

## 백합나무의 상대생장식 및 현존량 확장계수

강민선<sup>1</sup> · 장경수<sup>1</sup> · 손영모<sup>2</sup> · 김래현<sup>2</sup> · 박인협<sup>3</sup> · 이계한<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>전남대학교 산림자원학부, <sup>2</sup>국립산림과학원 산림산업연구과, <sup>3</sup>순천대학교 산림자원학과

### Allometric Equations and Biomass Expansion of Yellow Poplar(*Liriodendron tulipifera*) in Southern Korea

Min Sun Kang<sup>1</sup>, Kyoung Soo Jang<sup>1</sup>, Young Mo Son<sup>2</sup>, Rae Hyun Kim<sup>2</sup>,  
In Hyeop Park<sup>3</sup> and Kye Han Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Division of Forestry, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea

<sup>2</sup>Division of Forest Industry Research, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

<sup>3</sup>Department of Forest Resources, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea

**요약:** 백합나무(*Liriodendron tulipifera* L.)의 자원량 파악 및 바이오매스 통계자료 구축을 위해 줄기밀도, 바이오매스 확장계수, 뿌리함량비를 구하였으며, 흉고직경과 수고를 이용한 상대생장식을 개발하였다. 이를 위해 지역과 경급을 고려하여 총 40본의 표본목을 벌채하였고 21본은 뿌리까지 굴취 하였다. 본 연구 결과에 의하면 백합나무의 줄기밀도는  $0.43 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 바이오매스 확장계수는 1.2, 뿌리함량비는 0.2이며, 각각의 불확실성은 3.9%, 4.6%, 24.1% 이었다. 백합나무 지상부 상대생장식은  $W=0.060D^{2.524}$  이었고, 전체 바이오매스 및 지하부 상대생장식은 각각  $W=0.063D^{2.578}$ ,  $W=0.010D^{2.591}$  이었다.

**Abstract:** The purpose of this study was to develop allometric equations for identifying the amount of wood and building biomass statistics of *L. tulipifera* by density, biomass expansion factors and root ratio. For this purpose, total of 40 trees were sampled, which were used consideration the area and the DBH class. As a results, the wood density was  $0.43 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , biomass expansion factors were 1.2, root ratio was 0.2 and uncertainty were 3.9%, 4.6%, 24.1%, respectively. Allometric equations for above ground of *L. tulipifera* trees were  $W=0.060D^{2.524}$ . Total and underground allometric equations were  $W=0.063D^{2.578}$ ,  $W=0.010D^{2.591}$ , respectively.

**Key words:** biomass allometric equation, carbon stocks, *Liriodendron tulipifera*, wood density

## 서론

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 4차 보고서에 의하면 기후변화 원인은 산업혁명 이후 인간 활동으로 대기의 온실가스 농도가 증가하여 지구가 따뜻해지는 지구온난화(Global warming) 때문이라고 하였다(IPCC, 2007). 지구온난화를 일으키는 온실가스에는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 메탄(CH<sub>4</sub>), 일산화질소(NO), 수소불화탄소(HFCs) 등이 있으며, 이 가운데 CO<sub>2</sub>는 전체량의 80%를 차지한다(IPCC, 2007). 이처럼 CO<sub>2</sub> 농도 증가가 지구온난화와 밀접한 관련이 있는 것으로 알려지면서 세계적으로 CO<sub>2</sub> 저감대책이 논의되고 있고, 온실가스 흡수원 및 탄소 저장고 기능으로서 산림의 중요성이 대두되고 있다(Heather

Keith et al., 2008). 육상 생태계 바이오매스의 많은 부분을 차지하는 목질계 바이오매스는 대부분 산림에 축적되어 있으며, 이러한 산림은 지구상에 약 39억52백만ha가 존재한다(IPCC, 2007). 또한 산림은 지구 전체 광합성량의 2/3를 차지하며 육상 생태계 탄소량의 80%를 저장하고 있다(FAO, 2010). 산림의 수목들은 광합성을 통해 대기중의 CO<sub>2</sub>를 빠른 속도로 목질계 바이오매스로 전환시켜주며, 인간의 산림활동(조림, 경영, 보호 등)을 통해 지속적이며 계획적으로 대기중의 CO<sub>2</sub>를 흡수·방출하는 역할을 하고 있다.

국내에서도 온실가스 저감을 위해 교토의정서 제612조에서 규정하고 있는 청정개발체제(CDM: Clean Development Mechanism)의 15개 분야에 대한 구축사업 등을 진행하고 있다. 산림청에서는 CDM사업 일환으로 바이오순환림 조성 계획을 수립하고 있으며 백합나무 등 2020년까지 조림면적

\*Corresponding author

E-mail: khl@jnu.ac.kr, miire000@gmail.com

10만ha 조성을 목표로 하고 있다. 또한 바이오순환림 조성을 통한 수종별 바이오매스량을 산출하기 위해 2007년부터 2010년까지 교토의정서 대응 산림탄소계정기반구축 연구를 수행하였으며, 산림 온실가스 인벤토리 자료구축을 위해 소나무, 상수리나무, 곰솔, 리기다소나무 등 우리나라의 12수종에 대한 상대생장식을 개발 하였다(Korea Forest Research Institute, 2011).

