신 기후변화시나리오 RCP8.5에 근거한 복숭아 주산지 세 곳의 동해위험도 평가

김수옥^{1*} · 김대준¹ · 김진희¹ · 윤진일²

¹(재)국가농림기상센터, ²경희대학교 생태시스템공학과

(2012년 8월 28일 접수; 2012년 9월 24일 수정; 2012년 9월 24일 수락)

Freeze Risk Assessment for Three Major Peach Growing Areas under the Future Climate Projected by RCP8.5 Emission Scenario

Soo-ock Kim^{1*}, Dae-jun Kim¹, Jin-hee Kim¹ and Jin I. Yun²

¹National Center for Agro-Meteorology, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

²Department of Ecological Engineering, Kyung Hee University, Yongin 446-701, Korea

(Received August 28, 2012; Revised September 24, 2012; Accepted September 24, 2012)

ABSTRACT

This study was carried out to evaluate a possible change in freeze risk for ‘Changhowon Hwangdo’ peach buds in three major peach growing areas under the future climate projected by RCP8.5 emission scenario. Mean values of the monthly temperature data for the present decade (2000s) and the future decades (2020s, 2050s, 2080s) were extracted for farm lands in Icheon, Chungju, and Yeongcheon-Gyeongsan region at 1km resolution and 30 sets of daily temperature data were generated randomly by a stochastic process for each decade. The daily data were used to calculate a thermal time-based dormancy depth index which is closely related to the cold tolerance of peach buds. Combined with daily minimum temperature, dormancy depth can be used to estimate the potential risk of freezing damage on peach buds. When the freeze risk was calculated daily for the winter period (from 1 November to 15 March) in the present decade, Icheon and Chungju regions had high values across the whole period, but Yeongcheon-Gyeongsan regions had low values from mid-December to the end of January. In the future decades, the frequency of freezing damage would be reduced in all 3 regions and the reduction rate could be as high as 75 to 90% by 2080’s. However, the severe class risk (over 80% damage) will not disappear in the future and most occurrences will be limited to December to early January according to the calculation. This phenomenon might be explained by shortened cold hardiness period caused by winter warming as well as sudden cold waves resulting from the higher inter-annual climate variability projected by the RCP8.5 scenario.

Key words: Peach, Freeze risk, Climate change, RCP8.5, Cold hardiness

I. 서 론

온대과수의 내한성(cold tolerance)은 근본적으로 품종에 따라 달라지지만, 같은 품종이라도 환경조건에 따라 일정 범위 내에서는 변동성이 확인되는데, 겨울

철 휴면기간 동안 저온에 의하여 휴면지 조직 내 무기성분과 당 함량의 조성이 달라지면서 시기에 따라 내한성 정도가 다르게 표현된다(Seo *et al.*, 2000). 복숭아(*Prunus persica*)는 장미과(Rosaceae) 자두나무속(*Prunus*)에 속하는 온대 낙엽과수로서 동해한계온도

* Corresponding Author : Soo-ock Kim
(tolee7785@hanmail.net)

가 사과와 $-30 \sim -35^{\circ}\text{C}$, 배 $-25 \sim -30^{\circ}\text{C}$, 포도 $-20 \sim -25^{\circ}\text{C}$ 인 것에 비해 $-15 \sim -20^{\circ}\text{C}$ 로 상대적으로 높아 주산지가 소백산맥 이남의 경북 내륙지방에 머물러 있었다. 하지만 근년의 겨울기온 상승에 따라 복숭아 주산지가 북상하여 1982-2007 통계를 기준으로 강원도의 재배 면적이 2배 정도, 충청북도는 5배 정도 대폭 증가하였다(Cho *et al.*, 2010). 이에 따라 신규 주산지인 강원, 충청지역 과원을 중심으로 동상해 발생이 최근에 자주 보고된다(Seo *et al.*, 2010).

