Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, 19(1) 2016, pp. 30-42 ISSN 1226-9719(Print)
http://dx.doi.org/10.11108/kagis.2016.19.1.030 ISSN 2287-6952(Online)

위성영상을 기반으로 도출된 식물계절과 기온요인과의 상관관계 분석

최철현[1] · 정성관[2※] · 박경훈[3]

Analyzing Relationship between Satellite-Based Plant Phenology and Temperature

Chul-Hyun CHOI[1] · Sung-Gwan JUNG[2※] · Kyung-Hun PARK[3]

요 약

기후변화는 식물계절주기에 큰 영향을 미쳤으며, 이로 인해 유기적인 상호관계 하에 있는 생태계 내 다른 생물들까지도 피해를 받는다는 것이 밝혀졌다. 그러나 국내의 경우 식물계절 조사 자료의 구축이 미흡하여 기후와 식물계절간 관계와 관련된 연구를 수행하는데 있어 어려움이 있다. 이에 본 연구에서는 위성영상을 이용한 식물계절 분석방법을 사용하여 효율적으로 국내 산림의 생육개시일을 도출하였다. 또한 생육개시일-기온요인간 상관관계를 분석하여 생육개시일 변동에 가장 영향력이 큰 변수를 도출해보고자 하였다. 분석결과, 국내 산림지역의 생육개시일은 4월 평균기온 그리고 TSOGmin(3℃, 12일)과 가장 상관성이 큰 것으로 나타났다. 이러한 결과는 추후 미래의 기후변화 시나리오 자료를 통해 식물계절 변화를 예측할 수 있는 유용한 자료로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 생물계절, 기후변화, MODIS, EVI, HANTS

ABSTRACT

Climate change are known to have had enormous impacts on plant phenology and thus to have damage on other species which are interacted within ecosystem. In Korea, however, it is difficult to analyze the relationship between climate and phenology due to the limitation of measurement data of plant phenological records. In this study, to be effective analysis of SOG(start of growing season), we used phenological transition dates by using satellite data. Then, we identified the most influential variable in variation of

2015년 11월 7일 접수 Received on November 7, 2015 / 2015년 12월 29일 수정 Revised on December 29, 2015 / 2016년 1월 12일 심사완료 Accepted on January 12, 2016
1 국립생태원 생태보전연구본부 Bureau of Ecological Conservation Research, National Institute of Ecology
2 경북대학교 조경학과 Dept. of Landscape Architecture, Kyungpook National University
3 창원대학교 환경공학과 Dept. of Environmental Engineering, Changwon National University
※ Corresponding Author E-mail : sgjung@knu.ac.kr

SOG throughout the relationship between SOG and temperature factors. As a result, there is a strong correlation between the SOG and April temperature, TSOGmin(3℃, 12days). This study is expected to be used for predicting plant phenological change using climate change scenario data.

KEYWORDS : Phenology, Climate Change, MODIS, EVI, HANTS

서 론

1. 연구배경

국내 · 외적으로 장기적인 생태계 모니터링을 통해 식물의 개화, 개엽, 낙엽시기 등의 변화를 관측한 결과, 최근의 기후변화로 인한 영향으로 식물계절주기가 바뀌고 있다는 것이 밝혀졌다(Chmielewski and Rötzer, 2001; Badeck *et al.*, 2004; Linderholm, 2006; Menzel *et al.*, 2006; Schwartz *et al.*, 2006; Jeong *et al.*, 2013). 식물계절주기의 급격한 변화는 생물종 간 생물계절 불일치 현상을 초래하고 먹이사슬의 구조를 변화시키게 된다(Stenseth and Mysterud, 2002; Both *et al.*, 2006; Jones and Cresswell, 2010). 또한 생태계 내의 각 생물들은 서로 밀접한 유기적 관계에 있기 때문에 어느 한 생물에서 관찰된 계절학적 변화는 다른 생물종의 계절학적 특성에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 변화가 지속될 경우 생태계의 불균형을 초래할 수 있기 때문에 식물계절주기를 모니터링하는 것은 생태적 관점에서 중요한 사안이라 할 수 있다.

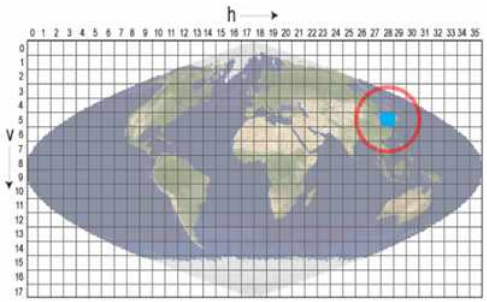
최근 식생의 계절적 특성 변화를 조사하고 이를 바탕으로 메타개체군의 생태적 변화를 파악해보고자 하는 연구가 지속적으로 이루어지고 있다(Stenseth and Mysterud, 2002; Méndez-Alonzo *et al.*, 2013). Both *et al.* (2006)는 이러한 현상에 대한 실증적인 연구를 수행하였으며, 식물의 계절주기 변화와 조류의 개체수 감소가 밀접한 관계를 가진다는 것을 밝혀냈다. 기온의 증가로 인한 수목의 조기 개엽은 나뭇잎을 먹이로 하는 애벌레의 조기 발생을 유발시켜 평소보다 빠르게 소멸하였고 이로 인해 애벌레를 통해 양분을 공급받는 철새는 먹이부족으로 개체수가 감소하였다. 이러한 결과는 미래의 기후변화로 인한 식물계절의 변화가 다양한 종들이 상호작용하는 생태계 내에서 종 간 생물계절의 비동조화를 발생시키고 이로 인해 국지적인 절멸의 요인으로 작용할 수 있다는 것을 시사한다(Kang, 2013).

