

기온과 봄 식물계절지수와의 관계

장정걸¹, 유성태², 김병도³, 손성원⁴, 이명훈^{3*}

¹대구수목원, 소장, ²대구수목원 교육연구팀, 팀장, ³녹지연구소, ⁴국립수목원 식물자원연구과, 임업연구소

The Relationship Between Temperature and Spring Phytophenological Index

Jung Gul Jang¹, Sung Tae Yoo², Byung Do Kim³, Sung Won Son⁴ and Myung Hoon Yi^{3*}

¹Director, Daegu Arboretum, Daegu 42829, Korea

²Team Leader and ³Researcher, Division of Education and Research, Daegu Arboretum, Daegu 42829, Korea

⁴Researcher, Division of Plant Resources, Korea National Arboretum, Yangpyeong 12519, Korea

Abstract - In order to find out the relationship between spring phytophenological index and temperature index for the past nine years (2010~2018), this study identified the relationship between temperature changes and trends in spring phytophenological index of sprouting, flowering and leaf unfolding of *Pinus densiflora* Siebold & Zucc., *Larix kaempferi* (Lamb.) Carrière, *Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb., *Rhododendron mucronulatum* Turcz., *Lindera obtusiloba* Blume and *Acer pseudosieboldianum* (Pax) Kom. in Daegu Arboretum, Palgong mt., Juwang mt. and Gaya mt. The change in temperature was caused by an increase in the monthly average temperature between March and April compared to February for nine years, and the average temperature of Daegu Arboretum and Palgong mt. were higher by region. The sprouting, flowering and leaf unfolding were the fastest of the *Lindera obtusiloba* and the slowest of the *Pinus densiflora* for each species, and the fastest plant season in Daegu arboretum came. SPI (Spring Phytophenological Index) tends to advance by -1.267~-6.151/9 years, with the largest *Pinus densiflora* (-6.151/9 years), with the lowest rate of change for *Rhododendron mucronulatum* (-1.267 days/9 years). Species which shows significant values in sprouting, flowering and leaf unfolding is *Rhododendron mucronulatum* and *Pinus densiflora*, which correlate with the mean temperature of January to March. As a result of checking the time series change of SPI, the change rate in the four regions was all negative and the phenological index was all accelerating. Among them, the rate of change was greater in inland areas such as Daegu arboretum, Palgong Mt. and Gaya mt. and the rate of change was slightly lower in the case of Juwang mt., which is somewhat distant.

Key words - Accumulately temperature, Flowering, Leaf unfolding, Mean monthly temperature, Sprouting

서 언

최근에 일어나는 기후변화는 우리 삶에 큰 변화를 가져오고 있다. 특히 자연생태계에 있어 식물계절주기의 변화가 감지되었음이 밝혀졌다(Badeck *et al.*, 2004; Chmielewski and Rötzer, 2001; Choi *et al.*, 2016; Jeong *et al.*, 2013; Jung and Lee, 2018; Linderholm, 2006; Menzel *et al.*, 2006; Schwartz *et al.*, 2006). 기후변화로 인한 기온의 증가는 식물의 조기 개엽을 유발하고 이는 나뭇잎을 먹이로 하는 애벌레의 조기 발생으

로 이어져 애벌레의 소멸 또한 조기에 나타나며 애벌레를 먹이로 하는 철새는 먹이부족으로 개체수의 감소가 나타나고 있다 (Jung and Lee, 2018). 자연생태계의 공급자 역할을 하는 식물의 계절주기 변화는 먹이사슬의 구조 변화뿐만 아니라 종 간 생물계절의 비동조화를 발생시키고 이는 국지적인 절멸의 요인으로 작용할 수 있다(Kang, 2013). 또한 곤충의 서식지 복상, 새의 산란시기 및 철새의 도래시기 변화, 어류의 산란시기 변화, 작물 및 과수의 생육 기간 및 생산량 변화 등(Lee *et al.*, 2009) 식물, 곤충, 동물, 농업 등 다양한 분야에 영향을 미치고 있다.

식물계절(Phenology)은 식물이 계절을 따라 주기적으로 나타나는 발아, 개화, 낙화, 개엽 및 낙엽, 단풍, 열매 생성과 결실

*교신저자: E-mail sorbus@korea.kr
Tel. +82-53-803-7313

등을 말한다. 봄 식물계절이란 발아, 개화, 개엽을 말하며 이러한 식물의 개화 및 개엽에 영향을 주는 기후인자는 온도, 수분, 광량 등 다양하나, 특히 겨울 및 봄철의 온도가 가장 민감한 요인이다(Chmielewski *et al.*, 2004; Jo and Ahn, 2008). 미래의 기후변화에 의한 부정적인 영향을 최소화하기 위해서는 식물계절주기에 관한 모니터링이 반드시 필요하다(Choi *et al.*, 2016). 식물계절은 장기간의 모니터링을 통해 이루어지며 최근에는 기후변화와 전 지구적인 기온상승의 잠재적인 영향을 평가하는데 중요한 지표로 인식하고 있다(Lee *et al.*, 2009; Sagarin and Micheli, 2001; Whitfield, 2001). 식물계절 연구는 기후변화가 식물에게 어떤 영향을 미치는지에 대해 쉽게 인식할 수 있어 가장 효율적이며(Donnely *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2011; Schwartz, 1999), 매년 반복되기 때문에 기후변화의 지표가 된다(Kim *et al.*, 2011)

봄 식물계절은 온도에 민감하여(Lechowicz, 1995) 온도 변화와 밀접한 관계가 있는 것으로 보고되었다(Jo and Ahn, 2008). 최근에는 위성영상을 이용하여 식물계절을 분석한 결과 국내 산림지역의 생육개시일은 4월 평균기온과 상관관계가 높지만(Choi *et al.*, 2016), 이는 식물종마다 다르며 일반적으로 식물의 생육이 시작하는 달과 2개월 전의 월평균 기온이 식물의 생육에 중요하다고 알려져 있다(Jung and Lee, 2018; Menzel *et al.*, 2006). 지금까지 봄 식물의 계절시기와 기온간의 상관관계에 관한 연구(Choi *et al.*, 2016; Fitter *et al.*, 1995; Jung and Lee, 2018; Spark *et al.*, 2000; Walkovszky, 1998), 식물종을 대상으로한 개화시기 연구(Ho *et al.*, 2006; Lee and Lee, 2003), 재배조건에 따른 식물 생육에 관한 연구(Lee *et al.*, 2020), 특정 지역 내 기후변화 취약식물종을 중심으로 식물계절 변화에 관한 연구(Jo and Ahn, 2008; Kim *et al.*, 2011) 등 다양한 연구가 이루어졌지만, 작물의 생육조건 및 생육시기에 관한 연구(Heo *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2008; Jung and Lee, 2018; Kitazono *et al.*, 2012)는 활발한 반면 산림식물종을 대상으로 한 연구는 식물종 1종을 대상으로 하거나, 특정 1개의 지역을 대상으로 하는 연구로 국한되어 있다.