앞으로 기후변화의 지속에 따라 복숭아 재배적지의 북상은 불가피하겠지만, 다른 온대과수에 비해 상대적으로 약한 내한성 때문에 동상해 위험 역시 상존할 것으로 우려된다. 미래 복숭아 재배적지에 대한 지리적인 정보를 얻기 위해 Chung *et al.*(2009a)은 현재 평년(1971-2000)과 IPCC SRES(Special Report on Emission Scenarios) A1B와 A2 시나리오에 근거한 미래기후조건(2011-2040, 2071-2100)에서 남한 전역을 $30 \times 30\text{m}$ 해상도로 분할하여 '장호원황도' 품종의 동해 위험도를 모의하였다. 이들의 동해위험도 산정법은 12월부터 2월까지 2주 간격으로 조사된 1년생 '장호원황도' 휴면지의 처리온도별 동해율에 휴면심도를 반영한 것이다(Chung *et al.*, 2009b; Kim *et al.*, 2009). 이 방법을 2010년 복숭아 동해가 크게 발생한 강원지역에 적용하여 실제 동해발생의 지리적 양상과 통계적 유의성이 있음이 확인된 바 있다(Seo *et al.*, 2010). 미래 기후조건에서 예상되는 매일의 기온과 휴면심도에 근거하여 '장호원황도' 휴면아의 동해위험도를 산정한 결과 일반적인 예상과는 달리 경기 이천과 충북 충주 등 복숭아 신규 재배지역에서 동해위험이 소폭 증가할 것으로 전망되었다. 그러나 이 결과는 평년의 일별 기온자료에 근거하였으므로 기온의 연차변이를 반영하지는 못하였다. 이를 보완하기 위한 방법으로서 Kim *et al.*(2012)은 평년을 대표하는 월별 평균값 대신 날씨생성기(weather generator)의 확률추정기법을 이용하여 일별자료로 변환하여 휴면-발아-개화로 이어지는 생물계절의 변이를 모의할 경우 실제 관측된 30년 기온자료에 근거한 계산결과와 유사하므로 일 기온 자료를 대체할 수 있다고 제안하였다.

IPCC에서는 지금까지 온실기체 배출시나리오로 사용되어 온 SRES 대신 인간활동이 대기에 미치는 복사량으로 온실가스 농도를 정하는 대표농도경로(Representative Concentration Pathway, RCP)를 5차

보고서 작성을 위한 표준으로 채택하였다. RCP8.5는 특별한 감축노력 없이 현재 추세대로 온실기체가 배출되는 경우로서 SRES A2~A1F1에 비견되는데, 2100년의 예상 이산화탄소 농도는 940ppm, 30년(1971-2000) 기준기간 대비 미래 30년(2070-2100)의 지구평균 기온상승 4.8°C , 강수량 증가 6%, 해수면 상승 90cm로 전망한다. 국립기상연구소는 RCP 시나리오에 기초하여 전구 대기-해양-해빙-수문-에어로졸 결합모델인 HadGEM2-AO(Atmosphere-Ocean version of the Hadley Centre Global Environment Model version 2)로 약 135km 해상도의 전구 기후변화 시나리오를 산출한 다음, 이를 이용하여 지역기후모델 HadGEM3-RA(Atmospheric Regional climate model of Hadley Centre Global Environment Model version 3)로 한반도 지역의 기후변화 시나리오를 12.5km 해상도로 산출하였다(국립기상연구소, 2011). 남한 지역에 대해서는 여기에 고도, 거리, 지향면(topographic facet), 해양도(coastal proximity)의 영향을 고려하는 통계적 상세화 기법(PRIDE, PRISM based downscaling estimation model)을 적용하여 1km 해상도의 상세 기후변화 시나리오를 산출하였다(www.climate.go.kr).

본 연구에서는 RCP8.5에 근거한 남한 1km 해상도 월별 기온전망자료로부터 복숭아 주산지 세 곳의 2020년대, 2050년대, 2080년대 기온요약자료를 추출하고, 이를 근거로 예상되는 일별 기온을 확률추정기법에 의해 복원함으로써 연차변이가 반영된 기온 입력자료를 준비하였다. 이 자료를 이용하여 동해위험도 예측모형을 구동함으로써 미래 시점의 11월부터 이듬해 3월 중순까지 '장호원황도'의 동해위험도 및 관련변수를 계산하고 신 기후변화 시나리오에 따른 복숭아 주산지의 동해위험을 평가하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 동해위험지수

Kim *et al.*(2009)이 제시한 '장호원황도' 동해위험지수는 1년생 가지의 눈 중에 피해를 입을 수 있는 눈의 수를 비율(%)로 표현한다. 이 모델은 매일의 최고기온과 최저기온을 바탕으로 품종모수(기준온도 5.7°C , 저온요구도 -108)에 따라 (-)값을 갖는 chill day를 누적, 휴면심도를 정량화하여 휴면이 깊을수록 눈의 내한성이 강해지는 특성을 반영한다. 또한 내생

