

진주시에 식재된 은행나무, 느티나무, 왕벚나무의 탄소저장량 추정식에 관한 연구

하지석* · 백경원** · 최병길*** · 이정민**** · 손요환***** · 김춘식*****†

*경상국립대학교 산림융복합학과 석사, **경상국립대학교 산림융복합학과 연구원, ***경상국립대학교 산림융복합학과 박사과정 학생, ****고려대학교 환경생태공학과 석박사통합과정 학생, *****고려대학교 환경생태공학과 교수, *****경상국립대학교 환경산림과학부 교수

Development of Allometric Equations for Carbon Storage of *Ginkgo biloba* Linn., *Zelkova serrata* (Thunb.) Makino. and *Prunus × yedoense* Matsum. Planted in Jinju-City

Ha, Jiseok* · Baek, Gyeongwon** · Choi, Byeonggil*** · Lee, Jeongmin**** · Son, Yowhan***** · Kim, Choonsig*****†

*M.Sc., Dept. of Forest Convergence Science, Gyeongsang National University, Jinju, Korea

**Researcher, Dept. of Forest Convergence Science, Gyeongsang National University, Jinju, Korea

***Ph.D. Student, Dept. of Forest Convergence Science, Gyeongsang National University, Jinju, Korea

****Combined M.Sc./Ph.D. Student, Div. of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

*****Professor, Div. of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

*****Professor, Div. of Environmental and Forest Science, Gyeongsang National University, Jinju, Korea

ABSTRACT

Quantitative evaluation for carbon storage of trees planted in an urban area is important for carbon sequestration management. This study was conducted to develop allometric equations to estimate the carbon storage of three representative urban tree species [*Ginkgo biloba* Linn., *Zelkova serrata* (Thunb.) Makino., and *Prunus × yedoense* Matsum.] planted in Jinju, Gyeongsangnam-do, Korea. Carbon concentrations in tree components were significantly different among three tree species, except for roots and branches. Allometric equations for carbon storage using generalized method of moments with diameter at breast height (DBH) or $DBH^2 \times \text{height}$ (H) as independent variables were significant in all three species with high coefficient of determination ($R^2 = 0.92-0.99$). There was little difference of coefficient of determination and root mean squared errors (RMSE) between allometric equations using DBH and $DBH^2 \times H$ as independent variables. Generalized allometric equations for foliage, branches and aboveground carbon storage for three tree species were significantly different ($P < 0.05$) in regression coefficients (slope). These results suggest that the accuracy of estimates for carbon storage of three tree species planted in an urban area could be improved by using species-specific carbon concentration and species-specific allometric equations.

Key words: Carbon Stock, Climate Change, Street Tree, Tree Biomass, Urban Forest

1. 서론

최근 대기 중 각종 온실가스 배출의 증가는 지구온난화와 같은 극심한 이상기후 문제를 야기하고 있으며(Nowak and Crane, 2002; IPCC, 2006), 이는 무분별한 산림벌채와 화석 연료 사용의 증가 등이 원인으로 알려져 있다. 또한, 세계적인 절반 이상이 도시에 살고 있고 이에 따른 도시화율의

꾸준한 상승은 에너지 사용량을 증가시켜 대기로 이산화탄소 배출이 급격히 증가하고 있다(Roy et al., 2012; Koo et al., 2013). 따라서 기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC)에서는 국가 차원의 온실가스에 관한 보고에 도시지역인 정주지를 포함한 탄소저장량 평가를 요구하고 있다(IPCC, 2006; Kim et al., 2018; Choi et al., 2020; Hong et al., 2021).

정주지에 식재되는 수목은 경관을 아름답게 하여 심미적 안정

†Corresponding author : ckim@gnu.ac.kr (Gyeongsang National University, Jinju, 52725, Korea. Tel. +82-55-772-3247)

ORCID 하지석 0000-0002-0381-227x
백경원 0000-0002-3578-7355
최병길 0000-0003-1202-5136

이정민 0000-0002-6730-6034
손요환 0000-0001-5621-9894
김춘식 0000-0002-3263-1187

감을 주고 미세먼지와 같은 대기오염물질을 차단하며 열섬현상을 완화하는 등 도시 생태계의 유지와 관리에 중요한 역할을 한다(Park and Kang, 2010; Seamans, 2013). 또한, 도시 내 수목의 이산화탄소 흡수 효과는 상당한 것으로 알려져 있으며, 기후 변화관점에서 도시 수목의 탄소저장량 평가는 탄소흡수에서 중요한 쟁점으로 등장하고 있다(Roy et al., 2012; Choi et al., 2020).

도시림 내 수목의 탄소저장량은 산림 내 임목 바이오매스 추정 상대생장식이나(Rubilar et al., 2005; Gao et al., 2015; Kim et al., 2016), 레이저 텐드로미터로 임목 재적 산출 후 바이오매스 확장계수 등을 이용하여 탄소저장량으로 전환하기도 하며(Yoon et al., 2013; Son et al., 2016; Dong et al., 2020), 최근에는 원격탐사 자료(Wu, 2019) 등 대부분 비파괴적 방법으로 탄소저장량을 추정하고 있다. 그러나 도시 수목은 전정이나 가지치기 같은 인위적인 관리가 빈번하고 입지환경 조건의 차로 인하여 일반 자연상태의 수목과는 생육상태가 다르기 때문에 이들 방법에 의한 탄소저장량의 정확한 산정에는 어려움이 있다. 또한, 도시 수목의 탄소저장량 산출을 위해 임목 바이오매스에 탄소전환계수 0.5를 곱하여 탄소저장량으로 환산한 후 상대생장식이 개발되기도 하나(Liu and Li, 2012; Yoon et al., 2013; Dorendorf et al., 2015), 도시수목의 다양성을 고려하지 않은 상태에서 일괄적인 탄소 전환계수 이용은 임목의 탄소 농도가 수종이나 임목 부위에 따라 차이가 있기 때문에 추정치에 오차가 발생할 수 있다(Ma et al., 2018).

도시지역은 경관적인 면에서 다양한 수종이 기능에 따라 식재되고 있으며 특히 벚나무, 은행나무, 느티나무는 도시 녹지 공간에 가장 많이 식재되는 수종으로, 이들 3개 수종의 탄소저장량은 타 도시 녹지 수종에 비해 가장 많은 것으로 알려져 있다(Park and Kang, 2010). 또한 왕벚나무와 은행나무는 내공해성 뿐만 아니라 척박한 입지에서 잘 적응하고, 느티나무는 내건성이 양호하여 도시지역 환경에 적합한 수종으로 추천되고 있어(Oh et al., 2020) 앞으로도 이들 수종에 대한 식재면적의 증가가 기대된다.

