

우리나라 식물계절 시기의 변화 경향에 관한 연구*

이경미** · 권원태*** · 이승호****

A Study on Plant Phenological Trends in South Korea*

Lee, Kyoung Mi** · Kwon, Won Tae*** · Lee, Seung Ho****

요약 : 식물계절 시기의 변화는 지역의 기후변화를 파악하는 데 중요한 지표이며, 지구온난화로 인한 기온상승의 영향이 뚜렷하게 반영된다. 본 연구에서는 식물계절 관측 자료를 이용하여 식물계절 시기의 변화 경향 및 식물계절 시기의 변화와 기온변화의 관계를 분석하였다. 봄철의 발아와 개화시기는 -0.7~-2.7일/10년의 변화율로 앞당겨지는 경향인 반면 가을철의 단풍절정시기는 3.7~4.2일/10년의 변화율로 늦어지는 추세이다. 한반도의 봄철 식물계절 시기는 2월에서 3월 평균기온과 높은 상관관계가 있으며, 2월에서 3월 동안의 평균기온이 1°C 상승함에 따라 봄철 식물계절은 3.8일씩 앞당겨지는 경향이다. 가을철 식물계절 시기는 10월 평균기온과 상관관계가 높고 10월 평균기온이 1°C 상승함에 따라 3.1일씩 늦어지는 추세이다.

주요어 : 식물계절, 기후변화, 발아, 개화, 단풍

Abstract : The phenological change of plants is an indication of local and regional climate change. An increase in temperature due to global warming is manifest in the change of phytophenological events. In this study, trends in the plant phenology and its correlation with air temperature in South Korea were examined using observational data for 18 phenological phases. The spring phenological phases, such as sprouting and flowering, occurred earlier (from 0.7 to 2.7 days per 10-year) during 1945~2007, while the autumn phases, such as full autumn tinting, moved later (from 3.7 to 4.2 days per 10-year) during 1989~2007. The correlation between the plant phenology in spring with the air temperature from February to March is relatively high. The warming in the early spring (February-March) by 1°C causes an advance in the spring plant phenology of 3.8 days. The plant phenology in autumn also correlates with the average temperature in October. The autumn plant phenology for a 1°C increase in October temperature occurs about 3.1 days later.

Key Words : Plant phenology, Climate change, Sprouting, Flowering, Autumn tinting

1. 서론

계절은 그 지역에 사는 생물의 종류, 분포, 생육 특성 등에 영향을 미치는 중요한 요인의 하나이다. 식물의 발아, 개화, 단풍, 낙엽 등의 시작 및 끝과 같은 식물계절 시기는 매년 반복되는 계절변화를 반영한다. 그러므로 식물의 발아 및 개화 등 식물계절의 지역적인 차이를 장기간 관측함으로써 계절변화의 추이를 파악할 수 있을 뿐만 아니라 이는 기후변화를 감지하는 중요한 정보로 활용할 수 있다.

최근 지구온난화 영향으로 극지적인 이상고온현상이 빈번하게 나타나고 이로 인하여 생태계의 변화가 감지되기 시작하면서 기후변화는 인류의 최대 관심사가 되었다. 특히 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 4차 보고서에 의하면 최근 50년간의 기온상승(약 0.13°C/10년)이 지난 100년(1906~2005년)간의 기온상승 추세(약 0.07°C/10년)보다 약 2배 정도 높다(IPCC, 2007). 이러한 지구온난화는 전 세계적으로 자연 생태계에 영향을 미쳐, 나비의 서식지가 북상하고, 꽃이나 잎의 발아 및 개화시기가 앞당겨지고 있으며, 새의 산란시기

* 이 연구는 "NIMR-2009-B-2(기후변화 예측기술 지원 및 활용연구)"의 지원으로 수행되었습니다.

** 건국대학교 대학원 지리학과 박사과정(Doctoral Student, Department of Geography, Konkuk University)(leekm@konkuk.ac.kr)

*** 기상청 국립기상연구소 기후연구과장(Director, Climate Research Laboratory, National Institute of Meteorological Research, KMA)(wontk@kma.go.kr)

**** 건국대학교 기후연구소 · 지리학과 교수(Professor, Department of Geography · Climate Research Institute, Konkuk University)(leesh@konkuk.ac.kr)

및 철새의 도래시기가 바뀌고 있다(Crick *et al.*, 1997; Crick and Sparks, 1999; Parmesan *et al.*, 1999; Menzel, 2000; Defila and Clot, 2001; Ahas *et al.*, 2002; Ahas and Aasa, 2006). 또한 어류의 산란시기가 변화하고 있으며, 작물 및 과수의 생육 기간 및 생산량 등도 변하고 있다(Ahas, 1999; Chmielewski *et al.*, 2004; Hu *et al.*, 2005; Tao *et al.*, 2006).

기후변화를 반영하는 지표는 농업, 식물과 동물의 분포, 생물계절, 고생태, 보건 등 다양하다. 이중 생물계절에 관한 연구는 새의 이동, 곤충 성장 단계, 식물의 개화시기 등 반복적으로 일어나는 자연현상의 시기와 기후 사이의 관계에 초점이 모아지고 있다. 생물계절은 장기간의 모니터링을 통해 이루어지며 과거에는 이러한 연구가 진정한 과학이 아니라고 여겨졌으나(Findlay and Jones, 1989), 최근에는 기후변화와 지구적인 기온상승의 잠재적인 영향을 평가하는 데 중요한 지표로 인식되고 있다(Sagarin and Micheli, 2001; Whitfield, 2001). 식물계절은 지역별 기후변화에 식물이 어떻게 반응하는가를 정의하는 데 중요한 자료의 하나로 최근에 생태학적 연구를 위한 중요한 관심사로 등장하였으며(Schwartz, 1999; IPCC, 2001a, 2001b), 대중적이고 쉽게 인식될 수 있기 때문에 가장 효율적인 기후변화 영향평가의 지표이다(Donnelly *et al.*, 2004).

최근 기후변화 영향평가를 위한 지표가 요구되면서 식물계절 자료에 관한 관심이 증대되었다. 그에 따라 식물계절 시기의 변화 경향에 관한 연구가 전 세계적으로 활발히 이루어지고 있다(Walkovszky, 1998; Ahas *et al.*, 2000; Sparks *et al.*, 2000; Keatley *et al.*, 2002; Lu *et al.*, 2006; Aono and Kazui, 2008; Cook *et al.*, 2008). 특히 봄철 기온변화를 잘 반영하는 식물계절 지표를 정의하여 봄의 변화를 평가하는 연구들이 많다. Schwartz and Reiter (2000)의 연구에서는 1종의 라일락(*Syringa Chinensis*)과 2종의 인동(*Lonicera tatarica*, *L. korolkowii*) 식물의 발아일과 개화일을 평균하여 봄 발아일 지수(SIFLD, Spring Index First Leaf Date)와 봄 개화일 지수(SIFBD, Spring Index First Bloom Date)로 정의하고 북아메리카에서의 봄의 변화를 평가하였으며, Schwartz and Chen (2002)은 같은 방법

을 적용하여 중국의 봄 시작일 변화를 분석하였다. Zhao and Schwartz (2003)는 미국 위스콘신의 남서부, 중동부, 북부 지역에서 관측되고 있는 식물들의 개화일을 평균하여 ISI (Integrated Species Index)를 개발하였으며, ISI의 변화 경향을 통하여 위스콘신의 지역별 봄 시작일의 변화를 평가하였다. 또한 UKPN (UK Phenology Network)는 영국 전역에서 관측되고 장기간의 계절변화를 잘 반영하는 산사나무(*Crataegus monogyna*)와 마로니에(*Aesculus hippocastanum*)의 개화일과 갈고리나비(*Anthocharis cardamines*)와 제비(*Hirundo rustica*)의 초견일을 평균하여 봄 지수(SI, Spring Index)로 정의하고, SI의 변화 분석을 통해 봄철 기온상승으로 인한 생물계절의 변화를 평가하고 있다.

