

기후변화가 신갈나무의 적지분포에 미치는 영향

이영근¹ · 성주환¹ · 천정화¹ · 신만용^{2*}

¹국립산림과학원 산림생태연구과, ²국민대학교 산림환경시스템학과

Effect of Climate Changes on the Distribution of Productive Areas for *Quercus mongolica* in Korea

Young Geun Lee¹, Joo Han Sung¹, Jung Hwa Chun¹, Man Yong Shin^{2*}

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

²Department of Forest, Environment, and System, Kookmin University, Seoul 130-702, Korea

요약: 본 논문은 환경인자를 이용하여 우리나라에 생태권역별로 분포하는 신갈나무의 지위지수 추정식을 개발하고, 기후변화 시나리오를 적용하여 적지면적 및 적지분포의 연도별 변화를 추정하기 위해 수행하였다. 이를 위해 산림입지도와 전자기후도 및 기후변화 시나리오 RCP 4.5와 RCP 8.5를 사용하여 산림생산력에 영향을 미칠 것으로 판단되는 19개의 기후변수를 포함한 총 48개 환경인자를 도출한 후, 최적 조합에 의해 신갈나무의 생태권역별 지위지수 추정식을 개발하였다. 최종 생태권역별 신갈나무의 지위지수 추정식에는 각각 4-6개의 환경인자가 독립변수로 사용되었고, 지위지수 추정식의 설명력을 나타내는 결정계수는 0.36-0.49의 범위에 있는 것으로 분석되었다. 이 추정식은 모형의 평균편의, 정도, 표준오차의 3가지 평가통계량에 근거하여 검증한 결과 비교적 지위 추정능력이 높은 것으로 판명되었다. 또한 본 연구에서는 생태권역별 신갈나무의 지위지수 추정식과 기후변화 시나리오 RCP 4.5와 RCP 8.5를 연계하여 시간 경과에 따른 신갈나무의 연도별 적지면적 및 적지분포의 변화를 2020년부터 2100년까지 10년 단위로 추정하였다. 그 결과 시간이 경과함에 따라 신갈나무의 적지면적은 감소하는 것으로 나타났으며, 극한 기후변화 시나리오인 RCP 8.5를 적용할 경우 RCP 4.5에 비해 적지의 감소 폭이 훨씬 더 큰 것으로 예측되었다. 본 연구에서 얻어진 결과는 적지적수와 관련된 산림정책 수립에 유용한 정보로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract: This study was conducted to predict the changes of yearly productive area distribution for *Quercus mongolica* under climate change scenarios. For this, site index equations by ecoprovinces were first developed using environmental factors. Using the large data set from both a digital forest site map and a climatic map, a total of 48 environmental factors including 19 climatic variables were regressed on site index to develop site index equations. Two climate change scenarios, RCP 4.5 and RCP 8.5, were then applied to the developed site index equations and the distribution of productive areas for *Quercus mongolica* were predicted from 2020 to 2100 years in 10-year intervals. The results from this study show that the distribution of productive areas for *Quercus mongolica* generally decreases as time passes. It was also found that the productive area distribution of *Quercus mongolica* is different over time under two climate change scenarios. The RCP 8.5 which is more extreme climate change scenario showed much more decreased distribution of productive areas than the RCP 4.5. It is expected that the study results on the amount and distribution of productive areas over time for *Quercus mongolica* under climate change scenarios could provide valuable information necessary for the policies of suitable species on a site.

Key words: climatic change scenario, productive area, site index equation, digital site map, climatic map

서론

산림의 임지생산력은 자연적인 지형조건, 토양환경 조건, 그리고 기후요인에 의해 결정되며, 특히 기후조건은

하층식생뿐만 아니라 임목의 생육에 다양한 영향을 주고 있다(Kang et al., 1996, 1997). 효율적인 산림경영을 위해서는 산림 내에서 작용하는 환경조건을 고려한 적지적수의 판정이 중요한데, 산림경영의 목적에 부합하는 수종을 선택한 후 조림정책에 반영할 필요가 있다. 이를 위해서는 기후요인이 포함된 환경인자에 의해 수종별 지위지수

*Corresponding author
E-mail: yong@kookmin.ac.kr

추정식의 개발이 요구되며, 이를 통해 기후변화에 따른 산림생산성의 변화를 예측할 수 있는 정보로 활용할 수 있다.

외국의 경우 Nakawatase and Peterson(2006)은 미국 워싱턴주 올림픽산맥의 산림을 대상으로 상관분석 및 요인 분석을 통하여 산림의 성장-기후 관계를 구명하였으며, Albert and Schmidt(2010)는 노르웨이 가문비나무와 너도밤나무를 대상으로 토양과 기후 변화모델을 이용한 과거와 미래 기후변수를 사용하여 해당 임지에서의 산림생산성 변화를 분석하였다. 최근에는 위성영상의 보급과 GIS 응용기술의 향상으로 개발된 수치산림입지도와 전자기후도를 구조화된 데이터베이스 형태로 가공하여 연구에 활용하고 있는 추세이다. 이를 기반으로 전국 산림을 대상으로 임목생장에 영향을 미치는 임지 및 기상인자를 함께 고려한 수종별 지위지수 추정식을 개발할 수 있는 계기를 마련하게 되었다.

