소나무의 지리적 분포 및 생태적 지위 모형을 이용한 기후변화 영향 예측

천정화^{1*} · 이창배²

¹국립산림과학원 산림생태연구과, ²산림청 녹색사업단
(2013년 10월 23일 접수; 2013년 10월 6일 수정; 2013년 11월 25일 수락)

Assessing the Effects of Climate Change on the Geographic Distribution of *Pinus densiflora* in Korea using Ecological Niche Model

Jung Hwa Chun^{1*} and Chang-Bae Lee²

¹Division of Forest Ecology, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

²Korea Green Promotion Agency, Daejeon 302-831, Korea

(Received October 23, 2013; Revised October 6, 2013; Accepted November 25, 2013)

ABSTRACT

We employed the ecological niche modeling framework using GARP (Genetic Algorithm for Rule-set Production) to model the current and future geographic distribution of *Pinus densiflora* based on environmental predictor variable datasets such as climate data including the RCP 8.5 emission climate change scenario, geographic and topographic characteristics, soil and geological properties, and MODIS enhanced vegetation index (EVI) at 4 km² resolution. National Forest Inventory (NFI) derived occurrence and abundance records from about 4,000 survey sites across the whole country were used for response variables. The current and future potential geographic distribution of *Pinus densiflora*, one of the tree species dominating the present Korean forest was modeled and mapped. Future models under RCP 8.5 scenarios for *Pinus densiflora* suggest large areas predicted under current climate conditions may be contracted by 2090 showing range shifts northward and to higher altitudes. Area Under Curve (AUC) values of the modeled result was 0.67. Overall, the results of this study were successful in showing the current distribution of major tree species and projecting their future changes. However, there are still many possible limitations and uncertainties arising from the select of the presence-absence data and the environmental predictor variables for model input. Nevertheless, ecological niche modeling can be a useful tool for exploring and mapping the potential response of the tree species to climate change. The final models in this study may be used to identify potential distribution of the tree species based on the future climate scenarios, which can help forest managers to decide where to allocate effort in the management of forest ecosystem under climate change in Korea.

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

* Corresponding Author : Jung Hwa Chun
(chunjh69@forest.go.kr)

I. 서 론

우리나라는 숲의 전부를 소나무와 함께 하였기 때문에 우리나라 문화가 소나무 문화이고 우리 생활과 가장 밀접한 나무라고 볼 수 있다(Korea Forest Research Institute, 2012a). 국민들의 선호도가 가장 높은 나무 가운데 하나인 소나무는 황폐지 녹화 과정에서 중요한 역할을 하였을 뿐 아니라 다양한 측면에서 효용가치가 상당히 높은 수종이다. 한반도에서 소나무는 위도상 제주도부터 함경북도까지, 경도상 울릉도부터 백령도까지 분포 범위가 대단히 넓은 수종이다(Korea Forest Research Institute, 2012a). 그러나 극양수이자 천이 초기인 소나무는 수종으로서 점차 성숙해가는 우리나라 산림에서 경쟁력을 잃어가는 양상을 보이고 있다. 뿐만 아니라 비교적 최근 남부 지방을 중심으로 기후변화로 인한 이상기온이나 강수패턴 변화와 연관성이 높을 것으로 추정되는 집단 고사 현상 등도 나타나고 있는 상황이다. 뿐만 아니라 솔잎혹파리, 소나무재선충 등 병해충에 의한 피해도 지속적으로 보고되고 있다.

대부분의 선진국들은 기후변화 영향에 대한 취약성 평가를 토대로 기후변화 적응 방안을 강구하고 있는데, 이 가운데에서 산림식생과 관련된 내용을 살펴보면 대부분의 식물 종들이 저위도 지방에서 고위도 지방으로, 저지대에서 고지대로 이동할 것으로 예측하고 있다(Shugart *et al.*, 2003; West and Gawith, 2005; Warren *et al.*, 2004; Ryan *et al.*, 2008).

식생의 분포가 기후변화에 의해 어떠한 영향을 받을 것인지에 대한 예측은 지구적 차원의 연구 목표이다(Clark *et al.*, 2001; Davis and Shaw, 2001; Jackson *et al.*, 2009; Loarie *et al.*, 2009; Dawson *et al.*, 2011). 기후대의 변화를 속도 측면에서 살펴보면 미국 동북부와 중서부의 경우 20세기 동안 100km 이상 이동한 것으로 나타났다. 지구가 온난화됨에 따라 특정 종들에게 있어 어떤 지역은 새로운 서식처가 되기도 하고, 또 다른 지역은 더 이상 서식처로서의 역할을 하지 못할 수도 있다. 이러한 기후변화의 영향은 식물 종의 확산, 군집 형성, 정착, 성숙 과정 등에 문제를 발생시킴으로써 희귀종 뿐만 아니라 생태계 내에서 중요한 기능과 서비스를 제공하는 대다수의 종들에게 위협요인이 되고 있다(Zhu *et al.*, 2011).

기존의 산림식생의 분포와 관련된 자료는 특정지역

에 편중되어 있거나 조사방법의 차이 등으로 인하여 정량적인 분석에 어려움이 있었다. 미국, 유럽 등지의 선진국들은 임목자원량의 변화뿐만이 아닌 생태계 변화를 감시할 수 있는 조사 및 모니터링 체계를 구축하고 있는데, 미국 USDA Forest Service는 1930년부터 이러한 사업을 수행해오고 있으며 조사 지점은 현재 15만 개 이상으로 알려져 있다. 2010년 US Forest Service Northern Research Station의 연구결과(Woodall, 2010)에 따르면 2000년부터 재정비된 산림조사분석(Forest Inventory and Analysis; FIA) 조사 자료에 기반하여 수종별 분포 변화를 예측하고 기후변화에 따른 영향을 예측하였다. 아울러 이와 같이 기후변화가 수종분포 변화에 미치는 영향을 분석하기 위한 연구에는 조사 자료의 일관성이 매우 중요함을 강조하면서 산림조사가 시작된 시기부터 1970년대까지의 자료는 조사방법 및 프로토콜의 차이로 인해 현재 FIA 자료와는 비교가 불가능함을 언급하였다. 이러한 사실들은 FIA에 해당하는 우리나라 국가산림자원조사자료(National Forest Inventory; NFI)의 중요성 및 활용에 관한 연구 필요성을 시사하고 있다.

현재 산림청의 NFI 자료의 경우 전국을 대상으로 동일한 조사방법을 적용하여 체계적인 조사를 수행하고 있고 상층임분 외에도 갱신 치수 및 초본식생 등 다양한 정보를 포함하고 있어 국가 차원의 평가 체계 구축에 매우 적합하다. 그러나 NFI의 1차 5개년 조사가 종료되어 데이터베이스가 구축되어 있음에도 불구하고 산림생태계 연구에 크게 활용되지 못하고 있는 상황이어서 기존의 임상도를 바탕으로 수행하기 어려웠던 현존수종 분포도, 잠재 수종분포도, 기후변화에 따른 예측분포도 등의 작성이 필요한 시점이다.

