

## 곰솔임분의 임분연령별 상대생장식 및 현존량 확장계수

김춘식<sup>1\*</sup> · 이광수<sup>2</sup> · 손영모<sup>3</sup> · 조현서<sup>1</sup>

<sup>1</sup>경남과학기술대학교 산림자원학과, <sup>2</sup>국립산림과학원 남부산림자원연구소,

<sup>3</sup>국립산림과학원 기후변화연구센터

## Allometric Equations and Biomass Expansion Factors in an Age-sequence of Black Pine (*Pinus thunbergii*) Stands

Choonsig Kim<sup>1\*</sup>, Kwang-Soo Lee<sup>2</sup>, Young-Mo Son<sup>3</sup> and Hyun-Seo Cho<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Forest Resources, Gyeongnam National University of Science and Technology, Jinju 660-758, Korea

<sup>2</sup>Southern Forest Resource Research Center, Korea Forest Research Institute, Jinju 660-300, Korea

<sup>3</sup>Center of Forest and Climate Change, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

**요약:** 경상남도 진주지역의 유사한 입지환경에서 생육한 평균 임령 35년생, 51년생, 62년생 곰솔임분을 대상으로 각 연령별 8본의 표본목을 벌채하여 바이오매스 추정을 위한 상대생장식과 줄기밀도 및 현존량 확장계수를 개발하였다. 흉고직경을 독립변수로 하고 각 부위별 건중량을 종속변수로 하는 상대생장식은 62년생 임분의 잎 바이오매스를 제외하고 유의성이 인정되었으며( $P < 0.05$ ), 결정계수( $R^2$ )의 값도 0.55-0.98 정도로 나타났다. 또한 각 임분 연령에 대한 상대생장식(Age-specific allometric equations)의 회귀계수(slope)에 유의적인 차가 없어( $P > 0.05$ ), 35년 이상 곰솔임분의 경우 임분 연령에 관계없이 일괄 상대생장식(Generalized allometric equations)을 이용하여 바이오매스 추정이 가능한 것으로 나타났다. 줄기밀도와 현존량 확장계수도 임분 연령 간 유의적인 차이가 없었으며 줄기밀도는  $0.45-0.51 \text{ g cm}^{-3}$ , 현존량 확장계수는 1.32-1.38 정도의 범위에 분포하였다. 본 연구결과에 따르면 35년 이상 성숙한 곰솔임분의 바이오매스 추정을 위한 상대생장식, 줄기밀도, 현존량 확장계수는 임분 연령의 영향이 크지 않는 것으로 나타났다.

**Abstract:** This study was conducted to evaluate age-specific and generalized allometric equations and biomass expansion factors (BEFs) for each tree component across three age-sequence stands (35-year-old, 51-year-old, 62-year-old) of black pine (*Pinus thunbergii* Parl.) in Jinju, located in the western part of Gyeongnam province, Korea. Biomass in each tree component, i.e. foliage, branch, and stem, was quantified by destructive tree harvesting. Allometric regression equations were significant ( $P < 0.05$ ) with diameter at breast height (DBH) or combination of DBH and height (DBH<sup>2</sup>H) accounting for 55-98% of the variation (as indicated by coefficients of determination,  $R^2$ ) in aboveground biomass except for foliage biomass of the 62-year-old stand. Generalized allometric equations can be used to estimate the biomass of black pine stands because the slopes of age-specific equations over 35-year-old stands were not significantly different by the age-sequence. The stem density and biomass expansion factor (BEFs) were not significantly different ( $P > 0.05$ ) from different stand ages and ranged from 0.45 to  $0.51 \text{ g cm}^{-3}$ , and from 1.32 to 1.38, respectively. The results indicate that allometric equations, stem density and aboveground BEFs in the matured black pine over 35-year-old are little influenced by different stand ages.

**Key words :** biomass equations, stem density, carbon stocks, forest inventory

## 서론

산림생태계 바이오매스의 정량적 평가는 생태계 물질 생산기작의 해석이나(Whittaker et al., 1974), 목질체를 이

용한 대체 에너지원으로서 생산능력 파악(Son et al., 2001) 등과 관련한 중요성 때문에 국내, 외에서 다양한 연구가 수행되었다. 그러나 최근 지구온난화 같은 지구 환경변화가 대기 중 이산화탄소 농도 증가와 밀접한 관련이 있는 것으로 알려지면서 산림 내 바이오매스 추정에 의한 탄소 저장량 및 탄소 격리 능력의 정확한 이해는 기후변화협약

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

대응이나, 온실가스 감축을 위한 국가적인 대책 수립, 기후변화관련 국가보고서 작성에 있어서 중요성이 부각되고 있다(Fukuda et al., 2003; Lehtonen et al., 2004; Park et al., 2005). 그 결과 임목 바이오매스 추정을 위한 상대성장식(Allometric regression equation)의 개발이나 수종별 줄기밀도(Stem density) 및 현존량 확장계수(Biomass expansion factor) 등의 산출은 국가산림자원 조사 결과로부터 탄소저장량의 정량적 환산을 위해 필수적으로 필요하게 되었다(Lehtonen et al., 2004; Park et al., 2005; Kim et al., 2011). 이러한 중요성 때문에, 국내에서도 소나무의 생태형과 임령에 따른 탄소 축적량 추정을 위한 현존량 확장계수가 산출된 바 있으며(Park et al., 2005) 낙엽송의 경우 임분 영급에 따른 줄기밀도와 현존량 확장계수가 개발되었다(Noh et al., 2006). 국외에서는 구주적송, 독일가문비, 자작나무 등의 현존량 확장계수가 조사된 바 있으며(Lehtonen et al., 2004), 캐나다에서는 스트로브자나무의 임분 연령에 따른 상대성장식 및 현존량 확장계수(Peichl and Arain, 2007)를 비교하는 등 다양한 연구가 진행되었다.