이에 본 연구는 다양한 지역과 다양한 식물종에 대한 기온과 봄 식물계절과의 관계를 알아보기 위해 지난 9년간(2010년~2018년) 대구수목원(대구 달서, 이하 '수목원'), 팔공산(경북 군위), 주왕산(경북 청송), 가야산(경북 성주)에 공통적으로 생육하는 소나무(*Pinus densiflora* Siebold & Zucc.), 일본잎갈나무(*Larix kaempferi* (Lamb.) Carrière), 신갈나무(*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb.), 진달래(*Rhododendron mucronulatum* Turcz.), 생강나무(*Lindera obtusiloba* Blume), 당단풍나무(*Acer pseudosieboldianum* (Pax) Kom.) 6종을 대상으로 수행하였다. 이를 대상으로 발아, 개화, 개엽의 봄 식물계절 시기의 변화 경향과 기온간의 관계를 파악하여 기후변화에 따른 산림식물종의 변화 양상을 확인하고 향후 기후변화에 따른 산림식물종의 보전에 필요한 식물 생육의 장기변화 경향을 확인하고자 한다.

재료 및 방법

연구대상지

본 연구는 기후변화와 가장 민감한 봄 식물계절과 기온지표와의 관계를 알아보기 위해 수목원(대구 달서), 팔공산(경북 군위), 주왕산(경북 청송), 가야산(경북 성주)에 공통적으로 생육하는 소나무, 일본잎갈나무, 신갈나무, 진달래, 생강나무, 당단풍나무 6종을 대상으로 하였다(Fig. 1, Table 1).

대구시 달서구의 도시에 위치하는 수목원(93 m), 태백산맥의 남단에 자리하는 팔공산(1,193 m) 및 경북 성주와 경남 합천에 잇대어 위치한 가야산(1,433 m)은 기후지역상 온대남부에 속하고, 식물분포학상으로 남부아구(Lee and Yim, 2002), 식생군계수준으로 냉온대(Yim and Kira, 1975), 한국생물기후구의 지역생물기후구-대구형에 속한다(Kim, 2004). 한편, 경북 청송과 영덕에 잇대어 위치한 주왕산(720 m)은 기후지역상 온대중부에 속하고, 식물분포학상으로 중·남부아구(Lee and Yim, 2002), 식생군계수준으로 냉온대(Yim and Kira, 1975), 한국생물기후구의 지역생물기후구-대구형에 속한다(Kim, 2004).

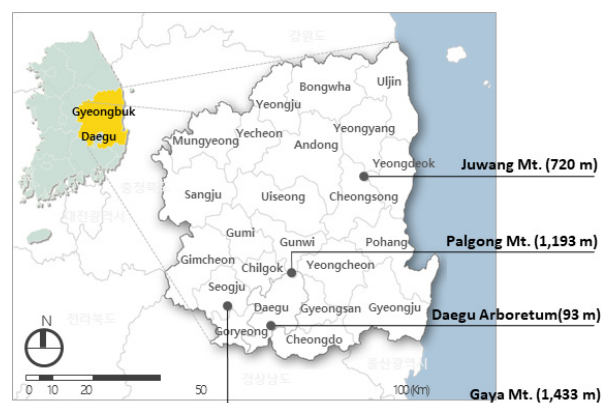


Fig. 1. The studied plot.

Table 1. The studied plot and GPS

	Daegu Arboretum	Palgong mt.	Juwang mt.	Gaya mt.
<i>Pinus densiflora</i>	N35°48'04.1"	N36°01'44.90"	N36°23'47.7"	N35°49'14.1"
	E128°31'14.4"	E128°37'50.70"	E129°08'56.5"	E128°07'27.6"
	78m	519m	310m	1,180m
<i>Larix kaempferi</i>	N35°47'48.7"	N36°01'41.07"	N36°23'47.8"	N35°47'18.2"
	E128°31'30.7"	E128°37'50.20"	E129°08'56.3"	E128°08'30.5"
	98m	522m	300m	1,100m
<i>Quercus mongolica</i>	N35°48'03.6"	N36°01'52.00"	N36°23'46.7"	N35°49'14.0"
	E128°31'12.7"	E128°37'34.20"	E129°08'56.1"	E128°07'27.6"
	78m	523m	320m	1,300m
<i>Rhododendron mucronulatum</i>	N35°47'46.1"	N36°01'42.00"	N36°23'47.2"	N35°48'25.6"
	E128°31'35.6"	E128°37'50.50"	E129°08'56.1"	E128°08'38.3"
	92m	520m	314m	560m
<i>Lindera obtusiloba</i>	N35°48'01.7"	N36°01'41.80"	N36°23'47.6"	N35°48'40.8"
	E128°31'18.9"	E128°37'51.70"	E129°08'55.5"	E128°08'19.1"
	79m	522m	298m	610m
<i>Acer pseudosieboldianum</i>	N35°48'03.0"	N36°01'40.70"	N36°23'47.1"	N35°48'54.9"
	E128°31'10.3"	E128°37'50.30"	E129°08'54.7"	E128°08'04.7"
	81m	525m	300m	720m

기상자료

기상측정은 기후변화 취약 산림식물종(Korea Forest Service and Korea National Arboretum, 2009)이 분포하는 각 지역에 기상장비(TMB-M006, Hobo Inc.)를 설치하였다. 기상장비의 위치는 수목원(N 35°09'40.8", E128°31'16.6", 50 m), 팔공산(N 35°57'14.21", E128°41'37.07", 150 m), 주왕산(N36°23'47.6", E 129°08'54.4", 가야산(N35°47'23.8", E128°08'52.8", 400 m)이며, 2010년 1월 1일부터 2018년 12월 31일까지의 기온변화추이를 기록하였다.

