

Research Paper

구상나무와 분비나무 분포지의 환경 특성 및 기후변화 민감성 평가

박현철* · 이정환** · 이관규*** · 엄기증****

강원대학교 대학원 조경학과*, 강원대학교 환경연구소**
강원대학교 조경학과***, 한국기후변화대응연구센터****

Environmental features of the distribution areas and climate sensitivity assesment of Korean Fir and Khinghan Fir

Hyun-Chul Park* · Jung-Hwan Lee** · Gwan-Gyu Lee*** · Gi-Jeung Um****

Department of Landscape Architecture, Graduate School, Kangwon National University*

Institute of Environmental at Kangwon National University**

Department of Landscape Architecture, Kangwon National University***

Climate Change Research Institute of Korea****

요약 : 본 연구는 대표적인 아고산식물인 동일속 식물 구상나무와 분비나무의 기후변화 민감성 평가에 목적이 있다. 이를 위해 중 분포 모형을 이용하여 현재 및 미래의 중 분포 확률을 예측하였고 기후변화 민감성 평가를 하였다. MTSS를 기준으로 예측된 잠재 분포지는 분비나무가 구상나무보다 감소율이 많았으며, 스칼라 민감도를 이용한 평가에서는 구상나무의 민감도가 분비나무보다 높았다. 본 연구와 같은 중 분포 모형을 이용한 연구에서는 위치자료 및 환경변수에 따라 중 분포 확률이 달라질 수 있으므로 연구 대상 종의 생태 환경에 대한 면밀한 조사가 선결되어야 하며, 본 연구를 기초로 하여 국내에 적용 가능한 기후변화민감성 평가 방법이 개발된다면 기후변화와 생물 다양성 적응 정책의 중요한 의사결정 수단이 될 것으로 기대한다.

주요어 : 적색목록, 한국 특산종, 중 분포 모형, Maxent, 기후변화생물지표

Abstract : The object of this study was the climate change sensitivity assessment of Korean Fir and Khinghan Fir as a representative subalpine plant in South Korea. Using species distribution models, we predicted the probability of current and future species distribution. According to this study, potential distribution that have been predicted based on the threshold (MTSS) is, Khinghan Fir was higher loss rate than Korean Fir. And in the climate change sensitivity assessment using the scalar sensitivity weight (W_s), W_s of Korean Fir was higher relatively than the sensitivity of Khinghan Fir. When using the species distribution models as shown in this study may vary depending on the probability of presence data and spatial variables. Therefore should be prior decision studies on the

ecological environment of the study species. Based on this study, if it is domestic applicable climate change sensitivity assessment method is developed. it would be important decision-making to climate change and biological diversity of adaptation policy.

Keywords : IUCN red list, Korea endemic plant, Species Distribution Models, Maxent, Climate-sensitive Biological Indicator Species

I. 서론

구상나무(*Abies koreana* E.H.Wilson)와 분비나무(*Abies nephrolepis* (Trautv. ex Maxim.) Maxim.)는 한국의 아고산 지대에 분포하는 전나무속 식물이다. 전 세계적으로 전나무속 식물은 약 52종이 있으며, 한국에는 전나무(*Abies holophylla* Maxim.), 구상나무, 분비나무 3종이 분포한다(Xiang *et al.*, 2007; Kormuřák *et al.*, 2008). 구상나무와 분비나무는 형태적으로 매우 유사하여 동일종으로 분류되었으나 1920년 미국의 식물분류학자 Wilson에 의해 포침 방향이 분비나무와 다른 점이 발견되어 구상나무를 신종 및 한국 고유종으로 분류되었다(Wilson, 1920). 최근 구상나무는 기후변화의 영향으로 개체군이 축소되어 IUCN 멸종위기종(Endangered)으로 등재되었고 한국에서는 기후변화생물지표로 지정되었다(Lee *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2011). 한국 고유종인 구상나무의 분포지역은 덕유산, 지리산, 가야산, 한라산이며 덕유산이 북방한계선으로 알려져 있다(공우석, 2006). 분비나무는 세계적으로 한반도 중부 이북(소백산, 오대산, 설악산 등과 북한), 만주, 시베리아에 분포하며 IUCN 약관심종(Least Concern)으로 등재되어 있다(Song, 1991; Zhang *et al.*, 2013). 또한 기후변화에 취약성이 예상되어 기후변화생물지표로 지정되었다(Lee *et al.*, 2010).

구상나무와 분비나무는 남한에 분포하는 대표적인 아고산 침엽수로 기후변화에 의한 취약성이 예상되는 동일 속(genus) 식물이다(Lee *et al.*, 2010; 공우석 등, 2014). 아고산대는 기온이 낮고 식물의 생육 일수가 짧으며, 바람이 강하고, 적설량이 불규칙하여 여러 기후요소의 연교차가 심하다. 또한 토질이 척박하고 빙하 주변 지역처럼 토양의 결해빙이 반복되는 주빙하성(periglacial) 지형간섭으로 식물이 살아

가기에 지극히 불리한 환경이다. 이러한 환경에서 적응된 고산식물은 기온이 높아지면서 온대성 식물들과의 경쟁에서 밀려 사라질 위기를 맞고 있다(공우석, 1998; 1999; 2002). 특히 구상나무는 지구 온난화에 의한 겨울철 고온, 수분 스트레스 등으로 고사와 생육 쇠퇴 현상이 관찰되고 있다(구경아 등, 2001; 임종환 등, 2006; Woo *et al.*, 2008).

기후변화와 생물다양성 보전에 관련한 연구는 생물학 및 보전생물학의 중요한 과제이다(Rathcke and Lacey, 1985; Woodward and Beerling, 1997; Walther *et al.*, 2002; Parmesan, 2006; Bertin, 2008). 기후변화에 의한 생물다양성 보전을 위해서는 지표생물의 선정 및 민감성 평가가 필수적이지만, 지표생물의 민감성 평가에 대한 국내 연구는 미진한 편이다(유가영과 김인애, 2008). 따라서 본 연구는 대표적 아고산식물이며 국가기후변화생물지표로 선정된 구상나무와 분비나무의 위치자료를 수집하여 1) 두 종간 환경, 지리적 분포 비교, 2) 기후변화 시나리오에 의한 분포지 예측 3) 기후변화 민감성 평가를 실시하여 아고산식물의 서식지내(*In-situ*) 보전을 위한 의사결정 방법 및 기후변화 적응 정책을 위한 기초자료 제공을 위해 시행되었다.

II. 연구 방법

1. 위치자료 수집

본 연구에서는 현지 조사와 기존 조사에 의해 위치자료를 수집하였다. 현지 조사는 2007년부터 2014년까지 남한에서 수집하였고 위치자료 수집은 구상나무와 분비나무 분포지에서 GPS(Global Positioning System)좌표를 기록하였다(Figure 1).

기존 조사는 제3차 전국자연환경조사(<http://>

library.me.go.kr)와 백두대간 보호지역 생태계조사(국립환경과학원, 2007a; 2007b; 2008; 2009; 2010)를 사용하였다. 전국자연환경조사와 백두대간 보호지역 생태계조사의 위치자료 수집은 각 조사 자료의 식생 부분에서 구상나무와 분비나무가 기록된 식생조사표의 좌표를 이용하였다.

2. 종 분포 모형

기후변화에 의한 민감성을 평가하기 위해서는 현재 기후 및 미래 기후에서 공간적 종 분포 확률을 예측해야 한다. 본 연구에서는 공간적 분포 확률을 예측하기 위해 종 분포 모형(SDMs: Species Distribution Models)을 사용하였다. 종 분포 모형은 생물이 분포하는 위치와 환경, 지리적 요소의 관계를 평가할 수 있고(Franklin, 2010), 생물지리학, 보전생물학, 생태학 등의 분야에서 다양한 목적으로 이용되고 있다(Elith and Leathwick, 2009). 최근에는 기후변화에 의한 생물다양성 변화 예측에 활용하는 빈도가 높아지고 있다(Hof *et al.*, 2012). 종 분포 모형은 알고

리즘에 따라 다양한 모형이 있다(Austin, 2007; Elith and Leathwick, 2009; Elith *et al.*, 2011). 본 연구에서 사용한 종 분포 모형은 MaxEnt(ver. 3.3.3k, Phillips and Dudik, 2008)이며, MaxEnt는 2006년 이후 생물다양성 관련 연구에 1,000건 이상 사용된 소프트웨어이다(Merow *et al.*, 2013). MaxEnt 개발 전에 주로 사용된 Generalized Linear Model, Generalized Additive Model, Artificial Neural Network 등은 종의 출현/비출현(presence-absence)자료가 필요하지만, MaxEnt는 종 출현자료(presence-only data)만으로 종 분포 확률을 예측할 수 있으며, 결과에 대한 해석이 용이하다(Phillips and Dudik, 2008; Elith *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2013; Merow *et al.*, 2013).