식물의 발아, 개화, 단풍 등 식물계절은 주로 토양, 유전, 질병, 기후 등 다양한 환경적 요인에 영향을 받으며, 특히 봄 식물계절은 기온에 민감하다(Lechowicz, 1995). 봄철 식물계절시기는 주로 겨울철의 휴면 기간이 끝난 이후의 기온에 영향을 받으며, 많은 연구에서 봄 식물계절시기와 기온 사이에 상관관계가 높음이 밝혀졌다(Fitter *et al.*, 1995; Walkovszky, 1998; Sparks *et al.*, 2000). 국내의 경우에는 관측 자료 및 개화일 예측모형을 이용하여 기후변화에 따른 벚꽃 등의 개화일의 시공간적인 변화를 분석한 연구들이 있었다(이승호·이경미, 2003; 윤진일, 2006; Ho *et al.*, 2006). 그러나 모두 개화일 자료만을 분석에 이용하여 봄철 식물계절의 변화를 분석한 연구로 식물의 발아일, 개화일, 단풍일 등 다양한 식물계절 자료를 이용하여 우리나라의 봄철과 가을철 식물계절의 변화 경향을 분석하고 그와 기후의 관계를 파악한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 우리나라에서 관측된 식물계절 자료를 이용하여 각 지역별 식물의 개화 및 발아시기와 단풍시기의 변화 경향을 분석하고 식물계절 시기의 변화 경향과 기온변화의 관계를 파악하고자 하였다.

2. 연구 자료 및 방법

본 연구에서는 기상청에서 관측하고 있는 식물계절 자료와 일 평균기온 자료를 이용하여 식물계

절 시기의 변화 경향 및 기온과의 관계를 분석하였다. 기상청에서는 계절의 이르고 늦음의 지역 차이 등을 파악하기 위하여 매년 식물계절 현상을 관측하고 있다. 식물계절 관측은 기상청에서 지정한 관측목을 대상으로 일정한 장소와 방법에 따라 행하여진다. 기상청에서 지정한 봄철 식물계절 관측목은 매화, 개나리, 진달래, 벚나무, 복숭아, 배나무, 아카시아 등이며, 가을철 식물계절 관측목은 은행나무와 단풍나무이다. 본 연구에서는 봄철 식물계절 관측목의 발아와 개화시기 자료와 가을철 식물계절 관측목의 단풍시작시기와 단풍절정시기 등의 자료를 분석에 이용하였다¹⁾.

식물계절 시기의 변화 경향을 파악하기 위하여 매화, 개나리, 진달래, 복숭아, 배나무, 벚꽃, 아카시아 등 7개 식물의 발아 및 개화시기와 은행나무, 단풍나무 등 2개 식물의 단풍시작 및 단풍절정시기의 시계열 변화를 그래프로 나타내었다. 이때, 발아와 개화, 단풍시작, 단풍절정 시기는 60년 이상의 장기 식물계절 관측 자료를 보유한 14개 관측지점(강릉, 서울, 인천, 울릉도, 추풍령, 포항, 대구, 전주, 울산, 광주, 부산, 목포, 여수, 제주)의 각 식물의 식물계절 시기를 평균한 값이다. 또한 식물계절 시기의 변화 경향을 정량화하기 위하여 각 식물계절 시기를 종속변수로 하고 연도를 독립변수로 하여 회귀분석을 행하고 9개 식물에 대한 식물계절의 시기별 변화율을 구하였다. 분석기간은 14개 관측지점에서 식물계절 관측이 시작된 이후로 봄철 식물계절 시기 변화의 분석기간은 1945~2007년까지이며, 가을철 식물계절 시기는 1989~2007년까지이다.

우리나라의 봄과 가을의 계절변화 특성을 파악하기 위하여 각 계절변화 특성을 반영하는 식물계절 지표를 정의하였다. 본 연구에서는 Schwartz and Reiter (2000), Schwartz and Chen (2002), Zhao and Schwartz (2003) 등의 방법에 의하여 통계적으로 유의한 변화 경향을 보이는 봄과 가을의 식물계절 시기를 각각 평균하여 봄 식물계절지수(SPI, Spring Phytphenological Index)와 가을 식물계절지수(API, Autumn Phytphenological Index)로 정의하였다. 80년 이상의 장기간 봄철 식물계절 관측 자료를 보유하고 있는 8개 관측지점(강릉, 서울, 인천, 대구, 전주, 부산, 목포, 제주)의 1921~

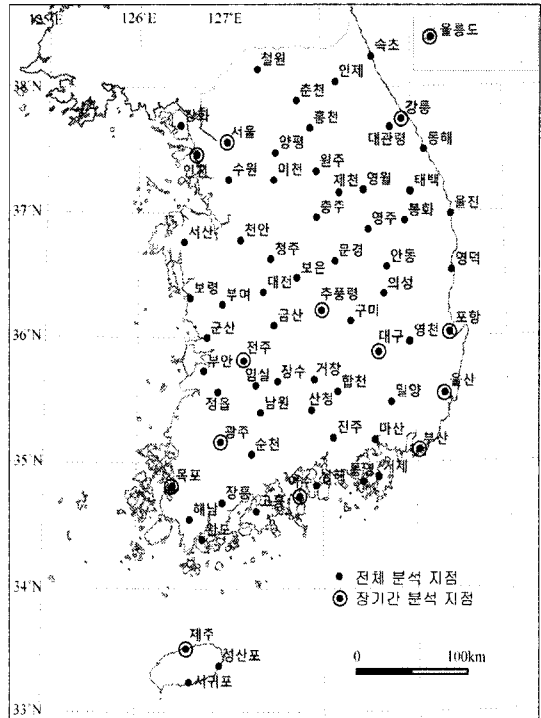


그림 1. 연구 지역 및 관측지점

2007년의 SPI의 시계열 변화를 그래프로 나타내고 회귀분석으로 변화율을 구하여 식물계절 시기의 장기적인 변화 특성을 분석하였다. 그리고 지역별 봄철 식물계절과 가을철 식물계절 시기의 변화 경향을 분석하기 위하여 69개 관측지점의 SPI와 API의 변화율을 지도화 하였다.

개화와 발아가 시작되기 전의 기온과 SPI의 상관관계를 파악하기 위하여 14개 장기 관측지점별 1월, 2월, 3월 각 평균기온과 SPI를 상관분석 하였다. 상관분석 결과 14개 관측지점의 SPI와 가장 상관관계가 높게 나타나는 시기의 기온을 독립변수로 하고 SPI를 종속변수로 하여 회귀분석을 행하고 기온에 따른 SPI의 변화율을 구하여 기온변화에 대한 봄철 식물계절 시기의 변화 경향을 파악 하였다. 가을철 식물계절 시기의 경우에는 9월, 10월, 11월 평균기온과 API 간의 상관관계를 분석한 뒤, API와 가장 상관관계가 높게 나타나는 시기의 기온을 독립변수로 하고 API를 종속변수로 하여 회귀분석을 시행하고 기온변화에 대한 가을철 식물계절 시기의 변화 경향을 파악하였다.

3. 식물계절 시기의 변화

식물계절 시기의 변화 경향을 파악하기 위하여 14개 장기 관측지점의 식물별 평균 개화, 발아, 단풍시작, 단풍절정 시기의 시계열 변화를 분석하여 그래프로 나타내었다(그림 2). 매화가 가장 일찍 발아하며 아카시아의 발아일이 가장 늦다. 그 밖의 개나리, 진달래, 복숭아, 배나무, 벚꽃 등의 발아일은 큰 차이를 보이지 않는다.

매화의 발아일은 전반적으로 앞당겨지고 있는 추세이다. 1970년대 이후 매화의 발아일이 앞당겨지는 경향이 뚜렷하다. 반면에 발아일이 가장 늦은 아카시아는 그 변화 경향이 뚜렷하지 않다. 그 밖의 개나리, 진달래, 복숭아, 배나무, 벚꽃 등의 발아일 변화 패턴은 유사하며, 1970년대 이후 그 시기가 점차 앞당겨지는 경향이다.