봄 식물계절 시기의 변화

조사대상종은 현지 내(팔공산, 주왕산, 가야산)와 현지 외(수목원) 4개 지역에 공통적으로 분포하는 6종을 선정하였다. 조사 대상종에 GPS (GPS60CS, Garmin Inc.)를 이용하여 위·경도와 해발고도를 기록하고(Table 1), 각 식물마다 인식용 표찰을 부착하였으며 2010년 3월부터 2018년 5월까지 주 1회 조사를 원칙으로 발아, 개엽, 개화시기의 변화를 기록하였다. 모든 기록은 조사대상개체와 인근 동일종간의 오차를 줄이기 위해 주변 동일종 3개체를 관찰한 후 평균을 고려하여 기록하였다.

발아시기는 칩엽수의 경우 잎눈이 최소 세 곳에서 새롭게 생

성된 줄기 중 처음 잎눈이 터져 잎다발이 보이기 시작할 때, 활엽수의 경우 잎눈이 터지거나 혹은 꽃눈이 파열되어 처음 관찰되었을 때를 기준으로 하였다(Korea Forest Service and Korea National Arboretum, 2013). 개엽시기는 칩엽수의 경우 식물의 최소 세 곳에서, 아린이 벗겨져 잎이 보이고 전체가 갈라졌을 때, 활엽수의 경우 최소 세 곳에서 완전히 퍼진 잎이 나올 때를 측정하였다(Korea Forest Service and Korea National Arboretum, 2013). 개화시기는 칩엽수의 경우 최소 세 곳에서 수꽃 화서가 완전히 벌어지거나, 가볍게 흔들어 꽃가루가 날릴 때를 측정하였으며 활엽수의 경우 최소 세 곳에서 개화된 꽃이 처음 관찰되었을 때를 측정하였다(Korea Forest Service and Korea National Arboretum, 2013).

기온과 봄 식물계절 시기 변화와의 관계

기온과 봄 식물계절 시기 변화와의 관계를 알아보기 위해 평균기온과 4개 지역 공통종 6종의 발아, 개엽, 개화시기의 봄 식물계절시기를 산출하였다. 조사대상종 6종은 모두 봄철에 꽃눈이 발아하고, 이후 개엽 혹은 개화시기를 마친다. 봄철 생육의 경우 기온의 영향이 매우 중요하며(Lechowicz, 1995), 식물의 생육은 앞선 시기의 기후가 누적되어 나타나므로(Lee *et al.*,

2008; Sparks *et al.*, 2000) 기온과 봄 식물계절지수와의 관계를 알아보기 위해 1월부터 5월까지의 월별평균기온, 일적산온도(YDI, 일평균기온이 0°C 이상의 값을 누적한 일적산온도), 온량지수(Tn, 연중 일평균기온이 5°C 보다 높은 날이 6일 이상 지속되고 그로부터 일평균기온이 5°C 미만인 날이 6일 이상 지속되었을 때 사이의 일수) 및 발아누적온도(SCT: Sprouting cumulative temperature, 1월 1일부터 발아가 시작될 때까지의 누적 일적산온도)를 이용하였다.

봄 식물계절시기의 자료는 1월 1일을 1로, 12월 31일을 365로 계산하여 각 연도별 발아, 개엽 및 개화시기를 변환하였다. 최초 조사·기록한 2010년을 기준으로 연도별로 대상수종의 발아, 개엽, 개화시기를 각각 평균하여 봄 식물계절지수(SPI, Spring Phytophenological Index)를 산출하고(Lee *et al.*, 2009), 이들의 평균변화율을 계산하였다. 이상의 자료를 대상으로 기온자료를 종속변수로 연도를 독립변수로 하여 시기별 변화를 도출한 후 9년간의 변화양상을 파악하였다.

봄 식물계절지수와 기온지표와의 상관관계를 분석한 후 상관성이 높은 기온지표를 중심으로 발아일수와 기온지표와의 관계를 회귀분석으로 변화율을 구하여 식물계절 시기의 장기적인 변화 특성을 분석하였다. 또한 이러한 관계를 지역별, 식물별로 구분하여 분석하였다.

결과 및 고찰

기온변화

연구대상지 4개 지역의 9년간 연평균기온을 측정한 결과 수목원 13.08°C, 팔공산 11.70°C, 주왕산 9.95°C, 가야산 10.40°C로 나타났다. 연도별 월평균기온 변화를 확인한 결과, 1월 평균 0.330°C/년, 2월 평균 0.091°C/년, 3월 평균 0.351°C/년, 4월 평균 0.447°C/년, 5월 평균 0.250°C/년의 증가율을 보였다(Fig. 2). 최근 들어 1월 최한월의 기온이 상승하였고, 식물의 발아가 시작되는 3월과 4월의 기온 상승률이 뚜렷함을 확인하였다. 지역별로 수목원은 0.347°C/년, 팔공산 0.150°C/년, 주왕산 0.359°C/년, 가야산 0.320°C/년으로 나타나 수목원은 연평균 기온도 높고 월평균기온의 증가율도 높았으며, 주왕산의 경우 연평균기온은 낮지만 3~5월의 월 평균기온의 높은 증가율을 확인하였다(Fig. 2).

봄 식물계절시기의 변화

봄 식물계절시기의 변화 경향을 알아보기 위해 4개 지역 6개

수종의 발아, 개엽, 개화시기의 시계열 변화를 분석하였다(Fig. 3). 발아시기는 수종의 경우 생강나무(79.53일)가 가장 일찍 발아하였으며, 소나무(126.38일)가 가장 늦었다(Fig. 3A). 평균 발아시기는 연도의 경우 2014년(93.9일)이 가장 빨랐으며, 2010년(110.8일)이 가장 늦어 그 차이는 약 17일에 이르고(Fig. 3A), 지역의 경우 수목원 90.02일, 주왕산 99.86일, 팔공산 102.81일, 가야산 103.06일의 순으로 나타났다(Fig. 3A). 개화시기는 수종의 경우 생강나무(86.02일)가 가장 일찍 개화하였으며, 소나무(132.14일)가 가장 늦게 개화하였다(Fig. 3B). 평균 개화시기는 연도의 경우 2018년(102.7일)이 가장 빨랐으며, 2010년(121.2일)이 가장 늦어 그 차이는 약 19일에 이르고(Fig. 3B), 지역의 경우 수목원 98.07일, 주왕산 109.70일, 팔공산 111.77일, 가야산 116.15일의 순으로 나타났다(Fig. 3B). 개엽시기는 수종의 경우 일본잎갈나무(109.12일)가 가장 빨랐으며, 소나무(161.49일)가 가장 늦게 개엽하였다(Fig. 3C). 평균 개엽시기는 연도의 경우 2018년(107.3일)이 가장 빨랐으며, 2010년(133.4일)이 가장 늦어 그 차이는 약 16일에 이르고(Fig. 3C), 지역의 경우 수목원 119.33일, 주왕산 120.28일, 팔공산 122.57일, 가야산 124.96일의 순으로 나타났다(Fig. 3C).