따라서 본 연구의 목적은 국가산림자원조사 자료와 식생분포 모형에 기반하여 보다 신뢰도가 높은 산림식생분포도를 작성하고 평가하며 기후변화에 따른 변화를 예측함으로써 기후변화가 식생분포에 미치는 영향을 예측하는 데에 있다. 따라서 최종목표는 다음과 같이 크게 세 가지로 요약할 수 있다. 첫째, 소나무의 현존분포도 작성을 통한 생육분포범위를 파악하고, 둘째, 소나무의 분포에 영향을 미치는 환경요인을 파악함으로써 셋째, 소나무의 잠재분포 모형 작성을 통해 기후변화 시나리오를 적용한 잠재분포 변화를 예측하는 것이다.

II. 재료 및 방법

2.1. 생태적 지위(Ecological Niche) 모형

학자들은 오래 전부터 환경적 요소가 식생의 지리적 분포에 영향을 미치고, 그 가운데에서도 특히 기후적 특징이 식물의 유형과 강한 연관성을 가지며, 그 결과 기후와 식생을 연결하는 어떠한 기작이 있음을 깨달았다. 기후와 식물 간의 관계에 대한 연구는 맨 처음 기원전의 인물인 Theophrastus에 의해 이루어진 것으로 알려지는데, 그는 관찰과 실험을 통해 식물의 분포에 있어 기후의 중요성에 대한 이해를 높였다고 한다. Woodward(1987)는 Theophrastus가 했던 “특정한 지역에는 특정한 나무들만 자라는 것으로 보아 모든 나무들은 적절한 위치와 기후를 찾고 있다”라는 말을 인용하고 있는데 이러한 사실은 이미 고대부터 식물과 기후의 연관성이 인지되고 있었음을 의미한다. 이후로, 다수의 학자들은, 기후와 식물 사이에서 존재하는 관계를 탐구하고, 확인하고 정량화하기 위해 노력했고 이 과정에서 식물의 지리적 분포를 예측하기 위한 접근방법으로 다양한 공간적 규모에서 다양한 환경요인 변수를 독립변수로 하는 모델링 방법이 이용되었다.

20세기 내내 기후 인자들은 특정한 생물의 풍부도를 결정짓는 유용한 잠재지표로 여겨졌다(Hutchinson and Bischof 1983; Huntley *et al.*, 1988). Clements의 천이동역학(succession dynamics) 이론은 초기의 생물지리학에 의해 영향을 받았고 특정 식물과 관련된 천이 과정은 지역적인 대기후에 의해 결정된다고 설명했다(Clements, 1936). Clements가 시간적인 중요성을 강조한 반면, Gleason은 이질적인 공간적 패턴 또한 중요함을 제안하면서 생태학에 있어 보다 단순한 접근방법을 강조했다. 그는 생물 분포의 공간적 패턴이 환경구배에 대한 개별적 반응으로 해석될 수 있음을 제안했다. 초기 생물지리학의 한 가지 목표는 특정 종 또는 군집의 분포역을 지리학에 기반하여 해석하고 자연사적 관점에서 분포 지도를 제작하는 것이었다.

20세기의 후반에 들어서는 자연사에 근거한 해석보다는 생태적인 동역학을 구명하고 설명하기 위하여 보다 과학적인 해석에 노력하였다. 환경구배 분석은 종의 분포가 환경적인 구배(Whittaker, 1956; Curtis, 1959)와 연관성이 높다는 가정 하에서 발전했다. Whittaker(1975)의 극상패턴설(climax pattern theory)에서 군집은 여러 개체군들이 환경구배에 따라 연속적

으로 겹치는 패턴으로 배치되며 극상은 시·공간적으로 가장 성숙한 단계에 출현하는 종들의 조합에 의해 형성된다고 보는 설로서 군집 간에는 명확한 경계가 존재하지 않고 서로 겹친 상태로 변해가는 추이대(ecotone)가 존재한다고 하였다. 따라서 자연 상태에서 식물상의 갑작스런 변화는 물리적인 환경의 불연속성과 밀접한 관련이 있다고 믿었으며(Whittaker, 1975), 그러한 관계의 정량적 분석을 위한 과학적 방법론이 급속하게 발전하였다(White, 1979; Paine and Levin, 1981; Allen and Starr, 1982; Mooney and Godron, 1983; Pickett and White, 1985). 이와 같이 종의 분포 모델링을 위한 다양한 접근은 종과 환경 간의 관계를 정량화하는 데에서 출발하였고, 생물기후학적 변수들은 종과 군집의 분포를 설명하기 위하여 사용되고 있다.

생태적 지위(Ecological Niche)는 이를 정량화하려는 많은 노력에도 불구하고 정량적인 개체군 생태학의 개념은 아니다. 생태적 지위에 대해서는 여러 가지 정의가 있다. Grinnell(1917)은 어떤 종이 생육하기에 적당한 영역으로 정의하였고, Elton(1927)은 어떤 종이 속한 군집 내의 종들이 가진 역할에 의해 형성되는 기능으로 정의하였다. Hutchinson(1957)은 생태적 지위를 종의 생육에 영향을 미치는 n 가지 환경 요인으로 이루어진 n 차원의 다차원 공간으로 정의했다(Fig. 1). 이 정의는 Grinnell의 정의에 보다 가깝다고 볼 수 있는데 이유는 군집 내에서 특정 종의 역할을 파

Fig. 1. Multi-dimensional space of ecological niche, (a) Single-dimension, (b) two-dimension, (c) multi-dimension (Begon, Harper & Townsend, 1990).

악하기는 어려운 반면 특정 종이 지니는 생태적 요인의 허용한계는 상대적으로 측정이 쉬울 수 있기 때문이다. 그러나 실제로 이러한 종간의 지위가 항상 겹쳐 있는 생태계 내에서 특정 종과 주변의 다른 종 또는 환경요인 간의 상호작용을 정확하게 측정하기는 어려운 것으로 보이며, 결국 이러한 복잡성이 개입된 개념적인 모델이 현재의 생태적 지위 모델이 기반으로 하는 머신 러닝(Machine Learning) 알고리즘으로 발전할 수 있었던 원인 중 하나는 비약적인 컴퓨터 성능 향상도 한 몫한 것으로 판단된다.

일반적으로 종 분포 모형은 두 가지 유형의 입력자료를 필요로 하는데 첫째는 종의 출현에 대한 기록이고 둘째는 종이 출현한 지점의 환경요인변수들이다. 이러한 입력자료를 기반으로 모델링 기법을 적용함으로써 종의 분포를 환경요인변수들의 조합을 통해 해석하게 된다. 사용되는 모델링 기법에 따라서, 해당 알고리즘이 최적인지를 테스트하기 위한 평가 및 결정이 필요하다. 설명변수로 사용되는 환경요인변수의 상대적 중요도나 기여도에 따라 몇 개의 변수를 어떠한 조합으로 사용할 것인지를 결정해야 한다. 일단 종의 분포를 설명하는 알고리즘이 구축되면 종의 분포를 예측할 수 있는 도면의 작성이 가능해지는데 이 과정에서 종의 분포를 얼마나 정확하게 설명하는지에 대한 평가가 이루어져야 한다.

이상의 과정들을 통해 모델의 검정이 성공적으로 이루어질 경우 종의 출현이 알려지지 않은 지역에 대한 정보를 예측할 수 있다. 대부분 이러한 모델은 종의 출현지점들 사이에 있는 지리적 빈 공간을 추정하는데 사용되는데(Anderson *et al.*, 2002; Ferrier *et al.*, 2002), 경우에 따라서는 다른 지역에서의 분포를 예측하는 데 사용되거나(Peterson, 2003), 다른 시기에 분포할 것인지를 예측하는 데 사용되기도 한다(Pearson and Dawson, 2003).

