

종가시나무 조림지의 임분밀도에 따른 임목 바이오매스 및 양분축적량

최봉준¹·백경원¹·조창규¹·박성완¹·유병오²·정수영²·이광수²·김춘식^{1*}

¹경남과학기술대학교 산림자원학과, ²국립산림과학원 남부산림자원연구소

Biomass and Nutrient Stocks of Tree Components by Stand Density in a *Quercus glauca* Plantation

Bong-Jun Choi¹, Gyeongwon Baek¹, Chang-Gyu Jo¹, Seong-Wan Park¹, Byung Oh Yoo²,
Su-Young Jeong², Kwang Soo Lee² and Choonsig Kim^{1*}

¹Department of Forest Resources, Gyeongnam National University of Science and Technology, Jinju 52725, Korea

²Southern Forest Resources Research Center of the National Institute of Forest Science, Jinju 52817, Korea

요약: 본 연구는 경상남도 고성군에 식재된 상록활엽수인 27년생 종가시나무 조림지를 대상으로 고밀도(1,933본/ha)와 저밀도(1,200본/ha)구분한 후 총12본(고밀도 임분 6본, 저밀도 임분 6본)의 표본목을 별채하고 임목부위별 바이오매스 추정을 위한 상대생장식과 양분(C, N, P, K, Ca, Mg)축적량을 조사하였다. 흉고직경(DBH)을 독립변수로 하는 임분밀도별 줄기 목질부, 줄기 수피, 가지, 잎, 지상부 총량 등의 바이오매스 추정을 위한 상대생장식의 유의성이 인정되었으며($P < 0.05$), 상대생장계수(slope)는 유의적인 차이가 없어 일괄상대생장식의 적용이 가능한 것으로 나타났다. 종가시나무 조림지의 지상부 임목 바이오매스는 고밀도 임분이 177 Mg ha⁻¹로, 저밀도 임분 114 Mg ha⁻¹에 비해 유의적으로 높았다. 그러나 줄기 목질부, 줄기 수피, 가지, 잎 등의 임목부위별 양분 농도의 경우 임분밀도 따른 유의적인 차이는 없었다($P > 0.05$). 임목부위별 양분축적량은 줄기 목질부의 질소 및 인축적량을 제외하고 고밀도 임분과 저밀도 임분 사이에 유의적인 차이는 없었다. 본 연구결과에 따르면 종가시나무 조림지의 임목부위별 양분농도의 경우 바이오매스 축적량에 비해 임분밀도의 영향이 크지 않은 것으로 나타났다.

Abstract: This study was conducted to evaluate aboveground tree biomass and nutrient (C, N, P, K, Ca, and Mg) response of tree components by high (1,933 trees ha⁻¹) and low (1,200 tree ha⁻¹) stand densities in a 27-year-old *Quercus glauca* plantation. The study site was located in Goseong county, Gyeongsangnam-do, southern Korea. Total 12 trees (6 high and 6 low stand densities) were cut to develop allometric equations and to measure nutrient concentration of tree components. Stand density-specific allometric equations in the high and low stand densities were significant ($P < 0.05$) in tree components with diameter at breast height (DBH). Also, generalized allometric equations could be applied to estimate tree biomass regardless of the difference of stand density because of no significant effect on slope of stand density-specific allometric equations. Aboveground tree biomass estimated by the allometric equations was significantly higher in the high stand density (177 Mg ha⁻¹) than in the low stand density (114 Mg ha⁻¹). However, nutrient concentration of tree components was not significantly affected by the difference of stand density. Nutrient stocks in tree components were not significantly between the high stand density and the low stand density, except for the N and P stocks of stem wood. These results indicate that aboveground tree biomass could be significantly affected by stand density, but nutrient concentration among the tree components was not affected by the difference of stand density in a *Quercus glauca* plantation.

Key words: biomass, nutrient cycling, nutrient stocks, tree nutrient

서론

산림생태계 내 임분 별 바이오매스 생산 능력과 임목부위 별 양분 축적량의 정량적 평가는 균형 있는 양분순환

체계 구축과 지속가능한 산림경영기술 개발의 기초단계로 미래의 산림자원관리에 가장 중요한 이슈이다(Nilsson et al., 1995; Kim, 1999; Bravo et al., 2008). 이러한 중요성 때문에 산림생태계의 임목에 의한 양분흡수 및 축적량에 관한 다양한 연구가 국내·외에서 수행된바 있다(Kim et al., 1999; Balboa-Murias et al., 2006; Hwang et al.,

*Corresponding author
E-mail: ckim@gntech.ac.kr

2005; Osman, 2013). 또한 최근 지구온난화 같은 지구환경 변화에 따른 산림생태계 바이오매스의 정량적 평가는 생태계 물질생산기작의 해석 및 목질계를 이용한 대체 에너지원의 생산능력 파악, 산림생태계 서비스 증진을 위한 산림자원관리, 산림 내 바이오매스에 의한 탄소저장량 및 탄소 격리 능력의 정확한 이해(Bravo et al., 2008), 임분별 생지화학적 순환의 잠재적인 영향 등과 관련하여 연구의 중요성과 관심이 증가하고 있다(Rubilar et al., 2005; Balboa-Murias et al., 2006; Augusto et al., 2008; Osman, 2013; Tomesgen et al., 2015).

산림 바이오매스는 수종 별 상대성장식(allometric equations)을 개발하여 비교적 정확하게 추정이 가능한 것으로 알려져 있으나, 이들 상대성장식은 동일 수종의 경우라도 지역, 임분연령, 지위 등의 요인에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Kim et al., 2011; Tomesgen et al., 2015). 또한 임목의 양분축적량 및 양분 분포의 경우 임목부위별 바이오매스뿐만 아니라 양분농도의 측정이 필수적으로 이는 임목부위의 양분농도가 수종, 기후요인, 토양특성, 임분 연령에 영향을 받기 때문이다(Osman, 2013). 그러나 일반적으로 임목부위별 양분은 잎, 꽃, 열매 같은 생식기관이 높은 농도를 보이며, 수피, 가지, 변재부위 등은 중간정도의 농도, 심재는 가장 낮은 양분 농도를 보이는 것으로 알려져 있다(Osman, 2013). 국내에서 수행된 임목부위별 양분 함량 및 양분축적량 관련 연구로는 강원도 잣나무 조림지의 임령별 양분 축적량 변화(Lee, 1998), 경기도 리기다소나무나 낙엽송 조림지의 바이오매스 및 양분 축적량 비교(Kim et al., 1999), 상록

활엽수종인 소흑산도의 후박나무 천연임분의 바이오매스 및 양분 분포(Lee et al., 2005), 장흥 천관산 동백나무 천연림의 현존량 및 무기영양소 분포(Hwang et al., 2005) 등이 조사된바 있다.

