

기후변화 시나리오에 따른 미래 참다래 궤양병 피해 예측

도기석* · 정봉남 · 최경산 · 안정준 · 좌재호
농촌진흥청 국립원예특작과학원 온난화대응농업연구소
(2015년 12월 29일 접수; 2016년 5월 19일 수정; 2016년 6월 17일 수락)

Impact of Climate Change on Yield Loss Caused by Bacterial Canker on Kiwifruit in Korea

Ki Seok Do*, Bong Nam Chung, Kyung San Choi, Jeong Joon Ahn and Jae Ho Joa

Research Institute of Climate Change and Agriculture, National Institute of Horticultural and Herbal Science,
Rural Development Administration, 281 Ayeonno, Jeju, 63240, Korea

(Received December 29, 2015; Revised May 19, 2016; Accepted June 17, 2016)

ABSTRACT

We estimated the averaged maximum incidences of bacterial canker at suitable sites for kiwifruit cultivation in 2020s and 2050s using D-PSA-K model with RCP4.5 and RCP8.5 climate change scenarios. Though there was a little difference between the estimation using RCP4.5 and that using RCP8.5, the estimated maximum disease incidences were more than 75% at all the suitable sites in Korea except for some southern coastal areas and Jeju island under the assumption that there are a plenty of infections to cause the symptoms. We also analyzed the intermediate and final outputs of D-PSA-K model to find out the trends on the change in disease incidence affected by climate change. Whereas increase of damage to kiwifruit canes in a non-frozen environment caused by bacterial canker was estimated at almost all the suitable sites in both the climate change scenarios, rate of necrosis increase caused by the bacterial canker pathogen in a frozen environment during the last overwintering season was predicted to be reduced at almost all the suitable sites in both the climate change scenarios. Directions of change in estimated maximum incidence varied with sites and scenarios. Whereas the maximum disease incidence at 3.14% of suitable sites for kiwifruit cultivation in 2020s under RCP4.5 scenario was estimated to increase by 10% or more in 2050s, the maximum disease incidence at 25.41% of the suitable sites under RCP8.5 scenario was estimated so.

Key words: Bacterial canker, Kiwifruit, Climate change, Disease forecast model, Disease incidence

I. 서론

전지구적 관점으로 1950년 이후 관측된 변화는 대부분 수십 년에서 수천 년내에 전례가 없던 것이며 대기와 해양의 온도 및 해수면은 높아지고 있는 반면에 눈과 빙하의 양은 감소하고 있다(IPCC, 2014). 대표농도경로(Representative Concentration Pathway, RCP) 기후변

화 시나리오는 대기 오염물질 및 토지 이용 변화 등과 같은 요인들을 바탕으로 향후 온실가스 배출량과 대기 중 농도의 변화를 추정하여 만든 시나리오로 엄격한 완화 시나리오(RCP2.6), 중간 시나리오(RCP4.5와 6.0), 매우 높은 온실가스 배출 시나리오(RCP8.5)의 4가지가 있다. 이들 시나리오에 따르면 1986-2005년을 기준으로 2081-2100년 지구 평균 온도는 RCP2.6에서 0.3-1.7°C, RCP4.5



* Corresponding Author : Ki Seok Do
(doki7312@gmail.com)

에서 1.1-2.6°C, RCP6.0에서 1.4-3.1°C, RCP8.5에서 2.6-4.8°C 상승한다. 한국의 경우에 평균 온도가 RCP4.5에서는 2°C 이상, RCP8.5에서는 4°C 이상 상승할 것으로 전망되고 있다(National Institute of Environmental Research, 2015).

온대기후대에 속한 한국은 기후 변화에 따라 점진적으로 아열대성 기후대로 변화가 되고 있고 이에 따라서 재배 가능한 농작물 종류 및 재배 작형은 물론, 병, 해충, 잡초 발생 양상도 달라질 것으로 전망된다. 해충 발생은 RCP8.5 시나리오에서 애벌구의 연간 세대수가 평년(1980-2010년) 대비 2050년에는 평균 2.0 세대, 2100년에는 5.2세대 증가하며, 월동 후 1세대 성충 50% 우화일은 2050년대에는 평균 6.0±8.07일 대비 약 13일, 2090년대에는 약 32일 빨라질 것으로 추정되었고(Jung *et al.*, 2013a), RCP8.5 시나리오에서 과수 나방류 해충인 복숭아심식나방, 복숭아순나방, 사과굴나방의 월동세대 발생일은 2000년대보다 2050년대와 2090년대에 각각 약 15-21일, 약 40-53일 빨라지고 연간 세대수는 2000년대보다 2050년대에는 복숭아순나방과 사과굴나방은 2세대 더 증가하고, 2090년대에는 복숭아심식나방 1세대, 복숭아순나방 4세대, 사과굴나방 6세대 더 증가할 것으로 예측되고 있다(Jung *et al.*, 2013b). 다른 여러나라에서도 여러 곤충에서 봄철 월동 성충의 출현일이 당겨지는 현상이 빈번히 발견되고 있음이 보고되어 있다(Collier *et al.*, 1991; Sparks and Yates, 1997; Forister and Shapiro, 2003; Stefanescu *et al.*, 2003; Kiritani, 2006).

