

## 식물계절모형 입력자료로서 확률추정 기상자료의 이용 가능성

김대준<sup>1</sup> · 정유란<sup>1</sup> · 윤진일<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>(재)국기농림기상센터, <sup>2</sup>경희대학교 식물환경신소재공학과

(2012년 2월 26일 접수; 2012년 3월 26일 수정; 2012년 3월 26일 수락)

## Feasibility of Stochastic Weather Data as an Input to Plant Phenology Models

Dae-jun Kim<sup>1</sup>, Uran Chung<sup>1</sup> and Jin I. Yun<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>National Center for Agro-Meteorology, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

<sup>2</sup>Department of Ecosystem Engineering, Kyung Hee University, Yongin 446-701, Korea

(Received February 26, 2012; Revised March 26, 2012; Accepted March 26, 2012)

### ABSTRACT

Daily temperature data produced by harmonic analysis of monthly climate summary have been used as an input to plant phenology model. This study was carried out to evaluate the performance of the harmonic based daily temperature data in prediction of major phenological developments and to apply the results in improving decision support for agricultural production in relation to the climate change scenarios. Daily maximum and minimum temperature data for a climatological normal year (Jan. 1 to Dec. 31, 1971-2000) were produced by harmonic analysis of the monthly climate means for Seoul weather station. The data were used as inputs to a thermal time - based phenology model to predict dormancy, budburst, and flowering of Japanese cherry in Seoul. Daily temperature measurements at Seoul station from 1971 to 2000 were used to run the same model and the results were compared with the harmonic data case. Leaving no information on annual variation aside, the harmonic based simulation showed 25 days earlier release from endodormancy, 57 days longer period for maximum cold tolerance, delayed budburst and flowering by 14 and 13 days, respectively, compared with the simulation based on the observed data. As an alternative to the harmonic data, 30 years daily temperature data were generated by a stochastic process (SIMMETEO + WGEN) using climatic summary of Seoul station for 1971-2000. When these data were used to simulate major phenology of Japanese cherry for 30 years, deviations from the results using observed data were much less than the harmonic data case: 6 days earlier dormancy release, 10 days reduction in maximum cold tolerance period, only 3 and 2 days delay in budburst and flowering, respectively. Inter-annual variation in phenological developments was also in accordance with the observed data. If stochastically generated temperature data could be used in agroclimatic mapping and zoning, more reliable and practical aids will be available to climate change adaptation policy or decision makers.

**Keywords:** Plant phenology, Weather generator, Harmonic analysis, Cherry blossom, Bud dormancy



\* Corresponding Author : Jin I. Yun  
(jiyun@khu.ac.kr)

## I. 서 론

농림업부문의 기후변화 영향평가를 위해 다양한 생태계예측모형이 이용되고 있으며 최소 입력자료로서 일 간격의 기온자료를 요구하는 경우가 많다(Pickering *et al.*, 1994; Wilks and Wilby, 1999; Soltani and Hoogenboom, 2003). 우리나라의 경우 국토의 대부분을 차지하나 기상관측밀도가 낮은 농경지와 산림지대에서는 일 기상자료를 얻을 확률이 매우 낮다. 시나리오 기후자료 역시 월별 평균값의 형태로 제공되므로(www.climate.go.kr), 응용모형을 이용한 다양한 기후변화 적응 지원정보를 생산하기 위해서는 먼저 일별자료로 변환해야 한다. 변환방법 가운데 월 간격의 평균값을 근거로 조화해석(harmonic analysis)에 의해 1년간(1일~365일)의 기온자료를 생성하여 사용해 왔다(Seino, 1993; Kim *et al.*, 2002; Jung *et al.*, 2005; Jung *et al.*, 2006; Yun, 2006; Chung and Yun, 2008; Kim *et al.*, 2009). 최근 제작된 농업용 전자기후도 역시 개별 농지의 속성인 월별 기후값을 조화해석에 의해 일 자료로 변환함으로써 각종 응용기후정보 제작에 이용하였다(Yun, 2010). 하지만 조화해석이란 12개 월별 평균값 사이의 빈 공간을 추정곡선에 의해 평활화 하는 과정이므로 생성된 일별 기상자료는 평균값의 경향은 잘 보여주지만 연차변이에 대해서는 아무 정보도 주지 못하는 단점이 있다.

