

정주지의 메타세쿼이아와 양버즘나무의 탄소 배출 계수 및 바이오매스 상대생장식 개발

정준영 · 임수빈 · 김현준 · 이계한^{ID*}

전남대학교 산림자원학과

Development of Carbon Emission Factors and Biomass Allometric Equations for *Metasequoia glyptostroboides* and *Platanus occidentalis* in Urban Forests

Jun-Young Jung, Subin Im, Hyun-Jun Kim and Kye-Han Lee^{ID*}

Forest Resources, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea

요약: 본 연구는 도시림 주요 식재 수종인 양버즘나무와 메타세쿼이아 2개 수종을 대상으로 탄소 배출 계수를 산정하고, 수목 부위별 바이오매스 상대생장식을 개발하였다. 메타세쿼이아 20본, 양버즘나무 25본을 벌채하여 주간, 가지, 잎, 뿌리 (>5 mm)의 건중량과 줄기 재적을 산출하였다. 메타세쿼이아와 양버즘나무의 목재 기본 밀도 $0.293 \pm 0.008 \text{ g cm}^{-3}$, $0.509 \pm 0.018 \text{ g cm}^{-3}$ 이었으며, 바이오매스 확장계수는 1.738 ± 0.031 , 1.561 ± 0.035 였다. 마지막으로 뿌리 대 지상부 비율은 0.446 ± 0.009 , 0.402 ± 0.012 이었다. 각각의 불확도 검사(CV, %)를 진행하여 목재 기본 밀도 2.8%, 3.5%, 바이오매스 확장계수 1.8%, 2.3%, 뿌리 대 지상부 비율 2.1%, 2.9%로 계산되었다. 개발된 상대생장식은 흉고직경을 활용한 Model I이 적합하였다. 이에, 메타세쿼이아와 양버즘나무의 지상부는 $Y=1.679(\text{DBH})^{1.315}$, $Y=0.505(\text{DBH})^{1.896}$, 뿌리 $Y=0.746(\text{DBH})^{1.315}$, $Y=0.301(\text{DBH})^{1.751}$ 이었으며, 전체는 $Y=2.422(\text{DBH})^{1.316}$, $Y=0.787(\text{DBH})^{1.858}$ 이었다. 산정된 탄소 배출 계수와 개발된 세 개 모델의 상대생장식을 활용하여 정주지 수목의 탄소저장량과 바이오매스를 산정한다면, 고정계수의 사용과 환경적 차이에 따라 발생하는 오차를 줄일 수 있을 것이다.

Abstract: This study aimed to develop biomass allometric equations and estimate carbon emission factors, such as the wood density, biomass-expansion factor, and root-to-shoot ratio, for *Platanus occidentalis* and *Metasequoia glyptostroboides* planted in urban areas. Twenty *M. glyptostroboides* and 25 *P. occidentalis* trees were harvested, and the dry weights and stem volumes of stems, branches, leaves, and roots (>5 mm) were measured. The wood densities of *M. glyptostroboides* and *P. occidentalis* were $0.293 \pm 0.008 \text{ g cm}^{-3}$ and $0.509 \pm 0.018 \text{ g cm}^{-3}$, and the biomass-expansion factors were 1.738 ± 0.031 and 1.561 ± 0.035 . The root-to-shoot ratios were 0.446 ± 0.009 and 0.402 ± 0.012 . The uncertainty tests (coefficient of variation, %) gave 2.8% and 3.5% values for wood density, 1.8% and 2.3% for biomass-expansion factor, and 2.1% and 2.9% for root-to-shoot ratio, respectively. Among the developed allometric equations, Model I using the diameter at breast height (DBH) was suitable. The allometric equations of *M. glyptostroboides* and *P. occidentalis* above ground were $y = 1.679 (\text{DBH})^{1.315}$ and $y = 0.505 (\text{DBH})^{1.896}$, and the allometric equations of the root and total were $y = 0.746 (\text{DBH})^{1.315}$, $y = 0.301 (\text{DBH})^{1.751}$, $y = 2.422 (\text{DBH})^{1.316}$, and $y = 0.787 (\text{DBH})^{1.858}$. If the carbon-emission factors of this study and biomass allometric equations of the three developed models are used to estimate the carbon storage and biomass of urban forests, errors caused by not considering the use of fixed factors and the environmental differences can be reduced.

Key words: allometric equations, biomass expansion factor, carbon storage, root/shoot ratio, urban forest, wood density

* Corresponding author
E-mail: khL@jnu.ac.kr

ORCID
Kye-Han Lee ^{ID} <https://orcid.org/0000-0003-4470-1290>

서론

급속한 도시화에 따른 산림벌채와 산업화는 화석연료 사용의 증가를 가져왔고, 이산화탄소 배출량을 급격히 증가시켰다(Koo et al., 2013). 전 세계적으로 증가한 이산화탄소의 양은 기후위기와 더불어 범지구적 문제를 일으켰다. 이산화탄소를 줄이기 위하여 여러 국가와 지자체에서는 많은 노력을 기울이고 있으며, 우리나라는 ‘2050 탄소중립 추진전략’을 내세워 산림을 포함하여 탄소흡수 기능강화를 목적으로 힘쓰고 있다. 하지만 산림의 면적은 도시화와 산업화에 갈수록 줄어들고 있는 현실이다. 반면에 도시 수목은 산림의 면적에 비해 적은 양이지만 꾸준히 늘어나고 있으며 결코 무시할 수 없는 양이다. IPCC에서는 이러한 전 지구적 상황에 맞추어 국가 차원의 온실가스 보고에 도시지역의 탄소저장량 평가를 함께 요구하고 있다(Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006; Kim et al., 2018; Choi et al., 2020; Ha et al., 2022).

