

## LiDAR 기반 가로수 구조지표를 활용한 재적 특성 분석

- 대구광역시 달서구를 사례로 -

Analysis of Volume Characteristics of Street Trees Using LiDAR-Derived Structuralmetrics

- A Case Study of Dalseo-gu, Daegu, South Korea -

서성혁\*, 정태열\*\*

\*경북대학교 조경학과 박사수료, \*\*경북대학교 조경학과 교수

Seo, Seonghyeok\*, Jung, Taeyeol\*\*

\*Ph. D. Candidate, Dept. of Landscape Architecture, Kyungpook National University

\*\*Professor, Dept. of Landscape Architecture, Kyungpook National University

Received: January 26, 2026

Revised: February 27, 2026 (1st)

March 20, 2026 (2nd)

Accepted: March 20, 2026

3인익명 심사필

Corresponding author :

Taeyeol Jung

Professor, Dept. of Landscape  
Architecture, Kyungpook National  
University, Daegu 41566, Korea

Tel.: +82-53-950-5786

E-mail: jungty@knu.ac.kr

### 국문초록

도시 가로수의 재적은 탄소흡수량과 구조적 생육 상태를 반영하는 핵심 지표이나, 기존 평가는 흉고직경(DBH)이나 수고(H) 중심의 단일 생장 지표에 의존하는 한계를 지닌다. 본 연구는 도시 가로수를 대상으로 지상 LiDAR(TLS)와 항공 LiDAR(ALS) 기반 구조지표를 활용하여 재적 형성 특성과 구조지표의 상대적 영향 요인, 그리고 DBH 생장 규모별 재적 분포 특성을 정량적으로 분석하였다. 분석 결과, 수고는 변동성이 낮은 반면 수관 관련 구조지표는 모든 수종에서 높은 변동성을 보여, 도시 가로수의 구조적 특성이 재적 및 수관 지표에서 개체 간 편차로 뚜렷하게 나타났다. 다중회귀분석 결과, 세 수종 모두에서 회귀모형은 통계적으로 유의하였으며( $p < 0.001$ ), 수관면적이 가장 높은 표준화 계수를 보여 재적 형성에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로 확인되었다. 그리고 DBH 생장 규모별 재적 분포 분석 결과, 재적 축적 양상과 분포 안정성은 수종별로 뚜렷한 차이를 보였으며, 특히 은행나무는 비교적 일관된 DBH-재적 관계를 나타낸 반면 왕벚나무와 양버즘나무는 개체 간 편차가 크게 나타났다. 이러한 결과는 도시 가로수의 재적 형성이 단일 생장 지표보다는 수관 구조에 의해 크게 좌우되며, 재적 형성의 구조적 영향 요인이 수종별로 상이하게 나타남을 시사한다.

**주제어:** 탄소중립, 도시림, 수목 구조, 재적분포, 가로환경

### ABSTRACT

The volume of urban street trees is a key indicator reflecting carbon sequestration capacity and structural growth conditions. However, conventional assessments have limitations as they rely primarily on single growth indicators such as diameter at breast height (DBH) or tree height (H). This study quantitatively analyzed the characteristics of volume formation, the relative influence of structuralmetrics, and the distribution patterns of volume according to DBH growth classes using terrestrial LiDAR (TLS) and airborne LiDAR (ALS) derived structuralmetrics for urban street trees. The results showed that tree height exhibited relatively low variability, whereas crown-related structuralmetrics displayed high variability across all species, indicating that structural characteristics of urban street trees are manifested as substantial inter-individual variation in volume and crown-related metrics. Multiple regression analysis revealed that the regression models were statistically significant for all three species ( $p < 0.001$ ), and crown area showed the highest standardized coefficient, indicating that it was the most influential factor in volume formation. In addition, the analysis of volume distribution according to DBH growth classes showed clear interspecific differences in volume accumulation patterns and distribution stability. In particular, Ginkgo biloba exhibited a relatively consistent DBH-volume relationship, whereas Prunus yedoensis and Platanus occidentalis showed greater inter-individual variability. These findings suggest that the volume formation of urban street trees is more strongly influenced by crown structure than by a single growth indicator, and that the structural drivers of volume formation differ among species.

**Keywords:** Carbon Neutrality, Urban Forest, Tree Structure, Volume Distribution, Street Environment

## 1. 서론

### 1.1 연구 배경과 목적

도시 가로수는 단순한 경관 조성을 넘어, 탄소흡수, 미세먼지 저감, 도시열섬 완화, 강우 유출 저감 등 다양한 생태기능을 수행하며 도시 환경의 질을 결정짓는 중요한 녹지 기반 시설로 기능하고 있다. 이 중에서도 최근에는 도시의 탄소중립 달성을 위한 탄소흡수원으로서 가로수의 역할이 주목받고 있으며, 이에 따라 가로수 재적의 정량적 진단과 함께 재적 상태에 따른 탄소흡수 가능성 평가의 중요성이 부각되고 있다.

그러나 국내 도시 가로수는 제한된 생육 공간과 비전문적인 유지관리, 강전정 위주의 획일적 관리 방식 등으로 인해 구조적 품질이 저하되고, 개체 간 품질 편차와 균질성 부족이 반복되는 문제가 지적되고 있다. 특히 KBS 다큐멘터리 「서울나무, 파리나무」(2019)는 동일 수종(양버즘나무)이 서울과 파리에서 전혀 다른 구조적 형태와 생육 상태를 보이는 사례를 통해, 전정 방식과 생육 환경의 차이가 도시 가로수의 구조 품질과 장기적 기능 수행 능력에 결정적인 영향을 미친다는 점을 보여준다.

서울의 가로수는 반복적 강전정과 협소한 공간에 따른 구조 왜곡과 생장 저하가 두드러지는 반면, 파리에서는 초기 수행 유도 및 최소 전정 중심의 관리로 건강하고 균형 잡힌 수관 구조가 유지되고 있다. 이는 가로수가 본래의 환경적·생태적 기능을 효과적으로 수행하기 위해 구조적 안정성과 균형이 반드시 확보되어야 한다는 점을 시사하며, 특히 수관이 충분히 발달하지 못하거나 반복적인 전정으로 구조적 손상이 지속될 경우, 탄소 저장, 그늘 형성, 도심 냉각 등의 주요 기능이 약화되며, 구조와 기능은 상호 의존적인 관계에 있음을 시사한다. 이에 본 연구는 대구광역시 달서구를 대상으로 대표적 가로수 수종인 양벚나무, 양버즘나무, 은행나무를 선정하고, 항공 및 지상 LiDAR를 활용한 3차원 구조 측정 기반 데이터를 바탕으로 다음과 같은 목적을 갖는다.

첫째, 가로수의 주요 구조지표인 수고, 흉고직경(DBH), 수관직경, 수관면적, 수관부피, 지하고 및 수간부피를 대상으로 수종별 기초통계 분석을 수행하여 구조지표의 규모와 변동 특성을 정량적으로 파악한다. 둘째, 가로수 주요 구조지표가 재적 형성에 미치는 영향을 다중회귀 분석을 통해 정량적으로 검증하고, 수종별 구조 특성과 재적 형성 구조의 차이를 분석하고자 한다. 셋째, 흉고직경(DBH)을 기준으로 생장 규모 범주를 설정하고, 범주별 재적 및 구조지표 분포 특성을 비교·분석함으로써, 동일 수종 내에서도 성장 규모에 따라 재적 형성 양상과 구조적 특성이 어떻게 달라지는지를 정량적으로 분석한다. 이를 통해 도시 가로수 재적을 단일 생장 지표가 아닌 수간과 수관 구조가 종합적으로 반영된 결과 지표로 진단하고, 향후 가로수 구조 관리 및 탄소흡수량 평가를 위한 구조 기반 분석의 기초 자료로 활용되기를 기대한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 도시 가로수 구조지표와 재적에 대한 이론적 고찰

도시 가로수의 구조적 특성은 수고, 흉고직경(DBH), 수관직경, 수관면적, 수관부피, 지하고 등 다양한 구조지표를 통해 정량적으로 설명될 수 있으며, 이러한 구조지표는 탄소 저장, 미기후 조절, 미세먼지 저감 등 도시 가로수가 수행하는 생태적 기능과 밀접한 관련을 가진다(IPCC, 2006; 국립산림과학원, 2014). 특히 재적(volume)은 수목의 수간과 수관 구조가 종합적으로 반영된 결과 지표로서, 생체량 및 탄소흡수량을 설명하는 핵심 지표로 활용되어왔다.