2.2. 소나무 분포 모형 작성 및 평가 과정

2.2.1. GARP 모형의 구동

생태적 지위모형에 기반하여 수종의 분포를 해석하고 예측하기 위해서는 다양한 환경요인변수를 수집하여 데이터베이스로 구축하고 모형의 입력자료로 변환하는 과정, NFI (National Forest Inventory) 정보에서 연구대상 수종의 입력출현정보를 작성하는 과정, 모형을 구동하여 전반적인 경향을 파악하고 수종분포

Fig. 2. Research process.

와 개별 독립변수 간의 연관성을 평가한 후 변수를 조정하는 과정을 거친다.

Fig. 2는 본 연구의 전체적인 흐름을 나타낸다. 이후 최종적으로 선정된 변수를 이용하여 모형을 구동한 후 현존 및 잠재 수종 분포도를 작성하는 과정, 결과를 평가하는 과정을 거쳐 독립변수에서 기후관련 변수를 기후변화 시나리오에서 추출한 자료로 대체하여 미래를 예측하였다.

본 연구에서는 보다 개연성이 높은 미래 예측을 위하여 NFI 자료의 상대적 층위구분 정보를 기반으로 하층을 포함하여 최소한 두 층위 이상에서 분석대상 수종이 출현하는 경우만을 출현으로 간주하였다. 다시 말해 어느 한 층위에만 출현하거나 하층에 출현하지 않는 경우는 비출현으로 간주하였다. 따라서 잠재 수종분포도 및 기후변화 시나리오에 따른 예측 수종분포도의 작성에는 조사 시점에서 중층이나 상층의 우점도가 높다 하더라도 기준을 만족시키지 못하는 출현정보는 사용하지 않았다. 또한 상층이 아닌 경우는 층위별로 각각 최소 2개체 이상 출현한 지점의 자료만을 분석에 포함시켜 개체 발생의 우연성을 최대한 배제하고자 하였다.

Pulliam(1988)은 개체군의 성장과 조절에 미치는 서식지 관점의 개체군 변동의 영향에 관한 논문에서 대다수의 개체군이 저조한 번식률을 보이는 ‘싱크(sink)’ 개체군이고 이러한 싱크 개체군들은 상대적으로 번식률이 우수한 주변의 ‘소스(source)’ 개체군으로부터의 이주에 의해 유지되고 있다고 하였다. 또한 그러한 이유로 인해서 기본적인 지위의 규모(niche size), 개체군 조절(population regulation), 군집 구조(community structure)와 같은 생태학적 개념들은 재고되어야 한다고 주장하였다. 임목의 경우 일년생 식물과는 달리 긴

생활사와 느린 번식주기를 가지고 있다는 점, 환경요인의 변화에 대한 변이 발생이 잘 일어나지 않는다는 점을 반영할 경우 분포 모형의 정도를 향상시킬 수 있다(Pearson and Dawson, 2003).

이러한 관점에서 본 연구에서는 생활사가 상대적으로 짧은 초본식물이나, 이동성을 지닌 동물과는 달리 임목의 생활사가 상대적으로 길다는 점을 감안하여 특정 지역에서 현재 상층을 점유하고 있다 하더라도 중층이나 하층에서 후계목이 발견되지 않는 경우는 소스 개체군이 아닌 싱크 개체군으로 판단하였다. 연구에 사용된 소나무의 층위별 출현 정보와 모형 작성에 사용된 최종입력정보는 Fig. 3과 같다.

본 연구에서는 5년간의 NFI 자료에서 나타나는 소나무의 출현정보를 설명하기 위한 환경요인변수로서

기후관련 변수 8개, 지형관련 변수 10개, 지질·토양 관련 변수 4개, 토지이용 및 식생현황 관련 변수 5개 등 총 27개의 변수를 사용하였다(Table 1).

벡터형태의 자료를 포함한 모든 환경요인변수는 래스터 형태로 변환하였고 여기에서 NFI의 조사지점 간 거리가 4km인 점을 감안하여 모든 환경요인변수의 해상도는 조사지점을 중심으로 하는 4km × 4km 래스터로 조정하였다. Fig. 4는 일반적인 생태적 지위 모형의 분석과정을 보여준다.

인공신경망과 유전적 알고리즘은 생물기후 모형과 관련하여 널리 사용되는 방법으로서 종속변수와 독립변수 사이의 연결강도를 조절하여 규칙을 탐색하는 병렬 정보처리시스템으로서 기존의 컴퓨팅과는 차별화된다. 신경망은 대량의 정보를 한꺼번에 처리하고 학습

Fig. 3. Presence data of *Pinus densiflora* ((a) Upper-story of NFI, (b) Mid-story of NFI, (c) Under-story of NFI, (d) Final Sink population removed input data).

Table 1. Environmental explanatory variables

Climate	Geography and topography	Geology and soil	Landuse and vegetation index
Mean annual temperature	Topographic index (100 m)	Geological types	Spring EVI PCA axis 1
Mean January temperature	Topographic index (1,000 m)	Soil types	Summer EVI PCA axis 1
Mean August temperature	Elevation coefficient of variation	Soil depth	Autumn EVI PCA axis 1
Mean temperature of growing season	Maximum elevation	Bedrock exposure	Winter EVI PCA axis 1
Annual precipitation	Average elevation		Growing season EVI PCA axis 1
Precipitation of growing season	Minimum elevation		
Difference of January and August temperature	Difference of Maximum and minimum elevation		
Annual solar radiation	Surface area ratio Topographic wetness index Distance from sea

Fig. 4. General approach and applications of ecological niche models.

하는 과정을 통해 패턴을 탐색한다. 다시 말해 적합한 연결은 강화하고 부적합한 연결은 약화하는 과정을 통해서 룰을 생성하는 것이다. 이러한 알고리즘들은 복잡하고 정확도가 낮은 자료들로부터 의미 있는 정보를 추출함으로써 음성 및 영상 인식으로부터 주식시장의 변동 예측에 이르기까지 여러 분야에서 급속한 발전을 거두고 있다. 그러나 처리과정을 통해 출력된 결과가 어떠한 과정을 거쳤는지 명확하지 않아 종종 ‘블랙박스’로 불리우면서 해석에 어려움을 가져오는 경우가 있다. 다양한 인공지능망과 유전적 알고리즘이 개발되어 생태적 지위모형에 적용되었으나 그 가운데에서 가장 널리 사용되는 것이 GARP이다(Stockwell and Peters, 1999; Peterson, 2001; Peterson and Vieglais, 2001; Stockwell and Peterson, 2002). GARP는 생물종의 출현, 비출현 정보에 기반한 모형이지만 비출현 자료를 반드시 요구하는 것은 아니기 때문에 상당한 장점을 가진다. 왜냐하면 대부분의 생물종 데이터 베이스들이 출현에 대한 정보만을 담고 있는 경우가 대부분이고, 설사 비출현에 대한 정보가 있다 하더라도 조사지역에 대해 완벽한 전수조사가 실시되지 않았거나 조사과정에서 발견하기 어려운 종이라면 신뢰성이 문제가 될 수 있기 때문이다.