해발고도별로 차이를 알아보기 위해 수목원 내 수종이 분포하는 100 m 이하, 주왕산 내 수종이 분포하는 300 m 내외, 팔공산 수종과 가야산의 진달래와 생강나무가 분포하는 500~600 m 및 가야산 내 소나무, 일본잎갈나무, 신갈나무가 분포하는 1,100 m 이상(가야산 당단풍은 제외함)으로 구분하였다. 평균 발아시기는 100 m 이하(90.02일)가 가장 빨랐으며, 1,100 m (114.50일) 이상이 가장 늦어 그 차이는 약 24.5일에 이르며, 평균 개화시기는 100 m 이하(98.07일)가 가장 빨랐으며, 1,100 m (131.68일) 이상이 가장 늦어 그 차이는 약 33.61일에 이르고, 평균 개엽시기 또한 100 m 이하(119.33일)가 가장 빠르며, 1,100 m (133.45일) 이상이 가장 늦어 그 차이는 약 14.1일에 이른다. 발아·개화·개엽 모두 100 m 이하가 가장 빠르며, 1,100 m 이상이 가장 느려 해발고도에 따른 봄 식물계절의 차이를 확인할 수 있었다(Table 2).

지역별 식물의 평균 식물계절시기의 변화율을 분석한 결과, 봄 식물계절시기는 -1.267~-6.151일/9년 정도 양당겨지고 있는 경향을 보인다(Table 3). 소나무의 개엽시기 변화율이 -6.151일/9년으로 가장 빠르며, 진달래의 발아시기 변화율이 -1.267일/9년으로 가장 느렸다. 수종별로 변화율을 확인한 결과 발아, 개화, 개엽 모두에서 유의한 값을 보이는 수종은 진달래와 소나무로 나타났으며, 개엽의 경우 신갈나무, 일본잎갈나무, 생강

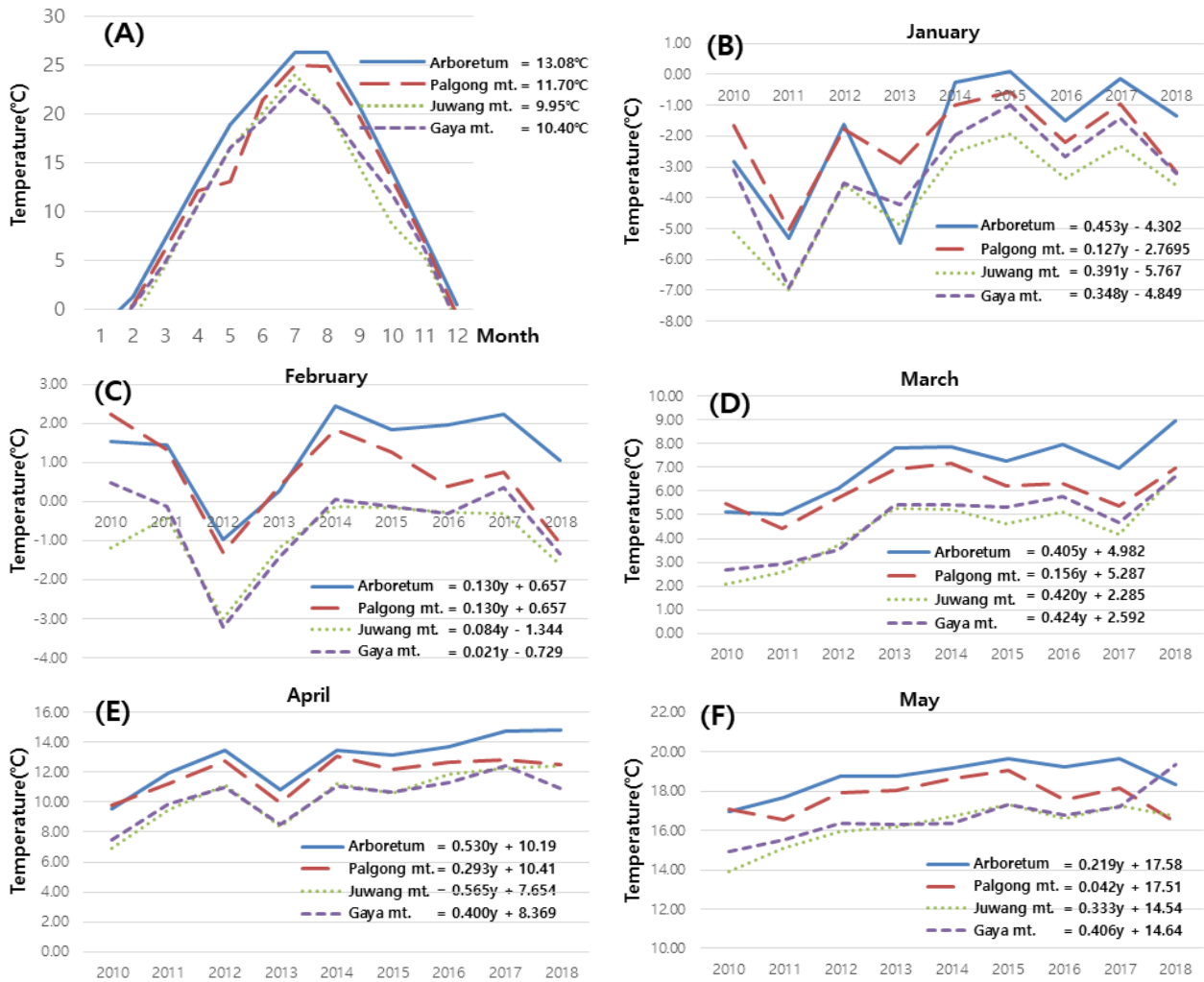


Fig. 2. The Change of mean monthly temperature. A: Mean monthly temperature, The Change of mean monthly temperature in January(B), February(C), March(D), April(E) and May(F).

