

## Design and Implementation of System for Estimating Diameter at Breast Height and Tree Height using LiDAR point cloud data

Jong-Su Yim\*, Dong-Hyeon Kim\*\*, Chi-Ung Ko\*, Dong-Geun Kim\*\*, Hyung-Ju Cho\*\*\*

\*Researcher, Forest ICT Research Center, National Institute of Forest Science, Seoul, Korea

\*\*Doctor, Dept. of Ecology and Environment System, Kyungpook National University, Sangju, Korea

\*Ph. D Researcher, Forest ICT Research Center, National Institute of Forest Science, Seoul, Korea

\*\*Professor, Dept. of Ecology and Environment System, Kyungpook National University, Sangju, Korea

\*\*\*Professor, Dept. of Software, Kyungpook National University, Sangju, Korea

### [Abstract]

In this paper, we propose a system termed ForestLi that can accurately estimate the diameter at breast height (DBH) and tree height using LiDAR point cloud data. The ForestLi system processes LiDAR point cloud data through the following steps: downsampling, outlier removal, ground segmentation, ground height normalization, stem extraction, individual tree segmentation, and DBH and tree height measurement. A commercial system, such as LiDAR360, for processing LiDAR point cloud data requires the user to directly correct errors in lower vegetation and individual tree segmentation. In contrast, the ForestLi system can automatically remove LiDAR point cloud data that correspond to lower vegetation in order to improve the accuracy of estimating DBH and tree height. This enables the ForestLi system to reduce the total processing time as well as enhance the accuracy of measuring DBH and tree height compared to the LiDAR360 system. We performed an empirical study to confirm that the ForestLi system outperforms the LiDAR360 system in terms of the total processing time and accuracy of measuring DBH and tree height.

▶ **Key words:** LiDAR point cloud data, Diameter at breast height, Tree height, Terrestrial LiDAR, Software

### [요 약]

논문은 LiDAR 점군 데이터를 사용하여 흉고 직경과 수고를 예측하는 ForestLi 시스템을 제안한다. ForestLi 시스템이 LiDAR 점군 데이터를 처리하는 과정은 다음과 같이 여러 단계로 진행된다. 다운샘플링, 이상점 제거, 지표면 분할, 지표면 정규화, 수간 추출, 개체목 분할, 흉고 직경 측정, 수고 측정. LiDAR 점군 데이터를 처리하는 상용 시스템 LiDAR360은 하층 식생과 개체목 분할 오류를 사용자가 직접 수정해야 한다. ForestLi 시스템은 하층 식생에 해당하는 LiDAR 점군 데이터를 자동으로 제거한다. 결과적으로 ForestLi 시스템이 LiDAR360보다 전체 수행시간을 줄이고, 흉고 직경과 수고 예측의 정확성을 높였다. 실험을 통해서 제안된 ForestLi가 LiDAR360 시스템보다 흉고 직경과 수고 측정의 정확성과 전체 실행시간 측면에서 우수하다는 것을 보여주었다.

▶ **주제어:** LiDAR 점군 데이터, 흉고 직경, 수고, 지상 LiDAR, 소프트웨어

- 
- First Author: Jong-Su Yim, Corresponding Author: Hyung-Ju Cho
  - \*Jong-Su Yim (yimjs@korea.kr), Forest ICT Research Center, National Institute of Forest Science
  - \*\*Dong-Hyeon Kim (kdhcjswo12@gmail.com), Dept. of Ecology and Environment System, Kyungpook National University
  - \*Chi-Ung Ko (kocu0603@forest.go.kr), Forest ICT Research Center, National Institute of Forest Science
  - \*\*Dong-Geun Kim (dgkim96@knu.ac.kr), Dept. of Ecology and Environment System, Kyungpook National University
  - \*\*\*Hyung-Ju Cho (hyungju@knu.ac.kr), Dept. of Software, Kyungpook National University
  - Received: 2023. 01. 26, Revised: 2023. 02. 14, Accepted: 2023. 02. 15.

## I. Introduction

산림청에서는 데이터 기반의 산림 행정 서비스를 구현하기 위하여 디지털로 빠르게 전환되고 있다. 전통적인 산림자원조사는 산림자원 현황(예: 본 수, 흉고직경(DBH: Diameter at Breast Height), 수고, 바이오매스)을 조사할 때, 직경테이프, 줄자, 측고기와 같은 재래식 장비를 이용해서 실측한다[1]. 국내 산림에 대한 전수 조사는 한계가 있어서, 층화 계통추출법, 층화 임의추출법을 이용하여 표준지 내에서 인력을 이용한 현지 조사를 통해 산림자원 통계자료를 만든다[2]. 국가산림자원조사(NFI: National Forest Inventory)는 위와 같은 방식으로 표준지에서 모니터링을 통해 국가산림자원의 기본통계를 만들고, 산림자원 변화를 주기적으로 파악한다. 이러한 기본통계는 지속가능한 산림경영(SFM: Sustainable Forest Management) 실천을 위한 산림정책 수립의 기초자료로 활용된다[3]. 재래식 장비를 이용한 산림자원조사는 노동집약적이고, 작업 시간이 매우 길다.

국가산림자원조사에서도 3차원 산림자원정보를 취득·관리할 수 있는 LiDAR(LiDAR: Light Detection and Ranging) 센서를 적극적으로 활용해야 한다고 주장하고 있다. LiDAR 장비는 비정형적인 임목의 형상을 3차원 LiDAR 점군 데이터로 획득할 수 있어 노동집약적인 기존 산림자원조사 방식을 개선할 수 있다[8]. 최근에 국립산림과학원은 LiDAR 장비를 지상 및 드론, 헬기에 탑재해서 적은 인력과 짧은 시간으로 조사의 정확성을 높이는 방법을 연구하고 있다. Fig. 1은 산림자원조사 방식의 변화를 보여준다. 기존 산림자원 조사는 재래식 장비를 이용해 실측했다. 최근에는 LiDAR 센서를 포함한 원격탐사 장비를 활용하여 넓은 산림지역을 효과적으로 조사하고 있다.

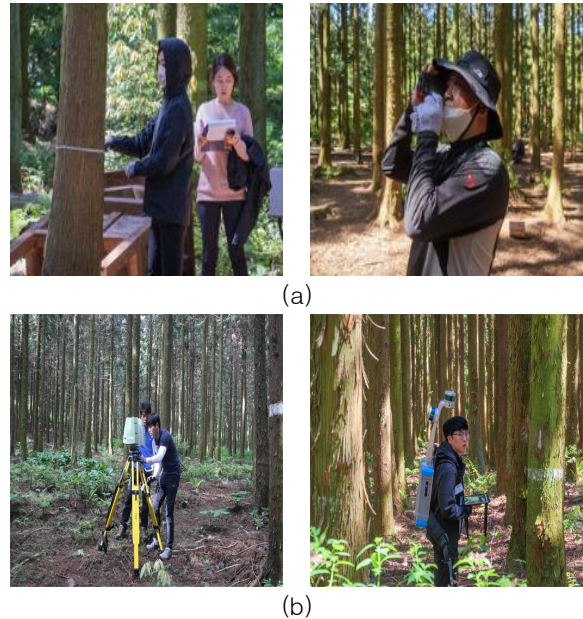


Fig. 1. Change in forest inventory survey methods (a) Traditional forest inventory (b) Forest inventory using the LiDAR sensor

LiDAR 점군 데이터를 사용하여 산림자원분야 융합산출물(예: 표준지 경계, 토지이용구분, 임상·수종구분도, 임분고, 임목축적·바이오매스, 산림경영활동)을 분석할 수 있다. 국내 산림 현황에 적합한 LiDAR 점군 데이터 분석 방법과 표준모델 개발 연구가 부족하다[8]. 특히 LiDAR 점군 데이터를 분석할 수 있는 전·후처리 방법과 표준모델 개발이 필요하다.