식물을 포함한 다양한 생물들에 대한 연구에서 GARP 모형이 사용되었고 모형의 성능을 상호 비교한 연구도 상당수 존재하나, 이러한 비교 연구에서는 대부분 조류, 파충류, 어류, 포유류 등을 입력자료로 사용하였고 식물을 대상으로 모형의 성능 비교를 목적으로 한 연구는 그리 많지 않다.

Elith and Burgmann(2002)는 식물을 대상으로 GARP, GAM, GLM 등의 성능을 비교한 연구에서 GARP가 가장 우수한 것으로 평가하였다. 동물을 대상으로 한 다수의 비교 연구에서도 GARP가 GLM이나 BIOCLIM에 비해 우수한 것으로 평가하였는데, 그 이유는 GARP가 로지스틱 회귀 분석과 기후 엔빌로프 분석 방법을 이미 포함하고 있기 때문이다(Anderson *et al.*, 2002; Stockwell and Peters, 1999; Peterson *et al.*, 2002).

본 연구에서는 위에서 언급한 바와 같이 다양한 생물종의 분포 예측과 관련된 연구에 널리 사용될 뿐만 아니라 그 유용성이 이미 입증된 생태적 지위 모형 가운데 하나인 GARP를 채택하였다.

2.2. 모형의 검증

모형 구동 결과는 Receiver Operating Characteristic (ROC)의 Total Area Under Curve (AUC) 및 실제 종 출현정보와 예측된 출현 및 비출현 정보에 기반한 컨퓨전 매트릭스(Confusion Matrix, Stehman, 1997) 관련 통계량을 기반으로 모형의 설명력을 검증하였다. 일반적으로 본 연구와 같은 이분형 모형의 경우 종의 출현, 비출현에 대한 예측결과가 실제 조사된 출현, 비출현 정보에 얼마나 가까운가를 평가하는데 이러한 평가 방법은 대부분 컨퓨전 매트릭스를 이용한다(Stehman, 1997). 에러 매트릭스(error matrix)라고도 불리는 이 매트릭스는 실제 조사 정보와 추정된 결과 간의 출현, 비출현에 의해 만들어질 수 있는 네 가지 조합을 항목별 표의 형태로 나타낸 것이다(Table 2).

이와 같이 컨퓨전 매트릭스에 나타난 수치들은 모형의 성능을 평가하는 데 있어 다양한 통계량 산출의 기반이 되는데 세부 항목들은 Table 3과 같다.

ROC AUC는 신호탐지이론(Wickens and Holland, 1999)에 기반하고 있는데 sensitivity를 Y축으로, 1-specificity를 X축으로 하는 그래프를 통해 알고리즘이나 모형의 성능을 평가하는 방법이다. 신호탐지이론은

Table 2. Confusion matrix and its components

Model \ NFI	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 3. 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	$\sum_{i=0}^n (TPR_{i+1} + TPR_i) / 2 (FPR_{i+1} - FPR_i)$ <p>i=cumulative frequency at ith Point were FPR changes</p>

Table 4. Diagnostic criteria based on AUC

AUC	AUC >= 0.9	0.9 > AUC >= 0.8	0.8 > AUC >= 0.7	0.7 > AUC >= 0.6	0.6 > AUC >= 0.5
Diagnosis	Excellent	Good	Fair	Poor	Fail

신호의 탐지가 신호에 대한 관찰자의 민감도와 관찰자의 반응 기준에 달려 있다는 이론으로서 신호와 노이즈의 구분에 관련된 능력을 측정하는 수단으로 이용된다. ROC의 AUC 점수 평가는 Swets(1988)가 제안한 기준을 따랐으며 그 기준은 Table 4와 같다.

개별 환경요인변수 각각을 설명변수로 하여 모형을 구동한 후 ROC의 AUC를 평가하고 기후관련변수 외의 범주에 속하는 변수들이 0.6 미만의 값을 가지는 경우 최종적인 수종별 환경요인변수에서는 제외하는 것을 원칙으로 하였다. 위에서 언급한 바와 같이 AUC가 0.5를 초과하는 경우 최소한 무작위적 추정은 아니지만 보다 개연성이 높은 모형의 작성을 위해 Swets(1988)의 기준에서 ‘Fail(매우 미흡)’의 수준에 해당하는 변수들은 제외하고자 하였기 때문이다. 그러나 식물의 생육과 직접적인 연관성을 가지는 환경요인변수인 기온과 강수에 대해서는 생태적 지위 모형이 생물기후 모형 가운데 하나임을 감안하여 반드시 포함하는 것을 원칙으로 하였다. 결과적으로 기온이나 강수량과 관련해서 한 개의 변수도 선택되지 않은 경우는 AUC가 0.6 미만이라 하더라도 같은 범주 내에서 가장 AUC가 높은 변수를 선택하여 최소한 하나씩의 관련 변수가 분석에 포함되도록 하였다.

또한 같은 범주에 속하는 환경요인변수들, 예를 들어, 1월 평균기온과 8월 평균기온이 동시에 포함되는 경우는 변수 간 공분산으로 인한 과대적합의 문제가

있을 수 있어 AUC가 높은 쪽을 선택하여 최종적인 잠재분포 모형을 작성하였다.

III. 결 과

3.1. 소나무의 현존분포

소나무는 전국적으로 분포하며 여전히 경제적인 가치를 인정받는 수종으로서 우리나라를 포함하여 극동러시아, 중국, 일본 등에 분포하는 소나무과 소나무속의(USDA, <http://www.ars-grin.gov/>) 상록침엽교목으로 우리나라에서는 한반도 북부의 아고산지대를 제외한 전국의 표고 1,300m 이하에서 자생한다(Korea National Arboretum, 2012). 서론에서 언급한 바와 같이 전국적으로 분포범위가 넓은 소나무는 상대적으로 기온상승의 영향이 덜 할 것으로 추정되었다.

본 연구에서 작성된 소나무 현존분포도(Fig. 6)를 살펴보면 전국적으로 분포하지만 중부 이남으로 다소 치우친 모습을 볼 수 있다. 출현 개체수가 상대적으로 많은 지역은 경기도 양평, 강원도 강릉, 삼척, 충청남도 서산, 공주, 청양, 금산, 전라북도 진안, 남원, 함양, 부안, 전라남도 곡성, 구례, 하동, 경상남도 울산, 양산, 부산, 경상북도 전역 등지로서 대부분 표고가 1,000m 이하인 곳임을 알 수 있다. 따라서 우리나라의 소나무는 기온이 상대적으로 낮은 온대북부지역이나 고산지역보다는 온대중·남부 지역과 표고가 낮은 지역에서

Fig. 5. NFI based current distribution of *Pinus densiflora*.

보다 적합한 수종으로 판단된다. 전국적으로 분포하고 있으나 주로 경상북도 지역에서 풍부도가 상대적으로 높게 나타나는 반면 강원도는 다소 낮은 값을 보인다. 이러한 결과는 강원도 지역의 소나무림이 현재는 상층을 점유하고 있으나 중층 및 하층에서 치수의 발생이 극히 저조한 것과 연관성이 있다. Fig. 3을 살펴보면 동일한 조사지점들에서 상층(a)에서는 출현하나 중층(b)이나 하층(c)에는 전혀 출현하지 않는 지점들이 다수 존재함을 알 수 있고 강원도 지역이 특히 그러한 것을 알 수 있다. 결과적으로 모형의 입력자료로 사용된 Fig. 3의 (d)에서는 중층이나 하층에서 최소한 2본이상의 개체가 출현하지 않는 조사구가 배제되어 강원도 지역 상당수의 조사구가 비출현지점으로 간주되었다.

