

SSP 시나리오에 따른 국내 용재수종의 서식지 적합도 평가

안현권, 임철희^{1,*}

국민대학교 산림환경시스템학과, ¹국민대학교 교양대학

Assessing habitat suitability for timber species in South Korea under SSP scenarios

Hyeon-Gwan Ahn and Chul-Hee Lim^{1,*}

Department of Forestry, Environment, and Systems, Kookmin University, Seoul 02707, Republic of Korea

¹College of General Education, Kookmin University, Seoul 02707, Republic of Korea

***Corresponding author**

Chul-Hee Lim

Tel. 02-910-6569

E-mail. clim@kookmin.ac.kr

Received: 9 November 2022

Revised: 20 December 2022

Revision accepted: 21 December 2022

Abstract: Various social and environmental problems have recently emerged due to global climate change. In South Korea, coniferous forests in the highlands are decreasing due to climate change whereas the distribution of subtropical species is gradually increasing. This study aims to respond to changes in the distribution of forest species in South Korea due to climate change. This study predicts changes in future suitable areas for *Pinus koraiensis*, *Cryptomeria japonica*, and *Chamaecyparis obtusa* cultivated as timber species based on climate, topography, and environment. Appearance coordinates were collected only for natural forests in consideration of climate suitability in the National Forest Inventory. Future climate data used the SSP scenario by KMA. Species distribution models were ensemble to predict future suitable habitat areas for the base year (2000–2019), near future (2041–2060), and distant future (2081–2100). In the baseline period, the highly suitable habitat for *Pinus koraiensis* accounted for approximately 13.87% of the country. However, in the distant future (2081–2100), it decreased to approximately 0.11% under SSP5-8.5. For *Cryptomeria japonica*, the habitat for the base year was approximately 7.08%. It increased to approximately 18.21% under SSP5-8.5 in the distant future. In the case of *Chamaecyparis obtusa*, the habitat for the base year was approximately 19.32%. It increased to approximately 90.93% under SSP5-8.5 in the distant future. *Pinus koraiensis*, which had been planted nationwide, gradually moved north due to climate change with suitable habitats in South Korea decreased significantly. After the near future, *Pinus koraiensis* was not suitable for the afforestation as timber species in South Korea. *Chamaecyparis obtusa* can be replaced in most areas. In the case of *Cryptomeria japonica*, it was assessed that it could replace part of the south and central region.

Keywords: timber species, ensemble, SSP scenarios, climate change, habitat suitability

서 론

최근 전 세계적으로 가속화되는 기후변화로 인해 다양한 사회·환경 문제들이 대두되고 있다. 기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 발간한 지구온난화 1.5°C 특별보고서에서는 최근 평균온도가 산업화 이전 대비 약 1.0°C가 증가하였으며, 2052년에는 1.5°C가 상승할 것이라 제시하였다(IPCC 2018). 최근에 발간된 IPCC 제6차 보고서에서는 2040년 무렵 1.5°C가 증가하여 앞서 발간한 특별보고서에 비해 10년 이상이 감축되어 지구온난화로 인해 기후변화가 급격하게 진행되고 있다고 언급하였다(IPCC 2021).

우리나라의 경우 2022년의 사례만 보아도 많은 기후재해가 발생하였다. 충청 및 영남지방의 가뭄과 수도권 및 강원지역의 집중호우, 울진의 산불 등이 인간과 자연환경에 큰 영향을 주었다. 특히, 가뭄과 홍수 등 수문학적 재해는 산불과 산사태로 이전되어 산림생태계에 많은 교란을 야기하고 있다(Lim *et al.* 2019; Lim and Kim 2022). 폭염과 국지적 한파, 지속적 온난화는 수종별 생장이나 서식처 질에도 많은 영향을 준다(Yoon *et al.* 2022). 즉, 넓은 토지공간을 차지하여 관리와 적응이 제한적인 산림생태계는 기후변화에 완전하게 노출되어 있다고 볼 수 있다. 장기적으로도 극한기상현상의 증가는 산림생태계에 교란 요인으로 작용하여 미래의 산림생태계에 큰 위협이 될 것으로 예상된다(Lee 2022). 현재는 아고산 지역의 침엽수림이 산림생태계의 기후변화 영향을 가장 적나라하게 보여주고 있는데(Lim and Kim 2020; Yoo *et al.* 2020), 기후변화가 장기화될수록 그 영향은 한반도 전역으로 확대될 것으로 전망되고 있다(Lim *et al.* 2018).

우리나라는 산림분야에서도 기후변화 대응을 위한 다양한 정책을 수립하였다. 그중 6차 산림기본계획에서는 산림자원 및 산지관리체계 고도화를 통한 산림 역할 강화를 제시하고 있다. 특히, 국가 온실가스 감축 목표 달성을 위해 경제림 육성단지를 거점으로 탄소 흡수력이 높은 수종으로 갱신하고, 국산 목재 이용의 확대를 계획하고 있다(KFS 2018). 수목을 가구재, 건축재 등 목재로 이용하면 탄소를 고정하는 역할을 하게 되며 이는 온실가스 감축에 기여할 수 있다(Zhang *et al.* 2020; Lim and Choi 2021). 이에 6차 산림기본계획에서는 목재를 활용한 기후변화 대응을 위해 2030년까지 2015년도 목재생산량보다 70% 이상 증가하는

것을 목표로 삼고 있다.

다만, 기후변화의 산림생태계 영향이 목재를 생산하는 용재수종에도 유효하다는 점을 고려해야 한다. 우리나라 평균기온이 1°C 상승할 경우 용재수종으로 사용되는 졸참나무, 서어나무, 개서어나무의 점유율은 증가하지만 잣나무와 신갈나무는 감소할 것이라 전망하였다(Ahn *et al.* 2009). 특히, 현재 아고산 침엽수림의 서식공간이 급격히 감소하는 것처럼, 장기전망에서는 현재 중부지방에 식재되는 침엽수림의 서식공간이 크게 감소할 것으로 전망되고 있다(Cui *et al.* 2016). 목재생산량을 증대시키기 위해서는 변화하는 기후에 적합한 용재수종을 선정하고 식재하는 과정이 필요한 것이다.

이에 본 연구에서는 국내에서 목재로 생산하고 있는 용재수종들을 대상으로 신기후변화 시나리오에 따른 서식지 적합도를 평가하고자 한다. 기계학습기반의 종분포모델 앙상블 기법에 기후·지형인자 및 수종별 위치정보를 활용하여 기후변화로 인한 서식지 적합도의 변화를 예측한다. 특히 현재까지 중점적으로 조림되던 용재수종과 난대·아열대 용재수종을 함께 모의하여 앞으로의 수종대체 가능성을 확인하고자 한다. 이러한 접근은 기존에 조림되고 있던 용재수종의 난대·아열대 수종으로 대체 가능성을 평가하고 앞으로의 용재수종 선정에 대한 과학적 정보를 제공할 수 있을 것이다.

