

Research Paper

CSF 알고리즘과 LiDAR 점군분석을 활용한 훼손수목량 산정 연구

윤국현 · 장윤영

광운대학교 환경공학과

A Study on the Advancement of Damaged Tree Volume Estimation Using the CSF Algorithm and LiDAR Point Cloud Analysis

Gukhyun Yun · Yoonyoung Chang

Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University

요약: 현행 환경영향평가(Environmental Impact Assessment, EIA)에서 훼손수목량 산정은 방형구법 기반 표본 조사에 주로 의존하고 있으나, 급경사지 및 식생 밀집 산림지역에서는 접근성, 안전성, 표본 대표성 측면의 한계를 가진다. 본 연구는 LiDAR 점군자료와 CSF(Cloth Simulation Filter) 알고리즘을 활용하여 개발사업 대상지의 훼손수목량을 정량적으로 산정하고, 환경영향평가 실무에 적용 가능한 분석 절차를 제시하고자 하였다.

연구 대상지는 경기도 남양주시 오남읍 양지리 527 일원의 소규모 환경영향평가 대상 산림지이며, SATLAB SL9를 이용해 고밀도 점군자료를 취득한 후 점군데이터 전처리, CSF 기반 지면분리, 비지면점 노이즈 제거, 높이 정규화, Treeiso 기반 개별 수목 분할, Circle Fitting 기반 흉고직경 산정, 2.5D Volume 및 규격식 기반 체적 산정을 수행하였다. 분석 결과, 본조사지역 최종 분석용 점군은 총 291,003,897점으로 확인되었고, CSF 적용 후 지면점은 170,879,807점(58.72%), 비지면점은 120,124,090점(41.28%)으로 분리되었다. 이후 비지면점에 대한 SOR 필터 적용 결과 105,683,270점이 유지되었으며, 높이 정규화와 0.3m 미만 저층 제거 후 Treeiso 입력 점군은 104,848,559점으로 정리되었다. Treeiso 기반 분할 결과 총 2,397개 객체가 추출되었으며, 층위 및 규격기준을 적용하여 채택 600개체, 다간수 병합의심 검토 1,565개체, 제거 232개체로 분류되었다. 채택 개체 기준 층위별 분류는 교목 207개체, 아교목 182개체, 관목 211개체였으며, 총체적은 174.0263m³로 산정되었다. 이는 LiDAR 기반 분석이 급경사지 산림지역에서 개별목 단위의 위치, 수고, 흉고직경, 체적을 동시에 정량화할 수 있음을 보여주었으며, 기존 표본 추정 방식이 제시하지 못하는 개별목 단위의 3차원 구조정보와 체적 기반 훼손량 평가가 가능하였다. 향후, 환경영향평가 실무에서 보다 객관적이고 재현성 있는 훼손수목량 산정체계 구축에 기여할 수 있다.

주요어: 환경영향평가, LiDAR, CSF 알고리즘, 훼손수목량, 흉고직경(DBH)

Abstract: In current Environmental Impact Assessment (EIA) practices, the estimation of damaged tree volume primarily relies on quadrat-based sampling methods. However, such approaches have inherent limitations in terms of accessibility, safety, and representativeness, particularly in steep slopes and densely vegetated forest areas. This study aims to quantitatively estimate damaged tree volume

using LiDAR point cloud data and the Cloth Simulation Filter (CSF) algorithm, and to propose an analytical workflow applicable to EIA practices.

The study area is a forest site subject to small-scale EIA located in Yangji-ri 527, Onam-eup, Namyangju-si, Gyeonggi-do, South Korea. High-density point cloud data were acquired using the SATLAB SL9 system. The workflow consisted of point cloud preprocessing, CSF-based ground filtering, noise removal of non-ground points using Statistical Outlier Removal (SOR), height normalization, individual tree segmentation using Treeiso, diameter at breast height (DBH) estimation via circle fitting, and volume calculation using both 2.5D volume and allometric equations.

The results show that the total number of points in the study area was 291,003,897. After CSF application, 170,879,807 points (58.72%) were classified as ground points and 120,124,090 points (41.28%) as non-ground points. Following SOR filtering, 105,683,270 points remained. After height normalization and removal of points below 0.3 m, 104,848,559 points were used for Treeiso segmentation. A total of 2,397 individual tree objects were extracted, which were further classified into 600 accepted trees, 1,565 multi-stem or merged candidates, and 232 removed objects. Among the accepted trees, 207 were classified as overstory trees, 182 as midstory trees, and 211 as understory vegetation. The total estimated tree volume was 174.0263 m³. These findings demonstrate that LiDAR-based analysis enables precise quantification of individual tree attributes, including location, height, DBH, and volume, even in complex forest environments such as steep terrains. Compared to conventional sampling-based approaches, this method provides detailed three-dimensional structural information and volume-based estimation of damaged trees. Therefore, it is expected to contribute to the development of a more objective and reproducible framework for estimating damaged tree volume in EIA practices.

Keywords: *Environmental Impact Assessment, LiDAR, Cloth Simulation Filter (CSF), Damaged Tree Volume, Diameter at Breast Height (DBH)*

I. 서론

다양한 형태의 국토개발사업 수행 시 수반되는 산림 식생의 훼손은 해당 지역의 생태적 건전성을 저해하는 주요 요인으로 작용하며, 이에 따라 환경영향평가 (Environmental Impact Assessment, 이하 EIA) 과정에서 정밀한 수목 현황 조사 및 저감방안 수립은 필수적인 절차로 간주된다. 현행 환경영향평가 실무에서 식생의 정량적 물리량을 산출하기 위해 활용되는 표준적 방법론은 방형구법(Quadrat Method)에 기반한 표본지 조사이다. 이는 조사 대상지의 식생 대표성을 확보할 수 있는 일정 면적의 방형구를 설정한 후, 목측 또는 실측을 통해 수종, 수고, 흉고직경 등을 조사하여 전체 대상지의 식생 현황을 통계적으로 추정하는 방식이다. 그러나 이러한 표본지 조사방식은 조사자의 주관적 판단에 따른 오차가 발생할 가능성이 높으며, 특히 접근

성이 제한되는 급경사지나 식생 밀도가 높은 지역에서 방형구 설치 및 전수 조사가 물리적으로 불가능하여 데이터의 해상도와 신뢰도 확보에 구조적인 한계를 지니고 있다.

이러한 기존 조사 방식의 한계를 극복하고 환경영향평가의 객관성을 제고하기 위해 능동형 원격탐사 기술인 LiDAR(Light Detection and Ranging)를 활용한 3차원 공간 정보 구축이 대안으로 제시되고 있다. LiDAR 기술은 국내외에서 산림 분야를 중심으로 다양한 선행 연구를 통해 그 유효성이 검증되어 왔다. Lee et al. (2008)는 LiDAR 데이터를 이용하여 도심 인근 산림의 수목 개체수, 수고, 울폐도, 밀도를 정량적으로 분석하였으며, watershed 알고리즘 기반 개별 수목 분리를 통해 산림 외부와 내부의 구조적 특성 차이를 규명하였다. Cho et al. (2017)는 경상북도 봉화군 혼효림을 대상으로 항공 LiDAR 자료의 고도분포 백분위수(HP)

및 층위 단위 점 개체수 백분율(HB)을 예측변수로 활용한 산림재적 추정 회귀모델을 개발하였으며, 복잡한 수직 구조를 가진 국내 혼효림에 대해 LiDAR 기반 정량 분석이 유효함을 제시하였다. Lee and Sung (2025)은 드론 LiDAR와 지상 LiDAR를 융합한 통합 점군자료를 활용하여 침엽수림의 개별 수목 수고와 흉고직경을 추출하고, 현장조사값과의 비교를 통해 수고 RMSE $\pm 0.73\text{m}$, DBH RMSE $\pm 0.37\text{cm}$ 수준의 정확도를 확인하였다. 또한 Lee et al. (2025)는 편백 및 굴참나무 임분에서 휴대형·고정형 지상 LiDAR의 흉고직경 측정 일치도(ICC)가 0.996 이상으로 나타남을 확인하여, 지상 LiDAR가 기존 인력 기반 조사를 대체할 수 있는 가능성을 제시하였다.

