

## GARP 모형과 기후변화 시나리오에 따른 잣나무의 지리적 분포 변화

천정화<sup>1\*</sup> · 이창배<sup>2</sup> · 유소민<sup>1</sup>

<sup>1</sup>국립산림과학원 산림생태연구과, <sup>2</sup>산림청 녹색사업단  
(2015년 9월 11일 접수; 2015년 10월 1일 수정; 2015년 12월 11일 수락)

### Shifts of Geographic Distribution of *Pinus koraiensis* Based on Climate Change Scenarios and GARP Model

Jung Hwa Chun<sup>1\*</sup>, Chang Bae Lee<sup>2</sup> and So Min Yoo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Division of Forest Ecology, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

<sup>2</sup>Korea Green Promotion Agency, Daejeon 302-831, Korea

(Received September 11, 2015; Revised October 1, 2015; Accepted December 11, 2015)

#### ABSTRACT

The main purpose of this study is to understand the potential geographic distribution of *P. koraiensis*, which is known to be one of major economic tree species, based on the RCP (Representative Concentration Pathway) 8.5 scenarios and current geographic distribution from National Forest Inventory(NFI) data using ecological niche modeling. *P. koraiensis* abundance data extracted from NFI were utilized to estimate current geographic distribution. Also, GARP (Genetic Algorithm for Rule-set Production) model, one of the ecological niche models, was applied to estimate potential geographic distribution and to project future changes. Environmental explanatory variables showing Area Under Curve (AUC) value bigger than 0.6 were selected and constructed into the final model by running the model for each of the 27 variables. The results of the model validation which was performed based on confusion matrix statistics, showed quite high suitability. Currently *P. koraiensis* is distributed widely from 300m to 1,200m in altitude and from south to north as a result of national greening project in 1970s although major populations are found in elevated and northern area. The results of this study were successful in showing the current distribution of *P. koraiensis* and projecting their future changes. Future model for *P. koraiensis* suggest large areas predicted under current climate conditions may be contracted by 2090s showing dramatic habitat loss. Considering the increasing status of atmospheric CO<sub>2</sub> and air temperature in Korea, *P. koraiensis* seems to experience the significant decrease of potential distribution range in the future. The final model in this study may be used to identify climate change impacts on distribution of *P. koraiensis* in Korea, and a deeper understanding of its correlation may be helpful when planning afforestation strategies.

**Key words:** Ecological niche modeling, GARP, NFI, *Pinus koraiensis*, Climate change, RCP 8.5 scenarios, Geographic distribution

#### I. 서 론

최근 기후변화 완화 및 적응 대책의 중요성이 부각

되고 있으며 이에 대한 정책이 추진되고 있음에도 불구하고 온실가스 배출량은 지속적으로 증가하고 있다 (The National Weather Service, 2015). IPCC는 인



\* Corresponding Author : Jung Hwa Chun  
(chunjh69@korea.kr)

위적인 요인으로 발생하는 온실가스과 에어로졸의 복사강제력 뿐 아니라 토지이용변화에 따른 영향도 포함하는 RCP (Representative Concentration Pathway) 시나리오를 적용하였을 때 현재 추세로 온실가스를 계속 배출할 경우, 해수면의 높이는 약 63cm 상승하고 평균기온(2081년~2100년)은 지금보다 약 3.7°C 상승할 것으로 전망하였다(The National Weather Service, 2013). 이러한 지속적인 기온상승은 기후변화의 범위를 넓힐 것이며 이는 지구환경의 모든 분야에 걸쳐 영향 미칠 것으로 예상되고 있다(Korea Environment Institute, 2000). 그 중 산림생태계 부문의 영향은 매우 다양하며 이는 산림생태계 기능의 교란, 종 다양성 변화, 저장되는 탄소 양의 증감 등을 들 수 있다(Scholes *et al.*, 1996). 현재 우리나라는 OECD 국가 중 네 번째로 산림비율이 높은 편으로(FAO, 2011) 산림이 제공하는 다양한 생태계 서비스에 의존하며 살고 있다(Millennium Ecosystem Assessment, 2005). 또한 산림은 광합성과 호흡을 통해 대기과 이산화탄소 교환량이 상당한 부분을 차지하고 있다. UNFCCC에서 채택한 교토의정서는 산림을 탄소 흡수원으로 인정하기로 하였고 기후변화를 완화하기 위한 수단으로 재조립, 신규조립, 지속적인 산림 관리활동을 수행하게 함으로써 산림에 대한 중요성이 더욱 부각되었다.

따라서 우리나라의 산림에 미치는 기후변화의 영향을 가늠하기 위해 현재의 산림 분포 현황을 파악하고 기후변화에 따른 미래 산림 분포 변화를 전망하는 연구가 필요하며 이에 관한 연구가 다양하게 이루어지고 있는 실정이다. 우리나라는 온난한 기후대를 가지고 있으며 주요 수종으로는 소나무, 낙엽송, 리기다 소나무, 잣나무가 있다. 그러나 한랭지역에서 자라기에 적합한 잣나무는 지리산, 속리산, 설악산과 같이 해발 1,000m 이상인 고지대에서 분포하며 우리나라에서는 다양한 침엽수 또는 활엽수와 혼효림을 이루며 자란다(Korea Forest Research Institute, 2012). 잣나무는 목재문화재로 주로 사용될 만큼 품질이 우수하며 식용으로 이용되는 종실을 통해 소득을 증대시키는 산림자원이 풍부한 주요 경제 수종 중 하나이다(Chon *et al.*, 1999). 또한 다른 수종에 비해 기상 변동에 민감하게 반응하는 수종이기도 하다(Han and Park, 1988). 잣나무 분포 면적은 23만 ha로 우리나라 전체 침엽수림 면적의 약 8.6%를 차지하고 있지만(Korea Forest Institute, 2009) 급진적인 기온상승은 향후 잣나무림의

