

## 기후 요소를 사용한 한반도 식생 생장일의 통계적 예측

이찬기<sup>1)</sup> · 박태원<sup>2)\*</sup> · 박두선<sup>3),4),5)</sup> · 고혜영<sup>5)</sup> · 손은하<sup>6)</sup> · 김미자<sup>6)</sup>

<sup>1)</sup>전남대학교 해양학과, <sup>2)</sup>전남대학교 지구과학교육과, <sup>3)</sup>경북대학교 지구과학교육과,  
<sup>4)</sup>경북대학교 대기과학과 위험기상 교육연구팀, <sup>5)</sup>경북대학교 대기원격탐사연구소,  
<sup>6)</sup>국가기상위성센터 위성분석과

(접수일: 2024년 9월 10일, 수정일: 2024년 10월 15일, 게재확정일: 2024년 11월 7일)

## Statistical Prediction of Growing Season in Vegetation over South Korea Using Climate Factors

Chan-Gi Lee<sup>1)</sup>, Tae-Won Park<sup>2)\*</sup>, Doo-Sun R. Park<sup>3),4),5)</sup>, Hye-Young Ko<sup>5)</sup>,  
Eun-Ha Son<sup>6)</sup>, and Meeja Kim<sup>6)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Oceanography, Chonnam National University, Gwangju, Korea

<sup>2)</sup>Department of Earth Science Education, Chonnam National University, Gwangju, Korea

<sup>3)</sup>Department of Earth Science Education, Kyungpook National University, Daegu, Korea

<sup>4)</sup>Weather Extremes Education and Research Team, Department of Atmospheric Science,  
Kyungpook National University, Daegu, Korea

<sup>5)</sup>Center for Atmospheric Remote Sensing, Kyungpook National University, Daegu, Korea

<sup>6)</sup>National Meteorological Satellite Center, Chungbuk, Korea

(Manuscript received 10 September 2024; revised 15 October 2024; accepted 7 November 2024)

**Abstract** This study defines growing season in vegetation over South Korea and examines the impact of climatic factors on the growing season. Also, a statistical model for predicting growing season was developed using stepwise regression based on climate factors. Using satellite-observed data, start of the growing season (SOS), end of the growing season (EOS), and length of the growing season (LOS) dates were estimated and compared with observed leaf-out and flowering dates from arboretums. Results indicated that between 2001 and 2020, SOS is advancing at a rate of  $-0.490$  days year<sup>-1</sup>, EOS is delaying at  $0.229$  days year<sup>-1</sup> and LOS is extending at  $0.771$  days year<sup>-1</sup>. Climatic factors affecting the growing season, such as temperature and precipitation from 1, 2, 3, and 4 months before SOS and EOS dates, winter duration, pre-season temperature, growing season temperature, and pre-season rainfall were analyzed and some of these factors were used for the statistical prediction model. Results using leave-one-out cross validation showed that the prediction model for SOS, EOS, and LOS demonstrated good predictive performance. Our study provides information for understanding the growing season in vegetation in response to climate change over South Korea. This suggests the potential applicability of statistical models for forecasting vegetative growing season under the future climate change.

**Key words:** NDVI, Vegetation, Growing season, Climate change, Climate factors, Statistical model

\*Corresponding Author: Tae-Won Park, Department of Earth Science Education, Chonnam National University, 77 Yongbong-ro, Buk-gu, Gwangju 61186, Korea.  
Phone: +82-62-530-2511, Fax: +82-62-530-2510  
E-mail: park2760@jnu.ac.kr

## 1. 서 론

지표에 존재하는 동식물은 주변 환경의 영향을 민감하게 받아 변화하고 있으며, 이러한 변화는 인간 생활에 큰 영향을 미친다. 최근 기후변화로 인해 기후의 변동성이 급격히 커지고 있으며, 이로 인해 식생의 계절적 변화 또한 더욱 두드러지고 있다(IPCC, 2023). 기후는 생태계의 변화에 영향을 주는 형태가 지연 상관성을 보이는 경우가 많아 복잡성이 크므로, 많은 관심과 연구가 필요하며 식생의 계절적 변화는 농업 생산성, 생태계 기능, 생물 다양성에 중요한 영향을 미치기 때문에 이에 대한 지속적인 모니터링이 필수적이다. 또한 기후변화와 관련하여 기후 요소가 식생의 성장 주기와 패턴에 미치는 영향을 분석하여 이해하고 이를 기반으로 정확한 예측을 수행하는 것은 향후 기후변화 적응의 관점에서 매우 중요하다.

기존 연구들에 의하면 북반구 주요 지역에서 낙엽수림의 봄 식생 시작일이 빨라지고 있지만, 2000년대에 들어서 해당 현상이 둔해지는 모습을 나타나고 있다(Park et al., 2018). 또한 도시화는 봄과 가을의 식생을 변화시키며, 서울 수도권에서는 인구 밀도와 관련된 온도 차이가 봄의 발아 시기를 13일가량 앞당기고, 가을의 단풍 시기를 최대 15일 지연시키는 영향을 미친다는 연구 결과가 보고된 바 있다(Jeong et al., 2019). 최근 수십 년 동안 북반구의 식물과 동물의 계절적 패턴에서 변화가 나타났으며, 특히 중위도 이상의 지역에서는 생물의 봄철 생리 활동이 10년당  $2.8 \pm 0.35$  일 만큼 빨라지는 현상을 보였다(Parmesan, 2007). 이러한 변화는 북극 지역에서의 온난화가 주요한 영향을 미쳤을 것으로 보인다(Oberbauer et al., 2013). 이러한 봄의 시작 시기의 변화는 꽃의 개화 시기가 빨라지고(Parmesan and Hanley, 2015), 조류가 알을 낳거나 이동하는 시기가 변화하며(Wu and Shi, 2016), 나비의 출현 시기가 빨라졌고(Roy et al., 2015), 위성에서 관측을 바탕으로 봄철 식생의 녹색화 시기가 빨라지는 현상을(Piao et al., 2015) 확인하였다. 또한 최근에는 기계학습을 활용한 모델을 통해 봄철 발아 시기의 관측 데이터로 가을 단풍 시기를 예측하는 간단한 방법이 개발되었으며, 이는 주요 환경 변수를 기반으로 한 기상 모델의 발전에 기여할 수 있는 방법론으로 평가되고 있다(Lee et al., 2022). 이러한 식생 환경 변화에 대한 선행 연구는 주로 북반구 주요 지역인 중국, 시베리아, 북미 등 특정 지역을 타겟으로 분석이 수행되었다(Park et al., 2018). 한반도를 중심으로 식생의 변화를 분석한 연구는 대표적으로 관측소 지점 자료를 활용한 꽃의 개화일에 대한 연구(Ho et al., 2006)와, 한국에서 관찰된 25종의 온대성 식물에 대한 연구(Kim et al., 2022)가 있다. 후자는 지역