LiDAR 기술의 활용은 산림 분야에 국한되지 않는다. Kim (2013)은 용인 지역 산림을 대상으로 LiDAR 자료와 정사영상을 융합하여 개별 수목을 분리하고 수고 정보를 추출하는 방법론을 제시하였으며, 이를 임상도와 연계할 경우 이산화탄소 흡수량 산정에도 활용 가능성을 보고하였다. 이처럼 LiDAR는 도시 가로수 정보 추출, 변화탐지, 탄소흡수원 평가 등 다양한 분야에 걸쳐 3차원 공간정보 취득 수단으로 그 활용 범위가 빠르게 확장되고 있다.

LiDAR 데이터 분석의 핵심은 복잡한 산림 지형에서 지면(Ground)과 비지면(Non-ground) 포인트를 정확히 분리하는 지면 필터링 공정에 있으며, 이는 수고(Tree Height, H) 및 체적(Volume) 산출의 기초가 되는 고도 정규화(Height Normalization)의 정밀도를 결정짓는 핵심 요소이다. 특히 경사도가 높은 국내 산림 지형의 특성을 고려할 때, 3차원 점군(Point Cloud)에 가상의 천을 덮어 지형을 재구성하는 CSF(Cloth Simulation Filter) 알고리즘은 기존의 경사 기반 필터링 방식보다 지형 기복에 따른 오차를 효과적으로 제어할 수 있는 것으로 평가받고 있다(Zhang et al., 2016). 따라서 CSF 알고리즘 기반의 정밀 지면 분리는 방형구법이 지닌 통계적 추정치의 불확실성을 제거하고, 대상지 전체에 대한 고해상도 식생 구조 분석을 가능케 하는 기술적 토대를 제공한다.

한편 환경영향평가에서의 훼손수목량 산정은 단순 본수 중심의 평면적 접근으로 실제 식생 손실의 구조

적 규모를 충분히 반영하기 어려운 현실이다. 따라서 훼손수목량을 보다 과학적으로 평가하기 위해서는 총본수뿐 아니라 수고, 흉고직경, 수평투영면적, 체적, 공간 좌표 등 3차원 구조 정보를 함께 고려하는 분석체계가 필요하다. 이러한 관점에서 LiDAR 자료는 대상지 전역의 식생 구조를 직접 취득하고 개별 수목 단위의 물리량을 정량화할 수 있다는 점에서 환경영향평가 실무에 유효한 자료원이라 할 수 있다.

기존 훼손수목량 산정 방식의 한계는 선행 연구를 통해 실증적으로 확인된 바 있다. Park et al. (2021)는 충청남도 태안군 방풍림(곰솔 682주)을 대상으로 방형구법과 드론영상 분석법의 정확성을 전수조사 결과와 비교한 결과, 방형구법은 평균 740주로 전수조사 대비 약 58주 과대 추정된 반면 드론영상 분석법은 25주 과대 추정에 그쳐, 방형구법이 표본의 위치와 개수에 따라 추정치의 편차가 클 수밖에 없음을 실험적으로 입증하였다. 또한 드론영상 분석법은 2차원 수관 영상에 기반하므로 울폐된 임관 아래의 수목 구조 정보를 취득하는데 근본적인 한계가 있다. 이에 비해 본 연구에서 적용한 LiDAR 기반 3차원 점군 분석법은 대상지 전역을 직접 스캔하여 개별 수목 단위의 위치, 수고, 흉고직경, 체적을 동시에 정량화할 수 있으며, CSF 알고리즘을 통한 정밀 지면 분리와 Treeiso 기반 개별 수목 분할을 결합함으로써 급경사지 혼효림에서도 자동화된 전수 분석이 가능하다. 이는 표본 기반 추정의 불확실성을 근본적으로 제거하고, 객관적이며 재현 가능한 훼손수목량 정보를 제공할 수 있다는 점에서 기존 방법들과 본질적으로 차별화된다.

이에 본 연구에서는 LiDAR 기반 3차원 점군자료와 CSF 알고리즘을 활용하여 개발사업 대상지의 훼손수목량을 정량적으로 산정하고, 이를 현장조사 방형구법과 비교함으로써 환경영향평가 실무에 적용 가능한 훼손수목량 산정 방법론을 정립하는 데 있다. 이를 위해 식생 밀도가 높은 산림지역의 소규모 환경영향평가 대상사업부지를 연구 대상지로 선정하고, 현장조사와 LiDAR 측량을 병행한 뒤, 점군 전처리, 지면 분리, 높이 정규화, 개별 수목 분할, DBH 및 체적 산정, GIS 통합, 비교 검증의 절차를 단계적으로 수행하였다.

II. 연구방법

1. 연구 대상지

본 연구의 공간적 범위는 경기도 남양주시 오남읍 양지리 527 일원에 위치한 혼효림 특성의 대상지이다. QGIS(v3.34) 지형 공간 분석 도구를 활용하여 대상지의 특성을 분석한 결과, 총 면적은 25,574.15 m²(2.5574 ha)이며, 1m × 1m 격자(Grid) 기준 26,307개의 셀(Cell)로 구성되었다. 대상지의 표고(Elevation)는 최소 40m에서 최대 195m까지 분포하며, 평균 표고는 89.11m로 분석되었다.

대상지의 평균 경사도(Average Slope)는 16.32°, 25° 이상의 급경사지(Steep Slope) 및 절벽급 지형이 전체 면적의 20.2%를 차지하며 최대 경사도는 43.63°에 이른다. 특히 경사가 급하고 식생이 밀집된 산림 지역은 인력의 접근성이 현저히 떨어져 데이터의 신뢰도 확보에 한계가 있으며, 조사 인력의 안전사고 위험 또한 상

시 내포하고 있다. 따라서 본 대상지와 같이 지형적 변동성이 극심한 환경에서는 드론 및 지상 LiDAR를 활용한 비접촉식 3차원 점군 데이터 취득 기술의 도입이 필수적이다.

