryblyt 모형에서는 지난 44.4도일(degree days, > 4.4°C) 간 누적 도시간(cumulative degree hours, > 18.3°C)이 110 이상이 되어야 감염이 일어난다. 생물계의 생리적, 생화학적 과정에는 에너지를 필요로 하는데, 에너지는 열(heat)로 표현될 수 있다. 꽃썩음병의 감염이나 병원세균의 증식, 감염에 의한 병 증상의 진전과 같은 일련의 과정도 열 에너지를 나타내는 누적 열단위(cumulative heat units)로 간접적인 표현이 가능한데, Maryblyt 모형에서는 누적 도일(cumulative degree days)과 누적 도시간(cumulative degree hours)을 이용해서 화상병의 각 단계를 모수화 하였다. 44.4의 누적 도일과 110 누적 도시간은 실험에 의한 경험적 모수인데, 이러한 값들을 본 연구에서는 얻을 수 없었기 때문에 문헌조사를 통해 관련된 정보를 추출해야 했다. 우선 44.4 누적 도일은 각 사과꽃의 개화 지속시간을 바탕으로 정해진 값인데, 개화되어 있는 동안에만 새로운 감염이 일어나거나 병원세균이 증식한다고 가정했기 때문이다. 이를 Pss-KBB Risk Model에 적용하면 다음과 같다. 1) 참다래의 꽃은 짧게는 3일 동안 개화가 지속되는 것으로 알려져 있고, 2) 만개기 이전 10일 동안이 꽃썩음병이 발병하는 기간이라고 가정

하여 해당 기간의 일 평균온도를 구한 후, 3) 참다래 생물모형의 생육기준온도(threshold temperature)인 7°C를 10일간의 일 평균온도에서 뺀 나머지를 일 누적도일로 정한다. 마지막으로, 4) 3일 동안의 개화기간을 감안하여 일 누적도일에 3을 곱하면 최종적으로 23 누적도일이 나오게 되는데, 본 연구에서는 지난 3일간의 누적도일이 23을 넘었을 때 모형을 구동되도록 하였다. Maryblyt 모형의 110 누적도시간은 감염위험도에 대한 경험적 실험 결과에 기반한 값인데, 본 연구에서는 이를 대체하기 위해 기존 문헌의 실험값을 활용하여 온도에 따른 감염 위험도를 나타내는 M index를 도입하였다. 앞서 Shin(2004)에 의해 보고된 꽃썩음병 병원세균의 온도에 따른 성장속도 측정결과를 바탕으로 온도에 따른 상대적 성장속도에 대한 상관관계 추정식을 구하였다(Fig. 1). 이렇게 구한 추정식을 사용하여 시간별 기온값에 대한 상대적 성장속도를 구하고 이를 시간별 감염위험도를 나타내는 Hourly M index 값으로 사용하였다. Fig. 1과 같이 14°C부터 42°C까지만 병원세균의 증식이 가능하기 때문에 14-42°C 이외의 시간별 기온값이 입력되면 Hourly M index는 0이 된다. 최근 뉴질랜드 Plant & Food Research 연구팀에 의해 실제 참다래 식물체에서 병원세균의 최적 성장온도(in planta)가 배양액에서 병원세균이 보여주는 최적 성장온도(in vitro)와 상당한 차이가 난다는 연구결과를 보고하였다(Beresford, 2012). 따라서 본 연구에서도 시간별 기온 입력값을 Hourly M index 추정식에 적용하기 전 해당 차이(1.35)만큼을 변환하는 과정을 거치도록 하였다.