농림생태계의 기후변화반응 가운데는 장기간의 평균 기온보다 극한값이나 연차변이에 더 의존하는 경우가 많다. 특히 추운 겨울 동안 휴면이 필요한 온대과수는 내생휴면 및 환경휴면의 해제, 발아 및 개화반응이 기온과 비선형적 관계임이 잘 알려져 있다(Cesaraccio *et al.*, 2004; Jung *et al.*, 2006). 시나리오기후자료를 이용하여 생태계 반응을 예측할 때 연차변이의 고려 없이 평균값만을 모형에 입력한다면 계산결과는 현실과 동떨어진 것이 될 수도 있다. 그 동안 이 분야에서 과거 혹은 미래 기후자료에 근거한 많은 연구결과가 발표되었지만, 입력자료의 연차변이 혹은 임의성(randomness)을 근거로 결과값의 신뢰도를 평가한 적이 거의 없었다.

본 연구는 신뢰성이 검증된 생물계절모형에 근거하여 기후학적 평년(1971-2000)의 서울지방 벚꽃 개화일을 조화해석 기반의 입력자료에 의해 추정할 경우, 같은 기간 중 실측 기온자료를 이용한 모형구동결과에 비해 어떤 차이가 생기는지 파악하고자 하였다. 또한

분석결과를 토대로 기후변화 영향평가 및 취약성 분석 과정에 조화해석 기반의 기온자료를 사용할 경우 예상되는 문제점을 파악하고, 나아가 문제점을 해결하기 위한 방안을 모색하기 위해 수행하였다.

## II. 재료 및 방법

### 2.1. 개화일 예측모형

온대북반구에서 낙엽수목은 하지를 지나 일장이 짧아지면 일부 조직이 꽃눈으로 분화하기 시작한다. 꽃눈조직은 가을까지 생장을 계속하다가 온도와 토양수분조건이 한계점에 달하면 내생휴면(endodormancy)에 들어간다. 내생휴면에서 깨어나기 위해서는 적당한 저온상태에서 일정기간을 경과해야 하며, 내생휴면해제 이후에 온도조건만 맞으면 생장을 재개하여 꽃눈이 터지고(발아, bud burst), 꽃잎이 열린다(개화, flowering). 이러한 화이분화-휴면-발아-개화에 이르는 전 과정에서 기상환경이 어떤 영향을 미치는지에 대한 정량적 연구, 즉 식물계절(phenology)에 관한 연구도 상당히 진행되어왔다(Oh, 2004). 식물계절은 단순히 경과시간 뿐 아니라 온도, 토양수분, 일장 등 다양한 환경요소에 의해 결정되며, 그 가운데서도 변동폭이나 영향력 면에서 온도가 지배적이다. 따라서 식물계절의 각 단계를 달력 상의 날짜(calendar time) 대신 달력과 온도계를 동시에 사용하여 측정하는 온도날짜(thermal time)로 표현하는 것이 더 정확하다고 알려져 있다. 이러한 개화생리와 식물계절 이론에 따르면, 내생휴면 해제 후 개화에 이르는데 필요한 고온요구량과 휴면돌입 후 해제에 필요한 저온요구량이 알려져 있는 식물이라면 기온자료만으로 지역에 무관하게 개화일을 추정할 수 있다.

본 연구에서는 Cesaraccio *et al.*(2004)의 생물계절모형을 토대로 1921~1950 기간 중 서울지방의 기온과 벚꽃 개화일 자료에 의해 Jung *et al.*(2005)이 확립한 개화일 예측모형을 사용하였다. 이 모형에 의하면 가을에 기온이 7°C이하로 내려가면 화아가 휴면에 들어가며, 냉각량(Chill Day)으로 표현되는 휴면심도(dormancy depth)가 0에서 시작하여 부의 방향으로 매일 누적된다. 일 최고 및 최저기온에 의해 계산되는 냉각량은 생장도일(Growing Degree Day, GDD)의 반대개념으로서 누적 냉각량이 -110에 도달할 때까지 꽃눈은 휴면상태를 유지한다. 이후 기온이 7°C 이상으로 상승하여 누적 냉각량이 0으로 회복되면 발아가 시작되고,

+13.5에 도달하면 벚꽃의 개화가 시작된다고 가정한다. 이 모형을 이용하여 최근 50년간(1955-2004) 매년 서울 지방 벚꽃 개화일을 추정한 결과 MAE (Mean Absolute Error)=1.6일, RMSE (Root Mean Square Error)=2.1일로 예측능력이 매우 뛰어난 것으로 보고되었다(Jung *et al.*, 2005).

이 모형은 주어진 기간 동안 실측기온자료를 입력할 경우 서울지방에서 자라는 빛나무의 화이분화로부터 휴면, 발아, 개화에 이르는 주요 생물계절을 정확하게 표현해줄 것으로 기대되므로, 다른 특성을 가진 기온 자료, 예를 들어 조화해석이나 확률추정 기반의 기온 자료를 대신 사용할 경우 그 결과의 신뢰도를 검증하기 위한 기준으로 삼을 수 있다.