우리나라는 그동안 수치산림입지도에 나와 있는 임지 요인 및 토양환경 인자를 독립변수로 하는 수종별 지위지수 추정식을 조제하였지만(Koo et al., 2003; Won et al., 2005; Shin et al., 2005; Lee et al., 2007), 임지생산력에 영향을 미치는 중요한 요인 중의 하나인 기후인자를 고려하지 못한 한계를 가지고 있었다. 특히 기후변화가 산림생태계에 미치는 영향을 정밀하게 평가하기 위해서는 기후요인을 고려한 주요 수종의 지위지수 추정식 개발 및 적지 판정이 필요하다. 이러한 필요성에 따라 최근 기후요인을 고려한 주요 수종의 지위지수 추정식 개발 및 적지 판정과 관련된 연구가 수행된 바 있다(Korea Forest Research Institute, 2011). 또한 우리나라 산림을 지리적 특성을 고려하여 5개의 생태권역으로 구분한 후 지형, 토양, 그리고 기후요인이 독립변수에 포함된 생태권역별·수종별 지위지수 추정식을 개발하고 적지를 판정할 바 있다(Korea Forest Research Institute, 2012). 이 연구의 결과는 현재의 수종별 산림생산성 추정 및 적지 판정에 유용한 정보이지만 기후변화에 따른 미래의 수종별 적지분포의 변화를 예측하기 위해서는 상세 정보가 포함된 연도별 기후변화 시나리오의 적용이 필요하다.

최근 기상청에서는 우리나라에 적용할 수 있는 2100년까지의 연도별 기후변화 시나리오를 발표하였으며(Korea Forest research Institute, 2013), 이 시나리오는 다양한 기후변화 대응 전략 수립에 필요한 정보로 활용될 수 있을 것으로 평가된다. 따라서 기후요인이 포함된 주요 수종별 지위지수 추정식과 기후변화 시나리오를 연계할 경우 시간 경과에 따른 주요 수종의 적지 분포 변화를 예측할 수 있으며, 이러한 정보에 근거하여 기후변화에 대응할 수 있는 다양한 산림정책 수립이 가능할 것으로 판단된다.

참나무류에 속하는 신갈나무는 우리나라의 대표적인 자생 활엽수종의 하나이며, 한랭하고 바람의 피해가 적고 토

심이 깊은 임지에서 잘 자라는 수종으로 알려져 있다(Korea Forest Research Institute, 1992). 특히 신갈나무는 제탄, 버섯재배 자목 등 용재로서의 잠재성이 높은 수종으로 기후변화에 따른 임지생산력의 변화를 체계적으로 파악하여 관리 방안을 수립할 필요가 있다. 본 연구는 우리나라에 분포하는 주요 활엽수종 중에서 신갈나무를 대상으로 임지 및 기후요인이 독립변수에 포함된 생태권역별 지위지수 추정식을 개발하고, 기후변화 시나리오 RCP 4.5와 RCP 8.5를 적용하여 시간 경과에 따른 연도별 적지면적과 적지분포의 변화를 파악하기 위해 수행하였다.

재료 및 방법

1. 연구 자료

본 연구에서는 우리나라에 분포하는 신갈나무의 생태권역별 지위지수 추정식을 개발하고 기후변화에 따른 적지면적 및 적지분포의 연도별 변화를 예측하기 위해 수치산림입지도, 전자기후도, 그리고 기후변화 시나리오 RCP 4.5와 RCP 8.5에서 도출한 산림입지자료, 기후자료, 그리고 성장자료를 이용하였다. 한편 수치산림입지도와 전자기후도는 생태권역 구분에 따라 산악권역, 남동산악권역, 남서산악권역, 중부산악권역, 그리고 해안도서권역의 5개로 구분하여 사용하였다(Figure 1). 생태권역은 우리나라를 자연 지리적 특성과 생태적 연계성, 그리고 문화적 동질성을 기준으로 5개로 구분한 것이다(Shin and Kim, 1996).

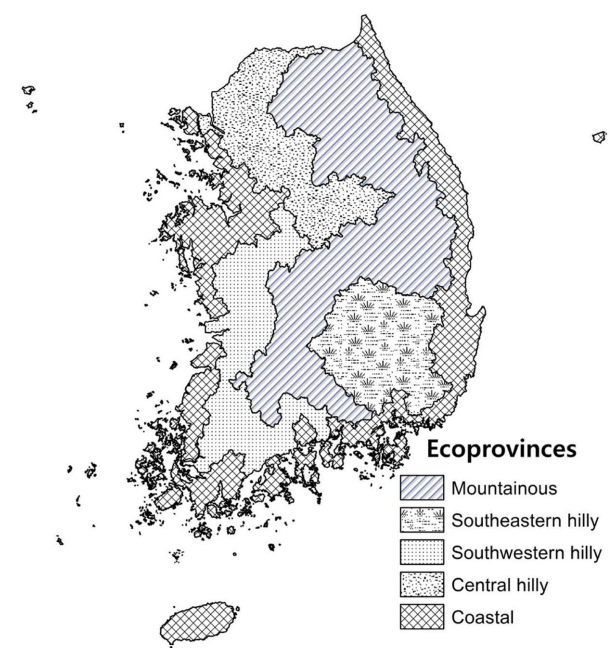


Figure 1. Ecoprovince classification of all forests in South Korea.

Table 1. Topography, soil, and climate variables used in this study.

