



디지털 트윈 구축을 위한 도시 가로수 대상 고정-모바일 라이다 센서 간 오차분석

Inter-Sensor Error Analysis between TLS and MLS for Urban Street Trees toward Digital Twin Development

박용범* · 이건원**

Yongbum Park* · Gunwon Lee**

* Main author, Graduate Student, Dept. of Architecture, Korea Univ., South Korea (ybpark2104@korea.ac.kr)

** Corresponding author, Professor, Dept. of Architecture, Korea Univ., South Korea (upnd.cla@gmail.com)

ABSTRACT

Purpose: This study compares tree metric estimates derived from terrestrial laser scanning (TLS) and mobile laser scanning (MLS) for urban street-tree inventory, focusing on inter-sensor consistency under an identical processing workflow. **Method:** Point clouds collected along the same street segment near Bomun Station, Seoul, were acquired using Leica RTC360 (TLS) and Leica Pegasus Two: Ultimate (P2U, MLS). After exporting both datasets to LAS, we applied the same LiDAR360 workflow (ground normalization, individual tree segmentation, and attribute extraction) and matched 41 trees (N=41). We compared TreeHeight, DBH, CrownDiameter, CrownArea, and CrownVolume using mean difference (Δ =P2U-RTC360), MAE/RMSE, and paired nonparametric tests. **Result:** P2U tended to underestimate TreeHeight and crown-related metrics compared with RTC360 (Δ TreeHeight=-1.02m; Δ CrownVolume=-103.38m³), while DBH showed no significant difference (Wilcoxon p=0.6078). CrownVolume exhibited the largest discrepancy and variability (MAE=124.29m³; RMSE=183.40m³). Sensitivity analysis excluding outlier candidates confirmed that the overall pattern remained unchanged. **Conclusion:** Under the same commercial workflow, TLS and MLS results are not directly interchangeable for crown metrics without additional QC or calibration, whereas DBH appears relatively stable in this case study.

KEYWORD

도시 가로수
디지털 트윈
정지형 라이다(TLS)
이동형 라이다(MLS)

Urban Street Trees
Digital Twin
Terrestrial Laser Scanning (TLS)
Mobile Laser Scanning (MLS)
LiDAR360

ACCEPTANCE INFO

Received Jan. 9, 2026
Final revision received Jan. 28, 2026
Accepted Feb. 3, 2026

© 2026. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

도시 가로수는 보행환경 개선, 경관 형성, 열섬 완화 및 대기질 개선 등 다양한 기능을 수행하며, 이에 따라 관리기관은 가로수의 생육 상태와 구조적 안전성, 유지관리 우선순위를 합리적으로 결정하기 위한 정량 자료를 지속적으로 확보할 필요가 있다[1,2]. 이러한 관리 의사결정의 기초 자료로는 흉고직경(DBH, Diameter at Breast Height), 수고, 수관 관련 지표(수관폭, 수관면적, 수관체적, 수관하부고 등)가 대표적이며, 해당 치수 값의 정확성뿐 아니라 조사 반복 시 결과가 일관되게 산출되는 재현성 또한 중요하다. 또한 본 연구에서 다루는 가로수 치수 데이터는 도시 디지털 트윈에서 녹지 레이어의 핵심 속성으로 활용되므로, 센서·플랫폼 변화에 따른 오차 특성을 정량적으로 규명하는 것은 디지털 트윈 데이터 품질 확보 측면에서 필수적이다. 그러나 전통적인 현장 실측 방식은 조사 인력과 시간 소요가 크고, 도심 교통·보행 환경에서 안전 및 작업성 제약이 발생하기 쉬우며, 측정자 숙련도와 현장 조건에 따라 결과 변동이 커질 수 있다. 이러한 한계를 보완하기 위해 최근 3차원 LiDAR (Light Detection and Ranging) 기반 점군(point cloud) 자

료를 활용한 비접촉식 수목 구조 측정이 확대되고 있으며, 특히 도시 가로수와 같이 접근성이 제한적이고 연속 구간 조사 수요가 큰 환경에서 효율성과 정밀도를 동시에 개선할 수 있는 대안으로 주목받고 있다[3~6].

LiDAR 기반 조사에서 널리 활용되는 취득 방식은 지상 정지형 스캐닝(TLS, Terrestrial Laser Scanning)과 이동형 매핑(MLS, Mobile Laser Scanning)으로 구분할 수 있다[6~8]. TLS는 다수의 정지 관측점에서 고밀도 점군을 취득함으로써 대상의 세부 형상과 줄기 단면 정보 확보에 유리한 반면, MLS는 이동 중 연속 취득을 통해 넓은 구간을 짧은 시간에 커버할 수 있어 도시 가로수길과 같은 선형 공간에서 높은 작업 효율을 제공한다[7,9~11]. 다만 두 방식은 관측 기하(관측거리 및 입사각), 점밀도와 점 분포의 불균일성, 차폐(occlusion) 발생 양상, 정합 또는 궤적 산정 과정에서의 오차 전파 특성이 다르다[6,12~15]. 따라서 동일한 구간을 대상으로 하더라도, 플랫폼과 장비 제원 차이는 개체목 분할과 치수 산정 결과의 체계적 차이(편향) 또는 변동 폭(산포)으로 나타날 수 있다[8,13].

현장 적용 관점에서 중요한 질문은 LiDAR가 가능한가 아니라, 서로 다른 장비로 산출된 치수 값이 어느 정도까지 서로 비교 가능한가이다[13,14]. 특히 도심 가로수 조사에서는 작업 효율이 높은 MLS의 활용 수요가 증가하는 반면, TLS 대비 산출 치수의 일관성

에 대한 정량 근거가 충분하지 않으면 장비 선택, 조사 표준화, 장기 모니터링 데이터의 연속성 확보가 어려워질 수 있다[15]. 또한 많은 실무가 상용 소프트웨어 기반 워크플로우에 의존하는 만큼, 동일 처리 도구 내에서 장비가 달라질 때 결과가 어떻게 달라지는지를 사례 기반으로 정리하는 작업은 실무적 의미가 크다[16].

본 연구의 목적은 보문역 가로수길을 대상으로 Leica RTC360 (TLS)과 Leica Pegasus Two: Ultimate (P2U, MLS)로 취득한 점군 데이터를 동일 형식(LAS)으로 정리한 뒤, LiDAR360을 이용해 수목 치수 정보를 추출하고 장비 간 결과 차이를 정량 비교하는 데 있다[16]. 분석 대상은 동일 개체로 매칭된 가로수 41주이며, 비교 변수는 수고, DBH, 수관폭, 수관면적, 수관체적이다. 장비 간 차이는 평균 차이와 함께 MAE, RMSE를 중심으로 요약하여, 변수별로 차이가 작고 안정적인 항목과 차이가 크고 해석에 주의가 필요한 항목을 구분해 제시하는 것을 목표로 한다[17,18].

