

## 완도지역의 붉가시나무 생육 적지예측 및 탄소저장량 추정

황정순 · 강진택<sup>†</sup> · 손영모 · 전현선

국립산림과학원 산림산업연구과

### Prediction of the Optimal Growth Site and Estimation of Carbon Stocks for *Quercus acuta* in Wando Area

Hwang, Jeong-Sun, Kang, Jin-Teak<sup>†</sup>, Son, Yeong-Mo and Jeon, Hyun-Sun

Division of Forest Industry Research, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

#### ABSTRACT

This study was carried out to predict the optimal growth site and estimate carbon stocks of *Quercus acuta*, evergreen broad-leaved trees in warm temperate zone according to climate change. The criterion for the optimal site prediction was created by quantification method with quantitative and qualitative data, collected from growth factors of stands and environmental factors of survey sites of 42 plots in *Q. acuta* by study relationship between growth of tree and site environmental factors. A program for the optimal site prediction was developed by using GIS engine tools. To prediction of the suitable growth site of *Quercus acuta*, developed program in this study applied to Wando in Jeollanam-do, distributing a various evergreen broad-leaved trees of warm temperate zone. In the results from analysis of the optimal site prediction on *Q. acuta*, the characteristics of the optimal site showed as follows; site environmental features of class I (the best site class for *Q. acuta*) was defined as 401 ~ 500 m of altitude, 21 ~ 25° of slope with above hillside, residual of deposit convex of slope type with west of aspect. The area and carbon stocks of optimal site prediction by class for *Q. acuta* in class I showed 147.1 ha (2.5%), total 316.5 tC/ha, total 1,161 tCO<sub>2</sub>/ha/yr of class I, 2,703.5 ha (46.3%), total 5,817.4 tC/ha, total 21,331 tCO<sub>2</sub>/ha/yr of class II, 2,845.5 ha (48.6%), total 6,123.0 tC/ha, total 2,845.5 tCO<sub>2</sub>/ha/yr of class III and 153.7 ha (2.6%), total 330.7 tC/ha, total 1,213.7 tCO<sub>2</sub>/ha/yr of class IV.

Kew words : Optimal Growth Site, Carbon Stocks, Evergreen Broad-leaved Trees, Warm Temperature Zone, Climate Change.

## 1. 서 론

최근 전 세계적으로 지구온난화와 이상기온 등 기후변화로 인한 동식물의 서식지 및 분포지의 변화, 고산 및 희귀 수종의 소멸에 의한 생물다양성의 변화 등 산림생태계의 많은 변화가 일어나고 있다. 지난 20년 간 전 세계 에너지·환경문제 중에서 가장 중요한 이슈가 기후변화 문제이다. 기후변화는 인류가 에너지 사용 및 경제활동으로 온실가스를 대량 배출하면서 나타나는 현상이라고 과학자들은 밝히고 있다. 한편, 지구온난화로 인해 지난 세기 동안 연평균 기온이 약 0.5°C 증가하였고 1994년부터는 0.96°C 증가한 것으로 보고되고 있다

(MacDonald and Sertorio, 1990). 아울러 1월 평균최저기온은 10년에 1.5°C씩 증가하였으며(Chung and Yoon, 1999), 이에 따라 한반도에서의 난대림 영역이 점차 확대될 것으로 예상되고 있다. 현재의 지구온난화 추세가 계속될 경우, 2020년 기온이 2000년 대비 평균 1.8°C 상승하고, 강수량은 8.4% 증가하며, 2070년에는 기온은 3°C, 강수량은 16% 증가할 것으로 예측하고 있다. 연평균기온이 2°C 상승할 때 산림기후대는 위도상 150~550 km, 고도는 150~550 m 가량 올라갈 것으로 예상된다. 온난화에 따른 나무는 매년 평균 4~200 km로 이동하여 기후대 이동을 쫓아가지 못하게 되며, 수종별로는 소나무 500 km, 전나무 300 km, 자작나무 2,000 km, 밤나무

<sup>†</sup> Corresponding author : [beg8bune@korea.kr](mailto:beg8bune@korea.kr)

Received November 5, 2015 / Revised November 25 2015 / Accepted December 7, 2015

300 km 정도 이동할 것으로 예상된다(Lim *et al.*, 2006). 따라서 기후변화에 대처할 수 있는 조림수종의 개발이 주목을 받고 있으며, 주요 관상수종으로 난대 상록활엽수종이 거론되고 있다(Shin *et al.*, 2002). 이러한 기후변화 현상은 범지구적이며, 이로 인한 파급효과는 장기간에 걸쳐 발생한다. 또한 생물종다양성협약(CBD) 등 국제적으로 논의되고 있는 국가 생물자원 확보와 개발을 위한 보이지 않는 전쟁이 시작되었으며, 이러한 자원 확보를 위한 다양한 노력이 시급한 실정이다. 그 중 상록활엽수림의 분포구역 변화가 주목을 받고 있으나(Lee and Choi, 2010; Yun *et al.*, 2011), 상록활엽수림에 대한 기존의 연구들은 식생구조와 식물상에 관한 연구(Oh and Shim, 2006; Chung *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2010)가 대부분이다. 우리나라 난·온대 상록활엽수는 기온상승으로 고위도 및 남부 내륙으로 분포가 확대되고 있으며, 난·온대 상록활엽수의 북방한계선에 변화가 나타나고 있다(Yun *et al.*, 2011).