해충에 비해서 기후변화에 따른 식물병 발생 변화에 대한 연구는 많이 이루어지지 않았다. 또한, 대부분의 해충 발생 변화 연구 결과가 월동 해충 발생 시기가 앞당겨지고 연간 세대수가 증가하는 방향성을 보이는 반면에 병 발생의 경우에는 전체적인 변화의 방향성이 없는 것으로 예상된다(National Institute of Environmental Research, 2015). 벼 흰잎마름병은 CO₂ 농도가 동반 상승하는 경우에 변화된 기상환경에 적용된 새로운 병원균 레이스의 출현을 배제한다면 현재 기후조건에서보다 크게 확대되지 않을 것으로 예상된다. 고추 풋마름병, 세균성 점무늬병, 탄저병은 현재 기후조건에서보다 상대적으로 더 극심해질 것으로 예상된다. 덧붙여 고추 탄저병의 경우에 이런 변화가 지역에 관계없이 동일한 속도로 발생하지 일어나지 않고 일부 지역에서는 더 빠르게 다른 일부 지역에서는 비교적 완만하게 변화할 것으로 예상된다(Shin and Yun, 2011). 즉, 병의 종류가 다르거나 같은 병이라도 발생 지역이 다르면 기후변화에 따른 병해 발생 생태 변화

가 다르게 나타날 가능성이 높았다.

기상 환경은 병원균의 발병력에 영향을 줄 뿐만 아니라 기주 식물의 저항성과 기주 병원체 상호작용에도 영향을 주기 때문에 미래 기후변화에 따른 발병 예측은 기주, 병원체 및 기주-병원체 상호작용을 모두 고려해야 하는 복잡한 작업이다(Shin and Yun, 2011). 더욱이 식물병 발생과정에서 중요한 엽면 습윤이나 강우에 관한 예측은 기후 변화에 따른 기온상승 예측보다 훨씬 어려우므로 미래 발병 예측을 곤란하게 하고 예측 정확도를 떨어뜨리는 요인이다. 따라서, 예측 정확도에서 큰 차이가 없다면 엽면 습윤이나 강우 요소를 병 발생 예측에 사용하지 않는 식물병 모형을 사용하여 미래예측기후에 따른 식물병 발생 변동을 예측하는 것이 더 개연성 있는 결과를 얻을 수 있을 것이다. 덧붙여 기후변화에 따른 병원균의 병원성 및 기주의 저항성 변동과 미래 기후 환경에서 기주의 재배가능성과 같이 식물병 모형에서는 고려되지 않지만 미래 병발생에는 큰 영향을 줄 수 있는 요소들도 모형의 결과와 함께 고려하여야 더욱 개연성이 높은 예측이 될 것이다.

참다래는 1974년 국내에 도입된 이후로 점차 제주와 남해안 지역을 중심으로 널리 재배되어 2013년에는 1,286 ha에서 약 19,000톤이 생산되고 있는 주요한 과일 중 하나이다. *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae*에 의해 발생하는 궤양병은 한국에서 참다래에 발생하는 주요한 병해 중 하나로 종종 참다래 과원에 치명적인 피해를 입히고 있으며(Ko *et al.*, 2002; Koh *et al.*, 1994; Koh *et al.*, 2012; Koh, 1995), 일본(Serizawa *et al.*, 1989; Takikawa *et al.*, 1989), 이탈리아(Balestra *et al.*, 2009; Scortichini, 1994)를 비롯한 다른 여러 국가들(Balestra *et al.*, 2010; Balestra *et al.*, 2011; Bastas and Karakaya, 2012; Everett *et al.*, 2011; Vanneste *et al.*, 2011a; Vanneste *et al.*, 2011b)에서도 발생하여 상당한 피해를 주고 있다.

한국에서 참다래 궤양병은 1988년 제주에서 처음으로 헤이워드 품종에서 발견이 되었고 그 후에 다른 재배 지역들로 빠른 전파가 일어났다(Koh *et al.*, 1994; Koh *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2005). 이런 참다래 궤양병으로 인한 피해량을 예측하기 위한 모형으로 D-PSA-K가 이미 개발되어 있다(Do *et al.*, 2015). 이 모형은 헤이워드 품종에서 한국에서 주로 분리되는 병원세균 균주들에 의해 발생하는 참다래 궤양병으로 인한 피해량과 작기 초기에 줄기에 발생하는 참다래 궤양병의 최대이병주율을 시간별 및 일별 온도자료만으로 추정할 수 있는 모형이다.

한편, 참다래 궤양병의 최대이병주율은 궤양병에 의해 발생하는 수확량 감소와 큰 상관관계가 있으며 수확량 감소량을 추정하는 간접적인 척도가 될 수 있다. D-PSK-K 모형은 먼저 월동기 저온 환경이 없다는 가정 아래에서의 참다래 궤양병 병원세균에 의하여 감염 후에 가지의 수피 아래에 발생하는 괴사병반의 증가를 모사한 식(1)을 사용하여 직전 생육기 및 월동기 동안의 가지 피해량(NNF)을 추정한다.

$$NNF = \sum_{\text{May 1, Last year}}^{\text{April 30, this year}} DNNF \quad (1)$$

$$DNNF = \frac{0.1321e^{0.1388Td} - 1}{10} \quad (15 < Td \leq 35^{\circ}\text{C})$$

DNNF= 월동기 저온으로 인한 피해가 없다는 가정 아래에서 궤양병으로 인해 하루동안참다래 가지에 발생하는 피해량(cm)