본 조사에서 수집한 구상나무와 분비나무의 위치자료는 종 분포 모형의 설명변수로 사용하였고, 표본 편향(sampling bias)에 의한 위치자료의 공간적 자기상관(spatially autocorrelated occurrence points)을 방지하기 위해 1km 이내 중복되는 위치자료를 제거하였다(Segurado *et al.*, 2006; Betts *et al.*, 2006;

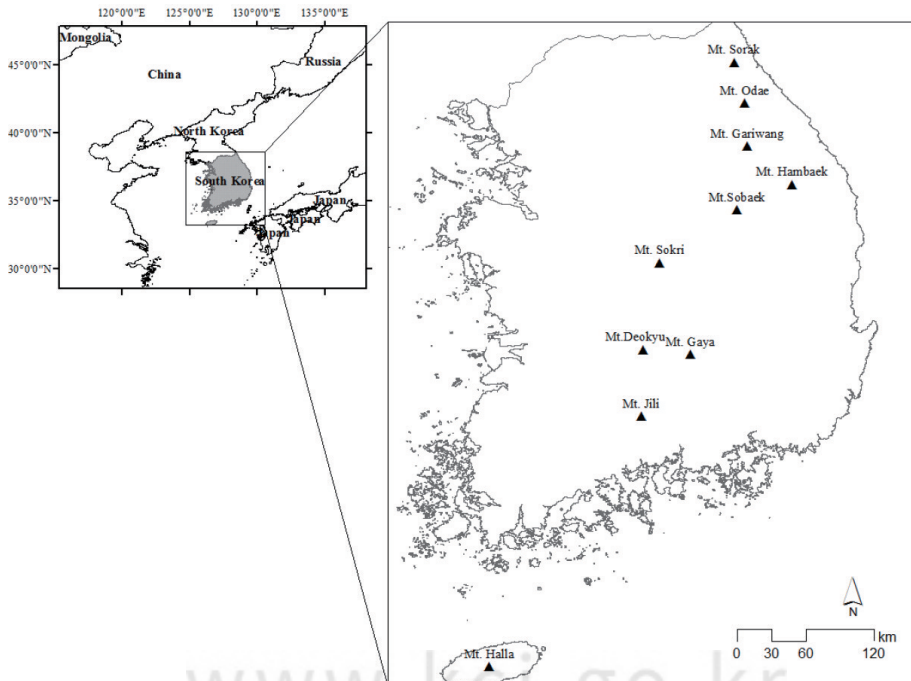


Figure 1. Location of the study region(in gray) and distribution mountain of *A. coreana* and *A. nephrolepis* in South Korea

Table 1. Pearson's correlation *r* matrix of bioclim. All correlations were significant ($p < 0.05$). Bold: strongly correlating ($|r| > 0.75$) layers

bioclim	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	-0.39	-0.07	-0.55	0.86	0.90	-0.52	0.92	0.90	0.91	0.95	-0.30	-0.55	-0.13	-0.41	-0.51	0.01	-0.52	0.02
2		0.77	0.70	0.04	-0.66	0.83	-0.12	-0.57	-0.11	-0.56	-0.16	0.38	-0.51	0.61	0.22	-0.59	0.32	-0.60
3			0.10	0.10	-0.19	0.30	0.02	-0.10	-0.03	-0.09	-0.13	-0.10	-0.28	0.05	-0.05	-0.22	0.01	-0.22
4				-0.06	-0.83	0.97	-0.21	-0.80	-0.17	-0.79	-0.11	0.72	-0.46	0.91	0.42	-0.68	0.50	-0.68
5					0.57	-0.02	0.98	0.59	0.98	0.66	-0.43	-0.26	-0.43	0.03	-0.38	-0.39	-0.33	-0.38
6						-0.84	0.69	0.96	0.66	0.99	-0.13	-0.69	0.21	-0.71	-0.53	0.38	-0.58	0.39
7							-0.19	-0.78	-0.15	-0.76	-0.13	0.67	-0.54	0.89	0.39	-0.72	0.48	-0.73
8								0.70	0.99	0.77	-0.42	-0.36	-0.33	-0.11	-0.44	-0.27	-0.41	-0.26
9									0.68	0.97	-0.05	-0.62	0.12	-0.64	-0.43	0.32	-0.48	0.34
10										0.74	-0.40	-0.30	-0.36	-0.05	-0.40	-0.30	-0.37	-0.29
11											-0.18	-0.68	0.10	-0.66	-0.54	0.28	-0.58	0.29
12												0.53	0.35	0.04	0.83	0.44	0.76	0.44
13													-0.24	0.83	0.89	-0.33	0.91	-0.33
14														-0.63	-0.03	0.94	-0.09	0.93
15															0.58	-0.76	0.64	-0.76
16																-0.05	0.98	-0.05
17																	-0.13	1.00
18																		-0.13

Dormann, 2007; Pearson *et al.*, 2007; Veloz, 2009; McCormack *et al.*, 2010; Warren and Seifert, 2011; Naimi *et al.*, 2011). 중복 위치자료의 제거는 ArcGIS의 toolbox로 개발된 SDM Toolbox v1.1, Spatially Rarefy Occurrence Data for SDMs을 사용하였다(Brown, 2014).

3. 환경 변수

식물의 분포에 관여하는 환경에는 생물기후, 토양, 지리적 요소 등 다양한 요소가 있다. 이 중 식물분포의 지리적 제한 요인은 기후이다(Rathcke and Lacey, 1985; Chuine and Beaubien, 2001; Walther *et al.*, 2002; Thuiller *et al.*, 2004; Parmesan, 2006; Chuine, 2010; Watling *et al.*, 2012). 기후는 생물의 서식지분포에 중요한 요소이며 본 연구에서는 생물기후를 제공하는 Worldclim의 bioclim의 자료를 이용하였다(Hijmans *et al.*, 2005). Worldclim은 생물의 서식과 관련된 19개의 자료를 제공한다. 그러나 19개의 bioclim은 다중공선성(Multicollinearity)이

발생될 수 있다(Watling *et al.*, 2012; Guo *et al.*, 2013; Khanum *et al.*, 2013). 따라서 19개 bioclim의 상관분석을 실시하여 강한 상관관계 ($|r| > 0.75$)를 나타내는 bioclim를 제외하고 상관성이 낮은 6개의 bioclim을 변수로 선정하였다(Table 1).

토양은 식물의 서식기반이 되는 요소로 지리적 분포의 제한 요인으로 작용한다(Woodward, 1987; Hodkinson and Thompson, 1997; Bochet *et al.*, 1999; Jobbagy and Jackson, 2001; Cousins and Lindborg, 2004). 본 연구에서는 국립농업과학원의 정밀토양도를 사용하였으며, 정밀토양도 중 표토와 모암 정보를 사용하였다. 지리적 요소는 고도, 경사, 향을 사용하였고 경사와 향은 DEM(Digital Elevation Model)을 이용하여 분석하였다(Table 2). 환경변수 공간 해상도는 100m²이며, 파일 형식의 변환, 공간 해상도 편집 등은 ESRI사의 ArcGIS(ver 10.1)을 사용하였다.

Table 2. Environmental predictors included in MaxEnt modeling for the study species, *A. Koreana* and *A. nephrolepis*

Variable	Code	discription
Topography	DEM	Continuous values of the elevation in South Korea
	Slope	Continuous values of the slope. Derived from the DEM
	Aspect	Continuous values of the aspect. Derived from the DEM
Soil	Top soil Parent rock	Source of digital detailed soil map of the NAAS(National Academy of Agriculture Science of South Korea).
bioclim	bio01	Annual Mean Temperature
	bio02	Mean Diurnal Range (Mean of monthly (max temp - min temp))
	bio04	Temperature Seasonality (standard deviation *100)
	bio12	Annual Precipitation
	bio13	Precipitation of Wettest Month
	bio14	Precipitation of Driest Month

4. 모형의 정확도

MaxEnt의 모형 정확도는 ROC (Receiver operating characteristic)의 AUC (Area Under Cover)값을 이용해 측정하였다. AUC를 이용한 모의 정확도는 기준값에 독립적인 장점을 가지고 있으며 다양한 모형의 정확도 비교에 많이 이용된다. AUC값은 최소 0.5를 기준으로 모형이 완벽할 경우, 1.0의 값을 나타내며 일반적으로 0.8이상이면 모형 예측력이 우수하다고 판단한다(Swets, 1988; Hosmer Jr and Lemeshow, 2004).

