

비파괴적 수간석해를 통한 원주시 주요 가로수 4수종의 지상부 상대생장식 개발

이승민¹ · 이성훈^{1*} · 한예원¹ · 이정민² · 손요환² · 윤태경¹

¹상지대학교 산림과학과, ²고려대학교 환경생태공학과

Determining the Aboveground Allometric Equations of Major Street Tree Species in Wonju, South Korea using the Nondestructive Stem Analysis Method

Seungmin Lee¹, Seonghun Lee^{1*}, Yewon Han¹,
Jeongmin Lee², Yowhan Son² and Tae Kyung Yoon¹

¹Department of Forest Science, Sangji University, Wonju 26339, Korea

²Department of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 02841, Korea

요약: 국가 온실가스 인벤토리 항목 중 정주지는 활동자료 부족 등의 이유로 보고되지 않고 있다. 이에 본 연구는 정주지 수목의 탄소저장량 추정에 필요한 기초자료로서 원주시 가로수 4수종(메타세쿼이아, 살구나무, 은행나무, 중국단풍)의 상대생장식을 개발하였다. 레이저 덴드로미터를 이용하여 수종별로 30번씩 비파괴적인 수간석해를 진행하였다. 이후 5개 모델의 지상부 체적 상대생장식과 수관면적을 독립변수로 한 흉고직경 상대생장식을 개발하였다. 가장 적합도가 높은 식으로 메타세쿼이아와 은행나무에서 aD^2+bD+c , 살구나무에서 $aD+bD^2$, 중국단풍에서 $a+bD^2$ 식을 선정하였다. 수관면적을 독립변수로 한 흉고직경 상대생장식에서는 은행나무와 중국단풍에서 결정계수가 0.364 이하로 낮게 나타났으며 메타세쿼이아와 살구나무는 0.767 이상으로 높게 나타났다. 이는 가로수 관리에 따른 차이라고 판단되며 수관면적을 이용한 체적의 추정엔 자연수형을 유지하는 수종에 사용 가능할 것으로 사료된다. 본 연구는 정주지 탄소흡수량을 측정하기 위한 기초자료로 사용될 수 있으며 도시림 관리에 의한 수목의 변화를 모니터링하는데 사용될 수 있다.

Abstract: In the national greenhouse gas inventory, a settlements category has never been included owing to the lack of activity data. Therefore, this study was conducted to obtain basic data for estimating biomass carbon storage in settlements. Nondestructive stem analysis with a laser dendrometer was performed on four major street tree species (*Metasequoia glyptostroboides*, *Prunus armeniaca*, *Ginkgo biloba*, and *Acer buergerianum*) in Wonju city, South Korea. Allometric equations of the aboveground volume were developed using five models, and allometric equations of crown area were developed with diameter at breast height (DBH) as an independent variable. The best performing allometric equations were aD^2+bD+c for *M.glyptostroboides* and *G. biloba*, $aD+bD^2$ for *P. armeniaca*, and $a+bD^2$ for *A. buergerianum*. Regarding the allometric equations of crown area with DBH as an independent variable, *G. biloba* and *A. buergerianum* exhibited low coefficients of determination (R^2), i.e., < 0.364 , whereas *M. glyptostroboides* and *P. armeniaca* exhibited satisfactory R^2 values, i.e., > 0.767 , probably due to different street tree management practices. The allometric equations in this study will support the carbon inventory of settlements and urban tree monitoring in management practices.

Key words: carbon storage, crown area, laser dendrometer, national greenhouse gas inventory, non-destructive stem analysis

서론

* Corresponding author
E-mail: dbajdls00@naver.com

ORCID

Seonghun Lee  https://orcid.org/0000-0003-0562-494X

현대 사회는 자연적인 기후변화가 아닌 인간의 화석연료 사용과 토지이용 변화에 의한 기후변화를 직면하고 있다(Kwon et al., 2007). 1970년대 이후부터 인간에 의한 온

실가스 배출에 영향을 받아 기온 상승, 가뭄과 폭우의 빈도 증가 등 이상기후 산업과 사회, 생태계에 피해가 급격히 증가하였다(Kim, 2013; Park et al., 2014). 이에 우리나라도 기후변화에 대응하기 위해 매년 국가 온실가스 인벤토리(National Greenhouse Gas Inventory Report)를 작성하고 있다. 국가 온실가스 인벤토리는 <2006 IPCC 가이드라인>(2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories)의 분류에 따라 에너지, 산업공정, 농업, 토지이용, 토지이용 변화 및 임업(Land Use, Land Use Change and Forestry, 이하 LULUCF), 폐기물 분야 등에 대한 온실가스(CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs, SF₆) 배출·흡수량 보고가 이루어지고 있다(IPCC, 2006). 하지만 LULUCF 세부 항목(산림, 농경지, 초지, 습지, 정주지, 기타토지) 중 정주지 분야는 활동자료 부족 및 토지이용 상의 국내 대상 범위 설정이 어려워 온실가스 배출·흡수량을 산정하지 못하고 있다(Choi et al., 2020; Hong et al., 2021; GIR, 2022).

정주지 분야의 연간 탄소흡수량을 산정하기 위해서는 이산화탄소 흡수원에 대한 탄소저장량 정보가 축적될 필요가 있다. 산림 분야에서는 일반적인 벌채 및 수확 방식의 수간석해를 통해 소나무, 낙엽송, 신갈나무 등 22수종의 상대생장식이 개발되어 있다(KFS, 2010). 하지만 정주지는 수목의 수종과 생육환경에서 일반적인 산림과 차이가 있음에도 정주지 수목의 상대생장식이 개발되어 있지 않아 지금까지 정주지 분야 탄소저장량을 산정하는 연구는 산림 분야에서 개발한 식을 응용하여 사용하고 있다(Park and Kang, 2010). 이러한 한계를 극복하고자 정주지에 식재되는 주요 수종에 대한 상대생장식 개발이 필요하다.

