



아까시나무 개화시기예측을 위한 지역별 적산온도 추정모형 비교연구

오성준, 심근섭, 박장현, 최홍민^{1,*}

(주)스마트팜에이전트, ¹농촌진흥청 국립농업과학원 농업생물부

A Comparative Study of Regional Cumulative Temperature Estimation Models for Predicting the Flowering Period of *Robinia pseudoacacia* L.

Sungjun Oh, Keunseob Shim, Janghyun Park and Hongmin Choi^{1,*}

Co. SmartFarmAgent, Anyang 14093, Republic of Korea

¹Department of Agricultural Biology, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Republic of Korea

Abstract

Accurate prediction of *Robinia pseudoacacia* flowering dates is essential for scheduling migratory beekeeping in Korea. Conventional growing degree day (GDD) models accumulate heat units from daily mean temperature, and their regional variation in predictive accuracy has rarely been examined. This study compared daily and hourly GDD accumulation using phenological observations of *R. pseudoacacia* at five Korea Meteorological Administration stations (Baengnyeongdo, Suwon, Hongseong, Yeosu, and Jeju) over nine years (2018~2026), yielding a balanced panel of 45 observations. Flowering and meteorological observations were made at identical sites, eliminating spatial mismatch. Leave-one-year-out cross-validation showed that a base temperature of 5°C minimized prediction error, and that hourly accumulation outperformed daily accumulation for both flowering onset (RMSE 4.22 vs 4.47 days, Wilcoxon $P=0.029$) and full bloom (4.03 vs 4.28 days, $P=0.046$). Prediction error differed significantly among sites (Levene $P=0.027$), ranging from 2.13 days at Hongseong to 6.09 days at Baengnyeongdo; at Baengnyeongdo the GDD model was less accurate than a simple climatological mean. Error magnitude was not explained by island or coastal location alone, as Jeju showed an intermediate error of 3.32 days. These results indicate that hourly accumulation should be preferred when sub-daily temperature data are available, and that operational flowering forecasts should be accompanied by site-specific error ranges.

Keywords

Robinia pseudoacacia, Growing degree days, Flowering prediction, Cross-validation, Migratory beekeeping

서론

아까시나무(*Robinia pseudoacacia* L.)의 개화 조건은 벌꿀 생산량을 좌우하는 주요 환경 요인으로 보고된 바 있다(Kim *et al.*, 2021a). 아까시나무는 국내 벌꿀 생산량의 상당 부분을 차지하는 대표적 밀원수로, 개화시기 예측은

이동양봉 일정 수립과 채밀량 확보에 직결되는 실무적 과제이다(Kim *et al.*, 2021b).

최근 봄철 기온 상승에 따라 아까시나무의 개화시기가 앞당겨지고 있는 것으로 보고되면서(Kim *et al.*, 2021c), 정확도 높은 개화 예측 정보에 대한 수요가 커지고 있다. 이러한 개화 조기화는 아까시나무에 국한되지 않으며,

국내 사과를 비롯한 여러 수종에서 확인되고(Cho *et al.*, 2021), 기후변화 시나리오 하에서 추가적인 개화 시기 이동이 예측되고 있다(Lee *et al.*, 2020). 기상청은 1920년대부터 아까시나무를 포함한 7개 목본종의 개화일을 관측해 왔으며, 이 자료는 아시아 최장 기간의 생물계절 관측 기록으로 평가된다(Pearse *et al.*, 2023).

아까시나무의 개화 시기와 기상 조건의 관계는 국내외에서 오래 연구되어 왔다. 국내에서는 개화기 예측과 다밀성 개체 선발이 1990년대부터 시도되었고(Son *et al.*, 1999), 국외에서는 헝가리 장기 관측 자료에서 봄철 평균기온과 연동된 3~8일의 개화 조기화가 보고되었다(Walkovszky, 1998). 최근 이탈리아 피에몬테에서는 1981년부터 2025년까지의 아까시나무 개화 시계열을 분석하여 개화가 연평균 약 0.5일씩 앞당겨졌으며, 봄철 최고기온 지수 1°C 상승이 개화를 약 4.5일 앞당기는 것으로 보고되었다(Carbonari and Epifani, 2026).

최근 아까시나무 개화 예측에는 적산온도(growing degree days, GDD) 기반의 과정기반모형이 널리 이용되어 왔다(Kim *et al.*, 2021c). 해당 연구에서는 전국 26개 지점에서 2006년부터 2017년까지 관측된 아까시나무 만개일과 일기온 자료를 이용하여, 전국에 단일 모수를 적용하는 통합 모형, 통합 모형에 지점별 보정계수를 더한 모형, 그리고 지점마다 모수를 따로 추정한 국지 모형의 예측 성능을 비교하였다. 그 결과 지점별 보정계수를 도입한 모형과 국지 모형이 단일 통합 모형보다 각각 24%와 15% 낮은 RMSE를 보였다. 이는 동일한 적산온도 모형이라도 지역에 따라 예측 정확도가 크게 달라지며, 전국 단일 모수를 일괄 적용할 경우 특정 지역에서 상당한 오차가 발생함을 의미한다. 다만 이 연구는 일기온 자료를 이용하였고, 지역별 오차의 크기와 그 원인을 개별 지점 단위로 제시하지는 않았다. 또 다른 연구에서는 27개 기상·지리 변수와 머신러닝 회귀모형을 이용하여 5개 지역의 개화 및 낙화일을 예측하였으며, 지역마다 최적 모형과 변수 중요도가 서로 달라 단일 통합 모형으로는 지역 간 변이를 충분히 설명하기 어렵다고 보고하였다(Oh *et al.*, 2025). 국외에서도 다수의 계절 열지수를 이용한 아까시나무 개화 예측모형이 평균절대오차 약 5일 수준에 머물러, 주간 단위 이상의 정밀도를 확보하기 어렵다고 보고되었다(Carbonari and Epifani, 2026). 이러한 선행 연구들은 공통적으로, 기온·강수·일사·지형 등 기존에 사용

된 환경변수를 확장하는 방식만으로는 지역별 개화시기의 변이를 부분적으로만 설명하며 예측오차를 실무적으로 유의미한 수준까지 줄이지 못했음을 보여준다. 즉 변수의 종류를 늘리는 접근과는 별개로, 이미 사용 중인 기온 변수를 어떤 시간 해상도로 처리하는가, 그리고 도출된 모형의 정확도가 지역에 따라 어떻게 달라지는가에 대한 검토가 필요하다. 그러나 기존 연구는 대부분 일평균 기온 또는 일최고·최저기온을 이용하여 적산온도를 산출하였다. 적산온도의 정확도는 온도 자료의 시간 해상도에 좌우되며, 시간별 기온 자료를 이용한 적산이 가장 정확하다는 점은 이미 알려져 있다(Cesaraccio *et al.*, 2001). 일평균기온을 이용하면 하루 중 기온 변동이 평활화되어, 일교차가 큰 지역과 작은 지역에서 동일한 일평균값이 서로 다른 실제 열 축적을 의미하게 된다. 특히 온대 수목의 잎 전개와 개화가 야간기온보다 주간기온에 더 강하게 반응한다는 보고를 고려하면, 일평균기온 기반 적산은 체계적 편의를 가질 수 있다(Piao *et al.*, 2015; Fu *et al.*, 2016).