도시림은 산림자원법 제 2조에서 “도시에서 국민 보건 휴양·정서함양 및 체험 활동 등을 위하여 조성·관리하는 산림 및 수목”을 뜻한다. 도시림의 역할은 도시의 경관을 아름답게 하며 미세먼지를 차단하고 열섬현상을 완화하는 등 도시에서 중요한 역할을 한다(Seamans, 2013; Park and Kang, 2010; Ha et al., 2022). 또한, 성장 과정에서 도시 내의 이산화탄소를 흡수하면서 성장하고, 이를 토양에도 저장하여 탄소흡수원으로서 기후 변화에 큰 역할을 담당하고 있다. 이러한 이산화탄소 흡수 효과와 탄소저장량에 대한 평가는 탄소 순환에 큰 역할을 하는 것으로 알려져 있다(Roy et al., 2012). 한편, 뉴욕의 도시림은 연간 120만 톤의 탄소를 저장하고 77만 톤의 이산화탄소를 흡수하며 연간 8,360만 톤의 이산화탄소를 흡수하는 것으로 보고하였다(Nowak and Crane, 2002). 뉴욕과 LA는 수목 식재 사업을 통해 나무 한 그루에 연간 평균 8.9~36 kg의 이산화탄소를 흡수하고(McPherson et al., 2007; Moore, 2009; Park and Kang, 2010), 콜로라도의 4개 도시지역에서 도시 수목의 간접효과로 150~225 kg의 이산화탄소를 흡수한다고 보고한 바 있다(McHale et al., 2007; Park and Kang, 2010).

도시림의 탄소저장량을 파악하기 위해 도시림을 대상으로 산정된 탄소 배출 계수가 존재해야 한다. 하지만 도시림은 산림과 달리 온실가스 통계 보고 실적은 여전히 부족한 실정이며, 도시림에 대한 기초 활동자료 및 탄소저장량 평가에 계수의 부재가 뒷받침하는 것으로 알려져 있다. 즉, 시간, 노동력, 장소 등 여러 가지 제한 요인으로 인해 도시림을 대상으로 한 연구는 미흡하다는 것이다(Ha et

al., 2022). 하지만 도시 수목에 관한 연구가 전혀 진행되지 않은 것은 아니다. Jo(1999)는 도시 수목인 소나무, 잣나무, 신갈나무, 현사시나무, 철쭉, 진달래 등 각각 상대생장식 계수를 밝힌 바 있었고, Jo and Cho(1998)이 적외선 가스 분석기를 이용해 양버즘나무, 은행나무, 느티나무, 단풍나무의 이산화탄소 흡수량을 산정하는 식을 보고한 바 있었다. 그러나 도시림 주요 수종의 계수 부재로 인해 경기권 도시림을 대상으로 탄소저장량을 추정할 때, 수종별 계수가 아닌 Lee(2003)의 임상별 고정계수를 이용해 상대생장식을 활용해 탄소저장량을 추정하였다(Park and Kang, 2010). 이는 도시림 수종의 다양성 및 도시 환경에 따른 성장 차이를 고려하지 않은 한계가 존재한다.

이에, 본 연구는 1) 도시림 수종별 탄소저장량 추정에 필요한 계수들인 목재 기본 밀도, 바이오매스 확장계수, 뿌리 대 지상부 비율을 산정하고, 2) 도시림 주요 수종의 탄소저장량을 추정하기 위해 수목 부위별 바이오매스 상대생장식의 개발을 목적으로 하였다.

연구 재료 및 방법

본 연구는 정주지 주요 수종에 대한 탄소 배출 계수 및 상대생장식을 개발하기 위하여 전라도 도시지역(35°24'2"N; 126°57'10"E, 35°26'44"N; 127°8'32"E)에서 수목을 벌채하였다(Figure 1).

본 연구 대상 수종은 메타세쿼이아와 양버즘나무 두 수종이다. 탄소 배출 계수 및 상대생장식을 개발하기 위해 2020년부터 2022년까지 7-8월 여름철에 연구를 수행하였다. 수종 별로 표준목들은 흉고직경이 고르게 분포하도록 메타세쿼이아는 중경목 17본, 30 cm 초과인 대경목 3본으로 총 20본이었으며, 양버즘나무는 소경목 9본, 중경목

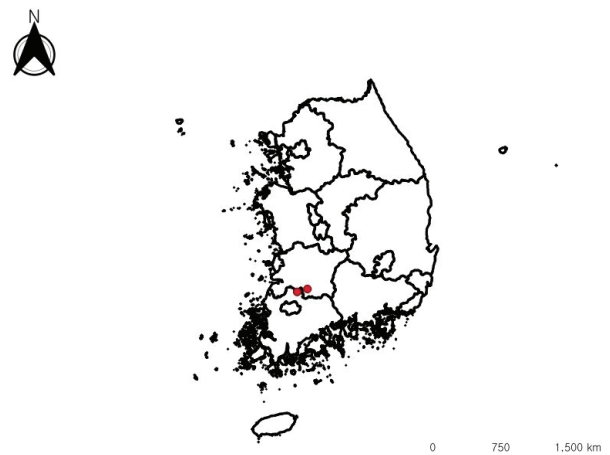


Figure 1. Locations of the study sites.

13본, 대경목 3본으로 총 25본을 선정하였다. 메타세쿼이아의 평균수령은 20.9년, 최소 수령 15년, 최고 수령 30년이었으며, 평균 흉고직경은 26.0 cm, 최소 15.5 cm, 최고 33.2 cm이었다. 평균 수고는 12.9 m였으며, 최소 10.5 m, 최고 15.6 m이었다. 양버즘나무의 평균 수령은 24.9년이었으며, 최소 16년, 최고 35년이었다. 평균 흉고직경은 17.8 cm, 최소 9.8 cm, 최고 35.5 cm이었다. 평균 수고는 14.7 m, 최소 10.3 m, 최고 21.1 m로 조사되었다(Table 1).

