

Research Paper

분산 능력을 고려한 기후변화에 따른 붉가시나무의 잠재서식지 분포변화 예측연구

신만석*^{**} · 서창완** · 박선욱*** · 홍승범** · 김진용** · 전자영** · 이명우*
전북대학교 대학원 조경학과*, 국립생태원**, 경희대학교 대학원 지리학과***

Prediction of Potential Habitat of Japanese evergreen oak (*Quercus acuta* Thunb.) Considering Dispersal Ability Under Climate Change

Man-Seok Shin*^{**} · Changwan Seo** · Seon-Uk Park*** · Seung-Bum Hong** ·
Jin-Yong Kim** · Ja-Young Jeon** · Myungwoo Lee*

Department of Landscape Architecture, Chonbuk National University*
National Institute of Ecology**
Department of Geography, Kyung Hee University***

요약 : 본 연구는 붉가시나무(*Quercus acuta* Thunb.)를 대상으로 기후변화의 영향을 평가함에 있어 분산능력을 고려해보고자 하였다. 기후변화에 따른 붉가시나무의 잠재서식지 변화를 예측하기 위하여 종의 분포자료와 기후자료를 활용하여 종분포모형을 개발하였다. 종분포모형은 9개 알고리즘을 True Skill Statistic 평가 값 가중치로 합산하는 앙상블모형을 적용하여 불확실성을 줄이고자 하였다. 미래의 시간적 범위는 2050년과 2070년을 대상으로 하였으며, 기후변화 시나리오는 RCP4.5와 RCP8.5를 선정 하였다. 최종적인 미래 잠재서식지는 현재 적합서식지에서 분산능력에 따라 분산가능한지의 여부를 고려하여 결정하였다. 분산능력은 제한이 없는 경우(Unlimited)와 거리에 따른 분산 확률 함수에 3가지 계수값 ($\theta = -0.005$, $\theta = -0.001$, $\theta = -0.0005$)을 적용하여 R 패키지인 Migclim을 사용하여 구현하였다. 2050년 RCP4.5 시나리오에서 계수값이 $\theta = -0.005$ 일 때 붉가시나무의 잠재서식지가 감소하였다. 그 이외의 경우에는 분산능력이 낮은 경우에도 한반도 내의 잠재서식지가 늘어났다. 하지만 분산능력을 고려하였을 경우 붉가시나무의 미래 잠재서식지 확장에는 한계가 분명하게 나타났다. 따라서 기후변화에 따른 미래 잠재서식지 예측에 있어서 분산능력을 고려하는 것이 중요하다고 판단된다.

주요어 : 종분포모형, 앙상블모형, Migclim, 한반도

First Author: Man-Seok Shin, Dept. of Landscape Architecture, Chonbuk National University, Jeonju 54896, KOREA, Tel: +82-63-270-2594, E-mail: shinms@nie.re.kr

Corresponding Author: Myungwoo Lee, Dept. of Landscape Architecture, Chonbuk National University, Jeonju 54896, KOREA, Tel: +82-63-270-2598, E-mail: lmw@jbnu.ac.kr

Co-Authors: Changwan Seo, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, KOREA, Tel: +82-41-950-5390, E-mail: dharmascw@nie.re.kr

Seon-Uk Park, Dept. of Geography, Kyung Hee University, Seoul 02447, KOREA, Tel: +82-2-961-0251, E-mail: psu1201@gmail.com

Seung-Bum Hong, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, KOREA, Tel: +82-41-950-5804, E-mail: sbhong@nie.re.kr

Jin-Yong Kim, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, KOREA, Tel: +82-41-950-5855, E-mail: mansan2nd@nie.re.kr

Ja-Young Jeon, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, KOREA, Tel: +82-41-950-5939, E-mail: jjy5161@nie.re.kr

Received: 28 February, 2018. Revised: 18 May, 2018. Accepted: 19 May, 2018.

Abstract : This study was designed to predict potential habitat of Japanese evergreen oak (*Quercus acuta* Thunb.) in Korean Peninsula considering its dispersal ability under climate change. We used a species distribution model (SDM) based on the current species distribution and climatic variables. To reduce the uncertainty of the SDM, we applied nine single-model algorithms and the pre-evaluation weighted ensemble method. Two representative concentration pathways (RCP 4.5 and 8.5) were used to simulate the distribution of Japanese evergreen oak in 2050 and 2070. The final future potential habitat was determined by considering whether it will be dispersed from the current habitat. The dispersal ability was determined using the Migclim by applying three coefficient values ($\theta = -0.005$, $\theta = -0.001$ and $\theta = -0.0005$) to the dispersal-limited function and unlimited case. All the projections revealed potential habitat of Japanese evergreen oak will be increased in Korean Peninsula except the RCP 4.5 in 2050. However, the future potential habitat of Japanese evergreen oak was found to be limited considering the dispersal ability of this species. Therefore, estimation of dispersal ability is required to understand the effect of climate change and habitat distribution of the species.

Keywords : Ensemble Model, Korean Peninsula, Migclim, Species Distribution Model

I. 서론

기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC, Inter-governmental Panel on Climate Change)는 지난 133년(1880~2012)간 지구의 평균기온이 0.85℃(0.65~1.06℃)상승하였고, 현재의 온실가스 배출추세(RCP8.5)를 유지할 경우 2100년 지구 평균기온은 현재보다 3.7℃(2.6~4.8℃) 상승할 것으로 전망하고 있다(IPCC 2013). 한반도의 경우 21세기 후반의 기온은 약 4.6℃ 증가할 것이며, 그 상승폭은 고위도 일수록 가파르게 증가할 것으로 보인다(Ahn et al. 2014). 이러한 기후변화에 따른 생태계 및 생육지에 대한 영향은 증가할 것이며(IPCC 2007), 생태계의 피해를 최소화하기 위한 적응방안 마련을 위하여, 그 영향의 정도를 평가하고 파악하는 것이 중요한 과제로 부각되고 있다(IPCC 2001).

국제사회에서는 2014년 제20차 유엔기후변화협약 당사국총회(Conference of the Parties, COP)에서 신(新) 기후체제(Post-2020) 합의를 위한 각 국가의 자발적 기여 방안(Intended Nationally Determined Contribution, INDCs)으로 감축목표와 함께 적응 관련 사항도 고려하도록 결정하였다. 녹색기후기금(Green Climate Fund, GCF)에서도 온실가스 감축과 기후변화 적응 사업에 동일한 비율(각 50%)로 할

당하여 국제사회에 기후변화 적응에 대한 지원을 하고 있다.

국내에서는 기후변화에 대응하기 위하여 저탄소 녹색성장 기본법을 2010년에 제정하고 시행함에 따라 5년마다 국가기후변화적응대책을 추진하고 있다. 현재는 2015년에 제2차 국가기후변화적응대책(2016~2020)을 환경부를 포함한 20개의 국가부처가 참여하여 수립 및 시행하고 있다. 제2차 국가기후변화적응대책의 기본체제는 기후변화로 인한 위험감소 및 기회의 현실화를 목표로 4대 정책부문(과학적 위험관리, 안전한 사회건설, 산업계 경쟁력 강화, 지속가능한 자연자원관리)으로 구분하여 추진계획을 수립하였다. 생태계와 관련해서는 지속가능한 자연 자원 관리를 위해서 생태계 피해 및 생물다양성 감소를 최소화하기 위해서 기후변화로 인한 서식환경 변화 및 멸종위기종·취약생물종·생태계를 중심으로 복원 및 보전대책을 강조하고 있다(제2차 국가기후변화 적응대책 2015).

