

종 분포 모형을 이용한 구상나무림의 지속 및 쇠퇴에 관한 연구
- 전라남도 광양시 백운산을 중심으로 -

조선희* · 박종영 · 박정호 · 이양근 · 문이만 · 강상호 · 김광현 · 윤종국
서울대학교 학술팀

A Study for Continue and Decline of *Abies koreana* Forest
using Species Distribution Model

- Focused in Mt. Baekwun Gwangyang-si, Jeollanam-do -

Seon-Hee Cho*, Jong-young Park, Jeong-Ho Park, Yang-Geun Lee, Lee-man Mun,
Sang-Ho Kang, Gwang-Hyun Kim and Jong-Guk Yun

University forests of Seoul National University, Gwangyang 545-808 Korea

요약: 본 연구에서는 백운산 내 구상나무 서식지를 조사하여 현존 분포도를 작성하고 분포에 영향을 미치는 생물학적 환경인자와 비 생물학적 환경인자의 기여도를 정량화하여 서식지 또는 대체서식지로써 잠재성을 가지고 있는 지역을 도출하고 보호구역 설정 안을 제시하였으며, RCP 8.5 기후변화 시나리오를 적용하여 기후변화가 향후 구상나무의 분포에 미치는 영향을 분석한 미래 잠재 서식지를 예측 하였다. 연구 결과 백운산 내 구상나무는 3,325개체 (DBH \geq 2.5 cm)가 서식하고 있었고 분포 면적은 150 ha 정도였다. 해발 900 m에서 구상나무의 개체가 확인되어 1,200 m까지 분포하고 있었으며, 잠재 분포도를 기반으로 현재 구상나무가 서식하기에 적합한 지역은 상봉, 억불봉, 파리봉, 도솔봉을 중심으로 현존 분포 면적의 3배인 450 ha로 분석되었다. 주봉인 상봉 인근이 구상나무의 서식에 가장 적합한 잠재력을 가진 임분으로 평가 되었으며, 남사면보다는 북사면을 선호하는 경향을 보이고 있었다. 기후 변화 시나리오 RCP 8.5를 적용하여 미래의 잠재적 분포를 분석한 결과 2050년에는 상봉 주변을 중심으로 20 ha까지 서식지 면적이 감소될 것으로 나타나며, 2080년에는 서식에 적합한 지역이 존재하지 않을 것으로 예측된다. 이러한 결과로 볼 때 지구온난화가 가속화될수록 구상나무는 저지대에서 고지대로 서식지의 이동 양상이 뚜렷해질 것으로 판단된다.

Abstract: The present study investigated the habitats of Korean fir trees (*Abies koreana* E. H. Wilson) on Mt. Baekwun (*Baekwun-san*), determined the current distribution, quantified the contribution of biological and non-biological environmental factors affecting the distribution, derived actual and potential habitats, presented a plan for the establishment of protected areas, applied RCP 8.5 climate change scenario to analyze the effects of climate change on the future distribution of Korean fir trees, and predicted future potential habitats. According to the results of the study, 3,325 Korean fir trees (DBH \geq 2.5 cm) inhabited Mt. Baekwun, and their distribution area was approximately 150 ha. Populations of Korean fir trees were confirmed to exist at an altitude of 900 m above sea level and were distributed up to 1,200 m. Based on potential distribution, areas appropriate for habitation by Korean fir trees were analyzed to be 450 ha, three times the current distribution area, with a focus on Sang Peak (*Sang-bong*), Eokbul Peak (*Eokbul-bong*), Ddari Peak (*Ddari-bong*), and Dosol Peak (*Dosol-bong*). The forest stands near Sang Peak, the main peak, were evaluated as those with the most appropriate potential for the habitation of Korean fir trees, and populations of the trees tended to prefer the northern slope rather than the southern slope. When climate change scenario RCP 8.5 was applied and future potential distribution was analyzed, the habitats were expected to decrease in area to 20 ha by 2050, with a focus on Sang Peak, and areas appropriate for habitation were predicted not to exist by 2080. Judging from such results, as global warming accelerates, the habitats of Korean fir trees are clearly expected to move from lowlands to highlands.

Key words: *Abies koreana*, Mt. Baekwun, climate change, global warming, environmental factor, potential habitat

*Corresponding author
E-mail: tl999@hanmail.net

서 론

인위적인 활동으로 대기 중 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄) 아산화질소(N₂O) 등 온실가스의 농도는 1750년 이후로 모두 증가했다. 이러한 온실가스들의 농도는 2011년에 각각 391 ppm, 1803 ppb, 324 ppb로 산업화 이전보다 약 40%, 150%, 20% 높아졌다. 1901~2010년에 지구 평균해수면은 0.19(0.17~0.21) m 상승했다. 21세기 후반과 그 이후의 지구 온난화는 주로 CO₂ 누적 배출량에 의해서 결정된다. 온실가스의 배출이 중단되어도 기후변화의 양상은 대부분 수백 년 동안 지속될 것이다. 이것은 수 세기동안 발생된 주요 기후변화가 과거, 현재, 미래의 이산화탄소 배출량에 의해 지속됨을 의미한다. 기후 시스템의 최근 변화를 이해하기 위해서는 관측, 피드백 과정에 대한 연구, 모델을 이용한 모의를 함께 활용해야 한다(IPCC, 2013). 기후변화가 식생분포에 미치는 영향은 전 세계적 관심사가 되고 있다. 미래 여름 평균강수량과 최한월 온도를 이용하여 미래 산림식생분포 변화를 전망한 결과 현재 산림식생분포에 비해 2080년에 미래 활엽수림과 혼효림은 각각 56.9%와 8.3% 증가하고 미래 침엽수림은 11.2% 감소하는 것으로 전망되었다(Shin et al., 2012).