우리나라 난대림에 분포하는 상록활엽수인 종가시나무 (*Quercus glauca* Thunberg)는 제주도를 비롯한 남해안 섬 지역과 전남 도서지역의 표고 600 m 이하에서 자생하는 난대수종으로 건축재, 선박재, 약기재, 정원수, 공원수 등으로 그 용도가 다양한 경제수종으로 알려져 있다(Shin et al., 2006). 종가시나무의 바이오매스 관련 연구로는 제주지역의 종가시나무 천연림을 대상으로 목재기본밀도(Son et al., 2014)와 꽃자왈 지역의 생물량 추정을 위한 상대성장식(Jeong et al., 2014)등이 제시된바 있으나, 내륙지역과 조림지 등을 대상으로 한 바이오매스생산량이나 양분축적량 등과 관련된 정량적인 정보는 아직까지 보고된바 없다. 또한 최근 숲 가꾸기나 간벌 같은 산림보육 작업과 임목 생육과정동안 병해충이나 기상에 의한 고사목 발생 등 생물적 교란(biotic disturbance)과 비생물적 교란(abiotic disturbance)으로 인하여 소면적의 산림 내 다양한 수준의 임분밀도가 발생하고 있으며, 이러한 임분밀도 차는 임목생장 뿐만 아니라 산림생태계의 물질생산이나 탄소 순환 등과 같은 다양한 요인에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Augusto et al., 2009; Noh et al., 2013). 따라서 본 연구는 종가시나무 조림지를 대상으로 임분밀도가 상대성장식의 회귀계수와 임목 각 부위별 양분농도 및 축적량에 미치는 영향을 조사하기 위한 목적으로 수행하였다.

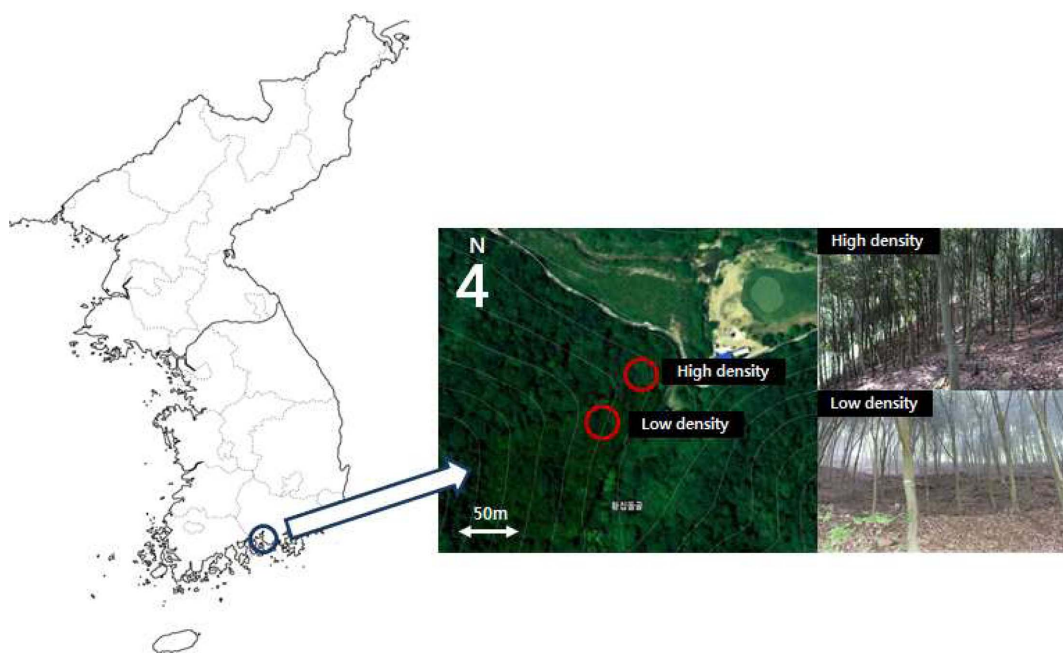


Figure 1. Location (high and low stand density sites) of the study site in a *Quercus glauca* plantation.

재료 및 방법

1. 조사지 입분현황

조사지는 고성군 상리면 동산리 산131번지에 위치한 서부지방산림청 함양국유림관리소 소관 국유림으로 1987년 0.9 ha에 종가시나무 2,250본 정도가 식재된 입분이다. 조사구는 숲가꾸기나 간벌이 아닌 자연 상태의 임목밀도가 차이가 나는 지역을 선정하여 고밀도 입분과 저밀도 입분으로 구분하여(Figure 1) 조사하였으며, 저밀도 입분은 1,200 본/ha으로 고밀도 입분 1,933 본/ha에 비해 약 730 본 정도가 적게 나타났다. 조림지의 입지현황은 고밀도 입분의 경우 남동향의 표고 256 m 산록부, 저밀도 입분의 경우 남동향의 표고 264 m 산복에 위치하고 있으며 두 조사구는 직선거리로 100 m 이내 위치하였다. 조사구는 상층 임관이 완전히 울폐되어 초본 및 관목류 등의 하층식생 발달은 매우 빈약하였다. 산림토양은 퇴적암인 사암모래의 암적갈색약간산림토양형(DRb₂)이 분포하고 있으며, 고밀도 입분의 A층 깊이는 0~25 cm, B층은 25~50 cm 정도였다. 토색은 A층은 5YR 4/4, B층 5YR 5/4, 토양건밀도는 A층 0.5 kg cm⁻² 이하, B층 1.25~1.5 kg cm⁻²로 나타났으며, 토양구조의 경우 A층은 입상, B층은 괴상구조가 발달하였다. 저밀도 입분의 경우 A층의 깊이는 0~20 cm, B층은 20~50 cm였고, 토색의 경우 A층 5YR 4/4, B층 5YR 5/4였다. 토양 건밀도는 A층 1.5 kg m⁻² 이하, B층은 2.5 kg cm⁻²로 나타났으며, 토양구조는 A층 단립, B층은 각괴상 구조였다. 토양단면특성은 두 조사구 간 차이가 크지 않았다. 입분별 평균 흉고직경은 저밀도 입분이 14.7 cm로 고밀도 입분 13.0 cm에 비해 큰 것으로 나타났으나, 평균 수고의 경우 고밀도 입분이 10.7 m로 저밀도 입분 9.6 m에 비해 크게 나타났다(Table 1).