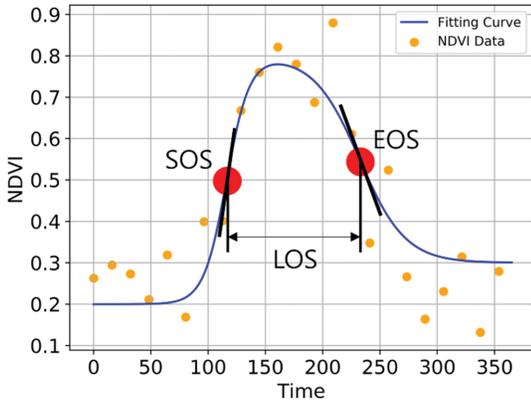
과 종에 따른 식생 변화가 기후 변화에 민감하게 반응하며, 특히 상록수는 온난화에 더 높은 민감도를 보인다는 점을 확인했다. 이러한 선행연구를 바탕으로, 본 연구에서는 한반도를 중심으로 식생의 변화를 분석하고, 식생 변화에 영향을 미치는 중점 기후 요소를 선정하여 식생생장을 예측하는 모델을 개발하고자 한다.

한반도에서 일년 중 식생이 증가, 감소하는 계절적 변화와 분석기간 내의 추이를 관찰하기 위해 위성 관측자료를 사용한 연구가 있었다(Jeong et al., 2011; Park et al., 2018). 고해상도 위성 자료를 활용해 식생의 녹색화가 가속화되는 시기와 감소하는 시기를 추산하였는데, 이렇게 추산된 식생의 증가 및 감소하는 시기를 수목원에서 관측한 개엽일, 개화일 자료와 비교 분석하여, 실제 식물의 성장을 대변할 수 있는 변수인지 확인하였다. 지연 상관성을 나타내는 식물의 특성을 반영하여 기온과 강수량의 시차(lead-lag) 상관 분석을 통해 식생에 영향을 미치는 주요 기후 요소를 분석했으며(Jeong et al., 2011), 봄철 식생 녹색화의 추세 변화를 설명하기 위해 겨울부터 봄까지 누적된 온도와 강수량을 이용해 다중 회귀 모델을 구성하고 개별 변수의 상대적 중요성을 분석한 선행연구가 있다(Park et al., 2018). 본 연구에서는 이러한 두 선행연구의 방법을 적용하여 한반도 식생 성장 계절변화에 영향을 미치는 기후 요소를 분석하고자 한다. 기후 요소의 계산은 한국기상청에서 제공하는 60개 종관기상 관측소의 기상관측 자료를 사용했으며, 관측소 위치와 고해상도 위성 관측자료의 격자를 대치시켜 분석하였다. 이후, 기후 요소를 바탕으로 단계적 회귀(stepwise regression) 기반 통계 예측 모델을 구성하였고, 예측된 식생 성장 변수를 관측된 변수와 비교하여 통계 예측 모델의 예측성을 검증하였다.

## 2. 자료 및 방법

### 2.1 위성 자료 기반 식생성장 변수 추정

NDVI는 근적외선과 가시광선을 이용하여 계산되며, 식생의 건강한 상태와 식물의 성장을 평가하는 지수이다. 위성을 통해 관측되므로 광범위한 지역의 계절적 변화를 이해하는 데 유리하다. 분석에 사용된 normalized difference vegetation index (NDVI) 자료는 National Aeronautics and Space Administration (NASA)에서 운영하는 극 궤도 위성 Terra에 탑재된 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) 센서로 관측된 자료를 사용하였으며, 전지구를 36개 스펙트럼 밴드를 통해 다양한 데이터를 수집한다. 2001년 1월 1일부터 2020년 12월 31일까지의 데이터를 사용하였고, 공간 해상도는 250 m, 시간 해상도는 16일



**Fig. 1.** Schematics for NDVI data with a double logistic curve and definition of SOS, EOS and LOS. The data in the graph were generated as random values within  $\pm 0.2$  of the logistic curve.

간격이다(Didan, 2021). 해당 자료를 사용해 식생생장의 계절 변화 시기를 추정하였으며, NDVI로부터 식생 성장계절 시작일(start of the growing season, SOS), 식생 성장계절 종료일(end of the growing season, EOS), 식생 성장계절 길이(length of the growing season, LOS)을 계산하였다. 이러한 추정 식생생장 변수는 수목원에서 관측된 개엽일 및 개화일 자료를 통해 검증하였다.

