

# 산림지역 수목의 기하학적 구조 측정을 위한 휴대용 라이다 장비의 활용성 평가\*

최승운<sup>1</sup> · 김태근<sup>2</sup> · 김종필<sup>3\*</sup> · 김성재<sup>4</sup>

## Assessment on the Applicability of a Handheld LiDAR for Measuring the Geometric Structures of Forest Trees\*

Seung-Woon CHOI<sup>1</sup> · Tae-Geun KIM<sup>2</sup> · Jong-Pil KIM<sup>3\*</sup> · Sung-Jae KIM<sup>4</sup>

### 요 약

본 연구에서는 흉고직경, 수고 등 산림지역 수목의 기하학적 구조 측정을 위한 휴대용 라이다 장비의 활용성을 평가하였다. 휴대용 라이다 장비의 정확도를 파악하기 위하여 태백산국립공원 내 대상지역(30m×30m)을 선정하고 매목조사를 통해 흉고직경과 수고를 측정하였다. 또, 라이다 장비의 활용성에 대한 객관적인 평가를 위해 편향, 평균제곱근오차, 절대평균오차, 상관계수 등 4가지 통계지표를 활용하였다. 분석결과, 흉고직경의 경우 매목조사와 휴대용 라이다 장비를 이용한 측정치가 거의 유사한 것으로 나타났으며, 휴대용 라이다 장비는 기존의 조사방식을 대체하기에 충분하였다. 그러나, 매목조사에 의한 수고 측정치는 다양한 오차를 포함하고 있어 라이다의 정확도를 파악하기에는 한계가 있었다. 향후 보다 신뢰성 있는 수고 측정방법을 통해 수집된 자료로부터 라이다 장비의 정확도를 평가하는 연구가 필요할 것으로 생각된다.

주요어 : 국립공원, 산림, 흉고직경, 수고, 라이다

### ABSTRACT

This study tried to assess the applicability of a hand-held LiDAR for measuring the geometric structures of forest trees including diameters at a breast height (DBH) and

2022년 02월 23일 접수 Received on February 23, 2022 / 2022년 04월 04일 수정 Revised on April 04, 2022  
/ 2022년 04월 06일 심사완료 Accepted on April 06, 2022

이 논문은 국립공원공단 국립공원연구원의 '라이다 기반의 식생구조 측정방법 도입 연구' 의 지원으로 수행되었음.

1 국립공원공단 국립공원연구원 원장 Director, Korea National Park Research Institute

2 국립공원공단 국립공원연구원 부장 Head of Department, Korea National Park Research Institute

3 국립공원공단 국립공원연구원 계장 Assistant Manager, Korea National Park Research Institute

4 ㈜신우아이씨티 이사 Director, Shin-Woo ICT Co.

\* Corresponding Author E-mail: jpkim97@knps.or.kr

tree height(H). A traditional method using tapelines was conducted to analyze the accuracy of the LiDAR instrument in the Taebaeksan national park in South Korea. Four statistical indices which are bias, root mean square error, mean absolute error, and correlation coefficient were employed to compare the measurements by the LiDAR instrument and traditional method. The DBHs from the LiDAR were very similar to those from the traditional method. And it indicated that the LiDAR is sufficient to be a alternative of a traditional method. However, there was a limitation in assessing the accuracy of LiDAR for measuring tree height by comparing the measurements by observer' s eyes since they included different error sources. Further study is needed to assess the accuracy of LiDAR instrument for tree height through more reliable measurements.

**KEYWORDS** : National Park, Forest, Diameter at Breast Height, Tree Height, LiDAR

## 서론

최근 세계 주요국들은 지구온난화에 따른 기후변화 영향을 최소화하기 위하여 탄소중립을 선언하고 이를 달성하기 위하여 노력하고 있다. 탄소중립 실현을 위해서는 인간 활동에 따른 온실가스 배출을 줄이는 것과 동시에 이미 배출된 온실가스에 대한 흡수원을 확충해나가야 한다. 산림은 해양과 함께 주요 탄소흡수원으로서 인정받고 있다. 산림을 구성하고 있는 수목의 기하학적 구조는 산림생태계의 보전과 관리뿐만 아니라 탄소흡수원으로서 산림의 탄소저장량을 파악하는데 필수적인 정보 중 하나이다.

산림에 대한 신뢰성 있는 탄소저장량 추정결과를 도출하기 위해서는 흉고직경(diameter at breast height), 수고(tree height) 등 수목의 기하학적 구조를 나타내는 변수들에 대해서 정밀한 측정이 요구된다. 전통적인 측정방법은 주로 직경테이프(흉고직경자), 수고측정기 등의 장비가 이용되어왔다. 하지만 이러한 방법은 조사자의 신체조건(신장 등)이나 숙련도, 피로도, 집중도, 습관 등에 따라 다양한 측정오차를 발생시킬 수 있다. 특히, 수고의 경우는 직경테이프를 이용해 직접 측정되는 흉고직경과는 달리 수목의 최상단과 최하단 사이의 각도와 수목과 조사자 간 거리를 통해 간접적으로 계산되기 때문에 그에 따른 오차는 더욱 커질 수 있다. 또,

산림은 매우 복잡하고 불규칙적이기 때문에 수목의 성장, 노화 등에 따른 수목의 기하학적 변화에 대한 지속적인 모니터링에도 한계가 있다.