2. 연구프로세스

본 연구는 환경영향평가 대상지의 훼손수목량을 정량적으로 산정하기 위해 현장조사와 LiDAR 기반 3차원 점군분석을 단계적으로 연계하는 방식으로 수행되었다. 먼저 대상지의 식생 및 지형 특성을 파악하기 위해 방형구법 기반의 기초조사를 실시하였고, SATLAB SL9와 Sat-LiDAR 3D를 활용하여 본조사지역의 고밀도 점군자료를 취득하였다. 취득된 원시 점군은 CloudCompare를 이용하여 대상지 경계 기준 절취(clip)와 병합(merge)을 수행한 후, CSF 알고리즘을 적용하여 지면점과 비지면점을 분리하였다. 경사면에서 지면점의 점간 간격이 불균일한 특성을 고려하여, SOR

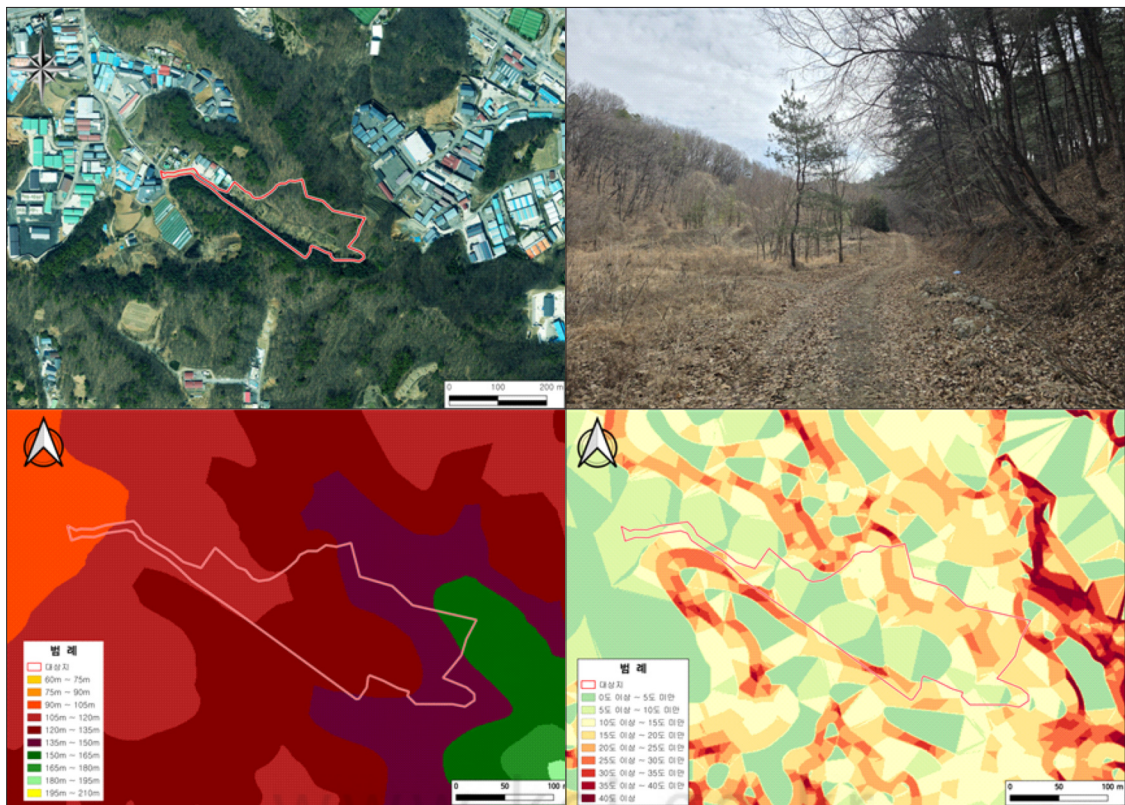


Figure 1. Spatial Environment Analysis of the Site

Table 1. Stepwise Workflow and Software Used in the Study

Step	Process	Software / Algorithm
Step 1	Site Selection and Preliminary Survey	Field Survey (Quadrat Method), QGIS
Step 2	Data Acquisition and Raw Data Collection	SATLAB SL9, Sat-LiDAR 3D
Step 3	Point Cloud Clipping, Merging, and Pre-processing	CloudCompare
Step 4	Ground Filtering and Height Normalization	CSF Algorithm, Ground Mesh, Cloud/Mesh Distance
Step 5	Off-ground Noise Removal	SOR Filter (off-ground points only)
Step 6	Individual Tree Segmentation and Structural Attribute Extraction	Treiso (v2), Circle Fitting
Step 7	Stratification and Quality Control (QC)	Python, Excel-based Statistical Processing
Step 8	Volume Estimation and GIS Integration	2.5D Volume, Allometric Equation, QGIS
Step 9	Comparative Analysis and Methodology Development	Statistical Comparative Analysis

Table 2. Technical Specifications of Hardware and Software Used for the Analysis

Category	Item	Specifications
Data Acquisition	LiDAR Sensor	SATLAB SL9
	Range Accuracy	± 2cm (at 100m)
Data Processing	Post-processing	Sat-LiDAR 3D v3.1.0
	Output Format	Standard LiDAR format (.las)
Data Analysis	Point Cloud Analysis	CloudCompare v2.14.0 beta
	GIS Analysis	QGIS (v3.34.)
	Core Algorithms	CSF (Cloth Simulation Filter), Treiso

Table 3. Specifications of the Hybrid GNSS/SLAM LiDAR System

Category	Item	Specifications
GNSS	Channels	1,408 Channels
	Signals	GPS, BDS, GLONASS, Galileo, QZSS, NavIC
	RTK Accuracy	H: 8mm + 1ppm / V: 15mm + 1ppm
LiDAR	Scan Rate	200,000 pts/sec
	Range	0.1~70m (@80% reflectivity)
	FOV	H: 360° / V: 59°
Sensors	IMU Update Rate	200Hz
	Camera	HD Camera * 4 (AR & Image measurement)
System	Weight / Size	1.68kg / Φ 134.4mm × 109.9mm
	Operating Time	Max 10h (SLAM mode: 5h)

(Statistical Outlier Removal) 필터는 전체 점군이 아닌 비지면점(off-ground points)에만 적용하였다. 이후 Ground mesh와 Cloud/Mesh distance를 이용하여 높이 정규화를 수행하고, 정규화된 점군에서 0.3m 미만 저층 점을 제거하여 Treiso 입력 자료를 구축하였다.

개별 수목 분리는 Treiso(v2)를 이용하여 수행하였으며, 최종 세그먼트(final_segs)와 원본 타일 인덱스(Original cloud index)를 조합하여 전역 개체 식별자를

구축하였다. 이후 1.2m 흉고구간 점군을 이용한 Circle Fitting 기반 DBH 산정, 수고 산정, 층위 분류, QC 기반 개체 판정, 수식 및 2.5D Volume 기반 체적 산정을 수행하였다. 최종 결과는 QGIS 기반으로 통합하여 개체 위치와 속성정보를 공간정보 형태로 정리하였으며, 기존 방형구법 결과와 함께 훼손수목량 산정 절차의 적용성을 검토하였다.

공간 정보의 정밀도와 해상도를 확보하기 위해 고성

능 LiDAR 센서가 탑재된 이동식 LiDAR 시스템(Mobile Mapping System)을 활용하여 점군 데이터를 취득하였다. 데이터 취득에 사용된 주요 장비는 SATLAB SL9으로, 고밀도 레이저 스캐닝을 통해 대상지의 지형 및 식생 구조를 3차원으로 정밀하게 기록하였다. 취득된 원시데이터(Raw Data)는 Sat-LiDAR 3D(v3.1.0) 소프트웨어를 통해 좌표 보정 및 표준 점군 포맷으로 변환되는 후처리 공정을 거쳤다. 이후 CloudCompare (v2.14.0 beta)와 QGIS (v3.34.)를 활용하여 노이즈 제거, 지면 분리, 수고 및 흉고직경 산출 등의 분석을 수행하였다. 데이터 취득 및 분석에 사용된 시스템의 세부 사양은 Table 3와 같다.

