한국농림기상학회지, 제24권 제1호(2022) (pISSN 1229-5671, eISSN 2288-1859)
Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 24, No. 1, (2022), pp. 1~12
DOI: 10.5532/KJAFM.2022.24.1.1
ⓒ Author(s) 2022. CC Attribution 3.0 License.

산악 지역에서의 피나무(*Tilia amurensis* Rupr.) 개화시기와 성장온일도를 이용한 개화 진행 예측

김민중[1], 손민웅[2], 이주혁[2], 정철의[1,2*]
[1]안동대학교 농업과학기술연구소, [2]안동대학교 식물의학과
(2021년 11월 9일 접수; 2021년 12월 21일 수정; 2022년 2월 25일 수락)

Blooming Time of *Tilia amurensis* Rupr. in Mountainous Area and Prediction of its Blooming Progress Using Growing Degree Day Model

Min-Jung Kim[1], Minwong Son[2], Juhyeok Lee[2], Chuleui Jung[1,2*]
[1]*Agricultural Science and Technology Research Institute, Andong National University, Andong 36729, Republic of Korea*
[2]*Department of Plant Medicals, Andong National University, Andong 36729, Republic of Korea*
(Received November 9, 2021; Revised December 21, 2021; Accepted February 25, 2022)

ABSTRACT

***Tilia amurensis* is an important honey plant. As *T. amurensis* mainly distributes mountainous area with various elevations in Korea, accurate prediction of blooming time at the different elevation would benefit forest beekeepers. In this study, we measured time-dependent blooming progress of *T. amurensis* in Mt. Gariwang area ranging from 500-1500m. Additionally we collected blooming data from web and published literatures and estimated the variation of blooming time relative to the geographic locations. Flowers began to bloom from July 6 to July 22 with full blooming on July 14 in location where elevation is 638m in Mt. Gariwang area in 2021. Based on these databases, a growing degree day (GDD) model was developed for prediction of *T. amurensis* blooming progress using average daily temperatures. Using the starting date of GDD accumulation of January 1 and base temperature of 5 ºC, blooming period ranging from 10% to 90% of cumulative blooming rate was estimated as 860-1198 degree days (DD). This corresponded to the beginning to the end of July in Mt. Gariwaning area in 2021. This model could explain the phenological variations of *T. amurensis* flower blooming possibly affected by elevation within geographic area, latitude or year relative to the climate change, and aid forest beekeepers for better timing of nectar foraging by honey bees.**

***Key words*: Honey plant, *Tilia amurensis*, Elevation, Forest beekeeper, Cumulative blooming rate**

* Corresponding Author : Chuleui Jung
(cjung@andong.ac.kr)

I. 서 론

최근 국내에서 벌꿀 생산 중 가장 높은 비율을 차지하는 아카시아 꿀 생산량 감소가 지속적으로 보고되고 있다(Kim *et al*., 2021a). 그 원인으로 산림생태계의 변화, 아까시나무(*Robinia pseudoacacia* L.) 개화기에 이상 기상현상 증가, 기후 변화에 따른 개화시기의 변화, 아까시잎혹파리(*Obolodiplosis robiniae* (Haldeman) (Diptera: Cecidomyiidae)) 등의 해충 피해 및 황화현상으로 인한 수목 쇠퇴가 지목되고 있다(Woo *et al*., 2003; Szabo *et al*., 2016; Kim *et al*., 2021b). 이에 따라 아까시나무를 대체할 수 있는 밀원수 발굴에 대한 요구가 증가하였고, 다양한 수종들에 대한 밀원 가치가 평가되었다(Batra, 1985; Kim *et al*., 2015; Kim *et al*., 2017; Kim *et al*., 2020). 밀원수 발굴과 더불어 산지 내에서 수목과 함께 농작물, 가축 등을 혼합 운영하는 '산림복합경영'도 함께 대두되고 있다(Sung and Seo, 2004; Lee, 2013). 개화시기가 상이한 다양한 밀원식물이 자생 혹은 식재 된 산림에서는 보다 안정적인 벌꿀의 연중 생산이 가능하다. 또한 양봉산물과 산림자원은 물론 경관과 산림 생태계의 생물다양성 증진 및 다양한 생태계 서비스를 제공할 수 있다(Park and Youn, 2012). 2020년부터 시행된 양봉산업 육성 및 지원에 관한 법률에서는 밀원 가치 연구들에 근거하여 아까시나무, 음나무(*Kalopanax pictus* Nakai), 피나무(*Tilia amurensis* Rupr.) 등을 포함한 총 25종의 목본식물을 밀원식물로 규정하였고, 밀원 숲을 조성하기 위한 근거들을 마련하였다. 이와 관련하여 산림에서 해당 수종들의 관리를 위한 공간 배치, 화밀 분비 특성 및 개화기에 관한 심층적인 연구가 필요하다.

피나무속(*Tilia* L.)은 전세계적으로 중요한 밀원수 및 목재용 식물로 평가받는다(Kim and Chung, 1986). 피나무속은 피나무과(Tiliaceae)에 속하는 낙엽교목으로 주로 온대지방에 분포하며 국내에는 11종이 기록되어있다(Kim, 1983). 이들 중 국내에 자생하는 피나무는 높은 화밀 분비량과 화밀 내 당함량으로 중요한 밀원수로 평가받고 있다(Lee, 1998; Han *et al*., 2010). 국내 양봉인들도 밀원수로의 피나무 가치를 인식하고 있지만(Lee, 1998), 번식 및 식재의 어려움과 자생지의 지리적 분포 때문에 강원도 일대 산악 지역에서 주로 채밀 활동이 이루어 지고 있다(Kim and Chung, 1986; Youn and Ohba, 1990; Lee, 1998). 이러한 특징 때문에 피나무 꿀은 자생지 인근의 양봉장이나 개화시기에 맞추어 오대산, 설악산 등 해발고가 높은 산지로 이동하여 채밀하는 형태로 생산된다. 따라서 산림양봉의 대표 대상 수종인 피나무의 채밀 시기를 결정할 수 있는 개화기 예측은 밀원 가치의 평가와 효율적 꿀 생산에 도움을 줄 수 있다.

