한국농림기상학회지, 제7권 제2호(2005)
Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 7, No. 2, (2005), pp. 148~155

생물계절모형을 이용한 벚꽃 개화일 예측

정재은 · 권은영 · 정유란 · 윤진일
경희대학교 생태시스템공학과/생명자원과학연구원
(2005년 5월 1일 접수; 2005년 5월 14일 수락)

Predicting Cherry Flowering Date Using a Plant Phenology Model

J. E. Jung, E. Y. Kwon, U. Chung, and J. I. Yun
Department of Ecosystem Engineering/Institute of Life Science and Natural Resources, Kyung Hee University, Suwon 449-701, Korea
(Received May 1, 2005; Accepted May 14, 2005)

ABSTRACT

An accurate prediction of blooming date is crucial for many authorities to schedule and organize successful spring flower festivals in Korea. The Korea Meteorological Administration (KMA) has been using regression models combined with a subjective correction by forecasters to issue blooming date forecasts for major cities. Using mean monthly temperature data for February (observed) and March (predicted), they issue blooming date forecasts in late February to early March each year. The method has been proved accurate enough for the purpose of scheduling spring festivals in the relevant cities, but cannot be used in areas where no official climate and phenology data are available. We suggest a thermal time-based two-step phenological model for predicting the blooming dates of spring flowers, which can be applied to any geographic location regardless of data availability. The model consists of two sequential periods: the rest period described by chilling requirement and the forcing period described by heating requirement. It requires daily maximum and minimum temperature as an input and calculates daily chill units until a pre-determined chilling requirement for rest release. After the projected rest release date, it accumulates daily heat units (growing degree days) until a pre-determined heating requirement for flowering. Model parameters were derived from the observed bud-burst and flowering dates of cherry tree (*Prunus serrulata* var. *spontanea*) at KMA Seoul station along with daily temperature data for 1923-1950. The model was applied to the 1955-2004 daily temperature data to estimate the cherry blooming dates and the deviations from the observed dates were compared with those predicted by the KMA method. Our model performed better than the KMA method in predicting the cherry blooming dates during the last 50 years (MAE = 2.31 vs. 1.58, RMSE = 2.96 vs. 2.09), showing a strong feasibility of operational application.

Key words : **Budburst, Dormancy, Flowering, Thermal time, Phenology, Cherry**

I. 서 론

최근 여러 지방정부 혹은 지역 민간단체들은 지방의 봄꽃을 소재로 한 축제행사를 앞다투어 개최하고 있다. 봄꽃축제의 성패는 당연히 행사기간 내 봄꽃의 개화 여부에 좌우된다. 기상청에서는 기온 및 생물계절 관측자료가 장기간 축적되어있는 기상관서를 대상으로 2월 관측기온과 3월의 기온전망을 토대로 매년 3월초에 개나리, 진달래, 벚꽃 등의 개화시기를 발표한다. 이 같은 개화일 예상은 각 지역의 개화일과 2, 3월의 평

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

균기온간 회귀분석을 통해 개화일 예측에 가장 적합한 모형을 도출함으로써 가능하다. 이 방법은 그 지역에서 이미 관측된 장기간의 추세를 바탕으로 하므로 상당히 정확한 개화일 예측이 가능하며, 모형의 구동에 월 평균기온자료만 필요하므로 예측과정이 매우 간편하다는 장점이 있다.

반면, 단점으로는 첫째, 모형이 작성된 몇 개 지역 외에는 이 방법을 적용하기 곤란하다는 점을 들 수 있다. 2월과 3월의 기온자료가 있다 하여도 그 지역에 맞는 모형이 없다면 개화시기를 예상할 수 없으므로, 전국적인 개화예상일 분포도를 작성하기 위해서는 등치선 작도에 의존할 수밖에 없고, 따라서 개화에 미치는 지역특성이 제대로 반영되지 않는다. 둘째, 모형구동을 위해 기온의 월 평균값을 사용하므로 개화예상일 발표시기가 3월초, 혹은 4월초로 한정되어 기상변화에 따른 개화예상일의 상시수정이 어렵다는 점이다. 서울지방의 경우 2005년 봄은 2월 평균기온 -1.9°C, 3월 평균기온 4.1°C로서 1984년(-3.4°C, 2.7°C) 이래 가장 추운 봄 날씨를 보였지만 벚꽃의 실제 개화일은 평년에 비해 불과 하루 늦은 4월 12일이었다. 반면 1996년은 2월 -1.2°C, 3월 5.0°C로서 춥지 않은 날씨였지만 벚꽃 개화일은 최근 30년 동안 가장 늦은 4월 21일이었다. 이는 4월의 기온이 개화에 큰 영향을 끼친 결과로서, 정확한 개화일 예보를 위해서는 무엇보다도 정확한 기온예보를 토대로 개화직전까지 예상기온의 변화를 주시하고 이를 반영해야 할 것이다.