2010년 국립생물자원관은 ‘국가 기후변화 생물지표’ 100종을 선정 발표하였다. 식물 44종 중 구상나무(*Abies koreana*)를 포함시켰으며, 2013년 IUCN(International Union for Conservation of Natural Resources)은 구상나무를 멸종 위기종으로 지정하였다. 구상나무는 문헌상으로 우리나라 아고산 지대에 분포하는 것으로 알려져 있으나 실제로 관찰된 지역은 가야산, 오대산, 덕유산, 지리산, 한라산 등으로 제한적이다. 전라남도 광양시 백운산 지역의 구상나무 서식지에 대한 자료는 문헌에 존재하고 있지 않으며, 한반도 대륙의 최남단이라는 데 큰 의미를 가지고 있다.

구상나무는 높이가 18 m에 달하며 상록교목으로 나무의 늙은 가지의 껍질이 거칠다. 잔가지는 황색이지만 털이 없어지면서 황색이 돌고 겨울눈은 난상 원형이며 수지가 약간 있다. 과지의 잎은 도피침상 선형이고 구과의 빛깔에 따라 푸른구상(for. *chlorocarpa*), 검은구상(for. *nigrocarpa*), 붉은구상(for. *nubrocarpa*) 등으로 구분된다(Lee, 2006). 특산식물인 구상나무의 보존을 위한 연구는 다방면으로 이루어지고 있으나 한반도의 구상나무림은 여전히 감소하고 있는 실정이다. 구상나무 서식지의 체계적인 조사와 분석을 통해 서식환경에 대한 평가와 이해로 합리적인 경영방법이 필요한 시점이다. 대부분의 산림식생 및 생태에 관한 연구는 샘플 사이트에 의한 자료를 토대로 이루어지고 있어 자료의 신뢰성 측면에서 아쉬움을 가지고 있는 현실이나 이번 연구에서는 백운산에 서식하는 구상나무에 대

한 전수 조사를 원칙으로 계획하고 실행함으로써 자료의 정확성과 신뢰성을 확보하고 있다.

본 연구의 목적은 구상나무의 서식에 영향을 미치는 생물학적인 환경인자와 비 생물학적 환경인자의 기여도를 정량화하여 구상나무 보전의 기초자료 제공과 기후변화에 따른 분포 변화를 예측하는데 있다. 따라서 연구의 목표는 다음과 같이 세 가지로 요약된다. 첫째, 구상나무의 생육 분포 범위 파악을 위해 현존 분포도를 작성하고, 둘째, 구상나무의 분포에 영향을 미치는 생물학적인자와 비 생물학적 환경인자의 기여도를 분석하여 설명변수에 기인한 잠재분포도를 제작하고, 셋째, 적합한 보호구역 설정안을 제시하며, 기후변화가 향후 구상나무의 분포에 미치는 영향을 예측하는 것이다.

재료 및 방법

1. 조사지 개황

백운산은 전라남도 광양시 봉강면·다압면·옥룡면·진상면 그리고 구례군 간전면과 경계에 위치하고 있는 산으로 최고봉인 상봉의 높이는 1,222 m이다. 지리산 노고단(1,507 m)·만복대(1,437 m)·반야봉(1,732 m) 등과 함께 소백산맥의 고봉으로 전라남도에서 노고단 다음으로 높다. 서쪽으로 파리봉(1,147 m), 도솔봉(1,123 m) 동쪽으로 매봉(867 m), 억불봉(990 m)을 중심으로 남쪽을 향해 뻗치는 4개의 지맥을 형성하고 있으며, 섬진강 하류를 사이에 두고 남쪽은 백운산 북쪽은 지리산 권역이다. 다양한 식생이 잘 보존되어 있으며 환경부 멸종위기종 1급 광릉요강꽃과 2급인 나도승마·세뿔투구꽃의 서식지이기도 하다.

서울대학교 남부학술림에서 운영하고 있는 백운산 한재(850 m) 기상관측소의 최근 9년간(2006~2014) 기상관측자료에 의하면 연평균기온이 9.83°C이었으며, 1월 평균기온이 2.65°C, 8월 평균기온이 20.9°C였다. 연평균 강수량은 1,343.4 mm이었고, 4월 평균 강수량이 111.4 mm, 7월 평균 강수량이 218.43 mm, 8월 강수량이 254.38 mm로 나타났다.

