

경기도 태화산 V 영급 잣나무(*Pinus koraiensis*) 조림지의 지상부 바이오매스 상대생장식 개발

류다운¹ · 문민규¹ · 박주한¹ · 조성식¹ · 김태규³ · 김현석^{1,2,4*}

¹서울대학교 산림환경학과, ²서울대학교 농업생명연구원,

³국립환경과학원, ⁴국가농림기상센터

(2014년 2월 28일 접수; 2014년 3월 10일 수정; 2014년 3월 13일 수락)

Development of Allometric Equations for V Age-class *Pinus koraiensis* in Mt. Taehwa Plantation, Gyeonggi-do

Daun Ryu¹, Minkyu Moon¹, Juhan Park¹, Sungsik Cho¹, Taekyu Kim³ and Hyun Seok Kim^{1,2,4*}

¹Dept. of Forest Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

²Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

³National Institute of Environmental Research, Incheon 404-708, Korea

⁴National Center for AgroMeteorology, Seoul 151-921, Korea

(Received February 28, 2014; Revised March 10, 2014; Accepted March 13, 2014)

ABSTRACT

Allometric equations for leaf, branch, stem and total above ground biomass of *Pinus koraiensis* trees were developed with diameter at breast height(DBH) of trees, which were growing in a pine plantation with the stand density of 410 tree ha⁻¹ and the average DBH of 29.1±5.2 cm in Mt. Taehwa, Gyeonggi. Damage by *Acantholyda parki* reduced leaf biomass compared to other studies, however, its contribution to total biomass was minimal among parts. Comprehensive analysis revealed that constant in allometric equation for total above ground biomass (logY=a + blogX) was affected by average DBH and stand density, however, constant b was not. At the stand level, biomass for leaf, brach, stem, total above ground biomass were 6.68 Mg ha⁻¹, 18.82 Mg ha⁻¹, 101.02 Mg ha⁻¹, 126.53 Mg ha⁻¹, respectively. We developed a Korean pine stand biomass regression, which explained about 98% of variation with DBH and stand density based on comprehensive analysis.

Key words: Carbon sequestration, Coniferous forest, Dry matter production, Pine forest, Stem

I. 서 론

대기 중 이산화탄소의 증가로 인해 각종 환경문제가 대두되면서 이를 줄이기 위한 노력이 다각적으로 이루어지고 있다. 특히 산림은 육상생태계 탄소의 약 80%를 차지하고 있으며(Dixon *et al.*, 1994) UN이 지정한 유일한 탄소흡수원으로 광합성을 통해 대기 중 이

산화탄소를 흡수하여 산림의 바이오매스와 토양에 탄소를 저장한다(United Nations, 1998). 이중 산림 바이오매스는 인공위성영상, 항공사진, LiDAR(Light Deduction and Ranging), 상대생장식 등을 이용하여 측정할 수 있으며 특히 상대생장식은 직접 측정법이자 흉고직경, 수고 등의 간편한 인자만을 필요로 하고 또한 다른 방법들의 지상검증자료로 사용되기 때문에 다



* Corresponding Author : Hyun Seok Kim
(cameroncraizies@snu.ac.kr)

양한 임분과 각 수종의 상대생장식을 이는 것은 중요하다(Ahmed *et al.*, 2013).

잣나무는 우리나라를 비롯해 러시아, 중국, 일본 등에 분포하며 우리나라에서는 수직적으로는 전라남도 지리산 이북에서부터 전국적으로 분포하고 수평적으로는 해발 100~1900m에 분포한다(Kong, 2004). 잣나무는 우리나라의 대표적인 조림수종의 하나로 1960년대 조림사업 이후 전국적으로 식재되어 현재 IV-IX영급에 이르러 간벌, 주벌 등의 산림사업이 필요하며 전체 산림 면적의 3.3%를 차지할 만큼 중요한 수종이다(Korea Forest Service, 2011; Korea Forest Service, 2012). 잣나무 바이오매스 상대생장식에 관한 국내 연구로는(Han, 2001; Son *et al.*, 2001; Kwon and Lee, 2006; Lee *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2010) 등 십여 편이 있다. 그러나 수종별 상대생장식 도출에는 임분 밀도, 수령, 임지 등의 인자가 중요함에도 불구하고(Lehtonen *et al.*, 2004) 잣나무림을 대상으로 한 상대생장식의 경우 IV영급 이상의 수령을 포함하는 경우는 제한적이었으며(Son *et al.*, 2001; Noh *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2010), 이중 특히 일부의 연구만이 우량 중경제 혹은 대경제 생산을 위해 권장하는 35년 2차 간벌 이후의 잔존 본수 400tree ha⁻¹을 만족하는 임지에서 개발되었을 뿐(Noh *et al.*, 2005) 대부분의 연구가 적정 임분 밀도보다 높은 곳에서 개발되었다. 아울러 우량 중경제의 목표 흉고직경인 25-40cm의 범위 전체를 포함하는 연구도 부족한 실정으로 적정 임분 밀도 하에서 중경제를 대상으로 개발한 상대생장식에 대한 보다 많은 연구가 필요하다(Korea Forest Service, 2005).

또한 우리나라에서 잣나무는 주로 잣 생산을 위한 경제수종으로서 식재되었으나 전체 산림에서 차지하는 비율이 증가함에 따라 목재생산 및 부산물 생산에 대한 중요성도 점차 증가하고 있다(Korea Forest Service, 2012). 잣나무의 경우 잣 생산에 있어서는 가지가 많을수록 유리하지만 고품질의 목재생산을 위해서는 곧은 원줄기와 높은 지하고가 요구되며 이러한 임목의 상태는 임분 밀도가 큰 영향을 미친다(Nutto *et al.*, 2005).

따라서 본 연구에서는 경기도 태화산의 V영급 잣나무 조림지에서 2차 간벌 이후 적정 밀도인 400tree ha⁻¹, 흉고직경 범위 25-40cm에서 사용 가능한 지상부 상대생장식을 도출하여 다른 잣나무 상대생장식과

비교하고 임분의 평균 흉고직경과 임분 밀도를 이용한 임분 바이오매스의 예측 가능성을 알아보는 것에 목적이 있다.