5. 기후변화에 의한 분포지 예측 및 기후변화 민감성 평가

미래 기후변화에 의한 분포지 예측을 위해 사용한 기후변화 시나리오는 온실가스가 저감없이 현재 추세로 배출되는 경우를 가정한 RCPs 8.5를 적용하였고 예측 시기는 2050년(2041~2060년의 평균), 2070년(2061년~2080년 평균)이다. RCPs 8.5는 Worldclim에서 제공하는 자료를 사용하였다(Hijmans *et al.*, 2005).

기후변화 민감성 평가는 1) 종 분포 모형에 의해 예측된 확률을 바탕으로 한 분포지의 면적 감소율, 2) 종이 분포하는 현재 위치의 확률 변화를 이용하여 계산하였다.

첫번째로 잠재 분포지의 면적 감소율은 종 분포 모형에 의해 예측된 공간 분포 확률을 잠재 분포지와 비분포지의 이항형 지도(binary map)로 변환하고

현재 분포에 대한 미래 분포의 감소율을 계산하였다(식 1). 잠재 분포지와 비분포지 구분의 임계값(threshold)은 모형의 민감도(sensitivity)와 특이도(specificity)의 합이 최대가 되는 'Maximum training sensitivity plus specificity (MTSS)'값을 기준으로 하였다(Liu *et al.*, 2013).

$$Loss(\%) = \left(\frac{P_{C_{MTSS}} - P_{S_{MTSS}}}{P_{C_{MTSS}}} \right) \times 100 \quad (1)$$

여기서, Loss(%)는 분포지 면적 감소율, $P_{C_{MTSS}}$ 는 현재 종 분포 확률 중 임계값 이상 지역의 면적, $P_{S_{MTSS}}$ 는 미래 종 분포 확률 중 임계값 이상 지역의 면적이다.

두 번째로 종의 현재 위치 확률 변화는 Crossman *et al.*(2012)의 스칼라 민감도(scalar sensitivity weight, W_{is})를 사용하였다. 스칼라 민감도는 종 출현 위치의 현재 분포 확률과 기후변화 시나리오에 의해 예측된 미래의 분포 확률의 차이로 계산된다(식 2). W_{is} 는 절대값이 포함된 스칼라 값이기 때문에 민감도에 대한 방향성은 없으며 종의 상대적인 민감도를 비교할 수 있다.

$$W_{is} = \frac{\sum_{k=1}^m |P_{ick} - P_{isk}|}{\sum_{k=1}^m P_{isk}} \quad (2)$$

여기서, W_{is} 는 스칼라 민감도, P_{ick} 는 종 출현 위치의 현재 분포 확률, P_{isk} 는 기후변화시나리오에 의한 미래 분포 확률이다.

III. 결 과

1. 구상나무와 분비나무의 분포

현장 조사 및 기존 조사를 통해 수집한 구상나무의 위치 자료는 86개, 분비나무는 82개이다. 위치자료 및 커널 밀도 분석결과 구상나무는 덕유산, 지리산, 가야산, 영축산, 한라산의 해발 1,200m 이상 지역에 분포하였고, 밀도가 높은 곳은 덕유산, 지리산, 한라산이었다. 분비나무는 화악산, 소백산, 함백산, 가리왕산, 오대산, 설악산에 분포하며, 설악산의 밀도가 가장 높았다. 분비나무 분포지역의 고도는 1,000m 이상 지역이며, 분비나무의 남방한계는 소백산으로 나타났다(Figure 2).

2. 구상나무, 분비나무 분포지의 환경특성

연속형 자료에 해당하는 6개 생물기후, 고도에 대해서는 두 종의 위치자료에서 각 요소의 값을 추출하여 표본 평균비교(independent two samples t-test)를 실시하였다. T-test 결과, 다습한 달의 강수량(Precipitation of Wettest Month)은 $P=0.413$ ($P>0.05$)으로 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났으며, 나머지 요소는 $P<0.05$ 으로 통계적으로 유의한 것으로 나타났다.

구상나무 분포지역의 연평균 기온은 6.4℃, 분비나무 분포지역의 연평균 기온은 4.3℃이며 구상나무가 분비나무에 비해 상대적으로 저위도에 많이 분포하여 구상나무의 연평균 기온이 분비나무의 연평균

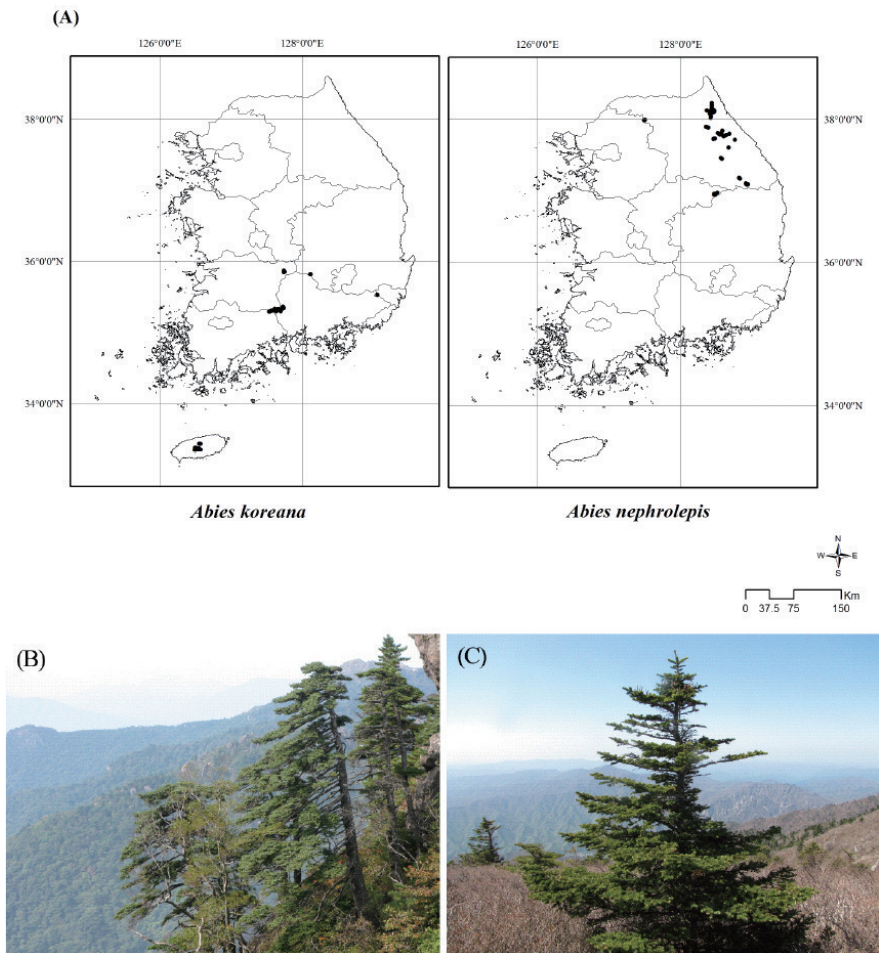


Figure 2. Locations of records used for this study(A) and field photographs: (B) *A. koreana* in Mt. Jiri, (C) *A. nephrolepis* in Mt. Seorak

기온보다 높은 것으로 나타났다. 일교차의 평균은 구상나무 8.29°C, 분비나무는 10.07°C로 분석되었고 상대적으로 고위도에 분포하는 분비나무의 일교차가 큰 것으로 분석되었다. 온도계 절성(Temperature Seasonality)의 평균은 구상나무 84.1, 분비나무 96.6으로 나타났다. 연평균 강수량은 구상나무 1,886.8mm, 분비나무는 1,628.4mm로 분석되었고 구상나무 분포지역의 강수량이 분비나무 분포지역보

다 많았다. 다습한 달의 강수량의 평균은 구상나무 360.38mm, 분비나무는 356.95mm이며 평균간 차이는 거의 없었다. 건조한 달의 평균 강수량은 구상나무 44.59mm, 분비나무 39.71mm로 구상나무 분포지역의 강수량이 상대적으로 많았다(Figure 3).

