

APCC MME 계절예측자료와 식물계절모형을 활용한 복숭아 만개기 예측모델개발

Modelling of Peach Tree (*Prunus persica*) Full Blooming
Dates Using APCC MME Seasonal Forecasts

전종안

APCC MME 계절예측자료와 식물계절모형을 활용한 복숭아 만개기 예측모델개발

Modelling of Peach Tree (*Prunus persica*) Full Blooming
Dates Using APCC MME Seasonal Forecasts

전종안

발간사

농촌진흥청 (이하 농진청)은 과수농가가 적절한 영농활동 계획을 세우고 개화 시기에 따라 저온 피해 대책 등을 마련하도록 과수의 만개기를 전망하여 매년 3월 하순에 발표하고 있습니다. 농진청에서 사용하는 복숭아 만개기 예측모델은 수원시험포장의 유명품종 만개기 관측자료를 활용하여 개발한 발육속도 모델로, 이 모델을 전국 주요 복숭아 생산지역에 적용하고 있습니다.

농진청에서 사용하는 발육속도 모델은 일평균기온을 독립변수로 사용하는 지수식형태의 함수로, 기상청장기예보의 순별 평균기온을 일평년자료에 합산하는 방식으로 일별로 변환하여 모델에 적용하는 방법입니다. 그러나 이러한 단일품종을 활용한 단일모델은 품종별 특성이나 지역 특성을 제대로 반영하지 못하는 단점이 있을 수 있으며, 장기예보의 자료도 단일모델보다는 다중모델을 앙상블하는 기법의 예측성이 더 좋다고 알려져 있습니다.

본 연구에서는 춘천, 수원, 청원, 청도, 나주, 진주 등 전국의 주요 복숭아 산지의 만개기 예측지점을 대상으로, 예측지점과 가장 가까운 종관기상관측시스템으로부터 기상자료를 수집하고, 다중회귀모형, 발육속도모형, 순차휴면모형을 이용하여 지역 및 품종별 맞춤형 복숭아 만개기 예측모델을 개발하였습니다. 또한 늦서리 피해를 저감하기 위해 봄철 늦서리 예측모델을 개발하여, “Ready-Set-Go” 프레임워크 적용을 위한 기반 기술을 개발하였습니다.

본 연구에서 제안한 지역 및 품종별 맞춤형 복숭아 만개기 예측모델은 현재 농진청이 사용하는 모형이 각 지역 및 품종별 특성을 제대로 반영하지 못하는

단점을 상당부분 개선할 수 있을 것으로 판단되며, 본 연구에서 사용한 방법을 과수원예작물을 재배하는 파키스탄이나 이란 등의 개발도상국에 적용하여 개발도상국 지원연구로 확대해 나갈 수 있을 것으로 기대됩니다.

끝으로 본 연구를 맡아 수행해 주신 본 센터의 전종안 박사의 노고에 감사를 드립니다. 그리고 본 연구를 위해 많은 도움을 주신 한현희 박사(국립원예특작과학원), 김 성 사무관(공군기상단), 손인창 박사(온난화대응농업연구소), 박기환 박사(농업관측센터), 본 센터의 이효진 연구원, 오상명 연구원께도 감사를 표합니다.

2016년 1월
APEC 기후센터
소장 정진승

ABSTRACT

Due to global warming, bud-burst and flowering dates of fruit crops are occurring earlier in recent years and, as the abnormal climate increases the variabilities of temperature in spring, the risk of frost damage has increased. This abnormal climate contributes to the increase in the variability of fruit prices, creating a potentially damaging situation for farmers and consumers. Despite the broad impacts of this phenomenon, the full blooming date prediction model for peach trees, employed by the Rural Developmental Administration (RDA), was developed using only one cultivar (Youmyeong) and observations from a single station (Suwon). This model might not adequately reflect the characteristics of other peach cultivars or local orchards. Therefore, this report develops site- and cultivar-specific blooming date prediction models for major peach cultivation regions and cultivars, presents a framework for applications of the APEC Climate Center Multimodel Ensemble (APCC MME) seasonal datasets, develops frost occurrence prediction models using logistic regression and decision tree techniques, and presents applications of this study. In addition, the prediction models of frost occurrence in spring were developed to apply the "Ready-Set-Go" framework that different strategies for temporal scales from seasonal to short-range forecasts can be more effective.

Multilinear regression, developmental rate (DVR), and sequential dormancy models (chill day, new chill day, and fraction-time models) were used to develop the locally-tailored full blooming date prediction models for major peach cultivars. For the development of these models, bud-burst and full blooming dates of peach tree for 5 cultivars (Cheonhong, Youmyeong, Changbangjosaeng, Cheonjoongdo, and

Janghowon) were collected from the 7 major peach cultivation sites: Chuncheon, Suwon, Yesan, Cheongwon, Cheongdo, Naju, and Jinju. Because the observed period of those dates in Yesan is too short to develop those models, those dates in Yesan were not used for this study. Although the weather datasets including daily maximum, minimum, and mean temperature were required to develop those prediction models, the orchards where those dates were collected from did not have weather stations. Therefore, these weather variables were collected from the nearest Automated Synoptic Observing System (ASOS) from the orchards (Chuncheon:101, Suwon:119, Cheongju:131, Daegu:143, Gwangju:156, and Jinju:192). APCC MME seasonal datasets were used for the predicted temperature in April, which in turn was used to predict the yearly full blooming dates of peach tree at the end of March. The frost occurrence days and 8 meteorological variables (minimum temperature, grass minimum temperature, dewpoint, wind speed on frost occurrence days, mean relative humidity, minimum relative humidity, cloud amount on one day before the frost occurrence days, and difference between maximum temperature on one day before the frost occurrence days and minimum temperature on the frost occurrence days) were obtained from the Korea Meteorological Administration (KMA). These datasets were collected from 8 total stations including the 7 major observed sites for the full blooming dates of peach tree and Wonju (114), one of regions in which RDA predicts the full blooming dates of peach trees.

For the multilinear regression model, mean temperature in March and mean temperature in early, mid, and late April were used for the explanatory variables to the Julian days on the full blooming dates. For this model, observed full blooming dates for the two cultivars (Younmyeong and Changbangjosaeng) in the Suwon site were used since approximately 30 of full blooming dates have been collected since 1979. Both linear and exponential models for the DVR model were used and compared for the 6 major sites and 5 cultivars. It is assumed that only days when the daily

mean temperature is above 5°C contribute to the development of peach trees, as the National Academy of Agricultural Science (NAAS) proposed. Once the DVRs for each day were calculated, the DVRs were summed until those sum reached 1.0 to determine the full blooming dates. Three sequential dormancy models including chill day, new chill day, and fraction-time models were applied for the 6 major observed sites and the 5 cultivars. Notably, to the best of our knowledge, this is the first application of new chill day and fraction-time models to fruit tree crops in Korea. For these models, the threshold temperature (T_C) and chilling requirement (C_R) were estimated with an iteration method. Based on the literature review, we defined the ranges of T_C and C_R ($5 \leq T_C \leq 10$, $-70 \leq C_R \leq -150$). When $\sum |C_d| \geq |C_R|$, rest is assumed to be broken and when $\sum |C_a| \geq |C_R|$, quiescence is assumed to be overcome (where C_d is chilling accumulation and C_a is heating accumulation). The T_C and C_R were determined where the Root Mean Square Error (RMSE) for the estimates against observed bud-burst dates was at a minimum. With those T_C and C_R , heating requirements (H_R) for each observed full blooming dates were calculated and averaged. The periods when both bud-burst and full blooming dates were observed were used for the training periods for the models. The periods with only full blooming dates were used to validate the models.

Among the full blooming dates of peach trees developed in this study, the model that predicted full blooming dates of peach trees most accurately (i.e., measures of goodness-of-fit were best) was selected for the applications of the APCC MME seasonal datasets for the predicted temperature in April were applied. However, the APCC MME seasonal datasets are too coarse (about 250 km of resolution) for the 6 major sites for the full blooming dates. Due to the constraints of the APCC MME seasonal datasets, we predicted required temperature variables (e.g., maximum and minimum temperature) using a statistical downscaling method for the 6 stations nearest from the 6 major sites for full blooming dates. However,

the number of the observations of the full blooming dates and the accuracy of the predicted temperature by the statistical downscaling method were considered selecting a site and cultivars. For the prediction models of the full blooming dates of peach trees, daily temperature datasets are required. Unfortunately, the APCC MME seasonal datasets currently do not provide daily temperature. We proposed a framework adapted from the bottom-up procedure used by the Euro-Mediterranean Center on Climate Change (CMCC) in their operational activities for watershed management. The Maximum Entropy Bootstrap Weather Generator (MEBWG) was used for this framework. The synthetic daily temperature generated by MEBWG was aggregated at a monthly temporal scale. These aggregated synthetic temperatures were compared with the downscaled monthly temperature at the site, and those similar to the predicted monthly temperatures were selected.

Logistic regression and decision tree techniques were used to develop the prediction models for the frost occurrence events. Based on the literature review, a total of 8 meteorological variables were selected for the explanatory variables. The results predicted from these developed models were summarized in the 2×2 contingency table. With this table, we calculated Hit Rate (HR), Probability of Detection (POD), and False Alarm Rate (FAR) as the skill scores for the predictability of the models. We selected threshold values to maximize HR and POD and minimize FAR for each station. Because the smaller number of the selected explanatory variables are selected, the operational applicability of the frost occurrence prediction models can be the more useful. We compared the developed models using both logistic regression and decision tree techniques, and proposed a better technique for the operational use. This proposed technique may be useful to better support farmers by providing adequate strategies to reduce frost damages through a timely warning.

The multilinear regression model for the full blooming date prediction was not

appropriate for this study as the fitted explanatory variables were not significant at the 0.05 probability level. We concluded that this model is not useful for the prediction model to reflect the local and cultivar characteristics. The required days for full blooming were fitted into both linear and exponential models and compared. No significance at the 0.05 probability level was found in the linear model for most of the sites, while the exponential model showed significance at the 0.05 probability level. Fitted coefficients were varied from locations and cultivars. This result implies that the prediction model for the full blooming dates of peach trees should reflect the local and cultivar characteristics to better predict the full blooming dates. Three measures of goodness-of-fit, Mean Absolute Percentage Error (MAPE), coefficient of determination (R^2), and Root Mean Square Error (RMSE) were used to evaluate the model. The highest MAPE (5.2%) was found from the Cheonhong cultivar in the Cheongwon site and the highest R^2 was 0.96 for Cheonhong cultivar in the Naju. The RMSE values varied with the range of 0.91 and 6.31 days. The overall measures for the dataset regardless of the location and cultivar were 2.58%, 0.75, and 3.65 day for MAPE, R^2 , and RMSE respectively.

For the sequential dormancy model, we evaluated the chill day, new chill day, and fraction-time models. T_C and C_R were successfully estimated through the iteration method, while the fraction-time models failed to estimate T_C and C_R . The ranges of T_C were 5 to 9°C and 5 to 7°C for chill day and new chill day models respectively. The estimated C_R values ranges were -148 to -71 and -140 to -75 for the chill day and new chill day models respectively. The ranges of H_R were 134.0 to 277.4 and 153.4 to 272.1 for the chill day and new chill day models. These results showed that the ranges for the new chill day model were smaller than those of the chill day model. The highest RMSE values for the bud-burst dates were 8.67 and 7.12 days for the new chill day and chill day models respectively, while those for the full blooming dates were 3.89 and 3.96 days for the new chill

day and chill day models respectively. Like the results of the DVR model, the goodness-of-fit measures were different from the location and cultivars. For the chill day model, the measures for the entire dataset regardless the location and cultivar were 2.31%, 0.79, and 3.36 days for MAPE, R^2 , and RMSE respectively. For the new chill day model, the values were slightly better than those of the chill day model at 2.19%, 0.82, and 3.16 days for MAPE, R^2 , and RMSE respectively.

The model results showed that the new chill day model displayed a higher performance than the others. Based on the considerations for the predictability of the statistical downscaling method and the observed periods of the full blooming dates at each site, we determined that the APCC MME seasonal datasets were applied for the new chill day model for the Changbangjosaeng and Youmyeong cultivars at the Suwon site. The values of the goodness-of-fit measures using the selected synthetic daily maximum and minimum temperatures reflecting APCC MME seasonal datasets were worse than those using those collected from the Suwon station (119). We surmise that this is partially due to the errors generated by each step in applying the APCC MME seasonal datasets for the prediction of the full blooming dates of fruit tree. It should be noted that this study does not address the question of how the uncertainties of the APCC MME seasonal datasets and the errors from the selection of the synthetic temperatures generated by MEBWG can contribute to the overall errors of the prediction of the full blooming dates. It is recommended that this question be addressed in a future study.

The prediction models for the frost occurrence events were developed using the logistic regression and decision tree techniques. The threshold values determined for the logistic regression model varied with the range of 0.42 (Jinju station) to 0.59 (Daegu station). The HR, POD, and FAR values resulted from these threshold values were approximately 0.9, 0.8, and 0.2 respectively. However, the FAR value for the Daegu station was as high as 0.725. This high value can be explained by

the fact that the Daegu station has one of the fewest frost occurrence events in Korea. A total of 7 meteorological variables were selected for the prediction model. This result suggests that the logistic regression model may not be adequate for operational activities to prevent frost damages. On the other hand, only 2 or 3 explanatory variables were selected for the frost occurrence event predictions using the decision tree technique. In addition, the values of HR, POD, and FAR for the decision tree model were slightly better than those for the logistic regression model. These results imply that the decision tree model for the frost occurrence event prediction can be more useful in providing a timely warning for the prevention of the frost damages to orchards.

Prediction models for full blooming dates that reflect the characteristics of the location and cultivar were developed in this study. However, further work is recommended to develop an operational system for early predicting of the full blooming dates for stakeholders including farmers. For this system development, collaboration with RDA is suggested so that the system can properly function according to user (i.e., RDA) preference. Since these models can better predict the full blooming dates for each location and cultivar, these models can be useful for the preparations of the peach blossom festivals distributed in multiple regions in Korea. To provide enough time to prepare and advertise the peach blossom festivals, the proposed models should be improved to predict the full blooming dates earlier than the late March. These proposed models in this study can be also used to project the quality of fruits by investigating the impacts of climate changes on periods of breaking rest and flowering; it is widely known that these breaking rest and flowering periods largely influence the quality of fruits. The prediction models of frost occurrence events can be used to prevent frost damages to orchards in spring by providing timely interventions for frost damages. The models can be developed for fall to prevent first frost damages to agricultural crops. However,

since the frost occurrence events are very local and are affected by local topological characteristics, the models should be improved to reflect these local topological characteristics. It is concluded that this study can be useful to prevent damages to agricultural farms and facilities.

목 차

1. 서론	1
2. 연구 자료 및 방법	7
2.1 자료수집	9
2.1.1 복숭아 발아기 및 만개기 자료	9
2.1.2 관측 기상자료	11
2.1.3 APCC MME 자료	12
2.1.4 서리 현상일자료	14
2.2 복숭아 만개기 예측모델개발	18
2.2.1 다중회귀모형	18
2.2.2 발육속도모형	19
2.2.3 순차휴면모형	20
2.3 APCC MME 자료 적용	25
2.3.1 통계적규모축소법	25
2.3.2 날씨생성기 (Weather generator)	27
2.4 봄철 서리현상일 예측모델개발	30
2.4.1 로지스틱 회귀 (Logistic Regression)	31

2.4.2 의사결정트리 (Decision Tree)	32
2.4.3 검증	32
3. 연구결과 및 토의	34
3.1 복숭아 만개기 예측모델개발	34
3.1.1 다중회귀모형	34
3.1.2 발육속도모형	36
3.1.3 순차휴면모형	48
3.2 APCC MME 자료 적용	56
3.2.1 통계적규모축소법	56
3.2.2 날씨생성기 (Weather Generator)	59
3.2.3 복숭아 만개기 예측	61
3.3 봄철 서리현상일 예측모델개발	64
3.3.1 로지스틱회귀	64
3.3.2 의사결정트리	69
4. 활용 방안	74
4.1 복숭아 만개기 예측모델	74
4.2 봄철서리현상일 예측모델	77
5. 요약 및 결론	83
■ 참고 문헌	86

1. 서론

많은 과수작물과 같은 영년생 작물은 겨울동안 저온에 노출이 되고 이어 따뜻한 봄에 휴면을 해제하게 되는데, 저온요구량 (Chilling requirement)에 도달하는 것이 과실생산에 매우 중요하다. Honjo (2007)는 지구온난화의 영향으로 과수 작물이 휴면을 해제하고 발아하는 시기와 개화기가 빨라지고 있고, 이상기후현상으로 봄철의 기온 변동도 커져 동해위험이 커지고 있다고 발표했다. 이러한 이상기후현상은 과일 가격을 상승시키거나 하락을 초래하기도해, 농민이나 소비자의 간접적인 피해를 입히기도 한다. 예를 들어, 2013년은 3월과 4월의 개화기 한파로 인한 냉해 여파로 복숭아의 가격이 상승한 바 있다 (서울신문, 2013). 2014년의 경우는 여름철 평균기온이 1도 상승하고 마른장마 등의 이상기후 현상 영향으로 2014년에는 전국적으로 복숭아가 출하가 집중되어서 (Figure 1), 공급량이 한꺼번에 많아져 가격이 하락하기도 하였다 (YTN, 2014). 6월 중순에는 주로 충남 이남지역에서 복숭아가 출하된다.

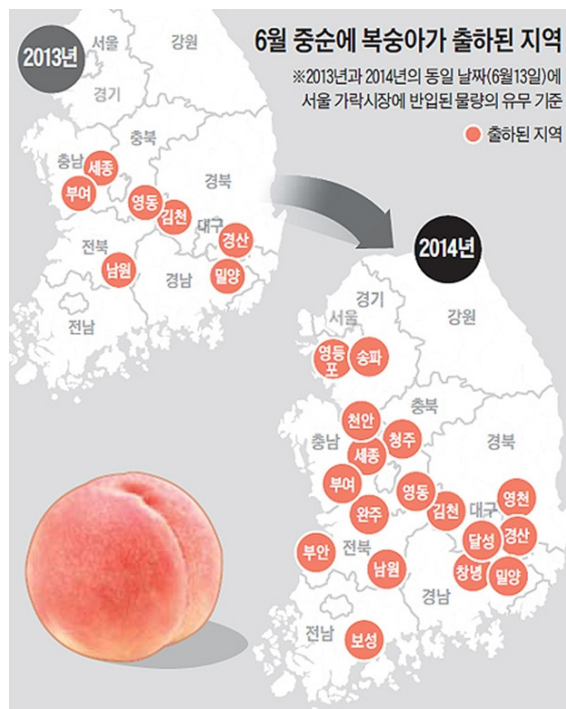


Figure 1 Regions where peach was shipped to Karak market in the mid of June in the years 2013 and 2014 [Source: Chosunilbo].

농림축산식품부가 (보도자료, 2013년 7월 3일) 발표한 2013년 저온피해현황에 따르면, 과수작물이 피해를 입은 면적이 약 12,441ha (43%)로 저온 피해가 가장 컸으며, 맥류 5,995ha (21%), 조사료 5,894ha (20%), 산림작물 2,700ha (9%) 순으로 피해를 입은 것으로 나타났다 (Figure 2). 2013년 저온피해현황을 전국 재배면적에 대한 피해면적의 비로 나타내보면, 배가 30%, 복숭아 16%, 참다래 39%, 유자 53%, 포도 6%, 자두 14%, 매실 19%로 나타났다. 농림축산식품부는 2013년 1월평균기온이 평년 -2.4°C 보다 약 1°C 낮았으며, 과수 개화시기인 4월 초에 영하로 기온이 하강하는 등, 1월부터 4월까지 이상저온현상에서 피해 원인을 찾았다. 또한, 복숭아, 배, 사과 등이 이미 개화기에 접어들었던 4월 초에 최저기온이 -4°C 까지 떨어지는 등 영하의 날씨가 16시간 이상 지속되어 직접적인 피해를 받은 것으로 나타났다. 이에 농림축산식품부는 과수 및 밭작물 피해농가 32,178호에 총 26,162백만원의 재해복구비를 지원하기로 결정하였다고 발표하였다. 이와 같이 농업기상재해는 농가의 직접적인 피해뿐만 아니라, 재해복구비 등의 정부의 추가 재정지출까지 초래하므로, 사전에 정확히 예측하여 피해를 줄이려는 노력이 필요하다.

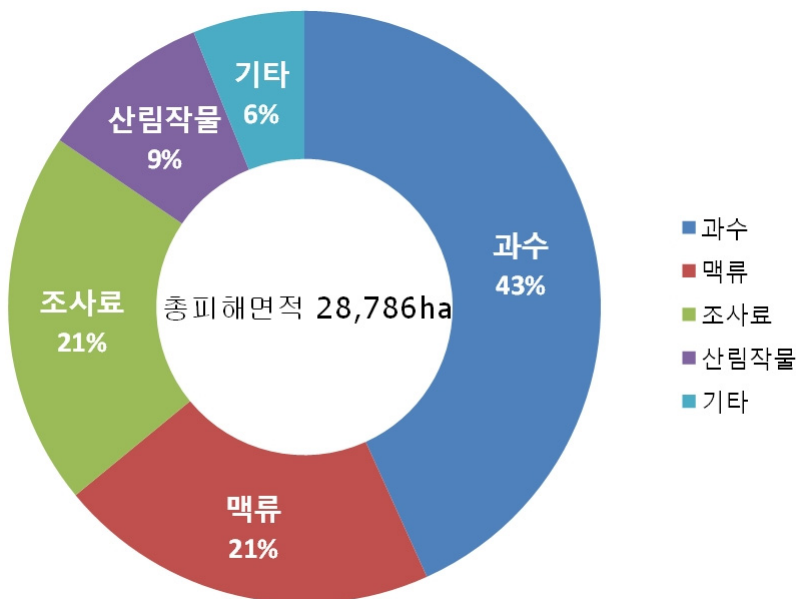


Figure 2 Low temperature damages to various crops in 2013 (Source: MAFRA).

주요 과수작물 중 사과, 배, 복숭아의 연도별 재배면적을 살펴보면 사과의 경우 약 31천ha정도로 가장 큰 재배면적을 보였고, 배의 경우는 2005년 약 22천ha에서 2013년 약 14천ha로 재배면적이 줄어드는 추세이며, 복숭아의 경우는 2013년 약 14천ha 정도이나, 최근 전북 임실, 경북 영덕 등 지자체가 지원 사업으로 복숭아를 선정하여 지원을 하는 등의 이유로 최근에 복숭아 재배면적이 다소 증가하였다 (Figure 3). 특히, 복숭아의 경우는 다른 과수작물에 비해 개화기가 빠른 편이므로, 저온 피해가능성이 더 높다고 할 수 있다 (윤석규 등, 2012). 따라서 복숭아 관련한 동해 및 저온피해사례를 조사하기로 하였으며, 조사에는 농업관측센터의 관측센터월보를 주로 참조하였다. 강원도 원주 및 춘천에서 개화기에 서리 피해가 발생 (2009)하였고, 2010년에는 겨울철 동해피해와 개화기 저온으로 인한 꽃눈 피해로부터 수정불량피해를 전국적으로 입었으며, 경북 이천, 충남 연기, 경북 김천 등의 동해피해와 가뭄사례 (2011년)가 보고되었다. 또한, 2013년에는 개화기 저온피해가 2012년보다 심한 것으로 보고되었고, 동해로 인한 고사면적이 1,131ha로 재배면적의 8%수준에 달하였는데, 특히, 경기, 강원, 충청지역의 피해가 심한 것으로 조사되었다. 2014년에는 경기 이천, 경북 영천 등에서 동해가 발생하였다. 이와 같이 주로 개화기에 저온 및 서리 피해사례가 많이 조사되었다.

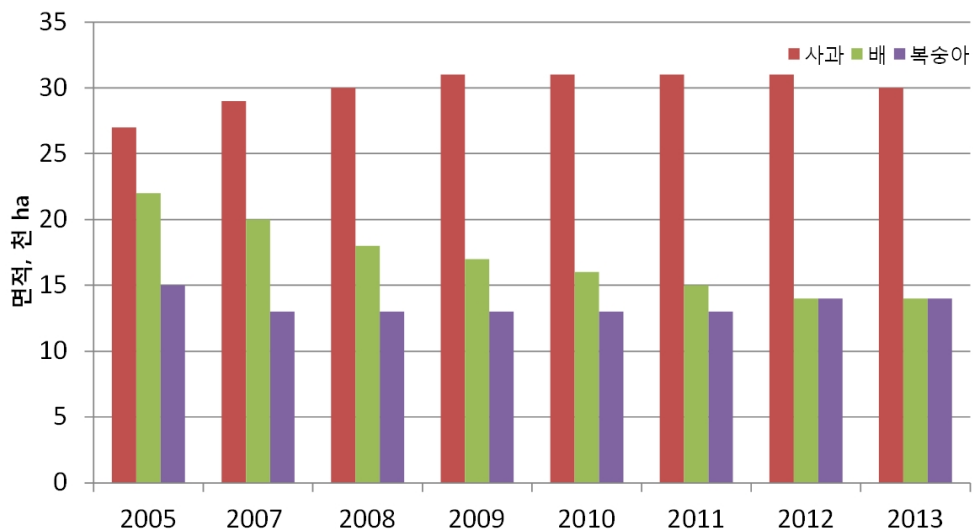


Figure 3 Cultivated areas in ha of apple, pear, and peach [Source: NIHHS].

우리나라의 복숭아 재배면적은 14,335ha로 사과 재배면적 (30,274ha)의 절반수준이나 2013년 피해규모는 사과 969ha보다 약 2.4배가 넘는 면적 (2,330ha)이었다. 피해면적으로만 살펴보면, 배가 4,356ha로 최대 면적을 보였으나, 피해수준별로는 50%이상의 면적에서 피해를 입은 곳이 배와 복숭아의 경우가 각각 1,010ha와 931ha로 비슷한 면적을 보였다 (Table 1). 이는 복숭아의 경우는 그 피해정도가 심한 면적이 전체 피해면적의 약 50% 정도에 달해, 다른 과수에 비해 더 심한 피해를 받는 경향이 있다고 할 수 있다. 따라서 정확한 기상의 예측을 바탕으로 하여, 개화기를 정확히 예측하고, 개화기의 기상조건으로부터 저온피해의 위험도를 미리 파악하여, 적절한 대책 마련을 통해 과수농가의 피해를 줄이는 노력이 필요하다고 하겠다.

Table 1 Low temperature damages to apple, pear, and peach in 2013. (unit: ha)

Fruit crops	Cultivation area (A, ha)	Damaged area (B, ha)	Damage level (ha)			Ratio (B/A, %)
			<30%	30~50%	>50%	
Pear	14,353	4,356	1,282	2,065	1,010	30.3
Peach	14,335	2,330	614	785	931	16.3
Apple	30,274	969	285	383	301	3.2

[Source: MAFRA]

이와 같이 농촌진흥청 (이하 농진청)은 과수의 만개기를 전망하여 매년 3월 하순에 발표함으로써, 과수농가가 적절한 영농활동 등을 미리 계획하고 개화시기에 따라 저온 피해 대책을 미리 준비하도록 한다. 농진청에서 사용하는 복숭아 만개기 예측모델은 수원시험포장에서 단일품종 (유명)을 활용하여 개발한 발육속도 모델이지만, 이모형을 사용하여 전국 주요 복숭아 생산지역에 적용한다. 농진청에서 사용하는 발육속도 모델은 일평균기온을 독립변수로 사용하는 지수식형태의 함수로, 기상청장기예보의 순별 평균기온을 사용하여 일평년자료에 합산하는 방식으로 일별로 변환하여 모델에 적용한다. 그러나 이러한 단일품종을 활용한 단일모델은 품종별 특성이나 지역 특성을 제대로 반영하지 못하는 단점이 있을 수 있다. 또한, 장기예보의 자료도 단일모델보다는 다중모델을 앙상블하는 기법의 예측성이 더 좋다는 결과들이 있다. APEC Climate Center (APCC)에서는 APCC Multimodel Ensemble 계절예측자료를 다양한 응용분야에 활용하는 연구를 수행하고 있다. 예를 들어, 농업분야에서도 이미 이러한 다중모델앙상블자료를 활용하

여 싹단수를 예측하는 연구를 수행한 바 있다 (전종안, 2015).

Cesaraccio et al. (2004)가 제안한 순차휴면모형은 과수작물이 휴면을 타파하는데 필요한 저온요구량 (C_R)과 그 크기는 같고 부호가 반대인 Anti-chill day를 만족하는 시점이 발아하는 시기로 간주한다. Cesaraccio et al. (2005)은 기존의 Chill day 모형의 오류를 수정하여 발표하였으며, Chill day 모형을 개선한 New chill day 모형과 Fraction-time 모형을 제안하고 배, 복숭아 등 과수작물과 임목에 적용하여 각 모형들을 비교한 바 있다 (Cesaraccio et al., 2006). 연구결과 Cesaraccio et al. (2006)은 Fraction-time 모형이 임목 (forest tree)에서 예측성이 뛰어났다고 밝혔다. 또한, Chill day 모형은 사과작물의 발아기와 발아기때 상해 위험도를 예측하는데 활용되기도 하였다 (Farajzadeh et al., 2010). Farajzadeh et al. (2010)은 겨울이 평년보다 따뜻하면 Anti-chill day 축적이 그 만큼 빨리 이루어지기 때문에 발아가 빨라지고, 상해의 위험도는 더 커진다고 발표하였다. Kuzmanova (2015)는 Common beech 나무의 내생 휴면 및 환경휴면해제 시기를 추정하는데 Chill day 모형을 사용한 바 있다. 한편 발육속도모형은 일본에서는 Murakami et al. (2009)이 발육속도모형을 이용하여 벚꽃의 개화일을 예측하였고, 관측 개화일과 예측 개화일의 오차는 약 4일 정도라고 보고한 바 있다. Sugiura and Honjo (1997)은 일본배의 개화기를 예측하는데 지수함수모형의 발육속도 모형을 사용했으며, 발육속도모형이 RMSE가 1.23 days로 상당히 정확한 예측성을 나타냈다고 발표하였다. Sugiura et al. (1991)은 일본배의 내생휴면해제시기부터 개화기까지의 발육속도의 모형을 지수함수식으로 사용하였다. Sakamoto et al. (2015)는 일본의 밤 (Porotan)나무에 대해 기온과 내생휴면에 대한 관계를 실험을 통해서 조사하고 이를 발육속도모형을 개발하는 데 활용하였다.

국내의 유사한 연구사례를 살펴보면, 김진희 등 (2013a)은 Chill day 모형의 입력자료로 동네예보자료를 활용하여 봄꽃개화일을 예측하였으며, 벚꽃의 경우 RMSE가 2~3일정도로 그 예측성이 크다고 보고한 바 있다. 윤석규 등 (2011)은 발육속도모형을 이용하여 포도 (캠벨얼리 품종)의 발아기를 예측하였다. 이 연구에서, 발육속도식으로 선형식과 지수식 모두를 사용하였으며, 실측 발아일과의 RMSE가 4일 이하로 예측성이 있다고 하였다. 이러한 발육속도식은 선형함수모형 (Behdani et al., 2008)이나 지수함수모형 (Aono, 1993; Aono and Omoto, 1990; Omoto and Aono, 1989; Ono et al., 1988)이 주로 사용된다. 복숭아와 배에 Chill day 모형을 적용하여 미래

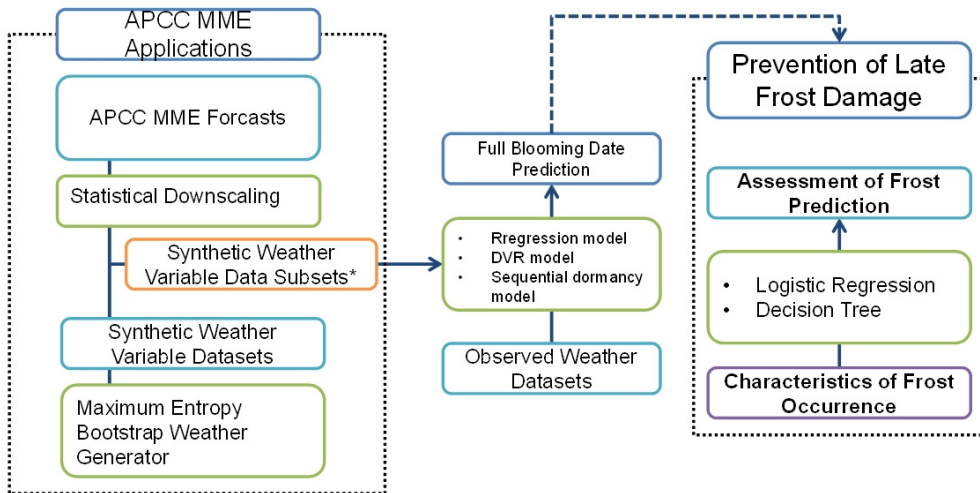
기후변화시나리오 (RCP 4.5 와 RCP 8.5)하에서 국내의 복숭아와 배의 개화일의 변화를 전망하였다 (Hur and Ahn, 2014). Hur and Ahn (2014)은 금세기 말에는 복숭아의 경우 3월말로, 배의 경우 4월 초로 개화기가 빨라질 것으로 전망하였다. 윤석규 등 (2012)은 복숭아의 유명품종의 만개기를 발육속도모형을 이용하여 예측한 바 있으며, 발육속도모형이 유명품종의 만개기를 예측하는데 유용한 모형이라고 결론내린 바 있다. 한편 회귀모형은 기상청이 벚꽃 개화일을 전망하는데 사용하는 모델로써, 장기간의 벚꽃 개화일 자료를 바탕으로 하여 개발한 모형이다. 김진희 등 (2009)는 복숭아 장호원 황도의 개화기를 기상청이 제안한 회귀모형과 발육속도모형 및 Chill day모형을 이용하여 예측하고 그 결과를 비교하였다. 김진희 등 (2009)은 발육속도모형의 RMSE가 7 days로 복숭아 개화기 예측성이 가장 떨어졌으며, 기상청 회귀모형을 적용한 모형의 RMSE는 4 days였고, Chill day 모형의 결과는 RMSE가 약 2 days로 가장 우수하였다고 발표한 바 있다.

