

MODIS 시계열 자료 (2001~2011) 및 Timesat 알고리즘에 기초한 남한 지역 식물계절 분석

김남신^{1,2} · 조용찬^{1,*} · 오승환¹ · 권혜진¹ · 김경순²

¹국립수목원 산림자원보존과, ²국립생태원 생태평가팀

A Phenology Modelling Using MODIS Time Series Data in South Korea. Kim, Nam-Shin^{1,2}, Yong-Chan Cho^{1,*}, Seung-Hwan Oh¹, Hye-Jin Kwon¹ and Gyung-Soon Kim² (¹Plant Conservation Division, Korea National Arboretum, Pocheon-si 487-829, Korea; ²Ecological Assessment Team, National Institute of Ecology, Seocheon-gun 325-813, Korea)

Abstract This study aimed to analyze spatio-temporal trends of phenological characteristics in South Korea by using MODIS EVI. For the phenology analysis, we had applied double logistic function to MODIS time-series data. Our results showed that starting date of phenology seems to have a tendency along with latitudinal trends. Starting date of phenology of Jeju Island and Mt. Sobeak went back for 0.38, 0.174 days per year, respectively whereas, Mt. Jiri and Mt. Seolak went forward for 0.32 days, 0.239 days and 0.119 days, respectively. Our results exhibited the fluctuation of plant phenological season rather than the change of phenological timing and season. Starting date of plant phenology by spatial distribution revealed tendency that starting date of mountain area was late, and basin and south foot of mountain was fast. In urban areas such as Seoul metropolitan, Masan, Changwon, Milyang, Daegu and Jeju, the phenological starting date went forward quickly. Phenological attributes such as starting date and leaf fall in urban areas likely being affected from heat island effect and related warming. Our study expressed that local and regional monitoring on phenological events and changes in Korea would be possible through MODIS data.

Key words: climate change, MODIS, plant phenology, starting date of plant phenology, Timesat Algorithms

서 론

우리는 기후변화가 초래한 많은 생태학적 영향의 분명한 흔적들과 마주하고 있다 (Walther *et al.*, 2002; Parmesan and Yohe, 2003; Root *et al.*, 2003; Parmesan, 2006). 생물계절, 종 분포 변화 그리고 생리적 변화들이 기후변화의 영향에 포함되고 있다. 생물계절의 변화는

다양한 생태계에서 나타나고 있는데 (Sparks and Carey, 1995), 조류는 시기를 앞당겨 알을 낳고 있으며 (Brown *et al.*, 1999; Crick and Sparks, 1999b), 식물들은 일찍 꽃피우고 열매를 맺고 (Cayan, 2001), 양서류는 일찍 짝짓기를 하고 있다 (Beebe, 1995; Gibbs and Breisch, 2001). 전반적으로, 지난 십 년에 걸쳐 봄철 현상들은 2.3일 빨리 나타나고 있다 (Parmesan and Yohe, 2003). 이러한 생물계절 변화는 군집 구성 및 생태계 기능의 결과인 상호의존적인 생태 현상의 발생 시기를 어긋나게 하고 있다 (Stenseth and Myrsetrud, 2002).

지구온난화로 인한 기온의 증가는 1차 생산자로서, 식

Manuscript received 14 August 2014, revised 15 September 2014,
revision accepted 16 September 2014

* Corresponding author: Tel: +82-31-540-1062, Fax: +82-31-540-1060
E-mail: bz0288@forest.go.kr

© The Korean Society of Limnology. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provide the original work is properly cited.

물의 생장과 발달에 영향을 미치고 나아가 식물의 발아, 개엽, 개화, 낙엽 등 식물계절 시기를 변화시키고 있다. 식물계절 현상 변화는 그 주기와 함께 진화해 온 많은 인간 활동이 그것의 급격한 변화에 적응하지 못하여 다양한 문제를 일으키고 있다 (Costanza *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2009; Lee, 2011; Oh *et al.*, 2011).

한편 지구온난화 문제는 주로 거시적인 측면에서 다루어지고 있다. 그 결과, 지역 단위의 관측 자료 축적이 부족하여 환경 및 생태적 문제에 대한 원인 진단 및 대안을 마련하는 데 한계점을 보여 왔다. 이러한 측면에서 식물계절 시기는 지역 및 국가 단위에서 매년 반복되는 계절 변화를 직접적으로 반영하기 때문에 지구온난화의 주요 지표로 활용할 수 있다 (Sherry *et al.*, 2007; Kim and You, 2010).

