

http://www.kseie.or.kr/ Online ISSN: 2288-8527

ORIGINAL ARTICLE

Phenocam을 활용한 국내 습지 및 산림생태계 대표 수종의 계절적 변화 분석

Analysis of Phenological Changes by Phenocams on Some Major Species Distributed in Wetland and Forest Ecosystems in Korea

홍민기¹·이효혜미²·박정수^{3*}

¹국립생태원 기후생태관측팀 연구원, ²국립생태원 기후생태관측팀 팀장, ³국립생태원 기후생태관측팀 선임연구원

Minki Hong¹, Hyohyemi Lee² and Jeong-Soo Park³*

¹Researcher, Ecological Observation Team on Climate Change, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, Korea ²Team Leader, Ecological Observation Team on Climate Change, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, Korea ³Senior Researcher, Ecological Observation Team on Climate Change, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, Korea

Received 29 November 2023, revised 18 December 2023, accepted 18 December 2023, published online 31 December 2023

ABSTRACT: As climate change intensifies, the importance of studying plant phenology has increased, leading to a surge in research employing automated video recording devices like Phenocams. In this study, using the Phenocams operated by the National Institute of Ecology, we examined the trends in plant phenological changes across diverse ecosystem types in South Korea and analyzed their correlations with climate factors. The patterns of plant phenological changes varied by region and tree species. Pinus thunbergii and Pinus densiflora typically show an overall increase in their growth period, positively correlating with temperatures and precipitation during winter. However, uniquely, for Abies koreana on Hallasan Mt., a higher amount of precipitation in August leads to an earlier end of season (eos), and the correlation analysis with the recent phenomenon of dying A. Koreana seems necessary. beyond the analysis, solutions for handling missing data issues during the data collection process were proposed. Furthermore, to expand future research scope and encompass diverse ecosystem types, a suggestion to combine Phenocam research with satellite observations was presented.

KEYWORDS: Climate change, Long-term ecological research, Phenocam, Phenology, Remote sensing

요 약: 기후변화가 심화됨에 따라 식물계절연구의 중요도가 증가하고 있으며 자동영상촬영장치 (피노캠. Phenocam)을 활용한 연구방법이 급부상하고 있다. 본 연구에서는 국립생태원에서 운영하는 피노캠을 활용하여 국내 주요 생태계 유형에 대한 식물계절 변화의 경향을 확인하고 기후요인과의 상관관계를 분석했다. 식물계절의 변화 양상은 지역 및 수종별로 다르게 나타났다. 곰솔 및 소나무림은 전체 생장 기간이 증가하는 경향을 보이며 주로 겨울철 기온과 강수량과 양의 상관관계를 보였으나, 한라산 구상나무는 8월 강수량이 많을수록 생장종료일이 빨라졌으며 최근 발생하는 구상나무 고사 현상과의 연관성 분석이 추후 필요할 것으로 보인다. 분석 결과에서 더 나아가 데이터 수집 과정에서 발생할 수 있는 결측치 문제 등에 대한 해결책을 제시하였으며, 향후 연구 범위를 확장하고 다양한 생태계 유형을 반영하기 위해 피노캠 연구와 위성 관측을 결합하는 방안을 제안하였다.

핵심어: 기후변화, 장기생태연구, 피노캠, 식물계절, 원격 관측

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. All rights reserved.

^{*}Corresponding author: jspark@nie.re.kr, ORCID 0000-0001-7311-287X

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, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

식물계절학(Phenology)은 계절변화에 따른 식물의 생물학적 변화를 관찰하고 연구하는 학문이다 (Kramer et al. 2000). 주로 잎의 변색과 낙엽, 개화시기, 열매의 성숙 등과 같은 식물의 생물학적 사건들이 계절에 따라 어떻게 변화하는지를 기록하고, 이를 토대로 기후 변화 에 따른 생태계의 반응을 이해하고 예측한다 (Piao et al. 2019). 이러한 식물계절현상은 환경 조건 변화에 민 감하게 반응하며, 이러한 변화는 식물과 상호작용하는 다른 분류군에도 영향을 미쳐 전체 생태계 구조를 변화 시킬 수 있다 (Duchenne et al. 2020, Gibson et al. 2016). 이 때문에, 기후변화가 심화됨에 따라 식물계절 변화에 대한 연구의 중요도 또한 높아지고 있으며 기후 변화의 영향을 이해하기 위해 다양한 연구들이 수행되 고 있다. Gordo and Sanz (2005)는 지중해 유역의 식물 계절 변화가 기온 상승과 연관되어 있음을 밝혔고, Asse (2018)는 알프스 고산지대에서 겨울 및 봄 온난화 가 식물의 개화 및 상호작용에 영향을 줄 수 있음을 확 인했다. 또한 작물의 성장 시기 및 수확 시기를 예측하 여 농업 생산성을 향상시키는데 활용하기도 하며 (Ren et al. 2019, Shim et al. 2010), 보전 및 복원 전략 수립을 위한 기초 자료 수립 등 (Kim et al. 2011) 다양한 분야 에서 활발히 연구되고 있다.