본 연구의 기여는 다음과 같이 정리할 수 있다. 첫째, 동일 구간에서 TLS와 MLS 장비를 적용하고 동일 처리체계(LAS-LiDAR360)를 사용하여 '장비 차이'만을 상대적으로 분리해 비교했다[8,13~16]. 둘째, 도시 가로수 인벤토리에서 핵심적으로 사용되는 치수(수고, DBH, 수관 지표)를 동시에 비교하여 항목별 차이 특성을 제시했다[8,9,13~15]. 셋째, 자동 추출 기반 자료에서 발생할 수 있는 이상치(극단값)를 점검하고, 이상치 제외 후에도 결론이 유지되는지 확인함으로써 결과의 안정성을 함께 제시했다[17~19]. 넷째, 본 연구는 단순 상관 비교가 아니라 일치도 관점에서 센서 간 결과의 교환가능성을 평가하기 위해, 평균차·오차 크기(MAE/RMSE)와 함께 한계 일치범위 및 비례편향 점점을 포함하는 분석 틀을 제시한다. 다섯째, 실무에서 센서 교체·혼용이 발생하는 상황을 고려하여, 변수별 허용오차 설정과 교차측정 표본을 활용한 보정 전략을 향후 연구 및 실무 적용 관점에서 구체화한다[20,21].

1.2. 연구 가설 및 연구 질문

장비 간 비교를 위해 다음의 연구가설을 설정한다. 첫째, P2U는 RTC360에 비해 수고를 더 작게 산출하는 경향이 나타날 것이다. 둘째, P2U는 RTC360에 비해 수관폭·수관면적·수관체적 등 수관 지표를 더 작게 산출하는 경향이 나타날 것이다. 셋째, DBH는 수고 및 수관 지표에 비해 장비 간 차이가 상대적으로 작거나 유의하지 않을 것이다. 이러한 가설은 TLS와 MLS의 관측 기하 및 차폐 특성 차이가 수관부(상부·외곽) 관측에 더 민감하게 작용할 수 있다는 점에 근거하며[13,23~26], 줄기 단면 포인트 확보 조건에서는 DBH가 상대적으로 안정적일 수 있다는 선행 논의와도 연결된다[12,22,23].

본 연구는 다음의 질문에 답하고자 한다. 첫째, 동일 처리체계에서 추출된 수고·DBH·수관 지표는 RTC360과 P2U 간에 어떤 차이를 보이는가? 둘째, 장비 간 차이는 변수별로 동일한 수준인가, 아니면 특정 변수(예: 수관체적)에서 더 크게 나타나는가? 셋째, 자동 추출 기반 자료에서 일부 개체의 극단값이 결과 해석에 영향을 주는가, 그리고 이를 제외하더라도 전체 경향이 유지되는가?

연구 범위는 보문역 가로수길의 조사 구간과 해당 구간에서 양 장비 모두로 치수 산출이 가능하고 동일 개체로 매칭된 표본으로 한정한다. 또한 본 연구는 장비 간 비교를 중심으로 하므로, 별도의 현장

실측(참값)을 통한 절대 정확도 검증은 본 범위에서 제한될 수 있으며, 결과는 "장비 간 상대적 차이" 관점에서 해석한다. 본 논문은 총 5장으로 구성된다. 2장에서는 관련 선행연구를 검토하고, 3장에서는 자료 취득 및 LiDAR360 처리·분석 절차를 제시한다. 4장에서는 변수별 비교 결과를 제시하고, 5장에서 결론과 시사점 및 향후 연구 방향을 정리한다.

2. 선행연구 검토

도시 가로수 관리는 단순한 식재 유지 차원을 넘어, 보행환경 개선과 도시 열환경 완화, 경관 및 안전 관리 등 다양한 목표를 동시에 다루는 영역이다[1,2]. 이러한 의사결정에서 수목의 구조적 특성을 나타내는 치수 정보(수고, 흉고직경(DBH), 수관폭, 수관면적, 수관체적 등)은 관리 우선순위 설정, 위험도 판단, 생육 상태 진단, 정비 이후 변화 추적의 기초 자료로 활용된다[2]. 특히 도심 가로수는 보행자·차량·시설물 등 환경이 복잡하고 조사 여건이 제한적이기 때문에, 빠르게 조사하면서도 결과가 일관되게 산출되는지(재현성)가 실무 적용에서 매우 중요한 요구조건이 된다[23~25]. 즉, 단발성 정확도뿐 아니라 동일 노선·동일 개체를 반복 조사했을 때 결과가 비교 가능한 수준으로 유지되는지가 데이터 활용 가능성을 좌우한다[26].

이러한 반복 비교 가능성은 디지털 트윈 구축·운영 관점에서 더욱 중요하다. 디지털 트윈은 동일 객체의 속성을 시간축으로 누적·갱신하는 체계이므로, 조사 주체나 센서·플랫폼이 변경되더라도 과거 시점과 현재 시점의 자료가 끊기지 않고 연속적으로 비교 가능해야 한다. 따라서 센서 교체 또는 TLS-MLS 혼용이 발생할 경우, 센서 간 편향이 실제 변화량으로 오인되지 않도록 플랫폼 간 상대 오차의 크기와 방향을 사전에 정량화하고, 품질관리 및 보정 필요성을 판단할 수 있는 근거를 제시하는 연구가 요구된다[27].

LiDAR 기반 수목 치수 산정은 점군 데이터를 이용해 수목의 3차원 구조를 정량화한다는 점에서 현장 실측의 한계를 보완할 수 있다[3~6]. 일반적으로는 노이즈 및 비수목 객체 제거, 지면 분류와 높이 정규화(ground normalization), 개체목 분할(Individual Tree Segmentation), 개체 단위 속성 추출의 순서로 처리된다[6,24]. 이 과정에서 수고는 개체 점군의 상단 높이 정보에 기반해 산정되고, DBH는 흉고 높이 부근의 줄기 단면 포인트를 이용해 산정된다[12,22,23]. 수관폭·수관면적·수관체적 같은 수관 지표는 나무 점군에서 수관의 바깥 경계를 얼마나 잘 잡아내느냐에 따라 값이 결정되며, 보통 2D 수평 투영이나 3D 형상 추정으로 계산된다. 그래서 줄기 단면으로 구하는 DBH나 최고점을 찾는 수고보다, 차폐로 인한 누락, 주변 점의 혼입, 점밀도 불균일의 영향을 더 크게 받는다. 같은 처리 과정이라도 TLS·MLS처럼 관측 각도와 시점이 달라지면 수관 경계를 포착하는 방식이 달라져 수관 지표에서 오차가 더 커질 수 있다. 수관폭·수관면적·수관체적은 개체목 수관 포인트의 공간 분포에 기반해 도출되는데, 수관 외곽 포인트의 누락이나 혼입 정도에 따라 값이 크게 달라질 수 있다[20,21]. 따라서 LiDAR 기반 치수 산정 결과는 '장비'뿐 아니라 점군의 품질(점밀도, 점 분포, 차폐 정도)과 처리 파라미터(분할 기준, 최소 포인트 수 등)에 의해 함께 영향을 받는

다는 전제가 필요하다[6,13~15].