분포를 줄어들게 할 것으로 전망된다. 실제로 잣나무는 급격한 기후와 환경 변화로 인해 재선충병, 잎떨림병, 피목가지마름병, 잣나무넓적잎벌 등 다양한 병해충 피해를 입으면서 그 분포가 줄어들고 있는 실정이다. 우리나라는 기후변화에 따른 다양한 수종 분포 변화 예측에 관한 연구가 폭넓게 수행되어지고 있지만 특히 환경인자에 따른 잣나무림의 생장 분포에 관한 연구는 아직 부족한 실정이다(Bae *et al.*, 2010). 또한 국내에서 수종별 분포범위를 도면화하고 기후변화 시나리오를 이용하여 변화를 예측한 연구의 경우 다양하다고 볼수는 없으나 Choi *et al.*(2009) 등은 미국에서 개발한 동적 식생 모형인 MC1과 온량지수를 기반으로 우리나라의 육상탄소 분포를 모의하고 예측하는 연구를 수행하였고, Korea Forest Institute(2011)는 MC1 및 잠재식생분포 모형인 HyTAG을 기반으로 우리나라 산림의 기후변화 취약성을 평가하고 미래 재목을 예측하는 연구를 수행중이다. Kang *et al.*(2012) 등은 MAXENT 모형을 기반으로 습나무의 서식처를 분석하고 미래의 변화를 예측하였다. 그러나 이러한 연구들의 경우 5년을 단위로 전국조사가 완료되는 NFI 자료의 일부만을 사용하였거나, 수종별 특성이 충분히 고려되지 못한 채로 범주화된 식생기능형을 사용하였으며, 체계성이 결여된 조사를 통해 수집된 종의 출현정보를 사용함으로써 실제 현존분포와는 차이가 상대적으로 클 가능성을 배제할 수 없다. 따라서 본 연구의 목적은 국가산림자원조사 자료와 생태적 지위 모형에 기반하여 보다 신뢰도가 높은 잣나무의 분포도를 작성하여 생육분포 범위를 시각화하고, 현재의 생육분포에 영향을 미치는 환경인자를 파악하여 기후변화 시나리오를 적용함으로써 향후 잣나무가 받게 될 기후변화의 영향을 파악하는 데에 있다.

## II. 재료 및 방법

### 2.1. 연구대상지 및 재료

본 연구에서는 잣나무의 생육분포범위를 파악하고 미래 잠재분포를 예측하기 위해 국내에서 소나무에 대해 수행되었던 바 있는 연구 방법을 적용하였다(Chun and Lee, 2013). 우리나라 전역을 대상으로 5년을 주기로 약 4,000개 지점에서 동일한 프로토콜에 의해 조사가 실시되고 있는 국가산림자원조사(NFI) 자료로부터 조사지점 별 잣나무 수종의 풍부도 자료를 추출

하여 종 출현정보로 사용하였다. 기후변화에 따른 잣나무의 지리적 분포를 예측하기 위해, 기후, 지형, 지질 및 토양, 토지이용 및 식생현황 관련 변수 등 총 4가지 범주의 27개의 변수를 선정하여 사용하였다.

기후관련변수는 1971년부터(10년씩) 관측된 기상자료(Korea Forest Research Institute, 2011)를 기반으로 40년간의 평균기온, 최한월인 1월의 평균기온, 최난월인 8월의 평균기온, 생육기(4~10월) 평균기온, 연평균 강수량, 생육기 평균강수량, 1월과 8월의 평균기온차를 계산하여 기후관련 변수로 사용하였다. 연간 일사량 자료는 월평균 일사량 자료에 월별 일수를 곱하여 월별 누적일사량을 계산한 후 1월~12월의 자료를 모두 합하여 변수로 사용하였다.

지리·지형 관련 변수는 가장 보편적인 평균표고 외에 표고의 최대, 최소, 평균, 표고차, 해안거리 등을 변수로 채택하였다. 그 밖에도 표고의 변이계수, 표면적과 평면적의 비율, Weiss(2001)의 지형적 위치 인덱스(Topographic Position Index; TPI), 표면적/평면적 비율, 습윤 인덱스(Topographic Wetness Index; TWI) 등을 산출하여 변수목록에 포함시켰다. 표고의 변이계수 및 표면적/평면적 비율은 해당 지역 지형의 복잡성을 정량화하기 위하여 사용하였다.

지질·토양 관련 변수로는 한국지질자원연구원 지질도의 지질 및 수치산림토양입지도의 토양형, 유효토심, 암석노출도 등을 통해 지질과 토양특성, 생장과 갱신의 저해요소 등을 평가하기 위하여 사용하였다.

토지이용 및 식생현황 관련 변수로는 NFI 자료가 수집된 동일한 5년간에 대해 MODIS 위성영상 산출물 가운데 하나인 MOD13Q1(연간 23장)의 식생지수를 주성분 분석한 후, 1축만을 이용하여 현존식생의 밀도 및 계절적 특성을 파악하고자 사용하였다.

연구에 사용된 모든 변수는 NFI의 조사지점 간 평균 거리가 4km인 점을 감안하여, 4km×4km 공간해상도를 갖는 GIS 래스터(그리드) 형태로 변환하여 사용하였다.