개화시기의 경우에는 매화의 개화일이 가장 이르며 아카시아의 개화일이 가장 늦다. 아카시아의 개화일 역시 발아일과 마찬가지로 변화 경향이 뚜렷하지 않다. 아카시아를 제외한 식물의 개화일은 1980년대 이후 앞당겨지는 경향이며, 발아와 개화시기가 이른 식물일수록 변화 폭이 크다. 이는 이 시기의 기온변화와 관련 있을 것으로 판단된다. 즉, 늦겨울에서 이른 봄의 기온의 변화가 크다는 것을 의미한다. 반면 변화 폭이 작은 아카시아의 발아와 개화시기는 늦은 봄의 기온변화가 상대적으로 작다는 것을 의미한다고 할 수 있다. 1945~2007년간 14개 장기관측지점의 2월에서 5월의 평균기온은 변화율을 보면, 2월과 3월의 평균기온은 0.4°C/10년의 변화율로 상승하는 경향이며, 4월과 5월의 변화율은 각각 0.3°C/10년, 0.2°C/10년이었다. 즉, 늦겨울에서 이른 봄의 기온변화가 늦은 봄의 기온변화보다

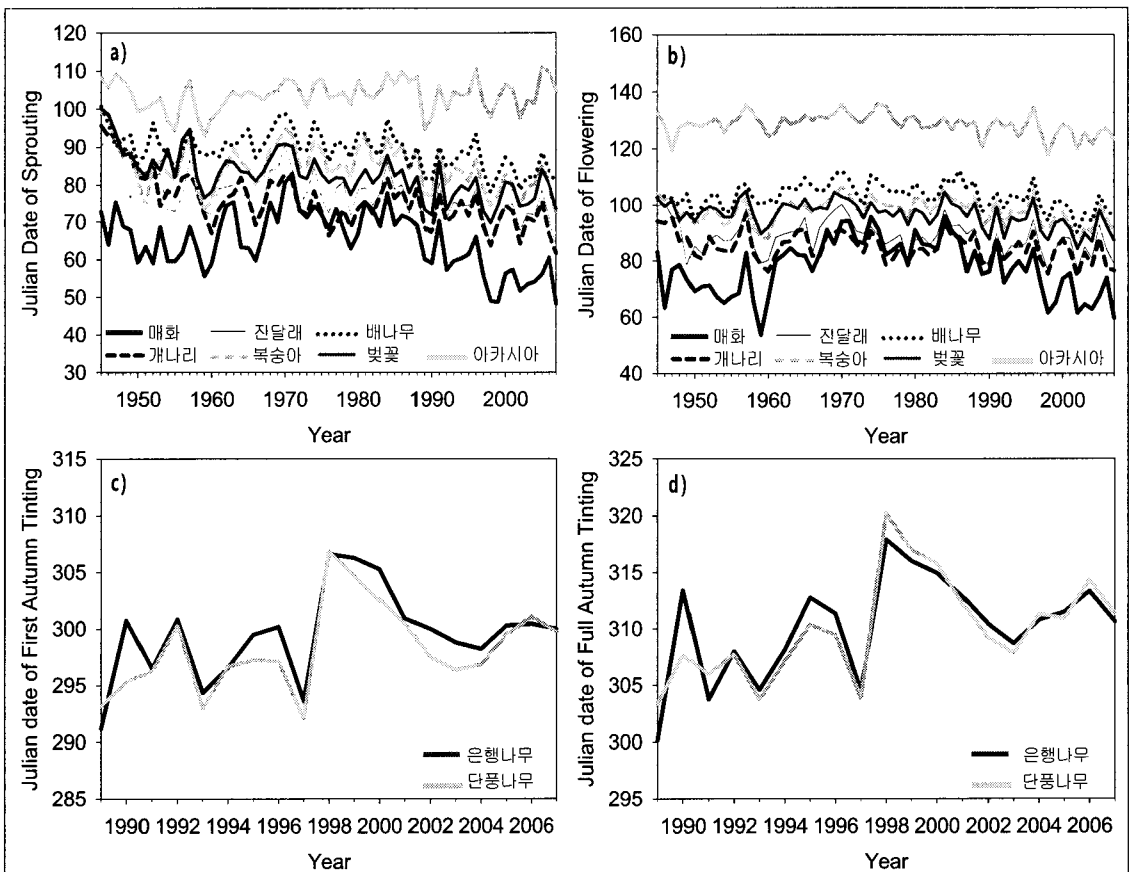


그림 2. 식물계절 시기의 시계열 변화

(a: 발아시기, b: 개화시기, c: 단풍시작시기, d: 단풍절정시기)

크다는 것을 확인할 수 있다.

은행나무와 단풍나무는 비슷한 시기에 단풍이 시작된다. 그 시기의 변화 패턴이 유사하며, 둘 다 늦어지는 경향이다. 단풍절정시기 역시 은행나무와 단풍나무 모두 늦어지는 경향을 보였다. 단풍의 시작과 절정 모두 1998년에 특히 늦은 경향이 뚜렷한데 1998년은 분석기간(1989~2007년) 중 가을철 기온이 높았던 해이며, 이에 관하여는 뒤에서 자세히 설명하고 있다.

표 1은 14개 관측지점의 각 식물의 평균 식물계절 시기의 변화율을 나타낸 것이다. 봄철 식물계절 시기의 변화율은 -0.7~-2.7일/10년으로 앞당겨지는 경향을 보이는 반면 가을철 식물계절 시기는 3.7~4.2일/10년으로 늦어지는 경향이다. 봄철 식물 중에서는 개나리의 발아시기의 변화율이 -2.7/10년으로 가장 크며, 가을철 식물 중에서는 단풍나무의 단풍절정시기가 4.2/10년의 가장 큰 폭으로 늦어지는 경향이다.

대체로 3월에 발아 혹은 개화하는 경우에는 변

화율이 크지만 4월에 발아 혹은 개화하는 경우에는 변화율이 작다. 매화는 3월에 개화하지만 변화율이 작고 표준오차가 10.1일로 크며, 발아시기도 표준오차가 7.4일로 크다. 매화의 발아와 개화시기의 시계열 변화를 보면 변동성이 크다(그림 2 참조). 가을 식물계절의 경우에는 단풍나무와 은행나무의 단풍시작 시기보다 단풍절정 시기의 변화율이 크다. 즉, 겨울철에서 봄철로 계절이 변화하는 시점과 가을철에서 겨울철로 계절이 변하는 시점의 식물계절 시기의 변화가 뚜렷하다. 이것은 이른 봄의 기온변화가 늦은 봄에 비해, 늦은 가을의 기온변화가 이른 가을에 비해 뚜렷하다는 것을 의미하는 것으로 생각된다. Lu *et al.*(2006)은 지구온난화 및 겨울과 이른 봄의 도시 열섬 효과 때문에 이른 봄철의 기온상승이 늦은 봄에 비해 더욱 뚜렷하며, 이의 영향으로 평균 개화일이 이른 식물이 늦은 식물에 비해 개화일이 더 빠르게 앞당겨지고 있다고 밝힌 것과 유사한 결과이다.

