

지상 및 드론라이다를 활용한 수목 재적 측정에 관한 연구[†]

Study on Tree Volume Measurement Using Terrestrial and Airborne Laser Scanners[†]

서성혁*, 박금미**, 정태열***

*경북대학교 조경학과 박사수료, **구미대학교 도시조경디자인과 조교수, ***경북대학교 조경학과 교수

Seo, Seonghyeok*, Park, Kummi**, Jung, Taeyeol***

*Ph.D. Completion, Dept. of Landscape Architecture, Graduate School, Kyungpook National University

**Assistant Professor, Dept. of Department of Urban Landscape Design, Gumi University

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

Received: August 01, 2024

Revised: August 21, 2024(1st)

September 02, 2024 (2nd)

Accepted: September 02, 2024

3인익명 심사됨

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

본 연구에서는 인간의 측정으로 인한 오차를 보완하고자 고정밀 측량기술인 라이더(LiDAR)를 활용하여 수목 재적 측정에 대한 정확성 및 일관성 있는 데이터 취득이 가능하도록 하고자 하였다. 이에 지상라이더(TLS)와 드론라이더(ALS)를 혼용하여 각 방법에 따라 측정되는 수목 재적값들에 대해 비교 검증을 실시하였다. 측정 방법에 따른 수목의 3D 데이터를 살펴본 결과, 지상라이더의 출력 데이터는 수목의 수관부가 미비하였으며, 드론라이더의 출력 데이터는 수목의 수간부가 미비한 것을 확인하였다. 이에 두 가지 데이터를 정합하는 방법을 통해 수목의 완전한 형태를 구축하고자 하였다. 그리고 각 방법에 따라 출력된 포인트 클라우드 데이터를 통해 수목의 재적값들에 대해 두 번의 검증을 실시하였다.

1차 검증으로 지상라이더에 대한 정확성 검증을 실시한 결과, 수고가 기존의 현장조사 측정값에 비해 1-3m 내의 차이를 보였다. 이는 라이더의 원리에 따라 수목의 밀도 또는 지형 및 지물에 영향을 받는 것으로 판단된다. 2차 검증에서는 지상라이더, 드론라이더, 지상라이더 및 드론라이더 정합 데이터를 각각 비교하였다. 각 측정 방법에 따른 수고와 흉고직경값을 비교를 위해 현장조사 측정값을 기준으로 Bland-Altman 기술통계를 실시하였다. 결과를 살펴보면, 수고는 드론라이더 측정법이 반복성 계수가 높게 나타나 일치성이 가장 부족한 것으로 나타났으며, 드론 및 지상라이더 정합데이터값이 가장 낮게 나타나 일치성이 높은 것으로 나타났다. 흉고직경은 지상라이더 측정법의 반복성 계수가 드론 및 지상라이더 정합데이터값과 유사한 값으로 낮게 나타나 일치성이 높은 것으로 나타났다. 따라서 수목에 대한 구조 측정시 드론 및 지상라이더 데이터를 중첩하는 방법은 보다 정밀한 수목 체적 정보를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

주제어: 탄소중립, 수목체적, 산림조사, 포인트클라우드 데이터, 도시림

ABSTRACT

This study aimed to utilize LiDAR, a high-precision surveying technology, to compensate for errors caused by human measurements and obtain accurate and consistent data for tree volume measurement. To this end, a comparative verification of measured tree volume values by each method was conducted using terrestrial LiDAR (TLS) and drone LiDAR (ALS). As a result of examining the 3D data of trees according to the measurement method, it was confirmed that the output data of terrestrial LiDAR had insufficient crowns, and the output data of drone LiDAR had insufficient trunks. Therefore, the study attempted to establish a complete form by aligning the two data sets. In addition, two verifications of tree volume values were conducted using the point cloud data output by each method.

As a result of the first verification, the accuracy verification of terrestrial LiDAR showed a difference of 1-3 m in tree height compared to the existing field survey measurement value.

The discrepancy is believed to be due to the density of trees or terrain and features according to the principle of LiDAR. In the second verification, terrestrial LIDAR, drone LIDAR, terrestrial LIDAR, and drone LIDAR alignment data were compared. In order to compare the tree height and breast height diameter according to

[†]본 과제(결과물)는 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 3단계 산학협력 선도대학 육성사업(LINC3.0)의 연구결과입니다.

each measurement method, Bland-Altman descriptive statistics were performed based on the field survey measurement values. Considering the results, the drone LIDAR measurement method showed the highest repeatability coefficient, indicating the least consistency, while the drone and terrestrial LIDAR alignment data values showed the lowest repeatability coefficient, indicating high consistency. For the breast height diameter, the terrestrial LIDAR measurement method showed a low repeatability coefficient similar to the drone and terrestrial LIDAR alignment data values, indicating high consistency. Therefore, it is judged that the method of overlapping drone and terrestrial LIDAR data when measuring the structure of trees can derive more precise tree volume information.

Keywords: Carbon Neutrality, Tree Volume, Forest Survey, Point Cloud Data, Urban Forest

1. 서론

1.1 연구 배경과 목적

탄소중립은 전 세계적으로도 해결해야 할 우선적인 과제이다. 수목은 인류가 실현할 수 있는 과학기술 수준을 고려하였을 때, 현실적으로 과잉 배출한 탄소를 흡수할 수 있는 수단이다(탄소중립위원회, 2021).

현재 탄소저장 및 흡수량 산출을 위한 수목 재적은 일반적으로 수목의 흉고직경 및 수고를 직경테이프 등을 통해 조사하는 매목조사 방법으로 산출하고 있다. 국립산림과학원은 우리나라 주요 산림수종 16종의 재적표(tree volume table)를 개발하였는데, 이는 우리나라 숲의 임목자원량을 평가하는 경영표이자 산림산업의 기본척도로써 숲이 흡수·저장하는 탄소량(carbon stock)을 계산할 때 반드시 필요한 수치데이터이다. 하지만 기존에 사용되는 수종별 재적표는 1960년대 개발되어 우리나라 산림이 성숙해지고 울창해짐에 따라 과거의 재적표로 현재의 수목 재적을 계산하는데 차이가 존재한다(국립산림과학원, <https://nifos.forest.go.kr>).

이러한 차이는 측정방법에서 비롯된 결과로 해석 할 수 있으며, 이에 더욱 정밀한 임업을 위한 첨단 장비를 활용하여 정교한 데이터 수집과 과학적 접근을 위한 연구개발이 필요한 실정이다.