육상생태계에서 식물은 일차생산자 역할을 통해 에너지 흐름과 먹이사슬에서 중요한 위치를 차지하고 있으며, 현재 한반도에서는 산림 식생이 지표면의 약 70% 비율을 차지하고 있다(Kang et al. 2009). 기후변화의 영향으로 이러한 산림 식생의 분포가 변

화하고 있어, 이에 대한 적응 및 대응 계획이 필요한 시점이다(Jaeschke et al. 2013). 적절한 대응 계획을 위해서는 미래 기후변화에 따른 식생 수종의 생육 적지 및 분포를 파악하는 것이 중요하다(Kim et al. 2012; Ahn et al. 2015).

식생 수종 분포변화를 예측하기 위하여 주로 종분포모형(Species Distribution Model, SDM)이 활용되고 있다(Pompe et al. 2008; Yates et al. 2010; Engler et al. 2011). 종분포모형은 종 관찰 조사를 통하여 공간과 환경자료를 통계적 방법으로 모형화하고 이를 공간적 형태로 변환하여 예측함으로써 자원관리, 생물다양성의 평가, 보호구역 디자인, 생물종 서식지 관리 및 복원, 외래종의 위험 평가 그리고 종의 기후변화 영향예측 등 정책 및 계획분야에서 다양하게 활용되고 있다(Miller et al. 2004; Peters et al. 2004; Flanklin 2009; Thorn et al. 2009; Shin et al. 2015). 종분포모형은 종의 위치정보를 통해 기후 및 환경정보 간의 상호 연관성을 통하여, 종에게 적합한 서식환경을 찾는 것에 목적을 두고 있으며(Schimper 1903; Grinell 1904; Flanklin 2010), 그 방법으로 GLM(Generalized Linear Model), GAM(Generalized Addictive Model), CART(Classification and Regression Tree), ANN(Artificial Neural Network), Maxent(Maximum Entropy Modeling) 등의 방법이 활용되고 있다(Seo et al. 2008; Kwon et al. 2012; Song and Kim 2012; Shin et al. 2015). 종분포모형 결과는 사용되는 통계 방법에 의해 정확도가 결정되므로, 통합하여 활용되는 것이 보다 신뢰성을 높일 수 있다(Araujo et al. 2005). 최근에는 이러한 단일 통계모형의 불확실성을 최소화하고자 앙상블 모형이 사용되고 있다(Thuiller 2003; Kwon 2014; Ahn et al. 2015).

종분포모형을 활용한 기후변화에 따른 종의 지리학적 변화와 관련된 연구는 대체로 고정된 상태를 예측하는 것으로, 단지 새로운 적합 서식지로의 이주를 “가능 또는 불가”로 가정하여 예측하고 있다(Araújo et al. 2006; Heikkinen et al. 2006; Midgley et al. 2006; Flanklin 2009). 종의 미래 분포변화 예측에서 종 분산 능력의 고려가 중요하다고 강조되었지

만(Araujo & Guian. 2007; Thuiller et al. 2008), 종분포모형에서는 종의 확산이나 이주 가능성이 제외되는 경우가 많았다(Engler et al. 2012). 일반적으로 기후변화에 따라서 한반도 내의 난대성 상록활엽수의 잠재서식지는 고위도 및 남부내륙으로 분포가 확대되고 북방한계선 또한 변화될 것으로 예측되고 있다(Nakao et al. 2011; Yun et al. 2011; Park et al. 2016a, 2016b). 하지만 분산 능력을 고려하면 난대성 상록식물의 미래 잠재서식지가 축소될 수 있는 가능성 또한 제시되고 있다(Park et al. 2017). 따라서 식물의 미래 적지 및 분포를 보다 정확하게 예측하기 위해서는 식물의 분산능력을 고려하는 것이 중요하다(Engler et al. 2012).

기후변화에 따른 적절한 대응 및 적응 전략을 위해서는 보다 정확한 예측결과가 필요하다. 따라서 본 연구에서 식물의 분산능력을 고려한 종분포모형을 적용함으로써 종분포모형이 갖는 불확실성을 줄여보고자 하였다(Engler et al. 2012). 이를 위하여 난대성 상록활엽수를 대표하는 붉가시나무(*Quercus acuta* Thunb.)를 대상으로 한반도 내에서 기후변화에 따른 잠재서식지 예측에 있어서 분산능력을 고려하였다. 현재와 미래의 잠재서식지는 9개 종분포모형 알고리즘을 True Skill Statistic(TSS) 가중치로 합산하는 앙상블모형을 적용하여 불확실성을 줄이고자 하였다. 그리고 최종적인 잠재서식지는 현재로부터 미래의 잠재서식지로 분산가능한지의 여부를 고려하여 결정하였다. 여기에서 분산능력에 제한이 없는 경우(Unlimited)와 거리에 따른 분산 확률 함수에 3개의 계수값을 적용하여 비교해 봄으로써, 향후 기후변화 적응 및 대응 전략에서 활용될 수 있는 가능성에 대해 논의해 보고자 한다.

II. 연구의 범위 및 방법

1. 연구대상지

본 연구는 대한민국과 북한을 포함한 한반도를 대상으로 하였다. 한반도의 총면적은 220,847km²이다. 3,400개 이상의 섬들이 주로 서쪽과 남쪽에 분포하고 있으며, 약 70%가 산지로 이루어져 있다. 대부분

의 산지는 한반도의 동쪽과 북쪽에 위치하고 서쪽과 남쪽에는 평야가 분포하고 있다. 여름은 습하고 더운 반면, 겨울은 건조하고 추운 특성을 갖고 있다. 30년 동안의 1월 평균온도는 $-17.2^{\circ}\text{C}\sim 6.8^{\circ}\text{C}$ 의 범위를, 8월 평균온도는 $19.1^{\circ}\text{C}\sim 27.1^{\circ}\text{C}$ 의 범위를 갖는다(Koo et al. 2017). 동일한 위도의 서해안과 동해안을 비교해 보면 주변 해류의 영향으로 동해안이 상대적으로 고온 다습하다(National Geographic Information Institute 2016). 하지만 동해안의 협소한 공간으로 난대성 상록활엽수는 서해안과 남해안에 주로 분포하는 특성을 보인다(Park et al. 2016a).

2. 연구 대상종 및 환경 변수

1) 연구 대상종

본 연구는 난대성 상록활엽수를 대표하는 식물로 붉가시나무(*Quercus acuta* Thunb.)를 대상으로 하였다. 국내 기후변화와 관련된 생물종으로는 2010년 환경부 국립생물자원관에서 발표한 '국가 기후변화 생물지표 100종'과 2011년에 산림청 국립수목원에서 발표한 '한반도 기후변화 적응 대상 식물 300종'이 있다. 이 종들은 한반도에서 기후변화에 따라서 분포변화를 효과적으로 감시 예측할 수 있는 종 또는 기후변화에 민감하고 취약하게 반응할 수 있어 우선적으로 관찰이 필요한 종들로 구성되어 있다. 산림청 한반도 기후변화 적응 대상 식물은 특산식물, 북방계식물 그리고 남방계식물 각 100종으로 이루어져 있다. 기후변화에 따른 분산능력을 고려하기 위하여 한반도에서 적합서식지가 늘어날 것으로 판단되는 남방계식물을 연구 후보 종으로 하였다. 그 중, 모형 결과에 유의미한 결과를 낼 수 있는 조사지점($n \geq 7$, Kwon 2011) 이상의 식물 중에서 비교적 미래 분포 예측 연구가 적은 붉가시나무를 대상으로 하였다.

