

## 기계학습 기반 최근 기후변화에 따른 지표수종의 서식처 변화 규명

임철희\* · 김현준\*\*†

\*고려대학교 오정리질리언스연구원 연구교수,  
\*\*전남대학교 산림자원학과 조교수

### Machine Learning Application for Identifying Habitat Suitability Changes of Indicator Tree Species against Recent Climate Change

Lim, Chul-Hee\* and Kim, Hyun-Jun\*\*†

\*Research Professor, Ojeong Resilience Institute, Korea University, Seoul, Korea

\*\*Assistant Professor, Department of Forest Resources, Chonnam National University, Gwangju, Korea

#### ABSTRACT

In this study, a recent climate change phenomenon and impact were identified by predicting a time-series suitable region of indicator species of warm-temperate and subalpine forests, in which climate change effects are prominent, using machine learning models and recent climate information. In the recent bioclimatic indices, temperature and seasonality of precipitation have increased. The suitable habitat regions of the past warm-temperate and subalpine forests predicted through the machine learning-based random forest model and the bioclimatic indices were similar to the actual natural forest distribution. In the last 18 years, in the warm-temperate forest, though the annual deviation was high, a clear increasing trend has been observed. On average, the potentially suitable habitat areas increased more than three times. In subalpine forests, the suitable habitat area decreased significantly and is very limited in the southern sub-alpine area. After 2013, little suitable area was present, with an average of only 23% compared to the past period. These results are related to the group death of subalpine forest in the 2010s and indicate that the accumulated climatic non-suitability has caused death of the subalpine forest. Climate change impacts on indicator species are both a risk and an opportunity, depending on the species, and we expect wise adaptation and measures to create more opportunities.

**Key words:** Recent Climate Change, Machine Learning, Subalpine Forest, Warm-temperate Forest, Indicator Species

#### 1. 서론

최근의 기후변화는 매년 다른 형태로 인간과 생태계를 위협하고 있다. 2019년 기후변화에 관한 정부 간 협의체 (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 발간한 기후변화와 토지 특별보고서(SRCLL, Special Report for Climate Change and Land)에서는 최근 전지구

육상의 온도가 1850년 ~ 1900년대 대비 1.5도 증가하였으며, 2017년에는 1.8도 이상의 편차를 기록했다고 발표했다 (IPCC, 2019). 특히 최근의 기후변화는 극한현상의 강도와 빈도가 증가하여 식량안보와 토지황폐화를 비롯한 육상 생태 전반에 부정적 영향을 야기하였다고 제시하였다(Li et al., 2018; Nolan et al., 2018; Lim et al., 2019a). 또한 엘니뇨(El Nino), 라니냐(La Nina)와 같은 전지구적 현상

†Corresponding author : [hjkim0837@jnu.ac.kr](mailto:hjkim0837@jnu.ac.kr) (61186, Room No. 302, 3th building, College of Agriculture and Life Science, Chonnam National University, 77 Yongbong-ro, Buk-gu, Gwangju, Republic of Korea. Tel. +82-62-530-2082)

ORCID 임철희 0000-0001-7752-0694

김현준 0000-0002-7373-1643

Received: November 20, 2020 / Revised: December 09, 2020 / Accepted: December 18, 2020

은 동아시아의 기후적 변동성을 증가시켜 집중호우와 폭염 등의 기후재해를 증가시키고 있다(Zhang et al., 2017; Xue and Zhao, 2017).

대한민국의 경우에도 2010~2011년은 집중호우로 큰 피해를 입었으며, 2014~2015년에는 기록적인 가뭄을 겪으며 인간과 생태계 전반에 영향을 주었다(Lim et al., 2015; Cha et al., 2018). 2018년에는 홍천에서 섭씨 41도를, 서울의 경우 39도를 기록하며, 현대적 기상관측 이래 가장 높은 기록을 경신하였고, 동아시아 전역에서 폭염으로 많은 사상자가 보고되었다(Lee et al., 2020). 2019년에는 7개의 태풍이 한반도로 상륙하여 강한 바람과 폭우를 동반했고, 2020년에는 52일의 장마를 보이며, 관측 사상 최장기 장마로 기록되었다(Hwang et al., 2020). 대한민국은 강도와 빈도가 높아지는 극한기후 현상에 그대로 노출되어 있는 것이다.

이러한 기후의 변동성과 장기적인 변화는 식물과 생태계에 직접적인 영향을 주고 있다. 특히 고산 및 아고산지역이나 연안 및 도서지역 등 취약생태계에서 그 영향이 두드러지게 나타나고 있다(KEI, 2015; Choe et al., 2017). 최근 20년 동안 아고산 지역 침엽수림의 면적은 약 25%가 감소하였으며, 특히 설악산, 지리산, 한라산의 경우 대규모 감소가 확인되었다(Kim et al., 2019a). 남부 도서지역에서는 한랭한 기후에 적합한 수종들이 급속하게 감소하고, 출현종이 제한적으로 분포하는 등 고유한 생태계가 훼손되고 있음이 보고된 바 있다(Kim et al., 2016). 최근의 가속화된 기후의 변화는 생물종 특히 식물의 서식지동속도에 비해 현저히 빠르게 서식적합지역을 이동시켰고, 앞으로 그 속도의 차이는 더욱 증가할 것으로 전망되고 있다(Choi et al., 2019).

기후에 의한 서식처 변화를 예측하고 대응하기 위해 기계학습 기반의 종분포모델링이 널리 활용되고 있으며, 특히 장기적인 관점에서 기후변화의 영향을 예측하고 있다(Koo et al., 2015; Lim et al., 2018; Park et al., 2019). 2050년대와 2070년대에는 난대림이 북한까지 북상 가능하며, 자연군락의 아고산림을 남한에서 관찰하지 못할 것으로 전망되고 있다(Lim et al., 2018; Yoo et al., 2020). 다만, 대부분의 연구에서 과거 20~30년과 RCP (Representative Concentration Pathway) 시나리오와 같은 장기미래 간의 차이를 기준으로 기후변화의 영향을 설명하고 있으므로, 최근의 관측된 기후변화로 인한 영향이 평가되지 못했다. 위성영상이나 현장조사를 통해 집단고사 혹은 서식처 변화가 모니터링되었으나, 기후적 영향에 대

해 직접적인 모의가 이루어지지 못한 것이다.

이에 본 연구에서는 기후변화에 많은 영향을 받고 있는 주요 지표 산림수종들을 대상으로 기계학습기법을 활용하여 최근의 관측된 기후변화 현상이 서식처 적합도에 미치는 영향을 예측한다. 특히 아고산림과 난대림들의 서식처 적합지역 변화를 정량적 및 공간적으로 예측하여 지표수종들의 시계열적 변화를 확인하고자 한다. 이러한 접근은 최근 발생한 아고산림의 고사나 난대수종들의 이동 등을 설명할 수 있을 것으로 기대하며, 장기적인 수종별 기후변화 적응에 기여할 것으로 예상된다.

## 2. 연구재료 및 방법

### 2.1 연구대상지 및 범위

본 연구는 대한민국 전체 국토를 대상으로 수행하였으며, 공간적 범위로는 경도 124° 54' ~ 131° 6', 위도 33° 9' ~ 38° 45'를 대상으로 하였다(Fig. 1). 기후자료의 상세화 수준을 고려하여 전체 공간해상도는 1 km<sup>2</sup>로 통일하였으며, 시간적 범위는 1971 ~ 2000년을 과거시기로, 2000 ~ 2017년을 최근의 기후변화에 따른 영향 모의 시기로 선정하였다.