이러한 단점을 보완하여, 전국 어느 지점이나 개화일 직전까지 상시 예측이 가능하면서 예측정확도가 기존의 회귀모형에 비해 뒤떨어지지 않는 방법을 찾아낸다면 각 지방의 봄꽃축제일정을 사전에 조정함으로써 성공적인 행사를 기획하는데 크게 기여할 것이다. 그러기 위해서는 낙엽수목의 개화생리과정에 기반을 둔 개화일 예측용 수치모형의 개발이 필요하다.

지금까지 알려진 개화생리과정을 요약하면 다음과 같다. 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 맞으며 생장을 재개하여 꽃눈이 터지고(발아, bud burst), 꽃잎이 열린다(개화, flowering).

이러한 화아분화-휴면-발아-개화에 이르는 전 과정에서 기상환경이 어떤 영향을 미치는지에 대한 정량적 연구, 즉 식물계절(phenology)에 대한 지식도 상당히 축적되어있다(Faust, 1989; 오성도, 2004). 식물계절은 단순히 경과시간 뿐 아니라 온도, 토양수분, 일장 등 다양한 환경요소에 의해 결정되며, 그 가운데서도 변동폭이나 영향력 면에서 온도가 단연 지배적이다. 따라서 식물계절의 각 단계를 시계로만 측정하는 달력날짜 대신 시계와 온도계를 동시에 사용하여 측정하는 온도시간(thermal time)으로 표현하는 것이 좀더 정확하다고 알려져 있다. 주요 단계에 도달하는데 소요되는 온도시간은 냉각량(Chill Unit)과 가온량(Heat Unit)으로 구성된다. 냉각량은 매시간 기온을 온도범위별로 적당한 가중치를 주어 누적시킨 값을 의미한다. 흔히 쓰이는 "Utah 모형"에서는 6°C에서 한 시간 노출되면 냉각량 1.0으로 두고, 온도가 더 높거나 낮을 경우 이보다 작아지며 특히 15°C 이상에서는 부의 효과를 갖는 것으로 간주한다(Seeley, 1996). 가온량은 매시 기온을 쓸 경우 생장도시(Growing Degree Hour, GDH), 일 기온자료를 쓸 경우 생장도일(Growing Degree Day, GDD)이라는 용어로 불린다.

이러한 개화생리와 식물계절 이론에 따르면, 내생휴면 해제 후 개화에 이르는데 필요한 가온량과 휴면돌입 후 해제에 필요한 냉각량, 즉 저온요구량(Chilling Requirement)이 알려져 있는 식물이라면 기온자료만으로 지역에 무관하게 개화일을 추정할 수 있다. 본 연구는 이러한 개화생리-식물계절 이론에 근거한 개화일 예측모형을 작성하고 벚꽃 개화일을 대상으로 그 신뢰성을 검증함으로써 기존의 개화일 예측방법을 개선하기 위해 수행하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 자료

기상청으로부터 1922년부터 2004년 기간 중 전쟁 등으로 인한 결측기간을 제외한 80년간 서울특별시 서대문구 송월동의 서울관측소 노장에서 관측된 벚꽃의 발아일과 개화일, 그리고 이곳의 일 최고 및 최저기온 자료를 수집하였다. 생물계절 관측은 살아있는 수목을 대상으로 하며, 측기가 아닌 관측자의 육안에 의존하므로, 표준목 자체의 품종과 수령, 관측자의 주관, 관측목 주변의 미기후변화 등, 기상관측보다 훨씬 많은

오차요인에 노출되어있다. 따라서 의미 있는 분석을 위해서는 동일 관측목-동일 관측자-동일 환경에 의한 균질적이며 연속적인 자료를 대상으로 하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 이들 자료 가운데 관측환경이 안정적이며 중간 결측이 없는 1922년부터 1950년 기간자료는 모형의 모수도출에 이용하였고, 전쟁 후 1955년부터 2004년 자료는 모형의 검증을 위해 사용하였다.

2.2. 모형

우리 모형에서는 낙엽수목의 개화과정을 2단계로 구분한다. 그 하나는 꽃눈의 내생휴면 시작부터 해제까지이고, 나머지는 내생휴면해제 이후 개화에 이르는 기간이다. 실제로는 개화에 앞서 발아단계를 거치지만 육안에 의한 발아여부의 판정은 개화에 비해 더욱 모호하여 관측자료 자체의 신뢰성이 낮다. 이렇게 신뢰성 낮은 관측자료를 토대로 모형을 검증할 경우 발생하는 문제를 회피하기 위해 '휴면해제-발아' 기간을 '휴면해제-개화' 기간으로부터 구분하지 않기로 하였다 (Fig. 1).

이 모형을 실제에 적용하기 위해서는 적용대상 식물의 특성 세 가지를 알고 있어야 한다. 가을에 꽃눈이 휴면에 들어가는 날짜, 휴면해제에 필요한 저온요구량, 그리고 휴면해제 이후 개화일까지의 고온요구량이 그것들이다.

