

HANTS 알고리즘을 이용한 MODIS 영상기반의 식물계절 분석*

최철현¹ · 정성관^{1*}

Analysis of the MODIS-Based Vegetation Phenology Using the HANTS Algorithm*

Chul-Hyun CHOI¹ · Sung-Gwan JUNG^{1*}

요 약

식물계절은 기후변화와 관련된 생태계의 중요한 지표로서 지속적인 모니터링을 필요로 한다. 본 연구에서는 Moderate Resolution Imaging Spectrometer(MODIS) 위성영상을 기반으로 구름이나 기타 영향에 의한 오류를 보정한 식생지수를 통해 국내 산림의 식물계절학적 특성을 분석하였으며, 이에 Harmonic Analysis of NDVI Time-Series(HANTS) 알고리즘을 이용하였다. 그 결과, 위성영상 기반 식생지수의 노이즈를 효과적으로 감소시킬 수 있었으며, 고도에 의한 식물계절 변화 및 경향을 파악할 수 있었다. 식물계절시기는 고도에 따른 변화경향이 뚜렷하게 나타났으며, 침엽수의 경우 생육개시일과 생육종료일, 생육기간은 각각 +0.71일/100m, -1.33일/100m, -2.04일/100m, 활엽수의 경우 +1.50일/100m, -1.54/100m, -3.04/100m, 혼효림의 경우 +1.39일/100m, -2.04일/100m, -3.43일/100m로 분석되었다. 고도에 따른 식물계절시기의 변화는 기온과 관련된 것으로 판단되며, 활엽수림이 침엽수림보다 변화에 대한 민감도가 더 높은 것으로 나타났다.

주요어 : 식물계절학, 식생지수, 평활화, 푸리에 함수, 위성영상

ABSTRACT

Vegetation phenology is the most important indicator of ecosystem response to climate change. Therefore it is necessary to continuously monitor forest phenology. This paper analyzes the phenological characteristics of forests in South Korea using the MODIS vegetation index with error from clouds or other sources removed using the HANTS algorithm. After using the HANTS algorithm to reduce the noise of the satellite-based vegetation index data, we were able to confirm that phenological

2014년 5월 2일 접수 Received on May 2, 2014 / 2014년 6월 25일 수정 Revised on June 25, 2014 / 2014년 7월 2일 심사완료 Accepted on July 2, 2014

* 본 논문은 2012학년도 경북대학교 학술연구비에 의하여 연구되었으며, 2014년 한국지리정보학회 춘계학술대회에서 발표한 내용을 수정·보완한 것임.

1 경북대학교 조경학과 Dept. of Landscape Architecture, Kyungpook National University

* Corresponding Author E-mail : sgjung@knu.ac.kr

transition dates varied strongly with altitudinal gradients. The dates of the start of the growing season, end of the growing season and the length of the growing season were estimated to vary by $+0.71\text{day}/100\text{m}$, $-1.33\text{day}/100\text{m}$ and $-2.04\text{day}/100\text{m}$ in needleleaf forests, $+1.50\text{day}/100\text{m}$, $-1.54\text{day}/100\text{m}$ and $-3.04\text{day}/100\text{m}$ in broadleaf forests, $+1.39\text{day}/100\text{m}$, $-2.04\text{day}/100\text{m}$ and $-3.43\text{day}/100\text{m}$ in mixed forests. We found a linear pattern of variation in response to altitudinal gradients that was related to air temperature. We also found that broadleaf forests are more sensitive to temperature changes compared to needleleaf forests.

KEYWORDS : *Vegetation Phenology, Vegetation Index, Smoothing, Fourier Function, Satellite Imagery*

서론

지구온난화에 의한 전 지구적인 평균기온의 상승은 온도에 민감한 다양한 생물의 환경에 영향을 미쳤으며, 특히 식생의 영역에서 분포의 변화 및 식물계절 주기의 변동을 야기시켰다(Kim *et al.*, 2012). IPCC 4차 보고서에 따르면 $1.5\sim 2.5^\circ\text{C}$ 정도의 전구적인 평균기온상승으로 인해 동·식물 종의 약 20~30%가 멸종 위기에 처한다고 전망하였다(IPCC, 2007). 또한 2013년 발표된 5차 보고서를 통해 현재 추세로 온난화가 지속될 경우 21세기말의 평균기온은 1986~2005년에 비해 약 3.7°C 가 증가하고 과거보다 극한기상과 기후의 변화에 의한 피해가 더욱 많아질 수 있다는 점을 경고하였다(IPCC, 2013). 이에 기후변화로 인한 생태계의 변화 및 생물다양성과의 관계를 파악하는 것은 매우 중요한 과제로 대두되었다.

기후변화에 의한 식물계절 주기의 변화는 다양한 종들이 서식하고 상호작용하는 구조를 나타내는 생태계 내에서 매우 중요한 요인이며, 광합성 식물이 주를 이루는 독립영양생물계의 변화는 이와 관련된 종속영양생물들에게 막대한 영향을 미쳐 기존 생태계의 불균형을 야기할 수 있다(Edwards and Richardson, 2004; Jo and Park, 2008). 또한 식물의 생육주기 변화는 주변 환경에 영향을 미치게 되며, 토양 내 양분의 변화 및 식물자체의 생산성 증감량

과 탄소고정량을 변화시킨다(Fridley, 2012). 따라서 기후에 대한 연구와 함께 이에 영향을 받는 식물의 계절주기에 대한 정량적인 분석을 통해 생태계의 변화를 지속적으로 모니터링하는 것이 필요하다.

식물계절주기와 관련된 연구의 경우 과거에는 주로 현장조사에 의한 실측으로 이루어졌다면 최근에는 원격탐사를 이용한 방법이 많이 사용되고 있는 추세이다. 1970년대 이후 보편적으로 사용된 인공위성 영상을 이용한 활용기술은 점차 고도화되었으며, 식생의 분포와 생육에 관한 정보는 적외영상을 활용한 식생지수를 통해 광범위한 지역을 정량적으로 분석할 수 있게 되었다(Kim *et al.*, 2013b). 또한 위성기술의 발전에 따라 영상의 시·공간적 해상도가 증가하면서 시계열적인 식생지수의 변화와 식생의 공간적 패턴에 대한 분석이 용이해졌으며, 이에 따라 식물계절주기에 대한 연구 역시 활발히 이루어지게 되었다(Reed *et al.*, 1994; Moulin *et al.*, 1997; Zhang *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2004; Fisher *et al.*, 2006; Soudani *et al.*, 2008; Tan *et al.*, 2011). 전 지구적 또는 지역적인 식생의 계절 정보에 대한 자료의 구축이 이루어진다면 점차 변화하고 있는 기후환경과 이로 인한 생태계의 악영향을 예측하고 대비할 수 있으며, 이는 거시적으로 건전한 생태환경을 조성하는데 기여할 수 있을 것이다.

그러나 현재 국내의 산림에 대한 식물계절학

과 관련된 연구는 부족한 실정이며, 이에 본 연구에서는 산림을 대상으로 식물계절주기에 대한 정보를 위성영상을 이용하여 구축하고 이를 활용할 수 있는 방안을 제시하고자 하였다. 이는 기후변화에 대한 생태학적 대응과 식생의 건전성 확보를 위한 대책을 마련하는데 있어 중요한 자료가 될 것으로 판단된다.

이론적 고찰

1. 위성영상을 활용한 식생 모니터링

인공위성은 원격탐사의 대표적인 기술로서 지표면을 촬영한 영상의 분광학적 특성은 매우 다양한 정보를 포함하고 있다(Song and Park, 2012). 특히 식생과 관련된 지수로 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)가 주로 사용되는데, 가시광선 영역의 적색 파장대(ρ_{red})와 근적외선 파장대(ρ_{nir})의 반사율을 이용하여 식 (1)과 같이 계산된다(Rouse *et al.*, 1973).

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \quad (1)$$

NDVI는 식생의 활력도나 그 밀도에 비례하여 증가하며, $-1 \sim 1$ 사이의 값을 갖는데 대기에 의한 영향으로 잘못된 값을 나타낼 수 있다. Enhanced Vegetation Index(EVI)는 대기의 영향을 저감시킬 수 있도록 개발된 MODIS 영상 기반의 식생지수로 청색파장(ρ_{blue})을 추가적으로 사용하여 대기의 영향을 최소화한 알고리즘이 적용된 식생지수이다(Liu and Huete, 1995; Park, 2013).

$$EVI = 2.5 \times \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + (6 \times \rho_{red} - 7.5 \times \rho_{blue}) + 1} \quad (2)$$

이러한 식생지수를 시계열자료로 구축하여 살펴보면 일정한 주기를 보인다는 것을 알 수 있다. 이는 식물의 생육활동과 관련되어 있으

며, 매년 반복되는 계절변화를 반영하고 일사량과 밀접한 상관관계를 갖는다(Lee *et al.*, 2009). 일사량이나 온도에 따라 식물이 반응하는 메커니즘은 광합성 작용에 의해 설명될 수 있는데, 광합성 활동이 시작되는 시기와 감소하는 시기는 식물의 개화나 개엽, 낙엽시기 등과 관련된다. 따라서 위성영상을 활용한 식물계절 주기 변화의 탐지는 장기간의 시계열자료를 필요로 하며, 계절변화가 있는 지역의 경우 보통 연단위의 주기를 갖기 때문에 1년을 단위로 분석하게 된다.