Variables	Variable Name	Variables	Variable Name
X ₁	Topography	X ₂₅	Soil Moisture in Horizon A
X ₂	Climatic Zone	X ₂₆	Soil Moisture in Horizon B
X ₃	Parent Rock	X ₂₇	Soil Consistency in Horizon A
X ₄	Soil Drainage	X ₂₈	Soil Consistency in Horizon B
X ₅	Slope	X ₂₉	Distance to the Coast
X ₆	Altitude	X ₃₀	Annual mean temperature
X ₇	Sedimentary Type	X ₃₁	Annual maximum temperature
X ₈	Erosion State	X ₃₂	Annual minimum temperature
X ₉	Relief	X ₃₃	Warmth index
X ₁₀	Aspect	X ₃₄	Coldness index
X ₁₁	Available Soil Depth	X ₃₅	Index of aridity
X ₁₂	Rock Exposure	X ₃₆	Annual total precipitation
X ₁₃	Ratio of Valley to Hill	X ₃₇	Monthly mean of precipitation
X ₁₄	Wind Exposure	X ₃₈	Total precipitation for the growing season
X ₁₅	Weathering Degree	X ₃₉	Total precipitation for 3 months in the early growing season
X ₁₆	Soil Type	X ₄₀	Total precipitation for 5 months of non-growing season
X ₁₇	Soil Depth in Horizon A	X ₄₁	Monthly mean of sunshine duration
X ₁₈	Soil Depth in Horizon B	X ₄₂	Annual sunshine duration
X ₁₉	Soil Color in Horizon A	X ₄₃	Total sunshine duration for the growing season
X ₂₀	Soil Color in Horizon B	X ₄₄	Total sunshine duration for 3 months in the early growing season
X ₂₁	Organic Matters in Horizon A	X ₄₅	Monthly mean of relative humidity
X ₂₂	Organic Matters in Horizon B	X ₄₆	Monthly mean of relative humidity for 3 months in the early growing season
X ₂₃	Soil Texture in Horizon A	X ₄₇	Monthly mean of relative humidity for the growing season
X ₂₄	Soil Texture in Horizon B	X ₄₈	Monthly mean of relative humidity for 5 months of non-growing season

2. 연구 방법

1) 자료의 정리

산림입지자료에는 각 polygon별로 지형 및 토양과 관련된 29개의 입지환경인자가 포함되어 있다. 이 중에서 지형인자는 방위, 경사, 표고, 퇴적양식 등 13개이며, 토양인자는 토심, 토양형, 유기물 함량, 그리고 건습도 등 16개이다. 한편 전자기후도에 각 grid별로 나타난 기온, 습도, 강수량, 그리고 일사량 자료에 근거하여 입지생산력에 영향을 미칠 것으로 판단되는 19개의 기후인자를 도출하였다. 이 기후인자는 기온과 관련된 인자가 5가지, 습도와 관련된 인자는 4가지, 강수량 관련 인자는 5가지, 그리고 일사량과 관련된 인자는 4가지로 구성되어 있다. 결과적으로 본 연구에서 사용된 환경인자는 입지환경인자 29개와 기후인자 19개의 총 48개이다(Table 1).

기후변화에 의한 신갈나무의 적지분포 변화를 파악하기 위해 2012년 기상청에서 제공한 기후변화 시나리오 RCP 4.5(복사강제력 4.5 W/m², 해수면 72.7 cm 상승 예측)와 RCP 8.5(복사강제력 8.5 W/m², 해수면 90 cm 상승 예측)를 사용하였다. 신갈나무의 생태권역별 지위지수 추정식에 포함된 기후인자를 입력변수로 사용하기 위해 연도별 기후변화 시나리오의 기후값을 정리하였다. 기후변화 자료는 2013년~2100년까지의 월 단위 자료를 ARC-GIS프로그램을 통해 추출하였으며, Table 1의 19개 기후

인자(X₃₀~X₄₈)를 현재 및 2020년부터 2100년까지 10년 단위의 자료로 정리하여 기후변화가 신갈나무의 산림생산력에 미치는 영향을 평가하고자 하였다.

2) 기준 임령 30년에 대한 지위지수 추정

수치산림입지도에는 각 polygon별 대표 수종의 임령과 우세목의 수고와 같은 성장자료가 포함되어 있다. 입지환경인자 및 기후인자를 이용하여 지위지수 추정식을 도출하기 위해서는 종속변수인 지위지수를 각 polygon별로 산출하여야 한다. 한편 국립산림과학원에서 임령과 수고를 이용하여 기준임령 30년의 수종별 지위지수 추정식을 개발한 바 있다(Table 2). 본 연구에서는 수치산림입지도 데

Table 2. Parameter estimates of site index model.

Model		
ΔChapman-Richards model		
$SI = H_D \left[\frac{1 - e^{-bt_j}}{1 - e^{-bt_i}} \right]^c$		
Species	Parameter Estimates	
	b	c
Quercus mongolica	0.0342	0.9241

SI=site index, H_D=height of dominant trees, t_i= stand age, t_j= index age(30), b, c=regression coefficients to be estimated.

이터베이스에 신갈나무가 대표 수종인 polygon의 임령과 수고 자료를 이용하여 지위지수 추정식의 종속변수에 해당하는 기준임령 30년의 지위지수를 추정하였다.

3) 분석 자료의 분류

지위지수 추정식을 개발하기 위해 최종적으로 정리된 자료는 종속변수인 기준임령 30년의 지위지수(SI)와 독립변수인 48개의 환경인자이다. 이 자료는 분석을 위해 생태권역별로 데이터베이스화하였으며, 이 과정에서 자료의 무결성 및 각 변수의 범주를 벗어나는 이상치가 있는지를 점검하여 문제가 있는 자료는 분석에서 제외하였다.

이와 같이 정리된 자료는 7:3의 비율로 추정자료(fit data)와 검증자료(test data)로 무작위로 분류하였다. 추정자료는 회귀기법에 의해 생태권역별 신갈나무의 지위지수 추정식을 개발하기 위한 자료이며, 검증자료는 추정자료에 기초하여 얻어진 추정식의 통계적 검증에 사용되는 자료이다. 일반적으로 회귀모형을 사용하여 추정식을 개발할 경우 최종적으로 개발된 회귀 추정식의 효용성을 검증하게 되는데, 이때 검증에 사용될 독립자료를 확보하기 위해서는 별도의 비용과 노력이 요구된다. 이에 대한 대안으로 사용 가능한 전체 자료를 추정자료와 검증자료로 무작위로 분류한 후, 검증자료를 독립적으로 수집한 자료로 간주하여 통계검증 절차에 사용한다(Snee, 1977). 본 연구에서는 회귀추정의 적합성을 우선적으로 고려하여 지위지수 추정식 개발에 필요한 추정자료에 70%를 배정하고, 검증자료는 30%가 되도록 무작위로 분류하였다.