Td=일평균기온

그 다음으로 월동기 저온에 의하여 수피 아래의 괴사병반이 저온 환경이 없을 때에 비하여 증가하는 비율, 즉 월동기 저온에 의한 참다래 궤양병에 의한 가지 피해 증가율(RNI)를 식(2)를 사용하여 추정하고 이 두가지 값의 곱으로 직전 생육기 및 월동기 동안에 참다래 궤양병으로 인해 발생하는 가지 피해량(D)를 추정한다.

$$RNI = 1 + \sum_{0 \text{ hour, October 1, last year}}^{23 \text{ hour, April 30, this year}} RNIH \quad (2)$$

$$RNIH = 0.0171Th^2 + 0.1412Th + 0.6298 \quad (-10 \leq Th \leq -3)$$

RNIH= 월동기 저온으로 인해 한시간 동안 증가되는 참다래 가지 피해증가량의 비(예: 0.3이면 30% 피해량 증가)

Th=시간평균기온

마지막으로 직전 생육기 및 월동기 동안에 참다래 궤양병으로 인해 발생하는 가지 피해 추정량(D)과 실제 관찰된 작기 초기 헤이워드 품종의 참다래 가지에 발생하는 궤양병 최대이병주율(DI) 사이의 경험적 관계식(DI = 0.1158D)을 이용하여 D-PSK-K 모형은 참다래 궤양병의 최대이병주율을 추정한다.

한편, 기후변화에 따른 참다래 재배적지 변동 예측도

농촌진흥청 국립원예특작과학원 온난화대응농업연구소에서 2009-2012년에 기후변화에 따른 주요 작물별 재배적지 변동 연구 과제의 일부분으로 RCP4.5, RCP8.5 시나리오에 대해서 이미 연구가 되어 겨울철 극최저기온 -15℃ 이상, 5월과 10월의 평균기온 10℃ 이상, 12~2월 평균기온 11℃ 이하, 연강수량 1,250mm 이상을 재배 적지의 기준으로 설정하고 2020, 2050, 2090년대 미래 재배적지 지도가 제작된 바가 있다.

본 연구에서는 기후 변화 시나리오자료와 참다래 궤양병 피해 예측 모형인 D-PSA-K, 미래 참다래 재배가능지 지도를 활용하여 한국에서 재배면적이 넓은 참다래에 많은 피해를 주고 있는 궤양병의 미래 피해를 예측하고자 하였다. 또한, 지도 형태로 얻은 D-PSA-K 모형의 중간값과 최종 결과값들을 분석하여 기후 변화에 따른 참다래 궤양병의 발생 변화의 경향도 예측하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 기후변화에 따른 미래 참다래 궤양병 최대이병주율 지도

기상청 기후변화정보센터에서 제공하는 RCP4.5와 RCP8.5의 남한상세기후변화시나리오 자료(HadGEM3-RA와PRIDE 모형 사용 상세화, 1km 해상도)의 일별 자료를 제공받아 이용하였다. RCP4.5와 RCP8.5 2020-2030, 2050-2060 기후변화 시나리오 자료의 일별 최고/최저기온을 입력 자료로 사용하여 시간별 온도자료를 시간별 기온 추정 알고리즘(Sugiura, 1999)을 이용하여 추정하고 D-PSA-K 모형의 월동기 저온으로 인한 참다래 궤양병 피해 증가량 추정 부분을 계산하였다. RCP4.5와 RCP8.5 2020-2030, 2050-2060 기후변화 시나리오 자료의 일별 평균기온을 이용하여 D-PSA-K 모형의 월동기 저온 환경이 없다는 가정에서의 참다래 궤양병으로 인한 가지 피해량 추정 부분을 계산하였다.

이렇게 계산된 두 값을 사용하여 년도별 참다래 궤양병의 가지 피해량 추정 지도들을 제작한 후에 년대별로 평균을 구하고 추정된 피해량과 최대 이병주율 관계식을 이용하여 년대별 참다래 궤양병 최대 이병주율 예측지도를 작성하였다. 최종적으로 기존에 개발된 30m 해상도의 참다래 재배지 변동 예측 지도와 중첩 분석하여 미래 참다래 재배가능지에서의 RCP4.5와 RCP8.5의 2020년대와 2050년대 궤양병 최대이병주율 예측지도를 제작하였다.

2.2. 2020년대 참다래 재배가능지에서 2050년대에 나타나는 궤양병 발생 변화

기후 변화의 진행에 따른 참다래 궤양병 발생 양상의 변화를 탐색하기 위하여 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오에 따른 2020년대 참다래 재배가능지의 궤양병 최대 이병주율이 2050년대가 될 때에 변화하는 비율을 나타내는 지도를 제작하였다. 이러한 변화의 요인을 탐색하기 위하여 D-PSA-K 모형에서 최종 예측값을 계산하기 위해 사용되는 두 중간값, 월동기 저온으로 인한 참다래 궤양병 피해 증가량값과 월동기 저온 환경이 없다는 가정에서의 참다래 궤양병으로 인한 가지 피해량값의 년대별 평균값을 계산하고 RCP4.5와 RCP8.5의 2020년대 재배가능지의 두 중간값이 2050년대가 될 때에 변화하는 비율을 나타내는 지도들도 제작하였다.