3.2. 소나무의 현존분포와 환경요인변수 간의 관계

소나무와 환경요인변수 간의 관계는 Table 5와 같다. 소나무에 대한 분석결과 AUC가 0.6 이상인 환경요인변수들은 총 4개로 분석되었다. AUC는 1월 평균기온, 1월과 8월 평균기온차, 연평균기온 순이었다. 기

온관련 변수는 모두 평균적인 지역이었고 1월과 8월 평균기온차도 보통인 지역이었다. 따라서 현재 소나무는 기온이 크게 높거나 낮지 않은 이상 전국 어느 지역에서도 분포가 가능한 것으로 보인다.

3.3. 소나무의 잠재분포

기존의 생태적 지위 모형을 이용한 대부분의 연구에서는 사용가능한 모든 변수를 처음부터 모형 작성에 포함시켰다. 그러나 수종에 따라서 생육에 영향을 미치는 환경요인이 서로 다를 수 있고 유사하더라도 영향의 크기에 차이가 있을 수 있다. 따라서 소나무를 대상으로 한 본 연구에서는 이상의 기준에 따라 최종적으로 선정된 변수들은 다음 Table 6과 같다.

소나무 잠재분포모형에서는 기후관련변수로서 1월 평균기온과, 생육기강수량이 선정되었을 뿐 나머지 지리·지형관련 변수, 토양관련변수, 토지이용 및 식생현황 관련 변수는 선정되지 못했다.

최종적으로 선정된 환경요인변수들을 기반으로 작성한 소나무 잠재분포 모형의 평가통계량과 AUC 곡선은 각각 Fig. 6, Table 7과 같다.

소나무 잠재분포 모형의 AUC는 0.67으로 분석되어 설명력은 ‘미흡’ 수준으로 평가되었다. sensitivity는 0.787로 보통 수준이었으나 1-specificity가 0.497로 다소 높았다.

소나무는 현재 1월 평균기온이 상대적으로 크게 낮은 고산 지역을 제외하면 어디에서나 분포하고 있는데 이러한 특성을 어느 정도는 반영하고 있다. 그러나 현존 분포 지역에 비해 경기도 및 강원도 내륙지역의 분포확률이 상대적으로 낮게 나타난다. 이러한 결과는 이미 모형에 투입되는 출현지점의 선정과정에서 치수가 발생하지 않는 싱크 개체군들이 제거된 데에서 기인하는 것이다.

소나무의 경우 6개 수종 가운데 AUC가 가장 낮았고 환경요인과의 연관성 분석 결과 선정된 변수도 기온과 관련된 변수들만이 선정되었고 강수량은 선정되지 않았다. 그러나 이러한 결과를 바꾸어 말하면 소나무의 경우 겨울철 기온이 낮은 북부 산악지역을 제외하면 현 시점에서는 전국 어느 곳에서도 경쟁력이 있는 수종임을 시사하고 있다. 또한 AUC가 0.6을 넘지는 않았으나 지질, 겨울 식생지수, 최소표고 등도 0.59 이상을 보이고 있는데 지질의 경우 K2 하양층군의 화강암질암에서 높은 잠재분포확률을 나타내어 경

Table 5. Relationship between environmental explanatory variables and current distribution of *Pinus densiflora* (* : AUC $\geq$ 0.6)

	Prevalence	Global diagnostic power	Correct classification rate	Sensitivity (true positive rate)	Specificity (true negative rate)	Omission error	1-specificity = commission error	AUC
Mean annual temperature	0.392	0.608	0.545	0.866	0.338	0.134	0.662	*0.605
Mean January temperature	0.389	0.611	0.611	0.759	0.517	0.241	0.483	*0.645
Mean August temperature	0.389	0.611	0.506	0.896	0.258	0.104	0.742	*0.606
Mean temperature of growing season	0.389	0.611	0.487	0.945	0.196	0.055	0.804	0.583
Precipitation of growing season	0.389	0.611	0.63	0.234	0.882	0.766	0.118	0.586
Annual precipitation	0.389	0.611	0.637	0.184	0.925	0.816	0.075	0.559
Difference of January and August temperature	0.389	0.611	0.575	0.763	0.455	0.237	0.545	*0.614
Annual solar radiation	0.389	0.611	0.58	0.319	0.746	0.681	0.254	0.552
Topographic index (100 m)	0.389	0.611	0.612	0.017	0.017	0.983	0.009	0.538
Topographic index (1,000 m)	0.389	0.611	0.61	0.067	0.956	0.933	0.044	0.519
Elevation coefficient of variation	0.389	0.611	0.611	0.172	0.891	0.828	0.109	0.539
Maximum elevation	0.389	0.611	0.55	0.657	0.481	0.343	0.519	0.586
Average elevation	0.389	0.611	0.554	0.639	0.501	0.361	0.499	0.588
Minimum elevation	0.389	0.611	0.539	0.712	0.429	0.288	0.571	0.591
Difference of Maximum and minimum elevation	0.389	0.611	0.601	0.089	0.926	0.911	0.074	0.531
Surface area ratio	0.389	0.611	0.597	0.192	0.854	0.808	0.146	0.535
Topographic wetness index	0.389	0.611	0.608	0.071	0.951	0.929	0.049	0.515
Distance from sea	0.388	0.612	0.576	0.35	0.72	0.65	0.28	0.54
Geological types	0.389	0.611	0.578	0.525	0.612	0.475	0.388	0.593
Soil types	0.389	0.611	0.594	0.195	0.848	0.805	0.152	0.541
Soil depth	0.389	0.611	0.508	0.792	0.327	0.208	0.673	0.566
Bedrock exposure	0.389	0.611	0.563	0.366	0.689	0.634	0.311	0.542
Spring	0.389	0.611	0.604	0.134	0.903	0.866	0.097	0.527
Summer	0.389	0.611	0.592	0.364	0.736	0.636	0.264	0.561
Autumn	0.389	0.611	0.59	0.254	0.804	0.746	0.196	0.542
Winter	0.389	0.611	0.597	0.408	0.717	0.592	0.283	0.576
Growing season	0.389	0.611	0.573	0.501	0.619	0.499	0.381	0.564

Table 6. Final environmental explanatory variables for potential distribution models for *Pinus densiflora*

Environmental explanatory variables		
<i>Pinus densiflora</i> (AUC)	Mean January temperature (0.645)	Precipitation of growing season (0.586)

상도 지역의 높은 현존 풍부도를 설명하는 것으로 판단되고, 겨울철 식생지수가 낮은 활엽수림 지역에서는 분포확률이 크게 낮아짐으로써 천이 초기 수종인 소나무가 참나무류들에 비해 경쟁력이 낮음을 보여준다.

Fig. 6. AUC curve of *Pinus densiflora*.

Table 7. Statistical indices of potential distribution model for *Pinus densiflora*

Prevalence	Global diagnostic power	Correct classification rate	Sensitivity	Specificity	Omission error	1-specificity= commission error	AUC
0.392	0.608	0.614	0.787	0.503	0.213	0.497	0.67

Fig. 7. Potential distribution of *Pinus densiflora* ((a) Current, (b) 2020s, (c) 2050s, (d) 2090s).