국내에서는 기상청 종관기상관측(ASOS)을 통해 시간 단위 기온 자료가 공개되고 있음에도, 이를 아까시나무 개화 예측에 적용하여 일단위 적산과 직접 비교한 연구는 찾기 어렵다. 또한 예측 정확도가 지역에 따라 어떻게 달라지는지, 그리고 어떤 지역에서 적산온도 모형의 적용이 제한되는지에 대한 정량적 평가도 부족하다.

이에 본 연구는 다음 세 가지를 목적으로 하였다. 첫째, 아까시나무 개화 예측을 위한 적산온도 모형의 최적 기준온도와 적산방식을 교차검증을 통해 결정한다. 둘째, 도출된 모형의 예측 정확도가 지역에 따라 어떻게 달라지는지 평가하고, 이동양봉 실무에 활용 가능한 지역별 오차 정보를 제시한다. 셋째, 지점 간 예측오차 차이와 관련될 수 있는 기상 요인을 탐색적으로 검토한다.

재료 및 방법

1. 조사 지점 및 개화 자료

본 연구는 기상청 기상자료개방포털의 계절관측 자료 중 아까시나무의 개화일과 만발일을 이용하였다. 기상청 계절관측지침에 따르면 개화일은 한 나무의 임의의 한 가지에 세 송이 이상 꽃이 활짝 핀 날, 만발일은 한 나무에서 80% 이상 꽃이 활짝 핀 날로 정의된다. 본 연구는 자료의

Table 1. Spring meteorological conditions at the five study sites (means for 2018~2026)

Site	Station ID	Mean temp. (°C)	Daily max. (°C)	Daily min. (°C)	Diurnal range (°C)	Daytime temp. (°C)	Nighttime temp. (°C)	Solar radiation (MJ m ⁻² day ⁻¹)	Precipitation (mm)
Baengnyeongdo	102	10.14	13.35	7.43	5.92	11.48	8.87	19.59	156.7
Jeju	184	15.35	18.89	12.20	6.69	16.93	13.83	17.59	240.6
Yeosu	168	14.22	18.02	10.95	7.07	15.82	12.62	17.93	371.6
Suwon	119	12.77	18.57	7.53	11.04	15.70	9.90	18.04	204.8
Hongseong	177	12.67	18.47	7.10	11.38	15.64	9.76	18.54	208.1

*Values are means for 2 March~1 June (92 days). Daytime is defined as 08:00~18:00 and nighttime as 20:00 of the preceding day to 07:00. Precipitation is the annual mean of the seasonal total. Solar radiation at Baengnyeongdo excludes March~April 2018, when radiation was not measured.

일관성을 위해 기상청 계절관측지침의 정의를 그대로 따랐다.

조사 지점은 백령도(지점번호 102), 수원(119), 홍성(177), 여수(168), 제주(184) 5개 지점이다. 지점 선정은 별도의 지리적 기준을 적용한 것이 아니라, 기상청 계절관측 지점 가운데 아까시나무의 개화일과 만발일이 분석 기간 전 연도에 걸쳐 결측 없이 관측된 지점을 모두 선정한 결과이다. 그 결과 위도 33.5°N(제주)에서 38.0°N(백령도)에 이르는 범위와 내륙·연안·도서 입지가 함께 포함되었다.

제주는 기상청 계절관측 지점으로 아까시나무 표준목이 지정되어 있어 다른 지점과 동일한 관측지침에 따라 개화일과 만발일이 기록된다. 다만 제주의 아까시나무 임분 규모와 분포는 내륙 지점과 차이가 있을 수 있으므로, 관측지 대표성의 문제는 고찰에서 별도로 다루었다.

조사 기간은 2018년부터 2026년까지 9개년으로 하였다. 2017년 이전에는 일부 지점에서 개화 또는 만발 관측이 이루어지지 않아 지점 간 자료 기간이 서로 달랐으며, 전 지점의 자료가 모두 존재하는 첫 해가 2018년이었다. 이에 따라 5개 지점×9개년, 총 45개 관측치를 구성하였다.

본 연구에서 균형패널(balanced panel)이란 모든 지점이 모든 연도에 대해 결측 없이 동일한 개수의 관측치를 갖는 자료 구조를 말한다. 지점마다 관측 연도가 다르면 특정 지점이 특정 연도에만 반영되어 지점 효과와 연도 효과가 뒤섞이고, 임계 적산량 산출과 지점 간 오차 비교가 편향될 수 있다. 균형패널을 구성함으로써 이러한 편향을 배제하였다.

계절관측은 기상관서 구내의 표준목을 대상으로 수행

되므로, 개화 관측과 기상 관측이 동일 지점에서 이루어진다. 이에 따라 선행 연구에서 오차 요인으로 지적되어 온 관측지와 기상관측소 간 공간적 불일치가 본 연구에서는 발생하지 않는다.

본 연구의 예측 대상은 개화시작일과 만발일 두 가지이다. 기준온도와 적산방식의 최적 조건 결정(결과 2, 3절)에서는 두 지표를 각각 독립적으로 분석하여 결과를 병기하였다. 반면 지점별 예측 정확도와 오차 요인 분석(결과 4, 5절)은 개화시작일만을 대상으로 하였으며, 이는 만발일이 개화시작일 이후의 진행 속도에 따라 추가적인 변이를 포함하여 지점 간 비교의 해석을 복잡하게 하기 때문이다. 각 표와 그림의 예측 대상은 제목 또는 각주에 명시하였다.

2. 기상 자료 및 전처리

기상 자료는 동일 5개 지점의 종관기상관측(ASOS) 시간자료를 이용하였으며, 기간은 매년 3월 1일 00시부터 6월 30일 23시까지로 하였다(지점당 연간 2,928시간, 총 131,760시간). 6월 말까지 자료를 확보한 것은 백령도의 만발일이 9년 중 8년에서 6월에 관측되었기 때문이다.

수집한 기상요소는 기온, 강수량, 풍속, 일사량이다. 이 가운데 적산온도 산출과 예측모형에 실제로 이용한 변수는 기온뿐이며, 강수량·풍속·일사량은 조사 지점의 기상 특성을 기술하기 위한 요약통계(Table 1)로만 제시하였고 어떠한 예측모형이나 통계 검정의 변수로도 사용하지 않았다. 기온 3건과 풍속 16건의 결측치는 관측 장비의 일시적 결측에 해당하므로 선형보간법으로 대체하였다. 반면 강수량과 일사량의 무기록 시각은 관측 실패에 따른 결측이 아니라, 강수가 없는 시각과 일사가 없는 야간 시각에

값을 기록하지 않는 기상청 자료 제공 방식에 따른 것이다. 따라서 해당 시각의 실제 관측값은 0에 해당하므로 0으로 처리하였다. 개화일과 만발일은 윤년에 따른 연중일수(day of year)의 편차를 배제하기 위해 각 연도 3월 1일부터의 경과일수로 환산하였다.