2. 조사 및 연구방법

1) 구상나무 서식지 조사

본 연구에서는 상록침엽수인 구상나무 특성을 고려해 개체 확인이 유리한 봄과 겨울철에 현장 조사를 실시하였다. 1차 조사는 2013년 3월~5월 도솔봉, 파리봉, 형제봉, 한재 일대를 조사하였고, 2차 조사는 2014년 3월~5월 상봉, 매봉 일대를 그리고 2014년 12월 억불봉 일대에 대한 3차 조사를 실시하였다. 분포하는 구상나무 개체에 대한 조사는 주능선을 중심으로 좌우 계곡과 능선을 따라 구획

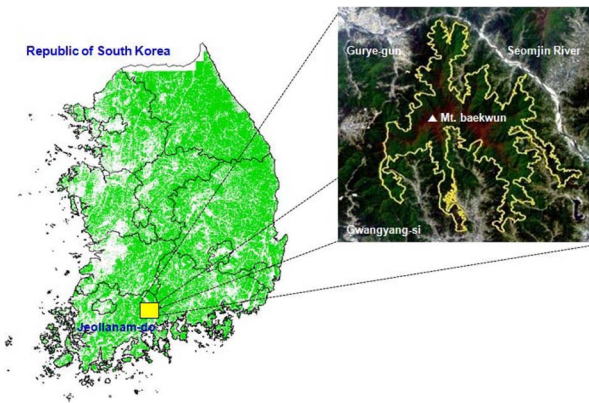


Figure 1. Location of study area.

하여 흉고직경 2.5 cm 이상의 개체에 한하여 조사하였으며, GPS(Global Positioning System)MMCX Comb를 이용 좌표를 측정하였고 추가적으로 수고(Haga hypsometer vertex), 수관 폭을 기록하여 현존분포도를 제작하였다.

2) 종 분포 모형

최근 종 보전 및 종의 생태적 지위를 파악하기 위해 종 분포에 대한 정량적 예측을 위한 다양한 통계적 방법이 시도되고 있다. 특히, 기후변화에 따른 생물종의 관리를 위한 통계적 회귀 방법을 이용한 다양한 종 분포 모델(Species Distribution Model)들이 개발되어 적용되고 있으며(Park et al., 2011), 생물종의 잠재적인 서식 분포를 파악하는 방법으로는 서식지 적합성 분석이 주로 이루어지고 있다(Lee, 2012). 환경요소에 대한 변수로는 회귀분석과 같은 방식으로 추출할 수 있다. 그러나 SPSS와 같은 통계 프로그램을 통해 구동되는 것이 아닌 독자적인 프로그램으로 구성되어 있으며, 모든 데이터는 ASCII 코드화하여 입력한다는 차이점이 있다. 또한 MaxEnt(Maximum Entropy Model)는 연속형 독립변수에 대해서는 거리에 따른 출현 확률 그래프로, 범주형 독립변수에 대해서는 범주별 출현 확률 그래프로 표현하여 분석의 결과물로 제공한다. 이를 통하여 서식지 적합성 평가 결과의 해석을 보다 간결하고 명확하게 할 수 있다(Kim, 2012) 일반적으로 종 분포 모형은 출현 자료만 입력하는 모형과 출현 자료와 비 출현 자료를 동시에 입력하는 모형으로 나눌 수 있다. 출현 자료만 입력하는 모형은 인공지능 체계를 사용하여 2진법으로 예측하는 GARP(The Genetic Algorithm for Rule-set Prediction) 모형과 최대 엔트로피(Maximum entropy approach) 기법으로 생물의 분포를 예측하는 MaxEnt 모형이 있다.

본 연구의 서식지 잠재력 평가에 이용된 생태적 지위 모형인 MaxEnt Model은 종에 대한 평균적인 정보를 최대화하는 회귀분석을 기반으로 한 모형으로 최대 엔트로피 접

근법이며 높은 예측 결과를 가질 수 있다(Phillips et al., 2004). 기존의 잠재력 평가 모형으로 이용된 GAM (Generalized Additive Model), ANN(Artificial Neural Network)이나 로지스틱 회귀분석과는 달리 비 출현 정보는 사용하지 않고, 알려진 서식처에서 나타나는 생물학적, 기후적, 지형학적인 변수인 생물종의 출현 정보만을 가지고 모형 화하여 출현 확률을 예측하는 방법으로 통계적 측면에서 우수성이 입증된 모형이다. 또한 표본구 숫자가 많지 않을 때도 적합하게 분석이 가능하다(Phillips and Dudik, 2008).

3) 서식지에 대한 잠재력평가

잠재력 평가는 구상나무가 존재하는 서식지의 생물적인 요소와 비 생물적인 요소를 분석하여 전체의 연구 사이트 안에서 구상나무 서식지로서 적합한 환경적 잠재력을 가지는 임분을 발견해내는 과정이다. MaxEnt 모형의 구동을 위해서는 구상나무의 현존분포도 작성이 우선되어야 하며, 설명되는 환경 변수들을 선택하고, GIS 프로그램을 통해 분석하여 변환하는 과정을 거쳐서 모형에 입력해야 한다.

Figure 2는 본 연구의 평가 과정을 나타낸다. 종속변수로 구상나무의 분포자료를 선택하였으며, 임상, 지형, 토양, 기후 관련 인자에서 추출한 변수를 환경적 설명 변수로 선정하였다. 변수들 간의 상관성과 기여도를 기초로 도출된 현재의 잠재 서식지를 근거로 결과를 평가하고 미래 기후변화 시나리오인 RCP 8.5의 기후인자를 적용하여 백운산 지역 구상나무의 미래예측분포도를 제작하였다. 정확성이 높은 미래예측분포도 제작을 위해 백운산과 주변 지역의 16개 기상관측소 기상 값을 바탕으로 보간법을 적용한 기후도를 제작하여 활용하였으며, 모든 변수는 10 × 10 m의 래스터 데이터로 만들어 분석하였다. 구상나무의 분포에 대한 기여도를 설명하고 잠재력을 평가하기 위한 변수로 서울대학교 남부학술림에서 2003년부터 2012년까지 조사한 백운산지역 8차기 산림조사부를 근거로 추출한 임상관련변수 4개, 지형 관련변수 6개, 토양 관련 변수 3개, 기후 관련 변수 8개 등 총 21개의 변수를 사용하였다.

