

기후변화에 따른 멸종위기 침엽수종 분포 변화 예측

유소민* · 임철희** · 김문일*** · 송철호**** · 김세진***** · 이우균*****†

*고려대학교 환경생태공학과 박사과정학생, **고려대학교 생명자원연구소 연구교수, ***국제응용시스템분석연구소 박사후연구원, ****고려대학교 오정리질리언스연구원 연구교수, *****고려대학교 환경생태공학과 박사과정학생, *****고려대학교 환경생태공학부 교수

Potential Distribution of Endangered Coniferous Tree Species under Climate Change

Yoo, Somin* · Lim, Chul-Hee** · Kim, Moonil*** · Song, Cholho**** · Kim, Sea Jin***** and Lee, Woo-Kyun*****

*Ph.D. Student, Dept. of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea Univ. Seoul, Korea

**Research Professor Institute of Life Science and Natural Resources, Korea Univ. Seoul, Korea

***Postdoctoral Fellow, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria

****Research Professor Ojeong Resilience Institute, Korea Univ. Seoul, Korea

*****Ph.D. Student, Dept. of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea Univ. Seoul, Korea

*****Professor. Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea Univ. Seoul, Korea

ABSTRACT

The objective of this study was to predict the potential distribution change for vulnerable and endangered tree species (*Picea jezoensis*, *Abies koreana*, *Abies nephrolepis*, and *Pinus pumila*) under climate change. To this end, HyTAG (Hydrological and Thermal Analogy Groups), the Korea-specific forest cover distribution model based on hydrological and thermal indices, was used to predict the potential spatio-temporal distribution changes in tree species. As a result, the optimal habitat of vulnerable and endangered tree species (*Picea jezoensis*, *Abies koreana*, *Abies nephrolepis*, and *Pinus pumila*) under the potential impact of climate change is expected to shrink rapidly and is going to appear only in Gangwon Province in the future. Also, comparing the distribution range of tree species, *Picea jezoensis* has the largest distribution range compared to the other tree species. On the other hand, the optimal habitat of *Pinus pumila* is the smallest. This means that physical environment for *Pinus pumila* tends to be rapidly reduced. These results show that these tree species are facing a great risk due to climate change, and this is expected to be an important input or tool for decision-making with respect to establishing management and conservation measures to reduce the negative impact of climate change.

Key words: Endangered tree species, climate change Impact, HyTAG, Sub-alpine conifer species, Potential distribution

1. 서 론

기후변화는 기온과 강수와 같은 기본 기상인자의 변화로 나타나며, 이는 산림 식생대, 수종분포 등 식생측면에서도 다양한 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(Fang and Lechowicz, 2006; Lim et al., 2017). IPCC (2014)에서는 기

후변화의 영향으로 기온이 상승하고 가뭄일수가 지속적으로 증가하여 산림 내 많은 수종들이 고사할 것으로 전망하고 있다. 특히, 우리나라의 침엽수림은 기후변화에 따라 기온이 2도 이상 상승할 경우, 그 분포가 급격히 감소하고 미래에는 멸종 위기에 처할 것으로 예상되고 있다(NIFoS, 2014a). 이러한 기후변화의 영향은 산림생태계 구성요소와 구조를 변

†Corresponding author : leewk@korea.ac.kr (Room No. 319, East building, College of Life Sciences & Biotechnology, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul, 02841, Republic of Korea, Tel. +82-2-3290-3016)

ORCID 유소민 0000-0001-8873-8947
송철호 0000-0002-8491-9545
임철희 0000-0001-7752-0694

김세진 0000-0002-3627-1596
김문일 0000-0003-1839-0791
이우균 0000-0002-2188-359X

화시킬 뿐 아니라 궁극적으로 산림생태계 시스템 기능을 변화시킴으로써 산림이 지니고 있는 다양한 공익적 가치와 생태계서비스 기능을 감소시킬 것이다(Markham et al., 1993; Lim and Shin 2005; Lim et al., 2018).

기후변화에 따른 수종별 서식지 이동을 예측하기 위해 종 분포 모형을 활용한 연구들이 다수 수행되었으며(Iverson et al., 2008; Iverson et al., 2013; Matthews et al., 2011), 기후변화가 지역의 종 풍부도와 분포에 미치는 영향을 예측하고 지역적 규모의 보전 전략 개발을 위한 생태모형을 개발하는 연구가 수행되었다(Attorre et al., 2008). 또한 기후변화로 인한 산림생태계 취약성 평가와 보전전략에 대한 연구도 수행된 바 있다(Janowiak and Maria, 2014; Choi et al., 2019). 국내에서는 기후변화 영향으로 아고산 지대의 침엽수림 고사 현상 속도가 점점 빨라지고 있다. 특히, 구상나무는 한반도에서만 서식하는 침엽수종으로 약 36년간 318ha가 감소하였으며(NIFoS, 2014b), 최근 세계자연보전연맹의 적색목록에서는 멸종위기종으로 등재하였다(Kim et al., 2011). 또한 눈잣나무는 비교적 기온이 낮은 고산지대에 제한적으로 자생하기 때문에 기후변화로 인한 건조기후와 고온현상에 극히 취약한 것으로 알려져 있으며, 가문비나무는 아고산지역 대표 수종 중의 하나로 국내에서 분포하는 면적이 적어 지구 온난화에 의해 크게 영향을 받을 것으로 예상되기도 한다(Yoon and Kong, 2011). 분비나무도 구상나무와 마찬가지로 기후변화 취약수종으로써 세계자연보전연맹의 관심대상종(Least Concern)으로 지정되었다(Zhang et al., 2013).

우리나라에서는 기후영향에 따른 기후변화 취약수종 및 멸종위기종을 선정하고 있는데, 주요 대상 수종은 해발 1200 m 이상의 서늘한 지역에서 자생하는 아고산 침엽수종이다. 산림청은 기후변화에 따른 아고산 침엽수림의 멸종 위험 피해를 줄이기 위해 보전 및 복원 대책 이행을 강화할 것이라고 발표하였으며, 이를 위해 전국적으로 분포 범위 및 피해 진행 상황에 대한 모니터링을 지속적으로 수행할 것이라고 공표하였다(KFS, 2016). 또한 고사의 주요 원인 규명과 고사 피해지 특성에 대한 과학적 연구도 수행하고 있다(Kim et al., 2017). 기존 연구들에서는 고온현상으로 인한 가뭄일수 증가, 강우량과 강설량 감소 등으로 인한 수분 부족을 침엽수림의 주요 고사 원인으로 보고 있다(Koo et al., 2001; Lim et al., 2006; NIFoS, 2009; Lim et al., 2019). 생물의 내성범위를 벗어날 정도로 서식처의 환경이 변화하면 다른 적정한 서식지로 이동하거나 변화된 환경에 유전적으로 적응하지 못할 경우 결국 사라지게 된다. 따라서 기후변화 취약수종을 보전하기 위해서는 수종별 생리적 특성과 환경요인 간의 관계 분석도 필수이지만, 수종별 생육 적정 기후범위를

분석하여 미래에 잠재적 분포 변화를 미리 예측하고 대응하는 것이 중요하다(Cui et al., 2016).

