환경요인에 의한 상수리나무와 신갈나무의 임지생산력 및 적지 추정

신만용^{1*} · 성주한² · 천정화²

¹국민대학교 산림환경시스템학과, ²국립산림과학원 산림생태연구과
(2012년 3월 30일 접수; 2012년 6월 28일 수정; 2012년 6월 30일 수락)

Estimating Forest Site Productivity and Productive Areas of *Quercus acutissima* and *Quercus mongolica* Using Environmental Variables

Man Yong Shin^{1*}, Joo Han Sung² and Jung Hwa Chun²

¹Dept. of Forest, Environment and System, Kookmin Univ., Seoul 130-702, Korea

²Division of Forest Ecology, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

(Received March 30, 2012; Revised June 28, 2012; Accepted June 30, 2012)

ABSTRACT

This study was conducted to estimate forest site productivity and productive areas of *Quercus acutissima* and *Quercus mongolica* using environmental factors including climatic variables. Using the data set from digital forest site map and forest climatic map, a total of 43 environmental variables were regressed on site index for developing the best site index equations for *Quercus acutissima* and *Quercus mongolica*. Five to six environmental factors by species were selected as independent variables in the best site index equations. For the site index equations, three evaluation statistics (i.e., mean difference, standard deviation of difference, and standard error of difference) were applied to the test data set for the validation of the results. The site index equations fitted well to the test data set with relatively low bias and variation. As a result, it was concluded that the site index equations by species were well capable of estimating site quality. Finally, based on the site index equations, the productive areas by species were estimated by applying GIS technique to the digital forest maps. In addition, the distribution of productive areas by species was illustrated.

Key words: Forest site productivity, Site index equation, Productive site, Climatic variables, Digital forest climatic map

I. 서 론

산림의 임지생산력은 지력, 기후, 종 분포 등 산림 생태계를 구성하는 내·외적인 요인들에 의해 발휘되는 산림의 총체적 잠재 생산력을 말한다. 따라서 산림 내의 환경조건을 정확히 파악하고 그 임지의 생산성과 산림경영 및 관리의 목적에 맞는 최적의 수종을 선택하여 조림을 실시할 필요가 있다. 참나무류에 속하는

상수리나무와 신갈나무는 우리나라의 대표적인 자생 활엽수종이며, 국내 총 임목축적량의 약 11.6%를 차지하는 귀중한 자원 수종이다(Korea Forest Service, 2010). 특히 제탄, 버섯재배 지목 등 용재로서 잠재적 효용성이 높은 수종이므로 참나무류에 대한 생장 및 생태 특성을 반영하는 임지생산력을 체계적으로 파악하여 관리 방안을 수립할 필요가 있다.

우리나라는 그동안 임령과 수고의 관계식을 이용하여

* Corresponding Author : Man Yong Shin
(yong@kookmin.ac.kr)

수종별 지위지수 분류곡선을 개발함으로써 임지생산력을 추정하여 왔으며(Korea Forest Service, 2001), 이러한 지위추정 방법은 비교적 추정의 정확도가 높아 활용도가 높은 편이다. 하지만 이 방법은 생장에 영향을 미치는 다양한 환경 인자들을 충분히 반영하지 못하고 있다는 단점과 무림목지나 산불 피해지, 그리고 수종 갱신지와 같은 곳에서는 직접 활용할 수 없는 한계를 가지고 있다.

임지생산력과 관련하여 산림에 대한 체계적이고 효율적 관리의 필요성이 제기됨에 따라 우리나라는 2002년에 산림입지조사를 전국적으로 실시하여 수치산림입지도를 제작하였으며, 이를 통해 수치산림입지도의 속성인자인 입지요인 및 토양환경 인자를 독립변수로 하는 수종별 지위지수 추정식을 제안한 바 있다(Koo *et al.*, 2003, 2010). 하지만 이러한 연구결과는 임지생산력에 영향을 미치는 중요한 요인 중의 하나인 기후인자를 고려하지 못한 한계를 가지고 있었다.

임목의 생장에 영향을 미치는 환경조건 중에서 기후환경은 인위적 조절이 불가능하기 때문에 임목이 생육하고 있는 지역의 국지기후가 임목 생장에 미치는 영향을 규명하고 수종별 적지 정보에 근거한 임분 조성이 필요하다(Kim *et al.*, 2001). 기후인자를 포함한 환경인자 중에서 생장에 영향을 미치는 인자들의 최적조합으로 정확성이 높은 수종별 지위지수 추정식을 개발한다면, 이미 구축되어 있는 수치산림입지도와 수치산림기후도를 활용하여 환경 특성이 반영된 수종별 임지생산력과 적지를 추정할 수 있을 것이다.