4) 생태권역별 지위지수 추정식의 개발

신갈나무의 생태권역별 최적 지위지수 추정식을 개발하기 위해 추정자료를 이용하여 기준임령 30년에서의 지위지수와 48개의 지형·토양인자, 그리고 기후인자 간의 상관분석을 실시하였다. 종속변수인 기준 임령 30년에서의 지위지수와 상관이 상대적으로 높은 환경인자를 선택한 후, 이들 변수 중에서 중회귀분석의 단계별 회귀기법(stepwise regression)에 의하여 지위지수 추정에 필요한 최적의 변수조합을 도출하였다. 이 과정에서 독립변수간의 내부상관이 있는지를 검증하였으며(Belsley et al., 1980; Myers, 1986; Judge et al., 1988), 내부상관의 문제를 제

거하면서 상대적으로 결정계수가 높은 지위지수 추정식을 작성하였다. 이상의 방법으로 조제된 지위지수 추정식은 검증자료에 근거하여 3가지 평가통계량을 산출함으로써 적합성을 검증하였다. 본 연구에서 사용한 평가통계량은 모형의 추정편의(estimation bias of model), 모형의 정도(precision of model), 그리고 이 두 가지를 고려한 측정치에 대한 오차의 평균평방화(mean square error type of measure)인 모형의 표준오차이다(Shin, 1990; Arbatzis and Burdhart, 1992; Shin et al., 1996).

본 연구에서는 최종적으로 추정자료와 검증자료를 합친 통합자료(pooled data)에 근거하여 최종 지위지수 추정식을 개발하였다. 즉, 추정자료만을 이용하여 작성된 지위지수 추정식이 일종의 독립자료로 간주되는 검증자료에 의해 통계적 검증에서 문제가 없는 것으로 판정된 경우, 최종 지위지수 추정식은 추정자료와 검증자료를 통합한 자료를 사용하여 개발하였다.

5) 기후변화 시나리오에 의한 연도별 적지의 판정

신갈나무의 적지판정은 앞에서 개발한 생태권역별 지위지수 추정식에 근거한 산림생산력에 의해 수행하였다. 즉, 적지판정의 기준은 기준임령을 30년으로 하는 수종별 지위지수 분류곡선식(Son et al., 2003)에 근거하여 동일 임령의 임목 수고분포가 평균치 이상이 됨을 의미하는 지위지수 '중' 이상을 적지로 판정하였다. 이를 근거로 설정한 신갈나무의 적지 기준은 지위지수 14 이상이다. 생태권역별 지위지수 추정식에 포함된 기후인자에 기후변화 시나리오의 연도별 기후값을 대입하여 연도별 적지면적과 적지분포를 예측하였다. 즉, 기후변화 시나리오의 기후값을 2013년부터 2100년까지 연도별로 지위지수 추정식에 대입하여 지위지수가 14 이상 polygon을 추출하여 연도별 적지면적을 산출하였으며, 해당 polygon의 공간분포에 따라 적지분포를 도해하였다.

결과 및 고찰

1. 생태권역별 지위지수 추정식의 조제

Table 3은 추정자료를 사용하여 단계별 회귀분석 기법에 의해 신갈나무의 생태권역별 지위지수 추정식을 도출

Table 3. Regression coefficients of site parameters to environmental variables by ecoprovince based on fit data set.

Ecoprovinces	n	Estimated equation of forest productivity	R ²
Mountainous	4,845	SI=24.6498-0.2416*X ₁₃ -0.3379*X ₂₅ -0.2409*X ₃₂ +0.0019*X ₃₉ -0.1858*X ₄₆	0.36
Southeastern hilly	78	SI=86.9863-0.5735*X ₂₅ -1.0955*X ₂₇ -0.1272*X ₃₃ -0.8756*X ₄₇	0.47
Southwestern hilly	254	SI=8.1459-0.1899*X ₉ +0.1035*X ₁₈ +0.0590*X ₃₂ +0.0004*X ₄₀ +0.0829*X ₄₇	0.35
Central hilly	567	SI=7.8247-0.8980*X ₂₆ -0.8019*X ₂₈ -0.4043*X ₃₂ +0.0149*X ₄₀ +0.0137*(X ₁₈ *Ln(X ₄₅))	0.50
Coastal	1,147	SI=27.5599-0.6175*X ₉ -1.0461*X ₂₅ -0.2226*X ₃₀ +0.0273*X ₄₀ -0.2226*X ₄₅	0.43

한 결과이다. 생태권역별 지위지수는 4-6개의 환경인자 조합에 의해 추정할 수 있는 것으로 나타났으며, 기후인자의 경우 연 평균기온, 연 최저기온과 같은 기온변수와 강수량 및 상대습도 관련 인자가 지위에 영향을 미치는 것으로 평가되었다. 특히 월평균 상대습도(X_{45})는 단독 또는 B층 토심(X_{18})과의 조합을 통해 하나의 독립변수를 구성하는 것으로 나타났다.

생태권역별로 지위에 영향을 미치는 기후인자를 보면 연 최저기온(X_{32})이 산악권역, 남서산야권역, 그리고 중부산야권역에 사용되었는데, 이는 신갈나무가 한랭성 수종이기 때문에 극한 기온이 생산성에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 그밖에 신갈나무의 산림생산력 추정에 미치는 강수량 관련 변수는 남동산야권역을 제외한 모든 권역에 사용되었다. 산악권역에서는 생장기간 초기 3개월 동안의 총강수량(X_{39})이 사용되었으며, 남서산야권역, 중부산야권역, 그리고 해안도서권역에서는 비생장 기간 동안의 총강수량(X_{40})이 산림생산성에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 한편 습도 관련 변수는 모든 권역의 지위지수 추정식에 포함되어 강수량과 함께 수분조건이 임지의 생산력에 영향을 미치는 것으로 판명되었다.

