한국농림기상학회지, 제9권 제3호(2007)
Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 9, No. 3, (2007), pp. 179~187

기후대별 입지환경 인자에 의한 소나무류의 지위지수 추정식 및 적지 구명

신만용[1] · 원형규[2*] · 이승우[2] · 이윤영[2]
[1]국민대학교 산림자원학과, [2]국립산림과학원 임지보전과
(2007년 5월 11일 접수; 2007년 5월 22일 수락)

Site Index Equations and Estimation of Productive Areas for Major Pine Species by Climatic Zones Using Environmental Factors

Man Yong Shin[1], Hyung Kyu Won[2*], Seung Woo Lee[2] and Yoon Young Lee[2]
[1]Department of Forst Resources, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea
[2]Division of Forest Soil Conservation, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea
(Received May 11, 2007; Accepted May 22, 2007)

ABSTRACT

This study was conducted to develop site index equations for some pine species by climatic zones based on the relationships between site index and environmental factors. The selected pine species were *Pinus densiflora* Sieb. et. Zucc., *Pinus densiflora* for. *erecta,* and *Pinus thunbergii.* A total of 28 environmental factors were obtained from a digital forest site map. The influence of 28 environmental factors on site index was evaluated by multiple regression analysis. Four to eight environmental factors were selected in the final site index equation for pine species by climatic zones. The site index equations developed in this study was then verified by three evaluation statistics such as model's estimation bias, model's precision and mean square error type of measure. We concluded that the site index equations for the pine species by climatic zones were capable of estimating forest site productivity. Based on these site index equations, the amount of productive areas for the species by climatic zones was estimated by applying the GIS technique to digital forest maps.

***Key words*: Forest site productivity, Environmental and soil factors, Multiple regression, Evaluation statistics, Productive area**

I. 서 론

산림생산력을 추정하고 해당 임지의 생산력에 따라 적당한 수종을 선정하여 육성하는 것을 적지적수라고 한다. 국립산림과학원은 1995년부터 전국 산림에 대한 입지조사를 실시한바 있으며, 조사된 모든 입지자료의 수치화를 통해 데이터베이스를 구축하였다. 이와 같이 구축된 데이터베이스에는 입지환경정보, 토양환경정보, 그리고 수종별 임목 생장에 관한 속성 정보를 포함하고 있어 수종별 적지 분석에 필요한 정보를 제공하고 있다.

그 동안 산림의 생산력을 추정하기 위한 연구는 다양한 형태로 수행되어 왔는데(Yun, 1972; Kim *et al.*, 1991), 가장 일반적인 방법은 지위지수를 이용하는 것이다. 지위지수는 임지의 지력뿐만 아니라 수종별 임목 생장량도 함께 추정할 수 있어 산림 종사자에게 매우 유용한 정보를 제공한다(Kim and Lee, 1967; Kim, 1973; Kim *et al.*, 1991). 현재 우리나

Corresponding Author : Hyung-Kyu Won(won2521@foa.go.kr)

라에서 사용되고 있는 지위지수 추정방법은 국립산림과학원에서 제안한 추정식을 이용하여 수종별 지위지수 분류곡선을 적용하는 것이다(Korea Forest Service, 2001). 그러나 이 방법은 수령과 수고의 관계를 이용하기 때문에 무립목지나 산불피해지 등과 같이 현재 잔존목이 없는 나대지에는 적용할 수 없는 한계를 가지고 있다.

이를 보완하기 위해 입지환경 인자를 이용하여 지위지수를 추정하는 것은 기존의 방법을 대체할 수 있는 대안으로 판단된다. 특히 임목의 생장에 영향을 미치는 여러 가지 요인들 중에서 지형 및 토양인자를 포함하는 입지환경인자는 임목생장에 결정적으로 영향을 주는 것으로 알려져 있어(Kim *et al.*, 1991), 이들 인자의 조합에 의해 산림생산력을 파악하는 것이 가능하다.

소나무는 우리나라를 대표하는 침엽수종으로 가장 넓은 면적에 분포하고 있을 뿐만 아니라 자원으로서의 가치도 인정되는 수종이다. 본 연구는 전국 수치산림입지도에 포함된 입지환경 인자를 이용하여 기후대별로 주요 소나무 수종(강원지방소나무, 중부지방소나무, 해송)의 지위지수 추정식을 개발하고, 기후대별 · 수종별 산림생산력을 추정하기 위해 수행되었다.

II. 재료 및 방법

2.1. 연구대상지

본 연구는 우리나라 전국의 산림을 대상으로 1995년부터 국리산림과학원에서 조사한 입지환경 인자에 대한 산림입지 조사 결과를 중심으로 분석하였다. 또한 임목의 생육환경과 입지조건이 고려된 좀 더 정밀한 지위지수 추정식을 개발하기 위해 전국을 산림기후대에 따라 구분하였다. 즉, 전국의 산림을 기후대에 따라 온대북부, 온대중부, 온대남부, 그리고 난대의 4개 지역으로 나누어 연구대상지를 구분하였다(Fig. 1).