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(오성도, 2004), 벚나무의 경우 낙엽개시일자에 대한 관측자료가 없을 뿐 아니라 낙엽현상에 대한 명확한 관측방법이 규정되어있지 않으므로 우리 모형에서는 편의상 10월 1일에 휴면을 시작한다고 가정하였다. 이 날짜부터 냉각량을 계산하더라도 일 최저기온이 7°C 이하로 내려가지 않으면 실제 냉각량이 누적되지는 않는다. 참고로 1971-2000 평년의 통계자료에 의하면 일 최저기온이 7°C로 떨어지는 첫날은 대관령에서 9월 22일, 서울지방에서 10월 22일이다.

내생휴면기간에 해당하는 온도시간, 즉 저온요구량은 주요 수목 및 과수의 품종별로 정해져 있는데, 대개 포장에서 채취한 시료를 항온챔버에 치상한 후 그 해부학적 변화를 검경에 의해 판별하는 방법으로 정확한 값을 얻는다(Balandier *et al.*, 1993). 그러나 본

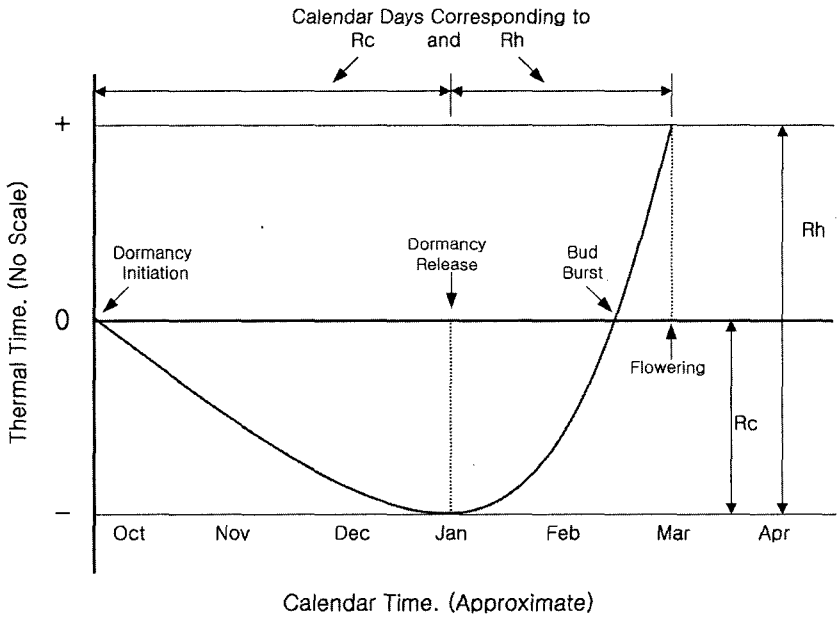

Fig. 1. Concept of the two step phenological model for predicting flowering date in temperate zone deciduous trees. Floral buds must be exposed sequentially to long enough periods of chilling temperature (R_c) and heating temperature (R_h) for spring flowering.

Table 1. Equations to calculate Chill Days for the five cases that relate daily maximum (T_x) and minimum (T_n) temperature to the threshold temperature (T_c) and 0°C, where T_m is the mean daily temperature (Cesaraccio *et al.*, 2004).

Number	Temperature	Chill Days	Anti-Chill Days
1	$0 \le T_c \le T_n \le T_x$	$Cd = 0$	$Ca = T_m - T_c$
2	$0 \le T_n \le T_c \le T_x$	$Cd = -\left[(T_m - T_n) - \left(\frac{(T_x - Tc)}{2}\right)\right]$	$Ca = \frac{T_x - T_c}{2}$
3	$0 \le T_n \le T_x \le T_c$	$Cd = -(T_m - T_n)$	$Ca = 0$
4	$T_n < 0 < T_x \le T_c$	$Cd = -\left(\frac{T_x}{T_x - T_n}\right)\left(\frac{T_x}{2}\right)$	$Ca = 0$
5	$T_n < 0 < T_c < T_x$	$Cd = -\left[\left(\frac{T_x}{T_x - T_n}\right)\left(\frac{T_x}{2}\right) - \left(\frac{T_x - T_c}{2}\right)\right]$	$Ca = \frac{T_x - T_c}{2}$

연구의 대상인 벚나무, 특히 우리나라 기상청의 표준목인 왕벚나무의 저온요구량에 대한 정보는 얻을 수 없어서 저온요구량에 의한 발아기 추정방법(Cesaraccio *et al.*, 2004)을 역으로 적용하였다.