본 연구에서는 우리나라 산림의 특수성을 반영하고 기후의 영향을 고려할 수 있는 잠재수종분포 모형인 HyTAG (Hydrological and Thermal Analogy Groups)를 사용하여, 기후변화에 따른 주요 아고산 침엽수종(가문비나무, 구상나무, 분비나무, 눈잣나무)에 대한 생육 적정 기후범위를 예측하고 미래 잠재 분포 변화를 파악하고자 한다. 이를 통해 멸종위기종으로 분류되는 아고산 침엽수림의 관리와 보전 대책을 수립하는데 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 연구재료 및 방법

2.1 연구대상지 및 범위

본 연구 대상지는 우리나라 전지역으로, 경도 124° 54' ~ 131° 6', 위도 33° 9' ~ 38° 45'의 공간 범위를 대상으로 하였다(Fig. 1). HyTAG 모형을 활용하여 기후변화시나리오에 따른 잠재 분포 변화를 파악하기 위한 공간해상도는 1 km², 시간적 범위는 2000s(1970-2000년), 2050s(2036-2065년), 2080(2066-2095년)로 각각 30년을 대상으로 하였다.

2.2 연구재료

2.2.1 대상 수종 분포 자료

국내에서 선정한 기후변화 취약수종과 멸종위기종에는 아고산지역 침엽수종이 많이 포함되어 있다(Kim et al., 2019). 본 연구에서는 현존 분포에 대한 공간자료 획득이 가능한 가문비나무, 구상나무, 분비나무와 대체자료로 분석이 가능한 눈잣나무까지 총 4가지 침엽수종을 선정하였다. 구상나무와 분비나무는 환경부에서 제공하는 현존식생도자료를 활용하였고, 가문비나무는 산림청에서 제공하는 1/5000 축적의 임상도를 활용하여 현재 분포를 파악하였다(Fig. 2). 눈잣나무의 경우, 공식적으로 제공하는 분포 자료가 없어 Kong (2006)이 제시하는 눈잣나무의 분포특성을 고려하여 분포범위를 선정하였다. 이에 따르면, 눈잣나무는 잣나무와 분포지역이 비슷하지만 잣나무 보다 고도가 더 높은 곳에 생육하는 것으로 밝혀졌으며, 국가생물종지식정보시스템에서는 눈잣나무의 생육환경기준을 해발 1,000 m~2,300 m로 제시하고 있다. 따라서 산림청에서 제공하는 1/5000 축적의 임상도에서 제공하는 잣나무 분포 지역 중 해발고도 1,000~2,300 m에 분포하는 잣나무림을 눈잣나무림으로 가정하였다(Fig. 2). 이는 현실적인 한계를 갖지만, 눈잣나무의

위치정보의 대체자료로서 활용한 것이다. 고도만을 고려한 눈잣나무 분포범위의 타당성을 평가하기 위해, 눈잣나무 분포에 관여하는 환경변수들을 선정하고 ROC 곡선(Receiver Operation Characterist Curve)을 통해 기여도가 가장 높은 변수를 파악해 보았다(Fig. 3). 환경변수로는 기존 연구(NIFoS, 2014; Park et al. 2015; Koo et al. 2016)를 통해 수종별로 환경변수를 가장 많이 사용하였던 고도(Digital Elevation Model: DEM), 지형수분지수(Topographical Wetness Index: TWI), 강우량, 최저온도, 최고온도 5가지를 선정하여 타당성을 검토하였다. 기상자료인 강우량, 최저온도, 최고온도는 과거 30년 기상관측자료를 월 평균값으로 계산하여 활용하였으며, 토양수분(TWI)은 고도와 경사도를 가지고 구축된 자료를 활용하였다. ROC 곡선에 따른 기여도에서 고도는 0.88로 도출되어 눈잣나무 분포에 가장 크게 기여하는 것으로 나타났다(Table 1). 잣나무 분포자료에서 고도를 분포 특성으로 활용하여 추출한 눈잣나무의 분포 범위가 타당하게 나타남에 따라 눈잣나무의 공간범위를 확정하

였다. 본 연구에서는 polygon 형태로 추출된 가문비나무, 구상나무, 분비나무, 잣나무 분포자료는 raster 형태인 기후 데이터와의 통일을 위해 ArcMap 10.3 소프트웨어를 활용하여 1 km² 공간해상도의 raster 형태로 변환하였다.

Table 1. AUC Value of environmental explanatory variables for Pinus pumila

| Environmental explanatory variables | Value |
|---|-------|
| DEM | 0.888 |
| TWI | 0.520 |
| Past 30years(1970~2000) precipitation | 0.520 |
| Past 30years(1970~2000) maximum air temperature | 0.125 |
| Past 30years(1970~2000) minimum air temperature | 0.143 |