2. 생태권역별 지위지수 추정식의 검증

Table 4는 앞에서 조제한 생태권역별 신갈나무의 지위지수 추정식의 효용성을 평가하기 위해 검증자료에 근거하여 평가 통계량인 모형의 평균편의(MD), 모형의 정도(SDD), 그리고 모형의 표준오차(SED)를 생태권역별로 분석한 결과이다. 이는 생태권역별 지위지수 추정식을 생태권역별로 신갈나무의 분포지역에 적용 하였을 경우 얻어지는 지위지수 추정치와 실측치를 비교하여 조제한 지위지수 추정식의 적합성을 검증한 결과이다.

Table 4. Evaluation results of the estimation ability based on the test data set for site index equations by ecoprovince.

Ecoprovinces	n	MD	SDD	SED
Mountainous	2,077	0.0185	1.8189	1.8189
Southeastern hilly	33	0.4672	2.1741	2.5164
Southwestern hilly	105	-0.2305	1.7752	1.7582
Central hilly	243	0.2045	2.3177	2.3267
Coastal	491	0.0088	1.9033	1.9033

검증 결과를 보면 생태권역별 지위지수 추정식의 평균편의를 나타내는 MD는 절대값이 모두 0.5 m 이하로 비교적 작은 오차를 보였는데, 상대적으로 표본의 개수가 많은 산악권역과 해안도서권역은 0.02 m 이하로 높은 추정능력을 보이고 있다. 결과적으로 본 연구에서 분석한 생태권역별 신갈나무의 지위지수 추정식은 편의의 관점에서 효용성이 높은 것으로 판단된다. 한편 추정식의 정도 및 적합성을 나타내는 SDD와 SED는 남동산야권역과 중부산야권역이 다소 높지만 생태권역별로 큰 차이가 없는 것으로 나타나, 본 연구에서 조제한 지위지수 추정식의 정도(精度) 및 적합성에는 문제가 없는 것으로 평가되었다.

3. 생태권역별 신갈나무와 상수리나무의 최종 지위지수 추정식의 개발

본 연구에서 조제한 지위지수 추정식은 평가통계량에 의하여 검증한 결과 적합성에 문제가 없는 것으로 평가되었다. 추정자료와 검증자료를 통합한 자료에 의해 생태권역별로 조제한 신갈나무의 최종 지위지수 추정식은 Table 5와 같다. 이 추정식에 포함된 독립변수는 앞에서 추정자료에 근거하여 조제한 생태권역별 지위지수 추정식과 동일한 것으로 나타났다. 하지만 최종 추정식의 경우 검증자료와의 통합을 통해 표본의 수가 늘어났기 때문에 각 생태권역별 회귀계수는 다르게 추정되었다. 본 연구에서 최종적으로 개발한 지위지수 추정식은 자료의 통합을 통해 좀 더 효용성이 높은 식으로 개선된 것으로 판단된다.

생태권역별 신갈나무의 최종 지위지수 추정식은 4-6개의 환경요인에 의해 지위지수를 잘 추정하는 것으로 평가되었다. 생태권역별 신갈나무의 지위지수 추정식에 포함된 지형인자는 경사형태(X_9)와 능선 대 계곡비(X_{13})의 2개이며, 토양인자는 B층 토심(X_{18}), A층 건습도(X_{25}), B층 건습도(X_{26}), A층 건밀도(X_{27}) 그리고 B층 건밀도(X_{28})의 5개 인자가 사용되었다. 한편 기후인자 중에 기온 관련 변수는 연평균 기온(X_{30}), 연최저 기온(X_{32}), 그리고 온량지수(X_{33})의 3개이며, 강수량 관련 인자는 연총 강수량(X_{36}), 생장기간 초기 3개월 동안의 총 강수량(X_{39}), 그리고 비생장기간 5개월 동안의 총 강수량(X_{40})의 3개 변수이다. 또한 습도인자는 월평균 상대습도(X_{45}), 생장기간 초기 3개월 동안의 월평균 상대습도(X_{46}), 그리고 생장기간 동안의

Table 5. The final regression equations developed for the site index estimation by ecoprovince.

Ecoprovinces	n	Estimated equation of forest productivity	R ²
Mountainous	6,922	SI=25.2934-0.2562*X ₁₃ -0.3219*X ₂₅ -0.2318*X ₃₂ +0.0018*X ₃₉ -0.1929*X ₄₆	0.36
Southeastern hilly	111	SI=101.0547-0.3083*X ₂₅ -1.5547*X ₂₇ -0.1474*X ₃₃ -1.0411*X ₄₇	0.43
Southwestern hilly	363	SI=3.4351-0.1263*X ₉ +0.1032*X ₁₈ +0.0110*X ₃₂ +0.0012*X ₄₀ +0.0690*X ₄₇	0.39
Central hilly	810	SI=7.8147-0.8850*X ₂₆ -0.8335*X ₂₈ -0.3468*X ₃₂ +0.0198*X ₄₀ +0.0133*(X ₁₈ *Ln(X ₄₅))	0.49
Coastal	1,638	SI=26.8439-0.4731*X ₉ -0.9598*X ₂₅ -0.2186*X ₃₀ +0.0275*X ₄₀ -0.2215*X ₄₅	0.41

Table 6. Estimation of productive areas for *Quercus mongolica* based on the site index equations and climate change scenarios.