재료 및 방법

1. 연구대상지 및 범위

본 연구는 우리나라 전체 국토를 대상으로 수행하였다. 우리나라는 북위 33°~39°, 동경 124°~131° 사이에 위치하며 전체 면적은 약 100,412 km²다. 전체 면적 중 약 63.3%가 산림이며 대부분 산은 동부와 북부에 위치한다. 최근 우리나라의 연 평균기온은 약 13.3°C, 연 강수량은 약 1,300 mm, 평균 상대습도는 68%이다(KFS 2021). 다만, 기후변화에 따라 최근에도 기온의 상승과 강수계절성 변화가 관측되어 산림서식처에 영향을 주고 있으며(Lim and Kim 2020), 미래 기후전망에서는 연 평균기온이 최대 7°C까지 상승할 수 있는 것으로 예상되고 있다(KMA 2021).

분석에 사용한 데이터는 기후자료의 공간해상도를 고려해 전체 공간해상도는 1 km²로 설정하였으며, 대상 시기는

2000~2019년을 현재 시기로, 2041~2060년을 근미래로, 2081~2100년을 먼미래의 기후변화에 따른 영향의 시기로 선정하였다.

2. 수종 위치정보

본 연구에서는 기후변화로 인한 우리나라 산림의 수종별 서식지역 변화에 대응하기 위하여 세 가지 용재수종을 활용하였다. 현재 기후에 적합한 수종의 경우 전국적으로 조림 및 분포하며 조림되고 있는 잣나무(*Pinus koraiensis*)와 미래 용재수종으로는 제주도과 남해안 도서 지역에서 주로 조림 및 분포하고 있는 삼나무(*Cryptomeria japonica*)와 편백(*Chamaecyparis obtusa*)을 선정하였다(Fig. 1). 세 수종의 위치정보 추출을 위해 전국 약 4,500개의 표본점을 조사하는 국가산림자원조사(NFI; National Forest Inventory) 자료 중 가장 최근 자료인 제7차 NFI(2016~2020) 자료에서 기후적합도를 고려하여 천연림에서만 잣나무와 삼나무, 편백의 위치정보를 추출하였다. 잣나무는 침엽수종 중 소나무와 편백, 낙엽송과 더불어 많이 조림되는 침엽수종이며(KMS 2021) 기후변화의 영향으로 피해를 입을 가능성이 높은 기후변화 취약 산림식물종 100종에 포함되어 있다(Lim et al. 2016). 편백은 피톤치드로 인한 독특한 향과 영향으로 인해 목재와 건축재료 수요가

많아 산지 소유주들이 조림을 희망하는 인기가 많은 용재수종 중 하나이며(Joung et al. 2020), 삼나무 또한 피톤치드의 함유량이 높으며 방풍림으로도 사용되고 있는 수종이다(Kim et al. 2013; Kim et al. 2017). 세 수종은 모두 상록침엽교목이며 산림청에서 선정한 권장 용재수종이라는 공통점을 가지고 있다.

3. 환경 변수

본 연구에서 기후변수로는 19가지 생물기후변수와 WI(Warmth Index)를 이용하였다. 생물기후변수를 제작하기 위해선 최고기온, 최저기온, 누적 강수량에 대한 자료가 필요하다. 현재시기의 기후정보인 기상청에서 제작한 MK-PRISM v2.1 자료와 근미래와 먼미래의 기후변화 시나리오인 SSP(Shared Socioeconomic Pathways)를 기상청이 운영하는 기후정보포털을 통해 제공받았다. MK-PRISM v2.1 자료는 종관기상관측장비(Automated Synoptic Observing System)와 방재기상관측장비(Automatic Weather Station)의 기상관측자료를 PRIDE(PRISM based Dynamic down-scaling Error correction) 모델에 적용하여 2000~2019년의 일별 및 월별, 연간의 격자 단위 기후자료를 제공한다. MK-PRISM(Modified Korea - Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model) 기법은 고도, 거리, 지향면,

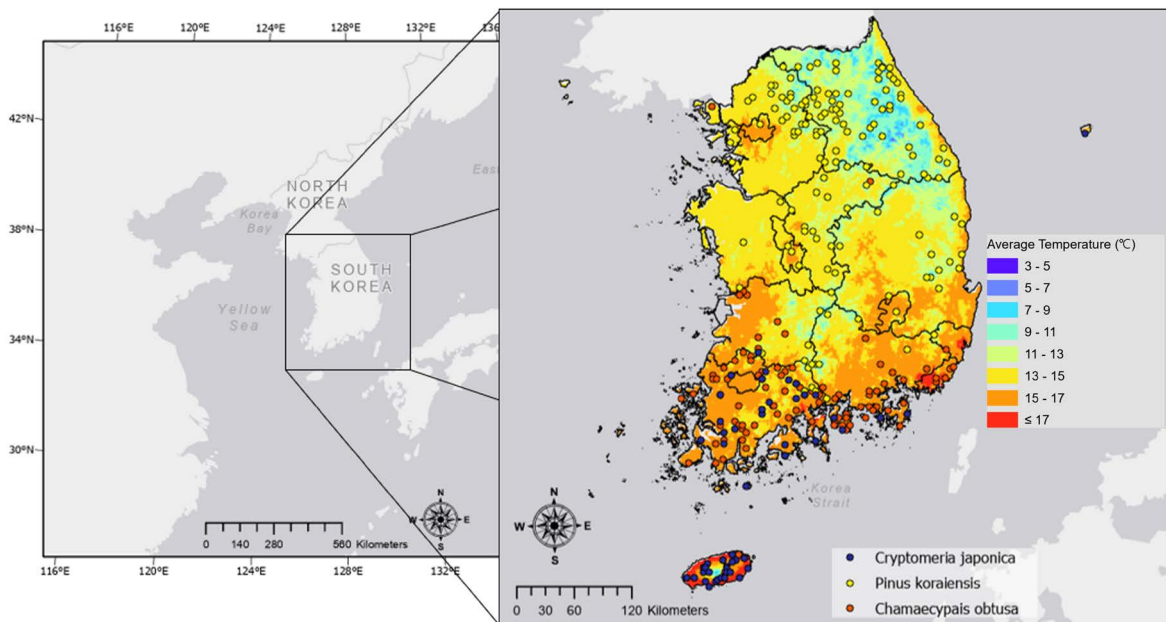


Fig. 1. Study area with average temperature and species distribution.

해양도의 영향을 고려하여 고해상도의 격자 자료를 산출하는 PRISM (Parameter-elevation Regression on Independent Slopes Model)을 대한민국에 맞게 수정한 PRISM이며 PRIDE 모델은 관측 해상도보다 더 고해상도로 기후변화 시나리오를 통계적으로 상세화하는 모델이다(Lim and Kim 2022). IPCC 5차 평가보고서에 사용된 RCP (Representative Concentration Pathways) 시나리오는 온실가스 농도의 변화만 고려하여 제작되었지만 6차 평가보고서에 기반한 SSP 시나리오는 인구통계, 경제발달, 복지, 생태계 요소, 자원, 제도, 기술 발달, 사회적 인자, 정책 등 미래사회경제와 온실가스 농도 전망을 함께 반영하여 보다 미래 전망에 대해 현실성을 개선한 시나리오이다. SSP 시나리오 데이터는 영국 기상청 해들리센터의 전지구기후모델(HadGEM2-AO)을 기반으로, 지역기후모델인 HadGEM4-RA, WRF, CCLM, GRIMs, RegCM4의 앙상블 결과를 사용하였다. 본 연구에서는 재생에너지 기술의 발달로 온실가스 감축이 성공적으로 수행되어 화석연료 사용이 최소화되고 친환경적이고 지속가능한 경제 성장을 가정하는 SSP1-2.6 시나리오와 온실가스 감축이 미이행되어 화석연료 사용이 증가하고 도시 위주의 개발이 확대될 것을 가정하는 SSP5-8.5의 시나리오를 사용하였다. SSP1-2.6과 SSP5-8.5 시나리오는 온실가스 감축과 사회변화에 대해 가장 큰 차이를 볼 수 있는 시나리오이다. 특히 SSP1-2.6 시나리오는 IPCC가 2100년까지 지구 평균온도 상승폭을 1.5°C로

제한하기 위해서는 2050년까지 전 지구적으로 탄소중립을 실현해야 한다고 제시하였으므로(IPCC 2021), 2050 탄소중립이 실현되었을 경우와 가장 가까운 시나리오이다.