산림청에서 고시한 본 연구의 사용된 두 수종의 분포를 보면(Korea Forest Service, 2020), 전국 가로수 분포에서 2.2%, 3.0%를 차지하고 있는 주요 수종이다. 더불어 메타세쿼이아는 30.5%로 광주광역시와 전라도 지역에 전국에서 가장 많은 분포량을 보이며, 양버즘나무는 5.8%를 차지하고 있다.

탄소 배출 계수와 바이오매스 상대생장식을 개발하기 위하여 별채를 통해 부위별로 샘플링을 진행하였다. 수목의 흉고직경은 직경 테이프를 이용하여 0.1 cm 단위로 측정하였다. 수고는 별채 후 줄자를 통해 측정하였다. 현장에서 수목 별채 후 주간, 가지, 잎, 뿌리(>5 mm)의 생중량을 0.1 kg 단위까지 측정하였고, 부위별 1 kg씩 밀봉하여 샘플링 하였다. 양버즘나무의 경우 가로수로 식재되었을 때, 집중적인 관리를 받는 수종이다. 관리 정도와 빈도수 등은 지자체별로 상이하고, 이에 따라 본 연구에선 관리 영향보다 무 관리에 따른 기준값을 산정하는 것이 목적이며, 본 연구결과를 기준으로 관리효과에 대해 산정할 시 기준값으로 활용이 될 수 있을 것으로 판단된다. 주간의 경우 2 m 단위(0.2 m, 1.2 m, 3.2 m, 5.2 m ...)로 원판을 5 cm의 길이로 채취하여 실험실로 가져와 수간석해를 진행하였다. 뿌리 굴취는 포크레인을 이용하였고, 잔뿌리는 수작업으로 굴취하였습니다. 또한, 정확한 생중량을 측정하기 위해 물로 흙을 세척한 후 측정하였다. 표준목들은 지표면이 보도블록이나 콘크리트로 포장되어 있지 않아

뿌리를 모두 굴취할 수 있었다. 1 kg씩 채취한 샘플들은 실험용 건조기에서 10일 이상 건조하며 항량에 도달하였을 때 측정하였다(Korea Forest Research Institute, 2010). 수목 부위 별 전체적인 바이오매스를 측정하기 위해 샘플의 건조량 대 생중량의 비를 전체의 생중량에 곱하여 계산하였으며, 줄기 재적은 Huber 식을 이용하여 계산하였다. 초두부의 경우 원뿔 부피 공식을 이용하여 계산하였다.

본 연구에서 산정된 탄소 배출 계수는 목재 기본 밀도(Basic wood density, WD, g cm⁻³), 바이오매스 확장계수(Biomass expansion factor; BEF), 뿌리 비율(Below to aboveground ratio; Root/shoot ratio; R)이다. 탄소 배출 계수 산정 방법으로 목재 기본 밀도(g cm⁻³) = 수피를 제외한 줄기 건조량 / 수피를 제외한 줄기 재적으로 계산된다. 바이오매스 확장계수는 지상부 바이오매스(줄기+가지+잎 등) / 줄기 바이오매스로 산정되며, 뿌리 대 지상부 비율은 뿌리 바이오매스 / 지상부 바이오매스를 활용하여 계산하였다(Korea Forest Research Institute, 2010).

개발된 탄소 배출 계수가 탄소저장량 산정에 사용되기 위해서 신뢰성을 확보해야 한다. FAO에서는 계수의 신뢰도의 기준을 40% 미만으로 권장하고 있으며, 본 연구에서는 IPCC에서 제시하는 수준 1 방법을 사용하며 다음과 같다(Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006; Fujiwara et al., 2007; Pyo et al., 2010; Kang et al., 2016; 식 1).

$$Uncertainty = \frac{1/2 \times (95\% C.I. width)}{\mu} \times 100 \quad (1)$$

(C.I. width : Confidence interval, μ : Average of emission factor)

상대생장식은 다양한 성장 특성이 있는 두 변수 간에는 Y=aX^b의 상대생장관계가 있다(Son et al., 2011). 상대생장식의 독립변수(X)는 주로 흉고직경(DBH)와 흉고직경과

Table 1. Average age and sizes of harvested sample trees in urban forests.

Species	Age	Diameter at 1.2m (cm)	Height (m)	Number of logging
<i>M. glyptostroboides</i>	20.9/15-30	27.5/15.5-33.2	12.9/10.5-15.6	20
<i>P. occidentalis</i>	24.9/16-35	15.7/10.5-26.1	14.2/10.3-21.1	25

· Numbers in the parentheses are maximum and minimum values.

Table 2. In this study's allometric equations forms.

Model type	Form of allometric equations
I	Y(Biomass of tree component) = a × (DBH) ^b
II	Y(Biomass of tree component) = a × (DBH ² × H) ^b
III	Y(Biomass of tree component) = a × b(DBH) × c(DBH ²)

수고(DBH²×Height)를 주로 사용하고 있고(Whittaker and Marks, 1975; Navbar, 2009; Son et al., 2011), 본 연구에서는 독립변수에 주로 사용되는 두 개와 더불어 흉고직경을 활용한 다항식을 추가하여 세 개의 독립변수를 활용하였다(Table 2). 종속변수로는 수목의 부위별 바이오매스로 설정하였다. 또한, 상대생장식은 선형 회귀모형으로 변환하여 계산하기 위해 양변에 log를 취했으며, 단순화된 직선 형태로 변환하여 계산하였다. 또한, 최적의 상대생장식을 선정하기 위해 결정계수(R²)와 평균 제곱근 편차(root mean square error) 값을 함께 산출하였다.

연구결과 및 고찰

1. 탄소 배출 계수 및 불확도 평가

본 연구에서 산정된 탄소 배출 계수들과 불확도 검사 결과는 다음과 같다(Table 3).