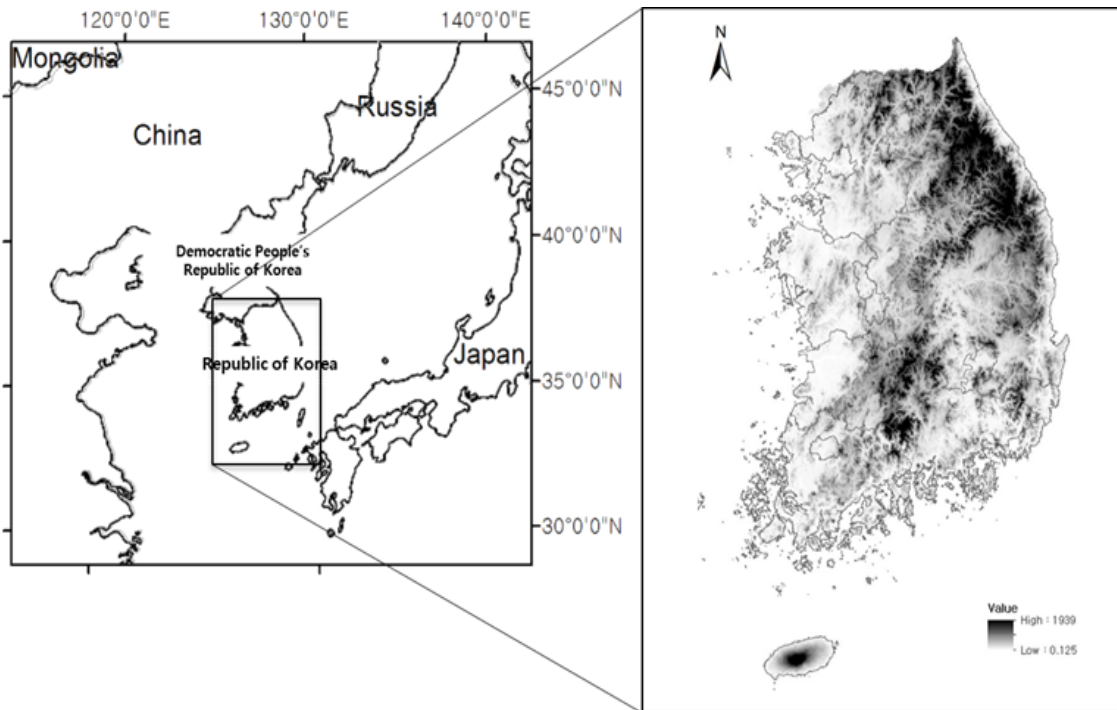


Fig. 1. Study Area



Fig. 2. Presence data of endangered Conifer tree

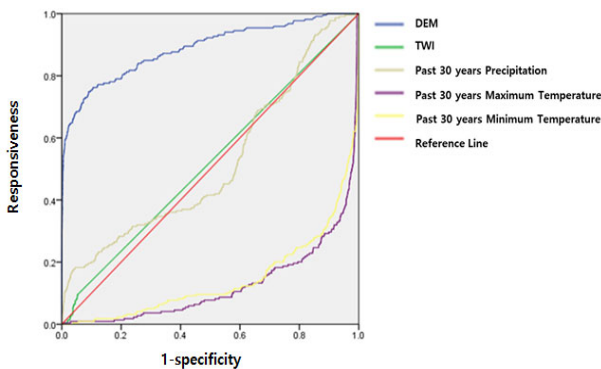


Fig. 3. AUC curve of environmental explanatory variables for Pinus pumila

2.2.2 기후자료

HyTAG 모형 구동에 필요한 기후변수는 월 평균기온과 월 평균 최저기온, 월 누적강수량이다. 과거 기후자료는 1970년부터 2000년까지(약 30년)의 기상청 관측 자료를 기반으로 기온자료의 경우, Yun et al.(2001)이 제시한 고도에

따른 기온감을 보정식을 적용하고, 강우자료는, Smith et al.(2008)이 제시한 고도에 따른 강수 증감률을 적용한 보정 자료를 활용하였다. 또한 Kriging과 거리역산가중 방법으로 기온자료와 강수자료를 1 km² 공간해상도로 보간하였다(Lee et al., 2007; Part and Zhang, 2008).

본 연구에서는 세 시기의 수종별 잠재분포를 추정하였다. 먼저, 2000년대(2000~2009년)는 관측기상자료를 통해 과거와 동일한 방법으로 보간하여 활용되었다. 미래 시기는 2050년대(2050~2059년), 2080년대(2080~2089년)로 RCP (Representative Concentration Pathway) 8.5 기후변화 시나리오가 적용되었다. RCP 시나리오에는 네 가지 시나리오가 있으나, 현재의 변화 추세에 가장 가깝고, 기후의 변화폭이 큰 RCP8.5 시나리오를 선정하였다. 이를 통해 멸종위기 침엽수종의 취약수준과 변화를 분명하게 확인할 수 있을 것으로 사료된다. 자료는 HadGEM3-RA 지역기후모형을 통해 제작된 남한상세자료(1 km² 공간해상도)를 기상청에서 제공받아 활용되었다.

각 시기별 월 평균기온, 월 평균 최저기온, 월 누적강수량은 HyTAG 모형에 활용하기 위해 온량지수, 최저온도지수, 유효강우지수로 구축하였다. 지수별 설명은 아래와 같다.

① 온량지수(WI: Warmth Index)

온량지수는 우리나라의 식생분포를 설명하기 위해 사용된 지수 중의 하나로(Yim, 1977) 식물생장과 분포에 밀접한 관계가 있으며, Kira (1945)는 월평균 기온 5℃는 식물이 생육하는데 필요한 최저 온도로, 식물의 적절한 생육을 위해서 일정기간동안 5℃ 이상이 유지되어야 함을 제시하였다. 국내에서는 온량지수로 구분된 기후지역과 식생 및 토양 분포가 대부분 일치하며, 이를 통해 식생분포를 설명하거나 주요 수종분포를 설명하는데 사용하였다(Yim, 1997; Yang, 2001). 본 연구에서는 온량지수를 Equation (1)을 활용하여 계산하였다.

$$WI = \sum (t - 5) \tag{Equation (1)}$$

여기서,

t: 5℃보다 높은 월 평균 기온

② 최저온도지수(MTCI: Minimum Temperature Index of the Coldest month)

최저온도지수는 식물이 추위에 견디며 생존할 수 있는 능력을 나타내는 지수이다. Neilson (1995)는 산림식생대는

월 평균 최저기온에 따라 달라진다고 하였으며, 국내에서는 TAG (Thermal Analogy Group)모형을 통해 미래 산림분포 변화를 파악하는데 적용되었다. 또한 Bachelet et al. (2001)은 동적식생모델(Dynamic Vegetation model)에 연계하여 최저온도지수를 활용한 바 있다. 본 연구에서는 월 평균 최저기온을 활용하여 최저온도지수를 계산하였다(Equation (2)).

$$MTCI = \frac{MTC - t_{mid}}{t_{hi} - t_{mid}} \times 100 \quad \text{Equation (2)}$$

$$MTC \geq t_{mid} (1.5^\circ C)$$

여기서,

t_{hi} : 18°C

t_{mid} : 1.5°C

t_{low} : -1.5°C

MTCI: 1월의 최저온도

③ 유효강우지수(PEI: Precipitation Effectiveness Index)

유효강우지수는 수분지수로 식물생장에 주요하게 작용하고 있다. 본 연구에서는 Thorthwaite (1948)이 제시한 방법을 활용하였으며, 월 누적강우량과 월 평균기온을 이용하여 월별 강우증발산 비율을 구하고 그것을 누적하여 유효강우지수를 계산하였다(Equation (3)).

$$PEratio = 11.5 \times \left(\frac{P}{T-10} \right)^{\frac{10}{9}} \quad \text{Equation (3)}$$

$$PEI_{Annual} = 10 \times \sum_{Jan}^{Dec} PEratio$$

여기서,

P : 월누적강우량(inch)

T : 월평균기온 (°F)