도시 수목의 탄소저장량에 대한 정확한 산정을 위해서는 상대생장식의 개발이 필요하다. 그러나 시간, 노동력, 경비 등의 제한 요인으로 인하여 도시 수목을 대상으로 한 상대생장식의 개발은 매우 미흡한 편이다. 국내에서도 도시 수목을 대상으로 상대생장식 개발을 위한 연구가 실시된 바 있으나, 실제 식재지가 아닌 조경수 재배지를 대상으로 하거나, 임목 탄소 농도가 측정되지 않은 상태에서 상대생장식이 개발된 바 있으며(Jo and Ahn, 2012), 임목의 지상부와 지하부 바이오매스 비율 환산에 중요한 뿌리 바이오매스 자료는 매우 미흡한

편이다. 본 연구는 도시지역의 가로수나 도시녹지에 주로 식재되는 은행나무, 왕벚나무, 느티나무를 대상으로 현장 별채 및 뿌리 굴취를 통하여 1) 임목 부위별 탄소 농도가 수종별 차이가 있는지를 조사하고, 2) 임목 부위별 탄소저장량을 추정하기 위한 상대생장식의 제시를 연구목적으로 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사지 개황

본 연구는 경상남도 진주시 내동면(35°9'38"N; 128°4'58"E)에 위치하였다. 이 지역은 대학의 종합농장에 인접하여 가로수로 활용되거나 조경용으로 식재된 은행나무, 왕벚나무, 느티나무 등이 분포하고 있었다(Fig. 1). 표본목이 위치한 지역의 하층식생으로는 개망초(*Erigeron annuus* (L.) Pers.), 쯤(*Pueraria montana* var. *lobata* (Willd.) Sanjappa & Pradeep), 거북고리(*Boehmeria tricuspis* (Hance) Makino), 팽나무(*Celtis sinensis* Pers.), 찔레(*Rosa multiflora* Thunb.), 환삼덩굴(*Humulus japonicus* Siebold & Zucc.), 싸리류(*Lespedeza* spp.) 등이 산재하였다.

2.2. 표본목 시료 채취 및 분석방법

상대생장식 개발을 위한 표본목은 2020년 5월 수종별 흉고직경급이 고르게 분포되도록 각 5분씩 총 15본을 선정하였다(Fig. 2). 본 연구에서 수종별 임목의 탄소저장량 추정을 위한 시료채취 방법은 산림지에서 실시되는 임목 바이오매스 측정 방법을 이용하였다(Korea Forest Research Institute, 2010). 한편, 도시 임목의 경우 공간적으로 좁은 범위에서 동일 수종의 경우도 조경이나 가로수 등 용도에 따라 성장 특성이 다를 수 있기 때문에 상대생장식의 개발을 위해서는 다양한 크기의 표본목 선정이 필요하다. 그러나 표본목 선정시 다양한 흉고직경급의 임목을 한 장소에서 선정하기 어려워 본 연구에서는 은행나무 표본목 5본 중 흉고직경 15 cm 이하의 3본은 조경수로 식재된 지역에서 선정되었으며, 흉고직경 30 cm 정도의 대경목 2본은 10년 전 도로와 경작지 사이의 완충대에 이식된 은행나무(Fig. 1)를 대상으로 하였다. 왕벚나무 표본목은 흉고직경 30 cm 정도의 대경목 1본은 포장도로에 인접하지만 보도블럭이 없는 토양에서 생육한 가로수 1본을 선정하였고, 나머지 4본은 시멘트 포장도로를 따라 보도블럭이 없는 토양에 가로수로 식재된 임목을 대상으로 하였다. 느티나무는 조경수 생산을 위해 식재되고 이식된 적이 없어 다양한 흉고직경급이 분포하였다. 선정된 표본

목의 경우 은행나무 대경목은 두목작업과 가지치기가 실시되었으나 나머지 은행나무 3본과 느티나무, 왕벚나무는 자연 상태로 생육하고 있었다. 상대생장식 개발을 위해 선정된 표본목은 지상으로부터 0.2 m 높이를 기계톱을 이용하여 벌채하고(Fig. 1), 줄자로 흉고직경, 수고, 수관폭, 지하고 등을 측정하였다. 벌채된 표본목의 0.2 m ~ 1.2 m는 1 m, 1.2 m 이상은 2 m 간격으로 절단하고 전자저울로 줄기 생증량을 측정하였으며, 줄기 건증량 환산을 위해 5 cm 길이의 원판을 채취하였다. 줄기를 제외한 가지 및 잎 등도 현지에서 분리한 후 전자저울로 생증량을 측정하고 건증량 환산과 탄소 농도 분석을 위한 시료를 일부 채취하였다. 벌채된 임목의 뿌리는 굴삭기로 굴취하였고, 생증량 측정 후 잔뿌리와 굵은 뿌리가 골고루 섞이도록 시료를 채취하여 실험실로 운반하였다. 채취된 잎, 가지, 줄기 원판과 수돗물로 세척한 뿌리 시료는 85°C 온풍 건조기에서 향량에 도달할 때까지 건조하였다.

각 수종의 부위별 시료는 건증량 측정 후 분쇄하여 0.425 mm 체(US standard No. 40)로 분석용 시료를 조제하고 원소분석기(Vario Macro Cube, Langensbold, Germany)로 탄소 농도를 분석하였다. 임목 부위별 탄소저장량은 탄소 농도에 임목 부위별 건증량을 곱하여 계산하였다. 도시 수목의 탄소저장량 추정식은 흉고직경, 수고, 수관폭 등을 독립변수 이용한 추정식을 주로 이용하나(Coombes et al., 2019), 본 연구에서는 도시 수목의 탄소저장량 추정에 적합도가 높은 것으로 알려진(Yoon et al., 2013; Dorendorf et al., 2015) 흉고직경(DBH)이나 $DBH^2 \times$ 수고(H)를 독립변수로 하고 임목 부위별 탄소저장량(y)을 종속변수로 하는 상대생장식 $[\log_{10}y = a + b \times \log_{10}(DBH \text{ 또는 } DBH^2 \times H)]$ 을 개발하였다.

2.3. 토양 특성

표본목이 위치한 지점의 토양 성질 분석을 위하여 400 cm³ 크기의 원통형 토양 채취기로 0 cm ~ 10 cm 깊이의 토양 시료를 채취하고 지퍼백에 밀봉하여 실험실로 운반하였다. 실험실로 운반된 토양은 건조 후 2 mm 체(ASTM No. 10)로 분석 시료를 조제하고 토양입경분포는 비중계법(Kalra and Maynard, 1991), 토양 pH와 EC는(토양:증류수, 1:5) 이온전극(Istec 735-P, Korea)과 EC메터(Orion 3 star conductivity, Singapore)로 측정하였다. 토양 유기탄소와 전질소는 원소분석기(Vario Macro cube, Langensbold, Germany), 인, 칼륨, 칼슘, 마그네슘은 2.5 g의 건조 토양에 암모늄 아세테이트 용액 55 ml를 첨가하여 16시간 동안 진공 추출 후(Kalra and Maynard, 1991) ICP (Perkin Elmer Optima 5300, USA)로 분석하였다.