일사량이 풍부한 여름철에는 생육활동이 왕성하게 이루어지기 때문에 식생지수가 최대치를 나타내며, 온도가 낮아지고 일사량이 부족한 늦가을에서 겨울 기간은 대부분의 식물들이 휴면기를 갖기 때문에 이 시기의 식생지수는 감소한다. 식물의 이러한 특성을 통해 생육이 개시되는 시기와 쇠퇴하는 시기를 대략적으로 알 수 있으며, 생육기간을 계산해 볼 수 있다. 이와 관련된 연구를 살펴보면, Reed *et al.*(1994)는 AVHRR 위성영상의 시계열 NDVI 자료를 이용하여 식물계절주기와 관련된 생육개시일과 종료일, 생육기간을 포함한 12개의 변수를 도출하였다. 이를 통해 식생피복 유형별로 각각의 특징을 비교하여 생태계 모니터링에 유용하게 사용될 수 있다는 것을 시사하였다. Moulin *et al.*(1997) 역시 AVHRR NDVI 영상을 사용하여 전지구적인 식물계절시기에 대해 분석하였으며, 기후요소와 상호비교하여 그 관계에 대한 결과를 도출하였다.

AVHRR 영상의 경우 약 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 의 공간 해상도를 가지는데 최근에는 해상도가 $250\text{m} \times 250\text{m}$ 로 개선된 MODIS 영상을 이용하여 식물계절주기를 분석하는 연구가 많아지고 있다. MODIS 위성은 지구환경 변화 모니터링을 목적으로 동일한 지역에 대해 일 간격의 영상을 촬영할 수 있기 때문에 시간해상도 면에서 우수하며, 이에 육지, 해양, 대기 등 폭넓은 분야에서 다양하게 활용되고 있다.

2. 식생지수 평활화 기법

위성영상 자료는 구름이나 기타 대기의 기상 조건 또는 눈이나 에어로졸 등에 의해 노이즈가 발생할 경우 관측값의 변동이 생길 수 있기 때문에 이를 보정할 필요성이 있다. 이는 시계열 자료를 구축한 뒤, 평활화(smoothing) 시키거나 관측값의 추세변화를 고려하여 이상치를 탐지한 뒤 노이즈를 최소화하는 알고리즘을 구현하여 극복할 수 있다. 시계열 식생지수 자료에 대한 평활화 방법은 주로 선형 내삽, 이동평균(moving average), 웨이블릿 변환, Savitzky-Golay 필터링, 푸리에 변환이나 여기서 더 발전된 알고리즘인 HANTS 등이 사용되는데, 각 방법에 따라 차이가 있기 때문에 원 자료의 특성을 고려하여 가장 최적의 알고리즘을 적용할 필요성이 있다(Menenti *et al.*, 1993; Reed *et al.*, 1994; Jakubauskas *et al.*, 2001; Chen *et al.*, 2004; Lu *et al.*, 2007; Roerink *et al.*, 2011).

3. HANTS 알고리즘

일정한 주기를 갖는 시계열 식생지수 자료는 반복적인 복잡한 파형으로 나타나는데 푸리에 변환은 이러한 파형을 단순한 파형의 합성으로 표현할 수 있다. 구간 $[0, L]$ 에서 복잡한 파형으로 나타나는 $f(t)$ 가 연속형 함수라 가정할 때, 식 (3)과 같이 푸리에 급수를 통해 정현파와 여현파의 합성으로 변환할 수 있는데 이는 식 (4)와 같은 여현파의 합으로 재구성할 수 있다 (Jakubauskas *et al.*, 2001).

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{2\pi nt}{L} + b_n \sin \frac{2\pi nt}{L} \right) \quad (3)$$

$$f(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cos \left(\frac{2\pi nt}{L} - \phi_n \right) \quad (4)$$

여기서 $\frac{1}{2}a_0 = c_0 = \frac{1}{L} \int_0^L f(t) dt$ 와 같고 이는 함수 $f(t)$ 의 평균이 되며, 파형의 수 n 에 따라 원 자료의 복잡한 파형에 더욱 근접한 형태

로 나타낼 수 있다.

$$a_n = \frac{2}{L} \int_0^L f(t) \cos \frac{2\pi nt}{L} dt \quad \text{for } n \geq 0 \quad (5)$$

$$b_n = \frac{2}{L} \int_0^L f(t) \sin \frac{2\pi nt}{L} dt \quad \text{for } n \geq 0 \quad (6)$$

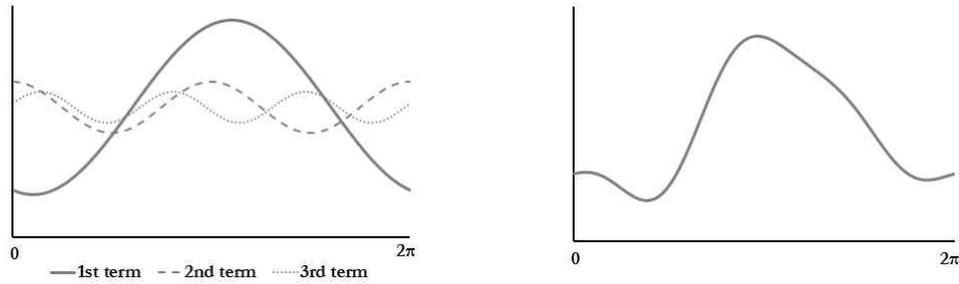
a_n 과 b_n 은 n 차 파형의 푸리에 계수로 삼각함수가 직교할 경우 내적의 합이 0이 되는 성질을 이용하여 식 (5)와 식 (6)에 의해 구해진다. c_n 과 ϕ_n 은 n 차 파형의 진폭과 위상을 각각 의미하는데 $c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$ 으로 벡터 $\langle a_n, b_n \rangle$ 의 길이, $\phi_n = \arctan \frac{b_n}{a_n}$ 으로 벡터 $\langle a_n, b_n \rangle$ 의 각도(방향)로서 이를 주파수의 성분으로 나타낼 수 있다. 함수 $f(t)$ 가 이산형 자료로 구성될 경우 trapezoidal 근사식으로 푸리에 계수를 구할 수 있으며, 임의의 집합 $y(k)$ 가 $\{k=1, 2, \dots, N\}$ 일 때, 식 (7), 식 (8)과 같이 계산된다.

$$a_n = \frac{1}{N-1} \left(y(1) + y(N) + 2 \sum_{k=2}^{N-1} y(k) \cos \frac{2\pi n(k-1)}{N-1} \right) \quad \text{for } n \geq 0 \quad (7)$$

$$b_n = \frac{1}{N-1} \left(2 \sum_{k=2}^{N-1} y(k) \sin \frac{2\pi n(k-1)}{N-1} \right) \quad \text{for } n \geq 1 \quad (8)$$

그림 1(a)는 n 이 각각 1, 2, 3일 때의 파형을 나타낸 것으로 이를 합성하면 그림 1(b)와 같은 형태가 된다.

HANTS 알고리즘은 시계열로 구성된 원 자료를 푸리에 변환을 이용하여 근사식을 구하고 이를 통해 연속된 자료로 재구축함과 동시에 구름화소에 영향을 받은 지역의 이상치를 복원시킬 수 있는 분석방법이다. 푸리에 근사식에 의해 재구축된 식생지수를 원자료와 비교하여 차이가 크게 나타나는 데이터가 있을 경우 이를 제외한 뒤, 재계산하고 이를 반복하여 최적의 푸리에 함수를 도출하게 된다. 식물계절시기



a) Curves for harmonic terms 1, 2 and 3 b) Curve produced from addition of curves

FIGURE 1. Analysis of the complex wavelength using Fourier transform

TABLE 1. Parameter settings for HANTS processing(Roerink *et al.*, 2000)

Parameter	Description
NOF (number of frequencies)	By this control parameter the user defines how many frequencies are used and how large their corresponding period in time sample units is.
SF (Hi/Lo suppression flag)	This flag indicates whether high or low values(outliers) should be rejected during curve fitting.
FET (fit error tolerance)	During curve fitting the absolute difference in the Hi/Lo direction of the remaining(that is, not rejected) data points with respect to the current curve is determined after each iteration.
DOD (Degree of overdeterminedness)	The number of valid observations must always be greater than or equal to the number of parameters that describe the curve($2 \times \text{NOF} - 1$).