지점 간 예측오차 차이의 요인을 탐색하기 위한 지표로 야간 저온 노출시간을 산출하였다. 야간은 전일 20시부터 당일 07시까지의 12시간으로 정의하였으며, 이는 일 최저기온이 주로 새벽에 나타나 하나의 복사냉각 주기가 자정에서 분할되지 않도록 하기 위함이다. 각 날짜에 대해 해당 야간 12시간 중 기온이 5°C 미만이었던 시간의 개수(0~12시간)를 세어 일별 야간 저온 노출시간으로 정의하였다. 임계값 5°C는 적산온도의 기준온도와 동일하게 설정하여 두 지표의 기준을 통일하였다.

지점·연도별 지표는 3월 2일부터 4월 1일까지 31일간의 일별 야간 저온 노출시간을 평균한 값(단위: 시간/야)으로 산출하였다. 3월 1일은 전일 20~23시 자료가 관측 기간에 포함되지 않아 야간 12시간이 완전하지 않으므로 제외하였다. 산출 구간을 개화 직전이 아닌 이른 봄으로 한정된 것은, 예측일이 지점·연도마다 달라 구간 길이가 달라지면 지표가 구간 길이에 비례하는 문제가 발생하기 때문이다.

3. 적산온도 산출모형

적산 시작일은 3월 1일로 설정하였다. 이는 다음 세 가지를 고려한 것이다. 첫째, 국내 아까시나무 개화 예측 연구에서 3월을 적산 시작점으로 삼아 온 관행을 따랐다. 둘째, 시작일을 3월 15일, 4월 1일, 4월 15일로 늦추어 예측 성능을 비교한 결과 교차검증 RMSE가 각각 4.84일, 6.71일, 8.61일로 증가하여 3월 1일에서 가장 낮았다(3월 1일 기준 4.22일). 이는 3월 초순의 기온이 개화 예측에 유효한 정보를 포함함을 의미한다. 셋째, 본 연구에서 이용한 기상 자료가 매년 3월 1일부터 확보되어 있어 그 이전 시점을 시작일로 설정할 수 없었다.

다만 최근 겨울철 기온 상승으로 1~2월에도 기준온도를 상회하는 시각이 나타날 수 있으므로, 적산 시작일을 겨울철까지 앞당길 경우의 예측 성능은 본 연구에서 검토하지 못하였다. 겨울철 기온의 적산은 저온요구도(chilling requirement)의 문제와 분리하기 어려우며, 국내

연구에서 저온-가온 순차모형이 단순 가온 모형보다 우수하지 않았다는 보고가 있어(Kim *et al.*, 2022) 본 연구에서는 다루지 않았다. 이는 연구의 한계에 기술하였다. 적산온도는 3월 1일을 적산 시작일로 하여 다음 두 방식으로 산출하였다.

일단위 적산(daily accumulation)

$$GDD_{daily}(D) = \sum_{d=1}^D \max(0, T_{mean,d} - T_b) \quad (1)$$

시간단위 적산(hourly accumulation)

$$GDD_{hourly}(D) = \sum_{d=1}^D \frac{1}{24} \sum_{h=1}^{24} \max(0, T_{d,h} - T_b) \quad (2)$$

여기서 D 는 3월 1일부터의 경과일 수, $T_{mean,d}$ 는 d 일의 일 평균기온, $T_{d,h}$ 는 d 일 h 시의 기온, T_b 는 기준온도이다. 시간단위 적산에서 24로 나누는 것은 시간 단위 적산량을 일 단위 적도로 환산하여 두 방식의 크기를 직접 비교할 수 있도록 하기 위함이다. 기준온도는 0°C부터 10°C까지 2.5°C 간격으로 변화시키며 예측 성능을 비교하였다. 개화 임계 적산량 F^* 는 관측된 개화일(또는 만발일) 시점의 누적 적산온도 평균으로 정의하였다.

$$F^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n GDD(D_i^{obs}) \quad (3)$$

예측일 $\hat{D}$ 는 누적 적산온도가 F^* 에 처음 도달하는 날로 정의하였다.

$$\hat{D} = \min\{D: GDD(D) \geq F^*\} \quad (4)$$

여기서 D_i^{obs} 는 i 번째 관측치의 실제 개화일(3월 1일부터의 경과일 수), n 은 관측치 수이다.

이하에서 예측오차(prediction error)는 예측일에서 관측일을 뺀 값으로, 예측 잔차(prediction residual)는 관측일에서 예측일을 뺀 값으로 정의한다. 두 값은 부호가 반대이며, 잔차가 양수인 경우는 적산온도 모형의 예측보다 실제 개화가 늦었음을 의미한다. RMSE와 MAE는 예측오차를 기준으로 산출하였고, 지점 간 오차 차이의 요인 분석에는 해석의 편의를 위해 예측 잔차를 사용하였다.

4. 성능 평가

학습에 사용되지 않은 연도에 대한 예측 성능과 연도

Table 2. Flowering onset and full bloom of *Robinia pseudoacacia* at the five study sites (2018~2026)

Site	Mean flowering onset	Range	SD (days)	Mean full bloom	SD (days)	Onset to full bloom (days)
Jeju	23 Apr	15 Apr~30 Apr	4.7	28 Apr	4.3	4.6
Yeosu	29 Apr	21 Apr~6 May	5.2	4 May	4.7	5.8
Suwon	7 May	30 Apr~13 May	4.5	11 May	4.7	4.3
Hongseong	9 May	4 May~13 May	2.6	13 May	2.4	3.9
Baengnyeongdo	26 May	19 May~5 Jun	4.8	4 Jun	4.1	8.4

*Sites are ordered by mean flowering onset. SD, standard deviation across the nine years.

간 기상 변이에 대한 일반화 성능을 평가하기 위해 연도별 교차검증 (leave-one-year-out cross-validation)을 적용하였다. 특정 연도를 제외한 8개년 자료로 임계 적산량 F^* 를 산출한 뒤 제외된 연도의 개화일을 예측하는 과정을 9개 연도에 대해 반복하여, 모든 예측치가 해당 연도의 관측을 포함하지 않은 상태에서 산출된 총 45건의 예측오차를 얻었다.

다만 연도별 교차검증은 특정 연도를 예측할 때 그 이후 연도의 자료가 임계 적산량 산출에 포함되므로, 미래 자료를 이용할 수 없는 실제 운용 상황과는 차이가 있다. 이를 확인하기 위해 검증 연도 이전의 자료만을 이용하는 전향적 검증 (prospective validation)을 병행하였다. 초기 4개년 (2018~2021년)으로 임계 적산량을 산출하여 2022년을 예측하고, 이후 연도를 순차적으로 학습 자료에 추가하며 2026년까지 예측하는 방식으로 총 25건의 예측오차를 얻었다.