최근 기후변화 대응을 위해 발표된 교토의정서는 국제적으로 온실가스 감축이행이 불가피한 실정임을 제시하고 있다. 우리나라도 지구온난화에 따른 난·온대 상록활엽수림의 분포구역 변화와 내륙으로 북상 이동이 진행되고 있는 만큼, 탄소흡수원으로써 상록활엽수림의 성장과 탄소평가에 대한 기초적인 연구도 선행되어야 한다. 이러한 시점에서 난·온대수종의 생육환경의 변화에 따른 조림적지 선정에 대해 고려해야 하는 수종별 생태적 특성 및 다양한 입지환경인자들을 선정하는 일은 매우 중요한 사항이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 Noh(1983)는 기상인자를 고려한 조림지 예정지의 온도를 추정하여 조림적지 여부를 판정하였고, Kang *et al.* (1997)은 기후, 토양, 지형인자 및 수종 특성을 고려한 수치지도해석에 의한 조림 적지분석을 시도하였고, Kim and Chung (2001)은 Neural Network 기법에 의한 적지적수 판정방법을 제시하였으며, Lee *et al.*(2006)은 퍼지집합과 GIS를 이용한 고로쇠나무 임분의 수액채취 적지 분석과 GIS를 이용하여 오미자 재배 적지 분석(Kim *et al.*, 2011)을 수행한 바 있다. 또한 최근에는 기후변화와 관련한 연구로 Ko *et al.* (2014)은 기후변화 시나리오에 따른 소나무 등 수종의 적지 분포 변화 예측에 관한 연구, Chun *et al.*(2013)은 소나무의 지리적 분포 및 생태적 지위 모형을 이용한 기후변화 영향 예측에 관한 연구를 수행한 바 있다. 이와 같이 최근 기후변화에 따른 수목 및 식물들의 적지 예측에 관한 다양한 연구(Kang *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2011)가 이루어지고 있는 추세이다. 선박재, 건축재 등 다양한 용도로 사용되고 있는 붉가시나무(*Quercus acuta*)는 상록활엽교목으로 전남, 제주 등 난대림지역에 분포하는 참나무과 수목으로 수고 20 m, 흉고 직경 60 cm까지 자라는

상록활엽 교목이다(Korea National Arboretum, 2009). 난대수종 중 비교적 내한성이 강할 뿐만 아니라, 염해 및 공해에도 강하고, 수형이 아름다워 남부지방에서 가로수 및 조경수로 많이 이용되고 있다. 따라서 본 연구는 장기적으로 기후변화에 따른 난대수종 생육 분포지의 확대에 따른 붉가시나무의 최적 생육적지 예측과 적지등급별 탄소저장량 예측을 위해 수행하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 연구방향

기후변화에 따른 붉가시나무의 효율적인 적지 예측 및 mapping을 위하여 총 42개 표준지를 선정하여 흉고직경과 입지환경인자를 조사하였다. 수량화 이론 I류에 의하여 표준지의 입지환경 인자와 대상임목의 흉고직경 성장량과의 관계 분석에 의해서 적지예측 평가모델을 설정하였다. 설정된 적지예측 기준에 의해 적지예측 프로그램을 작성한 후, 지리공간분석과 적지를 지형도상에 mapping 가능하도록 GIS를 응용하여 『적지예측 및 Mapping 프로그램』을 개발하였다.

### 2.2 조사지 개황

#### 2.2.1 조사지역

남해안 도서 및 제주지역 및 서해안 일부에 자생하고 있는 난대 주요 경제수종으로서 활용가치가 높고 자원화가 가능한 붉가시나무를 대상으로 조사하였다. 조사대상지는 우리나라에 분포하고 있는 인위적 간벌 또는 훼손 없이 임분 밀도가 비슷하고 균락을 대표하는 분포면적이 0.1 ha 이상의 지역을 선정하였다. 표준지는 20 m × 20 m(0.04 ha) 크기의 총 42 plots에 대하여 입지·매목 조사를 실시하고, 표준목을 선정하여 수간석해에 의해 흉고직경 성장량을 측정하였다.

#### 2.2.2 조사지 임분 상태

주요 난대수종의 생육적지 판정을 위한 평가기준을 설정하고자 대상수종이 분포하고 있는 임분의 표준지에 대한 기상 상태 및 임분상태는 Table 1과 같다.

조사된 표준지는 7개 지역에서 42 plots을 조사하였으며, 임분 성장상태는 수고 5.0~17.0 m, 평균수고 10.5 m, 흉고직경 6.0~56.0 cm, 평균 15.0 cm이며, 임령은 24~59년, 평균 32년으로 나타났다. 평균기온은 14.0°C, 평균 강수량은 1,396 mm로 나타났다.

Table 1. Forest and meteorological conditions of stand in the surveyed area

Species	No. of surveyed area	No. of plot	Meteorological factors		Growth factors		
			Annual mean temp.(°C)	Annual mean precip.(mm)	Height (m)	DBH (cm)	Age (cm)
<i>Quercus acuta</i>	7	42	14.0	1,396	10.5 (5.0~17.0)	15.0 (6.0~56.0)	32.0 (24.0~59.0)

### 2.3 조사 및 분석 방법

#### 2.3.1 성장량 측정

표준지내 임목을 대상으로 매목조사를 실시하여 산술직경 평균법에 의해 평균 흉고직경을 갖는 우세목을 표준목으로 선정하였다. 선정된 표준목을 수간석해 하였고, 수간석해가 불가능한 임목은 흉고부위의 목편을 채취한 후 WINDENDRO™ 연륜분석 시스템을 이용하여 성장량을 측정하였다.

#### 2.3.2 입지 및 기상인자

임목의 성장에 영향을 미치는 인자는 입지환경인자, 기상인자, 토양의 이화학적 성질 등 여러 가지 환경인자들이 복합적으로 작용하고 있지만, 이러한 인자들을 모두 고려한다는 것은 사실상 불가능하다. 따라서 본 연구에서 적용된 평가인자는 임목의 성장에 매우 큰 영향을 미치는 입지 및 기상인자를 적지예측 기준으로 설정하였다. 지형인자와 입지환경인자는 임목의 성장에 직접적으로 관여하여 많은 영향을 미치는 중요한 생육환경요소이다. 평가모델을 설정하기 위하여 난대수종이 분포하고 있는 전 지역을 대상으로 선정된 표준지의 입지환경인자는 지형조건, 임상 등이 임지를 대표할 수 있는 조건에서, 난대림의 생육에 관여할 것으로 예상되는 12개 입

지인자를 산림청 산림환경입지조사요령에 의해 측정하였다 (KFS, 1989). 적지예측에 적용한 기상인자는 난대지역을 구분하는 주요 인자인 30년간의 기온, 강수량, 한랭지수(Yim and Lee, 1975; Noh, 1983; Kim and Oh, 1996; Choi *et al.*, 1999)를 기온 13°C 이상, 강수량 1,300 mm 이상, 한랭지수 -10°C 이상의 기상조건을 적용하였다. 개발된 프로그램 실행 환경조건 입력창에서 분석하고자 하는 적지예측 대상지역의 기상조건을 입력하게 된다. 난대 한계선 내에 분포하고 있는 난·온대 상록활엽수림의 30년간 기상상태는 Table 2와 같다.