국내 환경에서 피나무는 보통 6월에 개화한다고 알려져 있으나(한국양봉협회), 전국적으로 5월에서 7월까지 개화가 관찰되는 것으로 보아 지역과 관찰연도에 따라 편차가 상당히 큰 것으로 추정된다(https://species.nibr.go.kr/). Kim and Choi (1988)는 1987년 경기도 수원 지역의 피나무에서 꿀벌 방화 활동을 6월 말에서 7월 초순까지 관찰하였다고 보고하였다. 반면에 Han *et al*.(2010)은 경기도 화성 지역의 기준목을 대상으로 한 관찰에서 피나무의 개화 시기가 6월 초에서 중순까지 10일가량 지속된다고 보고하여, Kim and Choi (1988)의 결과와 3주가량 큰 차이를 보였다. 따라서 국내 환경에서 피나무의 개화시기에 상당한 편차가 있음을 반증하고 있다. 유럽에서는 피나무와 같은 속의 *Tilia cordata*의 첫 개화시기가 북쪽으로 갈수록 늦어지며 이것이 위도에 따른 온도 변화의 영향이라고 보고한 바 있다(Thompson and Clark, 2006). 온도는 식물의 생리적 반응과 관련된 환경 요소들 중 온대 수목의 휴면과 발육에 영향을 주는 가장 중요한 요소로 알려져 있다(Johnson and Thornley, 1985; Cooke *et al*., 2012). 온도는 내생휴면(endodormancy) 및 환경휴면(ecodormancy)의 타파와 눈(bud) 발달 및 파열(bud-burst)에 순차적으로 영향을 주어 개화 과정을 전반적으로 조절하는 인자이다(Miklos *et al*., 1995). 따라서 보다 정확한 피나무 꿀 채밀 시기 추정을 위해 온도가 개화기에 미치는 영향에 대해 평가할 필요가 있다. 특히 국내에서 피나무 꿀이 주로 산악지역에서 생산되므로, 고도에 따른 기온 감소와 이에 따른 개화기의 변화도 함께 고려되어야 할 것이다(Lee *et al*., 1997).

온도에 따른 식물 개화시기 연구는 주로 통제된 온도 조건에서 추정된 발육율을 기반으로 하거나, 관찰된 특정 개화 현상(e.g., 최초 개화 시작일, 만개일 등)과 온도와의 관계를 역으로 추정하는 방식을 취한다(Murakami *et al*., 2009). 그러나, 수목의 경우 통제된 조건에서의 실험이 어렵기 때문에 관찰된 개화 현상 자료를 이용하여 평균 온도와 같은 예측변수와의 관계를 설명하는 통계적 모델이나 수목의 생리학적 반응을 고려한 과정기반 모델을 주로 활용한다(Andreini *et*

al., 2014). 제안된 여러 모델들 중 성장온일도(Growing degree days, GDD) 모델은 내생 휴면이 종료된 이후의 대기 온도가 개화기에 영향을 준다는 것을 근거로 하며 GDD 계산이 비교적 간단하여 널리 활용되고 있다(Yang *et al*., 1995). 본 연구는 GDD를 이용하여 피나무 개화기를 설명할 수 있는 모델을 개발함을 목적으로 하였다. 이를 위해 1) 전국적인 피나무 개화시기 정보를 수집하여 지역별 차이를 확인하였고, 2) 개화 진전을 표현할 수 있는 누적 개화율 자료를 바탕으로 고도와 지역에 따른 온도 차이가 피나무 개화기에 미치는 영향을 추정하였고, 3) GDD를 기반으로 피나무 개화 진행을 설명할 수 있는 분포 모델의 파라미터를 추정하였다. 이를 통해 산간 지역에서 보다 정확한 피나무 꿀 생산이 가능한 기간을 제시하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 개화 시기 자료 구축 및 분석 기준목 개화 진행 시기 조사

시기별 개화 진전을 파악하기 위하여 강원도 평창군 진부면 장전길 가리왕산 일대 해발고도 638m인 지점(37°29’03.3"N 128°32’27.4"E)에 있는 독립수(흉고직경(DBH) 140cm)를 기준목으로 선정하였다. 기준목에서 6월초 개화 전 사전 조사에서 약 2,700,000개에 달하는 꽃봉우리가 확인하였고, 비교적 접근이 용이한 지점에 위치하여 개화 진전 관찰에 적합할 것으로 판단하였다(Fig. 1). 개화 동태 관찰은 수간을 기준으로 10m 떨어진 지점에서 매일 정오에 수관부의 5~10개 지점을 임의로 망원렌즈로 촬영하고, 사진으로 개화 현황을 판단하는 방식으로 수행하였다. 사진 당 개화의 식별이 분명한 2~5개의 화서에서 개화 전 꽃봉오리, 개화한 꽃, 진 꽃의 개수를 파악하였다. 정리된 자료는 일별 개화율 및 누적 개화율로 변환하였다. 개화율은 식별된 총 꽃 수(미개화, 개화, 개화종료) 대비 개화 상태의 꽃의 비율로 계산하였다. 누적 개화율은 식별된 총 꽃 수 대비 개화 혹은 개화종료 상태의 꽃 수 비율로 계산하였다. 조사는 꽃이 피기 전인 2021년 6월 24일부터 7월 27일까지 약 한달간 수행하였다.

가리왕산 일대에서 기준목이 위치한 지점 외에 해발 500m~1500m 지역의 개화 현황을 관찰하였다. 조사는 7월 6일, 9일, 22일 총 3회에 걸쳐 임도 일대를 순회하며 개화 상태가 식별된 수목의 누적 개화율을 기록하는 방식으로 수행되었다. 7월말까지 꽃봉오리가 형성되지 않은 수목들(해발 1200~1500 일대)과 조사자의 접근이 어려워 정확한 개화 진전의 판단이 어려운 수목은 조사에서 제외하였다. 집중 관측이 이루어진 기준목과 동일하게 사진 촬영 후 개화 상태를 판별하였다.