백합나무는 미국 동부 전반에 걸쳐 자연적으로 발생하고, 남부 뉴잉글랜드에서 미시간, 플로리다 북부, 루이지애나에서 자생하며, 수직적으로는 해발 300 m~1,370 m로 산악지대에 분포하는 수종이다(Beck, 1962). 원산지에서도 극히 불량한 입지 외에는 우수한 생장을 보이며 건조한 토양에서도 생육이 가능하다고 보고되고 있다(Beck, 1962; Beck and Lino, 1975). 식재 15~20년 후 개화하기 시작하여 매년 종자를 결실하고, 자연상태의 종자 발아율은 10% 정도이나 결실량이 많다. 국내에서는 1969년부터 1971년까지 미국 인디애나에서 백합나무 종자를 도입하여 경기도 광릉, 강원도 춘천, 전라북도 완주, 입실에 적응성 검정을 위한 시험림을 조성하였다. 조성된 시험림을 대상으로 지역별 적응력과 지위수별 생장비교 연구를 통해 우리나라 기후 풍토에 잘 적응하는 수종으로 공중습도, 토양습도, 토양깊이, 수분을 보유할 수 있는 식토(clay)함량의 차이에 의한 성장차이가 있다고 하였다(Ryu et al., 2003). 2002년에는 기후대별 20대 조림 권장 수종으로 선정되었으며 이후 백합나무 양묘기술과 세포배양을 통한 대량증식 연구가 이루어졌다(Ryu et al., 2003; Ryu and Kim, 2003; Lee et al., 2003). 또한 2007년에는 전체 조림면적의 4.9%(1,020 ha)를 조림하였고, 2011년에는 전체 면적(21,179 ha)의 21.6%(4,583 ha)를 조림하였으며, 2020년까지 6만 ha 조림을 목표로 하고 있다.

이렇듯 점차적으로 조림면적이 증가하고 백합나무에 대한 다양한 연구가 이루어지고 있으나, 자원량 파악 및 바이오매스 통계자료 구축에 필요한 연구는 미비하다. 이에 본 연구는 백합나무의 바이오매스 추정을 위한 상대생장식 개발 및 현존량 확장계수를 파악하고, 그에 따른 불확

실성 검정을 실시하고자 시행하였다.

## 재료 및 방법

백합나무의 상대생장식 개발을 위하여 경기도와 전라남도에서 입지환경 및 임분 밀도를 고려하여 대표하는 임분을 대상으로 20 m × 20 m의 방형구를 8개 설치하였다. 수원과 강진은 경사 3°~8°의 평지 또는 완경사지이고, 장성은 30° 이상으로 절험지에 위치하고 있다. 해발고는 수원은 평균 80 m, 장성은 406 m, 강진은 150 m 이다. 수원은 북동사면에 위치하고 있으며, 장성은 남서와 북서사면에 위치하고, 강진은 북사면과 북서사면에 위치하고 있다(Table 1).

수원 I의 경우 2영급 임지로 2차 간벌이 이루어져 있었고, 수원 II는 1영급 임지로 1차 간벌만 이루어진 곳으로 두 곳 모두 큰 편차는 없어 1개의 조사구만 설치하였다. 반면 장성의 경우 4영급 임분으로 해발 400 m 부근에 위치하고 조림 후 인위적간섭이 없었던 곳으로 경급 및 수고 편차가 매우 심하였고, 강진은 편백과 혼효되어 있는 4영급 임분으로 지속적인 숲가꾸기 작업으로 경급 및 수고간의 편차가 많아 3개씩 조사구를 설치하였다.

각 조사구는 2010년과 2012년에 6 cm 이상의 임목을 대상으로 매목조사를 실시하고 5본의 표본목을 직경급이 고르게 분포하도록 선정하였다. 선정된 표본목은 "Survey manual for forest biomass and soil carbon"(Korea Forest Research Institute, 2007)에 따라 시료분리 및 생중량 등을 측정하였다. 줄기는 지상부 0.2 m 높이에서 벌채하였으며 1.2 m, 3.2 m, 5.2 m, 7.2 m 지점을 자르는 방식으로 2.0 m 간격으로 절단하고 마지막은 초두부가 2.0 m가 되지 않게 1.0 m로 절단하였다. 또한 각 길이별 하단부에서 5 cm 두께의 원편을 채취하였다. 줄기를 제외한 가지, 잎 + 소지로 구분하여 분리하였고, 분리된 줄기, 가지, 잎 + 소지는 현장에서 생중량을 측정하였다. 뿌리는 원치와 포크레인 등을 이용하여 조사구별 2개체 이상 굴취 하였고 토양 제거 후 생중량을 측정하였다. 또한 생중량 측정 후 절단

Table 1. Location and characteristics of *L. tulipifera* plantations.