II. 재료 및 방법

2.1. 연구대상지

본 연구는 경기도 광주시 도척면 태화산(북위 37°16'-37°18' 동경 127°16'-127°19')에 위치한 서울대학교 학술림 내 V영급 잣나무 조림지를 대상으로 하여 시기별로 조사를 실시 하였다(Table 1). 본 조림지는 1963년 식재되어 1988년, 2000 년에 각각 1, 2차 간벌을 실시하였으며 2012년에는 임분 밀도가 약 410tree/ha⁻¹으로 조사되었다. 2011년 6월 조사지에서는 평균 수고가 16.2±1.1m, 평균 흉고직경(DBH: Diameter at Breast Height)은 27.9±4.0cm로 조사되었고, 2012년 3월 조사지에서는 평균 수고가 16.2±1.0m이며 평균 흉고직경은 29.1±5.2cm로 조사되었다. 본 연구 대상지의 사면방향은 NE 50-60°이고, 고도는 129-219m 이며 자동기상관측장비를 이용하여 측정된 2012년의 평균 기온은 10.08°C이며 강수량은 1,484mm로 나타났다.

2.2. 바이오매스와 엽면적지수

상대생장식을 개발하기 위한 시료 채취는 2011년 6월 말과 2012년 3월 중순 두 차례에 걸쳐 이루어졌고 이를 바탕으로 1차 조사에서는 잎과 가지의 바이오매스 상대생장식을, 2차 조사에서는 잎, 가지, 줄기

Table 1. Site descriptions

	June 2011	March 2012
Area (ha)	0.125	0.5
DBH (cm)	27.9±4.0 22.6-37.2	29.1±5.2 14.5±45.9
Mean Height (m)	16.2±1.1 14.0-17.8	16.2±1.0 14.0-18.2
LAI (m ² m ⁻²)	3.1	2.3
Age class	V	
Annual precipitation (mm)	1,484	
Mean temperature (°C)	10.08	
Slope direction (°)	NE 50-60	
Altitude (m)	129-219	
Density (tree ha ⁻¹)	410 ± 6	

등 지상부 바이오매스 상대생장식을 도출하였다. 모든 부위의 바이오매스 상대생장식은 예상치와 실측 간의 차이가 가장 적고 잔차에 특별한 경향성이 없는 것으로 나타난 $\log Y = a + b \log X$ 식을 이용하였다(Levia Jr 2008; Zianis *et al.*, 2011; Cutini *et al.*, 2013; Ritchie *et al.*, 2013). 2011년 6월의 1차 조사에서는 흉고직경의 범위가 22.6-37.2cm에 해당하는 총 15그루의 나무를 선정하여 가지치기를 실시하고 잎과 가지의 시료를 채취하였다. 15그루에서 51개의 가지를 수확하여 잎과 가지를 분리한 후 각각의 생중량을 측정하였고 일부는 실험실로 운반하였다. 수확된 51개의 가지에서 잎을 당년생과 1년생 이상으로 분류하고 각각에서 잎의 시료를 50개씩 무작위로 추출하여 실험실에서 전자저울(AND, EK-610i)을 사용하여 0.01g단위로 생중량을 측정한 후 85°C에서 이들 이상 건조시켜 건중량을 측정하였고 스캔 후 포토샵을 이용하여 투영면적을 측정하였다. 잎 시료의 생중량과 건중량의 비를 이용하여 가지에서 분리한 잎의 생중량으로부터 가지 단위의 엽건중량을 추정하였고 가지 직경과 엽건중량간의 회귀곡선을 만들어 전체 엽건중량을 구하였으며 이를 바탕으로 흉고직경과 엽건중량과의 관계식을 도출하였다. 엽중량비의 역수 즉, 단위질량당 엽면적비를 당년생과 1년생 이상으로 구분한 엽건중량과 곱한 후 그 합으로 각 가지의 엽면적을 계산하였다. 개체목의 엽면적은 가지의 엽면적을 개체목별로 합하여 구하였다. 모든 개체목의 엽면적의 합을 단위면적으로 나누어 엽면적지수(LAI: Leaf Area Index)를 구했으며 임분내 가지 높이에 따라 엽면적지수의 수직적 분포를 추정하였다.

수확한 51개의 가지 중 14개의 가지는 잎을 분리한 후 85°C 오븐에서 일정한 무게에 도달 할 때까지 건조하여(최소 72시간) 건중량을 측정한 후 가지 직경과 가지 건중량간의 회귀곡선을 만들었다. 대상목의 수확하지 않은 나머지 가지의 바이오매스는 가지치기

당시 15개 대상목의 모든 가지의 높이와 가지 직경을 측정된 자료를 바탕으로 가지 직경과 가지 건중량간의 회귀곡선을 이용하여 추정하였다. 개체목의 가지 바이오매스는 흉고직경과의 관계식을 도출하여 추정하였다.

2차 조사에서는 흉고직경이 14.5-37.2cm의 범위에 있는 40그루를 대상으로 하여 지표면 0.2m 높이에서 벌목 하였다. 줄기부는 1.2m 높이에서부터 2m 간격으로 절단하여 각 높이의 원편을 채취하였고 줄기부의 체적은 14개 실험목을 대상으로 구하였으며 초두부는 원뿔로 간주하고 나머지는 원주로 간주하여 Huber식(중앙단면적 식)에 의해 계산하였다. 이 중 4개 실험목의 원편 체적과 항건중량을 측정하여 높이별 평균 목재밀도를 구한 후 줄기부 체적에 곱해 14개 실험목의 바이오매스를 구하였고 이를 이용하여 흉고직경과 줄기부 바이오매스 간의 관계식을 도출하였다.

잎과 가지의 바이오매스는 총 40그루의 나무에서 37개 가지 시료와 198개 잎 시료를 대상으로 하여 추정하였다. 잎 바이오매스의 경우 당년생과 1년생 이상 잎의 구분 없이 가지 직경과 전체 엽건중량 간의 관계식을 이용하여 1차 조사와 동일한 방법으로 추정하였으며 엽면적 추정을 위한 잎 시료는 수관의 높이에 따라 채취하였는데 상층부에서는 양엽을, 중·하층부에서는 양엽과 음엽으로 구분하여 엽면적비를 구하였다.

모든 바이오매스는 Sprugel(1983)에 의한 수정계수(Correction Factor)를 반영하여 계산하였고 각 부위별로 Table 2에 나타내었다.