현장 자료를 통한 국가 또는 지역 차원의 계절성 변동 (variation) 및 변화 (change)를 분석하는 것은 공간 규모의 한계로 인하여 공간 특성 및 환경 구배에 의한 식물계절의 양상을 표현하는 데 한계가 있다. 식물의 개엽 (budding) 또는 개화 (flowering)는 식물계절 현상을 측정하는 가장 주요 지표들이다. 현재까지 식물학과 관련된 계절의 시작 및 개화에 대한 연구는 현장 관찰을 통한 자료수집과 분석이 대부분이었다. 이러한 현장 기반의 조사는 직접적인 관찰임에도 불구하고, 관찰자, 시기, 기간, 방법 그리고 숙련도와 같은 생물계절성 기록의 많은 한계점을 내포하고 있으며, 현장 자료와 연계성을 고려할 수 있고, 공간적 또는 구배의 한계를 극복할 수 있는 관측 기법에 대한 다양한 접근이 필요하다.

앞서 언급한, 현장 관찰 및 공간 규모의 문제점을 극복할 수 있는 유력한 대안은 위성영상 기반의 식생지수 (Vegetation Index)를 이용한 식물계절 변화 분석이다 (Jeremy *et al.*, 2007; Hird and McDermid, 2009). 식생지수는 적외선 파장과 가시광선의 녹색밴드의 비율을 계산한 결과로서 이론적으로 0~1의 값을 갖는다. 식물이 활동력이 활발할수록 값은 1에 근사하게 된다. 따라서 1월부터 12월까지 식생지수를 그래프로 그리게 되면 정상분포 곡선의 형태를 갖는데, 이 변곡점들이 개화, 개엽, 낙엽 등의 식물계절 주기를 드러나게 한다 (Jönsson and Eklundh, 2002, 2003; Zhang *et al.*, 2003; Jönsson *et al.*, 2010).

현재 지구의 해양, 대기, 수체, 빙하, 사막화, 식생, 오존, 탄소, 황사 등 환경정보를 매일 촬영하여 1~2일 간격으로 지구로 송출하는 것은 MODIS 위성 영상이다. 일 단위로 진행되는 식물계절의 변화를 관찰하는 데 적합한 위성영상은 매일 촬영이 가능해야 한다. 위성체

중, 정지위성은 사용 목적이 특수한 경우가 많아 식물계절 파악에 적합하지 않으며, 주기가 짧은 위성영상이 적합하다. MODIS는 2000년 1월부터 활동하여 현재까지 전지구의 환경관련 정보들을 획득하여 영상을 정보화하고 있다. MODIS 영상은 36개 밴드, 250 m, 500 m, 1 km² 해상도로 식생, 자연 및 환경정보를 수집할 수 있어 광범위한 분야와 공간 범위에서 이용할 수 있다. 이러한 MODIS의 식생지수 자료를 1월부터 12월까지 활용하면 1년간의 식생 변화뿐만 아니라 식물계절 특징을 파악할 수 있다 (Zhang *et al.*, 2004, 2006).

위성영상을 이용한 식물계절 정보화는 식물계절 변화 모니터링에 필요한 기초 정보를 제공해 줄 수 있을 뿐만 아니라 현장 관측 자료와 연계하여 식물계절 변화의 예측도 향상에 기여할 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 2000년부터 2011년까지 MODIS 시계열 영상을 모델링하여 1) 한반도 남한 지역의 전반적인 식물계절 양상 및 2) 공간 특성을 분석하며, 3) 연구 결과의 활용성에 관하여 논의하고자 한다. 다만, MODIS 영상은 최고 250 m에서 최저 1,000 m의 해상도를 갖는다. MODIS 영상의 해상도를 이용하여 식물개화 탐색은 현장 모니터링 자료와 영상 픽셀단위 별로 장기적으로 추적하지 않으면 불가능하다. 본 논문은 중 수준의 개엽 및 개화 현상을 분석하기보다는, 우리나라의 식물 개엽 현상의 공간 경향을 살펴보고자 한다.

재료 및 방법

본 연구에 사용된 MODIS 위성영상은 2001~2011년 11년간 16일 간격의 영상을 사용하였다. 자료는 Julian Day 기준 (1.1~12.31 합산일)으로 1일 (1월 1일)에서 353일 (12월 19일)까지 1년 23개 영상, 11년간 253개 영상을 분석에 활용하였다.

MODIS 위성영상은 대륙이나 국가 등 광역적 단위로 매일 촬영되는 영상으로 촬영범위가 넓어 기상조건의 영향과 대기의 영향을 제거하기 위해 재합성하여 NASA에서 배포하고 있다. 영상재합성 알고리즘은 공개되어 있으며 일단위 정보가 합성영상에 반영되도록 설계되어 있기 때문에 일반화되어 사용되고 있다. 특정 종이나 작은 지역 설명에 무리가 있을 수 있으나 전체적인 경향 분석에 충분한 설명력을 갖는 것으로 검증되어 있다.

