

## MaxEnt 모형을 이용한 소나무 잠재분포 예측 및 환경변수와 관계 분석

조남현<sup>1</sup> · 김은숙<sup>2\*</sup> · 이보라<sup>2</sup> · 임종환<sup>2</sup> · 강신규<sup>1</sup>

<sup>1</sup>강원대학교 환경학과, <sup>2</sup>국립산림과학원 기후변화생태연구과  
(2019년 9월 11일 접수; 2020년 5월 29일 수정; 2020년 6월 26일 수락)

### Predicting the Potential Distribution of *Pinus densiflora* and Analyzing the Relationship with Environmental Variable Using MaxEnt Model

NangHyun Cho<sup>1</sup>, Eun-Sook Kim<sup>2\*</sup>, Bora Lee<sup>2</sup>, Jong-Hwan Lim<sup>2</sup>, Sinkyu Kang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon, 25949, Korea

<sup>2</sup>Forest Ecology and Climate Change Division, National Institute of Forest Science, 57 Hoegi-ro, Dongdaemun-gu, Seoul 02455, Korea

(Received September 11, 2019; Revised May 29, 2020; Accepted June 26, 2020 )

#### ABSTRACT

Decline of pine forests happens in Korea due to various disturbances such as insect pests, forest fires and extreme climate, which may further continue with ongoing climate change. For conserving and reestablishing pine forests, understanding climate-induced future shifts of pine tree distribution is a critical concern. This study predicts future geographical distribution of *Pinus densiflora*, using Maximum Entropy Model (MaxEnt). Input data of the model are locations of pine tree stands and their environmental variables such as climate were prepared for the model inputs. Alternative future projections for *P. densiflora* distribution were conducted with RCP 4.5 and RCP 8.5 climate change scenarios. As results, the future distribution of *P. densiflora* steadily decreased under both scenarios. In the case of RCP 8.5, the areal reductions amounted to 11.1% and 18.7% in 2050s and 2070s, respectively. In 2070s, *P. densiflora* mainly remained in Kangwon and Gyeongsang Provinces. Changes in temperature seasonality and warming winter temperature contributed primarily for the decline of *P. densiflora*., in which altitude also exerted a critical role in determining its future distribution geographic vulnerability. The results of this study highlighted the temporal and spatial contexts of *P. densiflora* decline in Korea that provides useful ecological information for developing sound management practices of pine forests.

**Key words:** *Pinus densiflora*, Climate change, Maximum entropy model, Geographic distribution, RCP scenarios



\* Corresponding Author : Eun-Sook Kim  
(drummer12@korea.kr)

## I. 서 론

기후변화에 따라 산림생태계가 어떻게 변화할지에 관심이 갈수록 커지고 있다. 기후변화가 진행됨에 따라 숲을 이루는 종들의 구성이 변화하여 궁극적으로 특정 식생대의 지리적 이동이 발생할 수 있다(Mather and Yoshioka, 1968; Stephenson, 1990; Zhang *et al.*, 2004; Allen *et al.*, 2010; Bertrand *et al.*, 2011; Kang *et al.*, 2016). 지난 100년 동안 지구의 평균기온은 약 0.6°C 상승하였으며 중위도 지방의 경우 타 지역보다 더 큰 상승폭을 보였다(Walther *et al.*, 2002). 우리나라에서 최근 30년간 연평균 기온은 1.2°C 증가했으며, 계절적으로는 겨울철 기온이 더 빠르게 상승하였다. 강수량은 여름철에 증가한 반면 다른 계절은 뚜렷한 증감 추세를 보이지 않았다(Kim *et al.*, 2006; IPCC, 2014; Lim, 2016). 이러한 급격한 기온상승은 산림생태계의 구조와 기능에 영향을 주는 교란으로 작용할 것이며, 산림의 점유비율이 큰 우리나라에서는 산림생태계 변화로 인한 국토 자연자원 관리의 상당한 불확실성에 직면할 것으로 예상된다(Kim *et al.*, 2017a).

소나무(*Pinus densiflora*)는 다른 수종에 비해 건조한 토양에 잘 적응하여 척박하고 비옥한 곳까지 넓은 생존분포를 보이며 단일 수종으로는 국내에서 가장 넓은 면적을 차지하고 있다(NIFOS, 2012). 이에 소나무는 오랜 세월 동안 우리 민족의 곁에서 다방면으로 활용되어 왔지만 최근 병해충, 산불피해, 기후변화, 자연천이, 인위적 요인 등 다양한 이유로 인해 소나무가 빠르게 감소하고 있다(Kim *et al.*, 2015; KFS, 2017; Kim *et al.*, 2017b). 현재 우리나라 소나무림은 2016년 기준으로 1974년의 국가산림자원조사 당시보다 167만ha가 줄어든 156만ha(해송면적 포함)로 지난 40여년 간 소나무 서식 면적이 절반 이상 줄어들었다(KFS, 2016). 지구온난화로 인한 아열대 기후의 북상은 현존 소나무 자생지의 기후환경을 변화시켜 우리나라 소나무 분포지역을 전국에서 일부 산간지역으로 축소시킬 수 있다고 보고된 바 있다(KEI, 2001; Chun and Lee, 2013). 또한, 생태계 천이과정을 통해 과거 소나무가 우점하던 지역이 활엽수, 특히 참나무류와의 경쟁에 밀려 점차 혼효림이나 낙엽활엽수 임분으로 변해 갈 가능성이 크다(KFS, 2016; Seo *et al.*, 2013). 따라서 점차 쇠퇴하는 소나무림의 동태를 파악하고 생태적 관리 방안과 정책 수립을 지원하기 위한 기초정보가 필요하다. 이에 Lee *et al.*(2012)는 Hydrological and