III. 결과 및 고찰

RCP4.5와 RCP8.5 기후 변화 시나리오에 따른 미래 참다래 재배가능지에서의 2020년대와 2050년대 참다래 궤양병 최대이병주율은 지역이나 예측에 사용된 시나리

오에 따라서 차이는 있지만 제주도 지역과 남해안 일부 지역을 제외한 대부분의 재배가능지에서 모두 75% 이상의 높은 값들이 나타날 것으로 예측되었다(Fig. 1). 2050년대의 참다래 재배가능지에서 참다래 궤양병의 최대이병주율이 75% 이하로 예측되는 지역은 RCP4.5 시나리오에 비하여 RCP8.5 시나리오 조건에서 더 좁은 면적이 나타났으며 해안으로부터 안쪽으로 들어갈수록 높은 이병주율이 예측되는 것으로 보였다. D-PSA-K 모형은 병원 세균의 의한 감염들이 병징을 발생할 만큼 충분히 존재한다는 가정 아래에서 참다래 궤양병 병징의 진전으로 인한 피해량을 추정하는 모형이기 때문에 병원 세균이 도입되어 충분한 밀도로 존재하는 환경이라면 기후 변화에 따라서 제주도 지역과 일부 남해안 지역을 제외한 대부분의 지역에서 여전히 궤양병에 의한 피해가 클 가능성이 높은 조건에 속하므로 이 병에 대한 지속적인 관리가 미래에도 필요하다는 것을 보여주고 있다.

RCP4.5 시나리오에서 2020년대 한국의 참다래 재배 적지 중에서 75% 이하의 최대이병주율이 나타나는 면적은 133,500ha로 예측되었고 2050년대 한국의 참다래 재배 적지 중에서는 248,900ha로 예측되었다(Table 1).

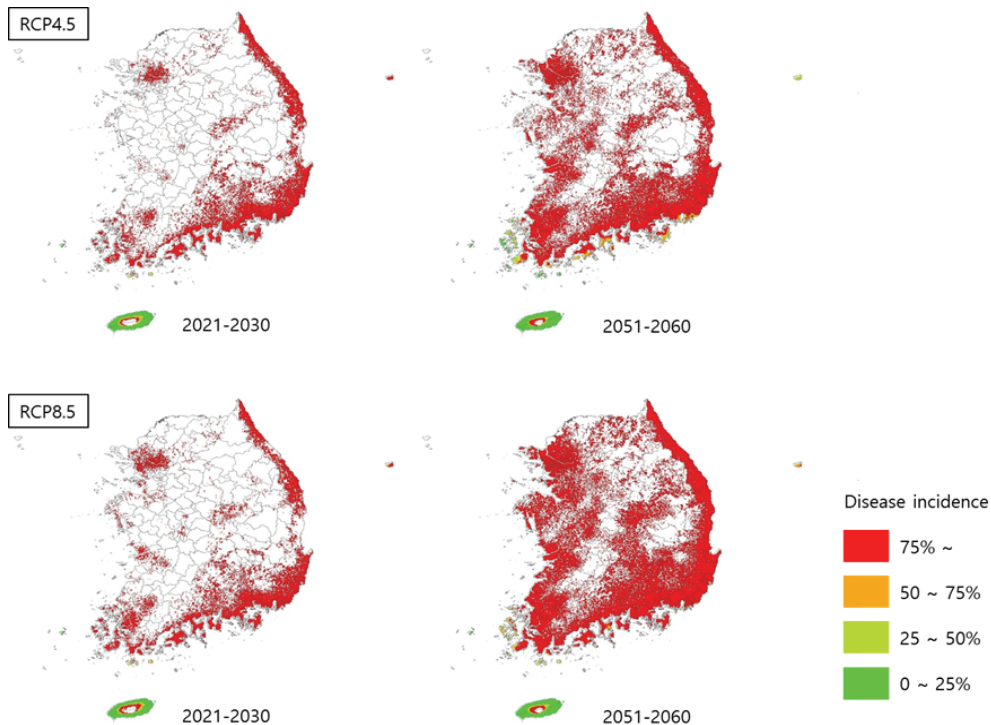


Fig. 1. Maximum disease incidences of bacterial canker at suitable sites for kiwifruit cultivation in 2020s and 2050s, which were estimated using RCP4.5 and RCP8.5 climate change scenarios.

Table 1. Land areas within the ranges of disease incidence of bacterial canker at suitable sites for kiwifruit cultivation in 2020s and 2050s, which were estimated using RCP4.5 and RCP8.5 climate change scenarios

Scenario	year	Land area within the range of disease incidence (100ha)				Area of suitable sites (100ha)
		0-25%	25-50%	50-75%	75%-	
RCP4.5	2020s	1,057	162	116	19,424	20,759
	2050s	1,358	401	730	40,001	42,490
RPC8.5	2020s	972	160	132	19,679	20,943
	2050s	1,203	208	342	52,012	53,765

RCP8.5 시나리오에서 2020년대 한국의 참다래 재배 적지 중에서 75% 이하의 최대이병주율이 나타나는 면적은 126,400ha로 예측되었고 2050년대 한국의 참다래 재배 적지 중에서는 175,300ha로 예측되었다.

RCP4.5 환경에서 2020년대에 비해 2050년대의 재배 가능면적은 104.7% 증가가 일어남에 비하여 75% 이하의 예상 최대이병주율이 기대되는 면적은 86.4% 증가가 일어났고, RCP8.5 환경에서는 2020년대에 비해 2050년대의 재배가능면적은 156.7% 증가가 일어남에 비하여 75% 이하의 예상 최대이병주율이 기대되는 면적은 38.7% 증가가 일어났다. 이것은 급속한 기후변화환경에서는 완만한 기후변화환경에 비하여 참다래 궤양병의 피해가 더 증가할 가능성이 있음을 보여준다.