를 정확히 평가하기 위해서는 원 식생지수 자료의 정보를 최대한 유지하면서 이상치로 판단되는 데이터를 제외시킬 필요성이 있으며, HANTS 알고리즘 상에서는 이를 제어할 수 있는 변수가 설정된다. HANTS 알고리즘의 제어 변수는 표 1과 같으며, 여기서 NOF는 몇 개의 하모닉곡선을 합성하여 함수를 만들 것인지 설정하는 변수로서 식생의 주기와 관련성이 깊다. 보통 산림의 식생은 연주기, 반년주기, 4개월 주기로 변화를 보이기 때문에 3으로 설정된다 (Roerink *et al.*, 2000). SF는 값이 지나치게 높거나 낮은 이상치를 제거하기 위해 설정되는 값으로 식생지수의 경우 대부분 구름에 의한 값의 저하나 결측이 발생하는 경우가 많기 때문에 인접한 시기의 값과 비교했을 때, 지나치게 낮은 값은 분석에서 제외시키기 위하여 'Lo' 로 설정하게 된다. FET는 원 자료와 푸리에 변환으로 재구축된 함수의 차이를 최소화시키기 위한 적합도를 설정하는 값이다. DOD

는 분석에 사용될 관측치 개수의 하한치로서 최소한 $2 \times \text{NOF} - 1$ 개보다 커야 하며 (Roerink *et al.*, 2000), 너무 낮은 값으로 설정할 경우 구축된 모형의 신뢰도가 떨어질 수 있다.

4. 식물계절시기 도출 방법

위성영상을 활용하여 식생의 생육활동과 관련된 변수를 추출하는 방법은 크게 전역적 또는 국지적 식생지수 임계값을 이용한 방법, 수학적 해법을 통해 도출하는 방법 등으로 나눌 수 있다(표 2). 전역적 임계값을 사용하는 방법은 경험적으로 생육개시일 시기의 식생지수값이 어느 정도인지를 파악한 뒤, 연간 시계열 식생지수 자료에서 해당값에 도달하는 시기를 도출하는 방법이다. 국지적 임계값의 경우 식생유형 또는 픽셀단위로 연간 시계열 식생지수 곡선을 도출한 뒤, 전체 주기에서 진폭(amplitude)을 파악하고 진폭의 일정 퍼센티지 이상을 초과하는 식생지수에 도달하는 시기를

TABLE 2. Techniques to derive phenological metrics from remote sensing

Method	Algorithm	Reference
Global threshold	NDVI exceeds 0.099	Lloyd, 1990
	NDVI exceeds 0.17	Fisher, 1994
	NDVI exceeds 0.09	Markon <i>et al.</i> , 1995
Local threshold	NDVI exceeds locally tuned threshold(annual minimum and maximum NDVI are selected and the midpoint between them is computed)	White <i>et al.</i> , 1997 Schwartz <i>et al.</i> , 2002
Conceptual-mathematical	Maximum increase on Fourier approximation of NDVI	White <i>et al.</i> , 2009
	Local minima and maxima on rate of change in the curvature	Zhang <i>et al.</i> , 2003
	Quadratic method: First composite period of growing degree accumulation best fitting the observed NDVI time series	de Beurs and Henebry, 2008
	Timesat method: High amplitude divergence from a multiple-model NDVI fit	Jönsson and Eklundh, 2004
	Smoothed NDVI time-series crossed moving average curves	Reed <i>et al.</i> , 1994

생육개시일로 도출하는 방법으로서 식생유형에 따른 생육특성을 고려할 수 있다. 수학적인 해법을 통한 방법은 시계열 식생지수 곡선을 특정 함수로 재구성한 뒤, 기울기가 급격하게 증가 또는 감소하는 지점을 생육개시일 및 생육종료일로 결정하는 방법으로서, 사용되는 함수 및 시기를 도출하는 방식에 따라 다양하며, 주로 푸리에 근사식이나 로지스틱 모델 등을 함수로 사용한다(Roerink *et al.*, 2000; Zhang *et al.*, 2003). 함수를 이용하지 않고 이동평균을 이용하는 방법이 있는데 이는 평활화된 연간 시계열 식생지수 자료와 지연 이동평균(delayed moving average) 곡선이 교차하는 지점을 생육개시일로 정의하는 방법으로 미국 지질조사국에서 이 방식을 채택하여 미국 전역의 식물계절시기 자료를 제공하고 있다(<http://phenology.cr.usgs.gov/index.php>).

White *et al.*(2009)은 북아메리카 전역을 대상으로 실측된 식물계절시기 조사자료와 현재까지 사용된 위성영상을 이용한 식물계절시기 탐지방법 10가지를 상호 비교하였다. 그 결과, 푸리에 근사식을 이용한 방법과 국지적 임계값을 통해 식물계절시기를 도출한 방법이 실측된 자료와 가장 일치하는 결과를 보였으며, 개화일 및 개엽일과 상관성이 높은 것을 확인하였다. 위성영상을 활용한 식물계절시기의 평가는 실측된 결과와 완전히 일치하지 않을 수

는 있으나 생태계의 다양성을 평가할 수 있는 지표로서 유용하게 활용될 수 있기 때문에 지속적인 연구를 필요로 한다(Liu *et al.*, 2012).

연구방법

1. 연구영역 및 위성영상 자료처리

본 연구에서는 미국 지질조사국(LP DAAC: Land Processes Distributed Active Archive Center)에서 제공하는 Terra MODIS Data Product 중 2010년 1월 1일부터 12월 31일까지의 MOD13Q1 데이터를 수집하였으며, 16일 간격으로 생성된 총 23개의 EVI 영상을 분석에 활용하였다. 공간적 범위는 남한을 대상으로 하였으며, 이를 포함하는 영역의 h28v05 tile 영상을 UTM Zone 52N(Datum: WGS84) 좌표체계로 변환하여 사용하였다.

2. 식생지수의 시계열자료 재구성

MODIS EVI 영상은 16일 간격으로 총 23개 영상을 제공하고 있지만 실제로는 하나의 영상이 16일 동안 관측된 모든 데이터에 대해 Bidirectional Reflectance Distribution Function Composite(BRDF-C), Constrained-View angle-Maximum Value Composite(CV-MVC), Maximum Value Composite

(MVC) 기법이 적용되어 최적의 값이 도출된 합성영상이다(Eun, 2012). 1년 동안의 23개 영상은 각각의 이산형 자료로서 이를 연속된 시계열자료로 구축하기 위하여 ArcGIS 10.2의 composite band 래스터 툴을 이용하여 23개 밴드의 영상으로 취합하고 이를 NetCDF 파일로 변환하였다. 그 후 MATLAB R2012a에서 HANTS 알고리즘이 적용된 스크립트를 통해 분석이 가능하도록 시계열 정보가 포함된 3차원 행렬로 변환하여 입력변수로 사용하였으며, 각 제어변수는 NOF의 경우 3, SF는 'Lo', FET는 0.05, DOD는 11로 설정하였다(Roerink *et al.*, 2000; Huh *et al.*, 2007). 해당 스크립트는 De Wit and Su(2005)의 연구에서 HANTS 분석을 위해 개발된 IDL 언어를 분석이 용이한 MATLAB에서 실행 가능하도록 M 파일로 제작되었다.

분석이 완료되면 원 자료와 동일한 시기로 보정된 23개의 식생지수 자료와 각각의 퓨리에 계수가 도출된다. 식생지수 및 계수는 MATLAB 내 변수로 출력되며, 이를 원 자료와의 비교를 위해 다시 NetCDF 파일로 변환한 뒤, ArcGIS 10.2에서 분석이 가능하도록 래스터 형태로 변환하였다. HANTS 알고리즘의 장점은 각 픽셀별로 퓨리에계수가 도출되기 때문에 분석하고자 하는 지역의 계수를 확인하여 이를 통해 연중 시계열 식생지수 곡선을 도출할 수 있다는 점이다. 분석의 대상이 되는 지점 또는 지역에 대해 퓨리에 계수의 평균값을 산출하여 하모닉곡선을 도출하면 연속된 일별 식생지수 자료로도 출력이 가능하다.