2.3. 엽면적비

2011년 6월 1차 조사에서는 당년생 잎과 1년생 이상 잎을 구분하였고 2012년 3월 2차 조사에서는 양엽과 음엽으로 구분하여 높이에 따른 단위질량당 잎면적인 엽면적비(SLA; Specific Leaf Area)를 구하였다(Poorter and Bongers, 2006). 채취한 잎 샘플은

Table 2. Allometric equation parameters

Component	2011					2012				
	a	b	r ²	P-value	CF	a	b	r ²	P-value	CF
Foliage	-0.9140	1.5618	0.3775	0.0148	1.0060	-3.3010	3.0461	0.6729	<0.0001	1.0144
Branch	-2.4685	2.7917	0.6043	<0.0001	1.0110	-2.4685	2.7917	0.6043	<0.0001	1.0170
Stem wood	-	-	-	-	-	-0.7298	2.1192	0.6968	0.0002	1.0042
Total Aboveground	-	-	-	-	-	-0.5453	2.0553	0.6814	0.0003	1.0052

85°C 건조기(다솔과학, KR/DS-80-1)에서 이틀 이상 건조시켰으며 전자저울(AND, EK-610i)을 이용하여 건조량을 측정한 후 스캔 하여 포토샵(CS6)으로 투영 엽면적을 측정하였다. 엽면적비는 아래의 식을 이용하여 계산하였다.

$$SLA(m^2 g^{-1}) = \frac{\text{Projected leaf area}(m^2)}{\text{Leaf dry mass}(g)}$$

2.4. 통계 분석

바이오매스 추정식 도출 및 수관 높이에 따른 잎 특성 분석에는 일반선형회귀모형을 사용하였다. 모든 자료의 평균은 T 검정(t-test)과 분산분석(ANOVA)을 통해 검정하였으며 가지 바이오매스의 연도, 엽령에 따른 선형회귀식의 비교는 가변수(dummy variable)를 이용하여 검정하였다. 모든 통계분석은 SAS 9.3® system를 이용하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 부위별 상대생장식

가지 직경에 따른 잎의 바이오매스 추정관계식은 2011년(당년생 $\log Y = -0.4320 + 1.5714 \log X$, $r^2 = 0.4601$, $p < 0.0001$, 1년생 이상 $\log Y = -0.7670 + 2.0908 \log X$, $r^2 = 0.7607$, $p < 0.0001$, Fig. 1)과 2012년($\log Y = -1.0022$

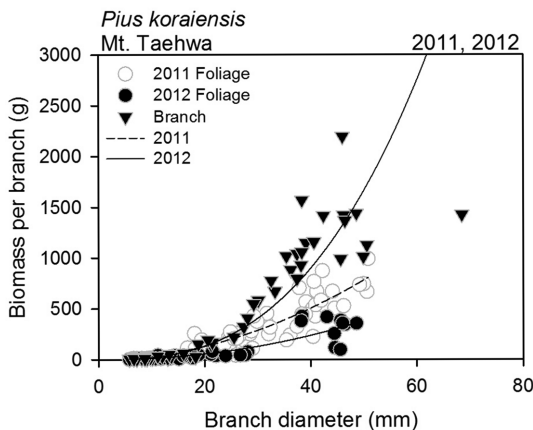


Fig. 1. Allometric biomass equations for branch vs. branch diameter at Mt. Taehwa Korea pine plantation in 2011, 2012. Each symbol represents foliage (2011; ○, 2012; ●) and branch (▼). Regression lines; $\log Y = -0.4292 + 1.9551 \log X$, $r^2 = 0.7370$, $p < 0.0001$ (2011; ○); $\log Y = -1.0022 + 2.1081 \log X$, $r^2 = 0.7431$, $p < 0.0001$ (2012; ●); $\log Y = 1.4622 + 2.7563 \log X$, $r^2 = 0.9401$, $p < 0.0001$ (▼).

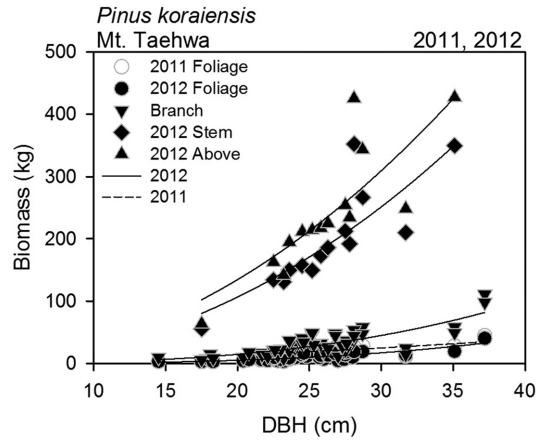


Fig. 2. Allometric biomass equation of trees vs. diameter at breast height (DBH) at Mt. Taehwa Korean pine plantation in 2011, 2012. White circle is foliage biomass in 2011(○), black circle is foliage in 2012(●), inverted black triangle is branch biomass(▼), black diamond is stem biomass(◆) and black triangle(▲) is aboveground biomass. Parameters are represented in Table 2.

+2.1081 $\log X$, $r^2 = 0.7431$, $p < 0.0001$) 모두 통계적으로 유의하고 서로 다른 것으로 나타났으나, 가지 직경에 따른 가지 바이오매스는 2011년과 2012년 사이에 유의한 차이를 보이지 않아($P = 0.1204$) 하나의 회귀식을 사용하여 나타내었다($\log Y = -1.4622 + 2.7563 \log X$, $r^2 = 0.9401$, $p < 0.0001$).

이렇게 도출된 대수회귀식을 이용하여 계산된 각 가지의 잎과 가지 바이오매스를 합하여 계산한 개체의 부위별 바이오매스도 모두 흉고직경과 지수적으로 증가하는 유의한 관계를 나타냈다(최대 $P = 0.0148$, Fig. 2).

2012년 태화산의 V영급 잣나무 조림지 개체목의 평균 지상부 총 바이오매스는 $306.8 \pm 127.26 \text{ kg tree}^{-1}$ 로 나타났으며(Table 3), 잎, 가지, 줄기의 부위별 평균 바이오매스는 각각 16.29 ± 9.12 , 45.91 ± 23.94 , $246.40 \pm 95.06 \text{ kg tree}^{-1}$ 로 나타났다. 구성비는 대부분의 선행연구 결과와 동일하게 잎<가지<줄기의 순으로 이루어졌으며(e.g., Yi, 1998; Kim et al., 1999; Noh

Table 3. Biomass of tree parts

Component	kg tree ⁻¹	Mg ha ⁻¹	%
Leaves	16.29 ± 9.12	6.68	5.28
Branch	45.91 ± 23.94	18.82	14.88
Stem	246.40 ± 95.06	101.02	79.84
Above ground	308.60 ± 127.26	126.53	100.00

et al., 2005; Kim *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2012) 각각의 구성비는 5.28, 14.88, 79.84%로 나타났다.