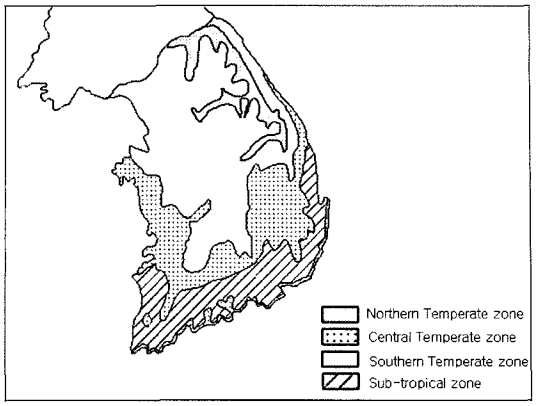

Fig. 1. Distribution of climatic zones in Korea.

2.2. 연구 자료

2.2.1. 산림입지 자료의 정리

본 연구에서 사용한 산림입지 자료는 국립산림과학원에서 구축한 수치산림입지도에서 추출하였다. 수치산림입지도에 포함된 자료는 산림입지조사요령(Korea Forest Service, 1998)에 따라 현지 조사되어 사용할 수 있도록 전산화된 자료이다. 수치산림입지도에는 총 28개의 입지환경 인자에 대한 정보가 포함되어 있는데, 입지와 관련된 인자는 해발고, 경사도 및 경사형태, 퇴적양식, 토양형 등 16개이며, 토양과 관련된 인자는 토심, 토성, 층계 및 층위, 토색, 견밀도, 토양구조 등 12개로 모든 속성정보를 코드화하여 정리하였다(Table 1).

지위지수 추정식 개발을 위한 기후대별 대상 소나무 수종은 표준지의 수가 최소 200개 이상(Meyer, 1947)의 표본점 자료를 보유하고 있는 것으로 선정하였다. 본 연구에서는 리기다소나무를 제외한 강원지방소나무, 중부지방소나무, 그리고 해송의 3개 수종을 대상으로 하였으며, 이들 수종을 대상으로 기후대별 · 수종별 자료를 정리하였다.

2.2.2. 기준임령 30년에 대한 지위지수 추정

본 연구에서는 수치산림입지도에 나타난 임령과 수고 자료에 근거하여 기준임령을 30년으로 하는 수종별 지위지수를 추정하였다. 이를 위해 Chapman-Richards의 모형(Clutter *et al.*, 1983)을 이용하여 국립산림과학원에서 개발한 수종별 지위지수 추정 모형의 모수 추정치를 사용하였다(Table 2). 이와 같은 방법으로 기준 임령 30년에 대한 수종별 지위지수를 추정한 후 분석이 가능하도록 정리하였다.

2.2.3. 자료의 분류

이상과 같은 방법으로 정리된 자료에는 종속변수인 기준 임령이 30년일 때의 지위지수(SI)와 독립변수인 입지환경 인자 28개가 포함되어 있다. 각 독립변수에 속한 인자는 X_1~X_{28}까지 지정하고 분석을 위해 수종별로 데이터베이스화하였으며, 이와 같이 정리된 기후대별 총 3개의 소나무 수종의 자료 중에서 점검을 통

Table 1. Environmental variables and its code description used in this study to estimate site index by species

Variables	Variable Name	Code Description
X_1	Topography	1: flatness, gentle hill, top of mountain 2: middle of mountain 3: foot of mountain
X_2	Climatic Zone	1: northern temperate zone 2: central temperate zone 3: southern temperate zone 4: sub-tropical zone
X_3	Parent Rock	1: sedimentary rock 2: igneous rock 3: metamorphic rock
X_4	Soil Drainage	0: poor 1: common 2: good 3: very good
X_5	Slope	1: > 30° 2: 15~30° 3: < 15°
X_6	Altitude	1: higher than 1000 m 2: 700~1000 m 3: 400~700 m 4: 200~400 m 5: lower that 200 m
X_7	Sedimentary Type	1: residual deposit 2: creeping 0: colluvial
X_8	Erosion State	0: severe 1: exist 2: not exist
X_9	Relief	1: concave 2: flat 3: convex
X_{10}	Aspect	1: south, southwest 2: east, southeast 3: north, northeast, northwest, west
X_{11}	Available Soil Depth	1: < 0.1 m 2: 0.1 - 0.3 m 3: > 0.3 m
X_{12}	Rock Exposure	1: > 30% 2: < 30%
X_{13}	Ratio of Valley to Hill	1: more than 7 2: 4~7 3: less than 4
X_{14}	Wind Exposure	1: exposure 2: medium 3: protected
X_{15}	Weathering Degree	1: low 2: medium 3: high
X_{16}	Soil Type	coded from 0 to 4
X_{17}	Soil Depth in Horizon A	1: < 30 cm 2: > 30 cm
X_{18}	Soil Depth in Horizon B	1: < 0.3 m 2: 0.3 - 0.6 m 3: 0.6 - 0.9 m 4: > 0.9 m
X_{19}	Soil Color in Horizon A	coded with 98 different numbers from 1 to 4
X_{20}	Soil Color in Horizon B	coded with 98 different numbers from 1 to 4
X_{21}	Organic Matters in Horizon A	1: 0~2% 2: 2~4% 3: 4~6% 4: > 6%
X_{22}	Organic Matters in Horizon B	1: 0~2% 2: 2~4% 3: 4~6% 4: > 6%
X_{23}	Soil Texture in Horizon A	1: clay, loamy sand, sand 2: silt clay loam, silt clay, clay loam 3: sandy loam, loam, silt loam, sandy clay loam
X_{24}	Soil Texture in Horizon B	1: clay, loamy sand, sand 2: silt clay loam, silt clay, clay loam 3: sandy loam, loam, silt loam, sandy clay loam
X_{25}	Soil Moisture in Horizon A	1: humid, dry 2: slight dry, slight humid 3: moderate
X_{26}	Soil Moisture in Horizon B	1: humid, dry 2: slight dry, slight humid 3: moderate
X_{27}	Soil Consistency in Horizon A	1: very hard 2: soft, hard 3: very crumbly, crumbly
X_{28}	Soil Consistency in Horizon B	1: very hard 2: soft, hard 3: very crumbly, crumbly