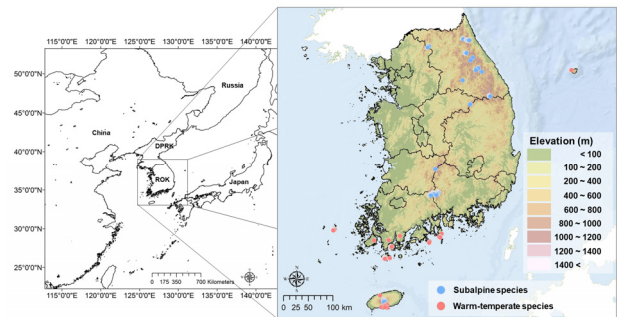


Fig. 1. Study area with elevation and species location

### 2.2 지표수종 위치정보

본 연구에서는 기후변화 생물지표 수종으로 선정되었거나 유사한 환경특성을 가지는 수종들을 선정하여 위치정보를 수집 및 활용하였다. 특히 자연적으로 서식하게 된 군락들의 정보를 최대한 반영하고자 환경부에서 제작한 현존식생도의 자연림군락 정보를 활용하였다(Choi et al.,

2011). 현존식생도는 식생의 서식분포를 공간화한 것으로 자연환경 관리와 건전한 이용을 위한 기초자료로 활용되고 있다. 전국자연환경조사에서는 산림지역에 분포하는 모든 자연림과 식재림을 대상으로 식생분포 현황을 조사하였고, 해당 정보를 통해 현존식생도가 제작되었다. 현존식생도에는 27종의 자연림군락 정보가 포함되어 있으며, 전체 수종 및 군락정보를 검토하였고, 일정 군락을 이루고 있으며 지표수종으로서 역할을 할 수 있는 수종을 아고산림과 난대림에서 각 3종씩 선정하였다.

아고산림의 경우 국내 고유종이자, 최근 한라산과 지리산 등에서 고사가 자주 발견되고 있는 구상나무(*Abies koreana*), 구상나무와 함께 세계자연보전연맹(IUCN)에 등재된 분비나무(*Abies nephrolepis*), 국내 고유종이면서 멸종위기종인 주목(*Taxus cuspidata*)을 선정하였다(Kim et al., 2011; Zhang et al., 2013). 세 수종 모두 국가 기후변화 생물지표로 등재되어 있다. 세 가지 아고산 수종의 경우 백두대간과 한라산을 중심으로 1400m 이상의 산지에서 주로 분포하고 있다(Fig. 1). 난대림의 경우 국가 기후변화 생물지표로 선정되어 있는 수종이 제한적이므로, 현존식생도의 자연군락 내 상록활엽수림을 활용하였다. 남부해안에서 자생하는 동백나무와 참나무과의 상록활엽수인 구실잣밤나무, 붉가시나무를 선정하였으며, 세 수종은 모두 남해안 도서지역과 제주도에 자연군락으로 서식하고 있다(Fig. 1). 벡터(Vector) 형태의 현존식생도에서 위 6가지 수종의 자연림군락정보를 분류하고 지점정보로 변환하여 모형의 학습자료로 활용하였다.

### 2.3 시계열 기후정보

본 연구에서는 월 평균기온, 월 평균 최저기온, 월 평균 최고기온, 월 누적강수량 정보가 활용되었으며, 이를 생물기후지수로 산정하여 산림유형별 서식적합지역 예측에 적용하였다. 과거시기에 해당하는 1971 ~ 2000년은 전국의 종관기상관측망(ASOS)의 관측기상정보를 수집하고 지형에 따른 기온감률 및 강수증감률을 적용하여 1 km<sup>2</sup> 공간 해상도로 보간하였다. 기온관련 변수의 경우, Yun et al. (2001)이 제시한 고도에 따른 기온감률 보정식을 적용하고, 강우자료는, Smith et al. (2008)이 제시한 고도에 따른 강수증감률을 적용하여 Kriging과 거리역산가중(IDW) 기법으로 보간하였다.

현재시기에 해당하는 2000 ~ 2017년은 기상청에서 제작한 MK-PRISMv12자료를 기상청 기후포털을 통해 제공

받아 활용하였다. MK-PRISMv12 자료는 전국 종관기상 관측망과 자동기상관측망(AWS)를 합하여 전국을 대상으로 MK-PRISM 기법을 적용하여 2000년부터 2017년까지 일별 및 월별 격자단위 기상정보를 제공하고 있다. PRISM (Parameter-elevation Regressions an Independent Slopes Model) 기술은 미국 오레곤 주립대를 중심으로 개발되어 많은 지역에서 활용된바 있으며(Daly et al., 2002; Daly et al., 2003), 국내에서도 2000년대 후반부터 PRISM 기법을 개량하여 K-PRISM (Shin et al., 2008), MK-PRISM (Kim et al., 2012)이 개발되었다. MK-PRISM 기법은 고도, 사면방향, 해양도에 따라 가중치가 부여되는 형태이며, 국내 기후상황에 맞게 개선된 방법론이다.

위의 기본 기후정보를 활용하여 19가지 생물기후지수를 구축 및 활용하였다(Table 1). 생물기후지수는 월별 기온과 강수정보를 기반으로 계절과 월단위로 조합하여 식물의 서식환경을 설명할 수 있는 지표로, 생물서식에 중요한 환경인자로 고려되고 있다(O'Donnell and Ignizio 2012). 19가지 생물기후지수는 R 프로그램언어 환경에서 'dismo' 패키지를 활용하여 각 시기별 19가지 지수를 도출하였다. 기후변화에 따른 산림과 생태계 영향평가 연구에 생물기후지수가 다양한 형태로 활용되고 있으며, 19개 모든 변수를 활용하는 것보다, 주성분분석 및 상관분석 등을 통해 분야별 대표성 있는 지수를 선정하여 사용해왔다(Koo et al., 2015; Park et al., 2019). 본 연구에서도 기존의 유사연구들을 고려하여 변수간 상관성을 높은 변수를 제거하고 아고산림과 난대림 서식처 예측에 적합한 수종들을 선정하였다. 변수 간 Pearson 상관관계분석을 통해 0.7 이상의 r값을 갖는 변수들을 제거하였고, 상관성이 높은 두 변수들 중 기존 유사연구에서 많이 활용되어 온 변수를 선정하였다. 이를 통해 총 8개의 생물기후지수를 선정하였다. Bio1과 Bio12는 연평균 기온과 연누적 강수량으로 지역기후를 설명하는 가장 기본적인 지표이며, Bio2와 Bio3은 기온의 연교차와 월교차의 공간적 분포를 설명할 수 있는 변수로(Park et al., 2019), 내륙성 및 해양성 기후에 적합한 식물서식 특성을 반영할 수 있다. 최난월최고기온과 최한월최저기온을 의미하는 Bio5와 Bio6은 생물의 서식한계를 설명할 수 있는 지표로, 아고산림과 난대림의 남방 및 북방한계선과 유사한 경향을 이루고 있다. Bio13은 여름철 집중되는 국내의 강수량의 양적 변화를 통해 호우와 수분스트레스에 대한 영향을 보여줄 수 있으며, Bio14는 겨울-봄 동안의 건조스트레스를 설명할 수 있다.