최소 표고 역시 높지도 낮지도 않은 중간 정도에서 분포확률이 가장 높게 나타나 가장 일반적인 지형에서 흔하게 자라는 수종임을 알 수 있다. 그러나 기후변화 시나리오에서 상승하는 기온으로 인해 2020년대에는 잠재분포역이 중부지방으로 밀려올라가고, 2050년대에는 생육기 강수량이 상대적으로 낮은 경북 지방으로 축소되다가, 2090년대에는 강원도 산악지역을 중심으로 잔존하게 된다(Fig. 7).

3.4. 고찰 및 모형연구의 한계

한반도는 세계에서 가장 큰 대륙과 가장 큰 바다의 사이에 위치한 지리적 특수성으로 인해 기후와 식생이 독특한 형태를 보이며 식생대는 온대림, 한대림으로 구분된다(Shin, 2002).

우리나라 대부분의 천연림은 대략 세가지 형태의 전형적인 이차림 즉, 소나무림, 소나무-참나무림, 참나무 혼효림으로 구분할 수 있다. 이와 같이 참나무류들이 우점하는 우리나라의 활엽수 천연림은 거의 대부분이 강도 높은 교란을 거쳐 형성된 이차림으로서 여전히 이차천이가 진행 중인 산림으로 볼 수 있다. 특히 우리나라는 식물이 자라기에 적합한 기후대와 국토면적에 비해 상대적으로 많은 식물종들이 생육하고 있어 산림에서 교란 이후 자연적 회복력이 높은 편이다. 통계에 따르면 우리나라의 소나무림 면적이 점점 감소하는 것으로 나타나는데 이것은 이차천이의 진행과정으로서 매우 자연스러운 현상으로 볼 수도 있다. 황폐지에 소나무림이 형성됨에 따라 유기물이나 수분 등 토양조건이 개선되면서 소나무에 비해 내음성과 초기생장이 우수한 참나무류가 자리를 잡고 빠르게 성장하게 된다. 시간이 지남에 따라 참나무류들은 소나무와 어께를 나란히 하며 수관점유율 및 수고를 높여 결국 소나무를 제압하게 되는 것이다. 현재 우리나라 이차림의 상당한 면적이 이와 같은 천이과정에 도달해 있는 것으로 추정되며, 지형조건상 사면이나 계곡에 비해 일사량이 높고, 토양 수분이나 양분 조건 측면에서 불리한 능선부를 따라 소나무림이 형성되어 있는 모습을 쉽게 발견할 수 있는 것은 이러한 이유에서이다(Korea Forest Research Institute, 2012b).

앞에서 언급한 바와 같이 우리나라의 산림은 인간과의 상호작용이 많았다. 과거 우리의 조상들은 산림과 함께 생활하며 산림으로부터 의식주를 해결해왔고 근대에 들어서는 한국전쟁, 일제의 목재수탈 등으로 인

해 대부분의 산림이 파괴되었다. 지금도 좁은 국토면적에 비해 높은 인구밀도는 경제적인 논리 하에서 산림지역의 개발을 가속화하고 있는 실정이다. 따라서 천이과정에 가해진 인위적인 교란의 영향에 대한 평가 없이 현존분포를 설명하는 것은 경우에 따라 큰 의미를 가지지 못할 수도 있으나 장기간에 걸친 역사적인 상황을 정량화하는 것은 거의 불가능한 것으로 보인다. 또한 수종별로 남한 전 지역을 대상으로 현존분포를 도면화하거나 예측한 연구도 극히 제한적이어서 본 연구결과를 선행연구와 비교하는 것도 쉽지 않은 것이 사실이다. 소나무의 분포와 관련된 선행연구결과와의 비교는 다음과 같다. 소나무는 현존분포도에서 나타난 것과 마찬가지로 고산 지역을 제외하면 기후에 대한 적응성이 가장 넓은 수종으로 보인다. 다만 앞서 언급한 바와 같이 천이과정상 갭신이 제대로 이루어지지 못하는 영향이 차츰 나타나고 있는 것으로 판단된다. 문헌에 나타난 소나무의 온량지수 범위는 30~122(Yim, 1977) 이다. 소나무는 유일하게 기후변화 영향 평가와 관련하여 국립산림과학원 외에 한국환경정책평가연구원(Korea Environment Institute, 2001)에서도 연구를 수행한 바 있다. 국립산림과학원(Korea Forest Research Institute, 2007)의 연구결과를 살펴보면 온량지수에 기반한 현재의 잠재분포는 남해안 지역을 제외한 전역으로 나타난다. 이러한 결과는 같은 문헌에서 나타난 온량지수를 사용한 한국환경정책평가연구원(Korea Environment Institute, 2001)의 결과도 마찬가지이다. 본 논문의 연구결과에서도 남해안 일부 도서는 소나무의 생육에 불리한 것으로 나타나지만 그 범위가 기존 연구에 비해 훨씬 좁게 나타난다. 또한 현존분포도와 비교해보면 본 논문의 연구결과가 실제 소나무의 현존분포에 훨씬 가까움을 알 수 있다. 또한 기존의 연구 결과들은 공히 소나무가 2090년대에 강원도 북부 고산지역에만 잔존할 것으로 예측한 반면 본 연구에서는 2090년대에도 중부지방을 중심으로 상당히 높은 잠재분포 확률을 보이며 더 넓은 면적에서 잔존할 것으로 예측하고 있다. 이러한 결과는 소나무가 천이과정상 현재 쇠퇴하고 있는 것은 사실이나 적절한 조림작업이 동반될 경우 앞으로도 상당기간 유지될 수 있음을 시사하고 있다. 이러한 사실은 본 연구의 입력자료로 사용된 NFI 자료를 층위별로 시각화한 자료에서 보다 쉽게 이해할 수 있다(Fig. 8). 즉 상층에서 높은 우점도를 보이는 강원도의 경우 경상북도

Table 8. Climate change responses and probabilities for *Pinus densiflora* under RCP 8.5 climate change scenario in Korea

	potential threats from climate changes	Potential responses	Probability based on AUC of modeled results
<i>Pinus densiflora</i>	Increased temperature and altered precipitation pattern may lead to reduced soil moisture availability on dry sites in the growing season.	Habitat suitability may substantially decreased. Increased competition with shade tolerant species Increased threats from insects and diseases	Intermediate-low

지역과 달리 중층이나 하층에 치수가 발견되지 않는 것이다. 소나무는 인간에 의해 장기간 이용되어온 수종으로써 천이초기 수종인 소나무가 지금까지 유지될 수 있었던 것은 과거 낙엽·낙지의 채취로 인해 소나무가 정착할 수 있는 조건이 유지되어 왔기 때문이다. 따라서 소나무의 갱신을 위해서는 치수가 안정적으로 정착하기까지 임상의 유기물 제거나 풀베기 등의 조림적 측면의 관리가 반드시 필요한 수종이라 하겠다.

Table 8은 연구결과를 토대로 향후 기후변화로 인한 소나무의 분포 변화와 변화 가능성을 정리한 결과이다.