범주형 자료에 해당하는 표토 토성(topsoil texture), 모암(parent rock)에 대해서는 빈도분석을 실시하였다. 구상나무 분포지역의 표토 토성 분석 결과, 구상

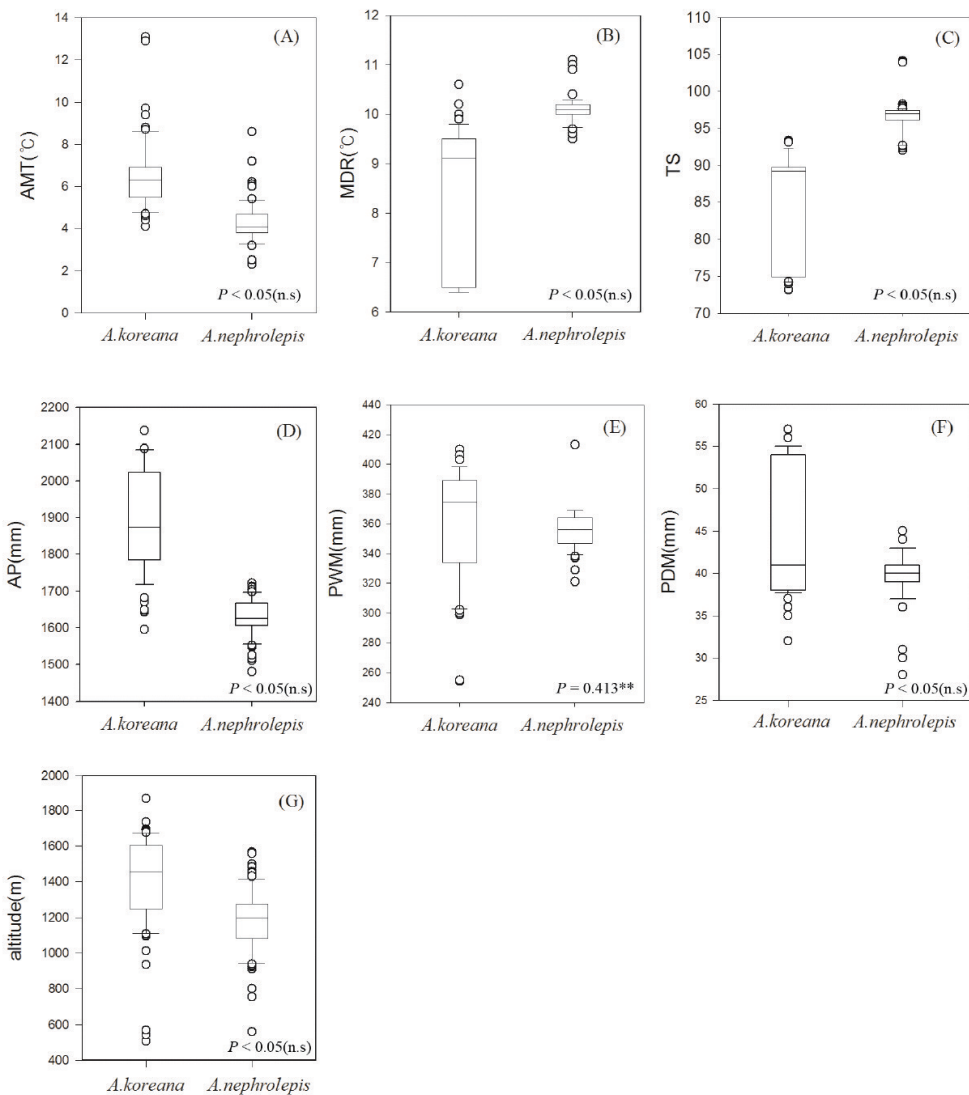


Figure 3. Box plots displaying the median, interquartile range, maximum and minimum values of bioclim and altitude
 AMT: Annual Mean Temperature, MDR: Mean Diurnal Range (Mean of monthly (max temp - min temp)), TS: Temperature Seasonality,
 AP: Annual Precipitation, PWM: Precipitation of Wettest Month, PDM: Precipitation of Driest Month.

나무는 사양토(51%, sandy loam), 미사질양토(36%, silt loam)지역에 집중적으로 분포하였다. 두 종의 분포지역의 공통적인 표토 토성은 사양토로 분석되었다. 분비나무는 사양토(51%), 양토(46%, loam)지역에 집중적으로 분포하였고 사양토 지역에 공통적으로 분포하였다. 구상나무의 모암은 변성암(50%, metamorphic), 제3기층(34%, Tertiary system)에 집중적으로 분포하였다. 분비나무는 산성암(70%, acidic rock), 변성암(20%) 지역에 집중적으로 분포하였고 두 종의 공통적인 모암은 변성암 지역으로 분석되었다(Figure 4).

3. 모형의 정확도 및 환경 변수 기여도

본 연구에서 사용한 MaxEnt의 모형 정확도는 5-fold cross-validation AUC (area under the ROC curve)으로 측정하였다. 측정 결과 두 종 모두 AUC 0.993으로 같았으며, AUC가 0.8이상으로 본 모형의 정확도는 매우 높은 것으로 나타났다(Figure 5).

구상나무와 분비나무의 현재 분포에 관여하는 환경변수는 Maxent의 알고리즘에 의한 기여도 평가(Percent contribution)로 분석하였다. 구상나무는 DEM(고도)의 기여율이 73.8%로 가장 높은 기여율을 보였으며, bio12(연평균강수량) 13.2%, 경사도(slope) 4.5% 등의 순으로 나타났다. bio2, bio13은

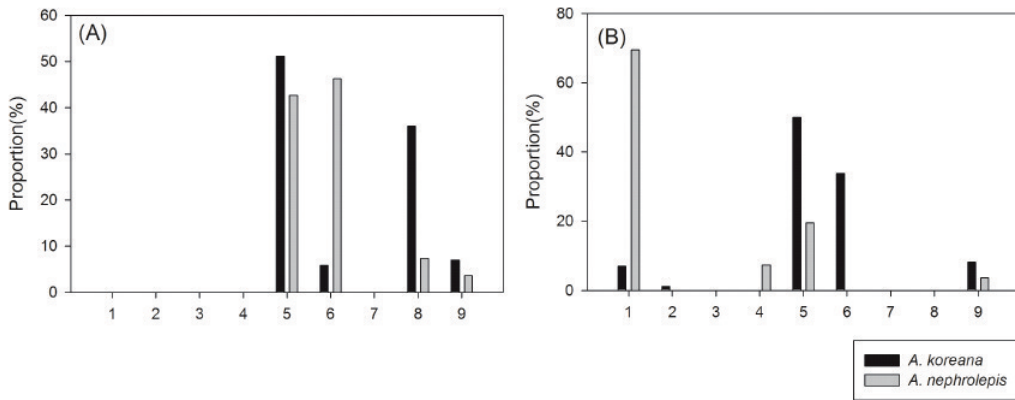


Figure 4. Frequency analysis of the topsoil texture(A) and parent rock(B) attribute derived from the occurrence point of *A. koreana* and *A. nephrolepis*

The X axis represents the topsoil and parent rock properties. (A) 1: loamy coarse sand, 2: loamy fine sand, 3: loamy sand, 4: fine sandy loam, 5: sandy loam, 6: loam, 7: clay loam soil, 8: silt loam, 9: others, (B) 1: acidic rock, 2: intermediate rock, 3: basic rock, 4: sedimentary rock, 5: metamorphic, 6: Tertiary system, 7: quaternary soils, 8: volcanic ash, 9: others.

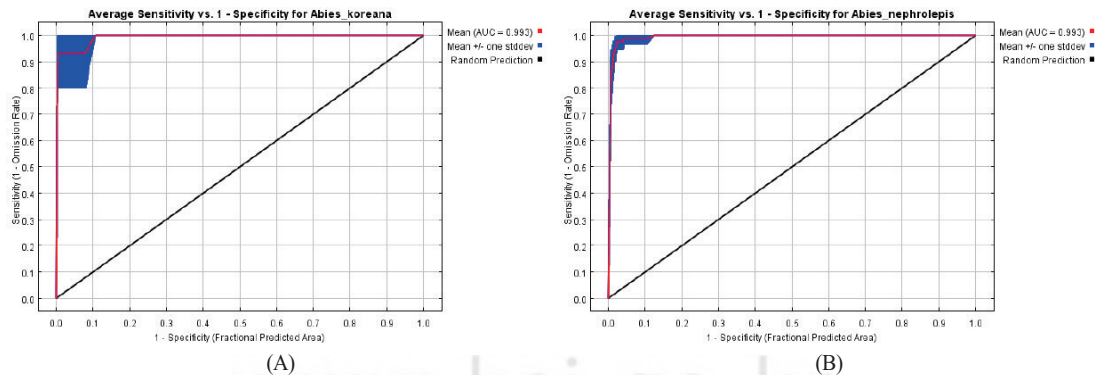


Figure 5. The ROC curve and AUC by the Maxent model for the prediction potential habitat of *A. koreana*(A) and *A. nephrolepis*(B)

Table 3. Changes in the potential distribution areas *A. koreana* and *A. nephrolepis* due to climate change scenarios(RCPs 8.5)

species	current(km ²)	2050		2070	
		Area(km ²)	Loss(%)	Area(km ²)	Loss(%)
<i>A. koreana</i>	48.40	46.88	2.3	41.97	13.2
<i>A. nephrolepis</i>	1,549.90	203.29	86.8	89.62	94.2

기여율이 0%이었다. 분비나무는 bio01(연평균기온)의 기여율이 74.8%로 가장 높았으며, DEM(고도) 23.1%, rock(모암) 0.4%, slope(향방향) 0.2% 등의 순으로 나타났다(Figure 6).