가장 고전적인 식물계절 연구법은 직접적인 현장조 사를 통해 식물계절현상을 기록하는 방법이다 (Aono and Kazui 2008). 이 방법은 현상을 정확하게 기록할 수 있다는 장점이 있지만 조사자의 접근이 힘든 극한지 역에 적용하기 어렵고, 조사자 간의 주관이 개입할 여 지가 크다는 단점이 있다 (Piao et al. 2019). 위성을 활 용한 원격 탐사 기술의 발전으로 광범위한 영역에 대한 연구가 가능해졌으나, 기상 조건에 따라 데이터 품질이 크게 떨어질 수 있고 해상도가 낮아 개별 종 수준에서의 분석이 어렵다 (Tucker et al. 2010). 최근에는 이런 단 점들을 보완하기 위해 RGB센서를 탑재한 자동영상촬 영 카메라 (피노캠, Phenocam)를 활용하여 근거리에 서고빈도(대략30분~1시간간격)로이미지를수집하 여 식물계절 변화를 분석하는 연구방법이 급부상하고 있다 (Brown et al. 2016). 미국의 NEON (National Ecological Observatory Network), 호주의 TERN (Terrestrial Ecosystem Research Network) 등 해외 여 러 장기생태연구기관에서 적극 활용하고 있으며, 한국 의 국립생태원에서도 2017년 설치를 시작하여 현재 ('23년 12월 기준) 총 8대의 피노캠을 운영하고 있다.

이처럼 식물계절연구를 위한 도구로써 피노캠의 중 요도가 커졌음에도 불구하고 국내에서는 아직 관련 연 구가 부족한 실정이다 (Han et al. 2020, Park et al. 2019). 본 연구에서는 국립생태원의 피노캠으로부터 수집된 이미지 데이터를 활용하여 국내 여러 산림의 식 물계절변화 양상을 파악하고, 이에 대한 기후요인과의 상관관계를 규명하고자 하였다. 또한 피노캠을 활용한 연구법에 대한 개선점을 제안하여 기후변화에 대응하 기 위한 식물계절자료 수립에 기여하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 조사 지역

국립생태원은 총 8개의 지소 (Table 1)에서 자동영 상촬영장치 (Phenocam, 이하 피노캠)를 설치하여 식 물계절변화 이미지 자료를 수집하고 있다. 본 연구에서 는 점봉산, 서천, 우포, 완도, 한라산의 5개 지소에 설치 된 피노캠 수집 자료를 분석하였다. 점봉산은 신갈나무 군락(Quercus mongolia) 및소나무군락(Pinus densiflora), 서천은 상수리나무군락(Quercus acutissima) 및 곰솔 군락 (Pinus thunbergii), 우포는 버드나무군락 (Salix koreensis), 완도는 붉가시나무군락 (Quercus acuta), 그리고 한라산은 구상나무군락 (Abies koreana)의 변 화를 모니터링하고 있다 (Fig. 1, Table 1).

2.2 데이터 수집

피노캠은 크게 이미지 데이터를 촬영하는 RGB센서 카메라 (Nikon d5600), 촬영스케줄, 무선통신 등을 자 동으로 조정하는 컨트롤러, 데이터 원격전송을 위한 LTE 모뎀, 그리고 전원을 공급하는 태양열 패널로 구성 되어있다 (Fig. 2). 모든 지소는 컨트롤러를 통해 07:00 부터 19:00까지 한시간 간격으로 촬영되도록 설정되었 으며 촬영된 이미지는 ftp 무선 전송 방식으로 국립생태 원 데이터 PC로 수집되었다. 그림자에 의한 영향을 최 소화하기 위해 해가 높게 떠 있는 11:30~13:30 사이에 촬영된 이미지 데이터를 선별하여 분석을 수행했으며, 각 지소의 연간 분석에 사용된 이미지 데이터는 Table 2 에 정리하여 나타내었다.