세 번째로 Maryblyt 모형에서는 강수량이 0.25 mm 이상 또는 전날 강수량이 2.5 mm 이상이어야 감염이 성립하는 기준이 있었다. 즉 감염이 일어나기 위해서는 일정량의 강우를 필요로 한다는 것인데 이는 대부분의 세균성 병해에서 통용되는 원리이다. 일정량의 강우는 병원세균이 주변의 견강한 조직으로 전반되거나 식물체 내부로 침투하는 수단이 되며, 높은 상대습도로 인해 병원세균이 증식할 수 있는 환경이 조성되기도 한다. 하지만 100 mm가 넘는 지나친 강우는 식물체 외부의 병원세균을 씻어 내리기 때문에 오히려 감염이 일어나는 것을 방해하게 된다. 따라서 참다래 꽃썩음병 예측모형인 Pss-KBB Risk Model에서는 당일 강수량이 0.25 mm 이상 100 mm 미만일 때 모형을 구동되도록 하였다.

마지막으로 예측 당일의 일평균 기온이 15.6°C 이상 되어야 하는 조건이 사용되었는데, 본 연구에서는 일평균 기온이 누적도일에서 이미 고려되었기 때문에 해당 조건을 사용하지 않았다.

Pss-KBB Risk Model은 Maryblyt 모형의 감염알고리즘을 기반으로 개발되었지만 시간별 기온을 바탕으로 Daily M index를 계산하고 이를 강우 정도와 연결하여 Daily R index를 계산하여 사용한다는 점에서 새로운 일별 위험도의 개념이 적용되었다. Daily M index는 기온에 따른 Pss의 증식정도를 나타내는 값이고 0.25 mm 이상의 강우가 내리면 증식된 Pss가 새로운 감염을