#### 2.3.3 적지예측 평가기준 설정

일반적으로 평가기준을 설정하기 위하여 관련 인자의 중요도와 입지의 속성을 통계적으로 처리하여 설정한다. 이러한 평가기준 설정방법으로는 중회귀분석, 수량화 I류, 수량화 II류 등의 방법(Tanaka Y *et al.*, 1985)과 설문지에 의한 관련인자를 평가인자로 확정하고, 주관적인 판단을 객관화하는 DHP(Delphic Hierarchy Process) 기법(Khorramshahgol and Moustakis, 1988)과 AHP(Analytic Hierarchy Process) 기법(Kim *et al.*, 2010; Shin *et al.*, 2010)으로 가중치 부여하여 평가기준을 작성하는 방법들이 있다. Lee *et al.*(2006)은 이러한

Table 2. Weather condition in the warm temperature forest zone

Meteorological factors	Min.	Max.	Mean	S.D.
Annual temperature(°C)	13.3	15.4	14.0	0.6
Annual precipitation(mm)	1,396.0	1,797.0	1,537.0	162.0
Coldness index	-8.0	0.1	-5.0	2.4
Warmth index	108.1	125.0	113.0	4.7
Temperature of Sep.~Nov.(°C)	4.1	7.8	5.2	1.1
Aridity index	5.4	7.6	6.4	0.7
Relative humidity(%)	66.0	75.0	71.0	3.2
The lowest temperature	8.2	12.7	10.3	1.4
Time of shine sunshine(hr)	170.9	243.1	198.7	21.8

평가인자에 대한 점수를 부여하는 방법은 연속 자료인 경우에는 퍼지집합(Fuzzy set)을 이용하였으며, 명목척도인 경우에는 기존 문헌 고찰을 통해 0점에서 1점까지 점수를 부여하였다. 여기에서는 전자의 경우처럼 임분의 입지환경인자와 생장과의 관계를 분석하여 수량화 이론 1류 방법에 의하여 score표를 작성하여 수종별 평가기준을 설정하였다. 계산된 평가기준의 category별 score는 적지예측 분석 가중치로 적용되었다. 또한 임목의 생장에 영향을 미치는 평가인자간의 기여도를 비교 평가하는 지표로서 편상관계수를 계산하였다.

2.3.3.1 Category 구분 및 가중치 결정

공시 대상수종의 생장에 영향을 미치리라 예상되는 표고, 경사도 등 12개의 입지환경인자를 수량화 분석에 의하여 각 3~7개의 category로 구분하였다. 가중치 결정은 질적 변량인 입지인자의 category에 의하여 조사원표를 작성하고, 조사원표의 category간의 상호관계를 수량화 이론의 식 (1)에 의하여 cross표를 작성하였다.

$$T_{lm}N_{lm} + \sum_{j=1}^M 1 \sum_{k=1}^{rj} 2 t_{jk} flm(jk) = \sum_{i=1}^n yi \delta i(lm) \quad (1)$$

- $l : 1, 2 \dots \dots M$ , 입지인자의 수
- $m : 1, 2 \dots \dots rm$ , 각 입지인자의 category 수
- $\sum 1, \sum 2 : j=1, k=m$ 인 경우를 제외한 수
- $Tlm : l$ 인자,  $m$  category에 주어진 수량
- $Nlm : l$ 인자,  $m$  category에 check된 수량
- $flm(jk) : l$ 인자,  $m$  category에 check된 것 중 다시  $j$ 인자,  $k$  category에 check된 수량
- $Yi : i$  번째 표준지의 종속변수 즉 흉고직경생장량
- $\delta i(lm) : l$ 인자  $m$  category에 check될 때는 1, 그렇지 않을 때는 0

Cross표는  $n$ 차 정방 행렬로서  $AX=P0$ 라는 행렬식이 되어 실제 계산은 역행렬  $X=A^{-1}P0$ 에서 그 해를 얻고, 각 category에 따라 score를 계산하였으며, 각 평가인자별 score를 가중치로 하였다. 결정계수는 식 (2)로서 중상관계수를 계산하여 제공하였다.

$$r_y : 1,2,\dots,M = \sqrt{1 - \frac{R}{R_{yy}}} \quad (2)$$

2.3.3.2 편상관 계수

Table 3. Carbon emission factors of *Quercus acuta*

Species	Basic wood density (WD) (Unit : t/m <sup>3</sup> )	Biomass expansion factor (BEF)	Root-shoot ratio (R)
<i>Quercus acuta</i>	0.830	1.700	0.190

임목의 생장에 영향을 미칠 것으로 예상되는 12개의 입지환경인자 간의 내부 상관을 배제한 독립적인 기여도를 구명하기 위하여 식 (3)에서 편상관 계수를 계산하였다.

$$r_{yi} : 1,2,\dots,M = \sqrt{\frac{-R_{yi}}{R_{yy} R_{ii}}} \quad (3)$$

식 (3)에 의해 계산된 편상관계수는 흉고직경생장에 영향을 미치는 각 입지환경인자의 중요도를 나타낸다.

2.3.4 탄소저장량 계산

국가산림자원조사 자료에서 졸참나무의 면적, 임목축적, ha당 본수 및 재적 등의 정보를 이용하였으며, 탄소저장량 추정 방법은 IPCC GPG(2003)에서 제시하는 탄소저장량 추정 방법을 적용하였으며(식 4), 이용된 탄소배출계수는 졸참나무의 국가고유의 계수로서 Table 4와 같다(Son et al., 2013).

$$\text{탄소저장량} = V \times BEF \times WD \times (1+R) \times 0.5 \quad (4)$$

여기서,  $V$ 는 재적(m<sup>3</sup>/ha),  $BEF$ 는 바이오매스 확장계수,  $WD$ 는 목재기본밀도(t/m<sup>3</sup>),  $R$ 은 뿌리함량비, 0.5는 탄소전환계수를 나타낸다(IPCC, 2003).