산림자원의 바이오매스 추정을 위한 상대성장식과 현존량 확장계수의 개발은 임목의 탄소 격리량이나 저장량 등과 같은 산림자원의 정량적 평가를 위한 필수적인 자료와 정보를 포함하고 있다. 또한 최근 바이오매스 추정을 위한 상대성장식의 경우 임분 연령에 의한 추정식의 개발 중요성이 높아 가고 있으며(Park et al., 2005; Peichl and Arain, 2007; Fatemi et al., 2011), 이는 임분 연령을 고려하지 않은 바이오매스 추정은 상당한 편이가 발생하기 때문이다(Peichl and Arain, 2007).

곰솔은(*Pinus thunbergii* Parl.) 국내에 자생하는 침엽수종으로 주로 해안지역에 분포하며 산림생산력이 소나무나 리기다소나무에 비해 높고(Kim et al., 1986), 해안방재림(Kim et al., 2012)으로 식재되는 등 다양한 용도를 가지는 경제수종이다. 이러한 중요성 때문에 곰솔의 분포나 적지 등과 관련한 비교적 많은 연구가 수행되었으나(Kim et al., 1986, Son and Chung, 1994), 바이오매스 관련 연구는 국내, 외적으로 매우 제한되어 있는(Kim et al., 1985; Konôpka et al., 2000) 실정이다.

우리나라의 온대남부림이나 난대림은 입지환경요인 및 임목생육상황을 고려할 때 국내에 분포하는 산림자원 중

산림생산력이 높을 것으로 기대되나 아직까지 남부 산림자원의 생태계 기능에 대한 정량적인 가치를 평가할 수 있는 기초 자료는 미흡한 편이다. 본 연구는 남부 산림자원으로서 우점 수종의 하나이며 경제수종인 곰솔을 대상으로 임분 연령별 바이오매스 추정을 위한 상대성장식 및 현존량 확장계수의 개발을 목적으로 하였다.

## 재료 및 방법

본 연구는 임분 연령의 차에 따른 조사구의 공간적 변이를 최소화하기 위해 경상남도 진주시 인근 유사한 입지 환경에서 생육한 평균 임분 연령 35년생, 51년생, 62년생 곰솔 천연임분을 대상으로 하였다. 35년생과 62년생 임분은 각각 진주시 금산면과 문산읍의 국립산림과학원 남부산림자원연구소 월아시험림, 51년생 임분의 경우 진주시 내동면 경남과학기술대학교 종합농장 내에 위치하였다. 3지역 조사지는 남향 또는 남동향이며 표고는 35년생 85 m, 51년생 144 m, 62년생 131 m로 조사지간 표고 차는 크지 않았다(Table 1). 산림토양형의 경우 35년생과 62년생 임분의 경우 퇴적암인 적자색 사암을 모재로 하는 암적갈색약건 산림토양형(DRb<sub>2</sub>), 51년생의 경우 회갈색 사암이나 혈암을 모재로 하는 적색계갈색약건 산림토양형(rB<sub>2</sub>)이 분포하였다(Table 1). 3지역 모두 도시 인근에 위치하여 최근까지도 토양교란을 심하게 받았으며 A층 깊이는 10 cm 내외, 전 토심은 30 cm 이내였고 62년생 임분의 토양단면 발달상태가 가장 양호하였다. 조사지 하층식생은 35년생 임분의 경우 땅비싸리, 산딸기, 개망초 등과 일부에 쉬나무가 식재되어 있었다. 51년생은 청미래덩굴, 땅비싸리 등이 출현하였으나 최근 숲 가꾸기 실시(2011년)로 하층식생 발달상태가 빈약하였다. 62년생은 계곡하부에 위치하며 밤나무, 굴참나무, 줄참나무, 청미래덩굴, 산철쭉, 산딸기 등이 분포하였다.