2.2. 지역별 개화 시기 자료 구축 및 분석

웹자료에서 식별된 피나무 개화 자료도 함께 구축

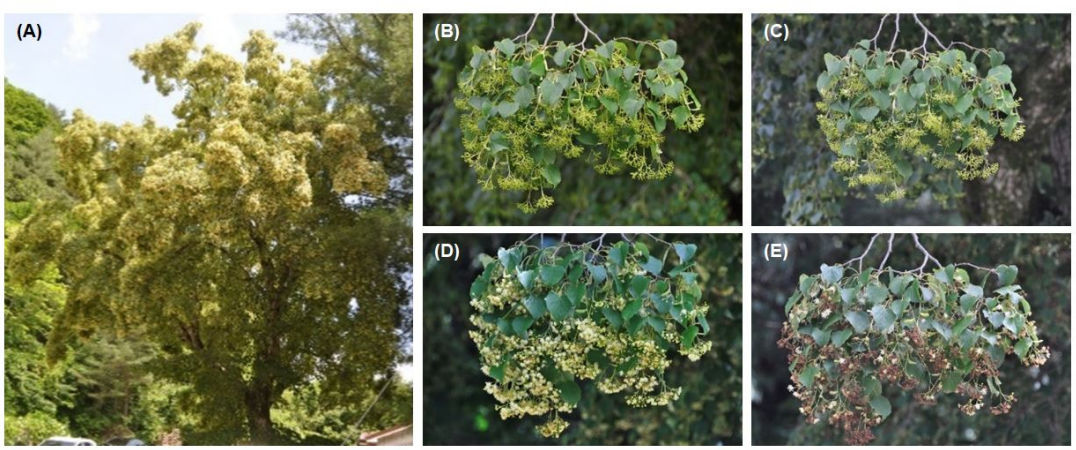

Fig. 1. Photos of *Tilia amurensis* observed in Mt. Gariwang area, Gangwon, Korea during the blooming period in 2021. (A) General feature of an observed tree on July 9; Blooming progression of specific part on (B) June 28, (C) July 7, (D) July 14, and (E) July 20.

Table 1. Information on *Tilia amurensis* specimens with identified blooming status

Specimen number	Date	Day of year	Latitude	Longitude	Elevation
SNBA200008112021	1939-07-18	199	37.50818	130.82171	238
KBNA200006122026	1961-06-11	162	36.13735	128.01533	159
KWNA200007061101	1976-07-08	190	37.87334	127.96088	883
KWNA200007061103	1976-08-03	216	37.09574	128.91524	1499
ENHA200508301025	1981-06-18	169	37.5718	126.93253	30
KNKA200006202061	1981-07-10	191	38.26208	127.55665	372
ENHA200508301024	1982-06-10	161	37.5718	126.93253	30
SNBA200505131003	1982-06-21	172	37.59237	127.04388	25
SNBA200505111021	1982-06-21	172	37.59237	127.04388	25
SNBA200505121036	1982-06-23	174	37.46694	126.94799	53
SNBA200505121059	1982-06-27	178	37.46694	126.94799	53
SNBA200505111038	1982-06-30	181	37.46694	126.94799	53
SNBA200505121060	1982-07-17	198	38.16472	128.37389	500
SNBA200505121052	1982-07-18	199	38.14639	128.41417	1100
HNHA200507122171	1986-05-31	151	34.65257	125.88916	100
SCNA200007111030	1986-06-05	156	34.99355	127.60815	38
SNFA201006071029	1986-07-14	195	35.22726	127.58981	160
KWNA200007071004	1986-07-23	204	37.09574	128.91524	1499
KWNA200007071013	1987-07-24	205	37.99021	128.45211	635
KNKA200005243071	1992-07-15	197	37.09574	128.91524	1499
SKKA200008182161	1993-07-12	193	38.26208	127.55665	372
KWNA200007071031	1995-07-05	186	38.3635	128.29933	865
KWNA200007071033	1995-07-05	186	38.26844	128.38261	638
CNNA200008082088	1995-07-12	193	37.46833	128.79948	457
EWUA200909261109	1997-06-25	176	35.94766	127.68975	997
CBBA200409092012	2001-07-06	187	37.94167	127.43194	1220
KBNA200607221003	2003-06-26	177	35.53996	129.05616	1056
HLUA200910231141	2005-07-14	195	37.52058	130.86815	354
CNNA200911122188	2006-07-14	195	35.81514	128.12311	1107
HLUA200910231146	2006-07-28	209	37.52058	130.86815	354
ADNA200911284051	2008-07-15	197	37.52058	130.86815	354
HLUA201107092086	2009-06-24	175	37.93296	128.38604	440
HLUA201007271011	2009-07-19	200	37.54197	128.27451	734
KWNA201206143056	2009-07-23	204	37.67694	128.31444	1252
KWNA201206143053	2010-07-15	196	38.04928	128.42526	1396
KNKA201502078048	2011-07-20	201	37.60722	128.27678	1099
KNKA201502078035	2011-07-22	203	36.73964	129.25311	914
KNKA201502078034	2011-07-22	203	36.73964	129.25311	914
KNKA201502078040	2012-07-07	189	35.81841	128.12396	1188
KNKA201502078027	2012-07-07	189	35.82247	128.1175	1282

하였다(https://www.naturing.net/). 사진 상으로 피나무 동정과 꽃봉오리의 개화 단계 식별이 명확한 자료에서만 누적 개화율을 계산하였다. 관찰 일시, 관찰 지역 정보가 포함된 문헌자료도 지역별 개화 현황의 차이를 분석하기 위해 수집하였다(Kim and Choi, 1988). 또한 국가생물종지식정보시스템에 구축된 표본 자료들도 수집하였다(http://www.nature.go.kr/). 피나무 표본으로 등록된 879개 자료 중 개화한 상태로 명확히 판별 가능한 40개의 자료를 정리하였다(Table 1). 표본 자료로는 해당 수목의 전반적인 개화 진전 정도를 파악하기 위한 꽃봉오리 개수가 충분하지 않다고 판단하여 누적 개화율은 산출하지 않았다.

지역별 개화 시기의 차이를 파악하기 위해 표본 자료들의 수집된 날짜와 경위도 좌표, 고도 정보를 이용하였다. 구축된 최종 자료에서 표본 수집일에 해당하는 관찰 연중일(DOY, day of year)과 해당 지역의 위도 및 고도와의 상관 분석을 수행하였다.