Table 2. Parameter estimates of site index model by species

Model	Species	Parameter Estimates	
		b	c
Δ Chapman-Richards model	*P. densiflora* for. *erecta.*	0.0253	0.9995
$SI = H_D\left[\frac{1-e^{-bt_j}}{1-e^{-bt_i}}\right]^c$	*P. densiflora* Sieb. et. Zucc	0.0483	1.4360
	P. thunbergii.	0.0483	1.4360

(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)

해 이상치는 분석에서 제외하였다. 또한 각 표준지별로 임령과 수고를 비교하여 추정식에 영향을 미칠 수 있는 비현실적인 자료도 제외하였다.

이와 같이 얻어진 자료는 7:3의 비율로 추정자료와 검증자료로 무작위로 분류하여 정리하였다. 추정자료는 회귀기법에 의해 기후대별 · 수종별 지위지수 추정식을 산출하기 위한 것이며, 검증자료는 추정자료에 기초하여 얻어진 추정식의 통계적 검증에 사용되는 것

이다(Snee, 1977; Song, 2003).

2.3. 지위지수 추정식의 산출

본 연구에서는 3개 소나무 수종에 대해 입지환경요인에 의한 기후대별 · 수종별 최적 지위지수 추정식을 도출하기 위해 중회귀분석의 단계별 회귀기법에 의하여 지위지수 추정에 필요한 최적 변수의 조합을 선택하였다. 이 과정에서 선택된 독립변수간의 내부상관이 있는지를 검증함으로써(Belsley *et al.*, 1980; Myers, 1986; Judge *et al.*, 1988), 내부상관의 문제를 제거함과 동시에 최적 변수의 조합으로 결정계수가 높은 지위지수 추정식이 되도록 하였다.

이상과 같은 방법으로 산출된 기후대별 · 수종별 지위지수 추정식의 적합성을 검증하기 위한 검증 통계량은 모형의 추정편의, 모형의 정도, 그리고 이 두 가지를 고려한 측정치에 대한 오차의 평균평방화인 모형의 표준오차 등의 세 가지를 사용하였다(Arabatzis and Burkhart, 1992).

본 연구에서는 최종적으로 추정자료와 검증자료를 합친 통합자료에 근거하여 최종 지위지수 추정식을 산출하였다. 즉, 추정자료만을 이용하여 만든 기후대별수종별 지위지수 추정식이 일종의 독립자료로 간주되는 검증자료에 의해 통계적 검증에서 문제가 없는 것으로 판정된 경우, 최종 지위지수 추정식을 추정자료와 검증자료를 통합한 통합자료에 근거하여 개발하였다.

2.4. 적지의 판정

2.4.1. 적지의 판정기준

수종별 적지 판정의 기준은 앞에서 산출된 지위지수 추정식에 근거한 산림생산력에 의해 설정하였다. 즉, 적지판정의 기준은 기준임령을 30년으로 하는 수종별 지위지수 곡선식의 범위에 근거하여 Table 3과 같이 설정하였다. 추정된 지위지수에 따라 수종별 적지의 범위를 설정하였는데, 적지의 기준은 산림생산력이 상대적으로 높은 것으로 인정할 수 있는 최소한의 조건이다. 수종별 지위지수 곡선에 따라 강원지방소나무의 적지 기준은 지위지수가 최소한 16이상으로 추정되면 적지로 판정하였고, 중부지방소나무와 해송은 지위지수가 14이상일 경우에 적지로 설정하였다.

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

Species	Evaluation Guideline of Productive Site
P. densiflora for. *erecta.*	greater than 16 in site index
P. densiflora Sieb. et. Zucc	greater than 14 in site index
P. thunbergii	greater than 14 in site index

2.4.2. 적지면적의 산출

기후대별 · 수종별 적지면적을 산출하기 위해 먼저 기후대별 전체 산림지역을 대상으로 앞에서 최종적으로 도출한 기후대별 · 수종별 지위지수 추정식을 적용하여 수치산림입지도 상의 각 격자별로 지위지수를 추정하였다. 이와 같이 얻어진 격자별 지위지수를 Table 3에서 제시한 적지 판정 기준과 비교하여 일정 지위지수 이상의 격자의 수를 산출한 후, 최종 적지 면적을 ha 단위로 계산하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 기후대별 · 수종별 지위지수 추정식

3.1.1. 기후대별 · 수종별 지위지수 추정식의 산출

본 연구에서 전국을 4개 기후대로 구분한 후 각 기후대에 분포하는 강원지방소나무, 중부지방소나무, 그리고 해송의 3개 소나무 수종을 대상으로 추정자료에 근거하여 입지환경 인자에 의한 지위지수 추정식을 개발한 결과는 Table 4와 같다.