한편, 최근 탄소흡수량 추정은 원격탐사를 이용하는 방향으로 나아가고 있다. 산림에서도 LiDAR를 통해 수관면적을 조사하여 탄소흡수량을 산출하는 연구가 진행되었다(Lee and Ru, 2012; Choi et al., 2015). 이에 Kim et al. (2011) 연구에서도 위성자료를 통해 정주지 수목의 수관면적을 조사하고 탄소저장량을 산출하는 연구를 진행하였다. 하지만 정주지 수목은 두목작업, 가지치기 등 도시림 관리로 인해 수관면적이 변화할 수 있기 때문에 수관면적을 통한 탄소저장량 산출에 대한 추가 연구가 필요하다.

가로수는 자동차 배기가스 정화, 도시소음 저감, 열섬완화 등 도시 환경 개선과 도시 경관을 조성해 공익적 가치가 높은 수목이기 때문에 일반적인 벌채 및 수확 방식의 수간석해를 통해 상대생장식을 개발하기에 어려움이 있다(Park, 2015). 이에 대구시, 대전시, 서울시 지역 가로수의 상대생장식을 개발한 선행연구에서는 벌채 및 수확 방식의 수간석해를 통한 건중량 상대생장식이 아닌 비파괴적 수간석해를 통한 지상부 재적 상대생장식을 개발한 바 있다

(Yoon et al., 2013; Son et al., 2016; Park et al., 2018). 본 연구에서도 벌채 및 수확 방식의 수간석해가 아닌 비파괴적 수간석해를 통해 원주시 가로수 지상부 재적 상대생장식(이하 재적 상대생장식)을 개발하였다. 또한 정주지는 공간범위 설정에 대한 문제와 도시림 관리로 인한 수관면적의 변화 등으로 인해 원격탐사자료를 이용하여 탄소저장량 및 탄소흡수량을 추정하는데 어려움이 존재한다. 공간범위 설정 방안을 제시하고 탄소흡수량을 산출하는 연구는 진행되었지만(Choi et al., 2020; Hong et al., 2021) 수관면적과 재적의 관계에 대한 연구는 미비하다. 이에 본 연구에서는 가로수 수관면적에 대한 흉고직경 상대생장식을 도출하고 도시림 관리에 의한 수관면적 변화가 흉고직경 상대생장식에 어떤 영향을 끼치는지 분석하였다.

재료 및 방법

1. 대상지 및 대상목

강원도 원주시(37° 21' 5" N / 127° 56' 43" E)는 86,789 ha의 면적으로 치악산, 백운산 등으로 둘러싸인 분지지형의 지역이다. 연평균 기온은 12.3°C, 연 강수량은 1276.2 mm이며 연평균 풍속은 1.3 m/s인 기후를 가지고 있다(Wonju, 2019). 가로수는 257개 노선에 총 35,161본이 식재되어 있으며 19개 수종이 분포한다(Wonju, 2021).

대상목은 19개 수종 중 침엽수와 활엽수 각각 2 수종씩 (1) 가지치기로 인해 수관에 큰 영향을 받은 수종과 (2) 자연수형을 유지하고 있는 수종으로 구분하여 선정하였다. 이에 가지치기로 인해 수관에 큰 영향을 받은 수종으로 은행나무(*Ginkgo biloba* L.)와 중국단풍(*Acer buergerianum* Miq.)을 선정하였고, 자연수형을 유지하고 있는 수종으로 메타세쿼이아(*Metasequoia glyptostroboides* Hu & W.C. Cheng)와 살구나무(*Prunus armeniaca* L.)를 선정하였다. 은행나무는 2021년 기준 총 9,405본으로, 원주시에서 가장 많이 식재되었으며 원추형의 수형으로 일정 크기가 되었을 때 매년 가지치기를 수행하여 수형을 유지하는 수종이다. 메타세쿼이아는 약한 가지치기를 통해 원추형의 자연수형을 유지하여 미관이 좋은 수종으로 총 582본이 식재되어 있다. 중국단풍은 총 2,697본이 식재되어 있으며 현장에서 가지치기로 인한 수관에 영향이 있다고 판단된 수종이다. 살구나무는 벚나무류로서 불필요한 가지만 제거하여 자연수형을 유지하고 있는 수종으로 총 819본이 식재되어 있다(KFS, 2020; Wonju, 2021).

2. 조사방법

원주시 가로수(메타세쿼이아, 살구나무, 은행나무, 중국

단풍)를 대상으로 한 수종당 30분을 선정하고 <도시녹지 온실가스 인벤토리>에 기초하여 각각의 흉고직경(DBH), 수고(H), 수관면적(CA)을 측정하였다(KFRI, 2010b). 이후 레이저 덴드로미터(Criterion 400, Laser Technology, USA)를 이용하여 수간고와 수간고별 직경, 가지의 높이와 직경을 측정하였다. 레이저 덴드로미터를 이용한 비파괴적인 수간석해의 특성상 잎의 부피를 산출하는 것에 한계가 있다. 이에 산림 분야에서 개발된 바이오매스 상대생장식을 통해 잎의 바이오매스는 1% 미만의 값이 나타나는 것을 확인하였고(KFRI, 2010a) 정주지 수목은 가지치기로 인해 잎의 바이오매스가 더 낮아질 것으로 판단하여 지상부 재적에서 제외하였다.