Site		Latitude	Longitude	Altitude (m)	Bearing	Slope (°)	Density (trees·ha <sup>-1</sup> )
Suwon	I	126° 57' 59"	37° 14' 43"	72	NE	3	725
	II	126° 55' 0"	37° 15' 28"	92	NE	8	1,000
Jangseong	I	126° 49' 38"	35° 27' 49"	404	NW	30	1,900
	II	126° 49' 39"	35° 27' 48"	408	SW	36	1,500
	III	126° 49' 41"	35° 27' 47"	410	SW	43	1,600
Gangjin	I	126° 51' 53"	34° 33' 4"	135	NW	3	1,000
	II	126° 51' 53"	34° 33' 4"	170	NW	8	600
	III	126° 51' 53"	34° 33' 4"	117	N	5	375

**Table 2. Calculation forms for tree biomass component.**

Tree component	Calculation Forms
Biomass	
Stem Total	$\frac{\text{Stem total FW} \times \text{Total disk DW}}{\text{Total disk FW}}$
Stem Wood	$\frac{\text{Stem total FW} \times \text{Stem wood DW}}{\text{Total disk FW}}$
Stem Bark	Stem total DW - Stem wood DW
Branch	$\frac{\text{Branch FW} \times \text{Sample branch DW}}{\text{Sample branch FW}}$
Root	$\frac{\text{FW Root} \times \text{Sample DW Root}}{\text{Sample Root FW}}$

FW: fresh weight, DW: dry weight

된 줄기원관과 가지, 잎 + 소지, 뿌리는 크기가 골고루 포함 되도록 하여 1 kg이상 씩 시료를 채취하여 수분이 마르지 않게 봉한 후 실내로 운반하여 건중량 대 생중량비 등을 구하는데 이용하였다(Table 2).

탄소배출계수를 산정하기 위해 줄기밀도(Wood density), 바이오매스확장계수(Biomass expansion factor), 뿌리함량비(Root ratio)를 측정하였다. 줄기밀도는 줄기의 건중량 대 재적값을 환산하여 사용하였으며, 줄기재적은 원관 높이에 따른 직경을 이용하여 부위별로 재적을 산출하였다. 목질부 재적은 Huber식을 이용하여 구하였고, 원뿔부피공식을 이용하여 초두부 재적을 산정하였다. 바이오매스 확장계수는 부위별 건중량과 줄기 건중량 비율로 산출하였고, 재적 값은 수피를 포함한 재적을 사용하였다(Table 3).

불확실성 검정은 산림부문의 온실가스 흡수·배출계수 관리에 있어서 주요한 부분 중에 하나이며, 산림의 다양한 구조, 임령, 수종 등의 복잡성과 지역적인 생육 환경 차이 등에 의하여 불확실성이 나타날 수 있다. 불확실성의 평가는 조사된 자료의 품질검증, 정확성 평가와 가능한 불

**Table 3. Equations for wood density and biomass expansion factor.**

Contents	Calculation Forms
Stem total density	Stem total DW(g) / Stem total V(cm <sup>3</sup> )
Stem wood density	Stem total DW(g) / Stem wood V(cm <sup>3</sup> )
Stem bark density	Stem total DW(g) / Stem Bark V(cm <sup>3</sup> )
Biomass expansion factor	Tree component DW(g) / Stem DW(g)

DW: dry wight, V: volume(cm<sup>3</sup>)

확실성의 감소를 유도하기 위함이라고 할 수 있다. 불확실성 산정은 IPCC 가이드라인에서 알려지지 않은 참값이 포함될 확률이 95%로, 95% 신뢰구간을 이용할 것을 제안하고 있다(IPCC, 2006). 신뢰구간은 불확실성 크기의 추정치(95% ≥ C.I.)를 집단의 평균(μ)으로 나눈 결과의 절반으로 산정하였으며, 불확실성을 백분율로 나타내면 다음 식과 같다(IPCC 2006).

$$\text{Uncertainty(\%)} = \frac{0.5 \times (95\% \text{C.I.})}{\mu} \times 100$$

C.I. : Confidence interval

μ : Average of emission factor

백합나무 부위별 바이오매스 상대생장식을 선정하기 위해 흉고직경(D)과 수고(H)를 변수로하는 8가지 모형을 적용하였으며, 통계적 추출방법으로 단순선형회귀모형과 다중회귀모형을 이용하였고, 프로그램은 IBM SPSS 19.0을 사용하였다. 지수식은 회귀모형으로 변환하기 위해 양변에 log를 취하여 대수회귀식으로 단순화된 직선 형태로 변환하였다(Table 4).

최적의 바이오매스 상대생장식을 선정하기 위해 8가지 모형에 대한 회귀결정계수(R<sup>2</sup>), 잔차제곱의 합(error sum of squares : SSE), 평균평방오차(mean square error : S<sub>e</sub><sup>2</sup>), 표준추정오차(standard error of the estimate : S<sub>e</sub>)를 산출하였다(Table 5).