한편, 최근에는 산림자원조사 시 LiDAR(light detection and ranging)를 활용한 많은 연구들이 진행되고 있다. 라이다 기술을 통해 스캔이 되는 물체를 3차원 위치정보를 가지는 포인트데이터(point cloud)형태로 나타내 산림의 구조적인 특성과 수목의 3D 모델링 등 다양한 정보 데이터를 취득할 수 있다(Lefsky et al., 2002). 라이다를 활용한 산림에 관한 연구들을 살펴보면 수목에 대한 매목조사를 직접 측정하여 얻은 측정값과 지상라이다를 활용한 측정값을 비교하며, 지상라이다 간의 특성 및 정밀도 차이에 대한 연구도 진행되었다(고병준 등, 2022). 또한 정확한 산림 현황을 조사하기 위해 고밀도 항공라이다 데이터를 이용하여 전수조사 기반의 수목개체 추출 방법을 제안하였다(조성환 등, 2023).

라이다의 원리는 레이저 펄스가 사물에서 반사되어 3차원 위치정보를 출력하는 방식이다. 하지만 보통의 도시림 또는 자연림의 수목의 밀도는 복잡하게 구성되어 있어 수관부에 의해 수목의 일부가 가려져 정확한 측정에 어려움이 존재한다(박정목 등, 2024). 이에 본 연구에서는 드론라이다(airborne laser scanning, ALS)와 지상라이다(terrestrial laser scanning, TLS)의 각각의 장단점을 활용하여 정확한 수목의 3차원 모델을 획득하고, 각각의 측정 방법에 따른 수목의 재적값들에 대한 비교 검증하고자 한다.

2. 연구범위 및 방법

2.1 연구범위

본 연구의 대상지는 대구광역시 북구 산적동 1384-1에 위치한 근린공원(꽃보라 동산)에서 수목의 잎이 무성한 2023년 9월 한 달 동안 진행하였다. 그리고 두 번의 검증을 실시하였다. 첫째, 1차 검증에서는 지상라이다를 활용하여 수목의 형태(단식, 삼점식재, 군식)에 따른 측정값을 비교하였다. 이를 위해 1, 3, 9 그루 형태로 식재된 수목을 랜덤으로 선정하였으며, 지상라이다 측정에 용이하기 위해 수목을 기점으로 반경 15m 범위를 확보 할 수 있는 수목을 선정하였다. 둘째, 2차 검증에서는 지상라이다와 드론라이다 두 가지를 활용하여 일반적으로 산림자원 조사에 적용되는 정방형 표준지(20m × 20m, 0.04ha)를 기준으로 부지를 선정하였다. 1차 검증과 마찬가지로 표준지

내 수목을 기점으로 반경 15m 범위를 확보할 수 있는 대상지를 선정하였다. 모든 검증에서 선정된 수목은 교목을 대상으로만 하였으며, 수종에 관계없이 수목의 식재 형태에 따라 측정을 실시하였다(Figure 1 참조).

2.2 연구방법

2.2.1 측정 도구

본 연구에서는 4가지 방법을 통해 수목의 수고와 흉고직경을 측정하였다. 매목조사에 활용한 장비는 흉고 및 근원직경 측정용 줄자인 KDS사 F10-02DM 직경 테이프 줄자를 활용하였다. 그리고 수목의 수고를 측정하기 위해 SUUNTO사의 수고 측정기(하이트메터)를 활용하였다. 지상라이다는 이동식 라이다로 Greenvalley사의 LiBackpack C50를 활용하였으며, 드론라이다는 DJI사의 Zenmuse L1을 드론 기체 DJI M300에 활용하여 측정하였다. Table 1은 라이다 장비의 주요 사양을 나타내고 있다(<https://www.greenvalleyintl.com/>; <https://www.dji.com/kr>).

2.2.2. 측정 방법

본 연구에서는 정확한 수목의 재적을 측정할 수 있도록 총 네 가지 방법으로 각 10회 측정을 통해 수목의 특성(수고, 흉고직경)에 대해 비교 검증하고자 하였다. 첫 번째는 국가산림자원조사에서 실시하고 있는 현장조사 측정, 두 번째는 지상라이다를 활용한 수목 측정, 세 번째 항공라이다를 활용한 수목 측정, 네 번째 지상라이다와 항공라이다를 정합한 데이터 수목 측정으로 구분하였다. 그리고 각 방법에 따른 측정값 비교가 용이할 수 있도록 수목별로 각 방법에 따른 측정결과를 일대일(1:1)로 대응시킬 수 있도록 측정을 시작하기 전 대상지 내의 수목에 대해서 줄기부에 표식(labeling)을 하였다(Figure 2 참조). 지정된 번호에 해당하는 수목의 번호에 따라 각각의 수고 및 흉고직경을 야장에 기입하였으며, 지상라이다, 드론라이다, 지상라이다와 드론라이다를 정합한 결과를 각각 비교하였다. 현장조사 측정은 3인 1조로 야장 기입, 지표면으로부터 1.2m 높이의 흉고직경 측정, 수고 측정을 진행하였다. 본 연구에서는 인간의 측정으로 인한 오차를 보완하고자 정확한 기준값을 위해 현장조사 시 10회 측정에 대한 평균값을 기준으로 하였다. 라이다 측정은 1인 1조로 진행하였다. 지상라이다 측정은 고정밀의 점군 데이터 수집에



Figure 1. Research area scope

Legend: ● Target trees for 1st verification □ Target site for 2nd verification

Table 1. Technical specifications of the laser scanner



Product name	LiBackpack C50	Zenmuse L1
Product image		
Physical size(mm)	950×250×160	152×110×169
Scan Range(m)	100	190 - 450
Field-of-View	Vertical -15°-15° / Horizontal 360°	Vertical 77.2° / Horizontal 70.4°
Resolution	3840×1920	1280×960
Acquisition rate(points/second)	300,000	480,000



Figure 2. Sample images of labeled trees in the study area

용이 할 수 있도록 측정 전 이동 경로를 사전 계획하여 사각지대가 생기지 않도록 하며, 제자리에서 도는 행위를 자제하였다. 그리고 이동 경로별로 일정 시간 이상을 유지하며 측정하였다. 드론라이더는 상공에서 고풍력 에너지가 표적에 펄스를 쏘고 반사되는 펄스를 측정하여 표적의 데이터를 수집한다. 이에 드론라이더 측정을 위해 사전에 측정 경로를 입력하여 그 경로에 맞게 자동으로 비행하는 방식으로 대상 수목을 측정하였다.