줄기는 지상에서 높이 0.2 m, 1.2 m, 3.2 m, 5.2 m, 7.2 m 위치 순으로 1.2 m 이후부터는 2 m씩 간격을 두고 직경이 6 cm가 될 때까지 측정하였다. 가지는 직경 6 cm 이상의 가지에 대해서 표본조사를 하였다. 줄기와 가지의 길이(H_n)는 기울어진 정도에 의한 오차를 줄이기 위해 디지털 각도기를 이용하여 각도(a, b)를 측정하고 높이(h_n)별 직경(D_n)을 측정하여 각도에 따른 줄기와 가지의 길이를 계산하였다(식 1). 줄기와 가지의 초두부 재적(V₁)은 원뿔 부피 공식을 사용하였으며(식 2) 그 외 부위 재적(V₂)은 스말리안식을 이용하였다(식 3)(Figure 1). 수관면적은 수관의 형태가 타원형이라고 가정하여 장축과 단축을 전자거리측

정계(Multi Measure Combo Pro, Sonin, USA)로 측정하고 산출하였다. 수고는 수고측정계(Vertex Laser 400, Haglof, Sweden)를 이용하여 측정하였다.

$$H = \frac{1}{\sin a} \times (h_1 - h_2) \tag{1}$$

$$V_1 = H_1 \times \pi \times \frac{(D_1 \div 2)^2}{3} \times 10^{-4} \tag{2}$$

$$V_2 = H_2 \times \pi \times \frac{(D_1 \div 2)^2 + (D_2 \div 2)^2}{2} \times 10^{-4} \tag{3}$$

Figure 1을 예로 들면 줄기는 2 m 간격과 흉고직경이 급변하는 지점(2.0 m)에서 직경과 길이를 측정하였다. 가지는 줄기와 비슷한 직경의 굵은가지(Branched stem)를 따로 구분하고 줄기와 굵은가지에서 분지되는 가지는 1차가지(Primary branch)로, 1차가지에서 분지되는 가지는 2차가지(Secondary branch)로 분류하여 측정하였다. 1차가지의 총 재적은 평균적인 가지 2개 이상의 재적을 산출하고 평균하여 가지 개수를 곱해 산출하였다. 2차가지도 1차가지와 동일하게 총 재적을 산출하였다. 이후 산출된 줄기, 굵은가지, 1차가지, 2차가지의 재적을 모두 더하여 지상부 총 재적을 도출하였다.

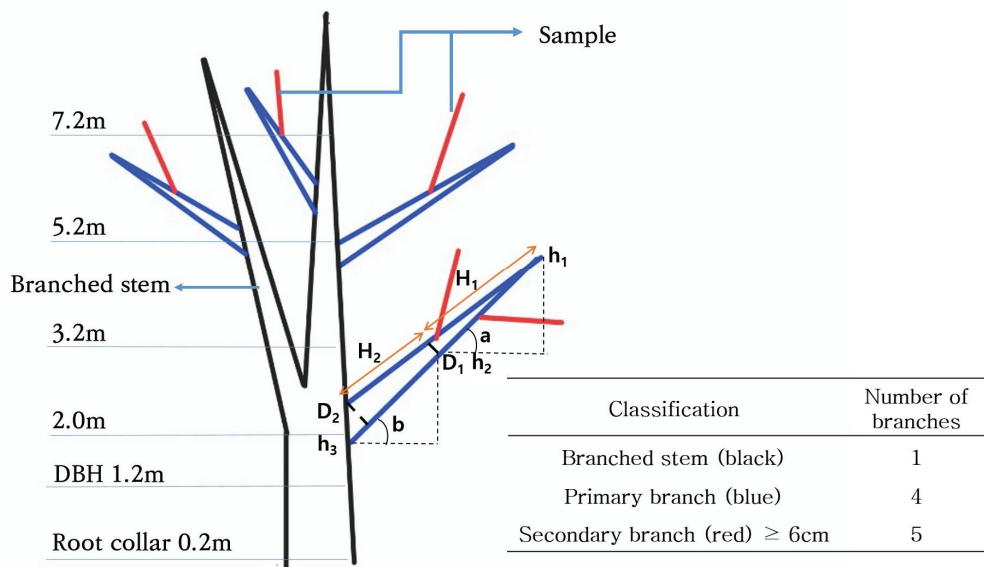


Figure 1. Schematic diagram of stem analysis using laser dendrometer. A stem and branched stems were indicated with black. Primary and secondary branches were indicated with blue and red, respectively. a, b : The inclination angle of the branch; h₁-h₃ : The measured height of each part of the branch (m); H₁, H₂ : Branch length (m); D₁, D₂ : Diameter of each part of the branch (cm); The volume of the H₁ is V₁ (m³); The volume of the H₂ is V₂ (m³).

3. 상대생장식 개발 및 분석방법

재적 상대생장식은 두목작업, 가지치기 등 도시림 관리로 인해 재적이 변하기 때문에 식에서 오차가 발생할 수 있다고 가정하였다. 그에 따라 정확도가 가장 높은 식을 개발하기 위해 흉고직경을 독립변수로 하는 4개의 선형회귀식 모델(aD^b , $aD+bD^2$, aD^2+bD+c , $a+bD^2$)을 이용하여 재적 상대생장식을 개발하였다(Son et al., 2016). 또한 다중 선형회귀식 모델($a+bD+cH$)을 통해 흉고직경과 수고를 독립변수로 재적 상대생장식을 개발하고 두목작업에 의한 수고의 변화가 상대생장식에 어떤 영향을 주는지 확인하였다. 흉고직경 상대생장식은 수관면적을 독립변수로 한 선형회귀식 모델($a+bCA$)을 이용하여 개발하였다.

개발된 상대생장식의 결정계수(R^2)를 확인해 독립변수와 종속변수의 관계가 어느 정도 일치하는지 알아보았고 잔차도(Residual plot)와 평균제곱근오차(RMSE)를 확인해 실측값과 상대생장식 사이에 정밀도를 판단하였다. 모든 통계 분석에는 R 프로그램(R Core Team, 2021)을 사용하였다.