또한, 통계적으로 유의한 변화를 보이는 봄철 식

표 1. 식물계절 시기의 변화 경향

구 분	전국 평균(월/일)	변화율(일/10년)	r^2	SE (일)	p
매화 발아	3/6	-1.8	0.15	7.4	**
개나리 발아	3/17	-2.7	0.45	5.3	***
진달래 발아	3/18	-2.1	0.34	5.3	***
매화 개화	3/19	-0.3	-0.01	10.1	
벚꽃 발아	3/24	-2.3	0.45	4.6	***
복숭아 발아	3/26	-1.2	0.13	5.6	**
개나리 개화	3/26	-1.1	0.13	4.8	**
진달래 개화	3/29	-1.2	0.11	5.7	**
배나무 발아	3/30	-1.5	0.28	4.3	***
벚꽃 개화	4/7	-1.3	0.23	4.3	***
복숭아 개화	4/8	-0.6	0.03	4.8	
배나무 개화	4/13	-0.6	0.03	4.8	
아카시아 발아	4/14	0.3	0.01	4.1	
아카시아 개화	5/9	-0.7	0.10	3.6	**
단풍나무 단풍시작	10/25	2.8	0.12	3.6	
은행나무 단풍시작	10/26	2.6	0.09	3.8	
단풍나무 단풍절정	11/6	4.2	0.23	4.0	*
은행나무 단풍절정	11/6	3.7	0.17	4.1	*

r^2 : 결정계수, SE: 표준오차, p: 유의확률(*** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$)

우리나라 식물계절 시기의 변화 경향에 관한 연구

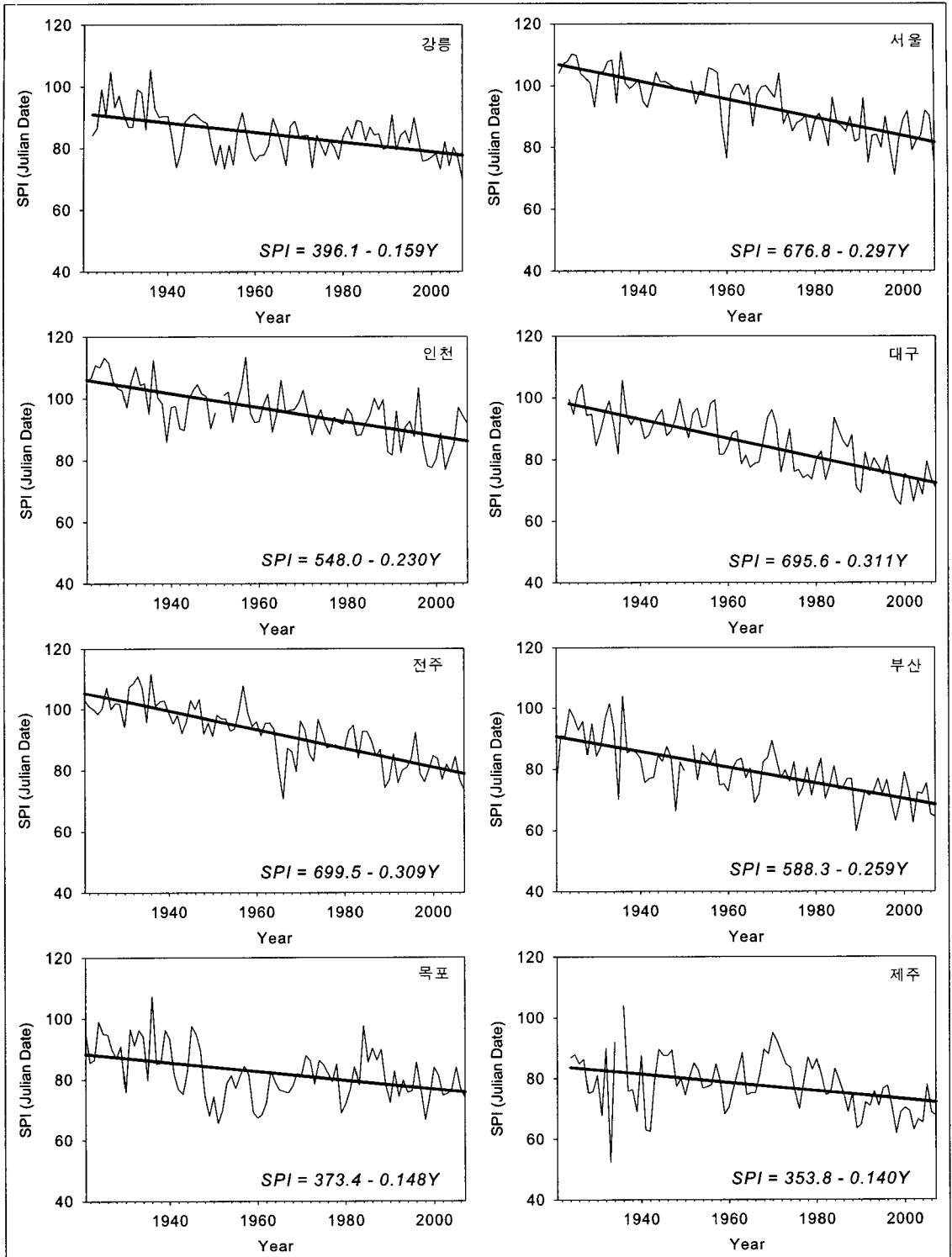


그림 3. 봄 식물계절지수(SPI)의 장기간 시계열 변화

(1921~2007, 그림의 모든 식은 유의수준 $p = 0.001$ 에서 유의함.)

물계절 시기의 결정계수(r^2)는 값은 약 0.1~0.45의 분포를 보이며, 가을철 식물계절 시기의 결정계수(r^2)는 값은 약 0.17~0.23의 분포를 보여 봄철 식물계절 시기의 변화가 가을철 식물계절 시기의 변화보다 더 유의한 변화를 보이고 있다고 할 수 있다. 이는 유럽과 북아메리카의 식물계절 변화 경향과 유사한 것으로 최근 기후변화로 식물계절 시기의 변화가 나타나고 있는데, 봄철 식물계절에 비해 가을철 식물계절 시기의 변화가 덜 명확하다(Walther *et al.*, 2002).

봄과 가을의 계절변화 특성을 반영하는 식물계절 시기의 변화 경향을 파악하기 위하여 봄 식물계절지수(SPI)와 가을 식물계절지수(API)의 변화 경향을 분석하였다. <표 1>의 결과를 바탕으로 SPI는 변화 경향이 통계적으로 유의한 매화, 개나리, 진달래, 벚꽃, 복숭아, 배나무의 발아시기와 개나리, 진달래, 벚꽃의 개화시기 등 총 9개 식물계절 시기의 평균으로 정의하였으며, API는 단풍나무와 은행나무의 단풍절정 시기의 평균값으로 정의하였다. 이때 다른 봄 식물계절 시기와 차이가 크고 변화율이 작은 아카시아의 개화시기는 지수 산정에서 제외하였다.

<그림 3>은 봄철 식물계절 시기의 장기간 변화 경향을 파악하기 위하여 1921~2007년 동안의 봄 식물계절지수(SPI)의 시계열 변화를 나타낸 것이다. 전 지점의 SPI 변화율이 모두 음의 값으로 식물계절의 시기가 앞당겨지고 있는 추세이다. 대구와 전주의 SPI 변화율이 -3.1일/10년으로 앞당겨지는 추세가 가장 뚜렷하며, 서울도 SPI의 변화율이 -3.0일/10년으로 봄철 식물계절 시기의 변화가 큰 것을 확인할 수 있다. 제주와 목포는 SPI의 변화율이 각각 -1.4일/10년, -1.5일/10년으로 봄철 식물계절 시기의 변화 폭이 다른 지역에 비해 작다. 지역별 봄철 식물계절의 장기적 변화 특성을 보면 비슷한 위도대에 위치하지만 대도시이면서 내륙에 위치하는 서울에서 SPI의 변화율이 인천이나 강릉보다 크며, 동해안의 강릉에서 SPI의 변화율이 작다. 우리나라의 남부 내륙에 위치하는 전주와 대구의 경우에는 모두 SPI의 변화율이 커서 봄철 식물계절 시기의 변화가 뚜렷하다. 남해안의 부산 및 목포와 제주의 SPI 변화율은 내륙 지역에 비해 작다. 즉, SPI의 장기적인 시계열 변화를 통해 해안

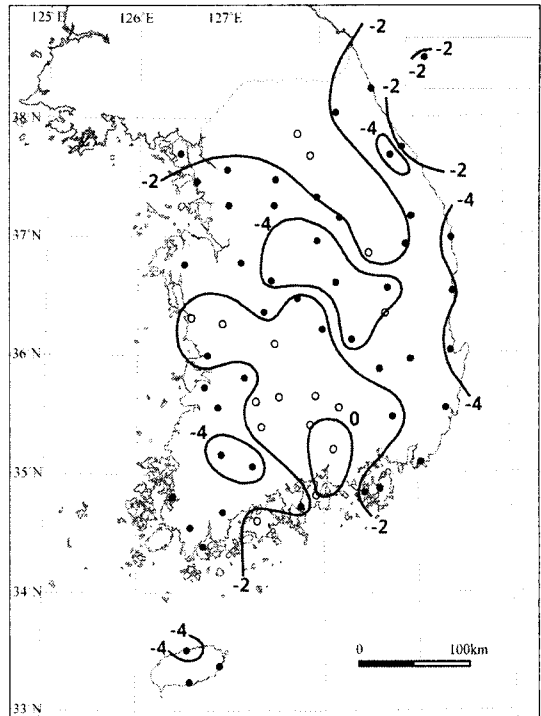


그림 4. 최근 봄 식물계절지수(SPI)의 변화율
(일/10년, 1971~2007, '●'으로 표시된 지점은 유의수준 $p = 0.05$ 에서 유의함.)

