

## 환경요인에 의한 잣나무의 지위지수 추정식 개발과 적지 판정

신만용<sup>1</sup> · 정일빈<sup>2</sup> · 구교상<sup>3</sup> · 원형규<sup>3</sup>

<sup>1</sup>국민대학교 산림자원학과, <sup>2</sup>산림조합중앙회 산림자원조사본부, <sup>3</sup>국립산림과학원  
(2006년 4월 29일 접수; 2006년 5월 20일 수락)

## Development of a Site Index Equation for *Pinus koraiensis* Based on Environmental Factors and Estimation of Productive Areas for Reforestation

Man Yong Shin<sup>1</sup>, Il Bin Jung<sup>2</sup>, Kyo-Sang Koo<sup>3</sup> and Heong-Gyu Won<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Forest Resources, Kookmin University, Seoul, Korea

<sup>2</sup>Korea Forest Inventory Center, Korea Forest Corporative Federation, Seoul, Korea

<sup>3</sup>Korea Forest Research Institute, Seoul, Korea

(Received April 29, 2006; Accepted May 20, 2006)

### ABSTRACT

Site index is an essential tool to estimate forest productivity. Generally, a site index equation is developed and used from the relationship between stand age and dominant tree heights. However, there is a limit to the use of the site index equation in the application of variable ages, environmental influence, and estimation of site index for the unstocked forest. Therefore, it has been attempted to develop a new site index equation based on various environmental factors including site, climate, and topographical variables. This study was conducted to develop a site index equation based on the relationship between site index and environmental factors for the species of *Pinus koraiensis* in Yangpyung-Gun, Gyunggi Province. The influence of climatic factors (temperature and solar irradiation ratio), topographical factors (elevation, slope, ratio of slope to valley and aspect) and soil profiles (soil depth by layer and soil consistency) on site index were evaluated by multiple regression analysis. Five environmental factors were selected in the final site index equation for *Pinus koraiensis*. The site index equation developed in this study was also verified by three evaluation statistics: model's estimation bias, model's precision, and mean square error of measurement. Based on the site index equation, the number of productive areas for *Pinus koraiensis* were estimated by applying GIS technique to digitized forest maps. In addition, the distribution of productive areas was compared with the areas of current distribution of *Pinus koraiensis*. It is expected that the results obtained in this study could provide valuable information about the amount and distribution of productive areas for *Pinus koraiensis* reforestation.

**Key words** : Site index equation, Climatic factors, Topographical factors, Soil factors, *Pinus koraiensis*

### I. 서 론

임지의 산림생산력은 임지가 일정 기간 동안에 생산할 수 있는 재적의 최대치라고 정의할 수 있다. 즉

산림생산력은 임지의 상태가 어느 정도인지, 그리고 임목이 얼마나 생장할 수 있는지에 대한 정보를 제공한다. 이러한 산림생산력을 추정할 수 있는 방법이 다양하게 개발되어 왔는데, 가장 보편적인 방법은 지위

**Table 1.** General information of study area

Area (ha)	Mean Slop	Average Elevation (m)	Position	Forest Types (ha)		
				Softwood	Hardwood	Mixed
87,810	14°	255	127° 18' 37°21'~27'	42,025	16,293	4,436

지수를 이용하여 임지의 생산능력을 예측하는 것으로 이미 많은 국가에서 이를 이용하고 있다.

지위지수는 임지의 잠재적 생산능력을 평가하는 기준이 되며, 지위를 추정하기 위해 일정 임지에 생육하고 있는 특정 수종의 생장에 영향을 미치고 있는 주요인자들의 특성을 이용하는 다양한 방법들이 시도되어 왔다. 특히 지위지수는 임지의 지력뿐만 아니라 수종별 임목 성장량을 함께 추정할 수 있는 방법으로 알려져 있다. Pederson and Howard(2004) 등은 임지생산력의 추정에 있어서 지위지수를 사용하였으며, 지형인자와의 상관 분석을 통한 지위지수 추정식을 개발하였다. 또한, Corona *et al.*(1998) 등은 지형인자 및 기상인자를 포함한 미송의 지위지수 추정식을 개발하였다.

최근에 보급된 첨단과학기술의 적용에 따라 GIS 기반의 다양한 산림 환경정보가 구축됨으로써 좀 더 많은 인자를 고려한 지위지수 추정이 가능해졌다. 즉, 첨단과학기술의 보급과 활용은 기존의 임령과 수고에 의존하여 왔던 지위지수 추정에서 한발 더 나아가 다양한 산림환경을 고려한 산림생산력을 추정할 수 있다는 것을 의미한다.

본 연구는 경기도 양평군의 잣나무 임분을 대상으로 기후, 지형, 그리고 토양 조건 등과 같은 입지환경 요인을 이용하여 잣나무 임분의 최적 지위지수 추정식을 조제하고, 이를 이용하여 잣나무림 적지를 판정함으로써 경기도 양평군의 잣나무 임분에 대한 조림 가능면적을 GIS 기법을 이용하여 도출하였다. 본 연구에서 얻은 결과는 우리나라 주요 조림수종인 잣나무의 적지 판정뿐만 아니라 이를 도면상에 구획함으로써 효율적인 조림계획의 수립과 관리가 가능할 것으로 기대된다.

