

## 기후변화에 따른 벚꽃 개화일의 시공간 변이

윤진일

경희대학교 생명과학부/생명자원과학연구원

(2006년 4월 19일 접수; 2006년 5월 20일 수락)

### Climate Change Impact on the Flowering Season of Japanese Cherry (*Prunus serrulata* var. *spontanea*) in Korea during 1941-2100

Jin I. Yun

Department of Ecosystem Engineering/Institute of Life Science and Natural Resources

Kyung Hee University, Suwon 446-701, Korea

(Received April 19, 2006; Accepted May 20, 2006)

#### ABSTRACT

A thermal time-based two-step phenological model was used to project flowering dates of Japanese cherry in South Korea from 1941 to 2100. The model consists of two sequential periods: the rest period described by chilling requirement and the forcing period described by heating requirement. Daily maximum and minimum temperature are used to calculate daily chill units until a pre-determined chilling requirement for rest release is met. After the projected rest release date, daily heat units (growing degree days) are accumulated until a pre-determined heating requirement for flowering is achieved. Model calculations using daily temperature data at 18 synoptic stations during 1955-2004 were compared with the observed blooming dates and resulted in 3.9 days mean absolute error, 5.1 days root mean squared error, and a correlation coefficient of 0.86. Considering that the phenology observation has never been fully standardized in Korea, this result seems reasonable. Gridded data sets of daily maximum and minimum temperature with a 270 m grid spacing were prepared for the climatological years 1941-1970 and 1971-2000 from observations at 56 synoptic stations by using a spatial interpolation scheme for correcting urban heat island effect as well as elevation effect. A 25km-resolution temperature data set covering the Korean Peninsula, prepared by the Meteorological Research Institute of Korea Meteorological Administration under the condition of Inter-governmental Panel on Climate Change-Special Report on Emission Scenarios A2, was converted to 270 m gridded data for the climatological years 2011-2040, 2041-2070 and 2071-2100. The model was run by the gridded daily maximum and minimum temperature data sets, each representing a climatological normal year for 1941-1970, 1971-2000, 2011-2040, 2041-2070, and 2071-2100. According to the model calculation, the spatially averaged flowering date for the 1971-2000 normal is shorter than that for 1941-1970 by 5.2 days. Compared with the current normal (1971-2000), flowering of Japanese cherry is expected to be earlier by 9, 21, and 29 days in the future normal years 2011-2040, 2041-2070, and 2071-2100, respectively. Southern coastal areas might experience springs with incomplete or even no Japanese cherry flowering caused by insufficient chilling for breaking bud dormancy.

**Key words :** Dormancy, Flowering, Phenology, Japanese cherry, Global warming, Climate change, Urban heat island, Data assimilation

## I. 서 언

기후변화에 대한 식생반응과 그에 따른 육상생태계 영향 및 농림업분야 적용에 대한 관심이 최근에 높아지고 있지만(한화진, 2005), 이 분야의 연구는 예상외로 부진하고 그 성과 역시 미미하다. 현재까지 관찰된 기후변화 가운데 가장 뚜렷하며 앞으로도 그 시공간적 변화경향을 비교적 확실하게 예상할 수 있는 것은 사실상 기온상승뿐이다. 한편 작물과 수목의 생육반응 가운데 기온자료만으로 알아낼 수 있는 것은 휴면해제, 발아, 개화 등 생물계절(phenology)에 그친다. 그렇다면 현재 기술수준에서 정책결정과정에 반영할 만큼 신뢰성을 갖춘 영향평가정보 역시 생물계절정보에 국한될 수밖에 없다. 사실 생물계절은 기온이나 이산화탄소농도에 덧붙여 기후변화지표의 하나로 인정되며, 그 자체가 바로 변화하는 환경조건을 나타내는 종합생물지표(integral biological indicator)이다(Menzel, 2002). 무엇보다도 생물계절은 기온자료만으로 비교적 정확한 예측이 가능하기 때문에 간단한 모형에 의해 과거기록뿐 아니라 기후시나리오 조건에서 신뢰성 있는 식생반응을 보여줄 수 있다. 선진외국에서는 이미 낙엽수목의 휴면과 개화일 예측에 생물계절모형이 널리 활용되고 있는데, 국내에서도 Jung *et al.*(2005)은 기상청의 지역별 봄꽃 개화에상일 발표용 회귀모형을 대체할 수 있음을 보였고, Kwon *et al.*(2006)은 월동기간 중 휴면심도를 생물계절모형에 의해 계산함으로써 실용적인 동해정보시스템 구축의 가능성을 열었다.