기후대별 대상 수종은 중부지방소나무가 4개 기후대에 모두 분포하며, 강원지방소나무는 온대북부와 온대중부 그리고 해송은 온대북부를 제외한 온대중부, 온대남부, 그리고 난대 지역에 분포하고 있다.

온대북부에 분포하는 강원지방소나무와 중부지방소나무는 각각 7개와 4개의 입지환경 인자에 의해 지위지수를 추정하는 것으로 나타났다. 수종별로 다양한 입지환경 인자의 조합에 의해 지위를 추정하는 것으로 분석되었는데, 이들 수종의 지위지수 추정식에 공통으로 관여하는 입지환경인자는 토양형(X_{16})인 것으로 나타났다. 한편 수종별 지위지수식의 결정계수는 0.43과 0.64로 수종별로 편차가 크지만 비교적 적은 입지환경인자만으로 수종별 지위지수를 잘 추정하는 것으로 나타났다(Kim *et al.*, 1991). 이러한 결과는 앞으로 수종별 산림의 생산력 판단과 적지적수의 판정을 위한 지위의 사정에서 몇 가지 입지환경 인자의 측정만으로도 결과의 도출이 가능하다는 것을 의미하는 것으로 기존의 지위 판정보다 비용과 시간, 그리고 노력을 경

Table 4. Regression coefficients of site parameters to environmental variables by species and climatic zones based on fit data set

Climatic Zones	Species	n	Site Index Equations	R^2
Northern Temperate Zone	*P. densiflora* for. *erecta*	4,101	$SI = 5.3023-0.3862*X_6+0.9900*X_9+0.4362*X_{16}+0.9604*X_{18}+0.4203*X_{22}+0.7813*X_{23}+0.3947*X_{27}$	0.43
	P. densiflora Sieb. et. Zucc.	275	$SI = 6.8268+0.5663*X_3-0.6808*X_4+0.7442*X_{14}+1.8274*X_{16}$	0.64
Central Temperate Zone	*P. densiflora* for. *erecta*.	5,237	$SI = 9.2915+0.3665*X_3-0.4954*X_4+0.5337*X_{14}+0.4804*X_{16}+0.6561*X_{18}-0.3024*X_{24}+0.5060*X_{26}$	0.30
	P. densiflora Sieb. et. Zucc	9,229	$SI = 5.6375+0.1373*X_1-0.5619*X_4+0.4482*X_9+0.5520*X_{16}+0.2565*X_{23}+1.0009*X_{25}+0.7589*X_{27}$	0.35
	P. thunbergii.	441	$SI = 10.4652-1.2744*X_3-1.2438*X_6+3.1760*X_{12}+0.9218*X_{20}-1.2710*X_{24}+2.4084*X_{25}+1.0085*X_{27}$	0.53
Southern Temperate Zone	*P. densiflora* Sieb. et. Zucc.	7,443	$SI = 5.8273+0.3879*X_3-0.6827*X_4-0.4032*X_6+0.7577*X_{18}+0.5146*X_{23}+1.3213*X_{25}+0.9956*X_{28}$	0.32
	P. thunbergii.	1,889	$SI = 3.8089+0.2918*X_3+0.7560*X_6-2.4640*X_8+0.7622*X_{16}+0.7304*X_{18}-1.4020*X_{20}+1.0928*X_{23}+2.3957*X_{28}$	0.43
Sub-tropical Zone	*P. densiflora* Sieb. et. Zucc.	1,921	$SI = 2.7488+0.4007*X_3-0.6617*X_4+0.9790*X_{14}-1.4678*X_{20}+0.7218*X_{21}+1.1414*X_{23}+1.6730*X_{28}$	0.33
	P. thunbergii.	6,506	$SI = 3.5621+0.8663*X_3-0.5915*X_4+0.8306*X_5+0.8218*X_{11}+0.6400*X_{14}-0.6527*X_{15}+1.2562*X_{26}$	0.30

감할 수 있는 방안이 될 것으로 기대된다.

온대중부에는 소나무 수종 3개가 모두 분포하고 있는데, 모든 수종의 지위 추정에는 7개의 입지환경 인자가 관여하고 있다. 그러나 수종별로 다른 다양한 입지환경 인자의 조합이 지위에 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 온대중부의 수종별 지위지수 추정식에 상대적으로 많이 포함된 입지환경 인자는 모암, 토양배수, 토양형, B층 토심, 그리고 A층 건습도인 것으로 분석되었다. 지위지수 추정에 사용된 모형의 설명력을 나타내는 결정계수는 수종별로 0.30~0.53으로 온대북부에 비해 다소 낮은 것으로 평가되었는데, 이 중에서 해송의 결정계수가 가장 높은 것으로 나타났다.