Table 1. Description of bioclimatic variables of this study

Bioclimatic variables	Description of variables	Selection
Bio1	Annual Mean Temperature	○
Bio2	Mean Diurnal Range (Mean of Monthly (max temp ~ min temp))	○
Bio3	Isothermality	○
Bio4	Temperature Seasonality	○
Bio5	Max Temperature of Warmest Month	○
Bio6	Min Temperature of Coldest Month	○
Bio7	Temperature Annual Range	○
Bio8	Mean Temperature of Wettest Quarter	○
Bio9	Mean Temperature of Driest Quarter	○
Bio10	Mean Temperature of Warmest Quarter	○
Bio11	Mean Temperature of Coldest Quarter	○
Bio12	Annual Precipitation	○
Bio13	Precipitation of Wettest Month	○
Bio14	Precipitation of Driest Month	○
Bio15	Precipitation Seasonality	○
Bio16	Precipitation of Wettest Quarter	○
Bio17	Precipitation of Driest Quarter	○
Bio18	Precipitation of Warmest Quarter	○
Bio19	Precipitation of Coldest Quarter	○

## 2.4 기계학습 기반 서식적합지 분석 방법

본 연구에서는 기계학습 알고리즘을 활용하여 아고산림과 난대림의 출현지점과 생물기후특성을 학습하여 서식적합지역을 예측하였다. 기존 국내에서도 Random Forest (RF), Artificial Neural Networks (ANN), Generalized Boosted Models (GBM), MaxEnt (Maximum Entropy) 등 기계학습 알고리즘에 기반의 다양한 종분포모형(Species Distribution Model)들이 여러 생물 종들의 서식처 예측에 적용되어왔다 (Shin et al., 2018; Park et al., 2019; Chung et al., 2020). 많은 선행연구에서 종분포모형 앙상블을 통해 불확도 낮은 예측을 지향하였으나, 대부분의 결과에서 RF의 정확도가 높았고, 앙상블 결과와 유사한 값을 보였다(Park et al., 2016; Shin et al., 2018). Chung et al. (2020)의 결과에서는 출현 정확도 지수와 종합적인 정확도 분석에서 앙상블 모형보다 RF 단일 모형이 더 좋은 결과를 보였다. 이에 본 연구에서는 기계학습 기반 종분포모형의 대표성을 지닌 RF를 통해 아고산림과 난대림의 서식적합지역 변화를 모의하였다.

RF는 기존 서식지역 데이터를 학습용 데이터로 활용하여 모형을 훈련시키는 지도학습(Supervised Learning) 방법 중 하나로, 수많은 의사결정나무를 생성하고 각 의사결정

모형 결과를 종합하여 결과를 산출하는 방법이다(Breiman, 2001). RF는 Bootstrap을 이용하여 데이터셋을 구성하고 이를 통해 의사결정나무를 구축한 후 다수결의 방식으로 의사결정나무모형들의 예측값을 결합하여 최종적인 값을 도출한다(Kim et al., 2019b). 기본적으로 앙상블 기법이 적용된 RF는 데이터 과적합 현상을 최소화하고 다양한 독립 변수를 모두 활용하는데 이점이 있다. 본 연구에서는 500개의 의사결정나무를 활용하여 난대림과 아고산림의 서식적합지역을 예측하였다. 분석을 위해 R 프로그래밍 언어 환경(version 3.6.0)에서 R Studio로 작업하였고, RF 모형 구현을 위해 'RandomForest' 패키지가 활용되었다. 보다 자세한 기술적 설명은 패키지 매뉴얼을 통해 확인할 수 있다(<https://cran.r-project.org/web/packages/randomForest>).

RF의 예측 정확도 검증을 위해 ROC (Receiver Operating Characteristic) 곡선의 AUC (Area Under the Curve) 값을 10회 교차검증을 통해 측정하였다(Pearson, 2007; Lim et al., 2019b). AUC 값은 0에서 1사이의 값으로, 0.9 이상일 경우 매우 높은 수준의 통계적 정확도를 의미한다. RF를 통해 예측된 값의 서식적합지역 분류를 위해서 NBC (Natural Break Classification) 기법을 활용하였다(Lim et al., 2018). 과거시기 예측결과를 NBC기법으로 이분화하고 해당 수치를 현재 시점의 시계열 예측결과에 적용하여 서식적합지역을 분류하였다.

과거시기(1970 ~ 2000) 평균 생물기후와 수종별 출현정보, RF알고리즘을 통해 기계학습 모형이 만들어졌고, 이 모형을 통해 최근 18년(2000 ~ 2017) 동안의 매년 기상에 의한 서식적합지역 예측이 이루어졌다. 또한 18년 동안의 모의 결과를 중첩하여 최근 기상에 의한 서식적합지역의 출현 빈도를 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 최근 주요 생물기후지수의 시계열 변화

과거시기 기후와 최근의 기후를 본 연구에서 선정한 생물기후지수를 통해 변화를 확인한 결과 지수별 다른 특성을 보였으나 전반적으로 온난화 현상이 발견되었으며, 수문학적 변화도 두드러지는 것으로 나타났다(Fig. 2).

Bio1의 경우 가장 기본적인 지수이므로, 직관적인 변화를 가장 쉽게 확인할 수 있는데, 중부 및 내륙지역에서도 과거 남부 혹은 해안지역에서 보였던 기온분포를 나타내

어 기온이 증가하는 기후변화를 확인할 수 있었다. 다만, 장기미래 기후변화에 따른 분석을 수행했던 기존의 연구들에 비해서는 그 편차가 적게 나타났다(Lim et al., 2018; Yoo et al., 2020). 이는 짧은 주기의 기온변화이므로 편차가 적었던 것이며, 변화의 방향성은 동일했고, 두 시기 모두 관측된 기후라는 점에서 유의미한 부분이다. Bio2와 Bio3의 경우 두드러진 차이는 없었으나, 내륙지역에서 연교차가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 기온의 계절적 특성을 의미하는 Bio5와 Bio6의 경우 겨울철 기온의 증가는 두드러지지 않았으나, 여름철 최고기온은 눈에 띄게 증가하였다.

강수관련 지수인 Bio12 ~ 14에서는 총 강수량을 의미하는 Bio12에서는 전반적 증가가 나타났는데, 특히 강수량이 많은 지역에서 크게 증가하고, 경상분지 등 기존 강수량이 적었던 지역에서는 여전히 증가폭이 적었다. 계절적 강수를 의미하는 Bio13, Bio14에서는 두 지수 모두 두드러진 변화를 보였다. 여름철 강수의 집중도는 증가하고, 겨울철 강우 혹은 강설량은 크게 감소하여 도서 및 해안지역을 제외하고는 가장 건조한 달의 강수량이 20 mm 이하로 나타났다. 이는 기온 측면의 온난화뿐 아니라 수문학적 생물서식환경이 크게 변화할 수 있음을 시사한다.