지역보다 내륙에서 봄철 식물계절 시기가 앞당겨지는 경향이 더 뚜렷하다.

<그림 4>는 봄철 식물계절 시기의 변화 경향의 공간 분포 특성을 파악하기 위하여 최근 봄 식물계절지수(SPI, 1971~2007년)의 변화율 분포를 나타낸 것이다. 대부분 관측지점에서 SPI가 음의 값으로 최근 봄철 식물계절 시기도 앞당겨지는 추세이다. 변화율이 가장 큰 안동에서 -5.4일/10년으로 봄철 식물계절 시기가 뚜렷하게 앞당겨지고 있다. 지역적으로 보면 안동, 구미, 문경 등의 경북 내륙과 충주 및 청주 등의 중부 내륙, 광주와 순천 등의 전남 내륙 등 대체로 내륙에서 주변 해안보다 SPI의 변화율이 크다. 해안에서는 동해안의 포항과 제주 등에서 SPI의 변화율이 크다. 제주는 최근의 봄철 식물계절 시기의 변화가 장기간 변화보다 크다(그림 3). 벚꽃 개화시기의 변화 경향을 분석한 이승호·이경미(2003)는 해안에 비해 내륙에서 벚꽃 개화시기의 변화율이 크며, 지역의 규모가 크고 산업화 및 공업화된 도시에서 개화시기가 크게 앞

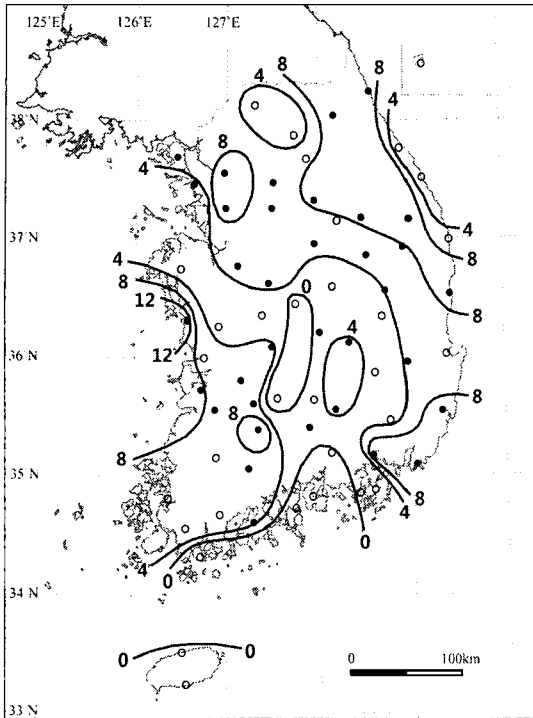


그림 5. 최근 가을 식물계절지수(API)의 변화율

(일/10년, 1989~2007, '•'으로 표시된 지점은 유의수준 $p = 0.05$ 에서 유의함.)

당겨졌음을 밝힌 바 있다.

가을 식물계절지수(API, 1989~2007년)는 대부분 지역에서 양의 값으로 가을철 식물계절 시기가 늦어지는 경향이다(그림 5). 변화율이 가장 큰 보령에서 12.4일/10년으로 가을철 식물계절 시기가 뚜렷하게 늦어지고 있다. 그 다음으로 태백, 부산, 울산, 부안, 영덕 등에서도 API의 변화율이 10일/10년 이상으로 가을철 식물계절 시기가 늦어지는 추세이다. 봄철 식물계절과는 달리 가을철 식물계절은 마산, 울산, 부산 등의 남해안 동쪽과 부안 및 보령 등의 서해안, 서울과 인천의 중부 내륙과 광주 등 규모가 큰 내륙뿐만 아니라 일부 해안에서도 변화가 뚜렷하다. 반면에 남해, 여수, 완도, 진주 등의 남해안에서는 API의 변화율이 0에 가깝다.

4. 식물계절과 기온과의 관계

중위도 지역에서 식물의 발아시기, 개화시기, 단풍시기 등과 같은 계절별 식물계절 시기는 대부분

기온에 의해 결정된다(Chmielewski and Rotzer, 2001). <표 2>는 봄 식물계절지수(SPI)와 기온 간의 관계를 파악하기 위하여 관측지점별 1월, 2월, 3월의 각 평균기온과 SPI를 상관분석을 시행한 결과이다.

전 관측지점의 SPI가 2월과 3월의 평균기온과 유의한 부의 상관을 나타낸다. 포항을 제외한 전 관측지점에서 2월과 3월의 평균기온과 SPI 간의 상관계수 절대값이 $r=0.5$ 이상으로 높은 값이다. 즉, 2월과 3월의 평균기온이 상승할수록 봄철 식물계절이 앞당겨지는 경향이다. 서울, 대구, 인천 등 일부 관측지점에서는 1월 평균기온과도 유의한 상관관계를 보이거나 1월 평균기온과 SPI 간의 상관계수는 2월과 3월의 상관계수보다 작다. 따라서 봄철 식물계절은 발아 및 개화가 시작되기 직전인 2월과 3월의 기온에 크게 영향을 받아 이 시기의 기온이 더 높을수록 봄철 식물계절 시기가 앞당겨진다고 할 수 있다.

2월과 3월의 평균기온 모두 SPI와 상관관계가 높게 나타나므로 두 시기의 기온을 모두 고려하여 봄철 식물계절 시기와의 상관관계를 파악하기 위하여 2월과 3월 기온의 평균값(T_{23})과 SPI를 상관분석을 행하였다. 2월과 3월 기온의 평균값(T_{23})과 SPI 간의 상관계수가 대체로 2월과 3월 평균기온 간의 상관계수에 비하여 높은 값이다. T_{23} 과 SPI 간의 상관관계가 가장 높은 관측지점은 광주로 상관계수 $r=-0.804$ 이며, 포항에서 $r=-0.418$ 로 가장 낮다. 포항을 제외한 전 관측지점에서 상관계수의 절대값이 0.6 이상으로 높고, 모두 통계적으로 유의하다. 즉, 2월에서 3월 동안의 평균기온이 봄철 식물계절에 가장 크게 영향을 미치며, 이 시기의 평균기온이 상승할수록 봄철 식물계절 시기가 앞당겨지는 경향이다.

