

기후변화에 따른 국내 키위 품종 ‘해금’의 개화시기 변동과 전망에 대한 불확실성: 전남 키위 주산지역을 중심으로

김광형¹ · 정여민¹ · 조윤섭² · 정유란^{1*}

¹APEC 기후센터, ²전남농업기술원 과수연구소

(2016년 3월 9일 접수; 2016년 3월 25일 수정; 2016년 3월 26일 수락)

Preliminary Result of Uncertainty on Variation of Flowering Date of Kiwifruit: Case Study of Kiwifruit Growing Area of Jeonlanam-do

Kwang-Hyung Kim¹, Yeo Min Jeong¹, Youn-Sup Cho² and Uran Chung^{1*}

¹Climate Change Research Department, APEC Climate Center, Busan 612-020, Korea

²Fruit Research Institute, Jeollanam-do Agricultural Research & Extension Services, Wando 537-807, Korea

(Received March 9, 2016; Revised March 25, 2016; Accepted March 26, 2016)

ABSTRACT

It is highly anticipated that warming temperature resulting from global climate change will affect the phenological pattern of kiwifruit, which has been commercially grown in Korea since the early 1980s. Here, we present the potential impacts of climate change on the variations of flowering date of a gold kiwifruit cultivar, Haegueum, in the Jeonnam Province, Korea. By running six global climate models (GCM), the results from this study emphasize the uncertainty in climate change scenarios. To predict the flowering day of kiwifruit, we obtained three parameters of the ‘Chill-day’ model for the simulation of Haegueum: 6.3°C for the base temperature (T_b), 102.5 for chill requirement (R_c), and 575 for heat requirement (R_h). Two separate validations of the resulting ‘Chill-day’ model were conducted. First, direct comparisons were made between the observed flowering days collected from 25 kiwifruit orchards for two years (2014-15) and the simulated flowering days from the ‘Chill-day’ model using weather data from four weather stations near the 25 orchards. The estimation error between the observed and simulated flowering days was 5.2 days. Second, the model was simulated using temperature data extracted, for the 25 orchards, from a high-resolution digital temperature map, resulting in the error of 3.4 days. Using the RCP 4.5 and 8.5 climate change scenarios from six GCMs for the period of 2021-40, the future flowering days were simulated with the ‘Chill-day’ model. The predicted flowering days of Haegueum in Jeonnam were advanced more than 10 days compared to the present ones from multi-model ensemble, while some individual models resulted in quite different magnitudes of impacts, indicating the multi-model ensemble accounts for uncertainty better than individual climate models. In addition, the current flowering period of Haegueum in Jeonnam Province was predicted to expand northward, reaching over Jeonbuk and Chungnam Provinces. This preliminary result will provide a basis for the local impact assessment of climate change as more phenology models are developed for other fruit trees.

Key words: Phenology, Kiwifruit, Variation, Uncertainty, Climate change



* Corresponding Author : Uran Chung
(uchung@apcc21.org)

I. 서 언

국내 키위 재배면적은 약 13,000 ha로, 최근 기후변화로 인한 온난화와 소비자의 기호도 상승으로 인해 제주도에서 경남 일부, 전남 동부지역까지 키위 재배 면적 및 생산량이 점차 확대 증가되고 있다(Belrose Inc., 2013). 국내에서 재배되고 있는 대표 품종인 그린키위 헤이워드(Hayward, *Actinidia deliciosa*)는 1977년 농촌진흥청 원예시험장에서 국내 재배 가능성을 검토하고자 처음 도입되었으며(김 등, 2013), 1980년 초부터 농가에서 상업적으로 재배하기 시작하였다. 최근 농가에서는 그린키위 이외에 제스프리골드, 해금(Haegeum, *A. chinensis Planchon*)과 같이 황색 과육을 가진 골드키위, 그리고 중국에서 육성된 적색 과육을 가진 홍양이라는 레드키위 등이 재배되고 있다. 이 중에서 해금은 국내에서 육성된 골드키위로 최근 재배면적이 증가하고 있다. 국내 키위 재배역사는 짧고 외국에서 도입된 난지과수인 망고 다른 온대과수(예, 사과, 배 등)에 비해 기상재해(예, 동해, 습해, 상해, 풍해)와 같은 환경 저해요인에 대한 정보가 부족할 뿐만 아니라, 귀양병, 꽃썩음병, 과실무름병 등과 같은 병해와 각종 해충 등에 의한 충해에 취약한 것으로 알려져 있다. 또한, 키위는 암수 그루가 달라 개화시기에 필요한 인공수정과 같은 재배기술과 영농정보 등이 필요하다. 특히, 돌발 해충이나 꽃썩음병 방제를 위해서는 키위의 개화시기 정보가 필수적으로 요구된다. 따라서 정확한 개화시기 정보는 이러한 병해충에 대한 효과적 방제나 그 피해를 경감하기 위한 조치를 취하는 데 도움이 될 수 있다.

개화시기는 과수의 성장발육 관찰을 통해 예측할 수 있는데, 개화시기를 예측하는 방법에는 장기간 수집된 기후요소와 과수의 생육시기와의 상관관계를 활용하여 통계적으로 개화시기를 예측하는 통계적인 방법(예, 다중회귀)과 생육기간 내에 생육단계별 발육속도를 기온의 함수로 개화일을 예측하는 방법(예, 발육속도모형), 온대과수의 낙엽을 시작으로 과수의 휴면과 휴면해제 후 발육속도에 따른 적산과정으로 구분하여 개화일을 예측하는 방법(예, 휴면시계모형) 등이 개발되어 활용되어 왔다(Chuine, 2000; Cesaraccio *et al.*, 2004; Kwon *et al.*, 2008; Zapata *et al.*, 2015). 통계분석에 의해 만들어진 회귀식은 이용하기 쉽다는 장점이 있지만 과거에 관측되지 않았던 기후변화에 대한 반응을 반영하지 못한다는 한계가 있다. 이에 반해

발육속도모형과 휴면시계모형과 같은 생물계절모형은 온대과수의 생육시기를 단계별(예, 휴면, 휴면해제, 발아, 개화 등)로 구분하여 개화까지 도달하기 위한 과수의 온도 반응이 비교적 자세하게 표현되어 있다. 국내에서도 포도(Kwon *et al.*, 2005; Jung *et al.*, 2006), 배(Han *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2009a), 사과(Seo, 2003; Kim *et al.*, 2009b), 복숭아(Kim, 2010; Yun *et al.*, 2012), 키위(Kwon *et al.*, 2012) 등과 같은 온대 및 난지과수의 개화시기 예측을 위해 생물계절모형을 활용한 예가 있다. 그러나 대부분의 연구 대상 품종들이 오래 전에 국외에서 도입되어 보급되었거나 육종된 지 오래된 것으로 최근 농가에서 많이 재배되는 품종들이 아닌 경우가 많다. 따라서 국내 과수 품종들에 대한 기후변화 영향평가를 위해서는 최근 국내에서 육종되어 많이 재배되는 과수 품종들에 대한 생물계절연구가 지속적으로 필요하다. 게다가 최근 동네예보 및 중장기 예보기술이 다양하게 개발 및 향상되고 있기 때문에, 이러한 정보를 활용하기 위해서는 국내 품종에 대하여 개화시기를 예측할 수 있는 기반기술과 지속적인 개화시기 모니터링을 통한 자료의 확보가 필수적이다.

본 연구는 최근 국내에서 그 재배면적이 급속도로 증가하고 있는 대표적인 국내 육종 골드키위 품종인 해금에 대한 개화시기를 생물계절모형에 의해 예측하고, 미래 기후변화에 의한 개화시기 변화와 그 지리적 변화에 대한 불확실성을 전망하고자 수행되었다.