잣나무 바이오매스에 관한 기존의 연구에서는 잎 바이오매스가 차지하는 비율이 임령에 따라 III영급 평균 $13.51 \pm 5.16\%$ (Shin and Lee, 1985; Yi, 1998; Kim *et al.*, 1999; Han, 2001; Lee *et al.*, 2009), IV영급 평균 $12.76 \pm 6.96\%$ (Yi, 1998; Son *et al.*, 2001; Li *et al.*, 2010), V영급 이상 평균 $10.11 \pm 2.83\%$ (Yi, 1998; Li *et al.*, 2010)로 보고된 바 있다. 각 논문의 잎 바이오매스 구성비는 임분 밀도 등 환경 조건에 따라 증감을 나타내기는 하나 전체적으로 감소하는 경향을 보이는데 이는 일반적으로 임령이 증가할수록 줄기 구성비는 증가하고 가지와 잎 바이오매스 구성비는 감소하는 경향과 일치한다(Whittaker and Marks, 1975). 하지만 본 연구는 비슷한 임령의 Li *et al.* (2010)의 잎 구성비인 14.12%보다 낮게 나타났다. 이는 임령이 높은 임분에서 잎 구성비가 감소하는 경향 외에 2011년에 본 연구지에서 발생한 잣나무 넓적 잎벌(*Acantholyda parki*)에 의한 잎 피해가 낮은 잎 구성비에 영향을 끼친 것으로 판단된다. 잣나무 넓적 잎벌은 유충이 5월 하순부터 출현하여 잎을 섭식함으로써 피해를 주며 25년생 잣나무 조림지에서 잣나무 넓적 잎벌에 의해 건전목의 잎이 90% 감소한 후 잎 구성비가 14.4%에서 1.5%까지 감소했다는 보고가 있다(Chung and Shin, 1994). 본 연구가 시행된 6월 중순에도 잣나무 넓적 잎벌에 의한 잎의 피해를 육안으로 확인할 수 있었다.

조사 시기 또한 잎 바이오매스 차이에 영향을 주는데 Kinerson *et al.*(1974)의 연구에 따르면 소나무속의 엽면적은 5월부터 증가를 시작하여 6월 중순에 증가 속도가 가장 빠르고 9월 초에는 엽면적이 최대치에 다다른 후 후년 4월 초에 최대치 대비 약 73%까지 감소하여 최소치가 된다. 1차 조사는 6월에 실시하여 엽면적이 가장 왕성하게 증가하는 시기인데 반하여 2차 조사는 3월에 실시하여 전년도 가을 낙엽 이후 새로운 잎이 발생하기 전에 잎 바이오매스가 낮게 유지되는 시기이므로 ha당 잎 바이오매스가 1차에서보다 2차 조사에서 약 23% 낮게 나타났다. 엽면적과 엽면적비의 곱으로 구한 엽면적 지수는 2차 조사 시기인 3월에 2.3이며, 1차 조사 시기인 6월에는 3.1로 나타나 조사 시기에 따른 차이를 잘 보여준다. 그러나 1차 조사 또한 잎 바이오매스가 가장 높은 시기가 아

니기 때문에 8~9월에 조사를 실시한 기존의 다른 연구와 비교해서 잎 바이오매스가 낮게 나타난 것으로 보인다(e.g., Shin and Lee(1985), Kwon and Lee, (2006), Li *et al.*(2010)).

결과적으로 본 연구를 통해 도출된 상대생장식으로 잎 바이오매스를 예측하는 것은 유용하지 않으나 전체 바이오매스 중에서 잎 바이오매스가 차지하는 비율이 낮고 특히 목재생산의 측면에서는 줄기 바이오매스가 가장 중요하기 때문에 본 연구에서 도출된 상대생장식을 이용하여 총 바이오매스를 예측하는 것은 큰 무리가 없다.

가지 바이오매스의 구성비는 14.87%로 46년생에서 23.84%(Yi, 1998), V-VI영급에서 28.71%(Noh *et al.*, 2005)등으로 나타난 비슷한 영급의 선행연구와 비교해서 약 9~14% 낮게 나타났고 낮은 영급을 대상으로 한 연구에서도 고사지를 포함한 가지 바이오매스의 구성비가 17.8~28.8%의 범위를 나타내(Lee and Hwang, 2000; Han, 2001; Son *et al.*, 2001; Kwon and Lee, 2006) 본 연구의 가지 바이오매스가 낮음을 알 수 있었다. 이는 고사지의 포함 유무에 따라 차이가 나타나는 것으로 보이는데, 기존의 연구 결과에 따르면 고사지는 총 가지 바이오매스의 약 40%를 구성한다(Lee and Hwang, 2000; Han, 2001). 본 연구에서는 고사지의 바이오매스 생장식을 유도하지는 않았으나 고사지의 구성비를 육안 조사한 결과, 기존의 연구결과와 유사하였고(결과 제시하지 않음) 고사지를 포함할 경우 가지 바이오매스 구성비는 기존연구와 유사할 것으로 보인다.

본 연구 결과 줄기가 차지하는 비율은 약 80%에 이르며 이는 줄기의 구성비가 46.21~73.60%의 범위로 나타난 대부분의 선행연구보다 높은 값을 나타냈으나 경기도 지역 30년생 조림지를 대상으로 한 Son *et al.*(2001)의 연구에서는 줄기 구성비가 79.1%로 본 연구결과와 3.8%의 편차를 보였으며 잎, 가지의 구성비도 4% 미만의 편차를 보여 가장 유사했다. 일반적으로 임령이 증가할수록 줄기 구성비가 증가하는 경향이 있는데(Whittaker and Marks, 1975), 이와는 반대로 감소한 Noh *et al.*(2005)의 연구를 제외하고 대부분의 연구에서 II영급의 줄기 구성비가 25.53~47.79%로 가장 낮게 나타났고(Kwon, 1982; Li *et al.*, 2010) III영급에서 46.21~67.30%(Kwon, 1982; Shin and Lee, 1985; Lee and Park, 1987; Lee and Kim, 1997; Yi, 1998; Kim *et al.*, 1999; Han, 2001; Kwon and Lee, 2006;

Lee *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2010), IV영급에서 58.84~79.1%로 나타났으며(Yi, 1998; Son *et al.*, 2001; Li *et al.*, 2010) V영급 이상에서 64.44~73.60% 등으로 나타나(Yi, 1998; Li *et al.*, 2010) 영급에 따라 줄기 구성비가 증가하는 경향을 보여준다(Niemistö, 2013). 또한 본 연구에서 엽면적이 최대치인 시기에 조사를 실시하지 않은 것과 가지 바이오매스 추정에서 고사지를 포함하지 않은 것이 줄기 구성비가 증가하는데 영향을 준 것으로 판단된다.