휴면해제 이후 기준온도 이상의 기온으로 인한 휴면타파를 anti-chill day의 저온요구도 차감을 통해 표현한다(Cesaraccio *et al.*, 2004). Kim *et al.*(2009)은 휴면심도에 근거한 ‘장호원황도’의 내한성을 D_{cd} 로 표현하고(식 1), 최저기온-휴면심도 조합에 따라 위험지수를 근사적으로 나타내었다(식 2, 3).

$$D_{cd} = C \cdot (|C_d| - 108)^2 + D \quad (1)$$

$$Risk(\%) = \frac{100}{1 + A \cdot e^{(X + T_{min}) \cdot D_{cd}}} \quad (2)$$

$$Risk(\%) = A \cdot e^{-T_{min} \cdot D_{cd}} \quad (3)$$

여기서 식 2는 갈변율을, 식 3은 발아장애율을 나타내며 최종 동해위험지수는 갈변과 발아장애의 각각 40%와 60%를 반영한다. T_{min} 은 당일의 최저기온, A 와 X 는 곡선의 형태계수이고, C 와 D 는 휴면심도에 의해 결정되는 상수이며, C_d 는 전날까지 누적된 chill

day값을 의미한다.

2.2. 대상지역

Fig. 1은 2010년에 통계청(www.kosis.kr)에서 행정구역 단위로 조사된 복숭아 재배면적 분포를 나타낸 것으로 경북지역의 경산, 영천 및 중부지역의 이천, 음성, 충주시가 복숭아 재배면적 상위 5곳에 해당한다. 복숭아 동해위험평가의 대상지역을 선정하는 과정에서, 군과 같은 행정단위를 기준으로 삼을 경우 부자연스러운 지역 구분이 이루어진다. 이를테면 복숭아로 유명한 경기 이천시 장호원읍과 충북 음성군 감곡면 사이의 행정경계는 주산지 판단에 불필요하다. 때문에 지형적으로 구분되는 분수계(watershed)를 기준으로 하되, 표준유역은 좁은 면적에 국한되므로, 국가수자원관리종합정보시스템(www.wamis.go.kr)에서 제시하는 중권역 단위로 주산지를 선정하였다. 최종 분석 대상지는 이천시를 포함하는 A지역(남한강하류), 충주시와 괴산군에 해당하는 B지역(충주댐하류, 달천), 경북 경산시와 영천시 일대의 C지역(금호강)이다(Fig. 1). B는 대상지역 간의 면적차이를 줄이기 위해 두 중권역을 하나로 통합하였다.

2.3. 기상자료

새로운 기후변화 시나리오(RCP8.5)에 대하여 복숭아 ‘장호원황도’의 동해위험도를 평가하기 위한 일간격의 기온자료를 다음과 같은 과정에 따라 생성하였다. 기상청 기후변화정보센터로부터 1km 격자의 10년단위 평균 월별 자료를 제공받은 다음, 농경지 해당 격자값만을 발췌하였다. 농경지가 아닌 곳은 no data로 처리한 미래 시나리오자료로부터 대상지역 A, B, C 각각을 대표하는 2020년대와 2050년대, 2080년대의 공간평균 월별 기온, 강수 값을 추출하였다. 이것을 입력자료로 하여 확률추정프로그램 ‘Weather Man’(Pickering *et al.*, 1994)에 의해 3배수의 일별 자료, 즉 가상의 30년치 일 최저, 최고기온으로 변환하였다. 기준연도 기상자료를 얻기 위해 1km 격자의 2000년대 일 최고, 최저기온의 월별 평균값 분포도에서 A, B, C 지역의 일별 자료를 생성하였다. 10년 단위 각 30년치의 일별자료는 실제 31년치 생성 결과물에서 첫 번째 년도의 10월 1일부터 마지막 년도의 누적 chill day가 모두 상쇄되는 날짜까지 활용되었다.

Fig. 1. An ‘Acreage by County’ map for peach production with the synoptic weather station (Korea Meteorological Administration, KMA) locations in South Korea. Three basins containing largest acreage counties are shown and represented by letter A, B, and C.