28.4°F보다 낮은 기온은 모두 28.4°F로 처리

PEratio : 40보다 큰 것은 40으로 처리

2.3 연구방법

본 연구에서는 기후변화에 따른 가문비나무, 구상나무, 분비나무, 눈잣나무의 미래 잠재 분포 변화를 파악하기 위해 한국형 산림생태계 분포 모형인 HyTAG (Hydrological and Thermal Analogy Group)를 적용하였다. HyTAG 모형은 우리나라 주요 수종 분포에 대한 예측 정확도가 비교적 높은 모형으로(Choi et al., 2011), 온도지수와 수분지수와 같이 기후지수만을 활용하여 우리나라 산림 수종에 대한 분포 특성을 도출하고, 이를 바탕으로 지역적, 국가적 규모별 미래의 잠재적인 산림분포를 예측한다. 수종별 미래 잠재 분포를 예측하기 위해 구축되어진 과거 기상자료와 현존 수종 분포자료를 이용하여 수종별 온량지수, 최저온도지수와 유효강우지수에 대한 분포 특성을 도출하였다. 이 때 분석된 수종별 기후지수 분포 범위에 확률밀도함수를 적용하여 정규분포곡선을 도출한 후, 누적분포함수를 이용하여 77% 이내(하위 11.5%, 상위 11.5 제외)에 위치하는 값들을 수종별 최적 생육분포 범위로 정의하였다(Choi et al., 2011). 도출된 수종별 최적 생육범위와 Binary logistic selection을 통해 기후변화 시나리오에 따라 수종별 잠재 분포를 시공간적으로 예측하였다(Fig. 4).

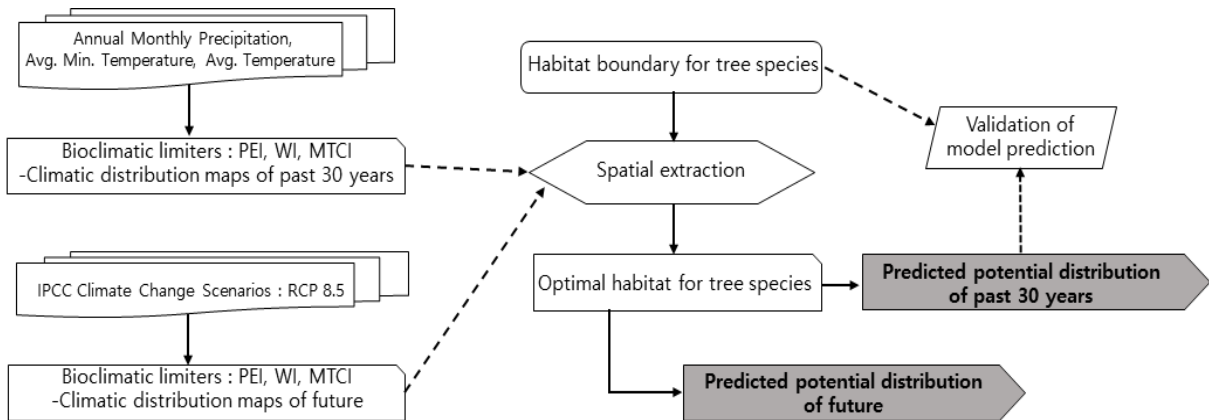


Fig. 4. Flow chart of the this study using HyTAG model

2.4 모형 검증

HyTAG 모형 검증을 위해 과거 기후를 통해 추정된 수종별 적정 기후분포대를 가지고 현재시점의 분포를 추정, 실제 현존 식생도와 비교함으로써 일치하는 면적 정도를 확인하여 정확도를 판단하였다. 본 연구에서 사용된 Prediction Probability(PrP)는 현존 식생분포와 예측된 식생분포와 비교하였을 때 얼마나 많은 부분이 동일한 식생분포를 가지는지를 파악하는데 활용되는 지표 중의 하나로, 식은 다음과 같다(Equation (4)). PrP값이 클수록, 실제 식생분포와 예측된 식생분포의 동일성이 크며, 이는 모형의 예측 정확성이 높음을 의미한다.

$$PrP = \frac{S_{both}}{S_{act}} \quad \text{Equation (4)}$$

S_{both} : 실제 분포도와 예측된 분포도 두 곳에 모두 존재

S_{act} : 실제 분포도에 존재

3. 결과 및 고찰

3.1 기후변화 시나리오에 따른 WI, MTCI, PEI 분포

본 연구에서는 2000s와 2050s, 2080s년대의 온량지수와 최저온도지수, 유효강우지수를 구축하였다(Fig. 5). 2000년대의 평균 온량지수 범위는 35.07-147.91℃(96.23±15.05)이며, 미래로 갈수록 평균 온량지수가 증가하는 경향을 보였다. 최저온도지수의 경우, 2000년대에는 -137.13-19.14℃(-50.79±21.97) 범위를 가지고 있었으며 미래로 갈수록 최저온도지수가 올라가는 경향을 보였다. 유효강우지수의 경우, 2000년대에는 55.54-241.77 In./°F(96.33± 13.1) 범위를 가졌으며, 미래로 갈수록 줄어드는 경향을 보였다(Table 2).