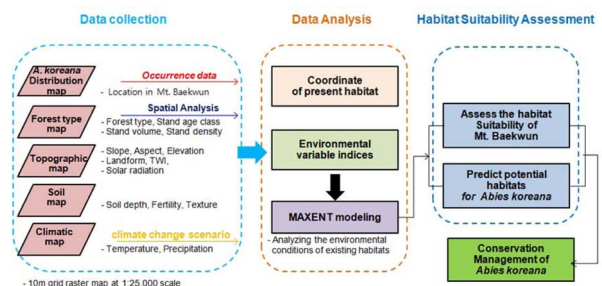


Figure 2. Research process to assess of *Abies koreana* habitats.

Table 1. Environmental explanatory variable indices

Category	Variables	Class	Description
Stand indices	Stand type	1	Coniferous forest,
		2	Deciduous forest,
		3	Mixed forest
	Stand age class	Stand age class (10-year interval)	
	Stand volume	m ³ /ha	
	Stand density	1	Low
		2	Medium
		3	Dense
Topographic indices	Slope	Slope (°)	
	Aspect	Linear transformed aspect [southwest (=0) to northeast (=2)]	
	Elevation	Elevation (m)	
	Landform	1	Ridge
		2	Upper slope
		3	Lower slope
		4	Valley
TWI	Topographic wetness index		
Solar	Potential radiation index		
Soil indices	Soil depth	1	Shallow (<30 cm)
		2	Medium (30-60 cm)
		3	Deep (>60 cm)
	Fertility	1	Low
		2	Medium
3		High	
Texture	1	Clay loam	
	2	Loam	
	3	Sandy loam	
Climate indices	Temperature	Mean January temperature(°C)	
		Mean April temperature(°C)	
		Mean August temperature(°C)	
		Mean annual temperature(°C)	
Precipitation	Mean January precipitation(mm)		
	Mean April precipitation(mm)		
	Mean August precipitation(mm)		
	Mean annual precipitation(mm)		

Table 1은 모형에 입력된 환경적 설명변수이다.

4) 모형의 검증

모형의 설명력 검증을 위해 구상나무 출현지 3,325 point 중에서 무작위로 25%를 추출하여 샘플 테스트 검증을 실시한 후 표본의 유의성에 의해 통계학적 분석을 하였으며, 모든 변수는 0에서 1로 규격화하여 교차 검증을 실시하였다. 검증은 ROC(Receiver Operating Characteristic) 분석 방법을 활용했으며, 분석 결과는 AUC(Area Under the Curve) 곡선 값에 의해 나타내었다. 신호 탐지 이론으로 시작된 ROC 곡선은 여러 개의 분류 모형 중 가장 좋은 모형을 선택하는 기준으로 종종 활용되는데 곡선 아래의 면

적이 가장 넓은 모형을 선택하면 된다. 또한 ROC 곡선은 두 개의 범주를 가지고 있으며 성능을 평가하기 위한 그래프로 민감도(Sensitivity)와 특이도(Specificity)의 관계가 있다.

평가 모형의 타당성을 검증하는 대표적인 방법 중의 하나인 ROC 곡선은 성과(performance)를 기반으로 한 분류 모형(classification model) 또는 분류자(classifiers)를 시각화할 수 있고 조직화하여 향상시킬 수 있으며 평가할 수 있는 유용한 방법이다(Centor, 1991). 곡선 그래프에서 알 수 있는 것은 분류 모형의 적합도이다. 이는 곡선 아래의 면적을 뜻하는 것으로 AUC 값이 0.5 이상 1이하의 값을 제공하며 1에 가까울수록 모델의 적합성이 좋음을 나타낸다

(Jing-Song et al., 2012). 계산식은 $MinROC\ dis.=\sqrt{[(1-Se)^2+(1-Sp)^2]}$ 이며, AUC 값의 평가 기준은 0.9~1(excellent), 0.8~0.9(good), 0.7~0.8(fair), 0.6~0.7(poor), 0.5~0.6(fail)으로 구분한다(Swets, 1988).

결과 및 고찰

1. 백운산 내 구상나무 현황

구상나무의 수직분포는 지리산 해발 1,050~1,900 m, 덕유산 1,350~1,590 m, 가야산 1,350~1,420 m, 한라산에서는 1,000~1,950 m로 산 정상부나 능선부의 암석지대에 많이 분포하고 있다(Lee and Hong, 1995). 현존분포도를 통해 살펴본 백운산의 구상나무는 주요 봉우리인 상봉, 억불봉, 도솔봉, 파리봉을 중심으로 분포하고 있었으며, 그중에서 해발고가 가장 높은 상봉 주변에서 더 많은 개체들이 확인되었다. 분포 면적은 150 ha에 이르며, 해발 900 m에서 구상나무 개체가 확인되어 1,200 m까지 분포하고 있었고, 서식지 조사에서 확인된 개체수는 3,325(DBH \geq 2.5 cm) 개체였다. 백운산의 최고봉인 상봉의 높이가 1,222 m임을 감안할 때 아고산지역을 중심으로 분포하고 있다는 것은 알 수 있었으나 고도에 대한 한계치는 확인할 수 없었다. 남사면보다는 겨울철 기온이 낮고 여름철 서늘한 북사면 쪽에 많이 분포하고 있으며, 계곡보다는 능선부에 분포가 집중되어 있었다. 능선 쪽으로 생육 서식지가 확장되어 있다는 것은 여름철 태풍이나 겨울철 강한 바람에 의해 뿌리의 지지력이 감소되어 뿌리 노출을 촉진시킬 뿐만 아니라 이러한 환경적 요인에 의한 겨울철과 봄철 건