3. 측정장비 점군 취득 성능 평가

본 연구에서는 LiDAR 분석장비의 측정 특성과 수목 정보 취득 효율을 검토하기 위하여 예비 취득시험을 수행하였다. 예비시험은 사업대상지 내 평탄한 조경식재지에서 수행하였으며, 대표 수목의 형상 재현성과 촬영시간에 따른 점군 축적 특성을 확인하기 위하여 이팝나무(*Chionanthus retusus*)를 중심으로 LiDAR를 고

정 설치한 후 10초, 20초, 30초, 60초 동안 자료를 취득하였다. 본 시험은 동일 거리와 동일 시야각 조건에서 촬영시간만 달리 적용함으로써 시간 경과에 따른 점군 축적량과 수목 구조정보 확보 수준의 차이를 비교하는데 목적이 있다.

III. 결과 및 고찰

1. 측정장비 점군 취득 성능평가 결과

분석 결과, 총 점군 수는 10초 342,462점, 20초 652,747점, 30초 934,906점, 60초 1,778,700점으로 증가하여 촬영시간이 길어질수록 점군 축적량이 뚜렷하게 증가하는 경향을 보였다. 60초 촬영은 10초 대비 약 5.19배의 점군을 확보하였으며, 지면점 비율은 53.51%에서 48.61%로 점차 감소한 반면 비지면점 비율은 46.49%에서 51.39%로 증가하여 줄기와 수관 등 비지면 구조의 표현성이 향상되는 경향을 나타냈다.

정규화 높이 구조를 비교한 결과, 평균 높이는 10초 0.812m, 20초 0.875m, 30초 0.894m, 60초 0.966m로 완만하게 증가하였고, 최대 높이는 12.920~14.944m, P95

Table 4. Basic Characteristics of Acquired Point Cloud Data

Acquisition Time	Total Points	Mean Intensity	Std. Dev. of Intensity	Mean GPS Time	Std. Dev. of GPS Time
S#1_10sec	342,462	40.925	40.562	14911.3	3.311
S#2_20sec	652,747	40.903	40.568	14958.15	6.246
S#3_30sec	934,906	40.458	40.448	15009.29	9.138
S#4_60sec	1,778,700	37.112	37.457	11629.32	17.674

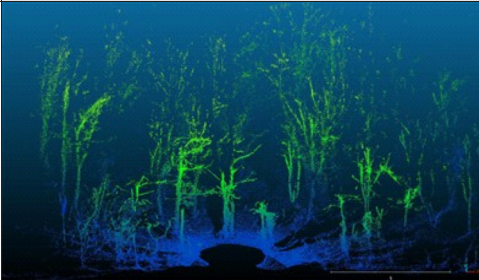
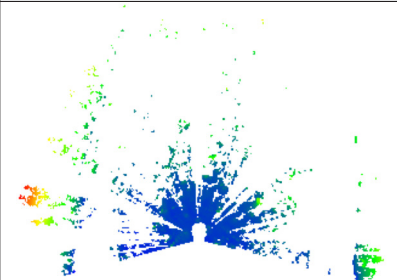
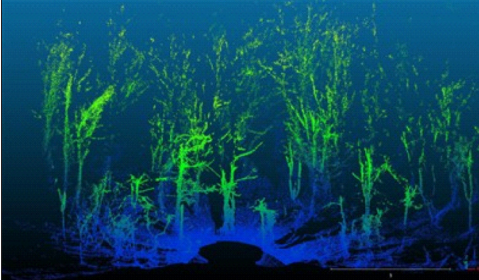
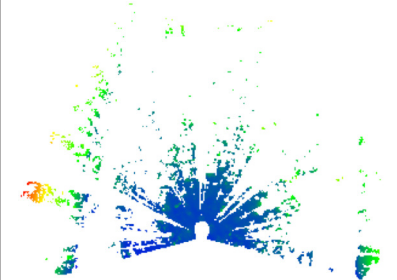
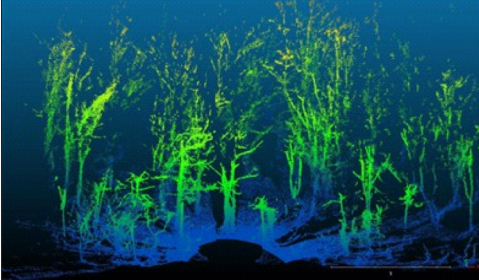
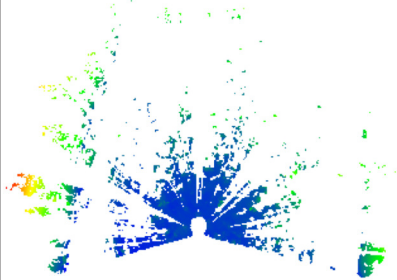

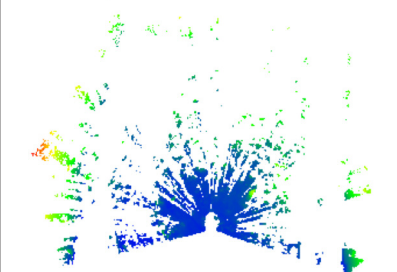
Table 5. Ground and Off-Ground Classification Results

Acquisition Time	Ground points	Off-ground points	Ground ratio (%)	Off-ground ratio (%)
S#1_10sec	183,235	159,227	53.51	46.49
S#2_20sec	341,977	310,770	52.39	47.61
S#3_30sec	479,196	455,710	51.26	48.74
S#4_60sec	864,657	914,043	48.61	51.39

Table 6. Statistical Summary of Normalized Height Distribution

Acquisition Time	Mean (m)	Std. Dev. (m)	Max (m)	P95% (m)
S#1_10sec	0.812	1.261	12.92	5.784
S#2_20sec	0.875	1.33	14.911	5.923
S#3_30sec	0.894	1.328	14.315	5.746
S#4_60sec	0.966	1.391	14.944	5.917

Table 7. Performance Evaluation Results of Point Cloud Acquisition

Acquisition	Normalized Height Classification	Ground Extraction Results
S#1		
S#2		
S#3		
S#4		

(전체 점군의 정규화 높이값 중 95퍼센트에 해당하는 높이)는 5.746~5.923m 범위로 나타났다. 이는 촬영시간이 증가함에 따라 점군 축적량과 상부 구조의 표현성은 향상되지만, 수목 구조를 대표하는 높이 지표의 변화 폭은 상대적으로 크지 않음을 의미한다. 따라서 본 예비취득시험 결과, 점군 밀집도와 자료 축적량 측면에서는 장시간 촬영이 유리하나, 수목의 형상 및 구조적 특성을 파악하기 위한 효율적 조사시간은 20~30

초 구간에서도 충분한 수준의 자료 확보가 가능한 것으로 판단된다. 특히 30초 이후에는 총 점군 수가 지속적으로 증가하였음에도 대표 구조지표의 증가폭이 제한적으로 나타나며, 조사 효율성 측면에서 20~30초 구간이 실용적인 촬영시간으로 검토될 수 있다.