온대남부는 중부지방소나무와 해송의 2개 수종이 분포하며, 각각 7개와 8개의 입지환경 인자에 의해 지위지수를 추정하는 것으로 나타났다. 두 수종 모두 다양한 입지환경 인자의 조합이 지위에 영향을 미치고 있는데, 모암, B층 토심, A층 토성, 그리고 B층 견밀도가 두 수종의 지위지수 추정식에 공통적으로 포함되어 있다. 수종별 지위지수식의 결정계수는 0.32와 0.43으로 수종별로 다소 차이가 있는 것으로 분석되었다.

이러한 결과는 난대 지역의 경우에도 비슷한데, 이 지역에는 중부지방소나무와 해송이 분포하고 있으며 각각 7개의 입지환경 인자가 지위지수 추정식에 포함되어 있다. 한편 난대 지역에서는 두 수종 모두 풍노출도(X_{14})가 지위에 영향을 미치는 중요한 요인으로 작용하였는데, 산림입지환경 인자를 이용한 주요 수종의 생장에 미치는 영향을 분석한 다른 연구에서도 풍노출도가 매우 중요한 인자로 보고된 바 있다(Kim, *et al.*, 1991; Jeong *et al.*, 1994). 이밖에 두 수종에 모두 출현하는 입지환경 인자는 모암과 토양배수이지만 수종 간에 어떤 특징적인 경향은 찾을 수 없었다. 난대 지역의 수종별 지위지수 추정식의 결정계수는 다른 기후대에 비해 다소 낮은 0.30~0.33인 것으로 분석되었다.

3.1.2. 지위지수 추정식의 검증

Table 5는 앞에서 추정자료를 이용하여 산출한 소나무 수종의 기후대별 지위지수 추정식에 대하여 검증자

Table 5. Evaluation result of the estimation ability for site index equation by species and climatic zones based on test data set

Classification		n	MD	SDD	SED
Northern Temperate zone	*P. densiflora* for. *erecta*	1,761	0.0168	1.8897	1.8898
	P. densiflora Sieb. et. Zucc.	119	-0.0326	1.5742	1.5745
Central Temperate zone	*P. densiflora* for. *erecta*.	2,274	-0.0497	2.0519	2.0525
	P. densiflora Sieb. et. Zucc	4,260	0.0407	2.1388	2.1392
	P. thunbergii.	220	-0.1894	1.9907	1.9997
Southern Temperate zone	*P. densiflora* Sieb. et. Zucc.	3,388	0.0160	2.0519	2.0520
	P. thunbergii.	846	-0.0132	1.9751	1.9752
Sub-tropical zone	*P. densiflora* Sieb. et. Zucc.	902	-0.0378	1.9752	1.9756
	P. thunbergii.	3,045	-0.0981	1.8581	1.8607

료를 기초로 평가 통계량인 모형의 평균편의(MD), 모형의 정도(SDD), 그리고 모형의 표준오차(SED)를 분석한 결과이다. 이는 각 기후대의 수종별 지위지수 추정식을 해당 지역의 표준지에 적용하였을 경우 얻어지는 지위지수 추정치와 실측치를 비교하여 앞으로 산출된 지위지수 추정식의 적합성을 검증하기 위한 절차이다.

온대북부의 경우 검증을 실시한 강원지방소나무와 중부지방소나무는 지위지수 추정식의 평균 편의를 나타내는 MD가 각각 0.02 m와 -0.03 m로 높은 추정능력을 보이고 있다. 중부지방소나무의 지위지수 추정식은 다소 과대 추정하는 경향이 있어 추정식의 편의가 음수로 나타났지만, 본 연구에서 분석한 온대북부의 수종별 지위지수 추정식의 편의는 대체적으로 낮아 효용성이 높은 것으로 평가된다. 한편 사용된 추정식의 정도 및 적합성을 나타내는 SDD와 SED는 수종별로 유사한 값을 보이고 있어, 본 연구에서 개발된 온대북부 지역의 수종별 지위지수 추정식의 정확도 및 적합성에는 문제가 없는 것으로 분석되었다.

온대중부의 수종별 지위지수 추정식도 검증결과 문제가 없는 것으로 평가되었다. 상대적으로 검증자료의 수가 적은 해송을 제외한 강원지방소나무 및 중부지방소나무는 실측 지위지수와 추정식에 의하여 산출된 지위지수의 차이에 대한 평균을 나타내는 모형의 평균편의가 0.1 m 미만으로 매우 정도가 높은 것으로 분석되었다. 해송의 경우에도 평균편의가 -0.19 m로 상대적으로 크지 않으며, 이러한 결과는 추정식의 문제라기보다는 검증에 사용된 표본자료의 부족에 기인한 것으로 판단된다(Koo *et al.*, 2003). 다른 평가 통계량인 모형의 정도와 표준오차의 경우에는 수종 간에 큰 차이가 없다.

온대남부의 수종별 지위지수 추정식의 적합성을 검증한 결과도 온대북부 및 온대중부와 유사하다. 온대남부의 해송에 대한 지위지수 추정식은 과대 추정하지만 그 양은 미미하며, 중부지방소나무의 평균편의는 약 0.02 m로 과소 추정하고 있음을 알 수 있다. 추정식의 정도 및 적합성을 나타내는 SDD와 SED의 경우에도 다른 기후대와 큰 차이가 없어 온대남부의 수종별 지위지수 추정식의 검증 결과도 적합성의 관점에서 문제가 없는 것으로 평가되었다. 또한 난대지역의 경우에도 지위지수 추정식의 검증 결과 다른 기후대와 거의 차이가 없는 것으로 분석되어 추정자료에 의해 도출된 수종별 지위지수 추정식의 적합성을 인정할 수 있었다. 결과적으로 입지환경 인자에 의해 본 연구에서 개발한 기후대별 주요 소나무 수종의 지위지수 추정식은 산림생산력 추정에 적합한 것으로 판명되었다.