나무까지 당단풍나무를 제외한 모든 수종에서 유의한 변화율을 보였다(Table 3). 변화율의 편차는 0.330~1.871로 크지 않은 것으로 나타났다.

식물의 평균 발아일은 3월 중순 전후 생강나무와 진달래, 3월 말~4월초 일본잎갈나무와 당단풍나무, 4월 중순 이후 신갈나무와 소나무가 발아하는 것을 확인하였다(Table 3). 일반적으로 초봄의 기온변화는 늦봄보다 더욱 뚜렷하여 평균 개화일이 빠른 식물일수록 늦은 식물에 비해 개화일이 더욱 빨라지거나 (Lu *et al.*, 2006), 1945년~2007년까지의 기상청 관측 자료를 바탕으로 확인한 결과 3월 발아 혹은 개화 수종의 변화율이 4월 발아 혹은 개화 수종보다 빠르다(Lee *et al.*, 2009). 하지만, 본 연구에서는 일찍 발아하는 수종일수록 변화율이 느리며, 4월 이

후 발아하는 수종일수록 변화율이 빠르게 나타났다. 이는 본 연구기간동안 월평균기온의 변화가 2월간의 기온상승보다 3~4월사이의 기온상승이 더욱 높았으며, 특히 9년간 월 평균기온의 변화율이 4월에서 제일 빨랐기 때문인 것으로 판단된다.

기온과 봄 식물계절시기 변화와의 관계

봄의 온도는 식물의 봄철 생육에 영향을 미치고(Lechowicz, 1995), 겨울과 봄의 온도는 식물의 개화나 개엽에 가장 많은 영향을 주는 인자이다(Chmielewski *et al.*, 2004). 이 중 생육개시일 예측을 위해 주로 이용하는 기온관련 변수는 2월, 3월, 4월 평균기온, 일적산온도(YDI), 온량지수(Tn) 등이 있다(Cannell and smith, 1983; Chmielewski and Rötzer, 2001; Choi *et al.*,

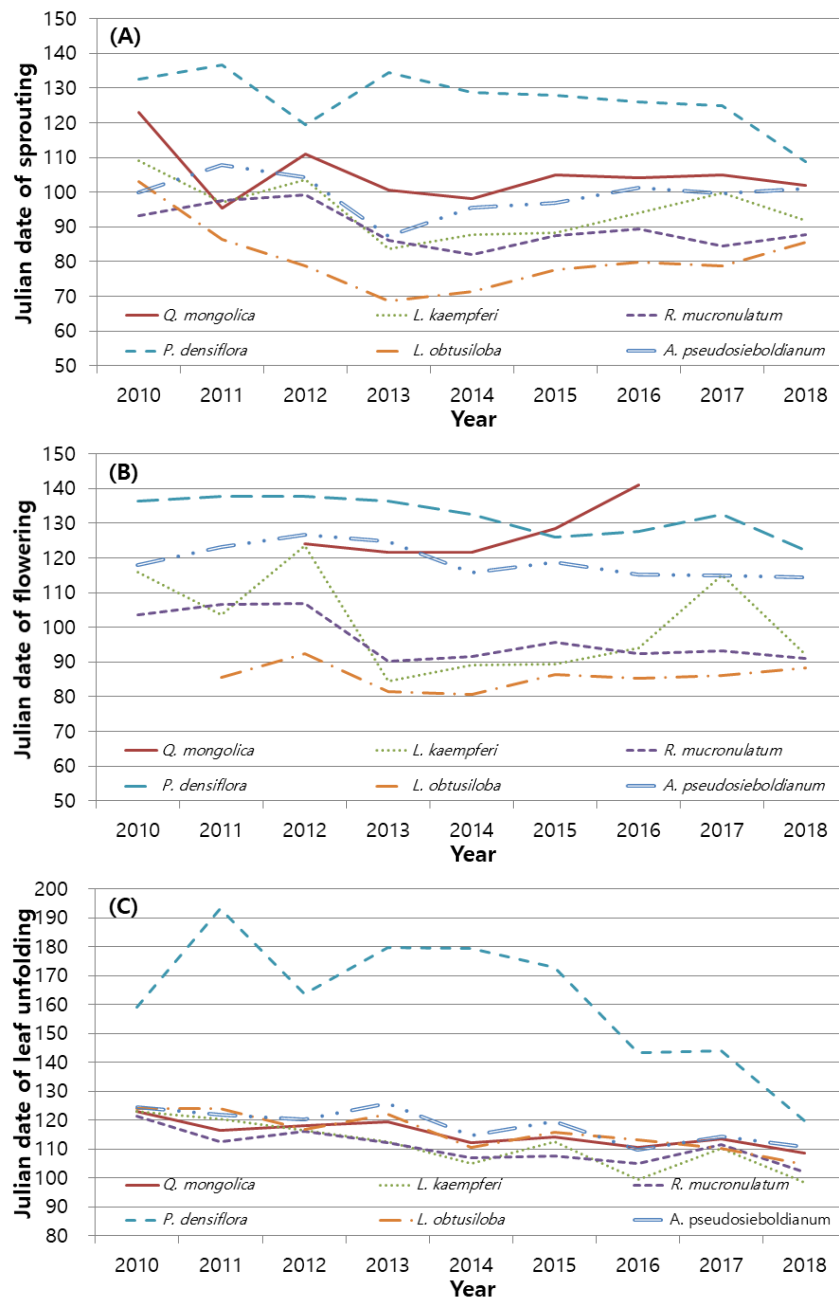


Fig. 3. The change of time series in Sprouting Phenological Index(A), flowering phenological index(B) and leaf unfolding phenological index(C).