다음은 본 논문의 성과를 요약한 것이다.

- 산림자원 조사 분야에서 LiDAR 점군 데이터 처리 절차와 자동화를 위한 시스템을 설계하고 구현한다.
- LiDAR 점군 데이터 처리 과정을 단계별로 분석하고 구현한다.
- LiDAR 점군 데이터를 처리하는 상용 프로그램과 흉고직경 및 수고 계산 정확도, 처리시간을 비교하여 제안된 시스템의 우수성을 실증적으로 보여준다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장은 LiDAR 소개와 관련 연구를 제시한다. 3장은 LiDAR 점군 데이터 처리 과정을 단계별로 기술한다. 4장은 실험 조건을 제시하고 제안된 시스템과 상용 프로그램의 흉고직경과 수고 측정의 정확도와 처리시간을 실증 비교한다. 5장은 본 논문의 결론을 제시한다.

## II. Preliminaries

### 1. Overview of LiDAR

LiDAR는 펄스 빛을 이용하여 주변에 있는 물체까지의 거리 측정치를 수집하는 원격탐사 장비이다. LiDAR 센서는 반사광 에너지를 기록하여 물체까지의 거리를 파악하고 이를 토대로 주변에 대한 3차원 표현을 생성한다. LiDAR 센서는 산림자원조사, 자율주행, 로봇공학 분야에서 널리 사용되며, 동시적 위치추정 및 지도작성(SLAM: Simultaneous Localization and Mapping), 경로 계획 같은 내비게이션 워크플로뿐만 아니라 객체 검출, 의미론적 분할 같은 3차원 인식 워크플로를 가능하게 만든다.

LiDAR를 탑재하는 플랫폼을 기준으로 항공 및 지상 LiDAR로 분류된다. 항공 LiDAR는 드론과 항공기에 탑재된다. 항공 LiDAR는 대규모 지형을 나타내는 LiDAR 점군 데이터를 수집하여 이를 LiDAR 매핑, 특징 추출, 지형 분류에 활용한다. 지상 LiDAR에는 고정형 지상 LiDAR와 이동형 LiDAR가 있다. 고정형 지상 LiDAR는 고정된 플랫폼에 탑재되고, 토지 측량, 도로 측량, 위상 매핑, 수치표고 모델(DEM: Digital Elevation Model) 생성에 널리 활용된다. 고정형 지상 LiDAR 센서는 상세하고 근접한 데이터 수집이 필요한 산림자원조사에 적합하다. 이동형 LiDAR 센서는 자동차나 트럭 같은 이동형 플랫폼에 부착되고 대표적인 응용 분야는 자율주행차다. 차량 주변을 LiDAR 센서로 스캔하여 운전 중에 장애물을 인식한다.

### 2. Related works

산림자원조사는 조사대상 지역이 넓어서, 항공 LiDAR 센서를 활용하는 연구가 활발하게 진행되었다[9]. 항공 LiDAR 센서는 수관 아래쪽 데이터를 얻기가 어려워서, 지상 LiDAR 센서를 활용한 산림자원조사 연구가 진행되고 있다[10].

국내에서 지상 LiDAR 센서가 수집한 산림 LiDAR 점군 데이터 처리를 위해 LiDAR360과 같은 상용 소프트웨어를 활용하여 산림자원 현황을 분석하는 연구가 진행되었다[2]. 산림자원조사 연구에서 사용하는 플랫폼은 대부분 항공 LiDAR 센서이다. 단빔 음향측심기(SBES, Single Beam Echo Sounder), 측면음향주사기(SSS, Side Scan Sonar), 항공 LiDAR 센서에서 수집한 데이터를 통합하고 지형의 3차원 그래픽 표현을 위한 프로그램이 개발되었다[15]. 이 방법은 하천 주변 지형과 하저 지형을 파악할 수 있지만, 산림에는 활용할 수 없다. LiDAR 점군 데이터를 고려한 유역분할 알고리즘 기반 산림 바이오매스 추정

[16], 수치표고모델(DEM, Digital Elevation Model)과 수치표면모델(DSM, Digital Surface Model)의 차이를 이용한 개체목 추출 및 수고 측정[18] 연구가 있었다. 요약하면 국내 산림 현황을 고려한 산림 LiDAR 점군 데이터 처리 알고리즘 개발과 공통 모듈 개발 연구는 부족하다[11].

국외에서는 LiDAR 센서를 항공 및 지상 등 다양한 플랫폼에 탑재하여 산림분야에 활용하려는 연구가 수행되었다 [12, 13]. 자국의 산림현황에 알맞은 LiDAR 점군 데이터 처리 알고리즘과 소프트웨어 개발이 함께 진행되고 있다[5]. 수관과 수간을 구분할 수 있는 LeWoS 프로그램 [14]과 딥러닝을 활용한 개체목 추출, 수간 추출, 흉고직경 및 수고 측정을 자동으로 수행하는 FSCT 프로그램[17]이 개발되었다. LiDAR 센서를 활용한 산림분야 연구가 자국의 산림 환경조건을 고려한 LiDAR 점군 데이터 처리 표준 모듈과 알고리즘 개발이 진행되고 있다[14]. 따라서 국내에서도 지상 LiDAR 센서를 활용하여 산림자원조사를 진행하고 취득되는 LiDAR 점군 데이터의 효율적인 처리를 위해 국내 산림환경에 적합한 분석 알고리즘과 표준모듈의 설계 및 구현이 필요하다.

## III. The Proposed Scheme

### 1. Overview of ForestLi program

Fig. 2는 본 연구에서 개발한 ForestLi 프로그램 모습을 보여준다. 왼쪽은 메뉴바로 구성되어 있고, 오른쪽은 사용자 입력 속성 정보를 제공한다. LiDAR 점군 데이터 처리 단계는 (1) 다운샘플링(Downsampling), (2) 이상점 제거, (3) 지표면 분류 및 정규화, (4) 수간 추출, (5) 임목 분류로 진행된다. (1)-(3) 단계는 PDAL API를 [6], (4)-(5) 단계는 treeseg API[5]를 사용하여 구현했다. 각 단계에서 사용되는 알고리즘에 대한 설명은 Table 1에 정리했다.

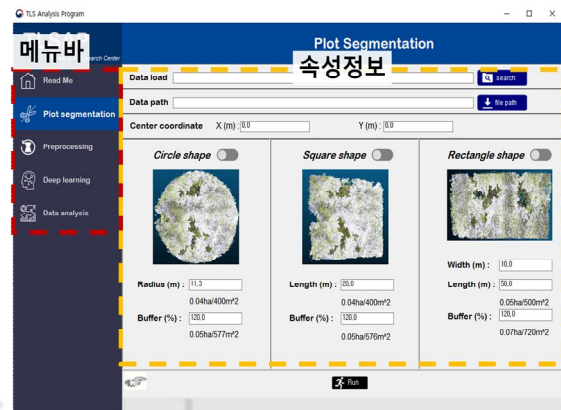


Fig. 2. ForestLi Program

Table 1. Processing algorithms of ForestLi

Processing phase	Algorithms of ForestLi
Downsampling	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voxel downsize filter</li> <li>• Sample filter</li> </ul>
Removing outliers	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Multiples of standard deviation</li> <li>• Extended local minimum</li> </ul>
Ground segmentation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simple morphological filter</li> </ul>
Normalizing ground points	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Height above ground nearest neighbor filter</li> <li>• Extended local minimum</li> </ul>
Stem extraction	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Euclidean clustering</li> <li>• Circle fitting algorithm</li> <li>• Cylinder fitting algorithm</li> </ul>
Individual tree segmentation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Euclidean clustering</li> <li>• Spatial 3D cylinder filter</li> <li>• Region growing algorithm</li> </ul>
DBH measurement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Random sampling consensus</li> <li>• Least median of squares</li> </ul>
Tree height measurement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Euclidean distance</li> </ul>