## 2.2. 모형구동

1971-2000 기간 중 서울관측소 실측 기온자료에 의해 벚꽃 개화일 예측모형을 구동시켜 30년 간 매년 휴면양상, 내동성 유지기간, 개화일 등을 추정하고 그 평균값을 얻어 비교의 기준으로 삼았다. 실제 모형구동기간은 휴면시작일부터 개화일까지이므로 먼저 휴면 시작일을 결정해야 한다. 낙엽수목이 휴면을 시작하는 시점은 기온이 정해진 임계값 이하로 떨어지는 날짜, 수확에 의해 과실이 나무에서 이탈되는 날짜, 단풍이 들기 시작하는 날짜 등으로 아직 표준화 되어있지 못한 상황이다(Seeley, 1996). 낙엽과수에 있어서는 가을에 낙엽이 시작되면 꽃눈이 휴면에 들어가는 것으로 가정하는데(Oh, 2004), 빛나무의 경우 낙엽개시일자에 대한 관측자료가 없을 뿐 아니라 낙엽현상에 대한 명확한 관측방법이 규정되어있지 않다. 1971-2000 통계 자료에 의하면 서울에서 일 최저기온이 7로 떨어지는 첫날은 평균 10월 22일이므로 이를 감안하여 본 연구에서는 10월 1일에 휴면을 시작한다고 가정하였다. 이 날짜부터 냉각량을 계산하더라도 일 최저기온이 7 이하로 내려가지 않으면 실제 냉각량이 누적되지는 않는다.

이렇게 해서 얻은 기준에 비해 지금까지 널리 사용되어온 조화해석 기반의 평년 일 기온자료에 의한 모형구동결과가 얼마나 차이 나는지 비교하기로 했다. 먼저 1971년부터 2000년까지 기후학적 평년의 서울관측소 월별 기온자료(일 최저 및 최고기온)를 토대로 일본기상청에서 사용하는 조화해석법(Seino, 1993)에 의해 평년의 일별 최고 및 최저기온 자료로 변환하였다. 조화해석에서는 하나의 시계열(time series) 자료를

여러 주기를 가지는 삼각함수, 즉 조화파(harmonic wave)의 합으로 표현한다(Lee, 1969; Wilks, 2011). 월일을 각각  $i$ ,  $j$ 로 두면, 임의의 날짜  $j$ 의 기온  $T_j$ 는 3월에서 7월까지,

$$T_j = B_0 + \sum_{k=1}^6 \left[ B_k \cos \frac{(j+16)2\pi \cdot k}{365} \right] + \sum_{k=1}^6 \left[ C_k \sin \frac{(j+16)2\pi \cdot k}{365} \right]$$

8월에서 2월까지

$$T_j = B_0 + \sum_{k=1}^6 \left[ B_k \cos \frac{(j+15)2\pi \cdot k}{365} \right] + \sum_{k=1}^6 \left[ C_k \sin \frac{(j+15)2\pi \cdot k}{365} \right]$$

로 표현할 수 있다. 또한 이 식에서

$$B_0 = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (T_i), B_k = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^{12} \left( T_i \cos \frac{ik\pi}{6} \right), C_k = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^{12} \left( T_i \sin \frac{ik\pi}{6} \right)$$

로 나타낼 수 있다(Kim and Yun, 2008).

이 방법에 의해 1971-2000 기간을 대표하는 1월 1일부터 12월 31일까지 매일 최고 및 최저기온 자료 한 세트를 생성하여 벚꽃 개화기 예측모형에 입력함으로써 기후학적 평년의 휴면양상, 내동성 유지기간, 개화일 등을 추정하였다. 얻어진 결과를 앞서 제작된 실측기온 기반의 기준과 비교하였다.

다음에는 주어진 날짜에 대해 단 하나의 기온자료만 생성되는 조화해석법을 대신하여 원하는 만큼 반복적으로 생성해주는 확률추정 날씨생성기(stochastic weather generator)를 모형구동용으로 활용할 수 있는지 그 가능성을 평가하고자 하였다. 본 연구에서는 WGEN (Weather GENERator; Richardson and Wright, 1984)과 SIMMETEO (SIMulation of METEOrological variables; Geng *et al.*, 1986; 1988) 모형을 토대로 Pickering *et al.*(1994)이 제작한 'WeatherMan' 프로그램을 사용하였다. 이 프로그램은 우선 월별 기후값으로부터 일별 기상자료 생성에 필요한 각종 매개변수를 추정한다. 이 과정에서 임의의 날짜의 강수출현 여부는 Markov Chain에 의해 결정되고, 강수량은 Gamma 분포를 따른다. 일 최고기온과 일사량은 강수일과 비강수일로 나누어 정규분포에 의해 결정되고, 일 최저기온은 강수와는 무관하지만 역시 정규분포로부터 얻어진다. 1971-2000 기간의 서울관측소 월별 기온평균값과 강수일수, 강수량, 기온연교차 등을 WeatherMan에 입력하여 1월 1일부터 12월 31일까지 일 최고기온과 최저기온 자료를 30세트 생성하였다. 이 자료를

이용하여 벚꽃 개화일 예측모형을 30회 구동하고 그 결과를 평균과 분산으로 나타낸 다음 실측기온자료에 의한 구동결과와 비교하였다.