2. 표본목 선정 및 상대생장식

조사구는 입분밀도를 고려하여 각 3개의 조사구(10 × 10 m)를 선정하였다. 선정된 조사구는 2015년 5월 흉고직경 6 cm 이상의 임목을 대상으로 매목조사를 실시하고 매목조사 후 얻어진 자료로부터 상대생장식 개발을 위해 별도 될 임목을 직경급이 고르게 분포하도록 각 처리 별 6본(총 12본)을 별채하였다. 선정된 임목은 “산림바

이오매스 및 토양탄소 조사·분석 표준 매뉴얼”(Korea Forest Research Institute, 2010)에 의거 지상부 20 cm 높이를 기계톱을 이용하여 별채하였으며, 별채된 임목의 경우 지상부 0.2 m, 1.2 m, 3.2 m, 5.2 m, 7.2 m의 간격으로 절단하고 디지털 저울을 이용하여 줄기 생중량을 측정하였다. 가지 생중량은 줄기로부터 분리하여 측정하였고, 가지에 부착된 잎의 경우도 전체를 분리하여 생중량을 측정하였다. 생중량이 측정된 줄기, 가지, 잎 시료는 건중량 환산을 위해 1~2 kg 씩 현지에서 채취하고 비닐주머니에 밀봉하여 실험실로 운반한 후 80°C 온풍건조기에 넣고 향량에 도달할 때까지 건조시킨 후 건중량을 측정하였다. 각 임목 부위별 건중량은 흉고직경(DBH)을 독립변수로 이용한 상대생장식 $\log_{10}Y=a+b\log_{10}X$ [(Y=각 임목 부위 건중량(g); X: DBH(cm)] 을 개발하였으며, 상대생장식의 유의성이 인정되는 경우($P < 0.05$) 개발된 상대생장식을 이용하여 각 부위별 단위면적당 바이오매스를 추정하였다.

3. 토양 및 임목의 양분 분석

조사구별 토양 특성은 임목의 3개 지점에서 400 cm³ 원통형 토양 채취기를 이용하여 0~10 cm, 10~20 cm, 20~30 cm의 깊이별로 토양 시료를 채취하여 실험실로 운반하고, 48시간 이상 풍건한 후 2 mm 체 및 40 mesh체를 이용하여 토양 물리, 화학적 성질 분석용 시료를 조제하였다. 토양 입경분포의 경우 비중계법(Kalra and Maynard, 1991)을 이용하였으며, 토양 탄소 및 질소농도는 대용량 원소분석기(Vario Macro cube, Germany)로 측정하였다. 토양 내 인, 칼륨, 칼슘, 마그네슘 등은 2.5 g의 건조토양을 암모늄 아세테이트 용액 55 mL를 첨가한 후 16시간동안 진공추출하고 추출한 용액을 ICP(Perkin Elmer Optima 5300, USA)를 이용하여 분석하였다(Kalra and Maynard, 1991).

각 조사구로부터 별채된 임목은 각 부위별 줄기 목질부, 줄기 수피, 가지, 잎 내 탄소 및 양분농도 분석을 위해 건중량 시료를 일부 채취하고 시료를 분쇄한 후 40 mesh체를 이용하여 탄소 및 양분 분석용 식물체 시료를 조제하였다. 각 임목부위 내 탄소 및 질소농도는 원소분석기(Thermo Scientific, Flash 2000, Italy)를 이용하여 측정하였으며, 인, 칼륨, 칼슘, 마그네슘 등은 0.5 g의 건조 식물

Table 1. General site and stand characteristics by stand density in a *Quercus glauca* plantation.

Treat-ment	Age	Location	Aspect	Elevation (m)	Slope (°)	Stand density (tree ha ⁻¹)	DBH (cm)	Height (m)	Basal area (m ² ha ⁻¹)
High density	27	34°57'54.44"N 128°10'36.33"E	SE	256	25~30	1933 (145)	13.0 (0.5)	10.7 (0.7)	26.14 (2.1)
Low density	27	34°57'52.37"N 128°10'33.47"E	SE	264	15~20	1200 (230)	14.7 (0.6)	9.6 (0.3)	19.00 (4.4)

*Values in parenthesis are standard error.

체를 습식분해 후(Kalra and Maynard, 1991) 여과액을 대상으로 ICP(Perkin Elmer Optima 5300, USA)를 이용하여 분석하였다.

4. 자료분석

임목 각 부위별 건중량 자료를 이용하여 바이오매스 추정을 위한 상대생장식을 개발하였으며, 상대생장식과 회귀계수(b)의 유의성 검정은 SAS의 Proc REG Procedure와 Analysis of Covariance를 이용하였다(SAS Inc, 2003). 또한 임분밀도 별 임목의 바이오매스와 양분함량 및 양분축적량의 비교는 SAS의 t-test를 이용하여 $P < 0.05$ 수준에서 유의성을 검정하였다.