붉가시나무는 한국과 일본에만 자생하는 한국과 일본의 특산종으로(Ohashi et al. 2006a; Lee & Choi 2010), 한반도에서는 전라남도 해안지역과 제주도에서 주로 분포한다(Choi 2001). 한반도 내륙에서 붉가시나무의 자생북한계지는 전라남도 함평군($N 35^{\circ}04'$, $E 126^{\circ} 31'$)으로 천연기념물 제110호로 1962

년부터 보존되고 있다. 도서에서는 서해안의 인천시 덕전면의 무인도인 남도($N 37^{\circ}04'$, $E 126^{\circ}00'$)에서 붉가시나무가 발견되었고(Lee & Choi 2010), 보다 북쪽으로 대청도까지 분포하는 것으로 기록되어 있다(Lee 1996; Lee & Yim 2002). 그리고 동해안에서는 울릉도 서면에서 붉가시나무의 자생지가 확인되었다(Lee & Choi 2010). 붉가시나무는 우리나라에서 자생하는 가시나무류 중에서 공간적 구조분석이 가능할 정도로 개체군의 밀도가 유지되고 있고 다른 가시나무류에 비해 성장속도가 빠를 뿐만 아니라 내한성이 가장 우수한 것으로 알려져 있다(Choi 2001). 그러므로 난대성 상록활엽수 중에서 기후변화에 따른 잠재서식지 변화를 예측하기에 적합한 종으로 판단된다.

연구를 수행하기 위해 사용된 붉가시나무의 분포 자료는 국립수목원의 한반도 관속식물분포도(Korea National Arboretum 2004; 2005; 2006; 2007; 2008; 2009; 2010a; 2010b; 2011)와 전국자연환경조사 3차 자료(National Institute for Environmental Research 2013)를 활용하였다.

2) 환경 변수

식물의 분포를 결정하는 데 중요하다고 알려진 19개의 생물기후적 변수(Bioclimatic Variables, Bioclim)들 중에서(Araújo et al. 2005), Pearson's r correlation을 통하여 변수들 간에 상관관계가 높은($r > 0.7$) 변수들은 제외하였다. 최종적으로 식물의 서식 적합지를 설명할 수 있고 다른 변수들을 대표할 수 있는 6개의 Bioclim 변수를 사용하였다(Table 1; Koo et al. 2015; Park et al. 2016b). 6개의 변수들 중에서 Bio1, Bio2 그리고 Bio3은 기온과 관련된 변수이고 Bio12, Bio13 그리고 Bio14는 강수량과 관련된 변수이다. 국내 기상청에서는 기후정보 포털을 통해 기후변화 시나리오에 따라서 전지구 자료(격자간격: 약 135km), 한반도 자료(격자간격: 약 12.5km), 남한상세 자료(격자간격: 약 1km)를 제공하고 있다. 본 연구에서는 현재와 미래의 Bioclim 변수를 한반도 지역을 포함하며, 국내에서 제공하는 자료보다 상세한 WorldClim(<http://www.worldclim>,

Table 1. Climate variable used for Species Distribution Models of *Quercus acuta* Thunb.

Bioclimatic variable	Description
Bio 1	Annual mean temperature
Bio 2	Mean diurnal range (mean of monthly (max temp – min temp))
Bio 3	Isothermality (Bio2/Bio7) (* 100)
Bio 12	Annual precipitation
Bio 13	Precipitation of wettest month
Bio 14	Precipitation of driest month

*Bio7 indicate temperature annual range (max temperature of warmest month - min temperature of coldest month)

org/)의 30”(30 arc-seconds, 약 1km)의 가장 상세한 공간해상도를 사용하였다. WorldClim의 Bioclim 변수들은 1950년에서 2000년까지의 전세계 관측자료를 통해 생성되었다(Hijmans et al, 2005).

기후변화 시나리오는 IPCC 5차 평가보고서(IPCC 2013)에서 채택된 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP)의 4가지 시나리오 중에서 RCP 4.5와 RCP 8.5를 선택하였다. RCP 4.5는 온실가스 저감 정책이 상당히 실행되는 경우의 시나리오이고 RCP 8.5는 현재 추세로 저감 없이 온실가스가 배출되는 시나리오이다. 미래 시간적 범위는 전지구 기후모델(Global Climate Model, GCM) 중에서 영국 해들리 연구소의 HadGEM2-AO를 통해 예측된 2050년(2041에서 2060년까지의 평균)과 2070년(2061에서 2080년까지의 평균)을 사용하였다.

3. 모형 개발 및 검증

1) 중분포모형

붉가시나무의 현재와 미래의 잠재서식지를 예측하기 위해서 중분포모형을 적용하였다. 잠재서식지 예측 방법은 중첩분석, 다 기준평가(Multi-criteria Evaluation)와 퍼지이론을 통합한 방법 그리고 발견된 생물종의 개체수(종속변수)와 기온 또는 환경변수(독립변수)를 사용하는 선형회귀분석 등이 이용되기도 한다(Kim et al, 1998; Choi & Park 2004; Lee et al, 2010). 하지만 이러한 방법들은 평가방법에서의 가중치 설정과 같은 전문가의 견해가 반영되거나 결과해석의 어려움이 있었다(Kwon 2011). 중분포모형은 회귀분석을 포함하여 다양한 방법들을 포함하

면서 손쉽게 공간적으로 분석할 수 있는 장점이 있다. 최근에는 단일 중분포모형의 예측 불확실성을 줄이기 위해서 여러 모형들을 통합하는 앙상블모형을 적용하고 있다(Thuiller et al, 2009; Kwon 2014; Ahn et al, 2016). 앙상블 방법에서 사전 평가 가중치 접근 방법이 중분포모형에 주로 사용되고 있고 잠재서식지를 가장 잘 설명하였다(Marmion et al, 2009). 최근에는 가중치 접근 방식에서도 검증 신뢰도가 높은 TSS 값을 사용한 방법이 주로 이용되고 있다(Park et al, 2016b; Koo et al, 2017). 따라서 본 연구에서는 9개의 중분포모형 알고리즘(Artificial Neural Networks(ANN), Classification Tree Analysis(CTA), Flexible Discriminant Analysis(FDA), Generalized Additive Models(GAM), Generalized Boosted Models(GBM), Generalized Linear Models(GLM), Multivariate Adaptive Regression Splines(MARS), Random Forest(RF), Surface Range Envelope(SRE))을 개별적으로 실시하였다. 그 이후에 9개의 개별 결과 중에서 True Skill Statistics(TSS) 값이 0.7 이상인 신뢰할 수 있는 모형을 가중치를 주어 합산하였다(Allouche et al, 2006; Koo et al, 2017; Equation (1)). 최종 앙상블모형의 예측값 P_{TWA} 는 개별 알고리즘의 TSS값과 확률값(P)을 곱하여 합산한 값을 TSS값의 총 합산 값으로 나누어 산정하였다.

$$P_{TWA} = \frac{\sum TSS_i P_i}{\sum TSS_i} \quad (1)$$

중분포모형을 통한 붉가시나무의 잠재서식지는 확률값으로 나타나므로, 모형의 민감도(출현지역 예측률)와 특이도(비출현지역 예측률)의 합이 최대가 되

는 값을 기준으로 출현가능 여부로 구분하였다(Liu et al. 2005; Shin et al. 2015).