본 연구는 기후요인을 포함한 환경 인자를 이용하여 우리나라에 분포하는 주요 활엽수종인 상수리나무와 신갈나무의 지위지수 추정식을 산출하고 적지를 판정하기 위해 수행하였다. 상수리나무와 신갈나무의 적지면적뿐만 아니라 적지분포를 도해하여 기후변화 시나리오에 따른 수종별 적지 분포의 변화를 예측할 수 있는 기반을 구축하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 연구 자료

우리나라는 지난 1995년부터 전국 산림을 대상으로 조사된 산림입지 자료에 근거하여 수치산림입지도를 제작한 바 있으며, 최근에는 수치 산림기후도(Yun, 2010)를 제작하여 실무에서 활용하고 있다. 본 연구에

서는 우리나라에 분포하는 상수리나무와 신갈나무의 수종별 지위지수 추정식을 개발하고 적지면적을 산출하기 위해 수치산림입지도와 산림기후도에 나와 있는 다각형(polygon)별 산림입지자료, 지형자료, 기후자료, 그리고 생장자료를 이용하였다.

2.2. 연구 방법

2.2.1. 자료의 정리

산림입지자료에는 각 다각형별로 지형 및 토양과 관련된 28개의 입지환경인자가 포함되어 있다. 이 중에서 지형과 관련된 인자는 표고, 경사, 방위, 경사형태, 퇴적양식 등 12개이며, 토양과 관련된 인자는 토심, 토양형, 토색, 유기물 함량, 토성, 전습도, 그리고 건밀도 등 16개로 총 28개이다(Table 1). 수종별 지위지수 추정식을 도출하기 위해 사용된 수치산림입지도의 28개 인자 중에서 경사, 표고, 방위, 그리고 유효토심은 실측치를 사용하였으며, 나머지 24개 인자는 모두 수치로 코드화하여 분석에 이용하였다. 특히 지형인자인 방위의 경우 조사된 방위각을 레디안(radian)으로 변환하여 분석에 사용하였다.

기후인자는 수치산림기후도에 각 격자별로 나타난 기온, 강수량, 그리고 일사량 자료에 근거하여 임지의 생산력에 영향을 미칠 것으로 판단되는 15개 변수($X_{29} \sim X_{43}$)를 도출하였다(Table 1). 이 중에서 기온과 관련된 인자는 연 평균기온, 연 최고기온, 연 최저기온, 온량지수, 그리고 한냉지수의 5가지이며, 강수량으로부터 도출한 인자는 연 총강수량을 포함한 5가지, 그리고 일사량과 관련된 인자는 4가지이다. 이들 기후변수를 도출하는 과정에서 온량지수(X_{32})와 한냉지수(X_{33})는 월 평균기온을 이용하여 계산하였고(Kim, 1975; Yim, 1985), 건조지수(X_{34})는 강수량과 평균기온과의 관계를 이용하여 산출하였다(Kramer, 1988). 또한 임목의 생장기간은 4월부터 10월까지의 7개월간의 자료를 이용하였으며, 생장기간의 초기 3개월은 4월부터 6월까지의 자료를 사용하였다. 비생장기간은 11월부터 3월까지의 5개월간을 의미한다. 나머지 기후변수는 월별 기온, 강수량, 그리고 일조시수에 대해 월 평균이나 연간 합계를 산출하여 구하였다.