본 연구의 메타세쿼이아와 양버즘나무의 목재 기본 밀도는 0.293±0.008 g cm⁻³, 0.509±0.018 g cm⁻³이며, 불확도 검사 결과 2.8%, 3.5%였다. 선행연구에서 메타세쿼이아의

목재 기본 밀도는 0.278 g cm⁻³(Cheng, 1992)로 본 연구와 유사하게 산정되었고, 국가별로 산정된 계수로는 네덜란드 0.288 g cm⁻³로 유사한 값의 목재 기본 밀도를 보여주었다(Polman et al., 1999). 양버즘나무는 0.46 g cm⁻³(Alden, 1995)으로 본 연구에서 산정된 계수와 유사하게 산정된 바 있다. 하지만, 또한, 국내 도시림의 탄소저장량 산정에 사용된 산림 바이오매스 산정을 위한 임상별 고정계수와 t-test를 통해 본 연구의 계수와 타당성을 확인해보고자 하였다(Table 4). 두 수종 모두 유의미한 결과(P<0.001)를 통해 고정계수의 사용보다 본 연구에서 산정된 계수 사용의 타당함을 보여주었다.

본 연구에서의 바이오매스 확장계수는 1.738±0.031, 1.561±0.035였다. 타 연구에서 메타세쿼이아의 바이오매스 확장계수는 0.914, 0.795로 산정되었으며(Yang et al., 2014), 본 연구보다 0.53배, 0.46배 낮게 산정되었다. 선행 연구에선 도시림을 대상으로 한 연구가 아닌 산림에서의 연구를 진행하였고, 도시림은 산림의 수목과 달리 독립수로 성장하기에 산림보다 수목끼리의 경쟁률이 낮고, 이에 따라 바이오매스에도 영향이 미쳤을 것으로 판단된다. 양

Table 3. Carbon emission factors calculated in this study and uncertainty test results (CV, %).

Species	WD	CV(%)	BEF	CV(%)	Root/shoot ratio	CV(%)
<i>M. glyptostroboides</i>	0.293(0.008)	2.8	1.738(0.031)	1.8	0.446(0.009)	2.1
<i>P. occidentalis</i>	0.509(0.018)	3.5	1.561(0.035)	2.3	0.402(0.012)	2.9

· mean(standard deviation)

Table 4. Basic wood density(WD) one sample t-test results.

Species	WD	μ	P-value
<i>M. glyptostroboides</i>	0.293(0.008)	0.48(Fixed coefficient by forest type)	<0.001
<i>P. occidentalis</i>	0.509(0.018)	0.65(Fixed coefficient by forest type)	<0.001

· μ is the coefficient used during the calculation of urban forest carbon stocks(Son et al., 2008; Park and Jwa, 2009).

Table 5. Biomass expansion factor(BEF) one sample t-test results.

Species	BEF	μ	P-value
<i>M. glyptostroboides</i>	1.738(0.031)	1.29(Fixed coefficient by forest type)	<0.001
<i>P. occidentalis</i>	1.561(0.035)	1.22(Fixed coefficient by forest type)	<0.001

· μ is the coefficient used during the calculation of urban forest carbon stocks(Son et al., 2008; Park and Jwa, 2009).

Table 6. Below to aboveground ratio(Root/shoot ratio; R) one sample t-test results.

Species	Root/shoot ratio	μ	P-value
<i>M. glyptostroboides</i>	0.446(0.009)	0.28(Fixed coefficient by forest type)	<0.001
<i>P. occidentalis</i>	0.402(0.012)	0.41(Fixed coefficient by forest type)	>0.05

· μ is the coefficient used during the calculation of urban forest carbon stocks(Son et al., 2008; Park and Jwa, 2009).

버즘나무는 해당 수종으로의 개발된 계수는 존재하지 않았으나, Son et al.(2016)은 서울시 가로수의 탄소저장량 평가에 활엽수의 평균인 1.450을 이용한 바 있다. 두 수종에 대해 불확도 검사 결과는 1.8%, 2.3%의 결과를 나타냈다. 본 연구에서 산정된 바이오매스 확장계수와 임상별 고정계수와와의 비교에서도 모두 유의미함을 나타냈다(Table 5).

뿌리 대 지상부 비율은 메타세쿼이아 0.446±0.009, 양버즘나무 0.402±0.012로 산정되었고, 불확도 검사에서는 2.1%, 2.9%로 계산되었다. 선행연구에서 메타세쿼이아는 빛의 처리에 따라 0.47~0.63의 뿌리 비율을 보였고(Equiza et al., 2006), 본 연구보다 1.05~1.41배 높게 산정된 바 있었다. 양버즘나무는 국내에서 도시 수목의 이산화탄소 흡수량 산정에 임상별 계수로 활엽수 0.41로 적용한 바 있었다(Son et al., 2008; Park and Jwa, 2009). Cairns et al.

(1997)은 온대 기후대의 평균 뿌리 대 지상부 비율로 0.26을 보고한 바 있다. 뿌리 대 지상부 비율에 대해 국내 임상별 고정계수와 t-test 결과 메타세쿼이아는 유의미함을 나타냈으나($P < 0.001$), 양버즘나무와의 비교에서는 유의미함을 나타내지 않았다($P > 0.05$, Table 6). 하지만 뿌리 부분에 대한 자료와 연구는 거의 없는 실정이다. 게다가 도시림은 산림과 다르게 가지치기와 전정 등 지속적인 관리를 받는다. 이는 뿌리 바이오매스 대 지상부 바이오매스가 상대적으로 적고, 산림보다 더 높게 계수가 산정된 것은 도시림은 산림과 비교하면 척박한 토양에서 성장하는 특징이기에(Setälä and Huhta, 1991), 본 연구에서 산정된 계수를 사용하여 탄소저장량을 산정한다면 타 국가와 지역에서 개발된 고정계수의 사용보다 정확한 값을 산정할 수 있을 것으로 사료된다.