2) 분산능력 적용

기후변화로 변화하는 환경에서 식물이 적응하는데 식물 종자의 분산능력을 고려하는 것은 매우 중요하다(Engler et al. 2012). 본 연구에서는 식물 종자의 분산능력을 고려하기 위해서 거리에 따른 분산 확률을 적용하였다. 일 년에 종자가 분산할 수 있는 분산 확률 D 는 현재 잠재서식지로부터의 거리(d)에 따라서 감소한다(Portnoy & Willson 1993; Crossman et al. 2012; Equation (2)).

$$D_0 = e^{(\theta d)} \text{ for } \theta \in \{-0.005, -0.001, -0.005\} \quad (2)$$

분산능력의 불확실성을 고려하기 위해서 3가지 계수 값(coefficient value, θ)을 적용하였다. $\theta = -0.001$ 는 동물에 의해 분산되는 계수값으로(Vellend et al. 2003), 일년에 최대 4km까지 분산할 수 있다. 더 나아가 본 연구에서는 분산 가능성이 이보다 더 적은 $\theta = -0.005$ 계수값 그리고 분산 가능성이 이보다 더 큰 $\theta = -0.0005$ 계수값을 적용하였다(Crossman et al. 2012). $\theta = -0.005$ 는 일 년에 최대 약 1km까지 분산할 수 있고, $\theta = -0.0005$ 는 일 년에 최대 약 10km까지 분산할 수 있다고 가정하였다(Figure 1). 최종 분산 가능 여부는 종분포모형에 의해 예측된 현재의 잠재서식지로부터의 분산 확률을 R 패키지인 MigClim를 사용하여 구현하였다(Engler et al. 2012).

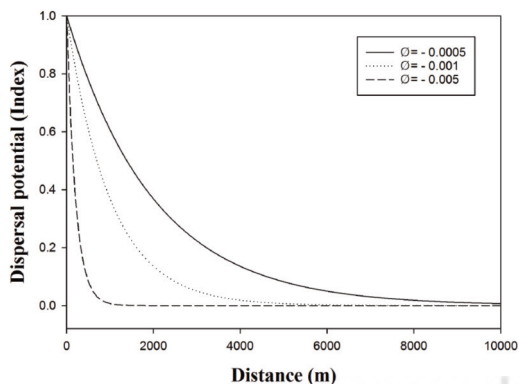


Figure 1. Distribution potential over distance from a current habitat of *Quercus acuta* Thunb.

3) 모형 검증

종분포모형의 예측 정확도는 10회 교차검증을 통하여 ROC(Receiver Operating Characteristic) 곡선의 AUC(Area Under the Curve) 값과 TSS(True Skill Statistic) 값을 측정하였다(Allouche et al. 2006; Pearson 2007). AUC 값은 종 출현-비출현 정보의 비율에 영향을 받지 않아 종분포모형을 검증하는데 많이 사용되고 있다(Lobo et al. 2008; Park et al. 2016). 하지만 종의 분포범위에 따라 영향을 받는 AUC 값의 단점을 보완하기 위해 TSS 값을 모형 검증에서 함께 사용한다(Park et al. 2016b; Koo et al. 2017). TSS 값은 AUC 값의 장점을 갖고 있는 동시에 분포의 면적과 형태에 영향을 받지 않아 검증의 신뢰도가 높은 방법이다(Allouche et al. 2006).

III. 결과 및 고찰

1. 현재 잠재서식지 예측 및 모형 검증

붉가시나무의 잠재서식지 예측을 위한 9개 종분포 모형의 예측 정확도는 Figure 2와 같다. 각 개별 종분포모형의 검증결과는 AUC 평균값이 0.83(SRE)에서 0.971(GAM)까지의 범위로 나타났고 TSS 평균값도 0.66(SRE)에서 0.884(GAM)까지의 범위로 나타났다. AUC 값과 TSS 값을 함께 고려해보면, GAM(AUC=0.971, TSS=0.884)이 가장 높은 예측 정확도를 보여주었다. 반면에 SRE(AUC=0.83, TSS=0.745)는 가장 낮은 예측력을 보여주었다. SRE와 CTA를 제외하면 모두 예측 정확도가 0.7이상의 높은 결과를 보여주었다. 붉가시나무의 잠재서식지는 각 개별 종분포모형에서 TSS값이 0.7보다 낮은 모형 결과 8개(SRE 5개, CTA 3개)를 제외하여 앙상블모형에 TSS 값 가중치를 적용하였다. 앙상블모형의 예측 정확도는 AUC 값이 0.988이고 TSS 값이 0.923으로 개별 종분포모형과 비교하면 매우 우수한 결과로 나타났다. 최종 붉가시나무의 잠재서식지는 모형의 민감도와 특이도의 합이 최대가 되는 0.212 값을 기준으로 출현가능 여부로 구분되었다(Figure 3).

본 연구를 통한 현재 붉가시나무의 잠재서식지 예

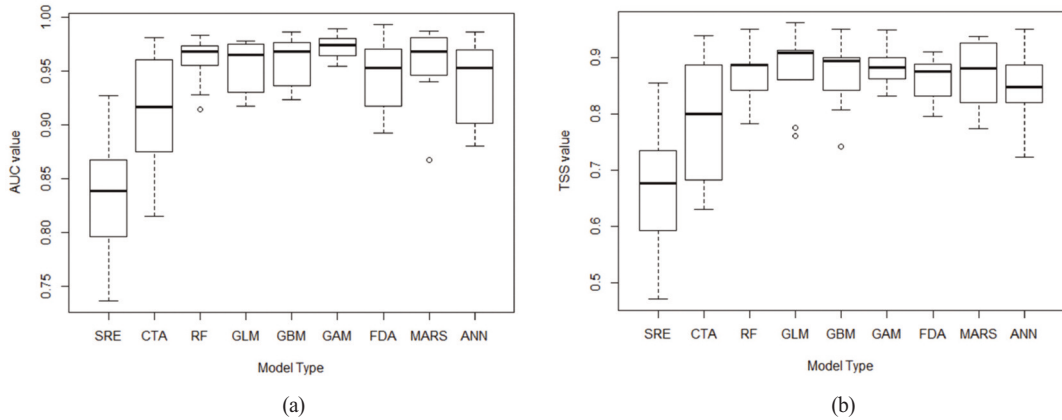


Figure 2. Box plots for assessments of nine-single Species Distribution Models (Area Under the Curve (AUC) values (a), True Skill Statistic (TSS) values (b))

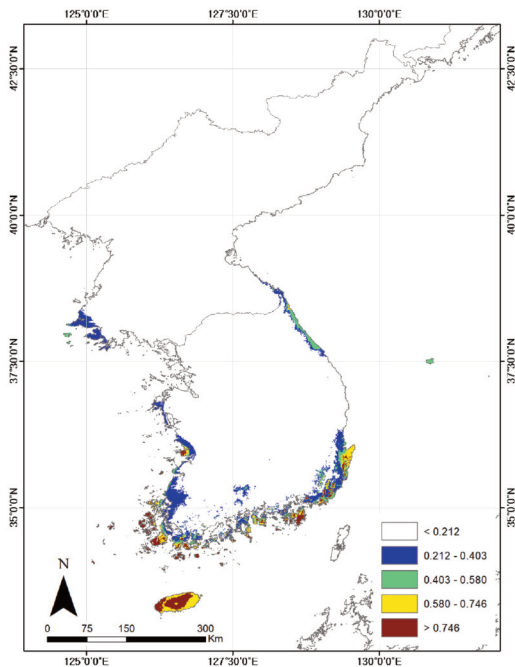


Figure 3. Potential habitat of *Quercus acuta* Thunb. in Korean Peninsula under current climate conditions.

측은 기준에 알려진 붉가시나무의 분포를 잘 설명하였다. 기준에 천연기념물로 보호되고 있던 붉가시나무의 자생복한계지인 함평군 중심을 잠재서식지로 예측하였고, 서해안에서는 대청도, 백령도 그리고 그 인접한 황해남도 일부를 잠재서식지로 예측하였다. 제주도과 남해안 지역은 매우 높은 잠재서식지로 나

타났다(>0.746). 또한, 동해안에서는 울릉도와 해안가를 중심으로 설악산 국립공원과 인접한 고성군까지 잠재서식지로 예측하였다. 이곳에서는 실제 붉가시나무의 분포가 발견되지 않았지만, 동해안은 서해안과 비교해 상대적으로 고온 다습한 조건을 갖고 있어서 잠재서식지로 예측한 것으로 보인다. 하지만 비교적 낮은 적합서식지로 예측되었다(0.212-0.58). 그리고 지리산 국립공원 일대를 잠재서식지로 예측하였는데, 이는 지리산과 인접한 백운산 인근에서 발견된 실제 붉가시나무의 분포지가 반영된 것으로 보인다. 한반도에서 붉가시나무의 현재 잠재서식지는 14,473km²의 면적으로 예측되었다.