Figure 1에 16일 간격의 불연속적인 NDVI 자료로부터 일 자료를 보간하고 식생생장 변수를 추정하기 위한 방법의 모식도를 나타내었다. NDVI 자료는 관측 기간 간격이 16일로 정확한 식생 성장 변수를 추정하기에 어려움이 있어 로지스틱 함수(logistic function)에 피팅하여 1일부터 NDVI가 최대값까지, 최대값부터 마지막날 까지는 부호를 바꿔서 감소하는 곡선인 이중 로지스틱 함수(double logistic function)를 통해 선형 보간을 적용했다[식(1)].

$$NDVI(t) = \frac{-\gamma}{1 + \exp(\pm \alpha(1 - \beta t))} + \delta \quad (1)$$

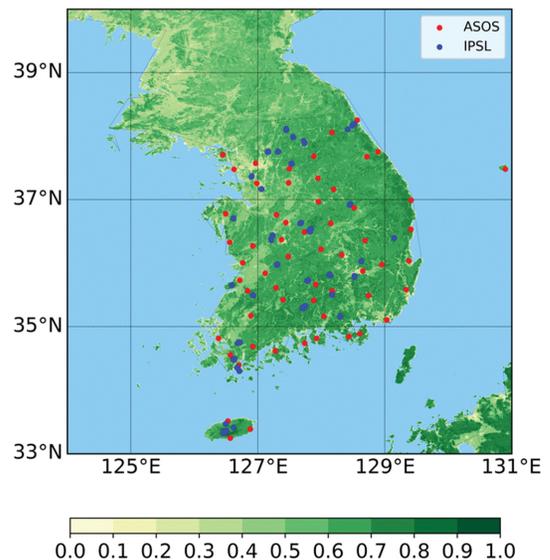
식(1)에서 NDVI(t)는 매년 1월 1일부터 시작하는 연중 날짜를 사용한 시간(t)의 함수이다.  $\alpha$ 는 NDVI 증가 기간의 길이,  $\beta$ 는 변곡점의 날짜,  $\gamma$ 는 연간 NDVI 진폭,  $\delta$ 는 연간 주기의 NDVI 최대값을 나타낸다. 1월 1일부터 NDVI가 최대인 지점까지  $\alpha$  앞의 부호가 +인 식을 사용하고, 최대인 지점부터 12월 31일까지  $\alpha$  앞의 부호가 -인 식을 사용한다. 보간 된 데이터를 통해 세 가지 식생생장 변수 SOS, EOS, LOS를 계산하였다. SOS는 식생이 가파르게 성장하다가 둔화하는 변곡점과 가장 가까운 일자로 정의하였고, 반대로

EOS는 식생이 가파르게 감소하다가 둔화하는 변곡점과 가장 가까운 일자로 정의하였다. LOS는 SOS에서 EOS까지의 기간으로 정의했다. 이러한 방법은 겨울 휴면기에서 여름 성숙기까지, 또는 여름 성숙기에서 겨울 휴면기까지의 변화를 설명하는데 적합한 방법이다(Zhang et al., 2003; Elmore et al., 2012). 또한 평균적인 식생 시작일, 식생 종료일에 대한 통계적인 임계 값이 필요하지 않기 때문에 기간이 짧은 데이터에도 적용이 가능하다.

## 2.2 관측 자료 기반 개엽일과 개화일 및 기후 요소

위성자료를 기반으로 추정된 식생생장 변수를 검증하기 위해서 한반도 수목원 자료 108개 관측 지점의 개엽일, 개화일 자료를 이용하여 NDVI 자료로부터 계산된 식생생장 시작일과의 대조 검증을 수행하였다. 수목원 관측 자료는 2010년부터 2020년까지 11년간의 데이터를 수집하였다. Figure 2에 한반도에서 NDVI의 평년 값과 수목원의 위치를 나타내었다. 교차 검증에 사용된 식물은 진달래, 산철쭉, 개나리의 개화일 자료와 단풍나무, 신갈나무, 졸참나무의 개엽일로 총 6종이며, 수목원의 위경도 지점과 가장 가까운 위성 관측 추정 식생생장 변수와의 관련성을 Pearson 상관 계수를 이용하여 분석하였다.

기상청에서 제공하는 중관기상관측소(automated synoptic observing system, ASOS)의 관측자료로부터 기후 요소를 계산하였다 60개 관측소의 위치는 Fig. 2에 나타내었다. 식생생장 변수에 영향을 미치는 기후



**Fig. 2.** NDVI Climatology and location of ASOS stations (red dots) and arboretum stations (blue dots).

요소로 겨울기간(winter duration, WD), 개엽 전 온도(preseason temperature, PT), 개엽 시기 온도(growing season temperature, GT), 개엽 전 강수량(preseason rainfall, PR)를 선정했다. 식물의 성장과 기온, 강수량은 지연된 상관관계를 가진다(Jeong et al., 2011). 따라서 평균 식생성장 시작일과 종료일 1, 2, 3, 4개월 전 온도와 강수량을 포함해 총 20개의 기후 요소를 사용하였다.

$$WD = \sum_{t=t_0}^{SOS_{clim}} \begin{cases} 0 & \text{for } T(t) \geq T_0 \\ 1 & \text{for } T(t) < T_0 \end{cases} \quad (2)$$

$$PT = \sum_{t=SOS_{clim}-75}^{SOS_{clim}-16} T(t) \quad (3)$$

$$GT = \sum_{t=SOS_{clim}-15}^{SOS_{clim}+15} T(t) \quad (4)$$

$$PR = \sum_{t=t_{clim}-59}^{SOS_{clim}} P(t) \quad (5)$$

식(2)~(5)의 변수인  $t$ 는 분석 기간 중 각 일을 의미하며  $t_0$ 는 분석기간 시작일인 1월1일을,  $SOS_{clim}$ 는 평균 SOS를 의미한다.  $T(t)$ 는 분석 기간 동안의 기온을 의미하며,  $P(t)$ 는 동일 기간의 강수량을 의미한다.  $T_0$ 는 임계온도 값으로 0도를 의미하며, WD는 1월 1일부터 평균기온이 첫 0도를 넘는 날까지의 일수로 즉, 겨울이 오래 지속되는 것을 의미한다. 이는 초봄의 기온이 낮음을 의미하며 식생현상을 지연시킬 수 있다. PT는 평균 SOS의 15일 이전 2개월 동안의 누적 기온으로 지연반응을 통해 시베리아 등 고위도 지역에서 식생현상을 앞당길 수 있다. GT는 SOS 전후 31일간의 누적 기온으로 봄철 식생이 성장하는 시기에 직접적으로 영향을 미친다. PR은 SOS 전 2개월간의 누적 강수량으로, 연중 강수량이 부족한 지역일 수록 식생 성장에 중요한 역할을 한다(Cong et al., 2013). 식생 성장계절 변수의 1, 2, 3, 4개월 전 기온과 강수량은 지연된 영향을 통해 SOS, EOS에 변화를 줄 수 있으며 겨울철 지면온도와 습도의 지연된 효과를 통해 봄철 식생 활동을 앞당기거나 지연시킬 수 있다고 알려져 있다(Yun et al., 2018; Park and Jeong, 2023).