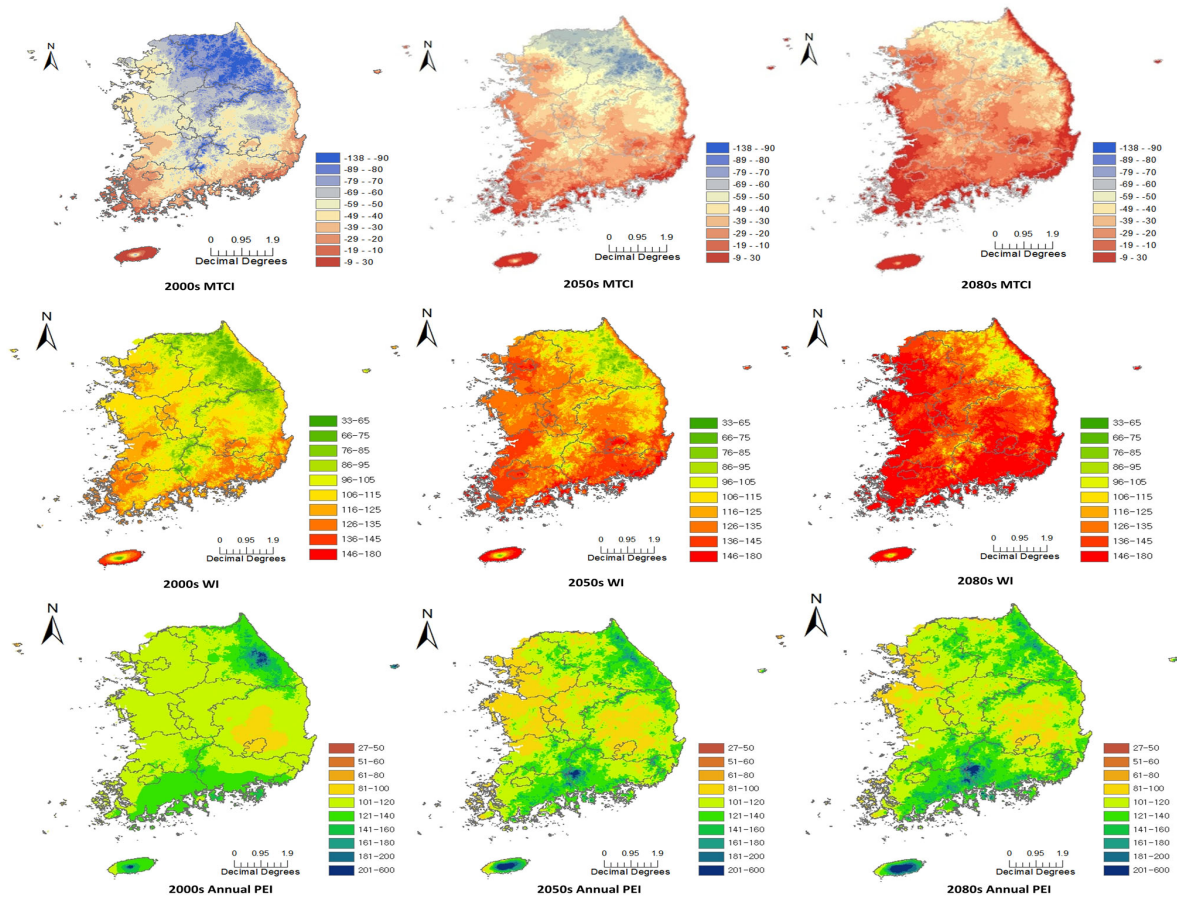


Fig. 5. Distribution of the WI, MTCI and annual PEI in Korea for the 2000s, 2050s, 2080s under 8.5 scenarios

Table 2. Distribution of the WI, MTCI and annual PEI under 8.5 scenarios and past meteorological data

| Period | 2000s ^c | 2050s | 2080s |
|-------------------------------|--------------------|------------------|------------------|
| WI ^(C) | 35.01 - 147.91 | 46.58 - 165.85 | 58.73 - 187.89 |
| (Mean ± Standard Deviation) | (96.23 ± 15.05) | (112.85 ± 15.51) | (130.22 ± 16.93) |
| MTCI | -137.13 - 19.14 | -114.59 - 27.31 | -94.59 - 41.80 |
| (Mean ± Standard Deviation) | (-50.79 ± 21.97) | (-49.29 ± 19.82) | (-27.91 ± 18.16) |
| Annual PEI ^(In./F) | 55.54 - 241.77 | 32.06 - 380.45 | 33.76 - 385.28 |
| (Mean ± Standard Deviation) | (96.33 ± 13.10) | (94.24 ± 20.82) | (98.86 ± 21.52) |

c : Estimating of mean climate index range from 1971 to 2000

3.2 수종별 최적 생육분포 기후범위

확률밀도함수를 적용하여 정규분포곡선을 도출한 후, 누적분포함수를 이용하여 수종별 최적 생육분포 범위를 도출하였다. Table 3은 가문비나무, 구상나무, 분비나무, 눈잣나무에 대한 최적 온량지수와 최저온도지수, 유효강우지수 범위를 나타낸다. 가문비나무는 다른 수종에 비해서 온량지수와 최저온도지수 범위가 높은 것으로 나타났으며, 유효강우지수는 범위가 가장 낮은 것으로 나타났다. 반면 분비나무의 경우 다른 수종에 비해 온량지수와 최저온도지수 범위가 가장 낮은 것으로 나타났으며 구상나무는 유효강우지수 범위가 다른 수종에 비해 가장 높은 것으로 나타났다.

Table 3. Optimal habitat ranges of WI, MITCI and annual PEI for each species

| Species | Optimal WI range | Optimal MTCI range | Optimal PEI range |
|--------------------------|------------------|--------------------|-------------------|
| <i>Picea jezoensis</i> | 67.3 ~ 96.6 | -93.6 ~ -49.3 | 87.2 ~ 118.3 |
| <i>Abies koreana</i> | 41.4 ~ 61.7 | -111.4 ~ -60.7 | 120.9 ~ 227.4 |
| <i>Abies nephrolepis</i> | 39.5 ~ 55.6 | -118.3 ~ -95.7 | 114.4 ~ 168.7 |
| <i>Pinus pumila</i> | 49.8 ~ 63.6 | -104.8 ~ -80.5 | 111.9 ~ 149.7 |

3.3 과거와 미래의 잠재 분포

본 연구에서는 2000년대, 2050년대 2080년대 각 잠재 분포변화결과를 수종별 멸종의 취약정도로 제시하기 위해 전체 육지면적에서 잠재분포 가능한 면적을 비율로 계산하였다(Fig. 6).

먼저 가문비나무는 2000년대에는 관동지방과 호남지방에

잠재 분포가 가능한 것으로 나타났으며, 잠재 분포 비율이 총 육지면적에서 30%를 차지하는 것으로 나타났다. 공간적 분포는 국립수목원 국가생물종지식정보(www.nature.go.kr)에서 보고하는 가문비나무 현존 분포 위치와 유사하게 나타났다. 2050년대에는 잠재 가능한 분포 면적 비율이 10%로 줄어드는 것으로 나타났으며 먼 미래인 2080년대에 약 2%만 잠재 분포가 가능한 것으로 나타났다. 분비나무의 경우, 2000년대에는 구상나무의 유사하게 관동지방에서 산맥을 중심으로 잠재 분포가 가능한 것으로 나타났으며, 잠재 분포 비율이 총 육지면적에서 1%를 차지하는 비율을 보였다. 이는 공간적으로 분포위치를 보았을 때 Park et al.(2015)에서 보고된 분비나무 현재 분포위치와 유사한 것으로 나타났다. 2050년대에는 잠재 가능한 분포 면적 비율이 0.2%로 줄어드는 것으로 나타났으며 2080년에는 거의 사라지는 것으로 나타났다. 구상나무는 2000년대에는 관동지방에서 산맥을 중심으로 잠재 분포가 가능한 것으로 나타났으며, 잠재 분포 비율이 총 육지면적에서 1.2%를 차지하는 비율을 보였다. 이는 공간적으로 분포위치를 보았을 때, 국립수목원에서 보고한 구상나무의 현재 분포 위치와 유사한 것으로 나타났다(Korea National Arboretum, 2015). 2050년대에는 잠재 가능한 분포 면적 비율이 1%로 줄어드는 것으로 나타났으며 2080년대에는 거의 사라지는 것으로 나타났다. 눈잣나무는 분비나무와 유사하게 관동지방 산맥 중심으로 잠재 가능 면적 비율이 1%로 나타났다. 이는 공간적으로 분포위치를 보았을 때, 국립수목원 국가생물종지식정보(www.nature.go.kr)에서 보고하는 현존 분포 위치와 유사하였다. 2050년대에는 0.13%로 다른 수종들보다 빠르게 잠재 분포 범위가 거의 사라지는 것으로 나타났다. 마지막으로 4개의 수종을 합한 고산·아고산 지대 침엽 수종 분포 면적을 보았을 때, 2000년대에는 관동지방과 호남지방이 분포 가능한 지역으로 나타났으며 총 육지면적에서 32%를 차지하는 것으로 나타났다. 2050년대에는 잠재 가능한 분포 면적 비율이 10%로 줄어드는 것으로 나타났으며 먼 미래 2080년대에는 2% 비율만

잠재 분포가 가능한 것으로 나타났다.