II. 재료 및 방법

2.1. 연구지역과 기상 및 생물계절정보

해금의 개화시기 예측모형에 필요한 모수 추정을 위해 전남 해남군 산이면에 위치한 한 노지재배 농가로부터 2008년부터 2013년까지 해금의 개화일과 만개일 정보를 수집하였다. 이 재배농가는 키위 표준 재배법에 의해 해금을 재배하고 있는 농가이다. 기상자료는 산이면 해금 노지재배 농가로부터 약 15km 동남쪽에 있는 기상청의 해남 기상관측소(station number: 261)로부터 2007년 10월에서 2013년 10월까지의 일별 최고 및 최저기온 자료를 수집하였다(Fig. 1).

2.2. 개화시기 예측모형

본 연구에서 해금의 개화시기 예측을 위해 도입한 생물계절모형은 Cesaraccio *et al.*(2004)이 제시한 휴면

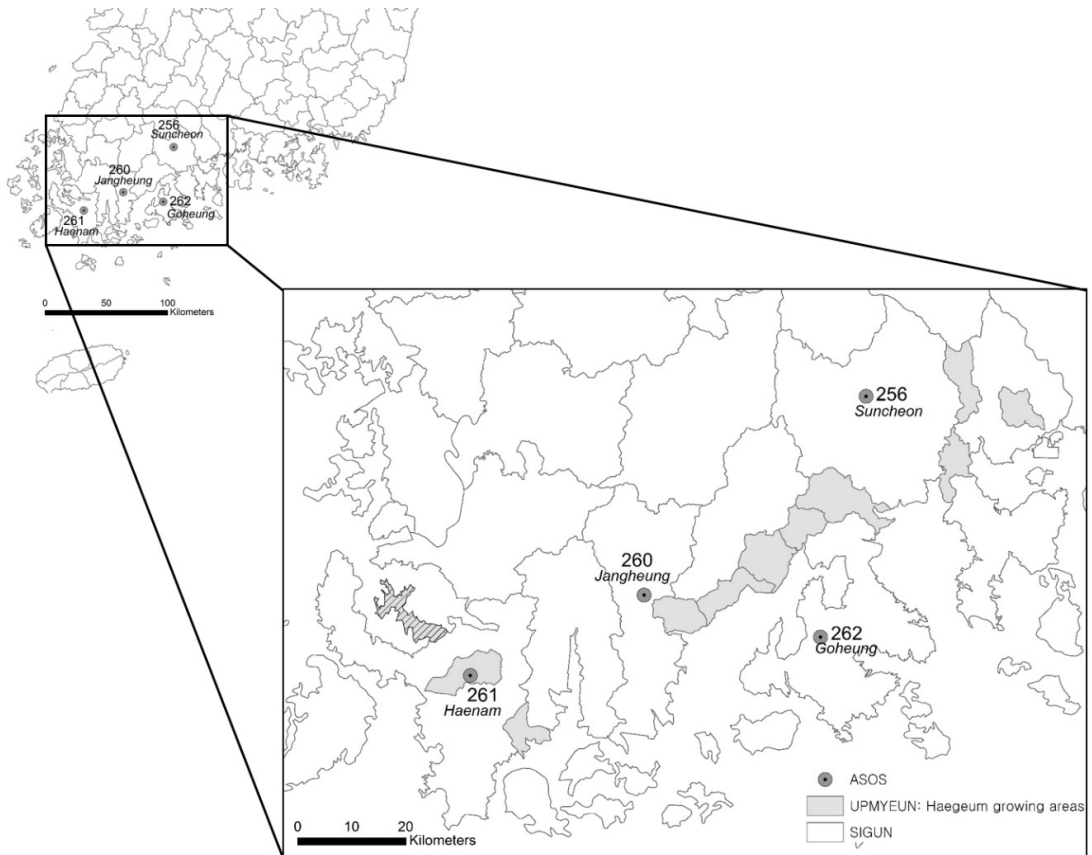


Fig. 1. The map of study area. The data have been collected for phenology model development in the polygon with shaded-dash. The polygons with gray present the administration boundaries (upmyeun-leedong) in where 25 kiwifruit farms of Haegeum locate. The circle dots indicate weather stations of Korea Meteorological Administration.

시계모형이다. 이 모형으로부터 개화시기를 예측하기 위해서는 기준온도(base temperature, T_b), 저온요구도(cool requirement, R_c)와 고온요구도(Heat requirement, R_h)가 필요하다. 휴면시계모형은 chill-day의 적산과 anti chill-day의 적산으로 구분되는데, 이 적산과정은 매일의 온도에 따른 가중치를 달리하여 적산되는 온도 시간(thermal time)으로 표현된다. 2008년에서 2013년 까지 6년 동안 수집된 해금의 개화시기와 관측 일별 기상자료로부터 해금의 휴면시계모형에 필요한 각각의 모수(T_b , R_c , and R_h)를 추정하였다.

2.3. 격자형 기온변화 분포와 개화시기 분포

2.3.1. 관측 기온표면

본 연구에 참여한 해금 노지재배 농가들이 위치한 행정구역들 중에는 표준기상관측소가 없는 곳들이 있다. 따라서 인근 기상관측소의 기온자료 조차 없는 농

가들에 대해 개화시기를 예측할 수 없는 경우가 발생하였다. 이와 같이 기상관측이 이루어지지 않는 곳에 위치한 농가들에 개화시기 예측모형을 적용하기 위해서는 미관측지점에 대해 기상요소를 추정할 수 있는 방법이 필요하다. 미관측지점에 대한 기상요소를 추정하기 위한 공간 기후분석법이 국내외 많은 연구를 통해 개발되어 왔다(Shin *et al.*, 1999; Yun *et al.*, 2000; Yun *et al.*, 2001; Jung *et al.*, 2004; Chung and Yun, 2004; Chung *et al.*, 2006). 미관측지점의 추정값은 주변 관측지점들 중 거리가 가까울수록 해당 관측지점의 관측치의 영향이 크게 반영된다는 거리자승역산가중(IDSW, Inverse distance squared weighting)이 많이 활용되고 있다. 또한 Nalder and Wein(1998)과 Yun *et al.*(2000)은 미관측지점과 공간내삽에 사용되는 주변 관측지점간의 고도편차를 기온감율에 의해 보정함으로써 내삽오차를 줄여 줄 수 있다고 하였다.

이 외에 사면일사량이나 기온역전층에서 발생할 수 있는 냉기호에 의한 보정 등으로 내삽오차를 계속 해서 줄일 수 있다(Chung and Yun, 2004; Chung *et al.*, 2006; Kim and Yun, 2011). 본 연구에서는 76개 표준기상관측소에서 2007년에서 2015년까지 관측기후 자료를 수집하고 IDSW와 고도편차 보정을 통해 공간해상도 1km, 시간해상도 매일의 격자형 관측 기온 표면을 생성하였다.

2.3.2. 미래 기온표면

일별 미래 기온 시나리오 자료는 대표농도경로 (Representative Concentration Pathways, RCP)를 바탕으로 전지구기후모형(Global Climate Model, GCM)에 의해서 생성된 것으로 CMIP5 (the phase five of the Couple Model Intercomparison Project)를 통해서 수집 되었다. 미래 기온 시나리오 자료의 공간해상도는 200~400km이기 때문에 농업모형에 활용할 수 있도록 공간 해상도의 상세화가 필요하며, GCMs의 계통오차 (systematic bias)에 대한 편의보정(bias correction)도 필요하다. 본 연구에서 사용한 미래 일별 기후변화 시나리오 자료는 조재필(2013)에 의해 공간적 상세화와 편의보정을 동시에 할 수 있는 비모수적 분위사상법으로 상세화된 6개 GCM (CanESM2, HadGEM2-AO, GFDL-ESM2G, inmcm4, IPSL-CA5-LR, MIROC-ESM-CHEM)의 미래 일별 기온 시나리오를 이용하였다 (Table 1). 이 자료는 GCM에서 생성된 격자형 미래 기온시나리오 자료에서 56개의 표준기상관측소가 위치한 격자의 중앙 기온값을 추출하고 여기에 편의보정 및 공간특성(예, 고도) 등을 반영하여 상세화한 점 단위 자료이다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이, 본 연구에 참여한 해금 노지재배 농가들이 위치한 행정구역들

중에는 표준기상관측소가 없는 곳들이 있어 이들 미관측지점에 대한 미래 기상요소의 추정이 필요하다. 따라서 공간 상세화 및 편의보정이 끝난 56개 지점의 일별 미래 기온변화 자료를 IDSW에 의해 격자형 기온표면으로 작성하였으며, 적용기간은 가까운 미래 2021-2040년까지이다. 분위사상법에 의해 편의보정될 때 고도보정이 이미 적용되었기 때문에 관측 기후표면을 생성할 때와 같이 고도보정을 적용하지 않았다. RCP 4.5와 RCP 8.5에 따른 6개 GCM의 일별 미래 시나리오 기온표면(20 years × 365 day × 6 GCMs: 43,800 raster files)이 공간해상도 1km로 제작되었다.