Thermal Analogy Groups (HyTAG) 모형을 이용해 미래의 소나무림과 참나무림의 공간분포 및 탄소저장량을 예측하여, 100년 후 국내 임상은 침엽수림에서 활엽수림으로 급격히 변하고 소나무는 거의 멸종될 것이라 보고하였다. 또한, Chun and Lee(2013)은 Genetic Algorithm for Rule-Set Prediction(GARP) 종 분포 모형을 이용하여 기후변화 영향에 따른 소나무 지리적 분포를 예측한 결과 소나무는 강원산악지역을 중심으로 일부 지역만에 잔존할 것이라 주장하였다. 선행연구들은 공통적으로 기후변화가 진행됨에 따라 소나무가 서식지 면적이 줄어들 것으로 예측하였지만, 분포 면적과 변화 추세 그리고 소나무의 잠재적 분포지를 결정하는 주요 요인에 대해서는 상이한 분석결과를 보였다. 이는 미래 소나무 분포지와 결정요인에 대한 우리의 이해가 아직 부족하다는 것을 의미한다. 보다 다양한 방법과 상이한 자료들을 이용해 대안적 기초자료를 생산함으로써 보다 종합적인 예측과 해석 정보를 개발할 필요가 있다.

본 연구에서는 Maximum Entropy Model (MaxEnt) 모형을 이용해 기후변화에 따른 국내의 소나무 분포의 변화를 예측하고, 변화의 주요 결정요인을 판별하였다. MaxEnt 모형은 생태계 지위 모형(Ecological niche model) 중의 하나로 Berger *et al.*(1996)에 의해 소개된 최대 엔트로피 접근법(Maximum entropy approach)을 바탕으로 하는 기계학습(Machine learning) 모형이다. 이 모형은 종(혹은 개체)의 출현자료를 이용해 종(혹은 개체)의 지리적 분포를 예측하는 데에 높은 정확도를 보이는 것으로 알려져 있다(Phillips *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2015). 또한, 비모수적인 관계를 잘 표현하기 때문에 다양한 분야에서 종 분포변화를 예측하는 데에 활용되었고 모형의 유용성이 널리 검증되었다(Petersom *et al.*, 2007; Phillips and Dudik, 2008; Kim *et al.*, 2013; Song, 2015). MaxEnt 모형결과는 소나무 잠재 분포를 예측하고 환경변수와의 관계를 파악하는 데에 유의미한 단서를 제공하고, 향후 타 모형을 이용한 연구결과들과의 비교 또는 앙상블(Ensemble) 분석에 활용될 수 있다. 이를 위해 MaxEnt 모형에 기후, 입지, 생물환경자료 등을 입력하여 현존 소나무의 잠재분포지를 모의하고 환경변수와의 관계를 파악하였으며, 미래 기후변화에 시나리오(Representative Concentration Pathway, RCP)를 바탕으로 기후변화에 따른 소나무 잠재분포지의 변화를 예측하였다.

## II. 재료 및 방법

### 2.1. 소나무 출현자료

본 연구에서 사용한 소나무 출현자료는 산림청에서 제공하는 1:5000 대축척 임상도(2009~2013년)에서 소나무 천연림 지역만 추출하여 분석에 사용하였다. MaxEnt 모형은 출현자료를 점(point) 좌표형태로 각 출현지점에 대한 위도와 경도 값을 요구하므로, 입지 구획(polygon)형태로 구성되어 있는 임상도 자료를 점 형태로 변환하는 전처리 과정을 수행하였다. 먼저, 입지구획 형태의 임상도에 격자화(Rasterization)를 수행하여 1 km x 1 km 격자자료로 변환하였다. 변환과정에서 한 격자 내 가장 많은 비율을 차지하는 속성정보를 선정하여 격자속성을 결정하는 방식을 취하였다. 그 후 생성된 격자형 자료에 속성정보가 소나무로 판단된 격자의 중심좌표를 추출하여 표 형태로 정리하여 MaxEnt 모형에 사용하였다. 본 연구에서는 임상도 자료 내 소나무 자료만 활용하였으며 해송은 제외하였다.

### 2.2. 기후, 입지 및 생육특성 자료

환경변수자료는 크게 세 가지로 기후(현재, 미래), 입지, 생육특성을 고려한 자료를 사용하였다(Table 1). 현재기후자료(1970~2000년)는 WorldClim version

2.0(<http://www.worldclim.org/>)의 30 seconds(~1 km<sup>2</sup>) 공간해상도의 생물기후변수(Bioclimatic variables)자료를 다운받아 사용하였다. 생물기후변수는 식생의 생리와 관계가 깊은 기후환경변수로 연평균 기온, 강수량 외에도 계절 또는 극한시기의 기온 및 강수량도 포함되어 총 19개로 구성되어 있다. 미래 기후자료는 앞으로 다가올 기후변화에 대비하여 IPCC 5차 평가보고서(AR5)에서 온실가스 저감 정책이 상당히 실행되는 RCP 4.5 경우와 현재 추세로 저감 없이 온실가스가 배출되는 경우인 RCP 8.5자료를 각각 사용하여 미래의 소나무 잠재분포를 평가하였다. 본 연구에서는 다양한 기후변화 예측모델(Global Climate Model, GCM) 중 기상청 기후변화정보센터(Climatic Change Information Center, CCIC)에서 선정한 HadGEM2-AO 모형을 적용한 RCP 시나리오의 Bioclimatic자료를 수집하였다. 기후변화에 따른 소나무 분포변화를 비교하기 위해 가까운 미래(average for 2041-2060, 2050년)와 먼 미래(average for 2061- 2080, 2070년) 자료 또한 각각 구축하였다. 19개의 변수들에 대해 다중공선성(Multicollonearity)을 제거하기 위해 상관분석을 실시하여 상관계수 값(Pearson correlation coefficient;  $r \geq 0.7$  or  $\leq -0.7$ )이 높은 변수들은 분석에서 제외하였다(Kumar *et al.*, 2014; Lee *et al.*, 2015). 그 결과, 총 8개의 변수가 선정되었다. 입지변수는 고