Cesaraccio *et al.*(2004)에 의하면 낙엽과수에 있어서 휴면해제에는 저온요구량 만큼의 온도시간이 필요하며, 발아를 위해서는 저온요구량과 크기는 같지만 방향이 반대인 Anti-Chill Day(GDD와 동일한 개념)가 축적되어야 한다. 본 연구에서는 먼저 저온요구량을 -80부터 -150까지 10 간격으로 8종을 상정하고, 기준온도는 5, 6, 7°C 등 3종으로 두어 8×3=24 처리를 만들었다. 서울관측소에서 28년간(1923년-1950년) 관측한 기온 및 벚꽃 발아일 자료에 24처리를 적용하고 그들 가운데 관측된 발아일을 가장 잘 설명하는 조합을 선발하였다. 구체적으로, 매년 10월 1일부터 다음 해 4월까지 일 최고 및 최저기온을 Table 1에 대입하여 Chill Day를 계산하고, -80, -90, -100, -110, -120, -130, -140 및 -150에 도달하는 날짜를 각각 휴면해제 예상일로 간주하였다. 이날 이후 Anti-Chill Days를 계산하여 +80, +90, +100, +110, +120, +130, +140, 그리고 +150에 도달하는 날짜를 발아기로 두는 방식으로 24 처리에 대해 발아 예상일을 도출하였다. 이 발아 예상일과 서울관측소에서 실제 관측된 벚나무 발아일 사이의 편차가 가장 작은 조합(임계온도 및 저온요구량)을 선발하였다.

이렇게 해서 도출된 벚나무의 저온요구량을 이용하면 매일 기온자료만으로 내생휴면 해제일을 추정할 수 있다. 이날 이후 개화에 이르기까지 소요되는 고온요구량은 일 최고기온이 수목의 생장개시온도(여기서는 7°C)에 도달하면 매일의 GDD를 계산하고 이를 개화일까지 누적시켜서 알아낼 수 있다. 평년통계(1971-2000)에 의하면 일 최고기온이 7°C에 도달하는 첫 날짜는 서울에서 3월 3일, 대관령에서 3월 28일로서, 1~2월 사이에 내생휴면이 해제되더라도 기온은 여전히 생장개시온도 아래인 경우가 많아 꽃눈은 소위 "강제휴면" 혹은 "환경휴면" 상태에 놓여있게 된다. GDD가 누적되기 시작하는 것은 이러한 강제휴면상태에서 벗어남을 의미한다. GDD 계산방법은 Table 1의 Anti Chill Days 계산방법과 동일하다. 본 연구에서는 서울관측소 자료에 의해 1923년부터 1950년까지 매년 저온요구량에 의해 추정된 휴면해제일부터, 관측된 벚꽃 개화일까지 GDD를 계산하여 그 평균값을 개화에 소요되는 고온요구량으로 삼았다. 비교를 위해 휴면해제일을 1월 31일로 고정시킨 계산결과도 함께 얻었다.

저온요구량의 표현은 매시기온을 쓸 경우 Chill Unit의 적산값으로, 일별기온을 쓸 경우 Chill Day의 적산값으로 할 수 있는데, 본 연구에서는 기상청의 방대한 자료를 대상으로 하는 점을 감안하여 매시기온 대신 일 최고-최저기온을 이용하는 Chill Day를 사용하였다.

2.3. 검증

우리 모형의 실용성을 평가받기 위해서는 당연히 기존 기상청모형이 그 기준이 되어야 한다. 기상청모형에 의한 벚꽃 개화일 예측은 장기간에 걸쳐 그 정확도가 확인되었으므로, 만약 우리 모형과 기상청모형의 예상결과가 비슷하기만 해도 연구의 목적은 달성되는 셈이다.

기상청의 회귀모형은 $Y=a_0+a_1X_1+a_2X_2$ 형태로서 Y=개화예상일, X_1=당해연도 2월 평균기온, X_2=당해연도 3월 예상 평균기온, a_1, a_2=계수(서울의 경우 각각

-1.0과 -1.7), a_0=상수(서울의 경우 110.5)이다. 이 회귀모형을 개화생리 측면에서 설명하자면, 휴면해제일을 1월 31일로 고정하고 이후 월 평균기온자료에 의해 온도시간을 계산하는데, 서로 다른 가중치를 부여하여 2월보다는 3월의 기온이 개화기 단축에 1.7배 더 효과적인 것으로 가정하는 것이다. 최종적으로 발표하는 개화예상일자는 이렇게 해서 계산된 1차 예상날짜에 예보관의 판단에 따른 "임의의 가중치"를 더하여 결정한다(기상청, 2002). 앞서 언급한대로 이 회귀모형은 상수 a_0 및 계수 a_1, a_2의 변화경향에 규칙성이 없어서 다른 지역에 적용하기는 곤란하다.

서울지방의 기온 및 벚꽃 개화자료에 의해 도출한 저온요구량과 개화에 소요되는 고온요구량으로 모수화시킨 식물계절모형을, 1955년부터 2004년 기간의 서울지방 일 최고/최저기온자료에 의해 구동시켜 개화일을 추정하였다. 이 연구의 목적이 현행 기상청 개화일 예측방법의 개선에 있으므로 두 방법에 의한 개화예상날짜와 실측개화일과의 평균절대오차(Mean Absolute Error, MAE)와 평균평방근오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 계산하여 상호 비교함으로써 실용가능성을 평가하였다.