2.4. 동해위험도 계산

각 지역별로 생성된 10년 단위 일별 기상자료를 복숭아 ‘장호원황도’의 동해위험지수 모형에 입력하여 순차적으로 30회씩 구동하였다. 10월 1일부터 매일의 휴면심도를 계산하고 다음날의 최저기온에 의한 동해위험도를 예측하였다. 2000년대와 RCP8.5 조건의 2020, 2050, 2080년대에 대하여 각각 11월 1일부터 3월 15일까지의 30세트(4,050일)에서의 동해위험도 발생일을 발췌, 복숭아 동해위험평가에 활용하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 확률추정 일별자료

Table 1은 이천, 충주, 영천 지역 기상관서에서 관측된 일 최저기온의 극값을 5위까지 나타낸 것으로 이천과 충주지역은 -26 ~ -28.5°C, 영천지역은 -20.5°C 까지 기록되었다. 확률추정기법을 통해 복원된 30세트의 일별 최저기온에서 연 최저기온만을 뽑아보면, 이천 지역을 포함하는 A는 2000년대에 -17 ~ -29°C, 2050년대가 되면 -14 ~ -23°C, 2080년대에는 -13 ~ -22°C 사이의 값이 산출되었고, 충주를 포함하는 B지역은 2000년대 -22 ~ -34°C, 2050년대 -13 ~ -24°C, 2080년대 -13 ~ -22°C 정도로 모의되었다. 경산, 영천 지역인 C의 경우 2000년대에서 2050, 2080년대로 갈수록 각각 -16 ~ -25°C, -9 ~ -21°C, -6 ~ -19°C 정도로, 평균기온 상승에 따라 연 최저기온이 상승하였다(Table 2). 기상관서의 관측 값은 관측소가 위치한 지점에서 표준화된 관측노장의 기온으로, 지형적으로 다양한 실제 농업지역과는 차이가 있고 산간 계곡지형 일수록 기온은 더 낮아질 수 있다. 2010년 이후로 충주, 이천 기상관서에서 1~2월 최저기온이 -19.3 ~ -22.8°C까지, 영천의 경우 -13 ~ -15°C까지 관측되었던 것을 볼 때, 가상의 일 기온으로도 최근 몇 년간과

비슷한 수준의 최저기온이 미래에 발생하는 경우에 대한 복숭아 동해위험 모의도 가능할 것으로 보인다.

3.2. 복숭아 주산지 동해위험도

각 복숭아 주산지의 10년 단위 기후조건 별로 직전연도 11월 1일부터 이듬해 3월 15일까지 30세트에 대하여 매일의 동해위험도를 모의한 4,050일의 경우의 수에서 ‘장호원황도’의 휴면이 동해를 입을 수 있는 날을 계수하여 동해 발생율을 계산하였다(Table 3). 2000년대는 주산지 A와 B, C지역에서 각각 31.3, 40.0, 22.3%의 동해 발생 가능성을 보였으나 미래로 갈수록 모두 동해의 발생 빈도가 줄어들어 2080년대에 이르러서는 현재에 비해 1/4에서 크게는 1/10가량에 불과할 것으로 나타났다. 모의된 동해위험도는 일 기온자료만으로 추정된 것으로, 농가의 적절한 과원 관리를 통해 어느 정도의 동해는 방지되거나 개화와 결실에 영향을 주지 않을 수 있는 반면, 1년 중 단 1회의 한파로도 과수원에 큰 피해를 입힐 수 있다. 따라서 동해 발생율보다는 동해위험도가 높은 시기를 파악하는 것이 중요하다.

Fig. 2는 11월부터 3월 15일까지 총 4,050일 중 동해가 발생할 것으로 모의된 모든 날의 동해율을 나타낸 것이다. A지역의 경우, 2000년대(검정색)에는 11월 중순부터 3월 중순까지 50% 이상의 동해가 나타날 수 있을 것으로 보인다. 이후 2050년대(파란색)가 되면 12월 중순부터 1월 동안의 동해위험이 다소 감소하고, 2080년대(붉은색)에는 11월 동안 동해가 나타나지 않다가 12월에 집중적으로 발생한 뒤 12월 이후로는 피해율이 급격히 감소한다. B지역은 A지역과 비슷한 경향을 나타내고 있으나, 2~3월의 동해율이 상대적으로 낮을 것으로 추정된다. 경북 영천, 경산시에 해당하는 C지역은 현재 12월 중순부터 1월까지의 심각한 동해의 발생 가능성은 낮으나 초겨울과 이른 봄에 동해위험이 두드러지는 것으로 모의된다. 2050년대