2.3. 개화 진행 시기 모델 개발

피나무의 누적 개화율 변화가 경과별로 관찰된 Kim and Choi (1987)의 자료와 본 연구에서 구축한 가리왕산 기준목의 개화율 자료를 모델 개발에 이용하였다. 자료는 관찰일과 각 관찰일에 해당하는 누적 개화율로 구성되며 자료들의 관찰 연도, 지역에 해당하는 일별 기온자료를 수집하였다(https://www.kma.go.kr/kma/). 가리왕산 기준목에 대한 기상자료는 가장 가까운 관측소인 평창군 대화면(고도 562m) 지점의 자료를 사용하였다. 지역 및 연도별 기온 분포의 영향과 시간을 함께 반영하기 위해 관찰일을 누적 GDD로 변환하였다. 본 연구에서 이용하는 GDD는 내생휴면이 종료된 이후 개화 진행까지 필요한 온도시간을 표현하므로, GDD의 누적 시작일과 일별로 유효한 가온량을 산출하기 위한 기준온도의 설정이 필요하다. GDD의 기준온도는 같은 속인 *T. cordata*의 분포 예측에 관한 선행연구에 따라 5 ℃로 설정하여 계산하였다(Sykes *et al*., 1996; Shafer *et al*., 2001). 또한 GDD 계산에 자주 활용되는 10 ℃의 기준온도도 함께 검토하였다(Kim and Yun, 2008). 본 연구에서 피나무의 내생휴면 종료 시기를 특정할 수 없으므로 GDD 누적 시작일로 1월 1일, 2월 1일, 3월 1일, 4월 1일을 설정하고 비교하였다. 일별 GDD는 다음과 같은 수식으로 계산하였다(Eq. 1).

$$GDD = \begin{cases} (T_{Max} + T_{Min})/2 - T_{Base} & T_{Avg} > T_{Base} \\ 0 & T_{Avg} < T_{Base} \end{cases} \quad \text{(Eq. 1)}$$

Eq. 1에서 T_{Max}와 T_{Min}은 각각 일별 최고, 최저 기온을 의미하며 T_{Avg}는 $(T_{Max} + T_{Min})/2$로 계산된 평균기온을 의미한다. 5 ℃와 10 ℃의 기준온도로 일별 GDD를 구한 후, 1월 1일, 2월 1일, 3월 1일, 4월 1일부터의 누적 GDD를 각각 산출하였다. 따라서 2개의 기준온도와 4개의 누적 시작일로 계산된 총 8개의 데이터 세트를 구성하였다. 연간 누적 개화율은 개화 전 0으로 유지되다가 개화 종료 후 1로 유지되는 단조증가하는 패턴을 보이기 되는데, 이러한 패턴을 표현하기 위해 계산된 누적 GDD와 누적 개화율을 시그모이드 함수에 적용하였다(Eq. 2). 추가적으로 GDD를 이용한 개화 진행 예측의 타당성을 검증하기 위해 DOY로 변환된 누적 개화율의 관찰일(OBS)로도 시그모이드 함수의 파라미터를 추정하고 적합도를 산출하였다.

$$F(x) = 1/(1 + \exp[-\varepsilon(x - \delta)]) \quad \text{(Eq. 2)}$$

Eq. 2에서 $F(x)$는 누적 개화율, x는 OBS 혹은 누적 GDD이며, ϵ와 δ는 추정해야 할 파라미터이다. 파라미터 ϵ는 시그모이드 곡선의 기울기를 결정하고 파라미터 δ는 전체 꽃의 절반이 개화를 완료한 시점(누적 개화율 50%)의 OBS 혹은 누적 GDD를 의미한다. 모델의 파라미터들은 R 4.1.1 프로그램에서 “nls” 함수를 이용하여 비선형 회귀분석을 통해 추정하였다. 모델들의 적합도를 잔차제곱합(residual sum of squares, RSS)을 이용하여 비교하였다.

2.4. 개화 진행 시기 모델 검증

가리왕산 기준목(고도 638m)외의 관측 지점 자료와 웹에서 식별된 자료들로 모델을 평가하였다. OBS를 독립변수로 사용한 모델은 평가 자료의 누적 개화율이 예상되는 날짜(예측일)와 실제 관찰일를 비교하여 평가하였다. GDD 모델은 평가 자료의 누적 개화율이 예상되는 누적 GDD를 계산 후 해당 날짜의 예측일로 변환하여 비교하였다. 누적 GDD는 가리왕산 일대 고도 557~655m 지점들의 경우 평창군 대화면(고도 562m)의 일 기상 자료를, 고도 890~1128 지점들은 중왕산 1050m 지점 무인 기상 관측소 자료를 이용하

Table 2. Cumulative blooming rates of *Tilia amurensis* identified from observation, literature, and web information

Year	Day of year	Cumulative blooming rate (%)	Latitude	Longitude	Elevation	Source
2021	187	51.6	37.49358	128.54259	557	Observation
	203	100.0				
	187	27.1	37.49358	128.54259	558	
	203	100.0				
	185	0.0	37.48426	128.54095	638	
	186	1.3				
	187	24.3				
	188	24.3				
	189	36.5				
	190	36.0				
	191	45.5				
	192	43.7				
	193	56.4				
	194	58.9				
	195	62.5				
	196	69.9				
	197	80.8				
	198	83.8				
	199	80.0				
	200	82.3				
	201	93.8				
	202	96.8				
	203	100.0				
	190	20.3	37.48848	128.54085	655	
	203	100.0				
	203	18.6	37.46609	128.50479	890	
	203	30.0	37.47454	128.51304	1121	
	203	36.5	37.47757	128.51289	1128	
1987	181	25.8	37.26763	126.98562	35	Kim and Choi, 1988
	182	42.4				
	183	60.2				
	184	70.2				
	185	78.5				
	186	89.9				
2021	164	81.1	37.56574	126.90331	12	Web
2019	172	84.6	36.43458	127.23316	58	
2020	170	41.7	36.43458	127.23316	58	
	175	76.4				
2021	169	53.8	36.43458	127.23316	58	
	177	100.0				
2018	174	75.0	37.45882	126.76047	28	

여 계산하였다. 웹자료의 GDD는 가장 가까운 기상관측소의 일별 기온자료를 이용하였다. 각 모델의 예측값과 실제 관찰일 간의 상관계수를 구하여 모델의 예측력을 평가하였다.

III. 결 과

3.1. 개화시기 분포

2021년 가리왕산 일대에서 피나무의 개화는 7월 초부터 7월말까지 관찰되었다(Table 2). 638m 지점의 기준목은 7월 5일부터 7월 22일까지(186~203 DOY) 약 2주간 개화를 진행하였다. 고도 557, 558m 지점에서 7월 6일(187 DOY)에 각각 51.6%, 27.1%의 누적 개화율이 관찰되었고, 655m 지점에서 7월 9일(190 DOY)에 20.3%의 누적 개화율을 보였다. 7월 22일(203 DOY)에는 890, 1121, 1128m 지점에서 각각 18.6%, 30.0%, 35.8%의 누적 개화율이 관찰되었으나 고도 655m 이하 지점들에서는 개화가 모두 완료되어 잠재적으로 같은 지역에서도 고도가 낮을 수록 개화기가 빠른 경향을 보였다(Table 2).