미래의 기후변화에 의한 부정적인 영향을 최소화하기 위해서는 식생의 식물계절주기에 대한 집중적인 모니터링이 반드시 필요하다. 또한 식물계절주기 변화와 이에 기인한 생장기간의 변화는 생태계뿐만 아니라 작물 등의 생산성과도 직결되기 때문에 임업이나 농업 분야에서도 중요하게 다루어지고 있으며, 산불, 병해충, 외래종에 의한 산림의 교란 등과 같은 피해와도 간접적인 영향 관계에 있다. 이에 장기적인 관점에서 산림 생태계 전반에 걸쳐 식물계절주기의 변화를 모니터링하는 것이 중요하나 국내의 경우 일부 지역 또는 특정종에 한해 단기간의 조사만이 이루어지는 경우가 많기 때문에 기후와 식물계절주기와의 관계를 연구하는데 있어 자료가 매우 제한적이라 할 수 있다.

추후 미래의 기후변화에 의한 식물의 계절적 특성 변화를 파악하기 위해서는 광역적인 지역에 대한 정량적인 식물계절 자료의 구축과 함께 기후에 대한 영향을 함께 살펴볼 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 최근 식물계절주기 모니터링에 사용되고 있는 위성영상을 이용한 기법을 적용하여 국내 전체 산림의 식물계절적 특성을 분석하고 기온요인과의 상관관계를 분석해보고자 하였다.

2. 연구범위

본 연구의 공간적 범위는 국내 전체의 산림



○ MODIS grid
- Tile grid : h28v05
- Longitude min : 115.47
- Longitude max : 143.61
- Latitude min : 30.00
- Latitude max : 40.00

(a) MODIS sinusoidal tiling system
[Source : http://modis-land.gsfc.nasa.gov]

(b) area of the 'h28v05' tile grid

FIGURE 1. MODIS tiling system and study site

지역을 대상으로 하였으며, 분석의 기반이 되는 위성영상의 공간적 관측범위 내로 한정하여 산림생태계의 식물계절적 특성을 살펴보았다. 본 연구에서 사용한 자료는 미국 NASA에서 제공하는 위성영상이며, Terra 위성에 탑재되어 있는 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 센서에 의해 촬영된 영상을 통해 도출된 식생지수를 분석에 활용하였다. 해당 위성은 지구 전 범위를 일간격으로 관측하며, 그림 1(a)와 같이 전 세계를 지역별 격자 형태로 나누어 자료를 제공하고 있다. 이 중 남한 지역은 h27v04, h27v05, h28v05 세 도곽에 해당되며, 그 중 h28v05 도곽은 남한 대부분의 지역과 북한 일부 지역을 포함하고 있다. 본 연구에서는 이 도곽의 영상자료에서 남한지역만을 추출하여 분석에 사용하였다.

연구방법

1. EVI를 이용한 생육개시일 분석

식생분야에서 위성영상을 통해 식생의 활력도를 평가할 수 있는 지수(index)에 대한 알고리즘은 상당히 오래전부터 연구되어 왔다. 모든 녹색식물은 잎에 함유되어 있는 클로로필(chlorophyll)을 통해 광합성 활동을 하며, 클로로필은 가시광선 영역인 0.45~0.67μm의 파장대는 강하게 흡수하고 근적외 영역(0.74~1.3μm)은 반사하는 특성이 있다. 이러한 특성을 이용하여 만들어진 대표적인 지수가 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)이다. EVI(Enhanced Vegetation Index)는 NDVI가 식생이 밀생하는 지역에서 오차가 크고 대기에 의한 영향이 크기 때문에 이를 보완하기 위해 개발된 지수이다. NDVI와 다른 점은 식생지수 계산에 청색파장 밴드와 에어로졸에 따른 보정 계수 그리고 수관밀도에 따른 조정 계수가 추가되었다는 점이다. 이에 EVI는 식생이 밀집해 있는 지역에서 더 정확한 값을 도출할 수 있으며, 대기의 영향에 의한 오차가 NDVI보다 적다(Huete and Liu, 1994).

위성영상 기반의 식생지수는 위성의 종류 및 센서에 따라 그 종류가 매우 다양하나 식물계절과 관련된 연구에 사용되기 위해서는 재관측 주기가 짧은 자료가 필요하다. 이에 대표적으로 사용되는 위성영상 자료는 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer) GIMMS

(Global Inventory Modeling and Mapping Studies) NDVI와 MODIS 식생지수이다. GIMMS NDVI는 15일 주기로 자료가 제공되고 공간해상도는 약 8km이며, 1981년부터 현재까지 자료가 구축되어 있어 장기간 동안의 식생지수 변화추세를 파악하는데 용이하다. 반면, MODIS 식생지수 자료는 2000년부터 운용되어 자료의 구축기간은 짧지만 전지구적 차원에서 다양한 조건의 지상 관측망 자료를 통해 자료가 검증된다. 또한 다양한 보정 알고리즘이 적용되어 16일 주기로 식생지수 자료가 제공되고 있으며, 공간해상도가 250m로 GIMMS NDVI보다 월등히 높다는 장점이 있다. 이에 본 연구에서는 더 정확한 생육개시일 분석을 위해 MODIS EVI 자료를 사용하였다.

우리나라와 같이 식물의 계절변화가 큰 지역의 경우 식생지수 역시 일정한 주기를 보이며 변동하는 특성을 갖는다. 이러한 특성을 이용하여 식물이 생육을 개시하는 시점과 종료되는 시점을 도출하는 방법이 최근 많이 연구되고 있다(Myneni *et al.*, 1997; Tucker *et al.*, 2001; Jeong *et al.*, 2009; Julien and Sobrino, 2009; White *et al.*, 2009). 초기에는 전체지역에서 동일한 식생지수 임계치를 일괄적으로 적용하여 식생지수가 해당 값에 도달하는 시기를 생육개시일 또는 생육종료일로 정의하는 방법을 주로 사용하였다. 그러나 이러한 방법은 간단하기는 하지만 다양한 식생의 종류에 따른 특성이 고려되지 못하기 때문에 최근에는 픽셀별로 국지 임계값을 적용하거나 식생지수 곡선의 급격한 변화를 나타내는 지점의 값을 적용하는 방법 등이 사용되고 있다(White *et al.*, 2009). 국지 임계값 적용은 픽셀별로 임계값이 다르게 설정되기 때문에 해당 지역 식생의 개별적 특성이 고려되어 실측값에 가까운 결과를 도출할 수 있다.