3. 식물계절시기 도출

위성영상을 통해 식물계절시기를 평가하는 방법은 현재까지 많은 연구가 진행되었으며, 적용 알고리즘에 따라 결과가 달라질 수 있기 때문에 각 방법의 장단점을 비교하여 신중히 선택해야 할 필요성이 있다. 또한 분석이 간편하고 그 결과에 대한 신뢰도가 높은 알고리즘을 적용하는 것이 좋으며, 추후 분석 시에도 동일

한 결과를 얻을 수 있는 방법이 적용되어야 할 것이다. White *et al.*(2009)은 위성영상 기반의 식물계절시기 탐지방법을 상호 비교해 본 결과, 국지적 임계값을 이용한 Midpoint_pixel 방법과 HANTS-FFT에 의한 알고리즘이 실측 자료와 상관성이 가장 높다는 것을 확인하였는데, Midpoint_pixel 방법은 식생지수의 보정이 제대로 적용되지 않았을 경우 과대치 및 과소치에 의해 오차가 커질 수 있다. HANTS-FFT 방식은 식생지수 곡선의 기울기가 급격하게 증가하는 시점을 생육개시일 또는 종료일로 정의하는데, 이는 뚜렷한 식물계절 주기가 나타나지 않거나 계절주기가 두 번 이상 나타날 경우 결과값에 대한 신뢰도가 낮다(White *et al.*, 2009).

본 연구에서는 두 가지 방법론의 단점을 보완할 수 있도록 HANTS 알고리즘을 이용하여 식생지수 자료를 평활화하고 국지적 임계값을 적용하여 식물계절시기를 탐지하는 방식을 사용하였다. 이를 자세히 설명하면 국지적 임계값 방식(Midpoint_pixel)을 이용하여 식물계절시기를 도출하되, 이상치에 의한 오차를 줄이기 위하여 HANTS 알고리즘에 의해 평활화된 식생지수를 사용하였으며, 이를 통해 임계치를 결정하였다. 임계치는 식 (9)를 통해 산출되며, 식생지수 최대값(VImax)과 최소값(VImin)의 범위에서 VRatio가 특정값일 때의 VIth값을 임계치로 사용하게 된다. 여기서 VRatio는 산림 식생의 성장이 급격히 이루어지는 시기를 기준으로 도출되며, 본 연구에서는 White *et al.*(2000)의 결과를 참조하여 0.5로 설정하였다. 식생지수가 최대가 되는 시점 이전과 이후의 시기에서 두 개의 값을 도출할 수 있으며, 첫 번째 값에 해당하는 시기는 생육개시일 그리고 두 번째 값에 해당하는 시기는 생육종료일로 정의하였다(그림 2). VI 임계치에 도달하는 시기(x축의 값)는 비선형방정식의 근사해를 구하는 방법을 통해 도출하였다¹⁾. 또한 생육개시일과 생육종료일의 도출을 위한 분석과정에서 해가 없거나 해가 2개 이상일 경우 -1의 값을 갖도록 알고리즘을 구성하여 오류가 발생

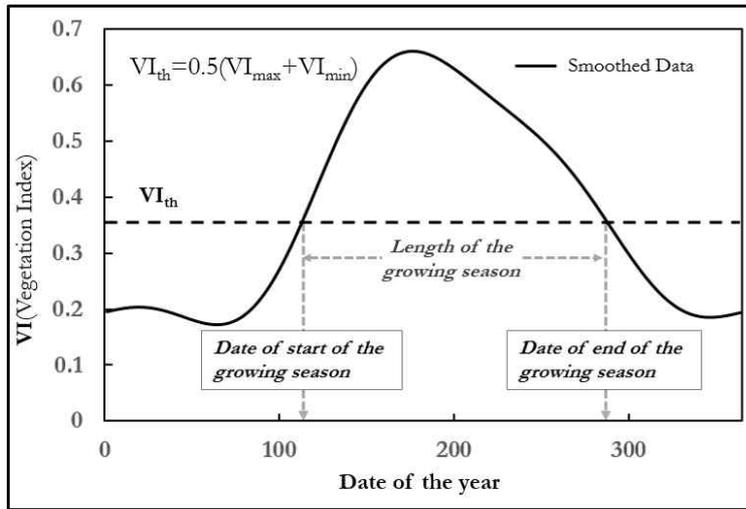


FIGURE 2. A schematic showing how phenological transition dates are calculated using HANTS curve and local threshold

한 지역을 파악한 뒤, 분석에서 제외할 수 있도록 설정하였다.

$$VI_{ratio} = \frac{VI_{th} - VI_{min}}{VI_{max} - VI_{min}} \quad (9)$$

결과 및 고찰

1. 토지피복별 평균 식생지수 비교

토지피복에 따라 식생이 분포하는 경향이 다르기 때문에 피복유형별로 식생지수의 경향은 뚜렷하게 나타난다(Lee *et al.*, 2010). 이에

대한 차이를 비교해보기 위하여 환경부에서 2010년 제작한 중분류 토지피복도를 사용하여 각 피복유형별 식생지수의 평균값을 분석하였다. 표 3은 토지피복별 식생지수의 연 평균치 및 표준편차를 나타낸 것으로 원 자료인 EVI와 HANTS에 의해 보정된 식생지수를 비교한 결과이다. 피복에 따라 유사한 경향을 나타냈으나 HANTS에 의한 평균값이 원 EVI 평균보다 약간 높은 값을 보였는데 이는 구름이나 다른 원인에 의해 발생한 노이즈로 인해 급격히 낮아진 EVI 값이 보정되었기 때문에 나타난 결과로 판단된다.

TABLE 3. Annual mean and standard deviation of the EVI and HANTS for each land cover type

Land cover type	EVI		HANTS	
	Annual mean	Standard deviation	Annual mean	Standard deviation
Urban and built-up	0.23	0.07	0.25	0.08
Croplands	0.30	0.05	0.31	0.05
Grasslands	0.31	0.06	0.33	0.07
Wetlands	0.20	0.10	0.21	0.10
Barren	0.25	0.08	0.26	0.08
Water	0.21	0.10	0.22	0.10
Broadleaf forests	0.35	0.04	0.38	0.04
Needleleaf forests	0.35	0.04	0.36	0.04
Mixed forests	0.35	0.04	0.37	0.04

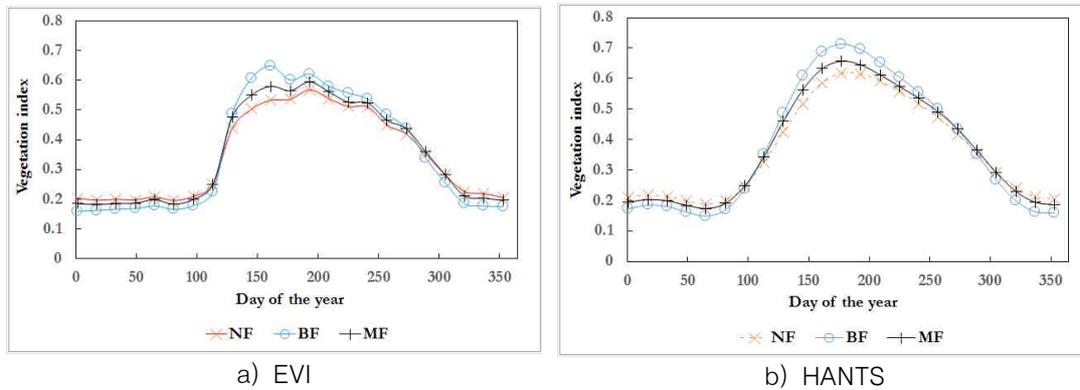


FIGURE 3. Comparison of the EVI and HANTS curve for each biomes(NF: needleleaf forests, BF: broadleaf forests, MF: mixed forests)

그림 3은 산림지역만을 추출하여 원 자료와 HANTS 보정자료의 시계열 곡선을 비교한 것으로 원 자료의 경우 잎이 성엽에 도달한 시기인 여름철에 식생지수의 불규칙한 증감을 보이는 반면, 재구축된 자료는 연속적인 곡선으로 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다. 잎이 성엽에 도달한 경우 엽면적지수는 거의 일정하다는 것을 고려할 때(Kang, 2005), 감소와 증가를 반복하는 양상은 구름에 의한 영향이라 할 수 있으며, HANTS 알고리즘을 통해 이에 대한 보정이 효과적으로 이루어졌다는 것을 알 수 있다.

2. 고도별 식물계절학적 특성

한반도 내의 산림은 복잡한 지형을 나타내며, 이에 따라 기후나 생태적 특성이 다르게 나타난다. 그림 4는 국내 산림의 생육개시일과 생육종료일 분포를 나타낸 결과이며, 이를 자세히 살펴보면, 해발고도에 따른 편차가 뚜렷하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 지형적 요인이 국내 산림의 식물계절학적 특성에 어떠한 영향을 미치는지 파악해보기 위하여 중분류 토지피복도 상의 산림지역만을 추출해 100m 간격의 고도 등급별 생육개시일, 생육종료일, 생육기간을 각각 분석하였다. 고도의 등급 구분은 국토지리정보원에서 제작한 5m 해상도의 수치

표고모델(DEM) 자료를 ArcGIS 10.2에서 100m 간격으로 재분류(reclassify)하였으며, 폴리곤 셰이프파일로 변환한 뒤 zonal statistics 툴을 통해 식물계절 분석결과의 고도 등급별 평균값을 산출하였다.