정지형 TLS는 특정 위치에서 고밀도 점군을 취득할 수 있어, 수목의 줄기와 하부 구조를 상대적으로 안정적으로 포착하는 데 유리하다[4~6]. 특히 DBH 산정은 줄기 단면 포인트가 충분히 확보될수록 안정적으로 수행되므로, 다방향 스캔을 통해 차폐를 완화할 수 있는 TLS는 구조적 치수 산정에 강점을 가진다[12,22,23]. 반면 도시 가로 환경에서는 스테이션 설치 위치가 보행·교통 흐름과 충돌하거나, 관측점 수가 제한될 수 있으며, 이 경우 특정 방향의 차폐가 해소되지 않아 수관부 관측이 불완전해질 수 있다[12]. 또한 TLS는 조사 품질을 높이기 위해 관측점을 늘리면 현장 작업 시간이 증가하는 경향이 있어, 정밀도와 작업 효율 간 균형이 실무에서 중요한 고려 요인이 된다[6]. 이동형 MLS는 이동 중 연속 취득으로 선행 구간을 빠르게 커버할 수 있어 도시 가로수 인벤토리에 효율적이다[7,9,10]. 그러나 MLS 점군은 이동 경로와 관측거리 변화에 따라 점밀도와 점분포가 불균일해질 수 있고, 도심 캐니언 환경에서는 위성 신호 및 자세 추정 품질 변화, 동적 객체 혼입 등으로 자료 품질이 흔들릴 가능성이 있다[7,9,25]. 특히 개체목 분할은 MLS에서 중요한 난제로 다뤄지며, 인접 수목 간 간격이 좁거나 수관이 겹치는 구간에서는 과분할/미분할이 발생할 수 있다[11,15,26]. 이러한 특성은 결과적으로 수고·수관 지표에서 변동을 키울 수 있으며, 수관부(상부·외곽)의 관측 누락 또는 혼입이 발생하면 수관폭·수관면적·수관체적의 차이가 확대될 가능성이 높다[13~15,20,21]. 반면 줄기 포인트가 일정 수준 이상 확보되는 조건에서는 DBH가 비교적 안정적으로 산정될 수도 있어, 변수별로 장비/플랫폼 영향이 다르게 나타날 수 있다[12~15,22,23].

TLS와 MLS의 비교는 어느 장비가 더 낫다의 단순 결론보다는, 어떤 변수에서 어느 정도 차이가 발생하며, 그 차이를 허용할 수 있는 사용 목적은 무엇인가를 정리하는 데 의미가 있다[8,13~15]. 플랫폼 비교 연구에서는 비교 공정성을 위해 동일 대상지·동일 개체를 대상으로 하고, 가능한 한 동일한 전처리 및 추출 파이프라인을 적용하여 장비 효과를 분리하는 방식이 중요하게 다뤄진다[13,23~25]. 또한 장비 간 차이는 평균 차이(편향), 산포(변동 폭), 그리고 오차 크기 지표(MAE, RMSE 등)로 요약하는 것이 실무적으로 이해하기 쉽다[28,29]. 측정방법 비교 연구에서는 상관계수나 회귀만으로는 두 방법을 서로 바꿔 써도 되는지 판단하기 어렵다[30~32]. 상관이 높아도 한 방법이 항상 편향이 존재할 수도 있고, 나무가 클수록 두 방법의 차이가 더 벌어질 수도 있다. 따라서 센서·플랫폼 비교에서는 평균차와 MAE/RMSE 같은 오차 크기뿐만 아니라, 개체별 차이가 어느 범위 안에 들어오는지(LoA)와 측정값의 크기에 따라 편향이 달라지는지(비례편향)까지 함께 제시하는 것이 권장된다[18,33,34]. 단순히 상관이 높다는 사실만으로 두 결과가 서로 교환 가능하다고 판단하기는 어렵기 때문에, 평균적으로 어느 방향으로 더 크게/작게 나오는지와 개체별 차이 폭이 어느 정도인지를 함께 제시하는 방식이 바람직하다[18,29,30~32]. 또한 자동 추출 과정에서는 분할 오류나 혼입으로 극단값이 발생할 수 있으므로, 이상치 점검과 민감도 분석을 병행하여 결론이 특정 사례에 의해 좌우되지 않는지 확인하는 접근이 자주 활용된다[31].

도시 가로수 조사에서는 상용 소프트웨어 기반 워크플로우가 널

리 사용되며, LiDAR360은 지면 정규화, 개체목 분할, 속성 추출을 비교적 일관된 절차로 수행할 수 있는 도구로 활용된다[16]. 다만 상용 도구의 결과는 사용자가 설정하는 파라미터(예: 분할 허용거리, 최소 포인트 수, 최소 수고 등)에 따라 달라질 수 있으며, 동일 장비라도 설정이 달라지면 산출값이 달라질 수 있다. 따라서 장비 비교 연구에서 LiDAR360을 사용하는 경우에는 두 장비에 동일한 처리 체계를 적용했다는 점을 문서화하고, 주요 설정값을 표 형태로 정리하는 것이 재현성과 설득력을 높이는 데 유리하다.