이와 같이 발육속도모형이나 Chill day 모형과 같은 생물계절모형은 이란 등 개발도상국을 포함한 여러 지역과 다양한 작물 및 품종에 대하여 적용되어 왔다. 본 연구에서 복숭아의 만개기 관측자료를 수집하였으므로 앞으로 본 연구에서는 복숭아 만개기에 대한 예측 방법에 대해 기술하였다. 본 연구의 목적은 APCC MME 계절예측자료의 활용성을 과수원예분야로 확대하고, 품종 특성과 각 지역특성에 맞는 맞춤형 복숭아 만개기 예측 모델을 개발하여, 그 예측성을 평가하는 것이다. 모형은 크게 다중회귀모형, 발육속도모형, 순차휴면모형의 세 가지 모형으로 나누어 개발하고 적용하였다. 발육속도모형은 선형함수식과 지수함수식으로 나누어 개발하였으며, 관측 만개기와 비교하여 예측성을 평가하였다. 순차휴면모형은 다시 Chill day model, New chill day model, Fraction-time model의 3가지 모형으로 나누어 개발하였다. 순차휴면모형 중 New chill day model, Fraction-time model은 국내에 아직 적용한 사례가 없는 모형으로, 본 연구에서 국내에 처음 도입하여 모형의 적용성을 평가하였다.

- 다중회귀모형 ($Y = a + b_i X_i$)
- 발육속도모형(선형함수식: $DVR_T = A + B \times T$, 지수함수식: $DVR_T = C \times e^{(D \times T)}$)
- 순차휴면모형 (Chill day model, New chill day model, Fraction-time model)

2. 연구 자료 및 방법

Figure 4는 전체연구수행흐름도이다. 먼저 관측기상자료와 다중회귀모형, 발육속도 모형, 순차휴면모형을 사용하여 각 주산지별 및 복숭아 품종별 만개기 예측 모형을 개발하였다. 본 연구에서 개발한 다중회귀모형, 발육속도모형, 순차휴면모형에 APCC MME 계절자료를 적용하기 위해 두 가지 방법으로 통계적규모 축소를 하였다. 첫 번째는 현재 농진청이 기상청장기예보를 활용하여 만개기를 예측할 때 사용하는 방법대로 월별 APCC MME 계절자료를 순별로 통계적규모축소 (이하 예측)하는 방법이다. 두 번째 방법은 각 주요 관측지점별로 필요한 기상요소를 월별 자료로 예측하는 방법이다. 첫 번째 방법으로 얻어진 순별 기온자료는 hindcast 자료기간 (1983년부터 2005년까지)에 대한 평균값에 대한 편차 (anomaly)값을 구한 후, 일별 기후값에 가감하여 일별 기온값으로 변환하였다. 두 번째 방법으로 얻어진 월별 “예측”자료는 날씨생성기에서 생성한 합성일별 기상자료와 비교하여 가장 유사한 시계열 합성자료를 선별하였다. 본 연구에서는 Srivastav and Simonovic (2015)가 개발한 Maximum Entropy Bootstrap Weather Generator (MEBWG)라는 날씨생성기를 사용하여 합성기상자료를 생성하였다. 이와 같은 방법은 2.3 APCC MME 자료 적용에서 자세히 설명하였다.



*Bottom-up procedure: CMCC (Euro-Mediterranean Center on Climate Change)

Figure 4 Schematic of genreal research strategy in this study.

2009년에 강원 원주와 춘천에서 늦서리 피해가 보고된 바와 같이, 복숭아의 경우 개화기가 다른 과수작물에 비해 빠른 편으로 개화기에 늦서리의 피해위험이 큰 작물이다. 이러한 피해를 방지하기 위해 효과적인 방법은 Figure 5와 같이 계절자료에서 단기예측 자료의 시간적 스케일에 따라 전략적으로 준비하고 행동하는 것이다. Figure 5의 “Reday-Set-Go” 프레임워크를 본 연구에 적용하여 보면 다음 과 같다. 먼저, 본 연구에서 개발한 복숭아 만개기 예측모형으로 APCC MME 계절자료를 활용하여 복숭아 만개기를 예측한다 (Figure 5의 “Ready” 단계). 만약 복숭아 만개기가 평년보다 빠르다면 그만큼 늦서리의 위험이 커지므로 송풍팬이나 살수시설을 갖추거나 이미 시설을 갖추고 있는 과원에서는 미리 장비의 상태를 점검한다. 개화기 즈음에는 (Figure 5의 “go” 단계) 1일이나 2일정도 단기 예측 정보를 활용하여 늦서리발생을 예측하여 복숭아 재배농가가 개화기에 늦서리피해를 줄일 수 있는 대책을 미리 강구할 수 있도록 한다. 이러한 “Reday-Set-Go” 전략적인 프레임워크를 본 연구에서 적용하는 방안으로 서리 현상일에 대한 기상특성 분석을 토대로 하여 서리현상일 예측모델을 로지스틱회귀기법과 의사결정트리기법을 적용하여 개발하였고, 그 예측성을 평가하였다. 각 세부 연구내용과 연구자료 등은 다음 장에 보다 상세히 저술하였다.

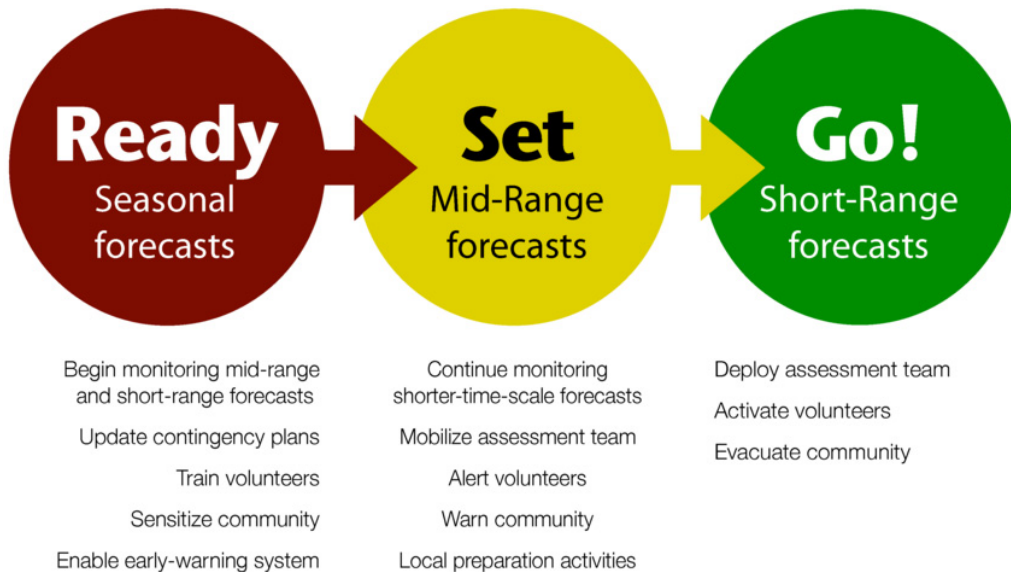


Figure 5 Schematic for ready-set-go framework (Source: Hellmuth et al, 2011).

2.1 자료수집

2.1.1 복숭아 발아기 및 만개기 자료

농진청 국립원예특작과학원 과수과로부터 복숭아 주요 7개 관측지점의 복숭아 발아기와 만개기 자료를 수집하여 Tables 2와 3에 요약하여 제시하였다. 춘천, 수원, 예산, 청원, 청원, 나주, 진주의 7개 지역에서 천홍, 유명, 창방조생, 천중도, 장호원의 5개의 품종별 발아기자료를 수집하였다 (Table 2). 예산의 경우 천홍과 유명품종에 대해 발아기가 각각 3개와 4개로 관측수가 가장 적었고, 수원의 창방조생과 유명품종에 대해 각각 17개 (1979년부터 2008년, 결측구간 존재)와 18개 (1979년부터 2011년, 결측구간 존재)의 발아기 관측자료 수집하여 가장 긴 발아기자료를 보유한 지역으로 나타났다. 한편, 가장 빠른 발아기는 청도에서 천홍품종으로 연중일 68일 (2003년 3월 9일)이었고, 가장 늦게 발아한 품종은 유명으로 수원에서 연중일 101일 (1979년 4월 11일)이었다. 만개기 관측 자료도 발아기와 매우 유사하였다 (Table 3). 예산에서 천홍과 유명품종의 만개기 관측 자료가 각각 3개와 4개였고, 수원에서는 창방조생과 유명이 각각 27개와 31개로 만개기 관측수가 가장 많았다. 지점별 품종별 만개기가 가장 빠른 경우는 연중일 89일 (2002년 3월 30일)이었으며, 가장 늦었던 시기는 연중일 122일 (2010년 5월 1일)이었다. 본 연구에서는 복숭아 발아기와 만개기 관측수가 적은 예산지점은 제외하였다.

Table 2 Observed bud-burst dates of peach trees at the 7 major observed sites.

Station	Cultivar	N [†]	MIN [‡]	MAX [§]	MEAN	STD
Chuncheon	Cheonhong	10	87	95	90.4	2.4
	Youmyeong	14	79	95	89.7	4.3
Suwon	Changbang-josaeng	17	77	101	90.4	5.1
	Cheonhong	9	82	92	88.4	3.5
	Youmyeong	18	77	101	90.7	5.1
Yesan	Cheonhong	3	97	99	97.7	1.2
	Youmyeong	4	87	99	95.0	5.4
Cheongwon	Cheonhong	6	83	98	89.8	5.1
	Youmyeong	6	89	97	92.7	3.8
Cheongdo	Cheonhong	7	68	88	80.9	7.0
	Cheonjungdo	5	86	94	89.0	3.0

Station	Cultivar	N [†]	MIN [‡]	MAX [§]	MEAN	STD [¶]
Naju	Janghowon	5	86	94	89.0	3.0
	Youmyeong	8	74	94	84.9	6.6
	Cheonhong	6	79	86	81.3	2.6
	Youmyeong	7	79	87	82.3	3.1
Jinju	Cheonhong	8	69	89	78.9	6.9
	Youmyeong	9	69	88	79.0	6.6

† Number of observed bud-burst dates

‡ The minimum of the bud-burst dates in Julian day

§ The maximum of the bud-burst dates in Julian day

¶ The standard deviation of the bud-burst dates in Julian day

Table 3 Observed full blooming dates of peach trees at the 7 major observed sites.

Station	Cultivar	N [†]	MIN [‡]	MAX [§]	MEAN	STD [¶]
Chuncheon	Cheonhong	10	102	117	112.3	4.1
	Youmyeong	17	103	122	114.1	5.3
Suwon	Changbang- josaeng	27	103	119	111.2	4.7
	Cheonhong	9	102	116	109.2	4.6
	Youmyeong	31	104	121	113.3	4.9
Yesan	Cheonhong	3	112	112	112.0	0.0
	Youmyeong	4	111	115	112.5	1.7
Cheongwon	Cheonhong	6	97	114	107.2	6.4
	Youmyeong	6	105	116	111.0	4.2
Cheongdo	Cheonhong	12	91	107	100.2	4.5
	Cheonjungdo	10	98	108	103.9	3.9
	Janghowon	9	97	108	103.8	3.9
	Youmyeong	11	98	110	103.9	4.1
Naju	Cheonhong	6	97	109	101.3	4.2
	Youmyeong	7	98	109	102.1	3.5
Jinju	Cheonhong	8	89	106	99.1	5.2
	Youmyeong	9	99	107	102.4	3.2

† Number of observed bud-burst dates

‡ The minimum of the bud-burst dates in Julian day

§ The maximum of the bud-burst dates in Julian day

¶ The standard deviation of the bud-burst dates in Julian day

2.1.2 관측 기상자료

농진청 국립원예특작과학원 과수과에서 관측하고 있는 7개지역 중 예산지역은 천홍과 유명 품종 모두 4개 이하의 관측수로 만개기 예측 모델 개발에는 관측수가 부족하여 본 연구에서는 제외하였다. 본 연구에서 개발한 복숭아 만개기 예측모델은 모두 기온을 이용하였고, 일최대기온, 일최저기온, 일평균기온은 발아기와 만개기 관측지역과 가장 가까운 종관기상관측시스템 (Automated Synoptic Observing System, ASOS)에서 수집하였다. 발아기와 만개기 관측지점과 관측지점에서 가장 가까운 ASOS표준지점을 나열하면, 각각 춘천: 춘천 (표준지점번호 101), 수원: 수원 (표준지점번호 119), 청원: 청주 (표준지점번호 131), 청도: 대구 (표준지점번호 143), 나주: 광주 (표준지점번호 156), 진주: 진주 (표준지점번호 192)이다 (Figure 6). 지점별 봄철월평균기온은 Table 4에 요약하였다. 지점별로 3월 평균기온은 약 4에서 8℃의 범위를 보였고, 4월과 5월은 각각 11℃에서 14℃와 17℃에서 19℃의 범위였다. 3월에 월평균일최저기온 중 가장 낮은 값은 -1.4℃로 춘천지점이었으며, 5월중 가장 높은 값의 월평균일최고기온은 25.4℃로 대구지점으로 나타났다.

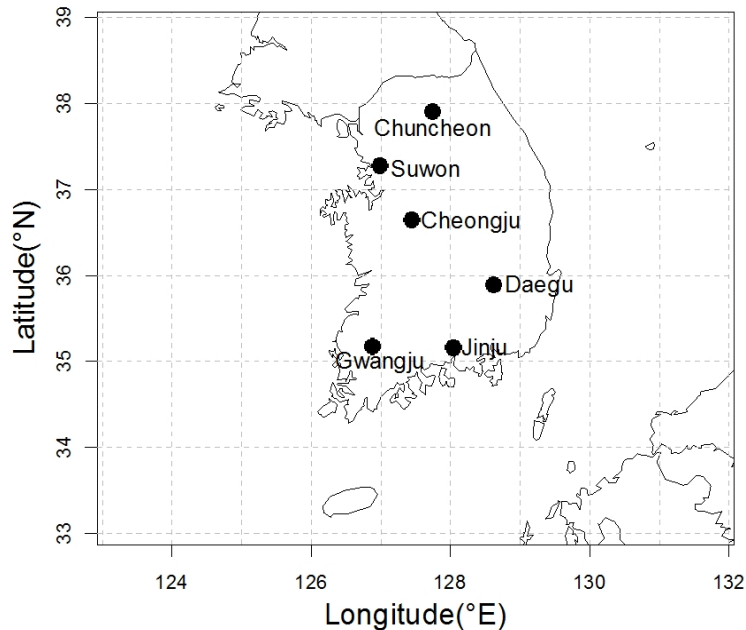


Figure 6 Location map of Automated Synoptic Observing System (ASOS) used in this study.

Table 4 Monthly mean average, maximum, and minimum temperatures in the study stations from 1983 to 2014.

Station	Month	TMEAN	TMAX	TMIN	TMEAN_sd [†]	TMAX_sd [‡]	TMIN_sd [§]
		°C					
Chuncheon	3	4.5	11.0	-1.4	1.2	1.5	1.1
	4	11.6	18.8	4.4	1.4	1.7	1.4
	5	17.3	24.1	11.0	0.8	1.1	0.8
Suwon	3	5.1	10.6	0.1	1.2	1.4	1.2
	4	11.6	17.9	6.0	1.3	1.6	1.4
	5	17.3	23.1	12.1	0.8	1.0	0.8
Cheongju	3	5.8	11.9	0.4	1.3	1.5	1.3
	4	12.7	19.5	6.3	1.4	1.5	1.6
	5	18.3	24.5	12.6	0.8	0.9	1.1
Daegu	3	7.9	13.6	2.9	1.2	1.5	1.1
	4	14.3	20.6	8.5	1.1	1.4	1.2
	5	19.2	25.4	13.6	0.8	1.0	1.0
Gwangju	3	7.0	12.9	2.1	1.2	1.4	1.1
	4	13.2	19.7	7.5	1.2	1.4	1.4
	5	18.4	24.4	13.2	0.7	0.9	0.8
Jinju	3	6.9	13.7	0.5	1.0	1.4	1.2
	4	12.7	19.8	5.9	1.1	1.3	1.4
	5	17.8	24.4	11.6	0.7	1.0	0.8

† Standard deviation of monthly mean temperature

‡ Standard deviation of monthly mean maximum temperature

§ Standard deviation of monthly mean minimum temperature

2.1.3 APCC MME 자료

현재 APCC에서 제공하고 있는 MME 자료는 hindcast 자료로 APEC 9개 회원국(한국, 미국, 일본, 중국, 러시아, 페루, 호주, 캐나다, 대만) 16개 기관의 기후예측 모델 자료를 수집하여, 자료 검증 (quality control)과정과 전처리 (표준화)과정을 거쳐, 다중모델앙상블 기법을 이용하여 계통오차를 보정하여 생산된다. 하지만, 이러한 hindcast 자료는 해상도가 2.5° (약 250-km)로, 복숭아 만개기 관측지점별 기온자료를 사용하는 본 연구에서는 너무 거친 해상도 (coarse resolution)라 할 수 있다. 그래서 본 연구에서는 APCC에서 제공하고 있는 MME 계절예측자료를 통계적인 방법을 사용하여 각 6개 복숭아

만개기 관측지점과 가장 가까운 ASOS지점별로 규모축소 (본 연구에서 사용한 통계적규모 축소방법에 대해서는 다음 장에 상세히 기술하였다)하여 사용하였다. CWB (Chinese Taipei), HMC (Russia), JMA (Japan), MSC_CANCM3 (Canada), MSC_CANCM4 (Canada), NASA (USA), NCEP (USA), PNU (Korea), POAMA (Australia)의 총 9개 모델로, 각 모델은 1983년부터 2005년까지의 기간에 hindcast자료를 보유하고 있다. 각 개별 모델의 특성은 Table 5에 요약하여 제시하였다. 본 연구에서 사용한 개별 모델들의 앙상블 평균 예측방법은 Simple Composite Method (SCM; Peng et al. 2002; Kang et al. 2009; Lee et al. 2008, 2011, 2013a, b)기법이다. 이러한 SCM기법은 가장 우수한 Multimodel Ensemble (MME)기법 중의 하나로 알려진 방법으로 현재 APCC에서 현업으로 사용 중인 여러 방법들 중의 하나이다. 앞으로 본 연구에서 사용하는 MME는 SCM 기법을 의미한다.

Table 5 Descriptions of the nine dynamical seasonal prediction models used in this study.

Model	Initialization	Ens. Size	SST Specification
CWB (Chinese Taipei)	Last 10 days(12Z) of previous month from NCEP Reanalysis version2	10	OPGSST 1.1 from CWB
HMC (Russia)	From 00hr 26 Mar. to 12hr 30Mar with 12-hour step	10	Persisted anomalies
JMA (Japan)	BGM method (9 members) and 5-day LAF	51	Predicted (One-tier method)
MSC_CANCM3 (Canada)	The CMC Global 4D-var analysis	10	Predicted (OGCM4)
MSC_CANCM4 (Canada)	The CMC Global 4D-var analysis	10	Predicted (OGCM4)
NASA (USA)	MERRA reanalysis	9	Predicted (MOM4)
NCEP (USA)	CFS data assimilation system each day at 00Z, 06Z, 12Z and 18Z	20	Predicted (GFDL MOM4 global ocean model)
PNU (Korea)	NCEP/NCAR Reanalysis 2 in AGCM, OISST data in OGCM	5	Predicted
POAMA (Australia)	Nudging to the analyses from the Australian Community Climate and Earth System Simulator	30	Predicted (ACOM2 Ocean model based on GFDL Mon2)

2.1.4 서리 현상일자료

권영아 등 (2008)은 서리 발생에 영향을 미치는 기상요소로 서리발생당일의 최저기온, 초상최저기온, 이슬점 온도, 풍속을, 서리발생전날의 평균상대습도, 최소상대습도, 운량, 서리발생전날 최고기온과 발생당일 최저기온의 기온차를 들었다. 기상청이 제공하는 서리현상일 자료는 오전과 오후로 나누어 서리발생유무를 표시하는 형태이다. 본 연구를 위해서, 기상청으로부터 위의 서리발생에 영향을 미치는 8가지 요소를 1973년부터 2014년까지 일별 자료로 수집하였다. 그러나 서리발생유무는 통계소프트웨어를 이용하여 직접 분석하기 어려운 html 형태의 문서로 제공을 받았기 때문에, 먼저 이를 분석이 용이하도록 SAS 통계소프트웨어패키지를 이용하여 데이터 베이스화하였다. 복숭아 개화기의 늦서리 피해 방지가 이 서리 현상일자료 분석의 최종 목적이므로, 서리현상일은 복숭아 만개기자료를 관측하는 7개 지점과 농진청에서 매년 복숭아 만개기를 예측하여 발표하는 지역인 원주 (원주, 표준지점번호: 114)를 추가하여 총 8개 지점에 대해 서리 현상일을 분석하고 봄철 늦서리 예측성 평가연구에 활용하였다 (Figure 7).

예를 들어, 수원지점의 경우 1973년부터 2014년까지 발생일 기준으로 총 3,764회의 서리가 발생했으며, 이를 월별로 구분하여 살펴보면 1월에 약 820여회가 발생해 가장 많은 달로 기록이 되었고, 9월은 같은 기간 동안 1회의 서리가 발생해서 최소 발생월로 나타났으며, 5월이 4회로 그 뒤를 이었다 (Figure 8a). 한편, 같은 기간 동안 춘천지점에서는 총 4,552회의 서리가 발생했고, 12월에 955회로 서리가 가장 많이 발생했으며, 1월이 953회로 관측되었다. 춘천에서도 수원지점과 마찬가지로 9월과 5월에 각각 1회와 4회 서리가 발생한 것으로 관측되었다 (Figure 8b).

서리의 경우 농작물에 직접적으로 피해를 주는 시기는 늦서리가 오는 봄철이나 첫서리가 오는 가을철로 이를 봄철 (3월에서 5월까지)과 가을철 (9월에서 11월까지) 서리발생일로 구분하여보면, 수원지점의 경우, 봄철과 가을철에 각각 792회와 690회로 관측되었고, 춘천지점의 경우에는 봄철과 가을철 모두 896회의 서리가 발생한 것으로 관측되었다. 본 연구에서는 복숭아 개화기에 피해를 주는 늦서리에 대한 봄철의 서리 현상일 예측모델을 개발을 위하여 봄철 서리현상일 기상특성을 분석하였으며, 분석결과를 요약하여 Table 6에 제시하였다. 봄철 서리현상일이 가장 많은 지점은

원주지점으로 937회 서리가 발생했으며, 봄철 서리발생회수가 가장 작은 지점은 광주지점으로 봄철에 510회 서리가 발생한 것으로 관측되었다. 지점별로 봄철서리현상일의 평균초상최저기온은 춘천지점에서 -7.4°C 로 가장 낮았고, 광주지점에서 -4.1°C 로 가장 높았다. 반면 일최저기온의 평균값은 춘천에서 -2.6°C 에서 대구지점의 약 0.0°C 로 초상최저기온과는 조금 차이가 났다. 권영아 등 (2008)은 서리현상은 일최저기온 보다 초상최저기온의 영향을 더 많이 받는다고 보고한 바 있다. 이러한 차이는 권영아 등 (2008)은 최저기온은 지면으로부터 1.2m에서 1.5m높이에서 측정하지만, 초상최저기온은 지면 30cm위에서 측정하기 때문이라고 보고하였다.

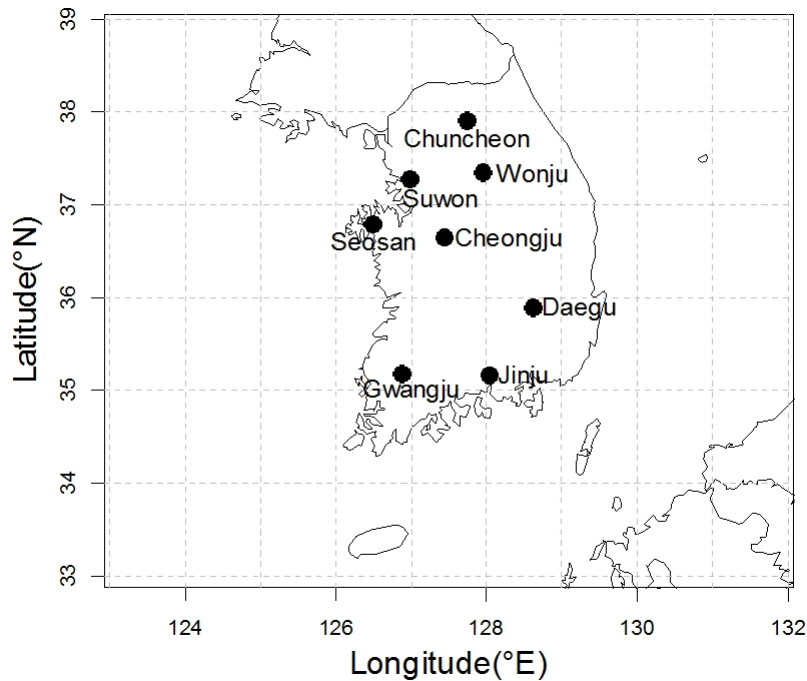


Figure 7 Location map of study sites used to analyze meteorological characteristics of frost occurrence.

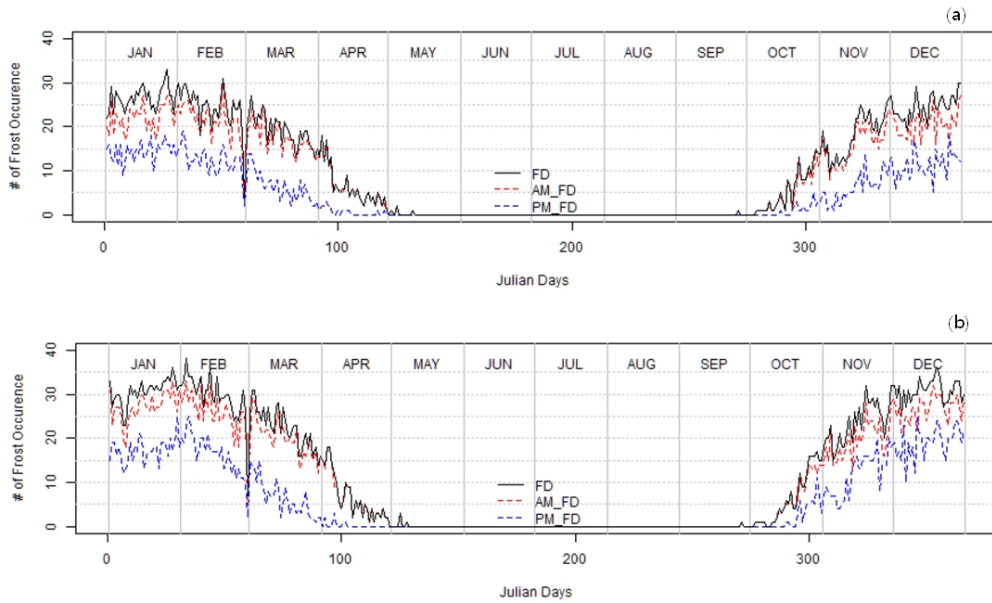


Figure 8 Number of frost occurrence events at Suwon (a) and Chuncheon stations (b).

Table 6 Meteorological characteristics of frost occurrence at the study stations in spring.

Station	Statistic	TMIN	GMINT [†]	Dewpoint	T_dif [‡]	RH_mean [§]	RH_min	Wind	Cloud
		°C				%		m s ⁻¹	%
Chuncheon	N	896	896	896	895	895	895	896	895
	MIN	-16.2	-23	-21.6	3.7	25.1	8.0	0.2	0.0
	MAX	11.8	4.7	10.9	43.2	97.8	96.0	6.0	100.0
	MEAN	-2.6	-7.4	-3.7	13.9	60.9	31.5	1.6	36.9
	STD	2.6	3.0	3.6	4.3	11.9	12.9	0.8	28.7
Wonju	N	937	937	937	936	936	936	937	936
	MIN	-13.8	-16.1	-20.3	2.4	22.3	4.0	0.2	0.0
	MAX	8.8	4.1	10.4	40.6	94.3	82.0	4.5	100.0
	MEAN	-2.2	-5.0	-3.6	13.9	59.7	29.7	1.5	39.6
	STD	3.0	3.0	4.1	4.3	11.8	13.7	0.7	30.1
Suwon	N	792	792	792	792	792	792	792	792
	MIN	-11.3	-15.7	-19.8	4.8	26.0	11.0	0.2	0.0
	MAX	6.1	2.1	6.6	36	97.3	95.0	5.5	100.0
	MEAN	-1.4	-6.7	-2.0	12.0	64.8	36.1	1.7	33.6
	STD	2.6	3.2	3.5	3.9	12.0	12.5	0.7	29.2

Station	Statistic	TMIN	GMINT [†]	Dewpoint	T_dif [‡]	RH_mean [§]	RH_min [¶]	Wind	Cloud
		°C				%		m s ⁻¹	%
Seosan	N	909	909	909	909	909	909	909	909
	MIN	-9.8	-14.8	-15.5	3.2	30.4	11.0	0.6	0.0
	MAX	5.7	0.3	6.9	37.7	97.8	91.0	7.0	100.0
	MEAN	-2.0	-6.1	-2.0	12.5	67.5	37.1	2.3	35.8
	STD	2.5	2.8	3.5	4.0	11.8	13.7	1.0	28.3
Cheongju	N	683	683	683	683	683	683	683	683
	MIN	-12	-17.4	-13.1	3.8	28.8	10.0	0.5	0.0
	MAX	5.4	0.8	5.6	38.8	96.5	93.0	5.3	100.0
	MEAN	-1.6	-6.9	-3.0	13.3	60.7	31.9	1.9	35.8
	STD	2.5	3.0	3.4	4.3	11.1	12.6	0.8	28.5
Daegu	N	167	167	167	167	167	167	167	167
	MIN	-7.3	-13.4	-13.6	5.3	25.4	11.0	0.8	0.0
	MAX	4.8	-0.4	6.4	42.4	86.8	72.0	5.8	100.0
	MEAN	0.0	-4.9	-2.4	12.7	56.1	32.3	2.5	36.4
	STD	2.2	2.5	3.4	4.7	12.1	12.5	0.9	30.0
Gwangju	N	510	510	510	509	509	509	510	509
	MIN	-10.1	-12.6	-12.2	2.9	32.3	6.0	0.5	0.0
	MAX	8.6	5.3	9.7	36.2	92.3	81.0	7.0	100.0
	MEAN	-0.4	-4.1	-2.3	12.1	61.4	33.7	2.1	35.8
	STD	2.2	2.4	3.2	4.1	11.4	12.8	0.8	27.8
JInju	N	537	537	537	537	537	537	537	537
	MIN	-10.4	-14.1	-16.5	5.3	25.0	8.0	0.4	0.0
	MAX	5.1	2.4	6.9	42.7	90.8	82.0	5.6	100.0
	MEAN	-2.2	-4.9	-2.8	15.9	56.5	26.6	1.7	29.9
	STD	2.2	2.6	3.9	4.1	13.1	12.3	0.7	27.8

† Grass minimum temperature

‡ Difference between maximum (one day before frost occurrence day) and minimum (on frost occurrence day) temperatures

§ Mean relative humidity

¶ Minimum relative humidity

2.2 복숭아 만개기 예측모델개발

2.2.1 다중회귀모형

다중선형 회귀분석은 하나의 종속변수와 두 개 이상의 독립변수의 관계를 추정하는 회귀분석으로, k개의 독립변수가 있다면 다음 식(1)와 같이 표현할 수 있다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon \quad (1)$$

여기서, y =종속변수

$\beta_0, \dots, \beta_k$ =추정되는 회귀계수

$x_1, \dots, x_k$ =k개의 독립변수

ϵ =오차

일반적으로 다중회귀모형에서는 모형의 설명력이 높은 독립변수들을 선택하는 것이 매우 중요하다. 기후요소가 식량작물의 생장 및 생산에 미치는 영향에 대한 선행연구가 많이 수행되었다 (Kwon et al., 2013; Nam et al., 2012, Chmielewski and Kohn, 2000; Ozkan and Akcaoz, 2002; You et al, 2009). 식량작물 뿐만 아니라 채소 원예작물의 생장과 기상요소와의 관계를 기상요소를 설명변수로 하는 연구를 수행 한 바 있다 (Ham et al., 2011; Lee et al., 2004; Shin, 2013). 과수작물의 경우 김미리와 김승규 (2014)는 다중회귀분석 등의 방법을 활용하여 사과생산량에 영향을 미치는 기상요소를 분석 한 바 있다. 김진희 등 (2009)은 복숭아 장호원품종에 대하여 만개기 예측에 기상청에서 사용하고 있는 회귀모형 (Jung et al., 2005)을 활용하여 Chill day 모형과 발육속도모형과 비교한 바 있다. 본 연구에서는 다음 식 (2)와 같이, 3월과 4월의 평균기온을 설명변수로 하여 복숭아 만개기를 예측하는 농진청에서 개발한 모형을 기반으로 하여, PROC REG 프로시저 (The SAS system for Windows, 9.2, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)를 사용하여 복숭아 만개기 예측모형을 개발하였다.

$$Y = a + b_i X_i \quad (i=1, 2, 3, 4) \quad (2)$$

여기서, Y =만개기, 1월1일부터 경과일수

a, b_i =추정되는 회귀계수

X_i =3월평균기온

X_2 =4월상순평균기온

X_3 =4월중순평균기온

X_4 =4월하순평균기온

복숭아 만개기자료는 관측수가 비교적 긴 자료를 가지고 있는 국립원예특작과학원의 과수원 (경기도 수원시)의 자료를 이용하였다 (Table 3). 수원시험포장의 경우, 창방조생품종이 1979년부터 2008년까지 총 27개의 만개기가 관측되었으며, 유명품종은 1979년부터 2011년까지 총 31개의 만개기자료를 수집하고 있다. 수원기상대 (표준지점번호: 119)의 기상자료를 관측자료로 활용하여 복숭아 만개기 예측모델을 개발하였으며, 교차검증 (Leave-One-Out Cross Validation)을 실시하였다.