위의 기후정보를 활용하여 19가지 생물기후변수를 제작하였다. 생물기후변수는 식물의 분포 및 생장에 관계성이 높은 기후요소로 구성된 변수들로, 이를 활용하여 수종의 분포와 서식처를 예측하는 많은 선행 연구가 존재하였다(Chun *et al.* 2015; Lee *et al.* 2021). R프로그래밍 언어(Version 3.6.1)에서 R Studio의 'dismo' 패키지를 이용하여 19가지 생물기후변수를 제작하였으며 변수 간 다중공선성(Multicollinearity)을 제거하기 위해 Pearson 상관관계분석을 시행하였다. 변수 간 연관성(상관계수 0.9 이상)이 높은 변수들은 모델 적용에서 제외하였고, 상관계수가 높은 두 변수 중 선행 연구에서 식물의 분포에 영향이 높은 것으로 제시된 변수를 선정하였다. 선정된 생물기후변수는 Table 1과 같다.

추가적으로 WI를 분석에 포함하였다. WI는 월평균기온 5°C 이상인 달에 대하여 월평균기온과 5°C와의 차를 1년 동안 합한 값으로, 식물 성장에는 일정량 이상의 열이 필요하다는 전제로 제작되었다. 기온을 이용하여 식물의 분포 및 이동을 설명할 수 있는 대표적 지수이다(Park *et al.* 2012).

지형 자료의 경우, Worldclim (www.worldclim.org)에서 제공하는 수치표고모델을 토대로 지형위치지수(Topogra-

Table 1. Description of variables in this study

Variable	Variable name	Description
Climate factor	BIO1	Annual Mean Temperature
	BIO2	Mean Diurnal Range (Mean of monthly (max temp - min temp))
	BIO3	Isothermality
	BIO5	Max Temperature of Warmest Month
	BIO6	Min Temperature of Coldest Month
	BIO7	Temperature Annual Range
	BIO12	Annual Precipitation
	BIO15	Precipitation Seasonality
	BIO18	Precipitation of Warmest Quarter
	BIO19	Precipitation of Coldest Quarter
Soil factor	Warmth Index	Warmth Index
Soil factor	Soil pH	Soil pH
Topographical factor	TPI	Topographic Position Index
	TWI	Topographic Wetness Index

phic Position Index)와 지형습윤지수(Topographic Wetness Index)를 제작하여 사용하였다. 토양 자료는 ISRIC (data.isric.org)에서 제공하는 토양 pH를 사용하였다.

4. 종 분포 예측 모델 및 앙상블

본 연구에서는 기계학습 알고리즘을 토대로 용재수종의 출현지점과 생물기후지수를 학습시켜 적합 서식지를 예측하였다. 분석에 사용한 기계학습 알고리즘은 BIOMOD2 모형에서 제공하는 통계 기반의 Generalized Linear Models (GLM), Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS)와 기계학습 기반의 Random Forest (RF), Maximum Entropy (Maxent), Generalized Boosted Models (GBM), Artificial Neural Networks (ANN), Classification Tree Analysis (CTA), Flexible Discriminant Analysis (FDA)로 총 8가지의 모델을 분석에 이용하였다. MaxEnt 모델을 제외한 나머지 7개의 모델은 모두 종의 출현-비출현 형태의 자료가 필요한 모형이다. 실제 출현-비출현좌표를 이용하는 것이 정확도가 높다는 선행 연구에 따라 NFI의 출현좌표 중 대상 수종을 제외한 출현좌표를 비출현좌표로 선정하였다(Seo *et al.* 2008; Lee *et al.* 2021). 이후 선정된 비출현좌표를 출현좌표와 비출현좌표의 비율이 3대 7이 되도록 무작위 추출하였다. 8개의 모델을 10회 반복 시행하여 AUC 값이 0.7 이상인 결과와 CV (Committee Averaging) 앙상블 방법론을 기반으로 앙상블을 진행하였다. 앙상블은 종 분포 단일 모형의 오차 및 불확실성을 보완할 수 있는 방법론으로 많은 선행 연구에서 이용된 검증된 방법론이다(Park *et al.* 2016; Noce *et al.* 2017; Khan and Verma 2022). 종 분포 모델과 앙상블 모델에 대한 정확도를 ROC (Receiver Operating Characteristic) 곡선의 AUC (Area Under the Curve) 값을 통해 측정하였다. AUC 값은 0에서 1 사이의 값으로, 1에 가까울수록 정확도가 높으며 AUC가 0.7 이상이면 모델의 설명력이 좋은 것을 의미한다(Lee *et al.* 2018). 모형 검증은 훈련자료(training data)와 시험자료(test data)를 80대 20으로 나누어 3회 반복 시행하였다. 단일 모델 및 앙상블한 결과는 서식 적합성이 0과 1 사이의 값으로 나타나며 적합성을 동일 간격(equal interval)을 통해 5개의 등급으로 구분하였다. 0.2 이하는 서식지로 부적합한 지역, 0.2 초과 0.4 이하는 서식지 적합도가 낮은 지역, 0.4 초과 0.6 이하는 서식지로 적합한 지역, 0.6 초과 1 이하는 서식지로 매우 적합한 지역으로 분류하였다(Li *et al.* 2020).

결과 및 고찰

1. 모델의 정확도 및 인자별 중요도 평가

8가지 모델의 10회 반복 시행 결과는 아래 Table 2와 같다. 모델들 중 비교적 CTA와 ANN이 낮게 평가되고 RF, MaxEnt, GBM, GLM이 높게 평가되었다. 8가지 모델을 앙상블한 모델의 경우 기존 모델들보다 AUC가 높게 나타나 단일 모형의 오차 및 불확실성을 보완했다. 특히, 잣나무의 경우 8가지 모델의 AUC 평균은 0.737이었지만 앙상블한 결과 AUC가 0.898까지 증가하게 되어 오차 및 불확실성을 보완하였다고 볼 수 있다. 잣나무의 경우 출현자료가 중부 지방에서 넓게 분포하여 상대적으로 AUC가 낮게 나타났으며, 삼나무와 편백의 경우 출현자료가 남부지역에 국한되어 높은 AUC를 보였다.