**Table 4. Allometric equations from regression models with variables.**

Equation forms	Regression model	Variable
W=a+bD <sup>2</sup>		Y=a+bX X=D <sup>2</sup>
W=aD+bD <sup>2</sup>		Y=aX <sub>1</sub> +bX <sub>2</sub> X <sub>1</sub> =D X <sub>2</sub> =D <sup>2</sup>
W=a+bD+cD <sup>2</sup>		Y=a+bX <sub>1</sub> +cX <sub>2</sub> X <sub>1</sub> =D X <sub>2</sub> =D <sup>2</sup>
W=aD <sup>b</sup>	logW=loga+blogD	Y=a+bX X=logD
W=aD <sup>2</sup> H		Y=aX X=D <sup>2</sup> H
W=a+bD <sup>2</sup> H		Y=a+bX X=D <sup>2</sup> H
W=a(D <sup>2</sup> H) <sup>b</sup>	logW=loga+blogD <sup>2</sup> H	Y=a+bX X=logD <sup>2</sup> H Y=logW
W=aD <sup>b</sup> H <sup>c</sup>	logW=loga+blogD=clogH	Y=a+bX <sub>1</sub> +cX <sub>2</sub> X <sub>1</sub> =logD X <sub>2</sub> =logH Y=logW

D: diameter at breast height(DBH), H: height, W: total biomass (dry weight), Y: dependant variable, X, X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>: independent variable, a, b, c: parameters

**Table 5. Accuracy estimation of developed allometric equations.**

Validation statistics	Calculation forms	
	Simple linear regression model	Multiple regression model
	$Y=a+bX_1$	$Y=a+bX_{11}+bX_{12}$
Coefficient of determination ( $R^2$ )	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$	
Error sum of squares (SSE)	$SSE = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2$	$SSE = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2$
Standard error of the estimate ( $S_e$ )	$S_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-2}}$	$S_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-p}}$
Mean square error ( $S_e^2$ )	$S_e^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-2}$	$S_e^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-p}$

$Y_i$ : dependent variable(the observed values of Y),  $\bar{Y}$ : arithmetic mean of  $Y_i$ ,  $\hat{Y}_i$ : estimate of Y,  $X_i$ : independent variable, n: number of data, p: degree of freedom

**결과 및 고찰**

**1. 표본목의 특성**

조사한 백합나무 표준목은 40본이나 뿌리까지 굴취한 것은 21본이다. 평균 흉고직경은 20.2 cm, 수고는 18.0 m 였고, 장성의 흉고직경 편차가 가장 심하며, 강진의 편차가 가장 적었다(Table 6).

표준목의 부위별 바이오매스비율을 살펴보면 모두 목 질부가 가장 높았다(Table 7). 지역별 차이를 살펴보면 수 원과 강진은 목질부 > 뿌리 > 가지 > 수피 > 잎 순이었고, 장 성은 목질부 > 뿌리 > 수피 > 가지 > 잎 순 이었다(Figure 1). 장성지역 가지 양이 다른 지역보다 낮은 것은 밀폐된 임 분으로 측지가 적고 수관부에 가지가 집중 되어 있었기 때문인 것으로 판단된다.

**Table 6. Stand descriptions of the plantations.**

Site	No. of data	Ages (year)	DBH (cm)	Height (m)
Suwon	10	$\frac{11}{8-13}$	$\frac{13.5}{5.9-19.4}$	$\frac{13.2}{6.6-19.5}$
Jangseong	15	$\frac{34}{33-34}$	$\frac{17.1}{6.3-29.6}$	$\frac{16.6}{7.9-22.1}$
Gangjin	15	$\frac{31}{30-34}$	$\frac{27.8}{19.7-38.7}$	$\frac{22.8}{14.8-26.6}$

**Table 7. Biomass of the plantations.** (Unit : kg)

Tree component	Suwon (n=10)	Jangseong (n=15)	Gangjin (n=15)
Stem	41.2 (3.8~81.2) <sup>2</sup>	86.5 (5.8~259.4)	262.2 (78.9~516.6)
Stem wood	36.3 (3.2~72.3)	76.5 (4.5~223.4)	233.4 (67.2~471.3)
Stem bark	5.0 (0.6~8.9)	12.7 (1.2~35.9)	28.8 (11.7~52.0)
Branch	7.6 (0.8~15.9)	7.9 (0.17~23.1)	34.5 (5.9~96.1)
Foliage	3.5 (0.5~6.8)	1.9 (0.06~6.5)	5.5 (1.3~12.6)
Above ground	52.3 (5.2~95.2)	78.1 (5.2~150.2)	302.3 (86.2~624.9)
Root	16.3 (0.3~26.1)	19.9 (3.0~52.2)	62.4 (16.6~159.7)

<sup>2</sup>minimum and maximum values, n : number of data

**2. 탄소배출계수 및 불확실성 평가**

백합나무의 줄기밀도는 0.43 g·cm<sup>-3</sup>, 불확실성은 3.9%, 바이오매스 확장계수는 1.2, 불확실성은 4.6%로 나타났다. 우리나라 다른 수종의 줄기밀도를 살펴보면 강원지방소 나무는 0.40 g·cm<sup>-3</sup>, 중부지방소나무는 0.47 g·cm<sup>-3</sup> (Son et al., 2011) 리기다소나무 0.46 g·cm<sup>-3</sup> (Seo et al., 2011) 이었으며, 붉가시나무는 1.04 g·cm<sup>-3</sup> (Kim, 2011)라 하였 다. 뿌리함량비의 경우 0.20 g·cm<sup>-3</sup>로 24.1%의 불확실성

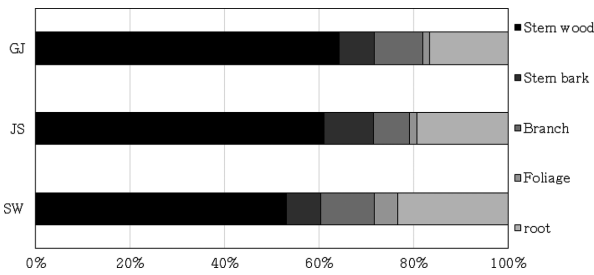


Figure 1. Proportion of each component in the three sites. GJ: Gangjin, JS: Jangseong, SW: Suwon

이 나타났으나, IPCC에서 권장하는 30% 이내이므로 계수의 적용은 타당한 것으로 보인다. 뿌리함량비의 경우 상대적으로 높은 불확실성을 보인 것은 뿌리 표본수가 적었기 때문인 것으로 사료된다(Table 8).