2. 기후변화를 고려한 미래 잠재서식지 분포 변화

기후변화를 고려한 붉가시나무의 미래 잠재서식지는 TSS값 가중치 앙상블모형을 활용하여 예측하였다. 시기는 2050년과 2070년을 대상으로 RCP 4.5와 8.5 시나리오를 사용하였다. 앙상블모형의 결과는 분산가능성에 제한이 없는(Unlimited) 경우로 가정하였다. 그 결과, 붉가시나무의 미래 잠재서식지는 시기와 시나리오에 상관없이 모두 증가하는 것으로 예측되었다(Figure 4). 2050년 기준으로 현재 대비 RCP 4.5 시나리오에서는 176%(25,544km²), RCP 8.5 시나리오에서는 169%(24,483km²)로 증가하는 것으로 예측되었다(Table 2). RCP 4.5 시나리오가

RCP 8.5 보다 더 큰 면적이 잠재서식지로 나타낸 이유는 RCP 8.5 시나리오 보다 RCP 4.5 시나리오가 연평균 온도(Bio 1)의 경우는 낮지만, 연 강수량(Bio

12)이 현재보다 큰 폭으로 증가된 지역들이 나타났기 때문에 판단된다. 2080년 기준에서는 RCP 4.5 시나리오의 경우에는 2050년보다 조금 줄어든 23,600

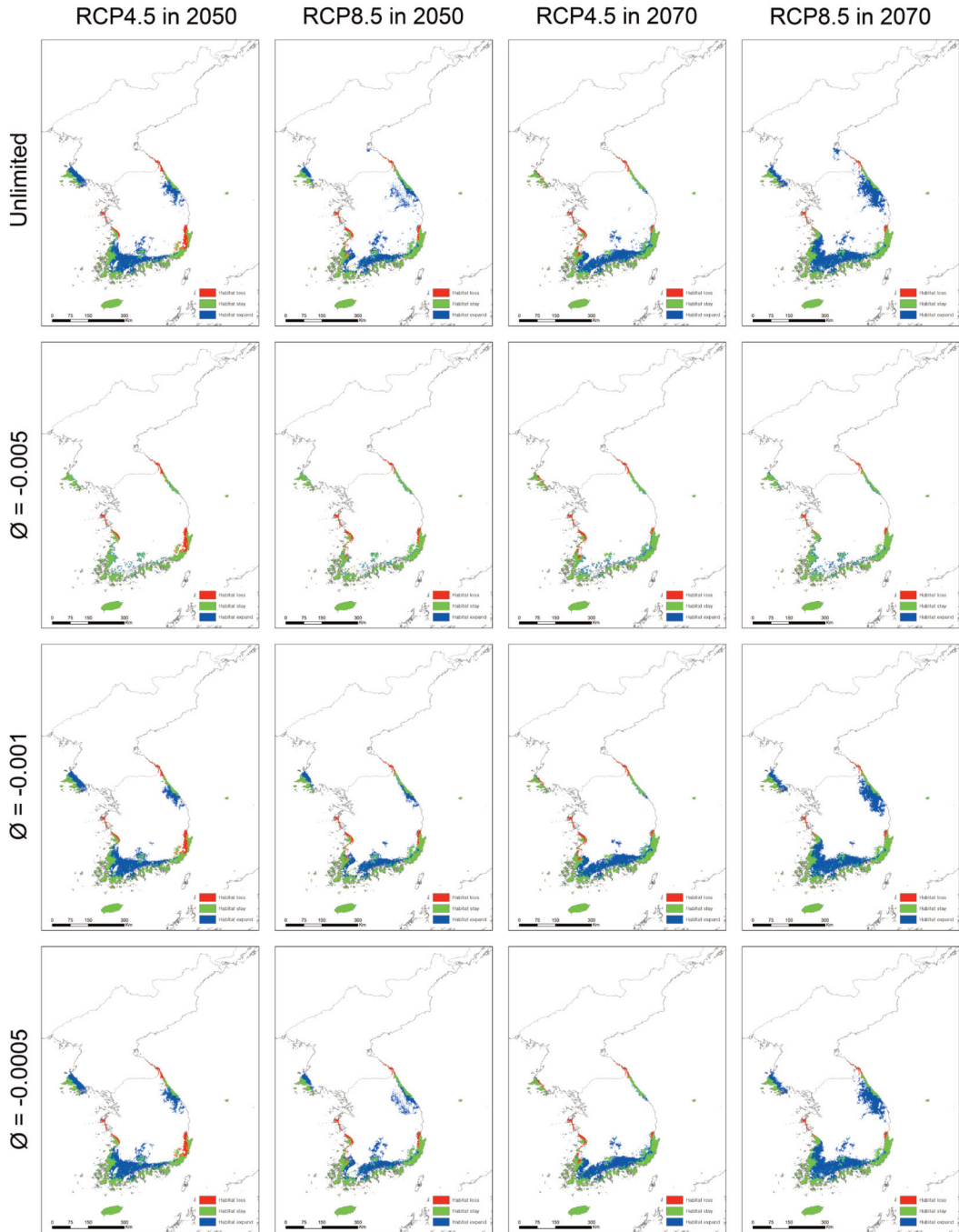


Figure 4. Potential habitat of *Quercus acuta* Thunb. considering future climate conditions and dispersal ability (The red area on the map is where the species will lose its habitat. The green area on the map is where the species will stay its habitat. The blue area on the map is where the species will expand its habitat.).

Table 2. The future potential habitat area of *Quercus acuta* Thunb. according to dispersal capacity.

dispersal ability	habitat area (km ²)	2050 year		2070 year	
		RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Unlimited	loss area	2,290	1,533	1,678	868
	expand area	13,360	11,542	10,805	19,671
	potential area	25,544	24,483	23,600	33,276
$\sigma = -0.005$	loss area	2,267	1,514	1,646	859
	expand area	1,672	1,691	2,424	2,827
	potential area	13,878	14,650	15,251	16,442
$\sigma = -0.001$	loss area	2,267	1,514	1,646	859
	expand area	12,679	9,261	10,492	18,110
	potential area	24,885	22,220	23,320	31,724
$\sigma = -0.0005$	loss area	2,267	1,514	1,646	859
	expand area	13,360	11,221	10,776	19,252
	potential area	25,566	24,180	23,604	32,867

km²로 잠재서식지가 예측되었으나 RCP 8.5 시나리오의 경우에는 2050년 보다 늘어난 33,276km²을 잠재서식지로 예측하였다. 시기와 시나리오에 상관없이 지리산 이남의 전라남도 화순에서 경상남도 진주 지역까지 남부 내륙지역으로 잠재서식지가 확장되었다. 2070년 기준 RCP 8.5 시나리오의 경우 동쪽에서는 설악산 국립공원과 태백산 도립공원의 내륙지역 그리고 서쪽에서는 황해남도 과일군 내륙지역까지 확장되는 것으로 예측되었다. 서해안의 충청남도 태안군과 안면도, 동해안의 강원도 고성군 해안지역 그리고 포항시 내륙 일부 지역들은 현재는 잠재서식지로 예측되었다가 미래에서는 적합하지 않은 지역으로 변화하였다. 붉가시나무의 잠재서식지가 한반도에서 미래에 확장되어 북상하는 원인으로는 기후변화로 인한 연평균기온의 상승, 평균일교차 감소와 연 강수량의 증가에 따른 것으로 해석된다. 그럼에도 불구하고 한반도내에서 붉가시나무의 서식지가 미래에 적합하지 않게 변화된 지역은 가장 건조한 달의 강수량 감소에 따른 것으로 판단된다.