라이다(Light Detection And Ranging, LiDAR)는 수많은 레이저(laser) 빛을 주변으로 방출하여 사물의 표면으로부터 반사되어 되돌아오는 신호를 분석하여 대상 물체의 3차원 영상을 구현해낼 수 있는 기술로서, 주로 토목건축(e.g. Pu, 2008; Karagianni, 2017), 재난안전(e.g. Bitelli *et al.*, 2004; Valença *et al.*, 2017), 도로교통(e.g. Zhang and Frey, 2006; Teo and Chiu, 2015) 등 공학 분야에서 활용되어왔다. 산림 분야에서도 이미 1980년대 초반에 라이다 기술이 도입되었으며(Lim *et al.*, 2003; Hopkinson *et al.*, 2004; van Leeuwen and Nieuwenhuis, 2010), 1998년에 최초의 상업용 지상 라이다 장비(Cyra Technologies社, 2001년 Leica社가 인수)가 출시된 이후부터 본격적으로 활용되기 시작했다(Liang *et al.*, 2016).

산림자원조사에서 라이다는 주로 수목의 위치, 흉고직경 등과 같은 수목의 기하학적 특성을 보다 효율적으로 조사하기 위하여 활용되었으며, 라이다 기술의 적용성을 검증하기 위한 연구들이 다수 수행되었다. Hopkinson *et al.* (2004)은 지상 라이다 장비를 통해 흉고직경과 수고를 측정하고 이를 직경테이프로 측정된 값과 비교한 결과, 흉고직경은 거의 유사하게 나타났다으나 수고의 경우는 라이다 측정치가 약

1.5m 낮게 나타났다고 하였다. Maas *et al.* (2008)은 선행연구를 분석하여 지상 라이다를 활용한 산림조사의 신뢰성과 정밀도를 조사하였으며, 그 결과 지상 라이다를 통해 97% 이상의 수목을 정확히 탐지할 수 있었고 흉고직경 측정 오차는 약 1.8cm 이내로 나타났다고 하였다. Vastaranta *et al.* (2009)은 지상 라이다, 레이저 카메라(laser camera) 그리고 릴라스코프(relascope)와 덴드로미터(dendrometer)의 기능을 조합한 레이저 릴라스코프(laser-relascope) 등 3종의 레이저 장비를 통해 수목의 흉고직경을 측정하고 버니어캘리퍼스(steel vernier calipers)로 측정한 값과 비교한 결과, 각 장비 순으로 4.5%, 4.9%, 8.3%의 오차가 나타났다고 하였다. Kankare *et al.* (2013)은 개별 수목의 줄기부 생물량(biomass) 추정을 위하여 지상 라이다 장비를 통해 흉고직경(수목 20분)을 측정하고 이를 직경테이프 측정치와 비교한 결과, 라이다 장비를 활용할 때 줄기부 생물량 추정 정확도가 개선되었다고 하였다.

선행연구를 통해서 다양한 지상 라이다 장비에 대한 검증이 수행되었으며, 각 장비의 특성에 따라 그 정확도나 신뢰도가 다르게 나타났다. 기존 지상 라이다 장비의 활용성 평가 연구는 대부분 고정식(e.g. Maas *et al.*, 2008; Vastaranta *et al.*, 2009; Donager *et al.*, 2018)과 배낭형(e.g. Xie *et al.*, 2020; Ko *et al.*, 2021) 라이다 장비 위주로 수행되었다. 휴대용 라이다 장비에 대한 평가는 일부 수행된 바(e.g. Proudman *et al.*, 2021; Stal *et al.*, 2021) 있으나, 국내 산림지역에 대한 연구는 거의 없었다. 따라서, 본 연구에서는 우리나라 산림지역 수목의 기하학적 측정을 위하여 휴대용(handheld) 지상 라이다 장비의 활용성을 평가하고자 하였다.

## 자료 수집 및 연구 방법

### 1. 라이다 장비

본 연구에서는 수목의 기하학적 구조 측정을




위하여 Leica社의 휴대용 라이다 장비(모델명: Leica BLK2GO laser scanner)를 사용하였다. 이 휴대용 라이다 장비는 1개의 고해상도 카메라(rolling shutter 방식)와 3개의 파노라마(panorama) 카메라(global shutter 방식)를 탑재하고 있어 주변 사물을 효과적으로 탐지하고 사진 촬영이 가능하며, 초당 약 42만 개의 점군(point cloud) 데이터를 취득할 수 있다. 또, 별도의 전용 제어장치가 필요 없이 일반 iOS 기반의 스마트폰이나 태블릿(tablet) 컴퓨터를 활용하여 데이터 취득 현황을 실시간으로 확인할 수 있고, 장비 무게는 배터리(battery)를 포함하여 약 775g으로 배낭형이나 고정형에 비해 상대적으로 가벼워 산림지역에서 이동하며 운영하기에 용이하다. 표 1은 라이다 장비의 주요 사양을 나타내고 있다(www.sccsurvey.co.uk).