2.2.2 발육속도모형

발육속도모델은 발육속도 (Developmental Rate)에 따라 발육단계 (Developmental Stage)를 적산하는 방법으로, 온도에 대한 작물의 발육속도 산정에 각각 선형함수모델 (Behdani et al., 2008) 이나 지수함수모델 (Aono, 1993; Aono and Omoto, 1990; Omoto and Aono, 1989; Ono et al., 1988)이 많이 사용되었다. 윤석규 등 (2011)은 발육속도모형을 활용하여 포도 캠벨얼리의 발아기를 예측한 바 있다. 윤석규 등 (2012)은 복숭아 만개기 예측을 위한 발육속도의 계산식은 선형함수식 (6)과 지수함수식 (7)을 사용하였다. 아래 식 (3)에서 (8)과 같은 발육지수와 발육속도에 대한 모형은 De Wit et al. (1970)과 Horie and Nakagawa (1990)가 과수 개화기 예측에서 활용하였던 모형이다.

$$DVI_i(\text{개화 전 발육 기간에서의 발육 지수}) = DVR_i \quad (3)$$

$$DVI_N(\text{발육시작 } N\text{일 후의 발육 지수}) = N \times DVR \quad (4)$$

$$DVR_T(\text{특정 온도에 대한 발육 속도}) = 1 \times N^{-1} \quad (5)$$

$$N^{-1}(\text{개화 소요일의 역수}) = A + B \times T \quad (6)$$

$$DVR_T(\text{대기온도 } T\text{에 대한 발육속도}) = (A + B \times T) \quad (7)$$

$$DVR_T(\text{대기 온도 } T \text{에 대한 발육속도}) = C \times e^{(D \times T)} \quad (8)$$

$$DVS(\text{발육 단계}) = \sum_{i=1}^n DVR_i \quad (9)$$

여기서, N=개화 소요일

T=일평균온도 (when $T \geq 5^\circ\text{C}$)

A, B, C, D=상수

본 연구에서는 NAAS (1990)가 사용한 방법대로 일평균온도가 5°C 이상일 때만 발육에 기여하는 것으로 하였다. 위 식 (7)과 (8)에 일평균기온이 5°C 이상일 때 일평균기온을 대입하고 계산값을 %로 표현하면 (말하자면, 100을 곱하여주면) 일평균기온이 만개기까지 도달하기까지의 백분율의 값을 정해주는 것이 된다. 이러한 식 (9)와 같이 DVR 값을 합산하여 100%에 도달하는 시기를 만개기로 정하였다. 본 연구에서는 6개 주요 복숭아 만개기 관측지점에서 각 관측 품종별 발육속도 모형을 개발하였고, 교차검증 (Leave-One-Out Cross Validation)을 실시하였다. 개발한 발육속도 모형에 APCC MME 계절자료를 대입하여, APCC MME 계절자료의 과수원예분야에 적용성을 검토하였다. 이는 앙상블계절자료를 사용하기 때문에 계절전망자료에서 오는 복숭아 만개기 예측의 불확실성을 줄일 수 있는 장점이 기대되는 자료이다. 본 연구에서는 예측시점은 현재 농진청이 복숭아 만개기를 예측하여 발표하는 3월 26일을 기준으로 하였다.

PROC REG 프로시저와 PROC NLIN 프로시저 (The SAS system for Windows, 9.2, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)가 각각 식 (7)과 같은 선형 발육속도관계식과 식 (8)과 같은 지수 발육속도관계식 개발에 사용되었다.

2.2.3 순차휴면모형

기온을 기반으로 하여 발아기를 예측하는 기법은 널리 사용되는 방법이다 (Cesaraccio, 2004). 예를 들어, Gilreath and Buchanan (1981)은 Richardson et al. (1974)이 제안한 “Utah” 모형이 작물이나 지역에 상관없이 널리 이용되고 있다고 보고한 바 있다. 내생휴면기간과 환경휴면기간의 중첩여부에 따라서, chilling and

forcing 모형을 크게 순차휴면모형 (sequential dormancy model)과 평행휴면모형 (parallel dormancy model)으로 나눌 수 있다. 순차휴면모형은 내생휴면이 끝남과 동시에 환경휴면이 시작된다고 개념적으로 가정한 모형 (Sarvas, 1974; Cannell and Smith, 1983; Hanninen, 1990; Linkosalo, 2000) 이며, 평행휴면모형은 내생 휴면기간과 환경휴면기간이 서로 중첩되어 있다고 가정하는 모형 (Hanninen, 1987, 1990; Kramer, 1994) 이다.

여러 순차휴면모형 중 Cesaraccio et al., (2004)가 제시한 Chilling and forcing 모형을 사용하여 복숭아의 발아기와 만개기를 예측하였다. 많은 연구자들이 휴면기간을 내생휴면 (rest)과 환경휴면 (quiescence)로 구분하였다 (Sarvas, 1974; Cannell and Smith, 1983; Hanninen, 1990; Linkosalo, 2000). Sarvas (1974)는 작물의 생리적 조건 때문에 휴면하는 기간을 내생휴면 (rest)이라 정의하고, 내생휴면이 해제된 후에도 환경조건이 작물생육에 알맞지 않아 작물이 계속해서 휴면상태를 유지하는 기간을 환경휴면(quiescence)라 정의하였다. 이러한 작물이 휴면을 타파하는 과정을 모델링하려는 노력이 계속되어 왔다 (Sarvas, 1972, 1974; Fuchigami et al., 1982; Cannell and Smith, 1983; Fuchigami and Nee, 1987). Chilling and forcing 모형은 냉각량 (C_d)과 가온량 (C_a)의 개념을 사용하여, 발아기를 예측하는 모형이다 (Figure 9). 적산냉각량 (일명, 휴면심도)이 저온요구도 (C_R)에 이를 때까지 꽃눈은 휴면상태를 유지하고 (내생휴면해제, breaking rest), 다시 적산가온량의 절대값이 저온요구도와 같아질 때 (환경휴면해제, overcoming quiescence) 발아하게 된다. 발아 후 개화할 때까지 적산가온량을 고온요구도 (heating requirement, H_R)라 부른다 (김진희 2013a). 본 연구에서 사용한 모형은 Figure 9와 같이 내생휴면이 끝나고 곧바로 온도가 적산이 되므로 (heating accumulation), 순차휴면모형이라 할 수 있다.

국내외 많은 연구자들은 Cesaraccio et al. (2004, 2005, 2006)이 제시한 Chill day 모형을 여러 과수작물이나 지역에 적용해 왔다. 예를 들어, Farajzadeh, et al. (2010)은 이란의 사과나무의 발아기를 추정하는데 Chill day 모형을 적용한 바 있으며, 국내에는 김진희 등 (2013b)은 기후변화시나리오에 따른 한반도 봄꽃 개화일을 전망하는 데 Chill day 모형을 사용한 바 있다. Hur and Ahn (2014)은 한반도의 기후변화시나리오별로 Chill day 모형을 사용하여 복숭아와 배의 개화시기의 변화를 전망한 바 있으며, 김진희 등 (2013a)은 우리나라의 동네예보와 Chill day 모형을 활

용하여 봄꽃 개화일을 예측하기도 하였다. 정재은과 윤진일 (2006)은 포도의 만상해 경보를 포도의 발달단계를 정확하게 예측하여 포도의 만상해 경보방법을 개선하는 연구에서 포도의 발아시기를 추정하는데 Chill day모형을 활용 한 바 있다. 정재은 등 (2005)은 벚꽃 개화일을 예측하는데 Chill day모형을 사용하였다.

이러한 저온요구도 및 고온요구도 등의 모수들은 수치해석의 방법을 활용하여 산정하였다. 먼저 기준온도 (T_c)와 저온요구도 (C_R)는 문헌을 참고하여 그 값들의 범위를 산정한 후 ($5 \leq T_c \leq 10$, $-70 \leq C_R \leq -150$), 반복법 (Iteration method)을 활용하여 관측과 예측의 발아기의 RMSE가 최소가 되는 T_c 와 C_R 의 조합을 구하였다. 각 T_c 와 C_R 의 조합으로부터 $\sum |C_d| \geq |C_R|$ 일 때 (말하자면, 냉각량을 매일 적산하여 저온요구량에 도달할 때) 내생휴면이 끝나는 시점을 추정하고, $\sum |C_a| \geq |C_R|$ 일 때 (말하자면, 고온량을 매일 적산하여 저온요구량의 절대값과 같아질 때) 발아기로 추정하였다. H_R 의 경우는 내생휴면이 끝나는 시점에서 관측 만개기 시점까지 적산고온량을 구하였고, 이를 평균한 값을 H_R 로 산정하였다.

Cesaraccio et al., (2006)는 Cesaraccio et al., (2004)에서 제시한 냉각량과 가온량 계산식 (Chill day model in Table 7)을 개선하여 New chill day model (Table 8)와 Fraction-time model (Table 9)을 제시한 바 있다. 본 연구에서는 냉각량과 가온량을 Cesaraccio et al., (2006)가 제시한 3가지 방법 (Table 7 to 9)을 모두 사용하여 계산하고, 이를 이용하여 각각 복숭아 만개기 예측 모형을 개발하고, New chill day model과 Fraction-time model은 아직 우리나라에 적용한 사례가 없는 만큼, 우리나라 복숭아 만개기 예측에 그 적용성을 평가하였다. 본 모형은 발아기자료가 모형 개발에 중요하게 사용되는 점을 고려하여 발아기와 만개기를 모두 관측하여 관측자료가 있는 해는 모형의 개발 및 보정 (말하자면, training period)에 사용하고, 만개기만 있는 해의 자료는 모형의 검증 (말하자면, validation period)에 활용하였다. 예를 들어, 수원의 경우, 창방조생품종이 만개기 자료는 총 27개이지만, 발아기 자료는 17개이다. 유명품종의 경우, 발아기와 만개기 관측수가 각각 18개와 31개로 나타났다. 따라서 수원지점의 창방조생품종의 경우 17개 자료로 모형 개발 및 보정하였고, 나머지 10개 자료로 모형을 검증하였다. 유명품종의 경우는 모형 개발 및 보정에 18개 자료를 사용하고, 모형 검증에는 13개의 자료를 사용하였다.

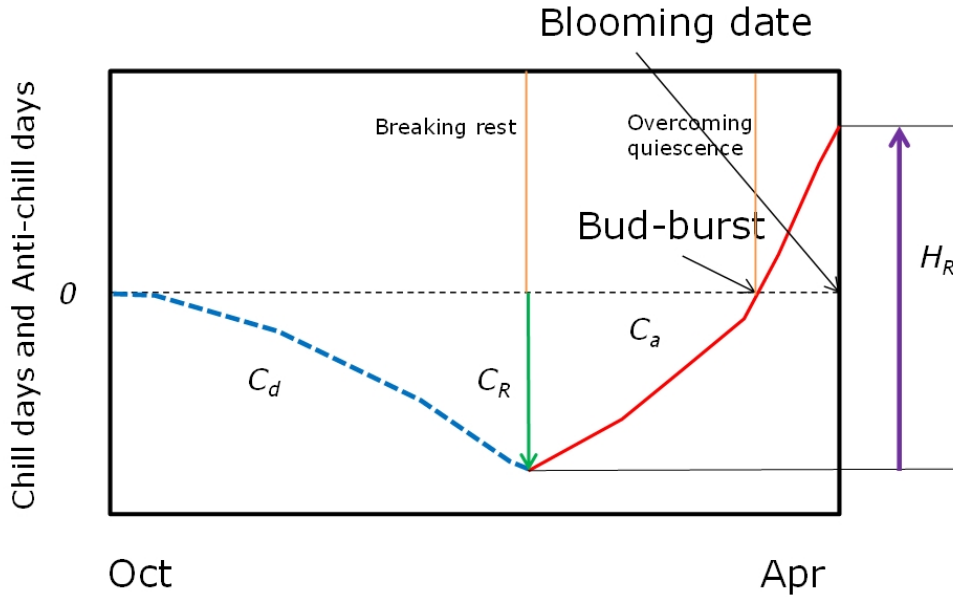


Figure 9 Conceptual diagram of chill (C_d) and anti-chill (C_a) accumulation to blooming date. C_d : Chill days, C_R : Chilling requirement, C_a : anti-chill days, H_R : Heating requirement (Adapted from "Improvement of chilling and forcing model to predict bud-burst," by Cesaraccio et al., 2006).

Table 7 Equations for the five cases of Chill day Model (Adapted from "Improvement of chilling and forcing model to predict bud-burst," by Cesaraccio et al., 2006).

Cases	Chill days	Anti-chill days
$0 \leq T_C \leq T_n \leq T_x$	$C_d = 0$	$C_a = T_M - T_C$
$0 \leq T_n \leq T_C \leq T_x$	$C_d = - \left[(T_M - T_n) - \frac{(T_x - T_C)^2}{2(T_x - T_n)} \right]$	$C_a = \frac{(T_x - T_C)^2}{2(T_x - T_n)}$
$0 \leq T_n \leq T_x \leq T_C$	$C_d = -(T_M - T_n)$	$C_a = 0$
$T_n \leq 0 \leq T_x \leq T_C$	$C_d = - \left[\frac{T_x^2}{2(T_x - T_n)} \right]$	$C_a = 0$
$T_n \leq 0 \leq T_C \leq T_x$	$C_d = - \frac{T_x^2}{2(T_x - T_n)} - \frac{(T_x - T_C)^2}{2(T_x - T_n)}$	$C_a = \frac{(T_x - T_C)^2}{2(T_x - T_n)}$

T_C : Threshold temperature, T_n : Minimum temperature, T_x : Maximum temperature,
 T_M : $(T_x + T_n)/2$, C_d : Chill days, C_R : Chilling requirement, C_a : anti-chill days

Table 8 Equations for the five cases of New Chill day Model (Adapted from “Improvement of chilling and forcing model to predict bud-burst,” by Cesaraccio et al., 2006).

Cases	Chill days	Anti-chill days
$0 \leq T_C \leq T_n \leq T_x$	$C_d = 0$	$C_a = T_M - T_C$
$0 \leq T_n \leq T_C \leq T_x$	$C_d = \frac{(T_n - T_C)^2}{2(T_n - T_x)}$	$C_a = \frac{(T_x - T_C)^2}{2(T_x - T_n)}$
$0 \leq T_n \leq T_x \leq T_C$	$C_d = T_M - T_c$	$C_a = 0$
$T_n \leq 0 \leq T_x \leq T_C$	$C_d = (T_M - T_C) - \left[\frac{T_n^2}{2(T_n - T_x)} \right]$	$C_a = 0$
$T_n \leq 0 \leq T_C \leq T_x$	$C_d = \frac{(T_n - T_C)^2}{2(T_n - T_x)} - \frac{T_n^2}{2(T_n - T_x)}$	$C_a = \frac{(T_x - T_C)^2}{2(T_x - T_n)}$

T_C : Threshold temperature, T_n : Minimum temperature, T_x : Maximum temperature,
 T_M : $(T_x + T_n)/2$, C_d : Chill days, C_R : Chilling requirement, C_a : anti-chill days

Table 9 Equations for the five cases of Fraction-Time Model (Adapted from “Improvement of chilling and forcing model to predict bud-burst,” by Cesaraccio et al., 2006).

Cases	Chill days	Anti-chill days
$0 \leq T_C \leq T_n \leq T_x$	$C_d = 0$	$C_a = 1$
$0 \leq T_n \leq T_C \leq T_x$	$C_d = -\frac{(T_C - T_n)}{(T_x - T_n)}$	$C_a = \frac{T_x - T_C}{T_x - T_n}$
$0 \leq T_n \leq T_x \leq T_C$	$C_d = -1$	$C_a = 0$
$T_n \leq 0 \leq T_x \leq T_C$	$C_d = -\frac{T_x}{T_x - T_n}$	$C_a = 0$
$T_n \leq 0 \leq T_C \leq T_x$	$C_d = -\frac{T_C}{T_x - T_n}$	$C_a = \frac{T_x - T_C}{T_x - T_n}$

T_C : Threshold temperature, T_n : Minimum temperature, T_x : Maximum temperature,
 T_M : $(T_x + T_n)/2$, C_d : Chill days, C_R : Chilling requirement, C_a : anti-chill days

2.3 APCC MME 자료 적용

2.3.1 통계적규모축소법

본 연구에서 사용한 통계적규모축소 기법은 다음 식(10)과 같은 방법으로 Kim et al. (2004)이 제안한 방법으로, 고유치분리법(Singular Value Decomposition Analysis, SDVA)와 경험적 직교함수 분석(Empirical Orthogonal Function Analysis, EOFa)를 기반으로 통계적으로 규모축소 하는 기법이다. APCC에서는 전종안 (2015)이 벼 생산성 예측에 활용하여 농업분야에 그 적용성을 검토한 바 있다.

$$E(x^*, t) = \sum_{i=1}^p \alpha_i S_i(t) R_i(x^*) \quad (10)$$

여기서, $E(x^*, t)$ =공간 x^* 와 시간 t 에서의 지역기후에 대한 추정값

$S(t)$ =광역규모 예측인자에 대한 SVD모드의 시간계수

$R(x^*)$ =지역규모의 예측변수와 지역규모 예측변수에 대한 SVD모

드의 시간계수사이의 공분산 패턴

α_i = i 번째 SVD모드의 시간계수간의 상관계수

따라서 α_i 의 값이 i 번째 SVD모드의 시간계수간의 상관계수를 나타내므로, 그 값이 1에 가까울수록 두 모드간의 연관성이 매우 크다는 것을 의미하고, 결과적으로 이 기법의 성능이 우수해지게 된다. 위 식(10)에서 필요한 모든 변수들은 광역규모의 예측인자와 지역규모의 예측변수에 대한 EOFa 및 SVDA의 분석을 통해 산정할 수 있다. 먼저 EOFa를 통해 잡음에 해당하는 모드를 제거하고, SVDA를 적용하여 결합모드를 추출한 후, 이렇게 추출한 결합 모드간의 관계로부터 광역규모 시간계수와 지역규모 분포사이의 연관성을 구한다. 이러한 연관성을 바탕으로 광역규모의 예측인자로부터 지역규모 예측변수를 산출하게 된다. 이러한 일련의 과정은 Figure 10에 제시하였다. 본 연구에서 사용한 통계적규모축소 기법은 김맹기 & 강인식 (1997)에서 보다 상세히 기술되어 있다.

본 연구에서는 월별 APCC MME 계절자료를 순별로 6개 주요 복숭아 만개기 관측 지점별 통계적규모축소하여, 일최대기온, 일최저기온, 일평균기온의 관측 편차

(Anomaly)와 비교하여 적용성을 평가하였다. 또한, 월별 기온자료로 각 6개 주요 복숭아 만개기 관측지점별로 통계적 규모축소하고 날씨생성기 (weather generator)를 활용하여 일별자료를 생성하는 방안을 적용하였다. APCC MME 계절자료를 적용할 복숭아 만개기 예측 모델은 각 6개 주요 복숭아 만개기 관측지점별 가장 우수한 모델을 선정하였다. 이는 통계적규모축소방법이 각 6개 주요지점과 가장가까운 ASOS 스테이션별로 예측자료를 추정하는 점을 고려한 것이다. 또한, 자료기간이 비교적 짧은 기간은 가능한 제외하는 방법으로 자료기간이 긴 지점을 가능한 선정하도록 하였다. 말하자면, 복숭아 만개기 관측자료수와 통계적규모축소의 예측성을 고려하여 지점 및 품종을 선정하여 APCC MME 계절자료 적용성을 평가하였다.

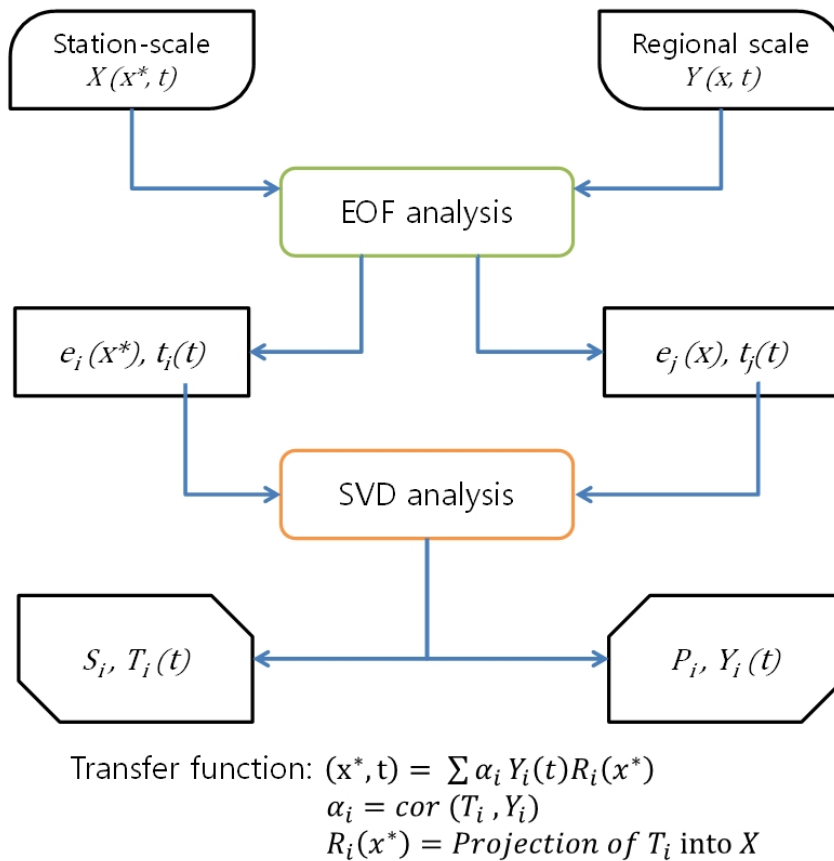


Figure 10 Schematic of the extraction of the coupled mode between large scale predictor and station scale predictand. [Adapted from "Development of regional long-range forecast technology for operational use," KMA, 2012].

2.3.2 날씨생성기 (Weather generator)

본 연구에서 개발한 복숭아 만개기 예측 모델 중 월별기온자료와 순별기온자료 사용되는 다중회귀모델을 제외하고, 발육속도모형이나 순차휴면모형은 일별기온자료가 사용된다. 그러나 APCC MME 계절자료는 월별 편차정보가 제공되기 때문에, 공간적으로 지점별 통계적 규모축소 (이하 예측)의 필요성뿐만 아니라, 시간적으로 월별자료를 순별 또는 일별로 규모축소해야 한다. 이러한 월별자료를 일별자료화 하여 사용하는 방법 중 날씨생성기 (Weather generator)를 사용하는 방법은 현업에서 주로 사용되기도 한다. 이러한 날씨생성기는 크게 모수적 날씨생성기 (parametric weather generator), 비모수적 날씨생성기 (non-parametric weather generator), 혼합형 날씨생성기 (hybrid or semi-parametric weather generator)로 나눌 수 있다 (Srivastav and Simonovic, 2015). 모수적 날씨생성기로는 WGEN (Craigmile and Guttorp, 2011), WGENK (Kuchar, 20014), generalization of Richardson 'WGEN' approach (Wilks, 1999), GEM, (Hanson and Johnson, 1998), multivariate autoregressive model (Hundecha and Bardossy, 2008), SIMMETEO (Elshamy et al., 2006), and AAFC-WG (Qian et al., 2004)등이 있다. 비모수적 날씨생성기로는 KnnCAD V1 (Sharif and Burn, 2007), KNNCAD V2 (Prodanovic and Simonovic, 2008), and k-nearest neighbors (k-NN) (Buishand and Brandsma, 2001; Rajagopalan and Lall, 1999) 등을 들 수 있으며, 혼합형 날씨생성기로는 LARS-WG (Wilby and Dawson, 2007), SDSM (Semenov and Barrow, 2002), Markov chain based k-NN model (Apipattanavis et al., 2007) 등이 널리 사용되는 모형이다. 모수적 날씨생성기는 관측기상 자료가 정규분포를 따른다는 가정에서 출발하는데, 대부분 기상자료의 분포는 이 가정을 만족하지 못하는 것으로 알려져 있다. 반면에 비모수적 날씨생성기는 관측범위를 벗어나는 자료를 생산하지 못하거나 시간적 상관성을 유지하지 못하는 단점이 있다 (Srivastav and Simonovic, 2015). 혼합형 날씨생성기 중 일반적으로 널리 활용하고 있는 LARS-WG나 SDSM의 경우 극한치를 과소추정하는 경향이 있는 것으로 알려져 있다 (Semenov, 2008).

Euro-Mediterranean Center on Climate Change (CMCC)에서는 bottom-up procedure를 적용하여 3개월 계절예측자료를 일별 및 시간별 강수나 기온자료가 필요한 물관리에 활용하고 있다 (Vezzoli et al., 2013). Bottom-up procedure는 다음

주요 4단계로 이루어져 있다.

1. 날씨생성기를 이용하여 여러 지점의 강수 시계열 생성
2. 생성한 강수 시계열을 계절자료의 시간스케일인 3개월자료로 종합
3. 날씨생성기로부터 3개월 종합한 자료 중 유역스케일에서 계절자료 유사한 자료 선정 (global criteria)
4. 3번에서 선정한 자료 중 각 지점별로 총 강수량이 계절예측자료의 80%이상인 자료를 최종 선정 (local criteria)

본 연구에서는 CMCC가 사용한 bottom-up procedure와 유사한 방법을 적용하였다. 먼저 Maximum Entropy Bootstrap Weather Generator (MEBWG)을 이용하여 주요 복숭아 만개기 관측지점별로 일평균기온, 일최고기온, 일최저기온을 각 지점별 관측기간을 고려하여 생성하였다. 각 기온 시계열을 월별로 종합한 후, APCC MME 계절자료로부터 각 지점별로 통계적으로 규모축소 한 기온자료와 유사한 시계열을 선정하였다. 따라서 이렇게 선별된 합성 기온자료는 월별로 종합했을 때 통계적 규모 축소하여 예측한 월별 기온자료와 유사하게 된다. 선별된 합성 기온자료가 최종적으로 각 복숭아 만개기 예측 모형에 입력변수로 사용된다. Figure 11은 본 연구에서 사용한 MEBWG의 대략적인 흐름도 (flow chart)이다. MEBWG는 전처리과정으로 관측자료 (본 연구에서는 일별 기온자료)를 직교변환 (Orthogonal transformation)하고, 이를 R software package중 MEboot package (Vinod and L'opez-de-Lacalle, 2009)를 이용하여 replicates을 생성한다. 마지막으로 이들 replicates을 역변환 (inverse transformation)하여 원자료와 동일한 형태로 변환하는 후처리과정 등 크게 3단계로 나눌 수 있다. MEBWG는 maximum entropy bootstrap (MEB)를 이용해서 관측자료의 시간-종속적 구조와 기타 통계적 특성을 추출해내고, 직교함수법은 여러 지점의 각 기상변수들 간의 공간적 상관성을 추출하게 된다. Srivastav and Simonovic (2014)는 maximum entropy bootstrapping을 활용하여 다중지점 및 시·공간 하천유량을 합성한 바 있다.

MEBWG 날씨생성기는 여러 지점별 다중기상자료를 각 지점 및 각 기상자료간의 상관성을 나타내도록 생성해주는 장점이 있다. 이러한 시·공간적 상관성을 유지해줄

뿐만 아니라 일별자료의 다른 통계적 특성을 잘 유지시켜준다 (Srivastav and Simonovic, 2015). 따라서 본 연구에서는 주요 6개의 복숭아 만개기 관측지점뿐만 아니라 주요 관측지점의 주변 ASOS관측지점간의 상관성을 고려하고 각 기상자료간의 상관성을 고려하도록 하기위해 Table 10과 같이 기상청 (기상청, 2012)에서 구분한 우리나라를 10개 권역으로 나누어서 MEBWG를 구동하였다. 예를 들어 제 1권역에서는 수원 (표준지점번호 119)관측지점의 경우, 서울 (표준관측지점 108), 인천 (표준관측지점 112), 강화 (표준관측지점 201), 양평 (표준관측지점 202), 이천 (표준관측지점 203) 등의 제 1권역내의 다른 ASOS 관측지점과의 상관성을 고려하여 기상정보가 생성된다. 이는 한반도 전체 60여개의 ASOS관측지점에 MEBWG를 구동할 경우 컴퓨터리소스나 구동시간 등의 제약이 있을 가능성을 고려한 결정이다.

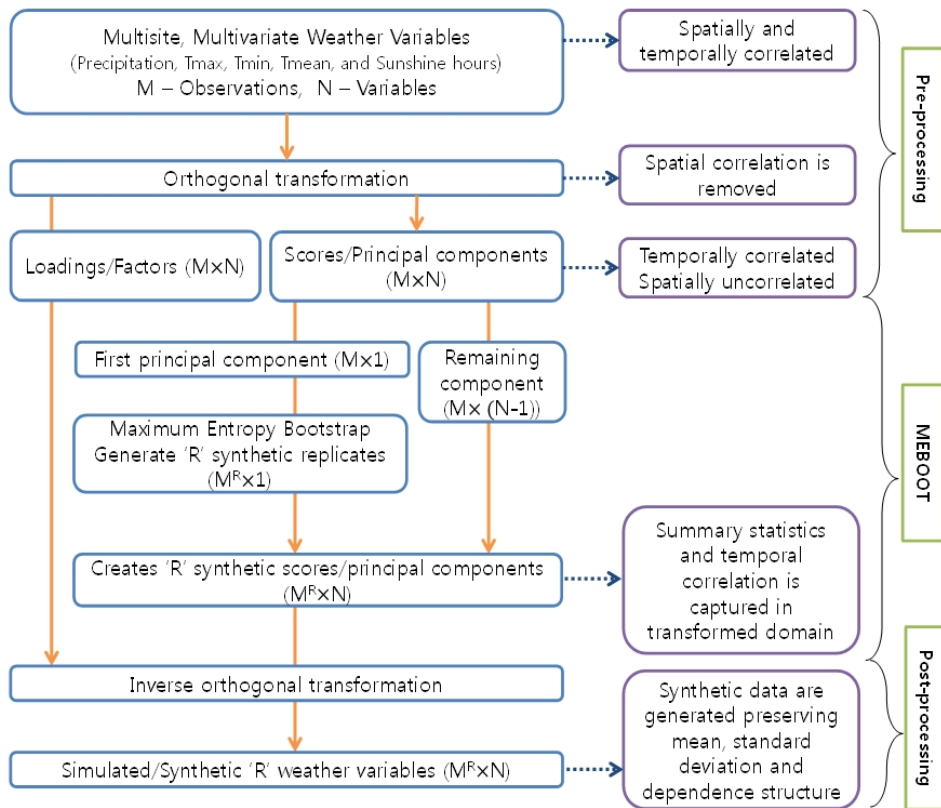


Figure 11 Schematic of Maximum Entropy Bootstrap Weather Generator [Adapted from “Muti-site multivariate weather generator using maximum entropy bootstrap,” by Srivastav and Simonovic, 2015].

Table 10 Local areas and stations belonging to 10 regions in Korea [Adapted from “Development of regional long-range forecasts technology for operational use,” KMA, 2012].