3. 분산능력을 고려한 미래 잠재서식지 예측

분산능력을 고려한 붉가시나무의 미래 잠재서식지는 앙상블모형에 사용된 동일한 시기와 시나리오를 대상으로 하였다. 붉가시나무의 미래 분산 능력을 고려하기 위해서 3개의 분산 가능성(Figure 1)을 가정

하고 앙상블모형에서 예측된 현재와 미래의 잠재서식지 자료를 활용하여 분산 능력을 모의하였다 (Figure 4). 붉가시나무의 미래 잠재서식지는 분산 가능성에 따라 다르게 예측 되었다. 계수값이 -0.005 일 때에 2050년도 RCP4.5 시나리오에서는 잠재서식지가 확장되는 면적 보다 소실되는 면적이 더 크게 예측 되었다(Table 2, Figure 5). 동일한 시기의 RCP4.5 시나리오에서 전체 붉가시나무 잠재서식지는 현재 대비 4% 감소되는 것으로 예측되었다. 하지만 미래로 갈수록 현재 잠재서식지의 대부분이 유지되면서 서식지가 확장되어 분산 가능성이 비교적 낮음에도 불구하고 한반도 내에서 전체 잠재서식지는 늘어나는 경향을 보였다. 계수값이 -0.001일 때에는

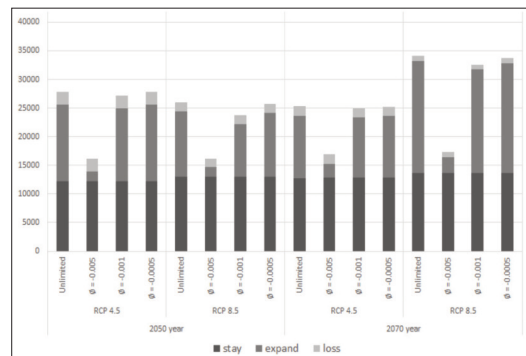


Figure 5. The results of estimated potential habitat area considering future climate conditions and dispersal ability.

분산능력에 제한이 없는 경우(Unlimited)와 비교해 예측되는 잠재서식지에 차이가 나타났지만, 계수값이 -0.0005 일 경우에는 그 차이가 미미하였다(Table 2, Figure 5). 분산가능성을 일 년에 최대 약 10km 이상으로 가정하면 제한이 없는 경우와 차이가 나타나지 않을 것으로 판단된다. 앙상블모형에 의해 강원도 동해안 일부 지역이 현재 붉가시나무의 잠재서식지로 예측되어 그 지역을 중심으로 확장되는 경향이 나타났다. 이는 현재 붉가시나무가 그 지역에 존재하지는 않지만 울릉도 서면에서 자생지가 확인된(Lee & Choi 2010) 만큼 예측된 현재의 적합서식지를 기준으로 할 경우 적절한 분산이 이뤄진다면, 북상할 것으로 예측되었다. 전체적으로 서식지 손실 지역은 2050년도 보다 2070년도가 적게 나타났다. 2050년도에는 붉가시나무에게 적합하지 않았던 지역이 2070년도에는 적합한 서식지로 변하는 것으로, 현재의 적합서식지가 가까운 미래에는 적합하지 않은 서식지로 변했다가 먼 미래에는 다시 적합한 서식지로 변하는 지역들이 존재하였다.

4. 종분포모형의 불확실성 저감을 위한 식물의 분산 능력 고려

종분포모형 뿐만 아니라 기타 모형을 통해 예측된 결과들은 불확실성을 갖고 있다. 기후변화에 따른 적응방안 마련과 대책 등의 정책에 모형 예측 결과들이 활용되기 위해서는 이러한 불확실성을 줄이기 위한 노력들이 필요하다. 종분포모형을 통해 생물 종 미래 잠재서식지 예측 과정은 크게 3가지(미래 기후 상태, 모형 방법(algorithm), 매개변수(parameter))의 불확실성을 내포하고 있다(Koo et al. 2017). 본 연구에서는 미래 기후의 불확실성을 줄이기 위하여 IPCC에서 채택된 2가지 RCP 시나리오(RCP 4.5, 8.5)를 사용하였다. 개별 모형 방법에서 오는 불확실성을 줄이기 위하여, 9개의 방법을 TSS 검증을 통해 검증값이 높은(≥ 0.7) 결과들을 합산하여 최종 앙상블모형에 적용하였다. 매개변수에서 오는 불확실성은 종의 부족한 조사지점, 종 발생에 영향을 주는 아직 알려지지 않은 중요한 원인들 그리고 고려되지 못하는 다양한 생물학적 상호작용(경쟁관계, 천이단계, 순응·

적응능력, 분산능력) 등 다양한 측면에서 발생할 수 있다(Barry & Elith, 2006; Wenger et al. 2013). 이러한 고려되어야 하는 다양한 부분 중에서, 본 연구는 분산능력을 고려하여 모형의 불확실성을 줄이고자 하였다. 식물은 씨앗(seeds), 산포체(diaspores), 번식체(propagules)와 같이 번식 할 수 있는 것을 새로운 장소에 정착시키는 것으로 분산이 이뤄진다. 여기에서 씨앗은 식물 스스로 주어진 형태(겉씨식물, 속씨식물), 그 외부적 상황(바람, 강, 사람 또는 동물 등)에 분산이 이뤄질 수 있고 낮은 확률(태풍과 같은 극한 현상 등)로 아주 긴 거리를 분산할 수 있다(Vittoz & Engler, 2007). 붉가시나무 씨앗은 참나무속 열매의 일반적 형태로, 도토리(타원형의 견과)의 형태이다. 도토리는 설치류와 같은 야생동물의 먹이로 주로 이용된다. 따라서 본 연구에서는 붉가시나무의 씨앗이 주로 동물에 의해 분산(일 년에 최대 약 4km, Vellend et al. 2003)될 것으로 판단되어 모형을 적용하였다. 또한, 불확실성을 줄이기 위해서 일 년에 최대 약 1km와 10km까지의 분산가능성도 고려하였다.

IV. 결론

기존 기후변화에 따른 생물 종 잠재서식지 예측에서는 종분포모형을 이용하여 변화하는 기후환경만을 고려한 연구들이 주를 이루고 있다. 기후변화에 따른 적절한 적응방안과 대책 마련에서 모형 예측 결과들의 활용성을 높이기 위해서는 보다 정확한 예측 결과가 필요한 상황이다. 따라서 본 연구는 식물의 분산능력을 고려하여 종분포모형 결과의 불확실성을 줄여보고자 하였다. 미래의 변화하는 환경이 식물에게 “적합한 서식지로 나타나는 경우”와 그 적합한 서식지로 “이동하여 서식하는 경우”를 구분해 보고자 하였다. 앙상블모형과 분산모형을 활용하여 한반도에서 기후변화에 따른 붉가시나무의 잠재서식지를 예측하였다. 현재 붉가시나무의 잠재서식지는 제주도 와 남해안 해안가 지역, 서해안의 대청도와 백령도 그리고 동해안의 울릉도와 강원도의 고성군 지역으로 나타났다. 미래 잠재서식지 예측은 2050년과