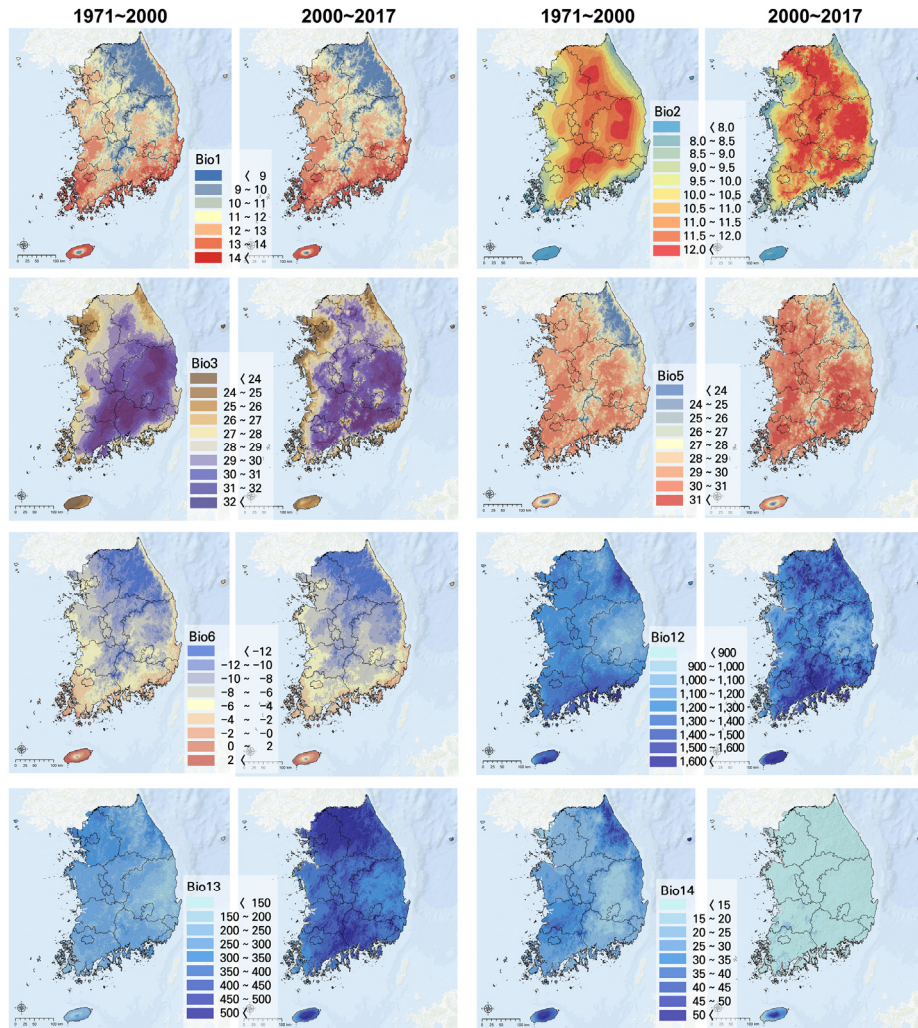


Fig. 2. Spatio distribution of the selected bioclimatic variables in Republic of Korea for the past and current period

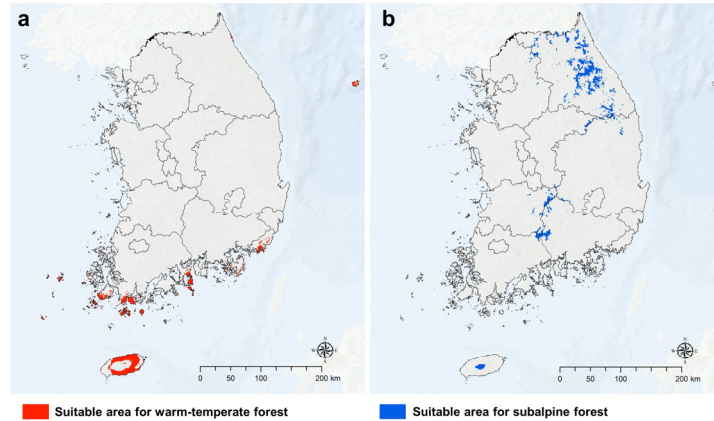


Fig. 3. Predicted habitat suitable area in past period (a: Warm-temperate forest, b: subalpine forest)

### 3.2 과거 시기 지표수종의 서식적합지 예측

#### 3.2.1 난대림과 아고산림의 서식적합지 예측

본 연구에서 개발된 기계학습 모형과 생물기후지수를 통해 과거 시기의 난대림과 아고산림의 서식적합지역을 예측하였다. 난대림의 경우 남해안과 일부 도서지역에서 제한적으로 서식에 적합한 것으로 나타났다(Fig. 3a). 제주 평지와 진도, 해남, 여수 등의 지역이 해당되며, 1,363 km<sup>2</sup>의 면적에서 난대림 서식에 적합한 것으로 예측되었다. 아고산림의 경우 백두대간과 제주산간 지역을 중심으로 1000 m 이상의 산간지역에서 서식적합지로 나타났다(Fig. 3b). 한라산, 지리산, 덕유산, 태백산, 오대산, 설악산 등 주요 산지의 능선을 따라 분포하였으며, 면적으로는 2,763 km<sup>2</sup>의 지역이 아고산림의 서식에 적합한 것으로 예측되었다.

#### 3.2.2 정확도 평가 및 변수별 기여도 분석

난대림 예측결과에 대한 통계적 정확성을 의미하는 AUC 값은 0.968로 매우 높은 수준의 정확도를 보였다. 공간분포의 경우 기존의 같은 수종 혹은 유사수종의 잠재서식지를 예측한 Park et al. (2016), Shin et al. (2018), Lim et al. (2018) 과 유사하면서 소폭 보수적인 예측이 되었다. 본 연구의 예측이 보수적인 방향을 갖는 것에는 현존식생도 자연림군락의 위치정보가 제한적이며, 활용된 기후정보의 출처가 다른 것에 원인이 있을 것으로 사료된다. 아고산림 예측결과와 AUC 값 또한 0.977로 매우 높은 수준의 정확도를 보였으며, 소폭이지만 난대림에 비해 더 높은 값을 나타냈다. 아고산림

의 공간분포에서도 동일 수종으로 잠재서식지 혹은 서식적합지역을 예측한 기존 연구들과 높은 유사성을 보였으며 (Lim et al., 2018; Park 2019; Yoo et al., 2020), 현장조사를 통한 현존식생분포 결과와도 일치하였다(Kim et al., 2011).

8가지 생물기후지수의 변수별 기여도는 두 가지 모형(난대림, 아고산림)에서 다르게 나타났다(Table 2). 난대림의 경우 내륙성-해양성 기후에 대한 설명력이 높은 Bio2와 Bio3이 높은 설명력을 보였으며, 식물의 생육한계를 설명할 수 있는 최한월최저기온(Bio6)이 뒤를 이었다. 이는 연교차가 적고 겨울철 온화한 지역에서 서식하는 난대림의 서식환경이 그대로 반영된 것으로 이해할 수 있다. 아고산림의 경우 최한월최고기온(Bio5)가 가장 높은 설명력을 보였고, Bio1(연평균기온)과 Bio14(최건조월강수량), Bio6(최한월최저기온)이 뒤를 이었다. 여름철 고온 스트레스에 민감하고, 평균적으로 낮은 기온에 서식하는 아고산림의 생육특성이 잘 반영되었으며, 겨울철 수분 스트레스도 반영된 것으로 이해할 수 있다.

Table 2. Variable Importance for each model

(Unit: %)

	Subalpine	Warm-temperate
Bio1	37.056	5.231
Bio2	4.374	30.321
Bio3	5.764	23.426
Bio5	41.005	4.702
Bio6	19.557	15.757
Bio12	4.103	7.750
Bio13	6.054	3.728
Bio14	21.706	5.224