결과 및 고찰

1. 가로수 조사 결과

메타세콰이아의 평균 흉고직경은 33.5 cm(19.5–50.7 cm), 평균 수고는 15.2 m(8.5–21.9 m), 평균 수관면적은 50.0 m²(19.3–94.4 m²)으로 다른 수종들에 비해 압도적으로 크기가 컸다(Table 1). 메타세콰이아를 제외하고 나머지 3수종을 비교해보았을 때 평균 흉고직경은 살구나무가 25.1 cm(11.3–49.3 cm)로 가장 컸고 은행나무가 22.0 cm(11.8–37.3 cm)로 가장 작았다. 평균 수고는 은행나무가 8.9 m(5.4–15.4 m)로 가장 높았고 중국단풍이 7.0 m(4.4–10.5 m)으로 가장 낮았다. 평균 수관면적은 살구나무가 35.3 m²(6.3–95.8 m²)로 가장 넓었고 중국단풍이 6.9 m²(3.0–16.4 m²)로 가장 좁았다. 결론적으로 평균 총 재적은 메타세콰이아가 0.710 m³(0.112–2.106 m³), 살구나무가 0.290 m³(0.032–

0.725 m³), 은행나무가 0.270 m³(0.040–0.876 m³), 중국단풍이 0.240 m³(0.019–0.582 m³)으로 메타세콰이아가 가장 컸고 중국단풍이 가장 낮았다(Table 1).

2. 상대생장식 개발

흉고직경을 독립변수로 한 재적 상대생장식 4개와 흉고직경 및 수고를 독립변수로 한 재적 상대생장식 1개를 이용하여 가로수 상대생장식을 도출하였다(Table 2). 수종 별 결정계수(R^2)에서 메타세콰이아는 aD^2+bD+c 식과 $a+bD^2$ 식에서 R^2 이 동일하게 0.784로 가장 높았다. 은행나무는 aD^b 식과 aD^2+bD+c 식이 가장 높았으며 R^2 이 0.825로 동일한 값이 나타났다. 살구나무와 중국단풍은 aD^2+bD+c 식에서 R^2 이 0.804 이상으로 가장 높게 나타났으나, 11 이하의 흉고직경에 대하여 음의 예측값이 나타났다. RMSE는 모든 수종에서 aD^b 식이 가장 높게 나타났으며 메타세콰이아는 0.216 이상의 값이 나타나 다른 수종과 비교했을 때 상대적으로 높은 값이 나타났다(Table 2). 잔차도는 흉고직경을 독립변수로 한 재적 상대생장식에서 흉고직경 30 cm 이하는 편이가 적게 일어난 모습을 보이지만 30 cm 이상부터는 편이가 일어나는 모습을 보이고 있다. 또한 메타세콰이아는 다른 수종보다 상대적으로 편이가 크게 일어난 모습을 보이고 있다(Figure 2).

흉고직경과 수고를 독립변수로 한 다중회귀모형($a+bD+cH$)은 모든 수종에서 흉고직경만을 독립변수로 한 식보다 상대적으로 결정계수가 높고 RMSE가 낮게 나타났다(Table 2). 따라서 정확도가 가장 높은 재적 상대생장식은 $a+bD+cH$ 식이다. 하지만 탄소저장량을 추정하기 위해 흉고직경 이외에 수고까지 조사하는 것은 비효율적이기 때문에 흉고직경을 독립변수로 한 재적 상대생장식을 사용하는 것이 효율적이다.

재적 상대생장식은 탄소저장량을 추정하기 위해서 탄소배출계수를 사용해야 한다. 산림에서 사용하는 탄소배출계수는 목재기본밀도, 바이오매스 확장계수, 뿌리함량비 등이 필요하지만(KFS, 2010) 본 연구에서 개발한 상대생

Table 1. Measured diameter at breast height (DBH), tree height (H), crown area (CA), and above-ground volume (V) of four street tree species in Wonju.

| Species | N | DBH (cm) | | | H (m) | | | CA (m ²) | | | V (m ³) | | |
|-------------------------------------|----|----------|------|------|-------|------|------|----------------------|------|------|---------------------|-------|-------|
| | | Min. | Max. | Mean | Min. | Max. | Mean | Min. | Max. | Mean | Min. | Max. | Mean |
| <i>Acer buergerianum</i> | 30 | 9.5 | 38.9 | 23.2 | 4.4 | 10.5 | 7.0 | 3.0 | 16.4 | 6.9 | 0.019 | 0.666 | 0.246 |
| <i>Ginkgo biloba</i> | 30 | 11.8 | 37.3 | 21.9 | 5.4 | 15.4 | 8.8 | 2.5 | 45.1 | 17.0 | 0.042 | 0.876 | 0.263 |
| <i>Metasequoia glyptostroboides</i> | 30 | 19.5 | 50.7 | 33.4 | 8.5 | 21.9 | 15.2 | 19.3 | 94.4 | 50.0 | 0.112 | 2.106 | 0.710 |
| <i>Prunus armeniaca</i> | 30 | 11.3 | 49.3 | 25.0 | 4.1 | 10.4 | 7.6 | 6.3 | 95.8 | 35.3 | 0.032 | 0.725 | 0.288 |

Table 2. Allometric equations using diameter at breast height (DBH) and/or tree height as an independent variable (s) for each street tree species ($p < 0.001$).