지상 LiDAR를 이용해 취득된 LiDAR 점군 데이터는 해상도가 높으며, 각종 잡음(먼지, 빛 등)이 존재한다. 이러한 잡음들은 분석과정에서 오류를 발생시키며, 계산 복잡성이 높아져 흉고직경 측정과 수고 측정의 정확도를 떨어뜨린다. 예를 들어, 4장 실험에서 사용한 잣나무림(KPF; Korea Pine Forest)을 스캔하여 얻어진 LiDAR 점군 데이터의 개수는  $6.627 \times 10^8$ 이다. 잡음 제거와 계산 복잡성을 낮추기 위해 다운샘플링과 이상점 제거를 수행한다. Table 1의 단계별 작업은 2절부터 8절까지 설명한다.

## 2. Downsampling

복셀 다운사이즈 필터는 복셀 기반 샘플링 방법이다. LiDAR 점군 데이터를 일정한 크기를 지닌 정육면체 형태의 복셀로 가득 채운다. 다음으로 복셀 내부에 있는 점들 가운데, 가장 첫 번째 점 좌표를 복셀의 중심(빨간 점)으로 이동시킨 뒤, 나머지 점들은(파란 점) 모두 제거한다(Fig. 3).

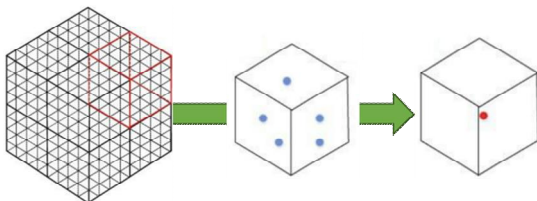


Fig. 3. Downsampling using voxel downsize filter

복셀 다운사이즈 필터는 리샘플링 방법에서 일반적으로 사용되는 방법이며, 정렬되지 않은 LiDAR 점군 데이터의 배열을 효과적으로 정렬시켜준다 (Fig. 4). LiDAR 점군 데이터에 배치되는 정육면체 형태의 복셀 크기는 사용자가

직접 설정할 수 있으며, 단위는 m이다. 값이 커질수록 해상도가 낮아지며, 값이 낮을수록 해상도는 높아진다. 즉, 값이 너무 커지면 유의미한 LiDAR 점군 데이터가 유실될 수 있으므로, 적당한 값을 선정하는 것이 중요하다.

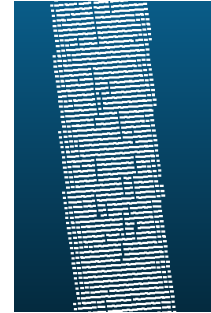


Fig. 4. Results of LiDAR point cloud data using voxel downsize filter on ForestLi

## 3. Removing outliers

이상점은 관측된 범위에 속하지 않는 아주 작은 값이나 아주 큰 값을 말한다. LiDAR 센서로 취득된 LiDAR 점군 데이터에서도 물리적인 표면에 존재하지 않는 잡음이 포함될 수 있다. 이상점은 흉고직경과 수고를 계산할 때, 계산 오류 문제를 발생시키므로 제거해야 한다. LiDAR 점군 데이터에서 이상점 제거는 인접한 점들 사이의 평균 거리가 임계 거리를 초과할 때 이상점으로 간주하여 제거한다.

먼저 인접한 점들 사이의 평균 거리를 계산하고, 평균 거리와 임계 거리를 사용하여 이상점을 식별한다. 각 점  $p_i$ 에서 가장 가까운  $k$ 개 점들  $p_1, p_2, \dots, p_k$ 을 찾고,  $p_i$ 에서  $k$ 개 점들까지의 평균 거리인  $u_i$ 를 계산한다. 모든 점에서 가장 가까운  $k$ 개의 점들까지 평균 거리  $\bar{u}$ 는 다음과 같이 계산한다.

$$\bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mu_i$$

비슷한 방법으로 모든 점에서 가장 가까운  $k$ 개 점들까지 평균 거리의 표준편차  $\sigma$ 를 다음과 같이 계산한다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\mu_i - \bar{u})^2}$$

마지막으로 이상점에 대한 임계 거리  $t$ 는 다음과 같이 계산한다. 여기에서  $m$ 은 사용자가 정하는 값이다. Fig. 4에서는  $m = 1.5$ 를 사용하였다.

$$t = \mu + m\sigma$$

점  $p_i$ 에서 가장 가까운  $k$ 개 점들까지 평균 거리  $u_i$ 가 임계 거리  $t$ 보다 크면  $p_i$ 를 이상점으로 결정하고 제거한다. Fig. 5에서 빨간색 점은 이상점을 의미한다.

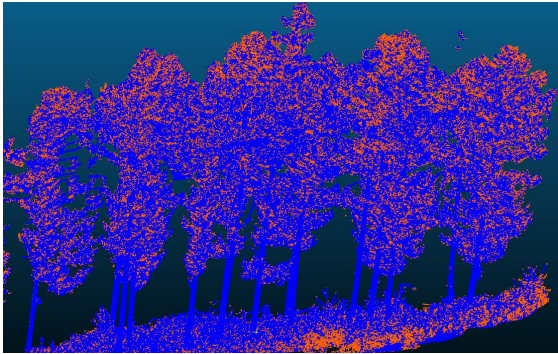
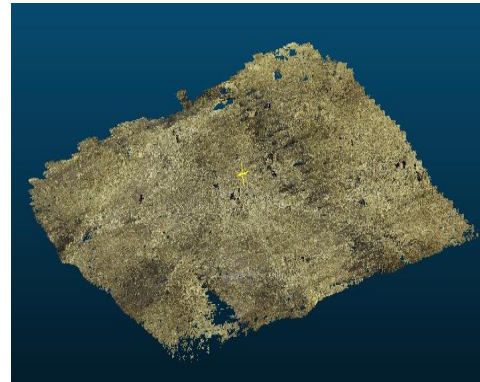


Fig. 5. Results of removal outliers using multiples of standard deviation on ForestLi

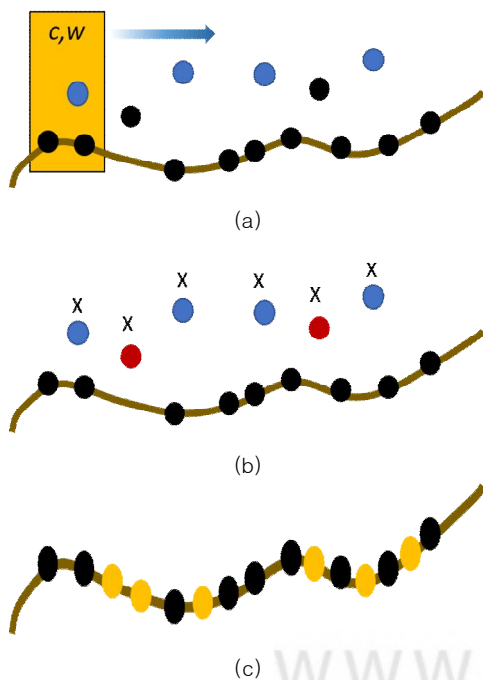


(d)