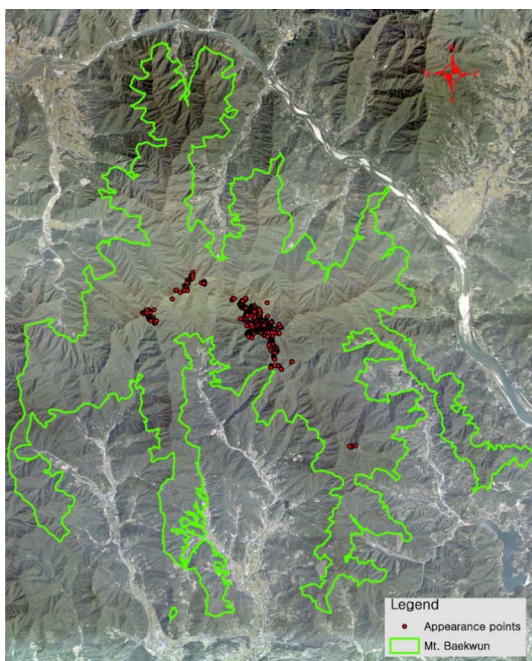


Figure 3. Current distribution of *Abies koreana* in Mt. Baekwun.

조피해의 우려를 가지고 있는 것으로 판단된다. Figure 3는 백운산에 서식하는 구상나무의 현존분포도이다.

2. 구상나무의 분포와 영향을 미치는 환경인자

서식지에 영향을 미치는 환경 인자를 평가하기 위해 교차 검증을 10회 실시하였다. 검증결과 구상나무의 잠재 분포 모형의 AUC 값은 0.893(Figure 4)으로 민감도와 특별성이 아주 높은 유의성을 가지고 있었다. Table 2는 구상나무의 분포에 영향을 미치는 설명변수에 대한 AUC 값이다. 구상나무에 대한 설명변수를 분석한 결과 9개의 환

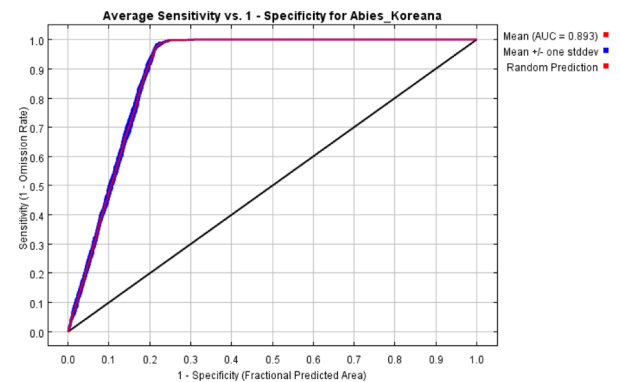


Figure 4. Performance result of potential distribution the model with *Abies koreana*.

Table 2. AUC of the environmental variables to the MaxEnt model.

Variables	AUC
Stand type	0.607
Stand age class	0.587
Stand volume	*0.855
Stand density	*0.701
Slope	0.579
Aspect	0.592
Elevation	*0.883
Landform	0.593
TWI	0.587
Solar	*0.700
Soil depth	0.522
Soil fertility	0.530
Soil exture	0.604
Mean January temperature	*0.874
Mean April temperature	*0.866
Mean August temperature	*0.862
Mean annual temperature	*0.868
Mean January precipitation	0.586
Mean April precipitation	0.592
Mean August precipitation	*0.841
Mean annual precipitation	0.587

*: AUC \geq 0.7

경 변수가 0.7 이상의 AUC 값을 가지고 있었고, 그중에서 임분 축적, 고도, 1월 평균기온, 4월 평균기온, 8월 평균기온, 연평균기온, 8월 강수량 등 7개 변수는 0.8 이상의 AUC 값이 나타났다. 특히 고도의 AUC 값이 0.883으로 구상나무의 분포에 가장 큰 영향을 미치고 있었다.

구상나무의 연륜 지수와 기후요소와의 상관분석을 해본 결과 구상나무의 생장은 4월, 전년 12월, 당년 1월 강수량과 유의한 양의 상관관계를 가지고 있으며, 4월은 구상나무가 생장을 시작하는 시기로 강우가 적을 경우 심각한 스트레스를 받는다고 하였으나(Koo et al., 2001) 본 연구에서는 8월 강수를 제외하고는 유의한 상관관계가 발견되지 않았다. 이는 백운산지역의 국지적 강수 편차가 크지 않기 때문인 것으로 보인다.