3.2. 흉고직경, 임분 밀도와 지하고의 상관관계

목재생산의 측면에서 임목의 용재적 가치를 높이기 위해서는 흉고직경뿐만 아니라 자연낙지가 잘 되어 원줄기가 하나로 곧아야 한다(Nutto *et al.*, 2005). 따라서 지하고는 나무의 용재적 가치를 결정짓는 중요한 인자 중 하나이며 이는 수종, 직경, 임분 밀도, 임목의 활력도, 잡아지의 발현 정도 등에 의해 영향을 받는데(Spiecker, 2004) 본 연구에서는 직경과의 관계에 중점을 두고 분석하였다. Fig. 3은 소나무와 잣나무 임분의 수고에 대한 지하고의 상대적인 비를 평균 흉고직경에 따라 나타낸 그래프이다. 소나무의 경우 유의하지는 않으나 상대적인 평균 흉고직경이 증가할수록 상대적인 지하고의 비가 증가하는 경향을 나타냈고 잣나무의 경우 통계적으로 유의한 양의 상관관계를 나타냈다. 그러나 평균 흉고직경의 범위가 비슷한 임분에서는 임분 밀도가 증가함에 따라 지하고가 증가하였으며 이는 밀도가 높은 임분에서 수고 성장에 대한

경쟁이 강하기 때문에 자연낙지가 증가하여 지하고가 높게 나타나는 것으로 보인다(Xue and Hagihara, 2008). 또한 동일 임분 내에서 흉고직경이 큰 임목이 작은 임목보다 지하고가 낮게 나타난다는 참나무의 연구보고가 있으나(Spiecker, 2004) 본 연구 대상지에서 조사한 잣나무의 경우 흉고직경에 따른 지하고는 아무런 경향을 나타내지 않았다(결과 제시하지 않음).

흉고직경에 따른 지하고는 소나무가 잣나무보다 더 높게 나타났는데 낮은 흉고직경에서 두 수종 간의 지하고비 차이가 큰 것은 잣나무는 유년기에 내음성이 강해 자연낙지가 잘 안 되는 수종인데 반해 소나무는 자연낙지가 잘 되는 수종이기 때문이며 흉고직경이 커질수록 성장공간이 감소함에 따라 수고 생장이 촉진되기 때문에(Johansson, 1992) 두 수종 간의 지하고비 차이가 감소하는 것으로 판단된다.

3.3. 개체목 지상부 바이오매스 추정식

한편, Shaiek *et al.*(2011)는 잣나무에 대한 연구에서 임령을 변수에 포함하는 부위별 바이오매스 상대생장식을 제시하였다. 그러나 대부분의 연구에서는 임령을 구분하여 조사하였음에도 불구하고 부위별로 하나의 상대생장식으로 나타내었다(e.g., Yi(1998), Noh *et al.*(2005), Li *et al.*(2010)). 또한 임령에 의한 차이보다 간벌 등의 산림사업이 성장과 재적에 더 큰 영향을 미치며(Oliver, 1980; Hara and Nagel, 2006), 곰솔 임분을 대상으로 한 연령별 상대생장식은 임분 간의 통계적 유의성이 인정되지 않아 일관 상대생장식(generalized allometric equations)의 이용이 가능하다(Kim *et al.*, 2013)는 선행연구가 있다. 이와 마찬가지로 국내 잣나무 임분의 지상부 바이오매스 상대생장식은 대부분 흉고직경만을 독립변수로 하고 있으며 Fig. 4에 나타낸 그래프를 살펴보면, 3개의 상대생장식은 본 연구결과와 95% 유의성 내에서 동일했으며(Han, 2001; Kwon and Lee, 2006; Korea Forest Research Institute, 2010), 임분 밀도가 높은 임분에서 하나의 영급을 대상으로 하여 도출한 상대생장식은 높은 바이오매스를 나타냈으며(Lee and Park, 1987; Son *et al.*, 2001), 다양한 영급을 포함하여 도출한 상대생장식은 낮은 바이오매스를 나타냈다(Kwon, 1982; Noh *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2010). 상대생장식은 모수 a, b에 의해 결정되는데 선행연구들의 지상부 상대생장식의 a, b와 임령, 평균 흉고직경, 임분

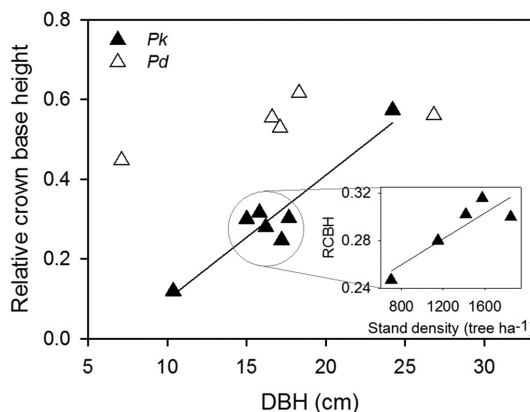


Fig. 3. Relative height of crown base (RCHB) vs DBH. Empty triangle is *pinus densiflora* (\triangle) and black triangle is *pinus koraiensis* (\blacktriangle). Five points in circle are significantly increase with stand density (inlet figure).