Table 7. Coefficients of allometric equations for estimating biomass by tree part component *M. glyptostroboides*'s diameter at breast height(DBH), diameter at breast height and height($DBH^2 \times \text{Height}$), and polynomial using diameter at breast height($a \times b(DBH) \times c(DBH)^2$).

Species	Model types	Tree component (Y)	Coefficients			R ²	RMSE	P-value
			a	b	c			
<i>M. glyptostroboides</i>	I	Volume (m ³ /tree)	0.000539	1.876	-	0.821	0.033	< 0.001
		Stem wood (kg)	0.437	1.528	-	0.820	6.948	< 0.001
		Stem bark (kg)	0.118	1.254	-	0.707	0.952	< 0.001
		Stem (kg)	0.540	1.495	-	0.822	7.564	< 0.001
		Branches (kg)	0.569	1.290	-	0.704	5.376	< 0.001
		Foliage (kg)	1.414	0.679	-	0.679	1.000	< 0.001
		Roots (kg)	0.746	1.315	-	0.860	4.772	< 0.001
		Aboveground (kg)	1.679	1.315	-	0.826	10.884	< 0.001
		Total (kg)	2.422	1.316	-	0.882	13.959	< 0.001
	II	Volume (m ³ /tree)	0.000634	0.799	-	0.854	0.028	< 0.001
		Stem wood (kg)	0.448	0.627	-	0.851	6.357	< 0.001
		Stem bark (kg)	0.034	0.539	-	0.787	0.793	< 0.001
		Stem (kg)	0.483	0.616	-	0.841	6.754	< 0.001
		Branches (kg)	0.054	0.567	-	0.819	4.022	< 0.001
		Foliage (kg)	1.414	0.293	-	0.761	0.834	< 0.001
		Roots (kg)	0.301	0.538	-	0.866	4.535	< 0.001
		Aboveground (kg)	0.505	0.556	-	0.918	7.541	< 0.001
		Total (kg)	0.787	0.551	-	0.931	9.974	< 0.001
	III	Volume (m ³ /tree)	-0.056152	0.006629	0.000193	0.792	0.032	< 0.001
		Stem wood (kg)	-23.404	3.300	0.003	0.791	6.843	< 0.001
		Stem bark (kg)	6.102	-0.342	0.014	0.732	0.888	< 0.001
		Stem (kg)	-17.302	2.958	0.017	0.794	7.511	< 0.001
		Branches (kg)	73.750	-5.540	0.158	0.878	3.613	< 0.001
		Foliage (kg)	12.803	-0.429	0.016	0.750	0.881	< 0.001
		Roots (kg)	34.664	-1.651	0.091	0.871	4.353	< 0.001
		Aboveground (kg)	69.251	-3.010	0.191	0.865	10.079	< 0.001
		Total (kg)	103.915	-4.661	0.282	0.895	12.595	< 0.001

2. 부위별 바이오매스 상대성장식 개발

본 연구에서 개발된 상대성장식은 독립변수는 총 3개이다(Table 2). Model I, III는 흉고직경을 활용하였고, Model II는 흉고직경과 수고를 함께 활용하였다. 개발된 상대성장식 중 메타세쿼이아는 Model I의 경우 결정계수 값이 0.679~0.882로 계산되었고, RMSE는 0.033~13.959로 도출되었다. 잎이 0.679로 타 부위에 비해 낮은 결정계수 값을 보였다(Table 7). 이는 흉고직경 대비 잎의 바이오매스가 상대적으로 적게 측정되었기 때문이다. Model II에서는 0.761~0.931의 결정계수 값을 보였고, 0.028~9.974의 RMSE가 도출되었다. Model I과 비교하였을 때 모든 부위에서 결정계수 값이 증가하였다. 마지막으로 Model III에서는 0.732~0.895의 결정계수 값을 보였고, 0.032~12.595의

RMSE가 도출되었다. 메타세쿼이아는 R²이나 RMSE를 비교하였을 때, Model II를 사용하여 바이오매스를 산정하는 것이 더욱 정확한 양을 계산할 수 있을 것으로 판단된다.

양버즘나무 또한 모델 3개를 사용하여 부위별 바이오매스 상대성장식을 개발하였다. 모든 모델의 P값이 0.001 미만으로 유의성을 확인하였다(Table 8). 양버즘나무의 Model I에서 부위별 결정계수 값은 0.798~0.925로 도출되었고, 타 부위 대비 수피에서 0.798로 가장 낮은 결정계수 값을 보였다. 수피에서 낮은 결정계수 값을 보인 것은 현장에서 전기톱의 사용 등으로 수피가 유실되어 비롯돼 현장에서 주의가 필요로 할 것으로 판단된다. 한편, Model II에서는 0.842~0.953으로 Model I보다 소폭 상승한 R² 값을 보였으며 Model I보다 정확한 바이오매스를 산정할 수

Table 8. Coefficients of allometric equations for estimating biomass by tree part component *P. occidentalis*'s diameter at breast height(DBH), diameter at breast height and height(DBH²×H), and polynomial using diameter at breast height(a×b(DBH)×c(DBH²)).