### 2.3. 실측 개화기와 예측 개화기의 연차변이 비교

꽃눈의 개화준비에 영향을 미치는 여러 단계의 생리적 특성이 확률추정 기온자료에 의해 실측기온자료와 유사한 정도로 예측할 수 있지만, 최종적으로 예측된 벚꽃 개화기의 연차변이가 실측기온자료 기반의 개화기 연차변이와 얼마나 유사한지를 확인 하는 것이 필요하다. 이를 위해 각각의 기온자료에 의해 추정된 30년 개화예상일을 박스플롯(Box-and-Whiskers Plot)으로 비교하였다. 박스플롯은 각각의 예측 개화일 30개를 날짜 순서대로 배열하여 그들의 최소값(minimum), 일사분위값(first quartile, Q1), 중앙값(median or 2nd quartile), 삼사분위값(third quartile, Q3), 최대값(maximum) 등 주요 5개 통계량을 하나의 그림으로 보여준다. Q3와 Q1 사이 거리를 IQR (inter quartile range)이라고 하는데, 최대값 및 최소값은 각각 Q1과 Q3로부터 1.5 IQR 이내에 포함되는 값으로 제한하고, 만약 1.5 IQR을 초과하는 특이값이 있다면 별도의 점(outlier)으로 표현한다.

## III. 결과 및 고찰

### 3.1. 조화해석자료에 근거한 식물계절 양상

조화해석 기반의 기후학적 평년 일별 기온자료에 의해 개화기모형을 구동시킨 결과 서울지방에서 기후학적 평년(1971-2000)에는 10월말부터 본격적으로 휴면에 돌입하여 12월 말에는 최대 휴면심도에 도달하며, 이 상태가 다음 해 3월 중순까지 지속되다가 차츰 회복되어 4월말에는 꽃눈이 발아하는 것으로 나타났다(Fig. 1, Bold line). 하지만 1971년부터 2000년까지 매년 실측 기온자료에 의해 모형을 구동시킬 경우 10월 1일 이후 휴면심도의 경과양상은 해마다 다르고 그 변동폭이 매우 커서(Fig. 1, Thin line), 조화해석 기반의 모의결과를 30년 동안의 평균적인 반응으로 간주하기는 어렵다는 것을 알 수 있다.

30년 간 반응의 평균값(Fig. 1, Dotted line)과 비교해보면 그 차이가 더욱 명백해진다. 평균적으로 보면 서울지방에서 벚나무 꽃눈의 휴면심도가 가장 깊은 날씨는 2월 중순인데 이 시점에도 최대휴면심도(-110

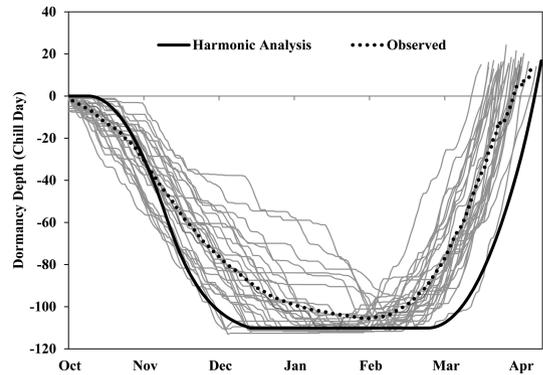


Fig. 1. Daily accumulation pattern of chill days for Japanese cherry estimated by daily maximum and minimum temperature observed at Seoul weather station during 1971-2000. Dotted line indicates the mean for 30 years and bold line stands for the model calculation using the harmonic analysis based daily data.

Chill Day)에 도달하지 못하는 해가 보인다. 그러나 조화해석 기반의 기온자료에 의해 구동할 경우 전술한 대로 12월말이면 이미 최대심도에 도달하여 3월 중순까지 75일간을 유지한다. 휴면심도가 깊다는 것은 생리적 내동성이 크다는 것을 의미하며, 최대심도 유지기간의 장단은 월동기간 중 꽃눈의 동해위험과 밀접하게 연관되어있다(Chung *et al.*, 2009).