2.2.3 포인트 클라우드 데이터 정합 및 전처리 방법

본 연구에서는 지상라이더 데이터와 드론용 라이더 데이터를 정합한 수목 3D 모델을 형성하여 수목의 상부 하부 재적 정보값 및 수목의 특성을 도출하는 측정 방법을 활용하였다.

지상라이더로부터 제1 포인트 클라우드 데이터를 획득하고, 드론용 라이더로부터 제2 포인트 클라우드 데이터를 획득하는 라이더 데이터 획득하는 단계, 상기 제2 포인트 클라우드 데이터를 기준으로 제1 포인트 클라우드 데이터와 제2포인트 클라우드 데이터를 정합하여 정합데이터를 생성하는 단계, 상기 정합데이터에 포함된 노이즈를 제거하고, 정합 데이터를 지면 데이터와 비지면 데이터로 분류하는 전처리 단계, 상기 정합 데이터로부터 추출된 객체의 흉고직경을 이용하여 측정 대상 수목과 비대상 수목으로 분류하는 측정 대상 수목 추출하는 단계, 그리고 상기 측정 대상 수목의 재적 정보를 추출하는 단계, 추출된 재적 정보와 임의로 부여된 ID를 매칭하여 출력하는 단계를 진행하였다.

데이터 정합 과정은 제1 포인트 클라우드 데이터와 제2 포인트 클라우드 데이터를 매칭하여 매칭 정도가 기 설정된 값 이상이면, 제2 포인트 클라우드 데이터에 포함된 포인트 중에서 하나 이상의 포인트를 기준 포인트로 설정하고, 제1 포인트 클라우드 데이터에 포함된 포인트 중 하나 이상의 포인트를 이동 포인트로 설정한다. 이는 아래의 식 1을 이용하여 기준 포인트와 이동 포인트의 정합에 따른 정합 포인트의 변환 행렬이 산출 가능하다.

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

여기서 T^* 는 변환된 모델을 나타내고, M 은 이동하는 포인트 데이터, S 는 기준이 되는 포인트 데이터를 나타낸다. 또한 데이터 정합 과정에서 식 2를 활용하여 정합 포인트의 회전 및 변환의 조합을 추정 할 수 있다(https://en.wikipedia.org/wiki/Point-set_registration#Outlier-free_registration).

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

이후, 전처리 과정에서는 불규칙 삼각망(Triangulated Irregular Network, TIN) 알고리즘을 적용하여 정합데이터를 지면 데이터와 비지면 데이터로 분류한다.

정합 데이터로부터 초기 시드 포인트를 추출하고, 초기 시드 포인트를 이용해 복수의 삼각형을 생성한 다음, 삼각형 내에 위치하고 있는 포인트의 위치값을 이용하여 지면 데이터 및 비지면 데이터로 분류할 수 있다. 분류된 비지면으로부터 복수의 포인트들의 높이값을 0으로 설정하여 비지면 데이터를 평탄화 한다.

측정 대상이 되는 수목을 추출하는 과정은 측정 대상 수목에 대한 기준 높이를 설정하고, 측정된 높이가 기준

높이보다 높으면 해당되는 객체를 측정 대상 수목으로 분류하고, 기준 높이보다 낮으면 해당되는 객체를 비대상 수목으로 분류할 수 있다. 이후 수목에 대한 정보를 추출하는 과정은 측정 대상 수목의 정보(위치 좌표, 분수, 흉고직경, 수고, 수관부피, 수관면적, 수관 길이)와 무작위로 부여된 ID를 포함하는 특성 정보를 정합데이터와 매칭하여 출력한다(<https://www.greenvalleyintl.com/LiDAR360/>).

2.2.4 통계 분석방법

본 연구에서는 지상라이다와 드론라이다를 혼용하여 각 방법에 따라 측정되는 수목 재적값들에 대해 비교검증을 위해 통계분석을 실시하였다. 지상라이다 측정값, 드론라이다 측정값, 지상라이다와 드론라이다 정합 방법을 통한 측정값들을 현장조사 측정값을 기준으로 하여 측정방법에 따른 값 차이와 측정방법 간의 값이 서로 얼마나 일치하는지를 살펴보고자 하였다(Figure 3 참조). 이에 Bland-Altman 분석을 통해 평균차이, 95% 신뢰구간, *t* 값 및 반복성 계수(CR값)을 비교함으로써 각 측정방법의 신뢰성을 평가하였다. 그리고 Bland-Altman 그래프에서는 기준이 되는 현장조사 방법과 각 측정방법 간 차이의 평균과 두 가지 방법의 95% 일치한계 값(Limits of Agreement, LoA), 총 세 개의 가로 선을 *x*축과 평행하게 표시하여 일치의 정도를 나타낸다. 그래프 상 세 개의 가로 선 중 가운데 가로선은 두 측정방법에 따른 차이의 평균이고, *x*=0 선에 가까울수록 두 측정법 간의 편차가 작다고 해석할 수 있다. 95% 일치한계값은 측정값 간 차이의 표준편차로부터 구할 수 있으며 두 일치한계값의 폭이 좁을수록 두 측정 방법 간 편차가 적은 것으로 판단한다(Bland and Altman, 1986).

3. 결과 및 분석

3.1 수목 측정 방법에 따른 포인트클라우드 데이터

본 연구에서는 지상라이다와 드론라이다를 활용하여 포인트 클라우드 데이터를 획득하였다. 수목 재적 측정 방법별 각 3D 데이터를 살펴보면, 지상라이다(TLS) 측정모델은 수목의 수관부가 일부 삭제된 상태로 출력된 것을 확인할 수 있다. 이는 수목의 수관 부분이 울창한 경우 지상 모바일 라이다에서 출력되는 레이저는 수목의 잎과 가지 부분을 잘 통과하지 못하게 된다. 이에 따라 지상라이다에 의한 포인트 클라우드 데이터만을 이용하여 수목의 재적을 측정할 경우 수고값이 부정확할 수 있다.