한편, 동일 수종 내에서 개체별 구조지표가 어떠한 분포 양상을 보이는지는 도시 가로수의 구조적 상태를 진단하는 데 중요한 기준이 된다. 일반적으로 개체 간 구조지표의 편차가 작고 고르게 분포할수록, 해당 가로수 군집은 높은 균질성을 갖는 것으로 해석할 수 있다. 이러한 균질성은 도심 경관의 일관성과 생태 서비스 제공의 예측 가능성을 높이는 요인으로 작용하며, 장기적인 가로수 관리 효율성과 정책적 지속성 확보 측면에서도 중요한 의미를 지닌다(김은영, 2023). 그러나 실제 도시 가로수 관리 환경에서는 전정 방식의 차이, 제한된 생육 공간, 각종 시설물 간섭 등 다양한 도시 환경 요인으로 인해 동일 수종 내에서도 구조지표의 분포가 불균등하게 형성되는 경우가 빈번하다. 이로 인해 개체 간 재적 확보 수준의 차이가 확대되고, 결과적으로 탄소흡수 능력 역시 개체별로 상이한 양상을 보이게 된다. 특히 강전정 위주의 관리 방식은 수관의 자연스러운 발달을 억제하고 수고의 정상적인 성장 과정을 저해함으로써, 구조지표 간 불균형과 재적 형성의 왜곡을 초래하는 주요 원인으로 지적되고 있다(박현빈 등, 2024).

이에 따라 도시 가로수는 자연림과 달리 지속적인 관리와 공간 제약 속에서 생육하는 특성을 지니므로, 구조지표 해석을 자연림 기반의 선형 생장 가정에 그대로 적용하기에는 한계가 있다. DBH 증가가 재적 증가로 일관되게

연결된다는 일반적 성장 논리만으로는 도시 가로수의 구조 형성을 충분히 설명하기 어렵다. 이러한 특수성을 고려할 때, 도시 가로수의 구조 평가는 관리 조건과 공간 제약을 전제로 한 해석 틀로 전환될 필요가 있다. 최근 도시 녹지 관리 분야에서는 평균적인 구조 규모의 확대 여부보다 개체 간 구조지표 분포의 편차와 집중 양상을 함께 분석하여 가로수 군집 전체의 구조적 균형 상태를 진단하려는 접근이 확대되고 있다. 이에 재적을 중심으로 구조지표의 분포 특성과 균질성을 정량적으로 분석하는 본 연구의 관점은 도시 가로수 구조를 보다 입체적으로 이해하기 위한 이론적 기반을 제공한다.

## 2.2 도시 가로수 구조 분석을 위한 LiDAR 활용 연구 동향

지상 및 항공 라이더(LiDAR)를 활용한 수목 구조 분석은 산림 및 생태 분야에서 수목의 형태와 공간 구조를 정밀하게 계측하기 위한 주요 방법으로 활용되어 왔다. Jupp et al.(2009)은 지상 라이더를 이용하여 수관 구조와 잎 면적 지수(LAI)를 추정하고, 실측값과의 비교를 통해 라이더 기반 구조 계측의 정확성을 검증하였다. Newnham et al.(2015)은 TLS 기반 수고 및 흉고직경 측정의 정확도와 알고리즘 적용 가능성을 분석하여, 라이더 기술을 활용한 수목 구조 분석의 이론적 기반을 제시하였다.

국내에서는 Heo et al.(2019)는 모바일 라이더를 활용하여 도심 가로수의 수고와 흉고직경을 계측하고, 실측 자료와의 상관성 분석을 통해 도시 환경에서도 라이더 기반 수목 측정이 유효함을 확인하였다. 다만 이러한 선행 연구들은 주로 개별 구조지표의 계측 정확도 검증에 초점을 두고 있어, 수종 간 구조적 차이나 동일 수종 내 구조지표 분포 특성, 재적의 균질성에 대한 종합적인 해석으로까지는 확장되지 못한 한계가 있다.

서성혁 등(2024)은 지상 라이더(TLS)와 항공 라이더(ALS)를 병행하여 수목의 상하부 구조를 동시에 계측하고, 두 플랫폼 간 측정 특성과 정합성을 검증하였다. 이는 라이더 장비 간 계측 성능 비교라는 기술적 측면에서 의미 있는 성과를 제시하였으나, 대상지가 공원 등 특정 공간으로 제한되었으며, 분석 초점 역시 도시 가로수 재적의 분포 특성이나 구조적 균질성에 대한 해석으로까지는 확장되지 못하였다.

이에 반해 기존 LiDAR 기반 도시 수목 연구는 수고 및 흉고직경의 계측 정확도 검증이나 플랫폼 간 성능 비교에 주로 초점을 두어 왔으며, 동일 수종 내 재적 분포 특성과 구조적 균질성을 종합적으로 분석한 연구는 상대적으로 제한적이다. 본 연구는 지상 라이더와 항공 라이더를 통합적으로 활용하여 도시 가로수의 수관과 수관 구조를 동시에 계측하고, 재적을 중심으로 구조지표 간 결합 구조와 DBH 범주별 재적 분포 특성을 통합적으로 분석하였다. 특히 동일 DBH 조건에서도 수종별로 재적 분포의 안정성과 변동 폭이 상이하게 나타나는 구조적 특성을 정량적으로 제시함으로써, 도시 가로수의 구조 상태를 평균값 중심이 아닌 분포 기반 관점에서 해석하였다는 점에서 기존 연구와 구별된다. 이러한 접근은 향후 도시 가로수의 구조 관리 및 재적 기반 탄소평가 논의에 기초 자료로 활용될 수 있는 방법론적 확장 가능성을 제시한다.

## 3. 연구범위 및 방법

### 3.1 연구범위

본 연구는 대구광역시 달서구를 대상으로 도시 가로수의 구조적 생육 특성과 품질 균질성을 정량적으로 분석하고자 하였다(Figure 1 참조). 달서구는 산업단지와 대형 간선도로가 밀집된 지역으로 가로수의 생태적 기능과 구조적 품질 관리의 중요성이 높은 지역적 특성을 가진다. 데이터 수집은 수관 생장이 안정된 2024년 9월에 수행하였으며, 대상지와 수종은 다음 기준에 따라 선정하였다.

첫째, 조사 수종은 대구 지역 내 식재 비율이 높고 전정 관리가 빈번히 이루어지는 대표적 가로수종인 왕벚나무, 양버즘나무, 은행나무를 대상으로 하였다. 둘째, 본 연구는 항공 및 지상 라이더 기반의 고정밀 입체 측정을 수행하므로, 드론 비행이 가능하고 비행 제한구역이 아닌 구역을 우선 선정하였다. 이에 따라 항공촬영의 장애 요소가 적은 지역을 중심으로 조사 구간을 구성하였다. 셋째, 가로수의 조성 연도는 1987년부터 1992년 사이에 식재된 구역으로 한정하였다. 이는 생장 단계 차이에 따른 구조적 편차를 최소화하기 위한 기준이며, 묘목 단계의 가로수는 분석 대상에서 제외하였다<sup>1)</sup>. 넷째, 조사 구간은 구조지표 비교의 일관성을 확보하기 위하여 대상 도로의 분산이 최소화되도록 설정하였다. 그 결과 전체 조사 구간은 반경 약 4km 범위 내에 위치함을 확인하였다.

다섯째, 점군 데이터를 기반으로 수목의 전체 구조가 온전하게 표현된 개체만을 최종 분석 대상으로 선정하였다. 수관 또는 수관 일부가 누락된 데이터, 구조 왜곡이 심한 개체, 다중 식재로 인해 구조 식별이 어려운 경우는 제외하여 정량 지표의 신뢰도를 확보하고자 하였다(Table 1 참조).