비교 기준으로는 각 지점의 나머지 8개년 평균 개화일을 그대로 예측값으로 사용하는 평년값 예측 (climatological mean)을 함께 평가하였다. 이는 적산온도 모형이 단순한 평년 개화일 예측보다 실질적인 성능 향상을 제공하는지를 판단하기 위한 것으로, 교차검증 분할은 적산온도 모형과 동일하게 적용하였다. 성능 지표는 평균제곱근오차 (root mean square error, RMSE)와 평균절대오차 (mean absolute error, MAE)를 사용하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{D}_i - D_i^{obs})^2} \quad (5)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(\hat{D}_i - D_i^{obs})| \quad (6)$$

여기서 $\hat{D}_i$ 는 교차검증으로 산출한 예측일, D_i^{obs} 는 관측일이며 단위는 일 (day)이다. 본 연구의 모형 비교는 두 단계로 수행하였다. 먼저 일단위 적산과 시간단위 적산 각각에 대해 기준온도를 0°C부터 10°C까지 변화시키며 교차검증 예측오차를 산출하고, 두 방식 모두에서 개화시작일의 오차가 최소가 되는 기준온도를 확인하였다 (Table 3). 이어서 그 기준온도 (5°C)를 고정한 상태에서 일단위 적산 모형과 시간단위 적산 모형의 예측오차를 짝지어 비교하였다. 즉 모형 간 비교란 동일한 기준온도·동일한 적산 시작일·동일한 교차검증 분할 하에서 적산 시간 해상도만 다른 두 모형의 비교를 의미한다.

두 모형의 예측오차 차이는 동일 지점·동일 연도의 절대예측오차 (absolute error) 쌍에 대해 Wilcoxon 부호순위 검정을 적용하여 평가하였다. 부호오차 (signed error)가 아닌 절대오차를 사용한 것은 예측이 이르거나 늦은 방향이 아니라 오차의 크기를 비교하는 것이 목적이기 때문이다. 동일 검정을 적산온도 모형과 평년값 예측의 절대예측오차 비교에도 적용하였다. Levene 검정은 기준온도 5°C·시간단위 적산 모형에서 개화시작일에 대해 산출된 교차검증 부호예측오차 45건을 지점별 5개 집단으로 나누어 집단 간 오차 분산의 동질성을 검정한 것이다.

지점별 평균 일교차와 예측오차의 관계는 Pearson 적률 상관계수로 평가하였다 (지점 수 $n=5$). 또한 지점 간 오차 차이의 요인을 탐색하기 위해, 예측 잔차를 종속변수로 하고 3월 야간 저온 노출시간을 설명변수로 하되 지점과 연도를 더미변수로 통제한 최소제곱회귀를 적용하였다 ($n=45$).

이 관계가 예측 성능 개선으로 이어지는지를 확인하기 위해 야간 저온 보정모형을 별도로 평가하였다. 보정모형은 각 지점 내에서 중심화한 야간 저온 노출시간을 설명

Table 3. Cross-validated prediction performance by base temperature and accumulation method (flowering onset and full bloom)

(A) Flowering onset

Base temp. (°C)	Daily RMSE (days)	Daily MAE (days)	Hourly RMSE (days)	Hourly MAE (days)
0.0	5.25	3.78	5.20	3.71
2.5	4.55	3.47	4.57	3.38
5.0	4.47	3.44	4.22	3.13
7.5	4.56	3.47	4.31	3.09
10.0	4.96	3.69	4.89	3.56

(B) Full bloom

Base temp. (°C)	Daily RMSE (days)	Daily MAE (days)	Hourly RMSE (days)	Hourly MAE (days)
0.0	5.73	4.42	5.77	4.42
2.5	4.86	3.84	4.84	3.78
5.0	4.28	3.38	4.03	3.11
7.5	4.13	3.16	3.63	2.82
10.0	4.27	3.29	3.87	3.04

Direct comparison of accumulation methods ($T_b = 5^\circ\text{C}$)

Target	Daily F^*	Daily RMSE (days)	Hourly F^*	Hourly RMSE (days)	Wilcoxon P
Flowering onset	413.0	4.47	425.6	4.22	0.029
Full bloom	475.3	4.28	487.9	4.03	0.046

*Errors were obtained by leave-one-year-out cross-validation ($n=45$ for each target). Bold indicates the minimum value in each column block. F^* , mean accumulated growing degree days at the observed date. P values are from Wilcoxon signed-rank tests on paired absolute prediction errors. For full bloom, the difference between base temperatures of 5.0°C and 7.5°C was not significant (Wilcoxon $P=0.236$, hourly accumulation).

변수로 하여 예측 잔차를 회귀한 뒤, 추정된 값을 적산온도 모형의 예측일에 더하여 보정 예측일을 산출하는 방식이다. 지점 내 편차를 사용한 것은 지점 간 평균 차이가 지점 효과로 흡수되어 보정항이 이를 중복 반영하는 것을 피하기 위함이다. 보정모형의 회귀계수는 검증 연도를 제외한 8개년 자료로만 추정하였으며, 적산온도 모형과 동일한 연도별 교차검증 분할을 적용하여 보정 전후의 예측 오차를 비교하였다. 모든 분석은 Python 3을 이용하여 수행하였다.

결 과

1. 조사 지점의 기상 및 개화 특성

조사 지점의 봄철 기상 개황과 개화 특성은 Tables 1, 2와 같다. Table 1의 기상 통계는 모두 2018~2026년의 3월 2일부터 6월 1일까지 92일간을 대상으로 산출한 9개

년 평균이다. 이 기간의 평균 일교차는 홍성 11.38°C 와 수원 11.04°C 에서 크고, 여수 7.07°C , 제주 6.69°C , 백령도 5.92°C 에서 작아 내륙 지점과 도서·연안 지점 간에 뚜렷한 차이를 보였다.

평균 개화일은 제주 4월 23일, 여수 4월 29일, 수원 5월 7일, 홍성 5월 9일, 백령도 5월 26일 순이었다. 개화는 대체로 저위도에서 고위도 순으로 진행되었으나 위도만으로 설명되지 않는 차이도 확인되었다. 백령도는 수원보다 위도가 0.71° 높을 뿐이나 개화는 19.7일 늦었고, 위도가 더 낮은 홍성이 수원보다 2일 늦게 개화하였다.

개화에서 만발까지의 소요일수는 홍성 3.9일, 수원 4.3일, 제주 4.6일, 여수 5.8일, 백령도 8.4일이었다.

2. 기준온도 및 적산방식의 최적 조건

기준온도별 교차검증 예측오차는 Table 3 및 Fig. 1의 (A)와 같다. 개화시작일을 대상으로 하였을 때 일단위와 시간단위 적산 모두 기준온도 5°C 에서 예측오차가 최소