Region	Local	Station	Number of station
1	Seoul, Incheon, Gyeonggi	Seoul(108), Incheon(112), Suwon(119), Ganghwa(201), Yangpyeong(202), Icheon(203)	6
2	Gangwon Yeongseo	Chuncheon(101), Wonju(114), Inje(211), Hongcheon(212)	4
3	Gangwon Yeongdong	Sokcho(90), Daegwanryeong(100), Gangneung(105)	3
4	Daejeon, Chungnam	Seosan(129), Daejeon(133), Cheonan(232), Boryeong(235), Buyeo(236), Geumsan(238)	6
5	Chungbuk	Chungju(127), Cheongju(131), Jecheon(221), Boeun(226), Chupungryeong(135)	5
6	Gwangju, Jeonnam	Gwangju(156), Mokpo(165), Yeosu(168), Wando(170), Suncheon(256), Jangheung(260), Haenam(261), Goheung(262)	8
7	Jeonbuk	Gunsan(140), Jeonju(146), Buan(243), Imsil(244), Jeongeup(245), Namwon(247)	6
8	Busan, Ulsan, Gyeongnam	Ulsan(152), Busan(159), Tongyeong(162), Jinju(192), Geochang(284), Hapcheon(285), Milyang(288), Sancheong(289), Geoje(294), Namhae(295)	10
9	Daegu, Gyeongbuk	Ulsan(152), Pohang(138), Daegu(143), Yeongju(272), Mungyeong(273), Yeongdeok(277), Uiseong(278), Gumi(279), Yeongcheon(281)	9
10	Jeju	Jeju(184), Seongsan(188), Seogwipo(189)	3

2.4 봄철 서리현상일 예측모델개발

봄철 늦서리는 농작물에 자주 피해를 주기도 한다. 특히 복숭아의 경우 개화기가 다른 과수작물보다도 이른 편이어서 늦서리의 위험은 그만큼 더 크다고 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 봄철 (3월, 4월, 5월)에 발생하는 서리 현상일 만을 대상으로 서리 현상일에 대한 특성분석을 기반으로 하여 로지스틱 회귀 (Logistic regression)과 의사결정트리 (Decision tree) 기법을 적용하여 서리 현상일의 예측모델을 개발하고 예측성을 평가하였다. 개발한 예측모델은 Leave-One-Out Cross Validation 기법으로 교차검증을 실시하였다. 모형은 복숭아 만개기 관측지점 (이 경우 서산을 포함해

서 7개)과 농진청에서 복숭아 만개기 예측자료를 발표하는 원주 (표준지점번호 114)를 포함해서 총 8개 지점에 대해 수행하였다. 설명변수로는 권영아 등 (2008)이 서리발생에 영향을 미치는 기상요소로 제시한 서리발생당일의 최저기온, 초상최저기온, 이슬점 온도, 풍속을, 서리발생전날의 평균상대습도, 최소상대습도, 운량, 서리발생전날 최고기온과 발생당일 최저기온의 기온차를 사용하였다.

2.4.1 로지스틱 회귀 (Logistic Regression)

이항변수인 서리발생유무(Y)와 양적 설명변수인 기상변수들을 이용하여 이범주 로지스틱 회귀모델링을 수행하였다. 서리가 발생할 확률을 $\pi(x_i)$ 이라고 하면, 로지스틱회귀함수는 다음 식(11)과 같이 표현 할 수 있다.

$$\text{logit} [\pi(x_i)] = \alpha + \beta' x_i \quad (11)$$

추정한 이범주 로지스틱 회귀모델로 서리발생에 대한 확률예보(probability forecast)를 생성한다. x_i 가 서리발생유무를 나타내는 0과 1로 이항값을 가질 확률을 구하는 식은 다음과 같다.

$$P(Y=0) = 1 - P(Y=1) \quad (12)$$

$$P(Y=1) = \frac{\exp(\alpha_0 + \beta' x_i)}{1 + \exp(\alpha_0 + \beta' x_i)} \quad (13)$$

식(12)은 ‘서리발생하지 않음’이 될 확률이고 식(13)은 x_i 가 ‘서리발생’일 확률이다. 구해진 각각의 확률 중 큰 값으로 추정치를 구한다.

식 (13)에서 $\alpha_0 + \beta' x_i$ 의 각 상수 (말하자면, α_0 , β')는 권영아 등 (2008)의 연구를 바탕으로 한 서리현상일의 기상특성을 분석하여 가장 관련이 깊은 8개 변수를 이용하였으며, R 소프트웨어 패키지의 일반화선형모형 (Generalized Linear Model)사 용하여 (R 소프트웨어 패키지의 glm() 함수) 로지스틱 회귀분석을 수행하였다. 우선 위의 8개 설명변수를 모두 사용하여 로지스틱 회귀분석을 실시 한 후 결과에서 각 설명변수의 유의성을 파악하여, 설명변수들 중에서 유의수준 0.05에서 가장 유의하지 않는 설명변수를 하나씩 제외하는 방법으로 모든 독립변수들이 유의수준 0.05에서

유의할 때까지 반복하여 수행하였다.

2.4.2 의사결정트리 (Decision Tree)

관측 범주와 예측인자를 이용하여 의사결정트리 모델을 수행하였다. 반응변수가 이산형인 경우에는 반응변수의 각 범주에 속하는 빈도에 기초하여 분리가 일어나며, 본 연구에서는 엔트로피 지수(entropy index)를 분리기준으로 사용하였다.

$$E = - \sum_{j=1}^3 (n_{+j} / n_{++}) \log_2 (n_{+j} / n_{++}) \quad (14)$$

$$E_L = - \sum_{j=1}^3 (n_{1j} / n_{1+}) \log_2 (n_{1j} / n_{1+}) \quad (15)$$

$$E_R = - \sum_{j=1}^3 (n_{2j} / n_{2+}) \log_2 (n_{2j} / n_{2+}) \quad (16)$$

$$E_D = E - (n_{1+} / n_{++}) \times E_L - (n_{2+} / n_{++}) \times E_R \quad (17)$$

여기서 E 는 부모마디의 엔트로피 지수, E_L 은 왼쪽 마디의 엔트로피 지수, E_R 은 오른쪽 마디의 엔트로피 지수, E_D 엔트로피 지수의 감소량이다. 의사결정트리 모델은 분류기준을 통해 예측치에 대한 범주를 구분할 수 있으며, 모델 적합을 통해 확률 예측치를 얻을 수 있다. 각각의 확률을 추정하여, 추정치 중 최대가 되는 범주를 예보 범주로 결정하였다.

2.4.3 검증

이 범주 예측 결과를 비교하여 최적 모형을 범주 예측모형으로 제안하고자 하였다. 예측 결과는 2×2 분할표 (Table 11)로 요약한 후, 예측성 평가측도(skill score)인 정분류율(Hit Rate, HR), 탐지확률(Probability of Detection, POD), 허위경고율(False Alarm Rate, FAR)을 구하여 비교하였다.

$$HR = \frac{A + D}{A + B + C + D} \quad (18)$$

$$POD = \frac{A}{A + C} \quad (19)$$

$$FAR = \frac{B}{A + B} \quad (20)$$

일반적으로 서리가 “발생”하는 경우와 “발생하지않음”의 두 가지 모든 경우에 잘 맞춰야 좋은 예측모형이라 할 수 있다. 그러나 서리는 “발생”인 경우의 피해가 “발생하지않음”의 경우보다 크므로 “발생”의 경우를 더욱 중요시하게 된다. 서리일수 경우 “발생하지않음”의 발생율이 크기 때문에 언제나 “발생하지않음”이라고 예보하는 경우 HR이 높게 나타나지만, “발생”을 예측하지 못하는 큰 문제가 있다. POD는 관측범주가 “발생”인 경우 “발생하지않음”이라고 예측한 비율이므로 “발생”에 중점을 둔 척도이다. 그러나 언제나 “발생하지않음”이라고 예보한다면 POD는 최대값인 1을 갖지만 FAR도 1이 되어 예측모형으로 사용할 수 없다. FAR은 예보관이 “발생”이라고 예보한 경우에 허위경고율이므로 FAR이 작을수록 좋은 모형이 된다. 따라서 본 연구에서는 예측모형의 결과가 HR과 POD는 가능한 크고 동시에 FAR은 가능한 작은 결과를 보이는 예측모형을 선택하였다.

Table 11 Two-dimensional (2×2) contingency table.

Observation	Forecast		Total
	No frost	Frost occurrence	
No frost	D (negative correction)	B (false alarm)	B + D
Frost occurrence	C (miss)	A (hit)	A + C
Total	C + D	A + B	A + B + C + D

본 연구에서는 개발한 로지스틱회귀모형과 의사결정트리모형은 Leave-One-Out Cross Validation기법을 적용하여 교차검증을 수행하였다. 교차검증의 결과도 위 Table 11의 2×2 분할표로 요약하여 정분류율 (HR), 탐지확률 (POD), 허위경고율 (FAR)을 구하고, 전체자료 사용 경우와 비교하여 모형의 안정성을 판단하였다.

3. 연구결과 및 토의

3.1 복숭아 만개기 예측모델개발

3.1.1 다중회귀모형

다중회귀모형의 결과를 요약하여 Table 12에 제시하였다. 일반적으로 분산팽창지수 (Variance Inflation Factor, VIF)가 10이상이면 다중공선성 문제를 발생시킨다고 판단 하는데, 청도 (대구, 표준지점번호 156) 관측지점에서 4월 상순과 중순의 VIF가 10이상으로 다중공선성 문제가 있는 지점으로 나타났다. 청도 관측지점을 제외하고는 분산팽창지수가 1에서 2사이에 분포하여 다중공선성문제가 발생하지 않는 것으로 나타났다. 다만, 모형에 적합 (fitting) 시킨 설명변수들의 p-value가 대개 0.1보다도 커 유의하지 않은 것으로 나타났다. 수정결정계수 (Adjusted R^2 values)를 살펴보면, 청원 (청주, 표준지점번호 131)에서 천홍품종과 유명품종 모두 0.9 이상으로 가장 높은 값을 보였으나, 수원, 청도, 진주에서 음의 수정결정계수를 보이는 등 일반적으로 설명변수의 모형설명력이 매우 낮았다. Intercept의 경우 관측지점이나 품종별로 약 104에서 232까지의 값을 보였고, 3월평균기온 변수(X_1)의 계수의 경우 -8.5에서 -1.1의 범위를 보였다. 4월 순별기온의 계수의 경우는 4월 상순 (X_2), 4월 중순 (X_3), 4월 하순 (X_4)가 각각 -3.85에서 0.45, -2.2에서 0.1, -1.4에서 1.1 정도의 범위를 보였다.

비교적 복숭아 만개기 관측자료가 긴 수원지점의 유명품종과 창방조생품종에 대해 교차검증을 실시하여 Figure 12에 묘사하였다. 유명품종의 경우 관측 만개기와 교차 검증에 의한 만개기 예측결과와 차이는 최대 5일 (5일 늦게 예측) 이었으며, 창방조생품종의 경우에는 최대 7일 (7일 빠르게 예측) 이었다. Figure 12a와 12b에서와 같이 유명과 창방조생품종의 예측치가 2005년 과 2006년 일에 모두 관측치보다 약 4에서 7일 정도 빠르게 예측이 되었다. 이는 수원지점에서 평년 만개기 4월 23일보다 약 4일에서 5일정도 늦게 관측되었기 때문으로 판단된다.

현재, 농진청에서도 복숭아 만개기를 예측하는데 다중회귀모형은 더 이상 사용하지 않고 있으며, 본 연구의 결과에서도 낮은 수정결정계수를 보이는 등의 모형을 제대로 설명한다고 볼 수 없었다. 따라서 다중회귀모형은 본 연구의 목적인 각 지역별

품종별 맞춤형 복숭아 만개기 예측모형으로는 적합하지 않는 것으로 판단하였다.

Table 12 Fitted parameters of the prediction models of the full blooming dates using a multi-linear regression model

Station	Cultivar	Adjusted R^2	Intercept	$b_1^\dagger$	$b_2^\ddagger$	$b_3^\S$	$b_4^\P$
Chuncheon	Cheonhong	0.61	147.70	-2.825	-0.820	-0.394	-0.637
	Youmyeong	0.73	148.52	-2.593	-0.886	-0.640	-0.439
Suwon	Changbang- josaeng	0.38	139.29	-1.132	-0.476	-0.844	-0.585
	Cheonhong	-0.07	174.66	-2.856	-1.832	-1.505	-0.946
	Youmyeong	0.64	146.17	-1.458	-0.674	-1.157	-0.440
Cheongju	Cheonhong	0.91	177.75	-4.738	-0.818	-1.895	-0.332
	Youmyeong	0.95	171.35	-1.298	-1.255	-2.196	-0.691
Daegu	Cheonhong	-0.06	104.81	-2.296	0.453	0.099	0.467
	Youmyeong	0.02	125.39	-1.987	-0.696	-0.401	0.609
	Cheonhong	-0.34	119.61	-2.048	-0.175	-0.112	0.302
	Cheonjungdo	0.41	139.81	-2.938	0.027	-0.651	-0.184
Gwangju	Janghowon	0.85	232.22	-8.503	-3.863	-0.377	-1.414
	Youmyeong	0.27	111.44	-2.332	-0.431	-0.324	1.084
Jinju	Cheonhong	0.28	147.75	-4.473	-1.924	0.016	0.375
	Youmyeong	-0.18	110.29	-1.396	0.233	-1.072	0.912

† 식 (2)의 X1(3월평균기온)의 계수

‡ 식 (2)의 X2(4월상순평균기온)의 계수

§ 식 (2)의 X3(4월중순평균기온)의 계수

¶ 식 (2)의 X4(4월하순평균기온)의 계수

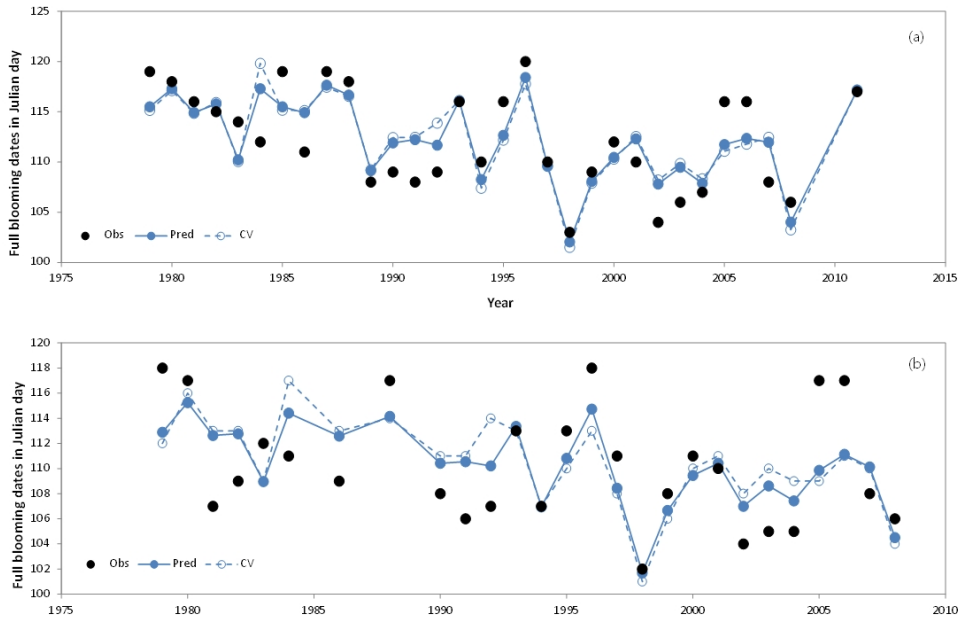


Figure 12 Observed and predicted full blooming dates for Youmyeong (a) and Chagbanjosaeng (b) at the Suwon site. Obs: observed full blooming dates, Pred: predicted full blooming dates, and CV: results from the Leave-One-Out cross validation.

3.1.2 발육속도모형

각 복숭아 주요 6개 만개기 관측지점에 대한 개화 소요일 및 5°C 이상인 날의 일평균기온을 요약하였다 (Table 13). 사과 나 복숭아 등의 주요 과수작물에서 기온이 5°C이하일 때는 발육이 멈추는 것 (말하자면, DVR=0)으로 가정하므로 (NAAS, 1990), 5°C이상인 날만 발육에 기여하는 것으로 하여 개화 소요일을 산정하였다. 이렇게 산정한 개화 소요일은 진주 관측지점 (192)에서 천홍품종이 약 36.1일로 최소의 값을 보였고, 청도 관측지점 (143)에서 천중도품종이 약 44.5일고 가장 큰 값을 보였다. 개화에 기여한 날의 일평균기온은 약 9.1°C에서 10.4°C의 범위로 나타났다. 그러나 본 연구에서 산정한 개화소요일과 개화에 기여한 날의 일평균기온은 수원관측지점의 창방조생이나 유명품종을 제외하고는 관측개수가 상대적으로 길지 않으므로 향후 복숭아 만개기를 지속적으로 관측하여 자료를 보강하여할 할 것이다.

본 연구에서는 발육속도모형은 윤석규 등 (2012)에서 사용한 선형함수식 (식 (7))과 지수함수식 (식 (8))을 사용하였고, 각 지점 및 품종별로 적합시킨 상수 (말하자

면, 식 (7)과 (8)의 A, B, C, D)를 Table 14와 Table 15에 제시하였다. 대부분의 지역에서 선형함수식은 유의하지 (유의수준: 0.05) 않은 것으로 나타났다. 수원지점의 유명품종의 경우 모형은 유의수준 0.001에서 유의한 것으로 나타났으나 식 (7)의 A (말하자면 intercept)는 p-value가 약 0.3으로 유의하지 않았고, 창방조생품종의 경우에도 유사한 결과를 보였다. 청도지점의 유명품종의 경우 전체 모형은 유의수준 0.05에서 유의한 것으로 나타났으나, intercept는 유의하지 (p-value: 0.74) 않았다. 각 지점 및 품종별 선형함수식에 대한 수정결정계수의 경우도 약 0.4 미만의 매우 낮은 값을 보여, 모형의 설명력이 매우 낮은 것으로 드러났다. 특히, 청도 관측지점의 천홍품종, 나주 관측지점의 유명품종, 진주 관측지점의 천홍 및 유명품종에 대해서는 음의 수정결정계수를 보였다. 본 연구에서는 모형의 설명력이 낮은 선형함수식은 사용하지 않기로 하였다. 그러나 이러한 결과는 윤석규 등 (2012)이 수원 관측지점의 유명품종에 대해 선형함수식의 적합 시킨 결과에서 결정계수가 약 0.72로 높은 값을 보인 것과는 다른 결과이다.

식 (8)과 같이 지수함수식에 적합시킨 상수 (C 와 D)들과 각각 95% 신뢰구간의 상한과 하한 값을 정리하여 Table 15제시하였다. 식 (8)의 C의 적합값 (fitted value)은 청원 관측지점의 유명품종이 0.002로 가장 작은 값을 보였고, 청도 관측지점의 천홍품종이 0.03으로 가장 큰 값을 보였다. D의 적합값의 경우에는 청도 관측지점의 천홍품종이 -0.02로 음의 값을 보여 다른 지점과 품종이 양의 값을 보인 것과 매우 달랐으며, 수원 관측지점에서 품종에 관계없이 0.1이상의 큰값을 보였다. 청원 관측지점과 청도 관측지점에서는 품종별로 C와 D의 적합값이 매우 상이했으나, 다른 관측지점에서는 품종별로 그 차이가 크지 않았다. 이렇게 각 C와 D의 적합값이 품종과 지역별로 다소 차이가 나는데, 이는 각 지역 및 품종별로 맞춤형 모형 개발이 필요함을 보여준다 하겠다. 수원 관측지점의 유명품종의 C와 D의 적합값은 각각 0.007과 0.138로 윤석규 등 (2012)의 연구결과의 0.0062와 0.1512와 매우 유사한 값을 보였다. 적합값의 다소 차이가 보이는 이유는 윤석규 등 (2012)의 연구에서는 총 만개기 관측개수에서 복숭아 만개기의 최대값과 최소값을 포함한 15개의 관측값 만을 선정하여 모형을 적합 시켰기 때문인 것으로 판단된다.

위와 같이 복숭아 만개기 예측을 위한 발육속도모형은 식 (8)과 같은 지수함수식이 더 적합한 것으로 나타났다. 본 연구에서는 각 지점 및 품종별 지수함수식 발육속도

모형에 대해 Leave-One-Out cross validation 기법을 활용하여 교차검증을 실시하여, 식 (8)의 C와 D의 적합값의 안정성을 평가하였다. 각 지점 및 품종별 교차검증의 결과는 Figure 13에서 Figure 18까지에 제시하였다. 청원 관측지점의 천홍품종 (상수 D)과 청도 관측지점의 장호원품종 (상수 C와 D), 진주 관측지점의 천홍품종 (상수 C)을 제외하고는 교차검증에 의해 상수 C와 D의 적합값은 모두 95% 신뢰구간에 내에 있어, 복숭아 만개기 예측을 위한 지수함수식 발육속도모형은 대체로 안정적인 모형이라 할 수 있다. 위의 청원, 청도, 진주 관측지점은 복숭아 만개기 관측수가 상대적으로 작은 지점으로, 향후 복숭아 만개기에 대한 관측을 지속적으로 실시하여 관측 자료수를 보강하여 모형 개발에 활용해야 할 것으로 보인다.

식 (8)과 같이 지수함수식 발육속도모형으로 각 지점 및 품종별 만개기 예측모형을 개발하여 관측지점의 일평균기온을 사용하여 복숭아 만개기를 예측하여 Figure 19에 나타냈다. Figure 19에서 보이는 바와 같이, 복숭아 만개기는 품종별의 차이보다는 각 지점별 차이가 더 컸다. 춘천 관측지점 (Figure 19a)과 수원 관측지점 (Figure 19b)의 만개기보다 청원 관측지점 (Figure 19c)과 청도 관측지점 (Figure 19d)의 만개기가 더 빠른 경향을 보였고, 나주 관측지점 (Figure 19e)과 진주 관측지점 (Figure 19f)에서는 다른 지점보다 빠르게 복숭아꽃이 만개하는 것으로 관측되었다. 청원 관측지점의 유명품종의 경우에는 발육속도모형이 대체로 관측 만개기보다 일찍 만개하는 경로 예측하는 것으로 나타났다.

본 연구에서 개발한 지수함수식 발육속도모형을 평가하기 위해 다음 식(21)의 평균 절대오차백분율 (MAPE, Mean Absolute Percentage Error), 결정계수 (R^2), 평균제곱근오차 (Root Mean Square Error, RMSE) 지표를 이용하였으며, Table 16에 요약하여 제시하였다.

$$MAPE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{O_i - P_i}{O_i} \right| \quad (21)$$

여기서, N =샘플수

O_i = i 번째 관측값

P_i = i 번째 모의값

각각의 지표들은 각 지점별 품종별, 지점별, 전체자료 세 가지로 나누어 산정하였다. 청원 관측지점의 유명품종의 경우 평균절대오차백분율이 5.2%로 가장 컸으며, 나주 관측지점의 천홍품종이 약 0.5%로 가장 작은 평균절대오차백분율의 값을 보였다. 결정계수는 나주지점의 천홍품종의 경우 0.96으로 가장 높았으며, 진주지점의 유명품종이 0.25로 가장 낮은 결정계수를 보였다. RMSE의 경우 0.91 day (나주지점의 천홍품종)에서 6.31 day (청원지점의 유명품종)의 범위였다. 지점별로 각 지표들을 살펴보면, 청원지점이 가장 예측성이 낮은 지점으로 나타났으며, 나주지점이 가장 예측성이 좋은 지점이었다. 각 지점과 품종 구분 없이 전체 관측자료에 대한 지표들은 MAPE, R^2 , RMSE가 각각 2.58%, 0.75, 3.65 day로 나타났다. 전체적으로 RMSE가 4일 이내의 값을 보인바와 같이 본 연구에서 개발한 발육속도모형이 관측치의 범위 안에서 예측을 하고 있다고 볼 수 있다. 이러한 예측의 오차는 모형이 일평균기온으로만 구성이 되어 있어, 토양온도와 같은 다른 환경요소들을 고려하지 못하는 한계와 복숭아 만개기 관측지점과 기온의 관측지점이 서로 다른 데서 오는 오차 등에 기인하는 것으로 판단된다. 향후, 다양한 환경요소를 고려할 수 있는 모형개발연구가 필요하다고 할 수 있겠다.

Table 13 Number of days higher than 5°C (req_N), Average air temperature when daily temperature is higher than 5°C from Jan. 30 to full blooming dates (Tmean), and number of observations (N).

Station	Cultivar	Variable	Observation	MIN	MAX	MEAN	STD
Chuncheon	Cheonhong	req_N	10	33	44	39.1	3.4
		Tmean	10	8.9	10.3	9.6	0.5
	Youmyeong	req_N	17	33	45	39.1	4.2
		Tmean	17	8.4	11.2	9.7	0.7
Suwon	Changbang- josaeng	req_N	27	23	48	37.9	6.2
		Tmean	27	8.0	10.6	9.3	0.7
	Cheonhong	req_N	9	28	47	38.2	5.9
		Tmean	9	8.7	9.9	9.4	0.4
	Youmyeong	req_N	31	24	47	39.5	5.4
		Tmean	31	8.6	11.4	9.5	0.7
Cheongju	Cheonhong	req_N	6	37	48	42.2	4.4
		Tmean	6	9.4	10.9	9.9	0.6
	Youmyeong	req_N	6	36	52	44.3	6.0
		Tmean	6	9.7	10.7	9.9	0.4
Daegu	Cheonhong	req_N	12	35	48	40.8	4.0
		Tmean	12	9.0	11.3	10.1	0.6
	Youmyeong	req_N	10	39	49	44.5	3.7
		Tmean	10	9.4	11.8	10.4	0.7
	Cheonhong	req_N	9	38	49	44.3	3.5
		Tmean	9	9.3	11.6	10.2	0.6
	Cheonjungdo	req_N	11	37	50	43.9	4.2
		Tmean	11	9.6	11.4	10.2	0.5
Gwangju	Janghowon	req_N	6	35	40	37.5	1.9
		Tmean	6	9.0	10.8	9.8	0.6
	Youmyeong	req_N	7	35	43	37.9	2.6
		Tmean	7	9.0	10.8	9.7	0.6
Jinju	Cheonhong	req_N	8	31	42	36.1	3.4
		Tmean	8	8.6	9.8	9.1	0.4
	Youmyeong	req_N	9	36	49	40.1	4.3
		Tmean	9	8.3	10.0	9.1	0.5

Table 14 Fitted coefficients (A and B) in Eq. (7) and Adjusted R²

Station	Cultivar	A	B	Adjusted R ²
Chuncheon	Cheonhong	0.0102	0.0016	0.0235
	Youmyeong	0.0024	0.0024	0.3681
Suwon	Changbang- josaeng	-0.0041	0.0033	0.1702
	Cheonhong	-0.0213	0.0051	0.0771
	Youmyeong	-0.0098	0.0038	0.3133
Cheongju	Cheonhong	0.0046	0.0020	0.0023
	Youmyeong	-0.0401	0.0063	0.3850
Daegu	Cheonhong	0.0294	-0.0005	-0.0843
	Youmyeong	0.0051	0.0017	0.2399
	Cheonhong	0.0082	0.0014	0.0998
	Cheonjungdo	-0.0081	0.0030	0.3453
Gwangju	Janghowon	0.0127	0.0014	0.2565
	Youmyeong	0.0153	0.0012	-0.0131
Jinju	Cheonhong	0.0211	0.0007	-0.1492
	Youmyeong	0.0193	0.0006	-0.1227

Table 15 Fitted coefficients (C and D) in Eq. (8) and 95% Confidence limits.

STN	Cultivar	C			D			Significance level
		95CI LL [†]	Est. [‡]	95CI UL [§]	95CI LL	Est.	95CI UL	
Chuncheon	Cheonhong	-0.004	0.014	0.032	-0.070	0.062	0.194	***
	Youmyeong	0.004	0.010	0.017	0.033	0.093	0.154	***
Suwon	Changbang- josaeng	0.001	0.008	0.016	0.029	0.127	0.226	***
	Cheonhong	-0.010	0.004	0.019	-0.165	0.194	0.553	***
	Youmyeong	0.002	0.007	0.012	0.067	0.138	0.210	***
Cheongju	Cheonhong	-0.013	0.011	0.035	-0.140	0.077	0.295	***
	Youmyeong	-0.004	0.002	0.007	-0.070	0.261	0.591	***
Daegu	Cheonhong	-0.003	0.030	0.064	-0.129	-0.020	0.090	***
	Youmyeong	0.001	0.010	0.019	-0.007	0.077	0.160	***
	Cheonhong	-0.001	0.012	0.024	-0.037	0.065	0.168	***
	Cheonjungdo	-0.001	0.006	0.013	0.018	0.129	0.239	***
Gwangju	Janghowon	0.002	0.016	0.030	-0.037	0.053	0.142	***
	Youmyeong	-0.002	0.017	0.037	-0.071	0.043	0.158	***
Jinju	Cheonhong	-0.021	0.022	0.064	-0.187	0.029	0.244	***
	Youmyeong	-0.011	0.020	0.050	-0.143	0.028	0.198	***

† 95% Confidence interval lower limit

‡ Estimate

§ 95% Confidence interval upper limit

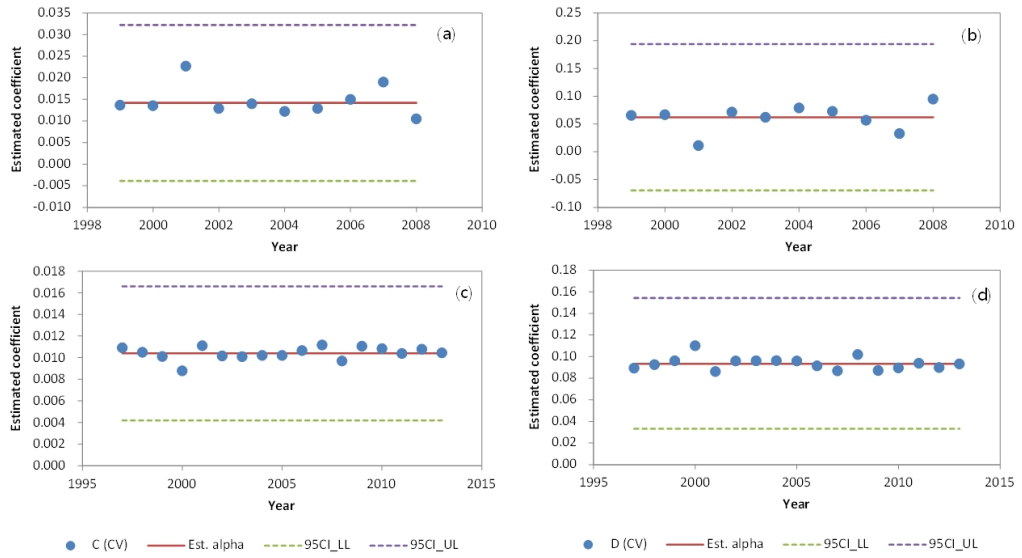


Figure 13 Estimated coefficients for Eq. (8) at the Chuncheon site: the coefficients C (a) and D (b) for Cheonhong and the coefficients C (c) and D (d) for Youmyeong.

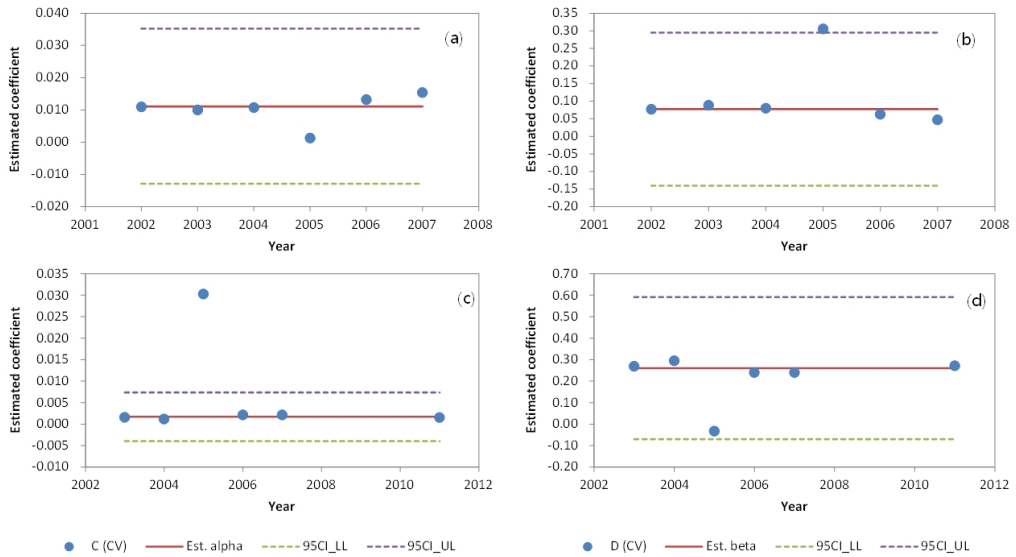


Figure 14 Estimated coefficients for Eq. (8) at the Cheongwon site: the coefficients C (a) and D (b) for Cheonhong and the coefficients C (c) and D (d) for Youmyeong.

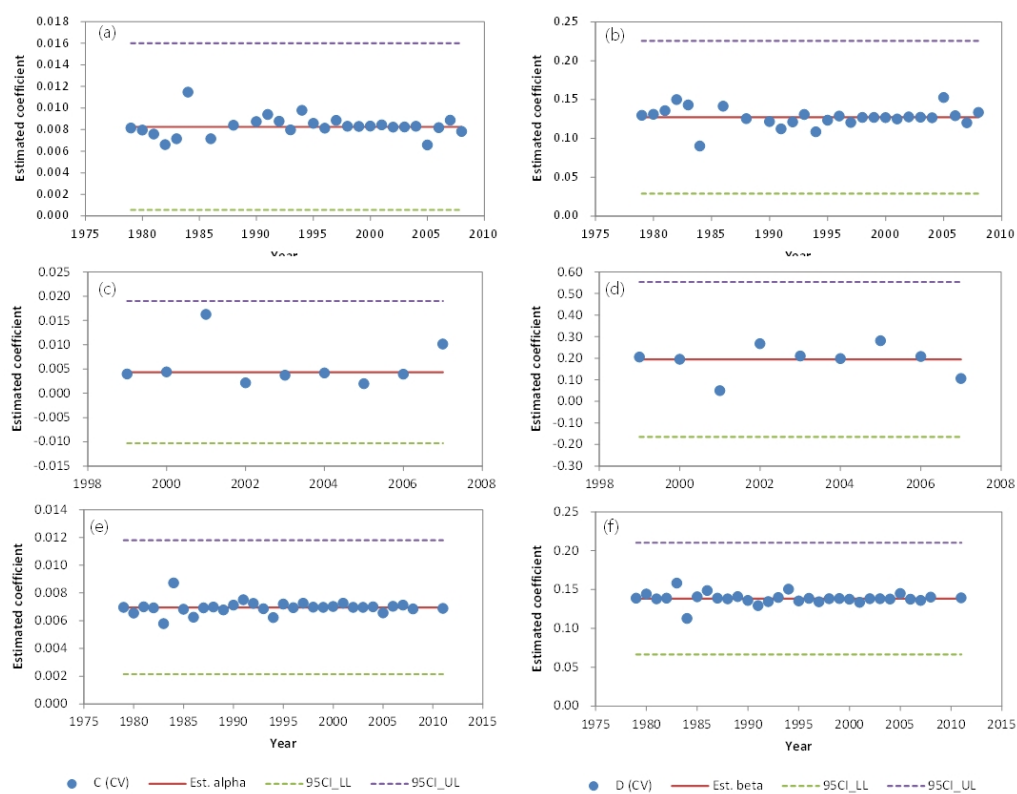


Figure 15 Estimated coefficients for Eq. (8) at the Suwon site: the coefficients C (a) and D (b) for Changbangjosaeng, the coefficients C (c) and D (d) the coefficient for Cheonhong, and the coefficients C (e) and D (f) for Youmyeong.