웹자료에서 식별된 피나무 개화 자료들은 모두 산악지역이 아닌 고도 60m 이하 지점에서 관측된 자료들로 6월 중순경(164~175 DOY)에 개화가 진행중인 것으로 나타났다(Table 2). Kim and Choi (1988)의 피나무 개화 자료에서는 181~186 DOY에 누적 개화율이 25.8%~89.9% 수준으로 유지되어 개화 관측 지역 및 연도에 따라 차이가 있음을 보여주었다(Table 2). 표본

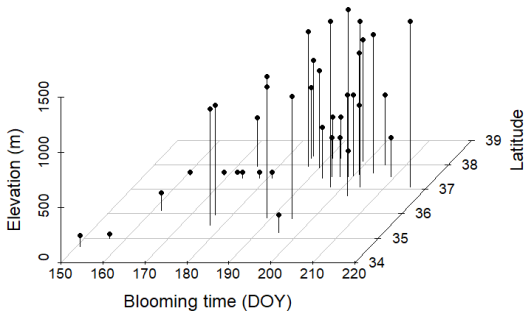

Fig. 2. Blooming time (DOY) of *Tilia amurensis* relative to the latitude and elevation identified from specimen data.

자료에서 식별된 피나무의 전국적인 개화시기는 151~216 DOY인 것으로 나타났다(Table 1). 관찰일과 고도 및 위도와의 상관계수는 각각 0.59 (t=4.48; df=38; p<0.001), 0.36 (t=2.38; df=38; p <0.05)으로 계산되었다. 표본 자료들은 동일한 기준으로 관찰된 특정 개화기(e.g. 50% 개화 완료 시기 등) 자료가 아니므로 이에 따른 변이가 함께 반영되었을 것으로 예측되나, 전반적으로 고위도 지역일수록, 고도가 높을수록 개화가 늦어지는 것으로 추정된다(Fig. 2).

3.2. 개화 진행 시기 모델

경과별로 누적 개화율이 관찰된 자료들(가리왕산 기준목, 문헌자료)의 OBS와 누적 GDD를 이용하여 누적 개화율 모델의 파라미터들을 추정하고 적합도를

Table 3. Estimated parameter values and residual sum of squares (RSS) for the cumulative distribution models of blooming time of *Tilia amurensis*

Predictor	Base temperature (℃)	Starting date	Parameter		RSS
			ε (mean ± SEM)	δ (mean ± SEM)	
OBS	-	-	0.119 ± 0.0363	188.87 ± 1.7892	1.18
GDD	5	01-Jan	0.013 ± 0.0017	1029.572 ± 9.3886	0.29
		01-Feb	0.013 ± 0.0017	1029.487 ± 9.3986	0.29
		01-Mar	0.013 ± 0.0016	1024.584 ± 9.1944	0.28
		01-Apr	0.012 ± 0.0017	988.519 ± 10.6497	0.34
GDD	10	01-Jan	0.013 ± 0.0025	534.06 ± 13.3461	0.64
		01-Feb	0.013 ± 0.0025	534.06 ± 13.3461	0.64
		01-Mar	0.013 ± 0.0025	534.06 ± 13.3461	0.64
		01-Apr	0.013 ± 0.0025	534.069 ± 13.1538	0.63

All other estimated parameter values significantly different from zero (p < 0.01).

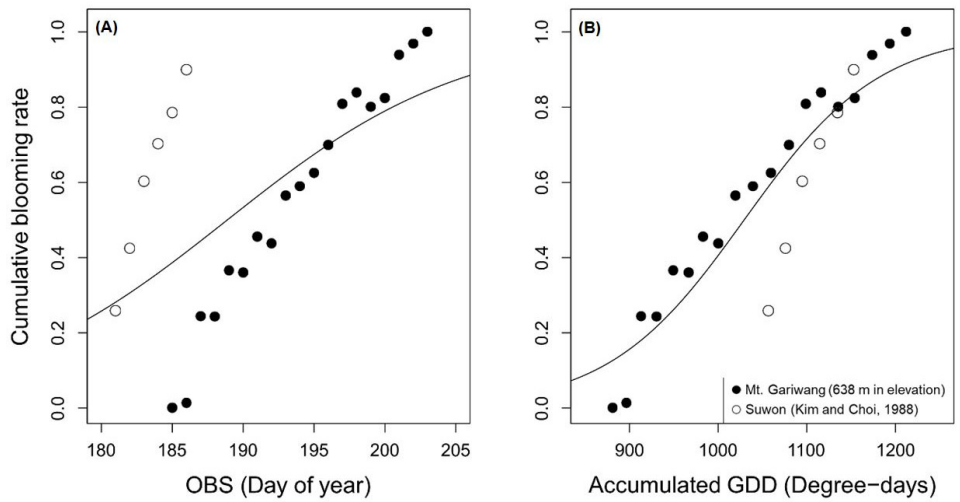

Fig. 3. Cumulative distribution models of *Tilia amurensis* blooming times. OBS (A) and accumulated GDD (B) model. Daily GDD was calculated using base temperature of 5ºC, and accumulated from January 1. Cumulative blooming rates identified from observation in Mt. Gariwang in 2021, previous observation in Suwon in 1987, and web information were used for model development.