16일 간격으로 재합성된 영상 기반의 식물계절 변화 분석은 식생지수 NDVI (Normalized Vegetation Index)보다 Sensor Saturation, 대기산란 효과, 연무현상, 지형

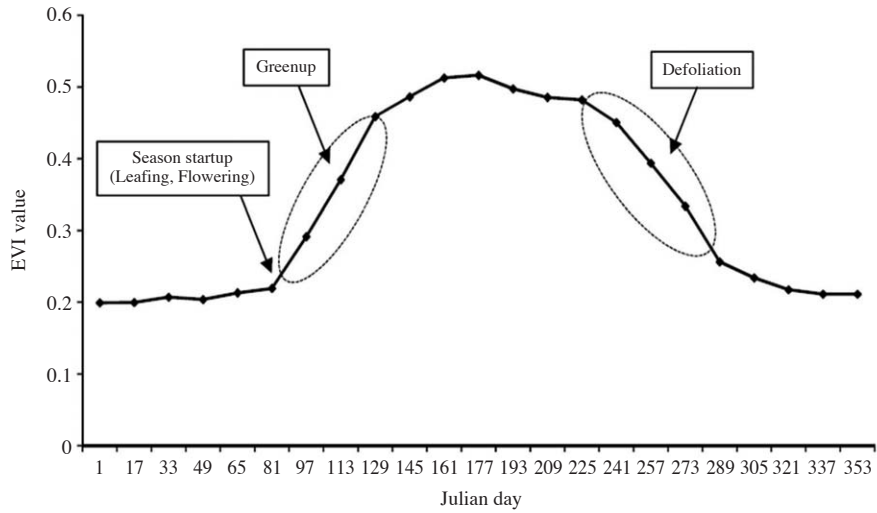


Fig. 1. Phenology change model by MODIS EVI (Enhanced Vegetation Index).

효과, 산림밀집지역 등의 난반사 효과 감소에 더 효과적인 EVI (Enhanced Vegetation Index)를 이용하였다.

1년 동안의 자료를 이용한 EVI 식생지수 값을 Time Profile Metrics로 표현하면 개엽, 개화, 낙엽의 계절 변화를 파악할 수 있다 (Fig. 1).

EVI 분석을 통하여 2001년부터 2011년까지 개별 연도에 대한 식물계절 시기 및 변화를 알아볼 수 있다. 그러나 개별 연도의 분석 결과를 중첩하게 되면 변화 양상보다는 기상 또는 날씨 변동성이 반영된 결과가 나타나게 된다. 따라서 11년간의 변동에 대한 변화를 살펴 보기 위해 자료를 통계적으로 변형시켜야 한다.

또한, 식생지수는 영상촬영일의 기상상태에 따른 자료 오류, 그리고 1일 자료를 16일 간격의 이산자료로 재합성했기 때문에 데이터 변이가 제거되지 않아 식물계절 변화 해석에 오류가 발생할 수 있다. 이를 보완하기 식물종의 개엽 및 개화일 자료를 활용하여 보완하고 있다 (Kim *et al.*, 2013).

자료의 변이를 제거하고 변화 경향성을 파악할 수 있도록 적용하는 방법이 자료 평활화 (Smooth Curve Fitting)이다. 자료 평활화 방법은 그간 연구에서 여러 방법이 개발되었으나, 본 연구에서는 Savitzky-Golay filtering과 Gaussian and Double logistic model functions을 적용하였고 (Wang and Engel, 1998; Li *et al.*, 2011), 변인 통제를 통해 자료의 공간적 특성에 따라 적용할 수 있도록 개발된 Timesat Algorithms을 사용하였다. Timesat Algorithms은 3개년도 자료를 평활화시켜 계절변화의 경향을 파악할 수 있도록 개발된 프로그램이다 (Jönsson and Eklundh, 2004; Tan *et al.*, 2011).

Timesat Algorithms은 계절시작이 12월에도 시작될 수 있는 지역이 있기 때문에 n-1년간 계산할 수 있도록 개발된 방법이다. 예를 들면 본 연구에 이용된 자료는 11년간이지만 평활화에는 10년까지 계산할 수 있다.

식물계절 분석 결과는 한국 전역, 주요 산림 지역, 그리고 시, 군 규모를 중심으로 공간 분포 특성을 논의하였다. Timesat Algorithms 적용에 의한 계절 시작에 대한 공간 특성 분석은 방해요인이 되는 지역을 Masking 처리하는 것이 필요하다. 공간적 방해요인은 인공구조물로 조성된 도시지역과 농경지이다. 알고리즘 적용 시 도시지역과 농경지를 제외시키고 분석하였다.

연구 기간에 해당하는 2001에서 2010년의 한반도는 평년 (1971~2000)과 비교하여 기온은 0.5°C 및 연강수량은 97.4 mm 증가하였으며, 본 연구의 주요 관심 시기인 봄철보다는 가을철 최저기온 상승이 평균 기온 상승에 큰 영향을 준 것으로 보고되고 있다 (Lee *et al.*, 2011).