그 결과, 저고도에서는 고도가 높아짐에 따라 생육개시일은 점차 빨라지는 경향을 보였으나 300~400m 이상부터 늦어지는 것을 확인할 수 있었다(그림 5). 임상별로 300~400m 부근에서 침엽수와 활엽수림, 혼효림의 생육개시일은 각각 5월 3일(DOY: 123), 4월 27일(DOY: 117), 4월 29일(DOY: 119)인 것에 반해 900~1000m 부근의 고도에서는 각각 5월 6일(DOY: 126), 5월 5일(DOY: 125), 5월 6일(DOY: 126)로 약 600m의 고도차가 날 경우 침엽수는 3일, 활엽수는 8일 혼효림은 7일 정도 차이가 있는 것으로 분석되었다. Vitasse *et al.*(2009)은 프랑스의 Pyrenean 지역 산림을 대상으로 식물계절 모니터링 자료를 이용하여 개엽일을 분석해본 결과, 고도가 100m 증가함에 따라 1.1~3.4일 정도 지연되며, 수종에 따라 다르게 나타난다는 결과를 도출하였다. 이는 고도가 100m 증가될 때, 봄철 생육이 시작되는 시기가 3.3일 정도 지연된다는 Hopkin's 법칙(Hopkins, 1920)이 임상 또는 수종 및 환경조건에 따라 다르게 나타날 수 있기 때문에

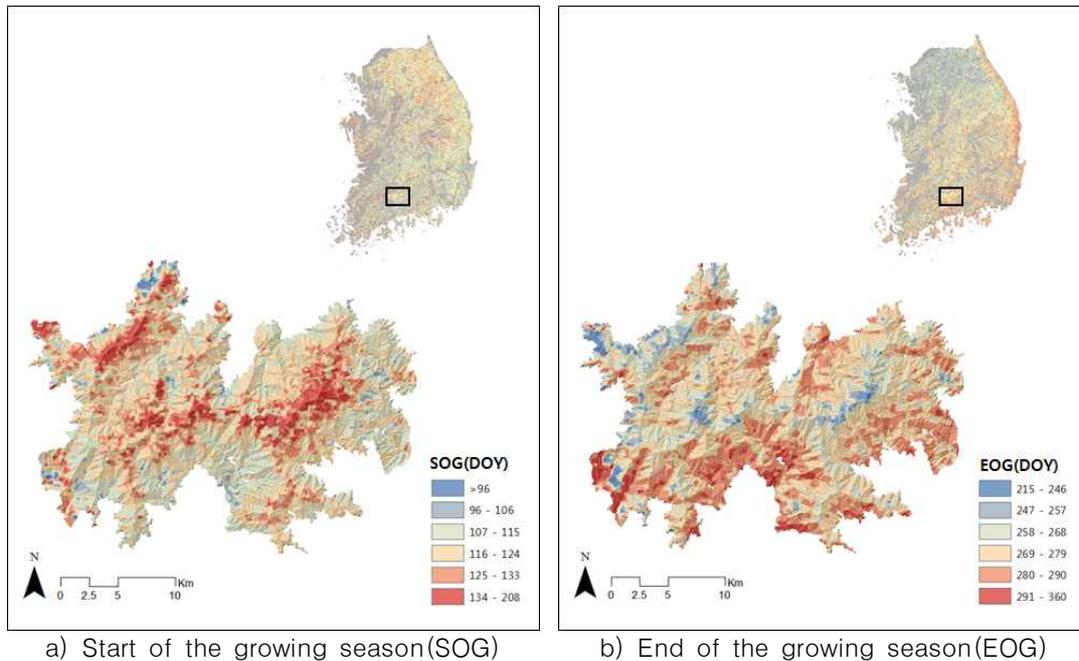


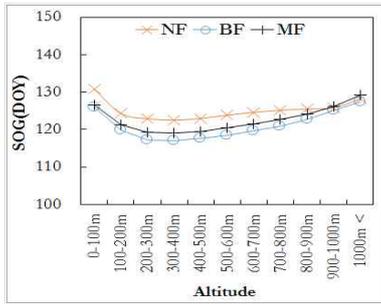
FIGURE 4. Spatial map showing phenological transition dates(DOY: day of the year)

이에 대한 세부적인 연구가 추가적으로 이루어져야 한다는 것을 시사한다.

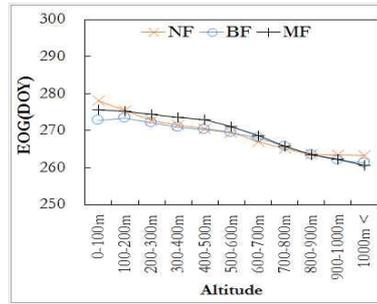
고도증가에 따른 개화 및 개엽일의 지연현상은 고도별 식물분포의 차이와도 관련이 있을 수 있으나 주로 온도와 수분, 일광 등과 큰 상관성이 있으며, 동일한 수종이라 하더라도 온도에 따라 큰 차이가 나타난다고 알려져 있다 (Chmielewski *et al.*, 2004; Vitasse *et al.*, 2009). 고도가 높아지면 건조단열감률에 의해 기온이 감소하는데 이는 식물의 생육에 영향을 미치게 되며, 이러한 기온과 식물계절시기에 관한 연구는 기존의 많은 현장조사를 통해 이루어져 관련성이 입증되었다. Kramer(1996)와 Rötzer and Chmielewski(2001)는 유럽의 산림을 대상으로 실측된 식물계절시기를 기상요인과 상호 비교해본 결과, 기온이 1°C 감소할 경우 개화시기는 4일, 개엽시기는 3.2~3.6일 정도 늦어진다는 결과를 도출하였다. 그림 5(d)의 평균기온은 기상청의 기후변화정보센터(CCIC: Climate Change Information Center)

에서 제공하는 1km의 해상도를 갖는 2010년 일평균기온자료²⁾를 격자별로 연평균값을 계산하여 고도등급별 평균값의 경향을 나타낸 것이다. 고도의 증가에 따라 기온이 선형적인 추세로 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 이러한 고도별 기온분포가 식물의 생육시기에 영향을 미쳤다는 것을 예상해 볼 수 있다.

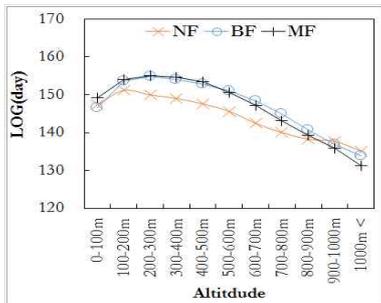
저고도에서의 생육개시일 지연과 생육기간의 단축 현상은 선행연구와는 다른 결과로 나타났는데 이에 대한 원인을 분석해 보기 위하여 각 고도등급별 시계열 식생지수 곡선을 도출하였다. 이는 고도등급별로 HANTS 알고리즘에 의해 분석된 계수의 평균값을 식 (4)에 대입하여 시계열 곡선으로 작성하였다(그림 6). 그 결과, 상대적으로 저고도인 지역에서의 식생지수는 전체적인 생육주기에 걸쳐 활력도가 떨어지는 것으로 나타났으며, 고도가 높아짐에 따라 증가되는 것으로 분석되었다. 특히, 300~400m 이하의 지역에서는 식생지수의 편차가 컸으며, 이후 고도가 높아짐에 따라 전체적인 식생지수



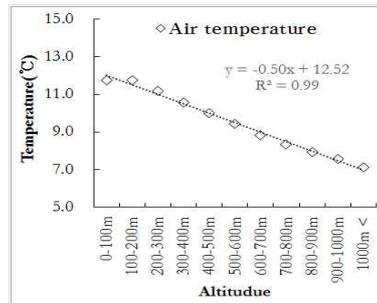
a) SOG(start of the growing season)



b) EOG(end of the growing season)



c) LOG(length of the growing season)



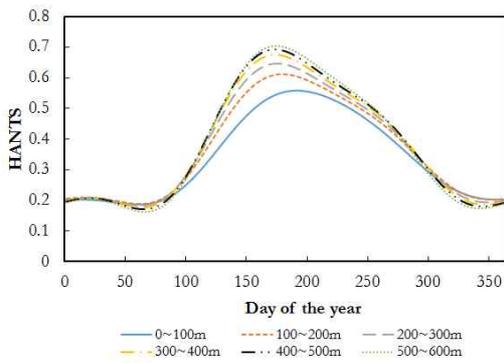
d) Annual mean air temperature

FIGURE 5. Phenological transition dates(a, b), length of the growing season(c), annual mean air temperature(d) vs. elevation(NF: needleleaf forests, BF: broadleaf forests, MF: mixed forests, DOY: day of the year)

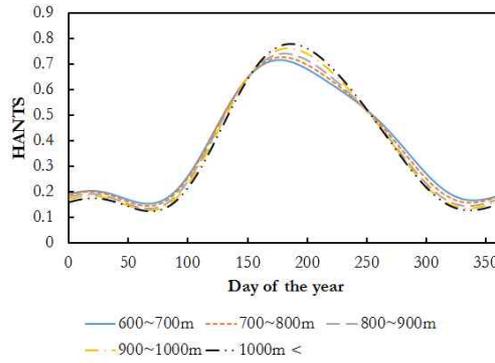
곡선의 경향은 거의 유사하게 나타났다.