2.3.3. 격자형 개화시기 표면

휴면시계모형에서 임의 해의 개화시기를 예측하기 위해서 휴면시계모형 구동의 시작을 온대과수의 낙엽 시기로 설정한다(Cesaraccio *et al.*, 2004; Kwon *et al.*, 2005). 정확한 온대과수의 낙엽시기는 알려진 바가 없지만, 10월 1일이라고 가정한 선 연구사례에 따라 본 연구에서도 10월 1일을 휴면시계모형 구동의 시작으로 설정하였다. 관측기간 2007년 10월부터 2015년 12월까지 고도보정된 격자형 일별 기온표면을 휴면시계모형에 입력하여 2008년부터 2015년까지 해금의 예상 개화시기 표면을 공간해상도 1km로 생성하였다. 마찬가지로 2020년 10월부터 2040년 12월까지의 일별 미래 시나리오 기온표면을 같은 휴면시계모형에 입력하여 가까운 미래기간 20년 동안(2021-2040) 해금의 미래 예상 개화시기 표면을 공간해상도 1km로 생성하였다.

2.4. 모수 검증

관측지점의 기상자료에 의해 추정된 해금의 예상

Table 1. The information of GCMs (Global Climate Models) used in the study

Model	Origin	Country	Resolution
CanESM2	Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis	Canada	2.8° x 2.8°
GFDL-ESM2G	NOAA/GFDL (Geophysical Fluid Dynamic Laboratory)	USA	2.5 ° x 2.0°
HadGEM2-AO	Meteorological Office Hadley Center	UK	1.88° x 1.25°
inmcm4	Institute for Numerical Mathematics	Russia	2° x 1.5°
IPSL-CM5A-LR	Institute Pierre Simon Laplace	France	3.75° x 1.8°
MIROC-ESM-CHEM	Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	Japan	2.8° x 2.8°

개화시기와 격자형 기상표면으로부터 계산된 해금의 예상 개화시기를 비교하여 해금의 휴면시계모형의 모수를 검증하고자 하였다. 2014년부터 2015년까지 모수 추정에 참여한 산이면의 노지재배 농가를 제외하고 전남 지역 11개 읍면에 위치한 해금의 노지재배 농가 25개로부터 개화시기 정보를 수집하였다(Fig. 1 and Table 2). 2014년에서 2015년까지 수집된 25개 해금 노지재배 농가의 주소는 리동 수준까지 상세하게 수집하였으나 농가의 디지털 위치 정보는 수집하지 못했다. 또한 25개 농가가 위치한 곳에는 가까운 기상청 표준기상관측소가 없는 경우도 있었다. 예를 들면 보성군의 경우 무인 기상관측소(station number: 732)는

있지만 인근 표준기상관측소는 장흥(station number: 260)뿐이다. 그래서 첫 번째 모수 검증을 위한 방법으로 이들 25개 노지재배 농가에서 가까운 4개 표준기상관측소의 관측 일별 최고 및 최저기온 자료로부터 예측된 4지점의 개화시기를 25개 노지재배 농가가 포함된 4개 시군 각각의 대표 개화일로 가정하고 25개 노지재배 농가의 각각의 관측 개화일과 비교하였다. 두 번째 검증 방법으로는 계산된 격자형 개화시기 표면에서 25개 노지재배 농가가 위치한 11개 읍면에 포함되는 격자들을 추출하여 평균한 11개 예측 개화시기와 25개 노지재배 농가의 각각의 관측 개화시기를 비교하였다. 휴면시계모형의 모수에 대한 통계적 오차

Table 2. The information of 'Haegeum' kiwifruit farms collected for validation of 'Chill-day' model in the study

Address of kiwifruit farms	The order of points at Figure 2	ASOS	Collection year	Farm management
Gwangyang-si, Okgok-myeon	1	256	2014	
Gwangyang-si, Bonggang-myeon, Bujeo-ri	2	256	2014	
Suncheon-si, Haeryong-myeon, Shinseong-ri, 1	3, 26	256	2014, 2015	
Suncheon-si, Haeryong-myeon, Shinseong-ri, 2	4, 27	256	2014, 2015	
Suncheon-si, Haeryong-myeon, Seonhak-ri	5, 28	256	2014, 2015	
Goheung-gun, Podu-myeon, Songsan-ri	6	262	2014	
Boseong-gun, Hoecheon-myeon, Dongryul-ri	7	260	2014	
Boseong-gun, Joseong-myeon, Daegok-ri, 1	8	260	2014	
Boseong-gun, Joseong-myeon, Daegok-ri, 2	9	260	2014	
Boseong-gun, Beolgyo-eup, Ondong-ri	10	260	2014	
Boseong-gun, Deungnyang-myeon, Samjeong-ri	11	260	2014	
Boseong-gun, Beolgyo-eup, Jinggwang-ri	12	260	2014	
Boseong-gun, Joseong-myeon, Joseong-ri	13	260	2014	Open field
Boseong-gun, Deungnyang-myeon, Jinggwang-ri	14	260	2014	
Jangheung-gun, Allyang-myeon, Surak-ri	15	260	2014	
Jangheung-gun, Allyang-myeon, Sinchon-ri	16	260	2014	
Jangheung-gun, Allyang-myeon, Gisan-ri	17	260	2014	
Haenam-gun, Bugil-myeon, Heungchon-ri	18	261	2014	
Haenam-gun, Sani-myeon, Yejeong-ri	19	261	2014	
Haenam-gun, Haenam-eup, Yeondong-ri	20	261	2014	
Haenam-gun, Haenam-eup, Hae-ri	21	261	2014	
Boseong-gun, Beolgyo-eup, Madong-ri 1101-6	22	260	2015	
Boseong-gun, Joseong-myeon, Chuknae-ri 29-3	23	260	2015	
Boseong-gun, Hoecheon-myeon, Seodang-ri 329	24	260	2015	
Boseong-gun, Beolgyo-eup, Jinggwang-ri 435-1	25	260	2015	

ASOS: Automatic synoptic observation system

는 RMSE (root mean square error)로 표현하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 골드키위 해금의 휴면시계모형의 모수

2008년에서 2013년까지 6년 동안의 골드키위 해금의 휴면시계모형의 모수에서 기준온도(T_b)는 6.3°C, 저온요구도(R_c)는 102.5, 고온요구도(R_h)는 575로 각각 추정되었다. 일반적으로 키위의 적정 기준온도가 7°C라고 알려진 것(Salinger *et al.*, 1993; Kwon *et al.*, 2012)과 다르게 본 연구에서는 6.3°C로 다소 낮게 추정되었다. 또한 품종은 다르지만 Kwon *et al.*(2012)의 연구에서 그린키위 헤이워드의 저온요구도는 115.3으로 추정되었는데, 본 연구에서 골드키위 해금의 저온요구도는 102.5로 다소 낮게 추정되었다.