기후의 시계열변화에 따른 수종별 분포변화를 정량적으로 파악하기 위해, 2000년대부터 2080년대까지 그래프를 통해 면적 변화를 비교하였다. 그 결과, 2000년대에는 4개의 아고산지대 침엽수종 중에서 가문비나무의 잠재분포 면적이 29,784 km²이며, 다른 수종에 비해 분포 면적이 가장 큰 것으로 나타났다. 반면, 분비나무의 경우, 잠재분포 면적이 432 km²이며 다른 수종에 비해 분포 면적이 가장 적은 것으로 나타났다. 미래로 갈수록 가문비나무가 급격히 줄어들지만 다른 수종에 비해 여전히 면적을 크게 차지하는 것으로 나타났다. 반면 구상나무, 분비나무와 눈잣나무는 미래로 갈수록 분포 면적이 30 km² 미만으로 거의 사라지는 것으로 나타났다(Fig. 6, 7).

본 연구에서 제시하는 결과는 기후적으로 생육가능한 잠재분포를 의미하므로, 실제 분포와는 높은 관계를 갖기에 어려운 한계가 있다. 해당 지역이 산림이 아니거나, 다른 수종들에게도 생육가능지역 혹은 적합지역일 수 있으므로, 본 결과가 수종별 식생분포를 설명하는 것이 아닌, 잠재서식 가능지역을 제시하는 것이다. 본 연구에서는 가문비나무의 분포가 매우 넓게 나타났으나, 이는 다른 세 수종에 비해 기온이 높은 지역에 서식하고 있음이 반영된 것이며, 실제로는 해당 지역에 온대림이 우점하고 있다. 즉, 넓은 잠재분포 지역 중 일부에서 서식하고 있는 것이다.

3.4 검증결과

본 연구에서 활용된 HyTAG 모형의 정확성을 파악하기 위해, 수종별 현재 분포 현황을 과거 기상자료를 가지고 예측한 모형 결과와 비교하여 검증을 수행하였다(Table 4). 검증 자료로 활용한 수종별 현재 분포 현황 자료는 현존 식생도, 국가생물종지식정보시스템, 국제바이오생물다양성기구(GBIF), 임상도에서 제공하는 공간 위치자료를 수집 및 활용하였다. PrP 방법론을 활용하여 예측된 잠재 수종 분포와 현재분포와의 일치성을 비교한 결과, 구상나무가 63.64%로 가장 높게 일치하는 것으로 나타났으며 눈잣나무 57.14%, 가문비나무 46.68%, 분비나무 33.87%로 나타났다. 또한 네 가지 수종이 아고산지대에 자생하는 침엽수종으로 유사한 환경을 가지고 있어, 이를 군집화 시켜 모델 검증한 결과, 65.04%로 수종별 검증결과보다 높은 것으로 나타났다.

동일한 모형과 기후자료를 활용한 기존의 연구에 비해 통

계적 정확도가 낮게 도출된 것은 잠재분포를 예측하는 HyTAG와 PrP 방법론의 특성에 기인한다. HyTAG는 기존 서식처의 기후정보를 기반으로 실제 수종 분포지역보다 넓은 지역을 예측하나(Choi et al., 2011), PrP 방법론에서는 실제와 예측이 모두 포함되는 면적이 클수록 높은 통계적 수치를 제시한다. 본 연구 결과에서는 잠재예측지역이 실측지역을 대부분 포함하며 넓게 분포하였는데, 위와 같은 통계적 오차로 높은 수치를 기대할 수 없었다. 즉, 정성적으로는 높은 정확도를 보였으나, 정량적 수치에서는 낮을 수 밖에 없는 한계가 존재하였다.

3.5 함의 및 전망

기후변화에 의한 이상고온 현상과 수문학적 변화가 심화될 것으로 예측됨에 따라 산림 생태계가 점점 위협해질 것으로 전망되고 있다. 특히 아고산지역 침엽수림들이 생육환경의 변화로 인하여 지난 20~30년 동안 집단 고사가 빈번히 일어나고 있다(Kim et al., 2019). 본 연구에서 다른 멸종위기 침엽수종들의 경우 현재까지도 쇠퇴하고 있으나, 미래 전망에서는 보다 급격한 쇠퇴가 예상되고 있다. 이러한 아고산지역 침엽수종의 감소는 산림생태계 다양성을 훼손하고 다양한 산림의 기능을 쇠퇴하게 만들 수 있다. 즉, 멸종위기 침엽수종의 쇠퇴는 탄소저장량, 수자원공급, 휴양 등의 산림고유의 기능들을 전반적으로 약화시킬 수 있으며, 국내 생물다양성 저하의 대표적 원인이 될 수 있다.

본 연구에서 추정된 2000년대의 국내 아고산지대 침엽수림 분포는 국립수목원의 국가생물종지식정보(www.nature.go.kr) 관련 보고서, Park et al. (2015)의 연구와 비교하였을 시 유사한 수준으로 나타났다. 미래 시나리오에서 아고산 침엽수림의 분포면적 감소 추세는 2050년대에 2000년대 대비 1/3 수준으로 감소할 것으로 나타나며, 2080년대에는 그 감소가 심각한 수준에 이를 것으로 분석되었다. 이는 Lim et al.(2018)의 연구에서 2070년대와 대체로 유사한 수준을 나타내고 있다. 즉 2050년대 이후 국내에서 아고산 침엽수림의 생육지역을 확보하기 위해서는 온실가스 감축을 통해 기후변화 자체를 완화하거나, 산림관리 및 보전지역 설정 등 산림 전반의 기후변화 적응 노력이 필요하다(Choi et al., 2019). 특히, 본 연구에서 활용한 RCP8.5 시나리오는 현재와 같은 전 지구적 온실가스 감축이 기대에 못 미치는 미래를 예상하므로, 이를 기준으로 적응전략을 도출하는 것이 현실적일 것으로 판단된다.