Table 2. A changing trend of spring phytophenological index according to height

Index \ Height	Below 100m	Around 300m	500~600m	More than 1,100m
Sprouting	90.02	99.67	99.86	114.50
flowering	98.07	108.02	109.70	131.68
leaf unfolding	119.33	120.96	120.28	133.45
Average	102.47	109.55	109.95	126.55

Table 3. A changing trend of spring phytophenological index

		Daegu Arboretum	Palgong mt.	Juwang mt.	Gaya mt.	Total	rate of change	Sig.	SE
Sprouting	<i>Q. mongolica</i>	90.0	104.8	100.6	123.7	104.8	-1.880	0.061	0.642
	<i>L. kaempferi</i>	84.3	100.8	95.4	90.0	92.6	0.599	0.412	0.630
	<i>R. mucronulatum</i>	74.8	92.3	96.2	91.1	88.6	-1.267	0.046*	0.383
	<i>P. densiflora</i>	123.3	125.1	125.1	134.1	126.9	-3.262	0.007*	0.487
	<i>L. obtusiloba</i>	62.6	99.7	78.5	79.8	80.1	-0.743	0.677	1.613
	<i>A. pseudosieboldianum</i>	92.4	97.5	104.6	106.3	100.2	-0.904	0.282	0.691
flowering	<i>Q. mongolica</i>	122.0	112.0	120.3	138.5	123.2	-1.700	0.416	1.300
	<i>L. kaempferi</i>	85.4	109.8	95.2	105.0	98.8	-2.965	0.333	2.572
	<i>R. mucronulatum</i>	84.2	99.0	101.6	100.4	96.3	-2.518	0.018*	0.538
	<i>P. densiflora</i>	121.1	130.4	130.1	146.4	132.0	-1.922	0.010*	0.330
	<i>L. obtusiloba</i>	72.9	94.6	84.5	89.1	85.3	-0.110	0.827	0.462
	<i>A. pseudosieboldianum</i>	112.7	118.5	115.6	124.0	117.7	-2.112	0.033*	0.564
leaf unfolding	<i>Q. mongolica</i>	99.0	115.0	113.1	131.9	114.8	-1.651	0.045*	0.497
	<i>L. kaempferi</i>	104.5	114.2	113.9	105.1	109.4	-2.306	0.013*	0.439
	<i>R. mucronulatum</i>	104.0	113.0	113.8	110.3	110.3	-1.648	0.043*	0.489
	<i>P. densiflora</i>	183.3	158.0	145.2	159.6	161.5	-6.151	0.046*	1.871
	<i>L. obtusiloba</i>	105.5	118.0	116.6	120.6	115.2	-2.138	0.016*	0.438
	<i>A. pseudosieboldianum</i>	114.4	117.2	117.6	121.3	117.6	-1.910	0.064	0.667

*p < 0.05

Table 4. The relationship between temperature and spring phytophenological index

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	YDI	Tn	SCT
<i>Q. mongolica</i>	-.253	-.338	-.600**	-.605**	-.618**	.828**	.793**	.763**
<i>L. kaempferi</i>	-.017	-.176	-.305	-.058	-.345	.810**	.723**	.590**
<i>R. mucronulatum</i>	-.392*	-.594**	-.758**	-.417*	-.704**	.716**	.528**	.139
<i>P. densiflora</i>	-.269	-.003	-.356*	-.567**	-.217	.842**	.831**	.723**
<i>L. obtusiloba</i>	-.114	-.243	-.344	.089	-.403*	.808**	.691**	.488**
<i>A. pseudosieboldianum</i>	-.432*	-.722**	-.623**	-.286	-.655**	.541**	.594**	.113

*p < 0.05, **p < 0.01

2016; Jo and Ahn, 2008; Nuttonson, 1948). 기존의 연구를 토대로 각 지역별 발아일수와 다양한 기온지표(1-5월 월평균기온, 일적산온도, 온량지수, 발아누적온도)와의 상관관계를 분석한 결과, 6종 모두 일적산온도(YDI), 온량지수(Tn), 발아누적온도와 정의 상관관계를 보였다(Table 4). 발아, 개화, 개엽 모두 변화 경향이 유의한 것은 진달래와 소나무로 나타났으며, 진

달래의 경우 1월부터 5월까지의 월평균기온과 정의 상관관계를 보이며, 소나무의 경우 3월, 4월 평균기온이 정의 상관관계를 보였다(Table 4).

특히, 3월 중순에 발아를 시작하여 3월말~4월초에 개화하는 진달래와 4월말~5월초에 발아를 시작하여 5월 중순 전후에 개화하는 소나무의 경우 1월~3월 평균기온과 상관관계를 보이

고 있어 생육이 시작하는 달과 2개월 전의 월평균기온이 중요하다는 기존 연구(Jung and Lee, 2018; Menzel *et al.*, 2006)와 유사한 것으로 나타났다.

봄 식물계절 시기의 장기 변화 경향을 파악하고자 2010년~2018년 동안 봄 식물계절지수(SPI)의 시계열 변화를 확인하였다. 수목원, 팔공산, 주왕산, 가야산 모두 SPI 변화율이 음의 값으로 식물계절 시기가 모두 빨라지고 있었다(Fig. 4A). 팔공산 -3.935일/9년, 가야산 -3.697일/9년, 수목원 -3.474일/9년, 주왕산 -1.604일/9년의 순서로 봄 식물계절 시기의 변화가 빠른

것을 확인하였다(Fig. 4A).

80년(1921~2007년) 이상의 장기간 봄 식물계절 관측 자료를 바탕으로 분석한 전국 8개소(강릉, 서울, 인천, 대구, 전주, 부산, 목포, 제주)의 SPI 값의 경우 대구 -3.11일/10년로 가장 빠른 변화율을 보였으며 제주는 -1.4일/10년로 봄 식물계절 시기의 변화 폭이 느렸다(Lee *et al.*, 2009). 기존 연구와 10년이 지난 현재 주왕산을 제외한 수목원, 가야산, 팔공산 지역이 모두 3.4일~3.9일 정도 빠른 변화율을 보이고 있어, 최근 기후변화의 양상이 더욱 빨라졌음을 확인하였다. 주왕산의 경우 연평균기온이 다소 낮고 내륙과 떨어져 있어 변화율이 상대적으로 느린 것으로 판단된다.