생물계절모형의 실용화 걸림돌은 입력자료의 문제로서, 기상관측망이 꾸준히 확충되어 왔지만 정작 식생반응이 일어나는 삼림, 농경지에서는 기상관측이 거의 이루어지지 않는다. 따라서 인근 기상관측 자료를 이용할 수밖에 없는데 기상관측은 대개 도시화, 산업화가 진행된 지역에 위치하고 있어 관측된 기온자료에는 도시효과가 포함되어있다. 지구온난화에 대한 개념이 없었던 70년대 초에 Rho(1973)는 서울지방의 기온이 주변지역에 비해 상승하였음을 표준기온관측자료의 분석을 통해 처음으로 보고하였다. 이후 전용 관측망을 구축하여 본격적으로 조사한 결과 서울 외에도 부산의 계절별 도시열섬효과의 최대값은 봄철에 6.1°C, 여름철에 3.0°C, 가을철에 7.0°C, 그리고 겨울철에 9.8°C였으며(Han *et al.*, 1993), 대구에서는 봄의 경우 6.9°C, 여름의 경우 4.7°C, 가을의 경우 6.6°C 그리고

겨울의 경우 4.4°C로 나타났다(Yoon *et al.*, 1994). 이 같은 도시열섬효과가 비도시지역에 그대로 전이되면 식생반응은 예상과 전혀 다른 결과를 보일 것이다. 실제로 지난 100년간 봄꽃의 개화기 단축이 기상관측의 생물계절 관측자료에서 확인되는데, 그 정도는 기상관측이 소재한 도시의 인구에 따라 다르며 대도시일수록 빨라지는 경향이 있음이 보고되었다(허창희 등, 2005). 따라서 정확한 식생반응을 알기 위해 기온자료로부터 도시효과를 제거한 “식생맞춤형” 국지기온자료 생산이 선행되어야 한다.

인구가 1만명만 되어도 나타나는 도시열섬효과를 제거하기 위해 일반적으로 인구 등급이나 인구 증가율을 이용하는 방법이 많이 이용된다. 도시와 인접한 전원지역간 기온차의 최대값(열섬강도)은 도시인구가 증가함에 따라 급격히 증가하다가 일정 수준 이상에서는 그 증가 추세가 둔화되므로 인구의 자연대수는 도시열섬효과와 직선적인 관계를 보이는데(Oke, 1987), 도시와 인접한 비도시의 온도차가 인구수의 0.45층에 비례한다는 연구결과도 있다(Karl *et al.*, 1988). 국내에서도 서울 및 주변도시들의 인구와 열섬강도 사이 관계를 나타내는 회귀 방정식을 유도하고 인구 30만명을 기준으로 그 회귀식의 기울기가 크게 달라지는 점을 발견하였다(Park, 1986).

그러나 이들 연구결과는 비도시지역 기후도를 작성하는 데 직접 사용될 수는 없는데, 그 이유는 도시열섬효과를 대표하는 인구자료가 시·군 행정구역 단위로 얻어지므로 같은 시·군내에서는 도시열섬효과의 공간적 변이를 표현할 수 없기 때문이다. 또한 각 시·군의 도시열섬효과는 행정구역 경계선을 따라 불연속적인 값을 가지게 되어 비현실적인 기온분포를 그리게 된다. 즉 수평공간에서 자연스럽게 확산되는 도시열섬효과의 정확한 표현이 불가능한 것이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 인공위성에서 관측한 야간의 불빛 밝기에 따라 대도시, 중소도시, 촌락으로 분류하여 도시열섬 효과를 추정하는 방법(Peterson *et al.*, 1999; Hansen *et al.*, 2001), 도시지역의 인구와 토지이용도를 동시에 고려함으로써 도시열섬효과를 정량적으로 표현할 수 있는 수치인구모형(Digital Population Model, DPM)을 이용하는 방법(Choi *et al.*, 2003) 등이 제시되어 기상관측 자료를 토대로 비도시지역의 “식생맞춤형” 국지기온자료의 생산이 가능하다.

세계기상기구에 의하면 기후란 적어도 30년 이상

장기간 기상자료의 통계량, 즉 평균과 변이로 정의할 수 있다. 기후산출에 이용된 자료기간을 기후학적 평년(normal year)이라고 하므로 엄밀한 의미에서 기후 변화란 두 기후학적 평년의 비교를 통해서만 확인할 수 있다. 현재 사용되는 기후학적 평년기간에 대해서는 이미 270 m 해상도로 남한지역의 “식생맞춤형” 기온자료가 제작되었으므로(Choi *et al.*, 2003), 1941-1970 평년에 대해서 동일한 해상도의 기온분포도가 제작된다면 두 개 기후학적 평년 간 기온변화를 270 m 공간해상도로 표현할 수 있다. 특히 지난 세기에 관측된 바로는 겨울 및 초봄의 기온상승이 우리나라 기후 변화의 특징 중 하나이므로(권원태, 2004), 겨울 및 초봄의 기온에 지배되는 낙엽수목의 봄철 생물계절, 즉 개화기의 공간분포가 기후변화와 함께 어떻게 달라졌는지 파악할 수 있다.

본 연구는 (1) 전국의 기상관서에서 지난 50년간 관측한 벚꽃 개화일자료에 의해 휴면생리 기반의 낙엽수목 개화일 예측모형의 신뢰성을 검증하고, (2) 기후 시나리오에 근거한 2100년까지 기온자료로부터 도시효과 보정기법에 의해 해상도 270 m의 “식생맞춤형” 국지기온자료를 생산하며, (3) 이 자료를 토대로 벚꽃 개화에상일 분포를 30년 기간 단위로 산출하기 위해 수행하였다.