3.1.1. 기상 관측지점의 예측 개화시기로부터 검증

기상청 표준기상관측소 4지점(station number: 256, 260, 261, 262)의 2013년부터 2015년 동안의 관측 일별 최고 및 최저기온을 휴면시계모형에 입력하여 예측된 개화시기를 2014년에는 21개 농가, 2015년에는 7개 농가에서 관측된 해금의 개화시기와 비교하였다(Fig. 2 and Table 2). 2015년의 7개 농가 중에서 3개의 농가가 2014년뿐만 아니라 2015년에도 수집되었기 때문에 실제 수집된 표본수는 28개이다(Table 2). 2년 동안 관측된 28개 개화시기를 살펴보면, Fig. 2A의 2014년에 가장 늦게 개화한 시기는 해남읍에 위치한 농가에서 5월 21일(day of year, 141일), 가장 빨리 개화한 시기는 광양시 옥곡면에 위치한 농가에서 5월 7일(127일)이고, 21개 농가의 평균 개화시기는 5월 15일(135일)이다. 그러나 인근 기상청 표준기상관측소의 예측 개화시기를 보면, 2014년에 해남 관측소의 개화시기는 5월 16일(136일), 순천 관측소의 개화시기는 125일(5월5일), 장흥 관측소의 개화시기는 132일, 고흥 관측소의 개화시기는 5월 11일(131일)로 예측되었는데, 해남읍에 위치한 농가의 개화시기와 해남 관측소의 예측 개화시기의 차이는 5일로 계산되었다. 또한 광양시 옥곡면에는 인근 기상관측소가 없어, 가장 가까운 순천 관측소의 예측 개화시기를 적용한 경우 광양시 옥곡면에 위치한 농가의 개화시기와 순천 관측소의 예측 개화시기의 차이는 2일로 나타났다. 2015년을 보면, 가장 늦게 개화한 시기는 순천시 해룡면에 위치한 농가에서 5월 18일(138일), 가장 빨리 개화한 시기

는 보성군 회천면에 위치한 농가에서 5월 8일(128일)이고, 7개 농가의 평균 개화시기는 5월 14일(134일)이다. 그러나 인근 표준기상관측소의 예측 개화시기를 보면, 2015년에 순천 관측소가 5월 16일(136일), 장흥 관측소가 5월 4일(134일)로 예측되었다. 순천시에 위치한 농가의 개화시기와 순천 관측소의 예측 개화시기의 차이는 2일로 나타났다. 보성군에는 인근 표준기상관측소가 없어서 장흥 관측소의 예측 개화시기를 적용하면 보성군에 위치한 농가의 개화시기와의 차이는 6일로 나타났다. 전반적으로 추정오차는 5.2일로, 선 연구의 온대과수에 대한 휴면시계모형의 추정오차 2-3일보다 약 2배 정도 증가하였다(Fig. 3A).

3.1.2. 격자형 예측 개화시기 표면으로부터 검증

2013년 10월에서 2015년까지 기상청 76개 표준기상관측소의 관측 일별 최고 및 최저기온으로부터 생성된 기온표면을 휴면시계모형에 입력하여 계산된 2014년과 2015년의 예상 개화시기 표면에서 25개 농가가 위치한 11개 읍면에 포함된 개화시기를 공간 평균하여 추출한 후, 28개 관측 개화시기와 비교하였다(Fig. 2B). 2014년을 보면, 공간 평균한 해남읍의 예측 개화시기는 5월 19일(139일)로 해남읍에 위치한 농가의 개화시기와 2일 차이를 보였고, 공간 평균한 옥곡면의 예측 개화시기는 5월 8일(128일)로 농가의 개화시기와 1일 차이를 보였다. 2015년에 대해서는, 공간 평균한 순천시 해룡면의 예측 개화시기는 5월 14일(134일)로 농가와의 차이는 4일로 나타났고, 공간 평균한 회천면의 예측 개화시기는 5월 15일(135일)로 농가와의 차이가 7일로 다소 크게 발생하였다. 그러나 전반적으로 격자형 예상 개화시기 표면으로부터 공간 평균한 개화시기의 추정오차는 3.4일로 온대과수에 대한 휴면시계모형의 추정오차 2-3일과 근접한 결과를 보였다(Fig. 3A). 또한 2년 동안 수집된 28개 해금의 관측 개화시기와 4개 표준기상관측소 각각의 기상자료에 의해 예측된 개화시기, 그리고 격자형 관측 기온표면으로부터 계산된 평균 개화시기를 상사수염도로 각각 표현하였다(Fig. 3B). 기상 관측지점의 예상 개화시기는 관측 개화시기의 평균보다 훨씬 단축하는 것으로 추정할 뿐만 아니라 관측 개화시기의 변동 범위(5일)에서 벗어날 수 있는 것으로 분석된 반면, 격자형 관측 기온분포에 의해 계산된 예상 개화시기는 관측 개화시기의 평균과 변동 범위를 비교적 잘 나타내었다. 이것은 순천시의 해룡면과 회천면처럼 공간 평균하였을 때 오차

가 더 커질 수 있는 경우가 발생할 수 있지만, 격자형 기온표면에 의해 개화시기를 공간적으로 추정하고 11개 읍면 단위로 공간 평균함으로써 4개 관측지점의 예상 개화시기보다 상세하게 전망된 개화시기를 확보

할 수 있었기 때문인 것으로 판단된다.