2.4. 적용 : 2005년 벚꽃 개화일 예측

서울지방의 벚꽃 개화일 예측을 위해 일차로 서울관측소의 2004년 10월 1일부터 2005년 3월 29일까지 일 최고 및 최저기온 관측자료를 모형에 입력시켜 휴면해제일과 개화일 예상값을 추정하였다. 3월 29일 이후 기온자료는 1971년~2000년 평년 일별 기온자료로 대치하였다. 이차로는 3월 30일부터 실제 개화가 관측된 4월 12일까지 실측 기온자료에 의해 모형을 구동시키고 추정오차를 계산하였다. 같은 과정을 마산기상대 자료에 적용하여 마산 인근의 대표적인 벚꽃축제도시인 진해의 벚꽃 개화일도 추정해보았다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 벚꽃 개화모형의 모수

28년간 서울관측소에서 관측된 벚나무의 발아일과, Chill Day 모형에 의한 예상 발아일간 편차의 제곱을 최소로 하는 조합은 기준온도 7°C, 저온요구량 110으로 나타났다. 즉 10월 1일부터 기준온도 7°C로 Chill Day를 누적시켜 110에 도달하는 날짜가 내생휴면 해제일이 된다는 것이다. 그러나 식물의 복잡한 개화생리에 비추어 기온자료만으로 추정한 휴면해제일을 전적으로 신뢰하기는 어렵기 때문에 본 연구에서는 벚나무의 내생휴면은 무조건 1월 31일에 끝난다고 가정하는 처리를 추가하였다. 어떤 방법이건 휴면해제일부터 개화일까지 누적시킨 온도시간이 해마다 큰 변동 없이 안정적일수록 개화일 예측에 유리하다.

해마다 변함없이 1월 31일로 정해둔 날짜에 휴면이 해제된다고 가정하여, 이날부터 실측개화일까지 GDD를 계산해보면 28년간 평균 125.9, 표준편차 11.7을 보인다. 반면 전년도 10월 1일 이후 기온자료에 의해 해마다 다르게 추정된 휴면해제일을 사용할 경우, 평균 123.5, 표준편차 11.1로서, 4월의 일별 평균 GDD값과 비교해볼 때 이들 표준편차는 이틀 정도의 오차에 해당하므로 큰 차이는 아니라고 볼 수 있다. 하지만 지구온난화에 따라 "춥지 않은 겨울"이 이미 일상화 되었고 (Shim *et al.*, 2004), 향후 이런 경향이 더욱 심해질 경우 2월 이전의 GDD 축적효과도 무시할 수 없을 것이다. 무엇보다도 봄꽃의 늦가을 이상개화 등 휴면과 밀접한 관련이 있는 생물계절의 평가와 예측을 위해서는 개화기 추정모형에서 휴면부분을 제외해서는 안 된다. Kang *et al.*(2003)은 휴면단계를 배제한 one step model을 토대로 1996년부터 2001년까지 봄철 우리나라 산림의 개엽시기 추정을 시도하여 MAE=2.5의 좋은 결과를 얻었다. 하지만 이상난동이었던 97/98 겨울 날씨 때문에 98년 봄에는 오차가 매우 컸다고 보고하였다. De Melo-Abreu *et al.*, (2004)은 스페인과 포르투갈에서 수행한 올리브 품종별 개화일 예측을 위한 실험을 통해, 평균적인 정확도에 있어서 별 차이가 없더라도 식물생리학적 의미를 갖는 two step model이 개별연도의 개화일 예측에 가장 적합하다는 결론을 내렸다.

따라서 본 연구에서는 휴면해제일을 기점으로 실측개화일에 도달하는데 필요한 123.5를 개화에 필요한 가온량으로 간주하였다.

3.2. 벚꽃 개화모형의 신뢰성

기상청 회귀모형을 무결점예보자료(즉 관측기온)에 의해 구동시켜 1955년부터 2004년까지 개화예상일을 추정하면 그 오차가 MAE=2.31, RMSE=2.96일이며, 관측치와 추정치간 상관계수는 0.84이다. 반면 생물계절모형에 의한 추정오차는 MAE=1.58, RMSE=2.09일, 상관계수 0.95로서, 회귀모형과 최소한 비슷하거나