## II. 자료 및 방법

### 2.1. 개화일 예측모형

본 연구에서는 Cesaraccio *et al.*(2004)의 생물계절 모형을 토대로 1921-1950 기간 중 서울지방의 기온과 벚꽃 개화일자료에 의해 도출한 벚꽃개화일 예측모형을 수정 없이 사용하였다(Jung *et al.*, 2005). 이 모형에서는 낙엽수목의 개화과정을 2단계로 구분한다. 그 하나는 꽃눈의 내생휴면 시작부터 해제까지이고, 나머지는 내생휴면해제 이후 개화에 이르는 기간이다. 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. 온대낙엽수목 꽃눈의 내생휴면 해제에는 일정량의 저온이, 발아(강제휴면타파)에는 저온요구량과 같은 정도의 성장도일(Growing Degree days, GDD)이, 그리고 개화에는 추가적인 GDD가 필요하다. 이 모형

에서는 휴면개시부터 내생휴면 해제까지 기간은 저온요구량(Chilling Requirement,  $R_c$ ), 내생휴면 해제 후 개화까지 기간은 고온요구량(Heating Requirement,  $R_h$ )으로 구성하였다. 낙엽수목이 휴면을 시작하는 시점은 정해진 임계값 이하로 기온이 떨어질 때로 알려져 있으며 이 임계온도( $T_c$ )에 따라 저온요구량과 고온요구량의 크기가 달라진다. Jung *et al.*(2005)은 서울시 종로구 송월동에 위치한 기상청 서울관측소에서 1921년부터 1950년까지 관측한 일별 기온과 벚꽃 발아, 개화일자료에 근거하여  $T_c=7^{\circ}\text{C}$ ,  $R_c=110$ , 발아일까지의  $R_h=110$ , 개화일까지의  $R_h=123.5$ 로 추정하였다.

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  $7^{\circ}\text{C}$  이하로 내려가지 않으면 실제 냉각량이 누적되지는 않는다. 참고로 1971-2000 평년의 통계자료에 의하면 일 최저기온이  $7^{\circ}\text{C}$ 로 떨어지는 첫날은 대관령에서 9월 22일, 서울지방에서 10월 22일이다. 휴면해제 이후 개화에 이르기까지 소요되는 기간은 벚나무의 성장개시온도(여기서는  $7^{\circ}\text{C}$ ) 이상에서 누적시킨 고온요구량으로 표현되는데, 평년통계(1971-2000)에 의하면 일 최고기온이  $7^{\circ}\text{C}$ 에 도달하는 첫 날짜는 서울에서 3월 3일, 대관령에서 3월 28일로서, 1~2월 사이에 내생휴면이 해제되더라도 기온은 여전히 성장개시온도 아래인 경우가 많아 꽃눈은 소위 “강제휴면” 혹은 “환경휴면” 상태에 놓여있게 된다. GDD가 누적되기 시작하는 것은 이러한 강제휴면상태에서 벗어남을 의미한다.

### 2.2. 개화일 예측모형의 신뢰성 검증

이 모형을 1955년부터 2004년 기간에 제주도, 울릉도 및 모수추정에 사용된 서울을 제외한 18개 지점(인천, 강릉, 여수, 추풍령, 완도, 통영, 군산, 대전, 충주, 청주, 원주, 춘천, 대관령, 속초, 수원, 서산, 울진, 안동)의 일 최고/최저기온자료에 의해 구동시켜 개화일을

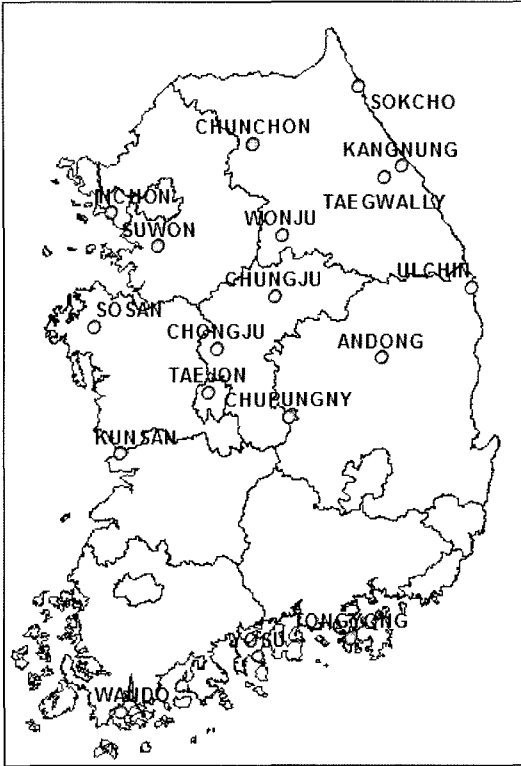


Fig. 1. Geographic locations of 18 synoptic weather stations with the phenology observation routine in South Korea.

추정하였다(Fig. 1). 계산된 개화예상일과 실측개화일과의 평균오차(mean error, ME), 평균절대오차(mean absolute error, MAE), 평균평방근오차(root mean square error, RMSE)를 계산하였다.