2. 방형구법 현장조사 결과

본 연구에서 방형구법 비교자료는 기존 소규모 환경

Table 8. Baseline Vegetation Data via Quadrat Method

Plant Community	Strata	Species Composition	
Pitch Pine (St.1)	Canopy	P. rigida, P. densiflora, Q. serrata	<ul style="list-style-type: none"> • Dominant : Prigida (DBH:36.4cm, H:10m) • Coverage: 41%
	Understory	Q. serrata	<ul style="list-style-type: none"> • Dominant: Q. serrata (Avg. H:3m) • Coverage: 45%
	Remarks	<ul style="list-style-type: none"> • No significant species observed • Low understory diversity due to P. rigida 	
Pitch Pine - Oriental Oak (St.2)	Canopy	P. rigida, Q. acutissima	<ul style="list-style-type: none"> • Dominant: Prigida (DBH:21cm, H:14m) • Coverage: 35%
	Understory	Q. dentata	<ul style="list-style-type: none"> • Dominant: Q.dentata (Avg. H:4.5m) • Coverage: 50%
	Remarks	<ul style="list-style-type: none"> • Low rarity of distribution • No significant species observed • Low understory diversity due to P. rigida 	
Konara Oak - Pitch Pine (St.3)	Canopy	Q. serrata, P. rigida, P. × yedoensis	<ul style="list-style-type: none"> • Dominant: Q.serrata (DBH:19.3cm, H:13m) • Coverage: 78%
	Understory	Q. dentata	<ul style="list-style-type: none"> • Dominant: Q.dentata (Avg. H:3m) • Coverage: 10%
	Remarks	<ul style="list-style-type: none"> • Low rarity of distribution • Low understory diversity due to P. rigida 	



Figure 2. Baseline Vegetation Data via Quadrat Method

Table 9. Performance Comparison of Vegetation Survey Methods

Evaluation Metrics	Strata	Conventional (Quadrat)
St.1 (655m ²)	Canopy	47
	Understory	2
St.2 (888m ²)	Canopy	64
	Understory	22
St.3 (11,576m ²)	Canopy	1,065
	Understory	232
Total Sum		1,432

영향평가서에 수록된 식생조사표를 활용하였다. 방형구법은 표준지 내 수종, 수고, 흉고직경 자료를 기초로 전체 대상지의 식생량을 추정하는 표본기반 방법이며, LiDAR 분석은 대상지 전역의 점군을 이용하여 개별 객체를 직접 분리하고 구조속성을 산정하는 객체기반 방법이다. 따라서 두 방법은 자료 취득 범위와 산정 논리가 상이하므로, 결과 비교 시 단순 본수 일치 여부보다는 수고, DBH, 체적, 층위 구조, 객체 판정 방식의 차이를 중심으로 해석할 필요가 있다.

3. LiDAR 점군분석(데이터 취득 및 전처리)

본조사지역 LiDAR 촬영 결과, 최종 분석용 점군은 총 291,003,897점으로 구축되었다. 점군의 공간 범위는

X축 213.647m, Y축 137.013m, Z축 58.809m의 Box dimension을 갖는 고밀도 점군으로 확인되었다. 본 연구에서는 본조사지역 점군만을 대상으로 절취 및 병합을 수행한 후, CSF 기반 지면분리와 비지면점 후처리가 가능한 수준의 원시자료를 구축하였다. 이는 기존 원고의 중간 분석 단계 점군수보다 확대된 최종 분석 자료로서, 급경사지와 식생 밀집 구조를 포함하는 전수 분석 기반이 마련되었음을 의미한다.

4. CSF 알고리즘 적용(지면분리, 높이 정규화)

CSF 알고리즘은 급경사지 조건에 적합한 설정값(Scene: Steep slope, Slope processing: On, Cloth resolution: 0.5, Max iterations: 500, Classification threshold: 0.5)을

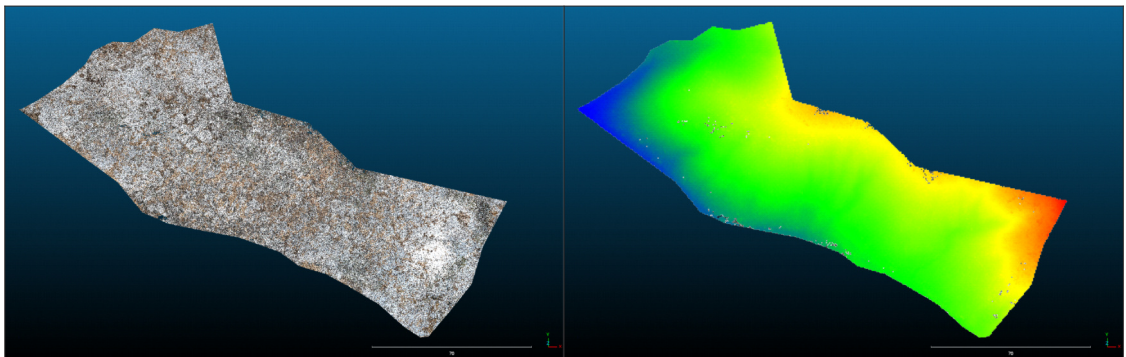


Figure 3. Clipped Boundary Point Cloud and Normalized Terrain Raster

Table 10. Specifications of the Final Point Cloud Data for Analysis

Parameter	Value
Total Number of Points	291,003,897points
Box dimension (X)	213.647m
Box dimension (Y)	137.013m
Box dimension (Z)	58.809m
Active Scalar Field	Intensity

Table 11. Results of CSF Filtering and Post-processing

Item	Value
Ground Points	170,879,807 points
Off-ground Points	120,124,090 points
Ground Ratio (%)	58.72
Off-ground Ratio (%)	41.28
Points after SOR Filtering (Off-ground)	105,683,270 points
Points for Treeiso Input	104,848,559 points

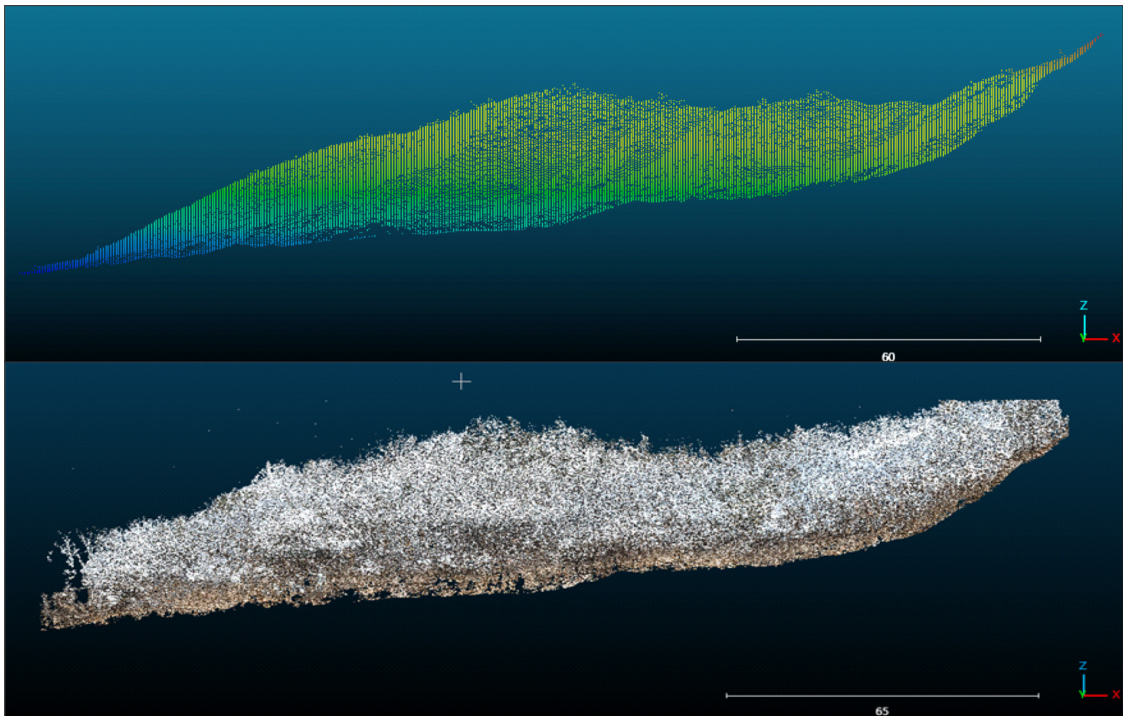


Figure 4. Ground and Off-Ground Separation Results Using the CSF Algorithm

적용하였다.