RCP4.5 시나리오에서 2020년대의 미래 참다래 재배 가능지에서 2050년대에 나타나는 참다래 궤양병의 발생 변화는 지역에 따라 상당히 다르게 나타났다(Fig. 2). 월동기 저온 환경이 없다는 가정에서의 참다래 궤양병으로 인한 가지 피해량값(NNF)은 모든 지역에서 증가하였고 월동기 저온으로 인한 참다래 궤양병 피해 증가량값(RNI)은 제주도 해안 지역에서만 10% 안쪽의 변화를 보였으며 다른 지역들에서는 10% 이상 감소하였다. 최대 이병주율(DI)의 변화율은 수도권 지역, 남해안과 동해안 지역 및 제주 내륙 지역에서는 궤양병의 발생이 10% 이상 줄어들 것으로 예측되었고 경상남도 내륙 등의 지역들에서는 10% 안쪽의 발생 변화가 있는 것으로 예측되었으며, 제주도 해안지역에서는 10% 이상 발생이 증가가 나타날 것으로 예측되었다.

RCP8.5 시나리오에서 2020년대의 미래 참다래 재배 가능지에서 2050년대에 나타나는 참다래 궤양병의 발생 변화도 지역에 따라 상당히 다르게 나타났다(Fig. 3). 월동기 저온 환경이 없다는 가정에서의 참다래 궤양병으로 인한 가지 피해량값(NNF)은 거의 모든 지역에서 증가하였고 월동기 저온으로 인한 참다래 궤양병 피해 증가량값(RNI)은 제주도 서쪽 해안 등의 일부지역에서만 10% 안

쪽의 변화를 보였으며 다른 대부분의 지역에서는 10% 이상 감소하였다. 최대이병주율(DI)의 변화율은 남해안과 서쪽 해안을 제외한 제주 지역에서는 궤양병의 발생이 10% 이상 줄어들 것으로 예측되었고 수도권과 동해안 지역, 경상남도 내륙 지역에서는 10% 안쪽의 발생 변화가 있는 것으로 예측되었으며 강원도, 경상도의 일부 내륙 지역과 제주도 서쪽 해안지역에서는 10% 이상 발생이 증가가 나타날 것으로 예측되었다. RCP4.5와 RCP8.5 시나리오에서 모두 월동기 저온 환경이 없다는 가정에서의 참다래 궤양병으로 인한 가지 피해량값(NNF)은 거의 모든 지역에서 10% 이상의 증가가 예측되었는데 이것은 기후변화에 의한 전반적인 온난화가 일어남에 따라서 월동기 저온 환경으로 인한 궤양병 변화요인을 무시한다면 한국에서 전체적으로 참다래 궤양병으로 인한 피해가 증가할 것임을 의미한다.

한편, 기후 변화에 따라서 현재까지 한국의 겨울철 극한 저온 환경이 점차 줄어드는 현상이 전반적으로 나타나고 있으므로(National Institute of Environmental Research, 2015), 모든 지역에서 참다래 궤양병의 격발을 야기하는 저온 환경이 감소하고 이에 따라서 궤양병으로 인한 피해가 줄어들 것이라고 예상되며, 제주도 해안 등 일부 지역들을 제외한 모든 참다래 재배가능지의 월동기 저온으로 인한 참다래 궤양병 피해 증가량값(RNI) 예측 결과도 대부분의 지역에서 10% 이상 감소하였다. 제주 해안 등의 일부 지역에서 월동기 저온으로 인한 참다래 궤양병 피해 증가량값(RNI) 변화가 10% 안쪽의 수준으로 예측된 것은 2020년대가 되면 이들 지역에서 참다래 궤양병 피해에 영향을 주는 수준의 월동기 저온이 거의 나타나지 않을 수준으로 기후 변화가 이미 진행되었기 때문으로 판단된다.

또, RCP6.0과 RCP8.5 시나리오에서의 최대이병주율 변화율의 지역적 분포는 제주도에서는 해안지방은 증가하고 그 안쪽 지역은 감소하는 것으로 예측되는 것과는 반대로 나머지 지역에서는 해안지방은 감소하고 그 안쪽

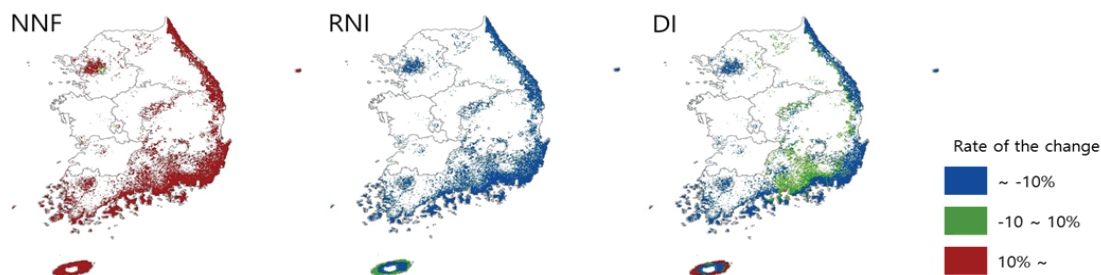


Fig. 2. Changes in the outputs of D-PSA-K from 2020s to 2050s at suitable sites for kiwifruit cultivation in 2020s, which were estimated using RCP4.5 climate change scenarios. NNF, RNI, and DI are estimated damage to kiwifruit canes in a non-frozen environment caused by bacterial canker during the previous growing and overwintering season, estimated rate of necrosis increase caused by the bacterial canker pathogen in a frozen environment during the last overwintering season, and estimated maximum disease incidence of bacterial canker on kiwifruit, respectively.