### 2.3. 격자형 기온자료 준비

도시지역의 인구나 토지이용도를 동시에 고려함으로써 도시열섬효과를 정량적으로 표현할 수 있는 수치인 구모형(Digital Population Model, DPM)을 기존 고도보정 기온 공간내삽모형과 결합함으로써 도시효과를 보정한 Choi *et al.*(2003)의 방법에 따라 기온자료를 준비하였다.

먼저 DPM을 제작하기 위해 전국의 지표피복(시가지, 농지, 산림, 초지, 습지, 나지, 수역)을 30 m×30 m의 정방형 격자 단위로 분류한 '대분류' 지표피복도를 환경부(<http://www.me.go.kr>) 환경지도서비스로부터 입수하였다. 기준연도는 1980년으로서 본 연구에서는 이 시기의 전 국토면적 가운데 도시에 해당되는 지역만 발췌하기 위해서 피복분류상 '시가지'에 해당되

는 픽셀만을 추출하였다.

다음에는 시·군별 인구자료를 통계청(<http://www.nso.go.kr>)의 통계정보시스템으로부터 수집하고 행정자치부(<http://www.mogaha.go.kr>)에서 작성한 시·군 행정구역수치지도에 속성정보로 추가하였다. '시가지' 피복 위에 행정구역수치지도를 중첩시키고 해당 시·군 면적에 포함되는 시가지 픽셀(30 m×30 m)을 계수하였다. 1985년의 시·군 인구를 해당 시가지 픽셀 수로 나누어 시가지 픽셀 하나 당 평균 인구, 즉 '시가지인구밀도'를 시·군별로 계산하고, 다시 '시가지' 피복 위에 시군 행정구역지도를 중첩시키고 시군 행정구역 형상의 속성정보인 "시가지인구밀도"를 곱해 줌으로써 실제 인구 분포를 디지털 값으로 바꾸어 표현하였다. 이 디지털 인구분포도는 농경지, 산림, 하천, 호수는 물론, 도시 안의 초지나 나대지 등도 제외하고 실제 사람이 살고 있는 지역을 대상으로 평균인구를 30 m 간격의 픽셀로 나타낸 것이다. 계산편의를 위해 이들 평균인구 픽셀 9개씩을 묶어서 90 m×90 m 픽셀로 변환한 것이 DPM이다.

DPM을 토대로 임의지점의 일 최저기온을 추정하는 공간내삽모형은 다음과 같은데, 기존의 거리역산가중(Inverse Distance Weighting, IDW)에 의한 내삽기온에 고도편차 및 도시열섬효과를 보정하는 형태이다. 여기서 도시열섬효과(P)는 중심점의 인구뿐만 아니라 주변 픽셀들의 인구에 의해서도 영향을 받으므로 이를 가장 잘 표현하는 반경 2,500 m 평활화 DPM이 사용된다.

$$T = \frac{\sum \frac{T_i}{d_i^2}}{\sum \frac{1}{d_i^2}} + \left[ z - \frac{\sum \frac{z_i}{d_i^2}}{\sum \frac{1}{d_i^2}} \right] \Gamma + \left[ P - \frac{\sum \frac{P_i}{d_i^2}}{\sum \frac{1}{d_i^2}} \right] \Pi \quad (1)$$

$T_i$  : Observed temperature at station 'i'

$d_i$  : Distance from the site to station 'i'

$z$  : Elevation of the site

$z_i$  : Elevation of the site 'i'

$\Gamma$  : Temperature change per unit change in the elevation (Lapse rate)

$P$  : Logarithm of the site population (DPM)

$P_i$  : Logarithm of the city population (DPM) where station 'i' locates

$P$  : Empirical conversion coefficient

이 모형을 이용하여 1971-2000 평년의 270 m 해

상도 격자형 기온자료를 만들기 위하여 기상청으로부터 전국 56개 지점(제주도, 울릉도 제외) 1971-2000 평년의 월별 기온자료(일 최고 및 일 최저기온)를 수집하였다. 다음에 56개소 기상관서의 해발고도를 이용하여 가상의 해발고도표면을 생성하고 월별 기온값을 곱하여 해발고도 보정값을 생성하였다. 이 보정값을, 단순내삽에 의해 추정된 초기 기온표면으로부터 감하여 고도편차가 보정된 일 최저기온 표면을 얻었다. 2,500 m 평활화 DPM으로부터 56개 지점에 해당하는 격자점의 인구를 추출하였다. 추출된 인구값을 이용하여 IDW 내삽에 의해 가상의 인구표면을 만들고 실제 인구와의 편차를 계산하였다. 인구편차의 자연대수를 취한 후, Choi *et al.*(2003)이 제시한 최적회귀식에 대입하여 월별로 기온보정값을 도출하였다. 가상 DPM과 실제 DPM을 비교하여 가상인구가 큰 경우에는 해발고도보정 기온에 도시열섬효과 보정량을 빼고, 작은 경우에는 더해줌으로써 최종 기온표면을 생성하였다.