White *et al.*(2009)은 위성영상을 이용하여 식물계절주기를 분석할 수 있는 다양한 알고리즘을 적용해 지상에서 관측된 개화, 개엽 등의 조사결과와 비교해본 결과, SMN(Seasonal Midpoint NDVI) 기법을 사용했을 때, 설명력이 높고 편차가 적다는 것을 확인하였다. SMN은 국지 임계값을 적용하는 방법으로서 각 픽셀별 식생지수의 최대값과 최소값의 중간값을 임계값으로 설정하고 임계값에 해당하는 시기를 생육개시일 또는 생육종료일로 정의하는 방법이다. Choi(2015)는 국립수목원에서 실시한 식물계절 모니터링 자료를 SMN 기법을 적용하여 도출된 생육개시일과 비교해본 결과, 상관계수는 지역에 따라 약간씩 다르나 0.65~0.81인 것을 확인하였으며, 이에 본 연구 역시 이 방법을 사용하여 생육개시일을 도출하였다. EVI 자료의 구름이나 에어로졸 등에 의한 결측치는 HANTS(Harmonic Analysis of NDVI Time Series) 알고리즘을 적용하여 보정하였으며(Roerink *et al.*, 2000), 생육개시일(Start Of Growing season, SOG)을 도출하는 전체적인 과정은 MATLAB 스크립트로 작성한 뒤, 각 픽셀별로 값을 도출하였다(Choi and Jung, 2014). 이러한 방법을 통해 광역적인 지역에 대해서 효율적으로 정량적인 식물계절적 특성을 도출할 수 있으며, 이는 지속적으로 축적되고 있는 위성영상 자료를 통해 장기적인 모니터링이 가능하다는 장점이 있다(Kim and Park, 2010; Choi and Jung, 2014; Kim *et al.*, 2014; Shin *et al.*, 2015).

2. 남한상세 기상자료

국내에서 주로 사용되는 기상자료는 기상청에서 제공하는 전국 각지의 지상기상관측소 자료이며, 기상관측소의 현황은 현재 유인관측소 51개, 무인관측소 520개 등 총 571개 지점에서 자동기상관측장비를 운영 중에 있다. 지상관측소를 모두 사용할 경우 약 12km의 공간해상도로 기상자료를 구축할 수 있어 활용도가 높지만 관측소가 주로 평지에 위치하고 있기 때문에 국내 산림지역의 복잡한 지형을 감안할 경우 많은 불확실성을 포함하고 있다(Kim *et al.*, 2012). 미국의 경우 이를 해결하기 위해서 지상관측소 자료와 함께 지형인자, 해양으로부터의 거리 등을 고려한 PRISM(Parameter-

elevation Relationships on Independent Slopes Model) 알고리즘을 통해 공간해상도가 약 800m인 기상자료를 생산하고 있다(Daly *et al.*, 2007). 국내 역시 이와 유사한 방법으로 PRIDE(PRISM based Downscaling Estimation Model) 모델을 개발하여 남한 지역의 1km 공간해상도를 갖는 기후자료를 제공하고 있다. 기상청은 유·무인 기상 관측자료를 통해 남한상세 평균기온자료를 검증한 결과, RMSE(Root Mean Square Error)가 1.56이었으며, 본 연구에서 유인관측소 자료를 통해 검증해본 결과, MAE(Mean Absolute Error)는 0.43, R^2는 0.97로 상당히 정확도가 높은 것으로 평가되었다. 본 연구에서 도출된 생육개시일 분석결과는 공간자료의 형태로 산림지역의 식생을 대상으로 한다. 따라서 지형적 요인이 고려된 신뢰도가 높은 기상자료를 필요로 하며, 이에 남한상세 기상자료를 사용하는 것이 적합할 것으로 판단된다.

3. 생육개시일과 기온변수와의 상관성 분석

식물의 개화나 개엽에 영향을 주는 인자에는 기온, 수분, 광조건 등이 있는데, 이 중 겨울과 봄철의 온도가 가장 민감한 요인으로 알려져 있다(Chmielewski *et al.*, 2004). 이에 생육개시일을 예측하기 위해 기온과 관련된 다양한 변수를 사용하며, 주로 사용되는 변수로는 2~4월 평균기온이나 일적산온량지수(Year Day Index, YDI), Nuttonson's Index(Tn), 저온요구량(chilling requirement) 등이 있다(Nuttonson, 1948; Cannell and Smith, 1983; Chmielewski and Rötzer, 2001; Jo and Ahn, 2008). 미래 기후변화에 대한 모의를 통해 앞으로 기온의 증가현상이 명백하게 일어날 것으로 예측되고 있으며, 기온과 밀접한 관련이 있는 생육개시일 역시 변화할 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 생육개시일에 대해 어떠한 기온변수가 가장 큰 영향을 미치는지 파악해 보고자 하였다.