## 2.2. 연구 방법

### 2.2.1. 분포 모형

본 연구에서는 수종의 분포를 해석하고 예측하기 위해 먼저 다양한 환경요인변수를 수집하고 이를 데이터 베이스로 구축하였다. 다음으로 수집한 환경요인변수를 모형의 입력자료로 변환시키는 과정을 수행하였고

NFI 정보에서 연구대상 수종의 입력출현정보를 작성하였다. 이 과정에서 정상적으로 생활사를 완성하는 잣나무 임분들만을 골라내고 모형의 적합도 향상을 위해 층위별 출현정보를 이용하여 상·중·하 층에서 최소한 두 층위에 각 층위당 2분 이상 출현하는 지점의 자료만을 입력자료로 사용하였다(Pulliam, 1998; Pearson and Dawson, 2003). 환경변수들의 기여도와 중요도를 파악하기 위해, 각각의 환경인자별로 모형을 구동하여 전반적인 경향을 파악하고 AUC를 기반으로 수종분포와 개별 독립변수 간의 연관성을 평가한 후 변수를 조정하였다. 마지막으로 최종 선정된 변수를 이용하여 GARP모형을 구동함으로써 잠재 수종 분포도를 작성하였다. 또한 독립변수 중 기후와 관련된 변수는 기후변화 시나리오 자료를 사용하여 미래를 예측하였다. 생태적 지위모형의 분석과정은 Fig. 1과 같다. GARP는 유전적 알고리즘을 기반으로 하고 있다. 생물기후 모형과 관련된 인공신경망이나 유전적 알고리즘은 종속변수와 독립변수와의 연결세기를 조절하여 규칙을 찾아내는 것으로서 기존 것과는 차별화되는 병렬 정보처리 시스템이다. 신경망은 대량의 정보를 한꺼번에 처리하고 학습하는 과정을 통해 패턴을 탐색한다. 다시 말하면 부적합하게 연결된 것은 약화되고, 반대로 적합하게 연결된 것은 강화되는 과정을 통해 규칙을 생성하는 것이다. 다양한 NN과 유전적 알고리즘이 개발되어 생태적 지위모형에 적용되었으나 그 가운데에서 가장 널리 사용되는 것이 GARP이다(Stockwell and Peterson, 2002). 이는 대부분의 생물종 자료들이 출현 정보만을 담고 있으며 실사 비출현 정보가 있다해도 정확성이 떨어지므로 신뢰성에 대한 문제가 있을 수 있지만 GARP는 비출현 자료를 반드시 요구하는 것이 아니기에 다른 모형에 비해 큰 장점을 지닌다. GARP 모형은 식물을 포함한 다양한 생물들에 관한 연구뿐 아니라 모형 성능을 상호 비교한 연구에도 적용되었지만, 식물만을 대상으로 모형 성능을 비교하려는 연구는 아직 미비한 실정이다. 식물을 대상으로 모형 성능을 비교한 연구를 수행한 Elith *et al.*(2002)과 동물을 대상으로 다수 모형 비교 연구에서는 GARP의 모형 성능이 가장 우수한 것으로 평가하였다(Anderson *et al.*, 2002; Stockwell and Peters, 1999; Peterson *et al.*, 2002).

### 2.2.2. 모형의 검증

모형을 검증하기 위해, 모형의 구동 결과를 실제 중

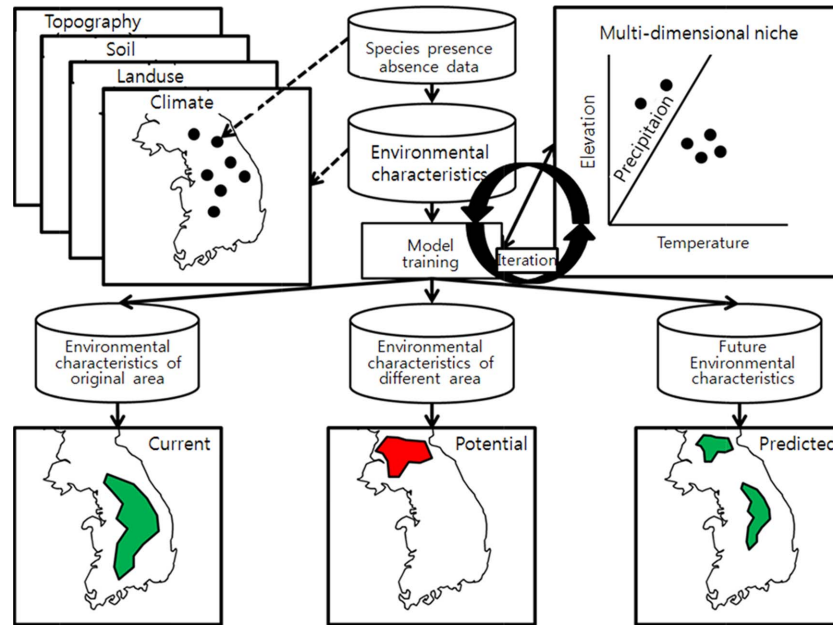


Fig. 1. General approach and applications of ecological niche models (Chun and Lee, 2013).