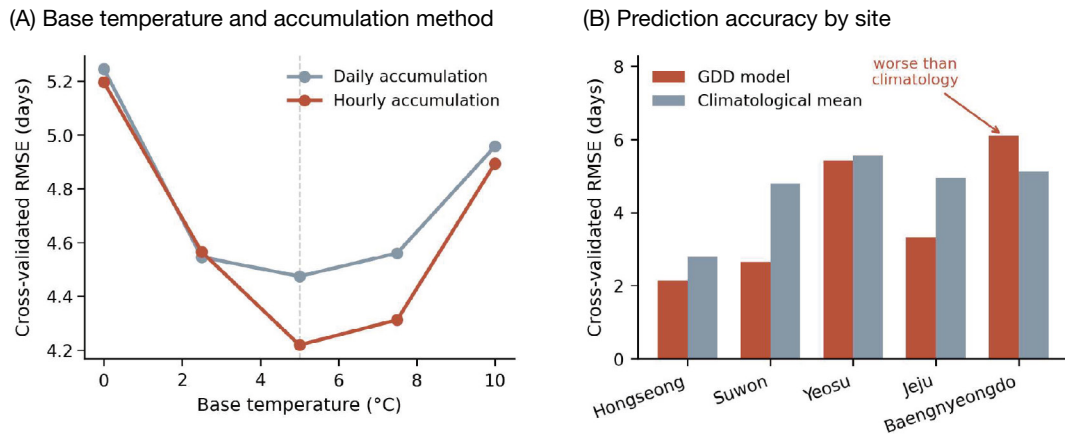


Fig. 1. Cross-validated prediction performance of the growing degree day (GDD) model for flowering onset of *Robinia pseudoacacia* at five sites in Korea (2018~2026). (A) Root mean square error (RMSE) as a function of base temperature for daily and hourly accumulation. (B) RMSE of the GDD model (base temperature 5°C, hourly accumulation) compared with a site-specific climatological mean, by site. Sites are ordered by mean diurnal temperature range.

였다. 만발일을 대상으로 한 경우에는 두 방식 모두 7.5°C에서 오차가 가장 낮았으나, 5°C와 7.5°C의 절대예측오차 차이는 통계적으로 유의하지 않았다(시간단위 적산 기준 Wilcoxon $P=0.236$).

국내 아까시나무 개화 예측 연구에서는 일평균기온 5°C를 기준온도로 적용해 온 사례가 보고되어 있으나(Oh *et al.*, 2025), 이는 여러 기준온도를 비교한 모형 평가를 거쳐 선정된 값이라기보다 관행적으로 채택되어 온 값에 가깝다. 본 연구는 0~10°C 범위에서 기준온도를 변화시키며 교차검증 성능을 비교함으로써 이 값을 처음으로 검증하였으며, 개화시작일 예측에서 5°C가 최적임을 확인하였다. 이에 따라 두 개화 단계에 동일한 기준온도를 적용하여 결과의 비교 가능성을 확보하고자 이후 분석에서는 5°C를 사용하였다.

기준온도 5°C에서 개화 임계 적산량은 시간단위 적산 시 $F^*=425.6$ (SD 44.0, CV 10.3%), 일단위 적산 시 413.0 (SD 46.5, CV 11.3%)이었다. 만발일 기준으로는 각각 487.9와 475.3이었다.

3. 시간단위 적산과 일단위 적산의 비교

기준온도 5°C에서 두 적산방식의 예측오차를 직접 비교한 결과, 시간단위 적산이 개화시작일과 만발일 모두에서 유의하게 우수하였다(Table 3).

개화시작일의 RMSE는 시간단위 적산 4.22일, 일단위

적산 4.47일이었고(Wilcoxon $P=0.029$), 만발일의 RMSE는 각각 4.03일과 4.28일이었다(Wilcoxon $P=0.046$).

개선폭은 0.25일 수준으로 크지 않으나, 두 개화 단계에서 일관되게 재현되었다. 또한 개화 임계 적산량의 변동계수(CV)도 시간단위 적산에서 더 작아(10.3% vs 11.3%), 시간단위 적산이 개화 시점의 열 요구량을 보다 안정적으로 표현함을 시사한다.

미래 자료의 포함 여부가 결과에 미치는 영향을 확인하기 위해 전향적 검증을 병행한 결과, 시간단위 적산의 예측오차는 3.58일로 동일 대상에 대한 연도별 교차검증 결과(3.56일)와 차이가 없었다(Wilcoxon $P=1.000$). 전향적 검증에서도 시간단위 적산이 일단위 적산(3.98일)보다 유의하게 우수하였다(Wilcoxon $P=0.007$). 따라서 본 연구의 결론은 검증 방식의 선택에 영향을 받지 않는다.

4. 지역별 예측 정확도

이하의 지점별 결과는 모두 본 연구가 최종적으로 제안하는 모형, 즉 기준온도 5°C·시간단위 적산·3월 1일 적산 시작 조건에서 개화시작일을 대상으로 산출한 교차검증 예측오차에 근거한다. 예측오차는 지점에 따라 크게 달랐으며, 교차검증 오차에 대한 등분산 검정 결과 유의한 차이가 확인되었다(Levene $P=0.027$). 지점별 성능은 Table 4 및 Fig. 1의 (B)와 같다.

예측오차는 홍성 2.13일, 수원 2.65일, 제주 3.32일, 여

Table 4. Prediction accuracy by site for flowering onset ($T_b = 5^\circ\text{C}$, hourly accumulation, cross-validated)

Site	Mean diurnal range ($^\circ\text{C}$)	GDD model RMSE (days)	Climatological mean RMSE (days)	Difference (days)
Hongseong	11.38	2.13	2.78	+0.64
Suwon	11.04	2.65	4.80	+2.16
Yeosu	7.07	5.42	5.56	+0.15
Jeju	6.69	3.32	4.94	+1.62
Baengnyeongdo	5.92	6.09	5.11	-0.98
All sites	-	4.22	4.74	+0.52 ($P=0.178$)

*Sites are ordered by decreasing mean diurnal temperature range. A positive difference indicates that the GDD model outperformed the climatological mean. Levene's test indicated significant heterogeneity of cross-validated error variance among sites ($P=0.027$).

수 5.42일, 백령도 6.09일로 지점 간 최대 약 2.9배의 차이를 보였다. 일교차가 큰 내륙 지점인 홍성과 수원에서 오차가 2~3일 수준이었던 반면, 백령도와 여수에서는 5~6일에 이르렀다. 특히 백령도에서는 적산온도 모형의 예측오차(6.09일)가 평년값 예측(5.11일)보다 컸다.

다만 제주는 일교차가 6.69°C 로 작은 편임에도 예측오차가 3.32일로 중간 수준이었고 평년값 대비 개선폭도 1.62일로 컸다. 따라서 예측오차의 크기가 도서·연안 여부만으로 설명되지는 않았다.

전체 45건 기준으로는 적산온도 모형이 평년값보다 낮은 오차를 보였으나(4.22일 vs 4.74일), 그 차이는 통계적으로 유의하지 않았다(Wilcoxon $P=0.178$).

평균 일교차와 예측오차 사이에는 음의 관계가 관찰되었다(교차검증 RMSE 기준 $r = -0.84$, $P=0.078$; 전체표본 잔차의 표준편차 기준 $r = -0.88$, $P=0.047$) (Fig. 3의 (B)). 그러나 지점 수가 5개에 불과하여 두 지표가 상반된 유의성 판정을 보였고, 제주가 이 경향에서 벗어나 있어 확정적 결론으로 보기는 어렵다.

5. 3월 야간 저온과 예측 잔차의 관계(탐색적 분석)

지역별 예측오차 차이의 요인을 탐색하기 위해, 3월 중 야간(전일 20시~당일 07시) 기온이 5°C 미만이었던 시간수와 예측 잔차의 관계를 분석하였다. 임계온도 5°C 는 적산온도의 기준온도와 동일하게 설정하여 두 지표의 기준을 통일한 것이다. 지역 및 연도 효과를 통제한 회귀분석 결과 유의한 음의 관계가 나타났다($\beta = -3.62$ 일/시간, $P=0.0005$, Fig. 2). 즉 3월 야간 저온 노출이 많았던 해에는 적산온도 모형의 예측보다 개화가 앞당겨졌다.