또한 동일 변수(수고, DBH, 수관 지표)를 동일하게 산출하기 위해서는 데이터 형식 통일, 좌표계/단위 정합, 전처리 절차의 일관성 확보가 선행되어야 한다[16]. 종합하면, 선행연구는 TLS와 MLS가 서로 다른 관측 특성과 데이터 품질 변동 요인을 가지며, 이 차이가 개체목 분할과 치수 산정 결과에 영향을 줄 수 있음을 공통적으로 시사한다[6,13~15]. 또한 수고 및 수관 지표는 수관부 관측 누락과 차폐, 혼입에 민감하여 플랫폼 차이가 확대될 가능성이 있으며, DBH는 줄기 포인트 확보 조건에 따라 상대적으로 안정적일 수도 있다는 점은 논의되어 왔다[12~15,22,23]. 하지만 기존의 비교 연구들은 상관계수나 회귀치점 결과가 비슷한 패턴으로 변하는지를 보여주는 지표에 집중하거나, 수고와 DBH 등 일부 치수만 비교하는 경우가 많아 수관 체적과 같은 3차원 수관 지표까지 포함한 교환 가능성(일치도)을 충분히 제시하지 못했다. 또한 취득 플랫폼(TLS, MLS) 차이와 처리 소프트웨어 및 파라미터 차이가 한 연구 설계에 함께 포함되는 경우가 많아, 동일한 파이프라인 조건에서 센서나 플랫폼 자체의 효과만을 분리해 해석하기 어렵다는 한계가 있다. 이러한 한계는 디지털 트윈 기반 도시 가로수 DB를 장기간 갱신하는 과정에서 센서 교체나 혼용으로 발생할 수 있는 체계적 편향을 사전에 진단하고 관리하기 어렵게 만든다는 점에서 중요한 연구공백으로 이어진다[28].

한편 TLS를 기준으로 MLS/ALS 결과를 평가·비교하는 연구들도 보고되어 왔으나[13,23~25], 도심 가로수길에서 동일 구간을 대상으로 TLS 장비(Leica RTC360)와 MLS 장비(Leica P2U)를 적용하고, 데이터를 LAS로 통일한 뒤, LiDAR360의 동일 파이프라인으로 치수를 추출하여 개체 단위로 정량 비교하는 사례 연구는 충분히 축적되어 있다고 보기 어렵다[16]. 따라서 본 연구는 보문역 가로수길에서 두 장비로 취득한 점군을 동일 처리 체계에서 분석하고, 수고·DBH·수관 지표에 대해 장비 간 차이를 평균차와 MAE/RMSE 뿐 아니라 LoA 및 비례편향 점검까지 포함해 제시함으로써, 도시 가로수 조사에서 장비 선택과 결과 해석을 위한 기초 근거를 제공하고자 한다. 또한 본 연구 결과는 향후 TLS-MLS 센서 간 값을 맞추기 위한 보정식을 만들거나, 데이터 품질관리 기준을 설정하는 등 디지털 트윈 구축·운영 단계의 후속 연구를 설계하는 데 기초 자료로 활용될 수 있다.

3. 연구방법

본 연구는 보문역 가로수길을 대상으로 Leica RTC360 (정지형 TLS)과 Leica Pegasus Two: Ultimate (P2U, 이동형 MLS)로 취득한 점군을 이용하여, 동일한 처리 체계에서 산출된 수목 치수의 장비 간 차이를 비교하는 사례 연구로 설계하였다. 본 연구의 비교에서 핵심

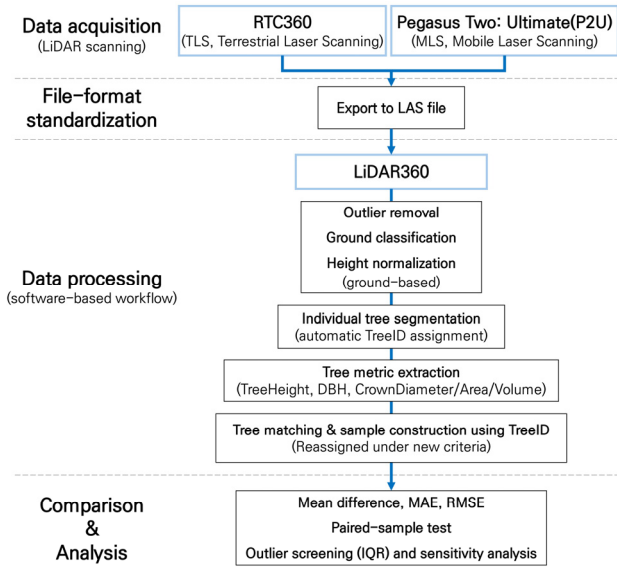


Fig. 1. Workflow diagram

은 두 장비가 만든 결과가 왜 다른가를 장비 효과로 최대한 분리해 해석할 수 있도록 분석 파이프라인을 통제하는 데 있다. 따라서 본 연구는 동일 구간, 동일 데이터 형식(LAS), 동일 분석 도구(LiDAR360), 동일 변수 정의(수고·DBH·수관 지표), 동일한 전처리 및 분할 원칙을 적용하고, 달라지는 요인은 장비 자체로 제한하는 방식으로 연구를 구성하였다.

연구의 전체 절차는 다음의 단계로 구성된다. 첫째, 동일 대상 구간에서 RTC360과 P2U로 점군 데이터를 취득한다. 둘째, 각 장비의 원시 데이터를 LAS 형식으로 변환하고 좌표·단위 체계를 일치시킨다. 셋째, LiDAR360에서 전처리(노이즈 제거, 지면 분리, 높이 정규화)를 수행한 뒤 개체목 분할을 통해 개별 가로수를 식별한다. 넷째, 개체목 단위로 수고, 흉고직경(DBH), 수관폭, 수관면적, 수관체적을 추출하여 표 형태 데이터로 정리한다. 다섯째, 두 장비에서 산출된 개체목을 동일 개체 기준으로 매칭하고, 매칭된 표본을 대상으로 장비 간 차이를 통계적으로 비교한다.

연구 대상지는 서울 보문역 인근의 가로수 식재 구간(보문역 가로수길)으로, 보행 및 차량 통행이 혼재하는 도심 가로 환경을 대표하는 사례로 선정하였다. 해당 구간은 가로수 개체들이 일정 간격으로 배치되어 있어 개체목 단위 비교가 가능하며, 동시에 도심 환경 특성상 건축물·가로 시설물·동적 객체(보행자, 차량)에 의한 차폐가 발생할 수 있어 TLS와 MLS의 관측 특성이 결과에 반영되는지를 확인하기에 적합하다. 본 연구는 특정 수준의 생태적 특성 비교가 아니라, 동일 구간·동일 개체를 기준으로 측정 플랫폼 차이가 치수 산정 결과에 미치는 영향을 확인하는 데 초점을 둔다.