또한 서울지방에서 벚나무의 꽃눈은 휴면상태에 돌입하는 속도가 조화해석 기반의 예측에 비해 느리며, 평균적으로 볼 때 최대심도에 도달하지 못하고 예측에 비해 일찍 발아조건을 충족하는 것으로 보인다. 봄철 기온상승이 충분하지 않은 상태에서 꽃눈이 예상보다 일찍 발아한다면 서리피해를 입을 위험성이 높아진다. 만약 과수농가에서 이런 정보에 의존하여 상해에 대비해야 한다면 심각한 결과를 초래할 수 있다.

미래 시나리오 기후조건에서 조화해석 기반의 기온 자료를 이용하여 온대과수의 휴면양상을 예측한다면, 실제에 비해 일찍 휴면에 돌입하고 최대심도의 휴면상태가 훨씬 오래 지속되어 동해위험이 과소평가될 것이며, 개화는 실제보다 늦게 예측되므로 늦서리 피해위험 역시 과소평가될 것으로 우려된다. 최근에 기후변화 적응대책의 일환으로서 기후변화에 따른 농작물 재배적지 이동을 연구하고 있으며, 여기에 시나리오 응용 기후지수 제작이 포함된다. 만약 조화해석 기반의 동상해 예측정보가 재배적지 이동 및 선정에 활용된다면 그 자체가 심각한 오류를 포함할 것이 거의 확실

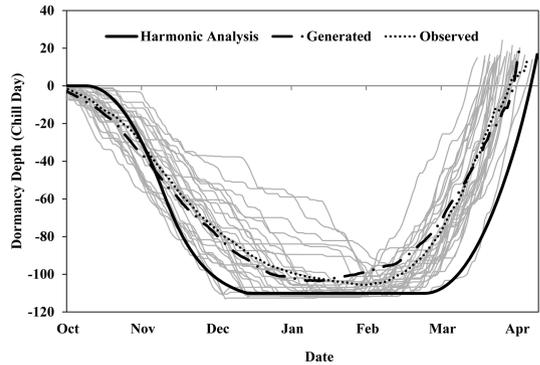
하며, 재배농가 입장에서는 잠재적인 위험을 떠안게 되는 것이다. 현재 보급중인 농업용 응용기후도(Yun, 2010) 역시 이런 지적에서 자유롭지 못하므로 개선방안 마련이 시급하다.

휴면해제 이후 GDD의 누적양상은 조화해석이나 실측 두 자료 모두 비슷한데, 휴면기간의 냉각량 축적양상이 크게 다른 것은 계산방법의 차이 때문이다. GDD의 경우 기준온도를 초과하는 온도분을 직산하는 단순한 계산방식이지만, 냉각량은 기준온도와 일 최고기온, 일 최저기온 간 상대적인 조건에 따라 서로 다른 계산방식을 사용하여(Cesaraccio *et al.*, 2004), 순차적으로 상승 혹은 하강하는 조화해석 기반 기온자료로는 연차변이에 따른 냉각량 누적경향의 변동을 나타낼 수 없다.

**3.2. 확률추정자료에 근거한 식물계절 양상**

1971-2000 기간 기후통계량 기반으로 WeatherMan을 이용하여 생성한 30년 기온자료는 월별 평균값에 있어서는 실측자료와 거의 같았고, 월별 표준편차도 최고기온에서 0.98~1.99(평균 1.54), 최저기온은 0.68~2.12(평균 1.50)로서, 실측자료의 최고기온 0.95~1.98(평균 1.43), 최저기온 0.72~2.25(평균 1.35)와 큰 차이가 없었다(Table 1).

생성된 기온자료를 개화기 모형에 입력하여 30년



**Fig. 2.** Daily accumulation pattern of chill days for Japanese cherry estimated by 30 sets of randomly generated daily maximum and minimum temperature data based on the 1971-2000 monthly climate summary for Seoul. Dashed line indicates the mean of 30 cases and bold line stands for the model calculation using the harmonic analysis based daily data. The observed mean is appeared in dotted line.

동안 매년 냉각량의 축적양상을 그림으로 표현하면 실측자료에 근거한 모의결과와 상당히 유사해짐을 알 수 있다(Fig. 2). 평균값의 경우 둘 사이에 거의 차이가 없어 조화해석 기반 일 기온자료의 문제를 해결하는데 충분해 보인다. 연차변이의 경우 휴면돌입 이후 내생휴면 해제(endodormancy release)까지 전반부와, 이후 발아-개화에 이르는 후반부에 각각 서로 다른 특징을 보인다.