4. 기후변화 민감성 평가

(1) 잠재 분포지의 감소율

본 연구에서 구상나무의 MTSS는 0.1132이며, MTSS를 기준으로 예측된 현재기후의 잠재분포지는 48.4km²이었다. RCPs 8.5를 적용한 2050년은 46.88km², 2070년은 41.97km²로 예측되었다. 분비나무의 MTSS는 0.412이며, 현재기후의 잠재 분포지는 1,549.90km², 2050년 203.29km², 2070년 89.62km²로 예측되었다(Table 3, Figure 7). 구상나무의 분포지는 위치자료가 수집된 지역에 한정되어 예측되었으나, 분비나무는 위치자료가 수집되지 않은 지리산, 한라산 지역에도 예측 분포지가 예상되었다. 그러나 지리산, 한라산의 분비나무 분포 확률은 MTSS이하로 잠재 분포지에 해당하지 않는다.

(2) 스칼라 민감도

구상나무의 2050년 분포 확률을 대상으로 측정된

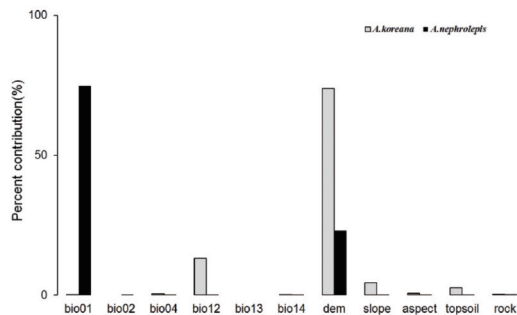


Figure 6. The bar chart gives estimates of relative contributions of the environmental variables to the Maxent model

Table 4. Climate change sensitivity assessment using the sensitivity weight(W_{is})

calculus	<i>A. koreana</i> (n=86)	<i>A. nephrolepis</i> (n=82)
Sum of P_{ick}	51.167	35.886
Sum of $P_{isk(2050)}$	31.647	34.894
Sum of $P_{isk(2070)}$	29.930	22.853
Sum of $ P_{ick}-P_{isk(2050)} $	23.558	2.628
Sum of $ P_{ick}-P_{isk(2070)} $	24.877	13.033
$W_{is(2050)}$	0.744	0.075
$W_{is(2070)}$	0.831	0.570

n: point of presence

민감도는(W_{is}) 0.744, 2070년 민감도는 0.831이었고, 분비나무의 2050년 민감도는 0.075, 2070년 민감도는 0.570이었다. 잠재 분포지의 감소율(Loss(%))은 구상나무보다 분비나무의 감소율이 높았으나, 스칼라 민감도는 구상나무가 분비나무에 비해 상대적으로 높았다.

IV. 고찰

기후변화는 인간의 활동에 의해 발생하는 이산화탄소 등 다양한 온실가스, 블랙카본과 같은 에어로졸, 도시화, 토지이용 변화 등이 원인이다. 특히 우리나라는 기후변화의 직접적인 영향과 더불어 동북아시아의 급속한 경제성장에 의한 온실가스 배출 증가에 따른 직·간접적 영향을 받을 것으로 전망되고 있다. 따라서 기후변화의 영향을 파악하고 발생가능한 부정적 영향을 최소화하기 위한 적응 대책 수립이 필수적이다(환경부·국립환경과학원, 2014). 이에 따라 물 관리, 재해 위험관리 등 다양한 분야에서 기후변화 적응 경험이 축적되고, 적응 계획과 정책 개발이 시작되고 있다(IPCC, 2014).

특히 기후변화에 의한 생물다양성 예측을 위해서는 장기간 시계열 자료의 구축이 필수적이다. 그러나

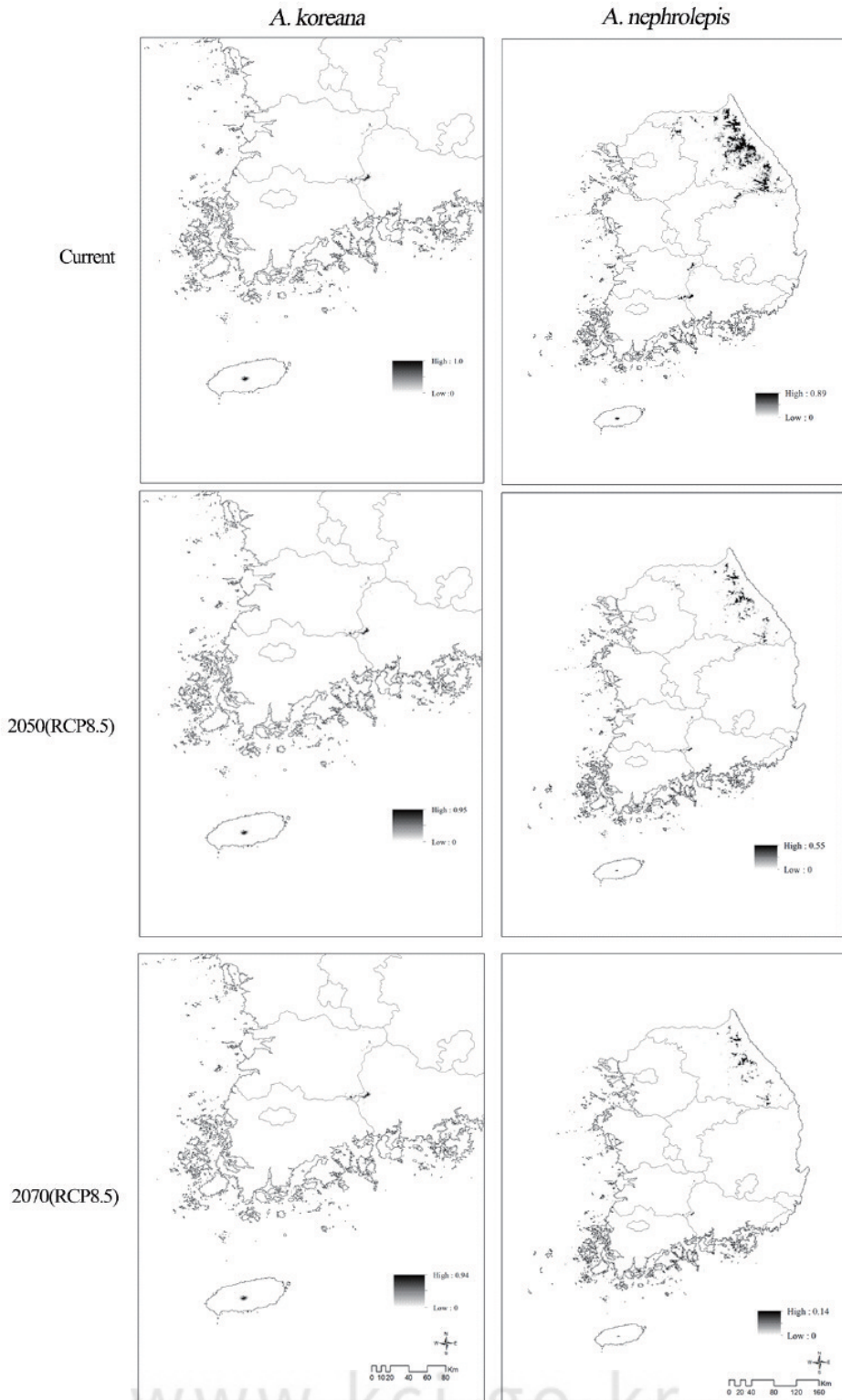


Figure 7. Projected changes in distributions of *A. koreana* and *A. nephrolepis* under climate change using RCP8.5 scenarios

국내에는 장기간의 시계열 자료가 구축되어 있지 않기 때문에 확률론적 접근에 의지할 수밖에 없다.