2.2.2. 기준 임령 30년에 대한 주요 수종별 지위지수 추정

국립산림과학원에서 개발한 수치산림입지도에는 각

Table 1. Environmental variables and its code description used in this study

Variables	Variable name	Code description
X ₁	Topography	1: flatness 2: gentle hill 3: foot of mountain 4: middle of mountain 5: top of mountain
X ₂	Climatic Zone	1: the north temperate zone 2: the middle temperate zone 3: the south temperate zone 4: warm temperate zone
X ₃	Parent Rock	1: igneous rock 2: sedimentary rock 3: metamorphic rock
X ₄	Soil Drainage	1: poor 2: common 3: good 4: very good
X ₅	Slope	real measured values in degree
X ₆	Altitude	real measured values in meters
X ₇	Sedimentary Type	1: residual deposit 2: creeping 3: colluvial
X ₈	Erosion State	1: not exist 2: exist 3: severe
X ₉	Relief	1: concave 2: flat 3: convex
X ₁₀	Aspect	real measured values in radian
X ₁₁	Available Soil Depth	real measured values in centimeters
X ₁₂	Rock Exposure	1: less than 10% 2: 10~30% 3: 30~50% 4: 50~70%
X ₁₃	Ratio of Valley to Hill	real measured values
X ₁₄	Wind Exposure	1: exposure 2: medium 3: protected
X ₁₅	Weathering Degree	1: high 2: medium 3: low
X ₁₆	Soil Type	coded from 1(B ₁) to 29(Va-4)
X ₁₇	Soil Depth in Horizon A	1. less than 50 cm 2: 50~70 cm 3: 70~90 cm 4: more than 90cm
X ₁₈	Soil Depth in Horizon B	1. less than 50 cm 2: 50~70 cm 3: 70~90 cm 4: more than 90 cm
X ₁₉	Soil Color in Horizon A	coded with 98 different numbers from 101 to 421
X ₂₀	Soil Color in Horizon B	coded with 98 different numbers from 101 to 421
X ₂₁	Organic Matters in Horizon A	1: 0~2% 2: 2~4% 3: 4~6% 4: more than 6%
X ₂₂	Organic Matters in Horizon B	1: 0~2% 2: 2~4% 3: 4~6% 4: more than 6%
X ₂₃	Soil Texture in Horizon A	1: sandy loam 2: loam 3: silt loam 4: silt clay loam 5: sandy clay loam 6: silt clay 7: clay loam 8: clay 9: loamy sand 10: sand
X ₂₄	Soil Texture in Horizon B	1: sandy loam 2: loam 3: silt loam 4: silt clay loam 5: sandy clay loam 6: silt clay 7: clay loam 8: clay 9: loamy sand 10: sand
X ₂₅	Soil Moisture in Horizon A	1: moderate 2: slight dry 3: slight humid 3: humid 5: dry
X ₂₆	Soil Moisture in Horizon B	1: moderate 2: slight dry 3: slight humid 3: humid 5: dry
X ₂₇	Soil Consistency in Horizon A	1: very crumbly 2: crumbly 3: soft 4: hard 5: very hard
X ₂₈	Soil Consistency in Horizon B	1: very crumbly 2: crumbly 3: soft 4: hard 5: very hard

다각형별 대표 수종의 임령 그리고 우세목의 수고와 같은 생장자료가 포함되어 있다. 입지환경인자 및 기후인자를 이용하여 수종별 지위지수 추정식을 도출하기 위해서는 종속변수인 지위지수를 각 다각형별로 산출하여야 한다. 한편 국립산림과학원에서는 기준 임령을 30년으로 하는 수종별 지위지수 추정식을 임령과 수고의 관계를 이용하여 개발한 바 있다(Table 2). 본 연구에서는 상수리나무와 신갈나무에 대한 지위지수 추정식의 종속변수에 해당하는 기준임령 30년의 지위지수를 추정하기 위해 수치산림입지도 데이터베이스에 포함된 임령과 수고 자료를 국립산림과학원에서 개발한 수종별 지위지수 추정식에 적용하였다.

2.2.3. 분석 자료의 분류

수종별 지위지수 추정식을 개발하기 위해 이상과 같은 방법으로 정리된 자료는 종속변수인 기준임령 30년의 지위지수(SI)와 독립변수인 43개의 환경인자이다. 각 독립변수에 속한 인자를 X₁~X₄₃까지 지정한 후(Table 1) 분석을 위해 수종별로 데이터베이스화하였으며, 이 과정에서 자료의 이상치 유무를 점검하여 이상치는 분석에서 제외하였다.

이처럼 정리된 수종별 자료는 추정자료(fit data)와 검증자료(test data)로 분류하였다. 추정자료는 회귀기법에 의해 지위지수 추정식을 산출하기 위한 자료이며, 검증자료는 추정자료에 근거하여 얻어진 지위지수 추

Table 1. Continued

Variables	Variable name	Code description
X ₂₉	Annual mean temperature	Real measured values (°C)
X ₃₀	Annual maximum temperature	Real measured values (°C)
X ₃₁	Annual minimum temperature	Real measured values (°C)
X ₃₂	Warmth index	Estimated values (°C)
X ₃₃	Coldness index	Estimated values (°C)
X ₃₄	Index of aridity	Estimated values (mm/°C)
X ₃₅	Annual total precipitation	Real measured values (mm)
X ₃₆	Monthly mean of precipitation	Real measured values (mm)
X ₃₇	Total precipitation for the growing season	Real measured values (mm)
X ₃₈	Total precipitation for 3 months in the early growing season	Real measured values (mm)
X ₃₉	Total precipitation for 5 months of non-growing season	Real measured values (mm)
X ₄₀	Monthly mean of sunshine duration	Real measured values (hours)
X ₄₁	Annual sunshine duration	Real measured values (hours)
X ₄₂	Total sunshine duration for the growing season	Real measured values (hours)
X ₄₃	Total sunshine duration for 3 months in the early growing season	Real measured values (hours)

Table 2. Parameter estimates of site index model by species

Model	Species	Parameter Estimates	
		b	c
△ Chapman-Richards model	<i>Q. acutissima</i>	0.0039	0.4459
$SI = H_d \left[\frac{1 - e^{-bt_j}}{1 - e^{-bt_i}} \right]^c$	<i>Q. mongolica</i>	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)			