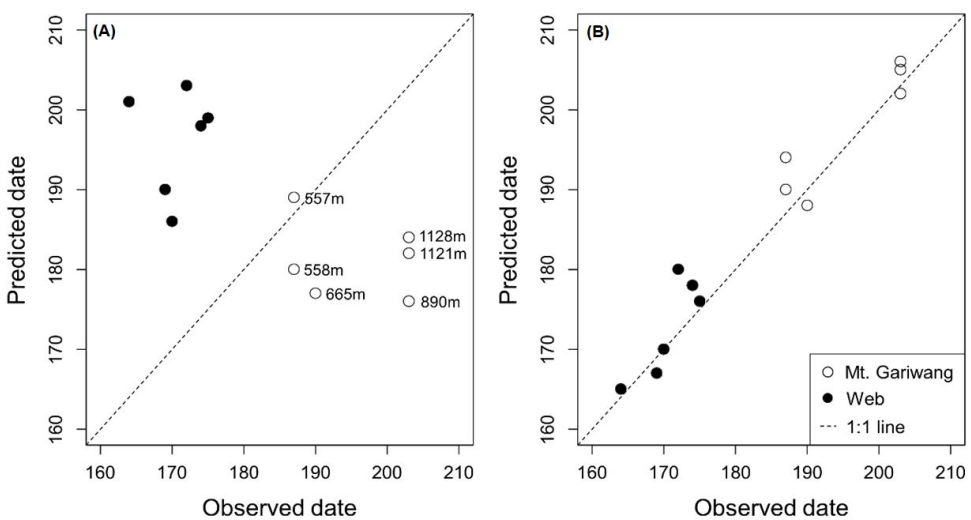

Fig. 4. Validation of OBS (A) and GDD (B) models for distribution of cumulative blooming rate of *Tilia amurensis*. The predicted dates in each plot were estimated by OBS model and GDD model, respectively.

비교하였다. RSS는 GDD 모델이 OBS 모델보다 전반적으로 낮게 나타났다(Table 3; Fig. 3). 5 ºC의 기준온도를 사용한 모델들에서 GDD 누적 시점을 1, 2, 3월로 하였을 때 적합성이 우수하였으며, RSS 값(0.28～0.29)과 추정된 파라미터 값에 있어서 유의미한 차이를 보이지는 않았다(Table 3). 반면에 4월 1일부터 GDD를 누적하거나 기준온도 10 ºC를 사용할 경우 RSS가 증가하여 모델의 적합성이 감소하였다. 1월 1일부터 5 ºC의 기준온도로 계산된 누적 GDD 모델은 10～90% 누적 개화율이 예상되는 시기를 약 860 DD에서

1198 DD으로 예측하였다(Fig. 3B).

평가 자료에서 관찰된 누적 개화율에 해당하는 예측일을 OBS 모델과 GDD 모델로 각각 산출 후 관측일과 비교했을 때 예측 성능에 있어 큰 차이를 보였다. OBS 모델은 실제 관측일 보다 저고도 지역(웹자료)의 개화시기를 느리게, 가리왕산 지역의 개화시기를 빠르게 예측하였다(Fig. 4A). OBS 모델에서 관측일-예측일간의 상관 계수는 -0.76 (t=-3.65; df=10; p<0.01)으로 지역별 개화기의 차이를 전혀 설명하지 못하였다. 반면에 GDD 모델에서 관측일-예측일간의 상관 계수는 0.98 (t=14.01; df=10; p<0.001)로 산출되어 상대적으로 지역별(웹자료, 가리왕산) 개화시기의 차이를 전반적으로 잘 설명하였다(Fig. 4B).

IV. 고찰 및 결론

본 연구를 통해 국내 피나무의 개화시기에 전국적으로 차이가 있음을 확인하였다. 표본 자료로부터 전국적인 개화시기 변이를 확인하였고 위도와 고도 증가에 따라 개화기가 늦어질 수 있음을 확인하였다. 해발고가 상대적으로 높은 가리왕산 일대의 2021년 개화시기는 기존 문헌에서 보고된 시간과 큰 차이를 보였다. 가리왕산에서 조사된 기준목의 경우 7월 15일(196 DOY)에 개화율이 57.0%로 가장 높았는데, 이는 Han *et al*.(2010)이 화성지역에서 보고한 개화 최성기(161 DOY)보다 1달 이상 차이를 보였다. 또한 가리왕산 638m 지점의 기준목 누적개화가 완료된 7월 21일 이후에도 고도 1000m 부근에서는 개화가 진행되고 있는 것으로 보아 동일한 지역에서도 고도에 따른 기온 감률이 개화기에 크게 영향을 줄 것으로 판단된다(Table 2). 지역적 개화 시기의 변이와 고도에 따른 개화기 차이는 기준온도와 대기 온도를 이용한 GDD 모델을 통해 상당부분 설명될 수 있었다. 즉 고도 및 위도에 따른 온도 분포 변화가 피나무의 개화시기에 크게 영향을 주었을 것으로 판단된다. GDD 모델은 고도 60m 이하 지점들의 개화 진행 뿐 아니라 산악지역의 고도별 개화 진행을 잘 설명하였다(Fig. 4B). 이 결과를 통해 피나무가 개화 전까지 상당부분 온도에 의존적으로 환경 휴면 타파 및 꽃눈 발육을 거쳐 개화가 진행됨을 알 수 있다. GDD 모델을 통해 지역별 개화기를 예측할 수 있으며 특히 산림 양봉에서는 고도에 따른 온도 변화를 감안한 개화기 예측이 채밀 기간을 좀 더 정밀하게 예측할 수 있다는 점에서 효율적인 꿀 생산에 도움을 줄 것으로 생각된다.

GDD 계산을 위한 기준온도는 일반적으로 임의의 온도들 중 특정 계절발생 자료(첫 개화, 50 % 누적 개화 등)를 가장 잘 설명하는 지점으로 결정된다(Yang *et al*., 1995). 이러한 접근법을 사용하기 위해서는 장기간 다양한 지역에서의 특정 계절 관측 자료가 계획적으로 수립되어야만 한다. 본 연구에서는 장기간 축적된 계절발생 자료가 없어 다양한 범위의 온도를 검토하지 못하고 임의의 2개 온도만을 평가하였다. 선정된 5 ℃의 기준온도는 피나무와 같은 속의 *T. americana*와 *T. cordata*의 분포 예측을 위한 GDD계산에도 동일하게 적용된 바 있고(Sykes *et al*., 1996; Shafer *et al*., 2001) 이 연구에서도 우수한 예측 성능을 보여주었다. 본 연구에서 검토한 10 ℃의 기준온도는 가리왕산 고도 별 개화시기의 변이를 잘 설명하지 못하였는데 이는 가리왕산 1000m 부근의 4～5월 평균기온이 대부분 10 ℃ 이하였기 때문일 것으로 추정된다. 기준온도를 통해서 일별 유효한 온일도인 GDD가 산출되므로 가리왕산 같이 고도 별 온도 분포가 뚜렷한 지역에서는 누적 GDD 산출이 기준온도에 따라 민감하게 변동할 가능성이 높다. 따라서 산악 지역에서 피나무 개화에 관련된 자료의 장기적인 축적이 필요하고 향후 기준온도에 대한 더욱 정밀한 추정이 필요할 것으로 생각된다.