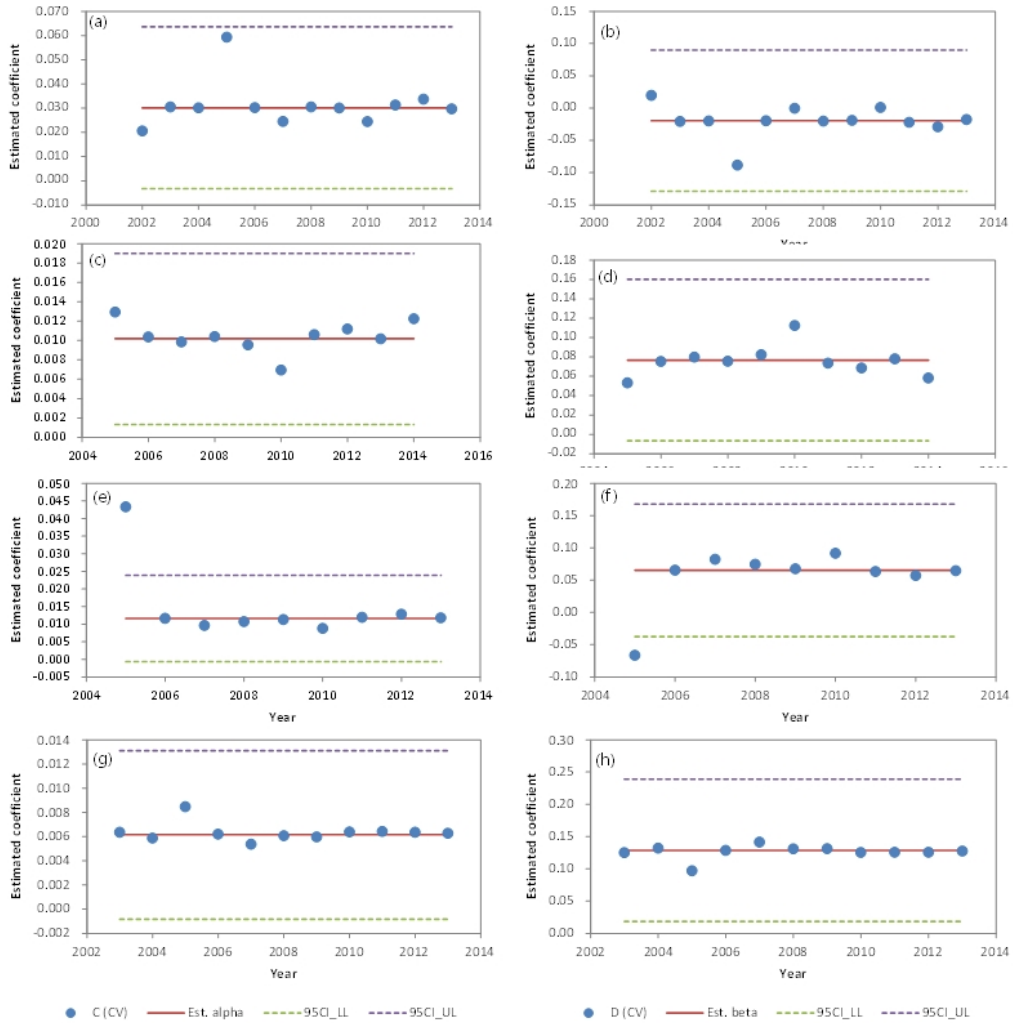


Figure 16 Estimated coefficients for Eq. (8) at the Cheongdo site: the coefficients C (a) and D (b) for Cheonhong, the coefficients C (c) and D (d) the coefficient for Cheonjoongdo, the coefficients C (e) and D (f) for Janghowon, and the coefficients C (g) and D (h) the coefficient for Youmyeong.

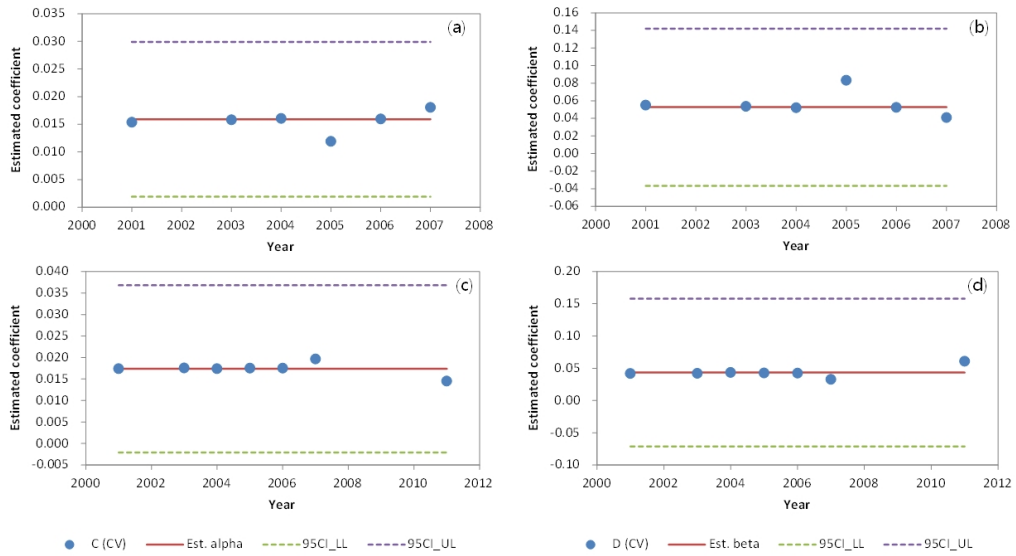


Figure 17 Estimated coefficients for Eq. (8) at the Naju site: the coefficients C (a) and D (b) for Cheonhong and the coefficients C (c) and D (d) for Youmyeong.

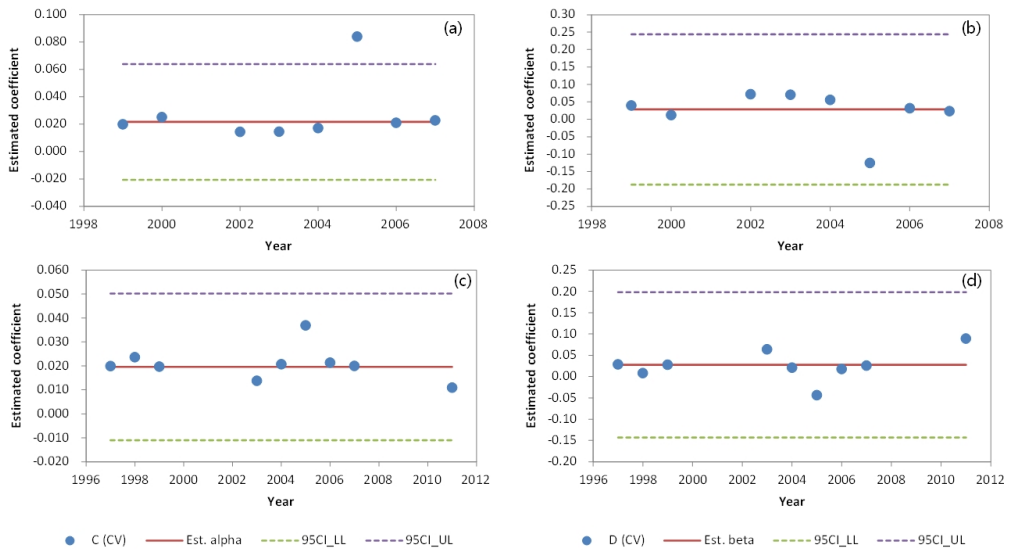


Figure 18 Estimated coefficients for Eq. (8) at the Jinju site: the coefficients C (a) and D (b) for Cheonhong and the coefficients C (c) and D (d) for Youmyeong.

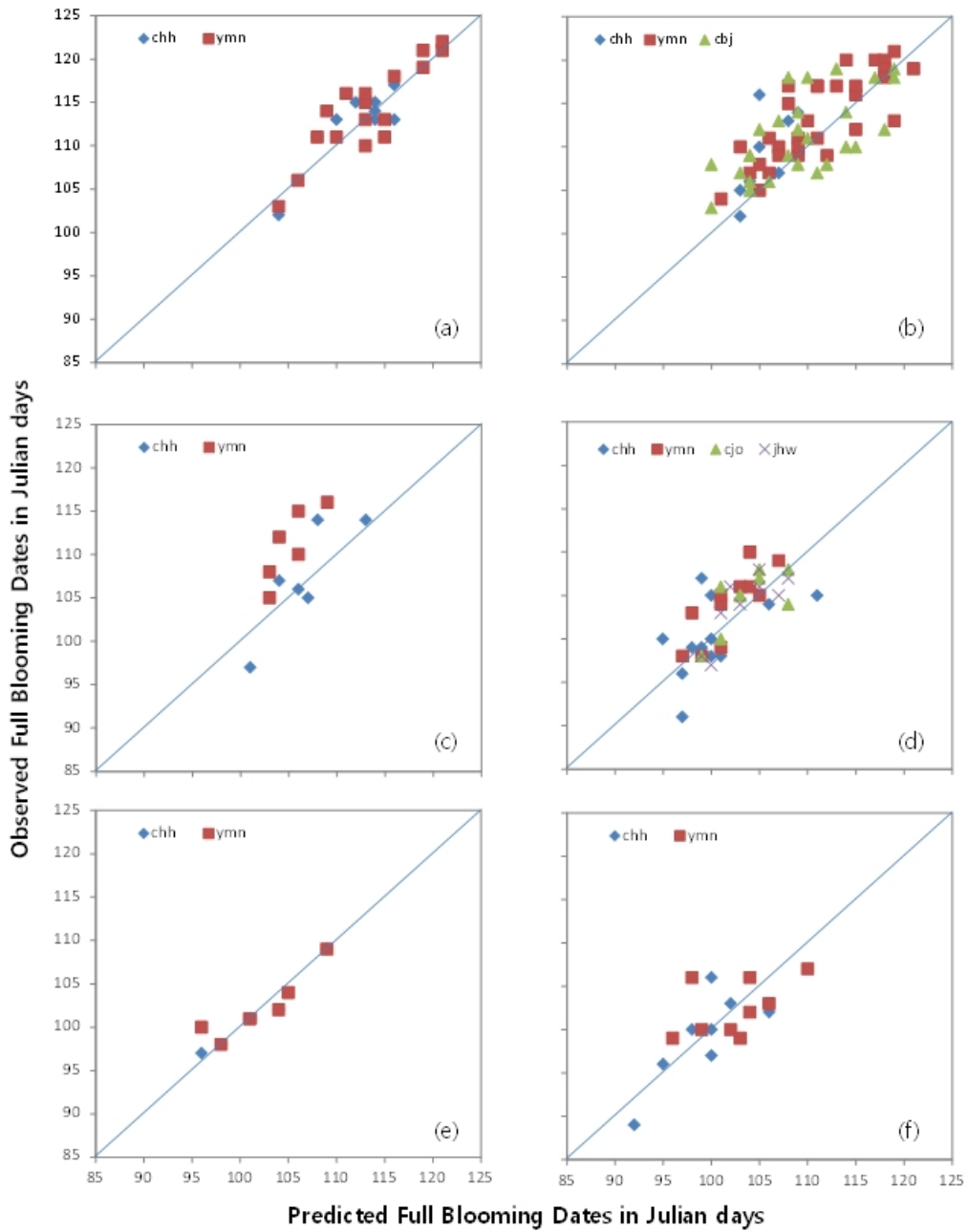


Figure 19 Predicted and observed full blooming dates in Julian days at Chuncheon (a), Suwon (b), Cheongwon (c), Cheongdo (d), Naju (e) and Jinju (f) sites.

Table 16 Goodness-of-fit measures for the DVR models for the full blooming dates against observed full blooming dates.

Station	Cultivar	MAPE (%)		R ²		RMSE (day)	
Chuncheon	Cheonhong	1.79	1.77	0.67	0.75	2.28	2.46
	Youmyeong	1.76		0.78		2.57	
Suwon	Changbang- josaeng	3.35	3.06	0.43	0.63	4.62	4.33
	Cheonhong	3.37		0.45		4.88	
	Youmyeong	2.72		0.65		3.87	
Cheongju	Cheonhong	2.50	3.85	0.74	0.54	3.32	5.04
	Youmyeong	5.20		0.68		6.31	
Daegu	Cheonhong	3.22	2.47	0.27	0.50	4.13	3.18
	Youmyeong	2.01		0.56		2.55	
	Cheonhong	1.93		0.63		2.26	
	Cheonjungdo	2.51		0.64		3.15	
Gwangju	Janghowon	0.50	0.76	0.96	0.89	0.91	1.41
	Youmyeong	0.99		0.83		1.73	
Jinju	Cheonhong	2.51	2.78	0.60	0.48	3.08	3.40
	Youmyeong	3.02		0.25		3.65	
Entire set		2.58		0.75		3.65	

3.1.3 순차휴면모형

Cesaraccio et al., (2006)은 과수작물과 임목에 대해 순차휴면모형의 일종인 Chilling and forcing 모형을 Chill day model과 이를 개선한 New chill day model 과 Fraction-time model을 제안하고 적용한 바 있다. 본 연구에서는 Cesaraccio et al., (2006)dl 제시한 3가지 모형을 복숭아 만개기를 예측하는데 적용하여 그 예측성을 평가하였다. 3가지 모형 중 Fraction-time model은 기준온도 (T_C)와 저온요구도 (C_R)의 값이 문헌을 참고하여 정한 범위 ($5 \leq T_C \leq 10$, $-70 \leq C_R \leq -150$)내에서 최적값을 구하지 못하였다. 따라서 Fraction-time model은 우리나라 복숭아 만개기 예측에 적용성이 없는 것으로 판단하여, 각 지역 및 품종별 맞춤형 복숭아 만개기 예측모형 개발이라는 본 연구의 목적에 적합하지 않아 본 연구에서 제외하였다. 이러한 결과는 Cesaraccio et al. (2006)의 결과에서는 Fraction-time model의 예측성이 더

좋았다는 결과와는 달랐다. Chill day model과 New chill day model을 적용하여 산정한 기준온도 (T_C), 저온요구도 (C_R), 고온요구도 (H_R)은 각각 Table 17와 Table 18에 요약하여 제시하였다.

Chill day 모형과 New chill day 모형을 적용하여 추정한 기준온도 (T_C), 저온요구도 (C_R), 고온요구도 (H_R)는 New chill day 모형에 의한 추정값의 범위가 대체로 작았다. Chill day 모형에 의한 기준온도 (T_C)의 추정치는 5°C 에서 9°C 에 걸쳐있는 반면, New chill day 모형에 의한 기준온도 (T_C)의 추정치는 5°C 에서 7°C 사이의 값이었다. 저온요구도 (C_R)의 경우 Chill day 모형이 -148에서 -71사이의 값을 보였고, New chill day 모형은 -140에서 -75사이의 값을 보여 그 범위가 다소 작았다. 고온요구도 (H_R)는 Chill day 모형과 New chill day 모형이 각각 134.0에서 277.4와 153.4에서 272.1의 범위를 보였다. Hur and Ahn (2014)은 복숭아 개화기 예측에 Chill day 모형을 적용해서 기준온도 (T_C)는 5°C , 저온요구도 (C_R)는 -99, 고온요구도 (H_R)는 183.3으로 추정한바 있으며, 본 연구의 결과의 추정치 범위 내에 있는 값이었다. 참고로 Hur and Ahn (2014)의 연구는 만개기가 아닌 개화기의 예측연구로 고온요구도 (H_R)는 만개기에 비해 이론적으로 작은 값을 나타낸다. 발아기의 예측치에 대한 RMSE가 최대 8.67 day로 New chill day 모형의 결과가 최대 7.12 day값을 보인 Chill day 모형보다 다소 나뉘었으나, 모델훈련기간 (training period, 본 연구에서는 발아기 관측자료가 있는 기간)에서 만개기의 RMSE는 3.89 day와 3.96 day로 New chill day 모형이 다소 예측력이 높은 것으로 나타났다. 모형의 검증기간 (validation period)에서 만개기의 RMSE는 두 모형이 서로 비슷한 값을 보였다.

이와 같이 산정한 기준온도 (T_C), 저온요구도 (C_R), 고온요구도 (H_R)의 값을 Chill day 모형 (Figure 20)과 New chill day 모형 (Figure 21)에 적용하여 각 6개 관측지점 및 품종별 복숭아 만개기를 예측하여 관측값과 비교하였다. Chill day모형과 New chill day 모형은 MAPE, R^2 , RMSE의 평가지표를 활용하여 평가하였다 (Table 19 and Table 20). Chill day 모형의 경우 청원 관측지점에서 유명품종이 평균절대오차백분율이 약 1.22%로 가장 작은 값을 보였고, 청도 관측지점의 천홍품종이 약 3.49%로 가장 큰 오차를 보였다. New chill day 모형의 경우에는 청도 관측지점에서 유명품종과 천홍품종의 평균절대오차백분율이 각각 약 1.30%와 3.18%로 최소치와 최대치를 보였다. 지역과 품종의 구분 없이 전체적인 관측자료에 대한 평균절대오차백분

울을 비교하였을 때, Chill day 모형이 2.31%, New chill day 모형이 2.19%로 New chill day 모형이 다소 낮은 오차값을 보였다. 이는 지수함수식 발육속도 모형 (Figure 19)을 이용했을 때, 평균절대오차백분을 2.58%보다 작은 값으로 전체적으로 New chill day 모형의 예측성이 가장 뛰어난 것으로 나타났다. 다른 평가지표에서도 발육속도모형보다 Chill day모형이나 New chill day 모형이 대체로 우수한 것으로 나타났다. 품종과 지역을 구분하지 않고 전체자료에 대한 평가지표에서도 R^2 가 발육속도 모형의 0.75보다 Chill day 모형에서 0.79로 다소 개선되었고, New chill day 모형에서는 0.82로 가장 우수한 결과를 나타냈다. 이러한 결과는 김진희 등 (2009)이 복숭아 장호원황도 품종에 대해 회귀모형, 발육속도모형, Chill day모형을 이용하여 개화기를 예측하고 각 모형의 결과를 비교한 연구에서 Chill day모형이 가장 우수한 것으로 보고한 결과와 비슷한 결과이다. 여기서, 김진희 등 (2009)은 New chill day모형은 적용하지 않은 결과이다.

청원 관측지점에서 유명품종 (Figure 19c)의 경우 지수함수식 발육속도 모형이 관측 만개기보다 전반적으로 이른 시기에 만개한다고 예측하는 경향을 보였는데, Chill day 모형과 New chill day 모형의 결과에서는 특정 경향이 나타나지 않았다. 따라서 위와 같은 발육속도모형, Chill day 모형, New chill day 모형의 결과를 바탕으로 New chill day 모형의 결과가 다소 우위에 있으므로, APCC MME 계절자료는 New chill day 모형에 적용하여, APCC MME 계절자료의 복숭아 만개기 예측에 적용성을 평가하였다. 그러나 다른 지점과는 다르게 청도지점에서는 Chill day 모형과 New chill day 모형의 평가지표가 발육속도 모형의 평가지표보다 다소 낮은 결과를 보였다. 이러한 결과는 대구관측지점 (143)에서 관측한 일평균기온, 일최고기온, 일최저기온이 다른 지점보다 3월에서 5월까지의 평균값이 다소 높았고, Chill day모형과 New chill day모형에서 사용되는 일최저기온이 다소 높아, T_c , C_R 을 추정할 때 다소 오차가 컸기 때문인 것으로 판단된다 (Table 17 and Table 18). 향후 지속적으로 발아기 및 만개기를 관측하여 관측 자료수를 증가시키고, 기온요소외의 다른 환경요소들을 고려할 수 있도록 모형 개선이 요구된다 할 수 있겠다.

Table 17 Estimated Threshold temperature (T_c), Chilling requirement (C_R), and Heating requirement (H_R) for the Chill day model.

Station	Cultivar	N_BBD	N_FBD	T_c	C_R	RMSE_BBD	H_R	RMSE_Tr	RMSE_Vd
Chuncheon	Cheonhong	10	10	5.0	-100	6.11	244.0	2.50	N/A
	Youmyeong	14	17	5.0	-110	7.28	245.0	3.25	2.88
Suwon	Changbang-josaeng	17	27	5.0	-107	6.06	232.9	3.02	5.55
	Cheonhong	18	31	5.0	-107	5.96	240.1	2.65	4.64
	Youmyeong	9	9	6.0	-73	4.24	180.2	2.30	N/A
Cheongju	Cheonhong	6	6	5.0	-133	2.04	261.8	2.45	N/A
	Youmyeong	6	6	7.0	-95	2.08	199.2	1.73	N/A
Daegu	Cheonhong	7	12	5.1	-127	7.12	275.7	3.96	5.94
	Youmyeong	5	10	9.0	-73	3.63	137.2	4.81	2.50
	Cheonhong	5	9	9.0	-73	3.63	134.0	4.21	1.11
	Cheonjungdo	8	11	5.2	-130	5.68	277.4	1.96	1.29
Gwangju	Janghowon	6	6	8.0	-71	2.42	149.6	3.08	N/A
	Youmyeong	7	7	8.0	-74	3.00	150.0	2.30	N/A
Jinju	Cheonhong	8	8	6.0	-123	5.42	215.7	2.24	N/A
	Youmyeong	9	9	5.1	-148	4.52	271.0	3.25	N/A

Table 18 Estimated Threshold temperature (T_c), Chilling requirement (C_R), and Heating requirement (H_R) for the New chill days model.

Station	Cultivar	N_BBD	N_FBD	T_c	C_R	RMSE_BBD	H_R	RMSE_Tr	RMSE_Vd
Chuncheon	Cheonhong	10	10	5.0	-82	5.05	231.3	1.97	N/A
	Youmyeong	14	17	5.2	-92	5.59	228.5	2.71	2.08
Suwon	Changbang-josaeng	17	27	6.0	-81	5.75	186.6	2.54	6.00
	Cheonhong	18	31	5.9	-81	5.89	196.3	2.41	3.64
	Youmyeong	9	9	5.0	-93	4.91	210.2	3.00	N/A
Cheongju	Cheonhong	6	6	7.0	-82	1.58	176.2	2.16	N/A
	Youmyeong	6	6	7.0	-87	2.12	186.1	2.24	N/A
Daegu	Cheonhong	7	12	5.0	-131	8.67	262.2	4.36	5.29
	Youmyeong	5	10	5.0	-140	4.19	272.1	3.74	3.06
	Cheonhong	5	9	5.0	-140	4.19	266.5	3.89	2.59
	Cheonjungdo	8	11	5.3	-131	6.74	263.2	1.90	1.41
Gwangju	Janghowon	6	6	5.1	-114	5.38	236.5	1.96	N/A
	Youmyeong	7	7	5.1	-114	5.41	234.9	2.59	N/A
Jinju	Cheonhong	8	8	7.0	-75	4.72	153.4	2.65	N/A
	Youmyeong	9	9	6.0	-94	5.49	200.7	3.09	N/A

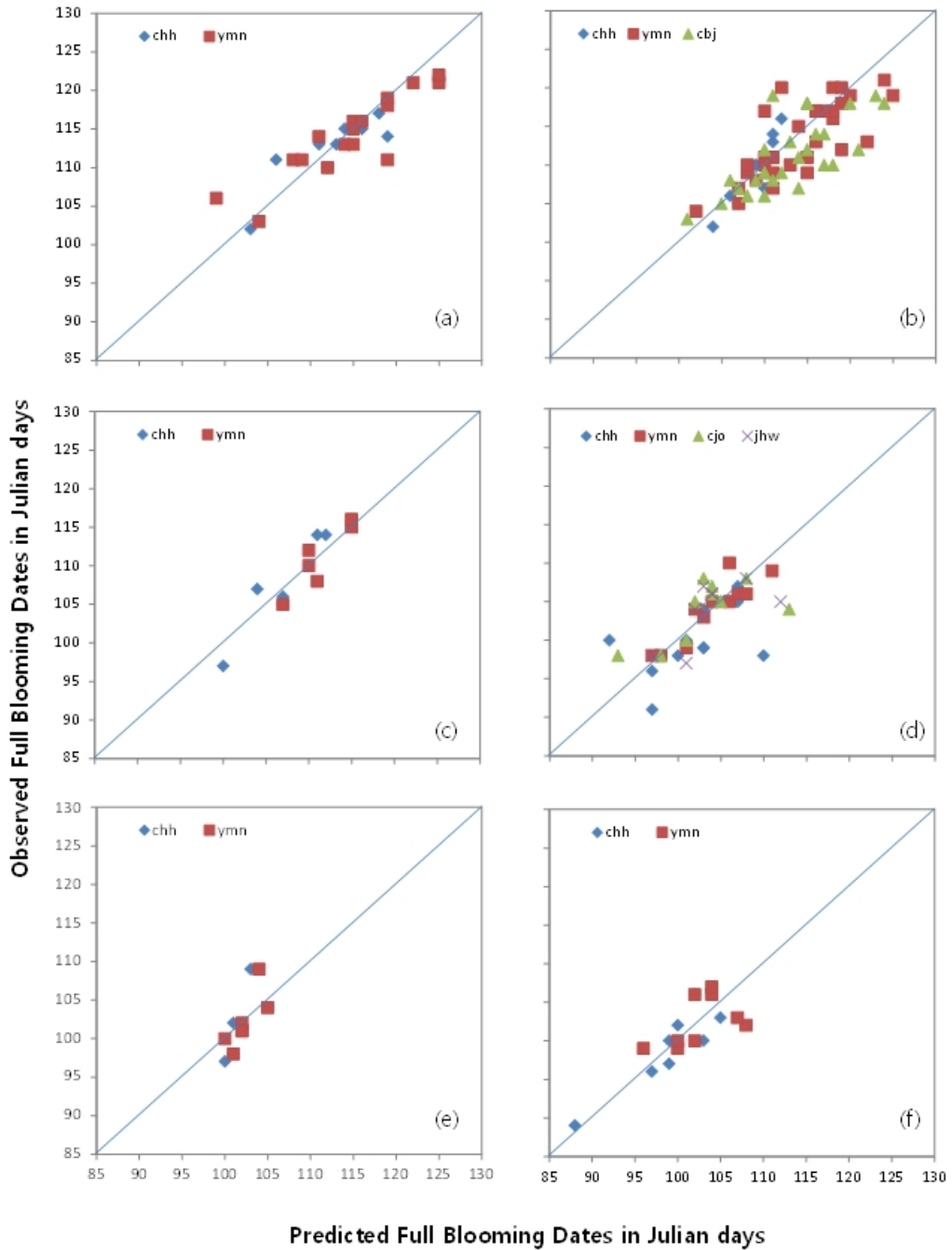


Figure 20 Predicted and observed full blooming dates in Julian days at Chuncheon (a), Suwon (b), Cheongwon (c), Cheongdo (d), Naju (e) and Jinju (f) sites, using the Chill day model.

Table 19 Goodness-of-fit measures for the Chill day models for the full blooming dates against observed full blooming dates.

Statioin	Cultivar	MAPE (%)		R ²		RMSE (day)	
Chuncheon	Cheonhong	1.69	1.91	0.72	0.79	2.51	2.96
	Youmyeong	2.04		0.80		3.19	
Suwon	Changbang- josaeng	2.94	2.51	0.54	0.72	4.15	3.71
	Cheonhong	1.82		0.85		2.31	
	Youmyeong	2.33		0.59		3.63	
Cheongju	Cheonhong	2.19	1.71	0.88	0.63	2.45	2.12
	Youmyeong	1.22		0.83		1.73	
Daegu	Cheonhong	3.49	2.51	0.27	0.44	4.89	3.69
	Youmyeong	2.69		0.44		3.92	
	Cheonhong	2.36		0.42		3.23	
	Cheonjungdo	1.38		0.81		1.81	
Gwangju	Janghowon	2.44	1.94	0.73	0.57	3.08	2.69
	Youmyeong	1.51		0.59		2.30	
Jinju	Cheonhong	1.99	2.36	0.80	0.64	2.24	2.82
	Youmyeong	2.70		0.26		3.25	
Entire set		2.31		0.79		3.36	

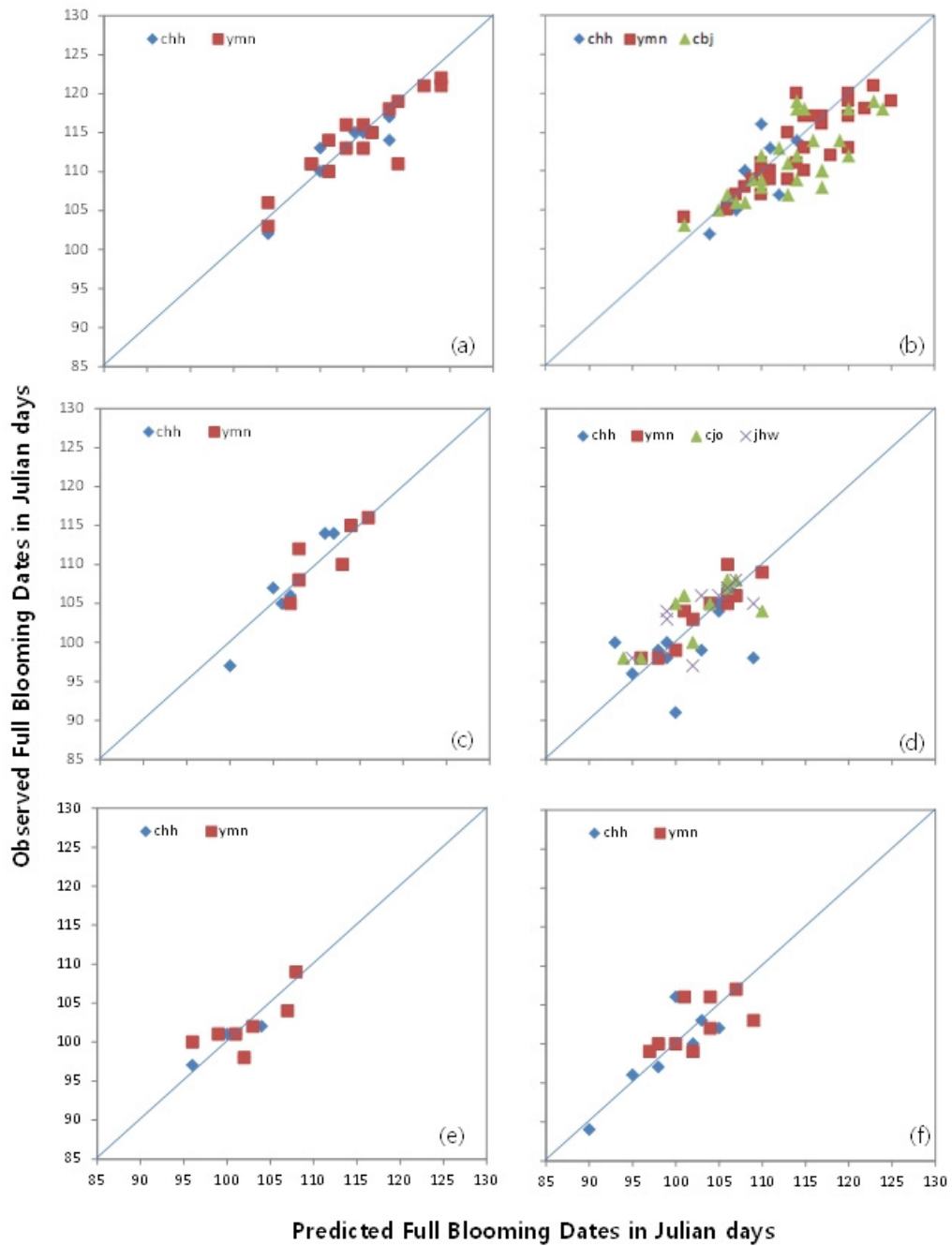


Figure 21 Predicted and observed full blooming dates in Julian days at Chuncheon (a), Suwon (b), Cheongwon (c), Cheongdo (d), Naju (e) and Jinju (f) sites, using the New Chill days model.

Table 20 Goodness-of-fit measures for the New chill day models for the full blooming dates against observed full blooming dates.