결과 및 고찰

1. 임분 및 토양 특성

종가시나무의 임분밀도 별 흉고직경 분포의 경우 저밀도 임분의 흉고직경급은 정규분포에 가까우나 고밀도 임분의 흉고직경급 분포는 14 cm 이하의 낮은 직경급이 높았다(Figure 2). 이는 조사지가 동일영급의 조림지로서 고밀도의 경우 광, 수분, 양분 등과 같은 임목생육에 필수적인 요인의 경쟁과 입지요인의 차로 인하여 낮은 직경급의 임목이 높은 빈도를 보이는 것으로 사료된다. 조사지의 토양특성 중 토양용적밀도, 석력함량, 토양입경분포 같은 토

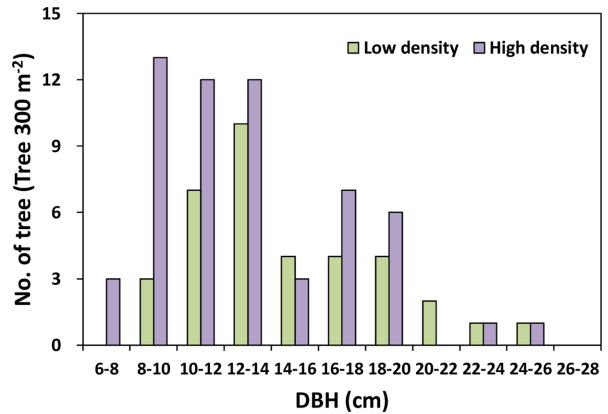


Figure 2. Distribution of diameter breast height (DBH) by stand density in a *Quercus glauca* plantation.

양 물리적 특성(Table 2)이나, 토양 pH, 토양 EC, 탄소 및 전질소 함량, 치환성 양이온 함량과 같은 토양 화학적 특성(Table 3)도 처리구 사이에 유의적인 차가 없었다. 이는 두 처리구가 동일 사면에 인접하여 토양특성의 공간적 변이가 크지 않았기 때문으로 사료된다. 본 조사구의 토양용적밀도는 우리나라 퇴적암 모재 산림토양의 A층 평균용적밀도 0.97 g cm⁻³ 보다 낮았으며, 토양 탄소함량은 5.1%로서, 1980년대 조사된 우리나라 산림지역 퇴적암 모재 산림토양의 평균 유기탄소함량 1.8%(Jeong et al., 2003)에 비해 높았다. 토양용적밀도나 유기탄소함량을 고려할 때 조사지의 토양 특성은 우리나라 퇴적암 모재 산

Table 2. Soil physical property by stand density in a *Quercus glauca* plantation.

Depth (cm)	Treatment	Bulk density (g cm ⁻³)	Coarse fragment (%)	Soil particle distribution(%)		
				Sand	Silt	Clay
0-10	High density	0.74 (0.05)	31.54 (4.24)	45 (3)	42 (2)	13 (1)
	Low density	0.71 (0.06)	41.31 (2.15)	48 (3)	38 (2)	14 (1)
10-20	High density	0.95 (0.06)	52.96 (7.25)	37 (2)	44 (1)	19 (1)
	Low density	0.83 (0.06)	41.32 (3.12)	40 (2)	45 (2)	16 (2)
20-30	High density	0.98 (0.08)	41.66 (4.23)	34 (2)	45 (1)	21 (2)
	Low density	0.94 (0.01)	40.70 (4.40)	36 (2)	46 (2)	18 (2)

*Values in parenthesis are standard error. All components of soil chemical property were not significantly between high stand density and low stand density at $P < 0.05$.

Table 3. Soil chemical property by stand density in a *Quercus glauca* plantation.

Depth (cm)	Treatment	pH	EC (uS cm ⁻¹)	Carbon (%)	Total N (%)	Avail. P (mg kg ⁻¹)	Exchangeable (cmolc kg ⁻¹)		
							K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
0-10	High density	4.53 (0.05)	169 (18.9)	5.13 (0.67)	0.38 (0.04)	7.2 (1.8)	0.22 (0.03)	0.34 (0.07)	0.24 (0.07)
	Low density	4.52 (0.01)	175 (8.1)	5.48 (0.66)	0.42 (0.05)	5.7 (0.2)	0.23 (0.02)	0.44 (0.05)	0.24 (0.03)
10-20	High density	4.49 (0.07)	191 (11.4)	2.96 (0.27)	0.23 (0.02)	6.3 (1.9)	0.14 (0.02)	0.16 (0.06)	0.10 (0.02)
	Low density	4.50 (0.04)	169 (10.6)	3.10 (0.26)	0.25 (0.02)	6.7 (0.6)	0.16 (0.02)	0.12 (0.01)	0.13 (0.01)
20-30	High density	4.45 (0.07)	182 (27.4)	2.74 (0.54)	0.23 (0.04)	7.4 (2.4)	0.11 (0.01)	0.12 (0.01)	0.10 (0.02)
	Low density	4.48 (0.04)	167 (5.9)	2.48 (0.16)	0.20 (0.01)	7.5 (0.7)	0.13 (0.00)	0.08 (0.01)	0.11 (0.01)

*Values in parenthesis are standard error. All components of soil chemical property were not significantly between high stand density and low stand density at $P < 0.05$.