2.4. 자료 분석

본 연구에서 표본수는 수종 별 5본으로 시료 수가 적고 로그 상대생장식은 이분산성(heteroscedasticity)이 발생할 수 있기 때문에 소규모 표본목의 상대생장식에 적합한 방법으로 알려진 일반화적률추정법(generalized method of moments)에 의한 상대생장식(Bi et al., 2004; Wang et al., 2018)을 SAS의 Proc Model Procedure (SAS Institute Inc., 2003)로 계산하였다. 수종 간 또는 임목 부위별 바이오매스 점유비율과 탄소 농도는 표본목의 임령을 공변이로 하는 공분산분석을 SAS의 Proc GLM Procedure로 유의성 검정 후($P < 0.05$), Least square means에 의해 평균을 비교하였다. 또한 로그를 이용한 상대생장 추정식에서 나타날 수 있는 편향(bias)에 대한 보정 인자(Correction factor, CF)도 제시하였다(Sprugel, 1983).

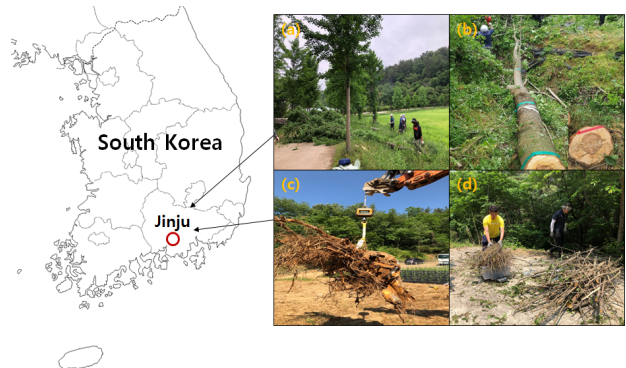


Fig. 1. Location of the study site and samplings of *Ginkgo biloba* (a), *Prunus x yedoense* (b), root biomass of *Zelkova serrata* (c), and branch biomass of *Prunus x yedoense* (d)

3. 결과 및 고찰

3.1. 표본목 현황

조사된 표본목의 평균 임령은 은행나무가 23년으로 가장 높고 느티나무가 21년, 왕벚나무는 14년으로 가장 낮았다. 수종 간 임령의 상당한 차이에도 불구하고 흉고직경과 수고 등은 큰 차이가 없었으며 이는 왕벚나무의 생육이 은행나무와 느티나무에 비해 빠름을 시사한다. 그러나 수관 폭의 경우 은행나무가 왕벚나무나 느티나무에 비해 가장 적었으며 이는 등글거나 반구형의 수관형을 가진 왕벚나무나 느티나무에 비해 은행나무는 원추형이고 두목작업이나 가지치기 등이 빈번하게 실시되었기 때문으로 알려져 있다(Park and Kang, 2010).

본 연구에서도 두목작업이 실시된 은행나무 대경목 2본은 45년생의 수고가 9.7 m로 26년생의 왕벚나무 대경목 10.3 m나 27년생의 느티나무 대경목 11.7 m보다 작게 나타났다.

3.2. 토양 특성

표본목이 채취된 인접 주위의 토양성질 중 토양용적밀도는 산림지와 인접한 느티나무 식재지가 0.87 g cm⁻³로 가로수 식재지인 왕벚나무의 토양 용적밀도 1.06 g cm⁻³에 비해 유의적으로 낮았다. 이는 가로수 식재지의 경우 포장과정 동안 절토나 성토 등과 같은 교란에 의해 토양용적밀도가 높게 나타난 것으로 사료된다. 본 연구 결과는 국내에서 조사된 가로수 식재지의 토양용적밀도 1.04 g cm⁻³ ~ 1.07 g cm⁻³ (Yoon et al., 2016)과 큰 차이는 없었다. 토양 입경 분포 및 석력 함량은 식재기간 유의적인 차이가 없었으며 이는 소규모 공간적 범위에서 조사가 실시되어 변이 폭이 크지 않았기 때문으로 사료된다. 토양 pH, 토양 EC, 유효인산, 칼륨, 칼슘 등은 은행나무 식재지가 왕벚나무나 느티나무 식재지에 비해 높아 인접 경작지의 시비에 따른 영향이 어느 정도 나타난 것으로 사료되었다. 그러나 유기 탄소나 전질소는 산림지에 인접하여 생육한 느티나무 식재지가 가로수 식재지인 왕벚나무나, 조경용으로 식재되거나 도로에 인접한 은행나무 식재지에 비해 유의적으로 높았으며, 이는 토양 유기물의 주요한 구성원인 낙엽·낙지 등에 의한 물질 순환이 이들 지역에서는 빈약하기 때문으로 사료된다. 본 조사지의 토양 유기탄소 농도는 국내에서 조사된 대도시 가로수 식재지의 토양 유기

탄소 농도 0.89% (Yoon et al., 2016)에 비해 약간 높은 값을 보였다.

3.3. 표본목의 부위별 바이오매스 및 분포 비

표본목의 바이오매스 중 유사한 흉고직경에서 줄기나 뿌리 같은 목질부는 느티나무 > 왕벚나무 > 은행나무 순으로 나타났다. 이는 수종 간 목재 전건비중 차가 원인으로 사료되며, 느티나무 목질부의 전건비중은 0.64 g cm⁻³, 벚나무는 0.59 g cm⁻³ (Chong and Park 2008), 은행나무는 0.47 g cm⁻³ ~ 0.51 g cm⁻³로 보고된 바 있다(Purusatama et al., 2018). 잎과 가지는 은행나무가 느티나무나 왕벚나무에 비해 가장 낮은 값을 보이고 있으며, 이는 은행나무 대경목의 경우 두목작업 및 가지치기 같은 인위적 영향이 크게 나타났기 때문으로 사료된다. 예를 들면 흉고직경이 가장 큰 수종의 최대 수관폭은 은행나무 5.5 m, 느티나무 9.2 m, 왕벚나무 9.9 m로(Table 1) 느티나무와 왕벚나무는 은행나무에 비해 약 1.7배 이상 크게 나타났다.

표본목의 부위별 평균 바이오매스는 줄기 수피를 제외한 줄기 목질부, 가지, 잎, 뿌리, 지상부 및 총 바이오매스 량 모두 느티나무가 가장 높게 나타났으나, 줄기 수피는 수피가 잘 발달한 은행나무가(Fig. 2) 느티나무나 왕벚나무에 비해 높은 값을 보였다. 한편 수관부를 이루는 가지와 잎은 느티나무가 가장 높은 값을 보이고 있으며, 이는 느티나무는 수관의 발달이 왕성하고 광합성 산물의 가지 분배량이 높기 때문으로 알려져 있다(Chen et al., 2021).