정식의 통계적 검증에 사용되는 자료이다. 일반적으로 회귀모형을 사용하여 추정식을 개발할 경우 개발된 회귀 추정식의 효용성 검증이 필요한데, 검증에 필요한 독립자료를 확보하기 위해서는 별도의 비용과 노력이 요구된다. 이에 대한 대안으로 사용 가능한 전체 자료를 추정자료와 검증자료로 무작위로 분류한 후, 검증 자료를 독립적으로 수집한 자료로 간주하여 통계검증 절차에 사용한다(Snee, 1977). 사용 가능한 자료가 충분한 경우 회귀추정 자료와 검증자료의 비율을 50:50으로 배정하는 것이 통계적으로 효율성을 갖는 것으로 알려져 있다. 하지만 본 연구에서는 회귀추정의 적합성을 우선적으로 고려하여 지위지수 추정식 개발에 필요한 추정자료를 70%, 그리고 추정식의 검증자료는 30%가 되도록 무작위로 분류하였다.

2.2.4. 수종별 지위지수 추정식의 조제

상수리나무와 신갈나무의 최적 지위지수 추정식을

산출하기 위해 기준입력 30년에 대한 지위지수와 43개의 지형인자, 토양인자, 그리고 기후인자 간의 상관분석을 실시하였다. 이는 많은 독립변수 중에서 수종별로 지위와 상관이 높은 인자를 우선적으로 선발하여 회귀분석에 사용하기 위함이다. 즉, 수종별 지위지수와 상관이 상대적으로 높은 환경인자를 우선적으로 선발한 후, 이들 변수 중에서 중회귀분석의 단계별 회귀기법(stepwise regression)에 의하여 지위지수 추정에 필요한 최적 변수 조합을 도출하였다. 이 과정에서 상관분석에 의해 선택된 독립변수간의 내부상관이 있는지를 다양한 방법에 의하여 검증함으로써(Belsley *et al.*, 1980; Myers, 1986; Judge *et al.*, 1988), 내부상관의 문제를 제거하면서 최적의 변수 조합에 의해 상대적으로 결정계수가 높은 수종별 지위지수 추정식을 산출하였다.

이상과 같은 방법으로 산출된 수종별 지위지수 추정식은 검증자료에 근거하여 3가지 평가 통계량을 산출

Table 3. Evaluation guideline of productive site based on site index by each species

Tree species	Evaluation guideline of productive site
<i>Q. acutissima</i>	Greater than 16 in site index
<i>Q. mongolica</i>	Greater than 14 in site index

함으로써 적합성을 검증하였다. 본 연구에서 사용한 평가 통계량은 모형의 추정편의(model's estimation bias), 모형의 정밀도(model's precision), 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 추정자료만을 이용하여 산출된 수종별 지위지수 추정식이 일종의 독립자료로 간주되는 검증자료에 의해 통계적 검증에서 문제가 없는 것으로 판정된 경우, 최종 지위지수 추정식은 추정자료와 검증자료를 통합한 자료를 사용하여 개발하였다.

2.2.5. 적지의 판정

수종별 적지 판정의 기준은 앞에서 산출한 지위지수 추정식에 근거한 임지생산력에 의해 설정하였다. 즉, 수종별 적지판정의 기준은 기준임령을 30년으로 하는 수종별 지위지수 분류곡선식(Son et al., 2004)에 근거하여 지위지수 '중' 이상을 적지로 판정하였다. 지위지수 '중' 이상의 경우 동일 임령의 임목 수고분포가 평균치 이상이 됨을 의미하는 것으로, 이 기준 이상에서 상대적으로 높은 임지생산력을 예상할 수 있다. 이를 근거로 설정한 수종별 적지 기준은 Table 3과 같다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 수종별 지위지수 추정식의 조제

Table 4는 단계별 회귀분석 기법을 사용하여 상수리나무와 신갈나무의 지위지수 추정식을 도출한 결과이다. 우리나라를 대표하는 활엽수종인 상수리나무와 신갈나무의 지위지수는 5~6개의 환경인자 조합에 의해

추정할 수 있는 것으로 나타났다. 기후인자의 경우 연최고기온과 한랭지수와 같은 기온변수와 강수량 관련인자가 임지생산력에 영향을 미치는 것으로 평가되었다. 특히 이들 기후인자는 단독 또는 유효토심(X_{11})이나 B층토심(X_{18})과의 조합에 의해 하나의 독립변수를 구성하는 것으로 나타났다.

수종별 임지생산력에 영향을 미치는 기후인자를 보면 극한 기온을 나타내는 연최저기온(X_{31})이 상수리나무의 지위지수 추정식에 포함되어있으며, 한랭지수(X_{33})는 신갈나무의 지위지수 추정식에 사용되었다. 그 밖에 수종별 지위지수 추정식에 사용된 기후인자는 강수량과 관련된 것들이다. 즉, 생장기간 동안의 강수량(X_{37})이 상수리나무의 지위지수 추정식에 유효토심(X_{11})과 함께 상호작용의 형태로 사용되었으며, 신갈나무의 지위지수 추정식에는 연총강수량(X_{35})이 B층토심(X_{18})과 함께 지위지수 추정에 관여하고 있다. 이 결과를 볼 때 참나무류 수종의 경우 기온뿐만 아니라 수분조건이 임지의 생산력에 영향을 미치는 것으로 해석할 수 있다.