봄 식물계절 시기 변화율이 유의한 진달래와 소나무의 변화율은 지역별로 다르게 나타났는데, 진달래의 경우 수목원 -2.19일/년, 팔공산 -1.53일/년, 가야산 -1.46일/년, 주왕산 -1.44일/년(Fig. 4B)의 순서로, 소나무의 경우 팔공산 -4.98일/년, 수목원 -3.11일/년, 가야산 -2.88일/년, 주왕산 -2.40일/년(Fig. 4C)의 순서로 변화율이 빠르게 나타났다. 수종별로 변화율은 다르지만, 수목원과 팔공산 지역에서 진달래와 소나무 모두 빠르게 나타났다. 특히 해안 지역보다 내륙에서 봄 식물계절시기가 앞당겨지며(Lee *et al.*, 2009), 지역의 규모가 크고 산업화 및 공업화된 도시의 개화시기가 앞당겨지고 있는데(Lee and Lee, 2003) 본 연구에서도 내륙 분지에 속하는 대구와 팔공산 지역의 변화율이 빠른 것으로 나타났다.

적 요

본 연구는 봄 식물계절지수와 기온지표와의 관계를 알아보기 위해 지난 9년간(2010년~2018년) 대구수목원, 팔공산, 주왕산, 가야산에 공통적으로 생육하는 소나무, 일본잎갈나무, 신갈나무, 진달래, 생강나무, 당단풍나무 6종을 대상으로 발아, 개화, 개엽의 봄 식물계절 시기의 변화 경향과 기온간의 관계를 파악하였다. 기온의 변화는 9년동안 2월 보다 3~4월의 월평균기온이 증가하였으며, 지역별로 수목원과 팔공산의 평균기온이 높았다. 발아, 개화, 개엽은 수종별로 생강나무가 가장 빠르며 소나무가 가장 느렸고, 지역별로 수목원에서 가장 빨리 식물계절시기가 도래하였다. 봄 식물계절시기는 -1.267~-6.151일/9년 정도 앞당겨지고 있는 경향을 보이는데 소나무(-6.151일/9년)가 가장 크며, 진달래(-1.267일/9년)의 변화율이 가장 낮았다. 발아, 개화, 개엽에서 모두 유의한 값을 보이는 수종은 진달래와 소나무로서 이들은 1월~3월 평균기온과 상관관계를 보였

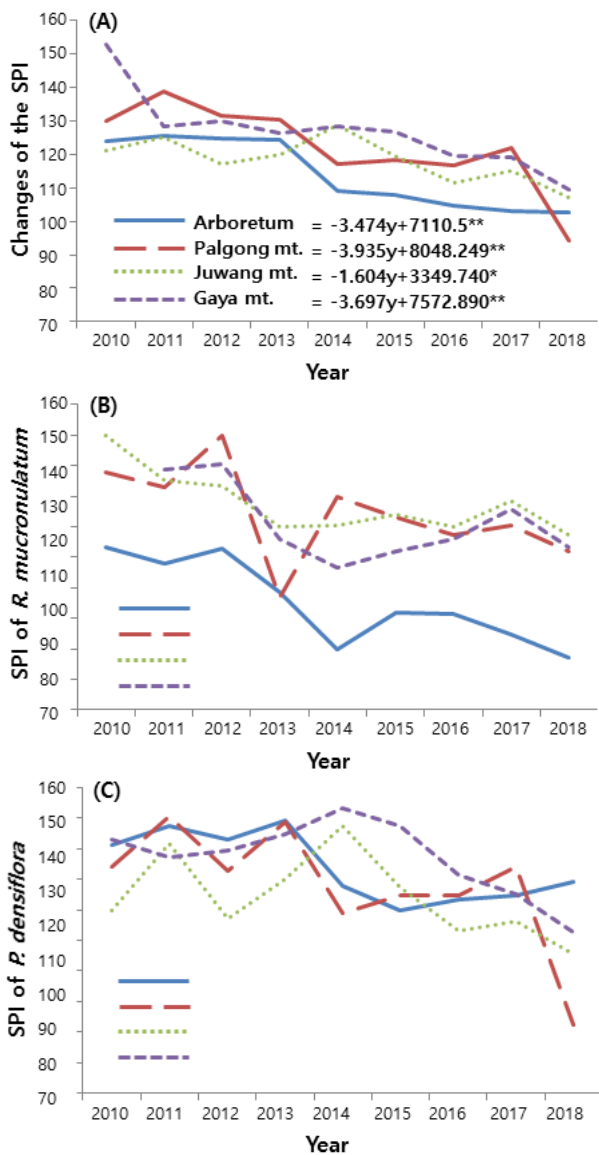


Fig. 4. The change of time series in SPI (A) and changing the SPI time series of *R. mucronulatum* (B) and *P. densiflora* (C).

다. 봄 식물계절지수(SPI)의 시계열 변화를 확인한 결과 4개 지역의 변화율이 모두 음의 값으로 식물계절 시기가 모두 빨라지고 있었다. 그 중 수목원, 팔공산 및 가야산과 같은 내륙지역일 수록 변화율이 컸으며, 다소 거리가 떨어진 주왕산의 경우 변화율이 조금 낮게 나타났다.

사 사

본 연구는 국립수목원 연구의 “기후변화 취약 산림식물종 보전·적응 사업”지원에 의해 수행된 결과로서 이에 감사드립니다.