RTC360은 정지형 지상 라이다(TLS)로서 다수의 정지 관측점에서 점군을 취득하는 방식이며, P2U는 이동 중 연속 취득을 수행하는 이동형 라이다(MLS)이다. TLS는 관측점 배치와 중복 관측을 통해 특정 객체의 형상을 상대적으로 정밀하게 포착할 수 있는 반면, MLS는 선형 구간을 빠르게 커버할 수 있으나 이동 경로·관측거리 변화에 따라 점밀도와 점 분포가 달라질 수 있다. 이러한 취득 방식

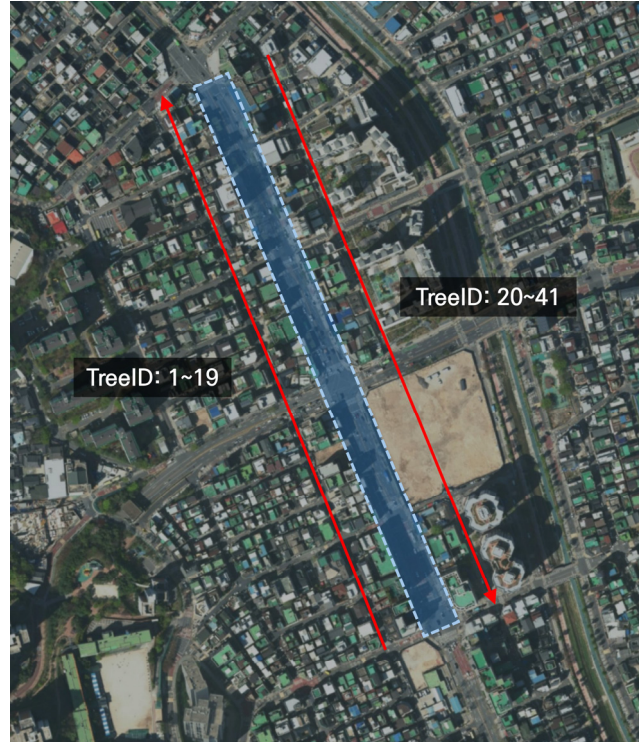


Fig. 2. Site location map with TreeID

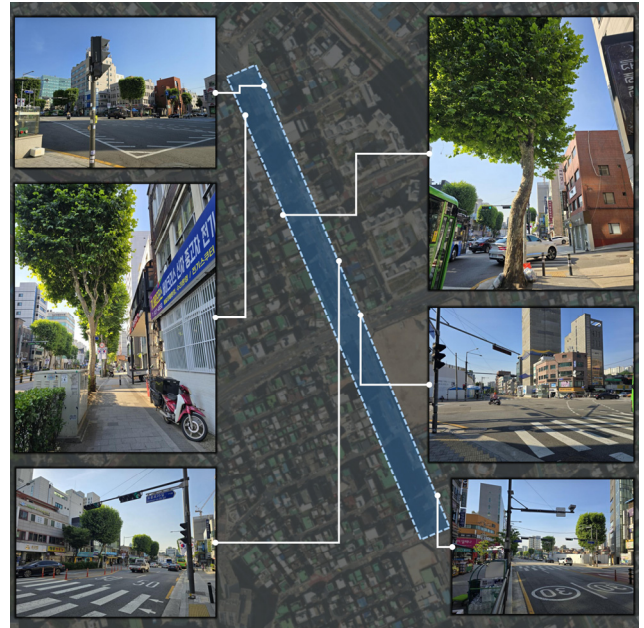


Fig. 3. Overview of the site

차이는 수목의 줄기와 수관에서 관측 불완전성(차폐, 포인트 부족, 혼입) 양상을 달리 만들 수 있으므로, 본 연구에서는 장비별 산출 치수 차이를 해석할 때 해당 특성을 함께 고려하였다.

본 연구는 두 장비 모두 동일 대상 구간을 스캔하였으며, 취득된 점군은 후속 분석을 위해 동일 형식(LAS)으로 변환하였다. 변환 과정에서 좌표계/단위 일치, 불필요한 객체(지면 이외의 명백한 노이즈나 동적 객체 등) 처리, 그리고 분석 가능 수준의 데이터 품질 확보를 전제 조건으로 설정하였다. 구체적인 스캔 날짜, 스테이션 수(또

Table 1. Specific values of data acquisition conditions

Platform	Condition	Specification
RTC360	Scan date	12 June 2024
	Station spacing/layout	approx. 10m
	Scan rate (points/s)	2,000,000pts/s
	Laser class	Class 1
	Field of view (FOV)	360° (horizontal)/ 300° (vertical)
	Range (min~max)	0.5~130m
	Navigation/ registration sensors	VIS, IMU, Altimeter/Compass/GNSS
Pegasus Two: Ultimate (P2U)	Scan date	11 June 2024
	Driving speed	30~50km/h
	Scan rate (points/s)	1,000,000pts/s
	Laser class	Class 1
	Field of view (FOV)	N/A (horizontal)/ 360° (vertical)
	Range (min~max)	0.3~119m
Navigation/registration sensors	GNSS/IMU/SPAN	
Common	Season (leaf-off / leaf-on)	Leaf-on
	Traffic/pedestrian congestion level	Moderate

는 주행 경로/패스, 정합 방식 등 취득 조건은 Table 1.에 정리하여 제시하였다.

두 장비에서 취득한 점군은 제조사 후처리 소프트웨어 또는 표준 변환 절차를 통해 LAS로 내보낸 뒤, LiDAR360에서 동일한 전처리 절차를 적용하였다. 전처리의 목적은 이상치/노이즈 제거, 지면 분류 및 높이 정규화, 개체목 분할에 유리한 점군 상태를 만드는 것이다. 이를 위해 LiDAR360에서 일반적으로 사용되는 노이즈 제거 (Remove Outliers), 지면 분류(Classify Ground), 대표 지면 추출 및 정규화(Normalize) 단계를 수행하였다. 장비 비교의 공정성을 위해 전처리 단계는 두 장비 데이터에 동일한 순서와 동일한 기준으로 적용하였다. 전처리 파라미터(노이즈 제거 임계값, 지면 분류 설정, 정규화 방식 등)는 재현성을 위해 Table 2.에 제시하였다.