Statioin	Cultivar	MAPE (%)		R ²		RMSE (day)	
Chuncheon	Cheonhong	1.34	1.54	0.78	0.81	1.97	2.40
	Youmyeong	1.66		0.81		2.61	
Suwon	Changbang- josaeng	3.01	2.38	0.56	0.79	4.18	3.52
	Cheonhong	2.12		0.53		3.00	
	Youmyeong	1.91		0.74		2.99	
Cheongju	Cheonhong	1.87	1.69	0.95	0.68	2.16	2.20
	Youmyeong	1.51		0.67		2.24	
Daegu	Cheonhong	3.18	2.54	0.22	0.46	4.77	3.55
	Youmyeong	2.80		0.56		3.42	
	Cheonhong	2.93		0.45		3.38	
	Cheonjungdo	1.30		0.83		1.78	
Gwangju	Janghowon	1.50	1.83	0.77	0.65	1.96	2.32
	Youmyeong	2.12		0.57		2.59	
Jinju	Cheonhong	1.97	2.19	0.71	0.62	2.65	2.89
	Youmyeong	2.38		0.36		3.09	
Entire set		2.19		0.82		3.16	

3.2 APCC MME 자료 적용

3.2.1 통계적규모축소법

먼저 농진청에서 복숭아 만개기를 예측하는데 활용하는 기상청 장기예보자료를 순별로 적용하기 때문에, 본 연구에서도 APCC MME 계절자료를 순별로 통계적 규모축소하여 적용성을 평가하였다. 본 연구에서 APCC MME hindcasts자료를 통계적으로 규모축소하기 위해 사용한 광역규모의 예측인자로는 T850 (850hPa temperature), u850 (850hPa zonal wind), v850 (850hPa meridional wind), z500 (500hPa geopotential height)으로 총 4개이며, 지역규모의 예측변수로는 복숭아 만개기 예측모형 개발에 사용한 일평균기온, 일최고기온, 일최저기온의 3개이다.

4월을 기준으로 했을 때, 2개월 리드타임자료일 경우 (말하자면, 2월에 예측한 3

월, 4월, 5월 자료), 일최고기온에서는 T850을 제외하고 모든 광역규모 예측인자 이용시 대부분의 관측지점에서 음의 상관관계를 나타냈다. T850이용의 결과도 3월 상순, 중순, 하순을 제외하고 4월, 5월 모두 대부분의 관측지점에서 음의 상관이나 매우 낮은 상관계수의 값을 보였다. 이 경우 3월에도 0.4이하의 낮은 상관계수를 나타내 통계적 규모축소법을 순별로 적용하기에는 한계를 보였다. 일최저기온과 일평균기온에서도 3월에서 약 0.5정도의 비교적 높은 상관계수를 보인 관측점이 있으나, 전반적으로는 일최고기온의 결과와 유사하였다. 이와 같이, 본 통계적 규모축소방법을 활용하여 월별자료를 순별로 변환하는 방법을 위의 4개의 광역규모 예측인자만으로는 상관관계가 큰 결과를 얻기 어려울 것으로 판단하였다. 1개월 리드타임자료일 경우 (말하자면, 3월에 예측한 4월과 5월 자료), 전반적으로 2개월 리드타임자료의 경우보다 더 좋지 않은 결과를 보였다. 따라서 본 연구에서는 APCC MME 월별자료를 각 관측지점별 순별로 변환하는 첫 번째 방법은 제외하였고, 두 번째 방법대로 관측지점별로 공간적으로 규모축소한 자료와 날씨생성기와 Bottom-up procedure를 활용하여 복숭아 만개기 예측에 활용하였다.

본 연구에서는 발육속도모형, Chill day 모형, New chill day모형 중 New chill day모형의 예측성이 다소 우수한 것으로 판단되어 New chill day 모형에 APCC MME 계절자료를 적용하기로 하였다. 농진청의 복숭아 만개기 예측 발표시점이 3월 하순(3월 26일)인 것을 감안하여 4월 전망자료를 사용하기로 하였다. 4월에 통계적으로 규모축소한 결과 중 New chill day모형에 입력변수로 사용할 일최고기온과 일최저기온 모두 비교적 우수하고, 복숭아 만개기 관측수가 가장 긴 자료수를 보유하고 있는 수원지점의 결과를 적용하기로 하였다. 수원지점의 경우 2개월 리드타임자료(2월에 예측한 4월자료)의 통계적 규모축소 결과는 광역규모예측인자로 Z500을 사용했을 경우가 관측과의 상관계수가 일최저기온이 0.44, 일최고기온이 0.18 이었다. 다른 지점에서도 일최고기온의 경우 대개 유사한 값을 보이거나 낮았으며, 일최저기온의 경우는 대구관측지점이 0.47로 가장 높았으나 나머지 지점에서는 0.2에서 0.3정도의 값을 보였다. 수원지점의 경우 일최고기온의 경우 상관계수가 비교적 낮은 값이나, 복숭아 만개기의 관측수가 가장 긴 지점이기 때문에 통계적 규모축소의 결과값의 상관계수가 다소 낮은 값을 보였으나, 본 연구에서는 수원지점의 통계적 규모축소값을 적용하기로 하였다.

통계적 규모축소에 의해 예측한 수원지점에 4월의 값을 전체 기간에 대해 평균한

값은 일최고기온이 약 18.0°C 와 일최저기온이 약 6°C 였으며, 같은 기간에 대해 일최고기온의 평균값은 약 18.0°C 와 일최저기온이 약 6°C 로 거의 유사하였다. 수원지점에 4월의 일최고기온과 일최저기온에 대하여 적용한 통계적규모축소 결과를 편차로 나타내어 (anomaly)를 각 연도별로 비교하여 Figure 22에 제시하였다. 일최고기온과 일최저기온 모두 1990년 초반까지는 그 경향을 제대로 예측하였으나, 1990년대 후반과 2000년대 초반은 예측성이 다소 떨어졌으며, 2000년대 중반이후에는 편차를 제대로 예측하고 있다. 이러한 일최고기온과 일최저기온의 예측성은 복숭아 만개기 예측성과도 매우 큰 관련이 있으므로 APCC MME계절예측의 예측성을 높이는 연구와 함께, 다양한 방법을 시도하여 통계적으로 규모축소하여 얻은 예측의 성능을 개선하는 연구도 매우 중요하다 하겠다. 따라서 복숭아 만개기의 예측성을 개선하기 위해서는 이러한 APCC MME계절예측자료의 예측성과 통계적 규모축소방법의 예측성을 동시에 개선하는 연구가 필요하다.

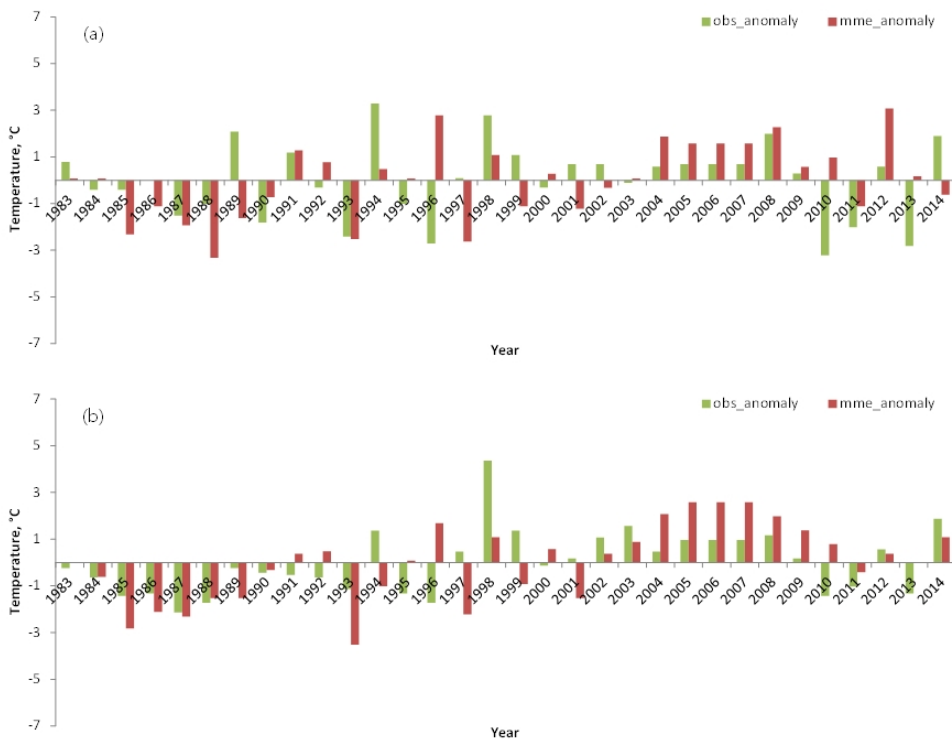


Figure 22 Observed and downscaled (a) maximum and (b) minimum temperatures at the Suwon site in April.

3.2.2 날씨생성기 (Weather Generator)

MEBWG 날씨생성기를 이용하여 다중관측지점, 다중기상자료를 1973년부터 2014년까지 일별자료로 생성하였다. 기상청에서 제안한 10개권역으로 나누어서 각 권역별로 기온, 강수, 일조시간 등의 기상자료를 500셋씩 두 번 (Figure 23에서 run1과 run2)에 나누어서 생성하였다. 본 연구에서 주요 6개 복숭아 만개기 관측지점별 일최고기온, 일최저기온, 일평균기온에 대해 생성한 일별 합성 기온자료와 관측한 기온자료를 월별로 평균한 자료를 Figure 23에 제시하였다.

MEBWG 날씨생성기로 생성한 합성 기온자료는 일최고기온, 일최저기온, 일평균기온 모두 1973년부터 2014년까지 월평균으로 관측치와 비교했을 때, 매우 유사하였다. Figure 23에서와 같이, 각 주요 복숭아 만개기 관측지점의 월평균기온은 대체로 8월에서 최대값을 보였고, 1월에 최소값을 보였다. 표준편차의 경우에는 관측이 최대 2.8°C 였던 반면에 첫 번째와 두 번째 생성한 기온자료에서는 0.4°C 에서 0.5°C 정도로 매우 작은 값을 보였다. 특히 관측 기온자료의 경우 일반적으로 겨울철 (12월, 1월, 2월)과 여름철 (7월, 8월)에서 표준편차가 상대적으로 컸다. MEBWG 날씨생성기로 생성한 합성 기온자료는 APCC MME 계절자료를 본 연구에서 개발한 New chill day 모형에 적용하기 위해 Bottom-up procedure를 본 연구실정에 맞게 수정하여 선별하였다. 먼저 MEBWG 날씨생성기를 사용해 생성한 각 지점별 기온자료 (일별자료)를 각 지점별 월별자료로 변환하였다. 그런 다음 APCC MME 계절자료를 지점별로 통계적 규모축소하여 얻어진 기온자료 (월별자료)와 가장 근사한 값을 각 지점별로 선별하여 본 연구에서 개발한 New chill day 모형에 일별로 적용하여 복숭아 만개기를 예측하였다.

장기간의 복숭아 만개기 관측자료를 보유하고 있고, 통계적 규모축소의 결과가 다른 지점에 비해 다소 우수한 수원지점에 대해 각 품종별 (유명품종과 창방조생품종) 만개기 관측자료가 있는 년도에 해당하는 1983년부터 2011년까지의 MEBWG의 일별자료를 월별로 변환하고 통계적 규모축소에 의해 얻어진 월평균자료와 비교하여 가장 유사한 자료를 선별하였다. 이렇게 선별한 각 셋의 일별자료를 전체 일별로 평균하여 Figure 24에 나타내었다. 관측자료는 검은색실선으로 표시하였고, 선별한 합성 기온자료는 파란색 점선으로 표시하였으며, 각 자료별 표준편차를 에리바 형태로 제시하였다. 관측자료는 표준편차가 큰 반면, MEBWG 날씨생성기에 의해 생성한 합성

자료는 표준편차가 상대적으로 작았다. 이 4월의 선별한 합성 기온자료는 수원지점의 유명품종과 창방조생품종의 만개기를 예측하는데 사용하였다.

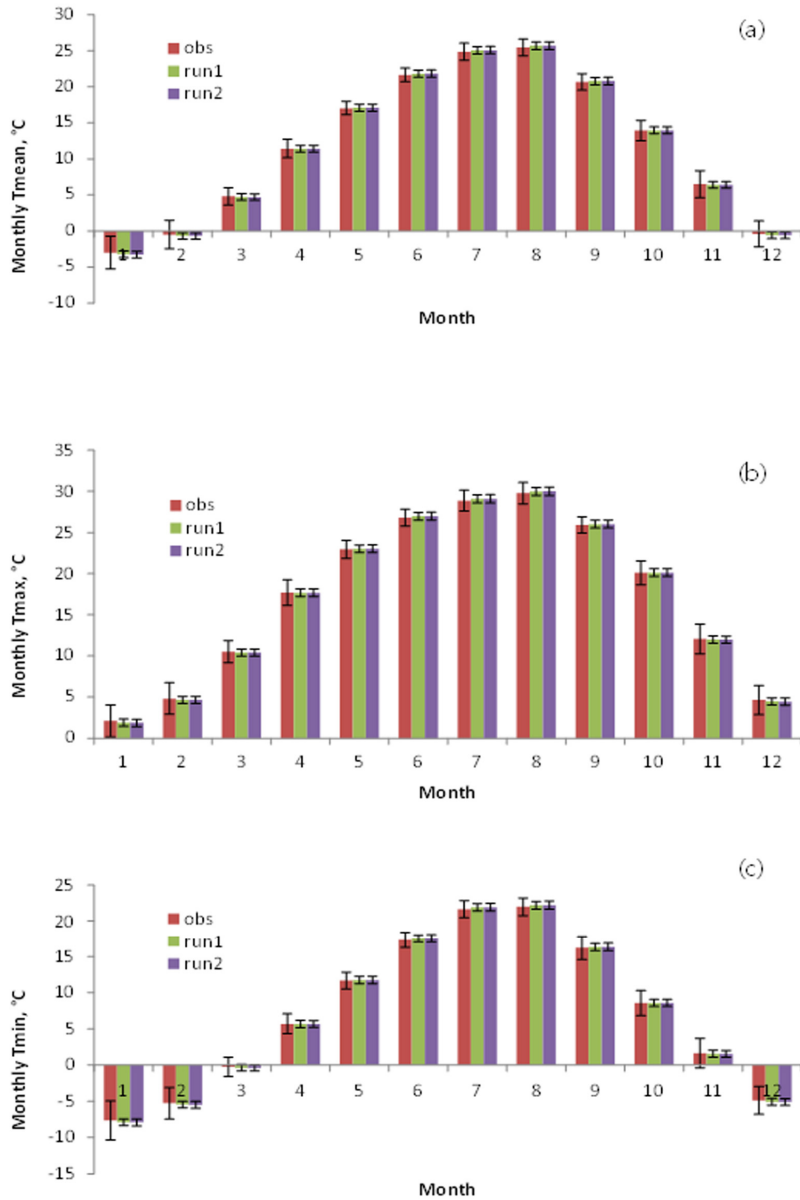


Figure 23 Observed and synthetic monthly mean, maximum, and minimum temperatures at the Suwon (119) site.

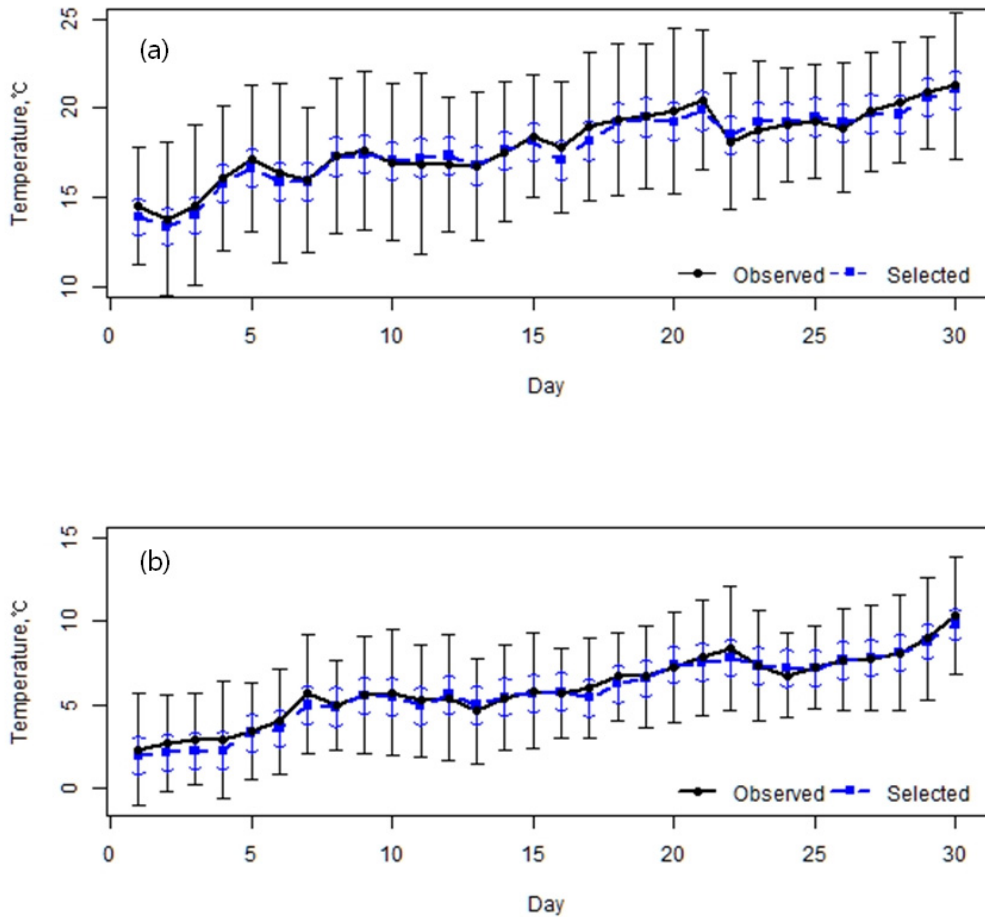


Figure 24 Observed and selected from the synthetic pool generated from MEBWG (a) maximum and (b) minimum temperatures.

3.2.3 복숭아 만개기 예측

MEBWG 날씨생성기를 이용하여 다중관측지점 및 다중기상자료를 1973년부터 2014년까지 생성하였고, 이 자료를 전술한바와 같이 월별자료로 변환 후 APCC MME 계절자료를 통계적으로 규모축소한 자료와 비교하여 그 차이가 가장 작은 셋을 선별하였다. 관측기상자료로부터 개발한 New chill day 모형에 이렇게 선별한 4월의 일별 합성 일최고기온과 일최저기온 자료를 입력변수로 사용하였으며, 나머지 기간은 관측의 일별기상자료를 사용하였다. 이는 통상 3월하순에 발표하는 농진청의 복숭아 만개기 예측시점과 월별로 생산하는 APCC MME자료의 특성을 고려한 것이다.

복숭아 만개기 예측에 관측 기상자료를 이용한 경우와 위와 같은 과정을 거쳐 APCC MME와 MEBWG 날씨생성기 (선별 합성 기온자료)를 이용한 경우의 예측성을 평가하여 각 지표를 제시하였다 (Table 21). 유명품종과 창방조생품종 모두의 경우에서 각 지표들은 관측기상자료를 사용했을 때가 더 우수했다. 특히 관측기상을 사용했을 때가 상관계수의 경우 0.8이상의 높은 값을 보인 반면, 선별 합성 기상자료를 사용했을 경우에는 창방조생품종이 0.5로 상대적으로 낮았다. RMSE나 MAPE와 같은 다른 평가지표에서도 창방조생품종의 예측성이 유명품종보다 다소 떨어지는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 월별자료인 APCC MME 계절자료를 통계적으로 규모축소한 결과가 바로 일별자료가 필요한 복숭아 만개기 예측에 쓰일 수 없고, 날씨생성기로부터 얻어진 결과를 선별해서 복숭아 만개기 예측을 하기 때문으로 사료된다. 말하자면, APCC MME 계절예측자료가 가지는 불확실성과 MEBWG 날씨생성기를 사용하면서 또 하나의 오차 나 불확실성이 추가되기 때문으로 판단된다.

New chill day 모형으로부터 각각 관측 일최고기온과 일최저기온의 기상자료와 APCC MME 계절자료와 MEBWG 날씨생성기로부터 선별한 생성된 4월의 일최고기온과 일최저기온을 활용 (선별 합성자료)하여 복숭아 만개기를 예측하였고, Figure 25에 나타내었다. 관측기상을 이용한 만개기 예측결과와 선별한 합성 기상자료를 사용한 만개기 예측결과는 관측과 각각 비교하였을 때, 유명품종과 창방조생품종에 대해서 대체로 비슷한 수준의 오차를 보였다. 그러나 1996년의 예측결과는 관측자료를 사용했을 때의 오차보다 선별 합성기상자료를 사용했을 때의 오차가 매우 컸는데, 이는 우선 APCC MME 계절자료를 통계적으로 규모축소한 결과가 일최고기온의 경우 관측이 평년보다 약 2.7°C 낮았는데, 통계적 규모축소 결과는 약 2.8°C 높았으며, 일최저기온의 경우도 관측이 평년대비 약 1.7°C 낮았는데, 통계적 규모축소 결과는 약 1.6°C 높은 것으로 나타났기 때문으로 보인다 (Figure 22). 이러한 결과를 종합해보면, 복숭아 만개기 예측모델 (New chill day 모형)이 가지는 모델의 구조적 오차는 위의 관측기상자료를 사용할 때나 선별 합성자료를 사용했을 때나 동일할 것이므로, 선별 합성자료를 사용했을 때 커지는 오차는 대부분 APCC MME 계절자료와 MEBWG 단계에서, 또는 합성 기상자료 선별 작업 단계 등에서 기여한다고 볼 수 있다. 따라서 APCC MME 계절자료의 예측성을 높이고 다양한 방법으로 좀 더 정확한 상세화 방안에 대한 연구를 통해 복숭아 만개기 예측성을 높일 수 있을 것이라 판단된다.

위의 자료생산 및 변환 단계별 오차를 정량화하는 연구는 각 단계별 오차를 줄여 결과적으로 예측력을 높일 수 있는 방안이 될 수 있으므로 매우 중요하다 할 수 있다. 그러나 이러한 오차를 정량화 하는 연구는 APCC MME 계절예측자료를 과수원예분야에 활용하여 그 적용성을 확대한다는 기본 연구 목적과는 다소 벗어나 있으므로 본 연구에서는 수행하지 않았다. 향후 자료변환 각 단계별로 발생하는 오차를 정량화하는 연구를 수행하고, 이를 통해 전체 복숭아 만개기 예측성을 개선시키려는 노력이 필요할 것으로 판단된다.

Table 21 Goodness-of-fit measures for the prediction models for the full blooming dates using downscaled MME datasets against observed full blooming dates.

Cultivar	Predicted full blooming dates with ASOS		
	Correlation Coefficient	RMSE	MAPE (%)
Youmyeong	0.89	2.75	1.8%
Changbangjosaeng	0.81	3.49	2.5%

Cultivar	Predicted full blooming dates with MME		
	Correlation Coefficient	RMSE	MAPE (%)
Youmyeong	0.62	4.67	3.5%
Changbangjosaeng	0.50	5.12	3.8%

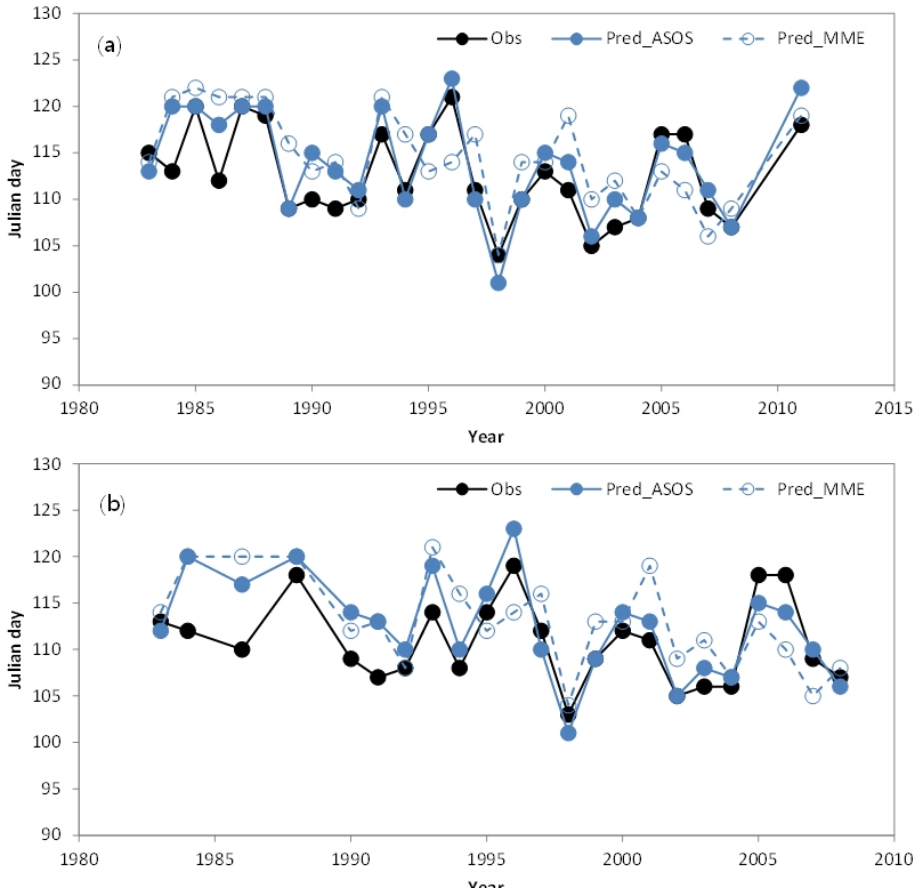


Figure 25 Observed and predicted full blooming dates for (a) Youmyeong and (b) Changbangjosaeng cultivar.

3.3 봄철 서리현상일 예측모델개발

3.3.1 로지스틱회귀

봄철의 기상특성을 분석한 권영아 등 (2008)의 연구를 바탕으로 하여 봄철의 서리 예측 모델을 로지스틱회귀모델을 이용하여 개발하였다. R 소프트웨어 패키지를 사용하였으며, 일반화선형모형 (Generalized Linear Model) 사용하여 (R 소프트웨어 패키지의 glm() 함수) 로지스틱 회귀분석을 수행하였으며, 로지스틱 회귀분석 후 결과에서 각 독립변수의 유의성을 파악하였다. 이때 독립변수가 유의수준 0.05에서 가장 유의하지 않는 독립변수를 제외하고, 나머지 독립변수로 다시 로지스틱회귀분석을

실시하여 각 독립변수들의 유의성을 파악하였다. 이러한 과정을 모든 독립변수들이 유의수준 0.05에서 유의할 때까지 반복하여 수행하였으며, 최종결과는 Table 22에 요약하여 제시하였다. 각 지점별로 선택된 독립변수들은 최저기온 (TMIN), 이슬점온도 (Dewpoint), 평균풍속 (Wind)이 8개 모든 지점에서 선택되었고, 상대습도 (RH_{mean})가 수원지점을 제외하고 7개 지점에서 선택되어, 서리현상일 특성을 이해하는 중요한 기상요소로 판단된다. 운량 (Cloud)과 초상최저기온 (GMINT)가 6개 지점에서 선택된 기상요소였고, 최소습도 (RH_{min})가 3개 지점에서 선택되어 가장 적게 선택된 기상요소로 파악되었다. 이와 같이 로지스틱회귀분석을 통하여 총 7개 (TMIN, Dewpoint, Wind, RH_{mean} , Cloud, GMINT, RH_{min})의 기상요소가 선택되었는데, 현업화를 위한 모형으로는 다소 많은 독립변수로 판단된다.

이러한 방법으로 결정한 로지스틱회귀식으로부터 확률값을 구해 서리가 발생한 날과 발생하지 않는 날로 분류하는 기준값 (threshold value) 선택하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 각 기준값으로부터 HR, POD, FAR을 구하고, 반복법 (Iteration method)으로부터 HR과 POD값은 가능한 큰 값을 갖고 동시에 FAR값을 가능한 작은 값을 보이는 기준값을 최종 선택하였다. 각 지점별로 선택한 기준값은 Table 22에 제시하였다. 진주 지점에서 기준값이 0.42로 가장 작은 값이었고, 최대값은 0.59로 대구지점이었다. 이렇게 산정한 기준값으로부터 최종 HR, POD, FAR구하였으며, Table 23에 요약하였다. HR은 약 0.9이상으로 높은 값을 나타냈고, 대구지점에서 0.962로 최대값을 보였으며, 원주지점에서 0.886으로 가장 작은 값을 보였다. POD의 경우에는 0.657 (대구지점)에서 0.816 (청주지점)의 범위로 나타났다. FAR은 대개 0.3이하로 낮은 값을 보였으나 대구지점에서 0.725로 높은 값을 나타냈는데, 이는 대구지점에서 봄철서리현상일이 다른 지점에 비해 현저히 낮았기 때문으로 사료된다 (Figure 26f).

로지스틱회귀모형에도 Leave-One-Out cross validation 기법을 통하여 교차검증을 실시하였다. 위와 같은 방법으로 최종 산출된 HR, POD, FAR의 값을 Table 23요약하여 제시하였다. 교차검증에 의한 HR, POD, FAR의 값은 로지스틱회귀모형에 의한 HR, POD, FAR과 유사하였다. 이러한 결과는 로지스틱회귀모형이 매우 안정적인 모형임을 의미한다 하겠다. 한편, 봄철 서리현상일 발생건수를 1973년부터 2014년까지 연중일별로 누적하여 로지스틱회귀모형의 봄철 서리현상일 예측결과 및 교차검증에 의한 예측결과와 비교하였다 (Figure 28). 로지스틱회귀모형은 대체로 춘천 (Figure 28a), 원주

(Figure 28b), 수원 (Figure 28c), 서산 (Figure 28d), 청원 (Figure 28e)지점에서 3월에 과대추정하는 경향을 나타냈으나, 교차검증결과와 큰 차이가 나지 않는 점으로 로지스틱회귀모형은 매우 안정적인 모형이라 할 수 있겠다. 서리현상일수가 상대적으로 적었던 대구지점 (Figure 28f)에서는 대체로 모형이 과소추정하는 경향을 보였다.

Table 22 Logistic regression models and threshold values for stations.

Station	$\alpha_0 + \beta'x_i$ in Eq. (13)
Chuncheon	$-0.384 - 0.761 TMIN + 0.15 Dewpoint + 0.019 RH_{mean}$ $- 0.372 Wind - 0.104 Cloud$ Threshold=0.43
Wonju	$-0.922 - 0.388 TMIN - 0.256 GMINT + 0.137 Dewpoint$ $+ 0.068 RH_{mean} - 0.365 Wind - 0.043 Cloud$ Threshold=0.45
Suwon	$-0.190 - 0.484 TMIN - 0.364 GMINT + 0.264 Dewpoint$ $- 0.461 Wind - 0.094 Cloud$ Threshold=0.49
Seosan	$-1.44 - 0.498 TMIN - 0.389 GMINT + 0.186 Dewpoint$ $+ 0.022 RH_{mean} - 0.381 Wind - 0.107 Cloud$ Threshold=0.44
Cheongju	$-2.554 - 0.416 TMIN - 0.501 GMINT + 0.292 Dewpoint$ $+ 0.034 RH_{mean} - 0.026 RH_{min} - 0.343 Wind$ Threshold=0.48
Daegu	$-3.169 - 0.416 TMIN - 0.405 GMINT + 0.328 Dewpoint$ $+ 0.077 RH_{mean} - 0.058 RH_{min} - 0.468 Wind$ Threshold=0.59
Gwangju	$-1.525 - 0.262 TMIN - 0.539 GMINT + 0.153 Dewpoint$ $+ 0.037 RH_{mean} - 0.529 Wind - 0.225 Cloud$ Threshold=0.45
Jinju	$-1.499 - 0.920 TMIN + 0.152 Dewpoint + 0.047 RH_{mean} - 0.029 RH_{min}$ $- 0.439 Wind - 0.0175 Cloud$ Threshold=0.42

Table 23 Hit rate (HR), Probability of detection (POD), and FAR (False alarm rate) by the logistic regression models in spring.