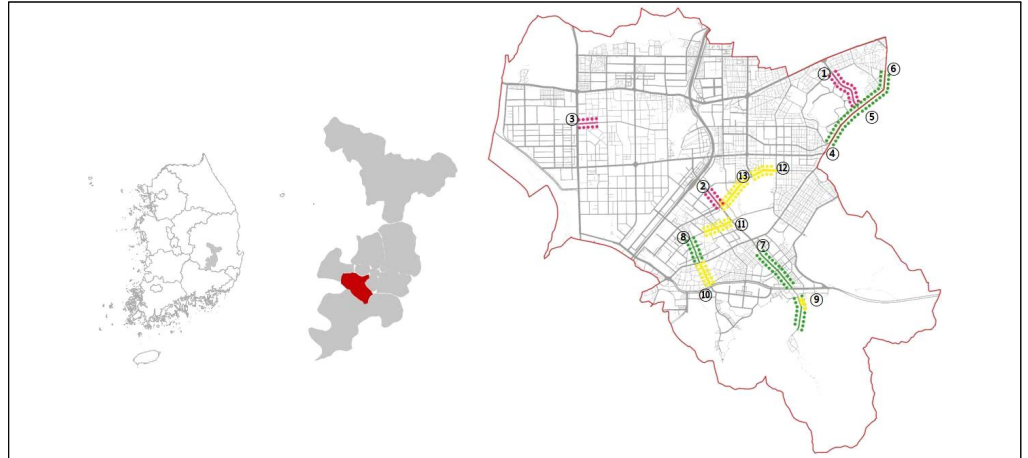


Figure 1. Research site  
 Legend: ● *P. yedoensis*, ● *P. occidentalis*, ● *G. biloba*

Table 1. Research site

Species	No.	Road name	Land use type	Planted	Age of tree	Total
<i>P. yedoensis</i>	①	Duryu Park	Natural Green	1988	42 ± 1 year	254
	②	Wolgok-ro	General Residential	1992	41 ± 1 year	
	③	Seongseobuk-ro	General industrial	1993	40 ± 1 year	
<i>P. occidentalis</i>	④	Seongdang-ro	Neighborhood commercial	1987	44 ± 1 year	359
	⑤	Seongdang-ro	General Residential	1987	44 ± 1 year	
	⑥	Wolgok-ro	General Residential	1992	42 ± 1 year	
	⑦	Wolgok-ro	General Residential/Natural Green	1992	42 ± 1 year	
	⑧	Jincheon-ro	General Residential	1992	42 ± 1 year	
<i>G. biloba</i>	⑨	Wolgok-ro	General Residential/Natural Green	1992	44 ± 1 year	298
	⑩	Jincheon-ro	General Residential	1992	44 ± 1 year	
	⑪	Joamnam-ro	General Residential	1992	44 ± 1 year	
	⑫	Haksanbuk-ro	General Residential/Natural Green	1987	46 ± 1 year	
	⑬	Haksanbuk-ro	General Residential	1987	46 ± 1 year	
Total count						911

### 3.2 가로수 구조지표 및 재적 수집 방법

#### 3.2.1 항공라이다(airborne LiDAR) 수집 방법

항공라이다는 DJI사 Zenmuse L1을 활용하여 수목 상부 구조를 중심으로 가로환경을 측정하였다(Table 2 참조). 측정은 다음과 같이 하였다. 항공 LiDAR 기반 데이터 수집을 위해 드론원스톱 민원포털(<https://drone.onestop.go.kr>)을 통해 비행 가능 구역을 사전 확인하고, 관계 법령에 따라 비행 승인 및 항공 촬영 허가를 이행하였다. 데이터 수집은 자동 비행(auto-flight) 모드를 기반으로 RTK-GNSS 보정 신호를 적용하여 좌표 정밀도를 확보하였고, 비행 중에는 IMU(inertial measurement unit) 및 LiDAR 센서의 실시간 보정 시스템을 통해 기체 흔들림과 오차를 최소화하였다. 비행 고도는 60-80m로 일정하게 유지하여 포인트 클라우드의 밀도 균일성을 확보하였으며, 건축물 간섭을 최소화하고 중첩 정확도를 향상시키기 위해 경로 간 중첩률(overlap ratio)을 50-60%로 설정한 'ㄱ'자 형태의 비행 경로를 적용하였다(Figure 2 참조).

#### 3.2.2 지상라이다(terrestrial LiDAR) 수집 방법

지상라이다는 GreenValley사의 LiGrip H120을 활용하여 수목하부구조를 중심으로 가로환경을 측정하였다(Table 2

Table 2. LiDAR measurement equipment




Category	Terrestrial LiDAR (TLS)	Airborne LiDAR (ALS)
Device name	LiGrip H120	Zenmuse L1
Device type	Ground-based mobile LiDAR	Drone-mounted airborne LiDAR (M350 RTK)
Manufacturer	GreenValleyInternational	DJI + Livox
Sensor type	Rotating mechanical LiDAR	LivoxAVIA (non-repetitive scan)
Measurement range	Up to 250 m	Up to 450 m
Point density	최대 1,200,000 pts/sec	최대 240,000 pts/sec
Image		 
Application	Measurement of lower tree structure	Measurement of upper tree structure



Figure 2. Lidar data collection path and method  
 Legend: — Walking, ..... Vehicle, - - - Drone

참조). 측정은 다음과 같이 하였다. 지상라이다 데이터는 차량 기반과 도보 기반 라이다 측정을 병행하여 수집하였다(Figure 2 참조). 차량은 시속 8-15km로 주행하며 도로 양측의 가로수 데이터를 획득하였고, 도보 측정은 3-5km/h 속도로 왕복하며 줄기 및 하부 가지 데이터를 보완적으로 확보하였다. 지상라이다 측정 시, 수목의 전체 구조를 보다 정밀하게 포착하기 위해 수목의 수관과 줄기를 중심으로 다양한 각도(0°, 45°, 90°)에서 데이터를 획득하였다. 특히, 차량 기반 라이다로는 포착이 어려운 하부 가지와 줄기 부분의 세부 정보를 확보하기 위해 도보 기반 정적 측정을 통해 보완하였다. 이동형 라이다 측정 시에는 주행 중 센서의 위치와 각도를 실시간으로 조정하여 측정 정밀도를 향상시키고, 차량 속도와 스캔 주파수를 조정하여 데이터 손실을 방지하였다. 수집된 데이터는 항공라이다 데이터와 정합하여 포인트 클라우드 데이터의 위치 오차를 최소화하였으며, RTK-GNSS 기반의 정밀 좌표를 반영하여 측정 정합성을 높였다. 이를 통해 개별 수목의 구조적 특성을 보다 정확하게 분석할 수 있도록 하였다.

### 3.2.3 포인트 클라우드 데이터 처리 방법

본 연구에서는 도심 가로수의 구조를 정밀하게 측정하기 위해 항공 라이다(airborne laser scanning, ALS)와 지상 라이다(terrestrial laser scanning, TLS)를 병행하여 수목의 상-하부를 통합한 고정밀 3차원 점군(point cloud) 데이터를 구축하였다. 항공 라이다는 수관 상부를 효과적으로 포착할 수 있고, 지상 라이다는 수관과 하부 가지 구조를 정밀하게 측정할 수 있어, 두 데이터의 결합은 도시 수목의 입체적 구조 분석에 용이하다는 것을 확인하였다(Figure 3 참조; 서성혁 등, 2024).