지위지수 추정식의 설명력을 나타내는 결정계수는 상수리나무가 0.49이고 신갈나무는 0.43으로 상대적으로 낮은 것으로 분석되었다. 우리나라의 대표적인 활엽수종인 상수리나무와 신갈나무의 지위지수 추정식의 설명력은 모두 50% 이하로 다소 낮은 것으로 평가되었다. 이처럼 추정식의 결정계수가 낮은 문제는 여러 가지로 설명될 수 있다. 우선 사용된 표본의 수가 많아 통계적인 관점에서 보면 높은 설명력을 기대하는 것은 한계가 있다. 또한 사용된 환경인자 중에는 실측값도 있지만 일부는 범주형 자료로 코드화되어 있어 사용된 자료 유형의 불일치로 인해 결정계수가 높은 추정식을 도출하는 것은 무리가 있는 것으로 판단된다.

3.2. 수종별 지위지수 추정식의 검증

Table 5는 앞에서 조제된 수종별 지위지수 추정식의 실용성을 검증하기 위해 검증자료에 근거하여 평가통계량인 모형의 평균편의(MD; mean difference), 모형의 정밀도(SDD; standard deviation of difference), 그리

Table 4. Regression coefficients of site parameters to environmental factors by species

Tree species	N	Estimated equation of forest productivity	R ²
<i>Q. acutissima</i>	14,388	SI = 10.6396 - 0.0816 × X_5 + 0.3757 × X_9 - 0.3460 × X_{26} - 0.3842 × X_{31} + 0.0107[(X_{11})Ln(X_{37})]	0.49
<i>Q. mongolica</i>	5,861	SI = 12.0446 + 0.5280 × X_{14} - 0.4566 × X_{25} - 0.0314 × X_{33} + 0.0479[(X_{18})Ln(X_{35})]	0.43

Table 5. Evaluation results of the estimation ability based on the test data set for site index equations by species

Tree species	n	MD	SDD	SED
<i>Q. acutissima</i>	6,167	0.0303	1.4830	1.4833
<i>Q. mongolica</i>	2,512	-0.0191	1.3472	1.3474

고 모형의 표준오차(SED; standard error of difference)를 수종별로 분석한 결과이다. 이는 수종별 지위지수 추정식을 해당 수종의 분포지역에 적용하였을 경우 얻어지는 지위지수 추정값과 실측값을 비교하여 조제된 지위지수 추정식의 적합성을 검증한 결과이다.

검증 결과를 보면 수종별 지위지수 추정식의 평균 편의를 나타내는 MD는 절대값이 모두 0.03m 이하로 나타나 높은 추정능력을 보이고 있다. Table 5에서 보는 바와 같이 상수리나무의 평균 편의는 양수를 보이고 있어 수종별 지위지수 추정식은 실제 지위지수보다 다소 과대 추정하는 경향을 보이고 있으며, 신갈나무는 반대로 음수를 보여 약간 과소추정하고 있다. 하지만 두 수종 모두 평균 편의가 0에 가까운 값을 보여 계수의 부호는 큰 의미가 없는 것으로 평가되었다. 결과적으로 본 연구에서 분석한 수종별 지위지수 추정식의 편의는 매우 낮아 효용성이 높은 것으로 판단된다. 한편 추정식의 정밀도 및 적합성을 나타내는 SDD와 SED는 수종별로 모두 1.4 미만의 작은 값을 보여 본 연구에서 산출한 수종별 지위지수 추정식의 정밀도 및 적합성에 문제가 없는 것으로 분석되었다. 특히 기후인자를 제외한 지형 및 토양인자만으로 기후대별수종별 지위지수 추정식을 개발한 연구(Won *et al.*, 2005; Shin *et al.*, 2006)와 본 연구의 결과를 비교하면 평균 편의가 더 작을 뿐만 아니라 추정식의 정밀도와 적합성도 개선된 것으로 나타났다.

3.3. 수종별 최종 지위지수 추정식의 개발

3.3.1. 최종 수종별 지위지수 추정식

평가 통계량에 의한 검증결과 본 연구에서 산출한 상수리나무와 신갈나무의 지위지수 추정식은 적합성에 문제가 없는 것으로 평가되었다. 따라서 최종적으로

추정자료와 검증자료를 통합한 자료를 사용하여 수종별로 산출한 지위지수 추정식은 Table 6과 같다. 모형의 설명력을 나타내는 수종별 지위지수 추정식의 결정계수와 이 추정식에 포함된 독립변수는 앞에서 추정 자료에 근거하여 산출하였던 수종별 지위지수 추정식과 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 하지만 최종 추정식의 경우 검증자료와의 통합을 통해 표본의 수가 늘어났기 때문에 수종별 회귀계수는 다르게 추정되었다. 본 연구에서 최종적으로 개발한 수종별 지위지수 추정식은 자료의 통합을 통해 좀 더 효용성이 높은 식으로 개선된 것으로 판단된다.