Fig. 6. Results of ground segmentation using SMRF on ForestLi (a) Extraction  $Z_{min}$  points in cell space (b) Remove misclassified  $Z_{min}$  points using open and close operation of SMRF (c) Interpolation of ground points using image in-painting algorithm (d) results of classified ground points

#### 4. Ground segmentation

ForestLi 프로그램은 형태학적 필터 SMRF(Simple morphological filter)와 이미지 인페인팅 알고리즘을 사용하여 지상점을 분할한다. 첫 번째, 사용자가 지정한 셀 크기에서 LiDAR 점군 데이터의 최저 표고점인  $Z_{min}$ 을 추출한다. 이를 1차 지상점(검은 점)으로 지칭한다. 두 번째, 적응형 윈도우와 SMRF 필터의 열기와 닫기 연산(Open & Close operation)을 이용하여 잘못 분류된 1차 지상점(빨간 점)을 제거한다. 두 번째 단계를 거쳐 추출된  $Z_{min}$  포인트를 2차 지상점이라 지칭한다. 마지막으로 이미지 인페인팅 알고리즘을 이용하여 비어 있는 영역(노란색 점)을 채운다. 보간 방법은 인접한 지상점들을 이용하여 비어 있는 영역을 가상 지상점으로 채운다. SMRF 알고리즘을 활용하여 출력된 지상점은 다음과 같다(Fig. 6).



#### 5. Ground height normalization

지표면 높이를 정규화할 때, HAG\_NN 필터(Height Above Ground Nearest Neighbor filter)를 이용한다. 임목의 수고를 정확하게 측정하기 위하여 지표면 높이 정규화가 필요하다. HAG\_NN 필터는 지상점에서 비지상점까지 거리를 계산하고 지표면 높이로 사용한다. 지표면 높이가 정규화 이전에는 지표면의 높이가 균일하지 않았으나, HAG\_NN 필터 사용 후에는 지표면 높이가 균일하다(Fig. 7). 지표면 정규화에 사용되는 다른 방법은 들로네 삼각분할 알고리즘이 존재한다. 들로네 삼각분할은 평면 위의 점들을 삼각형으로 연결하여 공간을 분할하고, 삼각형의 내각 최솟값이 최대가 되도록 하여 지표면의 높이를 산출한다. 산출된 지표면의 높이를 이용해 정규화를 수행한다. 해당 방법은 분할되는 지표면의 점들의 수가 적을수록 효율적으로 활용된다. 다만, 지상 LiDAR는 지표면 점 획득이 항공 LiDAR보다 쉽다. 따라서 들로네 삼각분할을 이용하면 인접한 점들이 다수 존재하므로 공선성에 의한 계산 오류가 발생한다. ForestLi 프로그램은 비지상점에서 최근접 이웃 검색을 이용하여 가장 가까운  $k$ 개 지상점까지 평균 높이를 이용하여 지표면 정규화를 실시하였다.



(a)



(b)

Fig. 7. Ground height normalization using HAG\_NN filter on ForestLi (a) LiDAR point cloud data before using HAG\_NN filter (b) LiDAR point cloud data after using HAG\_NN filter

## 6. Stem extraction

임목에 대한 재적, 바이오매스 측정은 흉고직경 데이터가 필요하다. 따라서 LiDAR의 LiDAR 점군 데이터에서 흉고직경을 계산할 때, 수간 부위의 추출이 중요하다. 유클리드 군집화, 지역기반 성장 군집화, 최근접 이웃 거리, 원형 맞춤 알고리즘을 사용하여 수간에 해당하는 LiDAR 점군 데이터만을 추출한다. ForestLi 프로그램은 수간을 추출하면서 하층식생을 제거한다. 하층식생은 개체목 분할, 흉고직경 계산, 수고 측정 등에서 계산 오류 문제를 포함하므로 제거되어야 한다. LiDAR 점군 데이터 처리 상용 프로그램인 LiDAR360은 하층식생 제거 기능이 없어서 사용자가 직접 하층식생에 해당하는 LiDAR 점군 데이터를 제거해야 한다.

ForestLi 프로그램의 수간 추출 과정은 다음과 같다 (Fig. 8). 첫 번째, 두 점 사이의 직선거리  $d(p_1, p_2)$ 를 계산하고, 군집에 포함되지 못한 LiDAR 점군 데이터를 군집화( $P$ )한다(Fig. 8a). 두 번째, 1차 군집을 기준으로 주성분 분석(PCA: Principal Component Analysis)을 통해서 차원을 축소하고 표면 법선 벡터를 계산한다. 표면 법선 벡터는 표면 위에 있는 한 점의 접평면에 수직인 단위 벡터이다. 다음으로 Z축을 기준으로 층을 분리하고, 분리된 층에서 군집화를 다시 적용한다. 군집 간의 거리를 이용해 재귀적으로 군집을 생성하는 지역기반 성장 알고리즘을 적용한다(Fig. 8b). 여기서  $A$ 와  $B$ 는  $P$ 에 속하는 임의의 점  $p_i$ 를 의미한다.

$$\theta(A, B) = \arccos\left(\frac{A \cdot B}{|A||B|}\right)$$

군집 간의 거리( $\overline{d_{NN}}$ )는 아래와 같이 최근접 거리 계산을 이용한다.

$$\overline{d_{NN}} = \frac{1}{N(P)} \sum_{i=1}^{N(P)} d_{NN}(p_i)$$

세 번째, RANSAC과 실린더 맞춤 알고리즘으로 군집화된 LiDAR 점군 데이터에서 하층식생과 수간을 분리한다. 먼저 RANSAC 알고리즘을 이용해 원 맞춤을 실행하고, 원 맞춤된 LiDAR 점군 데이터를 기준으로 실린더 맞춤하여 수간을 분류한다. 실린더 맞춤되지 않은 LiDAR 점군 데이터는 하층식생으로 간주하여 제거한다(Fig. 8c). 마지막으로 실린더 맞춤이 완료된 LiDAR 점군 데이터는 임의의 색을 부여하고 수간 추출 작업을 종료한다(Fig. 8d).

Fig. 8의 작업흐름도에 따라 ForestLi 프로그램의 수간 추출 결과는 다음과 같다(Fig. 9). Fig. 9(a)는 입력 LiDAR 점군 데이터이다. Fig. 9(b)는 직선거리에 의해 군집화된 LiDAR 점군 데이터를 보여준다. 같은 군집에 속하는 점들은 같은 색으로 칠한다. Fig. 9(c)는 지역 기반 성장 알고리즘 및 최근접 거리를 이용해 분류된 결과를 보여준다. Fig. 9(d)는 원형 맞춤과 실린더 맞춤 기법을 적용한 뒤, 하층식생이 제거되고 수간만이 추출된 LiDAR 점군 데이터를 보여준다.