2.4. 적지예측 및 Mapping 프로그램 개발

2.4.1 프로그램 개발환경

GIS에 의한 「적지예측 및 Mapping 프로그램개발」의 개발 환경으로는 한글 윈도우 운영체제로 한 개인용 컴퓨터를 이용하였다. 「적지예측 및 Mapping 프로그램개발」의 핵심적인 공간 분석 기능을 담당하는 지리정보시스템 엔진은 ESRI(Environmental Systems Research Institute)사의 ArcView를 선택하였다. ArcView를 선택한 이유로는 윈도우 NT를 기반으로 하는 Desktop GIS 프로그램이라는 이유와 함께 Spatial Analyst 와 3D Analyst를 이용하여 산악지형 분석과 해석이 용이하다는 점이 고려되었다. 또한 자체에 내장된 객체 지향 애플리케이션 개발 언어인 Avenue를 이용하여 손쉽게 사용자 용도에

Table 4. Score of category and range for each item on *Quercus acuta* stands

Item	Category	Score	Mean score	Deviation	Range
Altitude (X1)	<100 m	-0.1772	0.7209	-0.8981	5.8611
	100~200 m	0.0264		-0.6945	
	201~300 m	1.0952		0.3743	
	301~400 m	2.5762		1.8552	
	401~500 m	3.5822		2.8613	
	500~600 m	-2.2789		-2.9998	
	600 m<	0.0000		-0.7209	
Slope (X2)	<15°	2.3381	1.7908	0.5473	3.6137
	15~20°	2.0244		0.2337	
	21~25°	2.8850		1.0942	
	26~30°	-0.7287		-2.5195	
	30°<	0.0000		-1.7908	
Local topography (X3)	Plain	-3.4941	-0.0129	-3.4812	13.4498
	Hill	9.9558		9.9686	
	Piedmont	-0.0181		-0.0052	
	Hillside	-0.3240		-0.3112	
	Summit	0.0000		0.0129	
Aspect (X4)	East	0.1560	-0.6238	0.7798	2.4578
	West	0.9018		1.5256	
	South	-1.5561		-0.9323	
	North	0.0000		0.6238	
Slope type (X5)	Linear	-1.2958	-0.5565	-0.7393	1.2958
	Convex	-0.7708		-0.2142	
	Concave	0.0000		0.5565	
Weathering degree (X6)	High	0.8195	0.4838	0.3357	0.8195
	Middle	0.3100		-0.1738	
	Low	0.0000		-0.4838	
Deposit type (X7)	Residual	1.1242	0.9116	0.2125	1.1242
	Creeping	1.1045		0.1927	
	Alluvium	0.0000		-0.9116	
Degree of wind exposure (X8)	Exposure	-3.0214	-0.7050	-2.3164	3.2600
	Middle	0.2385		0.9435	
	Protection	0.0000		0.7050	

Table 4. Continued

Item	Category	Score	Mean score	Deviation	Range
Exposure rate of rock (X9)	<10%	7.0117	7.2758	-0.2641	8.4425
	10~30%	8.4425		1.1667	
	31~50%	7.3151		0.0393	
	50%<	0.0000		-7.2758	
Soil depth (X10)	<50 cm	-2.2979	-2.4124	0.1145	3.9561
	50~70 cm	-3.9561		-1.5438	
	71~90 cm	-1.5964		0.8160	
	90 cm<	0.0000		2.4124	
Soil moisture (X11)	Dry	1.2964	-1.0618	2.3581	5.5145
	Light dry	-0.2320		0.8297	
	Damp	-4.2182		-3.1564	
	Light wet	-2.5117		-1.4499	
	Wet	0.0000		1.0618	
Soil hardness (X12)	Very soft	9.2132	6.1616	3.0516	9.2132
	Soft	5.5950		-0.5666	
	Middle	5.2460		-0.9156	
	Hard	7.2415		1.0798	
	Very hard	0.0000		-6.1616	

Note)  $R^2 = 0.9756$ ,  $F$  value = 4.45, Prob > 0.00010

맞게 프로그램을 변형할 수 있다는 점과 다른 프로그램 언어와의 호환성을 고려하였다. 실제 프로그램 작성은 ArcView에 내장된 객체 지향 애플리케이션 개발 언어인 Avenue와 Dialog Designer를 이용하였다.

#### 2.4.2 프로그램 구조설계

「적지예측 및 mapping 프로그램」은 수치지도 작성 및 입력 모듈, 적지예측에 관여하는 평가인자 생성모듈, 평가인자들의 상대적인 중요도를 결정하는 가중치 결정모듈, 가중치가 부여된 평가인자들에 의해 임목의 최적 생육환경 조건을 판정하는 적지예측 모듈, 적지예측 결과를 나타내는 평가서 작성 및 출력 모듈로 구성되어 있으며, 이 모듈들은 유기적으로 연결되도록 하였다(Fig. 1). 특히 수종별 적지예측 평가모델에 의해 자동적으로 가중치가 계산되어 해당 수종에 대한 적지예측 및 평가가 가능하도록 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

적지예측 및 Mapping 프로그램의 적용성을 검토하기 위하여, 난대림의 분포면적, 생태적 위치 및 경제적 가치 등을 고려하여 붉가시나무, 후박나무, 구실잣밤나무, 황칠나무, 생달나무 등 난대수종이 다양하게 분포하고 있는 완도지역을 선정하여 개발된 프로그램의 적용성을 검토하였다.

#### 3.1 가중치 및 편상관 계수

붉가시나무의 적지예측을 위한 평가기준의 가중치를 설정하고자 category별 score를 계산한 결과는 Table 4와 같다.