### 2. 대상지역 및 조사방법

본 연구의 대상지역은 태백산국립공원 유일사 매표소 인근 지역(중심좌표: 37.11939° N, 128.91277° E)을 선정하였다(그림 1). 이 지역을 구성하고 있는 수종은 소나무가 약 51%, 신갈나무가 약 18%, 물푸레나무가 약 13%, 피나무가 약 10%, 나머지 개울나무, 층층나무, 들메나무, 당단풍나무, 팔배나무 등이 약 8%를 차지하고 있다. 대상지역에 대한 지형적인 특성을 파악하기 위하여 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission) DEM(Digital Elevation Model)을 분석한 결과(Farr and Kobrick, 2000). 대상지역의 평균 표고는 909m, 경사도는 15°, 경사향은 214°로 분석되었다(표 2).

현장조사는 2021년 6월 16일 13시부터 16시까지 진행되었으며, 이날 기상청에서 관측한 기상상황(강원도 태백시 황지동 기준)은 일강수량 5.4mm, 평균기온 14.7°C(최저기온 13.4°C, 최고기온 16.2°C), 평균풍속 2.4m/sec(조사시간 13시부터 16시까지 순간최대풍속 4.2m/sec)로 기록되었다(표 2). 이것은 표 1에서 제시된 것과 같이 라이다 장비 운영에 필요한 온도인 5~40°C, 풍속 5m/sec 이내(Seidel *et al.*, 2012;

TABLE 1. Technical specifications of the Leica laser scanners

Product name (type)	BLK2GO (handheld)	Pegasus (backpack)	P50 (station)
Product Image			
Physical size(mm)	Height: 279 / Diameter: 80	730×270×310	395×238×358
Weight with battery(kg)	0.775	11.9	12.65
Operating Time(hours)	6	4	5.5
Wavelength(nm)	830	903	1,550(invisible) / 658(visible)
Field-Of-View(H×V)	360° × 270°	270° × 30° per scanner	360° × 290°
Usable range(m)	0.5~25	0.5~50	0.4~1,000
Acquisition rate (points/second)	420,000	600,000	1,000,000
Relative accuracy(mm)	~15	~30	~3
Operating temp.(°C)	5~40	0~40	-20~50

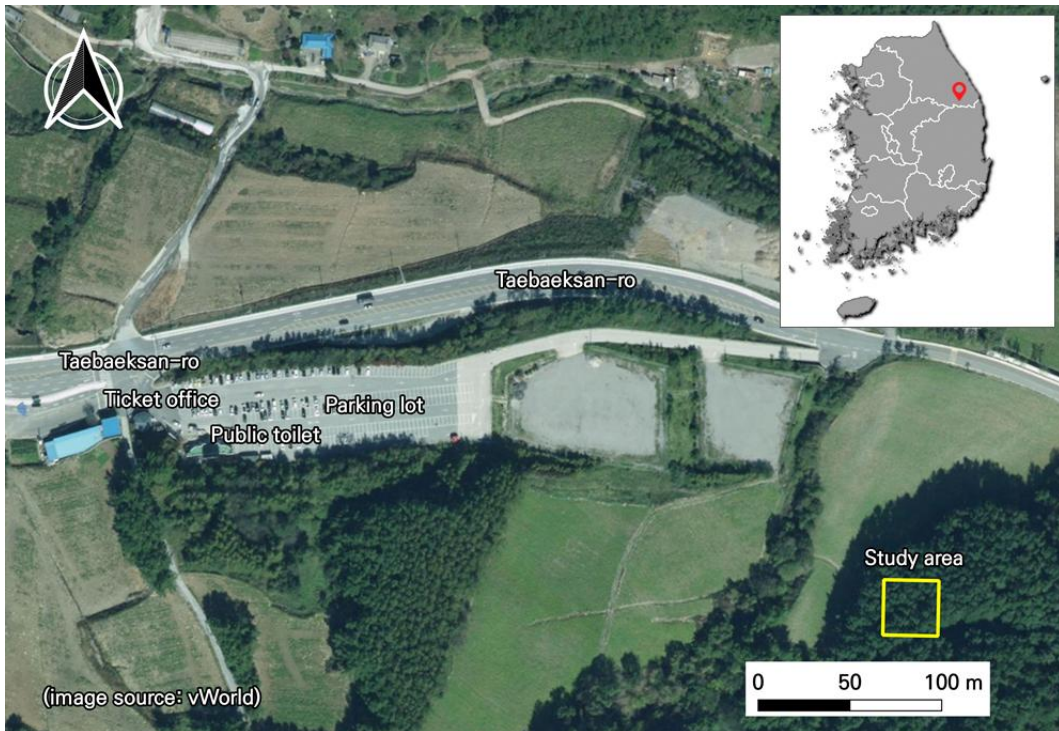


Figure 1. Location of the study area in the Taebaeksan national park

TABLE 2. Environmental conditions of the surveyed area

Forest		Topography		Weather		
Plot size	0.09 ha	Latitude	37.12° N	Rainfall	5.4mm	
Number of Trees	72	Longitude	128.91° E	Air temp.	Mean	14.7°C
Mean DBH	21.5cm	Elevation	909 El.m		Max.	16.2°C
Mean Height	12.9m	Slope	15°		Min.	13.4°C
Dominant species	pinus densiflora	Aspect	214°	Max. Wind speed	4.2m/s	