분석결과 지면점은 170,879,807점, 비지면점은 120,124,090점으로 분리되었으며, 지면점 비율은 58.72%, 비지면점 비율은 41.28%로 나타났다. 이후 비지면점에 대하여 SOR 필터를 적용한 결과 105,683,270 점이 유지되었으며, Ground mesh 기반 높이 정규화와 0.3m 미만 저층 제거를 수행한 후 Treeiso 입력 점군은 104,848,559점으로 정리되었다.

이 결과는 전체 점군에서 대상지의 수목 및 식생 구조가 비교적 높은 비중으로 포함된 점군 특성을 확인하였으며, 수목 객체 분할에 필요한 정규화 자료가 안

정적으로 확보되었음을 보여준다.

5. 개별 수목 분할 및 층위별 속성 판정 결과

정규화 점군에 대하여 Treeiso(v2)를 적용한 결과 총 2,397개의 객체가 추출되었다. 그러나 급경사지 혼효림의 구조적 특성상 일부 객체는 단간수뿐 아니라 다간수, 인접 개체의 병합, 가지 구조 혼입이 함께 나타났으므로, final_segs와 original cloud index를 기준으로 개체 식별자를 구축한 뒤 추가적인 품질검토를 수행하였다. 그 결과 채택 가능한 개체는 600개체, 다간수 또는 병합의심 검토 개체는 1,565개체, 제거 대상은 232

Table 12. Results of Individual Tree Segmentation and QC Classification

Item	Value
Parameter	Value
Total Extracted Objects	2,397
Accepted	600
Review (Multi-stem / Merged)	1,565
Removed	232

Table 13. Classification of Tree Objects by Vertical Strata

Category	Total Number of Objects	Number of Accepted Objects
Overstory Trees	1,012	207
Midstory Trees	652	182
Understory Vegetation	733	211

객체로 분류되었다. 또한 전체 객체를 높이 기반으로 층위 분류한 결과 교목 1,012개체, 아교목 652개체, 관목 733개체로 구분되었다. 채택 객체만을 기준으로 보면 교목 207개체, 아교목 182개체, 관목 211개체가 최종 체적 산정에 활용되었다.

Treiso 기반으로 분할된 객체에 대해 품질관리(QC)를 수행하여 최종 수목 객체를 선별하였다. 먼저 전체 점 수가 500점 미만이거나 수고가 2.0m 미만인 객체는 분석 대상에서 제외하였다. 흉고직경(DBH)은 정규화 높이 기준 1.15~1.25m 구간의 점군을 기본으로 산정하였으며, 해당 구간 점 수가 부족한 경우 1.10~1.30m 구간을 보정적으로 적용하였다. DBH 산정을 위한 슬라이스 점 수가 30점 미만인 경우 LOW_DBH_POINTS로 판정하였고, 원 적합 오차(RMSE)가 0.08m를 초과하는 경우 BAD_CIRCLE로 분류하였다. 또한 DBH가 3.0cm 미만 또는 150.0cm 초과인 경우 DBH_OUTLIER로 판정하였다. 최종적으로 기준을 충족한 객체는 OK로 채택하였으며, DBH가 과대하게 산정된

객체는 다간수 또는 병합의심 객체로 분리하여 별도 검토하였다.

6. 산정도 작성 및 비교 검증

본 연구에서는 DBH와 수고를 기반으로 한 규격 산정과 더불어, 정규화된 점군자료를 이용한 2.5D Volume 분석을 수행하여 대상지 및 개별 수목의 3차원 구조량을 정량화하였다. 2.5D Volume은 지면 기준면과 상부 점군 표면 간의 체적 차이를 격자 단위로 적분하는 방식으로 산정하였다.

DBH는 정규화된 점군의 흉고구간(1.15~1.25m, 필요 시 1.10~1.30m 보정)을 이용하여 Circle Fitting으로 산정하였으며, QC를 통과한 채택 객체만을 최종 통계에 반영하였다. 체적은 형수식을 기본으로 적용하되, 2.5D Volume은 점군 기반 구조 체적 검토에 보조적으로 활용하였다. 채택된 600개체의 평균 수고는 5.725m, 평균 DBH는 34.398cm로 나타났고, 총체적은 174.0263 m³로 산정되었다. 층위별 총체적은 교목 116.3407m³,

Table 14. QC Criteria for Individual Tree Objects

Criterion	Threshold (All Objects)	Decision
Number of Points	≥ 500	Accepted
Tree Height	≥ 2.0 m	Accepted
Number of Points in DBH Slice	≥ 30	Accepted
Standard Deviation of Circle Fitting Residuals	≤ 0.08 m	Accepted
DBH Range	3-150 cm	Accepted
DBH > 80 cm	Requires Further Review	Multi-stem or Merged Candidate

아교목 26.2945m³, 관목 31.3911m³로 나타났으며, 교목층이 전체 체적의 대부분을 차지하였다. 이는 훼손 수목량 평가에서 단순 본수보다 교목층 구조량이 최

종 체적에 더 큰 영향을 미친다는 점을 보여준다.