붉가시나무의 직경생장에 영향을 미치는 영향은 range의 범위가 클수록 높으며, Table 4에서는 국소지형, 토양건밀도, 암석노출도, 표고, 토양습도, 토심, 경사도, 풍노출도, 방위, 사면형태 순으로 나타났다. 입지인자별 생육조건은 국소지형 완

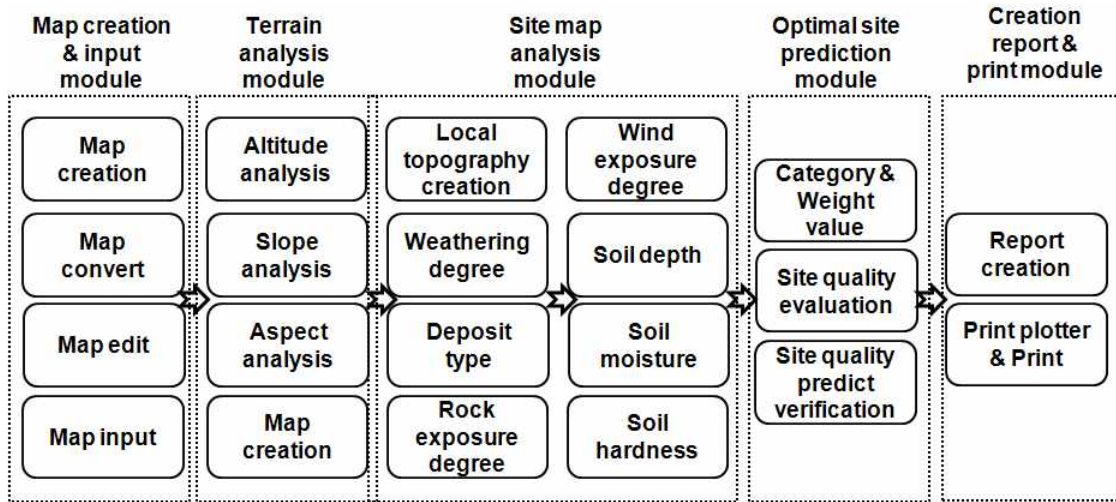


Fig. 1. Operation system for the optimal site and mapping program.

구릉지, 토양건밀도 심층, 암석노출도 10~30%, 표고 401~500 m, 토양습도 건조, 토심 90 cm 이상, 경사 21~25°, 방위 서쪽, 사면형태 요철면, 풍화정도 상, 퇴적양식 잔적토, 풍노출도 보통에서 가장 높은 score를 나타내고 있었다.

임목의 생장에 영향을 미치는 정도를 나타내는 평가인자들의 기여도를 나타내는 편상관계수를 계산한 결과는 Fig. 2와 같다. 입지인자들 간의 내부상관을 배제한 상태에서 붉가시나무의 생장에 관여하는 입지환경인자를 정확하게 파악하기 위

하여 편상관계수를 계산한 결과, 국소지형, 토양건밀도, 토양 습도, 방위, 표고, 풍화정도, 암석노출도, 경사도, 사면형태 순으로 기여도가 높게 나타났다.

### 3.2 평가기준 설정

수량화 1류 방법에 의해 계산된 score를 기중치로 적용하여 적지예측 기준을 설정한 결과는 Table 5와 같다.

각 평가인자들의 category별 score는 적지예측 평가점수로

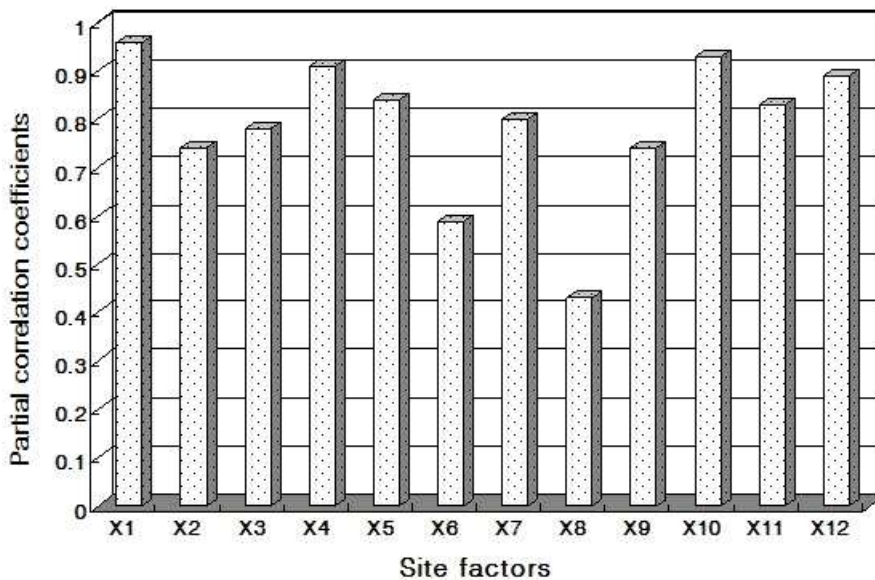


Fig. 2. Partial correlation coefficients between diameter growth at breast height and height and site environmental factors.

Table 5. Evaluation criteria for the site quality prediction of *Quercus acuta* stands

Evaluation factor		Class						
		1	2	3	4	5	6	7
Altitude	Score	<100 m	100~200 m	201~300 m	301~400 m	401~500 m	501~600 m	600 m<
		-0.1772	0.0264	1.0952	2.5762	3.5822	-2.2789	0.0000
Slope	Score	<15°	16~20°	21~25°	26~30°	30°<		
		2.3381	2.0244	2.8850	-0.7287	0.0000		
Local topography	Score	Plain	Hill	Piedmont	Hillside	Summit		
		-3.4941	9.9558	-0.0181	-0.3240	0.0000		
Aspect	Score	East	West	South	North			
		0.1560	0.9018	-1.5561	0.0000			
Slope type	Score	Linear	Convex	Concave				
		-1.2958	-0.7708	0.0000				
Weathering degree	Score	Low	Middle	High				
		0.0000	0.3100	0.8195				
Deposit type	Score	Residual	Creeping	Alluvium				
		1.1242	1.1045	0.0000				
Degree of wind exposure	Score	Exposure	Middle	Protection				
		-3.0214	0.2385	0.0000				
Exposure rate of rock	Score	<10%	10~30%	31~50%	50%<			
		7.0117	8.4425	7.3151	0.0000			
Soil depth	Score	<50 cm	51~70 cm	71~90 cm	90 cm<			
		-2.2979	-3.9561	-1.5964	0.0000			
Soil moisture	Score	Dry	Light dry	Damp	Light wet	Wet		
		1.2964	-0.2320	-4.2182	-2.5117	0.0000		
Soil hardness	Score	Very soft	Soft	Middle	Hard	Very hard		
		9.2132	5.5950	5.2460	7.2415	0.0000		

적용하였으며, score는 임목생장과 category별 score간의 상대적 기여도이다. 따라서 설정된 평가기준은 ArcView의 지도대수(map algebra) 연산에 의해 각 평가인자 레이어에 적용되어 최종 적지예측도를 작성하였다.