본 연구를 위한 조사지는 입지환경 특성 및 임분 밀도를 고려하여 각 조사지를 대표하는 지점을 대상으로 20 m × 20 m의 조사구를 각 임분 연령별로 1개소씩 선정하였다. 조사구로 선정된 임분의 임목밀도는 35년생 2,000본 ha<sup>-1</sup>, 51년생 800본 ha<sup>-1</sup>, 62년생 550본 ha<sup>-1</sup>로 임분의 영급이 높아질수록 임분 밀도는 낮아지는 경향을 보였다. 이는 35년생 임분을 제외한 51년생과 62년생 임분의 경우

**Table 1. General location and site characteristics of black pine stands.**

Stand	Latitude, longitude	Stand age (yrs)	Aspect	Elevation (m)	Slope (°)	Soil type
35-year-old	35° 12'12"N, 128° 10'01"E	35±2.5 (27-39)	S	85	20	DRb <sub>2</sub>
51-year-old	35° 10'48"N, 128° 11'09"E	51±1.4 (47-53)	SE	144	25	rB <sub>2</sub>
62-year-old	35° 09'90"N, 128° 04'14"E	62±2.5 (49-70)	SE	131	10	DRb <sub>2</sub>

Mean ± standard error. Values in parenthesis is range.

**Table 2. Stand characteristics of black pine stands.**

Stand	Stem density (trees ha <sup>-1</sup> )	DBH (cm)	Height (m)	Basal area (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )
35-year-old	2,000	15.4	12.9	40.30	99.5
51-year-old	800	25.2	18.0	41.75	186.6
62-year-old	550	36.6	21.5	59.59	309.4

소나무 재선충병 피해 확산을 저지를 위한 위생 간벌이나 숲 가꾸기가 실시되어 어느 정도 임목밀도가 조절되었기 때문이다. 임분별 평균 흉고직경은 62년생 임분이 36.6 cm로 가장 컸으며 51년생과 35년생 임분의 경우 25.2 cm와 15.4 cm였다(Table 2). 평균 수고의 경우도 흉고직경이 가장 크게 나타난 62년생 임분이 21.5 m로 51년생 임분 18.0 m, 35년생 임분 12.9 m에 비해 가장 높은 수고생장을 보였다. 흉고단면적 합과 임분 재적 또한 62년생 임분이 35년생과 51년생 임분에 비해 높게 나타났다.

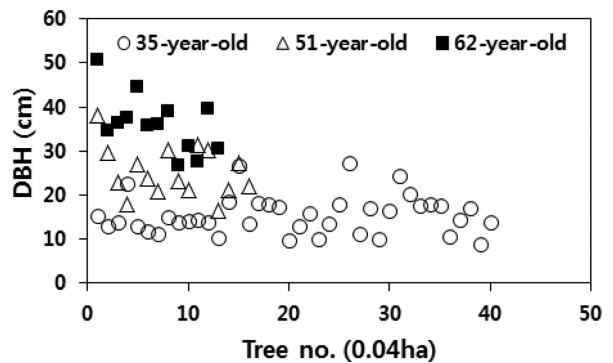
각 조사구는 2012년 7월 하순 흉고직경 6 cm 이상의 임목을 대상으로 매목조사를 실시하고 8분의 표본목을 직경급이 고르게 분포하도록 선정하였다. 선정된 표본목은 2012년 8월 6일에서 10일 사이 “산림 바이오매스 및 토양 탄소 조사·분석 표준 매뉴얼”(Korea Forest Research Institute, 2010)에 의거 지상부 0.2 m 높이를 기계톱을 이용하여 별채하였으며, 0.2 m, 1.2 m, 3.2 m, 5.2 m, 7.2 m의 간격으로 절단하고 디지털 저울을 이용하여 생중량을 측정하였다. 줄기의 경우 살아있는 가지나 죽은 가지를 분리하여 생중량을 측정하였고, 가지에 부착된 잎은 가지에서 전체를 분리하여 생중량을 측정하였다. 목질부나 잎 등의 수분함량 환산을 위해 줄기 아래 부분에 약 5 cm 정도의 원판과 가지와 잎 시료를 약 1-2씩 현지에서 채취하고 비닐주머니에 밀봉하여 실험실로 운반한 후 85°C 온풍건조기에 넣고 항량에 도달할 때까지 건조 후 건조중량을 측정하였다.

곰솔의 임목부위별 바이오매스 추정을 위해  $\log_{10} Y = a + b \log_{10} X$  [(Y=각 임목부위 건조중량(kg), X; DBH(cm) 또는  $DBH^2 H$ (cm<sup>2</sup>m)]의 상대생장모형을 이용하였으며 각 임분 연령별로 계산된 상대생장식의 모수(a 또는 b)의 유의성 검정은 SAS의 Analysis of Covariance를 이용하였다(Milliken and Johnson, 2002). 임분 연령 간 줄기밀도와 현존량 확장계수의 비교는 SAS의 PROC MIXED procedure를 이용하여 유의성을 검정하였다(SAS, 2003).

## 결과 및 고찰

### 1. 표본목 특성

임분 연령별 흉고직경 분포는 35년생 임분의 경우 20 cm 이하의 소경목이 분포하였으며, 51년생은 20-40 cm,



**Figure 1. Diameter at breast height (DBH) distribution by stand age in black pine stands (0.04 ha).**

62년생은 30-50 cm까지 고르게 분포하였다(Figure 1). 임분 연령별 표본목의 흉고직경에 따른 줄기 바이오매스는 유사한 흉고직경 급에서 51년생과 62년생이 35년생에 비해 줄기 건조중량이 크게 나타났으며, 이는 임분 연령 간 수고생장 차가 원인이다(Figure 2). 또한 가지 바이오매스의 경우 20-30 cm 직경 급은 62년생 임분이 많은 반면에 35년생 임분은 적게 나타났고, 잎 바이오매스는 임분 연령 및 흉고직경에 따른 변이가 크게 나타났다(Figure 2). 이는 자연낙지 특성을 가지는 곰솔의 경우 수관형태가 불규칙하게 나타나고 임분 연령보다는 임목밀도에 따라 가지 및 잎 발달 특성이 다르기 때문으로 사료된다. 곰솔과 유사한 생리적 특성을 보이는 소나무의 경우 임목밀도나 입지 비옥도 등의 차이에 따라 수관의 발달 특성이 다르게 나타나는 것으로 알려져 있다(Jeong et al., 2010).