영향을 미치는 설명변수들의 반응곡선(Figure 5)에 의하면 구상나무는 해발 900~1,200 m에 대부분의 개체가 집중적으로 분포해 출현 빈도가 가장 높았고, 분포에 대한 환경적 설명변수 중에서 고도가 가장 큰 기여도를 가지고 있었다. 고도에 대한 영향력이 높다는 것은 상관관계를 가지고 있는 기온에 대한 영향력 또한 크다는 것을 대변해주는 것이다. 고산지대에서 수목한계선을 결정하는 가장 중요한 인자는 온도이며 해발고에 따른 분포 한계는 겨울철의 최저 기온에 의해 결정된다(Larcher and Bauer, 1981). 아고산수종인 구상나무의 생장 쇠퇴의 원인이 되는 겨울철 기온 상승(Koo et al., 2001)과 여름철 높고 따뜻한 온

도는 심각한 스트레스를 유발할 가능성이 있다. 서울대학교 남부학술림에서 1964년부터 2013년까지 50년간 관측한 광양지역 기상자료에 의하면 최초관측 10년간 평균 기온보다 최근 10년간 평균 기온이 0.56°C 상승한 것으로 관측되었으며, 평균 강수량은 큰 변화가 없었던 것으로 나타났다. 구상나무가 서식하고 있는 지역의 1월 평균 기온은 -1.8°C~-2.7°C 이었고, 4월 평균기온이 9.6°C~10.3°C 이었으며, 8월 평균기온은 22.6°C~23.2°C 로 나타났다. 연평균 기온은 10.4°C~11.2°C 이었으며, 임분 밀도가 낮은 지역이 출현빈도가 더 높게 나타났다. 백운산에 현존하고 있는 구상나무 서식지는 암 노출도가 높고 능선과 가까운 지역에 많이 분포한다. 활엽수와 경쟁에서 밀리고 있는 양상을 보이고 있지만 척박한 환경에 대한 강한 적응력을 보이면서 개체를 유지하고 성장해 나가고 있는 것이다. 같은 종의 식물이더라도 서식 형태에 따라 고온이나 저온이 수목에 미치는 영향은 상대적이다. 태양복사열이 낮은 지역에서 출현 빈도가 높게 나타나고 있는데 이는 대부분의 구상나무가 주능선을 중심으로 북사면에 분포하고 있는 결과에 의한 것이다. 이러한 결과와 반대로 지리산(경남 산청) 지역에서는 구상나무가 남사면에 다수 분포하고 있다(Kim, 2012). 지리산은 백운산에 비해 상대적으로 산세가 험하고 계곡이 깊으며, 위도가 높고 기온이 낮기 때문에 구상나무가 서식하기에 적절한 기후 조건을 가지고 있어 사면에 의한 영향을 받지 않는 것으로 보여진다.

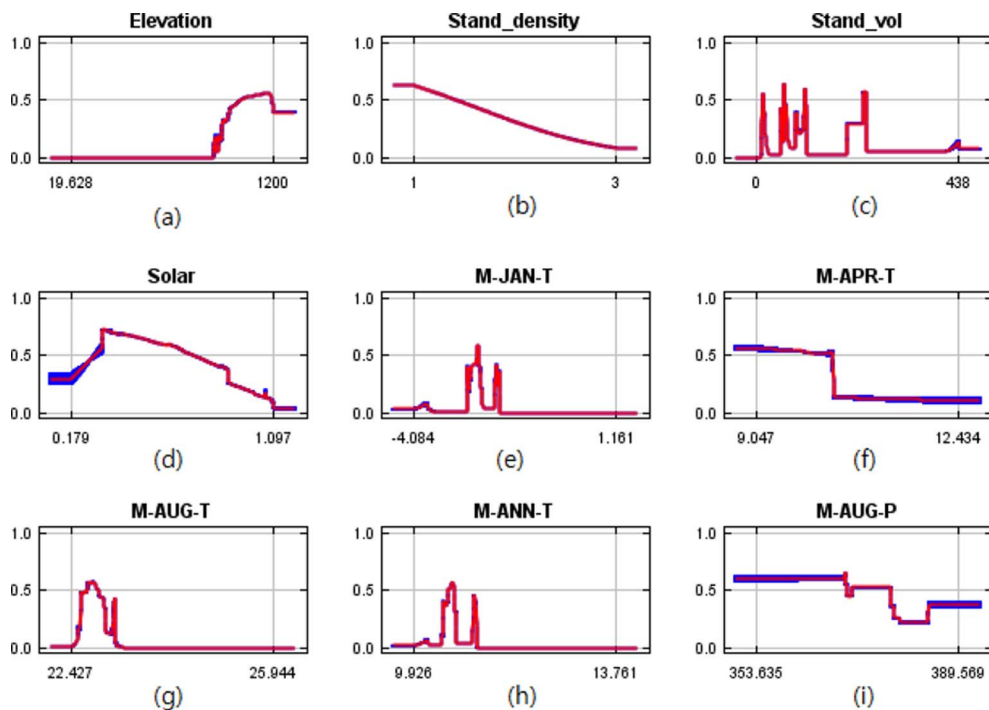


Figure 5. Response curves of environmental variables for the habitat suitability of *Abies koreana*. (a) Elevation (b) Stand density (c) Stand volume (d) Solar (e) Mean January temperature (f) Mean April temperature (g) Mean August temperature (h) Mean annual temperature (i) Mean January precipitation (j) Mean August precipitation.