주요 밀원식물 중 하나인 아까시나무와 개회나무(*Syringa reticulata*)도 저고도 지역보다 가리왕산에서의 개화가 약 3주에서 1달 정도 개화가 늦은 것으로 나타났다(Unpublished observations). 이는 피나무와 마찬가지로 환경 휴면 이후 식물이 경험하게 될 지역별 온도 차이에 인한 결과일 것으로 추정된다. 반면에 가리왕산의 주요 수종인 고로쇠나무(*Acer pictum*)와 쥐다래(*Actinidia kolomikta*)는 개화기가 저고도 지역과 비슷하거나 오히려 빠른 것이 관찰되었다. 이는 식물마다 내생 휴면 해제를 위한 저온요구량과 이후 개화까지 필요한 가온요구량이 상이하기 때문일 것으로 추정된다. 본 연구의 GDD 모델은 가온 누적 시작점과 기준온도에 따른 가온량만 고려하고 자료의 부족으로 저온 노출 기간은 모사하지 않았다. 하지만 5 ℃로 계산한 일일 GDD를 1월 1일, 2월 1일, 3월 1일부터 누적했을 때 모델들의 적합성이 상대적으로 우수한 것으로 보아 국내의 환경에서 피나무는 1월～3월달 사이 혹은 그 전년도에 저온요구량 충족에 따른 내생 휴면을 종료하고 환경 휴면상태에 돌입했을 것으로 추정된다. 그 이후 가온 누적량에 따라 잎눈 발육, 꽃눈 발달 및

개화가 진행되는 것으로 보인다. 이는 일반적으로 4월 달부터는 잎이 관찰되고 5월부터는 꽃눈이 관찰되기 시작하는 것과도 일치하는 결과라 할 수 있다. 또한 본 연구를 통해서는 피나무의 정확한 내생 휴면 종료 시기를 특정할 수 없지만 개화를 위한 가온 요구량 대비 1, 2월에 가온량이 매우 적어 이 범위 내에서는 가온 누적 시작 시기에 따른 개화 예측에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 1월 1일부터 5 ℃의 기준온도로 계산된 GDD로 예측된 모델에 의해 약 860 DD에서 1198 DD가 개화 기간으로 추정되었다. 하지만 기후 변화에 따라 겨울철 기온과 봄철 기온의 변동성이 증가하고 있기 때문에 보다 정확한 개화 예측을 위해서는 저온 요구량, 가온 요구량 및 기준온도에 관련된 심층적인 연구가 필요할 것이다. 이를 위해서 산악 지역에서의 개화기 장기간 모니터링 자료 구축이 요구되며 본 연구에서 제안한 모델의 추가적인 검증 작업과 이를 기반으로 한 정밀 예측이 필요할 것으로 보인다.

수목의 개화는 한 나무 내의 모든 꽃봉오리에서 일제히 일어나지 않으며, 특정한 분포를 따르게 된다. 연간 1회 개화하는 수목의 개화율 분포는 단봉형 분포를 보이게 되며 관측되는 개화율 분포는 각 꽃의 개화, 개화 유지, 개화 종료 현상이 통합되어 관찰된 결과이다. GDD 모델의 예측변수인 누적 GDD는 열요구량 충족 정도와 함께 누적된 시간의 흐름을 함께 반영하기 때문에 본 연구에서는 개화 현상의 변화를 반영하기 위해 누적 개화율 자료를 사용하여 모델을 구축하였다. 수목의 개화 시기는 일반적으로 개화 시작 시기, 만개기로 구분되어 제시되는 경우가 많은데, 누적 개화율을 활용한다면 개화의 진행 정도와 개화 기간을 표현할 수 있다는 점에서 양봉가들의 채밀 시기 결정에 도움이 될 것으로 생각된다. 또한 누적 개화율은 특정 시간 이후 앞으로 개화할 꽃들의 비율 정보도 함께 제공할 수 있으므로 이동 양봉가들의 경로 선택에 활용 가능할 것으로 예상된다. 따라서 피나무와 같은 밀원식물의 개화 진행을 경험적인 관측일 혹은 만개 예측일로 가늠하는 것 보다는 본 연구에서 제시한 누적 개화율 분포 모델을 사용하는 것이 개화 진행을 함께 예측할 수 있다는 점에서 활용 가능성이 높을 것이다. 향후 효율적인 산림 양봉을 위해서는 밀원수들의 산악지역을 포함한 전국적인 개화 모니터링 자료 구축과 예측 모델, 개화율 분포 모델 등의 개발이 필요할 것으로 생각된다.

적 요

본 연구는 국내 중요 밀원식물인 피나무가 주로 자생하는 산악 지역에서 개화시기를 예측하기 위해 수행되었다. 이를 위해 가리왕산 일대 해발 638m 지점 기준목에서 개화 진행을 모니터링 하고, 고도별 개화율을 관찰하였다. 또한 문헌자료, 웹자료, 개화 판별이 가능한 표본자료들을 수집하였다. 이 자료들을 이용하여 고도와 위도에 따른 개화기 변화를 확인하였다. 또한 누적 GDD를 이용하여 누적 개화율 모델을 개발하였다. GDD 계산은 5 ℃의 기준온도와 일별 최고, 최저 온도를 이용하였다. 일일 온일도를 1월 1일부터 누적할 경우 피나무 개화기는 860~1198 DD로 추정되었다. 이 결과는 산림양봉이 이루어지는 산악지역에서 개화기 예측과 채밀 가능기간을 추정에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술 연구개발사업‘(2021362E10-2223-BD01)’의 지원에 의하여 이루어진 것입니다. 조사를 도와주신 자연정원 권박사님께 감사드립니다.

REFERENCES

Andreini, L., I. G. de Cortázar-Atauri, I. Chuine, R. Viti, S. Bartolini, D. Ruiz, J. A. Campoy, J. M. Legave, J.-M. Audergon, and P. Bertuzzi, 2014: Understanding dormancy release in apricot flower buds (*Prunus armeniaca* L.) using several process-based phenological models. *Agricultural and Forest Meteorology* **184**(15), 210–219.

Batra, S. W. T., 1985: Red maple (*Acer rubrum* L.), an important early spring food resource for honey bees and other insects. *Journal of the Kansas Entomological Society* **58**(1), 169-172.