고도가 낮고 환경사인 지역은 도시의 확장이나 개발압력에 대한 노출도가 고도가 높은 지역에 비해 높기 때문에 산림의 훼손이나 전용

등에 의한 피해가 발생할 확률이 높고 대기오염이나 산불과 같은 인위적인 교란에 취약하여 식생의 생육이 부진할 수 있다. 또한 도시 인접부의 경우 도시열섬현상과 같은 이상고온 현상



a) 0~600m



b) above 600m

FIGURE 6. Reconstructed HANTS vegetation index curve for each elevation grade

에 의해 봄철 조기개엽 등과 같은 현상이 발생한다는 연구결과가 있으며(Zhang *et al.*, 2004; Fisher *et al.*, 2006), 이러한 원인들에 기인하여 식물계절주기가 불규칙하게 나타날 수 있기 때문에 저고도 산림지역에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

3. 임상별 고도에 따른 식물계절시기 변화 경향

앞서 300~400m 이상의 고도에서는 식물계절시기가 고도에 따라 선형적으로 변화하고 있다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 저고도 지역을 제외한 산지의 식물계절시기에 대해 고도 증가에 의한 영향을 정량적으로 파악해보기 위하여 고도에 따른 각 식물계절시기의 변화 경향을 분석하였다. 그 결과, 생육개시일의 경우 활엽수가 전반적으로 빠른 것으로 나타났으며, 생육종료일은 침엽수와 활엽수가 유사한 것으로 나타났다. 고도증가에 따른 변화경향을 각각 살펴보면, 생육개시일의 경우 침엽수와 활엽수, 혼효림은 각각 +0.71일/100m, +1.50일/100m, +1.39일/100m, 생육종료일은 -1.33일/100m, -1.54일/100m, -2.04일/100m, 생육기간은 -2.04일/100m, -3.04일/100m, -3.43일/100m으로 분석되었다(그림 7). 활엽

수림의 경우 침엽수림에 비해 고도에 따른 식물계절시기 변화의 폭이 더 큰 것으로 나타났는데 이러한 차이는 고도증가에 따른 온도감소와 관련하여 해석해 볼 수 있다. 기온은 100m가 증가할 경우 0.5°C가 낮아지는 선형적인 추세를 보였으며, 기온에 따른 식물계절시기 변화 경향을 분석해본 결과, 생육개시일의 경우 침엽수, 활엽수, 혼효림은 각각 -1.42일/°C, -2.95일/°C, -2.74일/°C, 생육종료일의 경우 +2.73일/°C, +3.07일/100m, +4.10일/°C, 생육기간의 경우 +4.14일/°C, +6.03일/°C, +6.85일/°C로 나타났다(그림 8). 생육개시일의 온도에 따른 변화경향은 -1.42~-2.95일/°C로 Kramer (1996)와 Rötzer and Chmielewski(2001)의 연구결과인 -3.2~-3.6일/°C 보다는 적은 변화를 보이는 것으로 나타났지만 이는 일부 지역을 대상으로 한 연구로서 전국의 평균치를 계산한 본 연구의 결과와는 차이가 있는 것으로 판단된다. White *et al.*(1999)는 미국 동부의 낙엽활엽수림을 대상으로 88년간의 데이터를 수집하여 생육기간에 대해 분석해본 결과, 온도가 1°C 증가할 경우 생육기간은 5일이 길어진다는 결과를 도출하였는데, 이는 본 연구의 활엽수림에 대한 생육기간 분석결과인 +6.03일/°C와 유사한 결과라 할 수 있다.

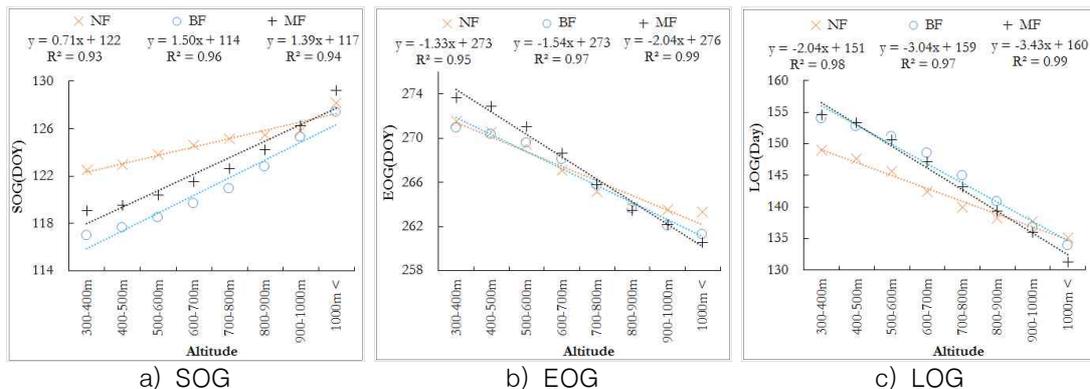


FIGURE 7. The relationship between altitude and start of the growing season(SOG), end of the growing season(EOG) and length of the growing season(LOG) for the three biomes(NF: needleleaf forests, BF: broadleaf forests, MF: mixed forests, DOY: day of the year)

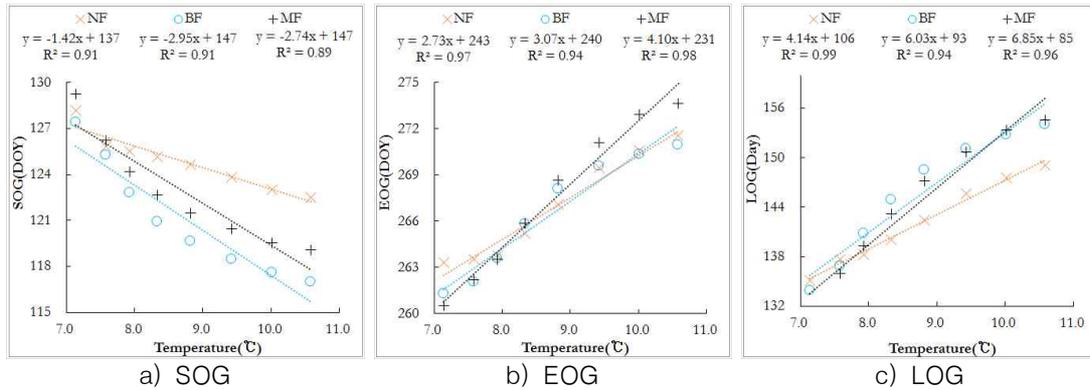


FIGURE 8. The relationship between mean annual air temperature and start of the growing season(SOG), end of the growing season(EOG) and length of the growing season(LOG) for the three biomes(NF: needleleaf forests, BF: broadleaf forests, MF: mixed forests, DOY: day of the year)

Niu *et al.*(2013)은 북반구 지역의 산림을 대상으로 측정된 임관 광합성능력(canopy photosynthetic capacity)을 비교해본 결과, 온도가 증가함에 따라 광합성능력이 최대가 되는 시점에 이르는 기간이 짧아졌으며, 낙엽활엽수림이 상록침엽수림보다 온도가 높아질 경우 광합성능력을 회복하는 기간이 더 빠르다는 결과를 도출하였다. 이는 본 연구와 유사한 결과로서 일반적으로 알려져 있듯이 활엽수가 침엽수보다 온도에 더 민감한 특성을 갖는다는 사실을 입증하는 결과라 할 수 있다. 이러한 특성은 계절변화에 따른 수종간 생존전략이 다른 것에 기인한다. 낙엽활엽수의 경우 계절에 따른 온도변화에 의해 개엽과 낙엽과 같은 식물계절시기가 뚜렷하게 나타나는 반면, 상록침엽수는 반응이 보수적이고 더 복잡한 단계에 걸쳐 이루어지는 특성을 갖기 때문에 온도변화에 의한 식물계절적 민감도가 적은 특징을 갖는다(Monson *et al.*, 2005).