## II. 재료 및 방법

### 2.1. 연구대상지

본 연구는 경기도 양평군을 대상으로 산림생산력에 영향을 미치는 입지환경 인자를 이용하여 잣나무림의

지위지수 추정식을 개발하고, 이에 근거하여 잣나무림의 적지면적을 산출하고자 하였다. 양평군의 지리적 위치는 도면상으로 좌측 하단을 기준으로 북위 37° 21', 동경 127° 18'이다. 또한 양평군의 평균 해발고도는 약 255m이나 지역적으로 편차가 심하며, 평균 경사는 14°로 비교적 완만한 지형조건을 가지고 있다 (Table 1).

연구 대상지인 양평군의 총 면적은 87,810 ha인데, 그 중에서 산림면적은 63,242 ha로 전체 면적의 72%를 차지하고 있다. 양평군의 전체 산림을 임상별로 보면 침엽수림이 42,025 ha(66.5%)로 가장 넓고 활엽수림은 16,293 ha(25.6%), 혼효림은 4,436 ha(7%)이며 무림목지는 488 ha(0.9%)이다(Table 1). 양평군의 침엽수림 중에서 본 연구에서 지위지수 추정식을 조제할 예정인 잣나무림은 12,846 ha인 것으로 파악되었다.

### 2.2. 자료의 정리

본 연구에서 사용한 자료는 양평군의 산림입지 자료, 지형자료, 기후 자료, 그리고 생장 자료로 구성되어 있다. 산림입지 자료는 국립산림과학원에서 구축한 수치산림입지도의 데이터를 사용하였으며, 지형 자료는 1:25,000 수치지형도를 이용하여 실측 데이터를 산출하였다. 한편 본 연구에서 사용된 기후 자료는 임목 성장기간 동안의 월별 평균 기온과 일사수광비율이다. 생장 자료에 포함된 임령과 우세목의 평균 수고는 기준 임령 30년에 대한 지위지수 추정을 위해 사용되었다. 본 연구에서 사용된 모든 자료는 기후 자료의 기초가 되는 수치기후도에 적용할 수 있도록 90 m의 격자 단위로 정리하여 분석에 사용하였다.

#### 2.2.1. 산림입지 자료의 정리

수치산림입지도에 포함된 입지 자료는 산림입지조사요령(Korea Forest Service, 1998)에 따라 현지 조사되어 활용할 수 있도록 전산화된 자료이다. 수치산림입지도에 포함된 28개의 인자 중에서 잣나무림의 지위지수 추정식을 도출하기 위해 사용한 인자는 총 6개

이다. 즉, 상대적으로 산림생산력에 영향을 많이 미치는 인자로서 유효토심, A층 및 B층 토심, 능선과 계곡의 비, 그리고 A층과 B층 건밀도이다. 이상의 인자들 중에서 3가지 형태의 토심과 능선과 계곡의 비는 실측값으로 정리하였으며, A층과 B층의 건밀도는 조건에 따라 코드화된 수치로 사용하였다.

### 2.2.2. 지형자료의 정리

본 연구에서 지위지수 추정식을 조제하기 위해 사용된 지형자료는 해발고도, 방위, 그리고 경사의 3가지이다. 경사는 퍼센트 단위로 분류하여 산출하였으며, 방위 값은 연산의 단위를 고려하여 Radian 값으로 치환하여 도출하였다(Pederson and Howard, 2004).

### 2.2.3. 기후자료의 도출

본 연구에서 사용된 기후자료는 Naurzbaev et al. (2004)에 의해 식물생장에 주요한 영향을 미치는 것으로 밝혀진 기온자료와 일사수광비율이다. 기온자료는 산림의 생장기간인 5월부터 8월까지의 자료를 사용하였다. 기온자료는 해당 월의 평균기온으로 치환하여 grid 형태의 파일로 저장하였으며, 각 grid의 크기는 90 m×90 m이다.

일사수광량은 지형을 고려한 경사면의 시간대별 일사수광량의 적산값의 평균을 사용하였다. 이는

Chung(2003)에 의해 개발된 ArcMacro로 작성된 프로그램을 이용하여 해당 월의 Julian Day만을 계산한 것이다. 이 프로그램은 복잡한 산악지형이 비교적 잘 반영되어 있으며, 특히 지형 특성에 의해 만들어지는 그늘에 대한 직달일사 성분을 계산하여 정밀한 태양의 위치와 지형간의 기하학적인 관계를 규명한 것이다. 본 연구에서는 해당 월 전체의 Julian day를 사용하지 않고 대표 값으로 해당 월의 첫째 날만을 계산하였다. 이는 각 일별 수광량의 차이는 크게 변하지 않지만, 태양의 방위각에 따라 시간대별 수광량은 지형에 의해 그늘이 질 경우 값의 차이를 보이기 때문이다.

### 2.2.4. 기준임령 30년에 대한 지위지수의 추정

본 연구에서는 수치산림임지도에 나타난 임령과 수고 자료에 근거하여 기준임령을 30년으로 하는 수종별 지위지수를 추정하였다. 이를 위해 Chapman-Richards의 모델(Clutter et al., 1983)을 이용하여 국립산림과학원에서 개발한 잣나무의 지위지수 추정 모델의 모수 추정치를 사용하였다. 이와 같이 얻어진 자료에 근거하여 연구 대상지인 경기도 양평군에 분포하고 있는 잣나무 임분에 대한 기준 임령 30년에 대한 지위지수를 정리하였다.