### 2.3 통계 예측 모형

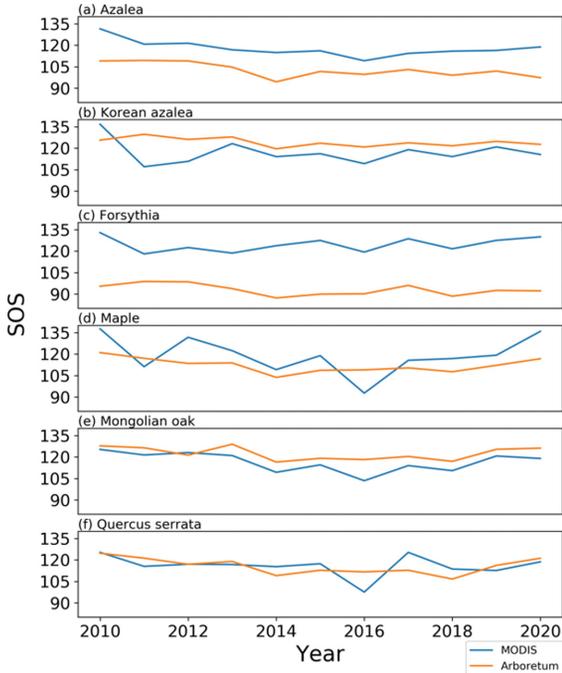
한반도에서 식생성장 변수를 예측하기 위해 SOS, EOS, LOS의 식생성장 변수를 종속변수로 하고, 이 종속변수와 관련된 다수의 기후 요소를 독립변수로 하여 단계적 회귀모형을 개발하였다. 단계적 회귀분

석은 최적의 인자를 산출하기 위한 방법으로, 종속변수에 영향을 미치는 독립변수를 선정할 수 있는 방법이다. 독립변수로 사용되는 기후 요소는 WD, PT, GT, PR, SOS 1, 2, 3, 4개월 전 기온과 강수량, EOS 1, 2, 3, 4개월 전 기온과 강수량으로 총 20개이다. 다중회귀분석을 할 경우 독립변수간 관련성이 높은 변수이기 때문에 다중공산성 문제가 발생할 수 있다. 때문에 본 연구에서 단계적 회귀분석 방법 중 하나인 단계적 회귀분석을 통해 예측인자로 활용되는 기후 요소를 선정했다. 단계적 회귀분석에는 독립변수를 추가하면서 모형을 구성하는 전진(forward) 방식, 반대로 독립변수를 제거하면서 모형을 구성하는 후진(backward) 방식이 있고, 이 두 방식을 동시에 사용하는 양방향(bidirectional) 제거 방식이 있다. 전진 방식에 의한 변수의 추가나 후진 방식에 의한 변수의 제거가 끝난 후에 남겨진 독립변수들로 다중회귀모형을 만들고, 이를 이용하여 종속변수를 예측할 수 있으며, 이 다중회귀모형의 독립변수들의  $\beta$  값으로 기후 요소의 민감도를 예측할 수 있다. 본 연구에서는 전진 방식과 후진 방식이 혼합된 양방향 제거 방식을 적용하였다. 단계적 회귀분석의 양방향 제거 방식을 통해 식생성장 변수를 예측하는 다양한 기후 요소를 선정하는 과정에서 발생하는 다중공산성 및 과적합 문제를 일으키는 변수를 분산 팽창 요인 분석을 통해 제거하였다. 분산 팽창 요인은 다중회귀분석에서 독립변수간 상관성으로 인해 발생하는 다중공산성을 판단하는 값으로 여러 개의 독립변수가 있을 때, 특정 독립변수를 종속변수로 하고 나머지 독립변수를 독립변수로 회귀분석을 수행하여 변수 간 관계성을 측정하는 방법으로 안정적인 식생성장 변수 예측 모형 개발에 효과적이다. 이러한 과정을 반복하여 새로운 독립변수의 추가가 통계적으로 유의한 결과를 만들지 못할 때 모형이 완성되며 종속변수에 관련성 있는 독립변수를 선정하는 방법이다. 이렇게 개발된 모형에서 관련성이 높은 변수로 많이 선정될수록 중요한 변수라고 볼 수 있다.

모형의 예측성을 평가하기 위해 leave-one-out cross validation (LOOCV) 방법을 사용하였다. LOOCV는 20년의 관측값 중 1년의 관측값만을 테스트 데이터로 사용하고, 나머지 19년의 관측값은 학습 데이터로 하는 과정을 20번 반복하여 예측성을 평가한다.

## 3. 결 과

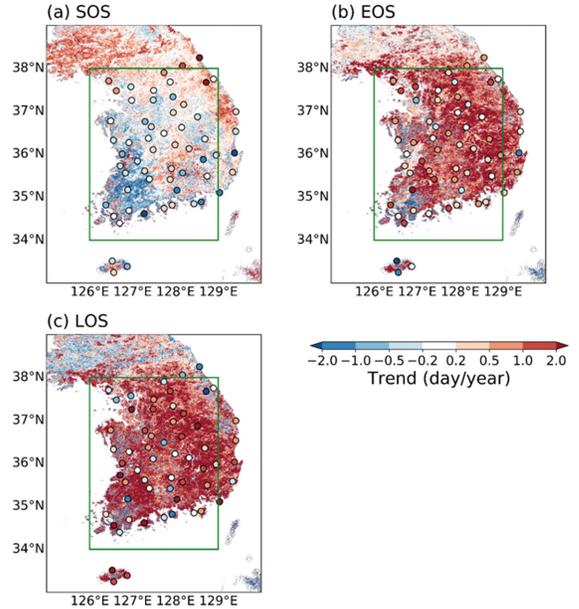
수목원에서 관측된 개화일, 개엽일 자료와 수목원에서 가장 가까운 격자의 위성관측 자료로 추정된 식생성장 변수 중 SOS를 시계열로 Fig. 3에 나타내었다. 수목원 관측 자료가 있는 2010년부터 2020년에 해당



**Fig. 3.** The time series of observed (a-c) flowering and (d-f) leaf-unfolding dates from the arboretum (orange line), and the estimated SOS time series based on satellite observation data are shown.