수종별 서식지 분포에 영향을 미치는 인자의 중요도를 파악한 표는 Table 3과 같다. 인자의 중요도는 8종의 모델을 10회 반복 시행한 중요도를 평균으로 나타난 값으로 상대적인 값을 나타낸다. 잣나무는 연간 온도 범위(BIO7), WI, 가장 추운 달의 최소 온도(BIO6) 순으로 높은 중요도를 나타냈으며 온도에 민감하게 반응하였다. 삼나무는 가장 추운 분기의 강수량(BIO19), 가장 따뜻한 분기의 강수량(BIO18), 강수 계절성(BIO15) 순으로 중요도가 높게 나타났으며 편백은 가장 추운 분기의 강수량(BIO19), 강수 계절성(BIO15), 가장 따뜻한 분기의 강수량(BIO18) 순으로 높은 중요도를 나타냈다. 난대·아열대 수종인 삼나무와 편백은 온대 수종인 잣나무에 비해 강수량에 민감하게 반응하였다.

Table 2. AUC (area under curve) values of each species by model

Model*	<i>P. koraiensis</i>	<i>C. japonica</i>	<i>C. obtusa</i>
RF	0.738	0.965	0.923
Maxent	0.768	0.953	0.907
GBM	0.764	0.964	0.915
ANN	0.719	0.928	0.883
CTA	0.690	0.852	0.842
FDA	0.742	0.938	0.894
MARS	0.739	0.921	0.886
GLM	0.732	0.950	0.896
CV ensemble	0.898	0.997	0.958

*RF: Random forest, Maxent: Maximum entropy, GBM: Generalized boosted models, ANN: Artificial neural networks, CTA: Classification tree analysis, FDA: Flexible discriminant analysis, MARS: Multivariate adaptive regression splines, GLM: Generalized linear models, CV ensemble: Committee averaging ensemble

Table 3. Mean importance of variables in models

Variable	Variable name	Species		
		<i>P. koraiensis</i>	<i>C. japonica</i>	<i>C. obtusa</i>
Climate factor	BIO1	0.099	0.065	0.168
	BIO2	0.074	0.199	0.047
	BIO3	0.133	0.142	0.027
	BIO5	0.084	0.025	0.149
	BIO6	0.169	0.145	0.171
	BIO7	0.313	0.150	0.150
	BIO12	0.154	0.180	0.100
	BIO15	0.200	0.312	0.218
	BIO18	0.118	0.373	0.205
	BIO19	0.122	0.402	0.368
	Warmth Index	0.218	0.131	0.128
Soil factor	Soil pH	0.009	0.006	0.016
Topographical factor	TPI	0.118	0.011	0.009
	TWI	0.063	0.003	0.009

Table 4. Changes of suitable area of species by period

(unit: km²)

Species	Current	2050s		2090s	
		SSP1-2.6	SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP5-8.5
<i>P. koraiensis</i>	13,303	19,245	10,684	8,849	109
<i>C. japonica</i>	6,795	4,988	18,789	19,404	17,460
<i>C. obtusa</i>	18,535	30,331	48,233	64,125	87,210

2. 수종별 서식지 분포 변화

1) 잣나무

잣나무의 잠재 서식지의 예측 결과는 Fig. 2와 같다. 잣나무의 현재 잠재 서식지는 내륙지방 중 북부에 서식에 적합한 지역이 분포하고 있으며 북부를 제외한 지역은 적합도가 낮게 나타났다. SSP1-2.6과 현재를 비교하면 근미래에는 북부지방을 중심으로 매우 적합 서식지가 확산하지만 먼미래에는 확산되었던 ‘매우 적합’ 서식지가 축소되고 남부지역의 서식지가 감소하면서 경기도, 강원도 지역에만 적합 서식지가 분포한다. SSP5-8.5와 현재를 비교하면 근미래에는 매우 적합한 서식지의 면적이 줄어들게 되며 서식지로 부적합한 지역이 중부에서 북상하여 경기도와 강원도 부근에만 적합 서식지가 분포하게 된다. 먼미래에는 서식지로 매우 적합한 지역은 대부분이 사라지게 된

다. 미래로 갈수록 침엽수의 적합 서식지가 대부분 사라지고 강원도 고산지대 일부에만 분포가 가능하다는 선행 연구(Yoo *et al.* 2020)와 유사한 결과가 나타났다. 잣나무의 시나리오에 따른 시기별 면적 변화는 Table 4와 같다. SSP1-2.6에서 적합 서식지의 면적은 현재의 적정 면적과 비교해 근미래에 약 1.447배가 증가하지만 먼미래에 약 0.803배로 감소할 것으로 예상되었다. 반면, SSP5-8.5의 적합 서식지 면적은 근미래에 약 0.665배이며 먼미래는 0.008배로 급격하게 감소할 것으로 전망되었다.

2) 삼나무

삼나무의 잠재 서식지의 예측 결과는 Fig. 3과 같다. 삼나무의 현재 잠재 서식지는 한라산 고산지대를 제외한 제주도과 남부 도서지역, 내륙의 남부지역에 매우 적합한 지역이 분포하고 있으며, 내륙 중부지방부터는 서식지로 부적