기온변화와 봄철 식물계절 변화의 관계를 파악하기 위하여 T_{23} 을 독립변수로 하고 SPI를 종속변수로 한 회귀분석 결과를 표 2에 함께 제시하였다. 전 관측지점에서 기온이 상승함에 따라 봄철 식물계절이 앞당겨지는 경향이며, 통계적으로 유의하다. 포항을 제외하면 결정계수(r^2)가 0.35~0.64의 분포를 보여 비교적 설명력이 높다. 기온변화에 대한 SPI의 변화율이 가장 큰 관측지점은 제주이며, 2월에서 3월의 평균기온이 1℃ 상승함에 따라 봄철 식

표 2. 봄 식물계절지수(SPI)와 기온간의 상관관계(1945~2007)

관측지점	평균 일 (월/일)	상관계수				기온(T_{23})변화와의 관계	
		T_1	T_2	T_3	T_{23}	변화율(일/°C)	r^2
울산	3/16	-0.230	-0.616**	-0.498**	-0.632**	-2.6***	0.39
부산	3/17	-0.313*	-0.567**	-0.689**	-0.689**	-3.5***	0.47
포항	3/18	-0.139	-0.395**	-0.341**	-0.418**	-2.9**	0.16
제주	3/18	-0.304*	-0.631**	-0.692**	-0.754**	-5.1***	0.56
목포	3/20	-0.233	-0.548**	-0.510**	-0.599**	-3.5***	0.35
여수	3/21	-0.399**	-0.546**	-0.684**	-0.677**	-4.4***	0.45
강릉	3/23	-0.268*	-0.694**	-0.730**	-0.779**	-2.6***	0.60
대구	3/23	-0.447**	-0.611**	-0.800**	-0.762**	-4.5***	0.57
광주	3/26	-0.457**	-0.651**	-0.760**	-0.804**	-5.0***	0.64
울릉도	3/29	-0.142	-0.512**	-0.555**	-0.600**	-3.7***	0.35
전주	3/29	-0.402**	-0.482**	-0.565**	-0.599**	-3.6***	0.35
추풍령	3/29	-0.155	-0.539**	-0.649**	-0.732**	-3.5***	0.53
서울	4/1	-0.448**	-0.751**	-0.687**	-0.796**	-4.0***	0.63
인천	4/4	-0.377**	-0.607**	-0.768**	-0.751**	-3.6***	0.56
한반도	3/24	-0.424**	-0.785**	-0.884**	-0.927**	-3.8***	0.86

T_1 : 1월 평균기온, T_2 : 2월 평균기온, T_3 : 3월 평균기온, T_{23} : 2~3월 평균기온, r^2 : 결정계수
 유의확률: *** $p < 0.001$ ** $p < 0.01$ * $p < 0.05$

물계절 시기가 5.1일 앞당겨지는 경향이다. 광주도 -5.0일/°C로 SPI의 변화율이 크다. 울산과 강릉은 2월에서 3월의 평균기온이 1°C 상승함에 따라 봄철 식물계절이 2.6일 앞당겨지는 경향으로 변화 폭이 가장 작다.

14개 관측지점의 평균인 한반도의 SPI와 T_{23} 사

이의 상관계수는 $r = -0.927$ 로 통계적으로 높은 상관관계를 보였다. <그림 6>은 한반도의 SPI와 T_{23} 의 각 평균에서의 편차 변화를 나타낸 것이다. 1945~2007년 동안 한반도의 2월에서 3월 평균기온은 10년 당 0.4°C씩 상승하는 추세였으며, 1989년 이후로 양의 편차가 우세하다. 반면 같은 기간 동안 한반

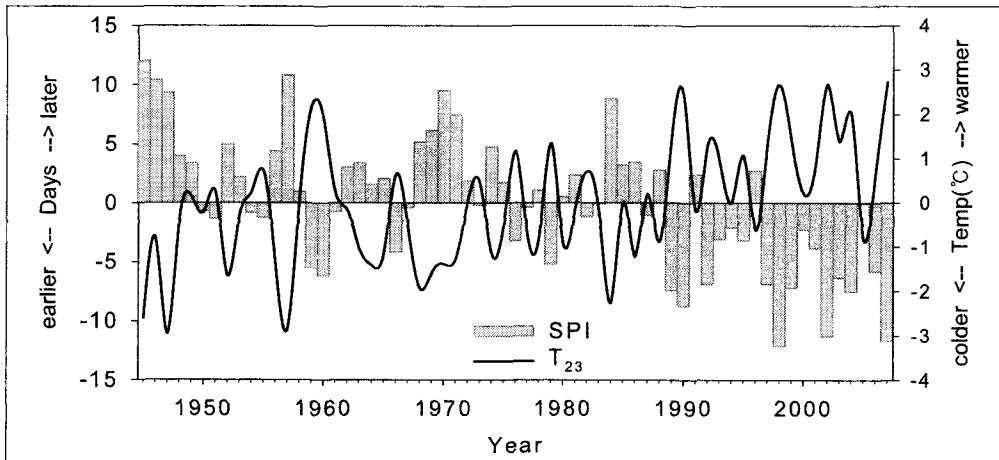


그림 6. 한반도의 봄 식물계절지수(SPI)와 기온(T_{23})의 편차 변화(1945~2007)

표 3. 가을 식물계절지수(API)와 기온간의 상관관계(1989~2007)

관측지점	평균 일 (월/일)	상관계수			기온(T_{10})변화와의 관계	
		T_9	T_{10}	T_{11}	변화율(일/°C)	r^2
추풍령	10/27	0.192	0.504*	-0.148	2.2*	0.20
대구	11/2	-0.040	0.422	-0.191	2.0	0.11
전주	11/2	0.429	0.455	0.050	1.4	0.16
울릉도	11/3	0.525	0.423	0.011	4.3	0.11
광주	11/4	0.396	0.689**	-0.111	3.7**	0.43
서울	11/4	0.366	0.487*	-0.196	2.7*	0.19
포항	11/5	0.302	0.114	-0.026	0.7	-0.05
인천	11/6	0.533*	0.576*	0.295	1.8**	0.29
강릉	11/8	0.106	0.478*	-0.010	3.6*	0.18
목포	11/8	-0.006	0.605**	0.126	6.5**	0.33
울산	11/9	0.082	0.414	0.145	3.0	0.12
여수	11/13	0.330	0.207	-0.181	1.4	-0.03
부산	11/14	-0.028	0.432	-0.040	3.6	0.04
제주	11/25	0.315	0.295	0.072	3.1	0.03
한반도	11/7	0.399	0.680**	-0.015	3.1**	0.43

T_9 : 9월 평균기온, T_{10} : 10월 평균기온, T_{11} : 11월 평균기온, r^2 : 결정계수, 유의확률: ** $p < 0.01$ * $p < 0.05$

도의 SPI는 -1.8일/10년으로 앞당겨지는 경향이 뚜렷하며, 1989년 이후로 음의 편차가 우세하다. 즉, 전 기간 동안 한반도의 SPI와 T_{23} 은 강한 음의 관계를 보이고 있으며, 최근에 기온상승으로 봄철 식물계절이 앞당겨지는 경향이 뚜렷하다. <그림 7>은 한반도의 SPI와 T_{23} 간의 상관관계를 나타낸

것이다. <그림 7>에 의하면, 한반도의 2월에서 3월 동안의 평균기온이 1°C 상승함에 따라 봄철 식물계절 시기는 3.8일씩 앞당겨지는 경향이라고 할 수 있다. 두 변수 간의 회귀식의 결정계수(r^2)는 0.86으로 높은 설명력을 갖는다.

가을 식물계절지수(API)와 관측지점별 9월, 10월, 11월의 각 평균기온 간의 상관분석을 행한 결과를 <표 3>에 제시하였다. 대부분 관측지점에서 API는 10월 평균기온과 비교적 높은 양의 상관을 보였다. 즉, 단풍이 시작되기 직전인 10월 평균기온이 상승할수록 가을철 식물계절 시기가 늦어지는 경향이다. 광주와 목포에서 API와 10월 기온 간에 가장 유의한 양의 관계가 있으며, 그밖에 추풍령, 서울, 인천, 강릉 등에서도 두 변수 간에 유의한 양의 관계가 있다. 그러나 각 관측지점별 API와 기온과의 상관관계는 대체로 SPI와 기온과의 상관관계보다 낮은 편이다. 이는 봄철 식물계절 시기가 가을철 식물계절 시기보다 기온변화에 더 민감하다는 것을 의미한다고 생각된다.