FIGURE 2. Sample images of a labeled tree captured by a RGB camera and the hand-held LiDAR instrument

Ko *et al.*, 2021), 강우량 10mm 미만(Kang *et al.*, 2017)의 조건을 모두 충족하는 것으로 확인되었다.

라이다 측정결과와 검증의 위하여 기존의 직경테이프를 이용한 매목조사를 동시에 수행하였다. 먼저, 직경테이프를 이용하여 대상지역 내 30m×30m 크기로 정방형 경계선을 설정하고, 다시 10m 간격으로 줄자를 설치하여 총 9개 구역으로 나누어 조사를 진행하였다. 또한, 수목 별로 매목조사와 라이다 측정결과를 일대일 (1:1)로 대응시키기 위하여 조사를 시작하기 전 임의로 29본의 수목에 대해서 줄기부에 표식 (labeling)을 하였다(그림 2). 매목조사는 먼저 수종을 확인하고 흉고직경과 수고를 측정하여 야장에 기입하였다. 흉고직경 측정 시 지면으로부터 1.2m 높이의 줄기부 직경을 측정하였으며, 경사면에서는 높은 쪽 지면을 기준으로 측정하였다. 또, 수목이 수직으로 서 있지 않은 경우는 줄기 방향으로 1.2m 지점에서 직경을 측정하였다.

라이다 장비로부터 양질의 현장 데이터를 획득하기 위하여 사전에 장비 배치, 스캔(scan) 기준선, 이동 경로, 중첩 구간 등에 대한 계획을 수립하고 조사를 수행하였다. 개별 수목에 대한 절대 좌표를 취득하기 위하여 조사구 주변 통신이 양호한 2개 지점에 각각 GNSS(Global Navigation Satellite System)를 설치하고 이를 기준으로 조사를 진행하였다. 이때, 위치결정에서 발생할 수 있는 오차를 최소화하기 위하여 정도저하율(Dilution Of Precision, DOP)을 고려하였다. 라이다 스캔 과정에서는 점군 데이터의 폐합과 사각지대를 최소화하기 위하여 3단계에 걸쳐서 중복 스캔을 실시하였다(그림 3). 1단계에서는 먼저 나선형으로, 2단계에서는 세로방향, 3단계에서는 가로방향으로 이동하면서 스캔을 진행하였다. 또한, 태블릿 컴퓨터를 활용하여 실시간으로 SLAM(Simultaneous Localization And Mapping)으로 획득된 결과를 통해 수집된 자료의 품질을 확인하였다. 데이터 처리 시 수목구



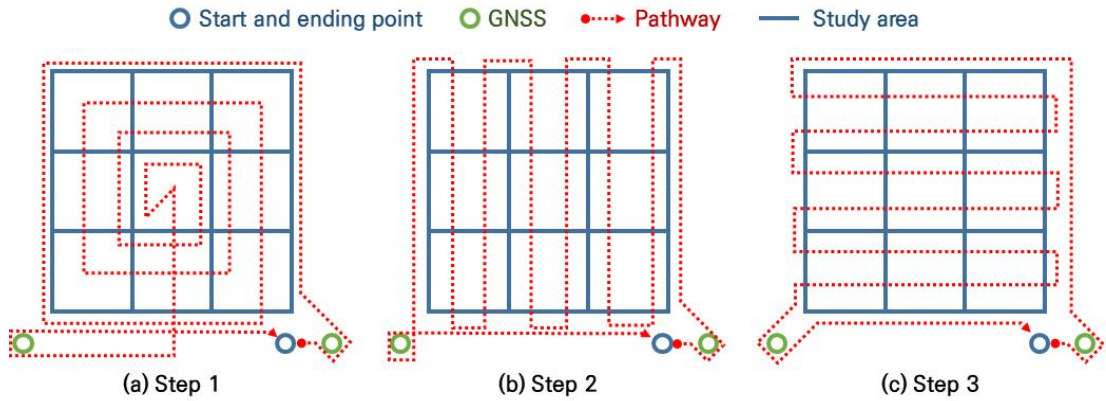


FIGURE 3. Sequential procedures and pathways for LiDAR scanning of this study

별이 용이하도록 하기 위하여 라이다 장비에 탑재된 카메라를 통해 사진 촬영을 병행하였다. 일부 데이터 점밀도가 떨어지거나 점군 데이터 생성 오류가 발생된 지점 등에 대해서는 보완을 위해 추가 스캔을 수행하였다.