### 3.3 입지도에 의한 평가 Layer 형성

본 연구에 사용된 입지도는 디지털 수치입지도를 이용하였다. Fig. 3은 수치입지도로부터 평가인자로 생성된 각 입지인자들의 레이어로 입지도로부터 추출된 9개의 입지인자 layer

생성결과이다. 생성된 각 layer별 category 구분은 입지조사요령에 따라 분류하였으며, 평가기준에 따라 각 인자의 category별 score를 속성값을 대신하여 가중치로 적용하였다.

### 3.4 공간분석 모델링 및 적지 예측

수치지형도로부터 추출하여 생성된 표고, 경사도, 방위 layer와 입지도에 의해 생성된 각 입지인자들을 raster로 변환하고, 이와 같이 생성된 layer들은 각 수종별 평가기준에 의해 가중치를 부여하여, 지도대수분석으로 최종 적지예측 분석도



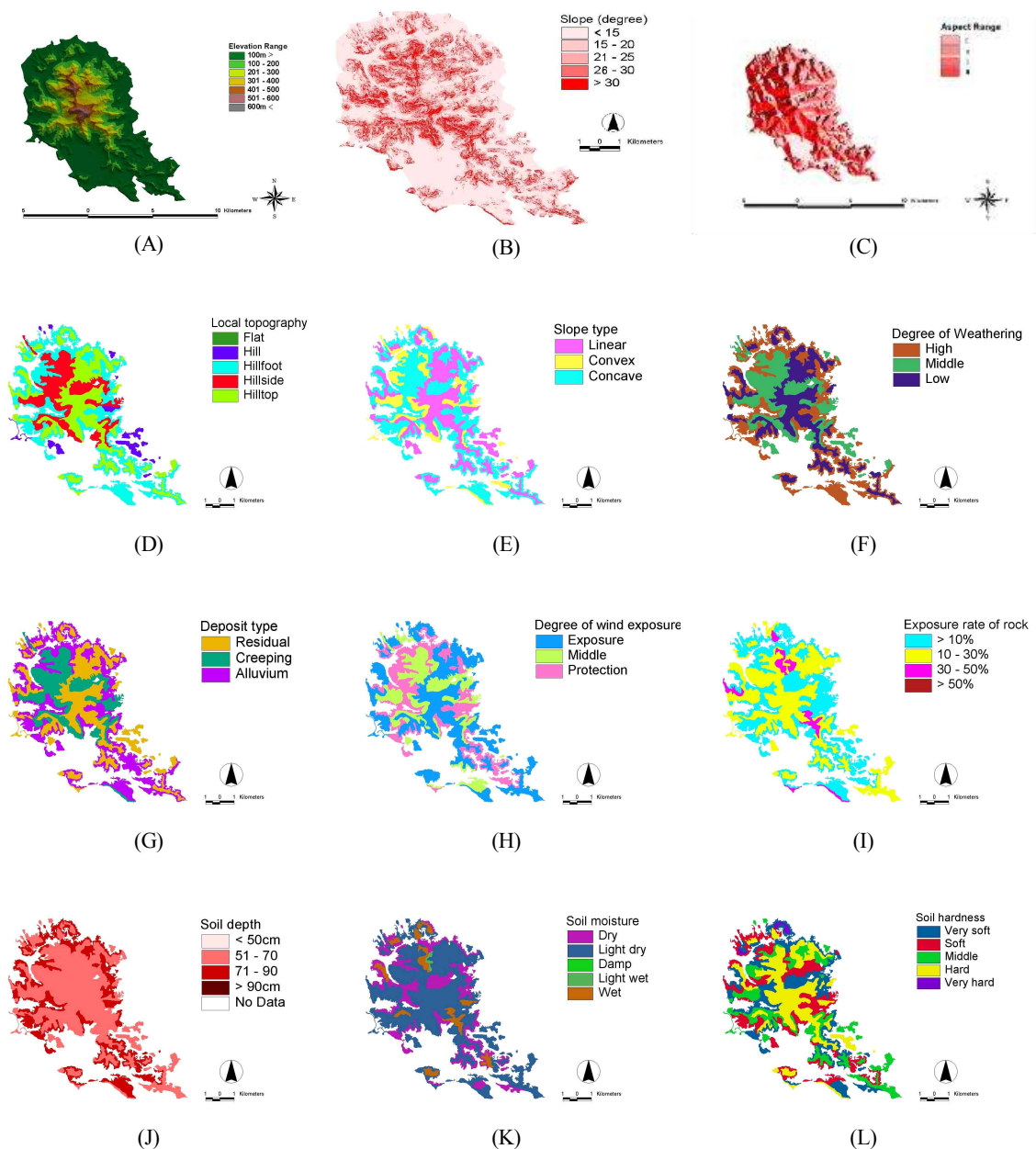


Fig. 3. Site factor layers extracted from digital site map (A~L).

를 작성하였다. 붉가시나무의 적지예측 평가기준에 따른 최종 적지 예측결과는 Fig. 4와 같다. 붉가시나무의 적지예측 분석 결과, I, II등급지로 분석된 지역의 입지환경 특징은 표고 401~500 m 사이로, 산복 이상의 경사도가 21~25°, 퇴적양식은 잔적토, 방위가 서쪽인 요철사면으로 나타났다. 실제 현지조사 결과, 완도는 붉가시나무가 서쪽과 북쪽에서 우점을 차지하고 있었으며, 표고 50~600 m까지 고루 분포하고 있다. Kim *et al.*(2002)은 완도난대림수목원지역 붉가시나무림의 산

림균락구조 조사에서 전반적으로 붉가시나무가 우점을 하고 있으며, 전 조사구를 대상으로 하여 각 층위별 중요치를 산출한 결과, 교목층의 경우 붉가시나무가 58.0%로 가장 높은 중요치를 보였으며, 개서어나무(8.6%), 때죽나무(7.5%) 등의 수종이 출현하고 있는 것으로 나타났다. 황칠나무의 적지예측 연구(Kang *et al.*, 2012)에서 표고가 401~500 m의 경사도가 15° 이하, 국소지형 산복, 퇴적양식 봉행토, 방위는 남쪽인 요철사면으로 나타났다. 실제 완도 지역의 현장조사 결과, 황칠