Site	Start year	Observation target	Altitude(m)	GPS	AWS	
Jeombongsan Mt.	2018	Quercus Mongolia Pinus densiflora	769	E 128° 28′ 5.94″ N 38° 2′ 16.92″	Osaek (596)	
Seocheon	2018	Quercus acutissima Pinus thunbergii	13	E 126° 43′ 12.98″ N 36° 2′ 22.91″	Seocheon (614)	
Upo	2019	Salix koreensis	14	E 128° 25′ 30.77″ N 35° 33′ 38.57″	Changnyeong (919)	
Wando	2017	Quercus acuta	173	E 126° 40' 22.45" N 34° 21' 32.69"	Wando-eup (857)	
Hallasan Mt.	2018	Abies koreana	1573	E 126° 31' 59.25" N 33° 21' 9.11"	Yeongsil (869)	
Janghang	2023	Salix spp.	8	E 126° 43′ 16.26″ N 37° 39′ 17.61″	-	
Yeongyang	2023	Quercus variabilis Pinus densiflora	309	E 126° 59' 32.06" N 37° 33' 4.59"	-	
Namsan Mt.	2023	Quercus mongolia	184	E 129° 9' 9.45" N 36° 38' 20.23"	-	





Fig. 1. Map of Phenocams installed by the National Institute of Ecology. The black circles represent the Phenocams used in this study, while the white circles denote the Phenocams newly installed in 2023. Each landscape image depicts the sight captured by the respective Phenocam.



Fig. 2. The main components of the Phenocam system.

	Year (No. of slides)					Total	
Site	2019	2020	2021	2022	2023	No. of slides	Size (GB)
Jeombongsan Mt.	1397	1185	962	1032	736	5312	70.2
Seocheon	947	915	834	642	542	3880	38.9
Upo	-	1098	840	752	490	3180	41.2
Wando	752	671	458	537	632	3050	24.8
Hallasan Mt.	1072	1774	1071	984	430	5331	66.9

Table 2. Image data used in phenological analysis. It shows the annual count and total size of image data used for analysis in each phenocam site



Fig. 3. Region of Interest (ROI) defined for extracting RGB Digital Number for each sites. a) Wando, b) Upo, c) Jeombongsan Mt., d) Seocheon, e) Hallasan Mt.. Observation target is depicted in Table 1.

2.3 식물계절단계 추출

수집된 이미지는 R 패키지 "Phenopix"를 이용하여 분석을 진행했다. Phenopix는 이미지 픽셀 기반으로 RGB DN (Digital Number, 디지털 넘버) 값을 추출하 고 식생지수를 계산하는 패키지이다 (v2.4.2; Filippa et al. 2016a). 선별된 이미지 중 군락이 잘 구분되는 이미 지를 대표 이미지로 선정하고 지소별 대표 군락이 포함 되도록 관심구역 (Region of Interest, ROI)을 설정하였 다 (Fig. 3). ROI 내의 모든 픽셀마다 RGB DN (디지털 넘버)값을 추출한 후, Gcc (Green Chromatic Coordinate) 값을 계산하여 식생 지수를 정량화하여 추출하였다 (Eq. 1). Gcc 계산식은 다음과 같으며, 매일의 ROI 내 전체 Gcc 평균값을 기록하여 연중 변화를 기록하였다.

$$G_{CC} = \frac{G_{DN}}{R_{DN} + G_{DN} + B_{DN}}$$
(Eq. 1)

식물계절단계 추출에 앞서 안개, 비 등 기상 상황의

영향을 최소화하기 위해 패키지에서 제공하는 'night', 'spline', 'max' 필터를 적용하여 Gcc 분포 그래프에서 이상치를 제거하였다. 또한 단일 관측값의 영향을 줄이 고 계절적 변동을 더 잘 포착하기 위해 패키지에서 제공 하는 이중 로지스틱 방정식 적합법 (Double logistic regression fitting method) 중모든지소및 연도에 대해 평균적으로 가장 적은 평균 제곱근 오차 (RMSE, 평균 0.005)를 보이는 Klosterman 방법 (Klosterman et al. 2014)을 적용하였다. 식물계절단계 추출법은 연중 Gcc 변화가 뚜렷한 낙엽성 식물과 Gcc 변동이 작은 침엽수 종등을 아울러 적용할 수 있는 비교적 단순한 Trs 방법 (Threshold method)을 채택하였다. Trs 방법은 생장시 작일: sos (start of season), 최대생장일: pop (peak of season position), 생장종료일: eos (end of season) 총 3 단계의 식물계절단계를 추출한다(Filippa et al. 2016b). pop는 Gcc가 최대에 도달하는 시기를 나타내며 sos와 eos는 각각 봄과 가을에 sos가 50%에 이르는 시기를 나 타낸다. 위 과정은 연도별로 모든 지소에 대해 적용하 여 식물계절현상의 변화를 측정하였다.