결과적으로 최종 지위지수 추정식은 수종별로 5~6개의 환경요인에 의해 지위지수를 잘 추정하는 것으로 평가되었다. 수종별 지위지수 추정에 관여하는 지형인자는 경사(X_5), 경사형태(X_9), 그리고 풍노출도(X_{14})의 3개 인자이며, 토양인자는 유효토심(X_{11}), B층토심(X_{18}), A층건습도(X_{25}), 그리고 B층건습도(X_{26})이다. 기후인자는 연 최저기온(X_{31}), 한랭지수(X_{33}), 연 총강수량(X_{35}), 그리고 생장기간 동안의 총강수량(X_{37})과 같은 변수들이 지위지수 추정에 영향을 끼치는 것으로 나타났다. 한편 강수량과 관련된 기후변수는 상수리나무와 신갈나무의 지위지수 추정식에 단독으로 사용되기 보다는 토양인자 중 토심과 상호작용의 형태로 임지생산력 추정에 관여하는 것으로 나타났다.

3.3.2. 비설명인자의 고찰

Table 6에서 보는 바와 같이 본 연구에서 개발한 상수리나무와 신갈나무의 최종 지위지수 추정식의 결정계수는 각각 0.50과 0.43으로 나타났다. 표본의 수가 상대적으로 많은 상수리나무의 결정계수가 신갈나무에 비해 다소 높은 것으로 분석되었다. 이 결과는 전체 자료가 갖는 지위지수의 변이중에서 선정된 추정식에 의해 설명되어지는 부분이 50% 미만인 것을 의미한다. 본 연구의 경우 복잡한 요인이 작용하는 임지생산력을 몇 가지 환경요인에 의해 설명할 수 있는 추정식을 개발하는 것이 목표이기 때문에 높은 결정계수를 얻는데 한계가 있다.

Table 6. The final regression equations developed for the site index estimation by species

Tree species	N	Estimated equation of forest productivity	R ²
<i>Q. acutissima</i>	20,555	SI = 10.5924 - 0.0810 × X_5 + 0.4041 × X_9 - 0.3427 × X_{26} - 0.3872 × X_{31} + 0.0104[(X_{11})Ln(X_{37})]	0.50
<i>Q. mongolica</i>	8,373	SI = 12.0951 + 0.5172 × X_{14} - 0.4563 × X_{25} - 0.0295 × X_{33} + 0.0493[(X_{18})Ln(X_{35})]	0.43

외국의 선행 연구(Corona *et al.*, 1998; Curt *et al.*, 2001; Kabrick *et al.*, 2004)에서도 환경요인을 이용한 지위지수 추정식의 설명력은 그다지 높지 않은 것으로 나타났다. 환경요인이 독립변수로 포함된 통계모형에 의한 지위지수 추정식이 실제 지위지수를 추정함에 있어 높은 설명력을 보이지 못하는 것은 수목의 생육에 다양한 입지조건과 생물환경 인자들이 복합적으로 작용하기 때문이다. 실제로 Monserud(1987)는 토양인자를 이용하여 미국 몬타나와 아이다호의 미송에 대한 지위지수를 추정하였지만 그 설명력은 16%에 불과하였다. 또한 강수량 및 지형요인 등과 같은 다양한 환경인자를 이용한 지위지수 추정에서는 42%의 설명력만 보인바 있다. 이탈리아에서는 미송을 대상으로 토양 및 기상인자를 이용하여 지위지수 추정식을 조제하였는데, 그 설명력이 39%였음에도 불구하고 수목의 생장에 입지토양환경인자가 복합적으로 작용하는 산림 생태계 내에서는 적절한 추정식으로 판정한 바 있다 (Corona *et al.*, 1998).

본 연구에서 얻어진 수종별 지위지수 추정식의 결정 계수가 낮은 이유는 지위지수 추정식의 독립변수로 사용된 일부 지형 및 토양인자의 자료 형태가 범주형으로 사용된 것에 기인하는 것으로 평가된다. 이러한 자료의 특성으로 인해 모형의 설명력이 다소 낮게 나타났다. 그밖에도 지위지수 추정식에 산림 내 개체목 상호 간의 영향을 고려하지 않은 점 등이 복합적으로 작용한 결과로 판단된다.

3.4. 수종별 적지의 판정

3.4.1. 수종별 적지면적의 산출

Table 7은 본 연구에서 사용한 수치산림입지도 자료에 근거하여 상수리나무와 신갈나무의 적지면적과 적지비율을 산정한 결과이다. 이 결과는 현재 분포하고 있는 수종에 관계없이 본 연구에서 개발한 지위지수 추정식에 의해 Table 3의 적지 판정 기준을 만족할 경우 해당 수종의 적지로 판정한 것이다.