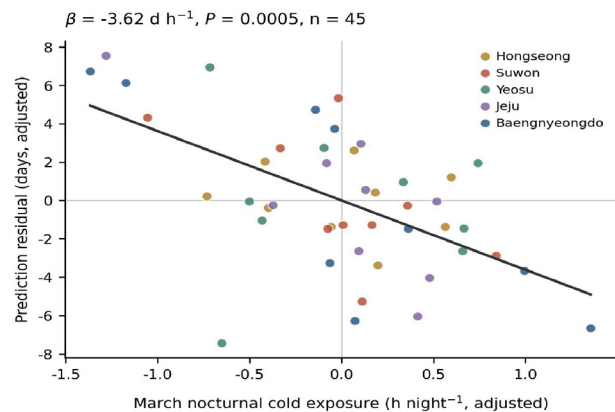


Fig. 2. Partial regression of the GDD prediction residual on March nocturnal cold exposure (hours below 5°C per night, 20:00~07:00), with site and year effects removed. Positive residuals indicate later flowering than predicted (flowering onset, $T_b = 5^\circ\text{C}$, hourly accumulation).

그러나 지점별로 분리하여 분석한 결과 이 관계는 백령도에서만 뚜렷하였고($\beta = -4.55$, $P=0.0001$), 나머지 4개 지점에서는 유의하지 않았으며 제주에서는 부호가 반대였다(Fig. 3의 (A)). 백령도를 제외하면 전체 모형에서도 유의성이 소실되었다($P=0.087$). 또한 이 항을 보정한 예측모형은 교차검증에서 일관된 성능 개선을 보이지 않았다. 전체 45건 기준 RMSE는 4.13일에서 3.86일로 감소하였으나, 이는 백령도 한 지점의 개선(5.99일 → 3.70일)에 의한 것으로 제주·홍성·여수에서는 오히려 악화되었다. 따라서 보정항의 일반적 적용은 정당화되지 않는다. 임계온도를 0°C , 2.5°C , 7.5°C , 10°C 로 변화시켜 동일한 분석을 수행한 결과, 0°C 와 2.5°C 에서는 회귀계수의 부호가 같았으나 통계적으로 유의하지 않았고(각각 $P=0.165$, 0.108), 7.5°C 이상에서는 부호가 반대로 나타났다. 즉 관

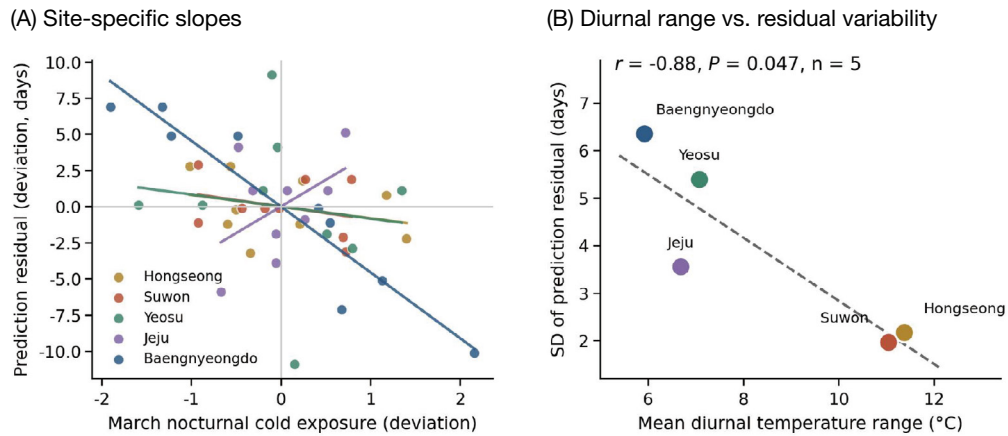


Fig. 3. Site-level heterogeneity in prediction error. (A) Site-specific regression slopes of the prediction residual on March nocturnal cold exposure, expressed as deviations from each site mean. (B) Relationship between the mean diurnal temperature range and the standard deviation of the prediction residual. All panels refer to flowering onset ($T_b = 5^\circ\text{C}$, hourly accumulation).

찰된 관계는 5°C 임계값에 국한된 것으로, 이 역시 본 소견을 탐색적 결과로 제시하는 근거가 된다. 따라서 본 결과는 확정적 결론이 아닌 탐색적 소견으로 제시한다.

고찰

1. 시간단위 적산의 의의

시간별 기온 자료를 이용한 적산이 일평균기온 기반 적산보다 정확하다는 점은 국외 연구에서 이미 지적되어 왔다(Cesaraccio *et al.*, 2001). 그러나 시간 자료를 확보하기 어려운 경우가 많아, 실제로는 일최고·최저기온으로부터 일변화를 근사하는 방법이 널리 사용되어 왔다.

본 연구는 국내 아까시나무 개화 예측에서 시간단위 적산의 이점을 교차검증으로 직접 확인한 결과이다. 개선폭 0.25일은 크지 않으나, 개화시작일과 만발일 두 단계에서 일관되게 재현되었고 임계 적산량의 변동도 감소하였다.

이러한 차이가 나타나는 이유는 일평균기온이 기준온도 부근의 기온 변동을 적절히 반영하지 못하기 때문으로 판단된다. 일평균기온이 기준온도를 밑도는 날에도 주간에는 기준온도를 상회하는 시간이 존재할 수 있으며, 일단위 적산은 이 열량을 누락한다. 반대로 일평균기온이 기준온도를 상회하더라도 야간에 기준온도 이하로 내려가는 시간이 있으면 일단위 적산은 열량을 과대평가한다. 이러한 편의는 일교차가 큰 지점과 이른 봄철에 특히 커

진다.

온대 수목의 잎 전개가 야간기온보다 주간기온에 더 강하게 반응한다는 보고(Piao *et al.*, 2015; Fu *et al.*, 2016)는 이러한 해석과 부합한다. 기상청 ASOS 시간자료는 전국 주요 지점에서 공개되고 있어 추가 비용 없이 적용 가능하므로, 시간 자료가 확보된 경우 시간단위 적산의 사용을 권장한다.

2. 지역별 적용 한계

Kim *et al.* (2021c)은 지점별 보정을 도입한 모형이 전국 단일 모형보다 우수함을 보고하였다. 본 연구는 이를 예측 정확도 측면에서 정량적으로 뒷받침하는 동시에, 단일 모형이 어느 지역에서 얼마나 실패하는지를 구체적으로 제시하였다.

특히 백령도에서 적산온도 모형이 평년값 예측보다 부정확했다는 결과는 주목할 만하다. 이는 모형의 정교함이 항상 정확도로 이어지지 않으며, 지역 특성에 따라 단순한 평년값이 더 나은 선택일 수 있음을 보여준다. 실무적으로는 해당 지역에 대해 복잡한 예측 모형을 적용하기보다 과거 관측 평균과 그 변동폭을 제공하는 편이 유용할 수 있다.