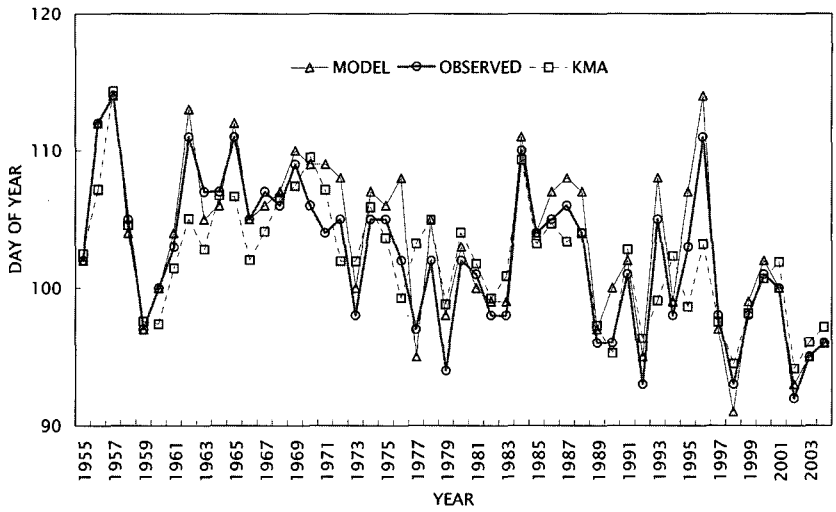

Fig. 2. Comparison of the model predicted dates for cherry blossom with the observed flowering dates in Seoul during 1955-2004. Official forecast dates (KMA) are also shown for comparison.

오히려 개선된 결과를 보여준다(Fig. 2). 생물계절 관측자료에 함축된 각종 오차요인을 감안한다면(기상청, 1994), 우리 모형은 지난 50년간 벚꽃 개화기의 연차변이를 거의 완벽하게 재현했다고 할 수 있다. 재현된 연차변이의 장기추세에는 지구온난화 경향까지 포함되어 있으므로 이 모형은 향후 기후변화 시나리오와 연

Table 2. Projection of the cherry blooming date for Seoul in 2005, based on the phenology model driven by daily maximum and minimum temperature data. The original forecast date (April 17) came from the model run by daily temperature normals, while the final forecast date (April 14) was determined by the measured data input to the model. The observed blooming was on April 12 in this year, according to the KMA official announcement.

		Normal		Thermal Time		2005		Thermal Time	
		T_{max}, °C	T_{min}, °C	GDD	ΔR_h	T_{max}, °C	T_{min}, °C	GDD	ΔR_h
March	30	13.6	4.3	3.3	-76.8	12.1	2.2	2.6	-77.6
	31	13.0	3.6	3.0	-73.8	15.5	3.5	4.3	-73.3
April	1	13.0	3.3	3.0	-70.8	16.1	6.3	4.6	-68.8
	2	12.8	3.3	2.9	-67.9	15.8	6.5	4.4	-64.4
	3	13.6	3.7	3.3	-64.6	14.5	5.6	3.8	-60.6
	4	15.5	4.6	4.3	-60.4	14.3	4.1	3.7	-57.0
	5	15.8	5.4	4.4	-56.0	19.0	7.3	6.2	-50.8
	6	16.3	5.6	4.7	-51.3	17.7	9.6	6.7	-44.2
	7	16.4	6.2	4.7	-46.6	16.1	10.5	6.3	-37.9
	8	16.5	7.0	4.8	-41.9	22.5	7.5	8.0	-29.9
	9	17.2	6.9	5.1	-36.8	15.8	11.3	6.6	-23.3
	10	16.5	6.4	4.8	-32.0	17.1	9.1	6.1	-17.2
	11	17.1	6.0	5.1	-27.0	18.2	10.1	7.2	-10.1
	12	17.5	6.7	5.3	-21.7	14.6	7.8	4.2	-5.9
	13	17.0	6.6	5.0	-16.7	15.8	6.4	4.4	-1.5
	14	17.5	7.1	5.3	-11.4	14.3	6.3	3.7	2.2
	15	17.6	7.3	5.4	-6.0	15.3	4.6	4.2	
	16	16.1	7.4	4.8	-1.2	15.8	5.5		
	17	17.2	7.1	5.1	3.9	19.2	7.5		

ΔR_h : the remaining thermal time (heating requirement) that must be filled for flowering.

계하여 생물계절 측면의 영향평가에도 활용될 수 있을 것으로 전망된다.

3.3. 2005년의 개화일 예측결과 비교

기상청은 회귀모형과 주관적인 보정에 근거하여, 금년의 벚꽃은 작년보다 4일 지연되어 4월 9일에 개화할 것으로 예상한 보도자료를 지난 3월 초에 발표하였다. 이 결과는 3월의 실측기온 대신 기온전망에 근거한 것인데, 3월의 실측기온자료를 이용하여 회귀모형을 구동시키면 예상개화일은 4월 16일로서 작년보다 9일 정도 지연될 것으로 예측되었다. 생물계절모형의 경우 휴면해제시기가 2004년보다 닷새 늦은 2월 16일이며, 4월의 기온을 평년과 같다고 간주하고 구동시키면 개화시기는 10일 지연된 4월 17일로 추정되었다. 즉 생물계절모형의 예측결과가 회귀모형의 결과에 근접함을 알 수 있다.