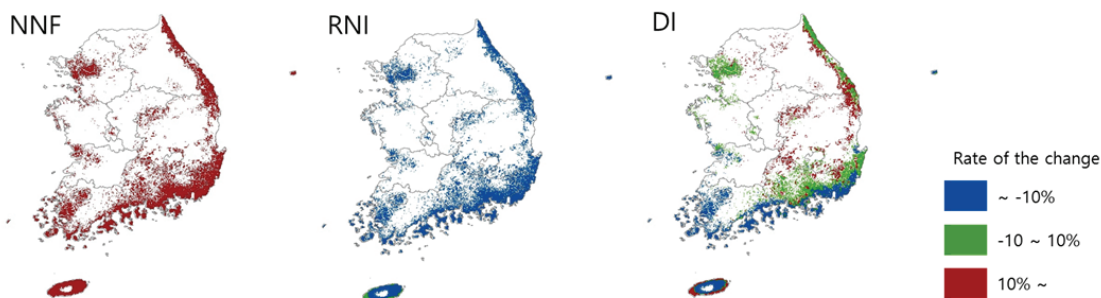


Fig. 3. Changes in the outputs of D-PSA-K from 2020s to 2050s at suitable sites for kiwifruit cultivation in 2020s, which were estimated using RCP8.5 climate change scenarios. NNF, RNI, and DI are estimated damage to kiwifruit canes in a non-frozen environment caused by bacterial canker during the previous growing and overwintering season, estimated rate of necrosis increase caused by the bacterial canker pathogen in a frozen environment during the last overwintering season, and estimated maximum disease incidence of bacterial canker on kiwifruit, respectively.

지역은 변화가 적거나 증가하는 것으로 예측되는 결과도 관찰할 수 있었다(Fig. 2 and 3). 제주도 해안 지역은 우리나라에서 가장 따뜻한 지역이고 제주도 중심인 한라산 쪽으로 갈수록 고도가 높아지고 기온이 낮아져 제주도 안쪽 지역과 남해안 지역은 온도적 환경이 유사할 것이며 그 안쪽의 내륙 지역은 전반적으로 기온이 비교적 낮은 지역이므로 이 결과는 기후 변화에 따라서 현재 비교적 저온 지역에서는 참다래 궤양병 발생으로 인한 피해가 어느 정도는 증가하다가 다시 점차 감소하는 경향을 나타내다가 고온 환경으로 완전히 변하면 병으로 인한 피해가 다시 증가하는 방향성을 가질 것이라고 D-PSA-K 모형이 예측한다는 것을 의미한다. 그러나, D-PSA-K 모형은 35°C 이상의 고온 환경에 대한 고려가 부족한 모형이므로 제주도 해안 지역에 대한 예측 결과의 정확도는 떨어질 것으로 예상된다.

월동기 저온 환경이 없다는 가정에서의 참다래 궤양병으로 인한 가지 피해량값(NNF)은 대부분의 지역에서 10% 이상의 증가가 예측되고 반대로 월동기 저온으로 인한 참다래 궤양병 피해 증가량값(RNI)은 대부분의 지역에서 10% 이하의 감소가 예측되어서 이 두가지 값의 곱의 형태로 예측되는 참다래 궤양병의 최대이병주율의 변화는 어느 쪽의 값의 변화가 더 크가에 따라서 증가 또는 감소가 예측된다. 즉, 10% 이상의 이병주율 증가 변화는 온난화로 인한 온도 상승으로 인한 병 발생 증가의 크기가 기후 변화로 인한 월동기 저온 환경의 감소로 인한 병 발생 감소의 크기보다 상대적으로 큰 것으로, 반대로 10% 이상의 이병주율 감소 변화는 월동기 저온 환경의 감소로 인한 병 발생 감소의 크기가 상대적으로 더 큰 것으로 예측됨을 의미한다.

RCP4.5 시나리오에서 2020년대의 참다래 재배가능

Table 2. Changes in the outputs of D-PSA-K from 2020s to 2050s at suitable sites for kiwifruit cultivation in 2020s, which were estimated using RCP4.5 climate change scenarios

Rate of the change	Land area with the change in the outputs of D-PSA-K (% of total)		
	NNF ¹	RNI ²	Maximum disease incidence
Decrease by 10% or more	0	97.17	70.31
Increase or decrease of less than 10%	0.54	2.83	26.65
Increase by 10% or more	99.46	0	3.14
Total	100	100	100

¹NNF = Estimated damage to kiwifruit canes in a non-frozen environment caused by bacterial canker during the previous growing and overwintering season

²RNI = Estimated rate of necrosis increase caused by the bacterial canker pathogen in a frozen environment during the last overwintering season

Table 3. Changes in the outputs of D-PSA-K from 2020s to 2050s at suitable sites for kiwifruit cultivation in 2020s, which were estimated using RCP8.5 climate change scenarios

Rate of the change	Land area with the change in the outputs of D-PSA-K (% of total)		
	NNF ¹	RNI ²	Maximum disease incidence
Decrease by 10% or more	0	98.62	36.62
Increase or decrease of less than 10%	0	1.37	37.97
Increase by 10% or more	100	0.01	25.41
Total	100	100	100

¹NNF = Estimated damage to kiwifruit canes in a non-frozen environment caused by bacterial canker during the previous growing and overwintering season