Cooke, J. E. K., M. E. Eriksson, and O. Junttila, 2012: The dynamic nature of bud dormancy in trees: environmental control and molecular mechanisms. *Plant, Cell and Environment* **35**, 1707-1728.

Han, J., S.-H. Kim, M.-S. Kang, C.-S. Kim, and E.-S. Baik, 2010: Flowering and nectar secretion characteristics of *Tilia amurensis* Rupr. and *Tilia manshurica* Rupr. et Max. *Journal of Apiculture*

25(3), 217-221.

Johnson, I. R., and J. H. M. Thornley, 1985: Temperature dependence of plant and crop processes. *Annals of Botany* **55**(1), 1-24.

Kim, J.-H., and J. I. Yun, 2008: On mapping growing degree-days (GDD) from monthly digital climatic surfaces for South Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **10**(1), 1-8. (in Korean with English abstract)

Kim, K., and Y. Chung, 1986: A study on the distribution of Genus *Tilia*. *Journal of Apiculture* **1**(1), 24-45. (in Korean with English abstract)

Kim, K., M.-Y. Lee, Y.-S. Choi, E.-J. Kang, H.-G. Park, B.-S. Park, O. Frunze, J.-G. 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. *Journal of Apiculture* **36**(1), 11-16. (in Korean with English abstract)

Kim, M.-S, H. Kim, S.-D. Kim, S.-J. Park, J.-H. Song, and S.-H. Kim, 2015: Pollinator visit, characteristics of secreted nectar and analysis of nectar sugar and amino acid contents in flower of *Dendropanax morbifera* Lev. *Journal of Apiculture* **30**(4), 307-314. (in Korean with English abstract)

Kim, M. S., S. H. Kim, J. Han, and J. S. Kim, 2012: Analysis of secretion quantity and sugar composition of nectar from *Tilia amurensis* Rupr. *Journal of Apiculture* **27**(1), 79-85.

Kim, S., T. K. Kim, S. Yoon, K. Jang, H. Lim, W. Y. Lee, M. Won, J.-H. Lim, and H. S. Kim, 2021b: Recent changes in bloom dates of *Robinia pseudoacacia* and bloom date predictions using a process-based model in South Korea. *Journal of Korean Society of Forest Science* **110**(3), 322-340. (in Korean with English abstract)

Kim, S. H., A. Lee, H. Y. Kwon, U. Lee, and M. S. Kim, 2017: Analysis of flowering and nectar characteristics of major four chestnut cultivars (*Castanea* spp.). *Journal of Apiculture* **32**(3), 237-246. (in Korean with English abstract)

Kim, Y., and S. Choi, 1988: Diurnal activity of the honeybees on the blosoms of *Tilia amurensis* Rupr. *Journal of Apiculture* **3**(2), 11-15. (in Korean with English abstract)

Kim, Y. K., J. H. Song, M. S. Park, and M. S. Kim, 2020: Analysis of nectar characteristics of *Idesia polycarpa*. *Journal of Korean Society of Forest Science* **109**(4), 512-520. (in Korean with English abstract)

Lee, H. S., J.-S. Lee, and B. H. Kwack, 1997: Effect of varied elevations of Kangwon province on growth and flowering of *Hibiscus syriacus*. *The Korean Institute of Landscape Architecture* **25**(3), 177-185. (in Korean with English abstract)

Lee, M., 1988: Characteristics of leaf morphology in the natural populations of a honey plant, *Tilia amurensis* Rupr. *Journal of Apiculture* **13**(1), 9-14. (in Korean with English abstract)

Lee, Y.-H., 2013: Economic potential and policy implications of agroforestry from US agroforestry cases. *Korean Journal of Forest Economics* **20**(1), 47-58. (in Korean with English abstract)

Miklos, F., E. Amnon, R. Lisa, W. Shiow, and N. Helen, 1995: Bud dormancy in perennial fruit trees: Physiological basis for dormancy induction, maintenance, and release. *HortScience* **32**(4), 623-629.

Murakami, S., C. Ishii, Z. Inaba, and S. Nakamura, 2009: Forecasting blooming date based on developmental rate of the ecodormancy stage in 'Kawazu-zakura' (*Prunus lannesiana* Wils. 'Kawazu-zakura') cherry trees. *Journal of Science and High Technology in Agriculture* **21**, 24-28.

Min, B. M., and J. K. Choi, 1993: A phenological study of several woody plants. *The Korean Journal of Ecology* **16**(4), 477-487. (in Korean with English abstract)

Park, M. S., and Y.-C. Youn, 2012: Traditional knowledge of Korean native beekeeping and sustainable forest management. *Forest Policy and Economics* **15**, 37-45.

Shafer, S. L., P. J. Bartlein, and R. S. Thompson, 2001: Potential changes in the distributions of western North America tree and shrub taxa under future climate scenarios. *Ecosystems* **4**, 200-215.

Sung, K.-C., and J.-W. Seo, 2004: Income enhancement measures of mountain area by using agroforestry. *Korean Journal of Forest Economics* **12**(1), 32-45. (in Korean with English abstract)

Szabo, B., E. Vincze, and B. Czúcz, 2016: Flowering phenological changes in relation to climate change in Hungary. *International Journal of Biometeorology* **60**, 1347-1356.

Sykes, M. T., I. C. Prentice, and W. Cramer, 1996: A bioclimatic model for the potential distributions of north European tree species under present and future climates. *Journal of Biogeography* **23**, 203-233.

Thompson, R., and R. M. Clark, 2006: Spatio-temporal modelling and assessment of within-

species phenological variability using thermal time methods. *International Journal of Biometeorology* **50**, 312− 322.

Woo, K.-S., H. J. Choe, and H.-J. Kim, 2003: A report on the occurrence of yellow locust midge *Obolodiplosis robiniae* (Haldeman, 1987) from Korea. *Korean Journal of Applied Entomology* **42**(1), 77-79. (in Korean with English abstract)

Yang, S., J. Logan, and D. L. Coffey, 1995: Mathematical formulae for calculating the base temperature for growing degree days. *Agricultural and Forest Meteorology* **74**, 61-74.

Youn, Y., and K. Ohba, 1990: In vitro plantlet regeneration from axillary buds of *Tilia amurensis* mature trees and clonal variation in tissue culturability. *Journal of Korean Forestry Society* **79**(2), 109-114.