하지만 실제 개화일은 4월 12일(기상청 공식발표)로서 두 모형이 4~5일 정도 지연 예측한 결과가 되었다. 기상청 모형만을 두고 본다면 3월말 예상보다 오히려 2월말 예상이 실제에 더 가까웠다고 할 수 있지만 입력자료가 월 평균기온이기 때문에 그 원인을 밝히기는 불가능하다. 생물계절모형의 경우 평년기온 대신 개화일까지 매일의 실측기온을 입력시켜 GDD의 축적과정을 살펴봄으로써 그 원인을 알 수 있다.

2005년 3월 29일까지 계산된 바로는, 앞으로 꽃눈이 완전 개화하기 위해 필요한 개화소요 가온량은 80.1이었다. 생물계절모형에서는 이 값이 GDD 누적에 의해 상쇄되는 날 개화하는 것으로 가정하는데, 개화일을 4월 17일로 예상한 당초 계산은 3월 29일 이후에는 실측기온 대신 평년기온자료를 사용하여 나온 값이었다. 다시 실측기온자료를 이용하여 모형을 구동시켜보면 개화예상일이 4월 14일로서 사흘이 단축됨을 알 수 있다(Table 2). 즉 3월 30일 이후 기온은 평년에 비해 상당히 높아서 벚꽃의 개화에 필요한 GDD 축적이 훨씬 빨리 이루어진 것이다.

이 모형이 서울을 벗어난 다른 지역에도 적용되는지 알아보기 위해 대표적인 벚꽃 군락지인 진해에 적용해 보았다. 진해에는 기상관서가 없기 때문에 인근 마산기상대의 기온자료를 이용하였다. 2005년의 경우 휴면해제일이 2월 4일로 계산되었으며 개화예상일은 4월 6일로서 진해에서의 실측개화일과 거의 일치하였다(Table 3).

Table 3. Projection of the cherry blooming date for Jinhae in 2005, based on the phenology model driven by daily maximum and minimum temperature data. Observed cherry blooming was on April 5, while the projected date was April 6. Measured temperature data at Masan, the nearest KMA station, were used to drive the model.

		T_{max}, °C	T_{min}, °C	GDD	ΔR_h
March	15	11.2	2.5	2.1	-81.2
	16	14.2	3.1	3.6	-77.6
	17	13.8	6.5	3.4	-74.2
	18	12.5	4.3	2.8	-71.4
	19	11.3	2.0	2.2	-69.3
	20	16.0	5.1	4.5	-64.8
	21	13.1	5.0	3.1	-61.7
	22	13.0	6.8	3.0	-58.7
	23	12.2	7.3	2.8	-56.0
	24	8.8	1.3	0.9	-55.1
	25	11.6	-0.6	2.3	-52.8
	26	15.0	3.4	4.0	-48.8
	27	10.1	6.4	1.6	-47.2
	28	20.8	7.6	7.2	-40.0
	29	14.3	4.2	3.7	-36.4
	30	16.2	1.7	4.6	-31.8
	31	19.3	5.8	6.2	-25.6
April	1	17.9	8.0	5.9	-19.7
	2	18.3	7.9	6.1	-13.6
	3	11.7	4.6	2.4	-11.2
	4	17.4	3.0	5.2	-6.0
	5	18.7	6.3	5.9	-0.2
	6	17.2	8.3	5.8	5.6

ΔR_h: the remaining thermal time (heating requirement) that must be filled for flowering.

IV. 요약 및 결론

현재 기상청에서 사용하고 있는 봄꽃 개화일 예상프로그램의 시공간적 경직성을 해소하여 지역제한이 없으며 상시예측이 가능한 방법을 찾기 위해 온대낙엽수목의 개화생리와 생물계절이론에 근거를 둔 개화모형을 작성하였다. 이 모형은 꽃눈의 내생휴면기간과 휴면해제 후 개화에 이르는 기간 등 두 단계를 각각 저온요구량과 고온요구량으로 표현하며, 수목의 종류와 품종에 따라 고유한 값을 갖는다고 가정한다. 모형의 구동은 일 최고 및 최저기온에 의해 매일의 냉각량을 계산하여 그 적산값이 저온요구량에 도달하면 내생휴면이 해제된다고 간주한다. 휴면해제일부터는 가온량을 계산하여 누적시키며 정해진 고온요구량에 도달하면 개화가 된다고 본다.

서울관측소에서 1922년부터 1950년까지 관측한 왕벚나무의 발아기, 개화기 및 기온자료에 의해 저온요구량과 고온요구량을 도출한 다음, 이들 값으로 모수화된 개화모형을 1955년부터 2004년까지 50년간 서울지방 기온자료에 적용하여 개화일을 예측하였다. 모형에 의한 추정값의 신뢰도는 기존의 기상청 방법보다 개선된 것으로 나타났다. 이 결과로부터 벚꽃 개화일 예측에 있어서 생물계절모형의 실용성을 확인할 수 있었다.