3.2. 해금의 미래 개화시기의 변동

2021년부터 2040년까지 RCP 시나리오에 따라 각

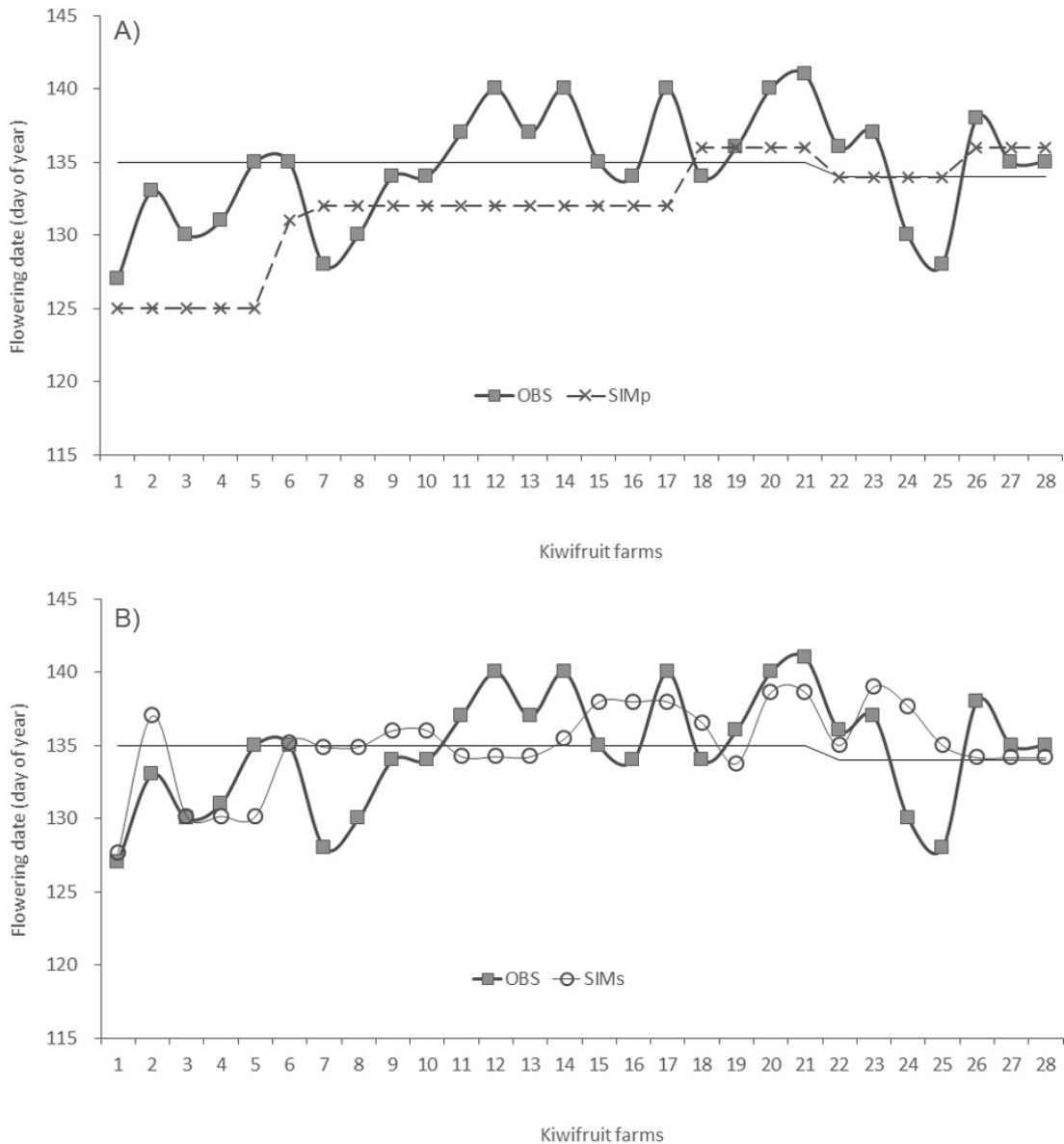


Fig. 2. The black solid line indicates the average flowering day of the observation of flowering day on 25 kiwifruit farms during from 2014 to 2015 and the yellow solid line with rectangles presents the observed flowering day of 25 kiwifruit farms of Haegeum. The yellow dash line with cross presents the flowering day predicted from the point weather data of four weather stations of KMA (Korea Meteorological Administration) nearby 25 kiwifruit farms (A). The yellow solid line with empty circle presents the flowering day extracted from the distribution map of flowering day which are spatially calculated (B).

각 6개 GCMs별로 예측된 골드키위 해금의 격자형 미래 예상 개화시기 표면에서 노지재배 농가들이 위치한 11 읍면 단위에 포함된 값을 추출하여 RCP 시나리오에 따른 6개 GCMs의 미래 예상 개화시기의 변화를 분석하였다(Fig. 4). 앞으로 다가올 20년에 대하여, RCP 4.5와 RCP 8.5의 6개 GCMs에서 각각 전망된 해금의 미래 개화시기 중에서 가장 빠른 개화시기는 RCP 8.5의 MIROC-ESM-CHEM과 HadGEM2-AO와 RCP 4.5의 CanESM2에서 4월 21일(111일)로 예측되었고, 가장 늦은 개화시기는 RCP 4.5의 Inmcm4에서 6월 2일(153일)로, RCP 8.5의 Inmcm4에서는 5월 31일(151일)로 예측되었다. 제2사분위와 제3사분위를 합한 값으로부터 변량의 크기를 예상할 수 있는데, RCP 4.5의 MIROC-ESM-CHEM에서 17일로 미래 예측 개화시기의 변동이 가장 큰 것으로 나타났다. 반면 CanESM2와 GFDL-ESM2G에서는 7일로 가장 작은 변동을 보였다. RCP 8.5에서는 MIROC-ESM-CHEM이 16일로 RCP 4.5에서보다 1일 차이지만 여전히 큰 변동을 보였으며, HadGEM2-AO에서 8일로 가장 작은 변동을

나타냈다(Table 3). Fig. 5는 2021-2040년 동안 골드키위 해금의 격자형 미래 예상 개화시기 표면이다. 분홍색(5월 13일에서 5월 19일까지)과 노란색(5월 20일에서 5월 25일까지) 범위는 현재 골드키위 해금의 주산지인 전남 해안 지역의 개화시기의 범위를 각각 표현한 것이다. Fig. 5A는 현재 시기(2008-2015년)에 대한 해금의 평균 개화시기 분포이고, Fig. 5B는 RCP 4.5 시나리오의 6개 GCMs에서 각각 예측된 미래 개화시기를 평균한 해금의 미래 개화시기 분포이며, Fig. 5C는 RCP 8.5 시나리오의 6개 GCMs에서 각각 예측된 미래 개화시기를 평균한 해금의 미래 개화시기 분포이다. 20년 후에, 현재 해금의 주요 재배 지역에서는 평균 10일 이상, 즉 5월 10일 이전에 개화하는 것으로 전망되었다. 반면, 현재 해금의 개화시기에 해당되는 범위는 북쪽으로 약 150km 이상 이동되었는데, RCP 4.5에서는 충남 이남 지역으로 확대되고, RCP 8.5에서는 충북까지 확대될 수 있는 것으로 전망되었다. 그러나 Fig. 5의 D와 E는 다른 경향을 보였다. Fig. 5D는 RCP 4.5의 6개 GCMs에서 예측한 미

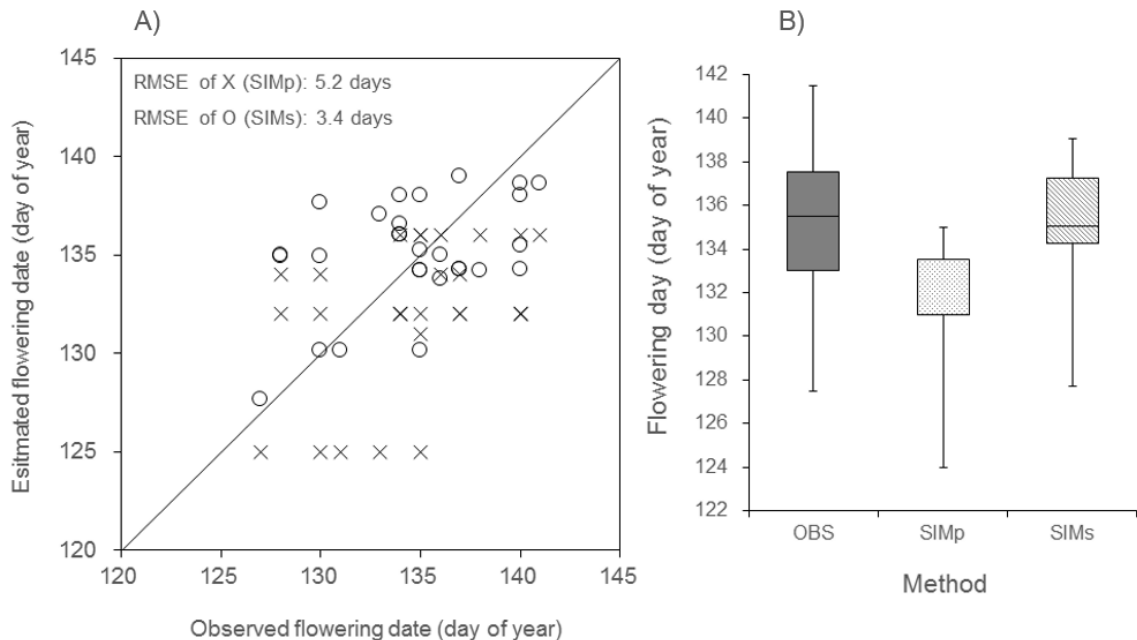


Fig. 3. Comparison of 'Haegeum' flowering day predicted between point-based and grid-based (A). Cross symbols (X) represent the estimated flowering days which are calculated in 'Chill-day' model with the observation weather data of 4 weather sites nearby 25 kiwifruit orchards of 'Haegeum' during 2014-2015. Empty circle symbols (O) indicate the estimated flowering days which are extracted from the distribution of flowering day that are calculated in 'Chill-day' model with the digital map of temperature for 2014-2015. Flowering date variation of two different prediction methods from 2014 to 2015 (B).