하는 자료를 비교하였다. Figures 3a-c는 각각 진달래, 산철쭉, 개나리의 개화일에, Figs. 3d-f는 단풍나무, 신갈나무, 졸참나무의 개엽일에 해당한다. Figure 3의 a, b, c를 살펴보면 개화일의 시계열에 비해 전체적인 평균 SOS가 낮게 나타난다. 진달래는 0.646의 상관계수를 보이며 통계적으로 유의하나 산철쭉과 개나리는 각각 0.141, -0.012로 관련성이 떨어진다. NDVI는 잎의 녹색화를 고려하여 산출된 값이기 때문에 꽃이 피는 개화일과는 관련성이 낮은 것으로 생각된다. Figure 3의 d, e, f를 확인하면 개엽일의 시계열과 SOS의 시기가 비슷하며, 단풍나무, 신갈나무, 졸참나무의 개엽일과의 상관계수는 각각 0.642, 0.818, 0.407으로 단풍나무와 신갈나무는 95%, 99% 수준에서 유의한 상관성을 보였다. 전체적으로 SOS가 개엽일의 격년 변동을 잘 나타내고 있다. 따라서 본 연구에서 산출한 식생생장 시작일은 한반도 나뭇잎의 연중 활동을 잘 모의했다고 생각된다.

2001~2020년 동안 종관기상관측소 지점과 한반도에서 SOS와 EOS, LOS의 변화 추세를 Fig. 4에 나타내었다. 한반도 남서지역에서 SOS의 감소가 두드러지게 나타나며 중부지방과 동해안 지역은 SOS가 약간 증가하는 것으로 나타났다. 내륙지역은 식생 생장



**Fig. 4.** The annual trend (unit:  $\text{day year}^{-1}$ ) in (a) SOS, (b) EOS and (c) LOS of growing season over South Korea. Dots represent annual trend of SOS, EOS, LOS at ASOS station's locations, and the green square outlines is an area used to calculate the average annual trend over South Korea.

시작일이 빨라지고 있는데, 그 강도가 남서지역 보다는 약하게 나타나고 있다. 반면에 EOS는 전체적으로 증가하는 경향이 나타나며, 호남지역과 충남지역 일부에서 감소하는 모습이 나타난다. 두 식생 생장계절 변수의 차이에 의해서 전반적으로 식생기간이 길어지는 모습을 Fig. 4c에서 확인할 수 있다. ASOS 60개 관측소에서 평균된 식생변수의 연변화는 SOS는  $-0.490 \text{ day year}^{-1}$ 로 90% 수준에서 유의하게 빨라지며, EOS는  $0.229 \text{ day year}^{-1}$ 로 식생 종료일이 늦어지는 정도가 약하며 이는 통계적으로 유의하지 않는 수준이다. 이에 따라 LOS는  $0.771 \text{ day year}^{-1}$ 로 95% 수준에서 유의하게 길어진다. LOS의 증가는 EOS의 증가보다 SOS의 감소가 주요인이라고 볼 수 있으며 LOS가 EOS와 SOS의 차이 값과 일치하지 않는 이유는 일부 지점에서 결측값이 존재하기 때문이다. 이러한 결과는 지역적으로 조금씩 다르지만 대체로 SOS가 더 중요한 역할을 하는 것과 유사한 결과이다(Piao et al., 2019). 그리고 각 관측소 지점에서 SOS, EOS, LOS의 연변화 추세의 분산은 각각 0.537, 1.365, 3.635로 SOS가 비교적 작고, LOS가 가장 크게 나타난다. 관측소 지점마다의 기후적 특성이 다르기 때문에 나타나는 것으로 해석된다. Figure 4에서 박스로 나타낸 구역에 해당하는 한반도 전역에서의 식생변수 연변화 평균을