드론라이다(ALS) 측정모델에서는 수목의 수간 부분의 일부가 삭제된 상태로 출력된다. 이는 드론용 라이다는 하늘에서 지면 방향으로 레이저를 출력하므로 수직으로 뻗어있는 수간 부분을 스캔 할 수 없게 된다. 따라서 드론라이다에 의한 포인트 클라우드 데이터만을 이용하여 수목의 재적을 측정할 경우, 수고의 측정은 가능하나 흉고직경의 측정은 불가능할 수 있다. 이에 본 연구에서는 이러한 한계점에 대한 보완 방법으로 지상라이다(TLS)와 드론라이다(ALS)를 정합하는 방법을 통해 수목의 전체 모델을 출력 가능하도록 하였다. 이를 통해 수목의 상부와 하부 구조의 정확한 재적 측정이 가능할 것으로 판단된다(Figure 4 참조).

3.2 지상라이다를 활용한 1차 검증

지상라이다의 정확성 검증을 위해 수목의 식재 형태별(1, 3, 9그루) 재적에 대한 1차 검증을 실시하였다. 이를 위해 대상지 내 지상라이다 측정이 용이하다고 판단되는 위치의 수목을 선정하여 현장조사(Measurement by Person, P)와 지상라이다(Terristial Laser Scanning Measurement, T)를 활용한 측정을 상기 기술한 측정 방법으로 10회 진행하였다.

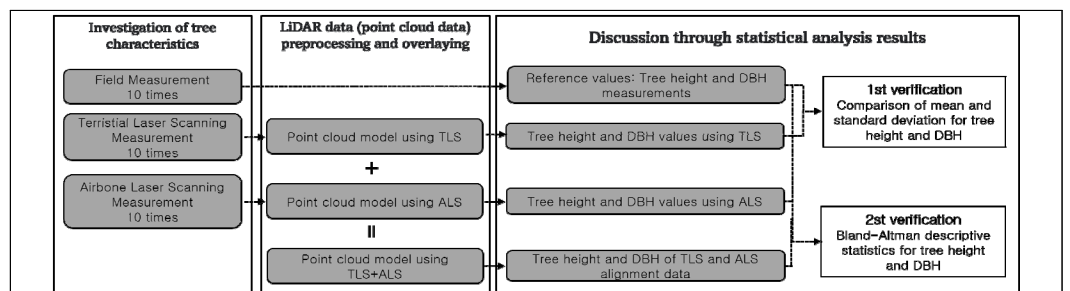


Figure 3. Research flow chart

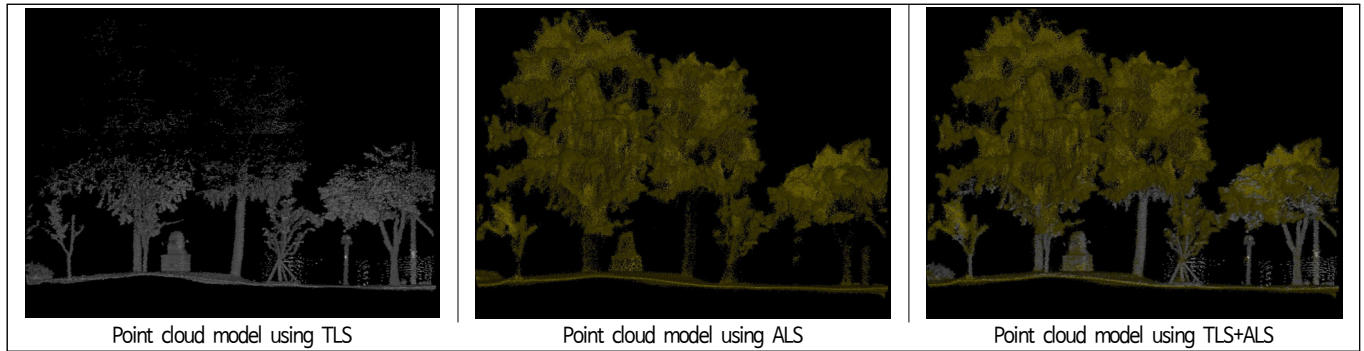


Figure 4. Point cloud data according to tree measurement method

3.2.1 수고에 대한 평균 및 표준편차 비교

지상라이다 측정과 현장조사(인간에 의한 측정)를 통해 수목의 수고값을 비교한 결과를 살펴보면 다음과 같다. 먼저 단식 형태의 수목 1그룹을 대상으로 지상라이다 측정과 인간에 의한 측정 수고값의 평균 차이는 0으로 나타났다(Table 2 참조). 그리고 삼점 식재 형태의 수목 3그룹을 대상으로 측정한 결과, 각 수목의 평균 차이가 최대 1m로 지상라이다 측정값이 낮게 나타났으며, 인간에 의한 측정값 보다 지상라이다 측정값의 표준편차가 비교적 크게 나타났다(Table 3 참조). 마지막으로 군식 형태의 수목 9그룹 대상으로 측정한 결과, 인간에 의한 측정과 지상라이다 측정 평균 값 최대 차이는 3.8m이며, 지상라이다 측정값의 표준편차는 최대 3.14로 높게 나타났다. 또한 전반적으로 라이다의 측정값이 낮게 나타난 것을 알 수 있다(Table 4 참조). 이러한 결과는 인간의 높이에서 측정하는 지상라이다로 지형 및 지물, 주변 수목으로 인해 수목의 수관부 측정에 한계가 있는 것으로 판단된다.

3.2.2 흉고직경에 대한 평균 및 표준편차 비교

지상라이다 측정과 현장조사(인간에 의한 측정)를 통해 수목의 흉고직경값을 비교한 결과를 살펴보면 다음과 같다. 먼저 단식 형태의 수목 1그룹을 대상으로 흉고직경 측정값의 평균차이는 0.01m로 나타났으며, 두가지 방법에 의한 표준편차는 0으로 동일하게 나타났다(Table 5 참조). 그리고 삼점 식재 형태의 수목 3그룹에 대한 흉고직경값은 두 측정방법 간에 평균차이가 최대 0.02m로 나타났으며, 각 수목에 대한 표준편차는 모두 0으로 나타났다(Table 6 참조). 마지막으로 군식 형태의 수목 9그룹에 대한 흉고직경 측정값 평균차이는 최대 0.05m로 타났으며, 라이다 측정값에서 표준편차의 범위가 0.01-0.09, 인간에 의한 측정값의 표준 편차는 0으로 나타났음을 확인하였다(Table 7 참조).