기존 방형구법은 표본지 조사 결과를 대상지 전체로 확대하는 통계적 추정 방식인 반면, LiDAR 기반 방

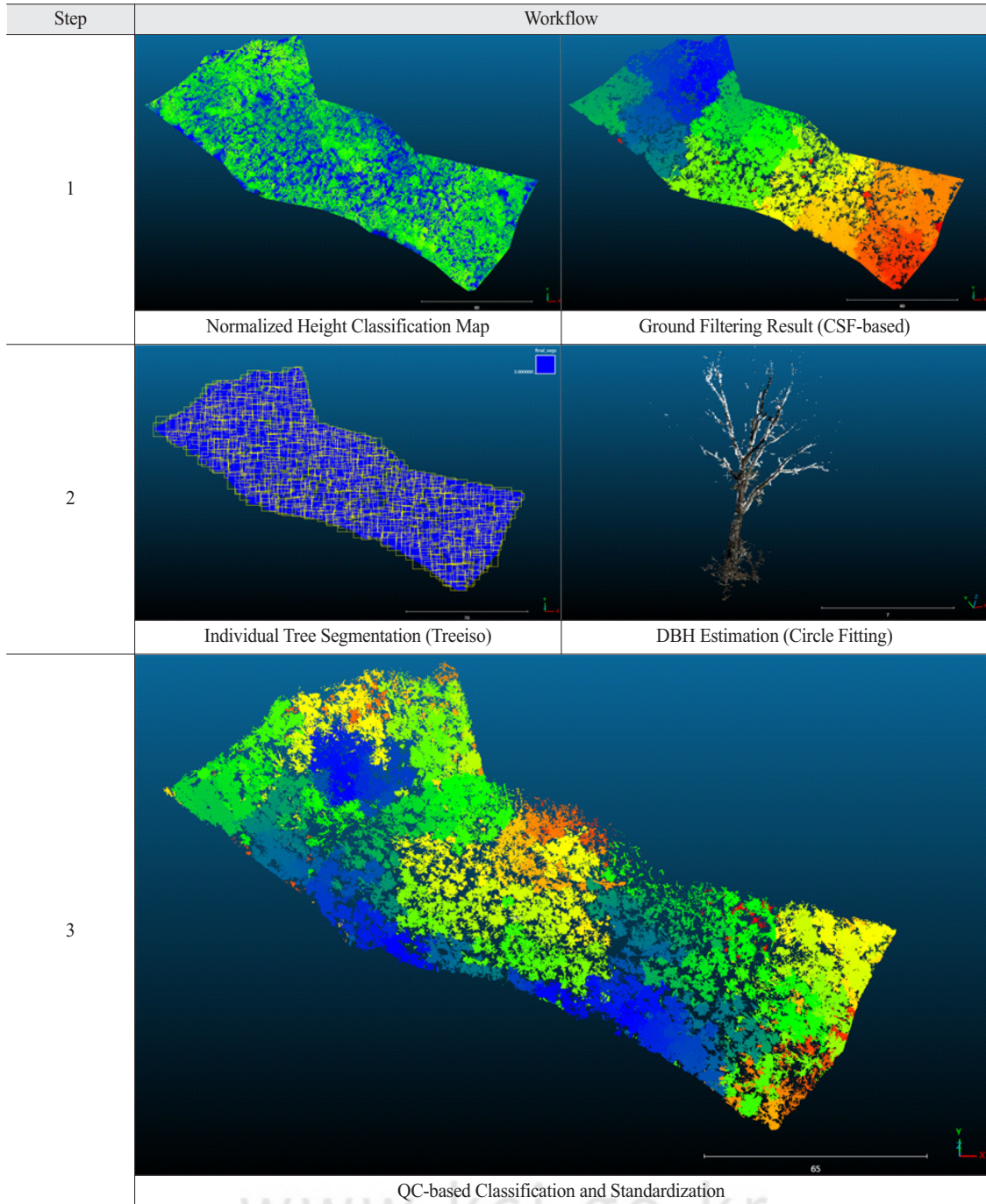


Figure 5. Workflow of Individual Tree Segmentation and Attribute Extraction

Table 15. Summary of Volume Estimates for the Accepted 600 Trees

Category	Number of Trees	Total Volume (m ³)	Mean Volume per Tree (m ³)	Mean Tree Height (m)
Overstory Trees	207	116.34	0.562	10.857
Midstory Trees	182	26.29	0.1445	3.4963
Understory Vegetation	211	31.39	0.1488	2.6129
Total	600	174.03	0.29	5.7251

법은 대상지 전역을 스캔하여 개별 객체를 직접 분리하고 구조속성을 산정하는 방식이라는 점에서 차이가 있다. 본 연구에서 LiDAR 기반 방법은 총 2,397개 객체를 추출하였고, 이 중 600개체를 구조적으로 신뢰 가능한 개체로 채택하였다. 또한 나머지 1,565개체는 다간수 또는 병합의심 객체로 분리하여 별도 검토군으로 관리함으로써, 기존 표본조사 방식이 제시하지 못했던 구조적 불확실성까지 함께 제시할 수 있었다. 이는 LiDAR 기반 훼손수목량 산정이 단순 본수 비교를 넘어, 객체의 위치, 수고, DBH, 구조 체적, 품질검토 상태를 동시에 제시할 수 있는 보다 재현성 높은 방법론임을 의미한다.

본 연구의 LiDAR 기반 DBH 산정 결과는 국내 선행 연구와의 비교를 통해 방법론적 타당성을 확인할 수 있다. Lee and Sung (2025)은 TLS와 드론 LiDAR를 융합한 방법으로 침엽수림 102그루의 DBH를 추정하고 결과 RMSE $\pm 0.37\text{cm}$, 수고 RMSE $\pm 0.73\text{m}$ 를 기록하였다. 본 연구에서 Circle Fitting 기반 DBH 산정 시 원적합 오차(RMSE) 0.08m 이하를 채택 기준으로 설정한 것은 이와 동등한 수준의 정밀도 기준을 반영한 것으로, 선행 연구의 정확도 수준과 일관된 품질관리 체계를 갖추고 있음을 의미한다. 또한 Lee et al. (2025)가 편백 임분에서 고정형 LiDAR가 수고를 최대 1.2m 과소 측정하는 경향을 보고한 바와 같이, 임분 밀도가 높은 혼효림에서는 수관 차폐로 인한 수고 측정 오차가 발생할 수 있다. 본 연구 대상지 역시 급경사 혼효림으로 수관 울폐도가 높은 조건이었음을 고려하면, Treiso 분할 결과 2,397개 추출 객체 중 600개체(25.0%)만을 최종 채택한 것은 단순한 탐지율의 문제가 아니라, 급경사 혼효림 구조에서 필연적으로 발생하는 다간수 및 수관 병합 현상을 체계적으로 분리·관리한 결과로 해석된다.

기존 방형구법 기반 추정치와의 비교 측면에서, Park et al. (2021)가 실증한 바와 같이 방형구법은 표본의 위치와 개수에 따라 추정치 편차가 크며 과대 추정의 가능성이 높다. 본 연구의 방형구법 결과(3개 표준지 기준 총 1,432본 추정)와 LiDAR 분석 결과(채택 600개체) 간의 차이는 두 방법의 자료 취득 범위와 산정 논리의 근본적 차이에서 비롯된 것으로, 단순한 수치 비교보다는 방법론이 제공하는 정보의 질적 차원에 주목할 필요가 있다. Lee et al. (2008)가 LiDAR 기반 분석이 현장 조사 대비 더 많은 수목 개체를 탐지할 수 있음을 보고한 것과 같이, 본 연구에서도 LiDAR는 대상지 전역의 개별 수목 위치, 수고, DBH, 체적, QC 상태를 공간 데이터베이스 형태로 통합 제공함으로써 향후 환경영향 평가 저감방안 수립 및 모니터링에 직접 연계 가능한 정보 체계를 구축한다는 점에서 기존 방식 대비 질적으로 차별화된다.

IV. 결론 및 제언

본 연구는 환경영향평가 실무에서 관행적으로 활용되어 온 방형구법 기반 훼손수목량 산정의 한계를 보완하기 위하여, LiDAR 기반 3차원 점군자료와 CSF 알고리즘을 연계한 훼손수목량 산정 방법론을 제시하였다. 연구 대상지는 경기도 남양주시 오남읍 양지리 527 일원의 산림지이며, 최종 분석용 점군은 291,003,897점으로 구축되었다. CSF 기반 지면분리 결과 지면점은 170,879,807점, 비지면점은 120,124,090점으로 분리되었고, 비지면점에 대한 SOR 필터와 높이 정규화, 저층 제거를 거쳐 104,848,559점의 Treiso 입력자료를 확보하였다. Treiso 분할 결과 총 2,397개 객체가 추출되었으며, QC를 통해 채택 600개체, 검토 1,565개체, 제거 232개체로 구분하였다. 채택 개체의 총체적은 174.0263

m³로 산정되었고, 그 중 교목층이 116.3407m³로 가장 큰 비중을 차지하였다.