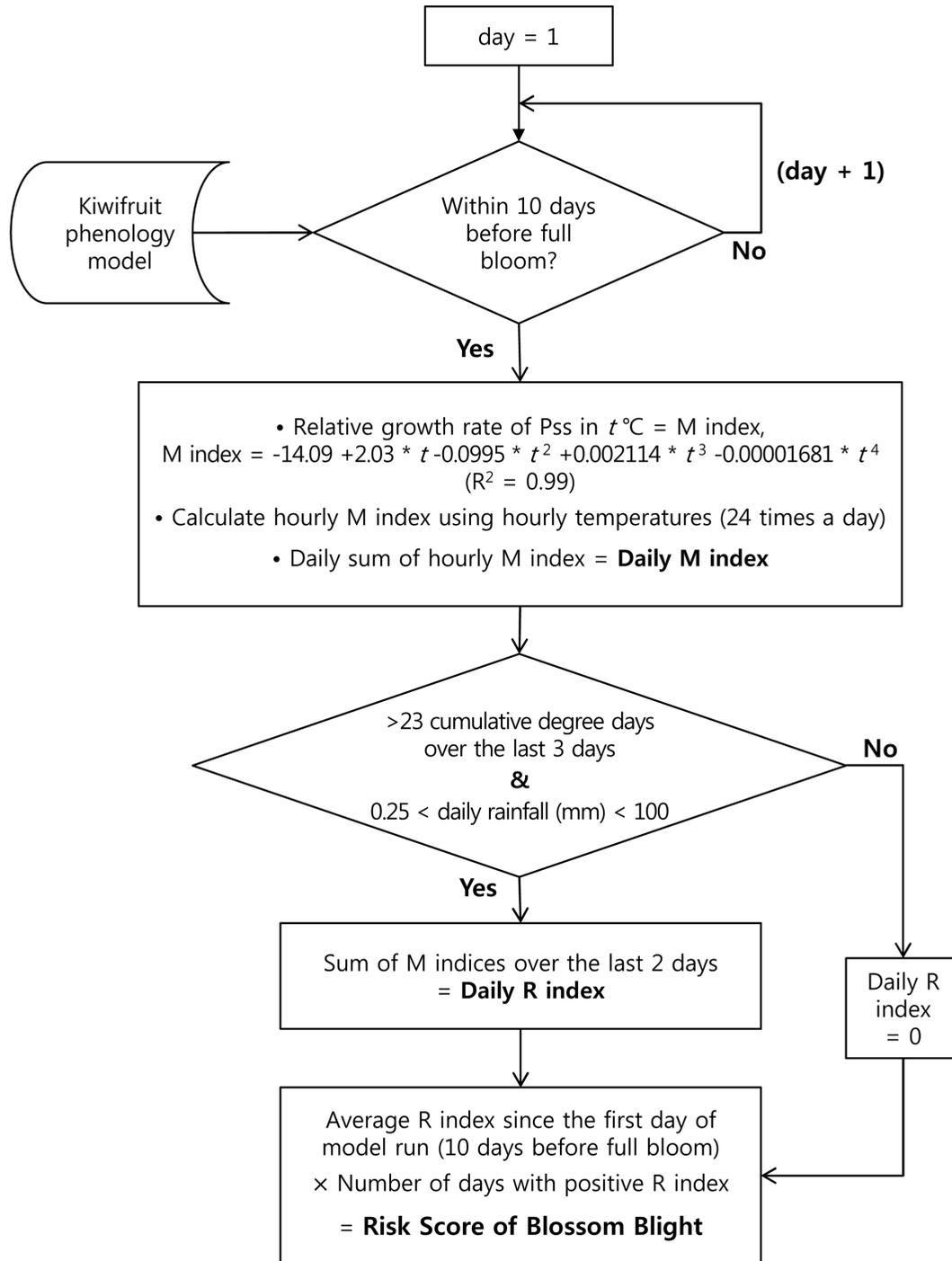


Fig. 3. A schematic flow chart illustrating the Pss-KBB Risk Model developed for estimating overall risk of kiwifruit bacterial blossom blight. Daily M index is calculated from hourly temperature and daily R index from the daily M indices based on daily mean temperature and precipitation thresholds. Finally a risk score of blossom blight since the first day of model run (10 days before full bloom) is calculated.

일으킬 수 있는 실질적 위험도가 증가하게 되는데 이는 Daily R index로 나타내었다. 당일의 Pss 증식 정도는 전날의 증식 정도에 영향을 받는 것으로 가정하여 Daily R index는 하루 전 Daily M index와 당일 Daily M index를 합한 값을 사용하였다. 하지만 당일 0.25 mm가 넘는 강우가 왔다 하더라도 지난 3일간 누적도일을 초과하지 않으면 개화가 지속되지 않아 꽃 조직의 내

외부에 존재하는 Pss의 증식이 의미가 없다고 가정하였기 때문에 R index가 계산되지 않도록 하였다. 마지막으로 Pss-KBB Risk Model을 통해 개화기 동안 꽃썩음병의 전체 위험도를 표출하기 위한 방법으로, 일별로 계산된 모든 R index를 평균한 뒤 0 이상되는 R index가 계산된 날의 개수로 나누어 전체 위험도지수를 생성하였다. 1997년부터 1999년 동안 전남 고흥 두원면에

**Table 1.** Correlation coefficients (Pearson's) resulting from statistical analyses using observed disease severity data and estimated disease scores from three different models including the Pss-KBB Risk Model

| Year                     | Observed disease severity (%) | Disease severity scores from the mean temperature model <sup>a</sup> (%) | Frequency scores from the rainfall frequency model <sup>b</sup> (days) | Risk scores from the Pss-KBB Risk Model |
|--------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 1999                     | 5.0                           | 3.14                                                                     | 4                                                                      | 38.18                                   |
| 2000                     | 0.1                           | 0.00                                                                     | 2                                                                      | 3.54                                    |
| 2001                     | 5.5                           | 0.00                                                                     | 3                                                                      | 36.75                                   |
| 2002                     | 10.7                          | 14.77                                                                    | 5                                                                      | 103.21                                  |
| 2003                     | 3.5                           | 3.41                                                                     | 3                                                                      | 37.48                                   |
| 2004                     | 0.5                           | 2.64                                                                     | 1                                                                      | 16.31                                   |
| 2005                     | 0.3                           | 0.00                                                                     | 0                                                                      | 0.00                                    |
| 2006                     | 0.2                           | 0.00                                                                     | 2                                                                      | 18.19                                   |
| 2007                     | –                             | –                                                                        | –                                                                      | –                                       |
| 2008                     | 7.5                           | 15.56                                                                    | 4                                                                      | 61.65                                   |
| 2009                     | 5.5                           | 0.00                                                                     | 5                                                                      | 64.00                                   |
| Correlation coefficients |                               | 0.760                                                                    | 0.858                                                                  | 0.954                                   |

<sup>a</sup>Referenced from Everett and Henshall (2012).