표본목의 임목부위별 바이오매스 중 줄기 바이오매스는 51년생 임분이 76.1%로 가장 높았고 가지 바이오매스는 줄기와 반대되는 경향을 보였다(Table 3). 그러나 잎 바이오매스는 임분 연령의 증가와 함께 증가하는 경향을 보였다. 본 연구 결과는 침엽수종의 임목부위별 바이오매스 분배비율은 임분이 성숙함으로써 줄기 바이오매스가 증가하고 가지와 잎 바이오매스는 감소한다는 보고(Peichl and Arain, 2007)와는 차이가 있었다. 임목밀도는 수관발달에 영향을 미치기 때문에 임목밀도의 차는 가지나 잎 바이오매스 비율에 상당한 변이를 초래하여 높은 수관밀도는 가지나 잎 바이오매스 비율 감소의 원인으로 알려져 있다(Konôpka et al., 2000). 본 연구에서 가지와 잎 바이오매스 비율은 35년생 26.5%, 62년생 27%, 51년생 23.9%로 51년생이 가장 낮았으며 이는 51년생 임분의 경우 본 연구가 수행되기 1년 전(2011년) 숲 가꾸기 작업이 실시되어 임목벌채 후 수관 확장이나 잎 면적 증가가 발생하지 않았기 때문으로 사료된다. 임목 부위별 바이오매스 분배비율은 임분 발달 과정동안 경쟁과 토대 등에 의해 영향을 받을 수 있으나(Peichl and Arain, 2007), 입지 비옥도는 잎 바이오매스의 상대적인 비율에 유의적인 영

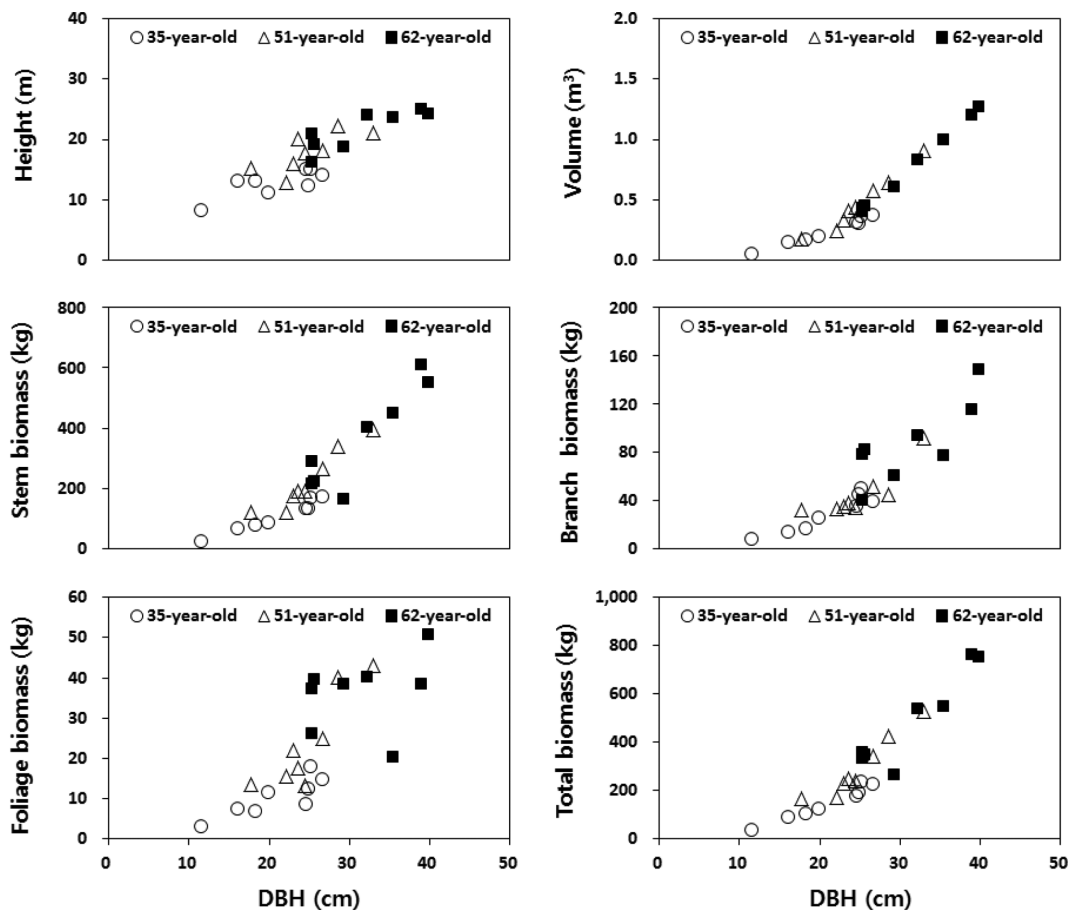


Figure 2. Scatter plots of tree height, volume and tree biomass components against diameter at breast height (DBH) from stand age in black pine stands.