Year	RCP 4.5			RCP 8.5		
	Polygon(n)	Area(Ha)	Rate(%)	Polygon(N)	Area(Ha)	Rate(%)
Current	60,929	1,146,181	20.5	61,929	1,146,181	20.5
2020	44,551	868,803	15.5	33,951	660,231	11.8
2030	37,858	743,920	13.3	21,864	448,537	8.0
2040	28,767	573,459	10.2	16,521	340,680	6.1
2050	23,063	466,010	8.3	11,697	247,195	4.4
2060	18,811	384,203	6.9	9,727	210,790	3.8
2070	11,965	254,532	4.5	7,165	159,570	2.8
2080	10,897	234,576	4.2	4,558	102,559	1.8
2090	8,093	174,253	3.1	3,005	69,715	1.2
2100	6,717	146,376	2.6	1,916	44,385	0.8

월평균 상대습도(X_{47})의 3개 변수가 신갈나무의 생태권역별 지위지수 추정에 영향을 끼치는 것으로 나타났다.

Table 5에서 보는 바와 같이 본 연구에서 개발한 최종 생태권역별·수종별 지위지수 추정식의 결정계수는 0.36~0.49의 범위에 있다. 산악권역의 결정계수가 0.36으로 제일 낮고, 중부산야권역의 결정계수가 0.49로 가장 높다. 이는 전체 자료가 갖는 지위지수의 변이 중에서 선정된 추정식에 의해 설명되어지는 부분이 50% 미만인 것을 의미한다. 본 연구에서는 신갈나무를 대상으로 산림생산력을 몇 가지 환경요인에 의해 기후변화에 따른 미래 한반도의 적지분포를 예측하는 것이 목표이지만, 산림생산력은 복잡한 환경요인에 의해 결정되기 때문에 높은 결정계수를 얻는 것은 한계에 있다. 실제로 Kim et al.(2012)은 기후변화에 따른 낙엽송의 지위지수 추정식을 개발한 결과 설명력은 14%에 불과한 것으로 보고하였다.

외국의 경우에도 산림생산력의 추정을 위하여 지위지수 추정식 개발을 해왔는데(Corona et al., 1998; Curt et al., 2001; Kabrick et al., 2004), 모형의 설명력은 높지 않은 것으로 보고되었다. 스코틀랜드에서는 기상 및 토양, 그리고 입지인자 이외에 시업년도를 추가하여 미송 조림지의 지위를 예측하여 45.5%의 설명력을 보였다(Tyler et al., 1996). 또한 Corona et al.(1998)은 이탈리아 미송의 지위지수 추정을 위해 토양 및 기상인자를 이용한 지위지수 추정식을 조제하여 그 설명력이 39%이었지만 수목의 생장에 입지토양환경인자가 복합적으로 작용하는 산림생태계 내에서는 적절한 추정식으로 판정된 바 있다. 한편 Albert and Schmidt(2010)는 토양과 기후인자를 사용하여 노르웨이 가문비나무와 너도밤나무의 지위지수 변화를 분석하였지만 그 설명력은 각각 39%와 34%인 것으로 보고하였다.

4. 기후변화 시나리오에 의한 연도별 적지면적의 변화 예측

우리나라를 대표하는 활엽수종의 하나인 신갈나무는

전체 생태권역에 분포하고 있다. 지위지수 추정식에 의한 현재의 전국 단위 적지면적은 약 115만 ha (20.5%)로 다소 과대 추정된 경향을 보이고 있다. 하지만 기후변화 시나리오를 적용하여 연도별 적지면적을 추정한 결과 시간이 지나면서 적지면적이 급격하게 감소하는 것으로 예측되었다. 기후변화 시나리오에 의하면 2030년이 되면 신갈나무의 적지면적은 RCP 4.5에서는 약 36% 감소한 74만 ha가 되지만, RCP 8.5를 적용하면 약 60%가 감소한 45만 ha로 예측되었다. 또한 2050년에는 시나리오별로 적지가 각각 47만 ha와 25만 ha로 감소하며, 2100년에는 적지가 더욱 줄어 각각 15만 ha와 4만 ha 정도가 될 것으로 예측되었다. 신갈나무는 한랭성 수종이지만 기후변화에 의해 온난화가 진행되어도 고산지역을 중심으로 일정 수준의 적지가 확보되는 것으로 예측되었다.

5. 기후변화 시나리오에 의한 연도별 적지분포의 변화 예측

적지면적은 수치상으로만 확인된 정보이지만 산림정책 결정자 또는 산림경영자의 입장에서는 적지면적보다는 적지의 공간분포가 더 유용한 정보로 활용될 수 있다. 본 연구에서는 기후변화 시나리오 RCP 4.5와 RCP 8.5를 적용하여 신갈나무의 연도별 적지분포의 변화를 분석하였다. Figure 2는 신갈나무를 대상으로 현재의 적지분포와 기후변화 시나리오 RCP 4.5를 적용하여 2030년, 2050년, 그리고 2090년의 적지면적을 산출한 후 그 분포를 비교한 것이다. 이 시나리오에 의하면 신갈나무의 적지면적은 2030년이 되면 현재보다 약 35% 정도 감소하여 74만 ha가 될 것으로 추정되었다. 현재의 적지분포와 비교하면 전체적으로 적지가 감소하는데, 특히 강원도 지역의 적지가 많이 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 2050년에는 적지면적이 2030년에 비해 약 36% 정도 감소하면서 적지는 47만 ha가 되는 것으로 예측되었다. 이 시점의 적지분포는 2030년과 비교하여 경기도 동부, 강원도, 그리고 경상북도 지