결과 및 고찰

1. 한국 및 주요 산림 지역의 식물계절 변화

Timesat Algorithms에 의한 계절 변화는 남한 전체를 대상으로 분석하였다. 또한 분석결과를 제주도 한라산, 남해안, 지리산, 소백산, 설악산 등 주로 산림 지역을 고려하여 위도와 고도를 달리하여 나타나는 변화를 살펴 보았다.

개별 지역의 식물계절 시작일을 10년간의 자료로 분

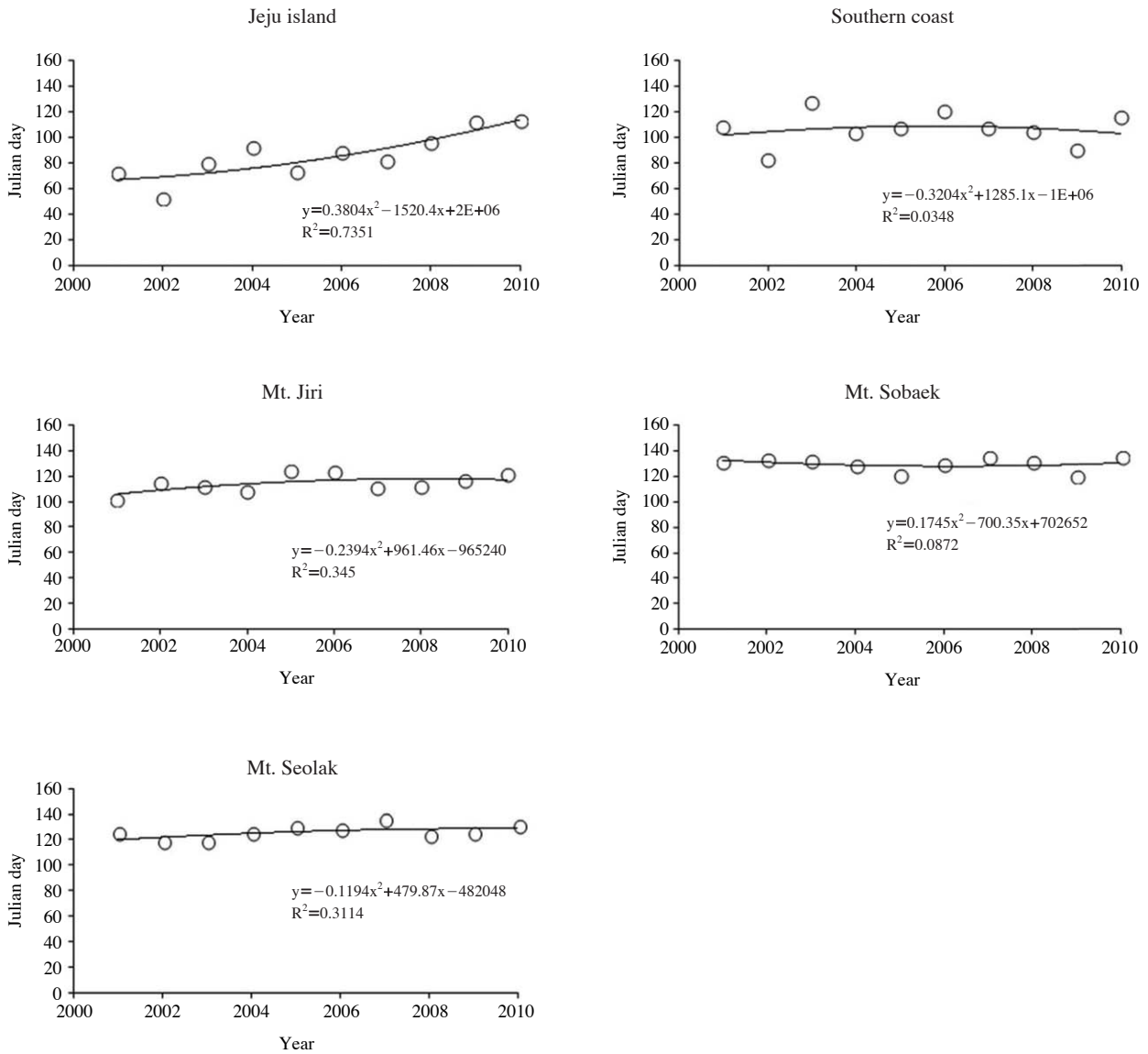


Fig. 2. Regression on the day of seasonal startup for 10 years in major forest areas in South Korea.

석하여 살펴보면 (Fig. 2), 유사성보다는 지역 변동의 특징을 보다 잘 나타내는 것으로 나타났다. 10년 관측 자료의 경향성을 살펴보면, 제주도는 연간 0.38일, 그리고 소백산지역은 0.174일 늦어지는 것으로 나타났고, 반대로 남해안은 0.32일, 지리산은 0.239일, 그리고 설악산 지역은 0.119일 개엽일이 앞당겨지고 있는 것으로 분석되었다.