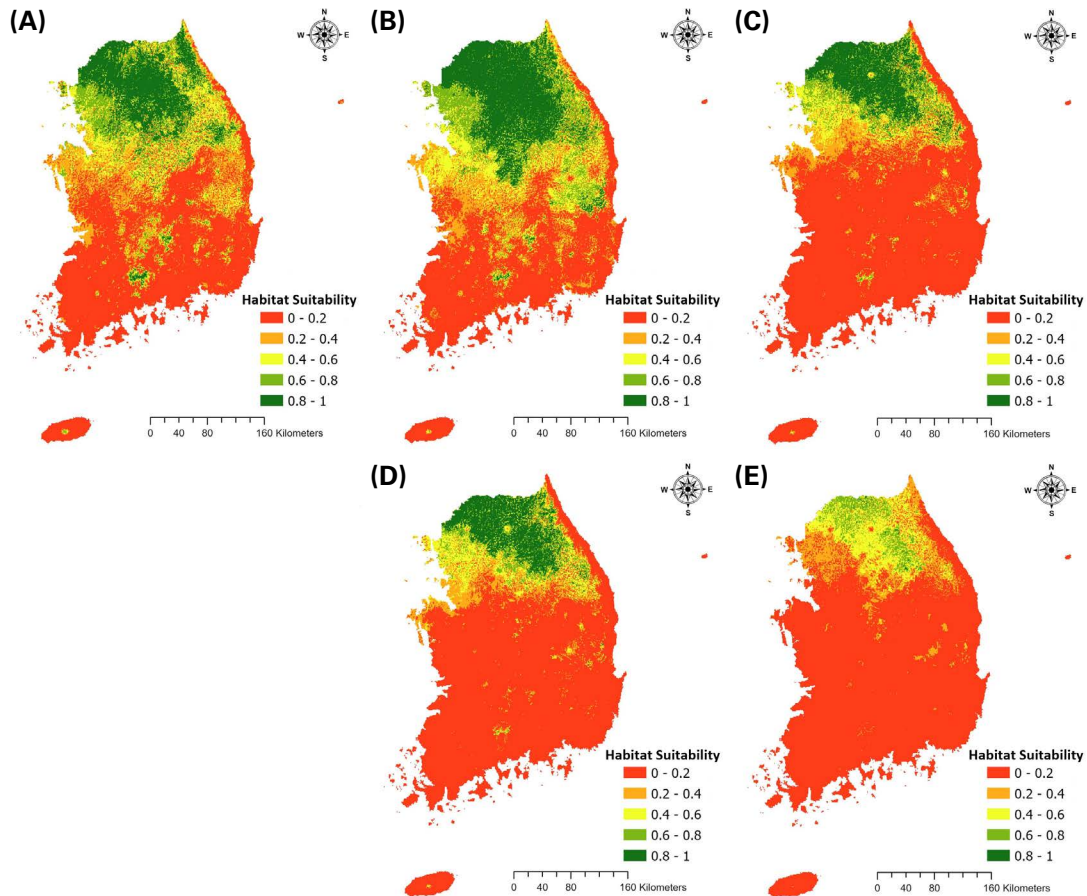


Fig. 2. Habitat suitability of *Pinus koraiensis*. (A) Current, (B) 2050s under SSP1-2.6, (C) 2090s under SSP1-2.6, (D) 2050s under SSP5-8.5, and (E) 2090s under SSP5-8.5.

합한 지역이 넓게 분포한다. SSP1-2.6과 현재를 비교하면 근미래에는 남서쪽을 중심으로 적합지역이 지역이 북상하고 있으며 먼미래에는 서식에 적합한 지역이 서해안과 동해안을 중심으로 북상하였다. SSP5-8.5 시나리오에서 근미래에는 서해안과 동해안을 중심으로 서식 적합지역이 확장하여 강원도 해안지역까지 북상하였으며, 내륙지방으로도 확산되었다. 먼미래에는 서식지 적합도가 높은 지역은 근미래와 비슷한 면적이지만 적합도가 낮은 지역이 크게 감소하여 경기·강원 산간지역 일부에서만 분포하였다. 삼나무의 시나리오에 따른 시기별 면적 변화는 Table 4와 같다. SSP1-2.6에서 적합 서식지의 면적은 현재의 적합 면적과 비교하여 근미래에 약 0.734배로 감소하지만 먼미래에는 약 2.765배로 급격하게 증가한다. SSP5-8.5의 적합 서식지 면적은 근미래에 약 2.856배이며 먼미래는 2.570배로 근미래에 비해 면적이 감소할 것으로 전망되었다. SSP5-8.5

먼미래에 근미래보다 적합 서식지의 면적이 적어지는 이유는 수분 조건이 양호할 때 적합 서식지로 판정될 가능성이 높다고 평가한 선행 연구(Chun *et al.* 2014)와 강수량의 중요도가 높게 나타난 결과를 비추어 볼 때 제주도를 비롯한 남부 해안지역의 기온이 지속적으로 상승함에 따라 열대화가 진행되면서 삼나무의 수분 조건에 부정적 영향을 미쳐 적합 서식지의 면적이 감소한 것으로 보인다.

3) 편백

편백의 잠재 서식지 예측 결과는 Fig. 4와 같다. 편백의 현재 잠재 서식지는 한라산 고산지대를 제외한 제주도와 남부 도서지역, 내륙의 남부지역에 매우 적합한 지역이 분포하고 있으며 내륙의 중부지방부터 서식지로 부적합하다. SSP1-2.6과 현재를 비교하면 근미래에는 매우 적합한 지역이 북상하였으며, 부적합지역이 넓었던 중부지방 또한 낮

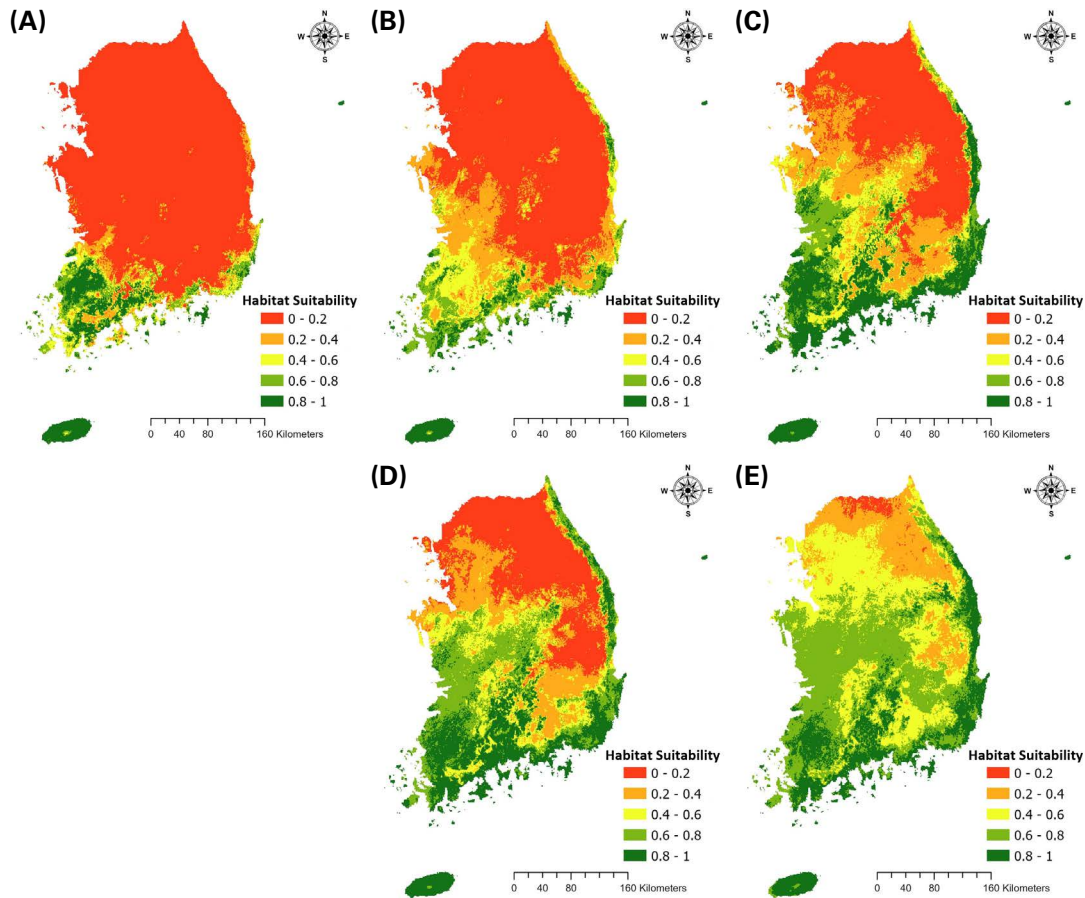


Fig. 3. Habitat suitability of *Cryptomeria japonica*. (A) Current, (B) 2050s under SSP1-2.6, (C) 2090s under SSP1-2.6, (D) 2050s under SSP5-8.5, and (E) 2090s under SSP5-8.5.