**Table 1.** List of bioclimatic, forest position and growth variable used in MaxEnt modeling

Variable ID	Description	Data Source	Units
BIO 1	Annual Mean Temperature		°C
BIO 3	Isothermality (BIO2/BIO7) (* 100)		%
BIO 4	Temperature Seasonality (standard deviation *100)		%
BIO 6	Min Temperature of Coldest Month	Download from Worldclim	°C
BIO 7	Temperature Annual Range (BIO5-BIO6)		°C
BIO 12	Annual Precipitation		mm
BIO 14	Annual Precipitation		mm
BIO 15	Precipitation of Driest Quarter		mm
DEM	Elevation (100 m interval (0~2000 m))		class
ASP	Aspect (8 directions)	Derived from DEM	class
SLP	Slope (15 degree interval (0~45 degree))		class
SOD	Soil depth (divided by less than 50 cm, 50~70 cm, 70~90 cm, Greater than 90 cm)	Derived from digital forest location map	class
AGE	Age Class	Extracted from digital stock map	class
DEN	Crown Density Class		class

도, 경사, 방위, 토심 등 4개의 변수를 사용하였으며 고도, 경사, 방위는 한반도 수치표고모델(Digital Elevation Model, DEM)에서 토심은 산림청에서 제공하는 산림입지토양도(1:5000)에서 각각 추출하였다. 생육변수의 경우, 임상도에서 추출한 영급, 수관밀도 자료를 사용하였다. 영급과 수관밀도를 분석에 추가한 이유는 수목의 고사 메커니즘과 관련이 있다. 고온가뭄으로 인한 생산과 소비(호흡)의 불균형은 수목 내 탄소 부족을 유발시키고 지속적 불균형 상태는 결국 수목은 탄소기아(Carbon Starvation)를 발생시켜 수목이 굶어 죽게 되는 기작이다(McDowell *et al.*, 2008). 이러한 메커니즘과 관련하여 영급이 높은 큰 나무들은 고온으로 인한 호흡량 증가에 민감할 것이며 수관밀도가 높은 곳에 사는 나무들은 가뭄으로 인한 생산량 저하에 상대적으로 취약 할 수 있기 때문에 영급과 수관밀도 변수를 추가하였다. 결과적으로 본 연구에 사용된 입력자료는 기후, 입지, 생육환경요소를 모두 포함하여 총 14개의 독립변수를 사용하였다.

### 2.3. MaxEnt 모형

MaxEnt 모형은 [https://biodiversityinformatics.amnh.org/open\\_source/maxent/](https://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/)에서 무료로 다운받을 수 있으며 본 연구에서는 3.4.1 버전의 MaxEnt 모형을 다운받아 사용하였다. MaxEnt 모형의 구동을 위한 종속변수자료는 위도, 경도가 포함된 CSV 형식의 출현자료가 필요하며 독립변수자료는 지리적 범위 및 공간 해상도를 동일하게 맞춘 ascii 형식의 격자형 자료가 필요하다.

MaxEnt 모형의 기본개념인 최대 엔트로피 방법은 출현자료의 분포를 가장 잘 나타내는 확률분포를 찾기 위해 입력자료로부터 제한조건을 생성하여 이를 최대로 만족시키도록 엔트로피를 최대화함으로써 최악의 상황을 선택할 확률을 최소화하는 방법이다. Maxent 모형은 잠재분포 가능성을 0~1의 범위를 갖는 확률로서 제공하며, 1에 가까울수록 분포 또는 출현 가능성이 높다는 것을 의미한다. 모형의 검증은 수신자 조작 특성(Receiver Operating Characteristic, ROC)의 곡선 하위 면적(Area Under Curve, AUC)를 이용하여 평가하였다. AUC는 참 값을 참 값으로 예측하는지 혹은 거짓 값을 참 값으로 예측하는지를 나타내는 척도로 판별이 불가능한 우연한 경우에 대해서는 최소값인 0.5의 AUC 값을 나타내며, 완벽한 판별이 가능한 경우에는 1.0의 값으로 나타낸다. 또한, 소나무 잠

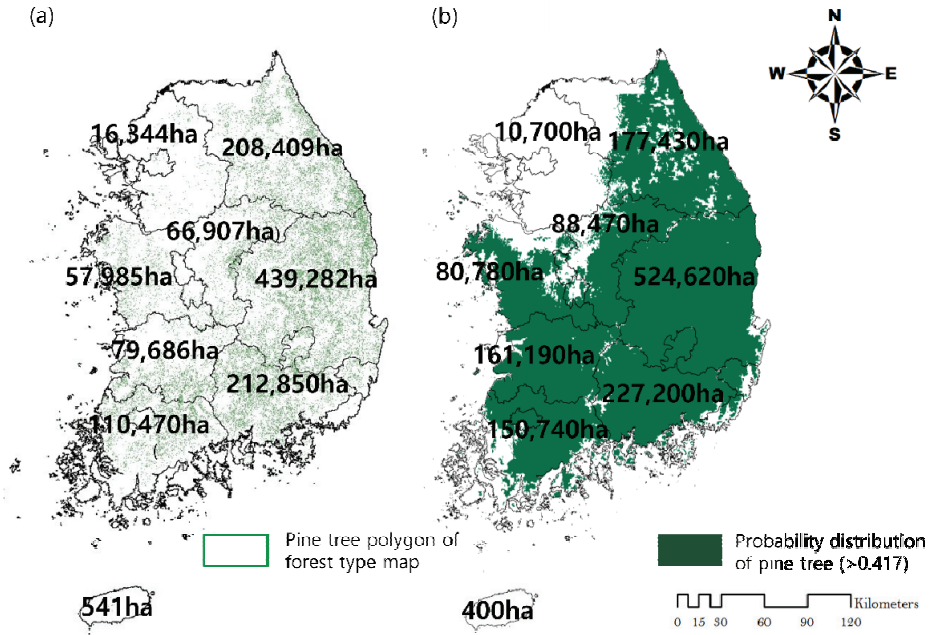
재분포에 영향을 주는 변수들의 중요도는 Jackknife 검증을 통해 평가하였다(Phillips *et al.*, 2006). 모형의 결과에서는 기여도(Percent Contribution)와 중요도(Permutation Importance)를 각각 제공해주며, 기여도는 모형의 훈련과정에서 각 변수의 기여도를 바꿔가며 최적의 결과에 도출할 수 있도록 하는 방법이며, 중요도는 무작위 자료에 대한 모형 훈련 시 AUC 값을 감소시키는 변수의 중요성을 나타낸다(Choi *et al.*, 2015; Lee *et al.*, 2015).