출현정보와 예측된 출현 및 비출현 정보에 기반한 Confusion Matrix 관련 통계량을 기반으로 모형의 설명력을 검증하였다(Stehman, 1997). 컨퓨전 매트릭스는 이분형 모형의 경우, 종의 출현과 비출현에 대한 예측결과가 실제 조사된 출현과 비출현 정보에 어느정도 가까운가를 평가하는 방법이다(Stehman, 1997). 컨퓨전 매트릭스를 통해 나타난 수치들은 모형의 성능을 평가하며 다양한 통계량 산출이 가능하다. 본 연구에서는 ROC (Receiver Operating Characteristic)의 AUC (Total Area Under Curve)를 평가 통계량으로 사용하였는데 이 수치는 모형이 출현지점을 제대로 가려낸

수치를 비출현 지점을 제대로 가려낸 수치로 나누어준 값이다. AUC와 관련된 통계량의 산출 방법은 Table 1, 2와 같다.

Table 1. Confusion matrix and its components

NFI	Model	
	Recorded presence	Recorded absence
Predicted presence	(a) True Positive; TP	(b) False Positive; FP
Predicted absence	(c) False Negative; FN	(d) True Negative; TN

Table 2. Model evaluation statistics derived from confusion matrix

Statistical indices	Formula
Prevalence	$(a + c)/n$
Global diagnostic power	$(b + d)/n$
Correct classification rate	$(a + d)/n$
Sensitivity (true positive rate; TPR)	$a/(a + c)$
Specificity (true negative rate)	$d/(b + d)$
Omission error	$c/(a + c)$
1-specificity = commission error (false positive rate; FPR)	$b/(b + d)$
ROC AUC	$\sum_{i=0}^n (TPR_{i+1} + TPR_i) / (2FPR_{i+1} - FPR_i)$

i = cumulative frequency at *i*th Doin were FPR changes

**Table 3.** Relationship between environmental explanatory variables and current distribution of *Pinus koraiensis* (\*: AUC  $\geq$  0.6)

Criteria	Prevalence	Global diagnostic power	Correct classification rate	Sensitivity (true positive rate)	Specificity (true negative rate)	Omission error	1-specificity = commission error	AUC	
Climate	Mean annual temperature	0.075	0.658	0.686	0.656	0.314	0.344	*0.677	
	Mean January temperature	0.074	0.496	0.872	0.466	0.128	0.534	*0.670	
	Mean August temperature	0.074	0.926	0.612	0.607	0.337	0.393	*0.645	
	Mean temperature of growing season	0.074	0.926	0.606	0.674	0.6	0.4	*0.676	
	Precipitation of growing season	0.074	0.926	0.619	0.604	0.62	0.38	*0.620	
	Annual precipitation	0.074	0.926	0.604	0.576	0.606	0.394	*0.610	
	Difference of January and August temperature	0.074	0.926	0.56	0.75	0.545	0.25	*0.655	
	Annual solar radiation	0.074	0.926	0.763	0.243	0.804	0.757	0.196	
	Topographic index (100 m)	0.074	0.926	0.922	0.028	0.993	0.972	0.007	0.569
	Topographic index (1,000 m)	0.074	0.926	0.866	0.111	0.926	0.889	0.074	0.553
Geography and topography	Elevation coefficient of variation	0.074	0.926	0.869	0.09	0.931	0.069	0.517	
	Maximum elevation	0.074	0.926	0.605	0.552	0.609	0.448	0.6	
	Average elevation	0.074	0.926	0.553	0.615	0.548	0.385	*0.601	
	Minimum elevation	0.074	0.926	0.644	0.497	0.656	0.503	0.589	
	Difference of Maximum and minimum elevation	0.074	0.926	0.615	0.441	0.629	0.559	0.562	
	Surface area ratio	0.074	0.926	0.581	0.535	0.585	0.465	0.566	
	Topographic wetness index	0.074	0.926	0.804	0.854	0.854	0.813	0.544	
	Distance from sea	0.074	0.926	0.583	0.67	0.576	0.33	*0.628	
	Geological types	0.074	0.926	0.521	0.709	0.506	0.291	0.494	*0.633
	Soil types	0.074	0.926	0.737	0.356	0.767	0.644	0.233	0.593
Geology and soil	Soil depth	0.074	0.926	0.626	0.543	0.632	0.457	0.589	
	Bedrock exposure	0.074	0.926	0.705	0.377	0.731	0.623	0.571	
	Spring	0.074	0.926	0.506	0.602	0.498	0.398	0.562	
	Summer	0.074	0.926	0.868	0.107	0.929	0.893	0.567	
	Autumn	0.074	0.926	0.751	0.353	0.783	0.647	0.593	
	Winter	0.013	0.987	0.921	0.668	0.547	0.332	*0.615	
Landuse and vegetation index	PCA axis 1	0.074	0.926	0.797	0.204	0.845	0.155	0.548	
	Growing season	0.074	0.926	0.797	0.204	0.845	0.155	0.548	

ROC AUC는 신호탐지이론(Christopher, 2003)에 기반으로 sensitivity를 Y축으로, 1-specificity를 X축으로 하는 그래프를 통해 알고리즘이나 모형의 성능을 평가하는 방법이다. 신호탐지이론은 신호의 탐지가 신호에 대한 관찰자의 민감도와 관찰자의 반응 기준에 달려 있다는 이론으로서 신호와 노이즈의 구분에 관련된 능력을 측정하는 수단으로 이용된다(Chun and Lee, 2013). ROC의 AUC 점수 평가는 Swets(1988)가 제안한 기준을 따랐으며 그 기준은 AUC가 0.9 이상인 경우 매우 우수, 0.6 미만이면 실패로 하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 3.1. 잣나무와 환경요인변수 간의 관계

잣나무와 환경요인변수 간의 관계는 Table 3과 같다. 잠재분포확률이 높은 지역을 각 기온관련 변수와 비교한 결과 기온은 모두 상대적으로 낮은 지역이었고, 지질은 편마암과 화강암 계열에서 높게 나타났으며, 해안거리는 중간정도에서 높았다. 생육기 강수량과 연 강수량이 높은 지역에서 높게 나타났고 겨울식생지수가 낮은 지역에서 높게 나타났다. 평균표고는 상대적으로 높은 지역이었으나 정상부는 약간 부적합한 모습을 보였다. 이상의 결과를 종합해 보면 현재 시점에서 잣나무의 경쟁력이 높은 지역은 상대적으로 표고가 높고, 기온이 낮은 내륙에서 강수량이 충분한 지역으로 보인다.