### 2.2.5. 자료의 분류

이상과 같은 방법으로 연구 대상지의 잣나무 임분에

**Table 2.** Variables and its code description used in this study to develop site index equation for *Pinus koraiensis*

Variables	Variable Name	Code Description
SI	Site Index at Base Age 30 Years	real measured values
X <sub>1</sub>	Mean Solar Irradiation of Julian Day 151	real measured values
X <sub>2</sub>	Mean Solar Irradiation of Julian Day 181	real measured values
X <sub>3</sub>	Mean Solar Irradiation of Julian Day 212	real measured values
X <sub>4</sub>	Mean Solar Irradiation of Julian Day 246	real measured values
X <sub>5</sub>	Mean Temperature of May	real measured values
X <sub>6</sub>	Mean Temperature of June	real measured values
X <sub>7</sub>	Mean Temperature of July	real measured values
X <sub>8</sub>	Mean Temperature of August	real measured values
X <sub>9</sub>	Elevation	real measured values
X <sub>10</sub>	Aspect(radian)	real measured values
X <sub>11</sub>	Slope(percent)	real measured values
X <sub>12</sub>	Effective Soil Depth	real measured values
X <sub>13</sub>	Soil Depth in Horizon A	real measured values
X <sub>14</sub>	Soil Depth in Horizon B	real measured values
X <sub>15</sub>	Ratio of Valley to Hill	real measured values
X <sub>16</sub>	Soil Consistency in Horizon A	1: very crumbly 2: slight dry 3: soft 4: hard 5: very hard
X <sub>17</sub>	Soil Consistency in Horizon B	1: very crumbly 2: slight dry 3: soft 4: hard 5: very hard

**Table 3.** Data summary of the fit and test data sets used in this study

Species	Total	Fit Data	Test Data
<i>Pinus koraiensis</i>	4,150	2,905	1,245

대한 지위지수 추정식을 조제하기 위해 정리한 자료는 Table 2와 같다. 최종적으로 정리된 자료는 종속변수인 기준 임령을 30년으로 하는 지위지수(SI)와 독립변수 17개이다. 각 독립변수에 속한 인자는 X1~X17까지 지정하고 분석을 위해 수종별로 데이터베이스화하였으며, 이 과정에서 자료의 이상치 유무를 점검하여 이상치는 분석에서 제외하였다.

이와 같이 얻어진 자료는 7:3의 비율로 추정자료(fit data)와 검증자료(test data)로 무작위로 분류하여 정리하였다(Table 3). 추정자료는 회귀기법에 의해 잣나무 임분의 지위지수 추정식을 조제하기 위한 자료이며, 검증자료는 추정자료에 기초하여 얻어진 추정식의 통계적 검증에 사용되는 자료이다(Snee, 1977; Song, 2003).

### 2.3. 지위지수 추정식의 조제

경기도 양평군을 대상으로 환경요인에 의한 잣나무 임분의 최적 지위지수 추정식을 도출하기 위해 중회귀 분석의 단계별 회귀기법(stepwise regression)에 의하여 지위지수 추정에 필요한 최적 변수의 조합을 선택하였다. 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 최적 변수의 조합에 의하여 결정계수가 높은 지위지수 추정식이 조제되도록 하였다.

이상과 같은 방법으로 조제된 수종별 지위지수 추정식의 적합성을 검증하기 위한 검증 통계량은 모형의 추정편의(model's estimation bias), 모형의 정도(model's precision), 그리고 이 두 가지를 고려한 측정치에 대한 오차의 평균평방화(mean square error type of measure)인 모형의 표준오차 등의 3가지 검증 통계량을 사용하였다(Shin, 1990; Arabatzis and Burkhart, 1992).

본 연구에서는 최종적으로 추정자료와 검증자료를 합친 통합자료(pooled data)에 근거하여 최종 지위지수 추정식을 조제하였다. 즉, 추정자료만을 이용하여

**Table 4.** Evaluation guideline of productive area based on site index for *Pinus koraiensis* in study site

Classification	Species	<i>Pinus koraiensis</i>
Productive area		greater than 14 in site index
The most productive area		greater than 16 in site index

조제된 잣나무 임분의 지위지수 추정식이 일종의 독립자료로 간주되는 검증자료에 의해 통계적 검증에서 문제가 없는 것으로 판정된 경우, 최종 지위지수 추정식은 추정자료와 검증자료를 통합한 통합자료에 근거하여 개발하였다.

### 2.4. 적지의 판정

본 연구에서는 잣나무 임분의 적지 판정의 기준을 앞에서 조제한 지위지수 추정식에 근거한 산림생산력에 의해 설정하였다. 적지판정의 기준은 기준임령을 30년으로 하는 잣나무 임분의 지위지수 곡선식의 범위에 근거하여 Table 4와 같이 설정하였다. 추정된 지위지수에 따라 잣나무의 적지 및 최적지의 범위를 설정하였는데, 적지의 기준은 산림생산력이 상대적으로 높은 것으로 인정할 수 있는 최소한의 조건이다. 잣나무의 적지 기준은 지위지수가 최소한 14 이상으로 추정되면 적지로 판정하였고, 지위지수가 16 이상일 경우에는 최적지로 구분하였다.