이러한 결과는 LiDAR 기반 분석이 급경사지와 식생 밀집 산림지역에서도 개별 객체 단위의 위치, 수고, DBH, 체적을 정량화할 수 있음을 보여주며, 훼손수목량 산정의 객관성과 재현성을 크게 향상시킬 수 있음을 시사한다. 특히 본 연구는 단간수뿐 아니라 다간수와 병합의심 객체를 별도 검토크군으로 분리함으로써, 자동 분할 기반 분석에서 발생하는 구조적 불확실성을 체계적으로 제시하였다는 점에서 의의가 있다. 향후에는 다간수 분리 기준의 정교화, 수종별 형수 적용, 근원 직경 산정 기준의 추가, 2.5D Volume과 규격식 체적 간의 상관성 검증, 그리고 GIS 기반 수목속성도 작성 자동화가 보완된다면 환경영향평가 지침의 기술적 가이드라인 수립과 훼손수목량 산정의 표준화에 실질적으로 기여할 수 있을 것이다.

장비의 성능을 확인하는 예비취득시험은 촬영시간 증가에 따라 점군 축적량과 비지면 구조의 표현성이 향상됨을 확인하였다. 그러나 30초 이후에는 총 점군 수의 증가에 비해 정규화 높이 지표의 개선 폭이 상대적으로 크지 않아, 수목 구조 특성 파악을 위한 효율적 촬영시간은 20~30초 구간에서도 충분한 자료 확보가 가능한 것으로 판단되었다. 즉, 고정형 LiDAR를 활용한 수목 조사에서는 장시간 촬영이 점군 밀집도 향상에는 유리하나, 조사 목적이 수목 구조 특성의 파악에 있을 경우 20~30초 수준의 촬영으로도 실용적인 분석자료를 확보할 수 있을 것으로 보인다.

References

- 조승완, 김용구, 박주원. (2017). 항공 LiDAR 자료를 이용한 산림재적추정 모델 개발 - 봉화군 춘양면 애당리 혼효림을 대상으로. 한국지리정보학회지, 20(3), 181-194.
- Cho, S. W., Kim, Y. K., & Park, J. W. (2017). Development of forest volume estimation model using airborne LiDAR data - a case study of mixed forest in Aedang-ri, Chunyang-myeon, Bonghwa-gun. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 20(3), 181-194. <https://doi.org/10.11108/kagis.2017.20.3.181>
- 최미나, 이도훈, 장문정, 김동주, 이선미, 문윤정, 권용성. (2023). 이식수목의 현황 평가를 위한 위성영상 기반 원격탐사 식생지수 적용연구. 환경영향평가, 32(6), 415-427.
- Choi, M. N., Lee, D. H., Jang, M. J., Kim, D. J., Lee, S. M., Moon, Y. J., & Kwon, Y. S. (2023). A study on the application of satellite image-based remote sensing vegetation index for status evaluation of transplanted trees. *Journal of Environmental Impact Assessment*, 32(6), 415-427. <https://doi.org/10.14249/eia.2023.32.6.415>
- Gollob, C., Ritter, T., Wassermann, C., & Nothdurft, A. (2020). Influence of scanner position and plot size on tree detection for terrestrial laser scanning. *Remote Sensing*, 12(10), 1602. <https://doi.org/10.3390/rs12101602>
- 황인협. (2024). 도로개발사업의 훼손수목 이식 실태와 개선 연구. 석사학위논문, 가천대학교.
- Hwang, I. H. (2024). A study on the actual condition and improvement of transplanting damaged trees in road development projects. master's thesis, Gachon University, Seongnam, Korea.
- 김의명. (2013). 라이다 자료와 정사영상을 이용한 산림지역의 수목영역추출. 한국지형공간정보학회지, 21(2), 27-34.
- Kim, E. M. (2013). Extraction of the tree regions in forest areas using LIDAR data and ortho-image. *Journal of the Korean Society for Geospatial Information System*, 21(2), 27-34. <http://dx.doi.org/10.7319/kogsis.2013.21.2.027>
- 구슬, 임언택, 정용한, 석재욱, 김성삼. (2023). 산악지형 드론 라이다 데이터 점군 분리를 위한 CSF 알고리즘 적용에 관한 연구. 대한원격탐사학회지, 39(5-2), 827-835.
- Koo, S., Lim, E. T., Jung, Y. H., Suk, J. W., & Kim, S. S. (2023). Study on applicability of cloth simulation filtering algorithm for segmentation of ground

- points from drone LiDAR point clouds in mountainous areas. *Korean Journal of Remote Sensing*, 39(5-2), 827-835. <https://doi.org/10.7780/kjrs.2023.39.5.2.7>
- 이동근, 류지은, 김은영, 전성우. (2008). LiDAR 데이터를 이용한 산림구조 분석 - 오산시 남촌동의 산림을 대상으로. *환경영향평가*, 17(5), 279-288.
- Lee, D. K., Ryu, J. E., Kim, E. Y., & Jeon, S. W. (2008). Analysis of forest structure using LiDAR data - a case study of forest in Namchon-Dong, Osan. *Journal of Environmental Impact Assessment*, 17(5), 279-288.
- 이동락, 성상민. (2025). LiDAR 기반 침엽수림 수고 및 흉고직경 추정 정확도 평가. *한국산업융합학회 논문집*, 28(6), 1719-1726.
- Lee, D. R., & Sung, S. M. (2025). Evaluation of LiDAR-derived tree height and DBH estimation accuracy in coniferous forests. *Journal of the Korean Society of Industrial Convergence*, 28(6), 1719-1726. <https://doi.org/10.21289/KSIC.2025.28.6.1719>
- 이상현, 박세익, 고병준, 이충규, 정성훈, 김현. (2025). 지상 라이다 기반 입목의 흉고직경과 수고의 정확도 평가. *농업생명과학연구*, 59(2), 117-125.
- Lee, S. H., Park, S. I., Ko, B. J., Lee, C. K., Jeong, S. H., & Kim, H. (2025). Accuracy assessment of tree diameter at breast height and height using terrestrial LiDAR. *Journal of Agriculture & Life Science*, 59(2), 117-125. <https://doi.org/10.14397/jals.2025.59.2.117>
- Liang, X., Kankare, V., Hyypää, J., Wang, Y., Kukko, A., Haggrén, H., ... & Vastaranta, M. (2018). International benchmarking of terrestrial laser scanning approaches for forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 144, 137-179. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.06.021>
- 환경부. (2024). *환경영향평가 시 훼손수목 이식 가이드북*.
- Ministry of Environment. (2024). *Guidebook for Transplanting Damaged Trees in Environmental Impact Assessment*.
- 국립생태원. (2021). *훼손수목 이식에 대한 이해관계자 인식 연구*.
- National Institute of Ecology. (2021). *A study on stakeholder perception of transplanting damaged trees*.
- 박민규, 이승희, 임지영, 박종준. (2021). 환경영향평가의 훼손수목량 추정을 위한 드론영상 분석법과 방형구법의 정확성 비교. *환경영향평가*, 30(6), 415-427.
- Park, M. K., Lee, S. H., Lim, J. Y., & Park, J. J. (2021). Comparison of accuracy between drone image analysis and quadrat method for estimating the number of damaged trees in environmental impact assessment. *Journal of Environmental Impact Assessment*, 30(6), 415-427. <https://doi.org/10.14249/eia.2021.30.6.415>
- Zhang, W., Qi, J., Wan, P., Wang, H., Xie, D., Wang, X., & Yan, G. (2016). An easy-to-use airborne LIDAR data filtering method based on cloth simulation. *Remote Sensing*, 8(6), 501. <https://doi.org/10.3390/rs8060501>