잣나무를 대상으로 최종적으로 선정된 변수들은 다음과 같다(Table 4). 잣나무 잠재분포 모형에서는 기후관련 변수로서 연평균기온과 생육기강수량이 선정되었고 지리/지형관련 변수로는 해안거리와 평균표고가 선정되었다. 토양관련 변수로는 지질과 토지이용이 선정되었고 식생현황관련 변수로는 겨울식생지수 pca 1 축이 선정되었다. 이는 잣나무가 위도와 표고가 높은 지역에서 주로 우점하여 기온상승에 의한 부정적인 영향이 클 것으로 추정되었다. 변수를 선정하는 과정에서 모형의 과대적합을 막기 위하여 동일한 범주(Table

3) 내의 변수의 경우 AUC가 가장 높은 변수 하나만을 선정하였고 본 모형이 생물기후 모형의 하나임을 감안하여 강수량의 경우는 반드시 하나 이상 포함되도록 하였다.

#### 3.2. 모형의 검증

최종적으로 선정된 환경요인변수들(Table 4) 기반으로 작성한 잣나무 잠재분포 모형의 평가통계량과 AUC 곡선은 각각 Fig. 2 및 Table 5와 같다. 잣나무 잠재분포 모형의 AUC는 0.74로 분석되어 설명력은 ‘적정’한 수준으로 평가되었다. 실제 분포지역을 분포지역으로 판단하는 sensitivity는 0.857로 양호한 수준이었다. 1-specificity가 0.486으로 약간 높았으나 이 통계량은 실제 분포하지 않는 지역을 분포지역으로 판단한 것으로서 잣나무의 잠재적인 분포가능성을 보여주는 통계량이기도 하다.

#### 3.3. 잣나무의 현존분포

잣나무의 현존분포를 보면 강원도 고성부터 경상남도 고성까지 전국적으로 분포하지만 경기도 지역에 집중된 모습을 볼 수 있다(Fig. 3). 강원도 고산 지역에

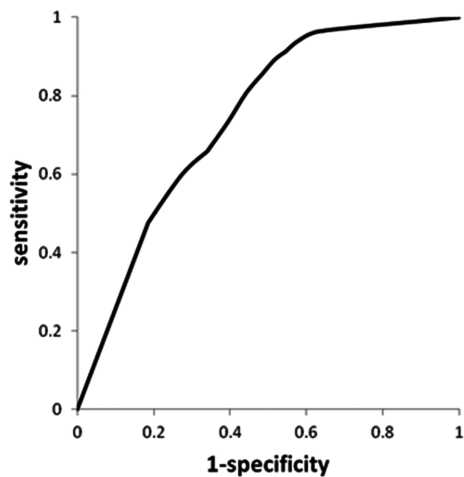


Fig. 2. AUC curve of *Pinus koraiensis*.

Table 4. Final environmental explanatory variables for potential distribution models for *Pinus koraiensis*

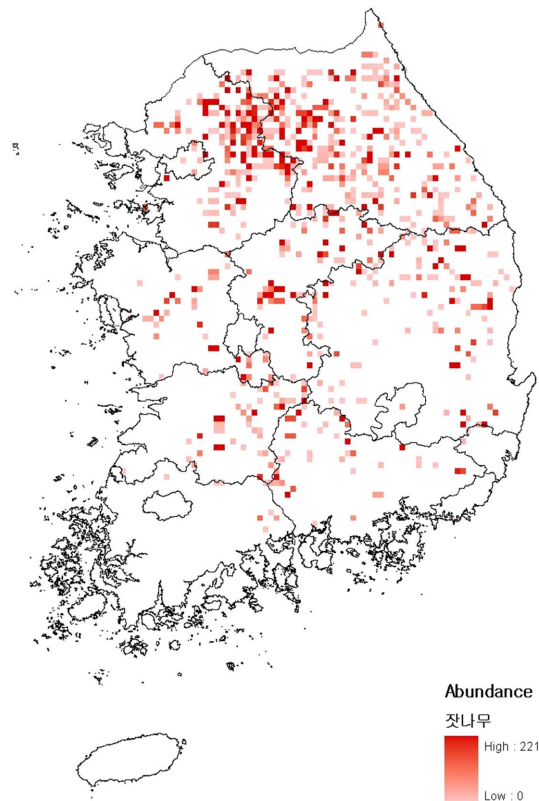
<i>Pinus koraiensis</i> (AUC)	Environmental explanatory variables					
	Mean annual temperature (0.677)	Geological type (0.633)	Distance from sea (0.628)	Precipitation of growing season (0.620)	Winter EVI PCA axis 1 (0.615)	Average elevation (0.601)

**Table 5.** Statistical indices of potential distribution model for *Pinus koraiensis*

Pevalence	Global diagnostic power	Correct classification rate	Sensitivity	Specificity	Omission error	1-specificity= commission error	AUC
0.075	0.925	0.540	0.857	0.514	0.143	0.486	0.74