위성영상 분석에 의해 나타난 식물계절 시작일 변화 양상의 공간적 변이는 현장 자료에 기초한 관측과 직접적 연결성 보다는 다양한 관점의 해석을 필요로 한다. 현장 식물계절 관측의 경우, 관찰자, 시기, 기간, 방법 그

리고 숙련도 등이 계절 시작 시점에 영향을 주며, 미지형과 미기후와 같은 소공간 환경 특성이 반영되어 나타난다. 반면, 본 연구와 같은 위성영상을 활용하며, 큰 공간규모에서 나타나는 식물계절 양상은 앞서 언급한 현장 관측 특성과 달리 개엽과 동시에 시작되는 녹음의 발달 일과 깊은 상관성을 나타내고 있다.

결과에서 나타난 산림 지역 간 식물계절 시작 양상의 변이성은 보다 장기 위성자료의 필요성을 나타낸다. 급속한 도시화 및 토지이용 변화로 인하여 빠른 속도로 온난화가 진행되고 있는 한국 10년 수준의 자료에서는 온난화에 따른 식물계절 현상의 전진보다는 공간 특성

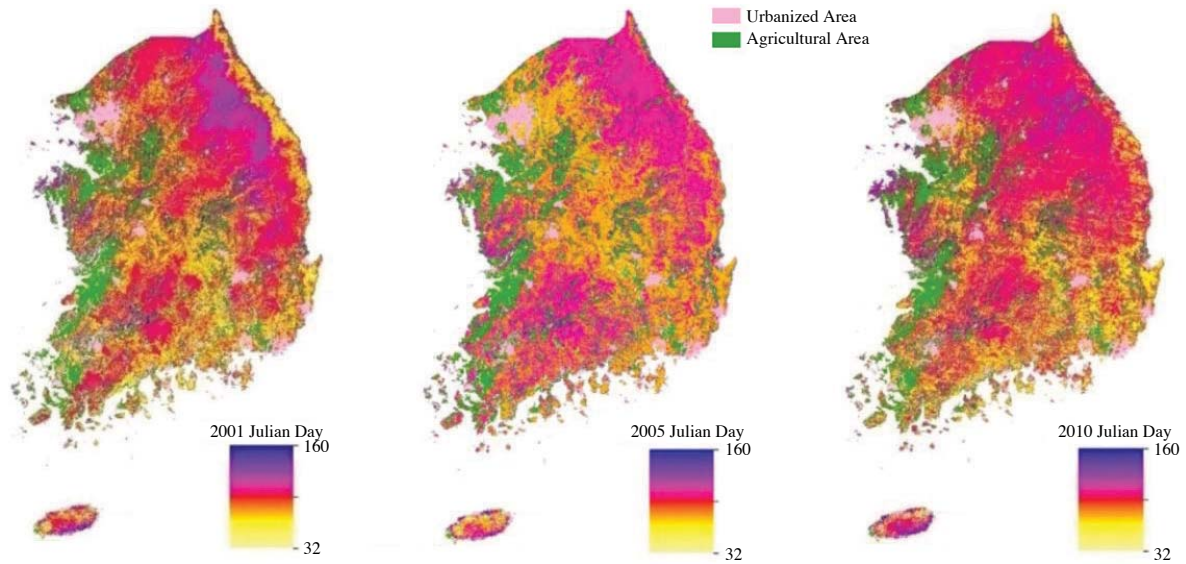


Fig. 3. Geo-spatial distribution of plant phenology by Timesat Algorithms in South Korea.

에 의해 변화 양상이 결정되는 것을 잘 나타내고 있다. 그리고 식물 개엽일과 녹음의 진행은 불안정한 봄철 기후에 영향을 크게 받는 것 또한 영향을 줄 것으로 판단된다.

2. Timesat Algorithms에 의한 식물계절 시작의 지형공간 특성

Timesat Algorithms 적용을 토대로 계절 시작에 대한 지형 및 지역별 공간 특성 분석을 실시하였다(Fig. 3). 제시한 적용시기 중 2001, 2005, 2010년, 3시기 모두 우리나라 주요 산맥지역은 개엽이 늦게 시작되고, 산맥의 산록사면을 따라 시작일이 빠른 것으로 나타났다. 산록사면 중, 분지 지역의 사면과 남사면 지역이 빠른 것이 또한 관찰되었다. 지역적으로는 제주도, 남서해안 및 동남해안 사면 지역이 빠르게 시작되었다. 동해안의 산록사면시대에서도 빠른 것으로 분석되었다. 남해안의 경우 해안선을 따라 전체적으로 시작일이 빠르지만 동남해안 즉 경상남도와 경북의 포항 일대를 따라 더욱 빠른 경향을 보였다. 상대적으로 서해안 일대는 해안선을 따라 늦게 나타났는데 이는 편서풍의 영향으로 식물계절의 시작이 늦게 시작되는 것으로 해석할 수 있다.