Table 1. Lowest minimum temperatures recorded at weather stations in Icheon (A), Chungju (B) and Yeongcheon-Gyeongsan (C)

A		B		C	
Date	Temp.	Date	Temp.	Date	Temp.
1981.01.05	-26.5	1981.01.05	-28.5	1981.01.17	-20.5
1981.01.04	-26.0	1981.01.06	-27.9	1993.01.21	-18.0
1981.01.06	-25.8	1981.01.04	-27.9	1974.01.26	-17.6
1973.12.25	-25.7	1974.01.25	-26.2	1981.01.27	-17.3
1981.01.27	-23.4	1984.01.05	-26.0	1974.01.25	-17.0

Table 2. Lowest minimum temperatures predicted for the 3 major basins by a stochastic process for thirty years under the RCP8.5 scenario (A: Icheon, B: Chungju, C: Yeongcheon-Gyeongsan)

Decade Set	Lowest minimum temperatures (°C)											
	A				B				C			
	2000s	2020s	2050s	2080s	2000s	2020s	2050s	2080s	2000s	2020s	2050s	2080s
0	-25.8	-21.9	-18.7	-13.3	-25.6	-23.9	-23.9	-15.2	-20.3	-16.1	-13.7	-16.6
1	-28.9	-25.4	-18.6	-18.6	-25.4	-20.9	-16.1	-18.2	-18.1	-21.5	-12.7	-11.8
2	-25.8	-23.0	-19.0	-14.3	-24.4	-23.0	-15.8	-17.7	-19.3	-23.2	-15.9	-13.6
3	-20.2	-20.5	-22.7	-14.5	-28.7	-19.3	-17.9	-12.7	-19.3	-14.5	-13.6	-10.9
4	-22.6	-23.8	-21.1	-13.8	-29.6	-21.3	-16.4	-18.3	-17.7	-14.5	-9.8	-14.5
5	-21.6	-23.7	-21.0	-19.9	-27.9	-22.0	-12.5	-18.0	-17.7	-15.6	-18.0	-16.5
6	-24.1	-17.3	-14.8	-15.8	-30.1	-26.6	-17.5	-17.7	-14.5	-24.6	-14.6	-8.3
7	-24.6	-23.7	-17.4	-20.2	-24.9	-24.3	-17.6	-18.2	-21.9	-16.7	-10.7	-12.9
8	-24.6	-22.6	-20.0	-17.6	-27.6	-18.9	-13.7	-17.6	-19.7	-17.9	-12.2	-13.3
9	-27.3	-18.1	-16.0	-20.3	-28.5	-20.7	-17.0	-15.7	-19.4	-19.4	-11.7	-12.9
10	-20.9	-25.8	-16.6	-16.3	-24.3	-23.1	-17.4	-15.1	-19.1	-16.3	-15.4	-13.2
11	-22.0	-25.6	-16.8	-22.0	-33.9	-20.7	-22.2	-12.6	-17.7	-13.1	-19.9	-10.0
12	-24.9	-20.1	-13.6	-16.7	-21.6	-28.7	-20.9	-18.8	-19.4	-18.1	-18.4	-16.4
13	-24.8	-20.9	-13.9	-15.7	-28.0	-22.5	-16.6	-15.2	-18.3	-17.0	-13.5	-19.1
14	-20.7	-20.2	-18.3	-18.7	-30.7	-22.1	-17.8	-18.5	-20.5	-16.1	-8.5	-14.3
15	-20.7	-18.9	-16.5	-13.6	-25.0	-24.3	-14.6	-17.3	-16.9	-16.0	-15.1	-11.5
16	-28.7	-23.2	-16.7	-14.9	-28.0	-22.9	-18.5	-17.4	-22.1	-16.9	-10.8	-13.6
17	-25.3	-23.0	-20.0	-15.0	-24.3	-22.7	-18.9	-14.4	-21.7	-14.6	-14.8	-9.3
18	-21.4	-26.2	-19.7	-16.4	-25.7	-21.8	-17.7	-14.4	-22.2	-17.4	-13.3	-11.2
19	-22.9	-23.2	-17.8	-12.6	-23.9	-22.7	-23.4	-22.1	-20.2	-15.2	-21.1	-16.4
20	-27.0	-22.0	-15.5	-18.9	-31.0	-22.6	-17.6	-14.6	-19.4	-20.1	-10.9	-10.5
21	-19.9	-22.5	-20.4	-19.3	-32.5	-29.4	-18.2	-17.6	-23.5	-19.7	-15.5	-14.7
22	-26.7	-25.3	-18.9	-14.0	-22.9	-18.7	-15.9	-15.0	-19.8	-24.0	-16.8	-15.0
23	-27.0	-19.5	-21.9	-20.4	-23.5	-21.7	-14.7	-16.7	-17.9	-22.1	-12.3	-12.1
24	-21.3	-22.7	-13.5	-15.3	-27.0	-26.3	-16.0	-17.8	-21.3	-18.7	-15.8	-11.4
25	-23.9	-24.9	-19.8	-16.5	-31.6	-24.5	-21.7	-15.7	-23.1	-22.2	-14.6	-13.8
26	-16.5	-15.5	-17.6	-16.7	-24.4	-17.8	-19.5	-20.9	-20.3	-16.8	-11.1	-10.6
27	-21.4	-16.7	-20.6	-16.6	-29.0	-24.8	-18.1	-18.8	-21.4	-17.8	-18.6	-10.5
28	-28.4	-20.9	-20.7	-14.9	-29.7	-20.0	-13.6	-17.6	-19.7	-19.8	-15.5	-10.6
29	-22.7	-16.9	-19.7	-17.4	-31.0	-21.9	-16.1	-15.3	-20.2	-17.2	-20.9	-10.7
30	-24.0	-27.0	-17.2	-20.0	-34.0	-25.2	-15.4	-15.9	-24.6	-17.7	-10.6	-6.0
Mean	-23.8	-22.0	-18.2	-16.8	-27.6	-22.8	-17.5	-16.8	-19.9	-18.1	-14.4	-12.7
S. D.	3.0	3.0	2.4	2.5	3.3	2.7	2.7	2.1	2.1	2.9	3.3	2.8
January*	-10.3	-8.6	-5.8	-4.3	-12.5	-8.7	-6.0	-4.7	-7.5	-4.8	-2.5	-1.5