3.1.3. 최종 기후대별·수종별 지위지수 추정식의 산출

본 연구에서 기후대별 · 수종별 최종 지위지수 추정식 산출에 사용된 자료는 추정자료와 검증자료를 통합한 전체 산림입지 DB 자료이다. 이 DB 자료를 사용하여 최종적으로 입지환경 인자의 조합에 의해 기후대별 · 수종별로 산출된 최적 지위지수 추정식은 Table 6과 같다.

소나무 수종에 대한 기후대별 지위지수 추정식의 결정계수는 0.30~0.64의 범위에 있는 것으로 분석되었다. 이와 같이 도출된 최종 지위지수 추정식은 앞에서 추정자료에 근거하여 산출되었던 기후대별수종별 지위지수 추정식과 비교하여 일부 다른 입지환경 인자가 포함된 것으로 나타났다. 이는 최종 지위지수 추정식을 만드는 과정에서 추정자료와 검증자료의 통합을 통해

Table 6. The final regression equation developed for the site index estimation of pine species in this study

Climatic Zones	Species	Site Index Equations	R^2
Northern Temperate zone	*P. densiflora* for. *erecta*	$SI = 9.1285-0.3937*X_6+0.9393*X_9-0.7793*X_{12}+0.4799*X_{16}+1.0083*X_{18}+0.4060*X_{22}+0.3746*X_{27}$	0.43
	P. densiflora Sieb. et. Zucc.	$SI = 6.3908+0.6394*X_3-0.5244*X_4+0.8909*X_{14}+1.6862*X_{16}$	0.64
Central Temperate zone	*P. densiflora* for. *erecta.*	$SI = 10.5278-0.4878*X_4-0.2705*X_6+0.5766*X_{14}+0.4860*X_{16}+0.7487*X_{18}-0.2602*X_{24}+0.4946*X_{26}$	0.30
	P. densiflora Sieb. et. Zucc	$SI = 5.5831+0.3890*X_1-0.6320*X_5+0.4751*X_9+0.6258*X_{16}+0.3514*X_{21}+0.8636*X_{25}+0.7091*X_{27}$	0.35
	P. thunbergii.	$SI = 9.4862-1.4809*X_3-0.4790*X_7-0.3029*X_{10}-0.6789*X_{11}+0.9625*X_{20}+2.7779*X_{25}+1.0091*X_{27}$	0.53
Southern Temperate zone	*P. densiflora* Sieb. et. Zucc.	$SI = 5.9154+0.3792*X_3-0.6542*X_4-0.4147*X_6+0.7190*X_{18}+0.5198*X_{23}+1.3606*X_{25}+0.9692*X_{28}$	0.32
	P. thunbergii.	$SI = 3.6814+0.2631*X_3+0.7197*X_6-2.2641*X_8+0.6865*X_{16}+0.8454*X_{18}-1.3599*X_{22}+1.0911*X_{23}+2.2825*X_{28}$	0.42
Sub-tropical zone	*P. densiflora* Sieb. et. Zucc.	$SI = 1.6610-0.6080*X_4+0.8211*X_{14}+0.8355*X_{18}-1.3564*X_{20}+0.6255*X_{21}+1.3519*X_{23}+1.5098*X_{28}$	0.33
	P. thunbergii.	$SI = 1.1352+0.7850*X_3-0.5773*X_4+0.6150*X_5+0.7345*X_6+0.7331*X_{14}-0.7776*X_{15}+0.4467*X_{23}+1.2689*X_{26}$	0.32

사용된 표본의 수가 증가하여 최적 입지환경 인자의 조합에 영향을 미친 것이다. 특히 추정자료에 의해 도출된 지위지수 추정식의 실용성을 검증하는 과정에서 통계분석을 통해 사용된 모형의 적합성 분석을 실시하였기 때문에, 최종 지위지수 추정식은 자료의 통합을 통해 좀 더 효율성이 높은 식으로 개선된 것으로 해석할 수 있다. 따라서 본 연구에서 개발한 기후대별수종별 최종 지위지수 추정식은 모두 4~8개의 입지환경요인에 의하여 지위지수를 잘 추정하는 것으로 평가되었다.

3.1.4. 비설명 인자에 대한 고찰

Table 6에서 보는 바와 같이 본 연구의 수종별 지위지수 추정식의 결정계수는 대부분 0.5 이하이다. 이는 전체 자료가 갖는 지위지수의 변이 중에서 선정된 추정식에 의해 설명되어지는 부분이 50% 미만인 것을 의미한다. 통계 모형을 이용하여 추정식을 개발할 경우 가능하면 설명력이 높은 추정식을 개발하는 것이 바람직하다. 하지만 본 연구의 경우 다양한 요인이 작용하는 산림생산력을 몇 가지 입지환경요인에 의해 설명할 수 있는 추정식을 개발하는 것이 목표이기 때문에 높은 결정계수를 얻는 것은 한계가 있는 것으로 판단된다.