본 연구는 기후변화에 취약할 것으로 예상되는 아고산식물을 대상으로 기후변화 민감성평가를 시도하였으며 결과는 다음과 같다.

- 1) 환경 변수를 이용하여 구상나무와 분비나무 분포 지역의 환경 특성을 비교해 본 결과, 다습한 달의 강수량(Precipitation of Wettest Month)의 강수량은 $P=0.413$ 으로 유의확률 0.05에서 유의하지 않은 것으로 나타났으며, 연평균 기온, 연간 강수량 등의 다른 환경요인은 $P<0.05$ 으로 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 따라서 같은 *Abies*속 식물인 구상나무와 분비나무의 기후조건은 다습한 달의 강수량을 제외하고 상이하였다. 두 종이 분포하는 지역의 공통적인 표토 토성은 사양토이며, 구상나무는 변성암, 분비나무는 산성암이 모암인 지역에 집중적으로 분포하는 것으로 나타났으며 공통적인 모암은 변성암으로 나타났다.
- 2) 위치자료와 환경변수를 이용하여 현재 및 미래의 분포지를 예측하기 위해 종 분포 모형인 Maxent를 사용하였다. 모델링 결과 두 종 모두 모형의 정확도(AUC)는 0.993으로 매우 우수하였으며 분포지 예측의 기여도 측정결과 구상나무는 고도, 분비나무는 연평균 기온의 기여도가 가장 높았다.
- 3) 기후변화에 의한 민감성 평가는 기후변화에 의한 잠재 분포지 면적 감소 및 현재 종이 분포하는 위치의 확률을 이용한 스칼라 민감도(W_{is})를 사용하였다.
 - Maxent의 종 분포 확률 중 임계값을 기준으로 현재와 미래의 분포지를 예측한 결과, 현재 대비 구상나무는 2050년 2.3% 감소, 2070년 13.2% 감소, 분비나무는 2050년 86.8% 감소, 2070년 94.2% 감소로 예측되었다
 - 구상나무의 스칼라 민감도(W_{is})는 2050년 0.744, 2070년 0.831, 분비나무는 2050년 0.075, 2070년 0.570으로 나타났으며 구상나무의 민감도가 분비나무의 민감도보다 상대적으로 높았다.

본 연구는 종 분포 모형을 이용하여 미래 분포 확률을 예측하고 분포 확률을 이용하여 두 가지 방법으로 민감성을 평가하였다. 분포지의 면적 감소율을 이용한 평가에서는 분비나무의 면적 감소율이 구상나

무보다 과도하게 예측되었다. 이러한 현상은 환경변수의 영향으로 예상된다. 환경 변수 기여도 평가에 의하면 분비나무는 연평균 기온, 구상나무는 해발고도의 기여도가 가장 높았다. 따라서 분비나무가 연평균 기온에 민감하게 반응한 결과로 예상된다. 또한 종 분포 모형을 이용하여 종 분포를 예측 할 경우 종의 위치자료의 편향 및 샘플수 그리고 환경변수의 종류에 따라 미래 예측이 상이할 수 있다(Hof *et al.*, 2012; Kramer-Schadt *et al.*, 2013). 본 연구에서는 식물의 분포 제한 요인으로 작용할 수 있는 공간적 변수를 최대한 활용하였다. 그러나 예상하지 못한 식물 분포 제한 요인이 있을 수 있다. 따라서 기후변화생물지표의 기후변화 민감성 평가를 위해서는 지표종에 대한 명확한 환경·생태적 특성 규명이 선결되어야 하며 환경·생태적 특징이 반영된 공간 변수의 제작이 필요할 것으로 판단된다. 또한 분비나무의 경우 북한, 만주, 시베리아에도 분포하는 종이므로 연구 범위를 확장한다면 분포지 예측에 관여하는 환경변수의 기여도 및 기후변화에 의한 분포지 예측이 달라질 것으로 예상된다.

스칼라 민감도(W_{is})는 식물종이 위치하는 현재 기후의 분포 확률과 기후변화 시나리오에 의한 미래 분포 확률을 이용하여 산출된다. 그러나 수식에 절대값이 포함된 스칼라 값이기 때문에 민감도에 대한 방향성 즉, 기후변화에 의한 종 분포의 취약, 확장을 판단할 수 없다. 따라서 스칼라 민감도를 사용할 경우 민감성의 방향성을 나타낼 수 있는 수식의 변형 및 개발이 필요할 것으로 판단된다. 그리고 본 연구의 한계성을 바탕으로 민감성평가 방안이 개발된다면 기후변화와 생물다양성 적응대책 수립을 위한 중요한 의사결정 방법이 될 것으로 기대한다.

사 사

본 논문은 환경부 차세대에코이노베이션 환경기술 개발사업(416-111-013) 및 강원대학교 환경연구소의 지원으로 수행된 연구의 일부입니다.

인용문헌

- 국립환경과학원. 2007a. 백두대간 보호지역 생태계 조사(육십령-지리산).
- 국립환경과학원. 2007b. 백두대간 보호지역 생태계 조사(속리산형제봉-지리산).
- 국립환경과학원. 2008. 백두대간 보호지역 생태계 조사(삼척뫼재-속리산 형제봉).
- 국립환경과학원. 2009. 백두대간 보호지역 생태계 조사(오대산진고개-삼척뫼재).
- 국립환경과학원. 2010. 백두대간 보호지역 생태계 조사(고성향로봉-오대산진고개).
- 공우석. 1998. 한라산 고산식물의 분포 특성, 대한지리학회지, 33, 191-208.
- 공우석. 1999. 한라산의 수직적 기온 분포와 고산식물의 온도적 범위, 대한지리학회지, 34, 385-393.
- 공우석. 2002. 한반도 고산식물의 구성과 분포, 대한지리학회지, 37, 357-370.
- 공우석. 2006. 한반도에 자생하는 소나무과 나무의 생물지리, 대한지리학회지, 41(1), 73-93.
- 공우석, 김건옥, 이슬기, 박희나, 조수현. 2014. 한반도 주요 산정의 식물종 분포와 기후변화 취약종, 환경영향평가, 23(2), 119-136.
- 구경아, 박원규, 공우석. 2001. 한라산 구상나무 (*Abies koreana* W.)의 연륜연대학적 연구 -기후변화에 따른 성장변동 분석, 한국생태학회지, 24(5), 281-288.
- 임종환, 우수영, 권미정, 천정화, 신준환. 2006. 한라산 구상나무 건전개체와 쇠약개체의 온도 변화에 따른 광합성능력과 수분이용효율, 한국임학회지, 95(6), 705-710.
- 유가영, 김인애. 2008. 기후변화 취약성 평가지표의 개발 및 도입방안, 한국환경정책 평가연구원.
- 홍용표, 안지영, 김영미, 양병훈, 송정호. 2011. 남한지역 구상나무와 분비나무 집단에서의 nSSR 표지 유전 변이, 한국임학회지, 100, 557-584.
- 환경부, 국립환경과학원. 2014. 한국 기후변화 평가 보고서 2014 -기후변화 영향 및 적응.
- Austin M. 2007. Species distribution models and ecological theory: a critical assessment and some possible new approaches, *Ecol Model*, 200, 1-19.
- Bertin RI. 2008. Plant phenology and distribution in relation to recent climate change, *The Journal of the Torrey Botanical Society*, 135(1), 126-146.
- Betts MG, Diamond AW, Forbes GJ, Villard MA, Gunn JS. 2006. The importance of spatial autocorrelation, extent and resolution in predicting forest bird occurrence, *Ecol Model* 191, 197-224.
- Bochet E, Rubio JL, Poesen J. 1999. Modified topsoil islands within patchy Mediterranean vegetation in SE Spain, *CATENA*, 38, 23-44.
- Brown JL. 2014. SDMtoolbox: a python-based GIS toolkit for landscape genetic, biogeographic and species distribution model analyses, *Methods Ecol Evol*, 5, 694-700.
- Chaine I. 2010. Why does phenology drive species distribution? *Philos Trans R Soc B Biol Sci*, 365, 3149-3160.
- Chaine I, Beaubien EG. 2001. Phenology is a major determinant of tree species range, *Ecol Lett*, 4, 500-510.
- Cousins SA, Lindborg R. 2004. Assessing changes in plant distribution patterns-indicator species versus plant functional types, *Ecol Indic*, 4, 17-27.
- Crossman ND, Bryan BA, Summers DM. 2012. Identifying priority areas for reducing species vulnerability to climate change, *Diversity and Distributions*, 18(1), 60-72.
- Dormann CF. 2007. Effects of incorporating