두 라이다 데이터의 정합은 ICP(iterative closest point) 알고리즘을 기반으로 수행하였다. 이는 서로 다른 두 점군 간에 가장 가까운 대응점 쌍을 반복적으로 탐색하고, 두 점군 사이의 거리 오차를 최소화하는 최적의 강체 변환 행렬 T\*를 도출하는 방식이다(Besl and McKay, 1992). 정합 과정은 다음과 같이 식 1과 식 2로 목적 함수를 정의한다:

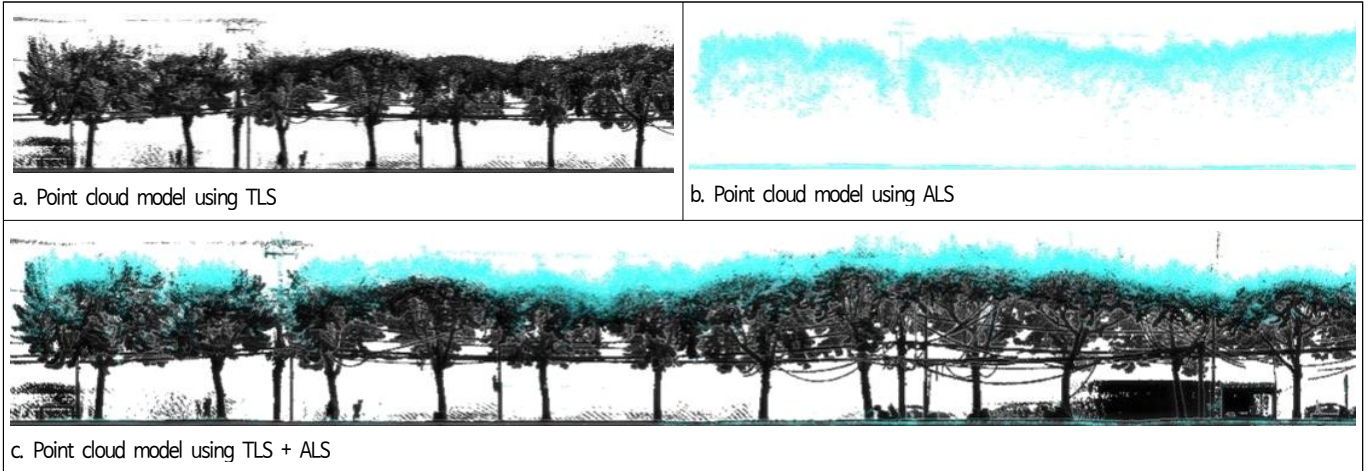


Figure 3. Point cloud data according to tree measurement method

$$T^* = \arg \min_{T \in \tau} \text{dist}(T(M), S) \tag{식 1}$$

$$\text{dist}(T(M), S) = \sum_{m \in T(M)} \| m - s_m \|_2^2, s_m = \arg \min_{s \in S} \| s - m \|_2^2 \tag{식 2}$$

(식 1)에서 M은 이동 대상 점군(TLS), S는 기준 점군(ALS), T는 가능한 변환 행렬 집합, dist는 정합 후 두 점군 간 거리 함수이다. (식 2)는 각점에 대해 기준 점군 S 내 최근점 점과의 유클리디안 거리 제곱합을 최소화하는 방식으로 두 점군 간의 회전 및 변환을 추정하는 과정이다.

정합은 ICP 기반 자동 정렬 후, 건축물 모서리 및 도로 경계선과 같은 기하학적으로 안정적인 고정 구조물을 기준으로 정렬 상태를 확인하고 필요 시 수동 조정을 통해 국지적 오정합을 최소화하였다. ICP 정합 결과, RMSE는 평균 0.042m(범위 0.031-0.058m)로 나타났다. 해당 RMSE 값은 Zenmuse L1의 수직 정확도(약 ± 5cm) 및 LiGrip H120의 상대 정확도(약 ± 3cm) 범위 내에서 확인된 결과이다.

ALS와 TLS는 관측 기하 및 점밀도 특성이 상이하며, ALS 점군은 주로 수관 상부 구조 확보에, TLS 점군은 수간 및 하부 구조 재현에 상대적으로 기여하였다. 특히 항공 라이다 점군은 수간부 관측이 제한적이므로 수간부피 산정은 주로 TLS 점군을 기반으로 수행되었으며, 통합 점군은 상하부 구조를 보완적으로 반영하는 조건에서 구성되었다. 플랫폼별 평균 점밀도는 ALS 238pts/m<sup>2</sup>, TLS 1,240pts/m<sup>2</sup>, 통합 점군 1,620pts/m<sup>2</sup>로 확인되었다. 이에 본 연구에서는 두 플랫폼의 보완적 특성을 전제로 통합 점군을 구성하였으며, 동일 처리 절차 하에서 구조지표를 산출하였다. 정합된 통합 점군은 Lidar360(GreenValley International) 소프트웨어를 활용하여 다음과 같이 처리하였다. 첫째, LiDAR360을 활용하여 노이즈 제거 및 지면 분리를 수행하였다. 노이즈 제거는 Noise Filter(sphere radius 0.5m, StdDev 1.0)를 적용하였다. 노이즈 제거 전후 점 개수 비교 결과 평균 제거율은 약 9-12%로 나타났다. 또한 Noise Filter의 StdDev 값을 0.8 및 1.2로 조정하여 구조지표 변화를 비교한 결과, 수관부피 및 수간부피 평균값의 변화는 각각 ± 2% 및 ± 1% 이내로 나타났다. 이후 TIN(triangulated irregular network) 기반 알고리즘을 적용하여 지면과 비지면 점군을 분리하였다. 둘째, LiDAR360의 Classify by Deep Learning 기능을 통해 수목 외의 객체(건축물, 차량, 전신주 등)를 분류하고 제거하였다. 이후 오분류 객체에 대해서는 수동 검수를 통해 보완하였다. 셋째, 전처리 및 객체 분류가 완료된 점군을 대상으로 Tree Information 모듈을 활용하여 개체 수목을 자동 분리하였다. 개체 분리는 정규화된 식생 점군을 대상으로 공간적 인접성 및 최소 수고-흉고직경 조건을 기반으로 수행되었으며, 모듈에서 자동 생성된 Tree ID를 기준으로 개체 구분이 이루어졌다. 각 Tree ID는 하나의 개체 수목에 대응하는 점군 집합을 의미하며, 이후 구조지표 산정은 Tree ID 단위로 수행하였다. 중첩 수관이 존재하는 구간에 대해서는 자동 분리 결과를 시각적으로 검수하여 개체 귀속의 적절성을 확인하였으며, 흉고 높이(1.2m) 단면에서 단일 줄기 단면이 명확히 확인되지 않는 개체는 분석 대상에서 제외하였다. 이후 Lidar360의 Tree Information 모듈을 활용하여 대상 수목의 수고, 흉고직경(DBH), 수관직경, 수관면적, 수관부피, 지하고 및 수간부피 7개 구조 지표를 자동 산출하였다<sup>2)</sup>.

### 3.2.4 통계분석 방법

본 연구에서는 가로수 재적의 형성 특성과 구조지표 간 관계를 정량적으로 분석하기 위하여 다음과 같은 통계 분석 절차를 수행하였다. 첫째, 가로수의 주요 구조지표인 수고(H), 흉고직경(DBH), 수관직경(CD), 수관면적(CA), 수관부피(CV), 지하고(CBH), 수간부피(SV) 값을 대상으로 수종별 기초통계 분석을 실시하였다. 각 지표에 대해 표본수, 평균, 중앙값, 표준편차, 최소값 및 최대값을 산출하고, 변동계수(coefficient of variation, CV)를 계산하여 구조지표 및 재적 값의 분포 범위와 개체 간 변동 수준을 비교하였다. 둘째, 가로수 재적 형성에 영향을 미치는 구조지표의 상대적 영향력을 정량적으로 파악하기 위하여 수종별 다중회귀분석을 실시하였다. 종속변수는 전체재적으로 설정하고, 독립변수는 수관면적(CA), 수관직경(CD), 수고(H), 흉고직경(DBH), 지하고(CBH)로 구성하였다. 수간부피와 수관부피는 전체재적의 구성 요소에 해당하므로 독립변수에서 제외하였다. 모형의 적합성은 조정결정계수(Adj. R<sup>2</sup>), F값, p-value, RMSE를 통해 검토하였으며, 각 구조지표의 상대적 영향력은 표준화회귀계수( $\beta$ )를 기준으로 해석하였다. 또한 독립변수 간 다중공선성은 분산팽창지수(VIF)를 통해 진단하였다. 셋째, 동일 수종 내에서 생장 규모에 따른 재적 분포 특성을 비교하기 위해 흉고직경(DBH)을 기준으로 생장 규모 범주를 설정하였다. DBH 범주별로 재적 값의 평균, 중앙값 및 사분위범위(IQR)를 산출하고, 박스플롯(boxplot)을 활용하여 분포 특성을 비교하였다. 이를 통해 생장 단계에 따른 재적 증가 양상과 분포 특성의 차이를 수종별로 분석하였다.