여러 나라에서 산림생산력의 추정을 위하여 지위지수 추정식을 제시하고 있으나, 지위지수 추정식이 실제 지위지수를 추정함에 있어 높은 설명력을 보이지 못하는 것은 임목의 생육에 다양한 입지조건과 생물환경 인자들이 복합적으로 작용하기 때문이다. 실제로 Monserud(1987)는 토양인자를 이용하여 몬타나와 아이다호의 미송의 최적 지위지수를 추정하였지만 그 설명력은 16%에 불과 하였고, 또한 강수량 및 지형요인 그리고 위도 등과 같은 다양한 환경인자를 이용한 지위지수 추정에서는 42%의 설명력만을 보인 바 있다. 한편 Corona *et al.*(1998)은 이탈리아 미송의 지위지수 추정에 있어서 토양 및 기상인자를 이용한 지위지수 추정식을 산출하였는데, 그 설명력이 39%였음에도 불구하고 수목의 생장에 복합적 입지환경인자가 작용하는 산림생태계 내에서는 적절한 추정식으로 판명한

바 있다.

본 연구에서 얻어진 기후대별 · 수종별 지위지수 추정식의 결정계수가 낮아 이 추정식에서 실제로 산림생산력을 설명하지 못하는 부분은 다음과 같은 요인에 기인하는 것으로 판단된다. 먼저 사용 가능한 자료를 기반으로 지위지수 추정식이 개발되었다는 점이다. 본 연구에서 지위지수 추정식의 독립변수로 사용된 28가지 입지환경 인자는 범주형 자료로 구성되어 0~5의 값으로 주어져 있다. 한편 종속변수인 지위지수도 정수의 형태로 구성되어 있는데, 이러한 자료의 특성으로 볼 때 오차의 제곱을 최소화할 때의 회귀계수를 추정하는 회귀모형은 모형의 설명력이 낮은 것이 일반적이다. 그밖에도 측정오차에 따른 자료의 문제, 지위지수 추정 모형에 산림 내 개체목 상호간의 효과가 적용되지 않은 점, 그리고 사용된 수치지도의 축척과 관련된 문제 등이 복합적으로 작용한 것으로 추정된다.

3.2. 기후대별 · 수종별 적지의 판정

3.2.1. 적지 면적의 산출

앞에서 언급한 수종별 적지의 판정 기준(Table 3)에 따라 Table 6의 기후대별 · 수종별 최종 지위지수 추정식을 전체 산림입지 DB 자료에 적용하여 적지 면적을 산출하였다. 이와 같은 방법에 의해 적지로 판정된 수종별 면적에 전국 산림면적을 고려한 기후대별 보정계수를 적용하여 최종 기후대별 · 수종별 적지면적을 산출한 결과는 Table 7과 같다. 여기서 산출된 수종별 적지면적은 입지환경 인자의 조합에 의해 도출된 최종 지위지수 추정식에 의해 얻어진 지위지수 추정치를 적지 기준과 비교하여 산출한 수종별 적지면적의 합계이다.

수종별 지역 분포에 따라 강원지방소나무, 중부지방소나무, 그리고 곰솔로 분류하여 적지를 분석하고 면적을 산출한 결과, 기후대로는 온대북부와 온대중부에 분포하며 지역적으로는 강원도와 경상북도 북부 일부에 분포하는 강원지방소나무의 적지는 약 24만 ha로 전체 산림면적의 약 4.1%인 것으로 추정되었다. 반면에 전국적으로 분포하는 중부지방소나무는 약 49만 ha가 적지로 추정되었으며 이는 전체 산림면적의 8.2%에 해당한다. 한편 온대중부, 온대남부, 그리고 난대지역의 해안가에 분포하는 해송의 적지 면적은 약 23만ha로 강원지방소나무와 비슷한 면적인 것으로 나타났다. 결과적으로 소나무 수종의 적지 면적은 약 97만ha로 전체 산림면적의 약 15%에 해당하는 것으로 분석되었다. 본 연구의 자료로 사용된 산림입지 DB에는 리기다소나무가 포함되어 있으며, 실제 리기다소나무의 적지 분포는 상당히 넓은 것으로 평가된다. 하지만 리기다소나무는 현재 여러 문제점 때문에 수종갱신의 대상으로 거론되고 있어 최종적인 분석결과에는 포함시키지 않았다.

이상과 같은 기후대별 · 수종별 적지 면적의 분석은 추정된 지위지수 값을 비교하여 단순히 수종별 적지면적을 산출한 것이다. 하지만 현실적으로 적지는 산림생산력을 표현하는 지위 이외에도 수종에 따라 지형조건 및 지리적 위치와 같은 다양한 물리적 환경에 영향을 받는다. 또한 Table 7에서 표현한 수종별 적지면적은 각 수종에 대한 독립적인 분석결과로 동일한 지역에 다수의 수종이 적지로 판정되더라도 이를 각각 분리하여 표시한 것이다. 따라서 이러한 점들을 고려하여 좀 더 현실성이 있는 결과를 도출될 수 있도록 적지적수 선정 프로그램의 개발과 활용이 필요하다.