- spatial autocorrelation into the analysis of species distribution data, *Glob Ecol Biogeogr*, 16, 129-138.
- Elith J, Leathwick JR. 2009. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time, *Annu Rev Ecol Evol Syst*, 40, 677.
- Elith J, Phillips SJ, Hastie T, Dudík M, Chee YE, Yates CJ. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists, *Divers Distrib* 17, 43-57.
- Eo JK, Hyun JO. 2013. Comparative anatomy of the needles of *Abies koreana* and its related species, *Turk J Bot*, 37, 553-560.
- Franklin J. 2010. Mapping species distributions: spatial inference and prediction, Cambridge University Press.
- Guo WY, Lambertini C, Li XZ, Meyerson LA, Brix H. 2013. Invasion of Old World *Phragmites australis* in the New World: precipitation and temperature patterns combined with human influences redesign the invasive niche, *Glob Change Biol*, 19, 3406-3422.
- Hijmans RJ, Cameron SE, Parra JL, Jones PG, Jarvis A. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas, *Int J Climatol*, 25, 1965-1978.
- Hodkinson DJ, Thompson K. 1997. Plant Dispersal: The Role of Man, *J Appl Ecol*, 34, 1484.
- Hof AR, Jansson R, Nilsson C. 2012. The usefulness of elevation as a predictor variable in species distribution modelling, *Ecological Modelling*, 246, 86-90.
- Hosmer Jr DW, Lemeshow S. 2004. Applied logistic regression, John Wiley & Sons.
- IPCC. 2014. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability.
- Jobbágy EG, Jackson RB. 2001. The distribution of soil nutrients with depth: global patterns and the imprint of plants, *Biogeochemistry*, 53, 51-77.
- Kramer-Schadt S, Niedballa J, Pilgrim JD, Schroder B, Lindenborn J, Reinfelder V, Wilting A. 2013. The importance of correcting for sampling bias in MaxEnt species distribution models, *Diversity and Distributions*, 19(11), 1366-1379.
- Khanum R, Mumtaz AS, Kumar S. 2013. Predicting impacts of climate change on medicinal asclepiads of Pakistan using Maxent modeling, *Acta Oecologica*, 49, 23-31.
- Kim YS, Chang CS, Kim CS, Gardner M. 2011. *Abies koreana*. The IUCN Red List of Threatened Species, Version 2014.3, <www.iucnredlist.org>, Downloaded on 09 January 2015.
- Kormuťák A, Lee SW, Hong KN, Yang BH, Hong YP. 2008. Crossability relationships between Korean firs *Abies koreana*, *A. nephrolepis* and *A. holophylla* and some other representatives of the genus *Abies*, *Biologia (Bratisl)*, 63, 94-99.
- Lee BY, Nam GH, Yun JH, Cho GY, Lee JS, Kim JH, Oh KH. 2010. Biological indicators to monitor responses against climate change in Korea, *Korean J Pl Taxon*, 40, 202-207.
- Liu C, White M, Newell G. 2013. Selecting thresholds for the prediction of species occurrence with presence-only data, (R. Pearson, ed.) *J Biogeogr*, 40, 778-789.
- McCormack JE, Zellmer AJ, Knowles LL. 2010. Does niche divergence accompany allopatric divergence in *Aphelocoma jays* as predicted under ecological speciation?:

- insights from tests with niche models, *Evolution*, 64, 1231-1244.
- Merow C, Smith MJ, Silander JA. 2013. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter, *Ecography*, 36, 1058-1069.
- Naimi B, Skidmore AK, Groen TA, Hamm NA. 2011. Spatial autocorrelation in predictors reduces the impact of positional uncertainty in occurrence data on species distribution modelling, *J Biogeogr*, 38, 1497-1509.
- Parnesan C. 2006. Ecological and evolutionary responses to recent climate change, *Annu Rev Ecol Evol Syst*, 637-669.
- Pearson RG, Raxworthy CJ, Nakamura M, Townsend PA. 2007. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar, *J Biogeogr*, 34, 102-117.
- Phillips SJ, Dudík M. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31, 161-175.
- Rathcke B, Lacey EP. 1985. Phenological patterns of terrestrial plants, *Annu Rev Ecol Syst*, 179-214.
- Segurado P, Araújo MB, Kunin WE. 2006. Consequences of spatial autocorrelation for niche-based models, *J Appl Ecol*, 43, 433-444.
- Song JS. 1991. Phytosociology of subalpine coniferous forests in Korea I. Syntaxonomical interpretation, *Ecol Res*, 6, 1-19.
- Swets JA. 1988. Measuring the accuracy of diagnostic systems, *Science*, 240, 1285-1293.
- Thuiller W, Lavorel S, Midgley G, Lavergne S, Rebelo T. 2004. Relating plant traits and species distributions along bioclimatic gradients for 88 *Leucadendron* taxa, *Ecology*, 85, 1688-1699.
- Veloz SD. 2009. Spatially autocorrelated sampling falsely inflates measures of accuracy for presence-only niche models, *J Biogeogr*, 36, 2290-2299.
- Walther GR, Post E, Convey P, Menzel A, Parmesan C, Beebee TJ, Fromentin JM, *et al.* 2002. Ecological responses to recent climate change, *Nature*, 416, 389-395.
- Warren DL, Seifert SN. 2011. Ecological niche modeling in Maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria, *Ecol Appl*, 21, 335-342.
- Watling JI, Romañach SS, Bucklin DN, Speroterra C, Brandt LA, Pearlstine LG, Mazzotti FJ. 2012. Do bioclimate variables improve performance of climate envelope models? *Ecol Model*, 246, 79-85.
- Wilson EH. 1920. Four new conifers from Korea, *J Arnold Arbor*, 1, 186-190.
- Woo SY, Lim JH, Lee DK. 2008. Effects of temperature on photosynthetic rates in Korean fir (*Abies koreana*) between healthy and dieback population, *Journal of integrative plant biology*, 50(2), 190-193.
- Woodward FI. 1987. *Climate and plant distribution*, Cambridge University Press.
- Woodward FI, Beerling DJ. 1997. The dynamics of vegetation change: health warnings for equilibrium 'dodo' models, *Global Ecology and Biogeography Letters*, 413-418.
- Xiang X, Cao M, Zhou Z. 2007. Fossil history and modern distribution of the genus *Abies* (Pinaceae), *Front For China*, 2, 355-365.
- Zhang D, Katsuki T, Rushforth K. 2013. *Abies*

nephrolepis, The IUCN Red List of Threatened Species, Version 2014.3, <www.iucnredlist.org>, Downloaded on 09 January 2015.

<http://library.me.go.kr>

References

- Austin M. 2007. Species distribution models and ecological theory: a critical assessment and some possible new approaches, *Ecol Model*, 200, 1-19.
- Bertin RI. 2008. Plant phenology and distribution in relation to recent climate change, *The Journal of the Torrey Botanical Society*, 135(1), 126-146.
- Betts MG, Diamond AW, Forbes GJ, Villard MA, Gunn JS. 2006. The importance of spatial autocorrelation, extent and resolution in predicting forest bird occurrence, *Ecol Model*, 191, 197-224.
- Bochet E, Rubio JL, Poesen J. 1999. Modified topsoil islands within patchy Mediterranean vegetation in SE Spain, *CATENA*, 38, 23-44.
- Brown JL. 2014. SDMtoolbox: a python-based GIS toolkit for landscape genetic, biogeographic and species distribution model analyses, *Methods Ecol Evol*, 5, 694-700.
- Chaine I. 2010. Why does phenology drive species distribution? *Philos Trans R Soc B Biol Sci*, 365, 3149-3160.
- Chaine I, Beaubien EG. 2001. Phenology is a major determinant of tree species range, *Ecol Lett*, 4, 500-510.
- Cousins SA, Lindborg R. 2004. Assessing changes in plant distribution patterns-indicator species versus plant functional types, *Ecol Indic*, 4, 17-27.
- Crossman ND, Bryan BA, Summers DM. 2012. Identifying priority areas for reducing species vulnerability to climate change, *Diversity and Distributions*, 18(1), 60-72.
- Dormann CF. 2007. Effects of incorporating spatial autocorrelation into the analysis of species distribution data, *Glob Ecol Biogeogr*, 16, 129-138.
- Elith J, Leathwick JR. 2009. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time, *Annu Rev Ecol Evol Syst*, 40, 677.
- Elith J, Phillips SJ, Hastie T, Dudik M, Chee YE, Yates CJ. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists, *Divers Distrib*, 17, 43-57.
- Eo JK, Hyun JO. 2013. Comparative anatomy of the needles of *Abies koreana* and its related species, *Turk J Bot*, 37, 553-560.
- Franklin J. 2010. Mapping species distributions: spatial inference and prediction, Cambridge University Press.
- Guo WY, Lambertini C, Li XZ, Meyerson LA, Brix H. 2013. Invasion of Old World *Phragmites australis* in the New World: precipitation and temperature patterns combined with human influences redesign the invasive niche, *Glob Change Biol*, 19, 3406-3422.
- Hijmans RJ, Cameron SE, Parra JL, Jones PG, Jarvis A. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas, *Int J Climatol*, 25, 1965-1978.
- Hodkinson DJ, Thompson K. 1997. Plant Dispersal: The Role of Man, *J Appl Ecol*, 34, 1484.
- Hof AR, Jansson R, Nilsson C. 2012. The usefulness of elevation as a predictor variable in species distribution modelling,