**Table 1.** Comparison of the monthly statistic of the observed daily maximum and minimum temperature at Seoul station for 1971-2000 with those generated by the stochastic method

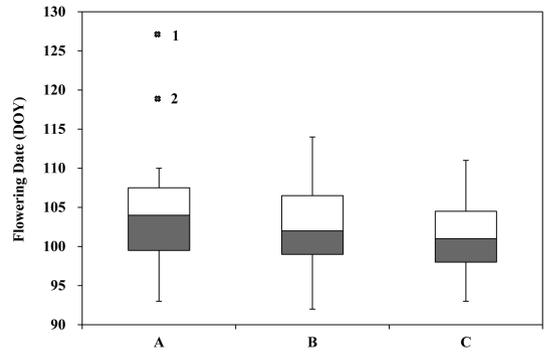
	Maximum temperature (°C)				Minimum temperature (°C)			
	Observed		Generated		Observed		Generated	
	Mean	Sd*	Mean	Sd	Mean	Sd	Mean	Sd
January	1.60	1.98	3.00	1.87	-6.10	2.25	-6.50	2.02
February	4.10	1.84	4.10	1.99	-4.10	1.91	-4.80	2.06
March	10.20	1.38	8.90	1.76	1.10	1.22	0.30	1.73
April	17.70	1.58	15.30	1.96	7.30	1.22	6.90	1.92
May	22.80	1.00	22.60	1.23	12.60	0.72	12.40	1.22
June	26.90	1.04	28.60	1.16	17.80	0.75	17.90	0.96
July	28.80	1.46	31.00	1.22	21.80	1.19	22.50	0.86
August	29.50	1.31	29.30	0.98	22.10	1.18	22.80	0.68
September	25.60	0.95	25.10	1.28	16.70	1.14	17.20	1.26
October	19.70	1.32	18.00	1.34	9.80	1.21	9.60	1.37
November	11.50	1.76	11.10	1.76	2.90	1.65	2.90	1.81
December	4.20	1.57	5.40	1.94	-3.40	1.70	-3.80	2.12
Annual	16.88	1.43	16.87	1.54	8.21	1.35	8.12	1.50

\*standard deviation

벚꽃 개화일 예측모형에서 저온요구량(-110 Chill Day)을 충족시키면 내생휴면이 해제되었다고 간주하는 데, 실측자료 기반의 모의결과에서는 이 시점이 12월 중순에서 다음 해 3월 중순까지 넓게 분포하는 반면, 확률추정자료에 근거한 모의에서는 12월 중순에서 2월 말까지로 약간 단축되는 경향이 있다.

내생휴면이 해제되었다고 해도 외부환경조건, 특히 기온이 꽃눈의 발아에 적합하지 않으면 휴면상태가 지속 되는데 이를 환경휴면 혹은 강제휴면이라고 한다(Oh, 2004). 평년통계(1971-2000)에 의하면 일 최고기온이 7에 도달하는 첫 날짜는 서울에서 3월 3일로서 1~2월 사이에 내생휴면이 해제되더라도 기온은 여전히 생장개시온도 아래인 경우가 많아 꽃눈은 강제휴면 상태에 놓여있게 된다. 휴면해제 이후 개화에 이르기까지 소요되는 온도시간은 벚나무의 생장개시온도(7) 이상에서 누적시킨 고온요구량으로 표현되는데, GDD가 누적되기 시작했다면 강제휴면상태에서 벗어났음을 의미한다.

강제휴면 해제 이후 개화에 이르기까지 소요기간은 실측자료 기반의 모의에서 2월 중순부터 4월 하순까지 70일 정도의 변이를 보이는 반면, 확률추정자료 기반의 모의에서는 훨씬 이른 1월 초부터 시작하여 5월 초까지 150일 이상 넓게 분포한다. 즉 모의기간의 전 반부에는 실측기온에 의한 모의결과에 비해 연차변이가 약간 줄어들지만, 후반부에는 연차변이가 훨씬 커져서 전체적으로 연차변이는 50% 가량 늘어났다. 이에 따라 발아와 개화가 평균적으로 각각 3일, 2일씩 지연되었지만, 조화해석 기반의 모의결과에 비해서는 발아 및 개화 예상일을 10일 정도 단축함으로써 실제에 가깝게 표현할 수 있었다(Table 2). 조화해석 기상자료의 문제점으로 지적되었던 과도한 최대휴면심도 지속기간(강제휴면기간 75일)은 7.7일로서 실측자료보다 오히려 10일 간 줄어들어 동해위험 과소평가라는 재배적지 선정 상 오류를 줄일 수 있다.