*The average of minimum temperature in January on farm land in 2000s and the future under the RCP8.5 scenario.

가 되면 1월 이후의 동해위험도가 크게 감소하고 피해는 주로 12월에 국한될 것으로 보이며, 2080년대에 이르러서는 12월 중순부터 1월 중순경까지 동해위험이 있다. 전반적으로 모든 지역에서 미래에 동해 발생 시기가 늦춰지는 경향이 보이며, 2080년대에도 12월 중순~1월 초 동안 동해율이 100%가까이 발생하는 경우

도 일어날 수 있을 것으로 보인다.

Fig. 3은 2000년대와 2080년대에 대하여 11월부터 3월 중순까지 30년치의 휴면심도(chill day 누적값)를 비교한 것이다. A와 B, C지역 모두, 2000년대에는 12월 중순이면 누적 chill day가 -60까지 채워지고 -100미만이 되는 경우도 발생할 수 있는데, 이러한 시

Table 3. Frequency of simulated freezing events in ‘Changhowon Hwangdo’ peach buds during the overwintering period (1 November to 15 March) for the current decade (2000s) and the future decades (2020s, 2050s and 2080s) projected by the RCP8.5 climate change scenario in 3 major peach production areas (A: Icheon, B: Chungju, C: Yeongcheon-Gyeongsan)

Decade	Rate of freezing events (%)		
	A	B	C
2000s	31.3	40.0	22.3
2020s	20.8	23.3	7.6
2050s	12.1	13.3	3.7
2080s	8.5	8.0	2.5

점이 2080년대에는 1월 중순으로 밀려나게 되는 반면, 휴면타파(anti-chill day의 적산)는 2월 동안 일제히 시작된다. 동해위험도는 휴면심도와 밀접한 관계가 있으므로, chill day 충족 시기의 지연이 동해 위험 시기를 변화시키는데 일조하는 것으로 보인다. 복숭아의 휴면심도가 깊은 소위 내동성 유지 조건을 chill day 누적값 -100 미만으로 가정한다면, 현재 A지역에 대한 내동성 유지기간은 평균 21일, B는 평균 27일, C는 평균 21일이지만 2080년대에 이르면 A와 B, C 각각 14일, 13일, 10일 정도로 감소할 것으로 추정된다(Table 4). 내동성 유지기간이 1월 말~2월 초에 불과할 경우, 한파에 취약한 시기가 확장되어 기상이변에 의한 잠재적 동해위험도는 높아질 것이다.