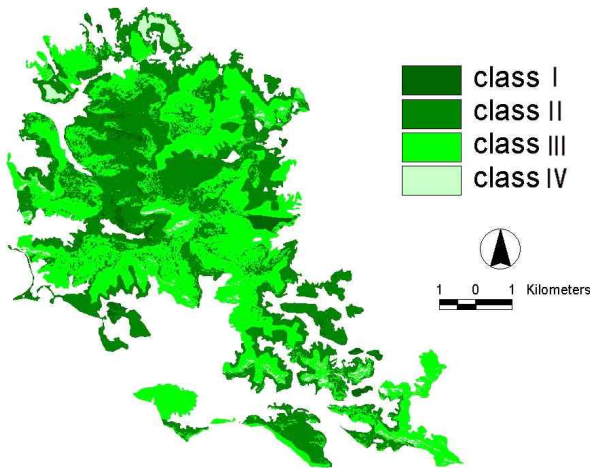


Fig. 4. Output map of the optimal site prediction on *Quercus acuta* stands in Wando.

나무는 상황봉(644 m)에서 붉가시나무 군락이 우점한 가운데 계곡부위에서 주로 분포하고 있었다. Kim *et al.*(2001)의 연구에서도 황칠나무의 분포 임지의 식생구조 및 입지환경과의 관계 구명에 관한 연구에서, 완도 상황봉 사면 임상은 주로 붉가시나무-서어나무 군집으로 총 23종이 출현하는 가운데 붉가시나무(42%)가 우점하고, 서어나무(13.7%), 황칠나무(10.3%), 비목나무 등의 순으로 9수종이 우점하고 있다고 보고한 바 있다.

Fig. 4의 최종 적지예측 지도를 등급 분류기준에 따라 class I, II, III, IV등급으로 분류한 결과는 Table 6과 같다.

각 수종별 적지예측 평가기준에서 인자별 가중치 계산의 종합점수 최저값과 최고값의 범위를 백분율에 의해 4등급으

Table 6. Classification criteria of class for site quality prediction of *Quercus acuta*

Class \ Species	I	II	III	IV
<i>Quercus acuta</i>	22.7<	8.4~22.7	-6.1~8.3	<-6.1

Table 7. Classified area from map of the optimal site prediction on *Quercus acuta* stands in Wando

Class	Area (ha)	tC/ha/yr	Total tCO <sub>2</sub> /ha/yr	Percentage (%)
I	147.1	316.5	1,160.6	2.5
II	2,703.5	5,817.5	21,330.6	46.3
III	2,845.5	6,123.1	22,451.0	48.6
IV	153.7	330.7	1,212.7	2.6
Total	5,849.8	46,154.9	12,587.7	100

로 적지예측 평가기준에 의하여 구하였으며, 얻어진 수종별 최종 평가점수를 적지예측 등급 분류기준에 따라 class I, II, III, IV로 분류하였다(Table 6). 등급 분류기준에 따라 분류된 적지로 예측된 등급별 면적과 탄소흡수량을 추정한 결과는 Table 7과 같다.

Table 7에서 완도지역 대상 면적은 총 5,849.8 ha로 최종 분석된 붉가시나무의 등급별 면적과 연간 탄소흡수량을 계산한 결과, I등급이 147.1 ha(2.5%)로 315.5 tC/ha, 1,160.6 tCO<sub>2</sub>/ha, II등급 2,703.5 ha(46.3%), 5,817.5 tC/ha, 21,330.6 tCO<sub>2</sub>/ha, III등급 2,845.5 ha(48.6%), 6,123.1 tC/ha, 22,451.0 tCO<sub>2</sub>/ha, IV등급 153.7 ha(2.6%), 153.7 tC/ha, 1,212.7 tCO<sub>2</sub>/ha으로 추정되었으며, 등급별 면적비에서 II, III 등급지가 95%로 붉가시나무는 현재 우리나라 주요 산림수종별로 LULUCF(Land Use, Land-Use Change and Forestry) 분야 국가 고유 탄소배출계수로 승인된 침엽수 9수종, 활엽수 6수종 중 목재기본밀도(Basic Wood Density, WD) 계수값이 0.83 t/m<sup>3</sup>으로 가장 높다(KFRI, 2014). 1 m<sup>3</sup>의 재적을 갖는 경우, 탄소저장량이 0.84 tC/m<sup>3</sup>로 두 번째로 탄소저장량이 많은 신갈나무(0.738 tC/m<sup>3</sup>)보다 훨씬 높은 값을 가지고 있다. 이와 같이, 향후 기후변화에 따라 수종갱신에 의한 대체조림을 할 경우, 수종별로 갖는 생육특성을 고려하여 탄소저장량이 높은 수종을 가장 적합한 지역을 선정하여 조림하면 목재생산뿐만 아니라, 탄소흡수원으로 활용할 수 있을 것이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서 기후변화에 따른 난·온대 수종의 생육한계선 북상 이동으로 자원화 가능한 난대 주요 수종인 붉가시나무의 생육 최적지를 분석할 수 있는 적지예측 평가 프로그램을 개발하였으며, 임목의 성장과 입지 환경인자와의 관계 분석에 의하여 적지예측 평가기준을 설정하였다. 적지예측 평가기준을 도출하기 위하여, 질적·양적 변량의 동시분석이 가능한 수량화 이론 I류에 의하여 적지예측 평가기준을 설정하였다. 개발

된 프로그램은 다양한 상록활엽수림이 천연분포되어 있는 전남 완도를 대상으로 붉가시나무의 적지 등급별 면적과 탄소 저장량을 추정하였다. 개발된 프로그램을 적용하여 적지분석 결과, 적지예측 적용대상 지역의 지형 및 입지에 대한 정확한 정보에 의하여 생육 최적지를 등급별 분석 및 GIS 기반으로 mapping 가능하였다. 또한 개발된 프로그램은 DB화된 지형 및 입지자료를 이용하여 짧은 시간 내에 대상지역의 지형 및 입지환경 인자에 대한 정확하고 다양한 시·공간적인 분석이 가능함으로써, 기후변화 대응수종의 조립 최적지 선정에 위한 유용한 도구로 사용되며, 다양한 의사결정이 가능하게 되었다. 또한 조립적지 선정을 통한 탄소 최대화에 의한 산림의 탄소 흡수원 유지증진을 극대화 하는데 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 개발된 프로그램이 현장에서 적용되기 위해서는 최근 위성사진 등 산림에 관련된 많은 정밀주제도와 미세산림 산악기상자료의 DB 구축이 안정되게 유지되어야 한다. 이러한 기반구축을 통하여 향후 지구온난화에 따른 난·온대 조립수종 등 적지예측 및 조립사업 의사결정에 효과적 인 수단이 될 것으로 기대한다.