연구 대상지인 양평군의 자료는 90 m×90 m의 grid로 구분된 수치지도에 저장되어 있다. 잣나무의 적지면적을 산출하기 위해 먼저 양평군에 분포하는 전체 산림지역을 대상으로 앞에서 최종적으로 도출한 잣나무 지위지수 추정식을 적용하여 각 grid별로 지위지수를 추정하였다. 이와 같이 얻어진 grid별 지위지수는 Table 4에서 제시한 적지 판정 기준과 비교하여 일정 지위지수 이상의 grid의 수를 산출한 후, 최종 적지면적을 ha 단위로 계산하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 3.1. 기준임령 30년의 지위지수 추정

지위지수 추정식의 종속변수에 해당하는 기준임령 30년의 지위지수는 수치산림입지도 DB에 포함된 임령과 수고 자료를 앞에서 언급한 Chapman-Richards 모델을 이용하여 추정하였으며 그 결과는 Table 5와 같다. 이와 같이 얻어진 지위지수 추정치를 추정자료,

**Table 5.** Estimates of site index at base age 30 for *Pinus koraiensis* stands in study site

Species	No. of Samples	Site Index(m)			
		Mean	Min.	Max.	S.E.
				Fit Data	
<i>Pinus koraiensis</i>	2,905	15.9	5.0	28.9	0.09
				Test Data	
<i>Pinus koraiensis</i>	1,245	15.9	5.0	28.7	0.14
				Pooled data	
<i>Pinus koraiensis</i>	4,150	15.9	5.0	28.9	0.07

검증자료, 그리고 통합자료로 구분하여 정리한 후 비교하였다.

기준 임령이 30년일 때 잣나무 임분의 평균 지위지수는 16 m로 추정자료와 검증자료 간에 변이가 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 무작위로 자료를 분류하여 지위지수식의 추정자료와 검증자료로 사용하여도 문제가 없다는 것을 의미한다. 즉, 분류된 자료 간에 동질성이 입증된 것이다. 이는 결과적으로 최종 지위지수 추정식을 개발하기 위해 두 개의 자료를 통합하여도 무방하다는 것을 나타낸 것이다. 하지만 Table 5에 제시된 잣나무 임분의 지위지수 요약은 전체 표본의 평균에 해당되는 것으로, 각 표본 간에는 상당한 변이를 보이고 있다. 즉, 각 지위지수의 최소값과 최대값의 차이가 상당히 큰 것에서 이러한 사실을 확인할 수 있다.

### 3.2. 지위지수 추정식의 개발

경기도 양평군의 잣나무 지위지수 추정식을 조제하기 위해 먼저 추정자료에서 도출한 지위지수와 17개 환경인자 간의 상관분석을 통하여 지위지수 추정식 조제에 적합한 환경인자를 선별하였다. 이 과정에서 환경인자 간에 내부상관이 높은 인자를 1차적으로 제외하였으며, 최종적으로 산림생산력에 영향을 미치는 환경인자를 선별하여 지위지수 추정식 모형에 적용하였다.

Table 6은 환경인자의 조합에 의해 잣나무 지위지수 추정식을 조제한 결과이다. 상관분석을 통하여 예비적으로 선별한 환경인자를 대상으로 단계별 회귀분석 기법을 사용하여 경기도 양평지역 잣나무 임분의 지위지

수 추정에 적합한 최적의 조합을 도출하였다. 결과적으로 연구 대상지의 잣나무 임분은 5개의 환경인자의 조합으로 지위지수를 추정할 수 있는 것으로 판명되었다. 지위지수 추정식에 포함된 환경인자는 일시수광비율( $X_4$ ), 7월의 평균기온( $X_7$ ), B층 토심( $X_{14}$ ), 계곡과 능선의 비율( $X_{15}$ ), 그리고 B층 견밀도( $X_{17}$ ) 등으로 이러한 인자들이 산림생산력에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

본 연구에서 개발된 잣나무 지위지수 추정식은 모형의 설명력을 나타내는 결정계수가 0.30으로 비교적 작은 값을 보였다. 하지만 산림생산력에 영향을 미치는 요인은 본 연구에서 사용한 환경 요인 외에 수종의 유전적 특성, 측정 오차, 그리고 다른 환경 요인 등이 작용하는 것으로 판단된다. 특히 5개의 환경 인자만으로 지위지수 추정에 필요한 30% 정도의 변이를 설명할 수 있다는 사실은 다양한 요인이 영향을 미치는 자연현상을 설명함에 있어서 결코 낮지 않은 것으로 판단된다.

### 3.3. 지위지수 추정식의 검증

Table 7은 앞에서 얻어진 잣나무의 지위지수 추정식을 검증자료에 적용하여 평가 통계량인 모형의 평균편의(MD), 모형의 정도(SDD), 그리고 모형의 표준오차(SED)를 분석한 검증 결과이다. 지위지수 추정식의 편의를 나타내는 MD를 보면 전체적으로 -0.16 m로 높은 추정 능력을 보이고 있다. 평균 편의가 음수로 나타났는데, 이는 지위지수 추정식에 의한 추정치가 실측치보다 다소 과대 추정된 결과이지만 편의 자체는

**Table 6.** Regression coefficients of site parameters to environmental factors for *Pinus koraiensis* in study site

Tree species	Regression Equations	R <sup>2</sup>
<i>Pinus koraiensis</i>	$SI = 9.99 - 9.39X_4 + 0.29X_7 + 0.11X_{14} - 0.16X_{15} - 0.38X_{17}$	0.30

**Table 7.** Evaluation result of the estimation ability for site index equation based on test data set

Tree species	n	MD	SDD	SED
<i>Pinus koraiensis</i>	1,245	-0.16	3.98	3.99

크지 않은 것으로 보인다. 특히 편이의 절대값이 작아 본 연구에서 개발된 잣나무의 지위지수 추정식은 실제 지위지수의 추정능력이 양호한 것으로 평가된다. 이러한 결과는 Song(2003)에 의해 개발된 지위지수 추정식에서의 검증결과와 유사한 경향을 보이는 것이다.