Table 1. General characteristics of the three sampled tree species

Species	No. of sample tree	Tree age (yr)	DBH (cm)	Height (m)	Crown width (m)	Clear bole length (m)
<i>Ginkgo biloba</i>	5	23 (7.1)/11-45*	17.6(5.1)/5.4-31.3	7.8(0.9)/4.3-9.7	3.5(0.7)/2.0-5.5	2.6(0.6)/1.5-4.9
<i>Prunus × yedoense</i>	5	14(3.3)/6-26	15.6(4.6)/4.3-31.1	7.7(0.9)/5.7-10.3	6.2(1.3)/3.3-9.9	2.0(0.5)/1.4-4.2
<i>Zelkova serrata</i>	5	21(2.7)/12-27	16.8 (4.1)/6.1-27.9	9.5(0.8)/7.6-11.7	6.6(0.8)/4.5-9.2	2.0(0.3)/1.6-3.6

*mean (one standard error of the mean)/range

Table 2. Soil physical and chemical properties of tree sampling sites

Species	Bulk density (g cm ⁻³)	Coarse fragment (g g ⁻¹)	Soil particle distribution (%)			Soil pH	EC (uS cm ⁻¹)	Organic C (%)	Total N (%)	Extractable P (mg kg ⁻¹)	Exchangeable (cmolc kg ⁻¹)		
			Sand	Silt	Clay						K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
<i>Ginkgo biloba</i>	1.03 (0.04) ab	0.17 (0.03) a	39.3 (0.7) a	38.3 (1.7) a	22.3 (1.5) b	7.29 (0.07) a	324 (58.0) a	1.29 (0.12) b	0.28 (0.02) b	7.40 (1.4) a	0.31 (0.04) a	9.60 (1.02) a	0.75 (0.15) b
<i>Prunus × yedoensis</i>	1.06 (0.05) a	0.28 (0.07) a	31.3 (4.4) a	38.7 (4.4) a	30.0 (1.2) a	5.84 (0.21) b	126 (8.0) b	1.09 (0.19) b	0.29 (0.02) b	1.53 (1.53) b	0.27 (0.03) a	3.67 (0.97) b	1.40 (0.19) ab
<i>Zelkova serrata</i>	0.87 (0.05) b	0.21 (0.03) a	31.3 (5.7) a	38.9 (4.1) a	30.3 (2.1) a	5.85 (0.10) b	127 (13.0) b	2.46 (0.39) a	0.38 (0.02) a	3.50 (1.26) ab	0.23 (0.02) a	5.74 (0.76) b	1.71 (0.24) a

Values in parenthesis represent one standard error of the mean. Different letters at each column indicate a significant difference among three tree species at P < 0.05.

임목 부위별 바이오매스 점유 비율 중 수간 목질부 비율은 은행나무 40.9%, 왕벚나무 33.6%, 느티나무 30.7%로 은행나무가 타 수종에 비하여 높게 나타났으나 유의적 차이는 없었다($P > 0.05$). 줄기 수피 비율은 은행나무가 6.3%로 느티나무 4.0%와 왕벚나무 3.0%에 비해 유의적으로 높았으며($P < 0.05$), 수피가 잘 발달하는 은행나무의 특성을 보여주고 있다(Fig. 3). 가지 분포 비율은 느티나무 31.5%, 왕벚나무 30.4%, 은행나무 19.5%로 느티나무가 은행나무에 비해 유의적으로($P < 0.05$) 높은 비율을 보였다. 특히 느티나무의 줄기 비율은 가장 낮고 가지 비율은 가장 높았으며, 이는 주간을 제외한 굵은 가지 비율이 타 수종에 비하여 높았기 때문으로 사료 된다. 유사한 결과가 타이완 느티나무 조림지에서도 관찰되었으며, Chen et al.(2021)은 느티나무

의 경우 흉고직경 1 cm 증가에 따라 줄기 바이오매스는 1.9%, 가지 바이오매스는 2.2% 증가하는 경향을 보고한 바 있다. 엽량의 비율은 느티나무 4.2%, 은행나무 4.4%, 왕벚나무 6.2%로 왕벚나무의 비율이 가장 높으나 수종 간 유의적인 차이는 없었다. 본 연구에서 조사된 은행나무 엽량 비율은 국내에서 조사된 은행나무 15년생 조림지의 엽량 비율 10% 보다는(Son and Kim, 1998) 낮아 대경목의 두목작업이나 가지치기의 영향으로 엽량이 낮게 나타난 것으로 사료된다. 그러나 일본 교토시 은행나무 50년생 가로수 엽량 비율은 5.1%로 본 연구 결과와 큰 차이는 없었다(Shoda et al., 2019). 은행나무 뿌리 바이오매스 비율은 28%로서 중국 장쑤성 은행나무 조림지의 뿌리 바이오매스 비율 26%(Liu et al., 2017)와 큰 차이는 없었다. 한편, Jo and