## 4. 결과 및 분석

### 4.1 가로수 주요 구조지표 특성

본 절에서는 가로수 주요 구조지표의 규모 수준과 개체 간 변동성을 파악하기 위해 수종별 기초통계량을 산출하고, 각 지표가 갖는 구조적 특성과 변동 양상을 중심으로 분석하였다(Table 3 참조). 가로수 주요 지표는 수고(tree

Table 3. Descriptive statistics of structural indicators by street tree species

Indicator	Species	n	Mean	SD	Median	Q25	Q75	CV (%)	Mean ± SD
Tree height (m)	<i>P. yedoensis</i>	254	9.7	1.9	10.0	8.2	10.9	0.19	9.65 ± 1.87
	<i>P. occidentalis</i>	359	11.8	2.0	11.4	10.5	12.8	0.17	11.84 ± 2.01
	<i>G. biloba</i>	298	10.3	1.2	10.3	9.6	11.0	0.12	10.33 ± 1.25
Diameter at breast height (cm)	<i>P. yedoensis</i>	254	35.7	10.5	35.4	28.8	42.2	0.29	35.71 ± 10.51
	<i>P. occidentalis</i>	359	41.6	7.9	41.3	36.5	46.3	0.19	41.58 ± 7.95
	<i>G. biloba</i>	298	29.4	6.8	27.8	24.2	33.3	0.23	29.40 ± 6.85
Crown diameter (m)	<i>P. yedoensis</i>	254	9.4	2.6	10.0	7.1	11.3	0.27	9.44 ± 2.55
	<i>P. occidentalis</i>	359	10.1	2.3	10.1	8.1	12.0	0.23	10.13 ± 2.32
	<i>G. biloba</i>	298	7.7	1.7	7.6	6.4	8.8	0.22	7.74 ± 1.72
Crown area (m <sup>2</sup> )	<i>P. yedoensis</i>	254	67.0	31.7	73.7	36.2	90.9	0.47	67.01 ± 31.70
	<i>P. occidentalis</i>	359	76.7	32.7	73.9	47.5	102.4	0.43	76.68 ± 32.75
	<i>G. biloba</i>	298	43.9	19.9	41.1	28.4	54.8	0.45	43.90 ± 19.87
Crown volume (m <sup>3</sup> )	<i>P. yedoensis</i>	254	307.1	179.6	347.3	124.6	430.1	0.58	307.11 ± 179.58
	<i>P. occidentalis</i>	359	427.1	244.8	374.6	214.3	606.0	0.57	427.11 ± 244.80
	<i>G. biloba</i>	298	202.5	117.5	180.2	113.5	257.4	0.58	202.46 ± 117.52
Crown base height (m)	<i>P. yedoensis</i>	254	2.9	0.8	2.8	2.3	3.4	0.28	2.89 ± 0.81
	<i>P. occidentalis</i>	359	3.7	1.0	3.6	3.0	4.4	0.26	3.69 ± 0.98
	<i>G. biloba</i>	298	3.0	0.7	3.1	2.6	3.5	0.24	3.03 ± 0.72
Stem volume (m <sup>3</sup> )	<i>P. yedoensis</i>	254	0.8	0.2	0.8	0.7	0.9	0.24	0.82 ± 0.20
	<i>P. occidentalis</i>	359	1.0	0.3	1.0	0.8	1.1	0.25	1.02 ± 0.26
	<i>G. biloba</i>	298	0.7	0.1	0.7	0.6	0.8	0.21	0.69 ± 0.15

height, H), 흉고직경(diameter at breast height, DBH), 수관직경(crown diameter, CD), 수관면적(crown area, CA), 수관부피(crown volume, CV), 지하고(crown base height, CBH), 수간부피(stem volume, SV)이며, 평균, 표준편차, 중앙값, 사분위수(Q25-Q75), 변동계수(CV)를 통해 구조적 분포 특성을 종합적으로 비교하였다.

먼저, 수고(H)의 평균은 왕벚나무 9.7m, 양버즘나무 11.8m, 은행나무 10.3m로 나타났으며, 변동계수(CV)는 0.12-0.19 범위로 비교적 낮은 수준을 보였다. 이는 수고가 수종 간 차이는 존재하지만, 개체 간 변동성은 상대적으로 제한적인 구조지표임을 의미한다. 이러한 특성은 도시 가로수 관리 기준 및 식재 환경의 영향을 받아 수고가 일정 수준으로 조절되는 경향과 관련될 가능성을 시사한다. 흉고직경(DBH)은 양버즘나무(41.6cm), 왕벚나무(35.7cm), 은행나무(29.4cm) 순으로 평균값이 나타났으며, 변동계수(CV)는 0.19-0.29 범위로 수고보다 높은 변동성을 보였다. 이는 직경 성장이 수고에 비해 개체별 생육 조건의 영향을 보다 민감하게 반영하는 지표임을 보여준다. 수관 관련 지표에서는 변동성이 더욱 두드러졌다. 수관직경(CD)의 변동계수(CV)는 0.22-0.27, 수관면적(CA)은 0.43-0.47, 수관부피(CV)는 0.57-0.58로 단계적으로 증가하는 경향을 보였다. 특히 수관부피는 모든 수종에서 가장 높은 변동계수를 나타내어, 개체 간 구조적 편차가 가장 크게 나타나는 지표로 확인되었다. 이는 도시 가로수의 수관 발달이 공간 조건, 관리 강도, 주변 인프라 간섭 등 다양한 환경 요인의 영향을 복합적으로 반영하는 구조적 특성임을 시사한다. 지하고(CBH)의 평균은 왕벚나무 2.9m, 양버즘나무 3.7m, 은행나무 3.0m로 나타났으며, 변동계수(CV)는 0.24-0.28 범위로 중간 수준의 변동성을 보였다. 수간부피(SV) 역시 변동계수(CV)가 0.21-0.25 수준으로 나타나, 수고에 비해 상대적으로 높은 변동성을 보이는 지표로 확인되었다.

종합하면, 수고와 같은 선형적 성장 지표는 비교적 안정적인 분포 특성을 보인 반면, 수관부피 및 수관면적과 같은 재적 기반 지표는 높은 변동성을 나타내어 도시 가로수의 구조적 이질성을 보다 민감하게 반영하는 핵심 지표로 나타났다. 이러한 결과는 도시 가로수의 구조지표가 지표 유형에 따라 변동성 수준이 상이함을 보여준다.

## 4.2 가로수 수종별 재적 형성 영향요인 분석

본 절에서는 수종별 전체재적 형성에 영향을 미치는 구조지표의 상대적 기여도를 정량적으로 비교·검증하기 위하여 다중회귀분석을 실시하였다. 종속변수는 전체재적으로 설정하고, 독립변수는 수관면적(CA), 수관직경(CD), 수고(H), 흉고직경(DBH), 지하고(CBH)를 포함하였다. 수간부피 및 수관부피는 전체재적의 구성 요소에 해당하여 구조적으로 종속 관계를 형성하므로 독립변수에서 제외하였다. 변수 간 상대적 영향력은 표준화회귀계수( $\beta$ )를 기준으로 비교하였으며, 공선성 여부는 분산팽창지수(VIF)를 통해 검토하였다. 수종별 다중회귀모형의 적합도를 분석한 결과, 세 수종 모두 모형은 통계적으로 유의하였다( $p < 0.001$ ). 조정결정계수(Adj.  $R^2$ )는 0.930-0.960 범위로 나타나 구조지표가 재적 변동의 대부분을 설명하는 것으로 나타났다(Table 4 참조).

### 4.2.1 왕벚나무 재적 형성 요인 분석

왕벚나무에서는 수관면적이 가장 높은 표준화계수( $\beta = 1.465, p < 0.001$ )를 나타내어 재적 형성에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로 확인되었다. 수고는 유의한 정(+)의 영향을 보였으며( $\beta = 0.192, p < 0.001$ ), 수직 생장이 재적 증가에 보조적으로 기여하는 구조를 나타냈다. 수관직경은 음(-)의 계수로 유의하였으나( $\beta = -0.636, p < 0.001$ ), 수관면적과의 공선성이 높아(VIF  $\approx 23$ ) 부호 해석에는 제한이 있다. 흉고직경은 통계적으로 유의하지 않았으며( $\beta = 0.009, p = 0.637$ ), 왕벚나무에서는 흉고직경보다 수관 규모 요인이 재적 형성에 더 직접적으로 작용하는 것으로 나타났다. 지하고는 유의한 음(-)의 영향을 보였으며( $\beta = -0.042, p = 0.023$ ), 동일 수관 조건에서 수관 하부 시작 높이가 높을수록 줄기 하부 축적량이 감소하는 경향이 반영된 결과로 판단된다(Table 5 참조).