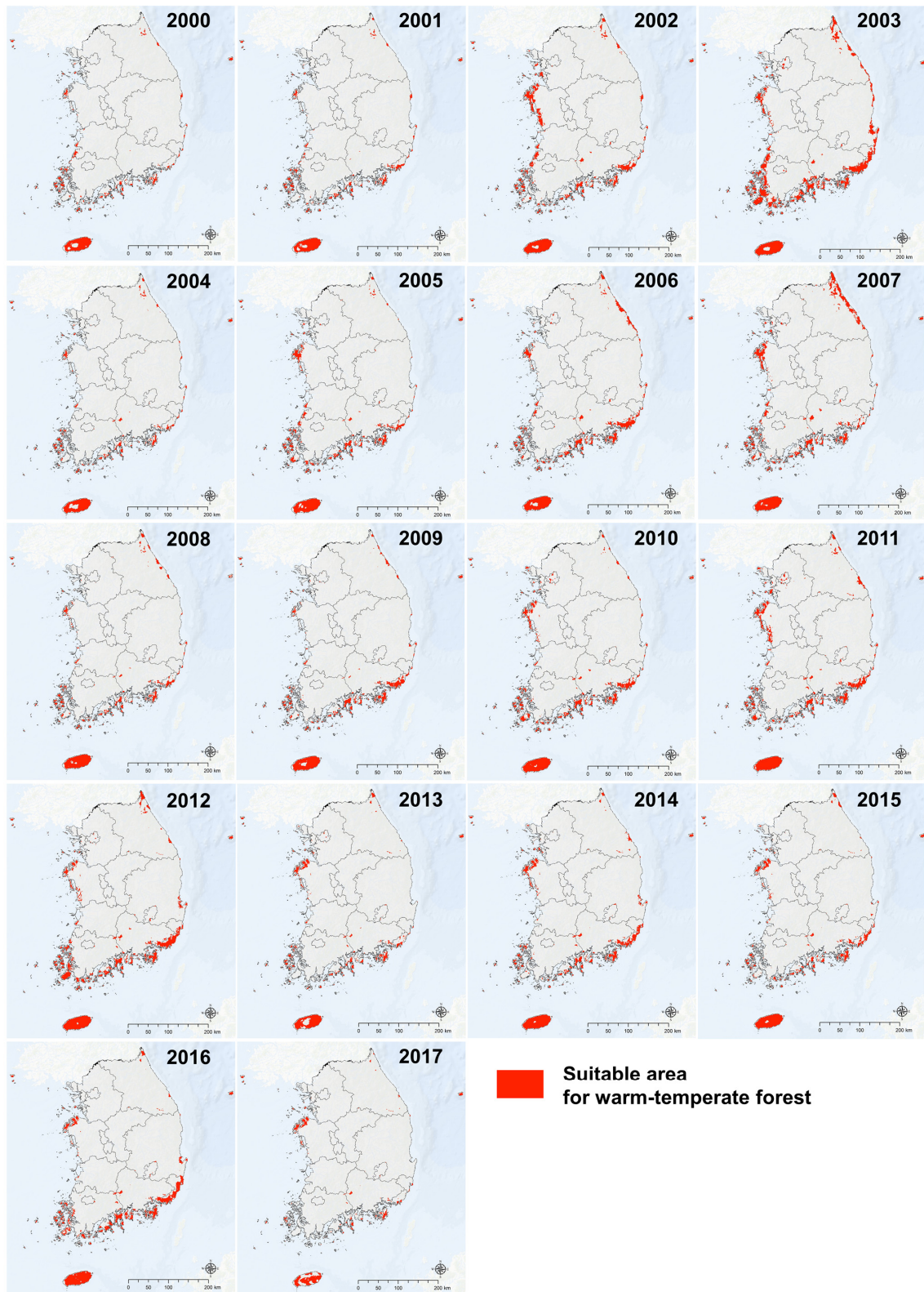


Fig. 4. Predicted habitat suitable area of warm-temperate forest in 2000 ~ 2017

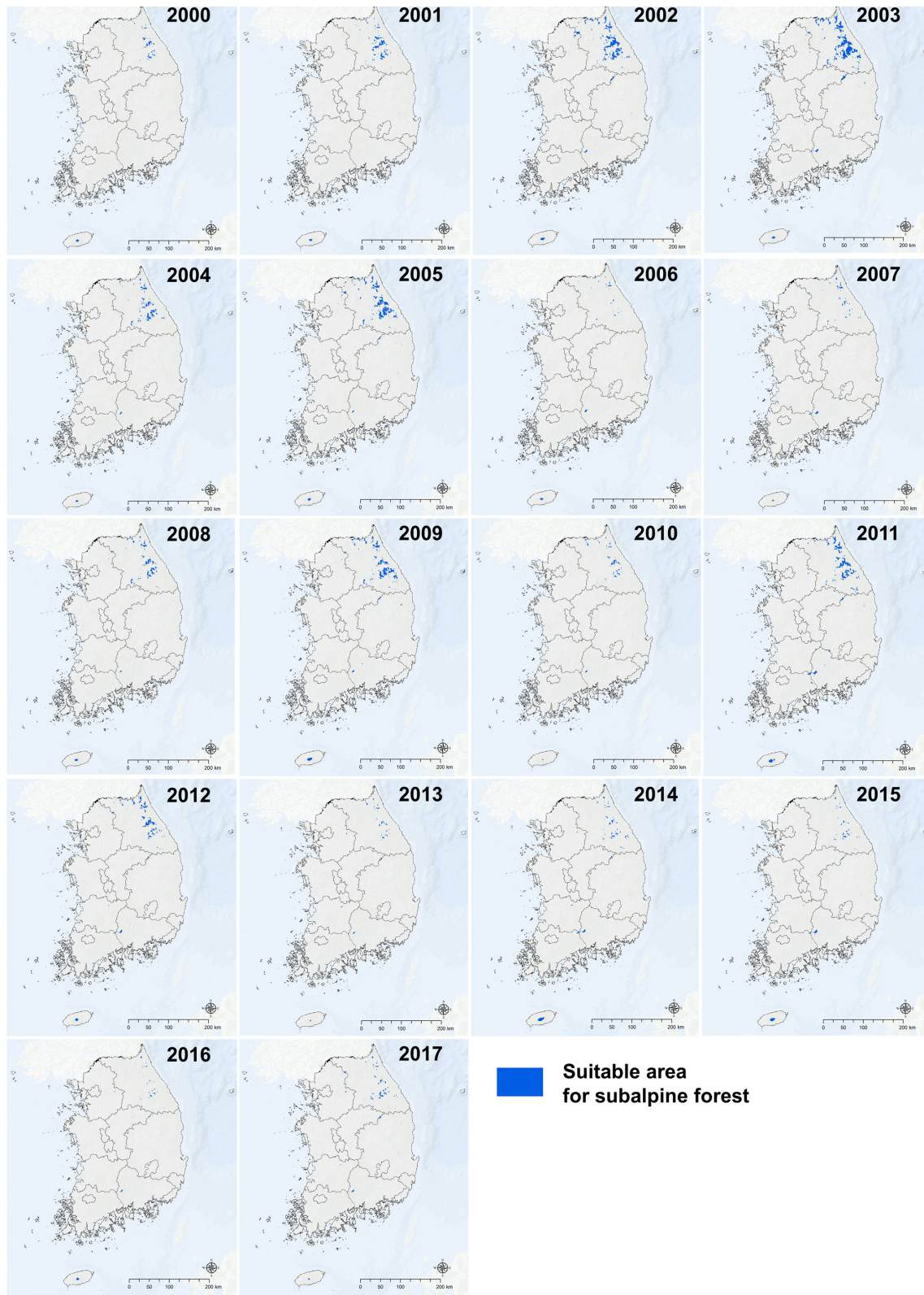


Fig. 5. Predicted habitat suitable area of subalpine forest in 2000 ~ 2017



### 3.3 난대림 및 아고산림 서식적합지역의 시계열 변화

최근의 생물기후지수를 통해 난대림과 아고산림의 연도별 서식적합지역을 시계열로 예측하였다. 난대림의 경우 과거 시기와 비교하여 두드러진 확산을 확인할 수 있었다. 연도별 편차는 크게 나타났으나, 모든 연도에서 과거 시기에 비해 넓은 서식적합지역을 보였으며, 해안지역을 중심으로 북상하는 형태를 보였다(Fig. 4). 이는 기후변화에 따른 장기 미래 변화를 예측했던 기존 연구들과 동일한 경향성이었다(Lim et al., 2018; Yoo et al., 2020). 특히 서부 해안을 따라 충남서해안에 반복하여 서식적합지역이 나타났으며, 동해안에서도 고성, 속초 등 강원북부 해안까지 북상하는 것으로 예측되었다. 2003년, 2007년, 2012년에 가장 넓은 지역에서 서식적합한 것으로 예측되었고, 면적에서도 세 시기에는 서식적합지역이 5,000 km<sup>2</sup> 이상으로 나타났다(Table 3 & Fig. 6). 이는 과거 시기에 비해 4배 이상 넓은 면적이다. 18년간 평균 4,472 km<sup>2</sup>의 면적에서 서식 적합하였으며, 평균적으로도 3배 이상 넓은 면적으로 나타났다. 다만, 최근 18년간의 변화가 점진적으로 증가한 것은 아니었다.