결론 및 제언

식물계절시기의 변동은 산림 생태계의 물질순환 및 순생산량에 영향을 미치고 이는 다시 생태계 전반에 걸쳐 큰 파급효과를 나타내기

때문에 지속적인 모니터링 및 변화경향을 파악하는 것은 중요한 과제라 할 수 있다. 그러나 범위가 넓고 접근이 어려운 산림지역에 대해 지속적으로 식물계절 조사를 하는 것은 거의 불가능하기 때문에 이를 대체할 수 있는 방법을 필요로 한다. 이에 본 연구에서는 위성영상을 활용한 정량적인 식생지수 분석방법을 통해 국내 산림에 대한 효율적인 식물계절시기 평가방법을 제시하였다.

몬순 기후를 가진 우리나라의 경우 위성영상에서 도출한 식생지수는 구름에 의한 오차로 인해 상당한 불확실성을 내포할 수 있기 때문에 HANTS 알고리즘을 통해 이를 보정한 시계열 식생지수 자료로 재구성하였다. 그 결과, 구름에 의한 영향으로 식생지수가 낮게 나타나는 오류를 최소화할 수 있었으며, 이를 통해 식물계절시기를 보다 정확하게 평가할 수 있었다.

지형이 복잡한 국내 산림지역에 대해 고도별 식물계절시기를 분석해 본 결과, 저고도 산지를 제외하면 고도가 증가함에 따라 생육개시일은 지연되고 생육종료일은 빨라지는 경향을 보였으며, 이에 따라 생육기간은 점차 감소하는 것으로 나타났다. 저고도 지역 산지의 식물계절학적 특성은 기존 연구결과와는 다르게 나타났으며, 이에 대한 원인을 분석해보기 위하여

HANTS 알고리즘에 의해 도출된 퓨리에 계수를 통해 전체적인 식생지수 패턴을 파악해 보았다. 그 결과, 300m 이하의 산지에서는 전반적인 식생의 활력도가 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 도시화 또는 산림훼손 등 개발에 의한 압력에 기인한 것으로 판단되며, 산림 생태계에 대한 부정적인 영향을 최소화할 수 있도록 추가적인 연구가 이루어져야 할 것이다.

고도에 따른 식물계절시기의 변화경향을 살펴본 결과, 임상별로 고도에 따른 변화경향의 차이가 있다는 것이 확인되었으며, 이는 기존 연구를 통해 고도에 따른 식생분포보다는 기온에 적응하는 수종별 생존전략의 차이에 기인한 결과라는 것을 알 수 있었다. 고도증가에 따른 변화경향은 생육개시일의 경우 $+0.71 \sim +1.5$ 일/100m, 생육종료일은 $-1.33 \sim -2.04$ 일/100m, 생육기간은 $-2.04 \sim -3.43$ 일/100m로 나타났으며, 기온에 따른 식물계절시기 변화경향은 생육개시일의 경우 $-1.42 \sim -2.95$ 일/°C, 생육종료일은 $+2.73 \sim +4.10$ 일/°C, 생육기간은 $+4.14 \sim +6.85$ 일/°C로 분석되었다. 추후 장기간의 시계열 식생지수 자료를 구축한다면, 기후변화에 의한 영향 및 기타 환경요소의 변동에 따른 식물계절시기의 변화정도를 분석해볼 수 있을 것으로 판단되며, 이는 기후변화에 대한 수종별 적응성을 예측해볼 수 있는 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

본 연구 및 기존의 연구결과에서 도출된 결과를 통해 활엽수종이 침엽수종보다 온도에 민감하다는 것을 알 수 있었으며, 이는 최근 국내 산림에서 나타나는 침엽수종의 쇠퇴 및 활엽수종의 우세현상을 설명할 수 있는 근거가 될 수 있다. 급격한 온도의 상승은 이에 민감한 활엽수림의 생육을 촉진시키기 때문에 혼효림 내에서의 침엽수는 잎이 넓은 활엽수의 조기개엽으로 인해 광량이 부족해지는 등 생육환경이 불량해져 고사될 확률이 높아지게 된다. 이러한 현상이 가속화되면 기존의 환경에 적응하여 서식하고 있는 다른 생물에게도 연쇄적인 영향을 주게 되며, 자연적인 천이가 이루어질 수 있는 한계를 초과할 경우 생태계에 심각한 문제를

야기하게 된다. 일례로 보존의 필요성이 있는 희귀식물종 대부분은 물리적 환경요인이 제한되어 있기 때문에 식물계절시기의 변동으로 인한 생육환경 변화는 생육저하 또는 멸종위기를 초래하여 생태계에 악영향을 미칠 수 있다. 따라서 식물계절 변화에 대한 지속적인 모니터링을 실시하여 기후변화에 대한 대비책을 마련해야 할 것이다. [KAGIS](#)

주

- 1) 퓨리에 함수는 초월함수인 삼각함수의 합성으로 구성된 주기함수이며, 이는 비선형방정식이다. 비선형방정식의 해를 구하는 것은 난해하기 때문에 근사해를 도출하는 방법을 사용하며, 본 연구에서는 bisection, secant, inverse interpolation methods를 조합한 방법을 통해 근사해를 도출하였다 (Brent, 2013).
- 2) 해당 기온 자료는 기존 기상관측소 자료가 가지는 공간적 해상도의 한계를 극복할 수 있도록 Parameter-elevation Regressions an Independent Slopes Model (PRISM) 기반의 1km 해상도를 갖는 격자자료로 생산되었기 때문에 본 연구에서 도출된 격자별 식물계절 분석결과와의 비교가 용이하다는 장점이 있다 (Kim *et al.*, 2013a).

REFERENCES

- Brent, R. P. 2013. Algorithms for minimization without derivatives. Courier Dover Publications.
- Chen, J., Z. Gu, M. Tamura, B. Matsushita, P. Jönsson and L. Eklundh. 2004. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter. Remote Sensing of Environment 91(3-4):332-344.

- Chmielewski, F.-M., A. Müller and E. Bruns. 2004. Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany. *Agricultural and Forest Meteorology* 121(1-2):69-78.
- de Beurs, K.M., and G.M. Henebry. 2008. Northern annular mode effects on the land surface phenologies of northern eurasia. *Journal of Climate* 21(17):4257-4279.
- De Wit, A.J.W. and B. Su. 2005. Deriving phenological indicators from SPOT-VGT data using the HANTS algorithm. *Proceedings of the 2nd international SPOT-VEGETATION user conference* pp.195-201.
- Edwards, M. and A.J. Richardson, 2004. Impact of climate change on marine pelagic phenology and trophic mismatch. *Nature* 430(7002):881-884.
- Eun, J. 2012. Development of integration method between MODIS NDVI and AVHRR NDVI. Thesis, Univ. of Inha, Incheon, Korea. 16pp (은정. 2012. MODIS NDVI와 AVHRR NDVI의 연계방법 개발. 인하대학교 대학원 석사학위논문. 16쪽).
- Fischer, A. 1994. A model for the seasonal variation of seasonal of vegetation indices in coarse resolution data and its inversion to extract crop parameters. *Remote Sensing of Environment* 48(2):220-230.
- Fisher, J.I., J.F. Mustard and A. Vadeboncoeur. 2006. Green leaf phenology at landsat resolution: scaling from the field to the satellite. *Remote Sensing of Environment* 100(2):265-279.
- Fridely, J.D., 2012. Extended leaf phenology and the autumn niche in deciduous forest invasions. *Nature* 485(7398):359-362.
- Hopkins, A.D. 1920. The bioclimatic law. *Monthly Weather Review* 48(6):355-355.
- Huh, Y., Y.G. Byun, Y.I. Kim and K.Y. Yu. 2007. A study on cloud-free MODIS NDVI time series reconstruction using HANTS algorithm. *Proceedings of the Journal of Korea Spatial Information Society 2007* pp.169-174 (허용, 변영기, 김용일, 유기운. 2007. HANTS 알고리즘을 이용한 MODIS NDVI 시계열 영상의 구름 화소 문제 해결에 관한 연구. 한국GIS학회 춘·추계 학술대회 발표논문 초록집. 2007: 169-174쪽).
- IPCC. 2007. Climate change 2007: synthesis report. IPCC Fourth Assessment Report. Geneva, Switzerland, pp.104-105.
- IPCC. 2013. Summary for policy makers. In: T.F. Stoker et al.(eds.). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jakubauskas, M.E., D.R. Legates and J.H. Kastens. 2001. Harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 67(4):461-470.
- Jo, H.K. and T.W. Ahn. 2008. Differences