래 개화시기를 모두 평균하지 않고 6개 GCMs 중에서 낮은 변동을 보인 CanESM2와 GFDL-ESM2G의 미래 예상 개화시기를 평균한 분포이다. RCP 8.5에서 낮은 변동을 보인 GCM은 HadGEM2-AO뿐이었기 때문에,

Fig. 5E는 RCP 8.5의 HadGEM2-AO에서 전망된 해금의 미래 개화시기 분포이다. B와 C에서 전남 및 경남 지역에서 현재 해금의 개화시기보다 10일 이상 빨리 개화할 것이라고 전망한 것과 다르게 D와 E에서는 5

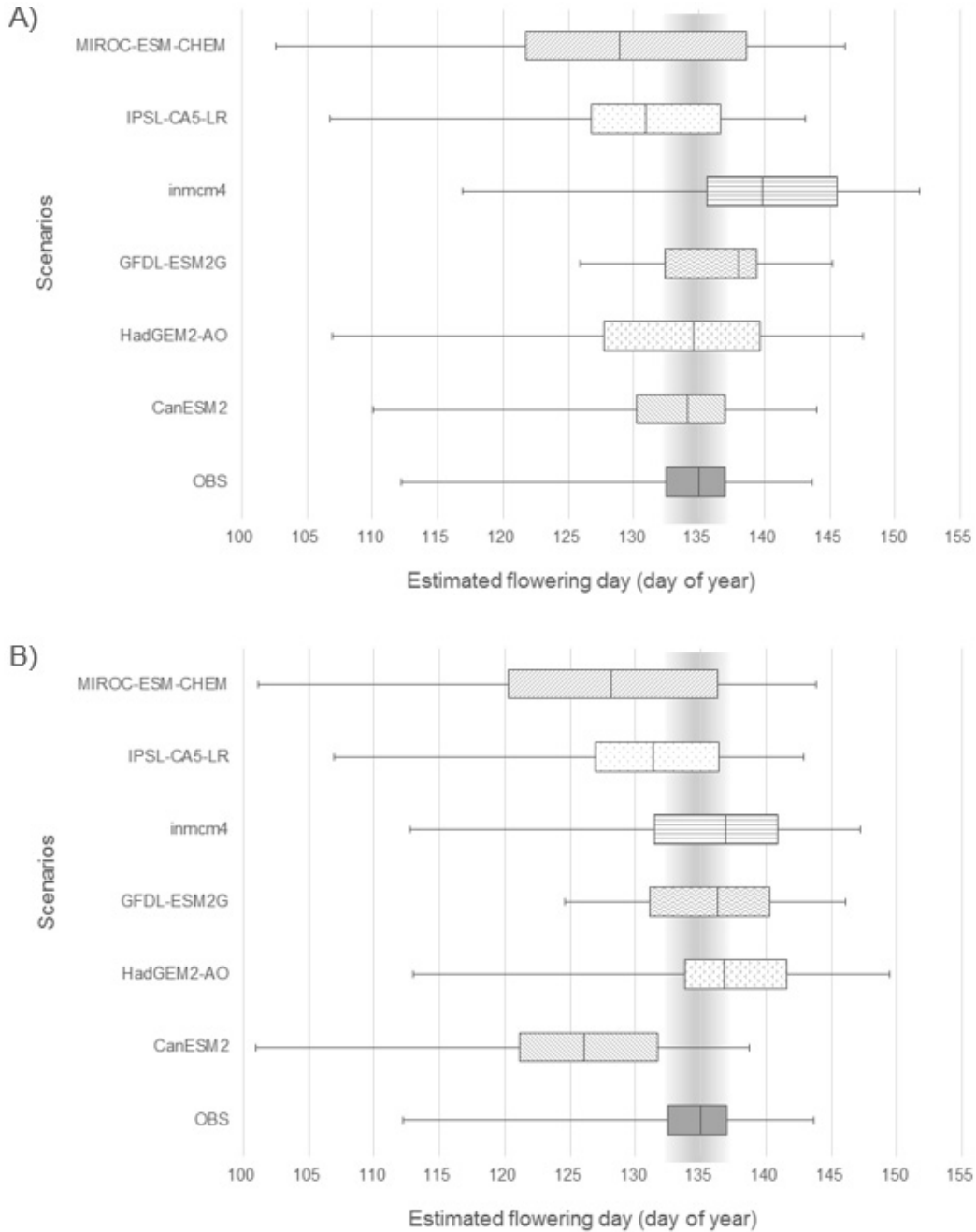


Fig. 4. The change of 'Haegeum' future flowering days which predicted from the future climate scenarios under 6 GCMs according to RCP 4.5 (A) and RCP 8.5 (B).

Table 3. The variation of ‘Haegeum’ future flowering day predicted under each GCM of RCP 4.5 and RCP 8.5, respectively

Scenario		Models					
		CanESM2	HadGEM2-AO	GFDL-2G	inmcm4	IPSL-CA5-LR	MIROC-ESM-CHEM
RCP 4.5	Q2 + Q3 (day)	7	12	7	10	10	17
RCP 8.5	Q2 + Q3 (day)	11	8	9	9	9	16

Q2: the second quartile
Q3: the third quartile

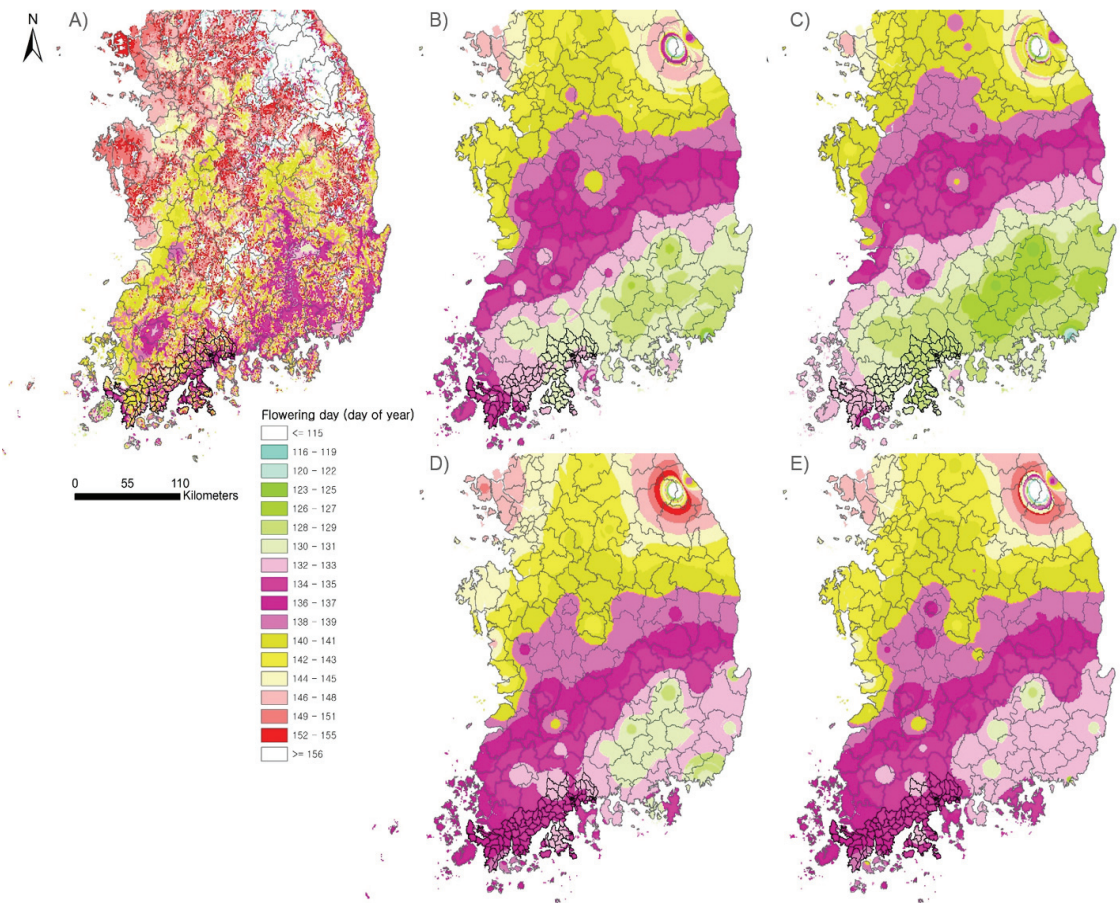


Fig. 5. A presents the geographical location of flowering day of Haegeum kiwifruit in the current climate (2008-2015). From B to E explain the geographical shifting and change of ‘Haegeum’ future flowering day; B presents average of future flowering day which predicted from the future climate scenarios under 6 GCMs of RCP 4.5. C presents average of future flowering day which predicted from the future climate scenarios under 6 GCMs of RCP 8.5. In the bottom panel, D presents average of future flowering day of 2 GCMs and E presents future flowering day of HadGEM2-AO only.