3. 상대생장식 개발

1) 지상부·지하부·전체 바이오매스 상대생장식

일반적인 바이오매스 연구는 표준목의 흉고직경과 수고를 이용하여 건중량 회귀식을 추정한다(Ter-Mikaelian and Korzukhin, 1997). 바이오매스 상대생장식으로 많이 이용되는  $W=a+bD^2$  식은 초창기에는 재적을 구하는 공식으로 개발되었으나(Hummel, 1955) 추후에는 재적(V) 대신 목재의 건중량을 추정하는데 사용되었다. 이후 흉고직경과 수고를 이용한 다양한 변형식이 개발되었으며(Ribe, 1979), 이러한 변형식은 다양한 연구를 통해 정확도를 인정받았다(Avery and Burkhart et al., 2002; Husch et al., 2003).

지상부, 뿌리, 전체 바이오매스에 대한 회귀분석 결과 8가지 모형 모두에서  $p < 0.001$  로 유의미한 것으로 나타났다(Table 9). 각 식의 독립변수 분석 결과 지상부, 지하부, 전체 바이오매스 상대생장식 분석에서  $W=aD^bH^c$ 의 상수 c는 유의미한 차이가 없었다( $p > 0.05$ ). 이는 수고(H)의 영향력이 적다고 할 수 있으므로 독립변수 H를 제외한  $W=aD^b$  식을 사용하는 것이 적절하다. 또한  $W=a+bD^2H$

Table 8. Statistics and uncertainty of wood density, biomass expansion factor, root ratio for *L. tulipifera*.

	n	Mean	Min.	Max.	SD	SE	95% C.I.	U(%)
WD	40	0.430	0.356	0.633	0.052	0.008	0.413 ~ 0.446	3.86
BEF	40	1.185	1.019	1.745	0.169	0.027	1.131 ~ 1.239	4.56
R	21	0.199	0.063	0.484	0.106	0.023	0.151 ~ 0.247	24.09

WD: wood density( $g \cdot cm^{-3}$ ), BEF: biomass expansion factor( $g/g$ ), R: root ratio = root dry weight/above ground dry weight, C.I.: confidence interval, n: number of data, SD: standard deviation, SE: standard error, U: uncertainty

Table 9. Models with DBH, height for biomass allometric equations.

D		$W=a+bD^2$	$W=aD+bD^2$	$W=a+bD+cD^2$	$W=aD^b$
Above ground	R <sup>2</sup>	0.908	0.957	0.911	0.983*
	F	376.467	419.040	189.051	2136.955*
	p	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Root	R <sup>2</sup>	0.821	0.919*	0.894	0.863
	F	87.084	107.457	75.751	119.249*
	p	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Total biomass	R <sup>2</sup>	0.939	0.978*	0.966	0.977
	F	292.455	417.215	252.631	815.383*
	p	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
D, H		$W=aD^2H$	$W=a+bD^2H$	$W=a(D^2H)^b$	$W=aD^bH^c$
Above ground	R <sup>2</sup>	0.958	0.914	0.975	0.983
	F	897.791	406.200	1471.388*	1048.774
	p	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Root	R <sup>2</sup>	0.884*	0.798	0.847	0.863
	F	153.082*	75.145	105.377	56.610
	p	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Total biomass	R <sup>2</sup>	0.963	0.931	0.962	0.977
	F	524.326*	257.757	480.528	387.448
	p	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001

D: diameter at breast height, H: height, W: dry weight, R<sup>2</sup>: coefficient of determination, F: F-statistic, p: p-value, a, b, c: parameters, \*: statistically significant

에서 상수 a는 유의미한 차이가 없었다( $p > 0.05$ ). 따라서 상수항의 영향력이 적다고 할 수 있으므로 상수항을 제거한  $W=aD^2H$ 의 식을 사용하는 것이 적절하다.  $W=a+bD+cD^2$  지상부 바이오매스 식에서도 상수 a의  $p$  값이  $p > 0.05$  이므로  $W=aD+bD^2$ 의 식을 사용하는 것이 적절하다.

분석 결과를 종합해 보면 흉고직경을 변수로 하는 상대성장식에서는  $W=aD+bD^2$ 과  $W=aD^b$  모형이 적합한 것으로 나타났으며, 흉고직경과 수고를 변수로 한 상대성장식에서는  $W=aD^2H$ 과  $W=a(D^2H)^b$  모형이 적합한 것으로 나타났다.