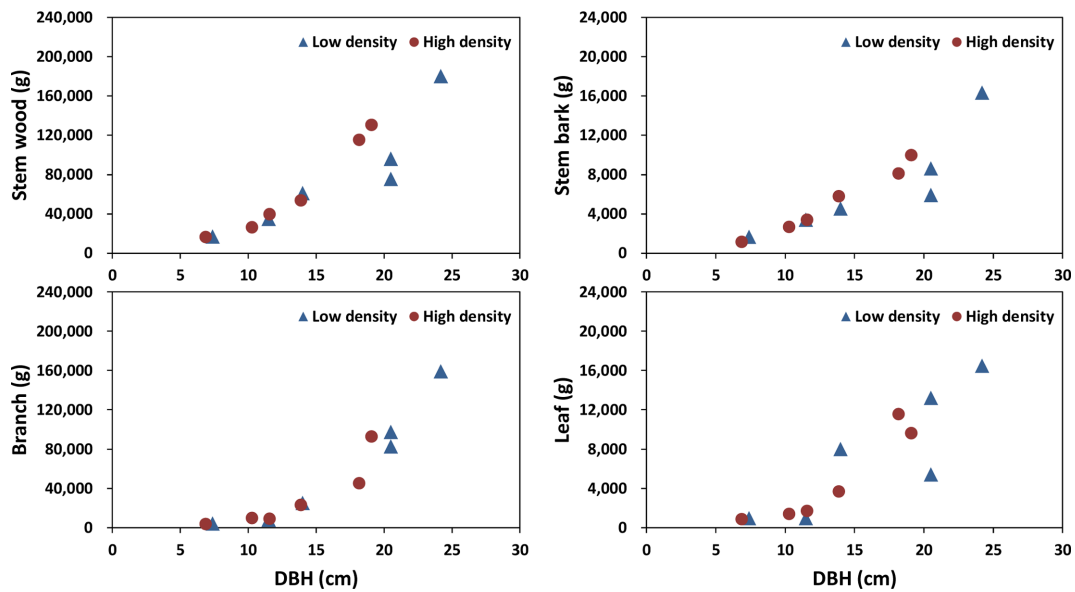


Figure 3. Scatter plots of dry weight in sampled tree components by stand density of a *Quercus glauca* plantation.

Table 4. Allometric equations by stand density of a *Quercus glauca* plantation ($\log_{10}Y=a+b\log_{10}X$).

Model	Treatment	Tree component	Parameter			
			a	b	R ²	P-value
Stand density-specific allometric equations	Low density	Stem volume with bark (cm ³)	2.9279	1.6638	0.9445	0.0012
		Stem volume without bark (cm ³)	2.8540	1.6869	0.9385	0.0014
		Stem wood (g)	2.7482	1.7146	0.9237	0.0022
		Stem bark (g)	1.8092	1.6142	0.8940	0.0044
		Branch (g)	0.8730	3.0714	0.9417	0.0013
		Leaf (g)	0.8638	2.3574	0.7341	0.0293
		Total (g)	2.4824	2.1517	0.9512	0.0009
	High density	Stem volume with bark (cm ³)	2.6427	1.9911	0.9819	0.0001
		Stem volume without bark (cm ³)	2.5982	1.9827	0.9828	0.0001
		Stem wood (g)	2.2950	2.1670	0.9741	0.0003
		Stem bark (g)	1.2282	2.1608	0.9899	0.0001
		Branch (g)	0.7881	3.1289	0.9283	0.0020
		Leaf (g)	0.4583	2.7445	0.9160	0.0027
		Total (g)	2.1927	2.4299	0.9698	0.0003
	P-value of the slope(b)	Stem volume with bark (cm ³)				0.7491
		Stem volume without bark (cm ³)				0.7126
		Stem wood (g)				0.2953
		Stem bark (g)				0.1861
		Branch (g)				0.7978
		Leaf (g)				0.8134
		Total (g)				0.6440
Generalized allometric equations	Stem volume with bark (cm ³)	2.8848	1.7345	0.9369	0.0001	
	Stem volume without bark (cm ³)	2.8174	1.7495	0.9381	0.0001	
	Stem wood (g)	2.6157	1.8517	0.9287	0.0001	
	Stem bark (g)	1.6027	1.8041	0.9226	0.0001	
	Branch (g)	0.8208	3.1077	0.9397	0.0001	
	Leaf (g)	0.7251	2.4879	0.8104	0.0001	
	Total (g)	2.3850	2.2443	0.9569	0.0001	

Y: Dry weight (g); X: DBH (cm).

림토양에 비해 양호하였다.

2. 표본목의 상대생장식 및 임목부위별 바이오매스

조사구로부터 벌채된 줄기 목질부, 줄기 수피, 가지, 잎 등의 건중량은 임분밀도 별 유사한 흉고직경에서 유사한 건중량을 가지는 것으로 나타났다(Figure 3). 또한 각 임분밀도 별 표본목의 줄기 목질부, 줄기 수피, 가지, 잎 건중량의 경우 흉고직경 증가에 따른 지수함수 관계를 보이고 있다(Figure 3). 표본목의 각 부위별 바이오매스(Y)와 흉고직경(DBH)을 독립변수(X)로 하여 계산된 종가시나무의 재적, 줄기 목질부, 줄기 수피, 잎, 지상부 총량 등 임목부위 별 상대생장식(Table 4)은 고밀도와 저밀도 모두 상대생장식의 유의성이 인정되었으며($P < 0.05$), 결정계수(R^2) 값도 줄기 목질부나 줄기 수피의 경우 0.894 이상으로 회귀식의 적합도가 높았다(Table 4). 그러나 잎건중량 추정 상대생장식의 결정계수는 고밀도 임분 0.916, 저밀도 임분 0.734로 임분밀도 별 상당한 차이가 있었는데, 이는 저밀도 임분의 경우 낮은 임분밀도로 인하여 수관이 확장할 수 있는 공간이 충분하여 흉고직경에 증가에 따른 불규칙한 엽량의 증가 때문에(Figure 3) 상대생장관계가 낮게 나타난 것으로 사료된다. 일반적으로 산림 내 임목의 잎 바이오매스 추정을 위한 상대생장식의 결정계수는 임목의 타 부위에 비해 낮은 것으로 알려져 있다(Kim et al., 2013). 한편, 임분밀도 별 상대생장식(stand density-specific allometric equations)의 회귀계수(slope, b)는 임목부위 별 유의적인 차이가 없어(Table 4) 종가시나무 조림지의 경우 임분밀도에 관계없는 일괄 상대생장식(generalized allometric equations)의 적용이 가능 한 것으로 나타났다(Table 4). 조사된 종가시나무 조림지의 임분밀도가 상당한 차이가 있음에도 회귀계수에 유의적인 차이가 없는 것은 이들 임분이 공간적으로 인접하여 유사한 입지환경에서 생육하였기 때문으로 사료된다. 일괄상대생장식의 경우 잎 바이오매스 추정 상대생장식 결정계수 0.810을 제외하고 줄기 목질부, 줄기 수피, 가지 등의 결정계수는 0.922 이상으로 저밀도 임분의 상대생장식 결정계수 보다 높게 나타났다.