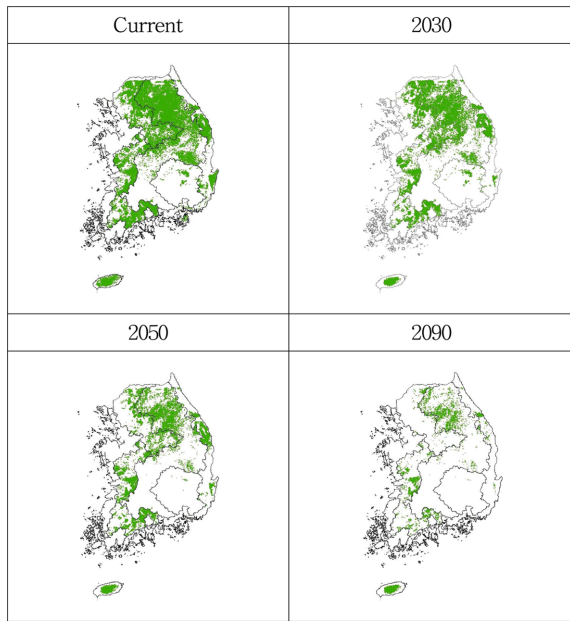


Figure 2. Comparison of yearly distribution for the productive areas of *Quercus mongolica* by RCP 4.5.

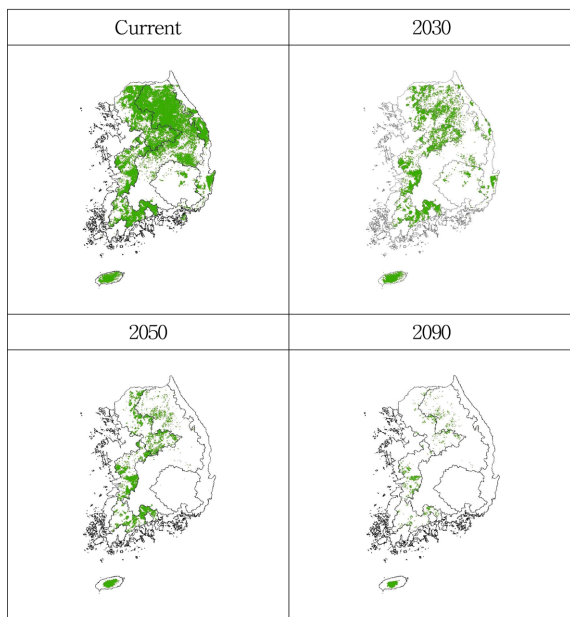


Figure 3. Comparison of yearly distribution for the productive areas of *Quercus mongolica* by RCP 8.5.

역 등 전반적으로 골고루 나타나는 것으로 분석되었다. 이와 함께 2090년에는 적지면적이 17만 ha까지 감소하며, 적지는 강원도 일부 지역에만 분포하는 것으로 추정되었다.

한편 극한 기후변화 시나리오인 RCP 8.5를 적용하면 연도별 신갈나무의 적지분포는 더 큰 변화를 겪게 되는 것으로 예측되었다(Figure 3). 신갈나무는 극심한 기후변화가 일어날 경우 2030년이 되면 적지면적이 현재의 39% 수준인 약 45만 ha로 급속하게 감소할 것으로 예측되었는

데 강원도 지역의 적지가 대폭 감소할 것으로 추정되었다. 또한 2050년에는 적지면적이 25만 ha까지 감소하는데, 적지분포를 보면 강원도 동부지역이 적지에서 대부분 제외되는 것으로 예측되어 강원도의 적지면적 비율이 크게 낮아지는 것으로 분석되었다. 이러한 추세는 시간이 경과하면서 동일한 형태로 지속되는데 2090년에 이르면 신갈나무의 적지면적은 현재 적지면적의 6%에 해당하는 약 7만 ha에 불과할 것으로 예측되었다. 그 결과 적지도 강원도 서부, 충청도 남부, 그리고 제주도 일부 지역에 제한적으로 분포하는 것으로 평가되었다.

결론

본 연구는 우리나라를 대표하는 활엽수종인 신갈나무를 대상으로 생태권역별 지위지수 추정식을 개발하고 기후변화에 의한 연도별 적지분포의 변화를 예측하였다. 신갈나무는 생태권역별로 4~6개의 환경인자에 의하여 지위지수를 추정할 수 있는 것으로 평가되었다. 특히 생태권역별로 경사형태, B층 토심, A층 건습도, 연 최저기온, 비생장기간 동안의 총 강수량, 그리고 월평균 상대습도가 지위지수 추정에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 생태권역별 지위지수 추정에는 기온, 강수량, 그리고 습도 관련 기후인자들이 골고루 사용된 것으로 분석되었다. 한편 지위지수 추정식에 포함된 기후인자에 기후변화 시나리오 RCP 4.5와 RCP 8.5에 나타난 연도별 기후값을 대입하여 시간 경과에 따른 적지분포의 변화를 예측한 결과 시간이 경과할수록 적지면적이 감소하고, 특히 극한 기후변화 시나리오인 RCP 8.5를 적용할 경우 적지의 감소 폭이 큰 것으로 평가되었다.