Table 3. Aboveground biomass partitioning of sampled tree components of black pine stands.

Stand	No. of Tree	DBH (cm)	Height (m)	Tree components (kg tree <sup>-1</sup> )			
				Stem	Branch	Foliage	Aboveground total
35-year-old	8	20.8±1.9	12.9±0.8	112.1±18.4 (73.5)	30.0±5.5 (19.4)	10.5±1.7 (7.1)	152.5±25.2 (100)
51-year-old	8	24.8±1.6	18.0±1.1	224.7±35.5 (76.1)	45.4±7.1 (15.9)	23.7±4.2 (8.0)	293.7±45.4 (100)
62-year-old	8	31.5±2.1	21.5±1.1	363.1±58.4 (73.0)	87.0±11.8 (18.5)	36.4±3.3 (8.5)	486.5±68.6 (100)

Mean ± standard error. Values in parenthesis are the proportion of total biomass.

향을 미치지 않는 것으로 알려져 있다(Vanninen et al., 1996). 본 연구에서 조사된 지상부 가지 및 잎 바이오매스 비율은 23.9-27.0%로서 일본에서 조사된 40년생 곰솔임분의 가지 및 잎 바이오매스 비율 12.4%(Konôpka et al., 2000)에 비해 높았다.

## 2. 상대생장식

표본목의 각 부위별 바이오매스(Y)와 흉고직경(DBH) 또는 흉고직경제곱과 수고(DBH<sup>2</sup>H)를 독립변수(X)로 하여 계산된 상대생장식은 3연령 임분 중 62년생 임분의 잎 바이오매스를 제외하고 상대생장식(Table 4)의 유의성이 인정되었다( $P < 0.05$ ). 결정계수( $R^2$ ) 값도 줄기 바이오매스

나 줄기제적의 경우 62년생 임분을 제외하고 0.89 이상으로 회귀식의 적합도가 높은 것으로 나타났다. 또한 상대생장식의 결정계수 값은 두 독립변수 간에 큰 차이가 없어 성숙 임분에서 정확한 수고측정이 어려운 점을 고려할 때 흉고직경만을 독립변수로 줄기 바이오매스 추정 가능한 것으로 나타났다. 51년생과 62년생 임분의 가지나 잎 바이오매스 결정계수는 0.55-0.71로 35년생에 비해 상대생장식의 적합도가 낮게 나타났다. 특히 62년생의 잎 바이오매스 상대생장식은 두 독립변수 모두 유의성이 인정되지 않아( $P > 0.05$ ) 새로운 독립변수 개발이 필요한 것으로 나타났다. 이와 같이 임분 연령 증가에 따라 잎 바이오매스 상대생장식의 적합도가 낮게 나타난 것은 곰솔의 경

**Table 4. Age-specific and generalized allometric regression equations ( $\log_{10}Y = a + b\log_{10}X$ ) for different tree components of black pine stands.**

Regression	Stand	Tree component	Equations on DBH				Equations on DBH <sup>2</sup> H			
			a	b	R <sup>2</sup>	P	a	b	R <sup>2</sup>	P
Age-specific equations	35-year-old	Volume (m <sup>3</sup> )	-3.4519	2.1393	0.98	<0.01	-3.7709	0.8370	0.99	<0.01
		Stem (kg)	-0.3742	2.0469	0.98	<0.01	-0.9780	0.8005	0.99	<0.01
		Branch (kg)	-1.3677	2.1326	0.96	<0.01	-1.5893	0.8084	0.91	<0.01
		Foliage (kg)	-1.2532	1.7082	0.82	<0.01	-1.4693	0.6580	0.80	<0.01
		Aboveground total (kg)	-0.5346	2.0426	0.98	<0.01	-0.8173	0.7933	0.98	<0.01
	51-year-old	Volume (m <sup>3</sup> )	-4.3452	2.8517	0.95	<0.01	-4.5231	2.0280	0.98	<0.01
		Stem (kg)	-0.8107	2.2497	0.89	<0.01	-1.3034	0.8316	0.96	<0.01
		Branch (kg)	-0.6378	1.6310	0.72	<0.01	-0.6320	0.5613	0.68	<0.01
		Foliage (kg)	-1.6442	2.1402	0.71	<0.01	-1.7343	0.7615	0.71	<0.01
		Aboveground total (kg)	-0.5440	2.1434	0.89	<0.01	-0.7219	0.7836	0.95	<0.01
	62-year-old	Volume (m <sup>3</sup> )	-3.8377	2.4705	0.99	<0.01	-4.0517	0.9043	0.98	<0.01
		Stem (kg)	-0.6632	2.1333	0.72	<0.01	-1.0438	0.8262	0.80	<0.01
		Branch (kg)	-0.3838	1.5384	0.55	<0.01	-	-	0.47	n.s.
		Foliage (kg)	-	-	0.03	n.s.	-	-	0.01	n.s.
		Aboveground total (kg)	-0.1005	1.8488	0.78	<0.01	-0.3590	0.6995	0.83	<0.01
P-value of slope (b) and intercept (a)	Volume (m <sup>3</sup> )	0.03	0.02			0.01	0.02			
	Stem (kg)	0.97	0.91			0.98	0.97			
	Branch (kg)	0.35	0.44			0.33	0.34			
	Foliage (kg)	0.04	0.06			0.03	0.05			
	Aboveground total (kg)	0.70	0.78			0.64	0.71			
Generalized equations	Volume (m <sup>3</sup> )	-3.8983	2.5083	0.97	<0.01	-3.9221	0.8769	0.99	<0.01	
	Stem (kg)	-1.0449	2.3807	0.90	<0.01	-1.1249	0.8466	0.96	<0.01	
	Branch (kg)	-1.4193	2.2009	0.88	<0.01	-1.3779	0.7539	0.86	<0.01	
	Foliage (kg)	-1.6450	2.1001	0.71	<0.01	-1.7193	0.7476	0.75	<0.01	
	Aboveground total (kg)	-0.8555	2.3386	0.92	<0.01	-0.9144	0.8267	0.96	<0.01	