기온변수는 선행연구를 토대로 1~5월 각각의 월평균기온, 연평균기온을 선정하였다. 또한 평균기온, 최고기온, 최저기온이 각각 t℃를 초과한 날이 d일 이상 지속되는 기간의 첫 번째 날을 생육개시일과 비교하였으며, 해당 변수는 TSOGmean(Thermal SOG for mean temperature), TSOGmax(Thermal SOG for maximum temperature), TSOGmin(Thermal SOG for minimum temperature)라 명명하였다. 이는 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)의 Climatology(CCL)/(Climate Variability)CLIVAR 실무그룹에서 제시한 극한기후 변수 중 GSL(Growing Season Length) 계산 알고리즘을 참조하여 분석하였다(Frich *et al.*, 2002). 임계값 t와 d의 경우 일평균기온, 일최고기온, 일최저기온 각각 t는 0~10℃, d는 1~20일로 설정하여 총 3×11×20=660개의 처리수로 생육개시일을 계산하고 이를 EVI를 통해 도출된 생육개시일(SOG)과 상관분석을 수행하였다. 그 후, 가장 상관계수가 높게 나왔을 때의 t와 d를 최적값으로 결정하였다. 분석의 시간적 범위는 2000~2010년으로 총 11년이며, 산림 전체의 생육개시일, 월평균기온, 연평균기온, TSOG 변수들의 평균값을 구해 상관분석을 수행하였다.

결과 및 고찰

1. 생육개시일의 연간 변동특성

국내 산림 전체의 연간 생육개시일 변화를 살펴본 결과, 그림 2와 같이 나타났으며, 2000년부터 2014년까지 총 15년간의 연간 변화는 뚜렷한 추세를 나타내지는 않는 것으로 분석되었다. 최근 연구에서 개화나 개엽시기가 앞당겨지고 있다는 결과가 보고되고 있으나 이러한 추세의 경향을 파악하기 위해서는 장기간의 자료를 사용하여 분석할 필요가 있을 것으로 판단된다(Ho *et al.*, 2006; Julien and Sobrino, 2009).

2012년과 2014년의 경우 생육이 개시되는 시점은 4월 17일로 15년의 기간 중 가장 이른

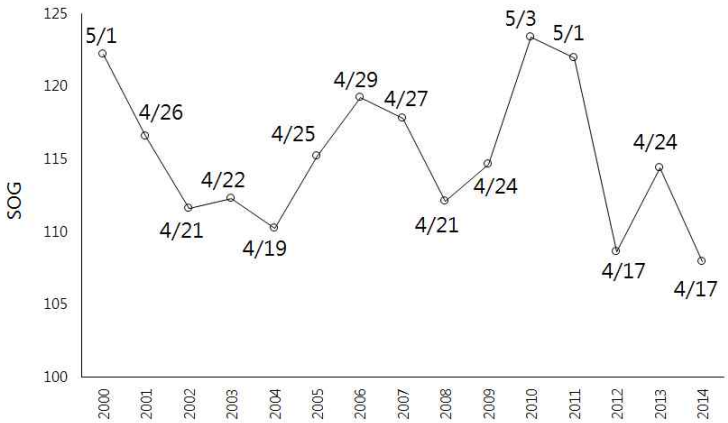
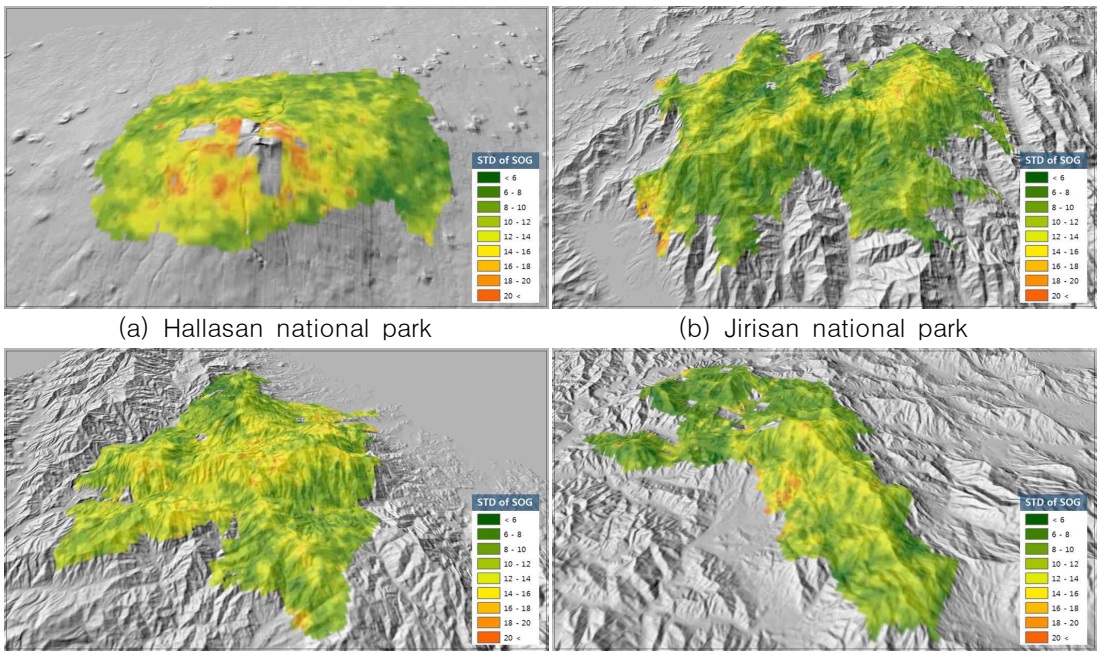


FIGURE 2. Change in the average SOG(start of growing season, unit: day of the year) in Korea forest, 2000-2014

것으로 나타났으며, 2010년의 경우 5월 3일로 가장 느린 것으로 분석되었다. 연간 생육개시일의 차이를 살펴보면 적게는 1일에서 많게는 13일의 차이가 나는 것으로 분석되었으며, 특히 2012년의 경우 전년도와 비교했을 때, 약 13일이 빠른 것으로 나타났다. 생육개시일의 변동량이 클수록 상호관계에 있는 종의 생물계절 불일치 현상이 발생할 확률이 높다(Stenseth and Mysterud, 2002). 따라서 연간 변동량과 관련된 표준편차를 계산하여 그 분포를 살펴보



(a) Hallasan national park (b) Jirisan national park

(c) Seoraksan national park (d) Deogyusan national park

FIGURE 3. Distribution of standard deviation for the SOG in national park

면 생물계절 불일치 현상이 발생할 확률이 높은 지역을 탐색할 수 있을 것으로 판단된다.