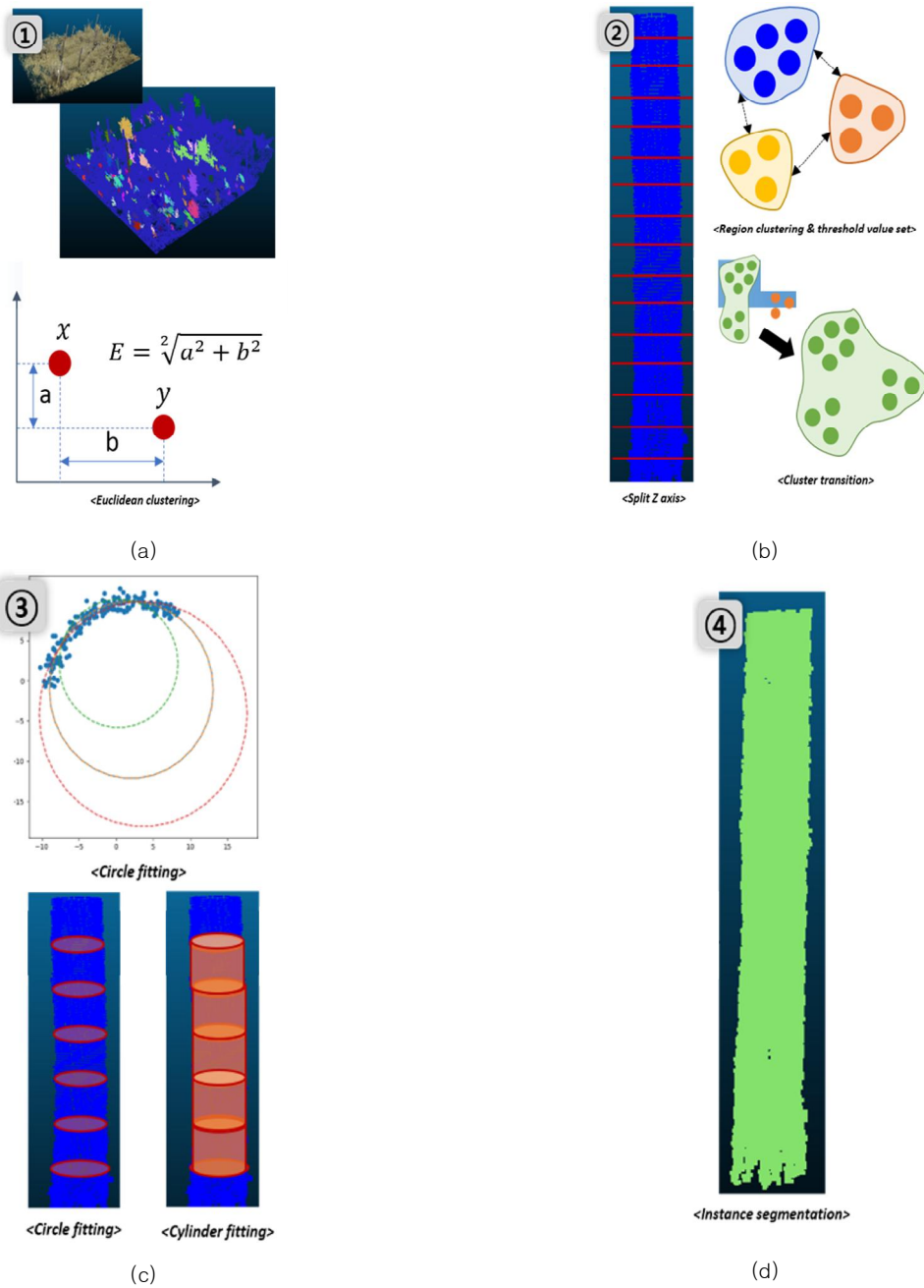


Fig. 8. Stem extraction algorithm workflow (a) LiDAR point cloud data clustering using Euclidean distance (b) Region-based clustering using PCA and KNN (c) Stem extraction using RANSAC and cylinder fitting algorithms (d) Results of stem extraction

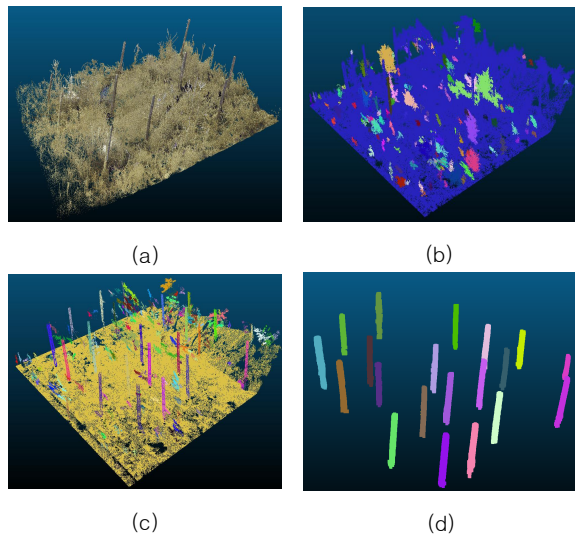


Fig. 9. Results of stem extraction on ForestLi (a) Input LiDAR point cloud data (b) Results of LiDAR point cloud data clusters using Euclidean distance (c) Results of region-based LiDAR point cloud data clusters using PCA and KNN (d) Extracted stem LiDAR point cloud data after applying RANSAC and cylinder fitting algorithms

**7. Individual tree segmentation**

해당 단계에서는 3차원 실린더 필터, 유클리드 군집화, 지역기반 성장 군집화 기법, 주성분 분석 알고리즘을 이용하여 개체목을 분할한다. 기존 연구들은 CHM(Canopy Height Model)[7]을 이용하여 개체목을 분할했다. CHM 방법은 계산 복잡도가 낮아 실행시간이 빠르다. 그러나 CHM 방법은 하향식(Top-Down)으로 LiDAR 점군 데이터의 수직 분포를 계산하여 개체목을 분할하기 때문에, 큰 나무 아래의 작은 나무(예: 관목류)는 큰 나무에 속하는 개체목으로 인식되는 문제가 있다. 이 문제를 해결하기 위해 ForestLi 프로그램은 상향식(Bottom-Up)으로 LiDAR 점군 데이터를 스캔하면서 개체목을 분할한다. 상향식으로 LiDAR 점군 데이터를 스캔하면 수간의 좁은 범위에서 수관의 넓은 범위까지 하나의 나무로 연결해야 한다.

수간이 겹쳐져 있는 경우에 주성분 분석을 이용해 수간의 기울기를 계산한다(Fig. 10 (a)). 실린더 필터의 방향은 수간 기울기를 고려하여 결정된다. 실린더 필터가 적용되는 위치는 수간 추출 단계에서 RANSAC에 의해 맞춤된 원을 기준으로 하며, 실린더 내부에 존재하는 모든 점은 개체목으로 분류된다. 실린더의 크기와 계수 값은 사용자가 입력한다(Fig. 10(b)). 실린더 내부에 포함되는 점들을 1차 개체목 점이라 부른다(Fig. 10(c)). 1차 개체목 점은 잡음(예: 인접한 개체목의 수관 LiDAR 점군 데이터)을 포함한다. 임목 밀도와 수관 밀도가 높을수록 1차 개체목 점에 잡음이 많다(Fig. 10(c)). 실린더의 크기가 개체목의 수

관 크기보다 작으면, 수관 일부가 잘려 나간다. 이것은 흉고직경과 수고 측정할 때 문제를 발생시킨다. 유클리드 군집화와 지역기반 성장 군집화 기법을 이용하여 잡음을 제거하고 잘려 나간 수관을 복구하였다. 개체목을 나눌 때, 유클리드 군집화 및 지역기반 성장 군집화 기법은 수간 추출단계와 동일하게 적용된다. 최종적으로 추출된 개체목 점은 Fig. 10(d)와 같다.