실제 농가에서는 한 과원에 여러 품종의 복숭아를 식재하여 6월 하순부터 9월 하순까지 연속적인 수확이 가능하도록 하므로, ‘장호원황도’와 타 품종의 상대적인 내한성 차이를 고려하여야 할 것이다. 지역적으로는 저지대나 냉기가 정체되는 지역에서 복숭아 과원 피해가 발생하므로(농촌진흥청, 2011), 현재와 미래기후 조건에 대한 국지적인 동해위험 분포변화를 모색할 필요가 있다.

미래기후(RCP8.5) 조건에서 평균기온이 상승함에 따라 동해가 발생하는 경우의 수는 점차 감소하게 된다. 그러나 과수원은 한파가 발생한 하룻밤에 피해를 입게 되므로, 앞으로 복숭아 주산지의 동해 위험 시기를 주목할 필요가 있으며, 복숭아 동해가 80~100%까지 크게 나타나는 고위험 시기에는 과원의 특별한 관리 대책이 필요할 것으로 보인다. 주요 생산지의 현재 및 미래의 동해 취약시기를 구분, 대비하고 사전 경보시스템을 구축하여 피해 경감을 모색할 필요가 있다. 일례로 Moon *et al.*(2011)이 구축한 복숭아 동해 예측

Fig. 2. Temporal change in freeze risk of ‘Changhowon Hwangdo’ peach buds predicted by stochastically generated daily temperature data for the future climate under the RCP8.5 scenario in 3 major peach production basins (A: Icheon, B: Chungju, C: Yeongcheon-Gyeongsan). Black, blue, and red asterisks mean the freeze risk in 2000s, 2050s and 2080s respectively.

서비스는 Service Oriented Architecture(SOA) 기반의 데이터 통합 프레임워크를 통해 복숭아 재배지역의

Table 4. Duration of the maximum cold tolerance of ‘Changhowon Hwangdo’ peach buds (accumulated chill days < -100) predicted under the RCP8.5 climate change scenario in 3 major peach production areas (A: Icheon, B: Chungju, C: Yeongcheon-Gyeongsan).

Decade	Duration of the maximum cold tolerance (day)					
	A		B		C	
	mean	s.d.	mean	s.d.	mean	s.d.
2000s	21.0	10.3	27.0	14.9	21.1	9.3
2020s	18.1	9.4	23.4	11.7	16.5	8.2
2050s	17.9	7.4	16.8	7.9	11.1	3.8
2080s	13.8	6.2	13.2	4.4	10.3	3.3

지형적 특성 및 환경조건 정보를 활용하여 실제 동해 유무를 결정하는 최적 의사결정 트리 알고리즘을 생성, 타 지역의 동해 예측에도 쉽게 확장할 수 있다. 과수 동상해 평가 모델에 기상이변에 대한 예측 시스템을 결합하고, 이와 더불어 빠른 사전 대비가 가능한 위험관리 기반시설이 확충되어야 할 것이다.

적 요

본 연구에서는 ‘장호원황도’ 복숭아의 휴면아 동해위

Fig. 3. Time course changes in dormancy depth of ‘Changhowon Hwangdo’ peach buds in 3 major production basins (A: Icheon, B: Chungju, C: Yeongcheon-Gyeongsan) for the present decade (2000s) and for the future decade (2080s).

험지수를 이용하여 새로운 기후변화 시나리오(RCP8.5) 조건에서 복숭아 주산지 3곳의 동해위험 변화를 전망하였다. 경기 이천시 주변(A)과 충북 충주시 일대(B), 경북 영천과 경산시 지역(C) 등 3곳의 복숭아 주산지에 대해 1km 격자의 월별 미래 수치기후도로부터 농경지에 해당하는 격자점의 공간평균값을 추출하고, 이로부터 확률추정기법에 의해 10년 간격으로 30세트씩 일별 기상자료를 생성하였다. 이들 기온자료를 동해위험도 예측모형에 입력하여 2000년대, 2020년대, 2050년대 및 2080년대의 월동기간(11월 1일~3월 15일) 일별 휴면심도 및 동해위험도를 계산하였다. 계산결과에 따르면 현재(2000년대)의 경우 A와 B지역은 월동기간 내내 동해위험도가 높지만 C지역은 12월 중순에서 1월까지의 상대적 위험도가 낮은 것으로 평가되었다. 미래로 갈수록 3개 주산지 모두에서 동해 발생빈도가 줄어들어 2080년대에 이르러서는 현재에 비해 1/4~1/10에 불과할 것으로 예상되었다. 반면 위험도가 80% 이상으로 '심각한' 수준의 동해는 사라지지 않고 미래에도 발생할 것으로 예상되었으며, 발생시키는 전 기간에 걸쳐 발생하는 현재에 비해 미래에는 12월~1월 초순으로 제한될 것으로 전망되었다. 이러한 전망에 대한 가장 유력한 근거는 생리적 내동성 유지기간(최대 휴면심도 지속시간)의 단축이므로 전반적인 온난화 추세에도 불구하고 기후 연차변이 증폭이 예상되는 미래에는 극한기후로 인한 심각한 동해위험이 복숭아 주산지 3곳에서 여전히 높을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ907129)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