2.4 데이터 분석

각지소의 연간 식물계절 변동이 유의한 경향성을 나 타내는지 확인하기 위해 각 단계에 대해 선형회귀분석 을 수행했다. 또한, 변동 경향과 기후요인이 상관관계 를 가지는지 확인하기 위해 피어슨 상관 계수를 구해 측 정하였다. 기상 데이터는 기상청 기상자료개방포털에 서 제공하는 자동기상관측장비 (AWS)에서 2019년 1 월~2023년 10월 동안의 월 평균기온, 월 최고기온, 월 최저기온, 월 누적강수량을 활용하여 분석하였다. 각 지소별로 가장 가까운 AWS에서 관측된 기상 데이터 를 사용했으며 위치는 Table 1에 나타내었다. 기온은 조사지와 AWS의 고도차를 고려하여 (-0.6°C/100 m) 보정한 후 분석하였다. 모든 분석은 R version 4.2.3으 로 수행되었다 (R Core Team 2023).

3. 연구 결과

3.1 지소별 식물계절단계 관측 결과

각 지소의 연중 Gcc 변화를 klosterman 방법으로 적 합한 후 trs 방법으로 식물계졀현상을 추출한 결과를 나 타내었다 (Fig. 4). 추출된 결과에서 생장종료일 (eos) 에 생장시작일 (sos)를 뺀 값을 전체 생장 기간으로 정 의하고 각 지소에 대해 연도별로 결과를 나타내었다 (Table 3). Jb-Qm의 경우 2022년~2023년의 성장시작



Fig. 4. The analysis of phenophases by year for each site. The blue line represents sos, the green line represents pop, and the red line represents eos. HI-Ak: Hallasan-Abies koreana, Jb-Qm: Jeombongsan-Quercus monglica, Jb-Pd: Jeombongsan-Pinus densiflora, Sc-Pt: Seocheon-Pinus thunbergii, Sc-Qa1: Seocheon-Quercus acutissima, Wd-Qa2: Wando-Quercus acuta, Up-Sk: Upo-Salix koreenis. *sos: start of season, pop: peak of season position, eos: end of season.

Table 3. Yearly length of growing season in each phenocam site. It represents the value of e	end of season (eos) minus
start of season (sos). HI-Ak: Hallasan-Abies koreana, Jb-Qm: Jeombongsan-Quercus monglica,	Jb-Pd: Jeombongsan-Pinus
densiflora, Sc-Pt: Seocheon-Pinus thunbergii, Sc-Qa1: Seocheon-Quercus acutissima, Wd-Q	a2: Wando-Quercus acuta,
Up-Sk: Upo-Salix koreenis	

	Length of season (day)						
	HI-Ak	Jb-Qm	Jb-Pd	Sc-Pt	Sc-Qa1	Wd-Qa2	Up-Sk
2019	166	149	168	172	188	130	
2020	142	142	145	139		93	211
2021	213	160	163			112	195
2022	244		159	240	184	162	188
2023		252	182	141		75	191
Mean	191	176	163	173	186	114	196
(±) SE	23	26	6	24	2	15	5

일이 제대로 추정되지 않았으며, 서천 지소의 경우 통 신상의 장애로 여름 기간의 데이터가 다소 누락되어 전 체적으로 적절한 추정이 이루어지지 않았다. 한라산 지 소는 2023년의 경우 악천후 조건에 의해 데이터가 충분 히 수집되지 않아 분석에서 제외되었다.

2019~2023년 식물계절 결과값의 평균을 비교했을 때, 참나무과 낙엽활엽수림에 속하는 Jb-Om과 Sc-Oal 은 생장시작일이 각각 130.0 ± 1.5, 120.0 ± 2.0, 최대생 장일은 144.4 ± 1.2, 137.4 ± 2.1 로서 Sc-Qa1 이 생장시 작일은 약 10일, 최대생장일은 약 7일 가량 빨랐다. 생 장종료일의 경우 각각 270.2 ± 6.7, 303.3 ± 3.5로 Jb-Qm가 약 33일 가량 더 빠르게 잎의 변색이 시작되 는 것으로 나타나 전체적인 생장 기간은 Sc-Oal이 한 달 이상 길어 크게 차이가 나는 것으로 확인됐다. 소나 무속 식물인 Jb-Pd와 Sc-Pt의 경우 생장시작일은 각각 118.8±1.7, 144.5±15.7로 Jb-Pd가 약 27일 가량 빨라 큰 차이를 보였고, 생장종료일은 282.2 ± 4.6, 320.8 ± 7.5로 Jb-Pd가 약 39일 빠른 것으로 나타났다. 전체 생 장 기간은 Sc-Pt이 약 13일 길었고 Jb-Pd가 일찍 생장을 시작하지만 더 빨리 생장이 종료되는 것으로 확인됐다. Up-Sk의 경우 다른 지소에 비해 생장시작일이 약 80.8 ±1.7로 가장 빨랐다. 생장종료일은 약277.0±4.3으로 전체 생장 기간은 약 196.3일로 다른 6개 지소에 비해 가장 길었다. 상록활엽교목에 속하는 Wd-Qa2는 생장 시작일이 128.0±5.5, 생장종료일이 242.4±11.0 이며, 전체 생장 기간은 114.4일로 모든 지소 중 가장 짧았다. HI-Ak는 생장시작일이 116.5 ± 29.6으로 변동폭이 매 우 크게 나타났다. 생장종료일은 307.8 ± 6.4로 전체 생 장 기간은 약 191.3일로 나타나 같은 침엽수종인 소나 무속 식물에 비해 길게 나타났다. 전반적으로 같은 속 식물과 비교했을 때 위도가 높을수록 생장종료일이 빠 르고 생장 기간이 짧은 경향이 있었다.