Species	Model types	Tree component (Y)	Coefficients			R ²	RMSE	P-value
			a	b	c			
<i>P. occidentalis</i>	I	Volume (m ³ /tree)	0.000634	1.904	-	0.914	0.033	< 0.001
		Stem wood (kg)	0.448	1.754	-	0.894	21.759	< 0.001
		Stem bark (kg)	0.034	1.760	-	0.798	1.767	< 0.001
		Stem (kg)	0.483	1.755	-	0.894	22.850	< 0.001
		Branches (kg)	0.054	2.188	-	0.883	15.232	< 0.001
		Foliage (kg)	1.414	0.679	-	0.876	4.861	< 0.001
		Roots (kg)	0.301	1.751	-	0.858	25.969	< 0.001
		Aboveground (kg)	0.505	1.896	-	0.925	38.794	< 0.001
		Total (kg)	0.787	1.858	-	0.917	62.450	< 0.001
	II	Volume (m ³ /tree)	0.000148	0.821	-	0.953	0.030	< 0.001
		Stem wood (kg)	0.125	0.749	-	0.915	20.094	< 0.001
		Stem bark (kg)	0.008	0.769	-	0.856	1.506	< 0.001
		Stem (kg)	0.133	0.751	-	0.918	20.825	< 0.001
		Branches (kg)	0.013	0.919	-	0.873	15.261	< 0.001
		Foliage (kg)	0.910	0.293	-	0.842	5.366	< 0.001
		Roots (kg)	0.091	0.738	-	0.854	26.529	< 0.001
		Aboveground (kg)	0.133	0.803	-	0.931	37.261	< 0.001
		Total (kg)	0.215	0.756	-	0.921	61.956	< 0.001
	III	Volume (m ³ /tree)	0.109885	-0.012076	0.000779	0.971	0.024	< 0.001
		Stem wood (kg)	65.695	-6.943	0.382	0.944	15.153	< 0.001
		Stem bark (kg)	1.712	-0.135	0.019	0.882	1.629	< 0.001
		Stem (kg)	67.407	-7.078	0.402	0.945	16.152	< 0.001
		Branches (kg)	26.541	-3.923	0.226	0.911	11.910	< 0.001
		Foliage (kg)	5.517	-0.824	0.066	0.920	3.905	< 0.001
Roots (kg)		98.148	-11.288	0.440	0.942	12.875	< 0.001	
Aboveground (kg)		99.465	-11.826	0.694	0.948	27.559	< 0.001	
Total (kg)		197.613	-23.114	1.134	0.952	38.294	< 0.001	

있을 것으로 판단된다. 마지막으로 Model III에서 0.882~0.971로 가장 높은 결정계수 값을 보였다.

양버즘나무의 경우 선행연구에서 바이오매스에 대한 상대생장식의 개발률은 매우 저조하다. Kim and Lee(2016)는 광주광역시 양버즘나무의 재적을 산정하기 위해 흉고직경과 수고를 활용하여 $V(\text{volume})=a \times (\text{DBH})^b$, $a \times (\text{DBH}^2 \times H)^b$ 등 4개의 상대생장식을 개발한 바 있다. Yoon et al.(2013)은 대구광역시 도시림 수종에 대해 재적을 산정할 수 있는 상대생장식을 $V=a \times (\text{DBH})^b$, $a \times (\text{DBH})^b \times C$ 와 수관폭을 활용하여 개발하였다. Park et al.(2018)은 대전광역시에서도 도시림의 재적에 대한 상대생장식을 개발하였다. 세 개의 선행연구 모두 부위별 바이오매스가 아닌 재적을 산정하는 상대생장식을 개발하였다. 선행연구들은 공통적으로 도시림은 전정과 가지치기 등 다양한 관리를 집중적으로 받기 때문에 바이오매스 상대생장식 개발에 어려움이 있었고, 관리 강도에 따라 바이오매스가 달라지기에 동일 수종이 어도 모수가 다르며 개발된 상대생장식을 적용하면 오차가 발생하게 되었다. 또한, 관리 강도뿐만 아니라 환경적 및 지역적 차이에서 오는 성장량의 차이에서도 비롯될 수

있을 것이다. 즉, 바이오매스 상대생장식은 개발이 거의 전무한 상황이다. 그렇기에 본 연구에서 개발된 수목 부위별 바이오매스 상대생장식을 활용하여 바이오매스를 산정하고 이를 활용한 탄소저장량을 산정한다면 훨씬 정확한 양의 바이오매스와 탄소저장량을 산정할 수 있을 것이다.

실제 현장에서 조사한다면 흉고직경은 측정이 용이하지만 수고는 현장에서의 정확한 측정이 어렵다. 특히 가로수는 대부분 도로를 연하는 지역이 대다수이기에 수고 측정은 더욱 어려울 것이다. 산림에서는 임분이 뺄 경우 측정하는데 시간과 비용이 더욱 많이 소요되기 때문에 수고는 일부만 측정하는 것이 일반적이다(Kang et al., 2016). 여러 가지 비용과 시간, 작업의 편리성 등 여러 가지 제한 요인 등에 비교해보았을 때 용인할 수 있는 오차 범위이기에 흉고직경만을 사용한 상대생장식을 사용여도 가능하다. 즉, 본 연구에서는 Model I, III가 해당되는데, 메타세쿼이아는 재적, 목질부, 수피를 포함 줄기는 Model I이 Model III보다 R²이 높았다(Table 9).

양버즘나무도 모든 부위에서 Model III가 결정계수가 높아 적절한 것으로 보이거나(Table 10), 두 수종 모두 Model

Table 9. *M. glyptostroboides*'s allometric equations by tree components and the highest R²(Compared with Model I and Model III).

Species	Tree component(Y)	Y=a(DBH) ^b	R ²	Best equation(Compared with Model I and Model III)	R ²
<i>M. glyptostroboides</i>	Volume (m ³ /tree)	Y=0.000539(DBH) ^{1.876}	0.821	Y=0.000539(DBH) ^{1.876}	0.821
	Stem wood (kg)	Y=0.437(DBH) ^{1.528}	0.820	Y=0.437(DBH) ^{1.528}	0.820
	Stem bark (kg)	Y=0.118(DBH) ^{1.254}	0.707	Y=6.102×(-0.342)(DBH)×0.014(DBH ²)	0.888
	Stem (kg)	Y=0.540(DBH) ^{1.495}	0.822	Y=0.540(DBH) ^{1.495}	0.822
	Branches (kg)	Y=0.569(DBH) ^{1.290}	0.704	Y=73.750×(-5.540)(DBH)×0.158(DBH ²)	0.878
	Foliage (kg)	Y=1.414(DBH) ^{0.679}	0.679	Y=12.803×(-0.429)(DBH)×0.016(DBH ²)	0.750
	Roots (kg)	Y=0.746(DBH) ^{1.315}	0.860	Y=34.664×(-1.651)(DBH)×0.091(DBH ²)	0.871
	Aboveground (kg)	Y=1.679(DBH) ^{1.315}	0.826	Y=69.251×(-3.010)(DBH)×0.191(DBH ²)	0.865
	Total (kg)	Y=2.422(DBH) ^{1.316}	0.882	Y=103.915×(-4.661)(DBH)×0.282(DBH ²)	0.895

Table 10. *P. occidentalis*'s allometric equations by tree components and the highest R²(Copmared with Model I and Model III).