API와 가장 상관관계가 높은 10월 평균기온의 변화에 대한 API의 변화율은 0.7~6.5일/°C이다.

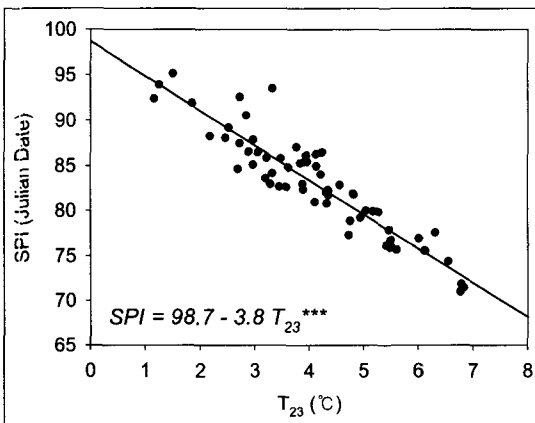


그림 7. 한반도의 봄 식물계절지수(SPI)와 기온(T_{23})의 관계

(1945~2007, 유의확률: *** $p < 0.001$)

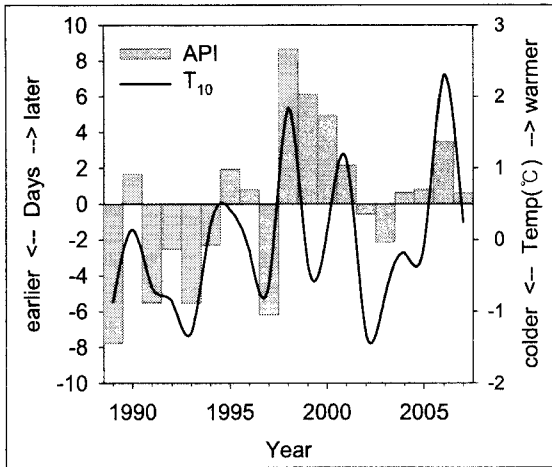


그림 8. 한반도의 가을 식물계절지수(API)와 기온(T_{10})의 편차 변화(1989~2007)

API와 10월 평균기온 간의 상관관계가 적은 포항과 여수를 제외하면 결정계수(r^2)는 0.03~0.43의 분포를 보이며, 이는 SPI 변화에 대한 기온의 설명력에 비해 낮다는 것을 의미한다. 통계적으로 유의한 결과 중 10월 평균기온 변화에 따른 API의 변화율이 가장 큰 관측지점은 목포이며, 10월 평균기온이 1°C 상승함에 따라 목포의 가을철 식물계절 시기는 6.5일씩 늦어지는 경향이다. 그 밖에 광주와 강릉에서도 각각 3.7일/°C, 3.6일/°C로 10월 평균기온 변화에 따른 API의 변화율이 큰 편이다.

한반도의 API와 10월 평균기온 간의 상관계수는 $r=0.680$ 으로 통계적으로 유의하다. 그림 8은 API와 한반도의 10월 평균기온의 편차 변화를 나타낸 것이다. 분석기간 동안 10월 평균기온은 통계적으로 유의하지는 않으나 0.6°C/10년으로 상승하는 경향이었고 API의 변화율은 3.5일/10년으로 늦어지고 있다. 분석기간이 비교적 짧은 하지만, API가 1997~1998년을 전후로 하여 전반기에는 음의 편차가, 후반기에는 양의 편차가 우세하여 한반도의 가을철 식물계절 시기가 점차 늦어지는 경향임을 보여준다.

<그림 9>는 한반도의 API와 10월 평균기온간의 관계를 나타낸 것이다. 두변수 사이의 관계식은 $API=261.5+3.1T_{10}$ 으로 한반도의 10월 평균기온이 1°C 상승함에 따라 가을철 식물계절 시기는 3.1일씩 늦어지는 경향이다. 즉, 우리나라의 봄철 식물계절은 기온상승으로 앞당겨지는 경향이 뚜렷한

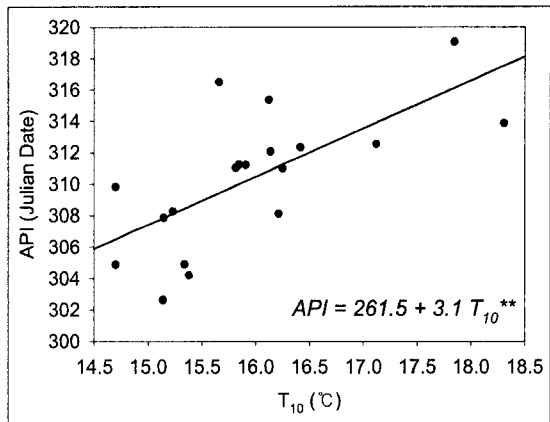


그림 9. 한반도의 가을 식물계절지수(API)와 기온(T_{10})의 관계(1989~2007, 유의확률: ** $\alpha < 0.01$)

반면에 가을철 식물계절 시기는 기온상승으로 점차 늦어지는 경향이다. 이는 유럽, 북아메리카, 중국 등 다른 중위도 지역의 식물계절 변화 경향과 유사한 결과이다(Menzel and Fabian, 1999; Menzel, 2000; Schwartz and Chen, 2002; Walther *et al.*, 2002).

5. 요약 및 결론

최근 기온상승으로 기후변화를 평가하기 위한 지표가 요구되면서 식물계절의 시기는 지역별 기후변화 경향을 반영하는 효율적인 지표로써 인식되고 있다. 본 연구에서는 식물계절 관측 자료를 이용하여 식물계절 시기의 변화 경향 및 그와 기온변화의 관계를 분석하였다.

봄철의 발아와 개화시기의 변화율은 -0.7~-2.7일/10년의 점차 앞당겨지는 경향이며, 가을철의 단풍절정 시기의 변화율은 3.7~4.2일/10년의 점차 늦어지는 추세이다. 3월의 발아 및 개화시기의 변화가 4월과 5월에 비해 뚜렷하며, 단풍절정 시기가 단풍시작 시기보다 더 뚜렷한 변화를 보였다. 즉, 겨울철에서 봄철로 계절이 변하는 시점과 가을철에서 겨울철로 계절이 변하는 시점의 식물계절 시기의 변화가 뚜렷하다.

대부분 지역에서 봄 식물계절지수(SPI)는 음의 값을 보여 봄철 식물계절 시기가 앞당겨지고 있음을 보였으며, 가을 식물계절지수(API)는 양의 값을 보여 가을철 식물계절 시기가 늦어지는 경향을 보

졌다. SPI의 변화율은 해안보다 내륙에서 -3.0일/10년 이상으로 커 내륙에서 봄철 식물계절 시기가 더 앞당겨지는 추세이다.

SPI는 발아 및 개화가 시작되기 직전인 2월과 3월의 기온과 높은 상관관계를 보였다. 특히, 한반도의 SPI와 2월에서 3월의 평균기온 간에 높은 상관관계를 보였으며, 2월에서 3월 동안의 평균기온이 1°C 상승함에 따라 봄철 식물계절이 3.8일씩 앞당겨지는 추세였다.

API는 단풍이 시작되기 직전인 10월 평균기온과 상관관계가 가장 높으며, 10월 평균기온이 1°C 상승함에 따라 가을철 식물계절은 지역별로 0.7~6.5일 늦어지는 경향이다. 한반도의 API와 10월 평균기온 간에는 3.1일/°C의 높은 상관관계를 보였다.

식물계절 관측 자료를 통한 식물계절 시기의 변화 경향 연구는 생태계에 관한 기후변화의 영향을 평가하는 데 중요하다. 이는 식물계절 시기의 변화로 인해 나타날 수 있는 사회·경제적 문제 및 환경 변화에 대한 영향을 예측하고 그에 대한 대책을 수립하는데 중요한 자료가 될 수 있다. 유럽이나 미국, 중국 등은 생물계절관측망의 구축이 매우 잘 이루어져 있으나 우리나라의 경우에는 아직 다양한 생물계절 관측 자료의 구축이 부족하다. 기후 변화 특성을 반영하는 다양한 장기적인 생물계절 자료 구축이 이루어진다면 좀 더 지역적인 규모에서 기후의 장기적인 변화 경향을 평가 및 예측할 수 있을 것이다.