아고산림의 경우 서식적합지역이 현저하게 감소한 것을 공간적 및 수치적 결과에서 확인할 수 있었다(Fig. 4). 난대림과 마찬가지로 연도별 편차가 크게 나타났으나, 모든 연도에서 과거 시기에 비해 매우 적은 지역만 서식적합지역으로 예측되었다(Table 3 & Fig. 6). 특히 아고산림의 주요 서식처로 조사된 한라산, 지리산, 태백산 등의 지역에서도 적합하지 않은 연도가 빈번하게 나타났다. 장기 미래 기후변화를 예측한 기존의 연구들과 유사한 경향이지만, 예측시기를 고려하면 예상보다 빠른 전개로 이해할 수 있다(Lim et al., 2018; Yoo et al., 2020). 2006 ~ 2007년도에는 높은 산간지역에서도 아고산림 서식적합지역이 매우 제한적으로 예측되

었고, 2013년 이후에는 모든 연도에서 넓은 서식적합지역을 찾아보기 어려웠다. 18년 동안 평균 서식적합지역은 645 km<sup>2</sup>으로, 과거 시기에 비하면 1/4 이하의 매우 적은 지역에 해당했다. 최근의 기후변화 현상이 아고산림의 서식적합지역을 크게 감소시켰고, 예상보다 빠른 속도로 실제 서식에 영향을 줄 것으로 전망된 것이다.

Table 3. Time-series habitat suitable area of warm-temperate and subalpine forest (unit: km<sup>2</sup>)

	Warm-temperate forest	Subalpine forest
1970-2000	1,363	2,763
2000	2,899	273
2001	3,196	571
2002	5,277	1,318
2003	8,117	1,803
2004	3,013	622
2005	4,174	1,191
2006	5,040	161
2007	5,893	262
2008	3,617	584
2009	3,839	1,073
2010	4,743	296
2011	5,526	1,215
2012	6,019	764
2013	3,169	218
2014	4,578	433
2015	4,000	323
2016	5,247	163
2017	2,155	345

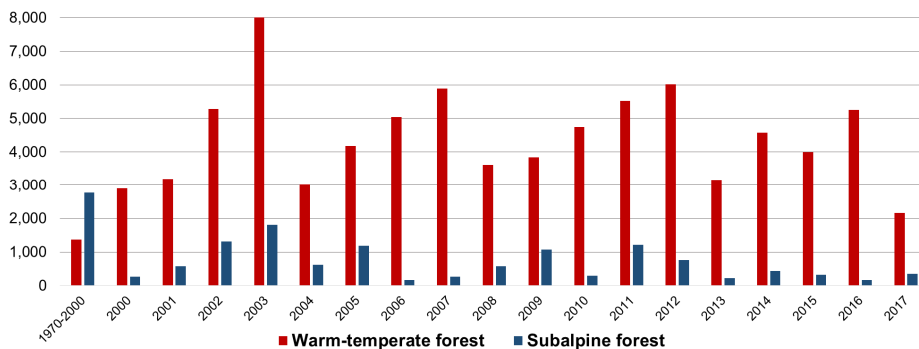


Fig. 6. Time-series habitat suitability change of warm-temperate and subalpine forest

### 3.4 서식적합지역의 출현빈도 분석

최근 18년간의 서식적합지역 예측결과를 중첩하여 기후적으로 서식에 적합한 지역과 시기의 출현빈도를 분석했다. 난대림 빈도분석 결과 누적된 예측결과들이 과거의 서식적합지역은 물론이며, 상당히 넓은 지역에서 높은 빈도의 적합지역이 나타났다. 대부분의 제주도과 남해안, 태안반도, 동해안 일부 지역에서 높은 빈도지역이 다수 나타났으며, 서울을 비롯한 수도권지역과 내륙 산간지역에서도 일부 분포하는 것으로 확인되었다(Fig. 7a). 이러한 현상이 지속될수록 난대림이 전국적으로 분포할 수 있을 것으로 예상되며, 산지에 식재하는 것뿐 아니라, 난대림을 조경수 등으로 활용하는 경우에도 서식환경이 충분히 뒷받침되어 활용성이 증가할 수 있을 것으로 사료된다.

아고산림의 경우 과거 시기 서식적합지역과 중첩하였을 때, 상당한 지역에서 현재는 한 해에도 서식에 적합하지 않았던 것으로 나타났다. 특히 과거 덕유산과 지리산 일대 및 태백산 일대에서 넓게 분포하던 서식적합지역은 현재 매우 제한적인 지역에서만 적합한 것으로 도출되었다(Fig. 7b). 위도가 높은 강원도 중북부 지역과 고도가 상대적으로 높은 지리산-한라산 지역에서만 10번 이상의 높은 빈도로 서식적합지역이 예측되었고, 그 외 지역은 대체로 빈도가 낮은 수준이었다. 이러한 결과는 2000년대에 아고산림의 서식에 불리하게 작용하여 전반적인 쇠퇴와 고사 등에 큰 영향을 주었을 가능성이 예상된다.

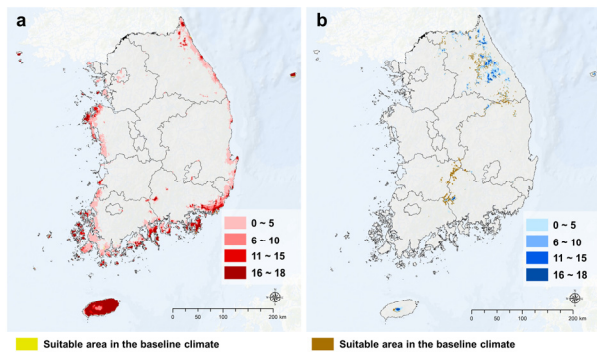


Fig. 7. Frequency analysis of habitat suitable area in the past 18 years (a: Warm-temperate forest, b: Subalpine forest)

### 3.5 아고산림과 난대림 적응에 대한 함의

국립산림과학원이나 국립공원관리공단, 혹은 개별연구자에 의해 조사된 자료에서 2010년대에 많은 아고산림들

이 집단고사한 것으로 보고되었다(Chun et al., 2019; Kim et al., 2019a; Park et al., 2020). 조사자료나 면적통계에서도 집단 고사가 두드러지게 나타난 한라산, 지리산, 덕유산 일대의 결과를 확대해 보면, 과거에 비해 서식적합지역이 현저하게 감소한 것을 확인할 수 있다(Fig. 8). 최근에 발견된 구상나무 등의 집단 고사는 기후적 서식적합지역의 감소가 누적되어 나타난 기후변화의 영향임이 본 연구를 통해 분명하게 나타난 것이다. 2000년대 이후 구상나무, 눈잣나무 등 멸종위기 아고산림의 복원을 위해 다양한 사업들이 추진되고 있으나, 남부지역에서는 기후적으로 적합한 산지가 지속적으로 감소하여 복원 가능 지역이 매우 제한적일 것으로 나타났다. 가속화되는 기후변화를 고려하여 아고산림 복원을 위해서는 보다 보수적인 지역 선정이 필요할 것으로 예상된다.