월 15일(135일) 정도에서 개화하는 것으로 전망되어 현재와 크게 다르지 않는 것으로 나타났다. RCP 4.5의 CanESM2와 GFDL-ESM2G, RCP 8.5의 HadGEM2-AO의 20년 동안(2021-2040)의 12월에서 2월까지의 겨울 기온과 3월까지의 기온을 관측기간 동안(2008-2015)의 기온과 비교했을 때, 기온 차이가 1°C 이내로 크지 않았는데, 이것 때문에 RCP 4.5의 CanESM2와 GFDL-ESM2G, RCP 8.5의 HadGEM2-AO의 미래 예상 개화시기가 지금과 크게 다르지 않게 전망된 것으로 판단된다. 또한 Fig. 4에서 RCP 4.5의 CanESM2와 GFDL-ESM2G의 미래 예상 개화시기의 변동이 작고, RCP 8.5에서는 HadGEM2-AO의 미래 예상 개화시기의 변동이 작게 나타난 것도 이들의 기온 차이가 크지 않았기 때문인 것으로 판단되며, RCP 4.5와 RCP 8.5의 MIROC-ESM-CHEM의 미래 예상 개화시기의 변동이 큰 것은 MIROC-ESM-CHEM의 겨울 기온의 차이가 현재보다 평균 2°C에서 최대 4°C이상까지 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

IV. 결론

4.1. 개화시기 예측모형

표준 재배법에 의해 재배되고 있는 과수의 관측 생물계절자료와 그 지점에서 표준 관측법에 의해 관측된 기상자료로부터 개화시기 예측모형 및 모수를 개발하는 것이 일반적이다. 그러나 본 연구에서 골드키위 해금의 한 재배농가에서 7년 동안 수집한 개화시기 자료와 인근 기상관측소의 관측 기상자료로부터 휴면시계모형의 모수를 추정하였다. 이렇게 추정된 휴면시계모형의 모수가 전남 지역의 모든 골드키위 해금의 개화시기를 예측할 수 있는 모수로 활용할 수 있는 대표성을 가진다고 단정할 수는 없다. 그러나 골드키위 해금의 개화시기 예측모형의 추정오차는, 인근 기상관측소의 관측자료로부터 바로 계산되었을 경우 5.2일로 다소 높게 나타났지만, 격자형 기온표면을 활용하여 공간 평균한 경우에는 3.4일로 개선되는 효과를 보였다. 따라서 본 연구에서 추정된 골드키위 해금의 휴면시계모형의 모수에 의한 개화시기 예측성은 나쁘지 않으며, 국내 육종 품종인 해금의 개화시기를 예측하는데에 활용 가능할 것으로 판단된다. 또한 해금의 기준온도는 6.3°C로 키위의 적정 기준온도 7°C보다 다소 낮게 추정되었는데, 작물의 성장발육에 필요한 온도량은 품종별로 다르기 때문에 해금의 기준온도뿐만 아니

라 저온요구도는 기존 연구에서 밝혀진 것과 다소 다를 수 있다. 기준온도나 저온요구도의 차이가 품종이 다르기 때문에 나타난 일반화된 결과라고 결론지을 수도 있지만 품종 이외 다른 요소가 개입되었는가에 대한 구명도 추후 필요할 것으로 판단된다. 또한 작물의 생물리학적 반응은 기후변화에 의한 잠재적인 가변성을 가지고 있는 만큼 이들 과수 작물의 성장발육에 필요한 생물리학적 온도량을 정의하기 위해서는 꾸준한 생물계절 관측자료 수집과 지속적인 모니터링도 요구된다.

4.2. 골드키위 해금의 미래 개화시기 변화에 대한 불확실성

모형에서 예측된 개화시기의 차이는 많은 요인에 의해서 발생한다. 앞서 언급한 바와 같이 생물계절모형과 모수에서 발생할 수 있는 불확실성에서부터 관측자료가 가진 불확실성까지 모든 요소에서 불확실성에 대한 염려가 나타난다. 그러나 생물계절모형이 가진 불확실성을 '0'이라고 가정한다면 예측된 개화시기에 대한 불확실성은 입력된 기후자료에 대한 불확실성으로 좁혀질 수 있다. 그래서 추정오차가 개선된 많은 기후모형들이 개발되고 있으며, GCM의 미래 기후변화 시나리오에 대한 불확실성을 해소하기 위한 방법들에 대한 연구들이 발표되고 있다(Murphy *et al.*, 2004; Semenov and Stratonovitch, 2010; Martre *et al.*, 2015). 본 연구에서도 1개 이상의 GCM의 미래 기후변화 시나리오를 활용하여 해금의 미래 개화시기 변화에 대한 불확실성을 설명하고자 하였다. 현재를 기준으로 20년 후 6개 개별 GCM 중, 현재의 겨울과 이른 봄 기간 동안의 기온과 비교했을 때 차이가 컸던 MIROC-ESM-CHEM에서 전망된 미래 개화시기의 변동이 가장 크게 나타난 반면, 차이가 작았던 CanESM2와 GFDL-ESM2G의 미래 개화시기의 변동이 가장 작을 것으로 전망되었다. RCP 4.5의 CanESM2과 GFDL-ESM2G, RCP 8.5의 HadGEM2-AO에서 전남 지역의 골드키위 해금의 미래 개화시기는 지금과 크게 다르지 않을 것이라고 전망한 반면, RCP 시나리오와 크게 상관없이 6개 GCMs 모두를 평균한 미래 개화시기 분포에서 전남 지역의 개화시기는 현재보다 10일 이상 단축되고 현재와 같은 개화시기는 약 150km 북쪽으로 이동될 것으로 전망하였다. 또한 본 연구에서 분석한 미래 개화시기 표면은 오로지 기온표면만으로 전망된 것이다. Kim *et al.*(2009b)의 방법과 같이 추후 재배에 적합한

연간 강수량 조건, 또는 농경지 등을 나타낸 지표피복도와 과수원이 조성될 수 있는 해발고도, 키워 품질결정 조건 등을 단계적으로 포함시킨다면 보다 현실적인 개화시기 표면으로 재분석될 수 있을 것이다. 또한 미래 개화시기 전망에 대한 차이와 그 차이의 원인에 대한 불확실성을 해소하기 위해서는 생물계절모형 개발뿐만 아니라 농업분야에서 활용할 수 있는 기후모형 개발과 기후자료의 상세화 기술개발 등이 지속적으로 수행되어야 할 것이다. 본 연구의 예비 결과가 국내 육종 과수의 성장발육 및 개화시기 예측 등을 위한 생물계절 연구와 기후변화에 대한 영향평가 개선에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