Station	Model			Cross Validation		
	HR	POD	FAR	HR	POD	FAR
Chuncheon	0.899	0.767	0.190	0.897	0.765	0.195
Wonju	0.886	0.762	0.233	0.881	0.753	0.241
Suwon	0.913	0.798	0.231	0.911	0.792	0.235
Seosan	0.918	0.812	0.154	0.916	0.809	0.158
Cheongju	0.927	0.816	0.242	0.924	0.799	0.239
Daegu	0.962	0.657	0.725	0.960	0.592	0.749
Gwangju	0.929	0.747	0.303	0.926	0.733	0.305
Jinju	0.935	0.760	0.216	0.933	0.751	0.229

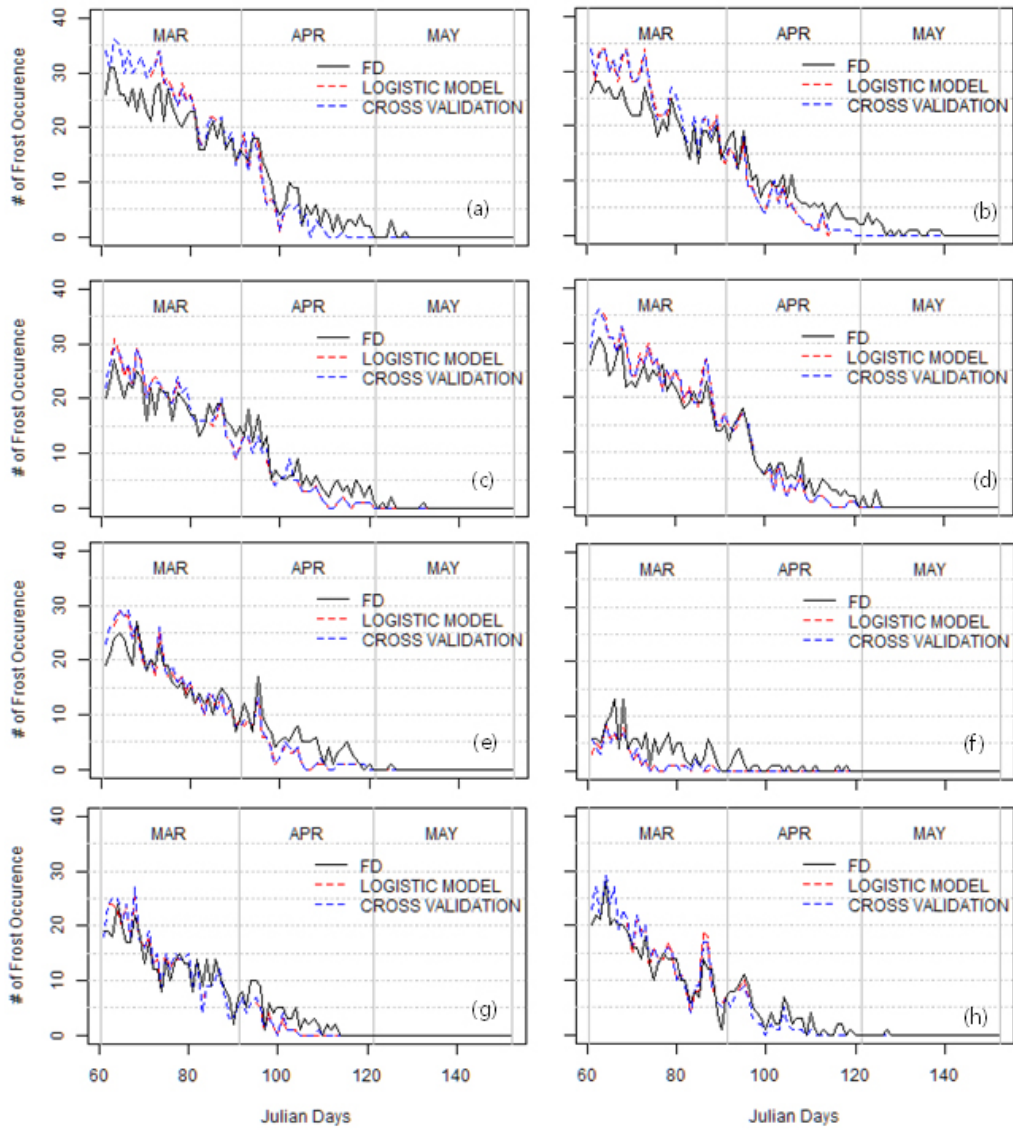


Figure 26 Observed and predicted frost dates in spring using the logistic regression models: (a) Chuncheon (101), (b) Wonju (114), (c) Suwon (119), (d) Seosan (129), (e) Cheongju (131), (f) Daegu (143), (g) Gwangju (156), and (h) Jinju (192).

3.3.2 의사결정트리

봄철서리현상일 예측모델을 의사결정트리를 이용해 개발하였으며, 본 연구에서는 R 소프트웨어 패키지의 `tree()` 함수를 이용하였다. 각 지점별 의사결정트리의 구조는 Figure 27과 28에 나타냈다. 서리현상일 발생유무의 최상위 분류기준으로 최저기온이 3개 지점에서 선택되었고, 초상최저기온이 5개 지점에서 선택되었다. 봄철 서리현상일이 상대적으로 적었던 대구지점을 제외하고는 최저기온, 초상최저기온, 평균풍속, 이슬점온도의 조합에 의해 봄철 서리현상 발생유무를 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 예를 들어, 서산지점 (Figure 29d)의 경우, 초상최저기온이 -0.95°C 이상일 때는 서리 발생이 없는 날로 예측하고, -0.95°C 이하일 때는 최저기온이 -0.25°C 이하이고 평균풍속이 4.05 ms^{-1} 이하일 때 서리가 발생하는 것으로 예측하게 된다. 봄철 서리현상일 예측을 의사결정트리를 이용할 경우, 최저기온, 초상최저기온, 평균풍속, 이슬점온도의 조합에 의해 대부분의 지점에서 예측이 가능하므로, 로지스틱회귀 모형보다 현업화에 유리할 것으로 판단된다.

의사결정트리를 이용한 봄철서리현상일 예측모델의 HR, POD, FAR을 계산하여 Table 24에 제시하였다. 모두 로지스틱회귀모델의 결과와 비슷한 값들을 보였다. 한편 Leave-One-Out cross validation 교차검증에 의한 HR, POD, FAR 값들은 의사결정트리 결과와 매우 유사하여 모형의 안정성일 입증하였다고 판단하였다. 로지스틱회귀모형과 같이 상대적으로 봄철서리현상일이 적었던 대구지점에서 FAR이 높은 값을 나타냈다. 봄철 서리 현상일에 대해 각 지점별 관측값과 의사결정트리와 교차검증에 의한 예측값을 서로 비교하였다 (Figure 29). 로지스틱회귀모형과는 다르게 원주지점(Figure 29b)과 청주지점(Figure 29e)에서 모형이 3월의 서리 현상일을 다소 과대추정하는 경향을 보였으나, 대구지점(Figure 29f)과 광주지점(Figure 29g)에서는 모형이 오히려 과소추정하는 경향을 보였다. 4월의 서리현상일은 대부분의 지점에서 모형이 관측값과 유사하게 추정하고 있으나 원주지점(Figure 29b)과 서산지점(Figure 29)에서 모형이 다소 과소추정하는 경향을 보였다.

이와 같은 결과를 종합하여볼 때, 의사결정트리에 의한 봄철서리현상일 예측모형이 향후 봄철개화기 늦서리 피해 방지에 활용하기에 다소 유리할 것으로 판단된다. 다만, 본 모형을 실제 예측에 활용하기 위해서는 각 기상요소를 시간별로 관측한 후,

시간별로 그 예측성을 평가하여 가장 예측성이 뛰어난 모형을 선정하는 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

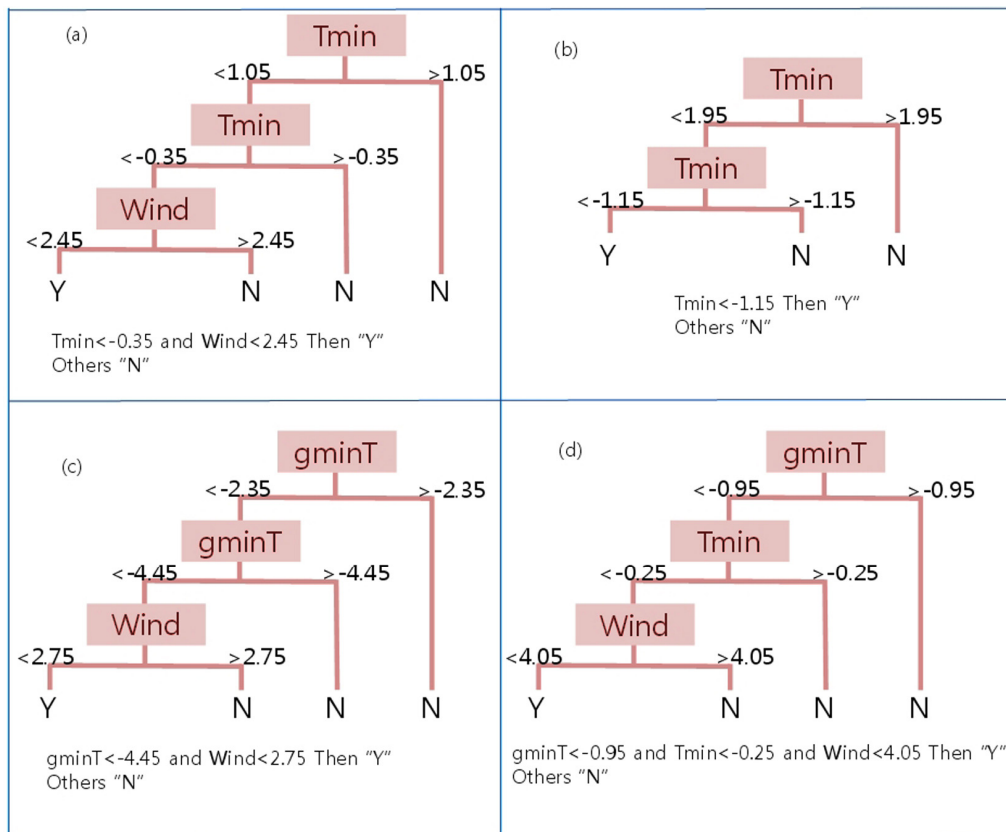


Figure 27 Determined number of nodes using the decision tree models: (a) Chuncheon (101), (b) Wonju (114), (c) Suwon (119), and (d) Seosan (129). $gminT$: grass minimum temperature, T_{min} : minimum temperature, $Wind$: wind speed.

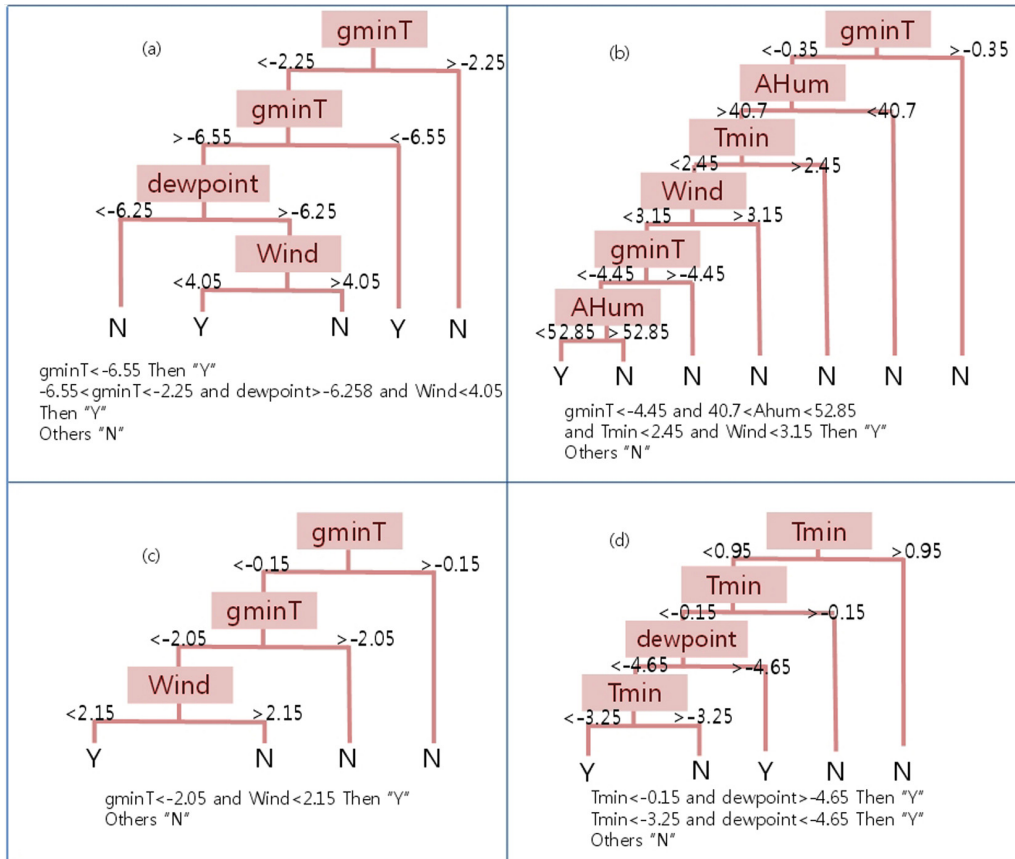


Figure 28 Determined number of nodes using the decision tree models: (a) Cheongju (131), (b) Daegu (143), (c) Gwangju (156), and (d) Jinju (192). gminT: grass minimum temperature, Tmin: minimum temperature, Wind: wind speed, AHum: Relative humidity.

Table 24 Hit rate (HR), Probability of detection (POD), and FAR (False alarm rate) by the decision tree models in spring.

Station	Model			Cross Validation		
	HR	POD	FAR	HR	POD	FAR
Chuncheon	0.900	0.813	0.259	0.899	0.812	0.265
Wonju	0.871	0.778	0.343	0.869	0.773	0.352
Suwon	0.903	0.808	0.311	0.893	0.784	0.337
Seosan	0.907	0.866	0.285	0.899	0.835	0.288
Cheongju	0.920	0.731	0.139	0.909	0.707	0.174
Daegu	0.964	0.745	0.754	0.952	0.396	0.772
Gwangju	0.916	0.761	0.469	0.915	0.746	0.465
Jinju	0.940	0.804	0.246	0.937	0.793	0.264

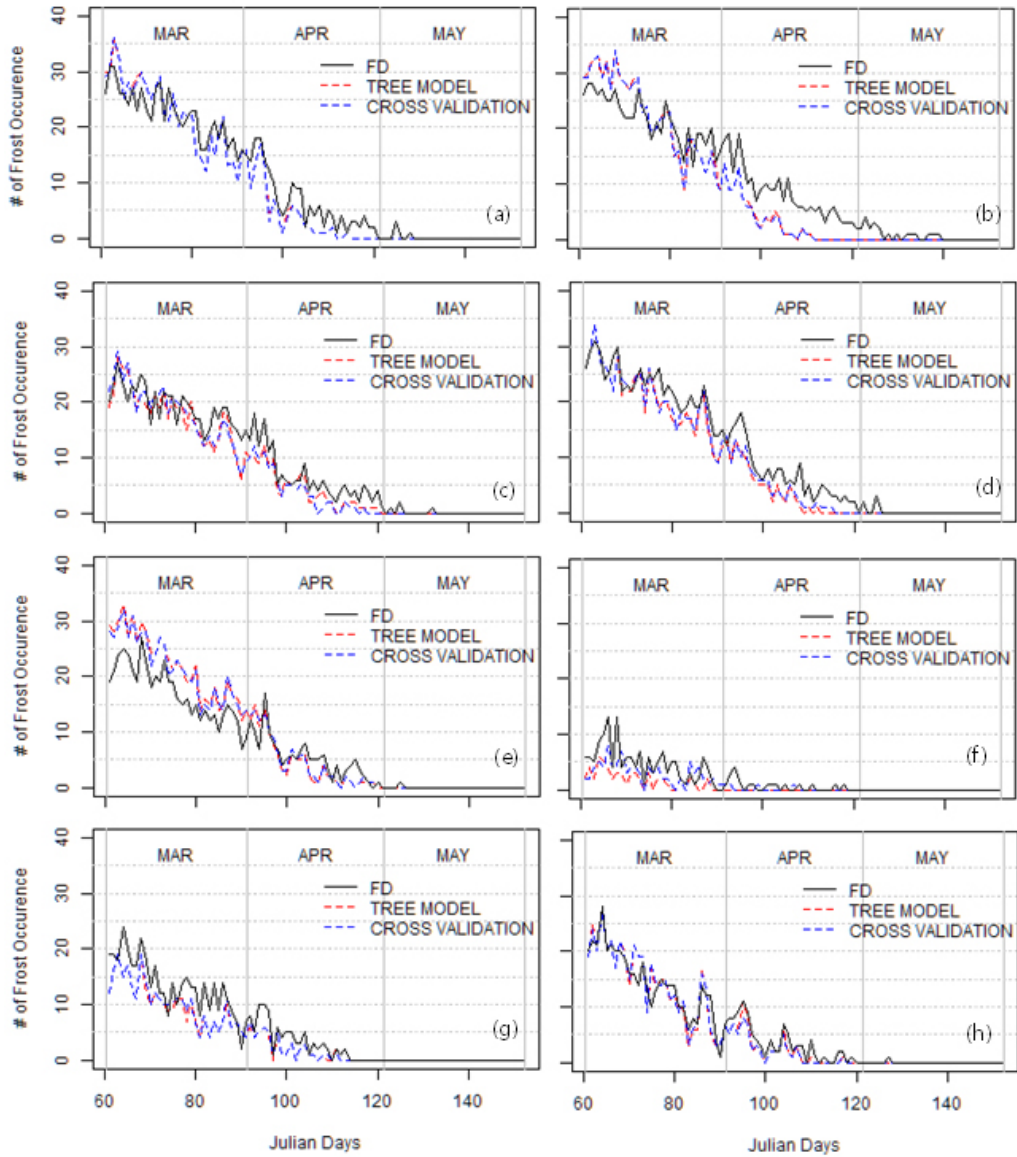


Figure 29 Observed and predicted frost dates in spring using the decision tree models: (a) Chuncheon (101), (b) Wonju (114), (c) Suwon (119), (d) Seosan (129), (e) Cheongju (131), (f) Daegu (143), (g) Gwangju (156), and (h) Jinju (192).

4. 활용 방안

4.1 복숭아 만개기 예측모델

본 연구에서 복숭아 만개기를 예측하기 위해 적용한 발육속도모형, Chill day 모형, New chill day 모형의 지역별 및 품종별 구분 없이 전체자료에 대해 구해보면, 대표적으로 MAPE 지표값은 각각 2.58%, 2.31%, 2.19%로 New chill day모형이 예측력이 다소 뛰어난 것으로 나타났다. 본 연구에서 New chill day모형은 국내에 처음으로 도입하여 적용한 모형으로 그 의의를 찾을 수가 있다. 또한, Chill day 모형과 New chill day 모형은 발육속도 모형과는 다르게 발아기를 예측할 수 있으며, 개념적이기는 하지만 내생휴면과 환경휴면이 타파되는 시기를 추정할 수 도 있는 장점이 있다. 또한, 본 연구에서 개발한 모형은 각 지역 및 품종별 맞춤형 복숭아 만개기 예측정보를 생산할 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 연구의 방법은 기온 등의 환경적인 요소뿐 만 아니라 각 품종별 특성을 고려해서 복숭아 만개기를 예측하는 방법으로, 현재 농진청의 유명품종에 대해 발육속도모형을 이용해서 전국의 주요 복숭아재배지역에 품종에 관계없이 만개기 예측정보를 제공하는 한계를 개선하였다.

본 연구의 결과를 이용하여 6개 주요 복숭아 만개기 지점 및 5개 품종별 모형을 선정하였다. 각 지역 및 품종별 최적 모형 선정기준은 복숭아 만개기는 실제 만개한 날과 예측한 날의 오차가 중요하므로 MAPE 지표를 활용하였다. 춘천지점에서는 천홍과 유명품종 모두 New chill day 모형이 선정이 되었고, 수원지점에서는 창방조생과 유명품종의 경우 chill day 모형이, 천홍품종의 경우 New chill day 모형이 선정되었다. 청원지점의 경우, New chill day모형은 천홍품종에, chill day 모형은 유명품종에 더 적합한 것으로 나타났으며, 청도지점의 경우, 천홍과 유명품종은 New chill day 모형이, 천중도와 장호원품종은 발육속도모형이 더 적합한 것으로 나타났다. 나주지점에서는 천홍과 유명품종 모두 발육속도모형이 선정되었으며, 진주에서는 두 품종 모두 New chill day 모형이 선정되었다. 이와 같이 발육속도모형은 청도와 나주지점에서 4개의 품종별 모형이 선정되었으며, Chill day 모형은 수원과 청원에서 3개의 품종별 모형이 선정 되었고, New chill day 모형은 춘천, 수원, 청원, 청도, 진주지점에서 모두 8개의 품종별 모형이 선정되었다.

이러한 지역 및 품종별 맞춤형 복숭아 만개기 예측정보는, 현재 단일품종 및 단일 모형에 의한 예측정보보다 지역 및 품종의 특성을 반영한 예측정보이므로 농진청에서 예측정보를 발표 시 그 활용성이 매우 크다고 할 수 있다. 또한, 각 도농업기술원에 지역별 복숭아 만개기 예측정보를 제공하여 필요한 복숭아 과원에 대한 영농활동을 추천하는데 사용할 수 있다. 예를 들어, 복숭아 만개기가 평년보다 이른 시기로 예측이 된다면, 개화기에 저온피해의 위험이 커지므로 저온피해방지대책을 미리 마련하도록 추천할 수 있으며, 계절예측정보와 결합하여 개화기때 강우가 평년보다 많이 전망될 경우에는 인공수분 작업을 할 수 있는 기간이 짧아지므로 꽃가루를 미리 확보해 두도록 추천할 수 있다. 본 연구는 농진청에서 복숭아 만개기를 전망하고 발표할 때 지역 및 품종별 맞춤형 정보를 제공하는 장점이 있으므로 실제 활용도 매우 크다고 할 수 있다. 그러나 본 연구를 실제 현업화해서 매년 농진청 및 도농업기술원에 제공하기 위해서는 현협화 시스템구축을 통하여 신속한 예측정보가 제공될 수 있도록 하는 방안 등의 후속연구가 반드시 수행되어야 할 것으로 판단된다.

우리나라의 강릉, 영덕, 이천 등 많은 지역에서 복사꽃축제를 개최하고 있다 (Figure 30). 이러한 축제가 성공적으로 개최되기 위해서는 정확한 복숭아꽃 만개기 예측을 바탕으로 충분히 미리 홍보를 하는 게 중요하다 하겠다. Figure 30에서 보여주는 바와 같이 복사꽃축제 지역이 한반도 전역에 걸쳐있다. 각 지역별 만개기 예측정보가 필요할 것이므로 본 연구에서 개발한 지역 및 품종별 맞춤형 복숭아꽃 만개기 예측정보는 상당히 유용한 정보일 수 있다. 그러나 이러한 지역별 맞춤형정보생산에도 복사꽃축제 홍보시점을 고려한다면 충분히 이른 시점에 예측정보가 생산되어야만 하는데, 현재 본 연구에서는 농진청의 발표시점 및 APCC MME 계절자료가 월별자료인 점을 고려해서 3월 하순에 분석이 되어 지역별 만개기 정보를 생산되는 한계가 있다. 본 연구에서 제안한 방법들보다 복사꽃 축제에 활용할 수 있도록 개선이 요구된다.

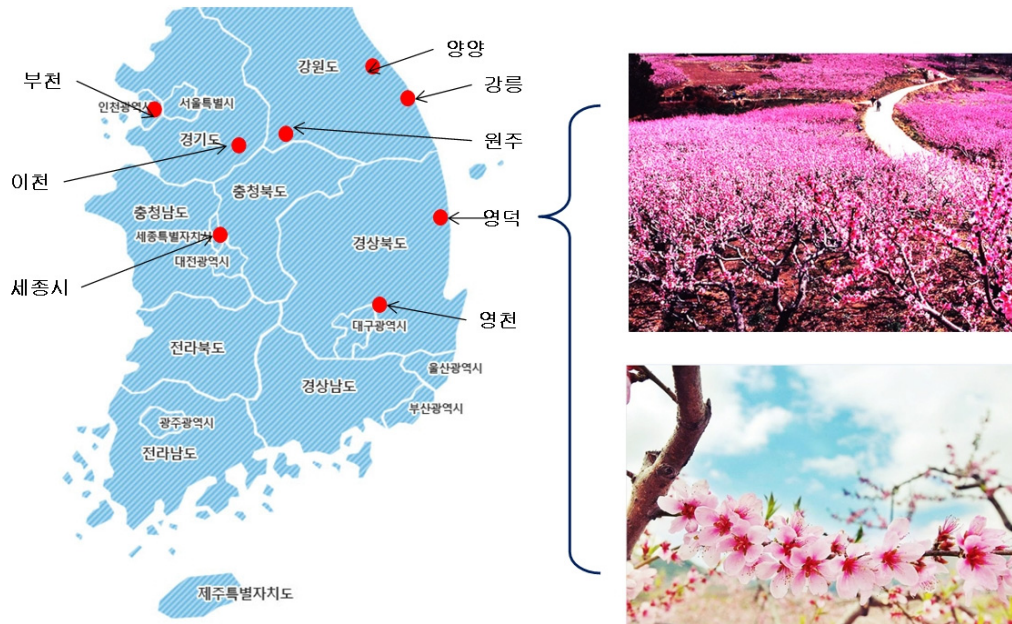


Figure 30 Location map of peach blossom festivals in Korea.

미래기후시나리오에 의하면 전지구적으로 기온상승이 전망된다. 이러한 기온상승으로 휴면타파에 필요한 저온요구량을 맞추는 시점 (즉 내생휴면타파시점)이 변화하고 결과적으로 휴면타파 후 발아시점의 변화가 예상된다. 김대준 등 (2012)에 의하면, 기후변화에 따라서 과수작물의 휴면 돌입시기가 빨라지고 휴면상태는 오래 지속될 수 있다고 발표하였다. 복숭아의 경우, 냉각량이 적절하지 못했을 때, 복숭아꽃의 암술머리 (stigma)와 암술대 (style)가 부족할 수 있다고 하였으며, 체리나무 (*Prunus avium*)의 경우 냉각량이 부족하면 꽃봉오리의 크기가 작아질 수 있다고 하였다 (Mahmood et al., 2000). Atkinson et al. (2013)은 기후변화에 따른 겨울철 기온상승으로 온대과수작물의 품질 및 수량의 저하가 예상된다고 하였다. 겨울철 기온상승은 발아, 개화, 수정, 착과 등 과수의 전반적인 발달단계에 영향을 미쳐 과실의 품질이 떨어질 수 있다고 하였다. 본 연구에서 개발한 지역 및 품종별 맞춤형 Chill day 모형이나 New chill day 모형을 활용하여 기후변화에 따른 내생 휴면타파시기 및 환경휴면타파시기, 발아기, 개화기 및 만개기의 변화 등을 전망할 수 있을 것이다. 과수의 휴면타파 및 개화시기는 과수의 품질 및 수량에도 영향을 주는 요소이기 때문에 본 연구에서 개발한 모형을 기후변화가 과수의 품질에 미치는 영향을 전망하는데 활

용 할 수 있을 것으로 기대된다.

한편, 품종을 지역별로 나누었을 때, 회귀모형에 사용하는 자료수가 작아지는 단점을 보완하기 위해, 지역 구분 없이 회귀모형을 적용하여 보았다. 또한, 이러한 방법으로 향후 지속적인 만개기 예측자료를 관측하여 각 관측지점에서 충분한 자료를 확보하였을 때 모형의 개선 정도를 미리 알아볼 수 있으므로, 지속적 관측자료의 확보 당위성을 제공해 주는 근거로 활용할 수 있을 것이다. 발육속도모형이나 Chill day 모형 및 New chill day모형은 일별 기상자료가 입력변수로 사용되므로 각 기상 관측지점별로 기상자료가 사용되므로, 지역 구분 없이 품종별 모형 개발에는 적용하지 않았다. 천홍과 유명품종을 제외하고 장호원, 천중도, 창방조생품종의 경우에는 오로지 한 지점에서만 관측하는 품종이므로 제외하였다. 따라서 천홍과 유명품종을 지역 구분 없이 다중회귀모형을 개발하였을 때, 모형개발에 사용된 자료의 수는 각각 51개와 81개였다. 수정결정계수의 경우에는 천홍과 유명품종이 각각 0.65와 0.73으로 다소 높았고, VIF값도 대부분 1.8이하로 다중공선성문제가 발생하지 않는 것으로 나타났다. 그러나 모형에 적합 시킨 설명변수들의 p-value는 천홍품종의 경우 3월 평균기온을 제외하고는 모두 유의수준 $\alpha=0.05$ 에서 유의하지 않았으며, 유명품종의 경우에는 4월하순평균기온을 제외하고는 모두 유의수준 $\alpha=0.05$ 에서 유의하였다. 각 설명변수의 적합값은 대체로 천홍 (intercept=131.1, $b_1=-3.34$, $b_2=-0.4$, $b_3=-0.03$, $b_4=0.05$)과 유명품종 (intercept=143.4, $b_1=-2.16$, $b_2=-0.67$, $b_3=-0.82$, $b_4=-0.26$) 모두 춘천관측지점과 유사하였다 (Table 12).

4.2 봄철서리현상일 예측모델

복숭아의 경우 다른 과수작물보다 개화기가 이른 편이라 개화기에 저온 및 서리피해 위험도가 클 수 있다. 주요 복숭아 만개기 관측지점에서 봄철 종상일과 발아기 및 만개기를 그림으로 나타내었다 (Figure 31). 청원지점 (Figure 31c)과 청도지점 (Figure 31d)을 제외하고 대부분 종상일이 복숭아 발아기이후에 나타난 것을 알 수 있는데, 발아기 이전에는 꽃눈이 휴면상태에 머물러 있기 때문에 저온 등의 피해로부터 비교적 안전하지만, 발아이후에는 그 위험에 그대로 노출될 수 있다. 따라서 청원지점과 청도지점을 제외하고 다른 주요 지점은 발아기 이후에도 늦서리 피해의 위험이 크다고 할 수 있겠다.

특히 진주지점에서는 만개기 즈음에 종상일이 관측 되는 등 늦서리 위험이 상대적으로 더 큰 지점으로 나타났다. Figure 5에서 보여주는 바와 같이 “Reday-Set-Go” 프레임워크를 각 시간스케일별로 전략적으로 대응해야 하는데, 봄철 늦서리 피해방지에 해당하는 항목은 Figure 5의 “Go”단계에 해당된다 할 수 있다.

봄철서리현상일의 예측하는 모델을 본 연구에서는 의사결정트리와 로지스틱회귀방법으로 개발하였으며, 로지스틱회귀모델에서는 선택된 설명변수가 최대 6개였고, 의사결정트리에서는 대부분의 지점에서 2개 내지 3개의 설명변수로 모형을 개발되었다. 이러한 선택된 설명변수의 수를 고려해보면, 향후 봄철늦서리발생 예측 등의 연구를 수행할 시 의사결정트리가 로지스틱회귀방법보다 더 적절해 보일 것으로 판단된다.

늦서리의 피해를 받기 쉬운 지형적 조건은 과원이 산지로부터 냉기류의 유입이 많을 수 있는 곡간지역이나, 평지사방이 산지로 둘러싸인 분지지형 등을 들 수 있다. 이와 같이 서리현상은 지형적요소가 매우 큰 영향을 주는 국지적 현상이니 만큼, 서리현상 예측 시에 국지적 지형요소를 고려할 수 있는 방안에 대한 연구가 함께 수행되어 그 예측성을 개선해야 할 것으로 보인다. 한편 개화기 전후로 저온이나 늦서리 피해를 받으면, 암술머리와 배주가 흑변 되고, 심한 경우 아예 개화를 못하고 고사하는 경우도 발생하며, 개화를 하더라도 결실을 못하거나, 수정이 되어도 기형과가 되어 조기 낙과의 피해가 발행할 수 있다. 전술하였듯이 저온이나 서리 피해방지에 해당하는 항목은 Figure 5의 “Go”단계에 해당된다. 피해 예방 등 사전 대책으로는 크게 연소법, 방상선에 의한 송풍법, 살수법 등을 들 수 있다. 연소법은 톱밥이나 왕겨 등을 태워서 과원내의 기온을 일시적으로 높여주는 방법으로 과원 내부보다는 과원 주위에 많이 배치해서 과원 내부 온도가 골고루 상승할 수 있도록 주의를 요한다. 방상선에 의한 송풍법은 온도가 내려갈 때 팬을 가동해 송풍을 유발시키는 방법으로 발아 직전에는 2℃ 전후에 가동을 하고, 개화기 이후에는 3℃ 정도에서 팬을 가동시키도록 설정해야 하는데, 이때 여러 대가 동시에 가동되지 않도록 주의해야 한다. 살수법은 살수장치(스프링클러)를 이용하여 미세한 물이 얼음으로 변환될 때 방출되는 잠열을 이용하는 방법으로 일반적으로 과원의 온도가 1℃에서 2℃정도가 되면 살수시스템을 가동하며, 일출 후에는 정지시킨다. 살수법을 실시할 때는 기온이 0℃일 때, 살수가 중지되지 않도록 충분한 물량을 미리 확보하는 게 중요하다.

농림축산식품부는 2013년에 과수 등 동상해 및 우박 피해농가 32,178호, 28,877ha 피해에 총 262억원의 재해복구비를 지원하기로 결정하였다고 발표하였다. 이와 같이 농업기상재해는 1차적으로는 재배농가의 재산에 직접적인 피해를 입힐 뿐만 아니라, 재해복구비 지원 등의 정부의 재정지출을 초래하기도 한다. 본 연구에서 수행한 봄철서리현상일 예측모델을 국지적 지형조건 등을 반영하여 사전에 보다 정확한 서리현상을 예측할 수 있다면, 농가의 재산피해를 줄이고, 정부의 재정지출부담을 감소하는 등의 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 한편 2013년 정부는 농작물재해보험 피해접수가 2만여 건에 달해 보험금으로 약 595억원을 지급될 것이라 추정하기도 하였다. 특정위험방식의 중 특약사항으로 봄동상해에 대해서 발아기에서 5월31일까지를 특정위험방식의 보험기간으로 정하였다. 농작물재해보험 사업시행지침 (2012년도)에 따르면 특정위험방식 (사과, 배, 단감, 감귤, 뽕은감) 및 종합위험방식 (복숭아, 포도)의 방재시설 설치 농지에 대해서는 방재시설별, 대상재해별로 5%에서 30%의 보험료 할인율이 적용된다. 또한, 과거 손해율 및 가입년수에 따라 최고 - 25%에서 40%범위 내에서 할인이나 할증율을 적용할 수 있다. 이와 같은 사실은 정확한 늦서리발생예측과 적절하게 적시에 피해방지대책으로 농가의 피해규모를 줄일 수 있다면, 보험요율 적용 및 할인이나 할증 등 산정 시 농작물재해보험에 가입하는 농가에게 유리하게 작용할 수 있을 것으로 기대된다.