### 4.2.2 양버즘나무 재적 형성 요인 분석

양버즘나무에서도 수관면적이 가장 높은 표준화계수를 나타내어 재적 형성에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로 확인되었다( $\beta = 1.072, p < 0.001$ ). 수고는 유의한 정(+)의 영향을 보였으며( $\beta = 0.246, p < 0.001$ ),

Table 4. Goodness-of-fit statistics for species-specific multiple regression models

Species	n	Adj. $R^2$	F	p-value	RMSE
<i>P. yedoensis</i>	254	0.930	678.52	< 0.001	46.80
<i>P. occidentalis</i>	359	0.941	1,140.85	< 0.001	59.04
<i>G. biloba</i>	298	0.960	1,415.10	< 0.001	23.38

Table 5. Multiple regression results for total volume of *Prunus yedoensis*

Indicator	B	SE	$\beta$	<i>t</i>	<i>p</i> -value	VIF
Crown area (m <sup>2</sup> )	8.303	0.452	1.465	18.351	< 0.001	23.2
Crown diameter (m)	-44.847	5.598	-0.636	-8.012	< 0.001	22.98
Tree height (m)	18.424	2.090	0.192	8.813	< 0.001	1.72
Diameter at breast height (cm)	0.157	0.334	0.009	0.471	0.637	1.38
Crown base height (m)	-9.267	4.057	-0.042	-2.284	0.023	1.23

왕벚나무보다 다소 높은 영향력을 나타냈다. 수관직경은 음(-)의 계수로 유의하게 나타났으나( $\beta = -0.320, p < 0.001$ ), 수관면적과의 공선성이 높아(VIF  $\approx 24-26$ ) 독립적 효과의 해석에는 주의가 요구된다. 흉고직경은 유의한 정(+)의 영향을 보였으나( $\beta = 0.072, p < 0.001$ ), 수관 관련 지표에 비해 기여도는 낮은 수준이었다. 지하고 역시 유의한 음(-)의 영향을 보였으며( $\beta = -0.058, p < 0.001$ ), 수관 하부 시작 높이와 재적 간의 음의 관계가 확인되었다(Table 6 참조).

#### 4.2.3 은행나무 재적 형성 요인 분석

은행나무에서는 수관면적이 가장 높은 표준화계수( $\beta = 0.644, p < 0.001$ )를 나타내어 재적 형성의 주요 요인으로 나타났다. 수관직경은 유의한 정(+)의 영향을 보였으며( $\beta = 0.176, p < 0.001$ ), 수평 확산 규모가 재적 증가에 독립적으로 기여하는 것으로 나타났다. 이는 왕벚나무 및 양버즘나무에서 나타난 음(-)의 계수와 대비되는 결과이다. 흉고직경 또한 유의한 정(+)의 영향을 보였으며( $\beta = 0.163, p < 0.001$ ), 흉고직경 생장이 재적 증가와 직접적으로 연계됨을 확인하였다. 수고는 유의하였으나 상대적 영향력은 제한적이었다( $\beta = 0.084, p < 0.001$ ). 반면 지하고는 통계적으로 유의하지 않았다( $\beta = -0.014, p = 0.233$ ). 공선성은 전반적으로 낮은 수준(VIF < 5)으로 나타났다(Table 7 참조).

### 4.3 가로수 흉고직경(DBH)별 재적 분포 특성

본 절에서는 수종별 흉고직경(DBH) 범주에 따른 가로수 지상부 재적 분포 특성을 분석하여, DBH 증가에 따라 재적의 중심 경향과 분포 폭이 어떻게 변화하는지를 비교하고자 하였다. DBH는 수목의 크기를 대표하는 주요 지표로 활용되지만, 동일한 DBH 범주 내에서도 재적 분포가 수종에 따라 상이하게 나타날 수 있다. 이에 DBH 범주별 평균 재적과 함께 중앙값, 사분위범위(IQR)를 중심으로 분포 특성을 정리하여, 수종별 재적 형성 양상의 차이를 살

Table 6. Multiple regression results for total volume of *Platanus occidentalis*

Indicator	B	SE	$\beta$	<i>t</i>	<i>p</i> -value	VIF
Crown area (m <sup>2</sup> )	8.014	0.490	1.072	16.369	< 0.001	25.96
Crown diameter (m)	-33.734	6.606	-0.320	-5.107	< 0.001	23.74
Tree height (m)	29.955	2.031	0.246	14.747	< 0.001	1.67
Diameter at breast height (cm)	2.219	0.470	0.072	4.722	< 0.001	1.41
Crown base height (m)	-14.524	3.300	-0.058	-4.401	< 0.001	1.05

Table 7. Multiple regression results for total volume of *Ginkgo biloba*

Indicator	B	SE	$\beta$	<i>t</i>	<i>p</i> -value	VIF
Crown area (m <sup>2</sup> )	3.815	0.153	0.644	24.862	< 0.001	4.95
Crown diameter (m)	12.020	1.750	0.176	6.867	< 0.001	4.85
Tree height (m)	7.894	1.356	0.084	5.821	< 0.001	1.53
Diameter at breast height (cm)	2.805	0.320	0.163	8.771	< 0.001	2.55
Crown base height (m)	-2.309	1.933	-0.014	-1.195	0.233	1.03

해보고자 하였다.

### 4.3.1 양벚나무 흉고직경별 재적 분포 특성

양벚나무는 DBH 증가에 따라 평균 재적이 전반적으로 증가하는 경향을 보였으나, 중-대경급 구간에서 증가 양상이 일정하게 유지되지는 않았다. DBH 20-45cm 구간까지 평균 재적은 98.7에서 418.5로 점진적으로 증가하였으나, 45-50cm 및 그 이상 구간에서는 평균 재적이 직전 DBH 범주와 유사하거나 낮게 나타나, 평균값 기준의 증가 추세가 지속되지 않는 양상이 확인되었다(Table 8 참조).

흉고직경별 재적 분포 특성을 살펴보면, DBH 25-30cm 및 30-35cm 구간에서 IQR이 각각 270.2와 244.4로 크게 확대되었으며, 35-40cm 구간에서도 IQR이 243.1로 높은 수준을 유지하였다. 이는 증경목 이후 구간에서 동일 DBH 범주에 속한 개체들 간 재적 분포 폭이 크게 나타났음을 의미한다. 대경급 구간( $\geq 45$ cm)에서도 IQR이 상대적으로 크게 나타나, 평균 재적 증가가 둔화되는 동시에 분포의 변동성은 지속적으로 유지되는 특성이 확인되었다(Figure 4 참조).

### 4.3.2 양버즘나무 흉고직경별 재적 분포 특성

양버즘나무는 DBH 증가에 따라 평균 재적이 전반적으로 증가하는 경향을 보였으며, 중-대경급 구간에서 평균 재적 수준이 크게 확대되었다. DBH 20-25cm 및 25-30cm 구간에서 평균 재적은 각각 192.1과 215.5로 나타났으며, 이후 DBH 45-50cm 및 55-60cm 구간에서는 평균 재적이 556.3과 753.0으로 크게 증가하였으나, DBH 55cm 이상 구간에서는 평균 재적이 직전 DBH 범주보다 낮게 나타났다(Table 9 참조).

흉고직경별 재적 분포 특성은 DBH 35-40cm 및 40-45cm 구간에서 IQR이 각각 272.4와 323.9로 크게 확대되었으며, 50cm 이상 구간에서도 IQR이 높은 수준을 유지하였다. 이는 양버즘나무에서 DBH 증가에 따라 평균 재적이 증가하는 경향과 함께, 대경급 구간으로 갈수록 동일 DBH 범주 내 재적 분포 폭이 크게 확대되는 특성이 동시에 나타났음을 보여준다(Figure 5 참조).