도 상당수 분포하고 남쪽으로는 주로 백두대간을 따라 내려가거나 경상도 산악지역을 따라 내려간다. 출현 개체수가 상대적으로 많은 지역은 경기도 포천, 가평, 양평, 광주, 강원도 홍천, 평창, 충청북도 청원, 괴산, 충청남도 예산, 논산, 전라북도 임실, 함양, 경상북도 봉화, 경주 등지로써 표고의 범위는 300m-1,200m 사이로 대단히 넓다. 그러나 남서부 해안 지역은 거의 나타나지 않는 것으로 보아 잣나무의 소수 개체군은 북부 및 산악 지역에 분포되어 있음을 알 수 있다. 이는 “중부 이남에서는 해발 1,000m 이상에서 자란다”(Korea Forest Research Institute, 2012)는 표현과 거의 부합된다. 잣나무는 과거에 식재된 지역도 많았으나 강원도 춘천의 일부 지역과 같이 사면에 따라 조림 성공지와 실패지가 명확하게 나누어지는 지역도 있고 일부 지역에서는 최근 집단 고사하는 현상도 보여 지형 및 기후에 상대적으로 민감하게 반응하는 것으로 보인다.

잣나무는 본래 북방계의 한대성 수종으로 원래 우리나라에 자생하는 수종이지만 상당한 면적이 인공식재 되어 우리나라 조림수종 가운데 세 번째로 큰 면적을 차지한다. 잣나무 조림지는 경상남도 지역에도 존재하지만 대부분 경기도 및 강원도에 식재되었다. 강원도 춘천 잣나무 조림지에서의 조사 결과 동일한 시기에 조림이 되었음에도 불구하고 북서사면에서는 생장이 양호한 반면 남동사면에서는 활엽수림의 우점도가 더 높아 이미 조림 초기에 생육이 불량했던 것으로 보인다(Korea Forest Institute, 2009). 이러한 사실은 기온 외에도 강수량의 변동이 생육에 영향을 줄 수 있음을 의미하고 가을이나 봄의 고온 및 가뭄현상이 잣나무의 생육에 불리하게 작용할 수 있음을 의미한다. 문헌에 나타난 잣나무의 온량지수 범위는 21~121 (Yim, 1977)이다. Korea Forest Institute(2007)의 연구 결과에 따르면 현재 잣나무의 잠재분포는 남부해안을 제외한 전 지역이고 2090년대에는 강원도 북부 고산 지역에만 잔존하는 것으로 나타났다. 이를 본 연구결과와 비교하면 현재의 잠재분포 범위는 Korea Forest

**Fig. 3.** NFI based current distribution of *Pinus koraiensis*.

Institute의 연구결과에서 훨씬 넓게 추정하고 있음을 알 수 있다. 본 연구의 현존분포도와 비교하면 과거 Yim(1977)의 연구결과에서 나타난 온량지수의 범위가 지나치게 넓은 것으로 판단된다.

### 3.4. 잣나무의 분포 변화예측

잣나무는 연평균기온이 낮은 경기도 북부 및 산악지역에 주로 분포하는 현존분포특성을 잘 반영하고 있다. 본 연구에서 사용한 모형에서는 연평균 기온의 AUC가 가장 높기 때문에 기후변화 시나리오에서 연평균기온이 상승함에 따라 이미 2020년대에는 잠재분포역이 큰 폭으로 축소되어 강원도 산악지역 및 지리산 부근



에만 잔존하게 되고, 2050년대에는 강원도 고산지역에 낮은 확률로 잔존하게 되며, 2090년대에는 거의 잔존하는 지역을 찾아보기 어렵다(Fig. 4).

이러한 결과는 이미 알려진 바와 같이 잣나무가 온대북북-한대성 수종임을 그대로 보여주고 있으며 이러한 사실은 경상남도 지역에 식재된 잣나무 임분에서 비교적 최근 발생한 병충해 피해 및 고사현상과 무관하지 않은 것으로 보인다.

연구결과를 토대로 향후 기후변화로 인한 잣나무의

분포 변화와 변화 가능성을 정리해 보면 작성된 모형의 신뢰도는 적절한 수준이었으며 기온상승과 강수패턴 변화로 인해 건조 피해가 연속될 경우 수세의 약화와 함께 병해충에 더 쉽게 노출될 가능성이 있는 것으로 보인다. 최근 산림은 병해충이나 갑작스러운 가뭄, 고온 및 저온현상 반복으로 인하여 집단고사가 수 차례 관찰되었으며, 고산지역에서는 유존종이 쇠퇴하는 현상이 지속적으로 나타나고 있다. 그럼에도 불구하고 산림이 고사하거나 쇠퇴하는 기작에 대한 연구