2070년을 대상으로, 시나리오는 RCP4.5와 RCP8.5를 대상으로 하였다. 기후변화에 따라서 남해안 지역, 황해남도 서해안 지역 그리고 강원도의 동해안 지역에서 각각 내륙으로 점차 확장되는 양상을 보였다. 하지만 분산능력을 고려하면 붉가시나무의 잠재서식지 확장에 한계가 나타났다. 기후환경변화만을 고려한 결과와 분산능력을 함께 고려한 결과의 차이가 발생하였다. 식물의 분산능력이 미래의 잠재서식지 예측에 중요한 영향을 미칠 것으로 판단된다. 본 연구의 한계 또한 존재한다. 잠재서식지 예측을 위해서는 각 종이 선호하는 물리적 환경요소 외에도 종간 경쟁 관계를 포함한 생태적 지위(ecological niche) 그리고 인간으로 인한 서식지 파편화와 훼손 등의 여러 요소를 고려해야한다. 하지만 현재 생태계에 미치는 기후변화의 영향이 매우 심각할 것으로 예측되는 상황에서, 기후변화에 따른 적응 및 대응 계획 수립이 시급한 상황이다. 이러한 모형을 활용한 예측은, 불확실성은 존재하지만, 한정된 시간과 제한된 예산에서 생태계를 좀 더 잘 파악할 수 있는 안내자로서 적절한 기후변화 적응전략 수립에 도움이 될 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 환경부와 한국환경산업기술원 “2014001310009(기후변화대응 환경기술개발사업)”의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Ahn Y, Lee DK, Kim HG, Park C, Kim J, Kim J. 2015. Estimating Korean Pine(*Pinus koraiensis*) Habitat Distribution Considering Climate Change Uncertainty -Using Species Distribution Models and RCP Scenarios-. J. Korean Env. Res. Tech. 18(3): 51-64. [Korea Literature]
- Ahn JB, Choi YW, Jo S, Hong JY. 2014. Projection of 21st Century Climate over Korean Peninsula: Temperature and Precipitation Simulated by WRFV3. 4 Based on RCP4. 5 and 8.5 Scenarios. J. Korean Meteor. Soc. Atmos. 24(4): 541-554. [Korea Literature]
- Allouche O, Tsoar A, Kadmon R. 2006. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). Journal of applied ecology 43(6): 1223-1232.
- Araújo MB & Guisan A. 2006. Five (or so) challenges for species distribution modelling. Journal of biogeography. 33(10): 1677-1688.
- Araújo MB, Whittaker RJ, Ladle RJ, Erhard M. 2005. Reducing uncertainty in projections of extinction risk from climate change. Global ecology and Biogeography. 14(6): 529-538.
- Araújo MB, Thuiller W, Pearson RG. 2006. Climate warming and the decline of amphibians and reptiles in Europe. Journal of Biogeography. 33: 1712-1728
- Araujo MB, Pearson RG, Thuiller W, Erhard M. 2005. Validation of species-climate impact models under climate change. Global Change Biol. 11:1504-1513.
- Barry S & Elith J. 2006. Error and uncertainty in habitat models. Journal of Applied Ecology. 43(3): 413-423.
- Choi TB. 2001. Genetic Structure and Diversity of Three Oak Species (*Quercus*, subgen. *Cyclobalanopsis*) in Korea and Conservation Strategy for *Q. acuta* Thunb. ex Murray. Ph. D. Dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea 23pp. 139pp. [Korea Literature]
- Choi TY and Park CH. 2004. Korean Groat

- Potential Habitat Suitability Model at Soraksan National Park Using Fuzzy Set and Multi-Criteria Evaluation. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture*. 32(4): 28-38. [Korea Literature]
- Crossman ND, Bryan BA, Summers DM. 2012. Identifying priority areas for reducing species vulnerability to climate change. *Diversity and Distributions*. 18(1): 60-72.
- Engler R, Randin CF, Thuiller W, Dullinger S, Zimmermann NE, Araujo MB, Guisan A. 2011. 21st century climate change threatens mountain flora unequally across Europe. *Global Change Biology*. 17(7): 2330-2341.
- Engler R, Hordijk W, Guisan A. 2012. The MIGCLIM R package — seamless integration of dispersal constraints into projections of species distribution models. *Ecography*. 35(10): 872-878.
- Franklin J. 2010. Mapping species distributions: spatial inference and prediction. Cambridge University Press.
- Grinnell J. 1904. The origin and distribution of the chest-nut-backed chickadee. *The Auk*. 21(3): 364-382.
- Heikkinen RK, Luoto M, Araujo MB, Virkkala R, Thuiller W, Sykes MT. 2006. Methods and uncertainties in bioclimatic envelope modelling under climate change. *Progress in Physical Geography*. 30: 751-777.
- Hijmans RJ, Cameron SE, Parra JL, Jones PG, Jarvis A. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25: 1965-1978.
- IPCC. 2001. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability: Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, UK.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 987 pp.
- IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Jaeschke A, Bittner T, Reineking B, Beierkuhnlein C. 2013. Can they keep up with climate change?-Integrating specific dispersal abilities of protected Odonata in species distribution modelling. *Insect Conservation and Diversity*. 6(1): 93-103.
- Kang JH, Suh MS, Kwak CH, Lee YS. 2009. Classification of land cover over the Korean Peninsula using MODIS data. *Atmosphere*. 19(2): 169-182. [Korea Literature]
- Kim WJ, Park CH, Kim WM. 1998. Development of Habitat Suitability Analysis Models for Wild Boar (*Sus Scrofa*): A Case Study of Mt. Sulak and Mt. Jumbong. *Korea Spatial Information Society*. 6(3): 247-256. [Korea Literature]
- Kim YK, Lee WK, Kim YH, Oh SH, Heo JH. 2012. Changes in Potential Distribution of

- Pinus rigida* Caused by Climate Changes in Korea. Journal of Korean Forestry Society. 101(3): 509-516. [Korea Literature]
- Koo KA, Park SU, Kong WS, Hong S, Jang I, Seo C. 2017. Potential climate change effects on tree distributions in the Korean Peninsula: Understanding model & climate uncertainties. Ecological Modelling 353: 17-27.
- Koo KA, Kong WS, Nibbelink NP, Hopkinson CS, Lee JH. 2015. Potential effects of climate change on the distribution of cold-tolerant evergreen broadleaved woody plants in the Korean peninsula. PloS one. 10(8): e0134043.
- Korea National Arboretum. 2004. Distribution maps of vascular plants of Korean peninsula I. South coast province. Korea National Arboretum, Pocheon. [Korea Literature]
- Korea National Arboretum. 2005. Distribution maps of vascular plants of Korean peninsula II. South province (Jeollado & Jirisan). Korea National Arboretum, Pocheon. [Korea Literature]
- Korea National Arboretum. 2006. Distribution maps of vascular plants of Korean peninsula III. Central & South province (Chungcheong-do). Korea National Arboretum, Pocheon. [Korea Literature]
- Korea National Arboretum. 2007. Distribution maps of vascular plants of Korean peninsula IV. Central & south province (Gyeongsangbuk-do). Korea National Arboretum, Pocheon. [Korea Literature]
- Korea National Arboretum. 2008. Distribution maps of vascular plants of Korean peninsula V. Central province (Geonggi-do). Korea National Arboretum, Pocheon. [Korea Literature]
- Korea National Arboretum. 2009. Distribution maps of vascular plants of Korean peninsula VI. Central province (Gangwon-do). Korea National Arboretum, Pocheon. [Korea Literature]
- Korea National Arboretum. 2010a. Distribution maps of vascular plants of Korean peninsula VII. South province (Gyeongsangnam-do) and Ulleung-do province. Korea National Arboretum, Pocheon. [Korea Literature]
- Korea National Arboretum. 2010b. Distribution maps of vascular plants of Korean peninsula VIII. Jeju-do province. Korea National Arboretum, Pocheon. [Korea Literature]
- Korea National Arboretum. 2011. Distribution maps of vascular plants of Korean peninsula IX. West & South coast province. Korea National Arboretum, Pocheon. [Korea Literature]
- Kwon HS. 2011. Integrated Evaluation Model of Biodiversity for Conservation Planning: Focused on Mt. Jiri, Mt. Deokyu and Mt. Gaya regions. Ph.D dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea. 18p [Korea Literature]
- Kwon HS. 2014. Applying Ensemble Model for Identifying Uncertainty in the Species Distribution Models. Journal of the Korean Society for Geospatial Information System 22(4): 47-52. [Korea Literature]
- Kwon HS, Seo CW, Park CH. 2012. Development of Species Distribution Models and Evaluation of Species Richness in Jirisan region. The Korean