수종별 적지면적을 보면 상수리나무는 약 99만ha로 추정되었는데, 이는 우리나라 전체 산림면적의 15.5%에 해당하는 것으로 상수리나무가 활엽수 중에서 우리나라의 입지조건에 가장 적합한 수종임을 의미하는 것이다. 이와 함께 신갈나무의 적지면적은 약 87만ha로 비교적 넓은 것으로 분석되었다. 신갈나무의 적지비율은 전체 산림면적의 13.7%인 것으로 평가되었다.

Table 7. Estimation of productive areas by species based on the site index equations for national forest

Tree species	Productive site		
	Polygon(n)	Area(ha)	Rate(%)
<i>Q. acutissima</i>	59,609	990,272	15.5
<i>Q. mongolica</i>	43,268	874,134	13.7

이상과 같은 수종별 적지 면적의 분석은 추정된 지위지수 값을 적지 기준과 비교하여 단순히 산출한 결과이다. 하지만 현실적으로 적지는 임지생산력을 표현하는 지위 이외에도 수종에 따라 다양한 지형조건 및 지리적 위치와 같은 물리적 환경에 영향을 받는다. 또한 Table 7에 요약된 수종별 적지면적은 상수리나무와 신갈나무 각각에 대해 독립적으로 분석한 결과로 동일한 다각형에 두 수종이 모두 적지로 판정되더라도 이를 각각 분리하여 표시한 것이다. 따라서 좀 더 현실성이 높은 결과를 도출하기 위해서는 기후인자를 배제하고 입지환경인자만을 이용하였던 이전의 연구(Korea Forest Research Institute, 2006)에서와 마찬가지로 적지면적 및 적지분포 분석 알고리즘이 포함된 적지적수 프로그램의 개발이 필요하다.

3.4.2. 수종별 적지 분포

이상과 같은 방법으로 판정된 상수리나무와 신갈나무의 적지는 수치상으로만 확인된 면적에 불과하다. 하지만 산림경영자의 입장에서는 수종별 적지의 공간분포가 더 유용한 정보로 활용될 수 있다. 즉, 현재의 수종별 분포와 적지로 판정된 지역의 공간분포를 비교함으로써 앞으로의 산림경영에 필요한 의사결정 도구로 사용할 수 있을 것이다. 특히 세계적인 이슈가 되고 있는 기후변화와 관련하여 현재의 수종별 적지분포가 기후변화에 따라 어떻게 변화할 것인지를 예측하고 이에 대응할 수 있는 대책을 마련하기 위해서는 적지분포의 도해가 필수적이다. Fig. 1은 우리나라 산림을 대상으로 상수리나무와 신갈나무의 적지분포를 도해한 결과이다.

Table 3의 수종별 적지 기준을 보면 상수리나무는 지위지수가 16 이상일 경우 적지로 판정한다. 우리나라를 대표하는 참나무류 수종인 상수리나무는 건조지에서도 비교적 생장이 양호하다. 또한 상수리나무는 내한성은 강하지만 내음성이 약해 음지에서는 생장이 불량한 특성을 가지고 있다. Fig. 1을 보면 상수리나무의 이러한 생리적 특성에 따라 우리나라의 중북부

Fig. 1. Distribution of productive areas by species.

지역이 적지인 것으로 분석되었다.

신갈나무의 경우 지위지수를 기준으로 14 이상이 되는 적지는 강원도 고산지역과 백두대간을 중심으로 분포되어 있는 것으로 분석되었다(Fig. 1). 하지만 해발고도가 낮은 충청남도과 전라남북도에는 적지가 상대적으로 적은 것으로 나타났다. 이는 신갈나무가 해발고도가 높은 지역에서 번성하는 특징을 보이기 때문으로 판단된다.

적 요

우리나라의 자생 활엽수종 중에서 상수리나무와 신갈나무는 분포면적이나 자원으로서의 잠재적 효용성을 고려할 때 매우 중요한 수종이다. 본 연구는 다양한 환경인자를 독립변수로 하는 상수리나무와 신갈나무의 지위지수 추정식을 개발하고, 이에 근거한 수종별 적지를 추정하기 위해 수행하였다. 본 연구에서 개발한 상수리나무와 신갈나무의 수종별 최종 지위지수 추정식은 모두 5~6개의 환경인자에 의하여 지위지수를 추정하는 것으로 평가되었다.