Table 8. DBH-class-based volume distribution of *Prunus yedoensis*

Species	DBH_class	n	Mean	SD	Median	Min	Max	Q25	Q75	IQR
<i>Prunus yedoensis</i>	< 20	18	98.7	75.7	74.8	31.2	340.7	55.3	103.7	48.4
	20-25	25	135.4	93.1	115.2	22.0	399.7	70.9	204.5	133.6
	25-30	34	251.8	160.1	153.8	64.1	521.8	114.6	384.8	270.2
	30-35	46	286.8	145.2	342.1	48.4	580.0	143.2	387.6	244.4
	35-40	47	358.0	158.2	396.4	75.9	655.4	194.1	437.3	243.1
	40-45	44	418.5	176.3	423.4	101.6	777.1	342.6	507.4	164.7
	45-50	21	441.3	121.1	490.8	58.3	597.1	361.8	517.2	155.4
	50-55	10	412.3	134.5	393.4	136.0	641.9	369.7	481.9	112.2
	55-60	5	350.6	223.1	339.1	63.0	582.3	210.8	557.8	347.0
$\geq 60$	4	228.7	176.9	218.9	75.5	401.6	76.5	371.1	294.6	

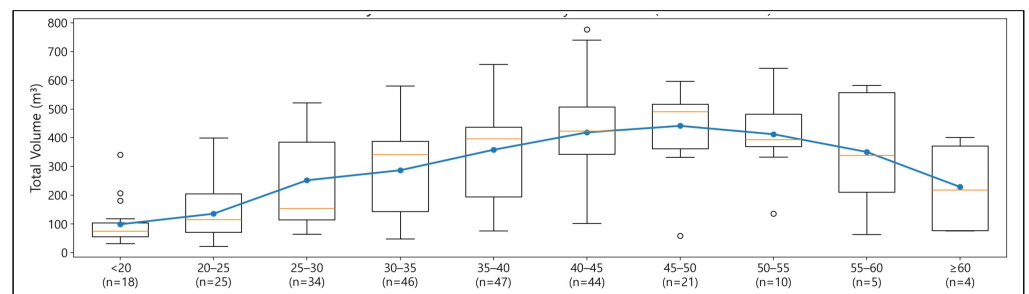


Figure 4. DBH-class-based volume distribution of *Prunus yedoensis*  
Legend: —●— Mean

Table 9. DBH-class-based volume distribution of *Platanus occidentalis*

Species	DBH_class	n	Mean	SD	Median	Min	Max	Q25	Q75	IQR
<i>Platanus occidentalis</i>	20-25	6	192.1	134.2	127.1	123.1	461.0	125.5	173.9	48.3
	25-30	16	215.5	75.8	195.3	139.6	417.1	166.5	219.0	52.5
	30-35	51	247.4	104.7	199.2	81.6	609.5	172.6	309.1	136.5
	35-40	82	347.5	191.3	297.7	96.8	840.8	201.6	474.0	272.4
	40-45	97	430.2	195.3	418.4	94.4	1,027.7	283.3	607.2	323.9
	45-50	61	556.3	200.7	560.7	192.0	1,311.2	437.2	658.7	221.5
	50-55	24	715.5	312.5	717.0	94.0	1,652.6	563.6	852.4	288.8
	55-60	17	753.0	288.9	697.0	187.8	1,378.3	582.3	845.3	263.0
	≥ 60	5	469.0	146.2	516.3	306.6	640.9	327.1	554.0	226.9

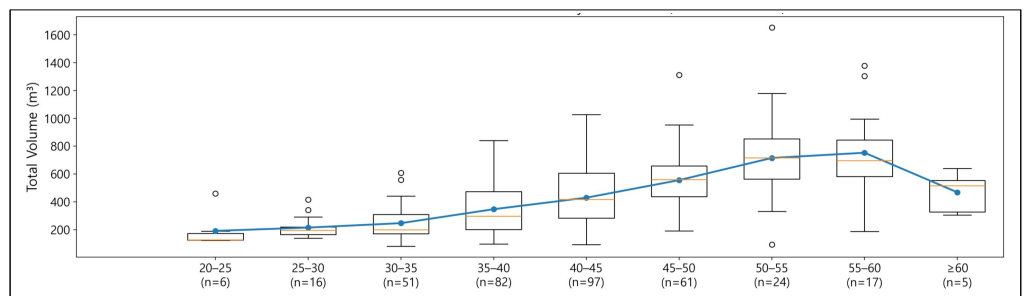


Figure 5. DBH-class-based volume distribution of *Platanus occidentalis*  
 Legend: —●— Mean

### 4.3.3 은행나무 흉고직경별 재적 분포 특성

은행나무는 DBH 증가에 따라 평균 재적과 중앙값이 비교적 단계적으로 증가하는 분포 특성을 보였다. DBH 20-25cm 구간에서 평균 재적은 114.1로 나타났으며, DBH 30-35cm 및 35-40cm 구간에서는 각각 250.7과 286.4로 증가하였다. DBH 40-45cm 및 45-50cm 구간에서도 평균 재적은 이전 DBH 범주보다 높은 수준으로 나타나, DBH 증가에 따른 평균 재적 증가 양상이 비교적 일관되게 유지되었다(Table 10 참조).

흉고직경별 재적 분포 특성은 DBH 20-25cm부터 40-45cm 구간까지 IQR 범위가 52.3-80.6로 비교적 제한적으로 나타나, 동일 DBH 범주 내 재적 분포가 상대적으로 집중된 특성을 보였다. 다만 DBH 45-50cm 구간에서는 IQR이 209.7로 확대되어, 대경급 구간에서 분포 폭이 증가하는 양상이 확인되었다(Figure 6 참조).

## 5. 결론 및 제언

본 연구는 도시 가로수를 대상으로 지상 LiDAR(TLS)와 항공 LiDAR(ALS) 기반 구조지표를 활용하여, 재적을

Table 10. DBH-class-based volume distribution of *Ginkgo biloba*

Species	DBH_class	n	Mean	SD	Median	Min	Max	Q25	Q75	IQR
<i>Ginkgo biloba</i>	20-25	87	114.1	49.4	105.0	35.3	304.1	82.3	134.6	52.3
	25-30	98	163.8	58.7	172.1	42.9	337.1	125.3	202.8	77.4
	30-35	55	250.7	78.6	251.2	62.5	490.5	193.8	284.9	91.1
	35-40	32	286.4	93.5	280.5	98.5	483.3	242.6	332.2	89.6
	40-45	16	415.5	70.3	415.8	306.7	567.4	370.8	451.4	80.6
	45-50	9	493.8	124.7	515.0	319.0	642.7	397.1	606.9	209.7
	50-55	1	508.4	-	508.4	508.4	508.4	508.4	508.4	0.0

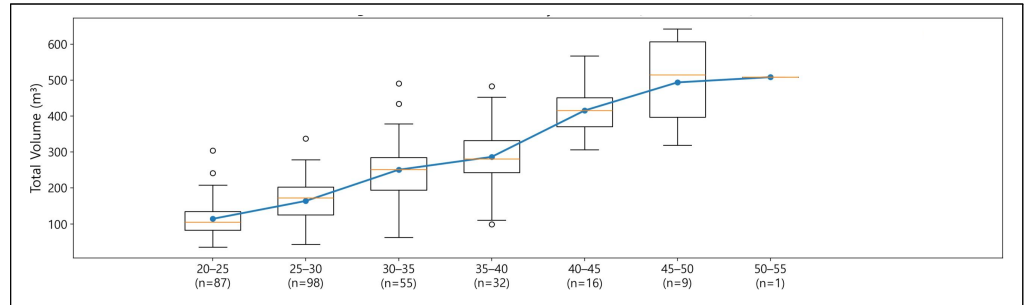


Figure 6. DBH-class-based volume distribution of *Ginkgo biloba*  
 Legend: —●— Mean

중심으로 주요 구조지표 특성, 구조 지표간 상관관계 그리고 DBH 생장 규모별 재적 분포 특성을 정량적으로 분석하였다. 이를 통해 도시 가로수의 재적 형성이 평균적인 생장 수준보다는 개체 간 구조적 편차와 분포 특성에 의해 보다 뚜렷하게 규정됨을 확인하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

첫째, 도시 가로수의 구조지표 특성은 수고는 수종 간 평균 차이는 존재하나, 변동성은 상대적으로 낮아 개체 간 분포가 비교적 균질하게 나타났다. 반면 수관직경, 수관면적, 수관부피 및 수간부피와 같은 재적 관련 지표는 모든 수종에서 높은 변동계수(CV)를 보여, 이는 도시 가로수의 구조적 특성이 단일 생장 지표만으로 설명되기보다, 수관 및 재적 지표에서 개체 간 구조적 편차로 보다 민감하게 반영됨을 의미한다.