| Species | DBH (cm) | Models | Parameters | | | R^2 | RMSE |
|-------------------------------------|----------|-------------|------------------|-----------------|----------------|--------------|---------------|
| | | | a | b | c | | |
| <i>Acer buergerianum</i> | 9.5 | aD^b | 0.00010 | 2.3471 | | 0.763 | 0.0829 |
| | | $aD+bD^2$ | -0.00140 | 0.0005 | | 0.780 | 0.0768 |
| | — | aD^2+bD+c | 0.00004 | 0.0185 | -0.2053 | 0.804 | 0.0716 |
| | 38.9 | $a+bD^2$ | 0.00330 | 0.0004 | | 0.783 | 0.0754 |
| | | $a+bD+cH$ | <i>-0.2826</i> | <i>0.0176</i> | <i>0.0170</i> | <i>0.814</i> | <i>0.0697</i> |
| <i>Ginkgo biloba</i> | 11.8 | aD^b | 0.0002 | 2.2631 | | 0.825 | 0.0850 |
| | | $aD+bD^2$ | -0.0014 | 0.0006 | | 0.824 | 0.0850 |
| | — | aD^2+bD+c | 0.0006 | -0.0033 | 0.0205 | 0.825 | 0.0846 |
| | 37.3 | $a+bD^2$ | -0.0159 | 0.0005 | | 0.824 | 0.0847 |
| | | $a+bD+cH$ | <i>-0.3923</i> | <i>0.0233</i> | <i>0.0162</i> | <i>0.836</i> | <i>0.0817</i> |
| <i>Metasequoia glyptostroboides</i> | 19.5 | aD^b | 0.00005 | 2.6837 | | 0.777 | 0.2208 |
| | | $aD+bD^2$ | -0.01103 | 0.0009 | | 0.783 | 0.2165 |
| | — | aD^2+bD+c | 0.00073 | 0.0011 | -0.1892 | 0.784 | 0.2161 |
| | 50.7 | $a+bD^2$ | -0.17092 | 0.0007 | | 0.784 | 0.2161 |
| | | $a+bD+cH$ | <i>-1.07024</i> | <i>0.0285</i> | <i>0.0544</i> | <i>0.819</i> | <i>0.1979</i> |
| <i>Prunus armeniaca</i> | 11.3 | aD^b | 0.000253 | 2.135400 | | 0.830 | 0.0958 |
| | | $aD+bD^2$ | 0.000348 | 0.000393 | | 0.840 | 0.0877 |
| | — | aD^2+bD+c | -0.000001 | 0.021880 | -0.25920 | 0.869 | 0.0774 |
| | 49.3 | $a+bD^2$ | 0.029110 | 0.000364 | | 0.839 | 0.0859 |
| | | $a+bD+cH$ | <i>-0.352304</i> | <i>0.019612</i> | <i>0.01969</i> | <i>0.881</i> | <i>0.0738</i> |

In aD^b , $aD+bD^2$, aD^2+bD+c , and $a+bD^2$, the values with the highest coefficient of determination (R^2) and the lowest root mean square error (RMSE) are marked in bold. The values of the formula using DBH and height (H) as independent variables are marked in italic.

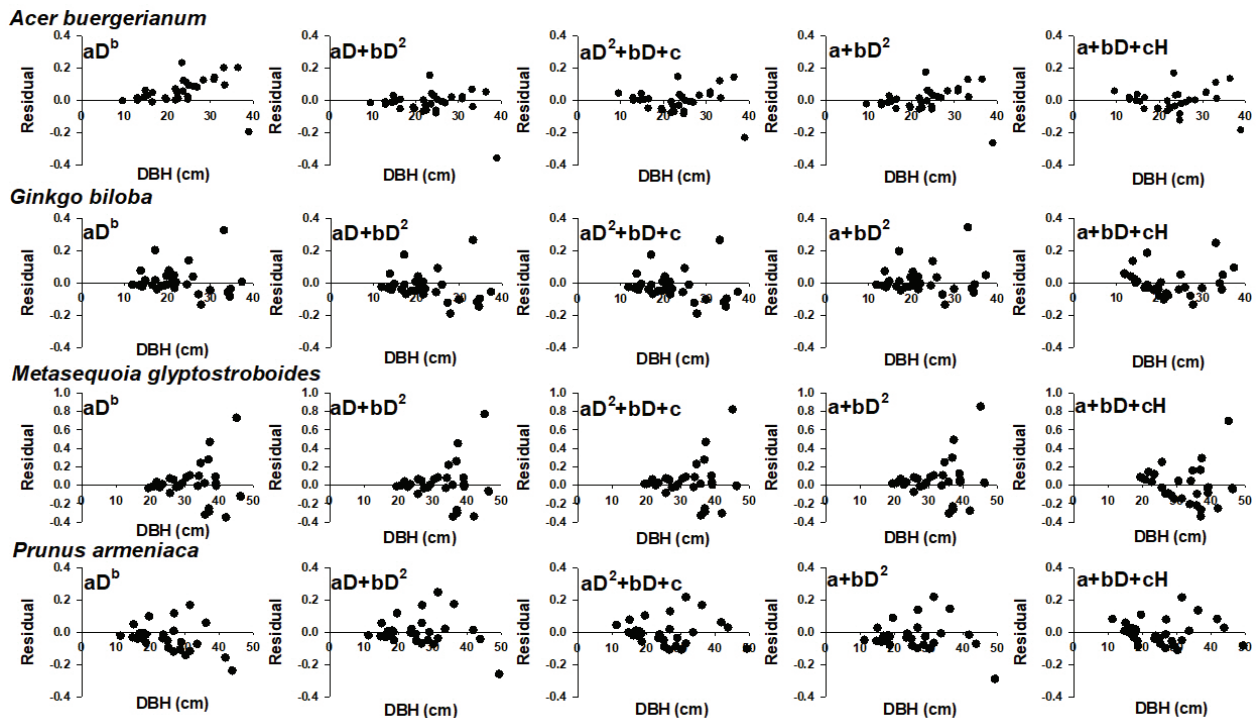


Figure 2. Residual plots of allometric equations between measured and predicted volume along diameter at breast height (DBH).