## III. 결 과

### 3.1. 현존 소나무 잠재분포 모의

MaxEnt 모형을 통해 전국 소나무 잠재분포지를 모의하였으며 잠재분포지도의 각 격자는 입력된 기후, 입지, 생육조건을 바탕으로 모형이 판단한 소나무 서식확률인 잠재분포확률 값을 가지고 있다. 잠재분포확률은 경상, 전라, 강원 영동지역에서 높은 값을 보였으며, 서울, 경기도는 평균 0.21 정도의 낮은 잠재분포 값을 보였다. 시·군 별로 비교하였을 때 전국에서 가장 높은 잠재분포 값을 보인 곳은 경북 울진으로 0.74 (SD=0.07)의 값이 나타났다. 그 다음으로는 영양, 청송, 영천, 청도, 영덕 순으로 높은 값을 보였다. 반대로 잠재분포 값이 낮은 지역은 대부분 서울 및 경기도 속하는 의정부, 강남, 하남 등으로 0.04 수준의 값이 나타났다. 본 연구에서는 소나무 서식 적합/부적합 지역을 구분하기 위해 “Equal training sensitivity and specificity”을 통해 산출된 기준 값(0.417, SD±0.001)을 적용하였다(Lee *et al.*, 2015). 모형에서 예측된 잠재분포확률을 기준 값을 이용해 서식 적합/부적합지로 구분하였을 때 현재 기후환경조건에서 우리나라의 소나무 잠재분포 가능성이 있는 면적은 1,421,760 ha로 산림청에서 제공하는 전국 소나무림 면적 1,337,680 ha (KFS, 2016) 보다 약 6%(84,080 ha) 큰 면적이 산출되었다. 지역별로 비교하였을 때 경기, 강원 등 북부지역은 잠재분포면적이 과소모의 되었으며, 중부 및 남부지역은 과대모의 되었다. 특히, 전북과 경북지역에서 각각 81,500 ha, 85,300 ha의 과대모의 된 결과가 산출되었다. 과대모의 된 지역의 경우 일부 해송서식지와 도ship지를 모형에서 소나무 생존적지로 판단하여 높은 값이 산출된 것으로 보인다.

MaxEnt 모형의 정확도는 전체 소나무 출현자료를 무작위로 7:3으로 나눠 각각 Training과 Test에 사용하



**Fig. 1.** Present pine forest map (a) Report data of Korea Forest Service and forest type map, (b) MexEnt result of potential distribution, respectively.

는 과정을 10회 반복하였을 때 Training ROC의 AUC 값은 0.79로 나타났으며 Test AUC 값은 0.77(SD = 0.014)로 산출되었다. 일반적으로 AUC 값이 0.8 이상이면 모형의 예측력이 우수하다고 평가할 수 있다 (Thuiller, 2003; Phillips *et al.*, 2006; Franklun, 2009).

**3.2. 미래 소나무 잠재분포변화 예측**

RCP 4.5와 RCP 8.5 기후변화 시나리오의 결과 우리나라 평균기온은 지속적으로 상승할 것으로 보이며 (NIFOS, 2014), RCP8.5기준 2070년 평균기온은

4.3°C 강수량은 약 160 mm가량 상승할 것으로 보인다(Table 2).

RCP 4.5와 RCP 8.5시나리오를 적용한 결과 소나무 잠재분포지는 감소하는 양상을 보였으며, RCP 4.5에 비해 RCP 8.5에서 더 빠르게 감소하였다(Fig. 2).

현재기후자료를 적용한 잠재분포 면적과 비교하였을 때 기후변화 시나리오상 소나무 잠재분포의 변화율은 다음과 같다(Table 3). RCP 4.5시나리오상 소나무 잠재분포지는 2050년에 전체면적의 5.3%가 2070년에는 12.3%가 감소할 것으로 나타났으며 RCP 8.5의

**Table 2.** Change in annual mean temperature and total precipitation by 2050's and 2070's

Index	Present	RCP 4.5		RCP 8.5		
		2050	2070	2050	2070	
Temperature(°C)	Average	11.4	13.9	14.6	14.2	15.7
	Max	16.0	18.3	18.9	18.5	19.7
	Min	3.2	5.7	6.5	6.0	7.6
	Difference	-	2.5	3.2	2.8	4.3
Precipitation(mm)	Average	1,301	1,419	1,444	1,435	1,465
	Max	1,968	2,202	2,380	2,189	2,193
	Min	948	1,036	1,031	959	980
	Difference	-	118	143	134	164