1941-1970 기간의 도시열섬효과를 모의하기 위해서는 이 기간에 얻은 인구 및 토지이용자료가 필요하다. 그러나 이 시기에는 인공위성자료에 근거한 토지이용도가 없으므로 부득이 토지이용양상이 다름에도 불구하고 80년대 위성자료를 이용하였다. 즉 이 시기의 DPM은 60년대 인구자료와 80년대 토지이용도를 이용하여 앞서와 동일한 방법에 따라 제작하였다. 또한 1971-2000년 기온내삽에 사용된 56개 기상관서 가운데 1941-1970년에 기온관측자료가 있는 기상관서는 12개에 불과하므로 나머지 44개소에 대해 기온자료의 복원이 필요하다. 이를 위해 장기간 기후자료를 보유한 12개 기상관서 및 소재지역을 대상으로 60년대와 90년대의 인구와 기온을 비교하여 인구증가에 따른 기온상승 예측모형을 도출하였다(Chung *et al.*, 2004). 나머지 44개소의 60년대 인구를 조사하여 90년대 인구와의 편차를 구하고 이 모형에 입력시켜 기온변화량을 계산하였다. 기존 1971-2000년 일 최저기온 분포도로부터 44개 지점의 기온자료를 발췌하고 여기에 계산된 기온변화량을 가감하였다.

같은 방법으로 미래 100년간 기온자료를 생산하기 위해 기상연구소로부터 IPCC(Inter-governmental Panel on Climate Change)의 SRES(Special Report on Emission Scenarios) A2 시나리오에 근거하여 역학적 규모축소기법에 의해 제작된 한반도 25 km 해상도 기온자료를 수집하였다(권원태, 2004). 먼저 이 자료를 2011-2040,

2041-2070, 2071-2100 등 3 기간으로 나누어 각각의 월별 평균값을 취하고 이를 평년기온으로 간주했다. 규모축소과정에서 각 시기의 평균적인 도시효과를 감안하기 위해 역시 DPM을 제작했는데 편의상 인구는 2000년, 지표피복은 90년대 자료를 수정 없이 사용하였다.

#### 2.4. 일별 기온자료 생성 및 모형구동

전 단계에서 1941년부터 2100년까지 30년 단위 평년 5개에 대해 일 최고 및 최고기온을 월별 평균값으로 얻었지만 개화일 예측모형은 입력자료로서 월 평균이 아닌 일 최고, 최저기온자료를 요구한다. 이러한 시간규모의 축소 혹은 ‘날짜생성기’에는 여러 가지 방법이 있지만 본 연구에서는 일본기상청에서 사용하는 조화분석법에 의해 평년의 월별 기온자료를 일별 최고, 최저기온값으로 변환하였다(Seino, 1993). 월일을 각각  $i, j$ 로 두면, 임의의 날짜  $j$ 의 기온  $T_j$ 는

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

로 표현할 수 있다. 이 식에서

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

이다.

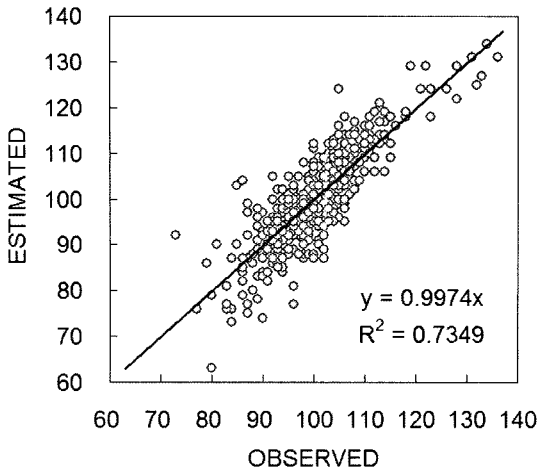
이렇게 해서 준비된 1941-1970, 1971-2000, 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100 등 5개 평년의 남한 전역 270 m 해상도 일 최고, 최저기온자료를 개화일 예측모형에 입력시켜 각 기간의 평균적인 벚꽃개화에 상일 분포도를 역시 270 m 해상도로 생성하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 3.1. 개화일 예측모형의 신뢰성

이 모형에 의한 전국 18개 지점의 50년간 벚꽃개화일 추정오차는 MAE=3.87, RMSE=5.14일, 상관계수 0.86이었다(Fig. 2). 이는 같은 모형을 서울지역에 적용하여 얻은 MAE=1.58, RMSE=2.09, 상관계수 0.95에 비해 크게 나빠진 결과이다. 하지만 생물계절관측의 특수성을 살펴보면 꼭 나쁜 결과만은 아니다.

벚나무는 장미목-장미과-벚나무속에 속하는 낙엽교



**Fig. 2.** Comparison of the model calculated flowering dates of Japanese cherry with the observed dates at 18 weather stations during 1955-2004.