3. 구상나무의 잠재 분포

현존분포도를 기준으로 서식지 적합성 평가를 통해 서식지 또는 대체서식지로서 잠재성을 가지고 있는 지역의 잠재분포도를 제시하고 기후변화 시나리오를 반영하여 미래의 잠재적 서식지를 예측하였다(Figure 6). 잠재분포도를 기반으로 현재 구상나무가 서식 가능한 지역은 상봉, 역불봉, 파리봉, 도솔봉을 중심으로 현존 분포 면적의 3배인 450 ha에 이른다. 주봉인 상봉 인근이 가장 서식에 적합한 지역으로 나타나고 있으며, 남사면보다는 북사면을 선호하는 경향을 보이고 있다.

서식지 적합성 평가에 기후변화 시나리오를 적용하는 객관적이고 과학적인 방법은 변수의 오차 확률을 줄일 수 있고 결과의 신뢰성을 높일 수 효과적인 분석 방법이다. 기후변화 시나리오 RCP 8.5를 적용하여 미래의 잠재적 분포를 분석한 결과 2050년에는 상봉 주변을 중심으로 20 ha로 감소될 것으로 나타나며, 2080년에는 서식에 적합한 지역이 존재하지 않을 것으로 예측된다. 이러한 결과로 볼 때 지구온난화가 가속화될수록 구상나무는 저지대에서 고지대로 서식지의 이동 양상이 뚜렷해질 것으로 판단된다. 구상나무의 서식에 적합한 450 ha에 이르는 잠재 서식지에 대한 보호구역 설정과 효율적 경영은 구상나무를 보존하는데 효과적인 방법으로 백운산 내에서 구상나무의 멸종을 늦출 수 있는 대안이라 할 수 있다.

지구온난화는 앞으로 다가올 지구의 미래로 인식되고

있다. 물론 온난화가 RCP 8.5 시나리오와 같이 2099년까지 전 세계적으로 6°C를 넘나드는 형태로 가속화되지 않을 수도 있지만 지구가 점점 더 더워지고 있다는 피할 수 없는 현실에 직면해 있는 것은 사실이다. 기후변화가 식물종과 생태계에 미치는 영향은 위협적이고 치명적이다. 식물도 기후변화에 적응하고 진화하겠지만 식물은 동물과 달리 이동속도가 극히 느려 기후가 변화하는 만큼 적합한 서식지로 이동하기에는 한계가 있는 것이다. 서식지 보호를 통해 생물 다양성을 유지하고 식물이 기후변화에 적응하고 진화할 수 있게 지속적으로 모니터링 하여 기초 자료를 축적하여 생물종의 보호에 주력해야 할 것이다.

결론

본 연구에서는 백운산에 서식하는 구상나무의 출현 정보를 기반으로 한 현존 분포도를 작성하고, MaxEnt 모형을 구동하여 구상나무의 서식에 영향을 미치는 환경인자의 기여도에 대한 평가로 잠재서식지를 도출하였으며, 평가 결과에 RCP 8.5 기후 변화 시나리오를 적용하여 향후 구상나무의 분포가 기후변화에 미치는 영향을 예측하였다. 이를 기반으로 기후변화를 고려한 구상나무의 서식에 적합한 보호구역 설정 안을 제시하였다. 구상나무는 야생동물이나 조류와 달리 기후변화에 대한 대응으로 이동통로가 필요하지는 않다. 보존을 위한 방법으로 현재 서식지의 주기적인 모니터링과 평가로 선호하는 환경에 대한 이해도를 높이고 기후 변화에 대한 영향력을 예측하여 적응력을 높일 것이 가장 좋은 방법이라 할 수 있다.

구상나무 보호를 위한 경영전략으로 첫째, 밀도가 낮은 지역에서 높은 출현율을 보이는 경향으로 분석해 볼 때 구상나무 주변의 유리한 광 조건으로 뿌리를 왕성하게 뻗고 있는 활엽수림을 일부 제거해 밀도가 과도하지 않게 하여야 한다. 이러한 빛에 대한 경쟁력 확보는 수목의 초살도를 높여 강한 바람에도 버틸 수 있고 안정감 있게 성장할 수 있도록 한다.

둘째, 수목은 수분부족 현상이 일어나면 체적이 감소하고 각 기관의 생장이 현저히 감소한다. 특히 침엽수는 활엽수에 비해 수분통도 저항성이 크기 때문에 건기가 길어지면 회복 또한 어렵게 된다. 능선부의 출현 빈도가 높은 구상나무는 수분에 대한 스트레스의 위험에 항상 노출되어 있다. 등산객에 의한 토양의 인위적 훼손 및 답압으로 인한 수분스트레스로부터 보호해야 할 것이다.