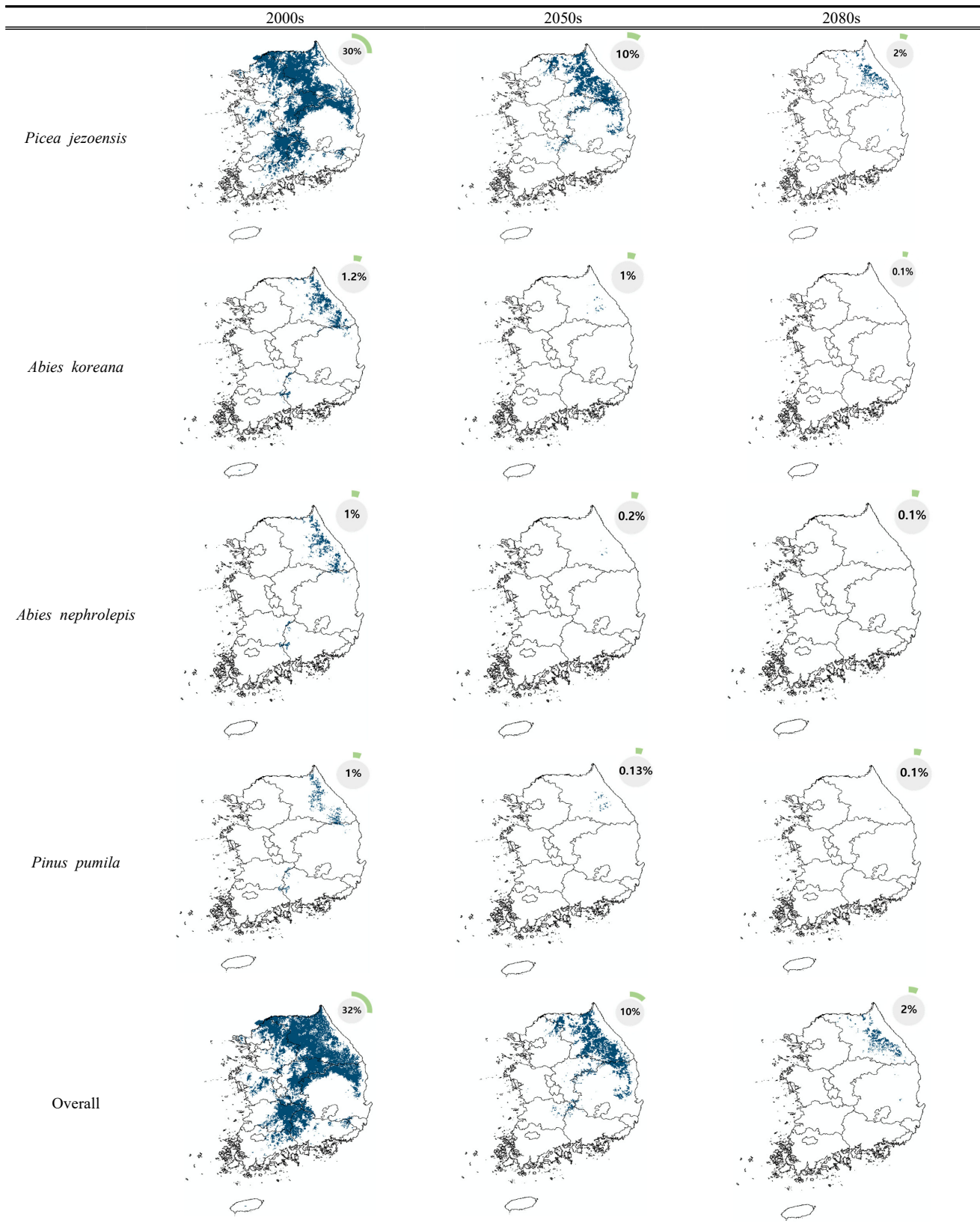


Fig. 6. Potential distribution of endangered coniferous tree species using HyTAG model

Table 4. HyTAG model validation using PrP

| | <i>Picea jezoensis</i> | <i>Abies koreana</i> | <i>Abies nephrolepis</i> | <i>Pinus pumila</i> | Overall |
|--------------------------------|------------------------|----------------------|--------------------------|---------------------|---------|
| S _{act} ^a | 69 | 88 | 62 | 7 | 226 |
| S _{pred} ^b | 29,784 | 1,164 | 432 | 1,538 | 32,148 |
| S _{both} ^c | 32 | 56 | 21 | 3 | 147 |
| PrP ^d | 46.68 | 63.64 | 33.87 | 57.14 | 65.04 |

S_{act}^a : the area identified in only the actual species distribution(km²)

S_{pred}^b : the area identified in only the simulated results(km²)

S_{both}^c : the area identified as containing species of interest in both and actual species distribution and the simulated results(km²)

PrP^d : prediction probability(%)

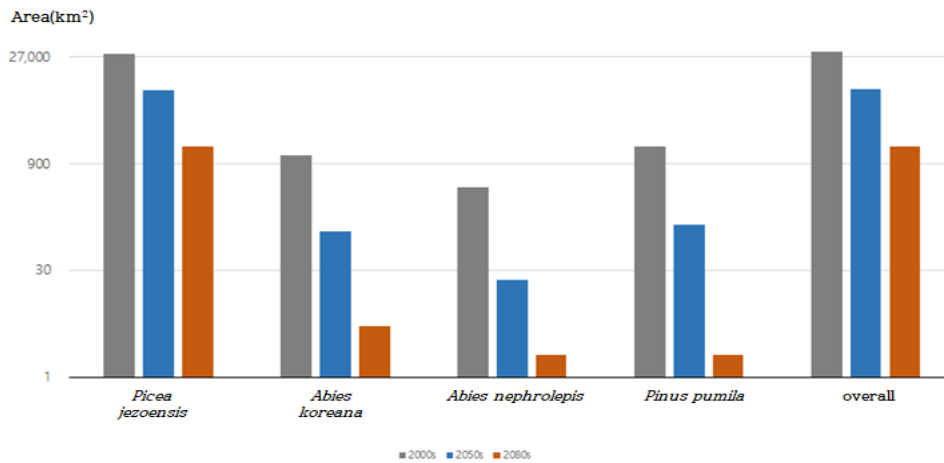


Fig. 7. Change distribution of endangered coniferous tree species in the past and future