- Cesaraccio, C., D. Spano, R. L. Snyder, and P. Duce, 2004: Chilling and forcing model to predict bud-burst of crop and forest species. *Agricultural and Forest Meteorology* **126**, 1-13.
- Cho, J. G., S. H. Kim, I. M. Choi, S. K. Yun, J. H. Han, and P. K. Oh, 2010: Changes pattern of peach cultivation areas for various location of Korea using statistical data. *Korean Journal of Horticultural Science and Technology* **28**(S1), 120-120.
- Chung, U., J. H. Kim, S. O. Kim, M. H. Choi, K. H. Hwang, and J. I. Yun, 2009a: Geospatial assessment of frost and freeze risk in 'Changhowon Hwangdo' peach (*Prunus persica*) trees as affected by the projected winter warming in South Korea I. Determination of freezing temperatures. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **11**, 206-212. (In Korean with English abstract)
- Chung, U., J. H. Kim, S. O. Kim, H. C. Seo, and J. I. Yun, 2009b: Geospatial assessment of frost and freeze risk in 'Changhowon Hwangdo' peach (*Prunus persica*) trees as affected by the projected winter warming in South Korea III. Identifying freeze risk zones in the future using high-definition climate scenarios. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **11**, 221-232. (In Korean with English abstract)
- Kim, J. H., S. O. Kim, U. Chung, J. I. Yun, K. H. Hwang, J. B. Kim, and I. K. Yoon, 2009: Geospatial assessment of frost and freeze risk in 'Changhowon Hwangdo' peach (*Prunus persica*) trees as affected by the projected winter warming in South Korea II. Freezing risk index based on dormancy depth as a proxy for physiological tolerance to freezing temperature. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **11**, 213-220. (In Korean with English abstract)
- Kim, D. J., U. Chung, and J. I. Yun, 2012: Feasibility of stochastic weather data as an input to plant phenology models. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **14**, 11-18. (In Korean with English abstract)
- Moon, I. H., H. Hur, and S. K. Kim, 2011: A design of SOA-based data integration framework for effective spatial data mining. *Korean Journal of Information Processing* **18**(5), 385-392. (In Korean with English abstract)
- Pickering, N. B., J. W. Hansen, J. W. Jones, C. M. Wells, V. K. Chan, and D. C. Godwin, 1994: WeatherMan: A utility for managing and generating daily weather data. *Agronomy Journal* **86**, 332-337.
- Seo, J. H., and S. T. Cheong, and S. L. Shin, 2000: Evaluation of cold tolerance in dormant stem tissues of 'Yumyeong' peach. *Korean Journal of Horticultural Science and Technology* **18**(5), 706-706.
- Seo, Y. H., Y. S. Park, B. O. Cho, A. S. Kang, B. C. Jeong, and Y. S. Jung, 2010: Regional distribution of peach freezing damage and chilling days in 2010 in Gangwon province. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **12**, 225-231. (In Korean with English abstract) DOI: 10.5532/KJAFM.2010.12.4.225
- 국립기상연구소, 2011: IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 기후변화 시나리오 보고서 2011, 국립기상연구소. 117pp.
- 농촌진흥청, 2011: 2010 과수 이상기상 대응 백서. 농촌진흥청 국립원예특작과학원, 327pp.
- <http://www.climate.go.kr> (2012.6.1)
- <http://www.kosis.kr> (2012.3.7)
- <http://www.wamis.go.kr> (2012.6.12)