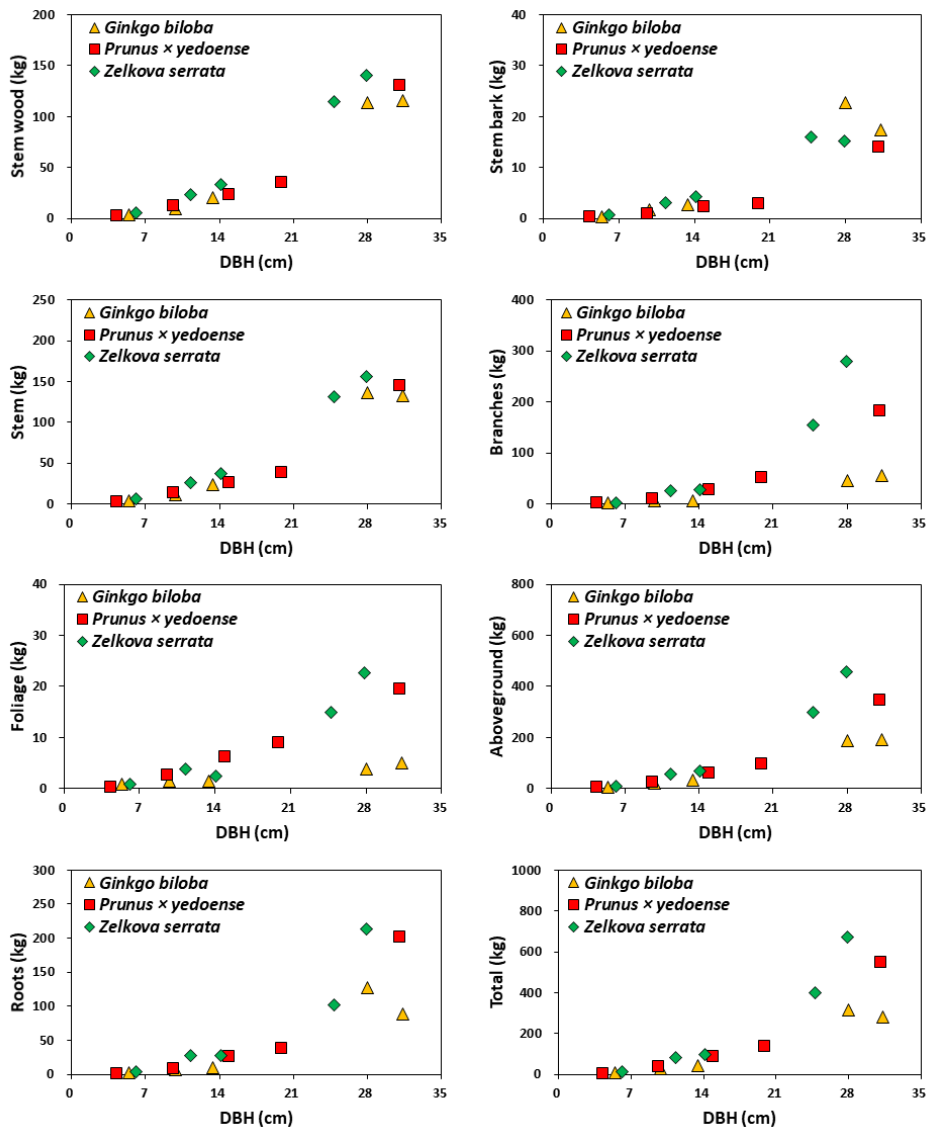


Fig. 2. Scatter plots of biomass in tree components of three tree species

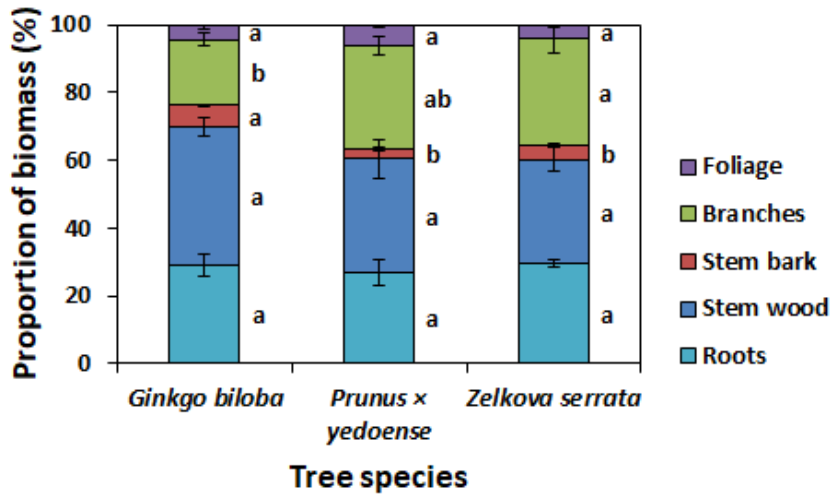


Fig. 3. Proportion of biomass distribution in tree components of three tree species. Vertical bars indicate one standard error of the mean. Different letters among three tree species in each tree component represent a significant difference at $P < 0.05$

Table 3. Mean biomass in tree components of sampled tree species

Species	Stem wood	Stem bark	Branches	Foliage	Roots	Above-ground	Total
	(kg tree ⁻¹)						
<i>Ginkgo biloba</i>	52.6 (25.5) /3.2-115.6	9.0 (4.6) /0.41-22.8	23.0 (11.3) /2.1-54.9	2.5 (0.8) /0.9-5.1	46.8 (25.8) /2.3-127.3	87.2 (41.9) /6.5-192.9	133 (67.2) /8.8-313
<i>Prunus x yedoense</i>	40.9 (23.1) /2.8-130.7	4.0 (2.5) /0.24-14.0	54.1 (32.9) /1.0-181.5	7.5 (3.3) /0.3-19.5	55.0 (37.2) /0.7-201.4	106.5 (61.8) /4.3-345.7	116.5 (98.9) /4.9-547
<i>Zelkova serrata</i>	63.5 (26.9) /5.5-140.8	7.9 (3.2) /0.76-16.0	97.7 (52.5) /2.4-278.8	8.9 (4.2) /0.9-22.6	74.8 (38.4) /3.9-213.7	178.0 (86.1) /9.6-457.5	252.9 (124.1) /13.5-671.3

*mean (one standard error of the mean)/range

Ahn (2012)은 느티나무와 왕벚나무의 바이오매스 분포 비율은 줄기 41%~44%, 뿌리 26%~30%, 가지 21%~26%, 잎 4%~7% 순으로 보고하고 있으나, 본 연구는 줄기 > 가지 > 뿌리 > 잎 > 줄기 수피 순으로 다르게 나타나 관리방법이나 입지환경 조건 등으로 인하여 바이오매스 분포비율에 차이가 발생할 수 있음을 시사한다.

3.4. 수종 및 부위별 탄소 농도 비교

임목의 잎, 줄기 목질부, 줄기 수피 등의 탄소 농도는 수종 간 유의적인 차이가 있었으나 가지와 뿌리의 탄소 농도는 차이가 없었다($P > 0.05$). 줄기 목질부 탄소 농도는 침엽수류인 은행나무가 낙엽활엽수류인 왕벚나무에 비해 유의적으로 높았으나, 잎 탄소 농도는 느티나무가 왕벚나무나 은행나무에 비해 유의적으로 낮았다(Fig. 4). 임목의 탄소 농도는 유전적·환경적 요인들의 상호작용에 따라 다르게 나타나는 것으로 알려져 있다(Bert and Danjon, 2006; Martin et al., 2015; Kim, 2019). 예를 들면 줄기 목질부의 탄소 농도는 본 연구 결과와 유사하게 침엽수류가 활엽수류에 비

해 높은 목질부 탄소 농도를 가지는 것으로 알려져 있다(Thomas and Martin, 2012; Ma et al., 2018). 이러한 수종 간 탄소 농도의 차이는 바이오매스 구성성분인 리그닌이나 셀룰로오스가 수종 및 임목 부위별로 다양한 변이를 보이기 때문으로 보고되고 있다(Bert and Danjon, 2006; Ma et al., 2018). 예를 들면, 줄기 목질부의 리그닌 양은 느티나무 22.5%, 벚나무 19.1%(Chong and Park, 2008)에 비해 은행나무는 33%(Timell, 1960)로, 본 연구에서 나타난 은행나무 목질부의 높은 탄소 농도는 수종 간 리그닌 양의 차이가 원인일 가능성이 있다. 잎 내 탄소 농도는 느티나무가 은행나무나 왕벚나무에 비해 낮은 값을 보였으며, 이는 일반적으로 잎 내 양분함량과 탄소 농도 사이 부의 상관성이 있음을 고려할 때(Kim, 2019), 토양 특성이 양호한 지역에서(Table 2) 생육한 느티나무의 탄소 농도가 낮게 나타난 것으로 사료된다. 그러나 목질부 수피 농도의 차는 수피에 포함되는 양분이나 리그닌 함량 등의 차와 함께 생리적·화학적 차이가 원인(Herrero de Aza et al., 2011; Thomas and Martin, 2012; Morhart et al., 2016)으로 알려져 있다.