3.2 연도별 식물계절 변화 경향 분석

2019~2023년 동안 지소별 식물계절 변화의 경향성 을 확인하기 위해 선형회귀분석을 수행한 결과를 나타 내었다 (Fig. 5). 생장시작일은 Up-Sk (0.5 ± 2.0)와 결 측치가 많아 분석이 어려운 Sc-Qa1을 제외하고 음의 회귀계수를 보여 해가 지남에 따라 점차 빨라지는 경향 을 보였다. HI-Ak가-22.4±12.5로 오차가 컸으나 가장 변화량이 크게 나타났으며, Sc-Pt가-8.0±12.0으로 두 번째로 컸다. 최대생장일 또한 생장시작일과 비슷한 경 향을 보였으나 그 변동은 적은 편이었다. 생장종료일의 경우 HI-Ak (8.1±4.1)와 Jb-Pd (1.9±3.6)는 점차 늦어 지는 경향을 보였으나 다른 수종은 모두 빨라지는 경향 을 보였다. Jb-Qm가-6.9±3.7로 감소하는 정도가 가장 컸고, Up-Sk가-6.2±1.6으로 두 번째였다.

3.3 기후요인 상관관계 분석

지소별 식물계절의 변화와 기후요인과의 상관관계 를확인하기 위해 피어슨 상관분석을 수행하였다(Fig. 6).



Fig. 5. Linear regression analysis of phenophase variation by site over time. The points on the graph represent regression coefficients, signifying the annual rate of change. Error bars depict the standard error. *sos: start of season, pop: peak of season position, eos: end of season.



Fig. 6. Correlation analysis between phenophases and climatic factors using Pearson correlation coefficient. *: *p*-value < 0.05, n.s: not significant

Sc-Pt, Sc-Qa1 그리고 Jb-Qm은 결측치로 인해 표본수 가 부족하여 분석에서 제외하였다. Wd-Qa2의 경우 4 월 최고기온과 생장시작일이 음의 상관관계를 보이고, 8월 최저기온이 생장종료일과 음의 상관관계를 보였 다. Up-Sk는 겨울철 기온이 최대생장일과 상관관계가 있었으며, 1월 최고기온과 2월 최저기온이 낮을수록 최 대생장일이 늦어지는 것으로 나타났다. 반면 HI-Ak는 8월 평균기온과 최대생장일이 양의 상관관계를 보였 고, 8월 강수량이 많을수록 생장종료일이 빨라졌다. Jb-Pd는 가장 많은 요인과 상관관계를 보였는데, 생장 시작일은 1월 최고기온, 최대생장일은 1월 평균기온과 2월 누적강수량, 생장종료일은 7월 최고기온과 양의 상 관관계가 있는 것으로 나타났다.

4. 고찰

4.1 식물계절 변화와 영향 요인

본 연구 결과에서 침엽수림들은 전반적으로 전체 생 장 기간이 증가하는 경향을 보였고, 우포의 버드나무는 생장시작일이 늦어지고 생장종료일이 빨라지며 전체

생장 기간이 짧아지는 경향을 보였다. 그러나 변화되는 정도는 지소별로 상이하게 나타났다. 일반적으로 기후 변화로 인한 기온상승은 잎의 노화를 지연시키는 것으 로 알려져 있으나, 식물계절변화에는 더 복잡한 요인들 이 관여하며, 종에 따라 그 정도가 다양하게 나타날 수 있다(Estiarte and Penuelas 2015). 점봉산의 소나무의 경우 겨울철 기온 및 강수량이 생장 시작과 최대 생장 도달에 영향을 크게 미치는 것으로 나타나는데 이는 이 른 봄에 녹는 눈이 수분 가용성을 높여 생장을 촉진하기 때문인 것으로 추측된다(Schreiber et al. 2013, O'Leary et al. 2018). 한라산의 구상나무의 경우 8월 강수량이 많을수록 생장종료일이 빨라지는 것으로 나타났는데, 이는 최근 보고되는 구상나무 군락의 쇠퇴 현상과 관련 이 있을 것으로 보인다 (Song et al. 2019). Ahn (2019) 은 구상나무의 고사 현상이 토양 수분스트레스에 의한 것일 수 있음을 제안하였다. 국내 여름철 강수량은 기 후변화에 의해 점차 증가하는 추세를 보이고 있는데 (Oh et al. 2022), 실제 한라산 영실 AWS에서 관측된 8 월 강수량합은 2017년 200.5 mm에서 2018년 1024.0 mm로 약 5배 증가하였으며 2022년을 제외하고 2000 년~2023년 측정된 한라산의 8월 강수량합 평균인 589 mm를 초과하였다 (Appendix 1). 본 연구 결과에서 8월 강수량합이 446 mm로 낮았던 2022년은 생장종료일 이 327일로 2019년~2021년의 생장종료일보다 약25 일 늦게 나타나 구상나무의 생육에 영향을 줄 수 있는 것으로 판단된다. 따라서 구상나무 고사 현상의 원인을 파악하기 위해 여름철 강수량과의 관계에 대한 추가적 인 연구가 필요할 것으로 보인다.