기존 아고산림이나 난대림의 기후변화 연구는 대체로 2050년대 이후의 장기 미래를 대상으로 예측해왔는데 (Park et al., 2016; Lim et al., 2018; Yoo et al., 2020), 이번 연구를 통해 최근의 기후변화가 서식처 측면에서 이미 많은 영향을 미치고 있음을 시사하였다. 장기 기후변화의 영향을 모의한 기존 연구들과 본 연구는 동일한 경향성을 보였으나, 2010년대를 모의한 본 연구와 2050년대를 모의한 기존 연구의 결과에 큰 차이가 없었다. 특히 아고산림의 경우에는 더욱 격차가 적었고, 이는 전지구기후모형과 대표농도경로에 의한 미래 기후예측에 비해 최근의 기후가 더 빠르게 변화하고 있으며 그 영향을 산림생태계가 받고 있음을 설명하는 것이다.

기후적 요인에 의한 아고산림의 빠른 쇠퇴는 동시에 난대림의 복상을 의미한다. Tradeoff 관계를 갖는 두 지표 수종들의 변화는 위기와 기회가 공존하고 있음을 말하고 있다. 동-서해안을 중심으로 확산되는 난대림의 서식적합지역은 신규조림이나 벌채 후 재조림 등 산림사업에서 고려될 필요가 있다. 기존 장기 미래 기후변화를 고려한 연구와 종합하면 21세기 전반적으로 서식에 적합할 것으로 사료되므로, 현재 시점에서도 모든 해안지역에는 난대림의 식재가 유효할 것으로 예상된다. 또한 난대림을 중심으로 기후변화 적응에 유리한 유망수종들의 재배기술 및 지역을 확대하여 신품종 산업과 산림바이오산업을 연계하여 추진할 필요가 있다. 수도권 지역에서는 난대수종을 가로수, 정원수 등으로의 활용 가능한 시기가 앞당겨지고 있음을 시사한다.

종합적으로 최근의 관측된 기후변화는 난대림이나 아고산림이 적응할 수 있는 서식이동속도에 비해 빠른 속도로

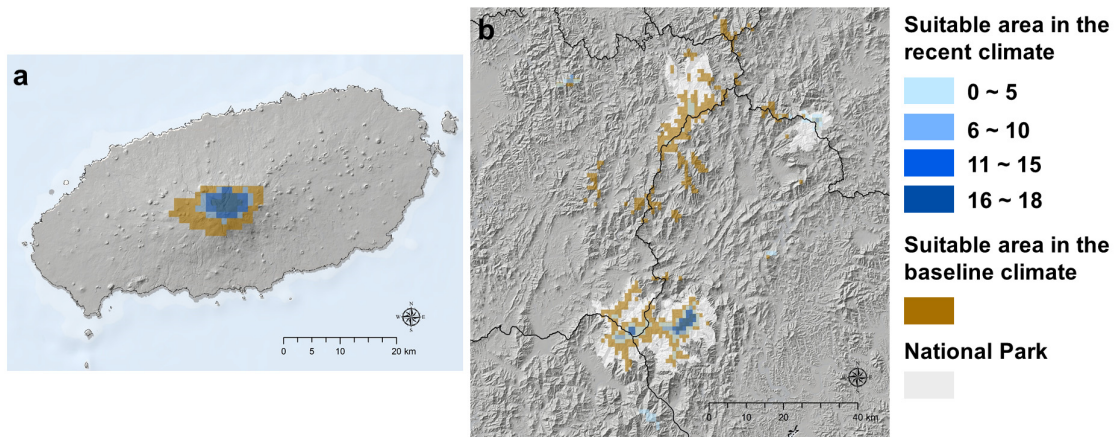


Fig. 8. Highly impacted area for subalpine forest (a: Hallasan, b: Jirisan and Deogyusan)

영향을 주고 있는 것이 확인되었다. 자연적인 보전만으로는 산림자원을 보호 및 육성할 수 없음이 드러난 것이다. 특히 백두대간지역과 남부지역은 장기적 측면에서도 생물 다양성 보전에 시급성이 높은 지역으로 제시된 바 있으므로(Choi et al., 2019), 우리나라 고유의 수종과 산림자원을 보전하기 위해서는 보다 적극적인 적응의 이행이 요구되는 시점이라 할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 기계학습 모형과 최근의 기후정보를 활용하여 기후변화 영향이 두드러지는 난대림, 아고산림 지표수종들의 시계열 서식적합지역을 예측하여 단기적인 기후변화 현상과 영향을 확인하였다. 지수별 차이가 존재했으나, 최근의 생물기후지수들은 과거 시기에 비해 온난화되고 강수의 계절성이 증가한 것으로 나타났다. 기계학습 기반의 RF모형과 생물기후지수를 통해 추정된 과거 난대림 및 아고산림의 서식적합지역은 실제 자연림 분포와 매우 유사했으며 통계적으로도 우수한 수준을 보였다. 최근 18년간의 예측결과, 난대림의 경우 연편차가 크게 나타났으나 뚜렷한 확장세를 보였고, 특히 동·서해안으로의 북상이 두드러졌다. 평균적으로 서식적합지역은 3배 이상 증가한 것으로 나타났다. 아고산림의 경우 서식적합지역이 큰 폭으로 감소하여 남부 아고산지역에는 서식적합지역이 매우 제한적으로 분포하였으며, 2013년 이후에는 적합지역을 거의 찾아보기 어려웠다. 평균면적에서도 과거 시기 대비 23% 수준으로, 감소 폭이 상당히 큰 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 2010년대에 자주 관찰된 아고산림

집단고사와 매우 큰 관련성이 있을 것으로 판단되며, 누적된 기후적 부적합성이 이미 아고산림의 고사를 야기하고 있음을 의미한다. 다만 본 연구에서 제시하는 수치는 기계학습에 의한 예측치이므로, 실제 서식하고 있는 면적이 아닌 최근의 기후변화 영향에 따라 변화하는 잠재 서식적합 지역으로 이해해야 한다. 지표수종들에 대한 기후변화 영향은 수종에 따라 위기가자 기회이며, 현명한 적응과 대책들이 더 많은 기회를 만들 수 있을 것이라 기대한다.

#### 사사

본 연구는 한국임업진흥원(산림청) 산림융복합 전문인력 양성사업(과제번호: 2020183C10-2022-AA02)의 지원으로 수행되었습니다.

#### References

Breiman L, 2001. Random forests. *Machine Learning*. 45(1): 5-32.

Cha S, Lim CH, Kim JW, Kim M, Song C, Lee WK, 2018. Analysis of Landslide Hazard Area due to Heavy Rainfall in the Seoul Metropolitan Area. *J Kor Geo Inform Sci*. 26(3): 3-11. [in Korean with English abstract]

Choe HY, James HT, Robert H, Kim JY, Kwon HS, Seo CW, 2017. Meta-corridor solutions for climate-vulnerable plant species groups in South Korea.