References

- Badeck, F.W., A. Bondeau, K. Böttcher, D. Doktor, W. Lucht, J. Schber and S. Sitch. 2004. Responses of spring phenology to climate change. *New Phytol.* 162(2):295-309.
- Cannell, M.G.R. and R.I. Smith. 1983. Thermal time, chill days and prediction of budburst in *picea sitchensis*. *J. Appl. Ecol.* 20(3):951-963.
- Chmielewski, F.M. and T. Rötter. 2001. Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agric. Forest Meteorol.* 108(2):101-112.
- Chmielewski, F.M., A. Müller and E. Bruns. 2004. Climate change and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961-2000. *Agric. Forest Meteorol.* 121:69-78.
- Choi, C.H., S.G. Jung and K.H. Park. 2016. Analyzing relationship between satellite-based plant phenology and temperature. *Journal of the KAGIS.* 19(1):30-42 (in Korean).
- Donnelly, A., M.B. Jones and J. Sweeney. 2004. A review of indications of climate change for use in Ireland. *Int. J. Biometeorol.* 48:1-12.
- Fitter, A.H., R.S.R. Fitter, I.T.B. Harris and M.H. Williamson. 1995. Relationship between first flowering data and temperature in the flora of a locality in central England. *Funct. Ecology* 9:55-60.
- Heo, I.H., S.Y. Kim, K.M. Lee, W.T. Kwon and S.H. Lee. 2008. Impacts of climate change on agriculture in Naju. *J. Clim. Res.* 3(1):17-30 (in Korean).
- Ho, C.H., E.J. Lee, I. Lee and S.J. Jeong. 2006. “Earlier spring in Seoul, Korea”. *Int. J. Climatol.* 26:2117-2127.
- Jeong, S.J., C.H. Ho, S.D. Choi, J.W. Kim, E.J. Lee and H.J. Gim. 2013. Satellite data-based phenological evaluation of the nationwide reforestation of South Korea. *PLoS ONE.* 8(3):e58900.
- Jo, H.K. and T.W. Ahn. 2008. Differences in phenological phases of plants subsequent to microclimate change. *Korean J. Environ. Ecol.* 22(3):221-229 (in Korean).
- Jung, E.J. and S.H. Lee. 2018. The relationship between air temperature variability and the growth date of *Citrus unshiu* in Jeju and Seogwipo. *J. Clim. Res.* 13(2):119-130 (in Korean).
- Kang, H.S. 2013. Ecological responses of plants to climate change: Research trends and its applicability in Korea. *Korean J. Ecol. Environ.* 46(3):319-331 (in Korean).
- Kim, H.J., J.K. Hong, S.C. Kim, S.H. Oh and J.H. Kim. 2011. Plant phenology of threatened species for climate change in sub-alpine zone of Korea - Especially on the summit area of Mt. Deogyusan -. *Korean J. Plant Res.* 24(5):549-556 (in Korean).
- Kim, J.W. 2004. *Vegetation Ecology.* World Science Publishing Co., Seoul, Korea. pp. 1-308 (in Korean).
- Kitazono, K., Y. Kawakubo and K. Fujita. 2012. Effects of global warming on cultivation of Satsuma Mandarin in Kumamoto prefecture. *Research Bulletin of the Kumamoto Prefectural Agricultural Research Center* 19:1-17 (in Japanese).
- Korea Forest Service and Korea National Arboretum. 2009. *Manual of conservation project of threatened plants for climate change.* Korean Moonhwa-Printing Association of Person With Disabilities, Seoul, Korea. pp. 11-13. (in Korean).
- _____. 2013. *Manual of conservation project of threatened plants for climate change.* Sumeungil Publishing Co., Seoul, Korea. pp. 31-34 (in Korean).
- Lechowicz, M.J. 1995. Seasonality of flowering and fruiting in temperate forest trees. *Can. J. Bot.* 73(2):175-182.
- Lee, K.M., W.T. Kwon and S.H. Lee. 2009. A study on plant phenological trends in South Korea. *Journal of KARG.* 15(3):337-350 (in Korean).
- Lee, S.H., I.H. Heo, K.M. Lee, S.Y. Kim, Y.S. Lee and W.T. Kwon. 2008. Impacts of climate change on phenology and growth of crops: In the case of Naju. *J. Geol. Soc. Korea* 43(1):20-35 (in Korean).
- Lee, S.H. and K.M. Lee. 2003. The trend on the change of the cherry blossom flowering time due to the temperature change. *J. EIA.* 12(1):45-54.
- Lee, S.I., S.H. Yeon, J.S. Cho and C.H. Lee. 2020. Growth characteristics of *Veronica rotunda* var. *subintegra* (Nakai)

- T. Yamaz. according to several cultivation conditions. Korean J. Plant Res. 33(1):24-32 (in Korean).
- Lee, W.C. and Y.J. Yim. 2002. Plant geography. Kangwon National University Press, Chuncheon, Korea. pp. 141-165 (in Korean).
- Linderholm, H.W. 2006. Growing season changes in the last century. Agric. Forest Meteorol. 137(1):1-14.
- Lu, P., Q. Yu, J. Liu and X. Lee. 2006. Advance of tree-flowering dates in responses to urban climate change. Agric. Forest Meteorol. 138:120-131.
- Menzel, A., T.H. Sparks, N. Estrella, E. Koch, A. Aasa, R. Ahas, K. Alm-Kübler, P. Bissolli, O. Braslavská, A. Briede, F.M. Chmielewski, Z. Crepinsek, Y. Curnel, Á. Dahl, C. Defila, A. Donnelly, Y. Filella, K. Jarczák, F. Máge, A. Mestre, Ø. Nordli, J. Penuelas, P. Pirinen, V. Remisová, H. Scheifinger, M. Striz, A. Susnik, A.J.H. Van Vliet, F.E. Wielgolaski, S. Zach and A. Züst. 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern. Global Change Biol. 12(10):1969-1976.
- Nuttonson, M.Y. 1948. Some preliminary observations of phenological data as a tool in the study of photoperiodic and thermal requirements of various plant material: *In* Murneed, A.E. and R.D. Whyte (eds.), Vernalization and Hotoperiodism-A Symposium. Chronica Botanica Publishing Co., Waltham, MA (USA). pp. 129-143.
- Sagarin, R. and F. Micheli. 2001. Climate change in non-traditional data sets. Science 294:811
- Schwartz, M.D. 1999. Advancing to full bloom: planning phenological research for the 21st century. Int. J. Biometeorol. 42:113-118.
- _____, R. Ahas and A. Aasa. 2006. Onset of spring starting earlier across the Northern hemisphere. Global Change Biol. 12(2):343-351.
- Sparks, T.H., E.P. Jeffree and C.E. Jeffree. 2000. An examination of the relationship between flowering times and temperature at the national scale using long-term phenological records from the UK. Int. J. Biometeorol. 44(2):82-87.
- Walkovszky, A. 1998. Changes in phenology of the locust tree (*Robinia pseudoacacia* L.) in Hungary. Int. J. Biometeorol. 41:155-160.
- Whitfield, J. 2001. Climate change data: the budding amateurs. Nature 414:578-579.
- Yim, Y.J. and T. Kira. 1975. Distribution of forest vegetation and climate in the Korean Peninsula. I. Some indices of thermal climate. Jap. J. Ecol. 25(2):77-88.

(Received 12 September 2019 ; Revised 18 February 2020 ; Accepted 2 March 2020)