최근 가뭄이나 병충해 등으로 인한 산림의 집단고사가 여러 차례 관찰되었고, 한라산과 같은 고산지역에서 구상나무와 같은 유존종의 쇠퇴현상이 지속적으로 나타나고 있다. 그럼에도 불구하고 제한된 환경에서의 실내 실험과는 달리 자연 상태의 산림이 고사하거나 쇠퇴하는 기작은 대부분 알려지지 않았거나 불분명한 경우가 많다.

기온의 상승은 생육기간의 증가를 가져올 수 있지만 갑작스러운 가뭄, 고온이나 저온 현상이 반복될 경우 산림생태계 전반에 영향을 줄 가능성이 있다. 병충해 역시 산림의 건강성이 저하된 경우에 최종적으로 발생하는 경우가 대부분인 것으로 알려져 있다. 그러나 기온상승으로 인한 곤충의 세대수 증가가 관찰되고 있으며 일반적으로 세균이나 바이러스의 활동도 기온상승과 함께 증가하는 것으로 알려지고 있어 산림의 건강성에 대한 모니터링을 체계화하여 조기경보체제를 갖추어야 할 것이다.

기존의 연구결과에서 2090년대에 남한에서 거의 자취를 감출 것으로 예측했던 소나무는 잠재분포역이 축소되기는 하지만 남한의 중·북부 지역에서 상대적으로 높은 잠재분포확률을 나타내며 적응가능한 모습을 보였다. 그러나 이러한 결과는 IPCC의 RCP 8.5 시나리오에 기반한 예측 결과일 뿐이고, 잠재분포역이

Fig. 8. Occurrence data of *Pinus densiflora* by vertical layers (● Upper ● Mid ● Under).

축소된다는 의미는 기존에 뿌리내린 성목들이 어느 순간 갑자기 고사함을 의미하는 것은 아님을 분명히 밝혀둔다. 다시 말해서, 동물과 같이 성체가 스스로 이동할 수 없는 식물의 특성을 고려할 때 종자산포의 거리나 확률, 변화된 환경에 적응할 수 있는 능력 등이 모수화되지 못한 본 연구의 한계가 분명히 존재한다. 따라서 생태적 지위 모형의 결과로 산출된 잠재분포역은 현재시점의 환경요인과 분포패턴으로 평가된 최적생육가능범위로 보는 것이 타당할 것이다. 즉 잠

재분포확률이 높게 나타난 지역에서는 해당 수종의 종자가 발아할 수 있는 확률이 높고, 식재할 경우도 생존할 확률이 높다는 것을 의미한다고 하겠다.

IV. 결 론

본 연구에서는 NFI의 소나무 출현정보를 기반으로 현존분포도를 작성하고, 생태적 지위 모형인 GARP를 기반으로 현존분포와 환경요인 간의 연관성을 분석하였으며, 현 기후에서 트레이닝 된 모형에 기후변화 시나리오를 투입하여 변화를 예측하였다. 그 결과 기존 연구결과에 비해 상대적으로 명확한 현존분포도를 제시하였고, 모형 작성 및 구동 결과 대략 3~6°C의 기온상승을 가정하는 극한의 시나리오에서도 강원도 지역을 중심으로 잔존하는 것으로 나타났다. 소나무의 현존분포산림생태계는 생물과 비생물이 한데 어울려 상호작용하는 복잡계이다. 또한 산림생태계의 기질인 임목들의 수명은 인간들의 그것을 훨씬 넘어선다. 지사학적인 관점에서 지구상에 인간이 출현한 시기는 고작해야 수백만년 전이지만 식물은 수억년 전부터 지금까지 진화를 거듭해왔다. 다시 말해서 이러한 비선형 방정식의 집합체라 할 수 있는 산림의 시·공간적 변화를 단편적인 자료에 기반하여 해석하는 것 자체가 무리일 수 있다. 그나마 이러한 어려움을 극복할 수 있는 한가지 방법은 다양한 산림생태계 구성요소에 대한 관측과 기록을 통해 가능한 장기간의 자료를 수집하고 이들을 정보화함으로써 사실에 입각한 통합적 의사결정체계를 갖추는 것이다. 기후변화에 따른 영향을 평가하기 위한 연구도 엄밀히 말하면 기후변화의 영향이 배제된 상태에서의 관측 자료가 존재해야 가능한 것이다. 물론 교목성 수종의 경우 목편채취를 통한 연륜연대학적 분석을 기반으로 과거의 상황을 추정할 수는 있을 것이다. 그러나 현재 우리가 대하는 산림은 최소한 수십 종의 다양한 임목들이 주어진 환경조건 하에서 공존과 경쟁을 거듭하고, 자신들을 이용하는 소비자들과 상호작용하면서 이루어진 적응과 도태의 결과이자 시간의 산물이다. 제대로 된 기록과 장기간의 노력이 뒷받침되지 않는 연구는 또 다른 가정과 추정을 만들어낼 뿐이다. 이러한 측면에서 향후 NFI나 건강성 평가와 같은 모니터링 사업이 지속적으로 수행될 수 있다면 여러 방면에서 매우 유용한 정보를 생산할 수 있을 것으로 판단된다.

산림생태계의 합리적 관리를 위해서는 체계적인 장기모니터링을 통해 산림생태계의 변화를 이해하고 그 결과를 토대로 기후변화와의 상관성을 보다 정확하게 해석하고자 하는 노력이 필요하다. 또한 그러기 위해서는 기후변화 관련 연구기관 간의 네트워크 체제 구축을 통해 서로 정보를 공유함으로써 방대한 생태정보들로부터 유용한 정보를 마이닝할 수 있는 생태정보 처리시스템의 구축이 반드시 필요하다. 이러한 과정을 거쳐 생산된 객관적인 정보들이 연구성과로 제시될 때 국가적인 산림관리 정책이 올바르게 수립되고 실현될 수 있을 것이다.

적 요

본 연구는 산림에서 나타나는 수종의 분포 패턴을 해석하고 예측하기 위한 목적으로 수행되었다. 국내에서 처음으로 시도된 전국 규모의 체계적 산림조사라 할 수 있는 NFI (National Forest Inventory)의 수종별 출현 정보와 출현지점별 풍부도를 기반으로 소나무의 현존분포도를 작성하였다. 생태적 지위 모형의 하나인 GARP (Genetic Algorithm for Ruleset Production)를 이용하여 소나무 현존분포와 연관성이 높은 환경요인변수들을 선정하였고, 선정된 변수들을 설명변수로 하는 소나무 잠재분포 모형을 작성한 후 기후변화 시나리오를 적용하여 미래의 잠재분포를 예측하였다. 기후, 지리·지형, 토양·지질, 토지이용 및 식생현황 등 27개 환경요인변수들 각각 설명변수로 하여 모형을 구동함으로써 소나무 현존분포와의 연관성을 평가한 결과 1월 평균기온이 최상위를 차지하였고 연평균기온, 8월평균기온, 연교차 등도 영향을 미치는 것으로 분석되었다. NFI 정보로부터 추출하여 소스개체군으로 선정된 조사지점들을 소나무의 최종출현정보로, 환경요인변수 간의 연관성 분석을 통해 최종적으로 선정된 변수 세트를 설명변수로 하여 모형을 구동함으로써 최적의 모형을 선정한 후 잠재분포도를 작성하였다. 현재 시점의 환경요인변수들에 의해 트레이닝 된 잠재분포 모형에서 기후관련변수들을 RCP 8.5 기후변화시나리오에서 산출한 변수들로 대체하여 2020년대, 2050년대, 2090년대의 소나무의 예측 잠재분포도를 작성하였다. 최종적으로 작성된 소나무 잠재분포모형의 평가통계량인 AUC (Area Under Curve)는 0.67로 다소 미흡하였으나 향후 기후변화 환경 하에서 소나무림의

보전 및 관리를 위한 최소한의 실마리를 제공할 수 있을 것으로 판단되었다.