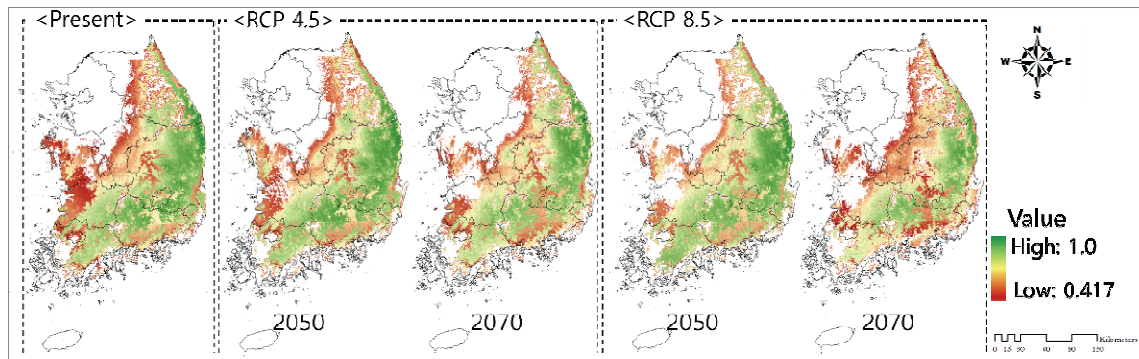


Fig. 2. Spatial map of pine tree potential distribution (a) Present (b) RCP 4.5 (C) RCP 8.5.

경우 2050년에 11.1%가 2070년에는 18.7%의 면적이 감소하는 결과가 산출되었다. 지역적으로 비교하였을 때 충남, 전북, 강원 순으로 각각 47.6%, 27.5%, 26.7%의 높은 감소율을 보였으며, 면적으로 환산하였을 때 잠재분포지가 가장 많이 감소한 지역은 강원, 전북, 경북으로 각각 47,400 ha 44,300 ha, 33,000 ha의 면적이 감소하였다.

3.3. 소나무 잠재분포와 환경요인변수 간의 관계

환경요인변수와의 관계를 보기 위해 모형의 잠재분포예측에 높은 기여도(Percent Contribution)와 중요도(Permutation Importance)를 보인 변수에 대해 살펴보았다. 기여도의 경우 DEM(33.8%), BIO4(32.7%), BIO6(11.0%) 순으로 높은 값을 보였으며, 중요도의 경우 BIO4(45.8%), DEM(15.9%), BIO6(15.7%)이 중요한 변수로 나타났다. 이외에 다른 변수들은 10% 이

하의 낮은 값을 보였다.

높은 기여도와 중요도를 보인 변수들에 대해 잠재분포지 판단에 있어 어떻게 작용하였는지 파악하기 위해 각 변수의 반응곡선을 살펴보았다. BIO4는 월 평균 기온의 표준편차(Standard Deviation, SD) \* 100 값으로 계절에 따른 기온차이의 정도를 나타낸다. 반응곡선에서 계절기온 값이 일정수준이상 증가하거나 감소하면 잠재분포 가능성이 낮아지는 형태의 곡선을 보였다(Fig. 4). DEM 변수 곡선에서는 고도가 높은 고산지대를 제외하고 대부분 높은 잠재분포확률 값을 보였다. BIO6는 Min Temperature of Coldest Month로 그 그래프에서 기온이 일정수준이상 올라가면 잠재분포확률이 급격히 떨어지는 양상을 보였다.

이 변수들에 대해 기준 값(0.41)을 적용하여 소나무 잠재분포지의 특징을 정리하면 연간 월평균기온의 표준편차가 7.8~10.2°C, 고도가 0~900 m, 최저기온이

Table 3. Table of potential distribution change ratio (%) compared to the current pine tree potential distribution map

Area	RCP 4.5		RCP 8.5	
	2050(%)	2070(%)	2050(%)	2070(%)
Gyeonggi-do	-59.4	-100	-96.8	-100
Gangwon-do	-7.9	-17.2	-15.1	-26.7
Chungcheongbuk-do	-12.2	-16.6	-12.1	-18.8
Chungcheongnam-do	+0.2	-35.9	-39.2	-47.6
Jeollabuk-do	-11.8	-23.4	-19.7	-27.5
Jeollanam-do	-8.7	-11.9	-6.9	-15.6
Gyeongsangbuk-do	-1.0	-1.5	-2.9	-6.3
Gyeongsangnam-do	-0.6	-2.3	-2.4	-10.2
Total	-5.3	-12.3	-11.1	-18.7

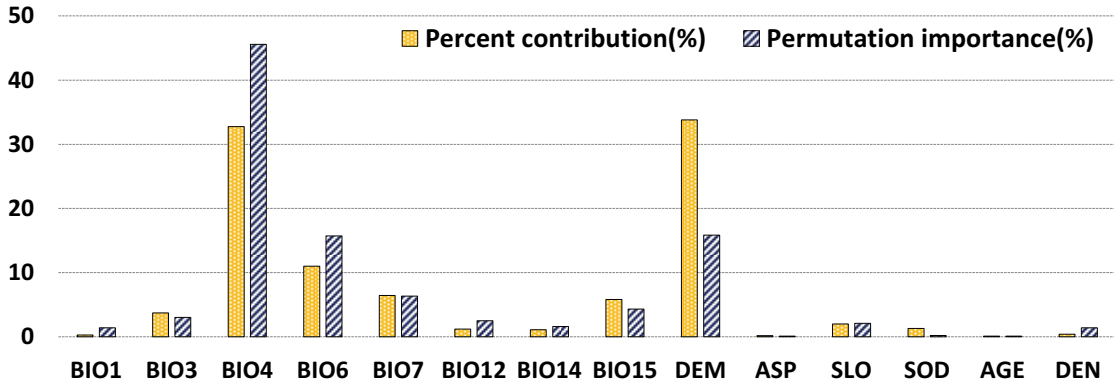


Fig. 3. Graph of variable contributions (Orange bar) and important (Blue bar).