- Ecological Modelling, 246, 86-90.
- Hong YP, Ahn JY, Kim YM, Yang BH, Song JH. 2011. Genetic Variation of nSSR Markers in Natural Populations of *Abies koreana* and *Abies nephrolepis* in South Korea, J Korean For Soc, 100, 557-584.
- Hosmer Jr DW, Lemeshow S. 2004. Applied logistic regression, John Wiley & Sons.
- IPCC. 2014. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability.
- Jobbágy EG, Jackson RB. 2001. The distribution of soil nutrients with depth: global patterns and the imprint of plants, Biogeochemistry, 53, 51-77.
- Kramer-Schadt S, Niedballa J, Pilgrim JD, Schroder B, Lindenborn J, Reinfelder V, Wilting A. 2013. The importance of correcting for sampling bias in MaxEnt species distribution models, Diversity and Distributions, 19(11), 1366-1379.
- Khanum R, Mumtaz AS, Kumar S. 2013. Predicting impacts of climate change on medicinal asclepiads of Pakistan using Maxent modeling, Acta Oecologica, 49, 23-31.
- Kim YS, Chang CS, Kim CS, Gardner M. 2011. *Abies koreana*, The IUCN Red List of Threatened Species, Version 2014.3, <www.iucnredlist.org>, Downloaded on 09 January 2015.
- Kong WS. 1998. The Distributional Patterns of Alpine Plants of Mt. Halla, Cheju Island, Korea, Journal of the Korean Geographical Society, 33, 191-208.
- Kong WS. 1999. The Vertical Distribution on Air Temperature and Thermal Amplitude of Alpine Plants on Mt. Halla, Cheju Island, Korea, Journal of the Korean Geographical Society, 34, 385-393.
- Kong WS. 2002. Species composition and distribution of Korean alpine plants, Journal of the Korean Geographical Society, 37, 357-370.
- Kong WS. 2006. Biogeography of native Korean Pinaceae, Journal of the Korean Geographical Society, 41, 73-93.
- Kong WS, Kim KO, Lee SG, Park HN, Cho SH. 2014. Distribution of High Mountain Plants and Species Vulnerability Against Climate Change, Journal of Environmental Impact Assessment, 23(2), 119-136.
- Koo KA, Park WK, Kong WS. 2001. Effects of Climate Change on the Growths = Dendrochronological Analysis of *Abies koreana* W. at Mt. Halla, Korea, Journal of Ecology and Environment, 24(5), 281-288.
- Kormuťák A, Lee SW, Hong KN, Yang BH, Hong YP. 2008. Crossability relationships between Korean firs *Abies koreana*, *A. nephrolepis* and *A. holophylla* and some other representatives of the genus *Abies*, Biologia (Bratisl), 63, 94-99.
- Lee BY, Nam GH, Yun JH, Cho GY, Lee JS, Kim JH, Oh KH. 2010. Biological indicators to monitor responses against climate change in Korea, Korean J Pl Taxon, 40, 202-207.
- Lim JH, Woo SY, Kwon MJ, Chun JH, Shin JH. 2006. Photosynthetic Capacity and Water Use Efficiency under Different Temperature Regimes on Healthy and Declining Korean Fir in Mt. Halla, Journal of Korean Forest Society, 95(6), 705-710.
- Liu C, White M, Newell G. 2013. Selecting thresholds for the prediction of species occurrence with presence-only data, (R. Pearson, ed.) J Biogeogr, 40 778-789.
- McCormack JE, Zellmer AJ, Knowles LL. 2010.

- Does niche divergence accompany allopatric divergence in *Aphelocoma jays* as predicted under ecological speciation?: insights from tests with niche models, *Evolution*, 64, 1231-1244.
- Merow C, Smith MJ, Silander JA. 2013. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter, *Ecography*, 36, 1058-1069.
- MOE, NIER. 2014. Korean climate change assessment report 2014.
- Naimi B, Skidmore AK, Groen TA, Hamm NA. 2011. Spatial autocorrelation in predictors reduces the impact of positional uncertainty in occurrence data on species distribution modelling, *J Biogeogr*, 38, 1497-1509.
- NIER. 2007a. Ecosystem survey of Baekdudaegan Protected Area(Yuksipryeong-Jirisan).
- NIER. 2007b. Ecosystem survey of Baekdudaegan Protected Area(Songnisan-Jirisan).
- NIER. 2008. Ecosystem survey of Baekdudaegan Protected Area(Daetjae-Songnisan).
- NIER. 2009. Ecosystem survey of Baekdudaegan Protected Area(Odaesan-Daetjae).
- NIER. 2010. Ecosystem survey of Baekdudaegan Protected Area(Hyangrobong-Odaesan).
- Parmesan C. 2006. Ecological and evolutionary responses to recent climate change, *Annu Rev Ecol Evol Syst*, 37, 637-669.
- Pearson RG, Raxworthy CJ, Nakamura M, Townsend PA. 2007. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar, *J Biogeogr*, 34, 102-117.
- Phillips SJ, Dudík M. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation, *Ecography*, 31, 161-175.
- Rathcke B, Lacey EP. 1985. Phenological patterns of terrestrial plants, *Annu Rev Ecol Syst*, 16, 179-214.
- Segurado P, Araújo MB, Kunin WE. 2006. Consequences of spatial autocorrelation for niche-based models, *J Appl Ecol*, 43, 433-444.
- Song JS. 1991. Phytosociology of subalpine coniferous forests in Korea I. Syntaxonomical interpretation, *Ecol Res*, 6, 1-19.
- Swets JA. 1988. Measuring the accuracy of diagnostic systems, *Science*, 240, 1285-1293.
- Thuiller W, Lavorel S, Midgley G, Lavergne S, Rebelo T. 2004. Relating plant traits and species distributions along bioclimatic gradients for 88 *Leucadendron* taxa, *Ecology*, 85, 1688-1699.
- Veloz SD. 2009. Spatially autocorrelated sampling falsely inflates measures of accuracy for presence-only niche models, *J Biogeogr*, 36, 2290-2299.
- Walther GR, Post E, Convey P, Menzel A, Parmesan C, Beebee TJ, Fromentin JM, *et al.* 2002. Ecological responses to recent climate change, *Nature*, 416, 389-395.
- Warren DL, Seifert SN. 2011. Ecological niche modeling in Maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria, *Ecol Appl*, 21, 335-342.
- Watling JI, Románach SS, Bucklin DN, Speroterra C, Brandt LA, Pearlstine LG, Mazzotti FJ. 2012. Do bioclimate variables improve performance of climate envelope models? *Ecol Model*, 246, 79-85.
- Wilson EH. 1920. Four new conifers from Korea. *J Arnold Arbor* 1:186-190.

- Woo SY, Lim JH, Lee DK. 2008. Effects of temperature on photosynthetic rates in Korean fir(*Abies koreana*) between healthy and dieback population, *Journal of integrative plant biology*, 50(2), 190-193.
- Woodward FI. 1987. *Climate and plant distribution*, Cambridge University Press.
- Woodward FI, Beerling DJ. 1997. The dynamics of vegetation change: health warnings for equilibrium 'dodo' models, *Global Ecology and Biogeography Letters*, 413-418.
- Xiang X, Cao M, Zhou Z. 2007. Fossil history and modern distribution of the genus *Abies* (Pinaceae), *Front For China*, 2, 355-365.
- Yoo GY, Kim IE. 2008. Development and introduction method of vulnerability assessment indicators of climate change, Korea Environment Institute, RE-05.
- Zhang D, Katsuki T, Rushforth K. 2013. *Abies nephrolepis*, The IUCN Red List of Threatened Species, Version 2014.3, <www.iucnredlist.org>, Downloaded on 09 January 2015.
- <http://library.me.go.kr>