- in phenological phases of plants subsequent to microclimate change. *Korean Journal of Environment and Ecology* 22(3):221-229 (조현길, 안태원. 2008. 미기후 변화에 따른 식물계절 차이. *한국환경생태학회지* 22(3):221-229).
- Jönsson, P., and L. Eklundh. 2004. TIMESAT - a program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers and Geosciences* 30(8):833-845.
- Kang, S.G. 2005. Analysis on cloud-originated errors of MODIS leaf area index and primary production images: effect of monsoon climate in Korea. *Journal of Ecology and Environment* 28(4):215-222 (강신규. 2005. MODIS 엽면적지수 및 일차생산성 영상의 구름 영향 오차 분석. *한국생태학회지* 28(4):215-222).
- Kim, B.D., S.G. Kang, S.T. Yu, H.T. Shin, K.H. Park, M.H., Yi, J.W. Yoon, G.S. Kim and J.W. Sung. 2012. A study on the plants for phenology of the Mt. Gaya national park. *Journal of Climate Reserch* 7(2):174-186 (김병도, 강신규, 유성태, 신현탁, 박기환, 이명훈, 윤정원, 김기송, 성정원. 2012. 가야산국립공원 식물종의 생물계절성 연구. *기후연구* 7(2):174-186).
- Kim, M.K., D.H. Lee and J.U. Kim. 2013a. Production and validation of daily grid data with 1km resolution in South Korea. *Journal of Climate Research* 8(1):13-25 (김맹기, 이대희, 김진욱. 2013a. 남한 1km 해상도의 격자형 일 기상 자료 생산과 검증. *기후연구* 8(1):13-25).
- Kim, N.S., H.C. Lee and J.Y. Cha. 2013b. A study on changes of phenology and characteristics of spatial distribution using MODIS images. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology* 16(5):56-69 (김남신, 이희천, 차진열. 2013b. MODIS 영상을 이용한 식물계절의 변화와 공간적 분포 특징에 관한 연구. *한국환경복원기술학회지* 16(5):59-69).
- Kramer, K. 1996. Phenology and growth of European trees in relation to climate change. Thesis, Landbouw Universiteit Wageningen.
- Lee, K.M., W.T Kwon and S.G. Lee. 2009. Articles: a study on plant phenological trends in South Korea. *Journal of The Korean Association of Regional Geographers* 15(3):337-350 (이경미, 권원태, 이승호. 2009. 우리나라 식물계절 시기의 변화 경향에 관한 연구. *한국지역지리학회지* 15(3):337-350).
- Lee, W.S., S.G. Jung, K.H. Park and K.T. Kim. 2010. Analysis of urban thermal environment for environment-friendly spatial plan. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 13(1):142-154 (이우성, 정성관, 박경훈, 김경태. 2010. 친환경적 공간계획을 위한 도시의 열환경 분석. *한국지리정보학회지* 13(1):142-154).
- Liu, H.Q. and A. Huete. 1995. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 33(2):457-465.
- Liu, L., L. Liu and Y. Hu. 2012. Response of spring phenology to climate change across Tibetan Plateau. *Proceedings of the Remote Sensing, Environment and*

- Transportation Engineering (RSETE) 2012 2nd International Conference on pp.1-4.
- Lloyd, D. 1990. A phenological classification of terrestrial vegetation cover using shortwave vegetation index imagery. *International Journal of Remote Sensing* 11(12):2269-2279.
- Lu, X., R. Liu, J. Liu and S. Liang. 2007. Removal of noise by wavelet method to generate high quality temporal data of terrestrial MODIS products. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 73(10):1129-1139.
- Markon, C.J., M.D. Fleming and E.F. Binnian. 1995. Characteristics of vegetation phenology over the Alaskan landscape using AVHRR time-series data. *Polar Record* 31(177):179-190.
- Menenti, M., S. Azzali, W. Verhoef and R. van Swol. 1993. Mapping agroecological zones and time lag in vegetation growth by means of Fourier analysis of time series of NDVI images. *Advances in Space Research* 13(5):233-237.
- Monson, R.K., J.P. Sparks, T.N. Rosenstiel, L.E. Scott-Denton, T.E. Huxman, P.C. Harley, A.A. Turnipseed, S.P. Burns, B. Backlund and J. Hu. 2005. Climatic influences on net ecosystem CO₂ exchange during the transition from wintertime carbon source to springtime carbon sink in a high-elevation, subalpine forest. *Oecologia* 146(1):130-147.
- Moulin, S., N. Kergoat, N. Viovy, and G. Dedieu. 1997. Global-scale assessment of vegetation phenology using NOAA/AVHRR satellite measurements. *Journal of Climate* 10(6):1154-1170.
- Niu, S., Y. Fu, L. Gu and Y. Luo. 2013. Temperature sensitivity of canopy photosynthesis phenology in northern ecosystems. *Phenology: An Integrative Environmental Science*, Springer. pp.503-519.
- Park, S.Y. 2013. Satellite-measured vegetation phenology and atmospheric aerosol time series in the Korean peninsula. *Journal of the Korean Geographical Society* 48(4):497-508 (박선엽. 2013. 위성기반의 한반도 식물계절학적 패턴과 대기 에어로졸의 시계열 특성 분석. *대한지리학회지* 48(4):497-508).
- Reed, B.C., J.F. Brown, D. Vanderaee, T.R. Loveland, J.W. Merchant, and D.O. Ohlen. 1994. Measuring phenological variability from satellite imagery. *Journal of Vegetation Science* 5(5):703-714.
- Roerink, G.J., M.H.G.I. Danes, A.J.W. De Wit, O.G. Prieto and A.J.H. Van Vliet. 2011. Deriving plant phenology from remote sensing. *Proceedings of the 2011 6th International Workshop on the Analysis of Multi-Temporal Remote Sensing Images, Multi-Temp* 2011:261-264.
- Roerink, G.J., M. Menenti and W. Verheof. 2000. Reconstructing cloudfree NDVI composites using fourier analysis of time series. *International Journal of Remote Sensing* 21(9):1911-1917.
- Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell and D.W. Deering. 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains

- with ERTS. Proceedings of the 3rd ERTS Symposium 1 pp.48-62.
- Rötzer, T., and F.M. Chmielewski. 2001. Phenological maps of Europe. *Climate Research* 18(3):249-257.
- Schwartz, M.D., B.C. Reed and M.A.White. 2002. Assessing satellite-derived start-of-season measures in the conterminous USA. *International Journal of Climatology* 22(14):1793-1805.
- Song, B.G. and K.H. Park. 2012. Analysis of heat island characteristics considering urban space at nighttime. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 15(1):133-143 (송봉근, 박경훈. 2012. 도시공간을 고려한 야간시간대의 열섬특성 분석. *한국지리정보학회지* 15(1):133-143).
- Soudani, K., G. le Maire, E. Dufrêne, C. François, N. Delpierre, E. Ulrich and S. Cecchini. 2008. Evaluation of the onset of green-up in temperate deciduous broadleaf forests derived from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data. *Remote Sensing of Environment*. 112(5):2643-2655.
- Tan, B., F. Gao, R.E. Wolfe, J. Nightingale, J.A.Pedely, J.T. Morissette and G.A. Ederer. 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.
- Vitasse, Y., S. Delzon, J.-M. Louvet, A. Kremer, R. Michalet, E. Dufrêne and J.-Y. Pontailler. 2009. Leaf phenology sensitivity to temperature in European trees: do within-species populations exhibit similar responses?. *Agricultural and Forest Meteorology* 149(5):735-744.
- White, M.A., G. Zhang, K.M. de Beurs, K. Didan, D.W. Inouye, A.D. Richardson, O.P. Jensen, J. O'Keefe, R.R. Nemani, W.J.D. van Leeuwen, J.F. Brown, A. de Wit, M. Schaepman, X. Lin, M. Dettinger, M. Bailey, J. Kimball, M.D. Schwartz, D.D. Baldocchi, J.T. Lee and W.K. Lauenroth. 2009. Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982-2006. *Global Change Biology* 15(10):2335-2359.
- White, M.A., M.D. Schwartz and Running, S.W. 2000. Young students, satellites aid understanding of climate biosphere link. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 81(1):1-5.
- White, M.A., P.E. Thornton and S.W. Running. 1997. A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability. *Global biochemical cycles* 11(2):217-234.
- White, M.A., S.W. Running and P.E. Thornton. 1999. The impact of growing-season length variability on carbon assimilation and evapotranspiration over 88 years in the eastern US deciduous forest. *International Journal of Biometeorology* 42(3):139-145.
- 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(7):1133–1145.
- Zhang, X., M.A. Friedl, C.B. Schaaf, A.H. Strahler, J.C.F. Hodges, F. Gao, B.C. Reed, and A. Huete. 2003. Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment* 84(3): 471–475. 