그림 3은 2000~2014년의 생육개시일 표준편차 값을 계산하여 주요 국립공원에 매핑한 결과이다. 주로 고도가 높은 지역에서 표준편차 값이 크며, 계곡이나 저지대에 가까울수록 표준편차 값이 작은 것을 알 수 있다. 일부 저고도 지역에서 표준편차 값이 큰 지역이 나타나는데 이는 주로 도시지역 또는 농경지역과 인접한 곳으로서 인위적 활동에 의한 교란 등이 발생하여 생육개시일의 변동에 영향을 준 것으로 보인다. 이후 장기간 동안의 자료를 바탕으로 생육개시일의 변동량이 큰 지역에 서식하는 식물종과 밀접한 관련이 있는 주요 멸종위기종 또는 희귀종에 대한 추가적인 조사가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

2. TSOG 임계값 선정

TSOG 변수의 평균기온, 최고기온, 최저기온 임계값 t℃와 지속기간 d일을 각각 다르게 적용하여 생육개시일(SOG)과의 상관성을 분석하였으며, 그 결과는 그림 4, 5, 6과 같이 나타났다. 이 그래프에서 x축은 t℃, y축은 지속기간 d일이며, 원의 크기는 생육개시일(SOG)과의 상관계수 크기를 나타낸다. 평균기온의 경우 9℃를 초과하는 날이 12일 이상 지속되는 첫번째 날로 계산된 생육개시일이 EVI를 통해 도출된 생육개시일과 가장 상관성이 높은 것으로 나타났다. 최고기온의 경우 10℃, 17일, 최저기온은 3℃, 12일인 것으로 분석되었다. 상관계수의 크기는 TSOGmean(9℃, 12일)이 0.91, TSOGmax(10℃, 17일)이 0.85, TSOGmin(3℃, 12일) 0.93으로 최저기온을 변수로 사용했을 때, 가장 상관성이 높은 것으로 나타났다.

3. 생육개시일과 기온변수의 상관성

산림지역의 평균적인 월평균기온, 연평균기온, TSOG 변수 및 생육개시일과의 관계를 분석해본 결과, TSOG 변수를 제외할 경우 4월 기온이 가장 상관관계가 높은 것으로 나타났