은 수준 적합도로 상당 지역 변화하였다. 먼미래에는 중부 지방의 적합도도 매우 높거나 높은 수준으로 증가할 것으로 나타났다. SSP5-8.5 시나리오에서 근미래에는 강원도와 경기 북부를 제외한 대부분의 지역이 매우 적합한 지역으로 확산되었다. 먼미래에는 일부 고산지역을 제외한 우리나라 대부분 지역에서 서식 적합도가 높게 전망되었다. 편백의 시나리오에 따른 시기별 면적 변화는 Table 4와 같다. SSP1-2.6의 적합 서식지의 면적은 현재의 적정 면적과 비교해 근미래에 약 1.636배가 증가하며 먼미래에는 약 2.602배로 급격하게 증가한다. SSP5-8.5의 적합 서식지 면적은 근미래에 약 3.460배이며 먼미래는 4.705배로 SSP1-2.6에 비해 넓은 면적이 크게 증가할 것으로 전망되었다.

3. 난대 용재수종의 잣나무 대체 가능성

기존 전국적으로 활용되던 용재수종을 난대·아열대 수

종이 대체할 수 있는지 확인하기 위해 현재 잣나무의 잠재 서식지와 난대·아열대 수종의 서식 적합지역을 중첩하여 대체 가능성을 분석하였다(Fig. 5). 또한, 현재 잣나무 적합 서식지 면적에서 미래 난대·아열대 수종의 서식 적합지를 통해 대체할 수 있는 면적을 확인하였다(Table 5). 현재와 SSP1-2.6의 잣나무와 삼나무의 적합 서식지 중 편백과 중복되는 지역이 거의 존재하지 않았으며 SSP1-2.6의 먼미래에는 삼나무와 편백이 수도권 지역 중 일부에 서식이 적합해지면서 현재 잣나무의 적합 서식지 중 약 5.22%를 대체할 수 있는 것으로 확인되었다. SSP5-8.5 시나리오의 근미래에는 SSP1-2.6의 먼미래에 비해 상대적으로 수도권에서 삼나무와 편백의 적합 서식지가 증가하였으며 현재 잣나무의 적합 서식지 중 약 24.30%를 대체할 수 있을 것으로 나타났다. SSP5-8.5의 먼미래에서는 경우 백두대간 부근을 제외하고 난대·아열대 수종이 대체 가능하였으며 현재 잣

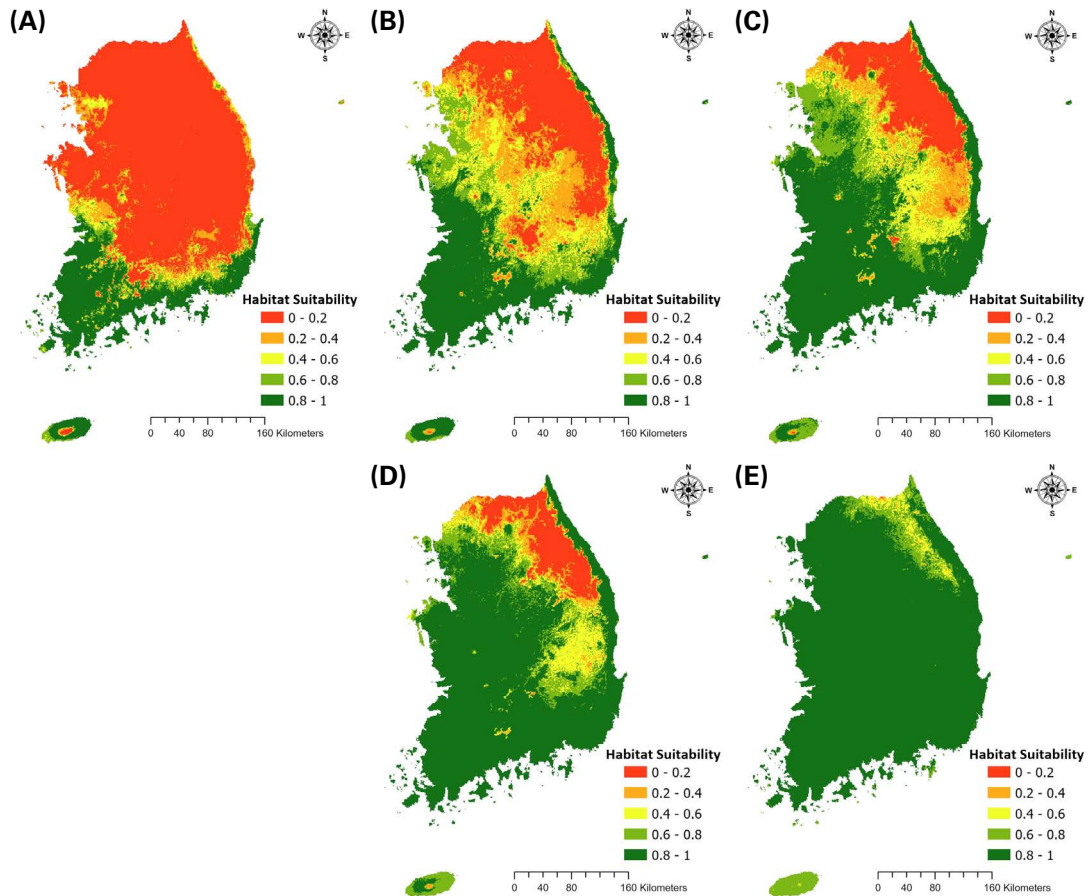


Fig. 4. Habitat suitability of *Chamaecyparis obtusa*. (A) Current, (B) 2050s under SSP1-2.6, (C) 2090s under SSP1-2.6, (D) 2050s under SSP5-8.5, and (E) 2090s under SSP5-8.5.

나무의 적합 서식지 중 약 85.39%를 대체할 수 있는 것으로 전망되었다.

4. 함의 및 한계

용재수종의 조림에는 일정량의 기간이 필요하며 최근 기온이 급격하게 변하는 상황에서 조림수종의 선정에 유의할 필요가 있다. SSP 시나리오 중 온실가스 배출량이 적은 경우인 SSP1-2.6과 온실가스 배출량이 많은 경우인 SSP5-8.5 두 가지 시나리오로 분석을 진행함으로써 온실가스 배출량에 따라 용재수종 및 적합지를 분석하였다. 특히, SSP1-2.6에서는 잣나무의 대체 필요성이 높지 않았으나, SSP5-8.5에서는 서식 적합지역이 크게 감소하며, 대체 요구도가 높았다. 이는 전 세계의 탄소중립과 온실가스 감축에 따라 용재수종의 대체 여부도 고려해야 함을 시사한다.