### 3. 수목의 기하학적 구조 측정

선행연구에서는 대부분 Computree나 Lidar360 과 같은 소프트웨어를 이용하여 라이다 점군 데이터를 처리하고 수목의 기하학적 구조를 측정

하였으며(Bauwens *et al.*, 2016; Xie *et al.*, 2020; Ko *et al.*, 2021; Stal *et al.*, 2021), 이를 매목조사에 의한 측정값과 비교하였다. 본 연구에서는 라이다 장비의 활용성을 평가하는데 목적이 있으므로 소프트웨어의 특성이나 알고리즘에 의한 영향을 배제하기 위하여 데이터를 육안으로 확인하면서 수동으로 분석을 수행하였다. 현장조사에서 취득된 점군 데이터의 품질을 향상시키기 위하여 수목을 제외한 하층식생 등에 의한 잡음(noise)을 제거하였다(그림 4).

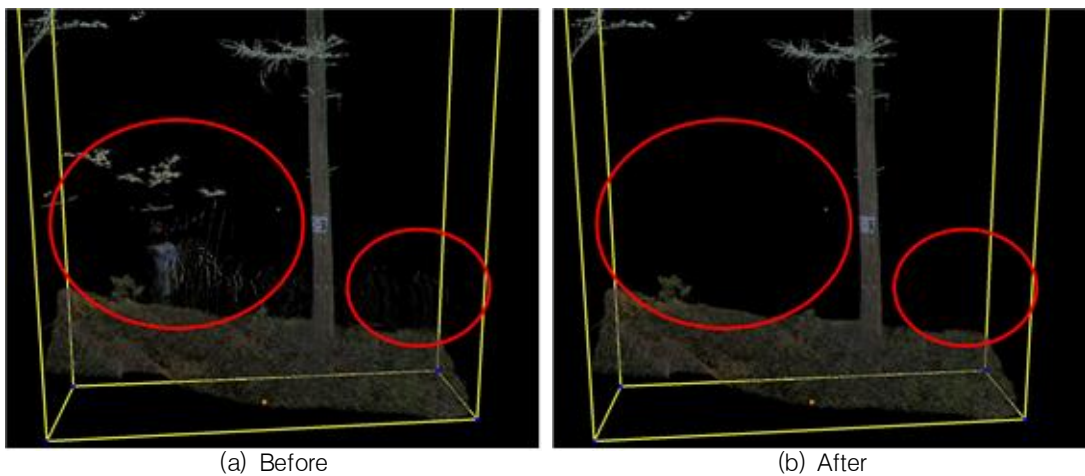


FIGURE 4. Comparison images (a) before and (b) after data pre-processing and noise reduction including removal of understory vegetation

수목의 기하학적 구조(수고, 흉고직경)를 측정하기 위하여 조사구 전체 수목에 대한 점군 데이터로부터 개별 수목을 분리하였다. 수고는 분리된 각 수목의 점군 데이터에서 지표면과 접한 최하단부로부터 최상단부까지의 거리를 측정하였다. 흉고직경을 측정하기 위하여 지표면으로부터 1.2m 높이를 기준으로 상·하부 5cm 구간(1.15~1.25m)을 추출하였다. 일반적으로 수목의 줄기부 단면은 완벽한 원형을 이루지 않기 때문에 직경을 직접 측정하는데 한계가 있어서 가상의 원기둥 모형을 생성하여 측정하였다. 이 원기둥 모형은 줄기부 단면에서 수피에 해당하는 점(point)들과 이 점들의 무게중심점까지의 평균거리를 반지름으로 하는 가상의 원(circle)으로 구성하였다. 마지막 이 원기둥 모형을 이루는 가상원의 직경에 대한 평균치를 수목의 흉고직경으로 정의하였다.

## 분석 결과

수목의 기하학적 구조 측정을 위한 휴대용 라이다 장비의 활용성을 평가하기 위하여 다음과 같이 편향(bias, 이하 BIAS), 평균제곱근오차(root mean square error, 이하 RMSE), 절대평균오차(mean absolute error, 이하 MAE), 상관계수(correlation coefficient, 이하 CC) 등 4가지 지표를 활용하여 통계적 검정을 수행하였

다(표 3). BIAS는 추정치(라이다 측정값)의 평균과 실측치(매목조사 측정값)의 평균과의 차이를 나타내며, 추정치의 계통오차(systematic error)를 평가하는데 활용하였다. 그런데 BIAS는 양(+의 오차와 음(-)의 오차가 서로 상쇄될 수 있으므로, RMSE와 MAE를 통해서 추정치와 실측치 사이의 오차의 크기를 측정하였다. 마지막으로 CC는 추정치와 실측치 사이의 상관관계를 파악하기 위하여 적용하였다.