장식은 가지에 대한 재적을 포함하였기에 바이오매스 확장계수를 사용하지 않고 목재기본밀도, 뿌리함량비, 탄소 전환계수를 사용한다. 본 연구에서 수행된 상대생장식 개발은 벌채 및 수확 방식의 수간석해가 힘든 정주지에서 수목을 벌채하지 않고 탄소저장량 추정을 위한 기초자료를 만드는 것에 의의를 두고 있다.

3. 상대생장식 비교

본 연구와 선행연구에서 개발된 대구시(Yoon et al., 2013), 대전시(Park et al., 2018), 서울시(Son et al., 2016)의 상대생장식을 비교해 보았다. 비교에 사용할 상대생장식으로 흉고직경을 독립변수로 한 재적 상대생장식 중 정확도가 가장 높은 식을 선정하였다. 살구나무와 중국단풍에서 결정계수가 가장 높고 RMSE가 가장 낮은 식은 $aD^2 + bD + c$ 이었으나 흉고직경 11 cm 이하에서 재적값이 음으로 예측되는 문제가 있었다. 따라서 두 수종의 경우에는 두 번째로 정확도가 높은 식을 선정했다. 그 결과 메타세쿼이아

아와 은행나무는 $aD^2 + bD + c$, 살구나무는 $aD + bD^2$, 중국단풍은 $a + bD^2$ 상대생장식을 선정하였다.

선행연구(Yoon et al., 2013; Son et al., 2016; Park et al., 2018)마다 수종 선정의 차이가 있어 같은 속(Genus)으로 분류되는 수종에 대한 상대생장식을 이용하였다. 중국단풍은 대구시 중국단풍($V=0.0000709D^{2.511}$)과 대전시 당단풍나무($V=0.000132D^{2.165}$)을 비교하였다. 은행나무는 대구시($V=0.0000453D^{2.656}$), 대전시($V=0.000105D^{2.235}$), 서울시($V=-0.0032D+0.0004D^2$)에서 모두 상대생장식이 개발되어 서로 비교해 보았다. 메타세쿼이아는 서울시($V=-0.0032D+0.0005D^2$)와 비교하였다. 살구나무는 개발된 선행연구가 없어 대구시에서 개발한 왕벚나무($V=0.0006664D^{1.819}$)와 비교하였다. 그 결과 원주에서 개발된 상대생장식은 대구시 상대생장식과 유사한 결과값이 나타나는 반면, 서울시와 대전시의 상대생장식과는 결과값에서 상대적으로 큰 차이가 나타났다(Figure 3).

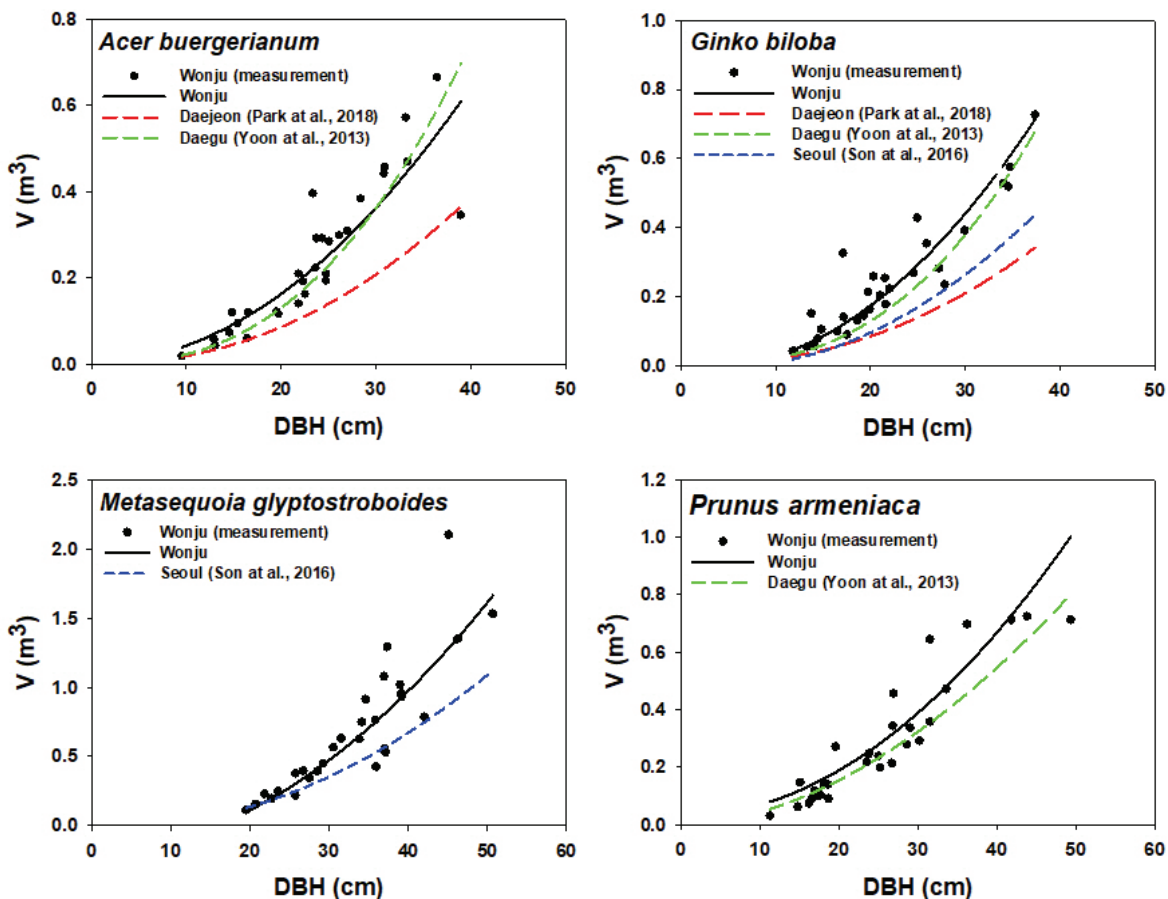


Figure 3. Comparison of above-ground allometric equations of street trees reported in this study and previous studies. V: Above-ground volume, DBH: Diameter at breast height.