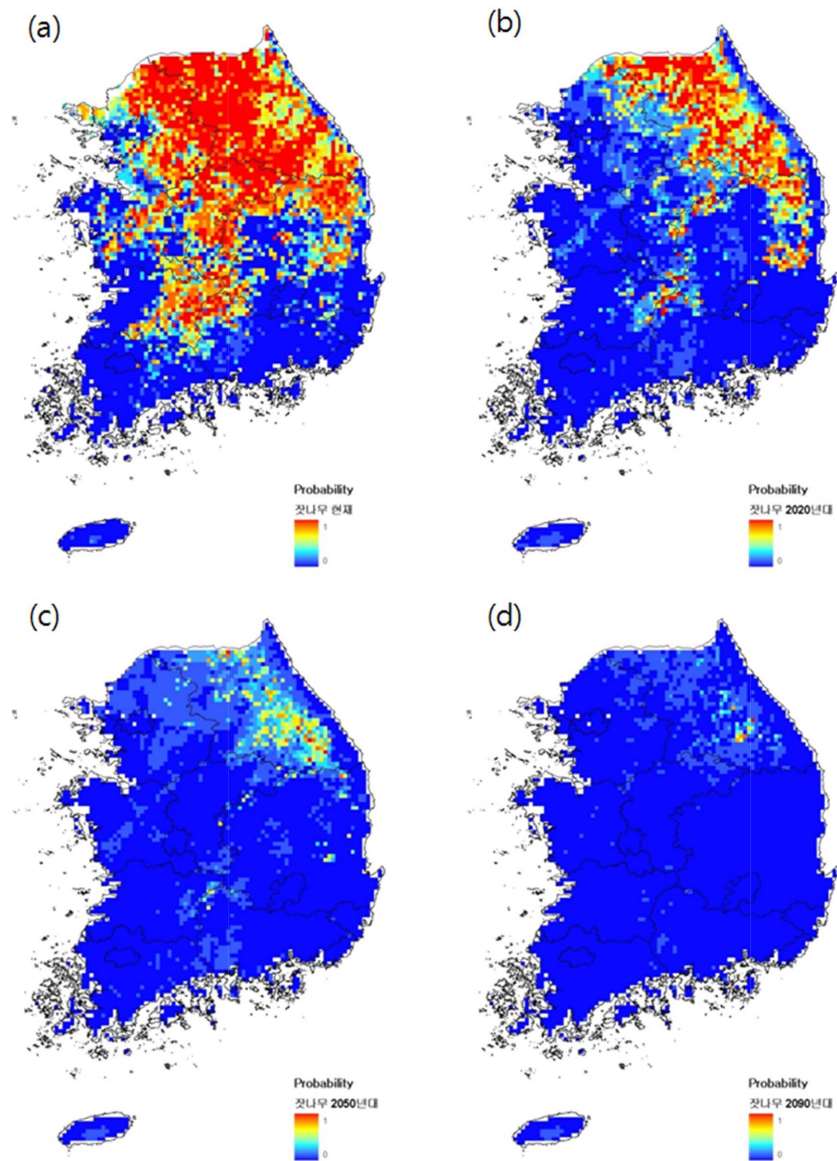


Fig. 4. Potential distribution of *Pinus koraiensis* ((a) Current, (b) 2020s, (c) 2050s, (d) 2090s).



는 부족하며 잘 알려지지 않은 경우가 많다.

본 연구의 결과는 기후변화 시나리오 중 하나인 RCP 8.5 기반한 분석 결과이고, 잠재분포역이 축소된다는 것은 기존의 성목들이 갑자기 고사한다는 것을 의미하는 것은 아니다. 다시 말해 본 연구에서는 스스로 움직일 수 없는 식물의 특성을 고려하였을 때, 종자산포 확률이나 거리, 어느 환경이든지 적응할 수 있는 능력이 모수화되지 못한 한계를 지니고 있다.

이에 GARP 모형을 통해 나온 잠재분포역은 현재 시점의 환경요인과 분포패턴으로 평가된 최적생육가능 범위로 보는 것이 타당할 것이며 잠재분포확률이 높게 나타난 지역에서는 해당 수종의 종자의 형성 및 발아 확률이 높고, 식재시에도 생존할 확률이 높다는 것을 의미한다고 할 수 있다.

#### IV. 결 론

잣나무는 잣의 생산뿐만 아니라 목재로서도 가치를 인정받아온 경제수종임에는 이론의 여지가 없다. 그러나 잣나무의 주 분포지는 한랭한 기후를 지닌 중국 동북 3성, 러시아 시베리아 동부 지역이라 할 수 있다. 한반도에서도 잣나무의 적지는 대부분 북한에 분포하고 있으며 남한지역에서는 백두대간과 일부 고산 지역에 국한되어 있었음을 기록을 통해 알 수 있다. 그러나 과거 강원도 지역에 식재한 입분에서도 지형적 특성에 따라 조림에 실패한 지역을 찾아볼 수 있고, 비교적 최근에는 기온이 높은 중부 이남 지역에 식재된 입분도 병충해 및 건조 피해를 경험하고 있다. 다시 말해 현재 우리나라의 대기중 이산화탄소농도나 기온상승 속도를 감안할 때는 향후 전망이 어두운 것으로 보인다. 그러나 여전히 경제수종으로 인정받고 있는 잣나무의 인공식재림 조성을 위해서는 극한기후는 물론 토양, 지형 등의 다양한 환경인자에 대한 보다 철저한 분석을 통해 대상지를 선정하는 합리적 과정을 거치도록 하는 것이 성공적인 조림의 열쇠로 판단된다.

#### 적 요

본 연구는 그간 우리나라에서 경제적인 가치를 인정받아온 수종인 잣나무를 대상으로 잣나무의 현존 분포를 파악하고, RCP (Representative Concentration Pathway)