**Fig. 3.** Summary statistic of cherry flowering date for 1971-2000 period predicted from a phenology model driven by stochastically generated daily temperature data (A) and observed daily temperature data (B), respectively. Observed flowering date is shown for comparison (C). Boxplots show minimum, first quartile (Q1), median (Q2), third quartile (Q3), and maximum. Outliers are more than 1.5 interquartile range (Q3-Q1) from an end of the box. Two outliers are overlapped on 119 DOY.

본 연구를 통해 생물계절모형 구동 시 조화해석 기온자료 사용에 의해 발생하는 주요 문제점들을 확률추정 기온자료로 대체함으로써 상당 부분 개선할 수 있음을 확인하였다. 재배농사 입장에서 이러한 모형을 구동하는 궁극 목표는 정확한 개화일 예측이라 할 것이다.

먼저 실측 기온자료에 의해 얻은 30년간 개화예상일은 특이값 없이 모든 값이 92일(day of year, DOY)에서 115일 사이에 분포하였고, 그 중 50%는 99일에서 107일 범위에 들었다(Fig. 3). 확률추정 기온자료를 이용한 경우에도 전체 50%는 99일에서 108일 사이에 들었으며, 최소값 역시 93일로 실측기온자료(92일)와 비슷하였다. 하지만 실측기온자료의 경우 Q1에서 중앙값 사이 25%가 100일 부근에 집중된 것에 비해 확률추정자료에서는 99일에서 104일까지 더 넓게 분포하였고, 오히려 중앙값에서 Q3까지 25%가

**Table 2.** Phenological characteristics of Japanese cherry predicted by 3 different temperature data for 1971-2000

Characteristics	Predicted Output (mean ± sd*)		
	Harmonic analysis	Observation	Weather generator
Endo-dormancy release date (DOY**)	1	26 ± 22.5	20 ± 16.3
Forced dormancy period (Days)	75	17.9 ± 15.4	7.7 ± 9.1
Budburst date (DOY)	114	100 ± 5.1	103 ± 7.8
Flowering Date (DOY)	116	103 ± 5.2	105 ± 7.4

\*standard deviation

\*\*Day of Year (1 = January 1, 365 = December 31)

105일을 중심으로 집중된 형태를 보였다. 더욱이 최대 값은 3개의 특이값을 제외한다면 110일로서 실측자료의 115일에 비해 집중도가 높았다. 앞으로 해결해야 할 문제 가운데 하나는 이들 특이값의 발생을 최소화할 수 있도록 날씨생성기를 개선하는 일이 될 것이다.

이 분석의 신뢰정도를 판단하기 위해 같은 기간 중 서울관측소에서 표준목을 대상으로 기상요원이 직접 관측한 개화일 자료도 박스플롯으로 표현하였는데(Fig. 3C), 실측기온자료에 근거한 모형구동결과에 비해 약간의 변동폭이 줄어 든 점 외에는 거의 동일한 모습이다. 따라서 본 연구에서 제시한 분석결과는 실측자료에 근거했다고 간주하여도 큰 문제는 없을 만큼 실용성을 확보했다고 판단한다.

## 적 요

월별 기후통계량의 조화해석에 의해 생성한 일 기온 자료가 생물계절모형의 입력자료로서 적합한지 여부를 평가하여 농림업 부문 기후시나리오 응용정보 제작 상 오류를 제거하기 위해 본 연구를 수행하였다. 서울관측소의 1971-2000 평년 월별 일 최고기온과 최저기온 평균값으로부터 조화해석에 의해 365일 간 기온자료를 생성하였다. 이것을 널리 검증된 온도시간 기반의 벚꽃 개화모형에 입력하여 휴면, 발아, 개화 등 주요 식물계절을 추정하였다. 같은 기간 중 실측기온자료에 의해 모형을 구동시켜 얻은 결과와 비교한 바, 연차변이를 전혀 반영하지 못하는 것은 물론, 휴면해제 25일 단축, 강제휴면기간 57일 연장, 발아 14일 지연, 개화 13일 지연 등 평균값도 크게 달라 식물계절을 크게 왜곡시키는 것으로 판단되었다. 대안으로서 확률추정기법에 의해 일 기상자료를 생성하고 이를 이용하여 모형을 구동한 결과 실측결과에 비해 휴면해제 6일 단축, 강제휴면기간 10일 단축, 발아 3일 지연, 개화 2일 지연 등으로 조화해석자료 사용에 비해 크게 개선되었음을 확인하였다. 연차변이양상 역시 실측기온에 의한 모의결과와 크게 다르지 않아, 향후 이 자료를 농업부문 전자기후도 제작에 적용하면 기후변화 적응정책 수립을 실용수준에서 지원할 수 있을 것으로 보인다.