임분밀도 별 상대생장식에 의해 추정된 종가시나무 조림지의 임목부위별 바이오매스중 가지 바이오매스를 제

외한 줄기 목질부, 줄기 수피, 지상부 총량 등은 고밀도 임분이 저밀도 임분에 비해 높은 값을 보였다(Table 5). 이는 임목 분수 증가에 따른 임분 흉고단면적 함의 차(Table 1)가 원인으로 사료된다. 종가시나무 조림지 임목의 지상부 평균 바이오매스는 145.5 Mg ha⁻¹으로 국내에서 조사된 유사한 영급의 상록활엽수인 완도 붉가시나무임분 78.15 Mg ha⁻¹(Lee et al., 2007), 완도 후박나무임분 123.7 Mg ha⁻¹(Lee and Kim, 1988) 등에 비해 높게 나타나 종가시나무 조림지의 산림생산력이 난대 상록활엽수종인 붉가시나무나 후박나무천연림에 비해 높은 것으로 나타났다.

3. 임분 밀도별 양분농도 및 양분축적량

임목 부위별 탄소, 질소, 인, 칼륨, 칼슘, 마그네슘농도는 임분밀도 간 유의적인 차이가 없었다(Table 6). 이는 임목부위의 양분농도가 토양 내 양분유효도와 밀접한 관련이 있음을 고려할 때(Kim et al., 2015) 두 처리 간 토양특성에 유의적인 차이(Table 2, 3)가 없었기 때문으로 사료된다. 임목부위별 양분농도 중 임목의 줄기 내 양분농도는 입지환경요인의 영향은 크지 않는 반면에(Hagen-Thorn et al., 2004), 잎 내 양분농도는 금년도 생육한 신엽(current-year-old needle)이 임목밀도의 영향을 가장 크게 받아 임목밀도가 낮은 경우 높은 양분함량을 보이는 것으로 알려져 있다(Barron-Gafford et al., 2003). 그러나 본 연구의 잎 양분은 임분밀도 별 차이가 없었으며, 이는 조사시기가 5월초로서 1년 이상 생육한 성숙한 잎 시료가 채취되고 양분이 분석되어 임분밀도의 영향이 크지 않은 것으로 사료된다. 임목부위별 양분농도는 임분밀도에 관계없이 잎이 가장 높았으며 가지>줄기 수피>줄기 목질부 순이었다(Table 6). 일반적으로 임목 내 양분농도의 경우 잎 부위가 줄기 목질부나, 가지부위에 비해 높은 것으로 알려져 있으며(Kim, 1999; Hwang et al., 2005; Osman, 2013), 본 연구에서 조사된 종가시나무도 동일한 경향을 보였다.

종가시나무에 축적된 양분함량(content)의 추정을 위하여 임목의 흉고직경(DBH)을 독립변수로 하고 임목 각 부위의 양분 함량을 종속변수로 단순회귀 모델을 개발한 결과 양분 함량 추정식의 유의성이 인정되었으며($P < 0.05$) 결정계수(r^2)의 값도 줄기 목질부, 인 축적량 0.35를 제외

Table 5. Aboveground biomass of tree components by stand density in a *Quercus glauca* plantation.

Treatment	Biomass (Mg ha ⁻¹)				
	Stem wood	Stem bark	Branch	Leaf	Total aboveground
High density	110.0 (11.7)a	9.3 (0.8)a	49.2 (5.5)a	7.9 (0.8)a	177.0 (15.9)a
Low density	64.0 (8.3)b	5.6 (0.7)b	39.2 (6.3)a	5.0 (0.7)b	114.0 (15.9)b
Mean	87.0	7.5	44.2	6.5	145.5

*Values in parenthesis are standard error. Different letters in treatment denote a significant difference at $P < 0.05$.

Table 6. Nutrient concentration of sampled tree components in a *Quercus glauca*.

Tree component	Treatment	Nutrient (%)					
		C	N	P	K	Ca	Mg
Stem wood	High density	45.6 (0.15)	0.11 (0.018)	0.006 (0.001)	0.17 (0.01)	0.17 (0.04)	0.03 (0.001)
	Low density	45.7 (0.20)	0.12 (0.008)	0.005 (0.001)	0.18 (0.03)	0.26 (0.03)	0.03 (0.002)
Stem bark	High density	44.6 (0.33)	0.55 (0.05)	0.02 (0.002)	0.22 (0.01)	2.08 (0.18)	0.09 (0.004)
	Low density	44.6 (0.32)	0.52 (0.04)	0.02 (0.002)	0.24 (0.02)	2.44 (0.15)	0.10 (0.010)
Branch	High density	46.6 (0.19)	0.45 (0.05)	0.07 (0.0007)	0.66 (0.06)	0.49 (0.08)	0.19 (0.01)
	Low density	46.3 (0.11)	0.38 (0.04)	0.06 (0.003)	0.88 (0.08)	0.70 (0.08)	0.15 (0.02)
Leaf	High density	48.1 (0.16)	1.42 (0.05)	0.10 (0.001)	0.65 (0.04)	0.51 (0.06)	0.16 (0.01)
	Low density	48.1 (0.27)	1.34 (0.07)	0.09 (0.001)	0.64 (0.05)	0.66 (0.04)	0.16 (0.009)

*Values in parenthesis are standard error. All nutrient concentration of tree components were not significantly between high stand density and low stand density at $P < 0.05$.

Table 7. Linear relations to estimate nutrient content of tree components in a *Quercus glauca* ($Y=a+bX$).