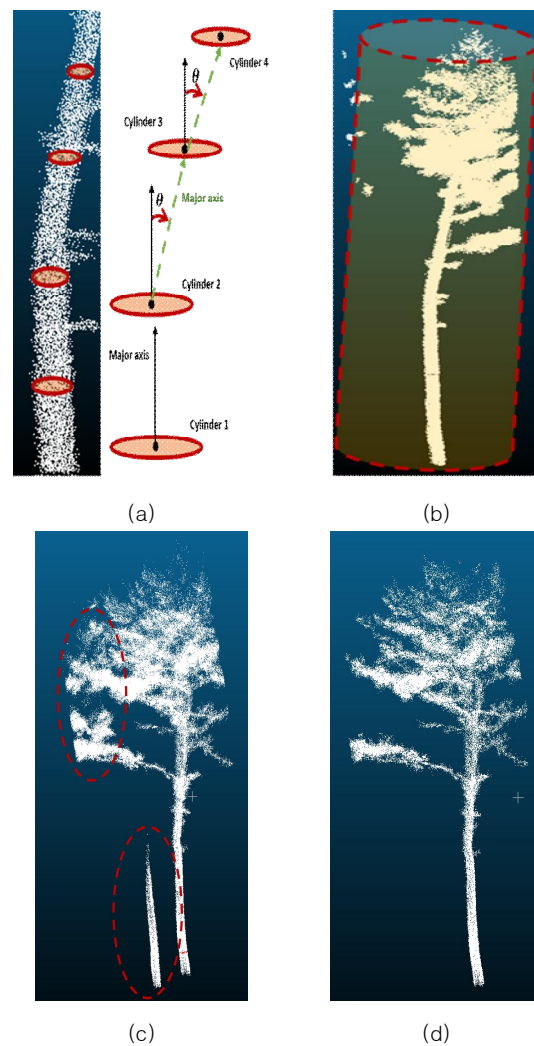


Fig. 10. Individual tree segmentation workflow (a) calculation of vector using PCA (b) 3D spatial cylinder filter (c) region-based growing cluster (d) individual tree segmentation

**8. DBH measurement**

ForestLi 프로그램은 흉고직경을 계산하기 위하여 RANSAC 알고리즘을 사용한다. RANSAC 알고리즘은 샘플 데이터를 무작위로 선택하고, 모델의 파라미터를 추정하고, 합의가 가장 많은 모델의 파라미터를 선택한다. ForestLi 프로그램에서는 RANSAC 알고리즘의 작동 순서

는 다음과 같다(Fig. 11). 첫 번째, 무작위로 3개의 점을 선택한다. 두 번째, 선택된 점들을 지나는 원의 중심과 반지름을 계산한다. 세 번째, 모델을 지지하는 점들의 개수를 계산한다. 네 번째, 두 번째와 세 번째 과정을 지정한 횟수만큼 반복하면서 최적 모델을 결정한다. Fig. 11은 흉고직경 근처(1.15m - 1.25m)에 있는 점들을 사용하여 원의 중심과 반지름을 찾는 RANSAC 알고리즘의 예시를 보여준다. 흉고직경 근처의 LiDAR 점군 데이터의 밀도가 낮으면 RANSAC 알고리즘이 원활하게 동작하지 않는다.

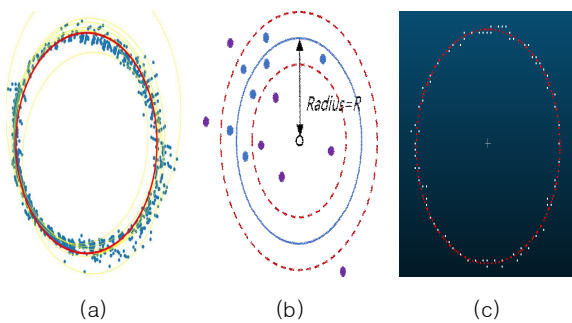


Fig. 11. Example of RANSAC algorithm (a) RANSAC algorithm model (b) Count the number of points that satisfy the RANSAC model (c) Result of RANSAC algorithm

## 9. Tree height measurement

수고를  $H = Z_{max} - Z_{min}$  라는 수식을 이용하여 계산하면, 기울어진 개체목의 수고는 측정할 수 없다. 여기서  $Z_{max}$  는 개체목에서 Z-좌표가 가장 큰 값을,  $Z_{min}$  는 Z-좌표가 가장 작은 값을 의미한다. 직선거리를 이용하여 개체목의 수고를 계산한다(Fig. 12). 지표면과 하층식생에 해당하는 점이 개체목 밑 부분에 존재하면 수고 계산에 오류가 발생한다. 이 문제를 해결하려고 ForestLi 프로그램은 지표면과 하층식생에 속하는 LiDAR 점군 데이터를 수간 추출 단계에서 제거한다.

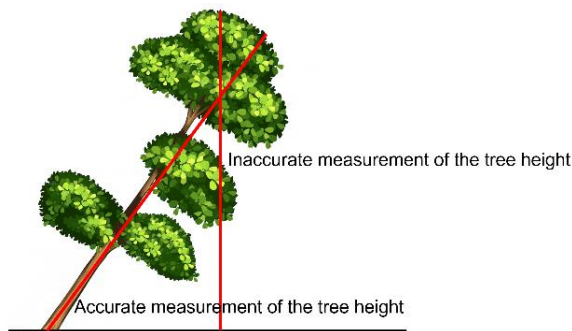


Fig. 12. Accurate measurement of the tree height

## IV. Performance Study

### 1. Experimental settings

Table 2. Detail of the LiDAR point cloud data used in the experiment

Forest type	LiDAR point cloud data count	LiDAR equipment
KRPF	$1.189 \times 10^7$	LiBackpack D50
KPF	$6.627 \times 10^8$	Leica RTC360
JLF	$5.962 \times 10^8$	Leica RTC360

디지털 산림자원조사를 위해서 백팩형 LiDAR(LiBackpack D50, GreenValley International, California) 센서와 지상 LiDAR(Leica RTC360, Leica, Wetzlar) 센서를 사용했다. 조사 대상지는 소나무림(KRPF; Korean Red Pine Forest), 잣나무림(KPF; Korean Pine Forest), 일본잎갈나무림(JLF; Japanese Larch Forest)이다. 실험에 사용된 LiDAR 점군 데이터의 개수와 측정 장비는 Table 2에 요약했다. 소나무림은 백팩형 LiDAR 센서를, 잣나무림과 일본잎갈나무림은 지상 LiDAR 센서를 사용했다. 지상 LiDAR 센서의 해상도가 백팩형 LiDAR 센서보다 해상도가 높다. 실험에 사용한 컴퓨터는 Intel i9-9900K 프로세서와 128GB 램을 가지고 있다.

Table 3. Detail of the study plot

Forest type	Plot (m <sup>2</sup> )	DBH (cm)	Tree height (m)	Count	Tree density (tree/ha <sup>1</sup> )
KRPF	900	$\frac{40.6}{31.1-61.3}$	$\frac{22.0}{20.4-23.8}$	13	144
KPF	900	$\frac{34.1}{22.4-44.5}$	$\frac{21.2}{16.4-24.2}$	18	200
JLF	900	$\frac{32.8}{23.1-40.8}$	$\frac{27.6}{25.3-30.5}$	11	122

LiDAR를 이용하여 조사한 대상지의 정보는 다음과 같다(Table 3). 조사 대상지 3곳은 모두 인공림이며, 현장 조사에서 수관이 겹쳐서 생기는 수고 측정 오차를 줄이기 위하여 임목 밀도가 낮은 지역을 선정했다. 900m<sup>2</sup> 크기의 정방형 표준지를 구획했고, 소나무림, 잣나무림, 일본잎갈나무림에서 13본, 18본, 11본을 각각 조사했다.

### 2. Experimental results

ForestLi 프로그램의 우수성을 확인하기 위하여 LiDAR 점군 데이터를 분석하는 상용 프로그램인 LiDAR360과 비교했다. 비교항목은 흉고직경, 수고, 실행시간이다. 흉고직경과 수고에 대한 정확성은 일원배치 분산분석(One-way

ANOVA)을 통해 유의성을 비교하고, 참조 값은 현장조사를 통해 얻은 측정값을 이용했다. 흉고직경을 계산하기 위하여 LiDAR360 프로그램은 LMedS 알고리즘을 사용하고, ForestLi 프로그램은 RANSAC 알고리즘을 사용한다.