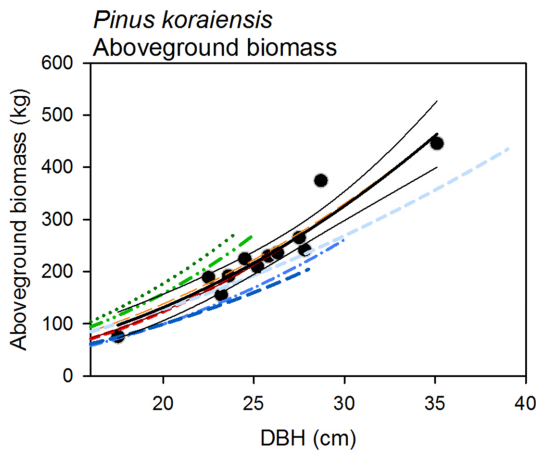


Fig. 4. Stand aboveground biomass equations along average DBH from various studies. Black circles are measurement point in this study, dotted lines are aboveground biomass equations from Son *et al.* (2001); green ···, Lee and Park (1987); green —··—, Han (2001); red—, KFRI (2010); orange —, Kwon and Lee (2006); brown —··—, Li *et al.* (2010); sky blue —, Noh *et al.*(2005); blue —··—, Kwon (1982); dark blue —.

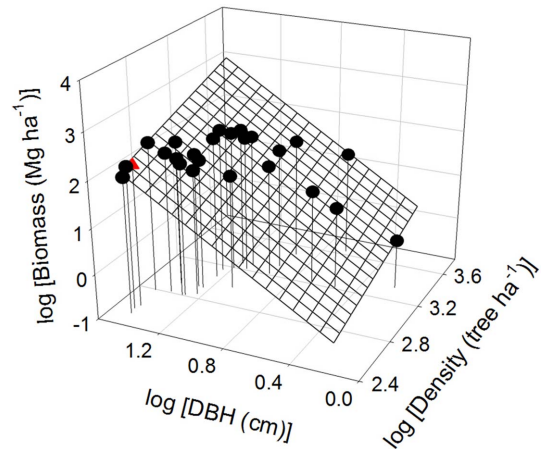


Fig. 5. Stand aboveground biomass as a function of average DBH and stand density from other studies (data from 27 *Pinus koraiensis* plantation in Korea; all axis are log₁₀-scaled, red triangle is measurement point in this study). Data points are shown in relation to the plane representing the relationship between biomass, density and DBH: $\log(\text{Biomass})=0.9030\log(\text{density})+2.0973\log(\text{DBH})-3.3230$. $r^2=0.9828$, $p<0.0001$.

밀도와와의 관계를 분석한 결과, a는 평균 흉고직경과 임분 밀도로 설명될 때 가장 유의하고 높은 결정계수를 나타냈다($r^2=0.8711$, $p=0.0060$). 그러나 임분 밀도에 대한 민감도가 매우 높아 일괄 회귀식을 도출할 경우에는 오차 발생이 크기 때문에 수종과 임분에 따른 a값을 각각 도출하여 사용해야 한다. 이와는 달리 b는 임령, 평균 흉고직경, 임분 밀도와 아무런 상관관계가 없는 것으로 나타났다.

3.4. 임분의 지상부 바이오매스 추정식

조사구 내 모든 나무의 각 부위별 바이오매스의 합을 조사구 면적으로 나눈 단위면적당 지상부 총 바이오매스는 126.53Mg ha^{-1} 로 나타났으며 이와 비교하여 선행연구에서는 30년생 잣나무 조림지에서 140Mg ha^{-1} (Son *et al.*, 2001), 22년생 잣나무 조림지에서 127.9Mg ha^{-1} (Han, 2001) 등으로 조사되었다. Son *et al.*(2001)은 II-VIII영급의 잣나무 조림지에서 $52.3\text{--}317.9 \text{Mg ha}^{-1}$ 의 범위를 보인다고 하였으며 V영급의 경우에는 약 270Mg ha^{-1} 로 나타났는데 이는 V영급 임분의 평균 흉고직경이 32.4cm이며 임분 밀도가 488tree ha^{-1} 로 본 연구 결과보다 모두 높기 때문에 단위면적당 바이오매스가 높은 것으로 판단된다.

이와 같이 선행연구에서 나타난 단위면적당 지상부

바이오매스의 차이는 향, 고도, 경사, 임령, 지위지수(Site Index)등과 같은 지역특이성에 의해서도 영향을 받지만(Gracia and Retana, 2004; Moser *et al.*, 2011; Sharma *et al.*, 2011; Unger *et al.*, 2012) 임분 밀도가 가장 큰 영향을 끼치는 것으로 알려져 있다(Xue and Hagihara, 2008). 임분 밀도가 감소할수록 직경 성장에 대한 경쟁이 감소하여 개체목 바이오매스가 증가하므로(Beadle *et al.*, 2013; Niemistö, 2013) 임분의 지상부 바이오매스는 평균 흉고직경과 임분 밀도의 두 인자를 이용하여 나타낼 수 있으며 국내 선행연구를 종합한 결과, 이 두 인자를 사용할 경우 임분의 지상부 바이오매스 변이의 98.25%를 설명하는 회귀식을 다음과 같이 도출하였다(Fig. 5).

$$\log Y = 0.903 \log(\text{density}) + 2.0973 \log(\text{DBH}) - 3.323$$

결론적으로 국내 잣나무 임분의 지상부 바이오매스 상대생장식은 임분의 평균 흉고직경과 임분 밀도를 이용하여 계산할 수 있으며 임령을 포함한 다른 인자보다는 이 두 인자에 더 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

기후변화 협약에 따라 우리나라는 매년 산림 바이오

매스 통계량을 제출할 것을 요구 받고 있으며 산림의 바이오매스는 수종, 입지, 임목밀도 등에 따라 달라질 수 있으므로 지역, 수종에 따라 각각의 상대생장식을 필요로 하고 이는 많은 노동력과 시간을 요한다. 본 연구에서는 경기도 태화산 지역의 V영급 잣나무 조림지를 대상으로 부위별 지상부 바이오매스의 상대생장식을 도출하고 다른 연구에서 도출된 잣나무 상대생장식들과 비교하였다. 다른 연구와 비교하여 조사시기의 차이가 있었고 잣나무 넓적 잎벌에 의한 피해로 인해 본 연구의 잎 바이오매스가 낮게 나타났다. 그러나 잎 바이오매스의 비율이 낮아 전체 바이오매스에 미치는 영향이 미미하기 때문에 전체 바이오매스의 추정에는 큰 영향이 없었다. 또한 우량재의 가치를 결정짓는데 중요한 지하고는 평균 흉고직경과 임분 밀도가 클수록 증가하는 경향을 나타냈다. 본 연구와 기존의 연구를 종합하여 분석한 결과, 임분의 평균 흉고직경과 임분 밀도의 두 인자만으로 임분의 지상부 바이오매스 회귀식을 도출하였으며 이를 이용해 국내 잣나무 임분의 비파괴적인 지상부 바이오매스 추정이 가능할 것으로 기대된다.