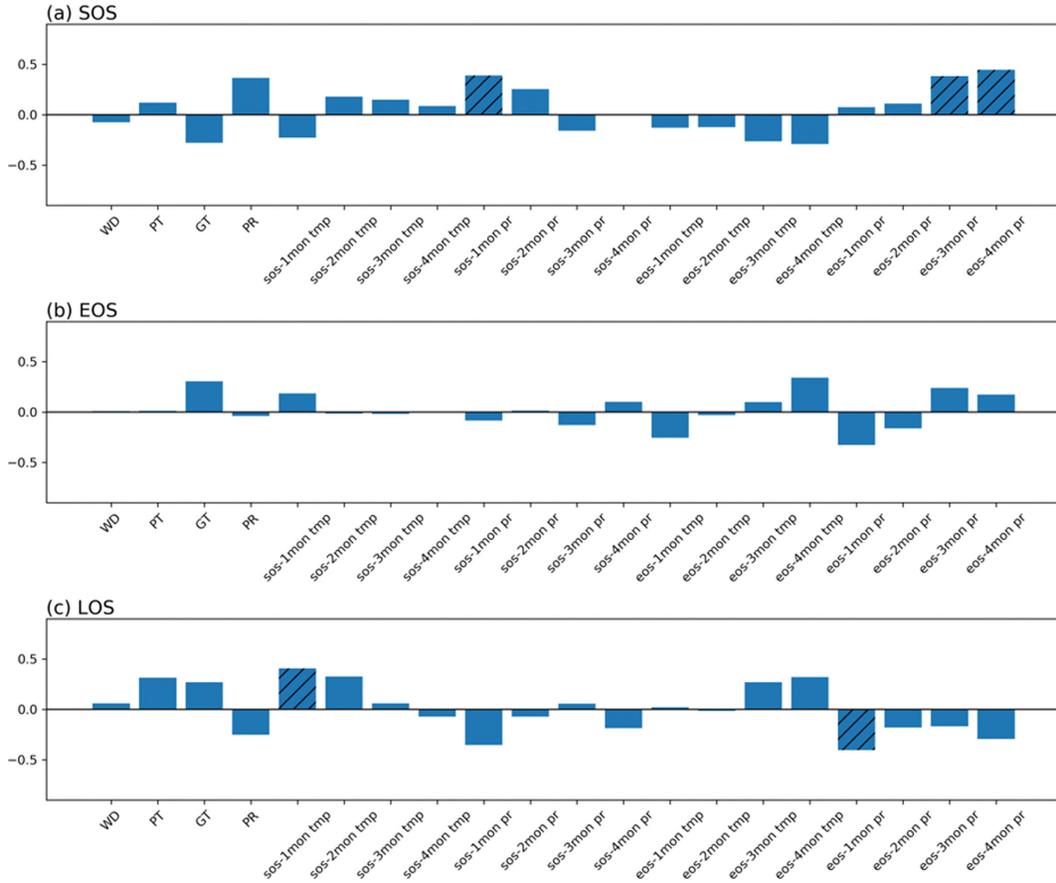


Fig. 5. Correlation between (a) SOS, (b) EOS and (c) LOS of growing season and climate factors.

살펴보면, SOS는  $-0.320 \text{ day year}^{-1}$ 로 빨라지고, EOS는  $0.288 \text{ day year}^{-1}$ 로 늦어진다. 이에 따라 식생 기간은  $0.608 \text{ day year}^{-1}$ 만큼 길어지며 식생 시작과 종료의 차이가 비슷한 수치로 서로 반대 방향으로 유사한 변화를 보인다. 기후 변화로 인해 지구 전반적으로 식물의 성장 주기가 빨라지고 성장 종료는 늦어지는 현상은 한반도에서도 유사하게 나타난다. 전 세계적인 녹화 현상이 1980년대 이후 전 지구적으로 나타나고 있으며(Piao et al., 2020), 이는 기후변화와 연관된 생태계 피드백 효과를 주고 있다. 본 연구에서 나타난 한반도의 식생 기간 증가는 이러한 지구적 녹화 현상의 일환으로 해석될 수 있다.

Figure 5는 ASOS 60개 관측소 지점 위치에서 평균된 위성 추정 식생변수와 관측된 기후 요소 사이의 상관관계를 나타낸 그림이다. SOS는 식생 시작 1개월 전부터의 강수량과 EOS 3, 4개월 전의 강수량과 관련성이 큰 것으로 나타났다. 이는 EOS와 SOS의 차이가 평균 100일 정도인 것으로, SOS 전 후의 강수

량이 많아질 경우 햇빛을 차단하여 SOS가 늦어지는 것에 영향을 주었을 것으로 해석할 수 있다. EOS에 대해서는 선정된 20개 변수 중 통계적으로 유의하게 영향을 미치는 변수는 나타나지 않았다. LOS 경우 SOS 전 1개월 간의 기온과 EOS 전 1개월간 강수량과 관련성이 큰 것으로 나타났다. 봄철 따뜻한 기온이 식생생장을 촉진하여 SOS가 빨라지고, 가을철 강수량으로 오래 식생이 유지되어 EOS가 느려지는 것이 식생 기간을 늘리는데 영향을 준 것으로 해석할 수 있다.

Figure 6은 기후 요소를 기반으로 한 식생성장 변수 예측을 위해 단계적 회귀 기반 통계 모델을 사용하여, 각 관측소에서 식생 성장계절 변수에 통계적으로 유의미한 영향을 미치는 주요 변수가 선정된 빈도를 나타낸다. 분석기간 중 19년의 독립변수와 종속변수로 예측모형을 만들고 남은 1개년의 식생성장 계절 변수를 예측하였다. 이러한 방식을 단계적으로 20년 반복하여 선정된 주요 기후 요소를 60개 ASOS 관측

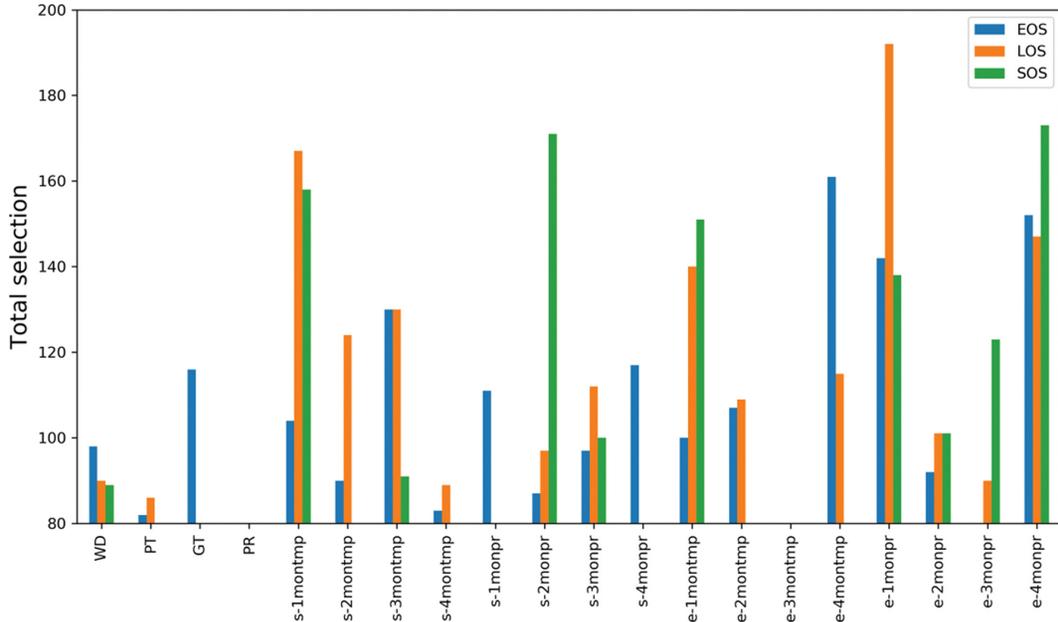


Fig. 6. The selected number of climate factors for predicting SOS, EOS, and LOS in the stepwise regression model.