지리적 조건에 따라서도 식물계절 변화 양상은 달라 질 수 있는데, 북미 지역에서 수행된 식물계절 연구에 서 위도별로 기후변화에 대한 향후 시나리오 양상이 다 르게 예측되었다 (Seyednasrollah et al. 2020). 영국의 낙엽수림에서 수행된 연구에 따르면 적당한 열 스트레 스는 휴면 시기를 늦추는 결과를 보였으나, 추위 및 고 온 스트레스는 오히려 휴면 시기를 앞당기는 모습을 보 였다 (Xie et al. 2015). 본 연구에서는 지소별로 수종이 달라 정확한 비교는 할 수 없었으나 같은 수종이라도 환 경 조건에 따라 식물계절 변화 양상이 달라질 수 있음을 나타내고 있다.

4.2 피노캠 관측 연구 방향 제안

식물계절 단계 추출 결과, 정확도 높은 분석을 위해 선 결측치를 최소화하는 것이 중요하다. 서천 지소의 경우 전원 이상, 통신 장애 등 기계적인 오류 발생으로 여름철 결측치가 많이 발생하여 식물계절 단계 추출과 기후요인 상관관계 분석이 불가능 했다 (Fig. 4). 장시 간 전원 공급이 차단되는 것을 방지하기 위해 가능한 전 력선을 통한 전원과 태양열 전원을 동시에 사용하는 것 이 권장되며 태풍, 폭우 등 극한 기상 현상이 있을 시 이 후 즉각적인 점검이 필요하다. 2023년 한라산의 경우, 여름철 폭우와 겨울철 서리 등에 의해 분석에 사용할 수 있는 이미지 데이터의 양이 부족해 분석에 실패한 바있 으므로 (Table 2, Fig. 4), 촬영 간격을 1시간에서 30분 으로 단축하여 분석 해상도를 높이는 방안을 계획하고 있다. 또한 야외 환경에 노출되는 장비인 만큼 모뎀 장 비 고장이 있을 수 있어 통신 장애에 대비하여 원격 전 송이 실패했을 때 최소 2주 분량 정도의 데이터를 저장 할 수 있는 예비 저장 장치를 현장에 연결해야 한다.

올해 새로 설치된 3개의 피노캠 (고양 장항습지, 서 울 남산, 영양 멸종위기종복원센터)을 제외하면 현재 5 년 이상 국립생태원에서 데이터를 수집한 지소는 5개

에 불과하다 (National Institute of Ecology 2022). 단 순한 현상 관찰에서 벗어나 지리적 요인, 기후적 요인 등을 고려한 고도화된 분석을 위해서 다양한 생태계 유 형을 반영할 수 있도록 표준화된 관찰 지소를 지속적으 로 확대할 예정이다. 동일 수종에 대해 위도, 고도, 서식 지 등을 달리하여 추가 관찰 지소를 설치하여 지리적 요 인에 대한 식물계절변화 양상의 차이를 분석할 수 있다. 예를 들어 한라산 구상나무의 식물계절변화 양상과 비 교하기 위해 지리산 구상나무군락을 대상으로 관찰 지 소를 추가한다면 8월 강수량의 영향이 다른 지역에서 도 일반적으로 나타나는 현상인지 확인할 수 있다. 식 물계절현상은 기후요인에 영향을 크게 받는 만큼 피노 캠설치 장소에 기상모니터링을 위한 장비를 같이 운용 하는 것이 필요하다. 현재 국립생태원에서 설치한 피노 캠관찰 지소에는 대부분 기상모니터링 장비가 같이 설 치되어 있어 이를 활용하여 보다 정확한 기후요인 분석 을 진행할 예정이다. 추가 설치시에도 기온 및 강수량 을 측정할 수 있는 장비를 병행하는 것이 필요하다.