과수작물이 봄철 늦서리에 주로 피해를 입는다면, 가을에 성숙하는 초본 작물은 가을철 첫서리 피해를 받기 쉽다. 본 연구에서 봄철서리현상 발생 예측모델의 연구방법을 그대로 가을철 서리현상 발생 예측모델 개발에 활용할 수 있다. 따라서 본 연구에서 수행했던 봄철서리발생 예측에 대한 연구에 대한 활용방안으로 가을철 서리현상 발생 예측 모델을 개발하였다 (Figure 32). 가을철은 권영아 등 (2008)에 제시하였던 9월에서 11월까지의 3개월로 정의하였다. Figure 31에서 보여주는 것과 같이, 봄철 서리현상일 예측에 대한 결과 보다 (Figures 26 and 29) 예측성이 다소 높은 것을 나타냈다. 예측성 검증에 활용한 HR, POD, FAR 모두 가을철 모델 (Table 25) 이 봄철 모델 (Tables 23 and 24)보다 우수한 것으로 나타났다. 이러한 가을철 서리현상 발생 예측정보가 가을철서리의 피해방지에 기여할 수 있을 것이라 기대된다.

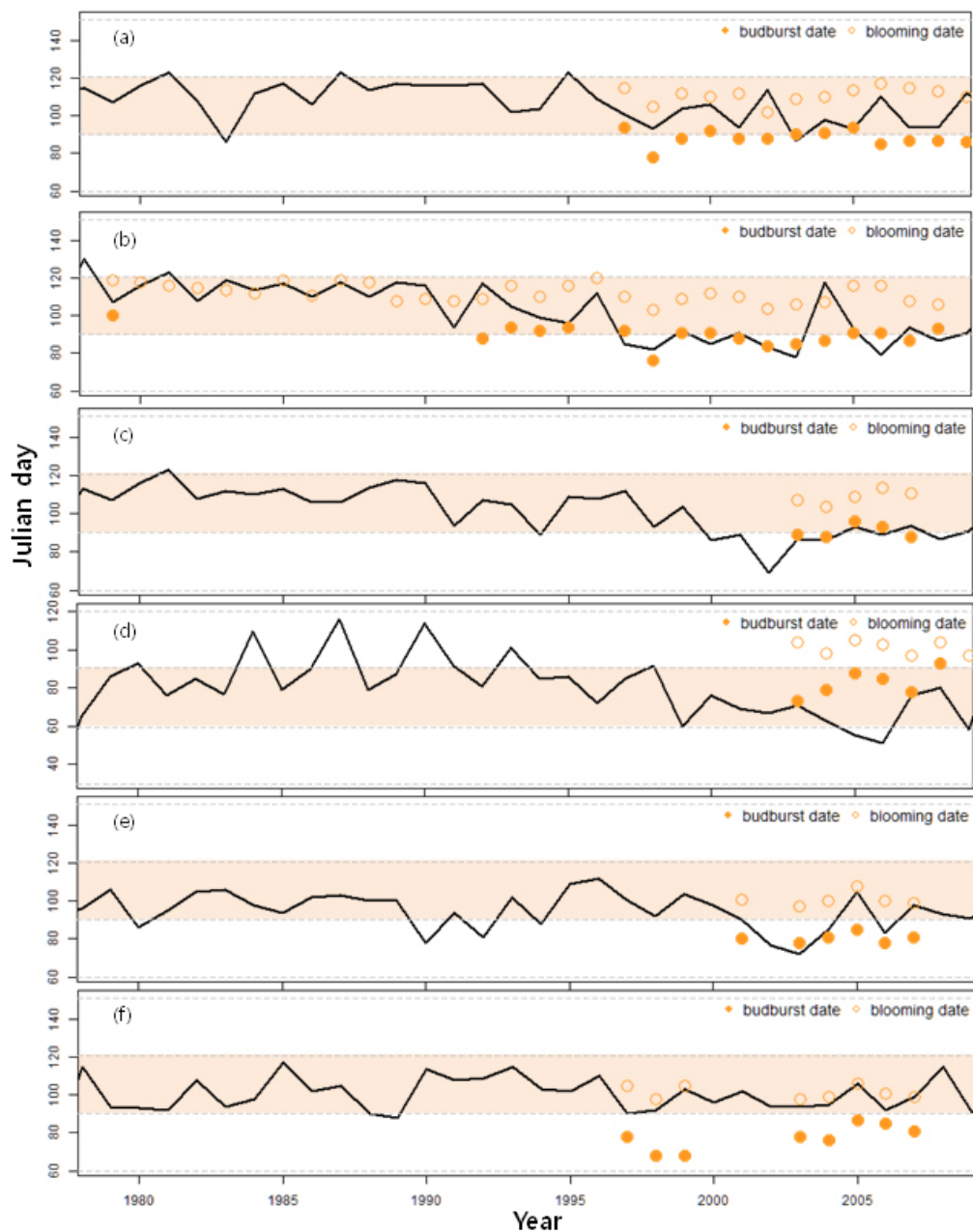


Figure 31 Last spring frost dates in Julian days and budburst and full blooming dates: (a) Chuncheon [101], (b) Suwon [119], (c) Cheongwon [131], (d) Cheongdo [143], (e) Naju [156], and (f) Jinju [192].

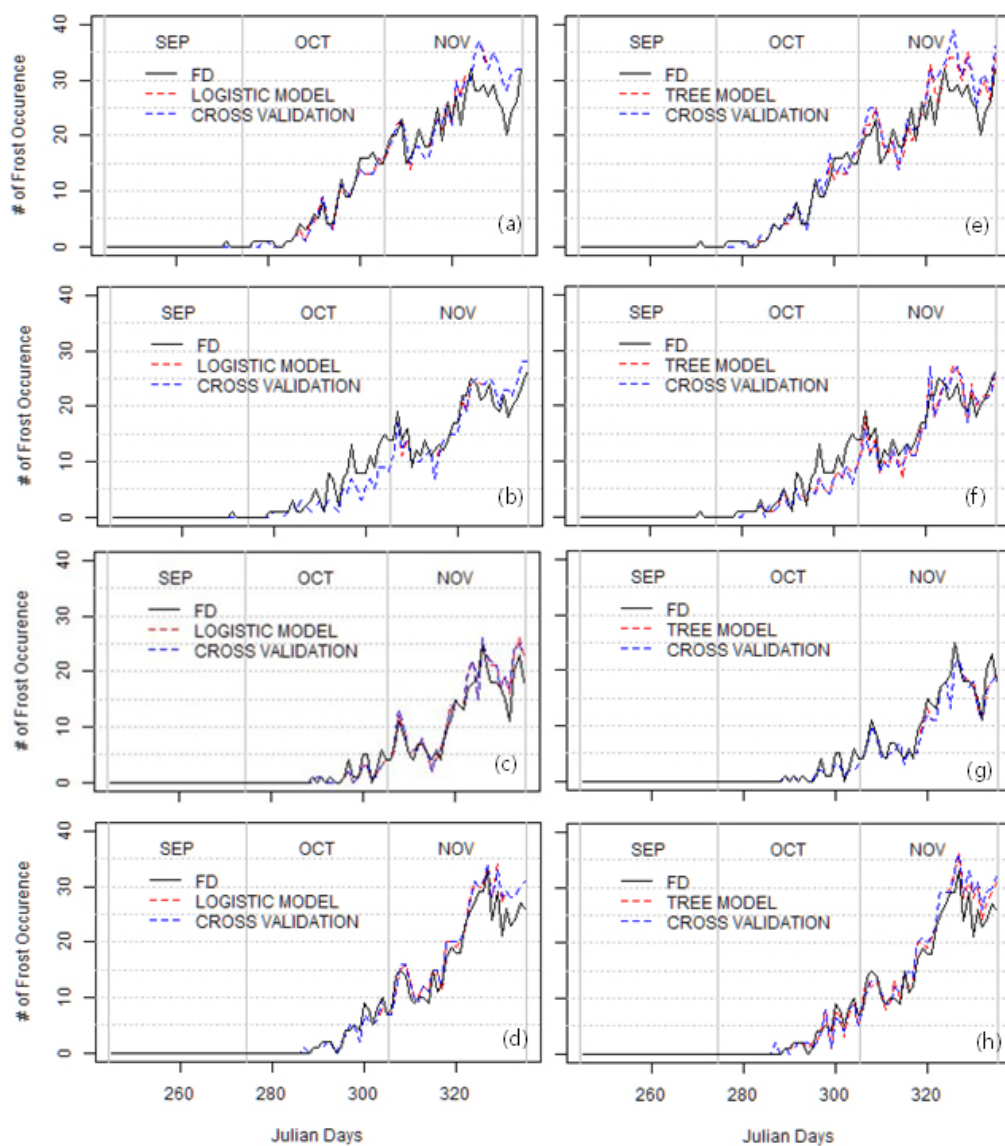


Figure 32 Observed and predicted frost dates in fall using the logistic (a) to (d) and decision tree (e) to (h) models: (a) and (e) Chuncheon, (b) and (f) Suwon, (c) and (g) Gwangju, and (d) and (h) Jinju.

Table 25 Hit rate (HR), Probability of detection (POD), and FAR (False alarm rate) by the logistic regression and decision tree models in fall.

Station	Logistic regression			Decision tree		
	HR	POD	FAR	HR	POD	FAR
Chuncheon	0.931	0.833	0.119	0.921	0.812	0.139
Wonju	0.925	0.821	0.249	0.929	0.833	0.242
Suwon	0.952	0.747	0.303	0.955	0.821	0.266
Seosan	0.959	0.852	0.082	0.956	0.847	0.096

5. 요약 및 결론

춘천, 수원, 청원, 청도, 나주, 진주 등 전국의 주요 복숭아 만개기 예측지점을 대상으로 복숭아 품종별 만개기 예측모델을 개발하였다. 이러한 지역 및 품종별 맞춤형 복숭아 만개기 예측모델을 개발하기 위해 위의 6개 만개기 관측지점과 가장 가까운 종관기상관측시스템으로부터 일최고기온, 일최저기온, 일평균기온의 기온자료를 수집하였으며, 다중회귀모형, 발육속도모형, 순차휴면모형 개발에 이용하였다. 본 연구의 지역 및 품종별 맞춤형 복숭아 만개기 예측모델은 현재 농진청에서 사용하고 있는 단일품종 (유명품종)을 기반으로 개발한 단일모형 (발육속도모형)을 이용하여 전국 주요 복숭아 재배지점에 복숭아 만개기를 예측하여, 각 지역 및 품종별 특성을 제대로 반영하지 못하는 단점을 상당부분 개선할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 본 연구에서 사용한 방법을 과수원예작물을 재배하는 파키스탄이나 이란 등의 개발도상국에 적용하여 개발도상국 지원이라는 APCC 역할을 수행하는 연구로 확대해나갈 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 다중회귀모델의 경우 변수의 설명력이 그리 높지 않았으며, 추정한 각 변수들도 (3월의 평균기온, 4월초순평균기온, 4월중순평균기온, 4월하순평균기온) 대부분 유의수준 0.05에서 유의하지 않았다. 발육속도모형은 선형함수식과 지수함수식으로 나누어 개발하였는데, 선형함수식의 경우에는 대부분의 지점에서 유의하지 (유의수준:0.05) 않았으나, 지수함수식의 경우 유의수준 0.001에서 유의한 것으로 나타났다. 특히, 각 지점 및 품종별로 적합값이 다소 달랐는데, 이는 지역 및 품종별로 특성을 반영하는 모델을 개발의 필요성을 함의한다고 볼 수 있다. 순차휴면모형은 Chill day 모형, New chill day 모형, Fraction-time 모형의 세 가지 모형을 적용하였는데, New chill day 모형과 Fraction-time 모형은 국내 처음 적용하는 모형이다. 적용 결과 Fraction-time 모형은 기준온도와 저온요구량을 추정할 때 대부분 발산하여 국내에는 적용성이 없는 것으로 나타났다. 전체 복숭아 만개기 관측자료에 대한 각 모형과 관측 만개기를 비교하였을 때, New chill day 모형이 Chill day 모형이나 발육속도모형보다 예측력이 다소 우수하였다. 각 모형의 평가지표를 살펴보면, 발육속도모형의 경우, MAPE: 2.58%, R^2 : 0.75, RMSE: 3.65일이었고, Chill day 모형은 MAPE: 2.31%, R^2 : 0.79, RMSE: 3.36일, New chill day모형은 MAPE:

2.19%, R^2 : 0.82, RMSE: 3.16일이었다.

농진청의 복숭아 만개기 전망자료 발표시점이 3월 하순이고, 복숭아의 평년 만개기는 춘천지점 이나 수원지점에서 4월 중순이므로, 발표시점 이후의 기온의 예측자료가 필요하다. 본 연구에서는 APCC MME 계절자료를 활용하여 4월 예측자료의 입력값으로 사용하였다. APCC MME 계절자료를 통계적으로 규모축소하여 복숭아 만개기 예측모델 중 예측성이 가장 우수한 New chill day 모형에 적용하였다. 복숭아 만개기 관측자료가 가장 긴 관측지점인 수원지점에 통계적 규모축소의 결과를 고려하여 수원지점의 창방조생품종과 유명품종에 대해 APCC MME 계절자료의 적용성을 검토하였다. 이때 일별기온자료가 필요하기 때문에 MEBWG 날씨생성기로 생성한 합성 일별기온자료를 월별자료로 변환 후, APCC MME 계절자료와 비교하여 가장 유사한 합성기온자료를 선별하였다. 이렇게 선별한 합성 기온자료를 활용하여 창방조생과 유명품종에 대해 만개기를 예측하였다. 예측결과는 오차가 관측자료를 활용할 때보다 커졌는데, 대부분 APCC MME 계절자료와 MEBWG 합성자료의 불확정성과 통계적 규모 축소 단계나 합성자료 선별 작업 단계 등에서 기인한다고 볼 수 있다. 따라서 APCC MME 계절자료의 예측성과 정확한 상세화 방안에 대한 연구를 통해 복숭아 만개기 예측성을 높일 수 있을 것이라 판단된다. 이와 같이 본 연구에서는 APCC MME 계절자료를 과수원예분야에 확대 적용하여 APCC MME 계절자료의 활용성을 다양화한데 그 의미가 있다 하겠다.

봄철 늦서리의 피해로 재배농가가 직접적으로 재산상의 피해를 입게 되고 정부는 피해복구비로 추가 재정지출을 하는 경우가 발생하며, 농협도 재해보험료 지급 등으로 보험료의 할증이 발생할 수도 있다. 이에 본 연구에서는 봄철 서리발생 예측모델을 개발하였는데, 이는 Figure 5의 Ready-Set-Go 전략적인 방법으로 개화기 즈음에 서리발생을 미리 예측하여 과원의 늦서리피해방지대책을 사전에 마련하여 피해를 줄이는 방안에 대한 기반 연구라고 할 수 있다. 본 연구에서는 서리현상 예측모델을 로지스틱회귀 및 의사결정트리의 방법을 활용하여 개발하였다. 로지스틱회귀방법으로는 설명변수가 지점별로 최대 6개까지 선택되었고, 의사결정트리에서는 2에서 3개의 설명변수만으로 서리현상이 예측 가능하였다. 따라서 의사결정트리모형이 서리현상 예측을 현업화 하기에는 더 유리할 것으로 판단하였다. 그러나 서리현상은 국지적 지형의 영향을 많이 받는 현상으로 지형의 영향을 고려하여 예측성을 개선하는 노력

이 요구될 것으로 사료된다. 농작물의 가을철 첫서리의 피해 또한 자주 발생하는 현상으로 본 연구에서 제안한 서리 현상 예측연구 방법론을 적용하여 가을철 서리현상을 사전에 예측할 수 있을 것으로 판단하였고 개발하여 결과를 제시하였다. 서리현상을 조기에 예측하는 이러한 예측방법은 연소법, 방상선에 의한 송풍법, 살수법 등의 피해방지대책을 미리 점검하고 활용하여 서리에 의한 피해를 줄이는 효과가 있을 것으로 기대된다.

이와 같이 본 연구에서 개발한 지점 및 품종별 맞춤형 복숭아 만개기 예측모형은 농진청에서 현업화에 관심을 보이는 등의 본 연구결과의 활용성이 매우 큰 연구라 할 수 있다. 다만 복숭아 만개기를 예측하는 모형을 현업화 하기 위해서는 만개기 예측의 전과정을 모듈화 및 자동화하는 등의 시스템화 노력이 필요하다. 또한, 시스템화 할 때에는 사용자 (이 경우 농진청)의 요구를 반영하여 사용자의 목적에 맞춤형으로 개발 될 필요성이 있으므로 향후 수요처와 지속적 협의가 필요하며, 시스템의 업데이트 및 모형의 예측성 향상 등의 꾸준히 개선하려는 노력이 요구된다. 복숭아 만개기 예측이 Ready-Set-Go 전략적인 방법에서 “Ready”에 해당하며, 서리현상 발생 연구는 “Go”에 해당하는 연구이다. 본 연구는 이러한 시간스케일에 따라 전략적으로 대응하는 방법으로 효율적이며 실질적으로 의사결정에 도움이 될 것으로 기대된다.

참고 문헌

- 권영아, 이효신, 권원태, 부경은, 2008. 서리 피해 방지를 위한 서리 발생일의 기상 특성에 대한 연구. 대한지리학회지 43(6), 824-842.
- 기상청 (KMA), 2012, 현업용 권역별 장기예보 기술 개발, RACS-2010-2018.
- 김대준, 정유란, 윤진일, 2012. 식물계절모형 입력자료로서 확률추정 기상자료의 이용 가능성. 한국농림기상학회지, 14(1), 11-18.
- 김미리, 김승규, 2014. 사과생산량에 영향을 미치는 기상요인 분석. 한국농림기상학회지, 16(4), 274-284.
- 김진희, 김수옥, 정유란, 윤진일, 황규홍, 김정배, 윤익구., 2009. 겨울기온 상승에 따른 복숭아 나무 '장호원황도' 품종의 결과지에 대한 동상해위험 공간분석: II. 휴면심도로 표현한 생리적 내동성에 근거한 동해위험지수. 한국농림기상학회지, 11(4), 213-220.
- 김진희, 이은정, 윤진일, 2013a. 동네예보와 생물계절모형을 이용한 봄꽃개화일 예측. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 15(1), 40-49.
- 김진희, 천정화, 윤진일, 2013b. 신 기후변화시나리오 저건에서 한반도 봄꽃 개화일 전망. 한국 농림기상학회지, 15(1), 50-58.
- 서영호, 박영식, 조병욱, 강안석, 정병찬, 정영상, 2010. 강원지역의 2010년 복숭아 동해. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 12(4), 225-231.
- 윤석규, 신용익, 윤익구, 남은영, 한점화, 최인명, 유덕준, 이희재, 2011, 발육 속도 모델을 이용한 포도 '캠벨얼리'의 발아기 예측, Korean Journal of Horticultural Science and Technology, 29,3, 181-186.
- 윤석규, 정경호, 윤익구, 남은영, 한점화, 유덕준, 이희재, 2012. 발육속도모델을 이용한 복숭아 '유명'의 개화기 예측. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 14(4), 189-195.
- 전종안, 2015. 원격탐사자료기반 한반도의 벼 생산성 예측. APEC기후센터 연구보고서 2015-8.
- 정재은, 윤진일, 2006. 발아시기 정밀추정에 의한 포도 만상해 경보방법 개선. 한국농림기상학회지 8(1), 28-35.
- Aono, Y., 1993. Climatological studies on blooming of cherry tree (*Prunus yedoensis*) by means of DTS method. Bulletin of University of Osaka Prefecture. Series B. Agriculture and Life Science 45, 155-192.
- Aono, Y., Omoto, Y., 1990. A simplified method for estimation of blooming date for the

- cherry by means of DTS. *Journal of Agricultural Meteorology* 46, 147-151.
- Apipattanavis, S., Podesta', G., Rajagopalan, B., Katz, R.W., 2007. A semiparametric multivariate and multisite weather generator. *Water. Resour. Res.* 43(11), doi:10.1029/2006WR005714.
- Atkinson, C.J., Brennan, R.M., Jones, H.G., 2013. Delining chilling and its impact on temperate perennial crops. *Environmental and Experimental Botany*, 91, 48-62.
- Behdani, M.A., Koocheki, A., Nassiri, M., Rezavani, P., 2008. Models to predict flowering time in the main saffron production regions of Khorasan province. *Jrounal of Applied Sciences* 8, 907-909.
- Buishand, T.A., Brandsma, T., 2001. Multisite simulation of daily precipitation and temperature in the Rhine basin by nearestneighbour resampling. *Water. Resour. Res.* 37(11), 2761-2776.
- Cannell, M.G.R., Smith, R.I., 1983. Thermal time, chill days and prediction of budburst in *Picea sitchensis*. *J. Appl. Ecol.* 20, 951-963.
- Cesaraccio, C., Spano, D., Snyder, R.L., Duce, P., 2004. Chilling and forcing model to predict bud-burst of crop and forest species. *Agricultural and Forest Meteorolgy*, 126, 1-13.
- Cesaraccio, C., Spano, D., Snyder, R.L., Duce, P., 2005. Corrigendum to "Chilling and forcing model to predict bud-burst of crop and forest species" [*Agricultural and Forest Meteorolgy*, 126, 1-13]. *Agricultural and Forest Meteorolgy*, 129, 211.
- Cesaraccio, C., Spano, D., Snyder, R.L., Duce, Pl, Jones, H.G., 2006. Improvement of chilling and forcing model to predict bud-burst. Paper presented at the 17th Confernece on Biometeorology and Aerobiology, San Diego, CA, USA.
- Chmielewski, F.M., Kohn, W., 2000. Impact of weather on yield components of winter rye over 30 years, *Agricltural and Forest Meteorology* 102, 253-261.
- Craigmile, P.F., Guttorp, P., 2011. Space-time modelling of trends in temperature series. *J. Time. Ser. Anal.* 32,378-395.
- De Wit, C.T., Brouwer, R., Penning de Vries, F.W.T., 1970. The simulation of photosynthetic systmes. *Proceedings of the IBP/PPTechnical Meeting, PUDOC, Wageningen*, 47-60.
- Elshamy, M.E., Wheeler, H.S., Gedney, N., Huntingford, C., 2006. Evaluation of the rainfall component of a weather generator for climate impact studies. *J. Hydrol.* 326,1-24.
- Farajzadeh, M., Rahimi, M., Kamali, G.A., Mavrommatis, T., 2010. Modelling apple tree bud burst time and frost risk in Iran. *Meteorological Applicaitons*, 17, 45-52.

- Fuchigami, L.H., Nee, C., 1987. Degree growth stage model and rest-breaking mechanism in temperate woody perennials. *HortScience* 22 (5), 836-845.
- Fuchigami, L.H., Weiser, C.J., Kobayashi, K., Timmis, R., Gusta, L.V., 1982. A degree growth stage (?GS) model and cold acclimation in temperate woody plants. In: Li, P.H., Sakai, A. (Eds.), *Plant Cold Hardiness and Freezing Stress. Mechanism and Crop Implications*. Academic Press, New York, pp. 93-116
- Gilreath, P.R., Buchanan, D.W., 1981. Rest prediction model for low-chilling Sungold nectarine. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 106 (4), 426-429.
- Han, S.H., Lee, B.H., Park, M.S., Seung, J.H., Yang, H.S., Shin, S.C., 2011. A study of building crop yield forecasting model considering meteorological elements, P152. Korea Rural Economic Institute.
- Hanninen, H., 1987. Effects of temperature on dormancy release in woody plants: implications of prevailing models. *Silva Fenn.* 21, 279-299.
- Hanninen, H., 1990. Modelling bud dormancy release in trees from cool and temperate regions. *Acta For. Fenn.* 213, 1-47.
- Hanson, C.L., Johnson, G.L., 1998. GEM (generation of weather elements for multiple applications): its application in areas of complex terrain. *Hydrol Water Resour Ecol Headwaters IAHS* 248, 27-32.
- Hellmuth, M.E., Mason, S.J., Vaughan, C., van Aalst, M.K., Choularton, R. (eds). 2011. A better climate for disaster risk management. International Research Institute for Climate and Society (IRI), Columbia University, New York, USA.
- Honjo, H., 2007. Effects of global warming on dormancy and flowering behavior of temperate fruit crops in Japan. *Horticultural Research*, 6, 1-5.
- Horie, T., Nakagawa, H., 1990. Modeling an dprediction of developmental precess in rice. *Japanese Journal of Crop Science* 59, 687-695.
- Hundecha, Y., Bardossy, A., 2008. Statistical downscaling of extremes of daily precipitation and temperature and construction of their future scenarios. *Int. J. Climatol.* 610, 589-610.
- Hur, J., Ahn, J.-B., 2014, The change of first-flowering date over South Korea projected from downscaled IPCC AR5 simulation: peach and pear. *International Journal of Climatology*, 35, 1926-1937.
- Jung, J.E., Kwon, E.Y., Chung, U., Yun, J.J., 2005. Predicting cherry flowering dae using a plant phenolgy model. *Korean Journal of Agricultural an Forest Meteorology* 7, 148-155 (In Koran with English abstract).

- Kang, H., and Coauthors, 2009. Statistical Downscaling of Precipitation in Korea Using Multimodel Output Variables as Predictors, *Mon. Wea. Rev.*, 137, 1928-1938
- Kramer, K., 1994. Selecting a model to predict the onset of growth of *Fagus sylvatica*. *J. Appl. Ecol.* 31, 172-181.
- Kuchar, L., 2004. Using WGENK to generate synthetic daily weather data for modelling of agricultural processes. *Math. Comput. Simul.* 65, 69-75.
- Kuzmanova, R., 2015. Applying chill days model in phenological observations of *Fagus sylvatica* L. in natural forests. *Forestry Ideas*, 21(1), 39-45.
- Kwon, L.S., Cho, K.K., Cho, E.B., Roh, J.S., 2013. Climate variables and rice productivity: A semiparametric analysis using panel regional data, *Korean Journal of Agricultural Economics* 54(3), 71-94.
- Lee, D. Y., Ahn, J.-B., Ashok, K. 2013a. Improvement of multi-model ensemble seasonal prediction skills over East Asian summer monsoon region using a climate filter concept, *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 52, 1127-1138. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0123.1>
- Lee, D.Y., Ahn, J.-B. Ashok, K., Alessandri, A., 2013b. Improvement of grand multi-model ensemble prediction skills for the coupled models of APCC/ENSEMBLES using a climate filter. *Atmosph. Sci. Lett*, 14, 139-145, doi: 10.1002/asl2.430
- Lee, D.Y., Ashok, K., Ahn, J.-B., 2011. Toward enhancement of prediction skills of multimodel ensemble seasonal prediction: A climate filter concept, *J. Geophys. Res.*, 116, D06116, doi:10.1029/2010JD014610.
- Lee, D.Y., Tam, C.-Y., Park, C.-K., 2008. Effects of multicumulus convective ensemble on East Asian summer monsoon rainfall simulation, *J. Geophys. Res.*, 113, D24111, doi:10.1029/2008JD009847.
- Lee, Y.S., Jeong, H.K., Kim, W.T., Choi, I.C., 2004. An estimation of yield functions of Korean fruit vegetables, P073. Korea Rural Economic Institute.
- Linkosalo, T., 2000. Mutual regularity of spring phenology of some boreal tree species: predicting with other species and phenological models. *Can. J. For. Res.* 30, 667-673.
- Mahmood, K., Carew, J.G., Hadley, P., Battey, N.H., 2000. The effect of chilling and post-chilling temperatures on growth and flowering of sweet cherry (*Prunus avium* L.). *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 75, 598-601.
- Murakami, S., Ishill, C., Inaba, Z., Nakamura, S., 2009. Forecasting blooming date based on developmental rate of the ecodormancy stage in 'Kawazu-zakura' (*Prunus lannesiana* Wils. 'Kawazu0zakura') cherry trees. *Shokubutsu Kankyo Kogaku* 21, 24-28 (In Japanese with English abstract).

- Nam, Y.S., Yang, S.R., Song, Y.H., Park, H.J., 2012. Research on the change of milled rice production under climate change in Korea: Based on RCP 8.5, Journal of the Korean Agricultural Economics 53(4), 61-88.
- National Academy of Agricultural Science (NAAS), 1990, The climatic characteristics of the main fruit cultivation regions in Korea. Rural Development Administration, Korea, 125-191. (In Korean)
- Omoto, Y. Aono, y., 1989. Estimation of blooming date for *Prunus yedonesis* by means of kinetic method. Journal of Agricultural Meteorology 45, 25-31.
- Ono, S., Konno, T., Okuno, T., Asano, S., 1988. Effects of temperature on the number of days for budding and flowering of Japanese pear. Journal of Agricultural Meteorology 44, 203-208.
- Ozkan, B., Akcaoz, H., 2002. Impacts of climate factors on yields for selected crops in the Southern Turkey, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 7, 367-380.
- Peng, P., Kumar, A., van den Dool, H., Barnston, A.G., 2002. An analysis of multimodel ensemble predictions for seasonal climate anomalies, J. Geophys. Res. 107, 4710, doi:10.1029/2002JD002712.
- Prodanovic, P., Simonovic, S.P., 2008. Intensity duration frequency analysis under changing climatic conditions. In: Simonovic SP, Bourget P (eds) CD proceedings, 4th international symposium on flood defense: managing flood risk, reliability and vulnerability. Paper 142, 8 pages
- Qian, B., Gameda, S., Hayhoe, H., De Jong, R., Bootsma, A., 2004. Comparison of LARS-WG and AAFC-WG stochastic weather generators for diverse Canadian climates. Clim. Res. 26, 175-191.
- Rajagopalan, B., Lall, U., 1999. A k-nearest-neighbor simulator for daily precipitation and other weather variables. Water. Resour. Res. 35(10), 3089-3101
- Richardson, E.A., Seeley, S.D., Walker, D.R., 1974. A model for estimating the completion of rest for Redhaven and Elberta peach trees. HortScience 9 (4), 331-332.
- Sakamoto, D., Inoue, H., Kusaba, S., Moriguchi, T., Sugiura, T., 2015. The relationship between temperature and endodormancy completion in Japanese chestnut 'Poroton' (*Castanea crenata* 나뭇. et Zucc.): towards establishing a developmental rate (DVR). Journal of Agricultural Meteorology 71 (2), 106-110.
- Sarvas, R., 1972. Investigations on the annual cycle of development of forest trees. I. Active period. Commun. Inst. For. Fenn. 76, 1-110.

- Sarvas, R., 1974. Investigations on the annual cycle of development of forest trees. II. Autumn dormancy and winter dormancy. *Commun. Inst. For. Fenn.* 84, 1-101.
- SAS Institute Inc. 2008. SAS/STAT[®] 9.2 User's Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Semenov, M., 2008. Simulation of extreme events by a stochastic weather generator. *Clim. Res.* 35, 203-212.
- Semenov, M.A., Barrow, E.M., 2002. LARS-WG: a stochastic weather generator for use in climate impact studies, version 3.0 user manual.
- Sharif, M., Burn, D.H., 2007. Improved k-nearest neighbor weather generating model. *J. Hydrol. Eng.* 12(1), 42-51
- Shin, I.A., 2013. The impacts of climatatic factor on red pepper yields and chinese cabbage yields, Department of climate change, Kyungpook National University.
- Srivastav, R.K., Simonovic, S.P., 2015. Muti-site multivariate weather generator using maximum entropy bootstrap. *Climate Dynamics*, 44(11), 3431-3448.
- Srivastav, R.K., Simoonovic, S.P., 2014. An analytical procedure for multi-site, multi-season streamflow geenration using maximum entropy bootstrapping. *Environmental Modelling and Software* 59, 59-75.
- Sugiura, T., Honjo, H., 1997. A dynamic model for predicting the flowering date developed using an endodormancy break model and a flower bud development model in Japanese pear, *J. Agric. Meteorol.* 52(5), 897-900.
- Sugiura, T., Ono, S., Kamota, F., Asakura, T., Okuno, T., Asano, S., 1991, A model for developmental rate from rest break to flowering of Japanese pear. *J. Agric. Meteorol.* 46, 197-203.
- Vezzoli, R., Pecora, S., Manzi, M.P., 2013. Using a weather generator to simulate daily preocipitation scenarios from seasonal weather forecasts. *Euro-Mediterranean Center on Climate Change (CMCC), Research paers Issue RP0176.*
- Vinod, H.D., L'opez-de-Lacalle, J., 2009, Maximum Entropy Bootstrap for Time Series: The meboot R Package. *Journal of Statistical Software* 29(5), 1-19.
- Wilby, R.L., Dawson, C.W., 2007. SDSM 4.2-a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. Version 4.2 user manual.
- Wilks, D.S., 1999. Multisite downscaling of daily precipitation with a stochastic weather generator. *Clim. Res.* 11, 125-136.
- You, L., Rosegrant, M.W., Wood. S., Sun, D., 2009. Impact of growing season temperature on wheat productivity in China, *Agricultural for Meteorology* 149, 1009-1014.

연구보고서 2015-17

**APCC MME 계절예측자료와 식물계절모형을 활용한
복숭아 만개기 예측모델개발**

Modelling of Peach Tree (*Prunus persica*) Full Blooming
Dates Using APCC MME Seasonal Forecasts

전종안



APEC 기후센터

48058 부산광역시 해운대구 센텀7로12

Tel: 051-745-3900 Fax: 051-745-3949

www.apcc21.org



ISBN 979-11-5698-114-5