기존의 직경 테이프에 의한 매목조사방법과 라이다 장비를 이용한 측정치를 비교한 결과, 기존 방법의 경우 수목의 흉고직경은 최소 6.0cm, 최대 47.2cm, 평균 15.6cm, 표준편차 11.1cm으로 측정되었으며, 라이다 장비의 경우 수목의 흉고직경은 최소 6.0cm, 최대 47.1cm, 평균 15.8cm, 표준편차 11.3cm으로 기존 방법에 의한 결과와 거의 유사한 것으로 나타났다(그림 5(a)). 기존 방법과 라이다 장비를 통해 측정된 흉고직경 사이의 BIAS는 (-)0.179cm으로 라이다로 측정된 흉고직경이 기존 방법에 의한 결과보다 다소 작게 나타났다. RMSE는 1.064cm, MAE는 0.593cm으로 이는 평균 대비 각각 약 6.7%와 약 3.8%인 것으로 나타났으며, CC는 0.996으로 비교적 높게 나타났다(표 3). 이 결과는 Maas *et al.*(2008)의 연구에서 제시된 흉고직경의 RMSE 1.8cm보다 더 우수한 것으로 나타났다. 또, 본 연구는 라이다 장비 운영환경

TABLE 3. Four statistical indices to evaluate the performance of the LiDAR instrument for measuring the geometric structures of forest trees

Statistics	Formula
Bias (BIAS)	$BIAS = \frac{1}{n} \sum (x_i - y_i)$
Root Mean Square Error (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (x_i - y_i)^2}$
Mean Absolute Error (MAE)	$MAE = \frac{1}{n} \sum  x_i - y_i $
Correlation Coefficient (CC)	$CC = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \times \sum (y_i - \bar{y})^2}}$

Where,  $x$  and  $y$  are measurements by LiDAR instrument and traditional field survey, respectively.  $\bar{x}$  and  $\bar{y}$  are the mean of  $x$  and  $y$ .  $i$  is 1, 2, 3, ...,  $n$  and  $n$  is the total number of the detected trees.

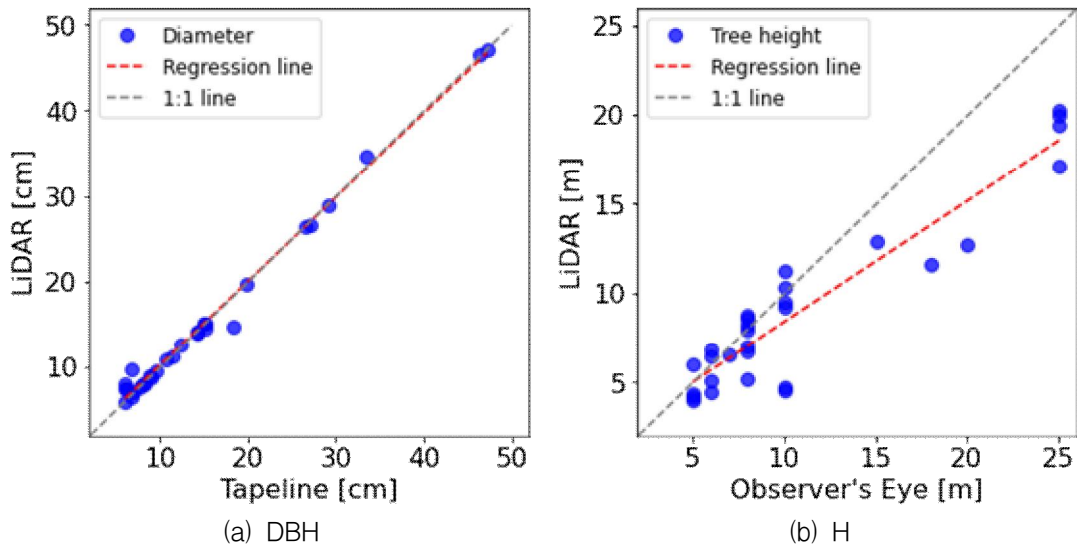


FIGURE 5. Scatter plots showing (a) diameters at breast height (DBH) and (b) tree height (H) measured by the LiDAR instrument and traditional methods

을 모두 만족하였으나 현장조사 당시 우천(강우량 5.4mm)으로 인해 수피의 대부분이 비에 젖어 있었다. 이로 인해 어느 정도의 측정오차가 발생되었을 것으로 생각되며, 이를 고려하면 본 연구에서 제시된 결과보다 두 방법의 간의 일치도는 더 높을 것으로 판단된다.

수고의 경우 기존의 매목조사방법(목측)에 의한 측정치는 최소 5.0m, 최고 25.0m, 평균 11.0m, 표준편차 6.6m이었으며, 라이다 장비 측정치는 최소 4.0m, 최고 20.2m, 평균은 9.1m, 표준편차 4.8m으로 분석되었다(그림 5(b)). 두 가지 방법으로 측정된 수고 간의 BIAS는 1.905m으로 매목조사가 대체로 과대 측정하는 것으로 나타났다. RMSE는 3.297m, MAE는 2.303m으로 평균 대비 각각 약 30.0%, 약 20.9%로 나타났다으며, CC는 0.937로 비교적 높게 나타났으며, 흥고직경 분석결과보다는 다소 낮았다(표 4). Maas *et al.*(2008)의 연구에서는 시거측량기와 지상 라이다 장비의 수고 측정치를 비교한 결과, RMSE 평균이 4.55m(평균 대비 약