Y: biomass (dry weight, kg); X: DBH (cm) or DBH<sup>2</sup>H (cm<sup>2</sup>m), n.s.: non-significance ( $P > 0.05$ )

우 자연낙지가 발생하는 수종으로 수관의 크기나 형태 발달이 흉고직경 증가나 수고 등의 요인과 관계가 크지 않기 때문에 사료된다. 일반적으로 잎이나 가지 바이오매스 추정을 위한 상대생장식의 결정계수는 임목의 타부위에 비해 낮은 값을 보이는 것으로 알려져 있으며 (Peichl and Arain, 2007; Fatemi et al., 2011), 흉고직경보다 살아 있는 가지 하단부의 줄기 직경과 밀접한 관계가 있었다는 보고도 있다 (Shinozaki et al., 1964).

임분 연령에 의한 상대생장식(Age-specific allometric equations)의 회귀계수(b, slope)는 재적을 제외하고 각 임분 연령 사이에 유의적인 차가 없어 ( $P > 0.05$ ) 곰솔임분의 임분 연령별 바이오매스는 일괄 상대생장식(Generalized allometric equations)의 이용이 가능한 것으로 나타났다. 3 조사가구가 임분 연령에 상당한 차이에도 불구하고 각 연령별 회귀계수(b)에 유의적인 차이가 없는 것은 이들 임분이 유사한 입지환경에서 생육하였기 때문으로 사료된다. 특히 일괄 상대생장식의 결정계수는 각 연령별 가지나 잎 바이오매스 상대생장식의 결정계수 값보다 높아 (Table 4) 임분 연령에 의한 상대생장식에 비해 가지나 잎 바이오매

스 추정 정확도를 향상 할 수 있을 것으로 사료된다.

### 3. 현존량 추정

곰솔임분의 현존량 추정을 위하여 임분 연령별로 개발된 상대생장식 중 흉고직경을 이용한 상대생장식으로부터 추정된 줄기 현존량은 62년생 임분이 154.35 Mg ha<sup>-1</sup>로 가장 높은 값을 보였고, 51년생 임분 93.76 Mg ha<sup>-1</sup>, 35년생 임분 62.85 Mg ha<sup>-1</sup> 순으로 임분 연령이 낮아질수록 낮게 나타났다 (Table 5). 임분 연령 간 줄기 현존량의 차이는 임목밀도와 관계가 없었으며 이는 임분 연령이 증

**Table 5. Aboveground biomass partitioning of black pine stands.**

Stand	Biomass (Mg ha <sup>-1</sup> )			
	Stem	Branch	Foliage	Aboveground total
35-year-old	62.85	16.06	6.26	85.17
51-year-old	93.76	18.20	9.64	121.6
62-year-old	154.35	33.95	14.81	203.11
Mean	103.65	22.74	10.24	136.63

가 할수록 줄기 부위에 광합성 산물 축적 증가가 원인이다. 지나 앞 현존량도 줄기와 유사하였으며 62년생 임분이 높고 35년생 임분은 낮았다. 국내에서 조사된 전남 여천지역 30년생 곰솔임분 줄기 현존량은  $66.40 \text{ Mg ha}^{-1}$  (Kim et al., 1985)로 본 연구에서 조사된 35년생 임분 줄기 현존량  $62.85 \text{ Mg ha}^{-1}$ 와 큰 차이는 없었으며, 51년생과 62년생 임분은 여천지역 30년생 곰솔임분에 비해 높았다. 앞 현존량의 경우  $6.26\text{-}14.81 \text{ Mg ha}^{-1}$ 로 30년생 곰솔임분의 앞 현존량  $2.30\text{-}10.30 \text{ Mg ha}^{-1}$  (Kim et al., 1985)의 범위에 속하거나 높은 값을 보였다.