## REFERENCES

- Choi WY, Tak WS, Yim KB, Jang SS. 1999. Delineation of provenance regions of forests based on climate factors in Korea. *Jour Korean For Soc* 88(3):379-388.
- Chun JH, Lee CB. 2013. Assessing the effects of climate change on the geographic distribution of *Pinus densiflora* in Korea using ecological niche model. *Korean Jour Agri For Meteor* 15(4):219-233.
- Chung JM, Jung HR, Kang JT, Cho MG, Kim CH, Moon HS. 2010. Ecological characteristics of forest community by distance from *Camellia japonica* stand. *J Agric Life Sci* 44:27-37.
- Chung YS, Yoon MB. 1999. Recent climate change and related factors observed in Korea. *J of Korean Meteor Soc* 35(3):309-318.
- Kang YH, Jeong JH, Kim YK, Park JW. 1997. Mapping of the righteous tree selection for a given site using digital terrain analysis on a central temperate forest. *Jour Korean For Soc* 90(4):437-444.
- Kang JT, Kim JW, Kim CM. 2012. Development of assessment model for the optimal site prediction evergreen broad-leaved trees in warm temperate zone according to climate change. *Jour Agri & Life Sci* 46(3):47-58.
- Khorramshahgol R, Moustakis VS. 1988. Delphic hierarchy process (DHP): A methodology for priority setting derived from the Delphic method and analytical hierarchy process. *European Journal of Operational Research* 37: 347-354.
- Kim HH, Chung JS. 2001. Neural network applications to determining suitable tree species for site-specific conditions. *Jour Korean For Soc* 90(4):437-444.
- Kim HH, Kim J, Choi SM, Lee SH. 2011. Suitable areas for *Chisandra chinensis* cultivation using GIS - Focused on Jangsu county forest -. *Jour Agri & Life Sci* 45(1):41-47.
- Kim SH, Shin CH, Jung NC, Na CS, Kim YJ. 2001. Sites characteristics and vegetation structure of *Dendropanax moribifera* Lev. natural forests in the warm temperature zone of Korea. *Jour Korean For Sci* 89(1):93-104.
- Kim SK, Hwang HY, Ban YU. 2010. Evaluation model building and application for suitable locations reflecting recreation forest type. *Jour Korean For Soc* 99(1):111-124.
- Kim SO, Chin SC, Oh CJ. 2002. The community structure of *Quercus acuta* forest at Wando warm-temperate forest arboretum. *Jour Korean Fore Soc* 96(6):781-792.
- Kim YK, Lee WK, Kim YH, Oh SY, Heo JH. 2012. Changes in potential distribution of *Pinus rigida* caused by climate change in Korea. *Jour Korean For Soc* 101(3):509-516.
- Kim YS, Oh KK. 1996. Restoration model of evergreen broad-leaved forest in warm temperate region(II) - rare, endangered and naturalized plants -. *Kor J Env Eco* 10(1):128-139.
- Korea National Arboretum. 2009. A field guide to trees & shrubs. p113.
- Korea Forest Research Institute. 2014. Carbon emission factors and biomass allometric equations by species in Korea. pp. 97.
- Korea Forest Service. 1989. Forest site survey manual. pp. 58.
- Ko SY, Sung JH, Chun JH, Lee YG, Shin MY. 2014. Predicting the change of yearly productive area distribution for *Pinus densiflora* in Korea based on climate change scenarios. *Korean Jour Agri For Meteor* 16(1):72-82.
- Lee BD, Chung JS, Kwon DS. 2006. Analysis of site suitability of forest stands for extracting sap of *Acer pictum* var. *mono* using GIS and fuzzy sets. *Jour Korean For*

- Soc 95(1):38-44.
- Lee JH, Choi BH. 2010. Distribution and northernmost limit on the Korean 3. Peninsula of three evergreen trees. Korean J Pl Taxon 40:267-273.
- Lee SC, Choi SH, Lee WK, Park TJ, Oh SH, Kim SN. 2011. Vulnerability assessment of forest distribution by the climate change scenarios. Jour Korean For Soc 100(2): 256-265.
- Lim JH, Shin JH, Lee DK, Suh SJ. 2006. Climate change impacts on forest ecosystems: Research status and challenges in Korea. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology 8(3):199-207.
- MacDonald GL, Sertorio L. 1990. Global climate and ecosystem Change. Plenum Press. New York. pp. 252.
- Noh, ER. 1983. Studies on the growth range and optimum site determination of the tree species using climatological factors in Korea. Jour Korean For Soc 62:1-18.
- Oh KK, Shim HY. 2006. Distribution and population structure of evergreen broad-leaved forest in the Weolchulsan national park. Kor J Env Eco 20: 81-93.
- Shin HC, Park NC, Song HK, Jeong YG, Choi JC, Kwon YG, Lee KS, Kim YG. 2002. Analysis of vegetation structure and vegetation-environment relationships in the *Ma-chilus thunbergii* Stands, Korea. Jour Korean For Soc 91 (6):765-774.
- Shin HJ, Kim EG, Yoo BI, Seo JW. 2010. Development of criteria and indicators for the forest management certification in Korea. Jour Korean For Soc 99(1):24-35.
- Son YM, Kang JT, Chung YG, Lee KS, Yoo BO. 2013. Development of statistics infrastructure for forest greenhouse gas. Korea Forest Research Institute Report. pp. 477-515.
- Tanaka Y, Tarumi T, Wakimoto K. 1985. Handbook of Statistical Analysis by Personal Computer, Public publishing. pp. 403.
- Yim KB, Lee SW. 1975. Temperature factor in silvicultural view point in Korea - Especially on warmth and cold index-. Korean For Soc 25:1-12.
- Yun JH, Kim JH, Oh KH, Lee BY. 2011. Distributional change and climate condition of warm-temperate evergreen broad-leaved trees in Korea. Kor J Env Eco 25:47-56.