2) 부위별 상대성장식

백합나무의 부위별 바이오매스 상대성장식을 선정하기

위해 각 부위별 바이오매스량을 종속변수로 하여 도출하였다(Table 10, 11). 흉고직경을 이용한 모형에서 줄기, 목질부, 지상부는  $W=aD^b$ , 수피, 가지, 잎, 뿌리, 전체 바이오매스는  $W=aD+bD^2$  모형이 높은 결정계수( $R^2$ )를 나타냈다(Table 10). 흉고직경과 수고를 이용한 모형에서는 줄기는  $W=a(D^2H)^b$ 과  $W=aD^bH^c$ , 목질부, 가지, 지상부는  $W=aD^bH^c$ , 수피는  $W=a(D^2H)^b$ , 잎, 뿌리는  $W=aD^2H$  가 높은  $R^2$ 을 나타냈다(Table 11).

백합나무 상대성장식을 이용한 기존연구를 살펴보면 Wiant(1977)는  $W=a+bD^2$ ,  $W=a+bD+cD^2$ ,  $W=aD^b$  모형을 사용하여 상대성장식을 구하였으며  $W=aD^b$  모형을 이용한 지상부 바이오매스, 목질부, 수피에 대한  $R^2$ 은 각각 0.99, 0.97, 0.99으로 보고하였고, 가지는  $W=a+bD+cD^2$  모

**Table 10. Validation tests and parameters for biomass allometric equations, tree components with DBH.**

Models	Tree component	Parameters			R <sup>2</sup>	SSE	S <sub>e</sub> <sup>2</sup>	S <sub>e</sub>
		a	b	c				
W=a+bD <sup>2</sup>	Stem	-28.671	0.354		0.924	57,303	1,508	39
	Xylem	-28.212	0.318		0.918	50,210	1,321	36
	Bark	-0.457	0.036		0.929	548	14	4
	Branch	-4.364	0.047		0.716	7,998	210	15
	Foliage	0.656	0.006		0.626	131	3	2
	Above ground	-32.381	0.407		0.908	93,202	2,453	50
	Root	-14.782	0.106		0.821	6,627	174	13
	Total	-74.945	0.586		0.939	59,818	1,574	40
W=aD+bD <sup>2</sup>	Stem	-3.058	0.423		0.964	194,790	5,126	72
	Xylem	-3.052	0.387		0.961	48,114	1,266	36
	Bark	-0.006	0.035		0.971	553	15	4
	Branch	-0.489	0.058		0.843	4,695	124	11
	Foliage	0.057	0.005		0.851	132	3	2
	Above ground	-3.490	0.486		0.957	90,457	2,380	49
	Root	-1.943	0.155		<b>0.919</b>	5,410	142	12
	Total	-8.758	0.795		<b>0.978</b>	41,908	1,103	33
W=a+bD+cD <sup>2</sup>	Stem	4.158	-3.454	0.431	0.926	55,497	1,460	38
	Xylem	8.407	-3.853	0.404	0.922	47,992	1,263	36
	Bark	-4.251	0.399	0.027	0.932	527	14	4
	Branch	3.011	-0.776	0.064	0.721	4,672	123	11
	Foliage	1.237	-0.061	0.008	0.627	132	3	2
	Above ground	8.400	-4.291	0.503	0.911	90,308	2,377	49
	Root	47.117	-6.360	0.248	0.894	4,061	107	10
	Total	117.557	-19.779	1.028	0.966	31,827	838	29
W=aD <sup>b</sup>	Stem	0.042	2.587		0.983	61,223	1,611	40
	Xylem	0.030	2.650		0.983	52,850	1,391	37
	Bark	0.016	2.227		0.963	631	17	4
	Branch	0.003	2.758		0.796	4,807	126	11
	Foliage	0.005	2.092		0.584	140	4	2
	Above ground	0.060	2.524		<b>0.983</b>	95,486	2,513	50
	Root	0.010	2.591		0.863	6,590	173	13
	Total	0.063	2.578		<b>0.977</b>	53,148	1,399	37

D: diameter at breast height, W: dry weight, R<sup>2</sup>: coefficient of determination, SEE: error sum of square, S<sub>e</sub><sup>2</sup>: mean square error, S<sub>e</sub>: standard error of the estimate, a, b, c : parameters