셋째, 서식지 적합성 평가를 통해 도출된 450 ha에 이르는 잠재서식지는 구상나무가 현존하고 있을 뿐 아니라 대체서식지로서 가능성을 가지고 있는 지역으로 구상나무가 서식하기에 유리한 지역이다. 이러한 지역을 대상으로 조림을 시행함으로써 다양한 유전자원을 확보하고, 기후

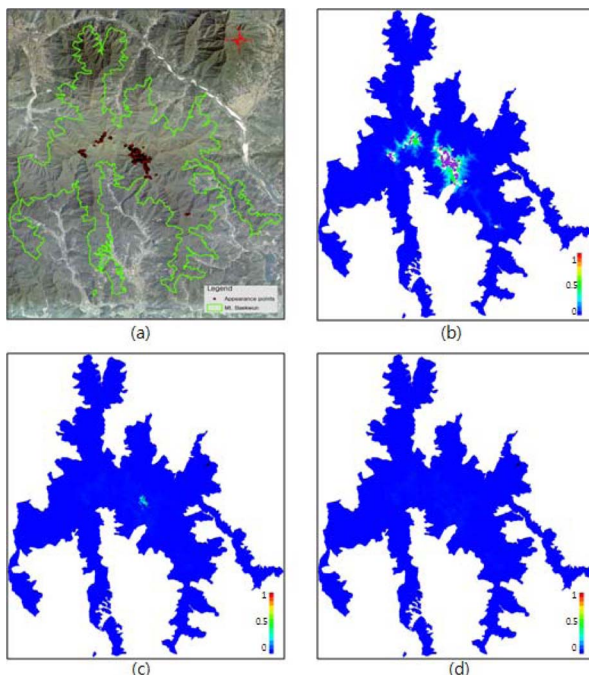


Figure 6. Distribution maps of *Abies koreana* used MaxEnt model. (a) Current distribution map, (b) Potential distribution map of *Abies koreana*, (c) Predicted distribution map of *Abies koreana* used RCP 8.5 (2050s), (d) Predicted distribution map of *Abies koreana* used RCP 8.5 (2080s).

변화에 대한 적응력이 높은 수종으로 거듭날 수 있도록 잠재서식지에 대한 보호구역설정과 대체서식지로서의 역할에도 무게를 두고 경영하여야 한다.

연구에 대한 한계점으로 백운산 해발고도가 구상나무 생육한계선 보다 낮음으로 인해 생육한계점을 이해할 수 있는 데이터 확보의 어려움이 있었으며, 또한 기후변화 시나리오와 중 분포 모델들이 환경 인자에 대한 부분을 완벽하게 고려하는 것 자체가 불가능하기 때문에 오차 확률이 내포될 수밖에 없다는 것이다. 이러한 특성상 중 분포 모형에 따른 예측 불확실 가능성이 존재한다. 따라서 신뢰성 높은 미래 잠재적 서식지를 도출하기 위해서는 분포지 예측의 불확실 가능성을 고려한 추후 발전된 연구가 요구된다. 이와 같은 연구결과는 보존가치가 매우 높은 한반도 특산식물의 기후변화에 의한 영향을 이해하고 정량화하여, 최종적으로 기후변화의 영향을 고려한 한반도의 생물종 보존 전략 및 경영전략 등에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 남부학술림에서 시행한 연구이며, RCP 8.5 미래 기후변화 시나리오는 기상청 기후변화 정보센터의 자료 제공에 의한 것임.

References

- Centor, R.M. 1991. Signal detectability: The use of ROC curve and their analyses, *Medical Decision Making* 11 pp. 102-106.
- IPCC. 2013. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. pp. 3-6.
- Jing-Song, S., Guang-Sheng, Z., and Xing-Hua, S., 2012. Climatic suitability of the distribution of the winter wheat cultivation zone in China.. *Eur J Agron* 43: 77-86.
- Kim, C.H. 2012. Vegetation Change and Growing Characteristics by Altitude of *Abies Koreana* Forest in Mt. Jiri National Park. Gyeongsang National University, Master Thesis. pp. 1-47 (in Korean with English abstract).
- Kim, H.G. 2012. A study on the method establishing Protected Areas for the Prediction of Habitat Distribution Changes of Living Species by Climate Change: Focused on Forest Vegetations, Birds and Amphibians. Seoul National University, Master Thesis pp. 25-29 (in Korean with English abstract).
- Koo, K.A., Park, W.K., and Kong, W.S. 2001. Dendrochronological Analysis of *Abies koreana* W. at Mt. Halla, Korea: Effects of Climate Change on the Growths. *Korean Journal of Environment and Ecology* 24(5): 281-288 (in Korean with English abstract).
- Larcher, W. and Bauer, B. 1981. Ecological significance of resistance to low temperature. *Encycl. Plant. Physiol. New Ser.* 12A. pp. 404-437.
- Lee, Y.W. 1995. Ecological Studies on the Vegetational Characteristics of the *Abies koreana* Forest. *Journal Korean Forest Society* 84(2): 247-257 (in Korean with English abstract).
- Lee, T.B. 2006. *Coloured Flora of Korea*(Volume one). Second edition. Hyangmun publisher. Seoul, Korea. pp. 131 (in Korean).
- Park, C.H., Yun, J.H., Kim, S.Y., Kim, S.Y., Lee, B.Y., Tanaka, N., and Nakao, K. 2011. Habitat Prediction and Impact Assessment of Climate Change on Korean Plants. *National Institute of Biological Resources* NO. 2011-01-032 pp. 10 (in Korean).
- Phillips, S., Anderson, R., and Schapire, R. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions, *Ecological Modelling* 190: 231-259.
- Phillips, S. and Dudik M. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* 31: 161-175.
- Swets, J.A. 1988. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science* 240 pp. 1285-1293.
- Shin, H.J., Park, G.A., Park, M.J., and Kim, S.J. 2012. Projection of Forest Vegetation Change by Applying Future Climate Change Scenario MIROC3.2 A1B. *Journal of Korean Association of Geographic Information Studies* 15(1): 64-75 (in Korean with English abstract).

(Received: February 3, 2015; Accepted: June 16, 2015)