수종별 예측 결과에서 잣나무의 경우 SSP1-2.6의 근미래

를 제외하고는 적합 서식지가 현재에 비해 감소하고 있으며 다양한 선행 연구들 역시 기후변화로 인해 침엽수종의 서식적합이 지속적으로 감소하고 있다는 경향을 보이고 있다(Park *et al.* 2014; Lim and Kim 2020; Yoo *et al.* 2020). 이는 21세기 내에 기존의 주요 용재수종 중 일부는 더 이상 국내에 조림이 어렵다는 것을 의미한다. 반면, 미래에 대체 가능한 용재수종으로 제시한 편백과 삼나무의 경우, 서식 적합지 복상으로 기존 용재수종의 적합지 중 80% 이상을 대체가 가능할 것으로 확인된 것이다. 편백과 삼나무의 서식 적합지역 확대는 유사한 방향성을 보이거나 적합도에서 차이를 보였다. 편백은 SSP5-8.5의 먼미래에 전국의 대부분에서 서식이 적합하게 확인되었으나, 삼나무 경우 우리나라 중부지역까지만 적합지가 높게 나타났다. 두 가지 난대·아열대 용재수종에서도 차별성을 발견한 것이며, 온실가스 감축과 미래 기후변화에 따라 유사 수종군에서도

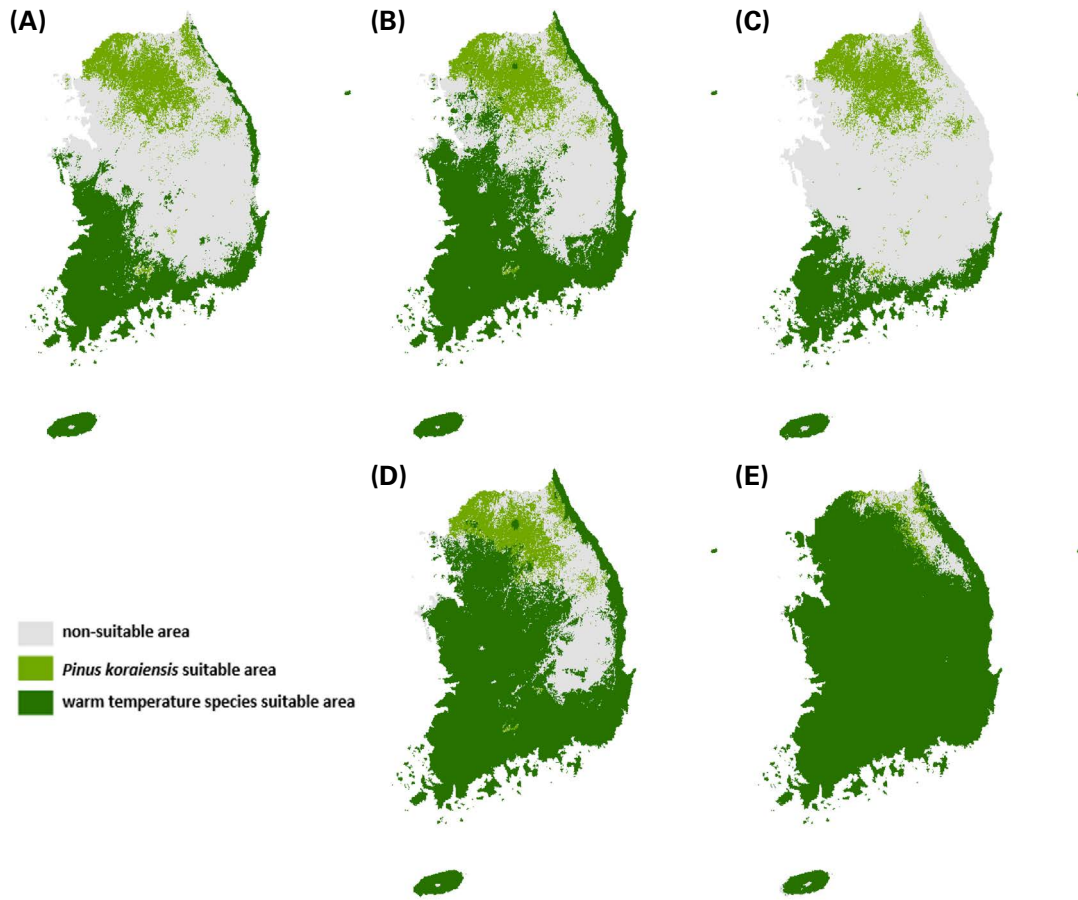


Fig. 5. Overlaid habitat suitability of warm temperature species and *Pinus koraiensis*.

Table 5. Potential areas to replace *Pinus koraiensis*

(unit: km²)

Species	Current	2050s		2090s	
		SSP1-2.6	SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP5-8.5
Replace species	0	9	3,232	695	11,360

적정 용재수종의 선정이 필요할 것을 시사한다.

다만, 이번 분석이 가지는 몇 가지 한계점이 존재한다. 현재 분석에 이용한 출현좌표는 NFI의 자료를 이용하였다. NFI의 자료는 표본점 조사를 통한 자료이므로 실제 분포하고 있는 수종의 모든 좌표를 반영할 수 없으며 실제 생물의 분포 경향과는 차이점이 존재한다. 또한, 분석에 사용한 자료는 비생물적 요인인 기후요소와 지형요소만 적용되었다. 경쟁, 포식, 공생 또는 중간 관계와 같은 생물적 요인은 식물의 분포에 영향을 주므로 분석 결과는 실제 분포

와 다소 다른 결과로 나타났을 가능성이 있다. 이번 연구에서는 기존의 주요 용재수종 중 한 수종에 대한 분석만 진행하여 우리나라의 모든 기후대의 용재수종에 대한 반영이 되지 못했으므로 추후 다양한 기후대의 용재수종의 적합지 분포를 분석할 필요가 있다. 또한, SSP 시나리오 중 기존 RCP에서 국제적으로 BAU (Business As Usual)로 판단하는 SSP2-4.5와 SSP3-7.0을 이용한 예측을 진행하지 못하였으므로 추후 모든 SSP 시나리오를 이용한 용재수종의 적합지 분포를 분석할 필요가 있다.

적 요

본 연구는 국내 주요 용재수종인 잣나무와 삼나무, 편백에 대한 종 분포 예측 모델의 결과를 앙상블하여 기후 시나리오에 따라 현재, 근미래, 먼미래의 서식 적합지를 예측하였고 잣나무와 삼나무, 편백의 기후변화 시나리오별 분포 적합지를 분석하였다. 특히, 잣나무를 삼나무와 편백이 대체할 수 있는지 평가하였다. 기준연도(현재) 잣나무의 매우 적합한 서식지는 전국의 약 13.87%를 차지하지만 SSP5-8.5 하의 먼미래에서는 약 0.11%까지 낮아진다. 삼나무의 경우 기준연도의 서식 적합지는 약 7.08%이며 SSP5-8.5 하의 먼미래에서는 약 18.21%까지 증가한다. 편백의 경우 기준연도의 서식 적합지는 약 19.32%이며 SSP5-8.5 하의 먼미래에서는 약 90.93%까지 차지하는 것으로 예측되었다. 전국적으로 조림하던 잣나무는 기후변화의 영향으로 서식처가 점차 북상하여 우리나라에서 적합한 서식처가 크게 감소하였으므로 21세기 중반 이후에는 국내에서 용재수종으로 조림하기에는 부적합하며 높은 수준의 서식 적합도를 갖는 편백이나 삼나무로 대체될 필요가 있다고 전망된다. 특히, 편백은 대부분의 영역에서 잣나무를 대체 가능하며, 삼나무의 경우 남해안과 중부지방 일부분을 대체할 수 있다고 평가되었다. 결론적으로 미래에는 조림하는 용재수종의 변화가 생길 것이며 다양한 수종을 대상으로 한 연구를 통해 기후변화에 대응하는 방안이 마련되기를 기대한다.