Species	Tree component(Y)	Y=a(DBH) ^b	R ²	Best equation(Compared with Model I and Model III)	R ²
<i>P. occidentalis</i>	Volume (m ³ /tree)	Y=0.000634(DBH) ^{1.904}	0.914	Y=0.109885×(-0.012076)(DBH)×0.000779(DBH ²)	0.971
	Stem wood (kg)	Y=0.448(DBH) ^{1.754}	0.894	Y=65.695×(-6.943)(DBH)×0.382(DBH ²)	0.944
	Stem bark (kg)	Y=0.034(DBH) ^{1.760}	0.798	Y=1.712×(-0.135)(DBH)×0.019(DBH ²)	0.882
	Stem (kg)	Y=0.483(DBH) ^{1.755}	0.894	Y=67.407×(-7.078)(DBH)×0.402(DBH ²)	0.945
	Branches (kg)	Y=0.054(DBH) ^{2.188}	0.883	Y=26.541×(-3.923)(DBH)×0.226(DBH ²)	0.911
	Foliage (kg)	Y=0.037(DBH) ^{2.007}	0.876	Y=5.517×(-0.824)(DBH)×0.066(DBH ²)	0.920
	Roots (kg)	Y=0.301(DBH) ^{1.751}	0.858	Y=98.148×(-11.826)(DBH)×0.694(DBH ²)	0.942
	Aboveground (kg)	Y=0.505(DBH) ^{1.896}	0.925	Y=99.465×(-11.826)(DBH)×0.694(DBH ²)	0.948
	Total (kg)	Y=0.787(DBH) ^{1.858}	0.917	Y=197.613×(-23.114)(DBH)×1.134(DBH ²)	0.952

III로 바이오매스를 산정할 경우 음수값이 나오는 경향이 있어 흉고직경을 활용하여 바이오매스를 산정한다면 Model I을 사용하여 바이오매스를 산정하는 것이 적절하다.

결론

본 연구에서는 정주지 주요 수종인 메타세쿼이아와 양버즘나무의 탄소저장량과 바이오매스를 산정하기 위해 탄소 배출 계수인 목재 기본 밀도, 바이오매스 확장계수, 뿌리 대 지상부 비율을 산정하였으며, 흉고직경, 흉고직경과 수고를 활용한 바이오매스 상대생장식을 개발하였다. 수종별 목재 기본 밀도는 메타세쿼이아 $0.293 \pm 0.008 \text{ g cm}^{-3}$, 양버즘나무 $0.509 \pm 0.018 \text{ g cm}^{-3}$ 이었다. 바이오매스 확장계수는 메타세쿼이아 1.738 ± 0.031 , 양버즘나무 1.561 ± 0.035 였으며, 뿌리 대 지상부 비율은 0.446 ± 0.009 , 0.402 ± 0.012 이었다. 각 계수의 불확도 검사 결과 목재 기본 밀도 2.8%, 3.5%였으며, 바이오매스 확장계수는 1.8%, 2.3%, 뿌리 대 지상부 비율은 2.1%, 2.9%였다. 마지막으로 바이오매스 상대생장식은 $Y=a(\text{DBH})^b$ 의 식인 Model I이 적합하였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 ‘온실가스 저감을 위한 국토도시 공간 계획 및 관리기술 개발 사업(21UMRG-B158194-02)’의 지원에 의해 이루어진 것입니다.