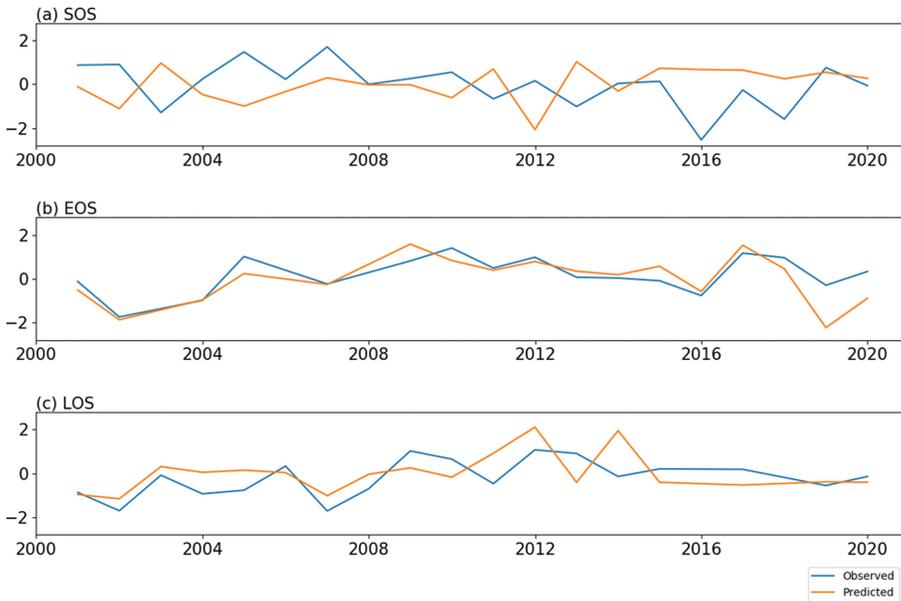


Fig. 7. The observed and predicted annual changes in growing season over South Korea. (a), (b), (c) indicates SOS, EOS, LOS.

소의 결과를 종합해 한반도에서 중요한 기후 요소를 선정하였다. 각 식생변수에서 상위 2개의 주요 기후 요소를 확인한다면 SOS에 영향을 미치는 주요 기후 요소는 개엽 2개월 전 강수량과 종엽 4개월전 강수량이 선정되었고, EOS는 종엽 4개월 전 기온과 강수량

이 선정되었으며, LOS는 개엽 1개월 전 기온과 종엽 1개월전 강수량이 가장 많이 선정되었다.

관측소에서 가장 가까운 격자점의 식생 성장변수와 모형에서 예측한 식생성장 변수의 시계열을 표준화하여 Fig. 7로 나타내었다. 관측값과 예측값의 상관관계

를 분석한 결과 SOS와 EOS의 상관계수는 각각 0.488, 0.790으로 95% 수준에서 유의하고, LOS의 상관계수는 0.438로 90% 수준에서 유의하게 나타났다. 이를 통해 본 연구에서 개발한 단계적 회귀 분석 기반 예측 모형이 SOS와 LOS의 경우 통계적으로 유의한 상관관계를 보이지만 상관계수가 0.5 미만이어서 예측성이 아주 높다고 볼 수는 없다. 하지만 EOS는 상관계수가 0.8에 가까운 정도로 높은 예측성을 보인다. 이러한 결과는 미래의 기후변화에 따른 식생 변화를 예측하는데 해당 모형이 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 4. 결론 및 토의

본 연구는 한반도를 중심으로 위성 자료와 종관 관측 자료를 활용하여 식생생장의 계절적 변화를 분석하고, 통계 예측 모델을 구성해 주요 기후 요소가 식생 변화에 미치는 영향을 파악하였다. 위성 기반 NDVI를 활용하여 SOS, EOS, LOS를 추정하였다. 또한 수목원에서 관측된 개엽일 및 개화일 자료와의 검증을 통해 분석의 신뢰성을 높였다. 분석 결과 한반도에서 식생 시작일은 빨라지고 있고 식생 종료일은 늦어지는 경향을 보이며, 결과적으로 식생 기간은 길어지고 있음을 확인하였다. 이는 전 지구적인 기후 변화로 인해 식물 성장 기간이 길어지고 있다는 선행연구와 일치하는 결과이다(Piao et al., 2019). SOS는 식생 시작 1개월 전부터 강수량과 큰 상관관계를 보였으며, 이는 강수량 증가가 햇빛을 차단하여 식생 시작을 지연시켰을 것으로 해석할 수 있다. EOS는 선정된 기후 요소 중 통계적으로 유의미한 변수와의 상관관계가 나타나지 않았다. LOS는 식생 시작 1개월 전의 기온과 EOS 1개월 전의 강수량과 높은 상관관계를 보여 봄철 따뜻한 기온이 식생을 촉진하고, 가을철 강수량이 식생 성장기간의 연장에 영향을 줄 수 있음을 보여준다. 기후 요소를 기반으로 한 식생 성장계절 변수 예측 모형은 한반도에서 식생의 계절적 변화를 효과적으로 예측할 수 있었다. 주요 기후 요소를 선정해 예측 모형의 설명력을 높였으며, 이는 향후 기후 시나리오에 따른 식생 변화 예측에 사용될 여지가 있을 것으로 생각된다.

이 연구는 한반도 평균값을 통해 전반적인 경향성을 파악한 연구이므로 식물 종 간 차이나 각 관측소의 기상 요소 변동성을 충분히 반영하지 못한 한계가 있다. 또한, 낙엽일 자료를 활용해 EOS의 추가적 검증이 이루어지지 않았으며, 이에 따라 EOS와 관련된 특정 기후 요인들의 영향을 구체적으로 분석하지 못하였다. 향후 연구에서는 식물 종의 특성을 고려하여 일사량, 강수 일수, 운량 등 다양한 변수를 포함하고,

관측소별 세부적인 기후 요소를 세밀하게 고려함으로써 연구 결과의 명확성을 높일 수 있을 것이다.