Table 2. Height of trees through TLS and Person measurements_Single planting (m)

Method	no.	Measurement cycle										average	Standard Deviation
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
T	①	5.2	5.2	5.2	5.1	5.2	5.1	5.2	5.3	5.2	5.3	5.2	0.06
P	①	5.1	5.2	5.2	5.1	5.1	5.3	5.2	5.3	5.1	5.2	5.2	0.07

Table 3. Height of trees through TLS and Person measurements_Multiple planting (m)

Method	no.	Measurement cycle										average	Standard Deviation
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
T	①	9.7	9.6	9.6	8.7	9.4	8.8	9.1	9.6	8.7	9.5	9.3	0.38
	②	8.9	8.8	8.8	7.2	7.9	6.4	8	8.1	7.5	8.7	8.0	0.78
	③	5.4	5.4	5.3	4.9	5.3	5.2	5.3	5.3	5.3	5.4	5.3	0.14
P	①	9.8	9.7	9.8	9.8	9.8	9.7	9.8	9.9	9.8	9.7	9.8	0.06
	②	9.1	9	9	9.2	9.1	9.1	9	8.9	9	9	9	0.08
	③	5.3	5.4	5.3	5.4	5.3	5.3	5.2	5.4	5.2	5.3	5.3	0.07

Table 4. Height of trees through TLS and Person measurements_Mass planting (m)

Method	no.	Measurement cycle										average	Standard Deviation
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
T	①	14.3	7.6	11.7	7	7.7	11.1	13.9	14.1	7.9	11.1	10.6	2.76
	②	10.4	9.6	14.5	12.4	13.3	14.5	6.6	11.1	5.1	10.9	10.8	2.97
	③	13.1	5	13.6	11.7	12.8	7.6	6.7	11.7	5.9	12	10.0	3.14
	④	7.9	6.5	6.8	6.6	6	7.6	6.1	9.8	7.1	6.5	7.1	1.11
	⑤	7	7	7	6.5	7	7.2	9.2	11.6	6.9	6.3	7.6	1.55
	⑥	7.7	9.3	4.7	10.4	9.3	7	6.8	9.4	7.9	6.3	7.9	1.65
	⑦	5	9.5	9.5	5	5	11.9	5.2	5.1	11.8	5	7.3	2.90
	⑧	5.9	5.9	13.4	5.8	5.7	5.9	5.7	5.9	7.9	5.8	6.8	2.39
	⑨	5.6	7.4	7.5	5.1	5.7	5.3	8.6	5.4	9.9	5.1	6.6	1.61
P	①	14.2	14.4	14.5	14.3	14.4	14.5	14.3	14.3	14.2	14.5	14.4	0.11
	②	10	10	10.1	10	10.1	9.9	10	10.1	9.9	10	10	0.07
	③	13.8	13.7	13.8	13.7	13.6	13.6	13.7	13.6	13.8	13.7	13.7	0.08
	④	10.1	10.2	10.3	10.2	10.2	10.4	10.2	10.3	10.3	10.2	10.2	0.08
	⑤	7.2	7.2	7.3	7.1	7.1	7.2	7.1	7.2	7.2	7.3	7.2	0.07
	⑥	7.7	7.8	7.7	7.9	7.9	7.8	7.8	7.9	7.8	7.9	7.8	0.07
	⑦	5.1	5.2	5.1	5.1	5.2	5.3	5.2	5.1	5.1	5.2	5.2	0.07
	⑧	6	6.1	6	6	6.1	5.9	6	6.1	6.1	6	6	0.06
	⑨	5.7	5.7	5.7	5.6	5.6	5.7	5.6	5.5	5.7	5.5	5.6	0.08

Table 5. DBH of trees through TLS and Person measurements_Single planting (m)

Method	no.	Measurement cycle										average	Standard Deviation
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
T	①	0.137	0.137	0.137	0.137	0.137	0.137	0.137	0.137	0.137	0.137	0.137	0.00
P	①	0.123	0.125	0.129	0.123	0.125	0.13	0.13	0.125	0.129	0.13	0.127	0.00

Table 6. DBH of trees through TLS and Person measurements_Multiple planting (m)

Method	no.	Measurement cycle										average	Standard Deviation
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
T	①	0.158	0.158	0.158	0.158	0.158	0.158	0.158	0.158	0.158	0.158	0.158	0.00
	②	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.140	0.00
	③	0.109	0.109	0.109	0.109	0.109	0.109	0.109	0.109	0.109	0.109	0.109	0.00
P	①	0.177	0.179	0.18	0.175	0.179	0.183	0.181	0.181	0.177	0.178	0.179	0.00
	②	0.156	0.159	0.153	0.158	0.152	0.153	0.153	0.153	0.154	0.153	0.154	0.00
	③	0.104	0.105	0.105	0.104	0.107	0.103	0.105	0.105	0.103	0.105	0.105	0.00

인간에 의한 측정값의 미세한 차이는 지표면으로부터 1.2m 높이의 줄기부 측정 시 발생하는 오차로 판단되며, 지상라이다 측정값의 차이는 수목의 그루 수가 많을수록 측정값에 대한 편차가 발생하는 것으로 나타났다.

3.3 지상라이다 및 드론라이다를 활용한 2차 검증

2차 검증은 수목 측정방법에 따른 결과 값에 대해 비교하고자 실제 산림조사 단위인 20m×20m 범위에 있는 19그루의 수목을 대상으로 하였다. 현장조사(P, Measurement by Person)와 지상라이다 측정(TLS, Terrestrial Laser Scanning Measurement), 드론라이다 측정(ALS, Airborne Laser Scanning Measurement), 지상라이다와 드론라이다 정합데이터값들에 대해 Bland-Altman 기술통계 분석을 실시하였다.