14.5%)로 분석되었다. 또, Hopkinson *et al.*(2004)의 연구에서는 버텍스(vertex) 측정기와 지상 라이다를 비교한 결과, BIAS가 1.5m로 라이다 측정치가 더 낮게 나타났다. 본 연구와 선행연구로부터 흥고직경은 라이다 장비와 기존 방법에 의한 측정결과가 거의 유사한 결과를 얻을 수 있었으나, 수고의 경우는 두 방법에 의한 측정결과 사이의 차이가 매우 큰 것을 알 수 있었다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 수고를 측정할 때 목측이나 장비를 이용한 방법 모두 조사자의 주관적인 판단에 의존하며 간접적인 방식을 이용하기 때문에 나타난 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구를 통해 조사된 목측 결과를 바탕으로 수고 측정에 대한 휴대용 라이다 장비의 정확도를 파악하기에는 한계가 있었으며, 향후 버텍스(vertex) 측정기 등 보다 객관적인 방법을 통해 측정된 수고 데이터를 이용한 비교연구가 필요하다.

한편, 휴대용 라이다 장비의 수고 측정범위에 대한 연구가 수행되었다(Bauwens *et al.*, 2013;



TABLE 4. Descriptive statistics showing the performance of the LiDAR instrument for measuring diameters at breast height(DBH) and tree heights(H)

Index	DBH	H
BIAS	-0.179cm	1.905m
RMSE	1.064cm	3.297m
MAE	0.593cm	2.303m
CC	0.996	0.937

Hyypä *et al.*, 2020; Balenović *et al.*, 2021). Balenović *et al.*(2021)에 따르면, 최근 개발된 휴대용 라이다 장비의 수고 측정범위는 최대 100m까지로 상당히 발전되었으나, 수고가 25m를 초과하는 경우에는 과소 추정될 수 있다고 하였다. 본 연구에서 사용된 휴대용 라이다 장비의 유효 측정범위는 25m로 이를 초과하는 수목의 수고를 측정하는 데는 한계가 있다.

## 결론

본 연구에서는 산림지역 수목의 기하학적 구조(흉고직경, 수고) 측정을 위한 휴대용 라이다 장비의 활용성을 평가하기 위하여 태백산국립공원 유일사 입구 인근 지역을 대상으로 연구를 수행하였다. 휴대용 라이다 장비를 통해 측정된 결과를 비교하기 위하여 매목조사를 병행하여 흉고직경과 수고 측정치를 수집하였으며, 장비의 활용성을 객관적으로 평가하기 위하여 편향, 평균제곱근오차, 절대평균오차, 상관계수 등 4가지 통계지표를 활용하였다.

분석결과, 흉고직경의 경우 매목조사와 휴대용 라이다 장비를 이용한 측정값과 거의 유사한 것으로 나타났으며, 휴대용 라이다 장비는 기존의 조사방식을 대체하기에 충분하였다. 그러나, 본 연구를 통해서 수집된 매목조사(목측)에 의한 수고 측정값은 조사자의 주관적 판단과 같이 다양한 오차 요인을 포함하고 있어 이 자료를 통해서 휴대용 라이다 장비의 수고 측정 정확도를 파악하기에는 한계가 있었다. 따라서, 향후 보다 신뢰성 있는 수고 측정방법을 통해 수집된 자료로부터 라이다 장비의 정확도를 평가하는 연구가 필요할 것으로 생각된다.

라이다 장비는 한 번의 현장조사를 통해서 산림의 복잡한 구조를 거의 완벽하게 복제해서 저장할 수 있기 때문에 산림조사에 매우 유용한 도구임에 틀림없다. 또한, 수집된 점군 데이터를 분석하여 매목조사에서 수집이 어려운 수목 위치, 수고별 직경, 수관폭, 수관넓이 등 다양한 구조 변수를 추출할 수 있으며, 추출된 정보를 통해서 벌목하지 않고도 줄기의 체적 또는 생물량(biomass)을 추정할 수 있다는 장점이 있다. 그러나, 상용 소프트웨어를 활용하더라도 방대한 양의 점군 데이터를 처리하고 분석하는데 많은 시간과 인력이 소모되며, 라이다 데이터만으로 수종을 구분하기 어렵다는 한계가 있었다. 향후 라이다 점군 데이터로부터 수목의 기하학적 구조를 보다 효율적으로 분석할 수 있는 소프트웨어와 인공지능 등을 활용한 수종 판독기술 등이 개발된다면 라이다 장비의 활용성이 더 높아질 것으로 기대된다. [KAGIS](#)

## REFERENCES

- Balenović, I., X. Liang, L. Jurjević, J. Hyypä, A. Seletković and A. Kukko. 2021. Hand-held personal laser scanning - Current status and perspectives for forest inventory application. *Croatian Journal of Forest Engineering* 42:165-183.
- Bauwens, S., H. Bartholomeus, K. Calders and P. Lejeune. 2016. Forest inventory with terrestrial LiDAR: A comparison of static and hand-held mobile laser scanning. *Forests* 7(6):127.