한편 지위지수 추정식의 정도 및 적합성을 나타내는 SDD와 SED의 경우에도 비슷한 양상을 보였다(Table 7). 결과적으로 본 연구에서 얻어진 지위지수 추정식은 검증결과 추정 능력이나 정도에 있어서 문제가 없는 것으로 판명되었다. 따라서 본 연구에서 개발한 몇 가지 환경요인에 의한 잣나무 임분의 지위지수 추정식은 실제 활용가치가 높을 것으로 판단된다.

### 3.4. 최종 지위지수 추정식의 도출

#### 3.4.1. 최종 지위지수 추정식의 조제

이상과 같이 본 연구에서 개발한 잣나무의 지위지수 추정식은 통계 검증을 통해 문제가 없는 것으로 판명되었다. 따라서 추정자료와 검증자료를 합친 통합자료에 근거하여 최종적으로 지위지수 추정식을 도출한 결과는 Table 8과 같다. 최종 추정식 조제 결과 추정자료에 근거하여 얻어진 회귀식의 결정계수와 비교하여 0.01 정도가 증가한 것으로 나타났다. 이는 추정자료와 통합자료의 표본의 수가 다소 다르기 때문인 것으로 판단된다. 하지만 최종적으로 얻어진 지위지수 추정식은 이전의 추정자료에 근거하여 도출되었던 추정식과 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

잣나무의 최종 지위지수 추정식에는 8월의 평균 일사수광비율이 포함되어 있다. 이 인자의 회귀계수는 -11.26으로 그 절대값이 다른 계수에 비해 상대적으로 큰데, 수광비율은 0과 1 사이의 값을 가지기 때문에 이러한 특성이 반영된 결과로 보인다. 특히 지위지수 추정식의 상수항이 큰 것은 일사수광비율의 회귀계수 추정치의 영향을 받은 결과이다. 잣나무의 지위지수

추정식에서는 7월의 평균기온과 B층 토심이 가장 중요한 영향인자로 판정되었다. 또한 능선 대 계곡비와 B층 견밀도도 지위지수에 영향을 미치는 인자로 추정식에 포함되었다. 결국 잣나무의 산림생산력에 영향을 미치는 토양환경은 A층보다는 B층의 물리적 성질임을 알 수 있다.

지위지수 추정식을 조제하는 과정에서 동일하게 관찰된 점은 토양인자의 영향력이 매우 높게 나타났다는 것이다. 특히 B층 토양의 산림생산력 추정에 큰 영향을 미치고 있다. 또한 토양인자 외에도 지형인자인 능선 대 계곡비가 추정식의 조제과정에서 비교적 높은 상관을 보였다. 이에 비해 다른 지형인자인 경사와 방위는 지위지수를 추정하는데 상대적으로 영향력이 낮은 것으로 평가되었다. 동시에 해발고도는 산림생산력에 일정 수준의 영향력이 인정되지만, 그 값의 편차 및 범위가 다른 인자에 비해 매우 크기 때문에 지위지수 추정식에 포함되지 않았다. 한편 월별 평균 일사수광비율과 월별 평균 온도의 경우 지위지수 추정에 미치는 영향력이 비슷하게 나타났다.

#### 3.4.2. 비 설명 인자에 대한 고찰

Table 8에서 보는 바와 같이 본 연구에서 조제한 최종 지위지수 추정식의 결정계수는 0.31이다. 이는 전체 자료가 갖는 변이 중에서 선정된 추정식에 의해 설명되어지는 부분이 31% 정도인 것을 의미한다. 통계 모형을 이용하여 추정식을 개발할 경우 가능하면 설명력이 높은 추정식을 개발하고자 하는 것이 바람직하다. 하지만 본 연구의 경우 복잡한 요인이 작용하는 산림생산력을 몇 가지 환경요인에 의해 설명할 수 있는 추정식을 개발하는 것이 목표이기 때문에 높은 결정계수를 얻는 것은 한계가 있는 것이 사실이다. 이는 수목의 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 보

**Table 8.** The final regression equation developed for the site index estimation of *Pinus koraiensis* stands in this study

Tree species	Regression Equations	R <sup>2</sup>
<i>Pinus koraiensis</i>	$SI = 10.90 - 11.26X_4 + 0.31X_7 + 0.10X_{14} - 0.19X_{15} - 0.28X_{17}$	0.31

인 바 있다. 한편 스코틀랜드에서는 기상 및 토양, 그리고 입지 인자 이외에 시업년도를 추가하여 미송 조립지의 지위를 예측하였으나 45.5%의 설명력을 보인 바 있다(Tyler *et al.*, 1996). 또한 Corona *et al.* (1998)은 이탈리아에서 미송의 지위지수 추정에 있어서 토양 및 기상인자를 이용한 지위지수 추정식을 조제하였는데, 그 설명력이 39%였는데도 불구하고 수목의 생장에 복합적 환경인자가 작용하는 산림생태계 내에서는 적절한 추정식으로 판명된 바 있다.