Table 7. DBH of trees through TLS and Person measurements_Mass planting

(m)

Method	no.	Measurement cycle										average	Standard Deviation
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
T	①	0.271	0.271	0.26	0.15	0.271	0.276	0.271	0.156	0.271	0.271	0.25	0.05
	②	0.26	0.339	0.26	0.26	0.139	0.26	0.26	0.26	0.2	0.25	0.25	0.05
	③	0.139	0.139	0.262	0.139	0.262	0.139	0.139	0.139	0.396	0.139	0.19	0.09
	④	0.156	0.156	0.156	0.225	0.156	0.225	0.156	0.143	0.156	0.156	0.17	0.03
	⑤	0.15	0.15	0.15	0.156	0.15	0.156	0.192	0.141	0.15	0.15	0.15	0.01
	⑥	0.271	0.271	0.271	0.26	0.26	0.271	0.271	0.312	0.26	0.271	0.27	0.02
	⑦	0.2	0.2	0.266	0.2	0.2	0.286	0.2	0.2	0.26	0.2	0.22	0.03
	⑧	0.168	0.168	0.139	0.168	0.168	0.168	0.168	0.168	0.168	0.168	0.17	0.01
	⑨	0.15	0.157	0.157	0.193	0.15	0.153	0.153	0.15	0.153	0.153	0.16	0.01
P	①	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.00
	②	0.245	0.243	0.246	0.246	0.247	0.246	0.245	0.246	0.245	0.245	0.25	0.00
	③	0.135	0.138	0.136	0.136	0.135	0.138	0.134	0.135	0.136	0.136	0.14	0.00
	④	0.16	0.162	0.161	0.161	0.159	0.16	0.159	0.161	0.161	0.162	0.16	0.00
	⑤	0.16	0.161	0.158	0.158	0.16	0.159	0.159	0.161	0.159	0.158	0.16	0.00
	⑥	0.306	0.305	0.306	0.306	0.308	0.307	0.308	0.306	0.307	0.307	0.31	0.00
	⑦	0.219	0.22	0.218	0.218	0.219	0.218	0.221	0.22	0.219	0.22	0.22	0.00
	⑧	0.167	0.17	0.169	0.169	0.166	0.167	0.168	0.169	0.167	0.167	0.17	0.00
	⑨	0.15	0.153	0.154	0.153	0.153	0.153	0.151	0.153	0.154	0.151	0.15	0.00

3.3.1 수고에 대한 통계적 분석

연구 조사 범위에 해당하는 19그루 수목을 대상으로 세 가지의 다른 방법으로 수고를 측정하였다. 이에 수고에 대한 Bland-Altman 기술통계 및 그 측정방법에 따른 평균 차이 그래프는 기준 수목 수고와 측정 방법에 따른 수목 수고 사이의 평균 차이를 볼 수 있다(Table 8, Figure 5 참조).

첫째로 지상 LiDAR(TLS)로 측정한 수목의 수고는 매목조사 측정 평균 차이가 1.025m였으며, 95% 신뢰구간 범위는 0.477-1.573m로 나타났다. 결과에 대한 t -test 결과 t -값은 3.929, p -값은 0.001로 나타나 지상 LIDAR 측정값과 기준값의 차이가 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 또한 반복성 계수(CR 값)는 2.956미터로 실제로 라이다 측정에 약간의 오류가 있을 수 있음을 의미한다.

둘째로 드론 LiDAR(ALS)로 측정한 수목의 수고는 간의 비교에서 평균 차이는 -0.665m였으며, 95% 신뢰 구간 범위는 -2.075m에서 0.745m로 나타난 것을 확인하였다. 결과에 대한 t -test 결과 t -값은 -0.991, p -값은 0.335로 드론 LIDAR 측정값과 기준값의 차이가 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다. 그리고 반복성 계수(CR 값)는 5.731m로 나타났으며, 이 값은 지상라이다 측정값에 비해 높게 나타나 드론 LiDAR 측정값은 일관성이 부족하여 정확도가 필요한 응용 분야에서의 사용이 제한될 수 있다.

셋째로 수목 수고 측정을 위해 지상 LIDAR와 드론 LIDAR를 정합하는 방식을 기준 수목 수고와 비교한 결과, 평균차이가 -0.434m의 차이를 보였으며, 95% 신뢰구간 -0.647m - -0.220m로 나타나 세 가지 방법 중 가장 적은 차이를 보였다고 할 수 있다. 결과 값에 대한 t -test 결과 t -값은 -4.264 p -값은 0으로 나타나 기준 수목의 수고와 상당한 일관성을 나타냈다. 반복성 계수(CR값)는 1.199m으로 드론 LIDAR와 정합된 지상 LIDAR가 가장 높은 측정 일치를 제공하고 반복 측정에서 신뢰성이 가장 높다고 할 수 있다. 이는 측정 기술을 선택할 때 방법의 정확성과 일관성을 적절히 고려해야 한다는 점을 강조하므로 산림 수목조사에 중요한 의미가 있다.

3.3.2 흉고직경에 대한 통계적 분석

흉고직경에 대한 통계적 분석도 마찬가지로 연구 조사 범위에 해당하는 19그루 수목을 대상으로 세 가지의 다른 방법으로 수목의 흉고직경을 측정하였다. 이에 흉고직경에 대한 Bland-Altman 기술통계 및 측정방법에 따른 평균 차이 그래프는 기준 흉고직경과 측정방법에 따른 수목 흉고직경 사이의 평균 차이를 볼 수 있다(Table 9, Figure 6 참조).

Table 8. Bland-Altman descriptive statistics for tree height

Tree height Bland-Altman descriptive statistics			
Measurement method	Person - TLS tree height	Person - ALS tree height	Person - TLS+ALS tree height
Effective sample size	19	19	19
Mean value(base tree height)	9.629	9.629	9.629
Mean value(other methods)	8.605	10.295	10.063
Average(difference)	1.025	-0.665	-0.434
Standard devitaion(difference)	1.137	2.925	0.443
95% CI(differences)	0.477-1.573	-2.075-0.745	-0.647--0.220
95% CI(difference)	-1.204-3.253	-6.399-5.068	-1.303-0.435
t value	3.929	-0.991	-4.264
p value	0.001	0.335	0
CR value	2.956	5.731	1.199

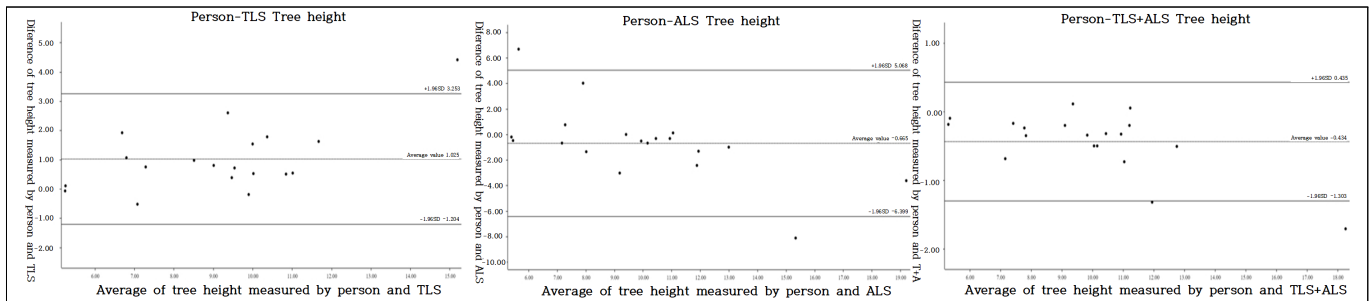


Figure 5. Bland-Altman graph of the tree height by Person and LiDAR measurement method