전처리된 점군을 입력으로 LiDAR360의 개체목 분할 기능을 사용하여 개별 가로수를 분리하였다. 개체목 분할은 인접 수목 간 간격, 수관 겹침, 줄기 포인트 확보 수준에 따라 과분할/미분할이 발생할 수 있으므로, 분할 결과를 확인하여 개체 단위 속성 추출이 가능한 수준인지 점검하였다. 이후 LiDAR360에서 개체목별 치수를 산정하여 표 형태로 내보냈으며, 본 연구에서 비교한 치수 변수는 수고(TreeHeight), 흉고직경(DBH), 수관폭(CrownDiameter), 수관면적(CrownArea), 수관체적(CrownVolume)이다. 수고는 개체 점군의 상당 높이 정보를 기반으로 산정되며, DBH는 흉고 높이(통상 1.25m)를 기준으로 줄기 단면 포인트를 이용해 산정되는 값이다. 수관폭·수관면적·수관체적은 수관 포인트의 공간 분포를 기반으로 계산되며, 수관 외곽 포인트의 누락 또는 혼입이 있을 경우 값이 변동될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 동일 도구·동일 설정에서 산출된 결과라는 전제 하에 장비 간 값을 비교하고, 변수별로 어떤 항목에서

Table 2. LiDAR360 Parameter settings for ground normalization and individual tree segmentation

Step	Parameter	Value	Unit
Remove outliers	Neighbor points	10	-
	Multiple of std deviation	5	-
Classify ground points	From class	Never classified	-
	To-class	2-ground	-
	Max building size	20	m
	Max terrain angle	88	"
	Iteration angle	8	"
	Iteration distance	1.4	m
	Stop triangulation when edge length<	1	m
Extract median ground points	From class	Never classified	-
	From ground class to	1-unclassified	-
	Min height	0.02	m
	Max height	0.3	m
	Grid size	0.5	m
Display TIN model by class	Multiple of std deviation	0.3	-
	Display by height	Spectrum color ramp	-
Point cloud segmentation	Normalize by ground points	Add The Original Z Value As An Additional Attribute	Check
	From class	0,1,2	-
	Cluster tolerance	0.2	m
	Minimum DBH	1.2	m
	Height above ground	0.3	m
	Trunk height	1.6	m
	Minimum cluster size	500	-
	Maximum DBH	1.25	m
	Minimum tree height	2	m
	Optimize color rendering for individual tree segmentation result	Check	-
	Open as	As table	-
	Data type	Points	-
	X	TreeLocationX	-
	Y	TreeLocationY	-
	Z	TreeHeight	-
Show lable	TreeID	-	

차이가 체계적으로 나타나는지를 확인한다.

범위는 보문역 가로수길 중 일부 구간으로 한정하며, 분석 단위는 개체목 단위 비교를 기본으로 한다. 두 장비 점군은 LAS 형식으로 변환하여 데이터 형식을 통일하고, 장비 간 공정한 비교를 위해 전처리, 분할, 치수 산정 과정에서 가능한 한 동일한 규칙과 파라미터를 적용하는 것을 원칙으로 한다. 또한 본 연구는 주관적 판단에 따른 표본 제외를 방지하기 위해, 분석 대상(개체목)의 포함·제외(QC) 규칙을 사전에 정량적으로 고정하였다. 포함 기준은 (1) TLS (RTC360)와 MLS (P2U) 모두에서 동일 개체목 1:1 매칭이 성립할 것, (2) LiDAR360에서 5개 치수 변수(수고, DBH, 수관폭, 수관면적, 수관체적)가 모두 산출되어 누락값이 없을 것, (3) 각 변수값이 0 또는 음수 등 비정상 값이 아닐 것으로 정의하였다. 본 데이터셋(41주)은 위 기준을 모두 충족하여 최종 분석에 포함하였다(N=41).

이상치(outlier) 및 표본 민감도(sensitivity) 점검은 별도의 사전 정의된 규칙으로 수행하였다. 구체적으로 변수별 장비 간 차이값($\Delta = P2U - RTC360$)에 대해 IQR ($1.5 \times IQR$) 규칙으로 이상치 후보를 식별하고, 이상치 후보 개체(TreeID)는 표로 공개한 뒤, 해당 개체를 제외한 민감도 분석 결과가 본 결론을 바꾸는지 추가 확인하였다.

장비 간 차이는 각 변수에 대해 개체별로 P2U 산출값과 RTC360 산출값의 차이를 계산하여 평가하였다. 우선 평균 차이를 통해 장비 간 경향(한쪽이 체계적으로 더 크게 또는 더 작게 산출되는지)을 확인하였다. 또한 오차 크기를 직관적으로 제시하기 위해 평균절대오차(MAE)와 제곱근평균제곱오차(RMSE)를 산출하였다. MAE는 장비 간 차이의 절대값 평균으로 평균적으로 어느 정도 차이가 나는지를 보여주며, RMSE는 큰 차이에 더 민감한 지표로 극단 차이가 포함될 때 변동 폭이 얼마나 커지는지를 함께 보여주는 데 유용하다. 장비 간 차이의 유의성 점검은 동일 개체에서 두 장비 값이 한 쌍을 이루는 자료 구조를 고려하여 대응표본 방식으로 수행하였다. 차이값의 분포가 정규성 가정을 만족하는 경우에는 대응표본 t-검정을 적용하고, 정규성이 만족되지 않는 경우에는 비모수 검정(예: Wilcoxon 부호순위 검정)을 적용하는 것을 원칙으로 한다. 유의수준은 0.05로 설정하였다. 차이값($\Delta = P2U - RTC360$)의 정규성은 Shapiro-Wilk 검정으로 점검하였다. 본 자료에서는 5개 변수 모두에서 차이값의 정규성이 만족되지 않아(Shapiro-Wilk $p < 0.05$), 장비 간 차이 검정은 비모수 대응표본 검정인 Wilcoxon 부호순위 검정(양측)을 적용하였다. 또한 5개 변수를 동시에 검정함에 따른 다중비교 문제를 고려하여 Holm 보정 p-value를 함께 보고하였다. 효과크기는 Wilcoxon 결과에 적합한 rank-biserial correlation을 사용하여 보고하였으며, 평균차의 불확실성은 부트스트랩 기반 95% 신뢰구간으로 함께 제시하였다. 본 연구는 절대 참값(현장 실측)을 전제로 한 정확도 검증이 아니라, 동일 처리체계에서 산출된 장비 간 상대적 차이를 평가하는 데 초점을 둔다.

장비 간 교환가능성을 정량적으로 제시하기 위해 Bland-Altman 방법을 추가 적용하였다[29]. 각 변수에 대해 차이값을 $\Delta = (P2U - RTC360)$ 으로 정의하고, 평균차와 표준편차를 이용해 95% 한계치범위(LoA)를 산출하였다. LoA는 개체 단위에서 두 센서 결과가 어느 범위 내에서 달라질 수 있는지를 직접적으로 보여주는 지표로, 단순 상관계수만으로는 판단하기 어려운 교환가능성을 보완한다. 또한 측정 규모가 커질수록 차이값이 체계적으로 변하는 비례편향 여부를 점검하기 위해, 평균값 $M = (P2U + RTC360) / 2$ 에 대해 Δ 를 종속변수로 하는 선형회귀를 수행하였다.