주

- 1) 식물의 발아는 눈을 보호하고 있는 인피가 터져서 잎이나 꽃잎이 보이는 상태를 의미하며, 관측목 눈의 총 수 중 약 20%가 발아한 날을 발아일로 관측한다. 개화는 꽃봉오리가 피었을 때를 말하나 그 정도를 정의하기 곤란하므로 한 개체에 많은 꽃이 피는 다화성식물은 한 개체 중 몇 송이가 완전히 피었을 때를 개화일로 본다. 단풍은 가을이 되면 잎 속의 색소가 변화하여 잎의 색이 홍색이나 황색으로 변화하는 현상으로, 어느 식물을 전체적으로 관찰했을 때 약 20% 정도 물들기 시작한 날을 단풍 시작일로 하고 80% 정도 물들었을 때를 단풍 절정일로 관측한다(기상청, 2003).

문헌

- 기상청, 2003, 계절관측지침.
- 윤진일, 2006, 기후변화에 따른 벚꽃 개화일의 시공간 변이, 한국농림기상학회지, 8(2), 68-76.
- 이승호·이경미, 2003, 기온 변화에 따른 벚꽃 개화 시기의 변화 경향, 환경영향평가, 12(1), 45-54.
- Ahas, R., 1999, Long-term phyto-, ornitho- and ichthyophenological time-series analyses in Estonia, *International Journal of Biometeorology*, 42, 119-123.
- Ahas, R., Aasa, A., Menzel, A., Fedotova, V. G., and Scheifinger, H., 2002, Changes in European spring phenology, *International Journal of Climatology*, 22, 1727-1738.
- Ahas, R. and Aasa, A., 2006, The effects of climate change on the phenology of selected Estonian plant, bird and fish populations, *International Journal of Biometeorology*, 51, 17-26.
- Ahas, R., Jaagus, J., and Aasa, A., 2000, The phenological calendar of Estonia and its correlation with mean air temperature, *International Journal of Biometeorology*, 44, 159-166.
- Aono, Y. and Kazui, K., 2008, Phenological data series of cherry tree flowering in Kyoto, Japan, and its application to reconstruction of springtime temperatures since the 9th century, *International Journal of Climatology*, 28, 905-914.
- Chmielewski, F. M. and Rotzer, T., 2001, Response of tree phenology to climate change across Europe, *Agricultural and Forest Meteorology*, 108, 101-112.
- Chmielewski, F. M., Muller, A., and Bruns, E., 2004, Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961-2000, *Agricultural and Forest Meteorology*, 121, 69-78.
- Cook, B. I., Cook, E. R., Huth, P. C., Thompson, J. E., Forster, A., and Smiley, D., 2008, A cross-taxa phenological dataset from Mohonk

- Lake, NY and its relationship to climate, *International Journal of Climatology*, 28, 1369-1383.
- Crick, H. Q. P. and Sparks, T. H., 1999, Climate change related to egg-laying trends, *Nature*, 399, 423-424.
- Crick, H. Q. P., Dudley, C., Glue, D. E., and Thomson, D. L., 1997, UK birds are laying eggs earlier, *Nature*, 388, 526.
- Defila, C. and Clot, B., 2001, Phytophenological trends in Switzerland, *International Journal of Biometeorology*, 45, 203-207.
- Donnelly, A., Jones, M. B., and Sweeney, J., 2004, A review of indicators of climate change for use in Ireland, *International Journal of Biometeorology*, 49, 1-12.
- Findlay, S. T. G. and Jones, C. G., 1989, *How can we improve the reception of long-term studies in ecology? In Long-term Studies in Ecology: Approaches and Alternatives*, Springer-Verlag, New York, 201-202.
- Fitter, A. H., Fitter, R. S. R., Harris, I. T. B., and Williamson, M. H., 1995, Relationship between first flowering data and temperature in the flora of a locality in central England, *Functional Ecology*, 9, 55-60.
- Ho, C. H., Lee, E. J., Lee, I., and Jeong, S. J., 2006, Earlier spring in seoul, Korea, *International Journal of Climatology*, 26, 2117-2127.
- Hu, Q., Weiss, A., Feng, S., and Baenziger, P. S., 2005, Earlier winter wheat heading dates and warmer spring in the U.S. Great Plains, *Agricultural and Forest Meteorology*, 135, 284-290.
- IPCC, 2001a, *Summary for Policymakers. A Report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, Shanghai.
- IPCC, 2001b, *Summary for Policymakers. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. A Report of Working Group II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, Geneva.
- IPCC, 2007, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Keatley, M. R., Fletcher, T. D., Hudson, I. L., and Ades, P. K., 2002, Phenological studies in Australia: Potential application in historical and future climate analysis, *International Journal of Climatology*, 22, 1769-1780.
- Lechowicz, M. J., 1995, Seasonality of flowering and fruiting in temperate forest trees, *Canadian Journal of Botany-Revue Canadienne De Botanique*, 73, 175-182.
- Lu, P., Yu, Q., Liu, J., and Lee, X., 2006, Advance of tree-flowering dates in response to urban climate change, *Agricultural and Forest Meteorology*, 138, 120-131.
- Menzel, A., 2000, Trends in phenological phases in Europe between 1951 and 1996, *International Journal of Biometeorology*, 44, 76-81.
- Menzel, A. and Fabian, P., 1999, Growing season extended in Europe, *Nature*, 397, 659-663.
- Parnesan, C., Ryrholm, N., Stefanescu, C., Hill, J. K., Thomas, C. D., Descimon, H., Huntley, B., Kaila, L., Kullberg, J., Tammaru, T., Tennent, W. J., Thomas, J. A., and Warren, M., 1999, Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming, *Nature*, 399, 579-583.
- Sagarin, R. and Micheli, F., 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, *International Journal of Biometeorology*, 42, 113-118.

- Schwartz, M. D. and Chen, X., 2002, Examining the onset of spring in China, *Climate Research*, 21, 157-164.
- Schwartz, M. D. and Reiter, B. E., 2000, Changes in North American spring, *International Journal of Climatology*, 20, 929-932.
- Sparks, T. H., Jeffree, E. P., and Jeffree, C. E., 2000, An examination of the relationship between flowering times and temperature at the national scale using long-term phenological records from the UK, *International Journal of Biometeorology*, 44, 82-87.
- Tao, F., Yokozawa, M., Xu, Y., Hayashi, Y., and Zhang, Z., 2006, Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China, 1981~2000, *Agricultural and Forest Meteorology*, 138, 82-92.
- Walkovszky, A., 1998, Changes in phenology of the locust tree (*Robinia pseudoacacia* L.) in Hungary, *International Journal of Biometeorology*, 41, 155-160.
- Walther, G. R., Posst, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T. J. C., Fromentin, J. M., Hoegh-Guldberg, O., and Bairlein, F., 2002, Ecological responses to recent climate change, *Nature*, 416, 389-395.
- Whitfield, J., 2001, Climate change data: the budding amateurs, *Nature*, 414, 578-579.
- Zhao, T. and Schwartz, M. D., 2003, Examining the onset of spring in Wisconsin, *Climate Research*, 24, 59-70.
- 교신 : 이승호, 143-701, 서울특별시 광진구 화양동 1번지, 건국대학교 지리학과(이메일: leesh@konkuk.ac.kr, 전화: 02-450-3380, 팩스: 02-3436-5433)
Correspondence: Lee, Seung Ho, Department of Geography, Konkuk University, 1 Hwayang-dong, Gwangjin-gu, Seoul, 143-701, Korea (e-mail: leesh@konkuk.ac.kr, phone: +82-2-450-3380, fax: +82-2-3436-5433)
- (접수: 2009.4.15, 수정: 2009.5.14, 채택: 2009.6.18)