Table 9. Bland-Altman descriptive statistics for DBH

DBH Bland-Altman descriptive statistics			
Measurement method	Person - TLS DBH	Person - ALS DBH	Person - TLS+ALS DBH
Effective sample size	19	19	19
Mean value(base tree height)	0.266	0.266	0.266
Mean value(other methods)	0.248	0.158	0.248
Average(difference)	0.018	0.107	0.018
Standard devitaion(difference)	0.021	0.128	0.02
95% CI(differences)	0.008-0.028	0.048-0.169	0.008-0.027
95% CI(difference)	-0.023-0.059	-0.144-0.358	-0.022-0.057
t-value	3.698	3.649	3.841
p-value	0.002	0.002	0.001
CR value	0.053	0.322	0.052

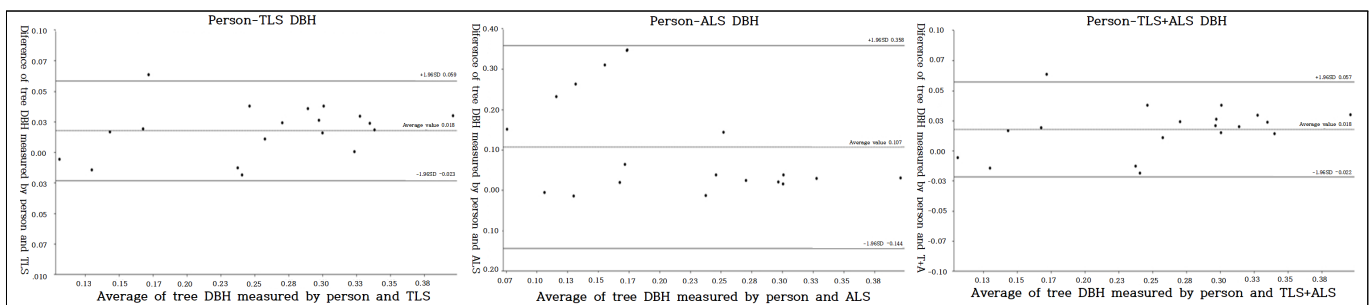


Figure 6. Bland-Altman graph of the DBH by person and LiDAR measurement method

첫째로 지상 LIDAR로 측정된 수목의 흉고직경은 매목조사를 통한 측정값과의 평균 차이가 0.018m로 나타났으며, 95% 신뢰구간 범위는 0.008-0.028m로 변동성이 낮아 지상 LiDAR를 활용한 측정방법은 기준이 되는 선에 매우 근접한 것으로 나타났다. 결과 값에 대한 t -test 결과 t -값은 3.698이며, p -값은 0.002으로 나타났다. 이는 지상 LiDAR 측정값이 기준 측정값과 통계적으로 유의미하게 다르지만 평균 차이가 작기 때문에 이 차이는 실제 적용에서도 문제가 없을 것으로 판단된다. 반복성 계수(CR 값)는 0.053m로 지상 LiDAR 방법의 높은 수준의 일관성과 반복성을 띄는 것으로 나타났다.

둘째로 기준 흉고직경과 드론라이다 측정값의 흉고직경을 비교한 결과, 평균 차이는 0.107m이며, 표준 편차가 0.128로 큰 변동성을 보여 드론라이다 방법이 일관적이지 않을 수 있음을 시사한다. 그리고 95% 신뢰 구간 범위는 0.045-0.169m이며, 가장 큰 범위로 나타났으며, 신뢰 구간이 넓을수록 불확실성이 크다는 것을 의미한다. 결과 값에 대한 t -test 결과 t -값은 3.649, p -값은 0.002로 드론 LIDAR 측정값이 기본 측정값과 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다. 반복성 계수(CR 값)는 0.322m로 세 가지 방법 중 가장 높게 나타나 지상LIDAR 측정값에 비해 드론LIDAR를 활용한 측정 방법이 떨어지는 것으로 나타났다.

셋째로 두 가지 방법을 정합한 흉고직경 측정값과 기준 흉고직경 측정값을 비교한 결과, 평균차이 0.018m로 나타났다. 표준편차 0.020으로 LIDAR 흉고직경 결과와 유사하였으며, 높은 수준의 일관성을 보여주었다. 95% 신뢰 구간 범위는 0.008-0.027m로 지상 LIDAR 방법과 가장 유사하게 나타났다. 측정값에 대한 t -test 결과 t -값은 3.841이고 p -값은 0.001로, 기준이 되는 측정값과 지상 LIDAR와 드론 LIDAR 정합한 측정값 사이에 통계적으로 유의미한 차이가 있음을 확인하였다. 반복성 계수(CR 값)는 0.052m로 세 가지 방법 중 가장 낮게 나타나 일관성과 반복성이 가장 우수하다고 할 수 있다. 결론적으로 지상 LIDAR와 드론 LIDAR 정합한 측정은 흉고직경을 측정하는 기본 방법과 가장 높은 일치도와 반복성을 보인 반면, 드론 방법은 통계적으로 유의하지만 일치도와 반복성이 낮은 것을 확인하였다.

4. 결론

본 연구는 고정밀 측량기술인 라이다(LiDAR)를 활용하여 수목 재적 측정에 대한 객관성 및 정확성 향상과 일관성 있는 데이터 취득이 가능하도록 정량적으로 검증하고자 하였다. 이에 현장조사를 실시하여 수목의 수고 및 흉고직경을 측정하고, 지상라이다(terrestrial laser scanning, TLS)와 드론라이다(airborne laser scanning, ALS)를 활용하여 각 측정 방법에 따른 결과에 대한 비교 검증을 실시하였다.

첫째, 수목의 재적 측정 방법별 포인트클라우드 데이터를 비교한 결과, 지상라이다를 통한 측정방법은 수목의 수관부가 미비하였고, 드론라이다 측정 결과는 수목의 수간부가 미비한 것으로 나타났다. 이에 지상라이다와 드론라이다를 정합하는 방법을 통해 완전한 형태의 수목 포인트클라우드 데이터를 출력하였다. 이는 각 방법에 따른 한계점을 보완 할 수 있는 방법이라고 할 수 있다.