## 감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 공동연구사업(기후변화에 따

른 주요 작물별 재배적지 변동 연구, 과제번호: PJ006403)의 지원에 의해 이루어진 것임.

## REFERENCES

- Cesaraccio, C., D. Spano, R. L. Snyder, and P. Duce, 2004: Chilling and forcing model to predict bud-burst of crop and forest species. *Agricultural and Forest Meteorology* **126**, 1-13.
- Chung, U., J. H. Kim, S. O. Kim, M. H. Choi, K. H. Hwang, and J. I. Yun, 2009: Geospatial assessment of frost and freeze risk in 'Changhowon Hwangdo' peach (*Prunus persica*) Trees as affected by the projected winter warming in South Korea: I. Determination of freezing temperatures. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **11**, 206-212. (In Korean with English abstract)
- Chung, U., and J. I. Yun, 2008: A prospect on the changes in short-term cold hardiness in "Campbell Early" grapevine under the future warmer winter in South Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **10**, 94-101. (In Korean with English abstract)
- Geng, S., and J. S. Auburn, 1986: Weather simulation models based on summaries of long-term data. *Weather and Rice* **7**, 237-254.
- Geng, S., J. S. Auburn, E. Brandstetter, and B. Li, 1988: A program to simulate meteorological variables: Documentation for SIMMETEO. *Agronomy Progress Report* **204**, 1-15.
- Jung, J. E., E. Y. Kwon, U. Chung, and J. I. Yun, 2005: Predicting cherry flowering date using a plant phenology model. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **7**, 148-155. (In Korean with English abstract).
- Jung, J. E., H. C. Seo, U. Chung, and J. I. Yun, 2006: Spring phenology of a grapevine cultivar under the changing climate in Korea during 1951-2000. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **8**, 116-124. (In Korean with English abstract)
- Kim, J. H., and J. I. Yun, 2008: On mapping growing degree-days (GDD) from monthly digital climate surfaces for South Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **10**, 1-8. (In Korean with English abstract)
- Kim, S. O., U. Chung, S. H. Kim, I. M. Choi, and J. I. Yun, 2009: The suitable region and site for 'Fuji' apple under the projected climate in South Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **11**, 162-173. (In Korean with English abstract)
- Kim, Y. H., H. D. Kim, S. W. Han, J. Y. Choi, J. M. Koo, U. Chung, J. Y. Kim, and J. I. Yun, 2002: Using spatial data and crop growth modeling to predict performance of South Korean rice varieties grown in western coastal plains in North Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **4**, 224-236. (In Korean with English abstract)

- Lee, B. S., 1969: Harmonic analysis of the temperature distribution in Korea. *Journal of the Korean Geographical Society* **4**, 17-25. (In Korean with English abstract)
- Oh, S. D., 2004: *Fruit Tree Physiology in Relation to Temperature*. Gilmogeum, Seoul, Korea, 364pp. (In Korean)
- Pickering, N. B., J. W. Hansen, J. W. Jones, C. M. Wells, V. K. Chan, and D. C. Godwin, 1994: WeatherMan: A utility for managing and generating daily weather data. *Agronomy Journal* **86**, 332-337.
- Richardson, C. W., and D. A. Wright, 1984: *WGEN: A model for generating daily weather variables*. ARS-8. USDA-ARS., 83pp.
- Seeley, S. D., 1996: Modeling climatic regulation of bud dormancy. *Plant Dormancy - Physiology, Biochemistry and Molecular Biology*, G. A. Lang (Eds.) CAB International, Wallingford, U. K., 361-376.
- Seino, H., 1993: An estimation of distribution of meteorological elements using GIS and AMeDAS data. *Journal of Agricultural Meteorology (Japan)* **48**, 379-383. (In Japanese with English abstract)
- Soltani, A., and G. Hoogenboom, 2003: Minimum data requirements for parameter estimation of stochastic weather generators. *Climate Research* **25**, 109-119.
- Wilks, D. S., and R. L. Wilby, 1999: The weather generation game: a review of stochastic weather models. *Progress in Physical Geography* **23**, 329-357.
- Wilks, D. S., 2011: *Statistical Methods in the Atmospheric Science* (3rd ed.) Academic Press., 428-438.
- Yun, J. I., 2006: Climate change impact on the flowering season of Japanese cherry (*prunus serrulata* var. spontanea) in Korea during 1941-2100. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **8**, 68-76. (In Korean with English abstract)
- Yun, J. I., 2010: Agroclimatic maps augmented by a GIS technology. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **12**, 63-73. (In Korean with English abstract), DOI:10.5532/KJAFM.2010.12.1.063  
www.climate.go.kr (Feb. 25, 2012)