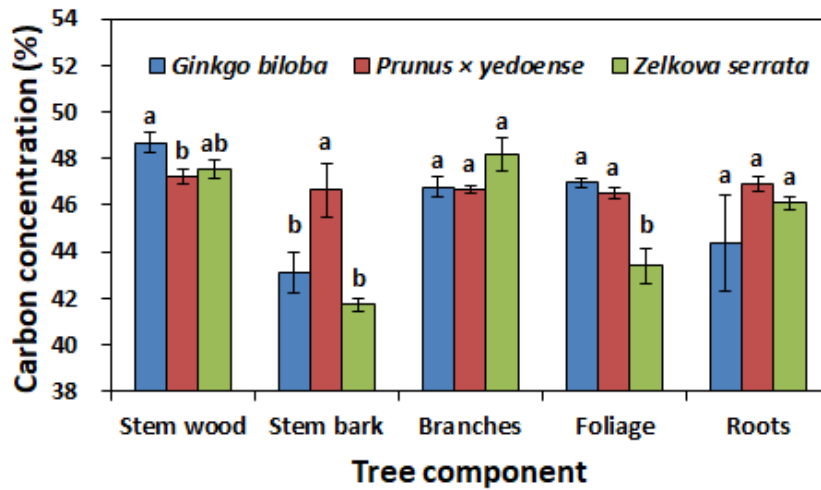


Fig. 4. Carbon concentration for tree components in three tree species. Vertical bars indicate one standard error of the mean. Different letters on the bar of each tree component represent a significant difference at $P < 0.05$ among three tree species

Table 4. Allometric equations by generalized method of moments with DBH (cm) as independent variables for carbon content in tree components in three tree species

Tree species	Tree component (y)	Regression coefficient		R^2	RMSE	CF	Slope P -value
		a	b				
<i>Ginkgo biloba</i> (n=5)	Stem wood (kg)	0.5928	2.1424	0.9965	0.0466	1.0025	
	Stem bark (kg)	-0.3908	2.2402	0.9773	0.1259	1.0184	
	Branches (kg)	0.4998	1.9254	0.9674	0.1302	1.0197	
	Foliage (kg)	0.8395	0.9834	0.9451	0.0873	1.0088	
	Roots (kg)	0.0192	2.4661	0.9666	0.1690	1.0334	
	Aboveground (kg)	0.9657	2.0205	0.9931	0.0621	1.0044	
	Total (kg)	0.9593	2.1491	0.9854	0.0965	1.0108	
<i>Prunus x yedoense</i> (n=5)	Stem wood (kg)	0.8926	1.8760	0.9814	0.0977	1.0111	
	Stem bark (kg)	-0.1866	1.8991	0.9713	0.1235	1.0177	
	Branches (kg)	0.0791	2.5739	0.9960	0.0620	1.0044	
	Foliage (kg)	-0.0983	2.1070	0.9811	0.1107	1.0142	
	Roots (kg)	-0.2532	2.8111	0.9886	0.1142	1.0151	
	Aboveground (kg)	0.9343	2.1563	0.9940	0.0634	1.0046	
	Total (kg)	0.9032	2.3083	0.9928	0.0744	1.0064	
<i>Zelkova serrata</i> (n=5)	Stem wood (kg)	0.7347	2.1536	0.9983	0.0278	1.0009	
	Stem bark (kg)	-0.0693	2.0317	0.9901	0.0630	1.0046	
	Branches (kg)	-0.2589	3.0154	0.9781	0.1400	1.0228	
	Foliage (kg)	-0.0562	2.0453	0.9342	0.1684	1.0332	
	Roots (kg)	0.3649	2.4532	0.9744	0.1232	1.0176	
	Aboveground (kg)	0.6938	2.5057	0.9905	0.0763	1.0067	
	Total (kg)	0.8592	2.4916	0.9871	0.0884	1.0091	
Generalized (n=15)	Stem wood (kg)	0.7435	2.0568	0.9719	0.1033	1.0124	0.15
	Stem bark (kg)	-0.2491	2.0881	0.9406	0.1549	1.0280	0.39
	Branches (kg)	0.1696	2.4502	0.8724	0.2766	1.0921	0.01
	Foliage (kg)	0.2768	1.6654	0.7874	0.2554	1.0780	0.01
	Roots (kg)	0.0068	2.6058	0.9410	0.1926	1.0436	0.45
	Aboveground (kg)	0.8937	2.2036	0.9488	0.1511	1.0266	0.04
	Total (kg)	0.9208	2.3050	0.9508	0.1548	1.0280	0.31

Allometric equation is $\log_{10}y = a + b \times \log_{10}(\text{DBH})$. The R^2 is the coefficient of determination. P -values represent the significance of the equations. RMSE: root means squared error. CF: correction factor.

3.5. 탄소저장량 추정식

각 수종 및 부위별 탄소저장량(줄기 목질부, 줄기 수피, 가지, 잎, 뿌리, 지상부, 총량)과 DBH 또는 $DBH^2 \times H$ 를 독립변수로 하는 상대성장식은 모두 유의성($P < 0.05$)이 인정되었으며 결정계수 값($R^2 = 0.92 \sim 0.99$)도 3 수종 모두 높게 나타났다(Table 4, 5). 이들 상대성장식의 결정계수가 높게 나타난 것은 표본목의 수가 적고 흉고직경 사이의 범위가 넓어 직경생장에 따른 임목 부위별 탄소저장량의 상대성장 관계가 뚜렷하였기 때문이며 표본목 수가 적은 경우 선형 회귀의 예측력이 높게 나타난다는 결과와 일치하였다(Chen et al., 2021). 또한, 본 연구 결과는 Jo and Ahn (2012)이 보고한 우리나라 중부지역 조경수를 대상으로 흉고직경을 독립변수로 하는 탄소저장량 추정 로그 상대성장식의 결정계수 0.97 ~ 0.99와도 유사하였다. 임목 각 부위 탄소저장량 추정 상대성장식은 DBH와 $DBH^2 \times H$ 사이에

결정계수 값이나 RMSE 차가 크지 않아 현장 조사 시 수고 측정에 투입되는 시간을 고려할 때 흉고직경만을 독립변수로 하는 상대성장식의 활용성이 더 높을 것으로 사료된다. 한편, 잎 탄소저장량 추정 상대성장식의 결정계수는 줄기, 가지, 지상부 총량 등 타 임목 부위에 비하여 비교적 낮게 나타나는 경향을 보였다. 수종별 지상부 탄소저장량 추정 상대성장 계수(b, slope)는 느티나무가 2.5057로 왕벚나무 2.1563이나 은행나무 2.0205에 비해 가장 크게 나타나 흉고 직경급 증가에 따른 탄소저장량의 증가가 가장 큰 수종으로 조사되었다. 한편, 조사된 3개 수종의 일괄상대성장식 개발을 위해 회귀계수에 대한 유의성을 검정한 결과 독립변수를 DBH로 한 상대성장식은 가지, 잎, 지상부 탄소저장량, $DBH^2 \times H$ 상대성장식은 줄기 목질부, 가지, 잎 등에서 수종 간 회귀계수에 유의적인 차이가 나타나, 도시 수목의 경우 이들 부위에 대한 일괄상대성장식의 적용은 어려울 것으로 나타났다.