본 연구에서 얻어진 잣나무 지위지수 추정식이 상대적으로 낮은 설명력을 보인 것은 다음과 같은 요인에 기인하는 것으로 추측된다. 첫째는 측정의 오류로 인해 발생하는 측정오차이다. 본 연구에서 사용한 수치산림입지도는 오랜 기간 동안 많은 인력이 동원되어 광범위한 지역에서 수집된 자료의 일부이다. 따라서 자료의 측정 과정에서 조사자의 숙련도와 기상 조건 등과 같은 조사 당일의 여러 가지 조건 등이 자료의 질에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 둘째는 본 연구에서 사용한 지위지수 추정 모형에 산림 내 개체목 상호간의 경쟁이 고려되지 않은 점이다. 경쟁은 개체목간에 일어나면서 최종적인 산림생산력에 영향을 미치지만, 본 연구에서 수집한 셀 단위의 자료를 반영하는 데는 한계가 있다. 즉, 임분 단위의 분석은 매목조사를 통하여 가능하지만 셀 기반의 지역 단위 분석에는 부적합한 것으로 평가된다.

셋째는 사용된 수치지도의 축적과 관련된 문제이다. 본 연구에서 사용한 기후도는 90 m의 셀 단위로 수치산림입지도나 수치지도보다는 낮은 해상력의 지도로 제작되어 있어 입지의 환경인자 및 지형인자에 대한 반영률과 추정의 정확도는 그만큼 떨어지게 된다. 산림환경인자는 대부분 매우 조밀한 분포를 보이는데 반해 제작된 주제도의 환경반영 비율은 그에 상응하지 못하기 때문에, 이에 대하여서는 측정 및 제작 기술의 개발에 따른 주제도 제작의 정확성을 기대할 수밖에 없다. 마지막으로 본 연구에서는 사용 가능한 자료를 기반으로 지위지수 추정식이 개발되었다. 본 연구에서 사용하지는 않았지만 실제 산림생산력에 영향을 미치는 다른 환경인자가 많이 존재한다는 것이다. 예를 들어 기상 자료의 경우 수분은 임목의 성장과 매우 밀접한 관계임에도 불구하고 수분과 관련한 자료를 본 연구에서는 사용하지 못하였다. 특히 수분 인자 중에서 연 강수량은 산림생산력에 영향을 미치는 매우 중

요한 인자이다(Hill *et al.*, 1948; Steinbrenner, 1963; Monserud, 1987; Corona *et al.*, 1998). 한편 토양 인자 중에서는 보통 점토 함유율이 특히 중요한 것으로 알려져 있으며(Hill *et al.*, 1948; Page, 1970; McGrath, 1975), 지형인자 중에서는 위경도 및 방위가 중요한 것으로 알려져 있다. 방위의 산정 방법은 지역적으로 큰 차이를 보이며 동시에 그 적용방법도 다르다(Steinbrenner, 1963). 이외에도 최근 그 관심도가 높아지고 있는 탄소함유량 등과 같은 미세 환경인자의 영향 또한 간과할 수 없는 중요한 요인으로 판단된다.

### 3.5. 적지의 판정

수종별 적지는 Table 4에서 제시한 기준에 따라 판정하였다. 본 연구에서 조제한 잣나무 임분의 지위지수 추정식을 연구 대상지 전체의 grid 단위 자료에 적용하여 적지 기준을 만족하는 셀을 추출한 후 ha 단위의 면적으로 환산하였다. 이와 함께 적지로 구분된 면적의 공간 분포를 GIS기법으로 도해(圖解)하였으며, 현재의 잣나무 분포와 본 연구에서 판정한 적지 분포 간의 비교를 통해 현재의 잣나무 분포 중에서 적지로 판정된 지역의 면적과 공간적 분포를 제시하였다.

#### 3.5.1. 적지 면적의 산출

본 연구에서는 적지면적의 산출을 위해 지위지수 추정식에 의해 얻어진 지위지수가 14 이상은 적지로 그리고 16 이상은 최적으로 판정하여 면적을 산출하였다. 이를 위해 수치지도로부터 지위지수 추정식에 포함된 인자를 추출하여 면적 계산을 위해 각각의 grid 파일로 제작하였으며 이를 기반으로 연산을 수행하였다. 결과적으로 Subdivision analysis extension의 연산을 통하여 얻은 잣나무 적지 면적의 분석 결과는 Table 9와 같다.

잣나무의 적지는 19,883 ha로 추정되었는데, 이러한 결과는 전체 양평군 산림 면적의 31.4%에 달하는 면적이다. 이는 잣나무가 가지고 있는 일반적인 생리·생

**Table 9.** Estimates of suitable area for *Pinus koraiensis* based on site index

Spices	<i>Pinus koraiensis</i>	
	Productive area	The most Productive area
Area(ha)	19,883	5,696