3. 행정구역 별 식물계절 시작 특성

행정구역(시 및 군) 별 계절 시작일 변동을 살펴보기 위해 행정구역 자료를 기준으로 2001~2010년까지의

특성을 분석하였다. 본 연구에서는 2001, 2005, 2010년 3개년도 5년 단위 자료를 제시하였다(Fig. 4).

2001년에는 서울과 경기도, 동해안, 남해안, 마산, 창원, 밀양, 대구, 그리고 제주도를 중심으로 계절 시작일이 빠른 것으로 나타났다. 서울, 경기도, 마산, 창원, 밀양, 대구 등의 도시지역은 도시화에 따른 기온상승 영향으로 식물 계절이 빠른 것으로 해석된다. 이는 2005, 2010년에서도 유사한 경향으로 나타나고 있다. 따라서 우리나라의 식물계절의 도시별 경향성은 도시화 영향이 강하게 반영되어 나타나고 있다.

동해안을 따라 계절 시작일이 빠른 것은 도시화보다는 지형 조건 및 해수 온도의 영향이 복합적으로 반영된 것으로 판단된다. 비교적 시작일이 빠른 도시화 지역과 달리 동해안 지역은 지난 수십 년 간 큰 도시화 또는 개발이 진행되지 않았다. 동해안 지역은 백두대간 및 낙동정맥의 동사면에 해당하여 나머지 사면에 비해 비교적 햇빛의 영향을 더 많이 받는 공간이 된다. 그리고 온난화와 함께, 동해안을 포함한 우리나라 연안 지역의 해수면 온도 상승은 지역 기온 상승을 보조하게 되며 계절 시작일에 영향을 미칠 수 있다.

MODIS 영상을 활용한 남한 지역의 전반적인 식물계절 변화 양상을 살펴보면(Fig. 5), 2001년과 2010년 사이에는 시작일이 빨라진 것으로 파악되지만, 2005년에는 2001 및 2010년과 비교해 오히려 늦어진 것으로 나타났다. 위성영상을 통하여 한반도에서의 다양한 식물계절의 년 변동을 보다 효과적으로 관찰할 수 있다. 이러

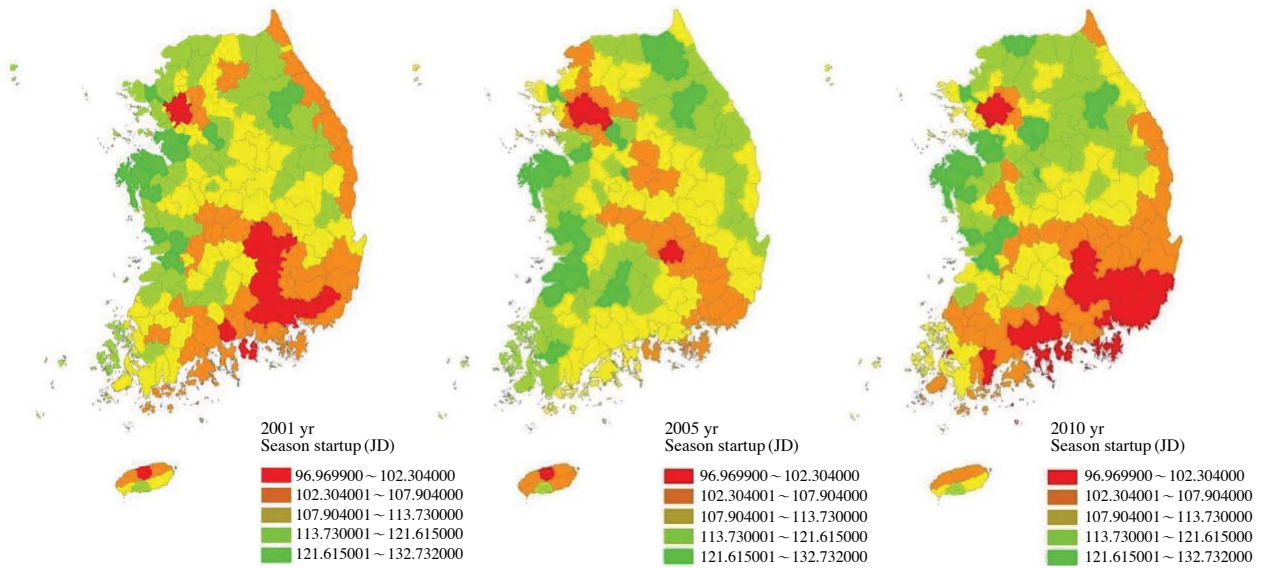


Fig. 4. Season startup by administrative districts in South Korea.