물론 벚나무의 저온요구량을 실험실에서 정밀하게 평가하지 못하고, Chill Day 모형에 의해 추정하였기 때문에 앞으로 다양한 벚나무 품종에 이 모형을 적용하기 위해서 이 부분은 좀더 연구가 필요하다. 하지만 전국 모든 지역에서 서울관측소 표준목과 동일한 수종, 동일한 수령의 벚나무를 가꾼다는 가정 하에 이 모형을 구동시킨다면 전국적인 기준이 될 수 있는 귀중한 정보를 제공한다. 이를 토대로 모형의 예상결과와 지역별 실측 개화기 사이의 편차를 분석한다면 실용성 있는 예측시스템을 구축할 수 있을 것이다. 나아가 전국의 일 최고최저기온 분포를 정밀한 해상도의 전자기후도 형태로 표현할 수 있다면(Yun, 2004), 이 모형을 이용하여 같은 해상도의 벚꽃 개화일 예상도를 제작할 수 있으므로 기상관서의 존재유무와 무관하게 임의 지점의 벚꽃 개화일을 추정할 수 있게 된다.

그러나 이 모형을 현업에 적용할 경우 예상되는 문제도 적지 않다. 휴면해제일 추정에 필요한 저온요구량의 계산에는 실측 일 최고 및 최저기온자료를 이용하지만, 휴면해제 후 개화에 필요한 가온량의 계산에는 관측자료 뿐 아니라 예보자료가 필요한데, 일주일 이상 중장기 기온예보는 아직 신뢰도가 미흡하다. 현재 기상청에서는 3월 8일 경부터 벚꽃 개화예상일을 산출하기 시작하여 3월 10일에는 언론사 보도자료를 통해 발표하고 있다. 따라서 생물계절모형을 현업에 적용할 경우 휴면해제일부터 3월 7일까지는 실측 최고, 최저기온자료를 가온량 계산에 사용하고, 개화예상일까지 나머지 약 한 달 기간에 대해서는 중장기 예보자료를 사용해야 한다. 향후 평년 기후자료를 중장기예보에 의해 어떻게 신뢰성 있는 일 최고최저기온자료로 변환하느냐가 이 모형에 의한 벚꽃개화예상일 산출에 관건이 될 것이다.

기온예보자료의 신뢰성만 확보된다면, 약간의 추가 실험을 거친 후 이 모형은 배, 복숭아, 사과 등 주요 낙엽과수의 개화기 추정에도 활용될 수 있으므로, 과수재배농가의 영농계획 수립과 늦서리피해 예방에 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글

장기간에 걸쳐 귀중한 생물계절 및 기온 관측자료를 생산하고 흔쾌히 제공해준 기상청 관계관 여러분께 감사드린다. 이 연구는 농촌진흥청 특정과제 "포도동해 발생의 지형기후학적 해석연구"의 지원으로 수행되었다.

인용문헌

기상청, 1994: 계절관측요령. 행정간행물 (등록번호 09200-74311-9407). 131pp.

기상청, 2002: 생활기상정보 산출 및 검증. 기상청 기후국 기술보고서 2002-1(발간등록번호 11-1360000-000108-01). 78pp.

오성도(대표저자), 2004: 과수온도생리. 도서출판 길모금, 364pp.

Balandier, P., M. Bonhomme, R. Rageau, F. Capitan, and E. Parisot, 1993: Leaf bud endodormancy release in peach trees: evaluation of temperature models in temperate and tropical climates. *Agricultural and Forest Meteorology* **67**, 95-113.

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.

De Melo-Abreu, J. P., D. Barranco, A. M. Cordeiro, J. Tous, B. M. Rogado, and F. J. Villalobos, 2004: Modelling olive flowering date using chilling for dormancy release and thermal time. *Agricultural and Forest Meteorology* **125**, 117-127.

Faust, M., 1989: *Physiology of Temperate Zone Fruit Trees.* John Wiley and Sons, Inc. 338pp.

Kang, S., S. W. Running, J.-H. Lim, M. Zhao, C.-R. Park, and R. Loehman, 2003: A regional phenology model for detecting onset of greenness in temperate mixed forests, Korea; an application of MODIS leaf area index. *Remote Sensing of Environment* **86**, 232-242.

Seeley, S. D., 1996: Modelling climatic regulation of bud dormancy. In: G. A. Lang (ed.) *Plant Dormancy-Physiology, Biochemistry and Molecular Biology.* CAB International, Wallingford, U. K. 361-376.

Shim, K. M., J. T. Lee, Y. S. Lee, and G. Y. Kim, 2004: Reclassification of winter barley cultivation zones in Korea based on recent evidences in climate change. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **6**, 218-234.

Yun, J. I., 2004: Visualization of local climates based on geospatial climatology. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **6**, 272-289.