적 요

본 연구는 산림입지 자료를 이용하여 주요 소나무 수종의 기후대별 산림생산력을 추정하기 위해 수행하였다. 이를 위해 강원지방소나무, 중부지방소나무, 그리고 해송의 3개 소나무 수종을 대상으로 입지환경 인자에 의한 기후대별 지위지수 추정식을 만들고, 적지 판정 기준에 따라 수종별 적지면적을 산출하였다. 기후대는 수종분포에 따라 온대북부, 온대중부, 온대남부, 그리고 난대의 4개 지역으로 구분하였다.

Table 7. Area estimates of productive site by species and climatic zones based on site index

Species	Area of Productive Site (ha)					Ratio(%)
	Northern Temperate zone	Central Temperate zone	Southern Temperate zone	Sub-tropical zone	Total	
P. densiflora for. *erecta.*	53,466	190,842	-	-	244,309	4.1
P. densiflora Sieb. et. Zucc	137,195	270,071	70,997	3,673	491,936	8.2
P. thunbergii.	-	200,067	32,068	1,679	233,814	4.0

이를 위해 전국의 산림입지 자료를 기후대별 · 수종별로 분류한 후, 지위지수 추정식 산출에 필요한 추정자료와 통계 검증에 필요한 검증자료로 분류하였다. 산림입지 자료에 포함된 임령 및 수고에 근거하여 기준 임령을 30년으로 하는 기후대별 · 수종별 지위지수를 추정하였다. 이를 통해 입지환경 인자에 의한 기준임령 30년에서의 기후대별 · 수종별 지위지수 추정식을 도출하였으며, 검증자료를 사용하여 통계적 검증을 실시한 후 검증 결과에 따라 최종 기후대별 · 수종별 지위지수 추정식을 산출하였다. 본 연구에서 산출된 기후대별 소나무 수종의 지위지수 추정식은 4~8개의 입지환경 인자에 의해 산림생산력을 비교적 잘 추정하는 것으로 판명되었다.

이와 같은 방법으로 도출된 지위지수 추정식을 산림입지 자료에 적용하여 기후대별 · 수종별 산림생산력을 추정하고, 이에 근거하여 적지를 판정한 후 적지 면적을 산출하였다. 수종별 적지 면적은 강원지방소나무는 온대북부와 온대중부에서 약 24만ha로 추정되었으며, 중부지방소나무는 전체 기후대에 걸쳐 약 49만ha가 적지인 것으로 분석되었다. 온대북부를 제외한 지역에 분포하고 있는 해송의 경우에도 전체 산림면적의 약 4%인 23만ha가 적지인 것으로 판명되었다.

REFERENCES

Arabatzis, 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.

Clutter, J. L., J. C. Fortson, L. V. Pienaar, G. H. Brister, and R. L. Bailey, 1983: *Timber Management: A Quantitative Approach*. Krieger Publishing Company, 333pp.

Corona, P., R. Scotti, and N. Tarchani, 1998: Relationship between environmental factors and site index in Douglas-fir plantation in central Italy. *Forest Ecology and Management* **110**, 195-207.

Jeong, J. H., K. S. Koo, and C. H. Lee, 1994: Characteristics and tree growth of gray forest soil type by forest soil classification in Korea. *Journal of Japanese Soil and Fertilization* **5**, 483-492. (in Japanese with English abstract)

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.

Kim, D. C., and H. K. Lee, 1967: A study on preparation of yield table for main species. The Research Reports of the Forestry Research Institute **14**, Seoul, 36-54. (in Korean)

Kim, D. C., 1973: Preparation of stand volume tables by using multiple regression analysis method. The Research Reports of the Forestry Research Institute **20**, Seoul, 248-255. (in Korean)

Kim, T. H., J. H. Chung, C. H. Lee, K. S. Koo, W. K. Lee, I. A. Kang, and S.I. Kim, 1991: Studies on the growth of major tree species by forest soil types. The Research Reports of the Forestry Research Institute **42**, Seoul, 91-106. (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 provinces using a digital forest site map. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **5**(4), 247-254. (in Korean with English abstract)

Korea Forest Service, 1998: *Guide for Forest Site Inventory*. 58pp. (in Korean)

Korea Forest Service, 2001: *Development of a Computer Program on the Righteous Tree Selection for a Given site by Using GIS technique*. 7-24. (in Korean)

Meyer, H. A., 1947: The structure and growth of rirgin beech-birch maple hemlock forest in Northern Pennsylvania. *Journal of Agricultural Research*, 12pp.

Monserud, R. A., 1987: Variations on a theme of site index. *Proceedings of IUFRO Forest Growth Modeling and Prediction Conference*. Minneapolis, 419-427.

Myers, R. H., 1986: *Classical and Modern Regression with Applications*. Duxbury Press, 395pp.

Snee, R. D., 1977: Validation of regression models : Methods and examples. *Technometrics* **19**, 415-428.

Song, M. H., 2003: Development of regional site index equations for main tree species based on environmental factors. Kookmin University Master's Degree Thesis, 2-3p, 11pp.

Yun, J. W., 1972: Studies on tree growth by multiple regression analysis. Gangwon National University. *Research Bull. of The Experimental Forests* **1**, 3-55. (in Korean)