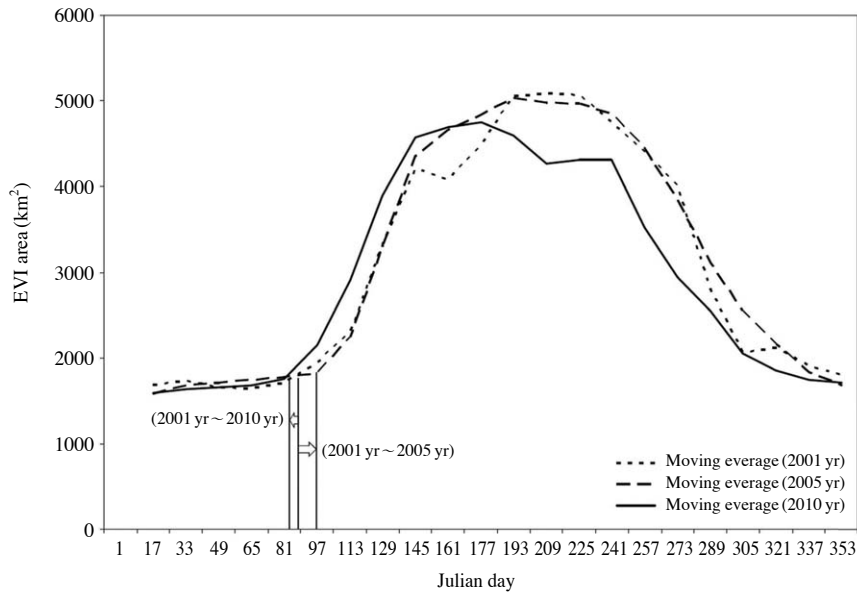


Fig. 5. Observed variation of season startup in South Korea.

한 결과는 앞서 언급한 바와 같이, 30년 이상의 보다 장기적인 자료를 축적을 통하여 기후변화 양상에 따른 생물계절 현상 변화와 해석에 중요한 역할을 할 것으로 생각된다.

적 요

본 연구는 MODIS 위성영상을 이용하여 광역적으로

진행되고 있는 식물계절학적 특징을 분석하고자 수행하였다. 위성영상을 이용한 식물계절학적 특징 분석은 현장 관찰 자료의 분석을 위한 전반적인 식물계절 경향성 및 변동성에 필요한 정보를 제공해 줄 수 있으며, 현장 관찰 값과 광역 식물계절 관측 값의 연결을 통하여 광역 수준에서 보다 정밀도 높은 식물 계절현상 모니터링을 가능하게 한다.

본 연구의 기반이 된 MODIS EVI 자료는 Timesat

Algorithms의 double logistic function으로 평활화시켜 분석하였다. 제주→남해안→지리산→소백산→설악산의 위도 분포에 따라 식물계절 시작일은 늦어지는 경향을 보였다. 그러나 11년간 주요 산림 지역에서의 식물계절 시작은 해마다 시작일에 다르게 나타나는 연변동의 특징을 보였다. 변동 자료를 고차다항식으로 변형한 결과, 제주도는 연간 0.38일, 소백산지역은 0.174일 계절 시작이 늦어지고, 남해안은 0.32일, 지리산은 0.239일, 설악산 지역은 0.119일 개엽일이 빨라지고 있는 것으로 나타났다.

우리나라 전체 식물계절 시작 시기의 특징을 공간적으로 살펴보면, 주요 산림 지역은 늦어지고, 분지나 산록의 남사면지역에는 빨라지는 것으로 나타났다. 지역적으로 살펴보면, 제주도의 남서해안 및 북동해안 사면지역, 동남해안 지역이 빠른 경향을 보였다.

행정구역별 식물계절 시작 시기를 분석한 결과, 2001년에는 서울과 경기도, 동해안, 남해안, 마산, 창원, 밀양, 대구, 제주도를 중심으로 빠르게 시작되었다. 이는 서울, 경기도, 마산, 창원, 밀양, 대구 등의 도시지역은 도시화에 따른 기온상승의 영향인 것으로 해석된다. 이 같은 경향은 2005, 2010년에도 같은 경향으로 보이고 있어 도시화가 식물계절 변화에 중요한 영향을 미치고 있는 것으로 해석할 수 있다.