4. 결론

본 연구에서는 국내에서 기후변화 취약수종인 동시에 멸종위기종으로 선정된 가문비나무, 구상나무, 분비나무, 눈잣나무를 대상으로 HyTAG 모델을 활용하여 시공간적으로 잠재수종 분포 변화를 예측하였다. 분석 결과, 생물기후지수는 미래로 갈수록 온량지수와 최저온도지수의 평균값이 상승하고 연평균 유효강우지수 평균값이 감소하는 것으로 나타났다. 가문비나무, 구상나무, 분비나무, 눈잣나무는 전반적으로 미래로 갈수록 잠재 분포 가능 면적이 줄어드는 것으로 나타났으며, 공간적으로는 강원도 고산지대 일부에서만 존재 할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 수종별 잠재분포 범위를 파악한 결과, 가문비나무가 다른 수종에 비해 잠재 서식할 수 있는 분포범위가 가장 큰 것으로 나타난 반면, 눈잣나무는 다른 수종에 비해 현존하는 분포범위가 적어 2050년

대부터 생육할 수 있는 공간이 거의 사라지는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 침엽수종의 기후변화 대응을 위한 다양한 적응방안이 필요함을 시사하고 있다. 다만 본 연구에서 활용된 모델은 기후인자만을 고려하여, 잠재적분포를 설명하며, 장기적으로는 수종에 영향을 미칠 수 있는 비기후인자를 함께 고려하여 자연적인 동적변화를 반영하는 등 현실성을 높이는 연구가 필요할 것이다.

사사

본 연구는 환경부 ‘기후변화대응 환경기술개발사업’(과제번호: 2014001310008)으로 지원을 받았으며, 이에 감사드립니다.

References

- Bachelet D, Lenihan JM, Daly C, Neilson RP, Ojima DS, Parton WJ. 2001. MC1: a dynamic vegetation model for estimating the distribution of vegetation and associated carbon, nutrients, and water-technical documentation. Version 1.0. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station.
- 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.
- Cui G, Kwak H, Choi S, Kim M, Lim CH, Lee WK, Kim JS, Chae Y. 2016. Assessing vulnerability of forests to climate change in South Korea. *J For Res* 27(3): 489-503.
- Fang J, Lechowicz MJ. 2006. Climatic limits for the present distribution of beech (*Fagus L.*) species in the world. *J Biogeo* 33(10): 1804-1819.
- IPCC. 2014. Climate change 2014: synthesis report. contribution of working group I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. IPCC. Geneva, Switzerland. p1-151.
- Iverson LR, Prasad AM, Matthews SN, Peters M. 2008. Estimating potential habitat for 134 eastern US tree species under six climate scenarios. *For Eco Manage* 254: 390- 406.
- Iverson L, McKenzie D. 2013. Tree-species range shifts in a changing climate - detecting, modeling, assisting. *Landscape Eco* 28: 879-889.
- Korea Forest Service. 2016. Preparing conservation and restoration measures for conifers in endangered alpine areas. Daejeon: KFS [Korean Literature]
- Kira T. 1945. A new classification of climate in eastern Asia as the basis for agricultural geography. Horticultural Institute. Kyoto Univ, Kyoto.
- 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 M, Lee WK, Choi GM, Song C, Lim CH, Moon J, Piao D, Kraxner F, Shvidenko A, Forsell N. 2017. Modeling stand-level mortality based on maximum stem number and seasonal temperature. *For Eco Manage* 386: 37-50.
- Kim YS, Chang CS, Kim CS, Gardner M. 2011. *Abies koreana*. The IUCN Red List of Threatened Species 2011: e.T31244A96 18913.
- Kong WS. 2006. Biogeography of Native Korean Pinaceae, *J Korea Geograph Soc* 41(1): 73-93. [in Korean with English abstract]
- Koo KA, Park WK, Kong WS. 2001. Effects of Climate Change on the Growths - Dendrochronological analysis of *Abies koreana* W. at Mt. Halla, Korea -. *J Eco Environ* 24(5): 281-288. [in Korean with English abstract]
- Korea National Arboretum. 2011. Distribution Maps of Vascular Plants of Korean Peninsula: Western & Southern Coastal Area. [Korean Literature]
- Korea National Arboretum. 2015. A Synonymic List of Vascular Plants in Korea. [Korean Literature]
- Lee MA, Lee WK, Song CC, Lee JH, Choi HA, Kim TM. 2007. Spatio-tempers change prediction and variability of temperature and precipitation. *J Geograp Infor Sys Korea*. 15(3): 267-278. [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 JH, Woo SY, Kwon MJ, Chun JH, Shin JH. 2006. Photosynthetic capacity and water use efficiency under different temperature regimes on healthy and declining Korean Fir in Mt. Halla. *J Korean For Soc* 95(6):705-710. [in Korean with English abstract]
- National Biological Species Information System[Internet]. Available from:www.nature.go.kr
- Neilson RP. 1995. A model for predicting continental scale vegetation distribution and water balance. *Eco App* 5(2): 362-385.
- NIFoS(National Institute of Forest Science). 2009. Forest damage caused by global warming-Korea Pinaceae cause and future outlook. Seoul: NIFoS. [Korean Literature]
- NIFoS(National Institute of Forest Science). 2014a. IPCC 5th report on climate change and its Implications. Seoul: NIFoS. [Korean Literature]
- NIFoS(National Institute of Forest Science). 2014b. Long-term Ecological Research (LTER) on Forest Ecosystem Responses to Global Environmental Change. Seoul: NIFoS. [Korean Literature]
- Matthews SN, Iverson LR, Prasad AM, Peters MP, Rodewald PG. 2011. Modifying climate change habitat models using tree species-specific assessments of model uncertainty and life history factors. *For Eco Manage* 262: 1460-1472.
- Park HC, Lee JH, Lee GG, Um GJ. 2015. Environmental features of the distribution areas and climate sensitivity assesment of *Korean Fir* and *Khinghan Fir*. *J Korea Environ Imp Ass* 24(3): 260-277. [in Korean with English abstract]
- Smith TM, Reynolds RW, Peterson TC, Lawrimore J. 2008. Improvement to NOAAs historical merged land-Ocean surface temperature analysis(1880-2006). *J Clim* 21: 2283-2296.
- Thornthwaite CW. 1948. An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Rev* 38(1): 55-94.
- USDA, 2014. Forest ecosystem vulnerability assessment and synthesis for northern Wisconsin and western Upper Michigan: a report from the Northwoods Climate Change Response Framework project. Gen. Tech. Rep. NRS-136. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station. 247 p.
- Yang KC. 2001. Classification of major habitats based on the climatic conditions and topographic features in Korea [Dissertation]. Chung-Ang University. [in Korean with English abstract]
- Yim Y.J. 1977. Distribution of forest vegetation and climate in the Korean peninsula III. Distribution of tree species along the thermal gradient. *Jap J Eco* 27: 177-189.
- Yoon KH, Kong WS. 2011. Distribution and climate factors of *Picea jezoensis* native to the Korean peninsula. *Kor Geog Soc Proceedings of Conference on Geography*: 68-72. [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>, Downloaded on 09 January 2015. <https://sustainabledevelopment.un.org/>