자동 추출 기반 데이터의 특성상 일부 개체에서 분할 오류 또는 포인트 혼입 등으로 극단적인 차이값이 발생할 수 있으므로, 이상치 후보(outlier candidate) 식별 규칙을 사전에 정의하였다. 변수별 차이값(Δ)에 대해 IQR 규칙($\Delta < Q1 - 1.5 \times IQR$ 또는 $\Delta > Q3 + 1.5 \times IQR$)을 적용하여 이상치 후보를 식별하였고, 이상치 후보의 TreeID 및 개체값(Q1, Q3, IQR, 하한/상한)을 표로 공개하였다. 또한 ‘이상치 포함’ 결과(N=41)와 더불어, 변수별 이상치 후보의 합집합(TreeID 1, 5, 26, 28, 29)을 제외한 민감도 분석(N=36)을 수행하여 주요 결론의 안정성을 확인하였다.

4. 분석결과

본 장에서는 Leica RTC360 (TLS)과 Leica Pegasus Two: Ultimate (P2U, MLS)로 취득한 점군을 LAS로 통일한 뒤, LiDAR360에서 동일한 방식으로 추출한 수목 치수 결과를 비교하였다. 분석은 두 장비에서 동일 개체로 매칭된 41주(N=41)를 대상으로 수행되었으며, 비교 변수는 수고(TreeHeight), 흉고직경(DBH), 수관폭(CrownDiameter), 수관면적(CrownArea), 수관체적(CrownVolume)이다. 장비 간 차이는 개체별로 P2U 값과 RTC360 값의 차이를 기준으로 요약하였고, 결과는 평균 수준의 차이(장비 간 경향)와 함께 평균절대오차(MAE), 제곱근평균제곱오차(RMSE)를 중심으로 제시하였다.

먼저 장비별 평균을 비교하면, 수고는 P2U 평균 10.63m, RTC360 평균 11.65m로 P2U가 더 낮게 산출되는 경향이 확인되었다. DBH는 P2U 평균 0.336m, RTC360 평균 0.336m로 두 장비가 평균 수준에서 거의 동일했다. 수관 지표의 경우 수관폭은 P2U 평균 7.21m, RTC360 평균 7.81m, 수관면적은 P2U 평균 46.79m², RTC360 평균 54.34m², 수관체적은 P2U 평균 276.82m³, RTC360 평균 380.20m³로 나타나, 수관 관련 지표 전반에서 P2U가 더 작게 산출되는 경향이 관찰되었다. 이러한 평균 비교는 장비 간 전반적 방향성을 보여주지만, 장비 비교의 핵심은 동일 개체에서 두 장비 값이 어느 정도 차이가 나는지에 있으므로, 다음 절에서는 개체별 차이와 오차 지표를 중심으로 결과를 정리한다. 특히 변수별로 평균 차이의 방향(편향)과 오차 크기(MAE/RMSE)를 함께 제시하여, 어떤 항목에서 장비 혼용 시 주의가 필요한지 판단할 수 있도록 구성하였다.

수고(TreeHeight)는 P2U가 RTC360보다 평균적으로 약 1.02m 낮게 산출되었다. 개체별로는 41주 중 39주에서 P2U 수고가 더 작게 나타났으며, 수고의 오차 크기는 MAE 1.03m, RMSE 1.69m로 요약된다. 대응표본 비교 결과 수고의 장비 간 차이는 통계적으로 유의하였다. DBH는 평균 차이가 -0.0005m (거의 0에 근접)으로 나타나 장비 간 체계적인 평균 차이가 사실상 없었다. 개체별로는 P2U가 더 작은 경우 22주, 더 큰 경우 19주로 방향성이 한쪽으로 뚜렷하게 치우치지 않았고, 오차 지표는 MAE 0.058m (약 5.8cm), RMSE 0.087m (약 8.7cm)였다. 대응표본 비교에서도 DBH는 유의한 차이가 확인되지 않았다. 수관폭(CrownDiameter)은 P2U가 평균적으로 약 0.60m 작게 산출되었고, 41주 중 34주에서 P2U 수관폭이 더 작게 나타났다. 수관폭의 오차 지표는 MAE 0.86 m, RMSE 1.60m였으며, 장비 간 차이는 유의하였다. 수관면적(CrownArea) 역시 P2U가 평균적으로 약 7.55m² 작게 산출되었고, 41주 중 34주에서 P2U가 더 작은 값을 보였다. 오차 지표는 MAE 11.67m², RMSE 19.54m²로 나타났으며, 장비 간 차이는 유의하였다. 수관체적(CrownVolume)은 비교 변수 중 장비 간 차이가 가장 크게 나타난 항목이다. P2U는 RTC360 대비 평균적으로 약 103.38m³ 작게 산출되었고, 41주 중 35주에서 P2U가 더 작은 값을 보였다. 오차 지표는 MAE 124.29m³, RMSE 183.40m³로 요약되며, 장비 간 차이는 유의하였다. 즉, 수관체적은 평균 차이 자체도 크고 개체별 변동 폭도 큰 지표로 나타나, 장비 혼용 또는 해석 시 가장 높은 주의가 필요한 변수로 해석된다.