적 요

임분 밀도가 410 tree ha^{-1} 이며 평균 흉고직경이 $29.1 \pm 5.2 \text{ cm}$ 인 경기도 태화산의 V영급 잣나무 조림지에서 흉고직경을 독립변수로 하고 부위별 바이오매스를 종속변수로 하는 상대생장식을 만들었다. 잣나무 넓적 잎벌 피해로 인해 잎의 바이오매스가 낮게 나타났으나, 총 바이오매스에 미치는 영향은 미미하였다. 그간의 연구를 종합한 결과, 개체목 지상부 상대생장식($\log Y = a + b \log X$)의 모수 a 는 평균 흉고직경과 임분 밀도에 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났으나 b 는 영향을 미치는 인자를 찾을 수 없었다. 임분 단위에서는 부위별로 잎은 6.68 Mg ha^{-1} , 가지는 18.82 Mg ha^{-1} , 줄기는 $101.02 \text{ Mg ha}^{-1}$ 로 나타났으며 이를 합한 지상부 총 바이오매스는 $126.53 \text{ Mg ha}^{-1}$ 로 나타났다. 국내 잣나무 임분의 지상부 바이오매스는 임령보다는 평균 흉고직경과 임분 밀도에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며 두 인자를 사용하여 국내 잣나무 임분 바이오매스를 98% 이상 설명하는 간단한 회귀식을 도출할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산림청 연구과제 차세대 조림 기술 개발 (S211313L020120)과 온대 북부 산림의 시계열 특성 분석 및 기후변화적응 관리기법 연구(S111212L120110)에 의해 수행되었으며, 본 연구를 수행하는데 물심양면으로 도와주신 서울대학교 학술림과 그 관계자 분들께 무한한 감사를 표하는 바입니다.

REFERENCES

- Ahmed, R., P. Siqueira, S. Hensley, and K. Bergen, 2013: Uncertainty of forest biomass estimates in north temperate forests due to allometry: Implications for remote sensing. *Remote Sensing* **5**(6), 3007-3036.
- Beadle, C., D. Trieu, and C. Harwood, 2013: Thinning increases saw-log values in fast-growing plantations of acacia hybrid in Vietnam. *Journal of Tropical Forest Science* **25**(1), 42-51.
- Chung, S. B., and S. C. Shin, 1994: Studies on the effects of black-tipped sawfly, *acantholyda posticalis posticalis* matsumura on the growth of the Korean white pine, *Pinus koraiensis* S. et Z. *Journal of Korean Forest Society* **83**(4), 450-459. (in Korean with English abstract)
- Cutini, A., F. Chianucci, and M. C. Manetti, 2013: Allometric relationships for volume and biomass for stone pine (*Pinus pinea* L.) in Italian coastal stands. *iForest-Biogeosciences & Forestry* **6**(6), 331-335.
- Dixon, R. K., S. Brown, R. E. A. Houghton, A. Solomon, M. Trexler, and J. Wisniewski, 1994: Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science(Washington)* **263**(5144), 185-189.
- Gracia, M., and J. Retana, 2004: Effect of site quality and shading on sprouting patterns of holm oak coppices. *Forest Ecology and Management* **188**(1), 39-49.
- Han, S. K., 2001: Biomass, nutrient distribution and litterfall in unthinned Korean white pine (*Pinus koraiensis*) plantation, 55pp. (in Korean with English abstract)
- Hara, K. L., and L. M. Nagel, 2006: A functional comparison of productivity in even-aged and multiaged stands: A synthesis for *Pinus ponderosa*. *Forest Science* **52**(3), 290-303.
- Johansson, K., 1992: Effects of initial spacing on the stem and branch properties and graded quality of *Picea abies* (L.) karst. *Scandinavian Journal of Forest Research* **7**(1-4), 503-514.
- Kim, C. S., K. S. Lee, Y. M. Son, and H. S. Cho, 2013: Allometric equations and biomass expansion factors in an age-sequence of black pine (*Pinus thunbergii*) stands. *Journal of Forest Research* **102**(4), 543-549. (in Korean with English abstract) doi: 10.14578/jkfs.2013.102.4.543