REFERENCES

- Allen, T. F. H., and T. B. Starr, 1982: *Hierarchy: perspectives for ecological complexity*. Chicago: The University of Chicago Press. pp. 310.
- 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.
- Clark, J. S., M. Lewis, and L. Horvath, 2001: Invasion by extremes: population spread with variation in dispersal and reproduction. *American Naturalist* **157**, 537-554.
- Clements, F. E., 1936: Nature and Structure of the Climax. *Journal of Ecology* **24**, 252-284.
- Curtis, J. T., 1959: *The vegetation of Wisconsin*. University of Wisconsin Press, Madison WI. pp. 657.
- Davis, M. B., and R. G. Shaw, 2001: Range shifts and adaptive responses to Quaternary climate change. *Science* **292**, 673-679.
- Dawson, T. P., S. T. Jackson, J. I. House, I. C. Prentice, and G. M. Mace, 2011: Beyond predictions: biodiversity conservation in a changing climate. *Science* **332**, 53-58.
- Elith, J., M. A. Burgman, and H. M. Regan, 2002: Mapping epistemic uncertainty and vague concepts in predictions of species' distribution. *Ecological Modelling* **157**, 313-329.
- Elton, C., 1927: *Animal Ecology*. Sidgwick and Jackson, London. pp. 209.
- Ferrier, S., G. Watson, J. Pearce, and M. Drielsma, 2002: Extended statistical approaches to modelling spatial pattern in biodiversity in northeast new south wales. Species-level modelling. *Biodiversity and Conservation* **11**, 2275-2307.
- Grinnell, J., 1917: The niche-relationships of the California thrasher. *The Auk* **34**, 427-433.
- Huntley, B., and T. Webb, 1988: *Vegetation History, Vol. 7 in Handbook of Vegetation Science*. Kluwer Academic Publ., Dordrecht, The Netherlands. pp. 803.
- Hutchinson, G. E., 1957: Concluding remarks. *Cold Spring Harbour Symposium on Quantitative Biology* **22**, 415-427.
- Hutchinson, M. F., and R. J. Bishof, 1983: A new method for estimating the spatial distribution of mean seasonal and annual rainfall applied to the Hunter Valley, New South Wales. *Australian Meteorological Magazine* **31**, 179-184.
- Jackson, S. T., J. L. Betancourt, R. K. Booth, and S. T. Gray, 2009: Ecology and the ratchet of events: climate variability, niche dimensions, and species distributions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **106**, 19685-19692.
- Korea Environment Institute., 2001: *Climate change impacts assessment and adaptation measures on ecosystem. II - Forest eco-climate model development*. pp. 107.
- Korea Forest Research Institute., 2007: *2007 Annual Report*. pp. 1103.
- Korea Forest Research Institute., 2012a: *Economic Tree Species 1 Pine tree*. pp. 250.
- Korea Forest Research Institute., 2012b: *Forestry technology manual*. pp. 1664.
- Korea National Arboretum., 2012: Korea biodiversity information system (<http://www.nature.go.kr/>).
- Loarie, S. R., P. B. Duffy, H. Hamilton, G. P. Asner, C. B. Field, and D. D. Ackerly, 2009: The velocity of climate change. *Nature* **462**, 1052-1055.
- Mooney, H. A., and M. Godron, 1983: *Disturbance and ecosystems: components of response*. Berlin: Springer-Verlag. pp. 292.
- Paine, R. T., and S. A. Levin, 1981: Intertidal landscapes: disturbance and dynamics of pattern. *Ecological Monography* **51**, 145-178.
- 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.
- Peterson, A. T., 2001: Predicting species' geographic distributions based on ecological niche modeling. *Condor* **103**, 599-605.
- Peterson, A. T., 2003: Predicting the geography of species' invasions via ecological niche modeling. *The Quarterly Review of Biology* **78**, 419-433.
- Peterson, A. T., and D. A. Vieglais, 2001: Predicting species invasions using ecological niche modeling: new approaches from bioinformatics attack a pressing problem. *BioScience* **51**, 363-371.
- 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., pp. 617-623.
- Pickett, S. T. A., and P. S. White, 1985: *The ecology of natural disturbance and patch dynamics*. San Diego, CA: Academic Press. pp. 472.
- Pulliam, H. R., 1988: Sources, sinks, and population regulation. *The American Naturalist* **132**, 652-661.
- Ryan, M. G., S. R. Archer, A. Birdsey, C. N. Dahm, L. S. Heath, J. A. Hicke, D. Y. Hollinger, T. E. Huxman, G. S. Okin, R. Oren, J. T. Randerson, and W. H. Schlesinger, 2008: *Land Resources: Forests and Arid Lands in The Effects of Climate Change on Agriculture, Land Resources, Water Resources, and Biodiversity in the United States*. U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research. pp. 75-120.

- Shin, J. H., 2002: *Ecosystem Geography of Korea*. in *Ecology of Korea*. pp. 406.
- Shugart, H., R. Sedjo, and B. Sohngen, 2003: *Forests & Global Climate Change: Potential Impacts on U.S. Forest Resources*. In. Pew Center on Global Climate Change, Arlington. pp. 52.
- Stehman, S. V., 1997: Selecting and interpreting measures of thematic classification accuracy. *Remote Sensing of Environment* **62**(1), 77-89.
- Stockwell, D., and D. Peters, 1999: The GARP modeling system: Problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographical Information Science* **13**(2), 143-158.
- 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.
- Warren, F. J., E. Barrow, R. Schwartz, J. Andrey, B. Mills, and D. Riedel, 2004: *Climate Change Impacts and Adaptation: A Canadian Perspective*. Natural Resources Canada, Ottawa, Ontario. pp. 174.
- West, C. C., and M. J. Gawith, 2005: *Measuring progress: Preparing for climate change through the UK Climate Impacts Programme*. UKCIP, Oxford. pp. 71.
- White, P. S., 1979: Pattern, process, and natural disturbance in vegetation. *Botanical Review* **45**, 229-299.
- Whittaker, R. H., 1956: Vegetation of the Great Smoky Mountains. *Ecological Monography* **26**, 1-80.
- Whittaker, R. H., 1975: *Communities and ecosystems*. Edn. 2. Macmillan, New York.
- Wickens C. D., and J. G. Hollands, 1999: *Engineering Psychology and Human Performance* Translated by Kwak, Ho Wan. 2003: Sigmamapress. pp. 678.
- Woodall., 2010: *US FOREST SERVICE NORTHERN RESEARCH STATION. Research Review*. 11. Autumn 2010.
- Woodward, F. I., 1987: *Climate and Plant Distribution*. Cambridge: Cambridge University Press Distribution, Cambridge: Cambridge University Press.
- 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.
- Zhu, K., C. W. Woodall, and J. S. Clark, 2011: Failure to migrate: lack of tree range expansion in response to climate change. *Global Change Biology* **18**(3), 1042-1052.