- Bitelli, G., M. Dubbini and A. Zanutta. 2004. Terrestrial laser scanning and digital photogrammetry techniques to monitor landslide bodies. *Proceedings of XXth ISPRS Congress Commission V*. pp.246-251.
- Donager, J. J., T. T. Sankey, J. B. Sankey, A. E. Sanchez Meador, A. J. Springer and J. D. Bailey. 2018. Examining forest structure with terrestrial lidar: Suggestions and novel techniques based on comparisons between scanners and forest treatments. *Earth and Space Science* 5:753-776.
- Farr, T. G. and M. Kobrick. 2000. Shuttle Radar Topography Mission produces a wealth of data. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 81(48):583-585.
- Hopkinson, C., L. Chasmer, C. Young-Pow and P. Treitz. 2004. Assessing forest metrics with a ground-based scanning LiDAR. *Canadian Journal of Remote Sensing* 34:573-583.
- Hyypä, E., X. Yu, H. Kaartinen, T. Hakala, A. Kukko, M. Vastaranta, J. Hyypä. 2020. Comparison of backpack, handheld, under-canopy UAV, and above-canopy UAV laser scanning for field reference data collection in boreal forests. *Remote Sensing* 12(20):3327.
- Kang, D.B., J.C. Huh and K.N. Ko. 2017. Analysis of factors influencing the measurement error of ground-based LiDAR. *Journal of the Korean Solar Energy Society* 37(6): 25-37 (강동범, 허종철, 고경남. 2017. 지상 기반 라이다의 측정 오차에 영향을 미치는 요인 분석. *한국태양에너지학회논문집* 37(6): 25-37.
- Kankare, V., M. Holopainen, M. Vastaranta, E. Puttonen, X. Yu, J. Hyypä, M. Vaaja, H. Hyypä and P. Alho. 2013. Individual tree biomass estimation using terrestrial laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 75:64-75.
- Karagianni, A. 2017. *Terrestrial Laser Scanning in Building Documentation*. *Civil Engineering and Architecture* 5(6):215-221.
- Ko, C.U., J.S. Kim, D.G. Kim and J.T. Kang. 2021. Analysis of optimal pathways for terrestrial LiDAR scanning the establishment of digital inventory of forest resources. *Korean Journal of Remote Sensing* 37(2): 245-256 (고치웅, 임종수, 김동근, 강진택. 2021. 디지털 산림자원정보 구축을 위한 최적의 지상LiDAR 스캔 경로 분석. *대한원격탐사학회* 37(2):245-256).
- Liang, X., V. Kankare, J. Hyypä, Y. Wang, A. Kukko, H. Haggrén, X. Yu, H. Kaartinen, A. Jaakkola, F. Guan, M. Holopainen and M. Vastaranta. 2016. Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 115: 63-77.
- Lim, K., P. Treitz, M. Wulder, B. St-Onge and M. Flood. 2003. LiDAR remote sensing of forest structure. *Progress in Physical Geography* 27:88-106.
- Maas, H.G., A. Bienert, S. Scheller and E. Keane. 2008. Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data. *International Journal of Remote Sensing* 29:1579-1593.
- Proudman, A., M. Ramezani and M. Fallon. 2021. Online estimation of diameter at breast height (DBH) of forest trees using a handheld LiDAR. *Proceedings of 2021 European Conference on Mobile Robots (ECMR)*.
- Pu, S. 2008. Generating building outlines from terrestrial laser scanning. *International*

- Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 37(B5): 451-456.
- Seidel, D., S. Fleck and C. Leuschner. 2012. Analyzing forest canopies with ground-based laser scanning: A comparison with hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 154:1-8.
- Stal, C., J. Verbeurgt, L. De Sloover and A. De Wulf. 2021. Assessment of handheld mobile terrestrial laser scanning for estimating tree parameters. *Journal of Forest Research* 32:1503-1513.
- Teo, T.A. and C.M. Chiu. 2015. Pole-like road object detection from mobile lidar system using a coarse-to-fine approach. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 8(10):4805-4818.
- Valença, J. I. Puente, E. Júlio, H. González-Jorge and P. Arias-Sánchez. 2017. Assessment of cracks on concrete bridges using image processing supported by laser scanning survey. *Construction and Building Materials* 146:668-678.
- Van Leeuwen, M. and M. Nieuwenhuis. 2010. Retrieval of forest structural parameters using LiDAR remote sensing. *European Journal of Forest Research* 129:749-770.
- Vastaranta, M., T. Melkas, M. Holopainen, H. Kaartinen, J. Hyyppä, H. Hyyppä. 2009. Laser-based field measurements in tree-level forest data acquisition. *Photogrammetric Journal of Finland* 21:51-61.
- Xie, Y., J. Zhang, X. Chen, S. Pang, H. Zeng and Z. Shen. 2020. Accuracy assessment and error analysis for diameter at breast height measurement of trees obtained using a novel backpack LiDAR system. *Forest Ecosystems* 7:33-43.
- Zhang, K. and H. C. Frey. 2006. Road grade estimation for on-road vehicle emissions modeling using light detection and ranging data. *Journal of the Air & Waste Management Association* 56(6):777-788. **KAGIS**