**Table 11. Validation tests and parameters for biomass allometric equations, tree components with DBH and height.**

Models	Tree component	Parameters			R <sup>2</sup>	SSE	S <sub>e</sub> <sup>2</sup>	S <sub>e</sub>
		a	b	c				
W=aD <sup>2</sup> H	Stem	0.014			0.967	53,905	1,419	38
	Xylem	0.012			0.965	43,876	1,155	34
	Bark	0.001			0.954	2,787	73	9
	Branch	0.002			0.842	5,254	138	12
	Foliage	0.0003			0.812	167	4	2
	Above ground	0.016			0.958	88,679	2,334	48
	Root	0.004			0.884	8,121	214	15
	Total	0.021			0.963	71,088	1,871	43
W=a+bD <sup>2</sup> H	Stem	1.450	0.013		0.931	53,557	1,409	38
	Xylem	-1.366	0.012		0.929	43,921	1,156	34
	Bark	2.818	0.001		0.907	1,671	44	7
	Branch	-0.383	0.002		0.720	5,173	136	12
	Foliage	1.242	0.0002		0.604	147	4	2
	Above ground	2.307	0.015		0.914	88,571	2,331	48
	Root	-3.982	0.004		0.798	7,546	199	14
	Total	-17.737	0.021		0.931	68,361	1,799	42
W=a(D <sup>2</sup> H) <sup>b</sup>	Stem	0.020	0.957		0.988	53,580	1,410	38
	Xylem	0.014	0.980		0.987	46,605	1,226	35
	Bark	0.008	0.825		0.972	671	18	4
	Branch	0.002	0.985		0.747	4,731	125	11
	Foliage	0.004	0.730		0.522	155	4	2
	Above ground	0.030	0.927		0.975	97,553	2,567	51
	Root	0.006	0.941		0.847	8,593	226	15
	Total	0.034	0.937		0.962	106,326	2,798	53
W=aD <sup>b</sup> H <sup>c</sup>	Stem	0.025	2.117	0.674	0.988	52,205	1,411	38
	Xylem	0.018	2.192	0.658	0.988	45,223	1,222	35
	Bark	0.009	1.717	0.732	0.971	583	16	4
	Branch	0.020	4.452	-2.430	0.846	6,501	176	13
	Foliage	0.072	4.401	-3.313	0.702	207	6	2
	Above ground	0.055	2.450	0.105	0.983	93,878	2,537	50
	Root	0.012	2.688	-0.139	0.863	5,299	143	12
	Total	0.066	2.626	-0.067	0.977	52,174	1,410	38

D: diameter at breast height, H: height, W: dry weight, R<sup>2</sup>: coefficient of determination, SEE: error sum of square, S<sub>e</sub><sup>2</sup>: mean square error, S<sub>e</sub>: standard error of the estimate, a, b, c: parameters

형을 이용하여 R<sup>2</sup>=0.73로 보고하였다. Brenneman et al.(1978)은 12분에 대하여 W=aD<sup>b</sup> 모형에 대해 R<sup>2</sup>=0.98로 보고하였고, Alexander(1977)는 W=a(D<sup>2</sup>H)<sup>b</sup> 모형에 log를 취한 대수식을 이용하여 지상부 바이오매스, 줄기, 목질부, 수피, 가지의 상대생장식을 산정하였으며 각각의 R<sup>2</sup>은 0.99, 0.99, 0.99, 0.98, 0.93으로 보고하였다. 본 연구 또한 R<sup>2</sup>은 0.90 이상으로 유사한 결과를 가져왔으나, R<sup>2</sup>이 낮은 이유는 선행연구에서는 고려하지 않은 잎과 뿌리 바이오매스 차이로 해석된다.

흉고직경은 현장에서 측정이 용이하지만 수고는 현장에서 정확한 측정이 어렵고, 임분이 뺄 경우 측정하는데 시간과 비용이 소요되기 때문에 수고는 일부만 측

정하는 것이 일반적이다. 따라서 수고 측정에 드는 시간과 비용, 작업의 편리성을 비교해보면 자연상태에서 용인할 수 있을 정도의 오차범위 이므로 흉고직경만을 변수로 사용한 식의 사용이 가능하다. 흉고직경만을 사용한 식 중 지상부, 뿌리, 전체 식의 R<sup>2</sup>값을 비교해 보면 W=aD+bD<sup>2</sup>와 W=aD<sup>b</sup> 식이 가장 높다. 하지만 W=aD+bD<sup>2</sup> 식에서 흉고직경 12 cm 이하의 바이오매스가 (-)로 나오는 현상이 발생하므로 W=aD<sup>b</sup> 모형을 채택하는 것이 가장 바람직하다. W=aD+bD<sup>2</sup>와 W=aD<sup>b</sup> 식의 설명력이 97.8%와 97.7%로 거의 유사한 설명력을 가진다고 볼 수 있으므로 상대생장식으로 W=aD<sup>b</sup> 식을 이용하여도 W=aD+bD<sup>2</sup> 식과 유의미한 차이가 없다는 결론을 내릴 수 있다(Table 12).

**Table 12. Allometric equations by tree components by  $W=aD^b$  and the highest  $R^2$ .**

Tree component	$W=aD^b$		Best Equation	
	Equation	$R^2$	Equation	$R^2$
Stem	$W=0.042D^{2.587}$	0.983	$W=0.025D^{2.117}H^{0.674}$	0.988
Xylem	$W=0.030D^{2.650}$	0.983	$W=0.018D^{2.192}H^{0.658}$	0.988
Bark	$W=0.016D^{2.227}$	0.963	$W=0.008(D^2H)^{0.825}$	0.972
Branch	$W=0.003D^{2.758}$	0.796	$W=0.020D^{4.452}H^{-2.430}$	0.846
Foliage	$W=0.005D^{2.092}$	0.584	$W=0.057D+0.005D^2$	0.851
Above ground	$W=0.060D^{2.524}$	0.983	$W=0.055D^{2.450}H^{0.105}$	0.983
Root	$W=0.010D^{2.591}$	0.863	$W=-1.943D+0.155D^2$	0.919
Total Biomass	$W=0.063D^{2.578}$	0.977	$W=-8.758D+0.795D^2$	0.978

D: diameter at breast height, W: dry weight,  $R^2$ : coefficient of determination, a, b: parameters