목 또는 관목의 총칭이다. 하지만 일반적으로 벚나무속 중 자두나무, 복숭아나무, 매화나무, 참옥매화, 귀룽나무 등의 이속을 제외한 벚나무이속의 것을 벚나무라고 한다. 벚나무이속은 벚나무, 왕벚나무, 올벚나무, 개벚나무, 섬벚나무, 꽃벚나무 등 다양한 생태형이 분화되어있어, 흔히 “벚나무”라고 할 때는 이들 중 우리나라가 원산지인 왕벚나무를 지칭한다. 생물계절을 관측하는 기상관서는 반드시 이러한 식물학적 특성을 이해하고 지역간 관측의 표준화를 유지해야 한다. 우리나라 기상청에서도 이를 위해 관서마다 “관측목관리대장”을 비치하고 있지만 근무자 변동, 노장이전 등 사유에 의해 관측목 및 표준화 수준에 대한 정확한 정보를 얻기 어려웠다. 따라서 여러 관서의 자료를 취합하는 본 연구에서는 자료균질성 문제를 피할 수 없으며 모형 검증자료로서 치명적인 결함을 내포할 수도 있다. 근본적으로 생물계절 관측이란 살아있는 수목을 대상으로 하며, 측기가 아닌 관측자의 육안에 의존하므로 표준목 자체의 생태형 혹은 수령 뿐 아니라 관측자의 주관, 관측목 주변의 미기후변화 등 술한 오차요인에 노출되어있다. 이러한 문제점을 감안한다면 이 모형은 지난 50년간 벚꽃 개화기의 전국적인 변이를 상당히 잘 표현했다고 볼 수 있다. 이 모형에 의해 재현된 기간에는 지구온난화 및 도시화에 의한 기후변화가 포함되어 있으므로 기후시나리오와 연계하여 생물계절 측면의 영향평가에 이 모형을 활용하려는 본 연구의 취지에는 부합된다고 할 것이다.

### 3.2. 과거-현재 전국 개화일 분포

1941-1970 및 1971-2000 기간의 평균적인 기온자료에 의해 모형을 구동해서 얻은 벚꽃 개화일을 비교해보면 남한지역 전체 공간평균으로는 현재평년(1971-2000)이 과거평년(1941-1970)에 비해 5.2일 단축되었고, 지역간 변이는 3일 지연에서 12일 단축까지 다양하다. 기상관서의 위치를 기준으로 보면 서대문구 송월동 서울관측소 노장의 벚꽃개화일은 과거평년에는 4월 21일, 현재평년에는 4월 17일로서 평균 개화기 단축일수가 4일이며, 마산기상대 노장은 4월 6일에서 3월 31일로 6일 단축이다. 격자형 자료로부터 서울지역 전체 벚꽃개화일의 공간평균을 구해보면, 과거평년에는 4월 21일, 현재평년에는 4월 16일로 5일 단축되었다. 국내 최대의 벚꽃축제지역인 경남 진해의 벚꽃개화일 공간평균을 보면 과거평년에 4월 13일, 현재평년에는 4월 6일로 7일이 단축되었다(Fig. 3A, 3B, 3C).

### 3.3. 기후시나리오에 따른 미래 개화일 변화

기상연구소의 25 km 해상도 IPCC SRES A2 시나리오 기반 미래 한반도 기온예상도로부터 지형과 도시효과를 감안하여 사방 270 m 간격의 격자점 단위로 개화예상일 분포를 만든 것이 Fig. 3C, 3D, 3E이며, 현재의 개화일 분포와 미래 3시기의 개화일분포 간 차이를 각각 구해 개화일 단축효과의 지역변이를 본 것이 Fig. 3G, 3H, 3I 이다.

이 결과에 따르면 앞으로 30년 이내 가까운 미래(2011-2040)에는 벚꽃 개화기가 지금보다 최소 2일에서 최대 20일까지 평균 9일이 단축된다(Fig. 3D and 3G). 특히 경남 밀양지방의 개화예상일은 대부분 3월 상순 이전이 될 것으로 예상되어 진해, 부산을 제치고 우리나라에서 벚꽃이 가장 일찍 피는 지역이 될 것이다.

지금으로부터 60년이 채 되지 않는 2041-2070 기간에는 지금보다 평균 21일 최대 38일까지 개화시기가 앞당겨지지만, 곳에 따라서는 오히려 5일까지 지연되는 등 벚꽃 개화일의 공간변이가 극심해질 것으로 예상된다(Fig. 3E and 3H). 이 시기에는 소백산맥 이남, 특히 경남지방 대부분과 대구 및 경북 남부는 모두 3월 상순 이전까지 벚꽃의 개화가 완료된다. 하지만 지역 내에서도 산간지대일수록 단축일수가 크고 해안지대에서는 단축일수가 적은 경향이 나타나며, 따뜻해진 겨울에 의해 휴면해제에 실패한 곳은 아예 꽃이 피지 않을 수도 있을 것이다.