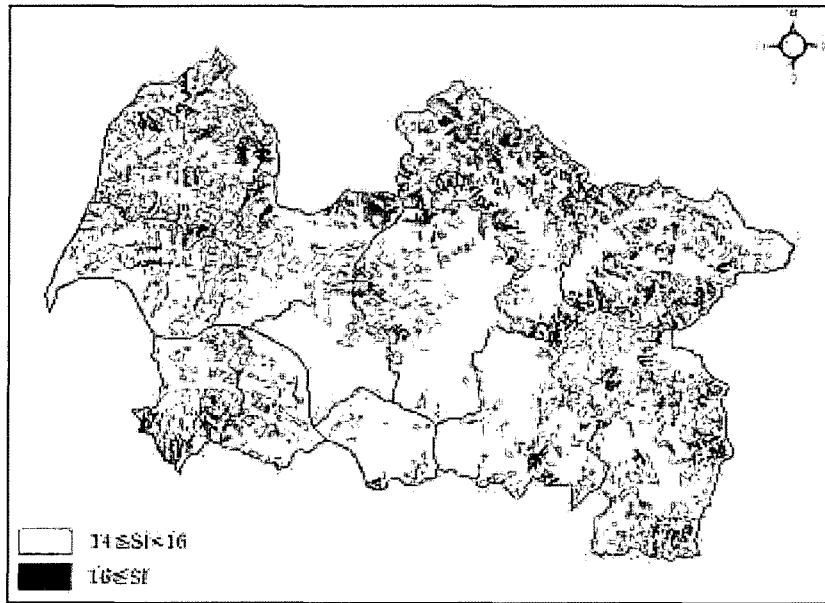


Fig. 1. Distribution of productive areas for *Pinus koraiensis* in study site.

태적 특성이 한랭한 기후조건에 적합하기 때문이며, 양평균은 경기도에 위치하고 있으나 강원도와 인접한 지역임과 동시에 평균 해발고도가 높은 편으로 잣나무 생육 조건에 부합한다고 할 수 있다. 또한 경기도 양평균의 잣나무 최적지는 5,696 ha로 평가되었는데, 이는 양평균 전체 산림의 약 9%에 해당하는 면적이다.

3.5.2. 적지 분포의 도해

양평균의 수치임상도 도엽에 잣나무의 적지 분포를 도해한 결과는 Fig. 1과 같다. 잣나무의 적지는 양평균 전체에 고르게 분포하고 있으며, 하천과 인접한 지역보다는 해발고도가 높은 산림 지역에서 넓게 분포하고 있다. 또한 산정보다는 주로 산림의 사면 부위에서 또는 산록 및 산복 부위가 적지로 판정되었음을 알 수 있다. 잣나무 적지 분포가 지형적으로 산정과 능선에는 거의 나타나지 않는 이유는 토양내의 양분 유출과 토양의 유실이 많기 때문으로 판단된다. 실제 잣나무의 지위수수 추정식에는 토양특성과 관련된 인자가 포함되어 있어 이러한 사실을 뒷받침해 준다.

또한 넓은 하천 주변에는 비교적 지위가 낮은 반면, 산림내의 수분공급이 원활한 지역에서 높은 값을 보이고 있다. 이는 넓은 하천 인근은 양분의 유실이 많지만 산림 내에서는 수분공급과 양분의 유실속도 간의 균형을 유지하면서 임목의 생장에 유리한 환경을 조성

하기 때문으로 추정된다. 즉, 인근에 하천이 있어도 유실속도가 빠르지 않아 일정 수준의 수분을 공급하는 지역은 임목생장에 유리하다는 것이다. 물론 이러한 지역에는 기본적으로 토양으로부터의 영양공급이 뒷받침되어야 한다.

3.5.3. 잣나무 분포 현황과 적지 분포와의 비교

경기도 양평균의 잣나무 분포 현황을 나타내는 수치임상도와 Fig. 1의 잣나무 적지 분포도를 중첩하여 현재 분포하는 지역이 잣나무의 적지인 면적은 Table 10과 같다. 경기도 양평균의 잣나무는 현재 12,846 ha에 분포되어 있지만, 그 중에서 적지로 판정된 면적은 현실 임상의 13.6%에 불과한 1,744 ha로 추정되었다.

따라서 현재 잣나무가 분포되어 있는 면적 중에서 약 86%는 잣나무의 적지가 아님에도 불구하고 과거 조림에 의해 인공적으로 조성되어 현재에 이르고 있음을 의미하는 것이다. 앞에서 언급한 바와 같이 산림생산력을 고려한 양평균의 잣나무 적지 면적이

Table 10. Estimates of suitable area among the current distribution of *Pinus koraiensis*

Classification	<i>Pinus koraiensis</i>
Real Area (ha)	12,846
Estimate of Productive Area (ha)	3,191



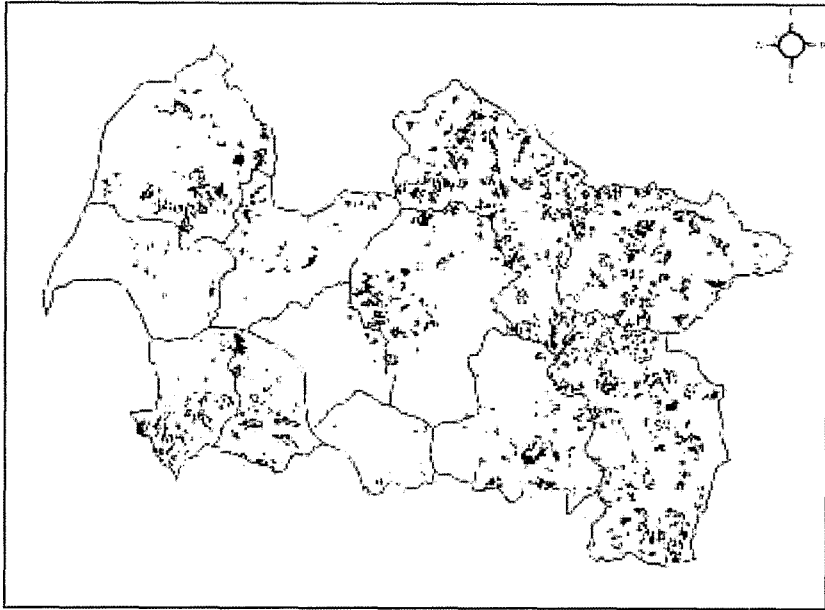


Fig. 2. Distribution of productive areas among the current distribution of *Pinus koraiensis*.