Table 5. Allometric equations by $DBH (cm)^2 \times H (m)$ of generalized method of moments with DBH (cm) as independent variables for carbon content in tree components in three tree species

Tree species	Tree component (y)	Regression coefficient		R^2	RMSE	CF	Slope P-value
		a	b				
<i>Ginkgo biloba</i> (n=5)	Stem wood (kg)	0.2449	0.8862	0.9811	0.1088	1.0137	
	Stem bark (kg)	-0.7551	0.9269	0.9625	0.1618	1.0306	
	Branches (kg)	0.2008	0.7922	0.9423	0.1733	1.0352	
	Foliage (kg)	0.6876	0.4043	0.9192	0.1060	1.0130	
	Roots (kg)	-0.3554	1.0120	0.9365	0.2329	1.0644	
	Aboveground (kg)	0.6433	0.8340	0.9735	0.1217	1.0172	
	Total (kg)	0.6226	0.8852	0.9618	0.1560	1.0284	
<i>Prunus yedoense</i> (n=5)	Stem wood (kg)	0.4738	0.8087	0.9798	0.1018	1.0120	
	Stem bark (kg)	-0.6190	0.8215	0.9764	0.1119	1.0145	
	Branches (kg)	-0.4858	1.1064	0.9887	0.1035	1.0124	
	Foliage (kg)	-0.5522	0.9029	0.9681	0.1437	1.0241	
	Roots (kg)	-0.8701	1.2084	0.9815	0.1456	1.0247	
	Aboveground (kg)	0.4561	0.9285	0.9903	0.0807	1.0075	
	Total (kg)	0.3915	0.9939	0.9889	0.0922	1.0098	
<i>Zelkova serrata</i> (n=5)	Stem wood (kg)	0.1225	0.9458	0.9968	0.0379	1.0017	
	Stem bark (kg)	-0.6439	0.8914	0.9866	0.0734	1.0062	
	Branches (kg)	-1.1313	1.3289	0.9833	0.1220	1.0173	
	Foliage (kg)	-0.6742	0.9093	0.9559	0.1378	1.0221	
	Roots (kg)	-0.3457	1.0814	0.9802	0.1085	1.0136	
	Aboveground (kg)	-0.0292	1.1037	0.9949	0.0560	1.0036	
	Total (kg)	0.1393	1.0978	0.9919	0.0701	1.0057	
Generalized (n=15)	Stem wood (kg)	0.2897	0.8787	0.9773	0.0927	1.0099	0.04
	Stem bark (kg)	-0.7135	0.8932	0.9483	0.1445	1.0243	0.65
	Branches (kg)	-0.3829	1.0505	0.8835	0.2643	1.0837	0.01
	Foliage (kg)	-0.0890	0.7110	0.7907	0.2534	1.0768	<0.01
	Roots (kg)	-0.5683	1.1133	0.9464	0.1836	1.0396	0.48
	Aboveground (kg)	0.4023	0.9431	0.9574	0.1378	1.0221	0.06
	Total (kg)	0.4087	0.9859	0.9582	0.1426	1.0237	0.24

Allometric equation is $\log_{10}y = a + b \times \log_{10}(DBH^2 \times H)$. The R^2 is the coefficient of determination. P-values represent the significance of the equations. RMSE: root means squared error. CF: correction factor.

4. 결론

경상남도 진주시를 대상으로 도시 내 조경수목으로 주로 식재되는 은행나무, 느티나무, 왕벚나무의 임목 부위별 탄소 농도를 비교하고, 각 수종의 부위별 탄소저장량 추정 상대성장식을 개발하였다. 임목 부위별 탄소 농도는 뿌리와 가지를 제외한 모든 부위에서 수종 간 유의적 차이가 나타나 임목 바이오매스에 대한 탄소전환계수 기본값 0.5의 적용은 도시 수목의 탄소저장량 추정 시 편향의 원인이 될 수 있는 것으로 나타났다. 각 수종의 DBH와 $DBH^2 \times H$ 를 이용한 임목 부위별 탄소저장량 추정 상대성장식은 결정계수가 0.92에서 0.99로 설명력이 높았다. 그러나 $DBH^2 \times H$ 상대성장식과 DBH 상대성장식 사이에 결정계수나 RMSE의 차이가 크지 않아 DBH를 독립변수로 하는 상대성장식의 실용성이 높을 것으로 나타났다. 조사된 3개 수종을 모두 포함한 일괄상대성장식은 가지나 잎의 상대성장계수에 유의성이 인정되어 가지나 잎 탄소저장량 추정에 일괄상대성장식의 적용은 어려운 것으로 나타났다. 한편, 조사된 3개 수종의 임목 부위별 탄소저장량 추정 상대성장식의 설명력이 높아 진주시 도시 수목의 탄소흡수 능력 평가에 활용될 수 있을 것으로 사료 된다. 그러나 임목의 생장은 기후, 토양 특성, 관리방법 등에 따라 차이가 있으며, 상대성장식이 진주시의 일부 표본목에 대한 소규모의 공간 범위와 제한된 표본 수로부터 개발되어 자료의 공간적 확장을 위해서는 지역별 기후 조건 및 관리 방법을 고려한 활용범위를 모색할 필요가 있다.

사사

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다(과제번호 22UMRG-C158194-03).

References

- Bert D, Danjon F. 2006. Carbon concentration variations in the roots, stem and crown of mature *Pinus pinaster* (Ait.). *For Ecol Manage* 222(1-3): 279-295.
- Bi H, Turner J, Lambert MJ. 2004. Additive biomass equations for native eucalypt forest trees of temperate Australia. *Trees* 18: 467-479.
- Chen CY, Ko SH, Lam TY. 2021. Modeling biomass allocation strategy of young planted *Zelkova serrata* trees in Taiwan with component ratio method and seemingly unrelated regressions. *Sci Rep* 11: 7536.
- Choi SE, Ham B, Song C, Park E, Kim J, Lee WK. 2020. Pilot study and development of activity data for greenhouse gas inventory of settlement categories in Korea: A case of Incheon Seo-gu. *J Cli Change Res* 11(3): 187-196 (in Korean with English abstract).
- Chong SH, Park BS. 2008. Wood properties of the useful tree species grown in Korea. Korea Forest Research Institute (in Korean without English abstract).
- Coombes A, Martin J, Slater D. 2019. Defining the allometry of stem and crown diameter of urban trees. *Urban For Urban Green* 44: 126421.
- Dong L, Widagdo FRA, Xie L, Li F. 2020. Biomass and volume modeling along with carbon concentration variations of short-rotation poplar plantations. *Forests* 11(7): 780.
- Dorendorf J, Eschenbach A, Schmidt K, Jensen K. 2015. Both tree and soil carbon need to be quantified for carbon assessments of cities. *Urban For Urban Green* 14(3): 447-455.
- Gao H, Dong L, Li F, Zhang L. 2015. Evaluation of four methods for predicting carbon stocks of Korean pine plantations in Heilongjiang Province, China. *PLoS One* 10(2): e0145017.
- Herrero de Aza C, Turrión MB, Pando V, Bravo F. 2011. Carbon in heartwood, sapwood and bark along the stem profile in three Mediterranean *Pinus* species. *Ann For Sci* 68: 1067-1076.
- Hong S, Ham B, Choi SE, Kim W, Ha R, Park S, Lee WK. 2021. Comparative analysis on the sequestration of CO₂ depending on spatial ranges for estimating greenhouse gas inventory in settlement - in case of Seoul -. *J Cli Change Res* 12(6): 767-776.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2006. 2006 guidelines for national greenhouse gas inventories. Institute for Global Environmental Strategies.
- Jo HK, Ahn TW. 2012. Carbon storage and uptake by