- Society for GeoSpatial Information System. 20(3): 11-18. [Korea Literature]
- Kwon HS. 2014. Applying Ensemble Model for Identifying uncertainty in the Species Distribution Models. Journal of the Korean Society for Geospatial Information System. 22(4): 47-52. [Korea Literature]
- Lee SG, Jung SG, Park KH, Kim KT, Lee WS. 2010. A Prediction Model and Mapping for Forest-Dwelling Birds Habitat Using GIS. The Korean Association of Geographic information Studies. 13(1): 62-73. [Korea Literature]
- Lee JH, Choi BH. 2010. Distribution and northernmost limit on the Korean Peninsula of three evergreen trees. Korean Journal of Plant Taxonomy 40(4): 267-273. [Korea Literature]
- Lee WC. 1996. Standard Illustrations of Korean Plants. Academy Publishing Co., Seoul. 624pp. [Korea Literature]
- Lee WC, Yim YJ. 2002. Plant Geography. Kangwon National University Press, Chuncheon. 412pp. [Korea Literature]
- Liu C, Berry P, Dawson T, Pearson R. 2005. Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distributions. Ecography 28: 385-393.
- Marmion M, Parviainen M, Luoto M, Heikkinen RK, Thuiller W. 2009. Evaluation of consensus methods in predictive species distribution modelling. Divers Distrib. 15(1): 59-69.
- Midgley GF, Hughes GO, Thuiller W, Rebelo AG. 2006. Migration rate limitations on climate change-induced range shifts in Cape Proteaceae. Diversity and Distributions. 12: 555-562
- Miller JR, Turner MG, Smithwick EAH, Dent CL, Stanley EH. 2004. Spatial Extrapolation: The Science of Predicting Ecological Patterns and Processes. BioScience. 54(4): 310-320.
- Nakao K, Matsui T, Horikawa M, Tsuyama I, Tanaka N. 2011. Assessing the impact of land use and climate change on the evergreen broad-leaved species of quercus acuta in japan. Plant Ecology, 212(2): 229-243.
- National Geographic Information Institute. 2016. The national atlas of Korea 2st Edition. Physical Geography, Suwon. 107pp. [Korea Literature]
- National Institute for Environmental Research. 2013. The second and third national ecosystem survey: 1997-2012. National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea. [Korea Literature]
- Ohashi H, Ojashi K, Takahashi H. 2006. Identity of Quercus acuta Thunb. (Fagaceae) recorded from Taiwan and China. J. Jpn. Bot. 81: 173-187 (in Japanese).
- Park SU, Koo KA, Kong W-S. 2016a. Potential Impact of Climate Change on Distribution of Warm Temperate Evergreen Broad-leaved Trees in the Korean Peninsula. Journal of the Korean Geographical Society 51(2): 1-17. [Korea Literature]
- Park SU, Koo KA, Seo C, Kong W-S. 2016b. Potential Impact of Climate Change on Distribution of Hedera rhombea in the Korean Peninsula. Journal of Climate Change Research 7(3): 325-334 [Korea Literature]
- Park SU, Koo KA, Seo C, Hong S. 2017. Climate-related range shifts of Ardisia

- japonica in the Korean Peninsula: a role of dispersal capacity. *Journal of Ecology and Environment*, 41:38 [Korea Literature]
- Pearson RG. 2007. Species' distribution modeling for conservation educators and practitioners. *Synthesis*. American Museum of Natural History, 50.
- Peters DPC, Herrick JE, Urban DL, Gardner RH, Breshears DD. 2004. Strategies for ecological extrapolation. *Oikos*. 106(3): 627-636.
- Pompe S, Hanspach J, Badeck F, Klotz S, Thuiller W, Kuhn I. 2008. Climate and land use change impacts on plant distributions in Germany. *Biology Letters*. 4(5): 564-567.
- Portnoy S, Willson MF. 1993. Seed dispersal curves: behavior of the tail of the distribution. *Evolutionary Ecology* 7(1): 25-44.
- Schimper AFW. 1903. *Plant-Geography upon a physiological basis*. Transl. WR Fisher. Oxford, Clarendon Press.
- Seo CW, Choi TY, Choi YS, Kim DY. 2008. A Study on Wildlife Habitat Suitability Modeling for Goral (*Nemorhaedus caudatus raddeanus*) in Seoraksan National Park, The Korea Society For Environmental Restoration And Revegetation Technology. 11(3): 28-38. [Korea Literature]
- Shin MS, Jang RI, Seo CW, Lee MW. 2015. A Comparative Study on Species Richness and Land Suitability Assessment ; Focused on city in Boryeong. *J. Environ. Impact Assess.* 24(1): 35-50. [Korea Literature]
- Song W, Kim E. 2012. A Comparison of Machine Learning Species Distribution Methods for Habitat Analysis of the Korea Water Deer (*Hydropotes inermis argyropus*). *Korean Journal of Remote Sensing*. 28(1): 171-180. [Korea Literature]
- Thorn JS, Nijman V, Smith D, Nekaris KAI. 2009. Ecological niche modelling as a technique for assessing threats and setting conservation priorities for Asian slow lorises (Primates: Nycticebus). *Diversity and Distributions*. 15(2): 289-298.
- Thuiller W, Albert C, Araujo MB, Berry PM, Cabeza M, Guisan A, Hickler T, Midgley GF, Paterson J, Schurr FM, Sykes MT, Zimmermann NE, Predicting global change impacts on plant species' distributions: future challenges. *Perspectives in plant ecology, evolution and systematics*. 9(3-4): 137-152.
- Thuiller W, Lafourcade B, Engler R, Araujo MB. 2009. Biomod-a platform for ensemble forecasting of species distributions. *Ecography* 32(3): 369-373.
- Thuiller W. 2003. BIOMOD-optimizing predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change. *Global change biology*. 9(10): 1353-1362.
- Vellend M, Myers JA, Gardescu S, Marks PL. 2003. Dispersal of *Trillium* seeds by deer: implications for long-distance migration of forest herbs. *Ecology*. 84(4): 1067-1072.
- Vittoz P. & Engler R. 2007. Seed dispersal distances: a typology based on dispersal modes and plant traits. *Botanica Helvetica*. 117(2): 109-124.
- Wenger SJ, Som NA, Dauwalter DC, Isaak DJ, Neville HM, Luce CH, Rieman BE. 2013. Probabilistic accounting of uncertainty in forecasts of species distributions under

- climate change. *Global Change Biology*. 19(11): 3343-3354.
- Yates CJ, McNeill A, Elith J, Midgley GF. 2010. Assessing the impacts of climate change and land transformation on *Banksia* in the South West Australian Floristic Region. *Diversity and Distributions*. 16(1): 187-201.
- Yun JH, Katsuhiko N, Park CH, Lee BY, Oh KH. 2011. Change prediction for potential habitats of warm-temperate evergreen broadleaved trees in Korea by climate change. *Korean Journal of Environment and Ecology*. 25(4): 590-600. [Korea Literature]