19,883 ha인 것을 고려하면 잣나무의 경우 적지적수의 개념을 고려하지 않은 결과가 현실로 나타난 것으로 보인다. 한편 Fig. 2는 이상에서 분석한 잣나무의 현재 분포 중에서 적지로 판정된 지역을 도시한 것이다. 이러한 결과는 실제 지형에서 지위지수 값의 분포를 예측함과 동시에 잣나무 임분에 대한 적지 면적 및 위치 등을 도면으로 상세히 출력 할 수 있어 산림경영의 의사결정에 중요한 자료가 될 것으로 보인다.

#### IV. 결 론

현재 우리나라에서 사용하고 있는 지위지수 추정식은 수령과 우세목의 수고의 관계를 이용하는 방법으로 조제되었는데, 다양한 임령에 적용할 경우에는 추정능력에서 한계가 있다. 또한 현재 사용하고 있는 지위지수식은 전국적인 적용을 목적으로 제작되어 지위지수 추정에 있어 환경적 영향을 고려한다든지, 또는 무림목지의 지위지수를 추정할 수 없다는 문제점을 가지고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구는 잣나무 임분을 대상으로 다양한 환경 인자를 이용하여 임지생산력을 추정할 수 있는 최적의 지위지수 추정식을 조제하였다. 경기도 양평군을 대상으로 도출된 잣나무 임분의 지위지수 추정식에 채택된 입지 환경인자는 5개

로 구성되어 있으며, 채택된 인자는 모두 실수화 된 것으로 산림생산력을 보다 쉽게 평가할 수 있는 장점을 갖는다. 또한 본 연구에서 조제된 지위지수 추정식에는 기존에 사용하지 못하였던 기상인자와 지형인자가 독립변수에 포함되어 있어 다양한 입지환경 인자를 통해 산림생산력을 추정할 수 있었다.

본 연구에서 개발된 잣나무 지위지수 추정식의 설명력을 나타내는 결정계수는 0.31로 비교적 낮은 편이나, 모형의 평균 편의, 정도, 표준오차 등의 3가지 평가통계량에 근거하여 검증한 결과 평균편의가  $-0.16$  m이고 모형의 표준오차가 3.99 m로 나타나 실제 적용에 문제가 없는 것으로 판명되었다. 한편 본 연구에서는 수치지도를 이용하여 지위지수 추정식에 근거한 잣나무의 적지면적 산출뿐만 아니라 위치를 도면으로 상세히 출력함으로써 연구 대상지의 산림경영에 필요한 의사결정 도구로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 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.
- Chung, Y. R., 2003: Spatial interpolation of hourly air tem-

- perature in complex terrain based on solar irradiance correction. Kyunghee University Master's Degree Thesis, 76pp. (In Korean with English abstract)
- 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, 333 pp.
- Corona, P., R. Scotti, and N. Tarchiani, 1998: Relationship between environmental factors and site index in Douglas-Fir plantation in central Italy. *Forest Ecology and Management* **110**, 195-207.
- Hill, W. W., A. Arnst, and R. M. Bond, 1948: Method of correlating soils with Douglas-fir site quality. *Journal of Forestry* **45**, 835-841.
- 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.
- Korea Forest Service, 1998: *Guide for forest site inventory*, 58pp. (In Korean)
- McGrath, C. L., 1975: *Soil-site quality relationships on the University of Idaho experimental forest*. Station Note, Forest, Wildlife and Range Experiment Station, University of Idaho, 22pp.
- 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.
- Naurzbaev, M. M., M. K. Hughes, and E. A. Vaganov, 2004: Tree-ring growth curves as sources of climatic information. *Quaternary Research* **62**, 126-133.
- Page, G., 1970: Quantitative site assessment: Some practical applications in British forestry. *Forestry* **43**, 45-56.
- Pederson, B. S., and J. L. Howard, 2004: The influence of canopy gaps on overstory tree and forest growth rates in a mature mixed-age, mixed species forest. *Forest Ecology and Management* **196**, 351-366.
- Shin, M. Y., 1990: The use of ridge regression for yield prediction models with multicollinearity. *Journal of Korean Forest Society* **79(3)**, 260-268.
- 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, 11p. (In Korean with English abstract)
- Steinbrenner, E., 1963: The influence of individual soil and physiographic factors on site index of Douglas-fir in West Washington. *Repr. from proceedings 2nd North American Forest Soils Conference Oregon State University*, 261-277.
- Tyler, A. L., D. C. Macmillan, and J. Dutch, 1996: Models to predict the general yield class of Douglas-Fir, Japanese larch and Scots pine on better quality land in Scotland. *Forestry* **69**, 13-24.