- Kim, S., B. Lee, Y. Seo, and Y. Lee, 2011: Crown fuel characteristics and allometric equations of *Pinus densiflora* stands in Youngju region. *Journal of Korean Forest Society* **100**(2), 266-272. (in Korean with English abstract)
- Kim, S., Y. Lee, M. Jang, Y. Seo, K. Koo, S. C. Jung, and K. Kim, 2012: Above-ground biomass and crown fuel characteristics of *Pinus densiflora* in Yangyang, Gangwon province. *Journal of Korean Forest Society* **101**(2), 244-250. (in Korean with English abstract)
- Kim, Y. C., D. J. Chung, and H. R. Kim, 1999: A study on biomass of Korean white pine (*Pinus koraiensis*) artificial plantation. *Institute of Life Science & Resources* **20**, 32-37. (in Korean with English abstract)
- Kinerson, R., K. Higginbotham, and R. Chapman, 1974: The dynamics of foliage distribution within a forest canopy. *Journal of Applied Ecology* **11**(1), 347-353.
- Kong, W. S., 2004: Species composition and distribution of native Korean conifers. *The Korean Geographical Society* **39**(4), 528-543. (in Korean with English abstract)
- Korean Forest Service, 2005: *(Sustainable) Forest Resource Management Manual*, Korea Forest Research Institute.
- Korean Forest Service, 2010: *Carbon Emission Factor (cff) by Main Species for Forest Greenhouse Gases*, Korea Forest Research Institute.
- Korean Forest Service, 2011: *Management for Stand Quality in Korean Pine*.
- Korean Forest Service, 2012: *Economic Tree Species 3: Korean pine*, Korea Forest Research Institute, 168pp.
- Kwon, K. C., and D. K. Lee, 2006: Biomass and energy content of *Pinus koraiensis* stand planted in mt. Wolak. *Mokchae Konghak* **34**(4), 66-75. (in Korean with English abstract)
- Kwon, T. H., 1982: Studies on biomass productivity of *Pinus koraiensis* in different-aged plantations, 58pp. (in Korean with English abstract)
- Lee, D. H., and J. W. Hwang, 2000: Biomass productivity of *Pinus koraiensis* S. et Z. By the regression equation. *Journal of Resource Development* **19**, 77-82. (in Korean with English abstract)
- Lee, D. K., and G. T. Kim, 1997: Tree form and biomass allocation of *Quercus species*, *Larix leptolepis* (Sieb. et Zucc.) gordon and *Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc. in Kwangju-gun, Kyunggi-do. *Journal of Korean Forest Society* **86**(2), 208-213. (in Korean with English abstract)
- Lee, K. J., and Park, I. H., 1987: Primary production and nutrients distribution in 22-year-old *Pinus koraiensis* and *Quercus mongolica* stands in Kwangju district. *The Korea Forestry Energy Research Society* **7**(1), 11-21. (in Korean with English abstract)
- Lee, Y. J., Y. O. Seo, S. M. Park, J. K. Pyo, R. H. Kim, Y. M. Son, K. H. Lee, and H. H. Kim, 2009: Estimation of biomass for 27 years old Korean pine (*Pinus koraiensis*) plantation in Gangneung, Gangwon-province. *Journal of Agriculture & Life Science* **43**(1), 1-8. (in Korean with English abstract)
- Lehtonen, A., R. Mäkipää, J. Heikkinen, R. Sievänen, and J. Liski, 2004: Biomass expansion factors (BEFs) for Scots pine, Norway spruce and birch according to stand age for boreal forests. *Forest Ecology and Management* **188**(1), 211-224.
- Levia Jr, D. F., 2008: A generalized allometric equation to predict foliar dry weight on the basis of trunk diameter for eastern white pine (*pinus strobus L.*). *Forest Ecology and Management* **255**(5), 1789-1792.
- Li, X., M. J. Yi, Y. Son, P. S. Park, K. H. Lee, Y. M. Son, R. H. Kim, and M. J. Jeong, 2010: Biomass and carbon storage in an age-sequence of Korean pine (*Pinus koraiensis*) plantation forests in central Korea. *Journal of Plant Biology* **54**(1), 33-42.
- Moser, G., C. Leuschner, D. Hertel, S. Graefe, N. Soethe, and S. Iost, 2011: Elevation effects on the carbon budget of tropical mountain forests (S Ecuador): The role of the belowground compartment. *Global Change Biology* **17**(6), 2211-2226.
- Niemistö, P., 2013: Effect of growing density on biomass and stem volume growth of downy birch stands on peatland in Western and Northern Finland. *Silva Fennica* **47**(4), article id 1002.
- Noh, N. J., Y. H. Son, R. H. Kim, K. Y. Seo, K. W. Seo, J. W. Koo, J. H. Kyung, J. S. Kim, Y. J. Lee, I. H. Park, K. H. Lee, and Y. M. Son, 2005: Biomass of Korean Pine (*Pinus koraiensis*) in Gapyeong. *Korean Journal of Forest Measurements* **8**, 75-82. (in Korean with English abstract)
- Nutto, L., P. Spathelf, and R. Rogers, 2005: Managing diameter growth and natural pruning of Parana pine, *Araucaria angustifolia* (Bert.) O Ktze., to produce high value timber. *Annals of Forest Science* **62**(2), 163-173. doi:10.1051/forest:2005008
- Oliver, C. D., 1980: Forest development in North America following major disturbances. *Forest Ecology and Management* **3**, 153-168.
- Poorter, L. and F. Bongers, 2006: Leaf traits are good predictors of plant performance across 53 rain forest species. *Ecology* **87**(7), 1733-1743.
- Ritchie, M. W., J. Zhang, and T. A. Hamilton, 2013: Aboveground tree biomass for *Pinus ponderosa* in Northeastern California. *Forests* **4**(1), 179-196.
- Shaiek, O., D. Loustau, P. Trichet, C. Meredieu, B. Bachtobji, S. Garchi, and M. H. E. Aouni, 2011: Generalized biomass equations for the main aboveground biomass components of maritime pine across contrasting environments. *Annals of Forest Science* **68**(3), 443-452.
- Sharma, C., S. Gairola, N. Baduni, S. Ghildiyal, and S. Suyal, 2011: Variation in carbon stocks on different slope aspects in seven major forest types of temperate region of Garhwal Himalaya, India. *Journal of biosciences* **36**(4), 701-708.
- Shin, J. H. and D. K. Lee, 1985: Total nitrogen distribution

- and seasonal changes in inorganic nitrogen at a *Pinus koraiensis* stand in Kwangju-gun, Kyonggi-do, Korea. *Journal of Korean Forest Society* **69**(1), 56-68. (in Korean with English abstract)
- Son, Y., J. W. Hwang, Z. S. Kim, W. K. Lee, and J. S. Kim, 2001: Allometry and biomass of Korean pine (*Pinus koraiensis*) in Central Korea. *Bioresource technology* **78**(3), 251-255.
- Spiecker, H., 2004: *Develop high-quality wood oak*. Chungnam National University Press. 182.
- Sprugel, D., 1983: Correcting for bias in log-transformed allometric equations. *Ecology* **64**(1), 209-210.
- United Nations, 1998: Kyoto protocol to the United Nations framework convention on climate change, 20pp.
- Unger, M., J. Homeier, and C. Leuschner, 2012: Effects of soil chemistry on tropical forest biomass and productivity at different elevations in the Equatorial Andes. *Oecologia* **170**(1), 263-274.
- Xue, L. and A. Hagihara, 2008: Density effects on organs in self-thinning *Pinus densiflora* Sieb. et Zucc. Stands. *Ecological research* **23**(4), 689-695.
- Whittaker, R. H., and P. L. Marks, 1975: *Methods of Assessing Terrestrial Productivity*. 55-118.
- Yi, M. J., 1998: Changes in aboveground biomass and nutrient accumulation of the Korean-pine (*Pinus koraiensis*) plantation by stand age at Kangwondo province. *Journal of Korean Forest Society* **87**(2), 276-285. (in Korean with English abstract)
- Zianis, D., G. Xanthopoulos, K. Kalabokidis, G. Kazakis, D. Ghosn, and O. Roussou, 2011: Allometric equations for aboveground biomass estimation by size class for *Pinus Brutia* Ten. trees growing in North and South Aegean Islands, Greece. *European Journal of Forest Research* **130**(2), 145-160. doi:10.1007/s10342-010-0417-9