식생생장이 시작되는 시기가 빨라지고 식생활동이 일어나는 기간이 연장되는 현상은 기후 변화, 특히 기온 상승과 강수량 변화에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 이는 미래 기후 시나리오에 따라 식생의 변화패턴이 어떻게 달라질지 예측하는데 중요한 정보를 제공할 수 있으며 식생 성장계절 변수 예측 모형 활용 방법을 제시하였다. 또한 이번 연구는 북반구 다른 지역에 비해 한반도에 대한 연구가 상대적으로 부족한 상황에서 한반도 중심의 자료를 활용하여 식생 변화를 분석한 점에서 의의가 있으며, 지역 기후 변화에 대한 이해를 높이고 식생의 적응 및 대응 전략에 근거를 제공할 수 있을 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 기상청 국가기상위성센터가 지원하는 “기상위성 예보지원 및 융합서비스 기술개발” 사업의 “위성자료의 기후환경 활용기술개발(KMA2020-00123)” 사업과 “기초연구실 지원사업(RS-2023-00207866)”의 지원으로 수행되었습니다.

#### REFERENCES

- Cong, N., T. Wang, H. Nan, Y. Ma, X. Wang, R. B. Myneni, and S. Piao, 2013: Changes in satellite-derived spring vegetation green-up date and its linkage to climate in China from 1982 to 2010: A multi-method analysis. *Global Change Biology*, **19**, 881-891, doi:10.1111/gcb.12077.
- Didan, K., 2021: MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V061 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. Accessed 2024-07-17 [Available online at <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.061>].
- Elmore, A. J., S. M. Guinn, B. J. Minsley, and A. D. Richardson, 2012: Landscape controls on the timing of spring, autumn, and growing season length in mid-Atlantic forests. *Global Change Biology*, **18**, 656-674, doi:10.1111/j.1365-2486.2011.02521.x.
- Ho, C. H., E.-J. Lee, I. Lee, and S.-J. Jeong, 2006: Earlier spring in Seoul, Korea. *Int. J. Climatol.*, **26**, 2117-2127, doi:10.1002/joc.1356.
- IPCC 2023: *Climate change 2023: Synthesis Report. C Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team H. Lee and J. Romero Eds., IPCC, 184 pp.

- Jeong, S.-J., C.-H. Ho, H.-J. Gim, and M. E. Brown, 2011: Phenology shifts at start vs. end of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982~2008. *Global Change Biology*, **17**, 2385-2399, doi:10.1111/j.1365-2486.2011.02397.x.
- \_\_\_\_\_, H. Park, C.-H. Ho, and J. Kim, 2019: Impact of urbanization on spring and autumn phenology of deciduous trees in the Seoul Capital Area, South Korea. *Int. J. Biometeorol.*, **63**, 627-637, doi:10.1007/s00484-018-1610-7.
- Kim, J., S. Jeong, C.-E. Park, H. Park, S. Son, and S. Y. Kim, 2022: Regional and species variations in spring and autumn phenology of 25 temperate species in South Korea. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **58**, 181-195, doi:10.1007/s13143-021-00247-0.
- Lee, S., S. Jeong, C.-E. Park, and J. Kim, 2022: A simple method of predicting autumn leaf coloring date using machine learning with spring leaf unfolding date. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **58**, 219-226, doi:10.1007/s13143-021-00251-4.
- Oberbauer, S. F., and Coauthors, 2013: Phenological response of tundra plants to background climate variation tested using the International Tundra Experiment. *Phil. Trans. R. Soc. B*, **368**, 20120481, doi:10.1098/rstb.2012.0481.
- Park, C.-E., and S. Jeong, 2023: Land surface temperature sensitivity to changes in vegetation phenology over northern deciduous forests. *J. Geophys. Res.*, **128**, e2023JG007498, doi:10.1029/2023JG007498.
- Park, H., S.-J. Jeong, C.-H. Ho, C.-E. Park, and J. Kim, 2018: Slowdown of spring green-up advancements in boreal forests. *Remote Sens. Environ.*, **217**, 191-202, doi:10.1016/j.rse.2018.08.012.
- Parmesan, C., 2007: Influences of species, latitudes and methodologies on estimates of phenological response to global warming. *Global Change Biology*, **13**, 1860-1872, doi:10.1111/j.1365-2486.2007.01404.x.
- \_\_\_\_\_, and M. E. Hanley, 2015: Plants and climate change: Complexities and surprises. *Ann. Botany*, **116**, 849-864, doi:10.1093/aob/mcv169.
- Piao, S., and Coauthors, 2015: Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years. *Global Change Biology*, **21**, 1601-1609, doi:10.1111/gcb.12795.
- \_\_\_\_\_, and Coauthors, 2019: Plant phenology and global climate change: Current progresses and challenges. *Global Change Biology*, **25**, 1922-1940, doi:10.1111/gcb.14619.
- \_\_\_\_\_, and Coauthors, 2020: Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. *Nat. Rev. Earth Environ.*, **1**, 14-27, doi:10.1038/s43017-019-0001-x.
- Roy, D. B., and Coauthors, 2015: Similarities in butterfly emergence dates among populations suggest local adaptation to climate. *Global Change Biology*, **21**, 3313-3322, doi:10.1111/gcb.12920.
- Wu, J., and Y. Shi, 2016: Attribution index for changes in migratory bird distributions: The role of climate change over the past 50 years in China. *Ecological Informatics*, **31**, 147-155, doi:10.1016/j.ecoinf.2015.11.013.
- Yun, J., S.-J. Jeong, C.-H. Ho, C.-E. Park, H. Park, and J. Kim, 2018: Influence of winter precipitation on spring phenology in boreal forests. *Global Change Biology*, **24**, 5176-5187, doi:10.1111/gcb.14414.
- 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 Sens. Environ.*, **84**, 471-475, doi:10.1016/S0034-4257(02)00135-9.