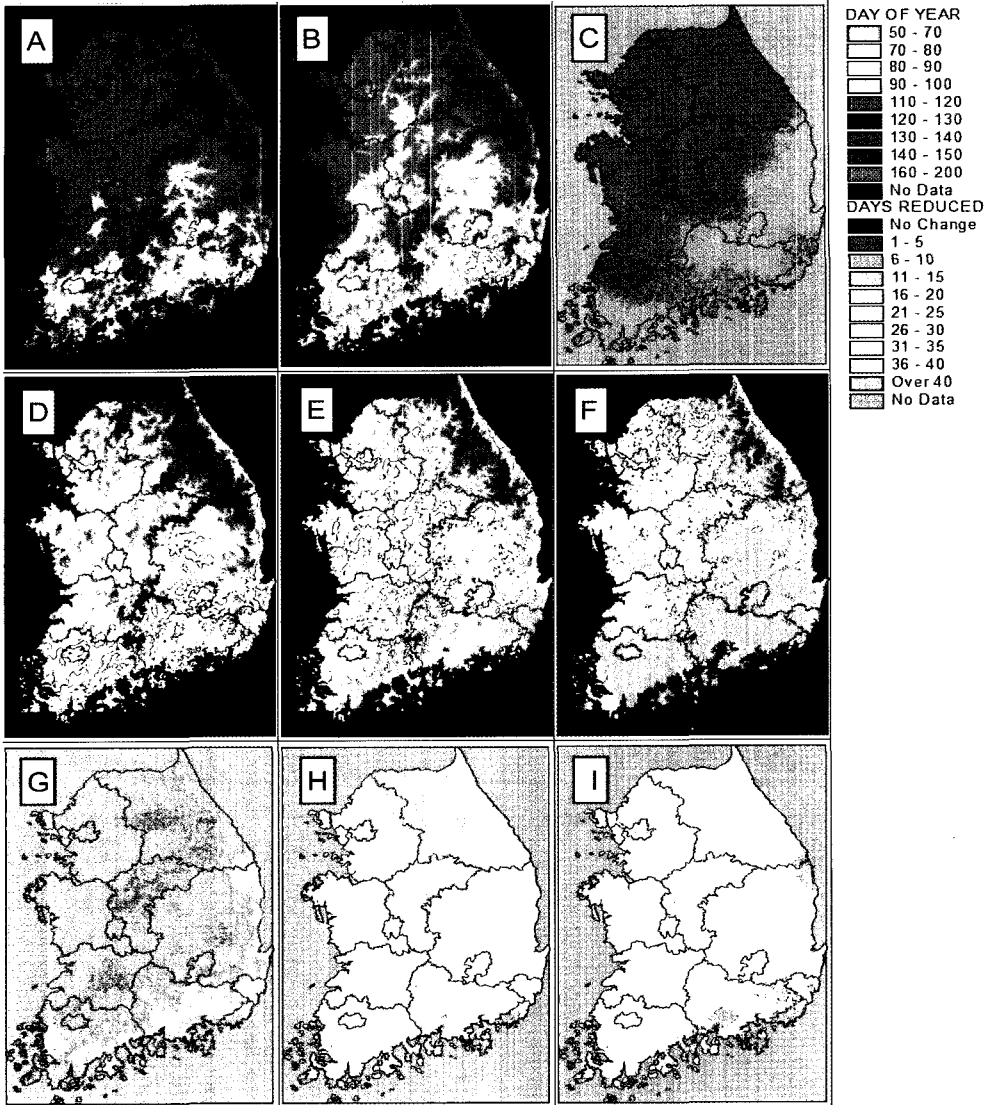


Fig. 3. Geographic distribution of the projected mean flowering dates of Japanese cherry in South Korea for the climatological normal years 1941-1970 (A), 1971-2000 (B), 2011-2040 (D), 2041-2070 (E), and 2071-2100 (F). Changes in flowering dates between (A) and (B), (B) and (C), (B) and (D), and (B) and (E) are shown as panels (C), (G), (H), and (I), respectively.

현재평년(1971-2000) 보다 100년 후인 2071-2100 평년에는 영남뿐 아니라 전남지방 대부분과 경북북부내륙 및 동해안지방에서도 3월 상순 이전에 벚꽃 개화를 볼 수 있다(Fig. 3F and 3I). 전국평균으로는 지금보다 29일이 단축되며 지역에 따라 최소 3일, 최대 48일까지 개화기가 단축되는데, 경북 울진에서 40일 이상 단축되고 서울은 25일 내외, 인천은 30일 이상 단축되어 지금처럼 4월에 벚꽃을 볼 수 있는 지역은 백두대간을 중심으로 하는 고산지대에 국한될 것이다. 이 시기에는

현재의 최대 벚꽃축제지대인 경남 해안지방에서 벚나무의 휴면해제가 불가능해지므로 벚꽃이 아예 피지 않거나 피더라도 불균일한 개화가 될 가능성이 높다.

#### IV. 요약 및 결론

전국 모든 지역에서 서울관측소 표준목과 동일한 수종, 동일한 수령의 벚나무를 가꾼다는 가정 하에 생물계절 이론에 근거한 벚꽃개화모형을 1941-2100 기간

중 5개 기후학적 평년(1941-1970, 1971-2000, 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100)의 도시효과가 보정된 격자형 기후자료에 적용하여 벚꽃개화일을 계산하고 그 공간변이를 파악하였다. 그 결과 남한전역 공간평균으로는 현재평년(1971-2000)이 과거평년(1941-1970)에 비해 5.2일 단축되었고, IPCC SRES A2 시나리오에 근거한 가까운 미래(2011-2040)에는 평균 9일, 2041-2070 기간에는 21일이 단축될 것으로 추정된다. 100년 후인 2071-2100 평년에는 현재보다 29일이 단축되며, 이 때에는 지금처럼 4월에 벚꽃을 볼 수 있는 지역은 백두대간을 중심으로 하는 고산지대에 국한되고, 기존 벚꽃축제지대인 경남 해안지방은 벚나무의 휴면해제가 불가능하여 개화불능 혹은 불균일한 개화가 될 가능성이 높은 것으로 예측된다.