#### 4. 줄기밀도 및 현존량 확장계수

줄기 현존량에 대한 줄기 재적비로 표현되는 줄기밀도의 경우 51년생 임분이  $0.51 \text{ g cm}^{-3}$ 으로 가장 높았으며, 62년생  $0.48 \text{ g cm}^{-3}$ , 35년생  $0.45 \text{ g cm}^{-3}$ 로 낮은 연령의 줄기밀도가 높은 연령의 줄기밀도보다 낮은 값을 보였으나 임분 연령 간 유의적인 차이( $P>0.05$ )는 없었다(Table 6). 특정 수종의 줄기밀도 변이는 연륜 폭의 성장과 밀접한 관계가 있으며 임분 연령뿐만 아니라 비옥도 및 기후 조건 등 다수의 요인에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Montague et al., 2005; Tobin and Nieuwenhuis, 2007). 특히 임분 연령의 경우 줄기밀도와 유의적인 관계가 있어 낙엽송 20년생 이하의 줄기밀도는 30년 이상의 임분 줄기밀도에 비해 유의적으로 낮은 값을 보였으나 30년 이상 성숙 임분에서는 유의적인 차가 없었다는 결과와 유사하였다(Noh et al., 2006). 본 연구에서 조사된 곰솔의 줄기밀도는 온대산림지역 소나무류의 줄기밀도  $0.32\text{-}0.44 \text{ g cm}^{-3}$  (IPCC, 2003), 경남지역 소나무림  $0.30\text{-}0.39 \text{ g cm}^{-3}$  (Kim et al., 2011)와 비교할 때 곰솔은 타 소나무류보다 줄기밀도가 높았다.

현존량 확장계수의 경우 줄기밀도와 유사한 경향을 보이며 51년생 임분이 1.32로 가장 낮았고, 62년생이 1.38로 가장 높았다. 현존량 확장계수의 경우 임분 연령이나 입지환경요인에 따라 차이가 나며 경남지역에서 조사된 소나무의 경우 임분 연령이나 입지비옥도가 낮은 경우 현존

량 확장계수가 높았다(Kim et al., 2011). 특히 입지비옥도가 낮은 경우 연륜폭이 좁고 잎량과 가지량의 높은 비율에 의해 현존량 확장계수가 높게 나타나는 것으로 알려져 있으며 본 연구에서도 현존량 확장계수가 가장 크게 나타난 62년생 임분의 가지와 잎 바이오매스 비율은 27%로서 현존량 확장계수가 가장 낮게 나타난 51년생의 가지와 잎 바이오매스 23.9%에 비해 높았다. 현존량 확장계수의 경우 임분 연령(Park et al., 2005; Kim et al., 2011), 수종(Lehtonen et al., 2004), 지위지수(Toebaldelli et al., 2009), 임분 밀도(Tobin and Nieuwenhuis, 2007) 등에 따라 다르게 나타나는 것으로 알려져 있으며, 본 연구에서의 평균 현존량 확장계수는 1.35로 경상남도 소나무임분의 현존량 확장계수 1.29나 IPCC(2003)의 소나무류 현존량 확장계수 디폴트 값 1.30에 비해 높았다.

## 결론

경상남도 진주지역 평균 임령 35년생, 51년생, 62년생 곰솔임분을 대상으로 상대생장식, 줄기밀도, 현존량 확장계수가 임분 연령별로 차이가 있는지를 조사한 결과 상대생장식의 경우 임분 연령 간 차이가 없어 일괄 상대생장식의 이용이 가능한 것으로 나타났으며, 줄기밀도와 현존량 확장계수의 경우도 임분 연령 간 유의적인 차이가 없었다. 본 연구 결과에 따르면 유사한 입지환경에서 생육한 35년생 이상 성숙한 곰솔임분의 임분 연령은 상대생장식의 회귀계수, 줄기밀도, 현존량 확장계수 등에 유의적인 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 2012년 국립산림과학원 남부산림자원연구소 연구용역과제의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## 인용문헌

**Table 6. Stem density and aboveground biomass expansion factors (BEF) by stand age of black pine stands.**

Stand	Stem density ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Aboveground BEF
35-year-old	$0.45\pm 0.01$ (0.43-0.49)	$1.36\pm 0.02$ (1.31-1.42)
51-year-old	$0.51\pm 0.03$ (0.43-0.68)	$1.32\pm 0.02$ (1.25-1.40)
62-year-old	$0.48\pm 0.04$ (0.27-0.68)	$1.38\pm 0.05$ (1.22-1.60)
<i>P</i> -value	>0.05	>0.05
Mean	$0.48\pm 0.02$ (0.27-0.68)	$1.35\pm 0.02$ (1.22-1.60)

Mean  $\pm$  standard error. Values in parenthesis are range. Stem density, stem biomass/stem volume; aboveground BEF, total aboveground biomass/stem biomass