<sup>b</sup>Referenced from Pennycook and Triggs (1992).

서 수집한 꽃썩음병 조사자료(Shin 등, 2004)와 기상청 고흥 종관기상관측소의 동일기간 과거기상자료를 사용하여 Pss-KBB Risk Model의 모수를 보정하였고 최종 모형의 구조 및 흐름도를 Fig. 3에 나타내었다.

**Pss-KBB Risk Model의 검증 및 비교평가.** Pss-KBB Risk Model의 성능을 검증하기 위해 해남지역 과수원에서 수집된 과거 10년간의 꽃썩음병 조사자료를 사용하였다(Lim, 2009). 앞서 기존 연구결과에서 도출된 기온이나 강우 정보로 꽃썩음병의 발병율을 예측하는 모형들의 결과를 Pss-KBB Risk Model의 결과와 비교 평가하였다(Table 1). 먼저 해남지역 기상관측자료로부터 개화시작 전 10일간 평균온도를 구하고, 앞서 뉴질랜드 Plant & Food Research 연구소의 개화 전 10일간의 온도와 꽃썩음병 피해율로부터 도출한 개화전평균온도 모형을 구동하여 꽃썩음병 피해도를 추정하였다. 연도별로 추정된 피해도와 실제 조사된 꽃썩음병 발병율의 상관관계를 분석한 결과 95% 신뢰수준에서 유의한 0.760의 상관계수를 얻었다. 앞서 강우와 꽃썩음병 발생과의 상관관계를 바탕으로 개화기 동안 강우량과 강우빈도(강우일수)를 가지고 꽃썩음병 병해조사자료와 통계분석을 실시하였다. 해남 꽃썩음병 조사자료에 만개기 정보도 포함되어 있었기 때문에 기상청 해남 기상관측소의 기상자료를 바탕으로 해남지역 만개기 전 10일 동안의 강우량과 강우일수를 얻었고, 꽃썩음병 발병화율과 상관관계를 분석하였다. 강우량과는 통계적으로 유의한 상관관계를 보이지 않았지만, 강우일수와 꽃썩음병 발병화율은 앞서 기온에 의한 피해도의 상관계수 보다 높은 0.858의 상관계수를 나타냈다. 이에 더해 개화기 동안의 기온조건과의 상관관계를 확인하기 위해 만개기 전 10일 동안의 평균 기온, 누적도일(>7°C), 또는 14–42°C 사

이의 열에너지 누적값을 의미하는 누적 도시간을 계산하여 꽃썩음병 발병율과의 상관관계를 분석하였지만 통계적으로 유의미한 결과를 얻을 수 없었다. 결과적으로 개화기 동안에는 기온보다는 강우 조건에 의해 꽃썩음병 발병의 많은 부분이 결정되는 것을 알 수 있었다. 실제로 단지 비가림시설만으로도 꽃썩음병 발병율을 61–8% 가량 줄일 수 있다는 이전 연구결과가 이를 뒷받침하고 있다(Koh 등, 2001). 본 연구에서는 꽃썩음병과 강우와의 강한 양의 상관관계로 인해 만개기 전 10일 동안의 강우일수를 바탕으로 참다래 꽃썩음병 위험도를 예측할 수 있음을 확인하였다.