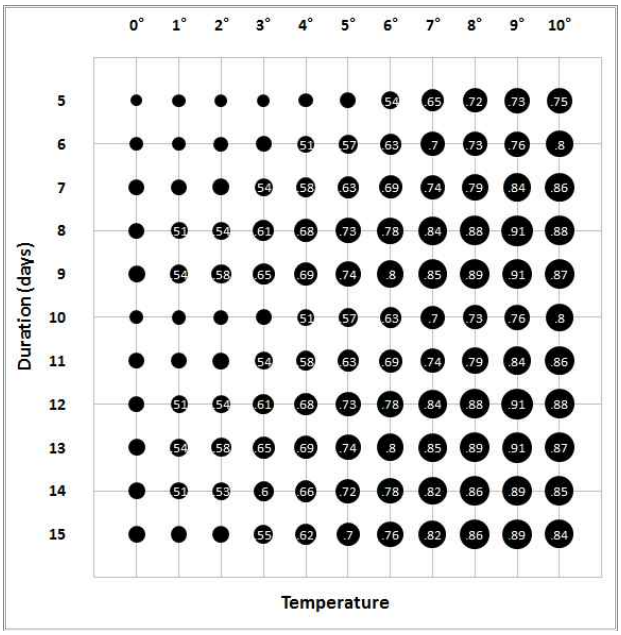


FIGURE 4. Correlation coefficients between SOG and TSOGmean

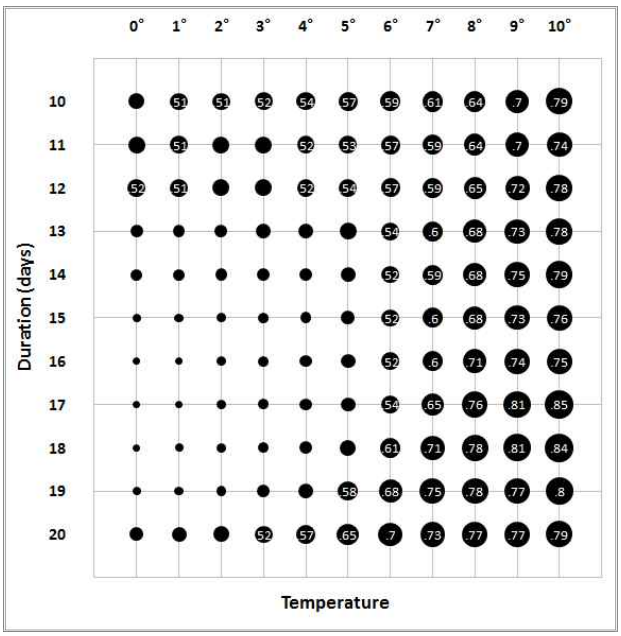


FIGURE 5. Correlation coefficients between SOG and TSOGmax

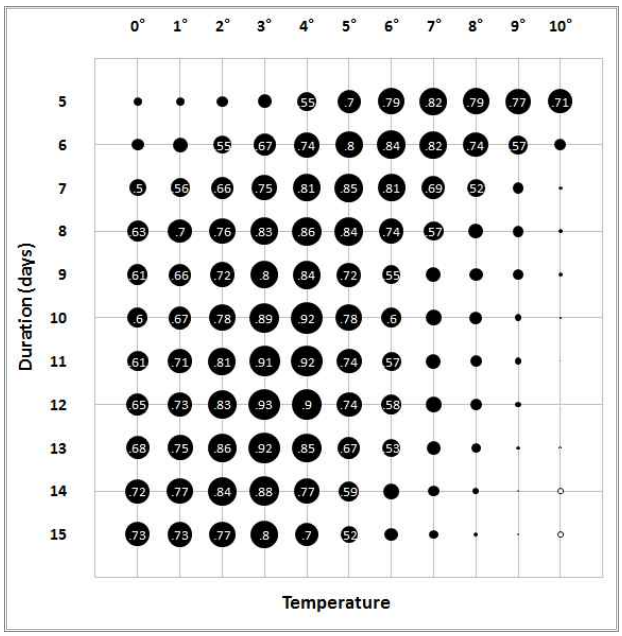
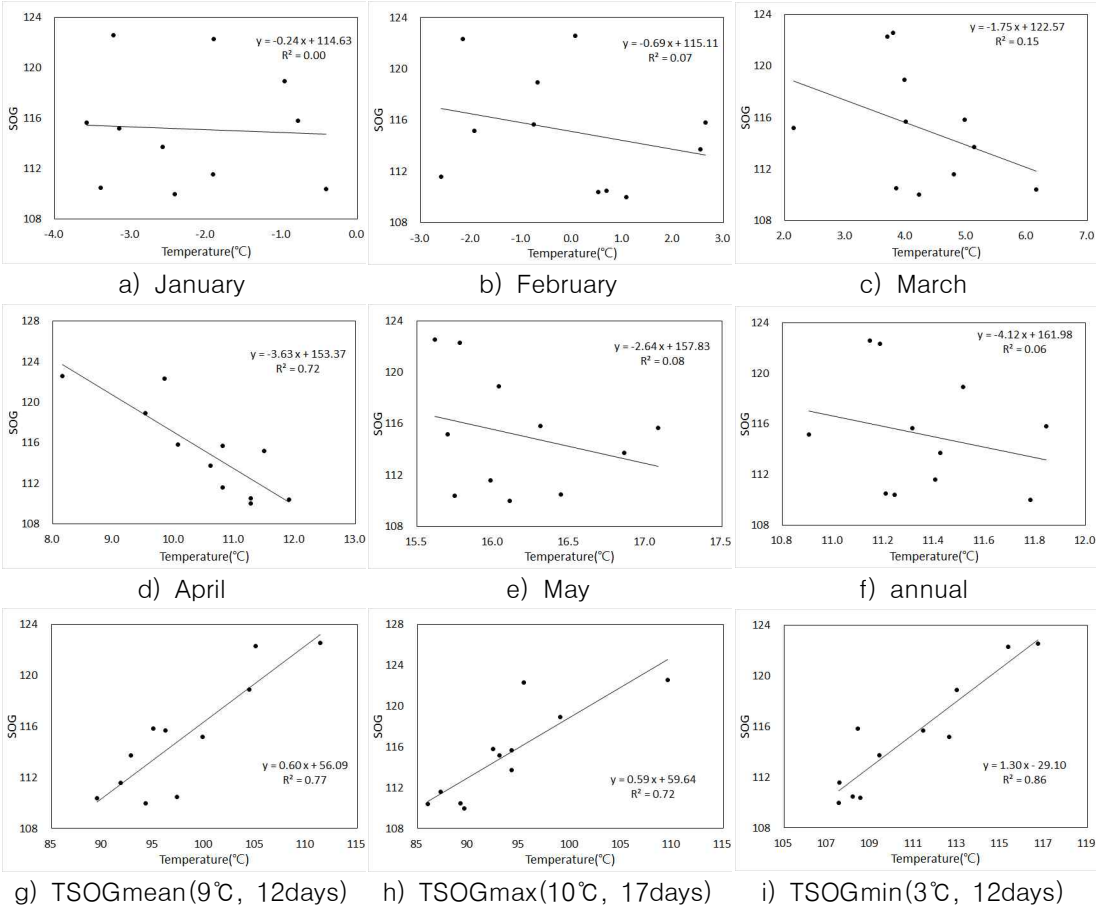


FIGURE 6. Correlation coefficients between SOG and TSOGmin



a) January b) February c) March

d) April e) May f) annual

g) TSOGmean(9℃, 12days) h) TSOGmax(10℃, 17days) i) TSOGmin(3℃, 12days)

FIGURE 7. Correlation between SOG and the temperature variable

다. 4월 기온을 이용한 모형에서의 회귀경사는 -3.63으로 이는 4월 기온이 1℃ 증가할 때, 생육개시일은 약 3.6일 정도 빨라진다는 것을 의미한다(그림 7). 1월에서 4월에 가까워짐에 따라 설명력이 커지는 것을 알 수 있으며, 이는 봄철 기온이 생육개시일 변화에 영향을 주는 주요 변수라는 기존 연구결과와 일치한다. 앞서 국내 산림 전체의 생육개시일 평균값은 4월 중순에서 5월 초인 것으로 분석되었으며, 이에 생육이 개시되는 기간인 4월의 평균기온이 생육개시일에 가장 큰 영향을 주는 것으로 판단된다. Jung *et al.*(2005)는 실측된 벚꽃 개화일과 기온과의 관계를 살펴본 결과, 4월의 기온이 개화에 큰 영향을 미친다는 것을 확인하였으며, 이에 기상청에서 벚꽃 개화일을 예측하기 위해 사용되고 있는 2월과 3월 평균기온을 이용한 모형이 수정되어야 할 것을 제안했다. 그러나 4월 기온을 벚꽃 개화일과 같은 생육개시일 예측에 사용할 경우 정확도는 높아질 수 있으나 예측시기가 늦어져 활용성이 떨어질 수 있다.