수종별 지위지수 추정식에서 채택된 독립변수는 지형인자, 토양인자, 그리고 기후인자를 포괄하고 있어 임지생산력에 영향을 미치는 산림생태계의 특성을 비교적 잘 반영하고 있으며, 설명력을 나타내는 결정계

수의 범위는 0.34~0.50인 것으로 나타났다. 이 결과는 임목의 생육에 다양한 입지조건과 생물환경 인자들이 복합적으로 작용하는 것을 고려하면 지위지수 추정에 큰 무리가 없는 것으로 평가된다. 이와 함께 본 연구에서 개발된 수종별 지위지수 추정식에는 그동안 반영하지 못하였던 기후인자를 독립변수에 포함시켰다는데 의의가 있다. 또한 본 연구에서는 수종별 지위지수 추정식에 근거하여 수종별 적지면적뿐만 아니라 적지의 공간적 분포를 파악하였다. 따라서 앞으로 기후변화 시나리오에 따른 수종별 적지분포의 변화를 예측할 수 있는 정보로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 2011년 국립산림과학원 산림생태연구과 위탁연구과제 ‘기후요인을 고려한 주요 수종의 지위지수 추정 및 적지 판정’ 연구 결과의 일부입니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

REFERENCES

- Arbatzis, A.A. and H. E. Burkhart, 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., E. Kuh, and R. E. Welsch, 1980: *Regression diagnostics*. John Wiley & Sons, New York, 292pp.
- Corona, P., R. Scotti, and M. H. Kutner, 1988: Relationship between environmental factors and site index in Douglas-Fir plantation in central Italy. *Forest Ecology and Management* **110**, 195-207.
- Curt, T. M., B. Bouchaud, and G. Agregh, 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., R. C. Hill, W. E. Griffiths, H. Lutdepohl, and T. Lee, 1988: *Introduction to the theory and practice of econometrics*. John Wiley & sons. New York, 1024pp.
- Kabrick, J. M., S. R. Shifley, R. G. Jensen., J. Fan, and R. Larsen, 2004: Factors associated with oak mortality in Missouri Ozak forest. USDA Forest Service General Technical Reports **NE-316**, 27-35.
- Kim, I. H., M. Y. Shin, Y. C. Kim, and S. K. Chon, 2001: Evaluation of vegetative growth in a mature stand of Korean pine under simulated climatic condition. *Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **3**(2), 105-113. (in Korean with English abstract)
- Kim, K. S., 1975: *Agricultural Meteorology*, Hyangmun Book Co., 331pp. (in Korean)
- Koo, K. S., I. H., Kim, J. H. Jeong, H. K. Won, and M. Y. Shin, 2003: Estimation of site index by species in Gyungi and Chungcheong province using a digital forest site map. *Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **5**(4), 247-254. (in Korean with English abstract)
- Koo, K. S., M. J. Lee, and M. Y. Shin, 2010: Estimation of forest productivity for post-wild-fire restoration in east coastal areas. *Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **12**(1), 36-44. (in Korean with English abstract)
- Korea Forest Research Institute, 2006: A study on the assessment of productive areas for main tree species using forest site map. 55pp. (in Korean)
- Korea Forest Service, 2001: *Guide for forest site inventory*. 91pp. (in Korean).
- Korea Forest Service, 2010: Development of producing and reporting systems for forest statistics based on national forest inventory data. 267pp. (in Korean with English abstract).
- Kramer, H., 1988: *Waldwachstumslehre*. Paul Parey. 374pp. (in German)
- Monserud, R. A., 1987: Variations on a theme of site index. Proceedings, IUFRO Forest Growth Modeling and Prediction Conference. Minneapolis, 419-427.
- Myers, R. H., 1986: *Classical and modern regression with applications*. Duxbury Press. 395pp.
- 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. I. B. Jung, K. S. Koo, and H. G. Won, 2006: Development of site index equation for *Pinus koraiensis* based on environmental factors and estimation of productive areas for reforestation. *Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **8**(2), 97-106. (in Korean with English abstract)
- Shin, M. Y., J. W. Yun, and D. S. Cha, 1996: Local correlation of tree volume equation for *Larix leptolepis* by ratio-of-means estimator. *Journal of Korean Forest Society* **85**(1), 56-65. (in Korean with English abstract)
- Snee, R. D. 1977. Validation of regression models: *Methods and Examples*. *Technometrics*. **19**, 415-428.
- Son, Y. M., K. H. Lee, S. D. S. Kwon, and W. K. Lee, 2004: Assessment and prediction system of timber resources for main species in Korea. *Korea Forest Research Institute Report Paper* **04-01**, 49-52. (in Korean).
- Won, H. K., J. H. Jeong, K. S. Koo, M. H. Song, and M. Y. Shin, 2005: Estimation of forest site productivity by regional environment and forest soil factors. *Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **7**(2), 132-140. (in Korean with English abstract)
- Yim, K. B., 1985: *The Principle of Silviculture*, Hyangmun Book Co. 491pp. (in Korean)
- Yun, J. I., 2010: Agricultural maps augmented by a GIS technology. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **12**(1), 63-73. (in Korean with English abstract)