References

- Alden, H.A. 1995. *Hardwoods of North America* (Vol. 83). US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Cairns, M.A., Brown, S., Helmer, E.H. and Baumgardner, G. A. 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia* 111(1): 1-11.
- Cheng, J.C. 1992. *Anatomy and properties of Chinese woods*. Chinese Academy of Forestry.
- Choi, S.E., Ham, B.Y., Song, C.H., Park, E.B., Kim, J.W. and Lee, W.K. 2020. Pilot study and development of activity data for greenhouse gas inventory of settlement categories in Korea: a case of Incheon Seo-gu. *Journal of Climate Change Research* 11(3): 187-196.
- Equiza, M.A., Day, M.E. and Jagels, R. 2006. Physiological responses of three deciduous conifers (*Metasequoia glyptostroboides*, *Taxodium distichum* and *Larix laricina*) to continuous light: adaptive implications for the early Tertiary polar summer. *Tree Physiology* 26(3): 353-364.
- Fujiwara, T., Yamashita, K. and Kuroda, K. 2007. Basic densities as a parameter for estimating the amount of carbon removal by forests and their variation. *Bulletin-forestry and Forest Products Research Institute Ibaraki* 6(4): 215.
- Ha, J.S, Baek, G.W, Choi, B.G, Lee, J.M, Son, Y.H. and Kim, C.S. 2022. Development of allometric equations for carbon storage of ginkgo biloba linn., *Zelkova serrata* (Thunb.) Makino. and *Prunus × yedoense* Matsum. Planted in Jinju-City. *Journal of Climate* 13(2): 135-145.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006. *Guidelines for national greenhouse gas inventories*. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Eggleston HS, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K, editors. Published: IGES, Japan.
- Jo, H.K. 1999. Carbon uptake and emissions in urban landscape, and the role of urban greenspace for several cities in Kangwon Province. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 27(1): 39-53.
- Jo, H.K. and Cho, D.H. 1998. Annual CO₂ uptake by urban popular landscape tree species. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 26(2): 38-53.
- Kang, M.S., Jang, K.S., Son, Y.M., Kim, R.H., Park, I.H. and Lee, K.H. 2016. Allometric equations and biomass expansion of yellow poplar (*Liriodendron tulipifera*) in southern Korea. *Journal of Korean Society of Forest Science* 105(4): 463-471.
- Kim, H.S., Lee, J.Y., Han, S.H., Kim, S.H. and Son, Y.H. 2018. Approaches for developing a forest carbon and nitrogen model through analysis of domestic and overseas models. *Journal of Korean Society of Forest Science* 107(2): 140-150.
- Kim, H.J. and Lee, S.H. 2016. Developing the volume models for 5 major species of street trees in Gwangju metropolitan city of Korea. *Urban forestry & urban greening* 18: 53-58.
- Koo, J.C., Park, M.S. and Youn, Y.C. 2013. Preferences of urban dwellers on urban forest recreational services in South Korea. *Urban Forestry & Urban Greening* 12(2): 200-210.
- Korea Forest Service. 2020. *Korea Forest Service_ Status of street tree (2019, by province)*. Public Data Portal.
- Korea Forest Research Institute. 2010. *Survey manual for biomass and soil carbon*. Samsung Adcom Co.: 60.
- Lee, G.G. 2003. Sustainability indicators of greenspace in apartment sites. The graduate school Seoul National University.
- McHale, M.R., McPherson, E.G. and Burke, I.C. 2007. The potential of urban tree plantings to be cost effective in carbon credit markets. *Urban Forestry & Urban Greening* 6(1): 49-60.

- McPherson, G., Simpson, J., Xiao, Q. and Wu, C. 2007. Los Angeles one million tree canopy cover assessment final report. Center for Urban Forest Research and University of California at Davis.
- Moore, J. 2009. Carbon Sequestration Potential of the Million Trees NYC Initiative. In: USA.
- Návar, J. 2009. Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management* 257(2): 427-434.
- Nowak, D.J. and Crane, D.E. 2002. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental Pollution* 116(3): 381-389.
- Park, E.J. and Jwa, S.H. 2009. Quantification of CO₂ uptake by urban trees and greenspace management for C sequestration. Gyeonggi Research Institute, 1-1.
- Park, E.J. and Kang, K.Y. 2010. Estimation of C storage and annual CO₂ uptake by street trees in Gyeonggi-do. *Korean Journal of Environment and Ecology* 24(5): 591-600.
- Park, J.H., Baek, S.G., Kwon, M.Y., Je, S.M. and Woo, S.Y. 2018. Volumetric equation development and carbon storage estimation of urban forest in Daejeon, Korea. *Forest Science and Technology* 14(2): 97-104.
- Polman, J.E., Michon, S.G.L., Militz, H. and Helmink, A.T.F. 1999. The wood of metasequoia glyptostroboides (Hu et Cheng) of dutch origin. *Holz als Roh- und Werkstoff* 57(3): 215-221. <https://doi.org/10.1007/s001070050044>
- Pyo, J.K., Son, Y.M., Lee, K.H., Kim, R.H., Kim, Y.H. and Lee, Y.J. 2010. Estimating the uncertainty and validation of basic wood density for *Pinus densiflora* in Korea. *Journal of Korean Society of Forest Science* 99(6): 929-933.
- Roy, S., Byrne, J. and Pickering, C. 2012. A systematic quantitative review of urban tree benefits, costs, and assessment methods across cities in different climatic zones. *Urban Forestry & Urban Greening* 11(4): 351-363.
- Seamans, G.S. 2013. Mainstreaming the environmental benefits of street trees. *Urban Forestry & Urban Greening* 12(1): 2-11.
- Setälä, H. and Huhta, V. 1991. Soil fauna increase betula pendula growth: laboratory experiments with coniferous forest floor. *Ecology* 72(2): 665-671.
- Son, Y.M., Lee, K.H., Park, Y.K., Kim, R.H. and Kwon, S.D. 2008. Greenhouse gases absorption and emission factor management plan in the forest sector. Korea Forest Research Institute Research Report, 08-11.
- Son, Y.M., Kim, K.N. and Pyo, J.K. 2016. Developing volume equation of street tree and its carbon stock for urban forest in Seoul. *Journal of Agriculture & Life Science* 50(1): 95-104. <https://doi.org/10.14397/jals.2016.50.1.95>
- Son, Y.M., Lee, K.H., Kim, R.H., Pyo, J.K., Park, I.H., Son, Y.H., Lee, Y.J. and Kim, C.S. 2011. Development of carbon emission factors and biomass allometric equations by major species in Korea [development of carbon emission factors and biomass allometric equations by major species in Korea]. *Journal of Korean Society of Forest Science* 2011: 1088-1090.
- Whittaker, R. H. and Marks, P. L. 1975. Methods of assessing terrestrial productivity. *Primary Productivity of the Biosphere*, pp. 55-118.
- Yang, J., Xu, R., Cai, Z., Bi, J. and Wang, H. 2014. Influencing factors on forest biomass carbon storage in eastern china—a case study of jiangsu province. *BioResources* 9(1): 357-371.
- Yoon, T.K., Park, C.W., Lee, S.J., Ko, S.I., Kim, K.N., Son, Y.M., Lee, K.H., Oh, S.H., Lee, W.K. and Son, Y.H. 2013. Allometric equations for estimating the aboveground volume of five common urban street tree species in Daegu, Korea. *Urban Forestry & Urban Greening* 12(3): 344-349.

Manuscript Received : February 22, 2023

First Revision : April 11, 2023

Second Revision : April 18, 2023

Accepted : April 19, 2023