- deciduous tree species for urban landscape. *J Korean Inst Landsc Archit* 40(5): 160-168 (in Korean with English abstract).
- Kalra YP, Maynard DG. 1991. *Methods manual for forest soil and plant analysis*. Northern Forest Centre, Edmonton, Alberta. Information Report NOR-X-319: 115.
- Kim GS, Pi JH, An JH, Lim CH, Jung SH, Joo SJ, Lee CS. 2016. Carbon budget evaluated in two urban parks of Seoul. *Korean J Ecol Environ* 49(1): 51-61 (in Korean with English abstract).
- Kim, C. 2019. Carbon and nitrogen distribution of tree components in *Larix kaempferi* Carriere and *Quercus variabilis* Blume stands in Gyeongnam Province. *J Korean Soc For Sci* 108(2): 139-146 (in Korean with English abstract).
- Kim H, Lee J, Han SH, Kim S, Son Y. 2018. Approaches for developing a forest carbon and nitrogen model through analysis of domestic and overseas models. *J Korean Soc For Sci* 107(2): 140-150 (in Korean with English abstract).
- Koo JC, Park MS, Yon YC. 2013. Preferences of urban dwellers on urban forest recreational services in South Korea. *Urban For Urban Green* 12(2): 200-210.
- Korea Forest Research Institute. 2010. *Survey manual for biomass and soil carbon*. Samsung Adcom Co.: 60.
- Liu C, Li X. 2012. Carbon storage and sequestration by urban forests in Shenyang, China. *Urban For Urban Green* 11(2): 121-128.
- Liu K, Cao L, Wang GB, Cao FL. 2017. Biomass allocation patterns and allometric models of *Ginkgo biloba*. *J Beijing For Univ* 39(4): 12-20.
- Ma S, He F, Tian D, Zou D, Yan Z, Yang Y, Zhou T, Huang K, Shen H, Fang J. 2018. Variations and determinants of carbon content in plants: a global synthesis. *Biogeosciences* 15: 693-702.
- Martin AR, Gezahegn S, Thomas SC. 2015. Variation in carbon and nitrogen concentration among major woody tissue types in temperate trees. *Can J For Res* 45(6): 744-757.
- Morhart C, Sheppard JP, Schuler JK, Spiecker H. 2016. Above-ground woody biomass allocation and within tree carbon and nutrient distribution of wild cherry (*Prunus avium* L.) - a case study. *For Ecosyst* 3: 4.
- Nowak DJ, Crane DE. 2002. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environ Pollut* 116(3): 381-389.
- Oh S, Kim HC, Kang HS, Shin CH, Koh SC. 2020. Seasonal change in the CO₂ fixation rate and water-use efficiency of broad-leaved tree species on Jeju Island. *J Environ Sci Int* 29(2): 123-132 (in Korean with English abstract).
- Park EJ, Kang KY. 2010. Estimation of C storage and annual CO₂ uptake by street trees in Gyeonggi-do. *Kor J Env Eco* 24(5): 591-600 (in Korean with English abstract).
- Purusatama BD, Kim YK, Jeon WS, Lee JA, Kim AR, Kim NH. 2018. Qualitative anatomical characteristics of compression wood, lateral wood, and opposite wood in a stem of *Ginkgo biloba* L. *J Korean Wood Sci Technol* 46(2): 125-131.
- Roy S, Byrne J, Pickering C. 2012. A systematic quantitative review of urban tree benefits, costs, and assessment methods across cities in different climatic zones. *Urban For Urban Green* 11(4): 351-363.
- Rubilar RA, Allen HL, Kelting DL. 2005. Comparison of biomass and nutrient content equations for successive rotations of loblolly pine plantations on an upper coastal plain site. *Biomass Bioenergy* 28(6): 548-564.
- SAS Institute Inc. 2003. *SAS/STAT[®] 9.0 User's Guide*. SAS Institute Inc., Cary.
- Seamans GS. 2013. Mainstreaming the environmental benefits of street trees. *Urban For Urban Green* 12(1): 2-11.
- Shoda T, Imanishi J, Shibata S. 2019. Measurement of above-ground biomass of a *Zelkova serrata* (Thunb.) Makino. and two *Ginkgo biloba* L. street trees in Kyoto City, Japan. *J Jpn Soc Reveget Tech* 45(1): 192-195.
- Son Y, Kim HW. 1998. Above-ground biomass and nutrient distribution in a 15-year-old ginkgo (*Ginkgo*

- biloba*) plantation in central Korea. *Bioresour Technol* 63(2): 173-177.
- Son YM, Kim KN, Pyo JK. 2016. Developing volume equation of street tree and its carbon stock for urban forest in Seoul. *J Agric Life Sci* 50(1): 95-104 (in Korean with English abstract).
- Sprugel DG. 1983. Correcting for bias in log-transformed allometric equations. *Ecology* 64(1): 209-210.
- Thomas SC, Martin AR. 2012. Carbon content of tree tissues: a synthesis. *Forests* 3(2): 332-352.
- Timell TE. 1960. Studies on *Ginkgo biloba*, L. 1. General characteristics and chemical composition. *Sven Papperstidn* 63(19): 652-657.
- Wang J, Zhang L, Feng Z. 2018. Allometric equations for the aboveground biomass of five tree species in China using the generalized method of moments. *For Chron* 94(3): 214-220.
- Wu J. 2019. Developing general equations for urban tree biomass estimation with high-resolution satellite imagery. *Sustainability* 11(16): 4347.
- Yoon TK, Park CW, Lee SJ, Ko S, Kim KN, Son Y, Lee KH, Oh S, Lee WK, Son Y. 2013. Allometric equations for estimating the aboveground volume of five common urban street tree species in Daegu, Korea. *Urban For Urban Green* 12(3): 344-349.
- Yoon TK, Seo KW, Park GS, Son YM, Son Y. 2016. Surface soil carbon storage in urban green spaces in three major south Korean cities. *Forests* 7(6): 115.