- J Applied Ecology 54: 1742-1754.
- Choi S, Lee WK, Kwak DA, Lee S, Son Y, Lim JH, Saborowski J. 2011. Predicting forest cover changes in future climate using hydrological and thermal indices in South Korea. *Clim Res* 49(3): 229-245.
- Choi Y, Lim CH, Chung HI, Ryu J, Jeon SW. 2019. Novel Index for bioclimatic zone-based biodiversity conservation strategies under climate change in Northeast Asia. *Environ Res Lett* 14(12), 124048.
- Chun YM, Lee HY, Gwon JH, Park HC, 2019. Monitoring on the Structure and Dynamics of *Abies nephrolepis* Populations in Seoraksan National Park. *Kor. J Env. Eco.* 33(3): 565-577. [in Korean with English abstract]
- Chung HI, Choi Y, Ryu J, Jeon SW, 2020. Accuracy Evaluation of Potential Habitat Distribution in *Pinus thunbergii* using a Species Distribution Model: Verification of the Ensemble Methodology. *J Climate Change Res* 11(1): 37-51. [in Korean with English abstract]
- Daly C, Gibson WP, Taylor GH, Johnson GL, Pasteris PP, 2002. A knowledge-based approach to the statistical mapping of climate, *Clim Res* 22: 99-113.
- Daly C, Helmer EH, Maya Q, 2003, Mapping the Climate of Puerto Rico, Vieques and Culebra, *International J Climatology* 23: 1359-1381.
- Hwang S, Toon J, Lee D, Noh H, 2020. Status of Flood Forecasting and Warning Technology in Korea. *J Kor Soc Civil Engineers* 68(9): 74-83 [in Korean]
- IPCC, 2019: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press.
- Kim ES, Lee JS, Park GE, Lim JH, 2019. Change of subalpine coniferous forest area over the last 20 years. *J Korean For Soc* 108(1): 10-20. [in Korean with English abstract]
- Kim HH, Kim DB, Won HK, Kim CS, Kong WS, 2016. Island-Biogeographical Characteristics of Insular Flora in Southern Sea of Jeollanamdo, Korea. *J Climate Change Res.* 7(2): 143-155. [in Korean with English abstract]
- Kim HS, Lee SM, Song HK. 2011. Actual Vegetation Distribution Status and Ecological Succession in the Deogyusan National Park. *Kor. J Env. Eco.* 25(1): 37-46.
- Kim MK, Han MS, Jang DH, Baek SG, Lee WS, Kim YH, Kim S, 2012. Production Technique of Observation Grid Data of 1km Resolution. *J Clim Res.* 7(1): 55-68. [in Korean with English abstract]
- Kim SJ, Lim CH, Kim GS, Lee J, Geiger T, Rahmati O, Son Y, Lee, WK, 2019. Multi-temporal analysis of forest fire probability using socio-economic and environmental variables. *Remote Sensing*, 11(1): 86.
- Kim YS, Chang CS, Kim CS, Gardner M. 2011. *Abies koreana*. The IUCN Red List of Threatened Species 2011: e.T31244A96 18913.
- Koo KA, Kong WS, Nibbelink NP, Hopkinson CS, Lee JH, 2015. Potential effects of climate change on the distribution of cold-tolerant evergreen broadleaved woody plants in the Korean Peninsula, *PLoS ONE* 10(8): e0134043.
- Korea Environment Institute (KEI). 2015. Measures for Strengthening the Ecosystem Environment Security in Responding to Climate Change : An Approach to Improving Ecosystem Management for Climate Change Adaptation. Sejong
- Lee HD, Min KH, Bae JH, Cha DH, 2020. Characteristics and Comparison of 2016 and 2018 Heat Wave in Korea. *Atmosphere.* 30(1): 1-15. [in Korean with English abstract]
- Li D, Wu S, Liu L, Zhang Y, Li S, 2018. Vulnerability of the global terrestrial ecosystems to climate change. *Glob change bio* 24(9): 4095-4106.
- Lim CH, Kim D, Shin Y, Lee WK, 2015. Assessment of Drought Severity on Cropland in Korea Peninsula

- using Normalized Precipitation Evapotranspiration Index (NPEI). *J Climate Change Res.* 6(3): 33-231. [in Korean with English abstract]
- Lim CH, Kim SH, Choi Y, Kafatos MC, Lee WK. 2017. Estimation of the virtual water content of main crops on the Korean Peninsula using multiple regional climate models and evapotranspiration methods. *Sustainability* 9(7): 1172.
- Lim CH, Yoo S, Choi Y, Jeon SW, Son Y, Lee WK. 2018. Assessing climate change impact on forest habitat suitability and diversity in the Korean Peninsula. *Forests* 9(5): 259.
- Lim CH, Kim SH, Chun JA, Kafatos MC, Lee WK. 2019. Assessment of agricultural drought considering the hydrological cycle and crop phenology in the Korean Peninsula. *Water* 11(5): 1105.
- Lim CH, Kim YS, Won M, Kim SJ, Lee WK, 2019. Can satellite-based data substitute for surveyed data to predict the spatial probability of forest fire? A geostatistical approach to forest fire in the Republic of Korea. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 10(1): 719-739.
- Nolan C, Overpeck JT, Allen JR, Anderson PM, Betancourt JL, Binney HA, Djamali M 2018. Past and future global transformation of terrestrial ecosystems under climate change. *Science*, 361(6405): 920-923.
- Park HC, Moon GS, Lee H, Lee NY, 2020. A Study on the Spatial Information and Location Environment of Dead Coniferous Tree in Subalpine Zone in Jirisan National Park -Focus on Korean Fir(*Abies koreana*) in Banyabong, Yeongsinbong, Cheonwangbong-. *Kor. J Env. Eco.* 34(1): 42-54. [in Korean with English abstract]
- Park SU, Koo KA, Kong WK, 2016. Potential Impact of Climate Change on Distribution of Warm Temperate Evergreen Broad-leaved Trees in the Korean Peninsula. *J Kor Geographical Soc.* 51(2): 201-217. [in Korean with English abstract]
- Park SU, Koo KA, Kong WS, 2019. Climate-related Range Shifts of Climate-sensitive Biological Indicator Species in the Korean Peninsula: A role of dispersal capacity. *J Climate Change Res.* 10(3): 185-198. [in Korean with English abstract]
- Pearson RG. 2007. Species' distribution modeling for conservation educators and practitioners. *Synthesis.* American Museum of Natural History, 50.
- Shin MS, Seo C, Park SU, Hong SB, Kim JY, Jeon JY, 2018. Prediction of Potential Habitat of Japanese evergreen oak (*Quercus acuta* Thunb.) Considering Dispersal Ability Under Climate Change. *J Korea Environ Imp Ass* 27(3): 291-306. [in Korean with English abstract]
- Shin SC, Kim MK, Suh MS, Rha DK, Jang DH, Kim CS, Lee WS, Kim YH, 2008. Estimation of High Resolution Gridded Precipitation Using GIS and PRISM. *Atmosphere* 18(1): 71-81.
- Smith TM, Reynolds RW, Peterson TC, Lawrimore J. 2008. Improvement to NOAA's historical merged land-Ocean surface temperature analysis(1880-2006). *J Clim* 21: 2283-2296.
- Xue F, Zhao JJ. 2017. Intraseasonal variation of the East Asian summer monsoon in La Niña years. *Atmos Oceanic Sci Lett* 10(2): 156-161.
- Yoo S, Lim CH, Kim M, Song C, Kim SJ, Lee WK, 2020. Potential Distribution of Endangered Coniferous Tree Species under Climate Change. *J Climate Change Res* 11(4): 215-226. [in Korean with English abstract]
- Yun JI, Choi JY, Ahn JH. 2001. Seasonal trend of elevation effect on daily air temperature in Korea. *Korea J Agri For Meteorol* 3: 96-104. [in Korean with English abstract]
- Zhang D, Katsuki T, Rushforth K. 2013. *Abies nephrolepis*, The IUCN Red List of Threatened Species, Version 2014.3, <[www.iucnredlist.org](http://www.iucnredlist.org)>, Downloaded on 09 January 2015.
- Zhang, R., Min, Q., & Su, J. (2017). Impact of El Niño on atmospheric circulations over East Asia and rainfall in China: Role of the anomalous western North Pacific anticyclone. *Science China Earth Sciences*, 60(6), 1124-1132.