휴면이론에 근거한 개화일 예상은 드문 일이 아니지만 도시효과를 보정한 기후시나리오와의 결합에 의한 시공간변이 예측을 시도한 것은 본 연구가 최초의 사례라 할 것이다. 겨울기온은 생장보다 휴면과 더욱 밀접하므로 특히 겨울기온의 변화가 클 것으로 예상되는 우리나라에서는 앞으로 생물계절관측에 좀더 주의를 기울여야 할 것이며, 예측모형을 잘 다듬는다면 기후변화 적응전략 수립에 크게 기여할 것이다. 기상청에는 벚꽃 외에 개나리, 진달래, 아카시아, 배, 복숭아 등 여러 종류의 식물계절 관측자료가 축적되어 있으므로, 향후 기후변화에 따라 지역적으로 달라지는 개화일 분포를 동일한 접근법에 의해 연구함으로써 중장기적으로 과수재배적지 재편, 봄꽃축제 등 관련 행사의 기획에도 도움이 될 것이다.

## 감사의 글

이 연구는 2005년 경희대학교 교수연구년 지원 및 2006년 기상지진기술개발사업(CATER 2006-4302) 지원에 의해 수행되었다. 기후시나리오를 제공한 기상연구소 기후연구실, 기후/생물계절자료를 제공한 기상청 기상산업진흥과, 격자형기후자료 제작에 도움을 준 경희대 생태정보연구실 연구원 여러분에게 감사드린다.

## REFERENCES

- 권원태, 2004: 기후변화의 과학적 현황과 전망. 환경부-기상청-한국기상학회 공동주관 제2차 기후변화학술대회 초록집 1-4. (2004년 11월 18-19일, 대구).
- 오성도(대표저자), 2004: 과수온도생리. 도서출판 길모금, 364p.
- 한화진(대표저자), 2005: 기후변화 영향평가 및 적응시스템 구축 I. 경제인문사회연구회 협동연구총서 05-20-01, 한국환경정책평가연구원, 383p.
- 허창희, 정수중, 정지훈, 2005: 봄꽃으로 보는 한반도 도시화와 온난화. 한국기후변화협의회체(KPCC) 주관 기후변화 전문가워크숍 초록집 22-25. (2005년 9월 7-8일, 서울)
- 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.
- Choi, J., U. Chung, and J. I. Yun, 2003: Urban effect correction to improve accuracy of spatially interpolated temperature estimates in Korea. *Journal of Applied Meteorology* **42**, 1711-1719.
- Chung, U., J. Choi, and J. I. Yun, 2004: Urbanization effect on the observed change in mean monthly temperatures between 1951-1980 and 1971-2000 in Korea. *Climatic Change* **66**, 127-136.
- Han, Y. H., B. H. Kim, and D. I. Lee, 1993: A study on the urban heat island in Pusan, Korea. *Journal of Korean Meteorological Society* **29**(3), 205-216. (In Korean with English abstract)
- Hansen, J., W. Lawrence, D. Easterling, T. Peterson, T. Karl, R. Ruedy, M. Sato, and M. Imhoff, 2001: A closer look at United States and global surface temperature change. *Journal of Geophysical Research (D: Atmosphere)* **106**(20), 23947-23963.
- 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)
- Karl, T. R., H. F. Diaz, and G. Kukla, 1988: Urbanization: its detection in the United States climate record. *Journal of Climate* **1**, 1099-1123.
- Kwon, E. Y., J. E. Jung, U. Chung, S. J. Lee, G. C. Song, D. G. Choi, and J. I. Yun, 2006: A thermal time-driven dormancy index as a complementary criterion for grapevine freeze risk evaluation. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **8**, 1-9. (In Korean with English abstract)
- Menzel, A., 2002: Phenology: Its importance to the global change community (an editorial comment). *Climatic Change* **54**, 379-385.
- Oke, T. R., 1987: *Boundary Layer Climates (2nd Edition)*, Methuen, 291-292.
- Park, H. S., 1986: Features of the heat island in Seoul and its surrounding cities. *Atmospheric Environment* **20**, 1859-1866.
- Peterson, T. C., A. Huang, D. A. McKittrick, K. P. Gallo, J. Lawrimore, and T. W. Owen, 1999: Global rural temperature trends. *Geophysical Research Letters* **26**(3), 329-332.



- Rho, C. S., 1973: On the rising trend of air temperature in Seoul area. *Journal of Korean Meteorological Society* **9**(2), 49-58. (In Korean with English abstract)
- 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.
- 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)
- Yoon, I. H., K. D. Min, and K. E. Kim, 1994: A study on the meteorological characteristics of Taegu area and its application to the atmospheric dispersion modelling II. Characteristic features of the urban heat island : Case study. *Journal of Korean Meteorological Society* **30**, 303-313. (In Korean with English abstract)