Nutrient	Tree component	Parameter		r^2	P-value
		a	b		
C	Stem wood	-25500	3885.12	0.8373	0.0001
	Stem bark	-1994.4	312.33	0.8191	0.0001
	Branch	-35395	3834.40	0.8610	0.0001
	Leaf	-3235.9	415.64	0.7894	0.0001
	Total	-66126	8447.51	0.8843	0.0001
	N	Stem wood	-64.802	9.560	0.8330
Stem bark		-34.019	4.604	0.7842	0.0001
Branch		-358.204	37.758	0.8392	0.0001
Leaf		-84.654	11.072	0.7923	0.0001
Total		-541.677	62.995	0.8610	0.0001
P		Stem wood	-1.775	0.361	0.3458
	Stem bark	-1.602	0.213	0.8104	0.0001
	Branch	-82.343	8.772	0.6886	0.0008
	Leaf	-5.298	0.707	0.8056	0.0001
	Total	-91.006	10.054	0.7073	0.0006
	K	Stem wood	-53.680	11.250	0.5792
Stem bark		-8.728	1.491	0.7735	0.0002
Branch		-636.594	66.997	0.6590	0.0013
Leaf		-39.099	5.070	0.7824	0.0001
Total		-738.101	84.808	0.7065	0.0006
Ca		Stem wood	-181.323	22.747	0.5886
	Stem bark	-114.821	17.042	0.8642	0.0001
	Branch	-565.729	59.837	0.7912	0.0001
	Leaf	-51.255	6.177	0.7349	0.0004
	Total	-913.134	105.805	0.8371	0.0001
	Mg	Stem wood	-21.724	2.815	0.8529
Stem bark		-6.372	0.844	0.6609	0.0013
Branch		-125.286	13.501	0.7446	0.0003
Leaf		-8.721	1.188	0.7571	0.0002
Total		-162.102	18.349	0.7863	0.0001

Y: Nutrient content (g); X: DBH (cm).

하고 대부분의 회귀식의 결정계수가 0.60~0.90으로 적합도가 높게 나타나 임목부위 별 양분함량 추정이 가능한 것으로 나타났다(Table 7).

임목부위 별 양분축적량은 일반적으로 고밀도 임분이 저밀도 임분에 비해 높은 축적량을 보이고 있으나 줄기 목질부의 질소와 인축적량을 제외하고 임분밀도 간 유의적인 차이는 없었다(Table 8). 두 임분밀도의 임목부위별 바이오매스의 유의적인 차이에도 불구하고 양분축적량에 차이가 없는 것은 임목부위의 양분농도가 임분밀도 간 뚜렷한 경향이 나타나지 않았기 때문으로 사료된다. 예를 들면, 줄기 목질부, 줄기 수피, 가지부위의 칼륨과 칼슘 같은 양분의 경우 저밀도 임분에서 양분농도가 높으나, 가지나 잎의 경우 고밀도 임분이 저밀도 임분에 비해 높은 질소농도를 보였다(Table 5). 또한 양분축적량 추정식이 최소자승법에 의해 추정된 회귀식이지만 추정식의 잔차 등의 차이가 양분 축적량 추정에 영향을 미치고 있는 것으로 사료된다. 두 임분밀도의 양분축적량은 탄소 > 칼슘 > 칼륨 > 질소 > 마그네슘 > 인 순이었고, 임목부위별 양분축적량은 가지가 임목의 타부위에 비해 축적량이 높았다. 본 연구에서 조사된 종가시나무조립지의 양분분포는 후박나무임분의 양분 분포비율 칼륨 > 칼슘 > 질소 > 마그네슘 > 인(Lee et al., 2005)과 동백나무임분의 질소 > 칼슘 > 칼륨 > 마그네슘 > 인(Hwang et al., 2005) 등과는 다른 분포비율을 보여 우리나라 난대 상록 활엽수종의 경우 수종별 양분 흡수 및 저장 특성이 차이가 있는 것으로 나타났다. 국내에서 조사된 동백나무천연림의 양분 축적량은 질소 443 kg N ha⁻¹, 인 50.5 kg P ha⁻¹, 칼륨 366 kg K ha⁻¹, 칼슘 433 kg Ca ha⁻¹, 마그네슘 118 kg Mg ha⁻¹ (Hwang et al., 2006)로, 종가시나무 조립지의 경우 동백나무천연림에 비해 약간 높은 양분축적량을 보였다.

Table 8. Nutrient stocks of tree components by stand density in a *Quercus glauca* plantation.

Tree component	Treatment	Nutrient (kg ha ⁻¹)					
		C	N	P	K	Ca	Mg
Stem wood	High density	47773 (3261)a	124 (8.4)a	6 (0.4)a	177 (11.2)a	217 (17.2)a	28 (2.2)a
	Low density	34343 (4254)a	89 (11.0)b	4 (0.5)b	121 (15.1)a	165 (20.8)a	21 (2.7)a
Stem bark	High density	3940 (266)a	59 (4.1)a	2 (0.2)a	20 (1.3)a	203 (14.1)a	9 (0.7)a
	Low density	2817 (348)a	43 (5.3)a	2 (0.2)a	14 (1.8)a	147 (18.3)a	6 (0.8)a
Branch	High density	27368 (2783)a	257 (27.5)a	60 (6.5)a	443 (48.6)a	401 (43.4)a	95 (9.8)a
	Low density	22639 (2947)a	216 (28.4)a	50 (6.6)a	375 (49.6)a	338 (44.6)a	79 (10.3)a
Leaf	High density	4138 (318)a	110 (8.4)a	7 (0.6)a	51 (3.9)a	55 (4.6)a	13 (1.0)a
	Low density	3121 (390)a	83 (10.4)a	5 (0.7)a	38 (4.8)a	43 (5.4)a	9 (1.2)a
Total	High density	83220 (6450)a	551 (47.3)a	75 (7.3)a	692 (62.2)a	878 (77.8)a	145 (13.4)a
	Low density	62921 (7877)a	431 (54.7)a	61 (7.9)a	550 (70.2)a	694 (88.5)a	116 (14.9)a

*Values in parenthesis are standard error. The different letters in each column indicate a significant difference at $P < 0.05$.

감사의 글

본 연구는 국립산림과학원 남부산림자원연구소 “2015년 상록활엽수 물질생산량 추정 및 양료순환 모델개발”연구과제의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

Augusto, L., Meredieu, C., Bert, D., Trichet, P., Porté, A., Bosc, A., Lagane, F., Loustau, D., Pellerin, S., Danjon, F., Ranger, J., and Gelpe, J. 2008. Improving models of forest nutrient export with equations that predict the nutrient concentration of tree compartments. *Annals of Forest Science* 65: 808-808.