TSOG 변수의 경우 일평균기온, 일최저기온, 일최고기온 모두 4월 기온변수보다 설명력이 높은 것으로 나타났으며, 세 변수 중 TSOGmin (3℃, 12일)이 R^2=0.86으로 가장 높은 설명력을 나타내는 것으로 분석되었다. 이에 일단위로 기온자료가 구축되어 있을 경우 TSOG를 이용

한 방법을 통해 생육개시일을 예측하는 것이 더 효율적일 것으로 판단된다. 또한 최근, 기후변화와 관련하여 RCP 시나리오 자료가 구축되었으며, 이에 미래의 기후자료를 사용하여 생육개시일 변화를 살펴보고 앞으로 어떠한 양상을 보일 것인지에 대해 파악해보는 것도 생태적 측면에서 중요한 의미를 가질 것으로 사료된다.

결 론

식물의 생육주기 변화는 다양한 종들이 서식하고 서로 상호작용하는 생태계 내에서 중요한 요인이며, 주변 생물 및 환경에 영향을 미치고 또한 토양 내 양분 변화 및 식물 자체의 생산성 변화 등과도 밀접한 관련이 있다. 특히 생물계절 불일치 현상은 특정 종의 개체수 감소와 이로 인한 먹이그물 변화 등 생태계 전반에 걸쳐 부정적인 영향을 미칠 것으로 보고되고 있다. 이에 식물의 계절에 따른 변화를 지속적으로 모니터링하는 것이 중요하며, 또한 식물계절주기는 기후변화 지표로서도 활용될 수 있기 때문에 이에 대한 정량적인 분석방법의 개발과 자료의 구축이 필요하다. 본 연구에서는 식물계절현상에 대한 현장조사의 한계를 극복하기 위해 위성영상을 이용한 분석기법을 적용하였으며, 이를 통해 국내 산림의 식물계절적 특성을 분석하고 미래 기후변화에 의한 영향을 파악하기 위한 기초단계로 기온요인과의 상관관계를 분석하여 가장 높은 상관관계를 갖는 기온변수를 도출해보고자 하였다.

연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

먼저 HANTS 알고리즘과 SMN 기법을 적용한 생육개시일 분석을 통해 국내 산림의 식물계절 변화를 살펴보았다. 뚜렷한 생육개시일의 추세는 나타나지 않았으며, 이는 15년 동안의 MODIS EVI 자료만을 사용하여 기간이 비교적 짧기 때문에 추세의 변화 경향을 확인할 수 없는 것으로 판단된다. 그러나 연간 생육개시일의 변동을 파악하는 것은 용이하였으며, 분석결과, 적게는 1일에서 크게는 13일 정도의 차이를 나타내는 것으로 분석되었다. 생육개시일 변화가 큰 시기 또는 지역에 대해서는 생물계절의 불일치 현상 등이 발생할 수 있기 때문에 추가적인 생태계 모니터링을 실시하여 멸종위기종 또는 희귀종에 대한 영향을 파악하고 심각한 영향을 초래할 경우 보호대책을 마련해야 할 것으로 판단된다.

다음으로 생육개시일과 기온변수와의 상관성을 분석해본 결과, 월평균 기온변수를 적용했을 때는 4월 평균기온, TSOG 변수를 사용했을 때는 최저기온, 임계온도 3℃, 지속기간은 12일을 적용했을 때, 생육개시일과의 상관계수가 가장 높은 것으로 분석되었다. 도출된 결과를 바탕으로 RCP 시나리오 자료와 같은 미래 기후 시나리오 자료를 이용하여 앞으로의 생육개시일 예측이 가능할 것으로 보이며, 추후 이러한 분석을 통해 기후변화에 취약한 지역을 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 광역적인 범위의 산림지역을 대상으로 식물계절에 대한 현장조사의 한계를 극복하기 위해 위성영상 기반의 효율적인 분석방법을 제시하고 기온요인과의 상관성을 도출하였다는 데 의의가 있다. 그러나 현재까지 국내에 신뢰도가 높은 지역별, 수종별 식물계절 조사자료의 부족으로 인해 세부적인 검증이 어렵다는 한계가 있다. 추후에는 이러한 조사자료를 적극적으로 구축하여 상호 연계를 통해 분석방법에 대한 보완과 정확도를 더 높일 수 있는 연구가 추가적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다. KAGIS

REFERENCES

Badeck, F.W, A. Bondeau, K. Böttcher, D. Doktor, W. Lucht, J. Schaber and S. Sitch. 2004. Responses of spring phenology to climate change. New Phytologist 162(2):295-309.

Both, C., S. Bouwhuis, C.M. Lessells and M.E. Visser. 2006. Climate change and population declines in a long-distance

migratory bird. Nature 441(7089):81-83.

Cannell, M.G.R. and R.I. Smith. 1983. Thermal time, chill days and prediction of budburst in picea sitchensis. Journal of Applied Ecology:951-963.

Chmielewski, F-M. and T. Rötzer. 2001. Response of tree phenology to climate change across Europe. Agricultural and Forest Meteorology 108(2):101-112.

Chmielewski, F-M., A. Müller and E. Bruns. 2004. Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in germany, 1961-2000. Agricultural and Forest Meteorology 121(1):69-78.

Choi, C.H. 2015. Climate change impact assessment and predictive model on forest ecology using MODIS. Ph.D, Kyungpook National Univ., Daegu, Korea (최철현. 2015. MODIS를 활용한 산림생태의 기후변화 영향평가 및 예측모형. 경북대학교 대학원 박사학위논문).