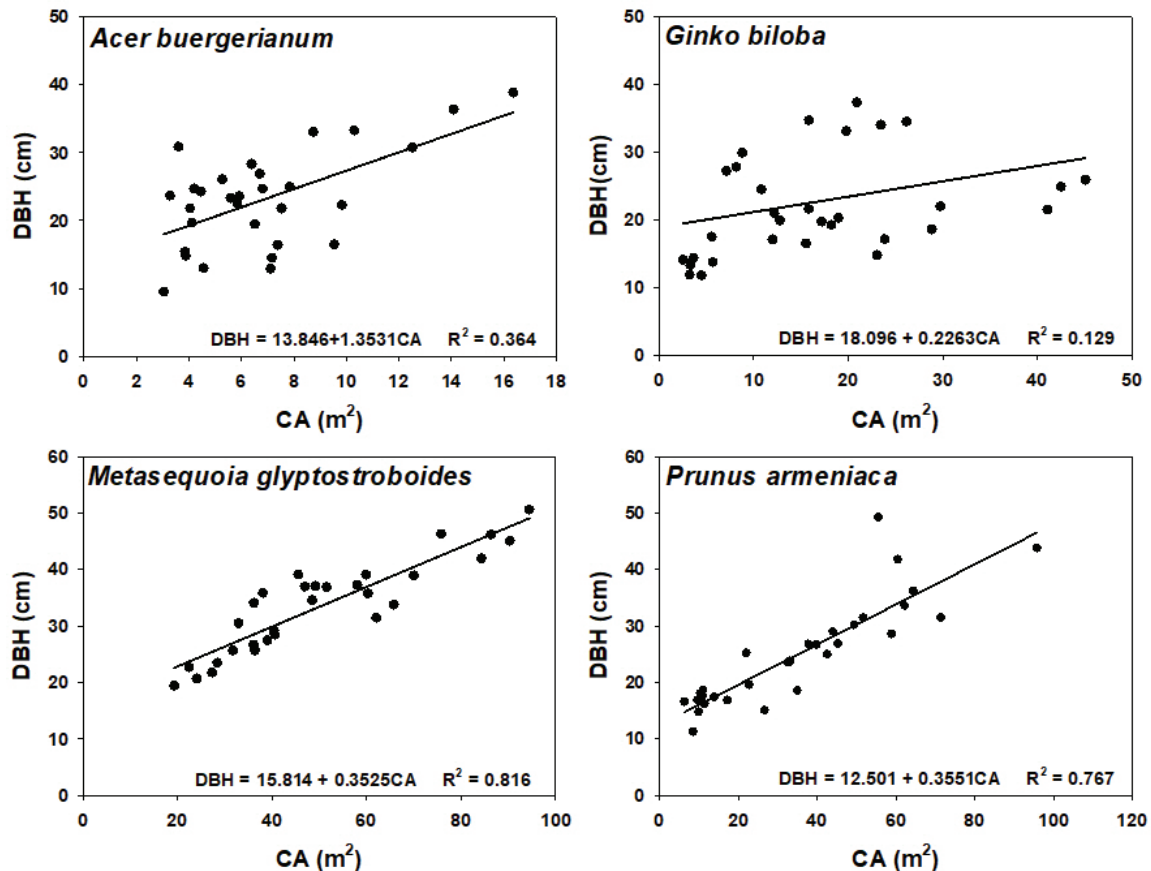


Figure 4. The relationship between crown area (CA) and diameter at breast height (DBH).

4. 수관면적과 흉고직경의 상대생장식

수관면적은 향후 원격탐사자료를 이용한 탄소흡수량 추정에 중요한 입력자료로 활용될 것이다. 따라서 수관면적과 흉고직경 사이의 관계를 알아보기 위해 선형회귀식을 도출하였다. 메타세쿼이아는 $DBH=15.814+0.3525CA$, 살구나무는 $DBH=12.501+0.3551CA$, 은행나무는 $DBH=18.096+0.2263CA$, 중국단풍은 $DBH=13.846+1.3531CA$ 의 식이 도출되었다. 자연수형을 유지하는 메타세쿼이아와 살구나무는 흉고직경이 증가할수록 수관면적이 증가하는 선형의 관계가 보이면서 결정계수가 0.816, 0.767로 높은 결과가 나타났다. 이와 반대로 인공수형을 유지하는 은행나무와 중국단풍은 결정계수가 0.129와 0.364로 나타났다. 이러한 결과는 가지치기 작업으로 인해 수관면적이 변화하여 나타난 것으로 사료된다. 일부를 제외한 대부분의 은행나무와 중국단풍 대상목에서 수관면적이 각각 30 m²과 10 m²을 넘지 않도록 조절되어 선형의 관계에서 벗어난 모습이 보였다(Figure 4). 이는 가지치기가 시행되고 있는 수목은 동일한 흉고직경에서도 수관의 형태 및 면적의 값이 달라지기 때문에 원격탐사자료를 통해 흉고직경 및 재

적을 추정하는데 어려움이 있다고 판단된다. 현재로서는 자연수형을 유지하는 수종에 한정하여 수관면적을 독립변수로 한 흉고직경 상대생장식 사용이 가능할 것으로 사료되며 향후 모든 정주지 분야의 수관면적을 이용해 재적을 산출하기 위해서는 도시림 관리에 의한 수관면적의 변화에 대해서 개선된 연구가 필요해 보인다.