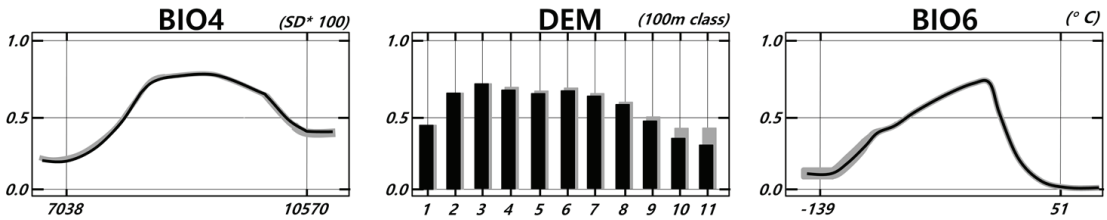


Fig. 4. Response curve of high rank contribution variables. BIO4(Temperature Seasonality (standard deviation \*100)), DEM(Elevation (100 m class)), BIO6(Min Temperature of Coldest Month (°C)), respectively.

-10.5~1°C인 곳으로 나타났다. 이를 지리적 위치로 살펴보면 DEM 경우 강원 산간지역 및 지리산, 덕유산 지역을 제외하고 전국적으로 넓은 잠재분포지를 보였다. BIO4와 BIO6은 경상을 중심으로 전남, 강원 일부를 포함하고 있었다. 경기 및 강원 영서의 경우 기온의 계절기온(BIO4)의 차이가 심하고 겨울철 기온(BIO6)이 매우 낮아 소나무 잠재분포 부적합지로 판단되었다. 반대로 제주의 경우 계절기온의 차이가 적고 기온이 높아 부적합지로 판정되었다.

#### IV. 결론 및 토의

본 연구는 생육, 입지, 기후환경요소를 바탕으로 MaxEnt 모형을 이용하여 소나무 잠재분포예측 및 환경요인변수와의 관계에 대해 분석하였다. 연구결과 현존 소나무 잠재분포는 서울, 경기를 제외하고 고도 1,100 m 이하에서 경북을 중심으로 넓은 분포를 보이는 기존 소나무 분포와 유사하게 나타났다. 선행연구 중 MaxEnt 모형과 함께 널리 사용되는 중 분포 모형인

GARF를 이용한 현존 소나무 잠재분포결과와 비교하였을 때 경기, 강원 영서를 제외하고 중부와 남부지방에 넓게 분포하는 형태는 비슷하였지만 전라, 충청의 MaxEnt 잠재분포확률은 0.5~0.6 수준으로 GARP 모형결과에 비해 상당히 낮은 값을 보였다(Chun and Lee, 2013). 이는 입력자료에서 오는 차이 일 수도 있지만 MaxEnt가 GARP 모형에 비해 잠재분포 발생확률을 더 보수적으로 판단한다는 선행연구들의 결과와 부합한다(Peterson et al., 2007; Qin et al., 2015; Ray et al., 2018). MaxEnt 모형 결과에 있어 일부 해송서식지 및 도심지를 소나무 생육적지로 판단하여 소나무 잠재분포지가 과모의 된 경우도 있었으며 반대로 작은 소나무 임분 및 파편화(Fragmentation)된 산림은 입력자료 전처리 과정에서 도심지로 분류되어 잠재분포지가 적게 산출되기도 하였다. 또한, 본 연구에서 사용한 현재기후자료인 worldclim version 2.0은 1970년부터 2000년까지의 평균자료로 임상도와 시간적 차이가 존재한다. 이러한 오차는 모형결과에 영향을 미칠 수 있으며 본 연구의 한계점이라 할 수 있다. 그럼에도 불구하고



하고 본 연구의 현존 소나무 잠재분포 결과는 일부 도시 및 해안을 제외하고 실제 소나무 분포자료와 비슷한 수준의 값을 보였다. 이는 기후변화 시나리오에 의한 잠재분포변화 예측에 있어 유의미한 결과를 제공할 수 있을 것이라고 판단된다.

미래에 소나무 잠재분포지는 지속적으로 감소할 것으로 나타났으며 소나무 분포 선행연구결과와 비교하였을 때 잠재분포지가 감소하는 경향은 같으나 상대적으로 넓은 잠재분포 면적이 산출되었다(Chun and Lee, 2013; NIFOS, 2014; Kim *et al.*, 2015). 이는 지속적인 관리 및 대응이 수행된다면 잠재분포확률이 높은 강원 및 경상 일부 지역을 중심으로 상당기간 소나무가 자생할 수 있을 것으로 예측된다. 하지만 현재 적용한 RCP 시나리오 보다 더욱 극한의 기후변화가 진행될 경우 소나무 잠재분포지 감소 폭은 더욱 증가할 것으로 판단된다.