둘째, 가로수 재적 형성에 영향을 미치는 구조지표를 분석한 결과, 세 수종 모두에서 수관면적(CA)이 가장 높은 표준화계수를 나타내어 재적 형성에 가장 큰 영향을 미치는 구조지표로 확인되었다. 이는 도시 가로수의 재적 형성이 공통적으로 수관 규모와 밀접한 구조적 관계를 가지는 특성을 반영하는 결과이다. 그러나 재적 형성에 기여하는 구조지표의 영향 구조는 수종별로 차이를 보였다. 왕벚나무에서는 수관면적의 영향이 가장 크게 나타났으며, 양버즘나무에서는 수관면적과 함께 수고의 영향이 비교적 크게 나타나 수관 확산과 수직 생장이 함께 재적 형성에 기여하는 구조가 확인되었다. 반면 은행나무에서는 수관면적뿐 아니라 수관직경과 흉고직경도 유의한 영향을 보여 수관 규모와 줄기 생장이 함께 재적 형성에 작용하는 특성이 나타났다. 종합적으로 도시 가로수의 재적 형성은 공통적으로 수관 규모의 영향을 크게 받는 구조를 보였으며, 재적 형성에 기여하는 구조지표의 영향 구조는 수종별 생장 및 수관 구조 특성에 따라 차이를 보이는 것으로 확인되었다.

셋째, 흉고직경(DBH)별 재적 분포 특성 결과, 재적 축적 양상은 수종별로 뚜렷하게 구분되었다. 왕벚나무는 중경급까지 평균 재적이 증가하였으나 대경급 구간에서는 증가 추세가 둔화되거나 감소하는 경향을 보였으며, 양버즘나무는 DBH 증가와 함께 평균 재적이 증가하되 대경급으로 갈수록 재적 분포 폭이 크게 확대되어 개체 간 편차가 가장 크게 나타났다. 반면 은행나무는 DBH 증가에 따라 평균 재적이 단계적으로 축적되며, 비교적 안정적인 분포를 유지하여 세 수종 중 DBH-재적 관계가 가장 일관된 특성을 보였다. 따라서 도시 가로수의 재적 형성은 DBH 증가에 따라 단순히 선형적으로 확대되지 않으며, 수종별 구조 발달 특성과 생장 단계에 따라 재적 분포의 안정성과 변동성이 상이하게 나타남을 의미한다.

이러한 결과는 도시 가로수의 재적 형성이 DBH나 수고와 같은 단일 생장 지표에 의해 일관되게 설명되기보다, 수관 구조와 재적 분포 특성을 함께 고려할 때 보다 정확하게 이해될 수 있음을 보여준다. 특히 동일한 생장 규모 범주 내에서도 재적 축적 수준과 분포 안정성이 수종별로 다르게 나타난 점은, 도시 가로수의 구조적 상태를 평균적 성장 규모 중심으로 평가하는 접근의 한계를 시사한다.

이는 향후 도시 가로수의 구조 진단 및 탄소흡수량 평가 과정에서 개별 수목의 크기 수준뿐 아니라, 군집 차원의 재적 분포 구조와 편차를 함께 고려하는 관리 전략이 필요함을 의미한다. 재적을 중심으로 구조지표의 결합 구조와 분포 특성을 정량적으로 분석한 본 연구의 접근은 이러한 구조 기반 평가 체계 구축을 위한 기초 자료로 활용될 수 있다.

다만 본 연구는 대구광역시 달서구 내 동일 연령대 가로수를 대상으로 한 사례 분석으로, 공간 제약과 전정 관리 등 인위적 영향이 지속적으로 작용하는 도시 가로수 환경을 전제로 한다. 따라서 DBH-재적 관계를 자연림이나 관리 조건이 상이한 수목 집단에 직접 일반화하기에는 한계가 있다. 또한 본 연구는 특정 시점의 LiDAR 기반 구조지표를 활용한 단면적 분석으로 전정 강도, 식재 공간, 도로 유형 등 관리·환경 요인을 정량적으로 반영하지는 못하였다. 향후 연구에서는 가로환경 요인 및 관리 이력을 포함한 영향요인 분석을 통해 도시 가로수 재적 형성의 결정 구조를 보다 체계적으로 규명할 필요가 있다.

- 주 1. 가로수 식재시 묘목의 직경 15cm 이하로 측정된 수목 제외.
- 주 2. Lidar360 Tree Information 모듈은 전처리 및 개체 분리된 점군을 기반으로 수목 구조지표를 자동 산출한다. 수고(H)는 정규화된 점군에서 개체의 최대 고도점과 지면 고도의 차이로 계산된다. 흉고직경(DBH)은 지면 기준 1.2m 높이 단면에서 추출된 줄기 점군에 대해 원형 피팅(one-circle fitting)을 적용하여 산정된다. 수관직경(CD)은 수관 점군의 수평 방향 확장 범위를 기반으로 계산된다. 수관면적(CA)은 개체로 분리된 수관 점군을 수평면에 투영한 후 형성되는 외곽 형상을 기준으로 산출되는 면적 지표로, 수관의 평면적 점유 범위를 정량화한 값이다. 수관부피(CV)는 분리된 수관 점군이 3차원 공간에서 점유하는 범위를 기반으로 산출되는 재적 지표로, 점군이 존재하는 공간 영역을 합산하여 정량화한 값이다. 이때 점군이 존재하지 않는 내부 공간은 체적 산정 과정에서 제외되며, 결과 값은 관측된 점군의 공간 점유 특성을 반영한다. 지하고(CBH)는 줄기 점군과 수관 점군의 구조적 분리 지점을 기준으로 지면으로부터의 높이로 산정된다. 수간부피(SV)는 trunk-based segmentation 기능을 통해 줄기 영역을 자동 분리한 후 줄기 점군의 형상을 모델링하여 계산된 재적 값이다 (GreenValley International, 2023).

References

1. 국립산림과학원(2014) 지속가능한 산림경영에 관한 대한민국 국가보고서.
2. 김은영(2023) 수원시 탄소중립 가로녹지 효과분석. 수원시정연구원.
3. 박현빈, 김동필, 이민석(2024) 국내외 가로수 조성 및 관리 체계에 관한 연구. 한국조경학회지 52(3): 59-75.
4. 서성혁, 박금미, 정태열(2024) 지상 및 드론라이다를 활용한 수목 재적 측정에 관한 연구. 한국조경학회지 52(5): 42-52.
5. Besl, P. J. and N. D. McKay(1992) A method for registration of 3-D shapes. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 14(2): 239-256.
6. GreenValley International, Ltd.(2023) LiDAR360 User Guide.
7. Heo, H. K., H. S. Lee, and K. W. Lee(2019) Estimating the heights and diameters at breast height of trees in an urban park and along a street using mobile LiDAR. Landscape and Ecological Engineering 15: 253-263.
8. IPCC(2006) 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. IGES.
9. Jupp, D. L. B., D. S. Culvenor, J. L. Lovell, G. J. Newnham, A. H. Strahler, and C. E. Woodcock(2009) Estimating forest LAI profiles and structural parameters using a ground-based laser called 'Echidna'. Tree Physiology 29(2): 171-181.
10. KBS(2019.6.13.) 서울나무, 파리나무. KBS 스페셜.
11. Newnham, G. J., J. D. Armston, K. Calders, M. I. Disney, J. L. Lovell, C. B. Schaaf, A. H. Strahler, and F. M. Danson(2015) Terrestrial laser scanning for plot-scale forest measurement. Current Forestry Reports 1(4): 239-251.
12. <https://drone.onestop.go.kr/>