CRedit authorship contribution statement

Hyeon-Gwan Ahn: Conceptualization, Methodology, Data Curation, Visualization, Investigation, Writing - Original Draft. Chul-Hee Lim: Conceptualization, Supervision, Writing - Review & Editing

사 사

본 연구는 한국연구재단 이공분야기초연구사업(우수신진연구)(과제번호: 2022R1C1C1008489)의 지원과 국민대학교의 학술지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

Ahn BI, EK Kim, HH Kim and DH Kim. 2009. Analysis of the effects of climate change on the domestic wood market. J.

Rural Develop. 32:109–131.

Chun JH, CB Lee and SJ Yun. 2015. Effects of climate change on the geographic distribution of *Quercus acuta* Thunb. J. Agric. Life Sci. 49:47–57. <https://doi.org/10.14397/jals.2015.49.6.47>

Chun JH, MY Shin, TS Kwon, JH Lim, YG Lee, GE Park, TW Kim and JH Sung. 2014. Predicting the Changes of Productive Areas for Major Tree Species under Climate Change in Korea. Korea Forest Research Institute. Seoul.

Cui G, H Kwak, S Choi, M Kim, CH Lim, WK Lee, JS Kim and Y Chae. 2016. Assessing vulnerability of forests to climate change in South Korea. J. For. Res. 27:489–503. <https://doi.org/10.1007/s11676-015-0201-2>

IPCC. 2018. Summary for policymakers. p. 32. In: Global Warming of 1.5°C. World Meteorological Organization, Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland.

IPCC. 2021. Summary for policymakers. p. 3. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge.

Joung YW, YM Kim and YA Jang. 2020. Studies on the anti-oxidant and whitening effects of *Chamaecyparis obtusa* Extract. J. Korean Appl. Sci. Technol. 37:1496–1506. <https://doi.org/10.12925/jkocs.2020.376.1496>

Khan S and S Verma. 2022. Ensemble modeling to predict the impact of future climate change on the global distribution of *Olea europaea* subsp. *cuspidata*. Front. For. Glob. Change 5:977691.

Kim HC, SS Oh, YC Song and YJ Kim. 2013. Distribution characteristics of phytoncide in Jeolmul Natural Recreation Forest of Jeju. J. Naturopathy 2:89–98. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.977691>

Kim SH, SY Lee, SM Cho, CY Hong, SY Park, MJ Park and IG Choi. 2017. Antioxidant activities of *Cryptomeria japonica* leaves extracts by extraction methods. J. Korean Wood Sci. Technol. 45:495–510.

KMA. 2021. Climate Change Outlook for Korean Peninsula 2020. Korea Meteorological Administration. Seoul.

KFS. 2021. Statistical Yearbook of Forestry. Korea Forest Service. Daejeon, Korea.

Lee MK, JH Chun and CB Lee. 2021. Prediction of distribution changes of *Carpinus laxiflora* and *C. tschonoskii* based on climate change scenarios using MaxEnt model. Korean J. Agric. For. Meteorol. 23:55–67. <https://doi.org/10.5532/KJAFM.2021.23.1.55>

Lee MY, YE Kim, JS Hong and KJ Jo. 2021. A stratified random sampling design for paddy fields: Optimized stratification and sample allocation for effective spatial modeling and mapping of the impact of climate changes on agricultural system in Korea. Korean J. Environ. Biol. 39:526–535. <https://doi.org/10.11626/KJEB.2021.39.4.526>

- Lee YH, CS Na, SH Hong, SI Sohn, CS Kim, IY Lee and YJ Oh. 2018. Predicting the potential habitat and risk assessment of *Amaranthus patulus* using MaxEnt. Korean J. Environ. Biol. 36:672–679. <https://doi.org/10.11626/KJEB.2018.36.4.672>
- Li Y, M Li, C Li and Z Liu. 2020. Optimized Maxent model predictions of climate change impacts on the suitable distribution of *Cunninghamia lanceolata* in China. Forests 11:302. <https://doi.org/10.3390/f11030302>
- Lim CH, S Yoo, Y Choi, SW Jeon, Y Son and WK Lee. 2018. Assessing climate change impact on forest habitat suitability and diversity in the Korean Peninsula. Forests 9:259. <https://doi.org/10.3390/f9050259>
- Lim CH, YS Kim, M Won, SJ Kim and WK Lee. 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. Geomat. Nat. Hazards Risk 10:719–739. <https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1543210>
- Lim CH and HJ Kim. 2020. Machine learning application for identifying habitat suitability changes of indicator tree species against recent climate change. J. Clim. Chang. Res. 11:793–805. <https://doi.org/793-805.10.15531/kscrc.2020.11.6.793>
- Lim CH and HA Choi. 2021. Ecosystem service-based economic valuation of forest restoration in North Korea. Korean J. Environ. Biol. 39:225–235. <https://doi.org/10.11626/KJEB.2021.39.2.225>
- Lim CH and HJ Kim. 2022. Can forest-related adaptive capacity reduce landslide risk attributable to climate change? - Case of Republic of Korea. Forests 13:49. <https://doi.org/10.3390/f13010049>
- Lim JH, JH Chun, KE Park and MY Shin. 2016. Effect of climate change on the tree-ring growth of *Pinus koraiensis* in Korea. J. Korean Soc. For. Sci. 105: 351–359. <https://doi.org/10.14578/JKFS.2016.105.3.351>
- Noce S, A Collalti and M Santini. 2017. Likelihood of changes in forest species suitability, distribution, and diversity under future climate: The case of Southern Europe. Ecol. Evol. 7:9358–9375. <https://doi.org/10.1002/ece3.3427>
- Park HC, HL Jung and GG Lee. 2014. Predicting the suitable habitat of the *Pinus pumila* under climate change. J. Environ. Impact Assess. 23:380–393
- Park J, IW Jung, H Chang and DH Jang. 2012. Relationship between population and changes in warmth and coldness indices in South Korea. J. Clim. Res. 7:210–225.
- Park SU, KA Koo, C Seo and WS Kong. 2016. Potential impact of climate change on distribution of *Hedera rhombea* in the Korean Peninsula. J. Clim. Chang. Res. 7:325–334. <https://doi.org/10.15531/kscrc.2016.7.3.325>
- Seo CW, YR Park and YS Choi. 2008. Comparison of species distribution models according to location data. J. Korean Soc. Geospatial Inform. Sci. 16:59–64.
- Yoo SM, CH Lim, MI Kim, CH Song, SJ Kim and WK Lee. 2020. Potential Distribution of Endangered Coniferous Tree Species under Climate Change. J. Clim. Chang. Res. 11:215–226. <https://doi.org/10.15531/kscrc.2020.11.4.215>
- Yoon KB, SY Kim, SW Cheong, JH Lee, JH Tho and SH Han. 2022. Developing system of forest habitat quality assessment for endangered species. Korean J. Environ. Biol. 40:307–315. <https://doi.org/10.11626/KJEB.2022.40.3.307>
- Zhang X, J Chen, AC Dias and H Yang. 2020. Improving carbon stock estimates for in-use harvested wood products by linking production and consumption - a global case study. Environ. Sci. Technol. 54:2565–2574. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b05721>