기상청 해남 종관기상관측소의 과거기상자료와 병해조사자료의 만개기 정보를 입력값으로 Pss-KBB Risk Model을 구동하였고, 지난 10년간 해남지역 꽃썩음병 발병화율 자료를 사용해 모형의 성능을 검증하였다. R index는 만개기 전 10일 동안 매일 계산이 되는데 대체적으로 강우일수와 상관관계가 높은 것으로 나타났다. 꽃썩음병의 발병에 강우가 미치는 영향을 고려하여 비가 0.25 mm 이상 내리는 날에만 R index가 계산되도록 한 모형 알고리즘 때문에 생기는 당연한 결과이지만, 강우의 영향 뿐 아니라 동기간 온도에 의한 영향이 더해져 R index의 높고 낮음이 결정되었다. 실제로 Daily R index를 모두 합하여 계산한 최종 위험도 지수 결과를 보면 같은 강우일수인 경우에도 위험도 지수 사이에 큰 차이가 나는 것을 볼 수 있다(Table 1). 이를 바탕으로 꽃썩음병 발병화율과의 상관관계를 분석하면 0.954의 높은 상관계수를 나타내므로 본 연구에서 개발된 Pss-KBB Risk Model의 성능이 다른 방법에 비해 향상되었음을 알 수 있었다.

국내 참다래 재배농가에서는 꽃썩음병이 발생할지라도 참다래 궤양병처럼 전체적인 수세에 큰 영향을 미치지 않을 뿐만 아

나라 과실의 수량에도 거의 영향을 미치지 않는다고 판단하여 매년 10–20% 정도의 꽃썩음병 발생은 자연스런 적화 또는 적과 수단으로 여기고 방제를 하지 않는 경향이 있다(Shin, 2004). 현재까지 꽃썩음병에 의한 수량손실은 보고된 바가 없지만 이는 공식적인 자료가 보고되지 않았을 뿐이지 실제로 꽃썩음병이 심하게 발생해서 조기낙화와 낙과 또는 기형과를 발생시켜 엄청난 수량감소를 일으킨 사례가 과거에 다수 있었음이 알려져 있다.

본 연구를 통해 개발된 Pss-KBB Risk Model은 기온과 강수에 의한 꽃썩음병의 발생정도를 위험도 지수로 나타내는데, 실제 과수원의 병해조사자료를 바탕으로 검증한 결과 그 성능이 우수함을 알 수 있었다. 따라서 Pss-KBB Risk Model과 기상예보자료를 활용해 꽃썩음병의 발병 위험도를 미리 알 수 있다면 적절한 방제를 통해 꽃썩음병에 의한 잠재적 피해를 줄이는데 도움이 될 것으로 판단된다. 하지만 본 모형을 현장에서 활용하기 위해서는 기상청에서 제공하는 10일 예보를 기상 입력값으로 하여 참다래의 품종별 휴면시계모형과 Pss-KBB Risk Model을 연계하여 서비스를 제공할 수 있는 시스템의 개발이 필요할 것이다.

## 요 약

*P. syringae* pv. *syringae*에 의해 발생하는 참다래 꽃썩음병은 개화기 전후의 기상조건에 영향을 크게 받는다. 지금까지 기상조건과 꽃썩음병 발생의 상관관계를 밝힌 연구들은 많았지만, 이를 활용해 꽃썩음병의 감염 위험도를 나타낼 수 있는 예측 모형은 개발되지 않았다. 본 연구에서는 기존 정보를 조사하고 꽃썩음병의 병원생태와 유사한 화상병 예측모형인 Maryblyt 모형을 기반으로 참다래 꽃썩음병 예측모형인 Pss-KBB Risk Model을 개발하였다. 비교평가를 통한 검증 결과, Pss-KBB Risk Model은 각각 온도와 강수 정보만을 이용하는 개화전 평균온도 모형과 강우일수 모형에 비해 실제 과수원의 병해 발생정도를 더 잘 모의하는 것으로 나타났다. 따라서 Pss-KBB Risk Model과 기상예보자료를 활용해 꽃썩음병의 발병 위험도를 예측하여 꽃썩음병에 대한 적기적량 방제가 가능할 것으로 판단된다.

## Acknowledgement

This work was carried out with the support of Regional Climate Services Program by Gwangju Regional Meteorological Administration, Korea.