## 결론

본 연구에서는 백합나무의 자원량 파악 및 바이오매스 통계자료 구축을 위한 줄기밀도, 바이오매스 확장계수, 뿌리함량비를 구하였으며, 흉고직경과 수고를 이용한 상대생장식을 개발하였다. 백합나무의 줄기밀도는  $0.43 \text{ g cm}^{-3}$ , 바이오매스 확장계수는 1.2, 뿌리함량비는 0.2이며, 각각의 불확실성은 3.9%, 4.6%, 24.1% 이었다. 백합나무의 상대생장식은  $W=aD^b$  모형이 적합하였으며, 전체 바이오매스는  $W=0.063D^{2.578}$ , 지상부 바이오매스는  $W=0.060D^{2.524}$ , 지하부는  $W=0.010D^{2.591}$  이 적합하였다.

## 감사의 글

본 연구는 산림청 ‘임업기술개발사업(S111314L100110)’의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

## References

- Alexander Clark III, James G. Schroeder. 1977. Biomass of Yellow-Poplar in Natural Stands in Western North Carolina. USDA Forest service Research Paper SE-165, pp. 1-16.
- Avery T. E. and Burkhardt, H. E. 2002. Forest Measurements. 5<sup>th</sup> Edition. McGraw-Hill, Inc. pp. 321-347.
- Beck, D.E. and Lino, D.B. 1975. Board-feet and diameter yellow-Poplar after thinning. USDA Forest service Research Paper SE-123. pp. 20.
- Beck, Donald E. 1962. Yellow-Poplar site index curves. USDA Forest service Research Paper. SE-180, p. 2.
- Bertram Husch, Thomas W. Beers, John A. Kershaw Jr., 2003. Forest Mensuration. 4th Edition. Kohn Wiley and Sons Inc. pp. 162-201.
- Brennman, B.B., Frederick, D.J., Gardner, W.E., Schoenhofen, L.H., and Marsh, P.L. 1978. Biomass of species and stands of West Virginia hardwoods. Central Hard-wood Forest Conference II. pp. 159-178.
- FAO. 2010. Global Forest Resources Assessment 2010, FAO Forestry Paper No. 163. Rome, Italy. pp. 340.
- Heather Keith, Brendan G. Mackey, and David B. Lindenmayer 2008. Re-evaluation of forest biomass carbon stocks and lessons from the world's most carbon-dense forests. Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America 106(28): 11635-11640.
- Hummel, F.C. 1955. The volume-basal area line; a study in forest mensuration. Forestry Commission Great Britain Bulletin 24: 84.
- Husch, Bertram, Beers, Thomas, W., Kershaw, Jr., and John, A. 2003. Forest Mensuration. Kohn Wiley and Sons Inc. pp. 162-201.
- IPCC. 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 3.1. CHAPTER 3: pp. 28.
- IPCC. 2007. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. CHAPTER 3: pp. 261; CHAPTER 9: pp. 544.
- Kim, H.J. 2011. Estimating absorption of carbon dioxide and developing allometric equation for *Quercus acuta*. Master's thesis of Chonbuk national university pp. 40.
- Korea Forest Research Institute. 2007. Survey manual for forest biomass and soil carbon pp. 74.
- Korea Forest Research Institute. 2011. Carbon emission factors by major species in Korea. pp. 107.
- Lee, J.S., Moon, H.K., and Kim, Y.W. 2003. Mass propagation of *Liriodendron tulipifera* L. via somatic embryogenesis. Journal of Plant Biotechnology 30(4): 359-363,
- Ribe, J.H. 1979. A study of Multi-stage sampling and dimensional analysis of puckerbrush stands. The Complete Tree Institute, University of Maine at Orono.
- Ryu, K.O. and Kim, H.E. 2003. Development of techniques and handling for seedling production of Yellow-Poplar (*Liriodendron tulipifera* Linne). Journal of Korean Forest Society 92(3): 236-245.



- Ryu, K.O., Jang, S.S., Choi, W.Y., and Kim, H.E. 2003. Growth performance and adaptation of *Liriodendron tulipifera* in Korea. *Journal of Korean Forest Society* 92(6): 515-525.
- Seo, Y.O., Lee, Y.J., Pyo, J.K., Kim, R.H., Son, Y.M., and Lee, K.H.. 2011. Uncertainty analysis of stem density and biomass expansion factor for *Pinus rigida* in Korea. *Journal of Korean Forest Society* 100(2): 149-153,
- Son, Y.M., Lee, K.H., and Pyo, J.K. 2011. Development of biomass allometric equations for *Pinus densiflora* in central region and *Quercus variabilis*. *Journal of Agriculture & Life Science* 45(4): 65-72.
- Ter-Mikaelian, M.T. and Korzukhin, M.D. 1997. Biomass equations for sixty-five North American tree species. *Forest Ecology and Management* 97: 1-24.
- Wiant, H.V.Jr., Sheetz, C.E., Colaninno, A., DeMoss, J.C., and Castaneda, F. 1977. Tables and procedures for estimating weights of some appalachian hardwoods. *Bulletin - West Virginia Agricultural and Forestry Experiment* 659(T): 36.

---

(Received: September 19, 2016; Accepted: November 23, 2016)