일일배치 분산분석 결과는 다음과 같다(Table 4). LiDAR360과 ForestLi 프로그램에서 RANSAC과 LMedS 알고리즘을 사용하여 예측한 흉고직경에서는 유의한 차이가 없고, Tukey 사후검정에서도 같은 그룹으로 분류되었다. 즉, LiDAR360과 ForestLi는 참조값과 유사한 흉고직경 값을 추정하였으며, RANSAC 및 LMedS의 알고리즘 간에도 차이가 없는 것으로 해석된다.

Table 4. Comparison of DBH between LiDAR360 and ForestLi using one-way ANOVA

Forest type	Method	DBH (unit: cm)						
		Min/Max	Mean	Std.	F	p	Tukey	Algorithm
KRPF	A	30.2/61.1	40.2	7.8	0.06	0.95	a	RANSAC
	B	28.3/62.3	41.3	7.9			a	LMedS
	C	61.1/61.3	40.6	7.1			a	-
KRF	A	21.2/39.1	32.5	5.2	0.14	0.16	a	RANSAC
	B	27.2/42.9	33.9	5.2			a	LMedS
	C	22.4/44.5	34.1	6.1			a	-
JLF	A	21.2/42.4	31.8	5.6	0.02	0.98	a	RANSAC
	B	24.8/42.6	32.7	5.4			a	LMedS
	C	21.1/40.8	32.8	4.9			a	-

A: ForestLi, B: LiDAR360, C: Actual measurement

Table 5. Comparison of tree height between LiDAR360 and ForestLi using one-way ANOVA

Forest type	Method	Tree height (unit: m)						
		Min/Max	Mean	Std.	F	p	Tukey	Algorithm
KRPF	A	16.4/23.7	20.9	1.9	1.95	0.16	a	Euclidean distance
	B	20.0/23.8	21.6	1.2			a	Euclidean distance
	C	20.4/23.8	22.0	1.1			b	-
KRF	A	19.8/25.1	22.8	1.5	8.13	0.00***	a	Euclidean distance
	B	21.4/26.7	23.2	1.3			a	Euclidean distance
	C	16.4/24.2	21.2	2.0			b	-
JLF	A	23.6/36.3	28.2	2.7	0.79	0.46	a	Euclidean distance
	B	23.6/36.3	28.8	3.5			a	Euclidean distance
	C	25.3/30.5	27.6	1.5			b	-

A: ForestLi, B: LiDAR360, C: Actual measurement  
\*\*\*: p<0.01

수고 추정값을 비교한 결과는 다음과 같다(Table 5). 소나무림과 일본잎갈나무림에서는 LiDAR360과 ForestLi 프로그램이 계산한 값과 실측값에서 유의미한 차이가 없다. 잣나무림에서는 LiDAR360 프로그램과 ForestLi 프로그램이 계산한 값과 실측값에서 유의미한 차이가 발견되었다. 원인은 현장 조사의 실측값에서 오류 때문이다. 산림 조사자가 직경테이프와 윤척을 이용하여 수고를 측정하는데, 이 과정에서 조사자의 경험과 능력에 따라 측정 오차가 발생한다. ForestLi 프로그램의 수고 측정 정확도가 LiDAR360 프로그램보다 낮게 나왔다. ForestLi 프로그램의 수고 측정에서 오차 원인은 다음과 같다. 첫 번째, 하층식생 제거과정에서 수간 아래쪽의 LiDAR 점군 데이터가 일부 소실되어 근원부 점  $Z_{min}$ 이 유실되었다(Fig. 13(a)). 두 번째, 개체목 분할 과정에서 실린더 필터를 통과하지 못한 수관 일부가 소실되어 초두부 점  $Z_{max}$ 가 유실되었다(Fig. 13(b)). 수간 추출과 개체목 분할 과정에서 매개변수를 조정하여, 개체목의 근원부와 초두부가 소실되지 않도록 해야 한다.

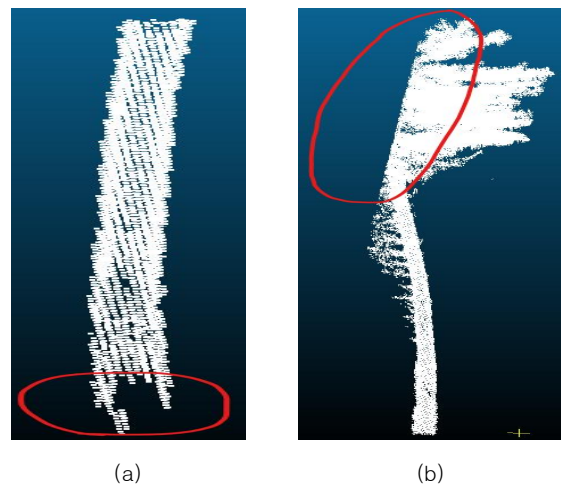


Fig. 13. An example of tree height measurement error in ForestLi program (a) Loss of  $Z_{min}$  LiDAR point cloud data during understory vegetation removal (b) Loss of  $Z_{max}$  LiDAR point cloud data by cylinder filter in tree segmentation

LiDAR360과 ForestLi 프로그램이 LiDAR 점군 데이터를 처리하는 전체 실행시간을 측정했다. Fig. 14는 전체 실행시간 비교 결과를 보여준다. LiDAR360 프로그램은 흉고 직경과 수고 측정을 위해서 사용자가 직접 개체목 분할 오류를 수정하고 하층 식생에 해당하는 LiDAR 점군 데이터를 제거한다. LiDAR360 프로그램의 실행시간은 사용자의 작업 시간을 포함한다. LiDAR360 프로그램의 실행

시간이 ForestLi 프로그램보다 최대 6.7배 이상 길다. 이것은 LiDAR360 프로그램은 하층식생 제거와 개체목 분할 오류를 사용자가 직접 수정하기 때문이다. 사용자의 작업 숙련도에 따라 전체 수행시간은 달라질 수 있다.

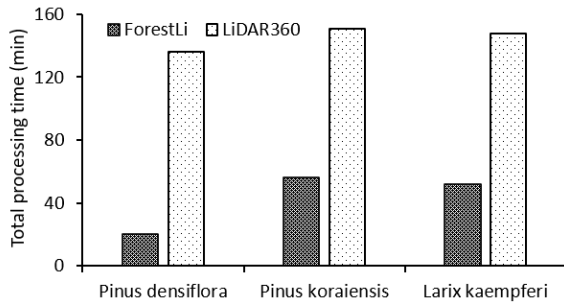


Fig. 14. Comparison of total processing time between the ForestLi and LiDAR360 systems

## V. Conclusions

본 연구는 흉고직경과 수고를 측정하는 표준지 산림자원 조사를 위해서 지상 LiDAR 스캐너가 생성한 LiDAR 점군 데이터를 처리하는 프로그램의 설계와 구현에 관한 연구를 수행하였다. 흉고직경과 수고를 측정하기 위해서 직경테이프와 윤척을 이용하는 현장조사 방법보다 경제적이며, 신속하고 정확하다. 본 연구에서 개발한 ForestLi 프로그램은 상용 LiDAR360 프로그램과 비교할 때, 하층식생을 자동으로 제거하고, 개체목을 분할한다. 지상 LiDAR 스캐너를 이용한 연구는 고품질 현장 산림자원조사와 주기적인 조사가 필요한 표준지의 장기 모니터링 산림과학 연구에 적합하다[19]. ForestLi 프로그램 개발의 후속 연구는 딥러닝 기반 LiDAR 점군 데이터 수종 분류 알고리즘을 개발하고 학습데이터를 구축하는 방안을 연구할 예정이다.