## References

Beresford, R. M. 2012. Psa risk model(ZES VI1278): Updated M-index using new temperature curve. Research Update for Zespri. Plant & Food Research Institute. 14 pp.  
 Conn, K. E., Gubler, W. D. and Hasey, J. K. 1993. Bacterial blight of

kiwifruit in California. *Plant Dis.* 77: 228–230.  
 Everett, K. and Henshall, W. 1994. Epidemiology and population ecology of kiwifruit blossom blight. *Plant Pathol.* 43: 824–830.  
 Everett, K. and Henshall, W. 2012. Bacterial blossom blight. KiwiTech Bulletin No. N78. Issued by Plant & Food Research Institute. 4 pp.  
 Fang, D., Hu, F. and Xie, L. 1999. Preliminary study on bacterial blossom blight of kiwifruit in Jianning County, Fujian Province. *J. Fujian Agr. Univ. Nat. Sci. Ed.* 1999–01.  
 Gullino, M. L., Gilardi, G., Sanna, M. and Garibaldi, A. 2009. Epidemiology of *Pseudomonas syringae* pv. *syringae* on tomato. *Phytoparasitica* 37: 461–466.  
 Koh, Y. J., Jung, H. J. and Kim, J. H. 1993. The kiwifruit bacterial blossom blight caused by *Pseudomonas syringae*. *Korean J. Plant Pathol.* 9: 300–303. (In Korean)  
 Koh, Y. J., Lee, D. H., Shin, J. S. and Hur, J.-S. 2001. Chemical and cultural control of bacterial blossom blight of kiwifruit caused by *Pseudomonas syringae* in Korea. *New Zealand J. Agric. Res.* 29: 29–34.  
 Kwon, Y.-S., Kim, S.-O., Seo, H.-H., Moon, K.-H. and Yun, J. I. 2012. Geographical shift in blooming date of kiwifruits in Jeju Island by global warming. *Korean J. Agric. For. Meteor.* 14: 179–188. (In Korean)  
 Latorre, B. A., Lillo, C. and Rioja, M. E. 2002. Effects of temperature, free moisture duration and inoculum concentration on infection of sweet cherry by *Pseudomonas syringae* pv. *syringae*. *Phytoparasitica* 30: 410–419.  
 Lightner, G. W. and Steiner, P. W. 1992. Maryblyt™: a computer model for predicting of fire blight disease in apples and pears. *Comput. Electron. Agr.* 7: 249–260.  
 Lim, D. K. 2009. Phenological survey for the subtropical fruit trees. Jeonnam Agricultural Research & Extension Services. 14 pp. (In Korean)  
 Miyoshi, T. and Tachibana, Y. 1994. A selective medium for isolation of *Pseudomonas syringae*, the pathogen of bacterial blossom blight of kiwifruit. *Ann. Phytopathol. Soc. Japan* 61: 489–492.  
 Morita, A. 1995. Occurrence of bacterial blossom blight of kiwifruit and its influence on fruit production in Nagasaki Prefecture. *Ann. Phytopathol. Soc. Japan* 61: 57–62.  
 Pennycook, S. R. and Triggs, C. M. 1992. Bacterial blossom blight of kiwifruit – A 5-year survey. *Acta Hort.* (ISHS) 297:559–566.  
 Shin, J. S. 2004. Ecology and eco-friendly control of blossom blight of kiwifruits. Ph.D. thesis. Suncheon National University. Korea. (In Korean)  
 Shin, J. S., Park, J. K., Kim, G. H., Park, J. Y., Han, H. S., Jung, J. S., Hur, J.-S. and Koh, Y. J. 2004. Identification and ecological characteristics of bacterial blossom blight pathogen of kiwifruit. *Res. Plant Dis.* 10: 290–296. (In Korean)  
 Tachibana, Y. 1988. Occurrence of kiwifruit bacterial blossom rot and its control. *Plant Quar.* 42: 182–186.  
 Young, J. M. 1984. Little light at the end of the bud rot tunnel. *Southern Horticulture* 13: 12–14.