²RNI = Estimated rate of necrosis increase caused by the bacterial canker pathogen in a frozen environment during the last overwintering season

지에서 2050년대가 되면 10% 이상 병의 감소가 일어나는 지역은 70.31%, 10% 이내의 병 발생 변화가 일어나는 지역은 26.65%, 10% 이상 병의 증가가 일어나는 지역은 3.14%로 나타났다(Table 2). 이것은 RCP4.5 시나리오와 같은 비교적 완만한 기후 변화 환경에서는 참다래 궤양병으로 인한 피해의 변화가 별로 없거나 피해가 전반적으로 줄어드는 방향으로 변화할 것으로 예측됨을 보여준다. RCP8.5 시나리오에서는 2020년대의 참다래 재배가능지에서 2050년대가 되면 10% 이상 병의 감소가 일어나는 지역은 36.62%, 10% 이내의 병 발생 변화가 일어나는 지역은 37.97%, 10% 이상 병의 증가가 일어나는 지역은 25.41%로 나타났다(Table 3). RCP4.5 시나리오에 비하여 RCP8.5에서 10% 이상의 이병주율 감소율을 보이는 면적율은 약 절반 수준이고 10% 이상의 이병주율 증가율을 보이는 면적율은 약 8배로 많았다. 이것은 RCP8.5 시나리오와 같은 급격한 기후 변화 환경에서는 완만한 기후

변화 환경에서 보다 참다래 궤양병으로 인한 전반적인 피해가 증가할 것으로 예측됨을 보여준다.

결론적으로 기후 변화에 따라서 궤양병의 미래 피해는 병원 세균이 이미 도입되어 병을 충분히 발생시킬 정도로 감염이 존재한다는 가정 아래에서 지역이나 예측에 사용된 시나리오에 따라서 차이는 있지만 2050년대까지 제주도과 남해안 일부 지역을 제외한 대부분의 지역에서 최대 이병주율 75% 이상으로 크게 나타날 것으로 예측되므로 새롭게 참다래 재배를 하는 경우에 비교적 낮은 수준의 최대 이병주율이 예측되는 지역에서 하는 것이 유리할 것이며 높은 최대 이병주율이 예상되는 지역에서는 궤양병 병원 세균의 유입을 막는 경제적 노력을 충분히 하지 않으면 궤양병으로 인한 큰 피해가 예상된다. 한편, 온난화로 인한 궤양병 피해 증가와 겨울철 저온 환경 감소로 인한 궤양병 피해 감소 요인이 모두 존재하여 지역별로 궤양병 피해의 증가 및 감소의 경향이 다르게 나타날 것으로 예

측되지만 완전한 기후 변화 시나리오인 RCP4.5에서는 비교적 급격한 기후 변화 시나리오 RCP8.5에서와는 달리 전반적으로 궤양병으로 인한 피해가 현재에 비해 큰 차이가 없거나 피해가 감소하는 경향을 나타내므로 기후 변화의 속도를 줄이는 노력이 미래 참다래 궤양병의 피해를 줄이는 데에도 기여할 것으로 예측된다.

적 요

RCP4.5와 RCP8.5 미래 기후 변화 시나리오자료와 참다래 궤양병 피해 예측 모형인 D-PSA-K, 미래 참다래 재배적지 지도를 활용하여 궤양병의 미래 피해를 예측하고 참다래 궤양병의 발생 변화의 경향성을 찾아 보았다. 병원 세균에 의한 감염이 충분히 있다는 가정 아래에서 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오의 2020년대와 2050년대에서 궤양병의 최대이병주율은 제주도과 남해안 일부 지역을 제외한 대부분의 지역에서 75% 이상으로 나타날 것으로 예측되었다. 두 시나리오들 모두에서 월동기 저온 환경이 없다는 가정 아래에서의 참다래 궤양병에 의한 가지 피해량은 거의 모든 재배가능지에서 증가될 것으로 예측된 반면에 월동기 저온에 의한 가지 피해량 증가율은 거의 모든 재배가능지에서 감소할 것으로 예측되었다. 지역 및 시나리오별로 궤양병 피해의 증가 및 감소의 경향은 다르게 나타날 것으로 예측되었다. RCP4.5 시나리오에서 2050년대에 2020년대에 비하여 10% 이상 최대 이병주율의 증가가 일어날 것으로 예측된 참다래 재배 가능지는 전체 재배 가능지의 3.14%, RCP8.5 시나리오에서는 25.41%였다.

감사의 글

본 논문은 2015년 농촌진흥청 국립원예특작과학원 박사후연구원 프로그램과 농촌진흥청 시험연구사업(과제번호: PJ009461012015)의 지원으로 이루어졌습니다.