본 연구결과에 있어 특기할 만한 점은 소나무 잠재분포지 판단에 있어 계절기온(Temperature Seasonality) 또는 최저기온(Min Temperature of Coldest Month)이 중요한 요인으로 나타났다는 것이다. 선행연구에서도 1월 평균기온, 최고 한기 기온, 최저온도지수(Minimum Temperature of the Coldest Month Index, MTCI) 등이 소나무 잠재분포판단에 주요변수로 나타난 바 있다(Lee *et al.*, 2012; Chum and Lee, 2013; Kim *et al.*, 2015). BIO4 반응곡선에서 계절에 따른 기온의 변이가 크거나 작은 경우 잠재분포확률이 감소하는 경향을 보였으며 BIO6의 경우에 겨울철 기온의 상승은 급격한 잠재분포확률 감소를 보였다. 이는 강원 고산지역과 같이 기온이 매우 낮은 지역을 제외하고 여름과 겨울의 기온차이가 작거나 겨울철 기온이 높은 지역은 소나무 분포가 적합하지 않은 곳으로 판단한 것을 의미한다. 이러한 결과는 지난 30년간 강수량의 뚜렷한 증감 없이 겨울철 기온이 많이 상승한 우리나라 기후변화 추세와 맞물려 생각해 볼 필요가 있다. 겨울철 기온상승은 토양결빙의 감소와 증산량을 증가시켜 식물이 이용할 수 있는 토양수를 감소시키는 한편 이른 봄철 소나무 균근균 생성 이전의 고온건조는 소나무 수분 및 영양물질 수급에 차질을 발생시켜 소나무 자생에 부정적인 영향을 미칠 것이라는 가설이 제시된 바 있다(Lim, 2016; Kang *et al.*, 2016). 또한, 기온상승은 유지호흡량을 증가시켜 식생 내 탄소화합물의 소비를 촉진시킨다. 이에 Kang *et al.*(2016)은 동적 생태계 과정 모형을 이용하여 소나무 대량 고사

가 발생한 지역에 대해 식생 탄소수지 거동을 모의하였으며, 그 결과 생산량-유지호흡량의 불균형을 확인한 바 있다. 식생의 탄소불균형은 탄소기아(Carbon Starvation)를 유발시켜 식생의 생장 및 방어기작 저하와 이어지며 기온의 증가로 개체수가 증가한 병해충 및 질병에 더욱 취약해질 것이다(McDowell *et al.*, 2008; Rosas *et al.*, 2013). 이는 결국 초기 생장이 빠른 낙엽활엽수종과의 경쟁에서 도태될 가능성을 키울 것이다.

기후변화로 인한 산림생태계 취약성(Vulnerability)은 점점 높아지고 있으며 병해충, 산불, 기후변화, 자연천이 등은 지속적으로 소나무 감소를 야기시킬 것이다. 이에 앞으로 발생할 수 있는 극단적 상황에 대한 대응전략을 구축할 필요가 있다. 산림생태계의 영향은 농업, 수자원 등에 비해 장기간에 걸쳐 나타나기 때문에 불확실한 미래상황을 예측할 수 있는 모델링연구는 필수적이다. 하지만 모형결과는 입력자료를 바탕으로 한 시뮬레이션 결과일 뿐 확정적인 것은 아니다. 그러므로 여러 방법과 자료를 활용한 모형연구와 이를 뒷받침해줄 다양한 기초자료구축의 필요성을 다시 한번 밝히는 바이다. 본 연구결과는 기후변화 시나리오에 따른 소나무 잠재분포를 모델링을 통해 예측함으로써 향후 소나무 보전 및 대책 마련의 의사결정의 참고자료로 활용될 수 있는 점에서 의미가 있다.

## 적 요

본 연구는 기후변화에 따른 소나무 잠재분포변화 예측 및 환경요인과의 관계를 파악하기 위한 목적으로 수행되었다. 입력자료인 종속변수는 1:5,000 임상도에서 추출한 소나무 출현자료를 사용하였으며, 독립변수는 RCP 시나리오 기후자료 및 임상도, 입지도에서 추출한 기후, 입지, 생육환경자료 등 총 14개의 환경요인 변수를 사용하였다. 이러한 입력자료를 바탕으로 생태적 지위 개념을 기반으로 한 종 분포 모형 중 하나인 MaxEnt (Maximum Entropy Modeling) 모형을 구동하여 미래의 소나무 잠재분포를 예측하였다. 분석결과 training AUC (Area Under Curve)가 0.79로 우수한 수준의 정확도를 보였으며 현존 소나무 분포 자료와 유사한 현재 잠재분포 결과를 보였다. RCP 시나리오를 적용한 결과 소나무 잠재분포지는 시간이 지남에 따라 지속적으로 감소할 것으로 나타났으며 RCP8.5 기준으로 2050년과 2070년에 각각 11.1%, 18.7%의



잠재분포지가 줄어들 것으로 예측되었다. 입력자료의 소나무 잠재분포 판단에 대한 기여도는 계절기온, 고도, 겨울철 기온 등이 높게 나타났다. 본 연구의 결과는 기후변화로 인한 소나무림 보전 및 대책 수립을 위한 기초자료로 활용될 것으로 판단된다.