## ACKNOWLEDGEMENT

This research was funded by the National Institute of Forest Science, grant number FM0103-2021-04-2023. Hyung-Ju Cho was partially supported by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF), funded by the Ministry of Education (NRF-2020R111A3052713).

## REFERENCES

- [1] D. H. Kim, S. J. Kim, E. J. Sung, and D. G. Kim, "Development of a Smartphone Application for the Measurement of Tree Height and Diameter at Breast Height," *Journal of Korean Society of forest Science*, Vol. 110, No. 1, pp. 72-81, Mar. 2021. DOI: 10.14578/jkfs.2021.110.1.72
- [2] C. U. Ko, J. W. Lee, D. G. Kim and J. T. Kang, "The Application of Terrestrial Light Detection and Ranging to Forest Resource Inventories for Timber Yield and Carbon Sink Estimation," *Forests*, Vol. 13, No. 12, Article ID 2087, Dec. 2022. DOI: 10.3390/f13122087
- [3] K. M. Kim, Y. H. Roh, and E. S. Kim, "Comparison of Three Kinds of Methods on Estimation of Forest Carbon Stocks Distribution Using National Forest Inventory DB and Forest Type Map," *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 17, No. 4, Dec. 2014 DOI: 10.11108/kagis.2014.17.4.069
- [4] C. U. Ko, S.H. Lee, J. S. Lim, D. G. Kim, and J. T. Kang, "Comparison of Forest Inventory Methods at Plot-Level between a Backpack Personal Laser Scanning (BPLS) and Conventional Equipment in Jeju Island, South Korea," *Forests*, Vol. 12, No. 3, Article ID 308, Mar. 2021. DOI: 10.3390/f12030308
- [5] B. Andrew, D. Mathias, and C. Kim, "Extracting Individual Trees from LiDAR Point Clouds using treeseg," *Methods in Ecology and Evolution*, Vol. 10, No. 3, pp. 291-445, Mar. 2019. DOI: 10.1111/2014-210X.13121
- [6] T. J. Pingel, K. C. Clarke, and W. A. McBride, "An Improved Simple Morphological Filter for the Terrain Classification of Airborne LiDAR Data," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 77, pp. 21-30, Mar. 2013. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2021.12.002
- [7] M. Lisiewicz, A. Kaminska, B. Kraszewski, B. and K. Sterenczak, "Correcting the Results of CHM-Based Individual Tree Detection Algorithms to Improve Their Accuracy and Reliability," *Remote Sensing*, Vol. 14, No. 8, Article ID 18221, Apr. 2022. DOI: 10.3390/rs14081822
- [8] C. U. Ko, J. S. Yim, D. G. Kim, and J. T. Kang, "Analysis of Optimal Pathways for Terrestrial LiDAR Scanning for the Establishment of Digital Inventory of Forest Resources," *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 37, No. 2, Apr. 2021, pp. 245-256. DOI: 10.7780/kjrs.2021.37.2.6
- [9] L. Liao, S. Tang, J. Liao, X. Li, W. Wang, Y. Li, and R. Guo, "A Supervoxel-based Random Forest Method for Robust and Effective Airborne LiDAR Point Cloud Classification," *Remote Sensing*, Vol. 14, No. 6, Mar. 2022, Article ID 1516. DOI: 10.3390/rs14061516
- [10] R. Ferrara, S. G. Virdis, A. Ventura, T. Ghisu, P. Duce, and G. Pellizzaro, "An Automated Approach for Wood-Leaf

separation from Terrestrial LiDAR Point Clouds using the Density based Clustering algorithm DBSCAN,” *Agricultural and forest meteorology*, Vol. 262, No. 15, Nov. 2018, pp. 434-444. DOI: 10.1016/j.agrformet.2018.04.008

- [11] D. Y. Kim, Y. W. Choi, G. S. Lee, and G. S. Cho, “Extracting Individual Number and Height of Tree using Airborne LiDAR Data,” *Journal of Cadastre & Land Informtix*, Vol. 46, No. 1, Jun. 2016, pp. 87-100. DOI: 10.22640/LXSIRI.2016.46.1.87
- [12] R. Douss, and I. R. Farah, “Extraction of Individual Trees based on Canopy Height Model to Monitor the State of the Forest,” *Trees, Forests, and People*, Vol. 8, Jun. 2022, Article ID 100257. DOI: 10.1016/j.tfp.2022.100257
- [13] F. Wang, M. K. Heenkenda, and J. T. Freeburn, “Estimating Tree Diameter at Breast Height (DBH) using and iPad Pro LiDAR Sensor,” *Remote Sensing Letters*, Vol. 13, No. 6, Apr. 2022, pp. 568-578. DOI: 10.1080/2150704X.2022.2051635
- [14] D. Wang, S. M. Takoudjou, and E. Casella, “LeWoS: A Universal Leaf-Wood Classification Method to Facilitate the 3D Modeling of Large Tropical Trees using Terrestrial LiDAR,” Vol. 11, No. 3, Mar. 2020, pp. 376-389. DOI: 10.111/2041-210X.13342
- [15] Y. S. Oh, S. K. Bae, and B. G. Kim, “Development of LiDAR and SBES data Merging Program for Calculation of Water Volume,” *The Journal of GIS Association of Korea*, Vol. 13, No. 2, pp. 157-166, July 2005. UCI: G704-000574.2005.13.2.001
- [16] A. J. Chang, and H. T. Kim, “Study of Biomass Estimation in Forest by Aerial Photograph and LiDAR Data,” *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 11, No. 3, pp. 166-173, Sep. 2008. UCI: 1410-ECN-0102-2009-980-019877750
- [17] S. Krisanski, M. S. Taskhiri, S. G. Aracil, D. Herries, A. Muneri, M. B. Gurung, J. Montgomery, and P. Turner, “Forest Structural Complexity Tool-An Open Source, Fully Automated Tool for Measuring Forest Point Clouds,” *Remote Sensing*, Vol. 13, No. 22, Article ID 4677, Nov. 2021. DOI: 10.3390/rs13224677
- [18] C. S. Woo, J. S. Yoon, J. I. Shin, and K. S. Lee, “Automatic Extraction of Individual Tree Height in Mountainous Forest Using Airborne Lidar Data,” *Journal of Korean Forest Society*, Vol. 96, No. 3, pp. 251-258, Apr. 2007.
- [19] H. S. Shim. “A Study on Implementation of a Disaster Crisis Alert System based on National Disaster Management System,” *Journal of the Korea Society of Computer and Information*, Vol. 28, No. 1, pp. 55-63, Jan. 2023. DOI: 10.9728/dcs.2021.22.1.77

## Authors



Jong-Su Yim is a researcher at the forest ICT research center, National Institute of Forest Science. His current research interests include forest resource assessment and monitoring, remote sensing and digital forest spatial information.



Dong-Hyeon Kim is a Ph.D. in the department of ecology and environmental systems at Kyungpook National University. His current research interests include forestry, LiDAR, deep learning, and data pre-processing algorithms.



Chi-Ung Ko is a Ph. D researcher at Forest ICT research center of the Korea national institute of forest science. He is interested in remote sensing techniques including LiDAR. His interest also includes forest management

and forest resource assessment.



Dong-Geun Kim is an full professor at the department of ecology and environmental systems at Kyungpook National University. His current research interest include forestry, forest measurement, forest management, forest

engineering, and LiDAR program.



Hyung-Ju Cho is an associate professor at the department of software, Kyungpook National University. His current research interests include moving object databases, query processing in mobile peer-to-peer

networks, and real-time maintenance of the high-definition digital map for autonomous vehicles.