Augusto L., Bakker, M., Lavaissiere, S.D., Jordan-Meille, L., and Saur, E. 2009. Estimation of nutrient content of woody plants using allometric relationships: quantifying the difference between concentration values from the literature and actuals. *Forestry* 82: 463-477.

Balboa-Murias, M.A., Rojo, A., Álvarez, J.G., and Merino, A. 2006. Carbon and nutrient stocks in mature *Quercus robur* L. stands in NW Spain. *Annals of Forest Science* 63: 557-565.

Barron-Gafford, G.A., Will, R.Y., Burkes, E.C., Shiver, B., and Teskey, R.O. 2003. Nutrient concentrations and contents, and their relation to stem growth of intensively managed *Pinus taeda* and *Pinus elliottii* stands of different planting densities. *Forest Science* 49: 291-300.

Bravo, F., LeMay, V., Jandl, R., and von Gadow, K. 2008. Managing Forest Ecosystem: The challenge of climate change. Springer. pp. 338.

Hagen-Thorn, A., Armolaitis, K., Callesen, I., and Stjernquist, I. 2004. Macronutrients in tree stems and foliage: a comparative study of six temperate forest species planted at the same sites. *Annals of Forest Science* 61: 489-498.

Hwang, J., Lee, S.T., Kim, B.B., Kwon, B.S., and Shin, H.C. 2005. Standing biomass and inorganic distribution for a *Camellia japonica* stand at Mt. Cheongwan (Janghueng-gun, Jeonnam). *Korean Journal of Ecology* 28(3): 163-168.

Jeong, J., Kim, C., Goo, K., Lee, C., Won, H., and Byun, J. 2003. Physico-chemical properties of Korean forest soils by parent rocks. *Journal of Korean Forest Society* 92(3): 254-262.

Jeong, H.M., Kim, H.R., Cho, K.T., Lee, S.H. Han., Y.S., and You, Y.H. 2014. Aboveground biomass estimation of *Quercus glauca* in evergreen forest, Kotzawal wetland, Cheju Island, Korea. *Journal of Wetland* 16(2): 245-250.

Kalra, Y.P. and Maynard, D.G. 1991. Methods Manual for Forest Soil and Plant Analysis. North. For. Cent., Edmonton, Alberta. Inf. Rep. NOR-X-319. pp. 115.

Kim, C. 1999. Aboveground nutrient distribution in Pitch pine (*Pinus rigida*) and Japanese larch (*Larix leptolepis*) plantations. *Journal of Korean Forest Society* 88: 266-272.

Kim, C., Jeong, J., Kim, R.H., Son, Y.M., Lee, K.H., Kim, J.S., and Park, I.H. 2011. Allometric equations and biomass expansion factors of Japanese red pine on the local level. *Landscape and Ecological Engineering* 7: 283-289.

Kim, C., Lee, K.S., Son, Y.M., and Cho, H.S. 2013. Allometric equations and biomass expansion factors in an age-sequence of black pine (*Pinus thunbergii*) stands. *Journal of Korean Forest Society* 102: 543-549.

Kim, C., Jeong, J., Park, J.H., and Ma, H.S. 2015. Growth and nutrient status of foliage as affected by tree species and fertilization in a fire-disturbed urban forest. *Forests* 6: 2199-2213.

Korea Forest Research Institute 2010. Survey Manual for Biomass and Soil Carbon. pp. 60.

Lee, J.S. and Kim, C. 1988. Biomass production of *Machilus thunbergii* S. et. Z. stands at Bogil island in Korea. *Journal of Korean Forest Society* 77(1): 10-16.

Lee, M.J. 1988. Changes in aboveground biomass and nutri-

- ent accumulation of the Korean-pine (*Pinus koraiensis*) plantation by stand age at Kwangwondo province. Journal of Korean Forest Society 87: 276-285.
- Lee, S.T., Hwang, J., Kim, B.B., Lee, K.J., Shin, H.C., and Park, N.C. 2005. Estimation of biomass and nutrient distribution in natural forest for *Machilus thunbergii*. Korean Journal of Forest Measurement 8: 83-90.
- Lee, S.T., Hwang, J.H., Lee, K.J., Shin, H.C., Kim, B.B., Park, M.S., Jun, K.S., and Cho, H.S. 2007. Biomass expansion factors (BEFs) for *Quercus acuta* according to age classes. Korean Journal of Environmental Ecology 21: 554-558.
- Nilsson, L.O., Huttle, R.F., and Johansson, U.T. 1995. Nutrient uptake and cycling in forest ecosystems. Plant and Soil 168-169: 5-685.
- Osman K.T. 2013. Forest Soils, Properties and Management. Springer, Switzerland. pp. 217.
- Noh, N.J., Kim, C., Bae, S.W., Lee, W.K., Yoon, T.K., Muroka, H., and Son, Y. 2013. Carbon and nitrogen dynamics in a *Pinus densiflora* forest with low and high stand densities. Journal of Plant Ecology 6: 368-379.
- Rubilar, R.A., Allen, H.L., and Kelting, D.L., 2005. Comparison of biomass and nutrient content equations for successive rotations of loblolly pine plantations on an Upper Coastal Plain Site. Biomass and Bioenergy 28: 548-564.
- SAS Institute Inc. 2003. SAS/STAT Statistical Software. Version 9.1. SAS publishing Cary, NC. USA
- Shin, H.C., Park, N.C., and Hwang, J.H. 2006. Warm temperate tree species in Korea. Korea Forest Research Institute. pp. 218.
- Son, Y.M., Kim, R.H., Kang, J.T., Lee, K.S., and Kim, S.W. 2014. A practical application and development of carbon emission factors for 4 major species of warm temperate forest in Korea. Journal of Korean Forest Society 103(4): 593-598.
- Temesgen, H., Affleck, D., Poudel, K., Gray, A., and Sessions, J. 2015. A review of the challenges and opportunities in estimating above ground forest biomass using tree-level models. Scandinavian Journal of Forest Research 30: 326-335.

(Received: June 29, 2016; Accepted: August 2, 2016)