본 연구의 결과는 지위지수 추정식에 포함된 기후인자 추정치의 연도별 변화에 따른 신갈나무의 적지분포 변화를 예측한 것이다. 하지만 본 연구에서 분석한 자료의 기반이 되는 생태권역별 지위지수 추정식에는 기후인자 외에 지형인자와 토양인자가 포함되어 있다. 지형조건과 토양조건은 시간이 경과하여도 큰 변화가 없을 것으로 판단된다. 하지만 기후변화 시나리오에 의한 적지의 변화를 위해 설정한 기간은 2100년까지 장기간으로 토양조건은 경우 기후변화에 의해 간접적인 영향을 받을 것으로 판단된다. 하지만 현 단계에서는 이러한 변화 가능성을 논리적으로 정량화할 수 있는 방법이 없다. 본 연구는 산림생산성에 영향을 미치는 다양한 환경요인 중 기후변화만을 고려한 한계를 가지고 있지만, 지위지수 추정식을 사용하여 RCP 4.5와 RCP 8.5의 기후변화 시나리오를 바탕으로 예측한 연도별 신갈나무의 적지면적 및 적지분포의 변화 예측 결과는 다양한 산림정책 수립에 필요한 유용한 정보로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2013년 국립산림과학원 산림생태연구과 위탁연구과제 ‘기후요인을 고려한 생태권역별 주요 수종의 지위지수 추정식 개발’ 연구 결과의 일부입니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Albert, M. and Schmidt, M. 2010. Climate-sensitive modeling of site-productivity relationships for Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and common beech (*Fagus sylvatica* L.). *Forest Ecology and Management* 259: 739-749.
- Arbatzis, A.A. and Burkhart, H.E. 1992. An evaluation of sampling methods and model forms for estimating height-diameter relationships in loblolly pine plantation. *Forest Science* 38(1): 192-198.
- Belsley, D.A., Kuh, E., and Welsch, R.E. 1980. *Regression diagnostics*. John Wiley & Sons. New York. pp. 292.
- Corona, P., Scotti, R., and Kutner, M.H. 1998. Relationship between environmental factors and site index in Douglas-Fir plantation in central Italy. *Forest Ecology and Management* 110: 195-207.
- Curt, T., Bouchaud, M., and Agrech, G. 2001. Predicting site index of Douglas-Fir plantations from ecological variables in the Massif Central area of France. *Forest Ecology and Management* 149: 61-74.
- Judge, G.G., Hill, R.C., Griffiths, W.E., Lutkepohl, H., and Lee, T.C. 1988. *Introduction to the theory and practice of econometrics*. John Wiley & sons. New York. pp. 1024.
- Kabrick, J.M., Shifley, S.R., Jensen, R.G., Fan, Z., and Larsen, D.R. 2004. Factors associated with oak mortality in Missouri Ozark forest. *USDA Forest Service General Technical Reports NE-316*. pp. 27-35.
- Kang, Y.H., Jeong, J.H., Kim, Y.G., and Lee, W.G. 1996. Mapping of the righteous tree selection for a given site by using of digital terrain analysis on a northern temperate forest. *Journal of Forest Science* 54: 94-103.
- Kang, Y.H., Jeong, J.H., Kim, Y.G., and Park, J.W. 1997. Mapping of the righteous tree selection for a given site by using of digital terrain analysis on a central temperate forest. *Journal of Korean Forest Society* 86(2): 241-250.
- Kim, D.H., Kim, E.G., Park, S.B., Kim, H.G., and Kim, H.H. 2012. Analysis of the effect of climate change on the site index of *Larix leptolepis*. *Journal of Korean Forest Society* 101(1): 53-61.
- Koo, K.S., Kim, I.H., Jeong, J.H., Won, H.K., and Shin, M.Y. 2003. Estimation of site index by species in Gyungi and Chungcheong Provinces using a digital forest site map. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 5(4): 247-254.
- Korea Forest Research Institute. 1992. *Illustrated Woody Plants of Korea*. pp. 562.
- Korea Forest Research Institute. 2011. Development of site index equations and estimation of productive areas for main species based on environmental and climatic factors. pp. 71.
- Korea Forest Research Institute. 2012. Development of site index equations for main tree species by ecoprovince classification based on environmental and climatic factors. pp. 101.
- Korea Forest Research Institute. 2013. Development of site index equations for main tree species by ecoprovince classification based on environmental and climatic factors(3). pp. 135.
- Lee, S.W., Won, H.K., Shin, M.Y., Son, Y.M., and Lee, Y.Y. 2007. Estimation of forest productive area of *Quercus acutissima* and *Quercus mongolica* using site environmental variables. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 40(5): 429-434.
- Myers, R.H. 1986. *Classical and modern regression with applications*. Duxbury Press. pp. 395.
- Nakawatase, J.M. and Peterson, D.L. 2006. Spatial variability in forest growth-climate relationships in the Olympic Mountains, Washington. *Canadian Journal of Forest Research* 36(1): 77-91.
- Shin, J.W. and Kim, C.M. 1996. The ecosystem classification in Korea(I): Ecoprovince classification. *Journal of Forest Science* 54: 188-189.
- Shin, M.Y. 1990. The use of ridge regression for yield prediction models with multicollinearity. *Journal of Korean Forest Society* 79(3): 260-268.
- Shin, M.Y., Jung, I.B., Koo, K.S., and Won, H.G. 2006. Development of a site index equation for *Pinus koraiensis* based on environmental factors and estimation of productive areas for reforestation. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 8(2): 97-106.
- Shin, M.Y., Yun, J.W., and Cha, D.S. 1996. Local correction of tree volume equation for *Larix leptolepis* by ratio-of-means estimator. *Journal of Korean Forest Society* 85(1): 56-65.
- Snee, R.D. 1977. Validation of regression models : Methods and example. *Technometrics* 19:415-428.
- Son, Y.M., Lee, K.H., Kwon, S.D., and Lee, W.K. 2003. Evaluation and prediction system of tree resources. *Report of Forest Research* 04-01 pp. 49-52.
- Tyler, A.L., Macmillan, D.C., and Dutch, J. 1996. Models to predict the general yield class of Douglas-fir, Japanese larch and Scots pine on better quality land in Scotland. *Forestry* 1: 13-24.
- Won, H.K., Jeong, J.H., Koo, K.S., Song, M.H., and Shin, M.Y. 2005. Estimation of forest site productivity by regional environment and forest soil factors. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 7(2): 132-140.