Choi, C.H. and S.G. Jung. 2014. Analysis of the MODIS-based vegetation phenology using the HANTS algorithm. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 17(3):20-38 (최철현, 정성관. 2014. HANTS 알고리즘을 이용한 MODIS 영상기반의 식물계절 분석. 한국지리정보학회지 17(3):20-38).

Daly, C., J.W. Smith, J.I. Smith and R.B. McKane. 2007. High-resolution spatial modeling of daily weather elements for a catchment in the Oregon cascade mountains, United States. Journal of Applied Meteorology and Climatology 46(10):1565-1586.

Frich, P., L.V. Alexander, P. Della-Marta, B. Gleason, M. Haylock, A.M.G. Klein Tank and T. Peterson. 2002. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. Climate Research 19(3):193-212.

Ho, C.H., E.J. Lee, I. Lee and S.J. Jeong. 2006. Earlier spring in Seoul, Korea. International Journal of Climatology 26(14):2117-2127.

Huete, A.R. and H.Q. Liu. 1994. An error and sensitivity analysis of the atmospheric-and soil-correcting variants of the NDVI for the MODIS-EOS. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on 32(4):897-905.

Huete, A., C. Justice and H. Liu. 1994. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. Remote Sensing of Environment 49(3):224-234.

Jeong, S.J., C.H. Ho and J.H. Jeong. 2009. Increase in vegetation greenness and decrease in springtime warming over East Asia. Geophysical Research Letters 36(2):L02710.

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 Journal of Environment and Ecology 22(3):221-229 (조현길, 안태원. 2008. 미기후 변화에 따른 식물계절 차이. 한국환경생태학회지 22(3):221-229).

Jones, T. and W. Cresswell. 2010. The phenology mismatch hypothesis: Are declines of migrant birds linked to uneven global climate change? Journal of Animal Ecology 79(1):98-108.

Julien, Y. and J.A. Sobrino. 2009. Global land surface phenology trends from GIMMS database. International Journal of Remote Sensing 30(13):3495-3513.

Jung, J.E., E.Y. Kwon, U. Chung and J.I. Yun. 2005. Predicting cherry flowering date using a plant phenology model. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology 7(2):148-155 (정재은, 권은영, 정유란, 윤진일. 2005. 생물계절 모형을 이용한 벚꽃 개화일 예측. 2005. 한국농림기상학회지 7(2):148-155).

Kang, H.S. 2013. Review: Ecological responses of plants to climate change: Research trends and its applicability in Korea. Korean Journal of Ecology and Environment 46(3):319-331 (강혜순. 2013. 기후변화에 대한 식물의 생태적 반응: 연구동향과 한국에서의 적용가능성. 생태와 환경. 46(3):319-331).

Kim, M.K., M.S. Han, D.H. Jang, S.G. Baek, W.S. Lee, Y.H. Kim and S. Kim. 2012. Production technique of observation grid data of 1km resolution. Journal of Climate Research 7(1):55-68 (김맹기, 한명수, 장동호, 백승균, 이우섭, 김연희. 2012. 1km 해상도의 관측 격자자료 생산 기술. 기후연구 7(1):55-68).

Kim, N.S., Y.C. Cho, S.H. Oh, H.J. Kwon and G.S. Kim. 2014. A phenology modelling using MODIS time series data in South Korea. Korean Journal of Ecology and Environment 47(3):186-193 (김남신, 조용찬, 오승환, 권혜진, 김경순. 2014. MODIS 시계열 자료 및 Timesat 알고리즘에 기초한 남한 지역 식물계절 분석. 생태와 환경 47(3):186-193).

Kim, G.S. and H.G. Park. 2010. Estimation of drought index using CART algorithm and satellite data. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 13(1):128-141 (김광섭, 박한균. 2010. CART기법과 위성자료를 이용한 향상된 공간가뭄지수 산정. 한국지리정보학회지 13(1):128-141).

Linderholm, H.W. 2006. Growing season changes in the last century. Agricultural and Forest Meteorology 137(1):1-14.

Méndez-Alonzo, R., F. Pineda-García, H. Paz, J.A. Rosell, and M.E. Olson. 2013. Leaf phenology is associated with soil water availability and xylem traits in a tropical dry forest. Trees 27(3):745-754.

Menzel, A., T.H. Sparks, N. Estrella, E. Koch, A. Aasa, R. Ahas, K. ALM-KÜBLER, P. Bissolli, O. Braslavská and A. Briede. 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern. Global Change Biology 12(10):1969-1976.

Myneni, R.B., C.D. Keeling, C.J. Tucker, G. Asrar and R.R. Nemani. 1997. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. Nature 386(6626):698-702.

Nuttonson, M.Y., A.E. Murneek and R.O. Whyte. 1948. Some preliminary observations of phenological data as a tool in the study of photoperiodic and thermal requirements of various plant

material. Vernalization and Photoperiodism: 129-143.

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.

Schwartz, M.D., R. Ahas and A. Aasa. 2006. Onset of spring starting earlier across the Northern hemisphere. Global Change Biology 12(2):343-351.

Shin, H.J., M.J. Park, E.H. Hwang, H.S. Chae and S.J. Kim. 2015. A study of spring drought using Terra MODIS satellite image -for the Soyanggang dam watershed-. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 18(4):145-157 (신형진, 박민지, 황의호, 채효석, 김성준. 2015. Terra MODIS 위성영상을 이용한 봄 가뭄 연구 - 소양강댐유역을 대상으로-. 한국지리정보학회지 18(4):145-157).

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.

Tucker, C.J., D.A. Slayback, J.E. Pinzon, S.O. Los, R.B. Myneni and M.G. Taylor. 2001. Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999. International Journal of Biometeorology 45(4):184-190.

White, M.A., De Beurs, M. Kirsten, K. Didan, D.W. Inouye, A.D. Richardson, O.P. Jensen, J. O'keefe, G. Zhang and R.R. Nemani. 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. KAGIS