본 연구의 시간적 규모인 10년 이내에서는 기후변동에 따른 식물계절 현상의 변이성을 잘 나타내었으며, 이러한 식물계절 모니터링 기법은 30년 이상의 보다 장기적인 자료를 축적을 통하여 기후변화 양상에 따른 생물계절 현상 변화와 해석에 중요한 역할을 할 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 2011년 및 2012년 환경부 “국가장기생태연구” 사업의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Beebe, T.J.C. 1995. Amphibian breeding and climate. *Nature* **374**: 219-220.
- Brown, J.L., S.H. Li and N. Bahagabati. 1999. Long-term trend toward earlier breeding in an American bird: a response to global warming? *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America* **96**: 5565-5569.
- Cayan, D.R. 2001. Changes in the onset of spring in the western United States. *Bulletin of the American Meteorological Society* **82**: 399.
- Costanza, Z., J.A. Andresen and J.A. Flore. 2006. Phenological models of flower bud stages and fruit growth of ‘Montmorency’ sour cherry based on growing degree-day accumulation. *Journal of the American Society for Horticultural Science* **131**(5): 601-607.
- Crick, H.Q.P. and T.H. Sparks. 1999. Climate related to egg-laying trends. *Nature* **399**: 423-424.
- Fisher, J.I., A.D. Richardson and J.F. Mustard. 2007. Phenology model from surface meteorology does not capture satellite-based greenup estimations. *Global Change Biology* **13**: 707-721.
- Gibbs, J.P. and A.R. Breisch. 2001. Climate warming and calling phenology of frogs near Ithaca, New York, 1900-1999. *Conservation Biology* **15**: 1175-1178.
- Hird, J. and G.J. McDermid. 2009. Noise reduction of NDVI time series: An empirical comparison of selected techniques. *Remote Sensing of Environment* **113**(1): 248-258.
- Jönsson, A.M., L. Eklundh, M. Hellström, L. Barring and P. Jönsson. 2010. Annual changes in MODIS vegetation indices of Swedish coniferous forests in relation to snow dynamics and tree phenology. *Remote Sensing of Environment* **114**: 2719-2730.
- Jönsson, P. and L. Eklundh. 2002. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **40**: 1824-1832.
- Jönsson, P. and L. Eklundh. 2003. Seasonality extraction from time-series of satellite sensor data. In *Frontiers of Remote Sensing Information Processing*, C.H. Chen (Ed.): 487-500.
- Jönsson, P. and L. Eklundh. 2004. TIMESAT - a program for analysing time-series of satellite sensor data. *Computers and Geosciences* **30**: 833-845.
- Kim, N.S., H.C. Lee and J.Y. Cha. 2013. A study on changes of phenology and characteristics of spatial distribution using MODIS images. *The Korea society of Environmental Restoration Technology* **16**(5): 59-69.
- Lee, K., H.J. Baek, C.H. Cho and W.T. Kwon. 2011. The recent (2001-2011) changes on temperature and precipitation related to normals (1971-2000) in Korea. *The Geographical Journal of Korea* **45**: 237-248.
- Lee, S.K. 2011. An Analysis on the effects and Vulnerability of Vegetation Distribution caused by Temperature increase, a Master's degree, Kyunghee University.
- Li, M., Z. Wu, L. Qin and X. Meng. 2011. Extracting vegetation phenology metrics in Changbai Mountains using an improved logistic model. *Chinese Geographical Science* **21**(3): 304-311.
- Parmesan, C. and G. Yohe. 2003. A globally coherent finger-

- print of climate change impacts across natural systems. *Nature* **421**: 37-42.
- Parmesan, C. 2006. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* **37**: 637-669.
- Root, T.L., J.T. Price, K.R. Hall, S.H. Schneider, C. Rosenzweig and J.A. Pounds. 2003. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature* **421**: 57-60.
- Sherry, R.A., X. Zhou, S. Gu, J.A. Arnone, D.S. Schimel, P.S. Verburg, L.L. Wallace and Y. Luo. 2007. Divergence of reproductive phenology under climate warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **104**(1): 198-202.
- Sparks, T.H. and P.D. Carey. 1995. The responses of species to climate over two centuries: An analysis of the Marsham phenological record, 1736-1947. *Journal of Ecology* **83**: 321-329.
- Stenseth, N.C. and A. Mysterud. 2002. Climate, changing phenology, and other life history traits: Nonlinearity and match-mismatch to the environment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **99**: 13379-13381.
- Tan, B., J. Morisette, R. Wolfe, F. Gao, G. Ederer, J. Nightingale and J. Pedelty. 2011. An Enhanced TIMESAT Algorithm for Estimating Vegetation Phenology Metrics From MODIS Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* **4**(2): 361-371.
- Walther, G.R., E. Post, P. Convey, A. Menzel, C. Parmesan, T.J.C. Beebee, J.M. Fromentin, O. Hoegh-Guldberg and F. Bairlein. 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature* **416**: 389-395.
- Wang, E.L. and T. Engel. 1998. Simulation of phenological development of wheat crops. *Agricultural Systems* **58**(1): 1-24.
- Zhang, X., M.A. Friedl and C.B. Schaaf. 2006. Global vegetation phenology from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Evaluation of global patterns and comparison with in situ measurements. *Journal of Geophysical Research* **111**: 1-14.
- Zhang, X., M.A. Friedl, C.B. Schaaf and A.H. Strahler. 2004. Climate controls on vegetation phenological patterns in northern mid- and high latitudes inferred from MODIS data. *Global Change Biology* **10**: 1133-1145.
- Zhang, X., M.A. Friedl, C.B. Schaaf, A.H. Strahler, J.C.F. Hoedges, F. Gao, B.C. Reed and A. Huete. 2003. Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment* **84**: 471-475.