일교차가 작은 지점에서 예측오차가 큰 경향이 관찰되었으나, 본 연구의 지점 수(5개)로는 일교차·해양성·위도 등 서로 얽힌 지역 특성을 분리하여 검정할 수 없었다. 국내에서는 고도에 따른 일기온 변화가 계절별로 다르게 나

타남이 보고된 바 있어(Yun *et al.*, 2001), 지형 요인 또한 지점 간 차이에 기여했을 가능성이 있다. 해양의 영향을 크게 받는 지점에서는 기온 이외의 요인이 개화에 관여할 가능성이 있으며, 이에 대해서는 지점 수를 확대한 후속 연구가 필요하다.

3. 3월 야간 저온과 개화간 관계

3월 야간 저온 노출이 많을수록 적산온도 예측보다 개화가 앞당겨진 경향에 대해서는, 지점별로 분리하였을 때 백령도를 제외한 4개 지점에서 유의하지 않았고 임계온도를 달리하면 관계가 사라진다는 점을 전제로, 다음 두 가지를 향후 검증이 필요한 가설로 제시한다. 아래 서술은 어느 한 기작을 지지하는 결론이 아니라, 후속 연구에서 검토할 방향을 정리한 것이다.

첫째, 주간기온 우세 가설이다. 동일한 적산량 조건에서 야간 저온 노출이 많다는 것은 상대적으로 주간기온이 높음을 의미한다. 잎 전개와 개화가 주간기온에 더 강하게 반응한다면(Piao *et al.*, 2015; Fu *et al.*, 2016), 이러한 조건에서 개화가 앞당겨지는 것은 자연스럽다. 다만 관측 수준($n=45$)의 잔차 회귀에서는 평균 일교차 변수 자체가 유의하지 않아, 임계값 기반 노출 지표에서만 신호가 나타난 점은 추가 검토가 필요하다. 이는 지점 수준($n=5$)에서 관찰된 일교차와 예측오차의 상관과는 분석 층위가 다르다.

둘째, 저온요구도(chilling requirement) 충족 가설이다. 다만 국내 9개 수목원의 9년간 관측 자료로 아까시나무를 포함한 7개 수종의 개화 예측모형을 비교한 연구에서, 저온-가온 순차모형이 단순 가온(적산온도) 모형보다 우수하지 않았다고 보고되었다(Kim *et al.*, 2022). 또한 저온 축적의 임계온도 자체가 수종과 연구에 따라 다르게 설정되어 왔으므로(Flynn and Wolkovich, 2018), 본 연구에서 사용한 5°C 임계값을 저온요구도의 지표로 단정하기는 어렵다.

무엇보다 본 소견은 백령도 단독에 의존하고 있어, 일반화를 위해서는 다지점 검증이 선행되어야 한다.

아까시나무는 저온요구도가 낮거나 불확실한 수종으로 평가되어 왔으며(Cook *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2022), 이탈리아 연구에서도 겨울철 기온이 개화시기의 연간 변이를 조절하는 신호로 나타났으나 직접적인 저온 지

표가 없어 생리적 기작을 단정할 수 없다고 보고되었다(Carbonari and Epifani, 2026). 본 연구의 소견도 같은 한계를 공유한다. 두 가설 중 어느 것도 본 연구의 자료로는 구분할 수 없으며, 이를 검증하려면 지점 수를 확대하고 개체 수준의 개화 관측과 미기상 자료를 함께 확보한 설계가 필요하다.

4. 이동양봉에의 활용

예측오차가 어느 수준일 때 실무적으로 활용 가능한지에 대한 확립된 기준은 없다. 다만 아까시나무의 개화에서 만발까지는 평균 5.4일이 소요되므로(Table 2), 예측오차가 이 기간보다 작으면 채밀 적기의 앞뒤를 판별할 수 있다는 점을 하나의 기준으로 삼을 수 있다. 실제 허용 오차는 이동 거리, 봉군 규모, 밀원 규모에 따라 달라질 수 있다.

이러한 기준에서 본 연구 결과는 이동양봉 일정 수립에 다음과 같이 활용될 수 있다.

- 오차가 작은 지점(홍성·수원): 적산온도 기반 개화 예측을 신뢰할 수 있으며, 오차 범위 2~3일은 개화에서 만발까지의 기간보다 짧아 이동 일정 수립에 활용 가능한 수준이다.
- 오차가 큰 지점(백령도·여수): 예측오차가 5~6일에 이르러 개화에서 만발까지의 기간과 비슷하거나 크므로, 예측만으로 채밀 적기를 판단하기 어렵다. 여유를 두거나 현장 확인을 병행할 필요가 있다.
- 오차 크기는 도서·연안 여부만으로 예단할 수 없으므로, 밀원지별로 과거 예측오차를 추적하여 신뢰 구간을 산출하는 방식이 바람직하다.
- 개화 예측 정보를 제공할 때는 예측일 단독이 아니라 지점별 오차를 반영한 구간 형태로 제시하는 것이 바람직하다.

다만 지점마다 오차가 다르다는 사실을 양봉인이 직접 확인하고 적용하도록 요구하는 것은 현실적이지 않다. 오차 정보의 산출과 반영은 예측 정보를 제공하는 측이 부담하는 것이 타당하며, 구체적으로는 다음과 같은 방식을 제안한다. 첫째, 예측 결과를 특정 날짜가 아니라 지점별 오차를 반영한 기간(예: 홍성 5월 9일±2일, 백령도 5월 26일±6일)으로 제공한다. 둘째, 오차가 큰 지점에 대해서는 적산온도 예측 대신 평년 개화일을 제시하거나 두 값

을 병기한다. 본 연구에서 백령도의 적산온도 예측오차는 평년값 예측보다 컸으므로, 이러한 지점에서는 단순 평년값이 더 나은 선택이 될 수 있다. 셋째, 예측 정보와 함께 현장 확인이 필요한 정도를 등급으로 표시하여, 양봉인이 오차 수치를 직접 해석하지 않고도 활용 여부를 판단할 수 있도록 한다.

5. 연구의 한계

첫째, 조사 지점이 5개로 제한되어 지역 특성을 분리하여 검정할 수 없었다. 향후 계절관측 지점을 확대하여 검정할 필요가 있다.

둘째, 9개년 자료로는 개화시기의 장기 변화 경향을 논의하기 어려워 본 연구에서는 다루지 않았다.

셋째, 아까시나무의 화아분화는 전년도에 이루어지므로 전년 기상조건이 당해 개화에 영향을 줄 수 있으나 본 연구에서는 고려하지 못하였다.

넷째, 본 연구의 개화일은 각 지점의 기상관서 구내에 지정된 표준목 1개체에서 관측된 값이다. 동일 지역 내에서도 개체군 간, 그리고 개체 간에 개화시기의 차이가 존재하며, 사면 방위·표고·수관 위치 등 미소환경 조건에 따라 개화 진행 양상이 달라질 수 있다. 따라서 표준목에서 관측된 개화일이 해당 지역 밀원림 전체의 개화 시기를 그대로 대표한다고 보기는 어렵다. 국외 계절학 관측망에서는 지점당 10개체의 중앙값을 사용하여 개체 변이를 완화하는 사례가 보고되어 있어(Carbonari and Epifani, 2026), 향후 국내에서도 지점당 복수 개체 관측이 도입된다면 관측값의 지역 대표성이 향상될 것으로 판단된다.