최소 10년 이상 장기간 축적된 피노캠 관측 데이터는 생태계 기후변화의 기후변화 영향을 판단할 수 있는 중 요한 자료로 활용될 수 있으며 선진국에서는 그 가치를 인정하고 다량의 데이터를 축적하고 있다. 또한 가시광 선 영역 뿐만 아니라 빛의 파장대를 확대하면 좀 더 세 밀한 식물의 생리적 변화를 판단하는 지표가 될 수 있을 것이다. 피노캒을 통해 얻어진 고해상도의 Gcc 기반식 물계절 데이터를 위성 데이터와 연계하면 생물계절 연 구결과를 국가 규모로 확대하여 분석할 수 있다. (Burke and Rundquist 2021, Cui et al. 2019, Thapa et al. 2021). 피노캠의 Gcc는 위성 기반의 NDVI, EVI 등 다른 식생지수와 상관관계를 가지는 것으로 나타났고, 이를 바탕으로 분석 범위를 확장할 수 있을 것으로 보인 다(Khare et al. 2022). 전국 범위의 기후변화 대응 식물 계절 기초 자료를 수립하기 위해 국내 생태계 유형을 대 표할 수 있는 피노캠 관찰지소를 추가로 설치하고, 이 를 위성 데이터와 결합하려는 연구가 지속되어야 한다.

감사의 글

본 연구는 국립생태원 "2023년 국가 장기생태연구 (NIE-고유연구(B)-2023-02)"의 연구비 지원 하에 수 행되었습니다.

References

- Ahn, U.S., Kim, D.S., Yun, Y.S., Ko, S.H., Kim, K.S. and Cho, I.S. 2019. The inference about the cause of death of Korean Fir in Mt. Halla through the analysis of spatial dying pattern – Proposing the possibility of excess soil moisture by climate changes -. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology 21(1): 1-28.
- Aono, Y. and Kazui, K. 2008. Phenological data series of cherry tree flowering in Kyoto, Japan, and its application to reconstruction of springtime temperatures since the 9th century. International Journal of Climatology 28: 905-914.
- Asse, D., Chuine, I., Vitasse, Y., Yoccoz, N.G., Delpierre, N., Badeau, V., Delestrade, A., and Randin, C.F. 2018. Warmer winters reduce the advance of tree spring phenology induced by warmer springs in the Alps. Agricultural and Forest Meteorology 252: 220-230.
- Brown, T.B., Hultine, K.R., Steltzer, H., Denny, E.G., Denslow, M.W., Granados, J., Henderson, S., Moore, D., Nagai, S., SanClement, M., Sanchez-Azofeifa, A., Sonnentag, O., Tazik, D., and Richardson, A.D. 2016. Using phenocams to monitor our changing Earth: toward a global phenocam network. Front Ecol Envrion 14(2): 84-93.
- Burke, M.W.V. and Rundquist, B.C. 2021. Scaling Phenocam GCC, NDVI, and EVI2 with Harmonized Landsat-Sentinel using Gaussian Processes. Agricultural and Forest Meteorology 300: 108316.
- Cui, T., Martz, L., Lamb, E.G., Zhao, L., and Guo, X. 2019. Comparison of Grassland Phenology Derived from MODIS Satellite and PhenoCam Near-Surface Remote Sensing in North America. Canadian Journal of Remote Sensing 45(5): 707-722.
- Duchenne, F., Thebault, E., Michez, D., Elias, M., Drake, M., Persson, M., Rousseau-Piot, J.S., Pollet, M., Vanor melingen, P., and Fontaine, C. 2020. Phenological shifts alter the seasonal structure of pollinator assemblages in Europe. Nature Ecology & Evolution 4: 115-121.
- Estiarte, M. and Penuelas, J. 2015. Alteration of the phenology of leaf senescence and fall in winter deciduous species by climate change: effects on nutrient proficiency. Global Change Biology 21: 1005-1017.
- Filippa, G., Cremonese, E., Migliavacca, M., Galvagno, M., Forkel, M., Wingate, L., Tomelleri, E., Morra di Cella, U., and Richardson, A.D. 2016a. Phenopix: A R package for image-based vegetation phenology. Agricultural and Forest Meteorology 220: 141-150.
- Filippa, G., Cremonese, E., Migliavacca, M., Richardson, A., Galvagno, M., and Forkel, M. 2016b. Phenopix: pixel based phenology.