둘째, 지상라이다를 정확성을 평가하기 위해 1차 검증을 실시하였다. 기준이 되는 매목조사의 수고와 흉고직경의 값을 비교한 결과 흉고직경에 차이는 매우 적은 것으로 나타났으며, 수고는 1-3m 내외의 차이를 보였다. 이는 수고 측정에 있어 라이다의 레이저가 지형 및 자물에 영향을 많이 받는 것으로 판단된다. 또한 수목의 밀도에 따라 그 정도가 심한 것으로 확인하였다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 본 연구에서는 지상라이다와 드론라이다를 활용하여 정합한 수목 포인트 클라우드 데이터를 활용하였다.

셋째, 지상라이다, 드론라이다, 지상라이다 및 드론라이다 정합 데이터를 각각 비교하기 위해 2차 검증을 실시하였다. 이를 위해 현장조사를 통해 도출한 값을 기준으로 측정방법들에 따른 수치의 정확도 파악하고자 Bland-Altman 기술통계를 활용하였다. 먼저, 수고에 대한 결과를 살펴보면, 지상라이다와 현장조사 측정값을 서로 비교한 결과 평균 차이는 1.025로 나타났으며, p -값이 0.001($\alpha \leq .05$)로 나타나 두 측정값 간에 통계적으로 유의한 차이가 있음을 확인하였다. 또한 반복성 계수(CR 값)은 2.956m로 나타났다. 드론라이다와 현장조사의 값을 비교한 결과 평균의 차이는 -0.665로 나타났으며, p -값은 0.335($\alpha \leq .05$)로 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다. 그리고 CR값이 5.731로 가장 높게 나타났는데, 이 수치가 높을수록 현장조사의 측정값과 일치성이 부족하다고 할 수 있으며, 정확도가 필요한 응용분야에서는 제한될 수 있음을 확인하였다. 마지막으로 두 가지를 정합한 데이터에서는 평균 차이가 -0.434로 가장 낮았으며, p -값은 0($\alpha \leq .05$)으로 나타나 두 값 간의 유의한 차이가 있음을 확인하였다. 또한 CR 값이 1.199m로 가장 낮게 나타났다. 이는 가장 높은 일치성과 신뢰성이 높은 것으로 나타났음을 알 수 있다.

다음으로 흉고직경에 대한 결과를 살펴보면, 지상라이다와 현장조사 측정값을 비교한 결과, 평균 차이는 0.018로

나타났으며, 신뢰구간이 0.008-0.028로 변동성이 낮아 지상파 라이다 방식이 기준값에 매우 근접한 것으로 나타났다. 또한 CR 값은 0.053으로 높은 수준의 일관성과 반복성이 나타났다. 반면에 드론라이다와 현장조사 측정값을 비교한 결과 평균 차이는 0.108, 표준편차는 0.128로 큰 변동성을 보여 일관적이지 않은 것을 확인하였다. 95% CI 범위는 0.045-0.169로 신뢰 구간이 넓을수록 불확실성이 크다는 것을 의미한다. CR값은 0.322로 세가지 방법 중 가장 높게 나타나 드론라이다 측정방법이 가장 큰 차이로 일치성이 낮은 것으로 나타났다. 마지막으로 두 가지 방법으로 정합한 데이터의 경우 평균 차이가 0.018로 지상라이다 측정값과 유사하게 나타났으며, CR 값은 0.052로 세가지 방법 중 가장 낮았으며 일관성과 반복성이 가장 우수하다는 것을 확인하였다.

본 연구에 제시하고있는 고정밀 측량 기술인 라이다(LiDAR)를 활용한 수목의 재적 측정방법은 기존의 현장조사를 통한 산림조사보다 정밀하고 경제적 비용을 경감 할 수 있는 유용한 방법이다. 또한 수고 및 흉고직경 뿐만 아니라 수목의 좌표, 수관폭, 수관높이 등 다양한 정보를 추출 할 수 있기 때문에 가로수 및 공원에 식재된 수종별 탄소 저장량을 효과적으로 산출할 수 있다. 그리고 일반적으로 산림에서는 상대성장식을 통해 탄소흡수량을 추정할 수 있는 반면, 도시림은 전지 및 전정에 의해 상대성장식 대입이 용이하지 않다. 이에 본 연구 방법을 통해 실시간으로 수목의 정확한 재적 정보를 추출이 가능할 것으로 사료되며, 이는 탄소거래가 본격적으로 시작되는 2025년부터 활용도가 높아질것으로 예상된다. 향후, 라이다(LiDAR)를 기반으로 딥러닝 모델을 개발하여 다양한 수목의 탄소 저장량을 예측하는 시스템 구축과 수종별 포인트 데이터를 취득하여 수종별 수형을 구분할 수 있는 알고리즘에 대한 연구가 필요하다고 생각된다.

References

1. 고병준, 박세익, 박희정, 이상현(2022) 지상 LiDAR를 활용한 침엽수림의 수고 및 흉고직경 측정, 한국환경과학회지 31(6): 479-490.
2. 박정목, 임종수, 강진택, 조형주, 김동근(2024) 지상라이다 산림 데이터에서 개체목 분리를 위한 파이프라인 접근 방식, 한국멀티미디어학회지 27(3): 420-435.
3. 조성환, 반수홍, 이현직, 최석근,(2023) 고밀도 항공라이다측량을 이용한 자연림의 수목개체 추출, 대한공간정보학회지 31(1): 29-38.
4. 탄소중립위원회(2021) 2050 탄소중립 시나리오.
5. Bland, J. M., D. G. Altman(1986) Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement, The Lancet 327(8476): 307-310.
6. Lefsky, M. A., W. B. Cohen, G. G. Parker and D. J. Harding(2002) Lidar remote sensing for ecosystem studies: Lidar, an emerging remote sensing technology that directly measures the three-dimensional distribution of plant canopies, can accurately estimate vegetation structural attributes and should be of particular interest to forest, landscape, and global ecologists, Bio Science 52: 19-30.
7. <https://nifos.forest.go.kr/>
8. https://en.wikipedia.org/wiki/Point-set_registration#Outlier-free_registration
9. <https://www.greenvallleyintl.com/LiDAR360/>
10. <https://www.dji.com/kr>