이러한 한계는 본 연구에서 제시한 예측오차의 해석에도 영향을 미친다. 본 연구의 예측오차는 표준목 개화일에 대한 오차이며, 실제 밀원림 단위의 개화 시기를 예측할 때에는 개체 간 변이와 임분 내 미소환경 차이에 따른 추가적인 불확실성이 더해질 수 있다. 따라서 본 연구의 오차 범위는 실무 적용 시 최소값으로 해석하는 것이 타당하다.

다섯째, 본 연구의 기상 자료는 개화 관측과 동일한 기상관서에서 측정된 것이므로 관측지 수준에서는 공간적 불일치가 없으나, 이는 반대로 밀원림 현장의 기상 조건과는 다를 수 있음을 의미한다. 실제 밀원지에 예측을 적용할 때에는 관측소와 밀원림 간의 거리 및 표고 차이에

따른 기온 차이가 추가로 고려되어야 한다.

여섯째, 적산 시작일을 3월 1일로 고정하였으며 겨울철(1~2월)을 포함한 적산의 효과는 검토하지 못하였다. 최근 겨울철 기온 상승을 고려하면 적산 시작일의 재검토가 필요할 수 있으며, 이는 저온요구도 모형과 함께 향후 연구에서 다루어야 할 과제이다.

결론

1. 아까시나무 개화 예측에 적합한 적산온도 조건은 기준 온도 5°C, 3월 1일 적산 시작이며, 개화 임계 적산량은 약 426(만발 기준 약 488)이었다.
2. 시간단위 적산이 일단위 적산보다 유의하게 정확하였다(개화시작일 $P=0.029$, 만발일 $P=0.046$). 시간 기상 자료가 확보된 경우 시간단위 적산을 권장한다.
3. 예측 정확도는 지점에 따라 유의하게 달랐다(Levene $P=0.027$). 홍성·수원은 오차 2~3일 수준이었으나 백령도·여수는 5~6일에 이르렀고, 백령도에서는 적산온도 모형이 평년값보다 정확하지 않았다. 다만 제주는 3.3일로 중간 수준이어서 오차 크기가 도서·연안 여부만으로 설명되지는 않았다.
4. 이동양봉 일정 수립 시 개화 예측값은 지점별 오차 범위와 함께 제시되어야 하며, 오차가 큰 지점에서는 현장 확인을 병행할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청의 주요 밀원 개화기 예측 이용 벌꿀 생산 최적 모델 개발(과제번호: RS-2023-00230940)에 의해 수행되었습니다.

인용문헌

- Carbonari, F. and C. Epifani. 2026. Seasonal climate signals driving flowering of *Robinia pseudoacacia* in Piedmont (Italy): implications for apiculture under climate change. *Int. J. Biometeorol.* 70(4): 122.

- Cesaraccio, C., D. Spano, P. Duce and R. L. Snyder. 2001. An improved model for determining degree-day values from daily temperature data. *Int. J. Biometeorol.* 45(4): 161-169.
- Cho, J. G., S. Kumar, S. H. Kim, J.-H. Han, C. S. Durso and P. H. Martin. 2021. Apple phenology occurs earlier across South Korea with higher temperatures and increased precipitation. *Int. J. Biometeorol.* 65(2): 265-276.
- Cook, B. I., E. M. Wolkovich and C. Parmesan. 2012. Divergent responses to spring and winter warming drive community level flowering trends. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 109(23): 9000-9005.
- Flynn, D. F. B. and E. M. Wolkovich. 2018. Temperature and photoperiod drive spring phenology across all species in a temperate forest community. *New Phytol.* 219(4): 1353-1362.
- Fu, Y. H., Y. Liu, H. J. De Boeck, A. Menzel, I. Nijs, M. Peauccelle, J. Penuelas, S. Piao and I. A. Janssens. 2016. Three times greater weight of daytime than of night-time temperature on leaf unfolding phenology in temperate trees. *New Phytol.* 212(3): 590-597.
- Kim, K., M. Lee, Y.-S. Choi, E.-J. Kang, H.-G. Park, B. Park, O. Frunze, J. Kim, S. M. Han, S. O. Woo, S. G. Kim, H. Y. Kim, S.-K. Kim and D. Kim. 2021a. Status and environmental factors of the annual production of acacia honey from the false acacia (*Robinia pseudoacacia*) in South Korea. *J. Apiculture* 36(1): 11-16.
- Kim, M. J., S. J. Na, H. Y. Kwon and Y. K. Kim. 2021b. The main source of Honey Plants in Korea I(Tree Species). pp. 28. National Institute of Forest Science.
- Kim, S., T. K. Kim, S. Yoon, K. Jang, H. Lim, W. Y. Lee, M. Won, J.-H. Lim and H. S. Kim. 2021c. Recent changes in bloom dates of *Robinia pseudoacacia* and bloom date predictions using a process-based model in South Korea. *J. Korean Soc. For. Sci.* 110(3): 322-340.
- Kim, S., T. K. Kim, S. Yoon, K. Jang, J.-H. Chun, M. Won, J.-H. Lim and H. S. Kim. 2022. Quantifying the importance of day length in process-based models for the prediction of temperate spring flowering phenology. *Sci. Total Environ.* 843: 156780.
- Lee, H. K., S. J. Lee, M. K. Kim and S. D. Lee. 2020. Prediction of plant phenological shift under climate change in South Korea. *Sustainability* 12(21): 9276.
- Oh, S., K. Shim and J. Park. 2025. Predicting blooming and fall dates for *Robinia pseudoacacia* using machine learning. *J. Apiculture* 40(1): 57-64.
- Pearse, W. D., M. Stemkovski, B. R. Lee, R. B. Primack and S. D. Lee. 2023. Consistent, linear phenological shifts across a century of observations in South Korea. *New Phytol.* 239(3): 824-829.
- Piao, S., J. Tan, A. Chen, Y. H. Fu, P. Ciais, Q. Liu, I. A. Janssens, S. Vicca, Z. Zeng, S.-J. Jeong, Y. Li, R. B. Myneni, S. Peng, M. Shen and J. Peñuelas. 2015. Leaf onset in the northern hemisphere triggered by daytime temperature. *Nat. Commun.* 6: 6911.
- Son, J. H., J. G. Kim, K. G. Oh, I. H. Ji and S. C. Park. 1999. Prediction of a Flowering Period and Selection of Trees with High Nectar Production in Black Locust. pp. 95. Ministry of Agriculture and Forestry.
- Walkovszky, A. 1998. Changes in phenology of the locust tree (*Robinia pseudoacacia* L.) in Hungary. *Int. J. Biometeorol.* 41(4): 155-160.
- Yun, J. I., J. Y. Choi and J. H. Ahn. 2001. Seasonal trend of elevation effect on daily air temperature in Korea. *Korean J. Agric. For. Meteorol.* 3(2): 96-104.