결론

국가 온실가스 인벤토리에서 LULUCF 항목 중 정주지에 대한 보고가 활동자료의 부족으로 인해 이루어지고 있지 않다. 이에 본 연구는 원주시 가로수 4수종을 대상으로 재적 상대생장식과 흉고직경 상대생장식을 개발하였다. 레이저덴드로미터를 이용하여 비파괴적인 수간석해를 진행하였으며 재적 산출은 스말리안식과 원뿔 부피 공식을 이용하였다. 흉고직경을 독립변수로 한 4개의 선형회귀모델과 수고와 흉고직경을 독립변수로 한 1개의 다중선형회귀식을 사용해 재적 상대생장식을 개발하였다. 가장 정확도가 높은 지상부 재적 상대생장식은 메타세쿼이아

와 은행나무는 aD^2+bD+c , 살구나무는 $aD+bD^2$, 중국단풍은 $a+bD^2$ 이며 지상부 재적 상대생장식을 개발한 선행연구와 비교했을 때 대구시와 비슷하며 대전시와 서울시보다는 큰 결과가 나타났다. 수고와 흉고직경을 독립변수로 한 재적 상대생장식은 흉고직경만을 독립변수로 한 재적 상대생장식보다 상대적으로 결정계수가 높아지고 RMSE가 낮아지는 것으로 보아 정확도가 높아진다는 것을 알 수 있다. 수관면적을 독립변수로 한 흉고직경 상대생장식은 자연수형을 유지하는 수종에 비해 인공수형을 유지하는 수종에서는 결정계수가 매우 낮게 나타났다. 현재로서 원격탐사를 활용한 탄소흡수량 추정은 자연수형을 유지하고 있는 수종에 한해서 신뢰성이 높을 것으로 사료되며 모든 수종에 대해서 원격탐사를 진행하기 위해서는 추가 연구가 필요해 보인다. 본 연구는 비파괴적인 수간석해를 통해 지상부 상대생장식을 개발한 것에 의의를 두고 있으며 재적 상대생장식은 국가 온실가스 인벤토리 작성에 있어 지역별 정주지 바이오매스 탄소흡수량을 추정하기 위한 기초자료로 사용될 수 있다. 또한 흉고직경, 수고, 수관면적에 대한 재적 곡선을 통해 도시림 관리에 의한 수목의 변화를 모니터링하는 자료로 사용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다(과제번호 22UMRG-C158194-03). 더운 여름날 현장 조사를 함께 했던 송민혁, 강성찬, 황인석, 박준, 김도운, 안태하 학부과정 학생들과 연구를 도와준 이송희 박사님, 원채윤 학부과정 학생에게 감사합니다. 마지막으로 논문 심사 과정에서 논문을 꼼꼼하게 읽어주시고 저자와 논문의 발전을 위해 정성스런 의견을 주신 심사자님께 감사드립니다.

References

- Choi, S.E., Ham, B., Song, C., Park, E. Kim, J. and Lee, W. 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.
- Choi, Y.R., Lee, J.S. and Yun, H.C. 2015. Extraction of forest resources using high density LiDAR data. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography* 33(2): 73-81.
- Greenhouse Gas Inventory and Research Center (GIR). 2022. National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea 2021. Ministry of Environment.
- Hong, S., Ham, B., Choi, S.E., Kim, W., Ha, R., Park, S. and Lee, W.K. 2021. Comparative analysis on the sequestration of CO₂ depending on spatial ranges for estimating greenhouse gas inventory in settlement - In case of Seoul -. *Journal of Climate Change Research* 12(6): 767-776.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IGES.
- Kim, H.S. 2013. Global warming and forests. *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(1): 47-50.
- Kim, K.T., Cho, J.W. and Yoo, H.H. 2011. Carbon storage estimation of urban area using KOMPSAT-2 imagery. *The Korea Society For Geospatial Information System* 19(2): 49-54.
- Korea Forest Research Institute (KFRI). 2010a. Carbon Emission Factors by Major Tree species in Forest Greenhouse Gas Inventory. Korea Forest Research Institute. pp. 73.
- Korea Forest Research Institute (KFRI). 2010b. Greenhouse Gas Inventory of Urban Green Areas: a case of the Seoul Metropolitan City. Korea Forest Research Institute. pp. 11.
- Korea Forest Service (KFS). 2020. Street Tree Establishment and Management Manual. Korea Forest Service pp. 62-78.
- Kwon, W.T., Koo, G.S. and Boo, K.O. 2007. Progresses of climate change sciences in IPCC Assessment Reports. *Atmosphere* 17(4): 483-492.
- Lee, H.J. and Ru, J.H. 2012. Application of LiDAR data & high-resolution satellite image for calculate forest biomass. *Journal of the Korean Society for Geospatial Information Science* 20(1): 53-63.
- Park, E.J. and Kang, K.Y. 2010. Estimation of C storage and annual CO₂ uptake by street trees in Gyeonggi-do. *Korean Society of Environment and Ecology* 24(5): 591-600.
- Park, I.S., Jang, Y.W., Chung, K.W., Lee, G., Owen, J.S., Kwon, W.T. and Yun, W.T. 2014. In-depth review of IPCC 5th Assessment Report. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 30(2): 188-200.
- 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.
- Park, M.O. 2015. A study on the urban street landscape design. *Journal of the Korea Institute of the Spatial Design* 10(1): 23-38.
- R Core Team. 2021. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.

- 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.
- Wonju. 2021. Street trees and flower beds status (2021). Wonju's climate. <https://www.wonju.go.kr/www/selectBbsNttView.do?key=4955&bbsNo=604&nttNo=392922&searchCtgr=&searchCnd=all&searchKrd=&pageIndex=1&integrDeptCode=>. (2022. 5. 13).
- Wonju. 2019. Wonju's climate. <https://www.wonju.go.kr/www/contents.do?key=3710&>. (2019. 2. 22).
- Yoon, T.K. et al. 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 : October 24, 2022
First Revision : November 21, 2022
Second Revision : November 28, 2022
Accepted : November 29, 2022