## REFERENCES

- Allen, C. D., A. K. Macalady, H. Chenchouni, D. Bachelet, N. McDowell, M. Vennetier, T. Kitzberger, A. Rigling, D. D. Breshears, and E. T. Hogg, 2010: A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management* **259**(4), 660-684.
- Berger, A. L., S. A. D. Pietra, and V. J. D. Pietra, 1996: A maximum entropy approach to natural language processing. *Computational Linguistics* **22**(1), 39-71.
- Bertrand, R., J. Lenoir, C. Piedallu, G. Riofrio-Dillon, P. Ruffray, C. Vidal, J.-C. Pierrat, and J.-C. Gégout, 2011: Change in plant community composition lag behind climate warming in lowland forests. *Nature* **479**, 517-520.
- Choi, J., P. S. Lee, and S. H. Lee, 2015: Anticipation of the future suitable cultivation areas for Korean pines in Korean peninsula with climate change. *Journal of Korean Society of Environmental Restoration Technology* **18**(1), 103-113. (in Korea with English abstract)
- Chun, J. H., and C.-B. Lee, 2013: Assessing the effects of climate change on the geographic distribution of *Pinus densiflora* in Korea using ecological niche model. *Agricultural and Forest Meteorology* **15**(4), 219-233. (in Korea with English abstract)
- Franklin, J., 2009: *Mapping species distributions: spatial inference and prediction*. Cambridge University Press.
- IPCC, 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Group I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Core Writing Team, R. K. Pachauri, and L. A. Meyer, eds). IPCC, Geneva, Switzerland, 151pp.
- Kang, S. K., J.-H. Lim., E. S. Kim, and N. H. Cho, 2016: Modelling analysis of climate and soil depth effects on pine tree dieback in Korea using BIOME-BGC. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **18**(4), 242-252. (in Korea with English abstract)
- Kim, D. W., J. C. Park, and D.-H. Jang, 2017a: Analysis of the possibility for drought detection of spring season using SPI and NDVI. *Journal of the association of Korean geographers* **6**(2), 165-174. (in Korea with English abstract)
- Kim, H. G., D.-K. Lee, Y. W. Mo, S. H. Kil, P. Chan, and S. J. Lee, 2013: Prediction of landslides occurrence probability under climate change using MaxEnt model. *Journal of Environmental Impact Assessment* **22**(10), 30-50. (in Korea with English abstract)
- Kim, J. B., E. S. Kim, and J.-H. Lim, 2017b: Topographic and meteorological characteristics of pinus densiflora dieback areas in Sogwang-Ri, Uljin. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **19**(1), 10-18. (in Korea with English abstract)
- Kim, K. T., and J. S. Park, 2006: Correlation analysis of vegetation index and drought index. *Wetlands research* **8**(1), 49-58. (in Korea with English abstract)
- Kim, T.-G., Y. G. Cho, and J.-G. Oh, 2015: Prediction model of pine forests' distribution change according to climate change. *Korean Society of Limnology* **48**(4), 229-237. (in Korea with English abstract)
- KEI(Korea Environment Institute), 2001: *Climate change impacts assessment and adaptation measures on ecosystem. II - Forest eco-climate model development*. 107pp.
- KFS(Korea Forest Service), 2016: *Survey Report of National pine forest Resources*. 9pp.
- KFS(Korea Forest Service), 2017: *National pine forest monitoring*. 1pp.
- Kumar, S., J. Graham, A. M. West, and P. H. Evangelista, 2014: Using district-level occurrences in maxent for predicting the invasion potential of an exotic insect pest in India. *Computers and Electronics in Agriculture* **103**, 55-62.
- Lee, H. W., 2012: Prediction of Spatial Distribution and Forest Carbon Storage on Pinus densiflora and Quercus spp. Stands in Korea using 4<sup>th</sup> Forest Cover Map and HyTAG Model (Master Dissertation, Korea University, South Korea) (in Korea with English abstract)
- Lee, S.-H., P. S.-H. Lee, S. A. Lee, S.-Y. Ji, and J. Choi., 2015: Predicting the changes in cultivation areas of walnut trees (*Juglans sinensis*) in Korea due to climate change impacts. *Korean Journal of*

- Agricultural and Forest Meteorology* **17**(4), 399-410. (in Korea with English abstract)
- Lim, J.-H., 2016: Climate change-induced dieback of evergreen conifers in Korea and options for adaptation. Proceedings of 2016 International Climate Change Adaptation Symposium on Forest Management for Enhancing Resilience to Climate Change, Seoul, Korea. 53-76.
- Lee, Y.-H., Y.-J. Oh, S.-H. Hong, C.-S. Na, Y.-E. Na, C.-S. Kim, and S.-I. Sohn, 2015: Predicting the suitable habitat of invasive alien plant *Conyza bonariensis* based on climate change scenarios. *Climate Change Research* **6**(3), 243-248. (in Korea with English abstract)
- Mather, J. R., and G. A. Yoshioka, 1968: The role of climate in the distribution of vegetation. *Journal of the Association of American Geographers* **58**, 29-41.
- McDowell, N., W. T. Pockman, C. D. Allen, D. D. Breshears, N. Cobb, T. Kolb, J. Plaut, J. Sperry, A. West, D. G. Williams, and E. A. Yezzer, 2008: Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? *New Phytologist* **178**, 719-739.
- NIFOS(National Institute of Forest Science), 2012: Economic Species (1) Pine tree. 250.
- NIFOS(National Institute of Forest Science), 2014: *Predicting Changes of Productive Areas for Major Species under Climate Change in Korea.*
- Phillips, S. J., R. P. Anderson, and R. E. Schapire, 2006: Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* **190**, 231-259.
- Phillips, S. J., and M. Dudik, 2008: Modeling of species distributions with MaxEnt: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* **1**, 161-175.
- Rosas, T., L. Galiano, R. Ogaya, J. Peñuelas, and J. M. Vilalta, 2013: Dynamics of non-structural carbohydrates in three Mediterranean woody species following long-term experimental drought. *Frontiers in Plant Science* **4**, 400pp.
- Seo, D. J., C.Y. Oh, K. S. Woo, and J. C. Lee., 2013: A study on ecological niche of *Pinus densiflora* forests according to the environment factors. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **15**(3), 153-160. (in Korea with English abstract)
- Song, W. K., 2015: Habitat analysis of *Hyla suweonensis* in the breeding season using species distribution modeling. *Journal of Korean Society of Environmental Restoration Technology* **18**(1), 71-82. (in Korea with English abstract)
- Stephenson, N., 1990: Climatic control of vegetation distribution: The role of the water balance. *The American Naturalist* **135**(5), 649-670.
- Thuiller, W., 2003: BIOMOD-optimizing predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change. *Global Change Biology* **9**(10), 1353-1362.
- Walther, G. R., E. P. Convery, A. Menzel, C. Parmesan, R. J. C. Beebee, J. M. Fromentin, O. Hoegh-Guldberg, and F. Bairlein, 2002: Ecological responses to recent climate change. *Nature* **416**, 389-395.
- Zhang, X., M. A. Friedl, C. B. Schaaf, and A. H. Strahler, 2004: Climate controls on vegetation phenological patterns in northern mid- and high latitudes inferred from MODIS data. *Journal of Global change biology* **10**, 1133-1145.