적 요

최근 국내에서 재배면적이 증가하고 있는 골드키위 해금의 개화시기를 예측할 수 있는 휴면시계모형의 모수를 추정하고 해금 주산지에서 미래 기후변화에 의한 개화시기의 변화와 불확실성을 전망하고자 본 연구를 수행하였다. 해금 개화시기 예측을 위한 휴면시계모형의 모수는 6.3°C (base temperature, T_b), 102.5 (chill requirement, R_c), 575 (heat requirement, R_h)로 추정되었다. 2가지 방법으로 추정된 모수를 검증하였는데, 4개 표준기상관측소의 3년 동안(2013-2015)의 기상자료로부터 해금의 개화시기를 예측하고 25개 해금 노지 재배농가에서 수집된 2년 동안(2014-2015)의 관측 개화일과 비교한 결과 5.2일의 추정오차를 보였다. 또한 격자형 기후표면에 의해 계산된 격자형 개화시기 표면으로부터 25개 해금 노지 재배농가가 위치한 격자들의 예상 개화시기를 추출하여 비교한 결과, 3.4일의 추정오차를 보였다. 이 모수를 2021-2040년 동안의 6개 GCMs의 미래 기후변화 시나리오와 결합하여 해금의 미래 개화시기를 예측하였다. 전남 키워 주산지에서 가장 빠른 개화시기는 4월 21일(111일), 가장 늦은 개화시기는 6월 2일(153일)로 나타났다. 6개 개별 GCM 중에서 RCP 4.5의 CanESM2과 GFDL-ESM2G, RCP 8.5의 HadGEM2-AO에서 20년 후 전남 키워 주산지에서 해금의 개화시기는 현재보다 2-3일 단축될 뿐 현재와 큰 차이가 발생하지 않는 것으로 전망되었다. 그러나 RCP 4.5와 RCP 8.5의 6개 GCMs의 평균 미래 개화시기에서 현재보다 10일 이상 단축되고 현재와 같은 개화시기는 전북 및 충남 해안지역 등 북

쪽으로 약 150km 이상까지 확대될 수 있는 것으로 전망되었다. 본 연구의 예비 결과는 국내 육종 과수의 성장발육 및 개화시기 예측 등을 위한 생물계절 연구와 기후변화에 대한 영향평가 개선에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 광주지방기상청 지역기후서비스 사업과 에이펙 기후센터의 지원으로 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

REFERENCES

- Belrose Inc., 2013: *World Kiwifruit Review*. 2013 edition. Pullman, WA Belrose Inc., USA.
- 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.
- Chuine, I., 2000: A unified model for budburst of trees. *Journal of Theoretical Biology* **207**, 337-47.
- Chung, U., and J. I. Yun, 2004: Solar irradiance - corrected spatial interpolation of hourly air temperature in complex terrain. *Agricultural and Forest Meteorology* **126**, 129-139. doi: 10.1016/j.agrformet.2004.06.006
- Chung, U., H. H. Seo, K. H. Hwang, B. S. Hwang, J. Choi, J. T. Lee, and J. I. Yun, 2006: Minimum temperature mapping over complex terrain by estimating cold air accumulation potential. *Agricultural and Forest Meteorology* **137**, 15-24. doi: 10.1016/j.agrformet.2005.12.011
- Han, J. H., S. H. Lee, J. J. Choi, S. B. Jung, and H. I. Jang, 2008: Estimation of dormancy breaking time by development rate model in 'Niiitaka' pear (*Pyrus pirifolia* Nakai). *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **10**, 58-64.
- Jung, J. E., U. Chung, J. I. Yung, and D. K. Choi, 2004: The Observed change in interannual variations of January minimum temperature between 1951-1980 and 1971-2000 in South Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **6**, 235-241.
- Jung, J. E., H. C. Seo, U. Chung, and J. I. Yun, 2006: Spring phenology of grapevine cultivar under the changing climate in Korea during 1921-2000. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **8**, 116-124.
- Kim, J. H., 2010: Freeze risk assessment for 'Changhowon Hwangdo' peach trees using a dormancy clock model during winter season. Kyung Hee University, 65pp.

- Kim, S. O., J. H. Kim, U. Chung, S. H. Kim, G. H. Park, and J. I. Yun, 2009a: Quantification of temperature effects on flowering date determination in Niiitaka Pear. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **11**, 61-71.
- Kim, S. O., U. Chung, S. H. Kim, I. M. Choi, and J. I. Yun, 2009b: The suitable region and site for 'Fuji' apple under the projected climate in South Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **11**, 162-173.
- Kim, S. O., and J. I. Yun, 2011: A quantification method for the cold pool effect on nocturnal temperature in a closed catchment. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **13**, 176-184. doi: 10.5532/KJAFM.2011.13.4.176
- Kwon, E. Y., G. C. Song, and J. I. Yun, 2005: Prediction of dormancy release and bud burst in Korean grapevine cultivars using daily temperature data. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **7**, 185-191.
- Kwon, E., Y., E. Jung, U. Chung, J. I. Yun, and H. S. Park, 2008: Using thermal time to simulate dormancy depth and bud-burst of vineyards in Korea for the twentieth century. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **47**, 1792-1801. doi: 10.1175%2F2007JAMC1777.1
- Kwon, Y. S., S. O. Kim, H. H. Seo, K. H. Moon, and J. I. Yun, 2012: Geographical shift in blooming date of kiwifruits in Jeju Island by global warming. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **14**, 179-188. doi:10.5532/KJAFM.2012.14.4.179.
- Martre, P., D. Wallach, S. Asseng, and F. Ewert, 2015: Multimodel ensembles of wheat growth. Many models are better than one. *Global Change Biology* **21**, 911-925.
- Murphy, J. M., D. M. Sexton, D. N. Barnett, G. S. Jones, M. J. Webb, M. Collins, and D. A. Stainforth, 2004: Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations. *Nature* **430**, 768-772. doi:10.1038/nature02771.
- Nalder, I. A., and R. W. Wein, 1998: Spatial interpolation of climatic normals: test of a new method in the Canadian boreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology* **92**, 211-225.
- Salinger, M. J., G. J. Kenny, and M. J. Morley-bunker, 1993: Climate and kiwifruit cv. Hayward. 1. Influences on development and growth. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science* **21**, 235-245.
- Semenov, M. A., and P. Stratonovitch, 2010: Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Climate Research* **41**, 1-12.
- Seo, H. H. 2003: Site selection criteria for the production of high quality apples based on agriclimatology in Korea. Kyung Hee University, 130pp.
- Shin, M. Y., J. I. Yun, and A. S. Suh, 1999: Estimation of daily maximum/minimum temperature distribution over the Korean Peninsula by using spatial statistical technique. *Journal of the Korean Society of Remote Sensing* **15**, 9-20.
- Yun, S. K., K. H. Chung, I. K. Yoon, E. Y. Nam, J. H. Han, D. J. Yu, and H. J. Lee, 2012: Developmental rate equations for predicting blooming date of 'Yumyeong' (*Prunus persica*) peach trees. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **14**, 189-195. doi: 10.5532/KJAFM.2012.14.4.189
- Yun, J. I., J. Y. Choi, Y. K. Yoon, and U. Chung, 2000: A spatial interpolation model for daily minimum temperature over mountainous regions. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **2**, 173-182.
- Yun, J. I., J. Y. Choi, and J. H. Ahn, 2001: Seasonal trend of elevation effect on daily air temperature in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **3**, 96-104.
- Zapata, D., M. Salazar, B. Chaves, M. Keller, and G. Hoogenboom, 2015: Estimation of the base temperature and growth phase duration in terms of thermal time for four grapevine cultivars. *International Journal of Biometeorology* **59**, 1771-1781. doi:10.1007/s00484-015-0985-y.
- 김성철, 성기철, 좌재호, 임찬규, 전승중, 김천환, 최인명, 2013: 거인에 맞서는 용기 세계적인 기업과 우리 참다래. 농촌진흥청. 20pp.
- 조재필, 2013: 불확실성을 고려한 농업용 저수지의 기후변화 영향 평가. APEC 기후센터, 36pp.