- Fateme, F.R., Yanai, R.D., Hamburg, S.P., Vadeboncoeur, M.A., Arthur, M.A., Briggs, R.D., and Levine, C.R. 2011. Allometric equations for young northern hardwoods: the importance of age-specific equations for estimating aboveground biomass. *Canadian Journal of Forest Research* 41: 881-891.
- Fukuda, M., Iehara, T., and Matsumoto, M. 2003. Carbon stock estimates for sugi and hinoki forests in Japan. *Forest Ecology and Management* 184: 1-16.
- IPCC. 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. IGES, Kanagawa, Japan.
- Jeong, J., Cho, H.J., Seo, J.H., Kim, R.H., Son, Y.M., Lee, K.H., and Kim, C. 2010. Aboveground biomass estimation of

- Pinus densiflora* stands in the western Gyeongnam regions. Journal of Korean Forestry Society 99: 62-67.
- Kim, C. and Jeong, J. 2001. Change of aboveground carbon storage in a *Pinus rigida* stands in Gwangnung, Gyunggi-do, Korea. Journal of Korean Forestry Society 90: 774-780.
- 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, H.P., Lee, H.H., and Lee, J.H. 2012. Studies on the characteristics of growth of the *Pinus thunbergii* planted in a costal sand zone. Journal of Korean Forestry Society 101: 656-662.
- Kim, J.U. Yim, Y.J., and Kim, B.S. 1986. Changes of site index and production of black pine (*Pinus thunbergii* Parl.) stand from coast to inland. Korean Journal of Ecology 9: 123-133.
- Kim, T.W., Lee, K.J., and Park, I.H. 1985. Effect of air pollution on the primary production of *Pinus thunbergii* forest. Journal of Korean Forestry Society 71: 33-39.
- Konôpka, H. Tsukahara, H., and Netsu, A. 2000. Biomass distribution in 40-year-old trees of Japanese black pine. Journal of Forest Research 5: 163-168.
- Korea Forest Research Institute. 2010. Survey Manual for Biomass and Soil Carbon. pp. 60.
- Lehtonen, A., Makipaa, R., Heikkinen, J., Sievanen, R., and Liski, J. 2004. Biomass expansion factors (BEFs) for Scots pine, Norway spruce and birch according to stand age for boreal forests. Forest Ecology and Management 188: 211-224.
- Milliken, G.A. and Johnson, D.E. 2002. Analysis of Messy Data. Volume III: Analysis of Covariance. Chapman & Hall/CRC.
- Montagu, K.D., Duttmer, K., Barton, C.V.M., and Cowie, A.L. 2005. Developing general allometric relationships for regional estimates of carbon sequestration - an example using *Eucalyptus pilularis* from seven contrasting sites. Forest Ecology and Management 204: 113-127.
- Noh, N.J., Son, Y., Kim, J.S., Kim, R.H., Seo, K.Y., Seo, K.W., Koo, J.W., Kyung, J.H., Park, I.H., Lee, Y.J., Son, Y.M., and Lee, K.H. 2006. A study on estimation, stem density and biomass expansion factor for stand age classes of Japanese larch (*Larix leptolepis*) stands in Gapyeong area. Journal of Korean Forest Energy 25: 1-8.
- Park, I.H., Park, M.S., Lee, K.H., Son, Y.M., Seo, J.H., Son, Y., and Lee, Y.J. 2005. Biomass expansion factors for *Pinus densiflora* in relation to ecotype and stand age. Journal of Korean Forestry Society 94: 441-445.
- Peichl, M. and Arain, M.A. 2007. Allometry and partitioning of above- and belowground tree biomass in an age-sequence of white pine forests. Forest Ecology and Management 253: 68-80.
- SAS Institute Inc. 2003. SAS/STAT Statistical Software. Version 9.1 SAS publishing Cary, NC.
- Shinozaki, K., Yoda, K., Hozumi, K. and Kira, T. 1964. A quantitative analysis of plant form: The pipe model theory. II. Further evidence of the theory and its application in forest ecology. Japanese Journal of Ecology 14: 133-139.
- Son, Y.M. and Chung, Y.G. 1994. The effects of the topographical, soil and meteorological factors on the tree height growth in the *Pinus thunbergii* stands. Journal of Korean Forestry Society 83: 380-390.
- Son, Y., Hwang, J.W., Kim, Z.S., Lee, W.K., and Kim, J.S. 2001. Allometry and biomass of Korean pine (*Pinus koraiensis*) in central Korea. Bioresource Technology 78: 251-255.
- Teobaldelli, M., Somogyi, Z., Migliavacca, M., and Usoltsev, V. 2009. Generalized functions of biomass expansion factors for conifers and broadleaved by stand age, growing stock and site index. Forest Ecology and Management 257: 1004-1013.
- Tobin, B. and Nieuwenhuis, M. 2007. Biomass expansion factors for Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.) in Ireland. European Journal of Forest Research 126: 189-196.
- Vanninen, P., Ylitalo, H., Sievaenen, R., and Mäkelä, A. 1996. Effects of age and site quality on the distribution of biomass in Scot pine (*Pinus sylvestris* L.) Trees Structure and Function 10: 231-238.
- Whittaker, R.H., Bormann, F.H., Likens, G.E., and Siccama, T.G. 1994. The Hubbard Brook ecosystem study: forest biomass and production. Ecological Monograph 44: 233-252.