- Gibson, D., Blomberg, E.J., and Sedinger, J.S. 2016. Evaluating vegetation effects on animal demographics: the role of plant phenology and sampling bias. Ecology and Evolution 6(11): 3621-3631.
- Gordo, O. and Sanz, J.J. 2005. Phenology and climate change: a long-term study in a Mediterranean locality. Oecologia 146:484-495.
- Han, S.H., Yun, C.W., and Lee, S. 2020. Phenophase Extraction from Repeat Digital Photography in the Northern Temperate Type Deciduous Broadleaf Forest. Journal of Korean Society of Forest Science 109(4): 361-370.
- Khare, S., Deslauriers, A., Morin, H., Latifi, H., and Rossi, S. 2022. Comparing Time-Lapse PhenoCams with Satellite Observations across the Boreal Forest of Quebec, Canada. Remote Sensing 14(1): 100.
- Kim, H., Hong, J., Kim, S.C., Oh, S.H., and Kim, J. 2011. Plant Phenology of Threatened species for Climate change in Sub-alpine zone of Korea – Especially on the Summit Area of Mt. Deogyusan -. Korean J. Plant Res. 24(5): 549-556.
- Klosterman, S.T., Hufkens, K., Gray, J.M., Melaas, E., Sonnentag, O., Lavine, I., Mitchell, L., Norman, R., Friedl, M.A., and Richardson, A.D. 2014. Evaluating remote sensing of deciduous forest phenology at multiple spatial scales using PhenoCam imagery. Biogeosciences 11: 4305-4320.
- Kramer, K., Leinonen, I., and Loustau, D. 2000. The importance of phenology for the evaluation of impact of climate change on growth of boreal, temperate and Mediterranean forests ecosystems: an overview. Int J Biometeorol 44: 67-75.
- National Institute of Ecology. 2022. Monitoring ecosystem response to climate change. National institute of Ecology. Seocheon, Korea. p. 452. (In Korean)
- O'Leary, D.S., Kellermann, J.L., and Wayne, C. 2018. Snowmelt timing, phenology, and growing season length in conifer forests of Crater Lake National Park, USA. Int J Biometeorol 62: 273-285.
- Oh, M., Kim, J., Lee, B., and Kim, T. 2022. Hydrometeorological Characteristics in Season and Solar Term According to RCP Climate Change Scenarios. Journal of Wetlands Research 24(4): p288-300.
- Park, E., Lee, N., Kim, M., and Park, H.C. 2019. A Study on the Phenology of Quercus mongolica Using Vegetation Indices in Korea National Park. Proc. Korean Soc. Environ. Ecol. Con. 29(2), 195.
- Piao, S., Liu, Q., Chen, A., Janssens, I.A., Fu, Y., Dai, J., Liu, L., Lian, X., Shen, M., and Zhu, X. 2019. Plant phenology and global climate change: Current progresses and challenges. Global Change Biology 25: 1922-1940.
- R Core Team. 2023. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

- Ren, S., Qin, Q., and Ren, H. 2019. Contrasting wheat phenological responses to climate change in global scale. Science of the Total Environment 665: 620-631.
- Schreiber, S.G., Ding, C., Hamann, A., Hacke, U.G., Thomas. B.R., and Brouard, J.S. 2013. Frost hardiness vs. growth performance in trembling aspen: an experimental test of assisted migration. Journal of Applied Ecology 50: 939-949.
- Seyednasrollah, B., Young, A.M., Li, X., Milliman, T., Ault, T., Frolking, S., Friedl, M., and Richardson A. D. 2020. Sensitivity of Deciduous Forest Phenology to Environmental Drivers: Implications for Climate Change Impacts Across North America. Geophysical Research Letters 47: e2019GL086788.
- Shim, K., Roh, K., So, K., Kim, G., Jeong, H., and Lee, D. 2010. Assessing Impacts of Global Warming on Rice Growth and Production in Korea. Climate Change Research 1(2): 121-131.
- Song, J.H., Han, S.H., Lee, S.H., and Yun, C.W. 2019.

Changes for Stand Structure of *Abies koreana* Forest at the Yeongsil Area of Mt. Hallasan for Six Years (from 2011 to 2017). Journal of Korean Society of Forest Science 108(1): 1-9.

- Thapa, S., Garcia Millan, V.E., and Eklundh, L. 2021. Assessing Forest Phenology: A Multi-Scale Comparison of Near-Surface (UAV, Spectral Reflectance Sensor, PhenoCam) and Satellite (MODIS, Sentinel-2) Remote Sensing. Remote Sensing 13: 1597.
- Tucker, C.J., Pinzon, J.E., Brown, M.E., Slayback, D.A., Pak, E.W., Mahoney, R., Vermote, E.F., and El Saleous, N. 2010. An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. International Journal of Remote Sensing 26(20): 4485-4498.
- Xie, Y., Wang, X., and Silander, J.A. 2015. Deciduous forest responses to temperature, precipitation, and drought imply complex climate change impacts. PNAS 112(44): 13585-13590.



Appendix 1. Yearly total precipitation in August observed at Hallasan Mt., Yeongsil. The red dashed line represents the mean total precipitation in August measured from 2000 to 2023 Hallasan Mt.