REFERENCES

- Balestra, G. M., A. Mazzaglia, A. Quattrucci, M. Renzi, and A. Rossetti, 2009: Current status of bacterial canker spread on kiwifruit in Italy. *Australasian Plant Disease Notes* **4**, 34-36.
- Balestra, G. M., M. Renzi, and A. Mazzaglia, 2010: First report of bacterial canker of *Actinidia deliciosa* caused by *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* in Portugal. *New Disease Reports* **22**, 10pp.
- Balestra, G. M., M. Renzi, and A. Mazzaglia, 2011: First report of *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* on kiwifruit plants in Spain. *New Disease Reports* **24**, 10pp.
- Bastas, K., and A. Karakaya, 2012: First report of bacterial canker of kiwifruit caused by *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* in Turkey. *Plant Disease* **96**, 452pp.
- Collier, R. H., S. Finch, K. Phelps, and A. R. Thompson, 1991: Possible impact of global warming on cabbage root fly (*Delia radicum*) activity in the UK. *Annals of Applied Biology* **118**, 261-271.
- Do, K. S., B. N. Jung, and J. H. Choa, 2015: A model for estimating the maximum incidence of bacterial canker on kiwifruit canes at early growing season. *The 2015 KSPP Fall Meeting and International Conference, Goeje, Gyeongnam*, The Korean Society of Plant Pathology, 266-267.
- Everett, K. R., R. K. Taylor, M. K. Romberg, J. Rees-George, R. A. Fullerton, J. L. Vanneste, and M. A. Manning, 2011: First report of *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* causing kiwifruit bacterial canker in New Zealand. *Australasian Plant Disease Notes* **6**, 67-71.
- Forister, M. L., and A. M. Shapiro, 2003: Climatic trends and advancing spring flight of butterflies in lowland California. *Global Change Biology* **9**, 1130-1135.
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: *Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.), IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Jung, M. P., H. H. Park, S. G. Lee, and K. H. Kim, 2013a: Prediction of adult emergence time and generation number of overwintered small brown planthopper, *Laodelphax striatellus* according to RCP8.5 climate change scenario. *Korean Journal of Applied Entomology* **52**(4), 427-430.
- Jung, M. P., K. H. Kim, S. G. Lee, and H. H. Park, 2013b: Effect of climate change on the occurrence of overwintered moths of orchards in South Korea. *Environmental Research* **43**(3), 177-182.
- Kiritani, K., 2006: Predicting impacts of global warming on population dynamics and distribution of arthropods in Japan. *Population Ecology* **48**, 5-12.
- Ko, S. J., Y. H. Lee, K. H. Cha, S. D. Lee, and K. C. Kim, 2002: Occurrence of kiwifruit bacterial canker disease and control by cultivation type. *Research in Plant Disease* **8**, 179-183. (in Korean with English abstract)
- Koh, Y. J., 1995: Economically important diseases of

- kiwifruit. *Plant Disease and Agriculture* **1**, 3-13. (in Korean with English abstract)
- Koh, Y. J., B. J. Cha, H. J. Chung, and D. H. Lee, 1994: Outbreak and spread of bacterial canker in kiwifruit. *Korean Journal of Plant Pathology* **10**, 68-72. (in Korean with English abstract)
- Koh, Y. J., G. H. Kim, J. S. Jung, Y. S. Lee, and J. S. Hur, 2010: Outbreak of bacterial canker on Hort16A (*Actinidia chinensis* Planchon) caused by *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* in Korea. *New Zealand Journal of Crop and Horticulture Science* **38**, 275-282.
- Koh, Y. J., G. H. Kim, H. S. Koh, Y. S. Lee, S. C. Kim, and J. S. Jung, 2012: Occurrence of a new type of *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* strain of bacterial canker on kiwifruit in Korea. *The Plant Pathology Journal* **28**, 423-427.
- Lee, J. H., J. H. Kim, K. H. Kim, J. S. Jung, J. S. Hur, and Y. J. Koh, 2005: Comparative analysis of Korean and Japanese strains of *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* causing bacterial canker of kiwifruit. *The Plant Pathology Journal* **21**, 119-126.
- National Institute of Environmental Research, 2015: *Korean climate change assessment report 2014*. National Institute of Environmental Research, 326pp.
- Shin, J. W., and S. C. Yun, 2011: Impact of climate change on fungicide spraying for anthracnose on hot pepper in Korea during 2011-2100. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **13**(1), 10-19.
- Scottichini, M., 1994: Occurrence of *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* on kiwifruit in Italy. *Plant Pathology* **43**, 1035-1038.
- Serizawa, S., Y. Takikawa, T. Ichikawa, and M. Goto, 1989: Occurrence of bacterial canker of kiwifruit in Japan: description of symptoms, isolation of the pathogen and screening of bactericides. *Annals of the Phytopathology Society of Japan* **55**, 427-436.
- Sparks, T. H., and T. J. Yates, 1997: The effect of spring temperature on the appearance dates of British butterflies 1883-1993. *Ecography* **20**, 368-374.
- Stefanescu, C., J. Peñuelas, and I. Filella, 2003: Effects of climatic change on the phenology of butterflies in the northwest Mediterranean Basin. *Global Change Biology* **9**, 1494-1506.
- Sugiura, T., 1999: Prediction of full bloom date of pear using air temperature. *Agriculture and Horticulture* **54**, 146-149.
- Takikawa, Y., S. Serizawa, T. Ichikawa, S. Tsuyumu, and M. Goto, 1989: *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* pv. nov.: the causal bacterium of kiwifruit canker in Japan. *Annals of the Phytopathology Society of Japan* **55**, 437-444.
- Vanneste, J. L., F. Poliakoff, C. Audusseau, D. A. Cornish, S. Pailard, C. Rivoal, and J. Yu, 2011a: First report of *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae*, the causal agent of bacterial canker of kiwifruit in France. *Plant Disease* **95**, 1311pp.
- Vanneste, J. L., J. Yu, D. A. Cornish, S. Max, and G. Clark, 2011b: Presence of *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae*, the causal agent of bacterial canker of kiwifruit, on symptomatic and asymptomatic tissues of kiwifruit. *New Zealand Plant Protection* **64**, 241-245.