8.5 기후변화 시나리오와 생태적 지위 모형에 기반하여 향후 잣나무의 분포 변화를 예측하기 위해 수행되었다. 이를 위해 5년간의 NFI 자료에서 조사지점별 잣나무의 풍부도 자료를 추출하여 사용하였으며, 수종에 영향을 미치는 환경요인변수를 선정하기 위해 생태적 지위 모형 가운데 하나인 GARP (Genetic Algorithm for Rule-set Production)를 이용하였다. 총 27개의 환경요인변수에 대해 각각 모형을 구동하고 컨퓨전 매트릭스(Confusion Matrix) 기반 산출 통계량인 AUC (Area Under Curve)가 0.6 이상인 변수들을 선발하여 최종 잠재분포모형을 작성하였다. 그 결과 작성된 모형은 비교적 높은 적합도를 나타냈는데 잣나무는 현재 표고의 범위가 300m에서 1,200m 사이인 지역 및 남부에서 북부에 이르기까지 넓게 자리 잡고 있는 것으로 나타났다. 작성된 모형에 RCP 8.5 기후변화 시나리오를 적용한 결과, 잣나무는 2020년대부터 잠재분포역이 큰 폭으로 축소되며, 2090년대에는 우리나라 대부분의 지역이 잣나무의 생육에 불리할 것으로 예측되었다. 본 연구를 통해 기후변화가 잣나무 분포에 미치는 영향을 파악하고, 잣나무와 기후변화와의 상관성에 대한 이해를 높임으로써 향후 지역별 조림수종 선정 및 경제수종 교체 등의 조림적 관점에서 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

#### REFERENCES

- Anderson, R. P., M. Gomez-Laverde, and A. T. Peterson, 2002: Geographical distributions of spiny pocket mice in South America: Insights from predictive models. *Global Ecology and Biogeography* **11**, 131-141.
- Bae, S. W., J. H. Hwang, S. T. Lee, H. S. Kim and J. M. Jeong, 2010: Change in soil temperature, moisture content, light availability and diameter growth after thinning in Korean Poin (*Pinus koraiensis*) plantation. *Journal of Korea Forest Society* **99**(3), 397-403.
- Chon, S. K., M. Y. Shin and D. J. Chung, 1999: Characteristics of the Early Growth for Korean White Pine (*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.) and Effects of Local Climatic Conditions on the Growth-Relation between Periodic Annual Increment and Local Climate Conditions. *Journal of Korea Forest Society* **88**(1), 73-85.
- Christopher, D. W., 2003: *Engineering psychology*. Sigma press, 678pp.
- 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. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **15**(4),

- 219-233. (in Korean with English abstract)
- Choi, S. H., W. K. Lee, S. J. Yoo, S. M. Park, J. G. Byun and G. S. Cui, 2009: Simulation on vegetation cover and terrestrial carbon distribution by climate change in Korea. *Proceedings of GIS Autumn Conference*, 138-139. (in Korean with English abstract)
- Elith, J., M. A. Burgman and H. M. Regan, 2002: Mapping epistemic uncertainties and vague concepts in predictions of species distribution. *Ecological Modelling* **157**, 313-329.
- FAO, 2011: State of the World's Forest. 164pp.
- Han, S. S. and W. G. Park, 1988: Diameter Growth and Key-year in *Pinus koraiensis* and *Pinus densiflora* Trees. *Journal of Korea Forest Society* **77**(2), 216-221. (in Korean with English abstract)
- Kang, W. M., D. Kang, and C. R. Park, 2012: Decreased Habitat Area and Connectivity of *Kalopanax pictus* under Climate Change in South Korea. *Proceeding of The 55th symposium of International Association for Vegetation Science*, Organizing Committee of IAV2012, Mokpo Korea, 102pp.
- Korea Environment Institute, 2000: Evaluation of the Ecological Effect and Corresponding Strategy Due to Climate Change 1. *Forest Ecology*, 86pp.
- Korea Forest Research Institute, 2007: *2007 Annual Report*, Korea Forest Service, 1103pp.
- Korea Forest Research Institute, 2009: *2009 Annual Report*, Korea Forest Service, 771pp.
- Korea Forest Research Institute, 2011: *2011 Annual Report – Forest Conservation*, Korea Forest Service, 694pp.
- Korea Forest Research Institute, 2012: Economic Tree Species *Pinus koraiensis*, Korea Forest Service, 168pp.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005: *Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends. Volume 1*. R. Hassan, R. Scholes, and N. Ash (Eds.). Island Press, 137pp.
- Peterson, A. T., D. R. B. Stockwell, and D. A. Kluza, 2002: Distributional prediction based on ecological niche modeling of primary occurrence data. In: Scott, J. M., P. J. Heglund, M. L. Morrison (Eds.), *Predicting Species Occurrences: Issues of Scale and Accuracy*. Island Press, Washington, D.C, 617-623pp.
- Pearson, R. G. and T. P. Dawson, 2003: Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: Are bioclimate envelope models useful. *Global Ecology and Biogeography* **12**, 361-371.
- Pulliam, H. R., 1988: Sources, sinks, and population regulation. *The American Naturalist* **132**, 652-661.
- Scholes, R. J. and M. R. van der Merwe, 1996: Sequestration of Carbon in Savannas and Woodlands. *The Environmental Professional* **18**, 96-103.
- Stehman, S. V., 1997: Selecting and interpreting measures of thematic classification accuracy. *Remote Sensing of Environment* **62**(1), 77-89.
- Stockwell, D. R. B. and A. T. Peterson, 2002: Effects of sample size on accuracy of species distribution models. *Ecological Modelling* **148**, 1-13.
- Swets, J. A., 1988: Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science* **240**, 1285-1293.
- The National Weather Service, 2013: Summary for decision maker of police in accordance with a scientific basis, 28pp.
- The National Weather Service, 2015: *2014 Climate Change Report*, 155pp.
- Weiss, A. D., 2001: Topographic Position and Landforms Analysis. Poster presentation. *Proceedings of ESRI User Conference, San Diego, CA*
- Yim, Y. J., 1977: Distribution of forest vegetation and climate in the Korean peninsula III. Distribution of tree species along the thermal gradient. *Japanese Journal of Ecology* **27**, 177-189.