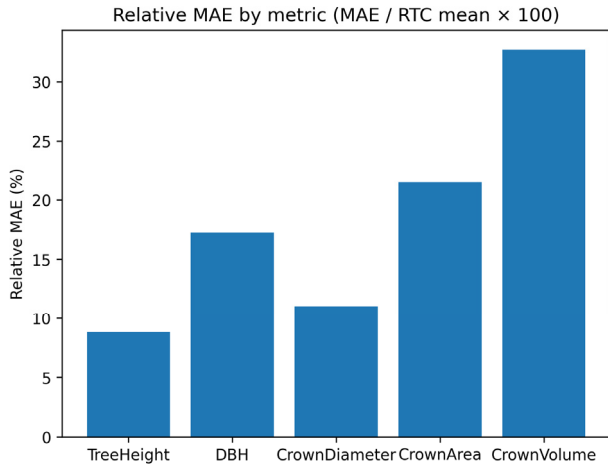


Fig. 4. Relative MAE(%) by metric

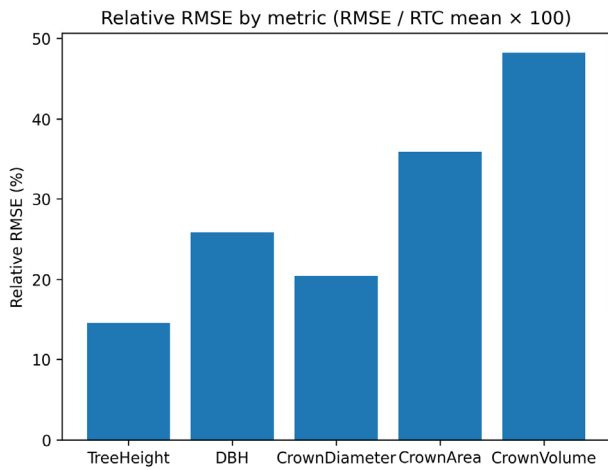


Fig. 5. Relative RMSE(%) by metric

Bland – Altman 분석에서 수고(TreeHeight)의 95% 한계일치범위 (LoA)는 -3.68~1.64m로 나타나, 개체별로는 P2U가 최대 약 3.7m 까지 더 작게 산출될 수 있음을 시사한다. 수관체적(CrownVolume)의 LoA는 -403.99~197.23m³로 폭이 가장 넓어, 수관체적은 센서 간 교환가능성이 가장 낮은 지표임을 재확인하였다. 또한 비례편향 점검에서 수고(p=0.0049)와 수관체적(p=0.0028)은 유의한 비례편향이 관찰되어, 규모가 큰 개체일수록 P2U의 과소추정 경향이 확대될 가능성이 있음을 보여준다.

수관 지표가 P2U에서 더 작게 산출되는 원인을 정량적으로 점검하기 위해, 본 연구는 점군 수준에서의 직접적인 포인트 밀도/결측률 지표를 별도로 산출하지 못한 한계 하에서, 동일 워크플로우(LiD AR360)로 산출된 치수값만으로 정의 가능한 수관 결측 대리 지표(proxy)를 설정하였다. 본 논문에서 장비 간 차이값은 $\Delta = (P2U - RTC360)$ 으로 정의하므로, (1) 수관 상부 결측지수(UOI)는 $UOI = -\Delta TreeHeight = (TreeHeight_{RTC360} - TreeHeight_{P2U})$ [m]로 정의하였다(UOI가 클수록 MLS에서 수관 상부 포착이 상대적으로 감소했음을 시사). (2) 수관 외곽 결측지수(EOI)는 $EOI = -\Delta CrownDiameter = (CrownDiameter_{RTC360} - CrownDiameter_{P2U})$ [m]로 정의하였다(EOI가 클수록 수관 외곽 포착 결손이 큼). 분석

Table 3. Descriptive statistics and paired-comparison summary (n=41)

	Tree Height	DBH	Crown Diameter	Crown Area	Crown Volume
Unit	m	m	m	m ²	m ³
P2U (mean±SD)	10.63 ±4.13	0.336 ±0.187	7.21 ±2.79	46.79 ±30.36	276.82 ±228.26
RTC360 (mean±SD)	11.65 ±4.70	0.336 ±0.208	7.81 ±2.89	54.34 ±33.46	380.20 ±295.61
P2U_mean	10.63	0.3357	7.212	46.79	276.8
RTC_mean	11.65	0.3362	7.811	54.34	380.2
MeanDiff (P2U-RTC)	-1.021	-0.00051	-0.5998	-7.547	-103.4
MAE	1.025	0.05798	0.8618	11.67	124.3
RMSE	1.685	0.08696	1.597	19.54	183.4
Wilcoxon_p	9.095×10 ⁻¹²	6.078×10 ⁻¹	1.359×10 ⁻⁵	3.035×10 ⁻⁵	3.594×10 ⁻⁷
Holm p	4.55×10 ⁻¹¹	6.078×10 ⁻¹	4.08×10 ⁻⁵	6.07×10 ⁻⁵	1.44×10 ⁻⁶
r (rank-biserial)	-0.988	-0.094	-0.733	-0.707	-0.83
△ mean 95% CI	[-1.515, -0.688]	[-0.026, 0.028]	[-1.112, -0.190]	[-13.206, -2.058]	[-150.54, -57.47]
Count (P2U<RTC)	39	22	34	34	35
Count (P2U>RTC)	2	19	7	7	6

결과, $|\Delta CrownVolume| (= |CrownVolume_{P2U} - CrownVolume_{RTC360}|)$ 은 UOI와 강한 양의 상관을 보였고(Spearman $\rho=0.811$, $p<0.001$, $N=41$), EOI와도 유의한 양의 상관을 보였다($\rho=0.683$, $p<0.001$, $N=41$). 또한 UOI를 설명변수로 한 단순 선형회귀에서 $|\Delta CrownVolume|=44.8+77.9 \times UOI$ 로 추정되었으며($R^2=0.60$, $p<0.001$), 이는 P2U 수고가 TLS 대비 1m 더 작게 산출될수록(즉 상부 결측이 클수록) 수관체적의 장비 간 차이가 평균적으로 약 78m³ 증가하는 경향을 의미한다. 이상치 후보(TreeID 1, 5, 26, 28, 29)를 제외한 민감도 분석($N=36$)에서도 UOI - $|\Delta CrownVolume|$ 상관($\rho=0.801$)과 EOI - $|\Delta CrownVolume|$ 상관($\rho=0.812$)은 모두 유의하게 유지되어($p<0.001$), 수관 과소추정 경향이 특정 극단값에 의해 좌우되는 결과가 아님을 확인하였다. 이러한 정량 결과는 이동형 MLS 환경에서 관측 기하 및 차폐로 인해 수관 상부·외곽 포인트의 상대적 누락이 커질수록, 상용 워크플로우 기반 수관 지표가 체계적으로 과소추정될 가능성이 증가한다는 해석을 지지한다.

자동 추출 기반 치수 자료의 특성상 개체목 분할 오류, 인접 객체 혼입, 포인트 부족 등의 이유로 일부 개체에서 극단 차이가 발생할 수 있으므로, 본 연구는 차이값 분포를 기준으로 이상치 후보를 점검하였다. IQR 규칙으로 식별된 변수별 이상치 후보의 TreeID와 임계값(하한/상한)을 제시하며, 이상치 후보 개체의 변수별 차이값(Δ)을 함께 제공한다. 본 연구는 본문 결과($N=41$)에 더해 이상치 후보 합집합(TreeID 1, 5, 26, 28, 29)을 제외한 민감도 분석($N=36$)을 수행하였고, 이상치 제외 후에도 “수고·수관 지표는 P2U가 더 작게, DBH는 유의차 없음”이라는 결론이 동일하게 유지됨을 확인하였다. 즉, 수고와 수관폭·수관면적·수관체적은 여전히 P2U가 더 작게 산출되는 경향이 유지되었고 통계적으로도 유의했으며, DBH는 제외 후에도 유의한 차이가 나타나지 않았다. 또한 이상치 제외 후 오

Table 4. IQR-based outlier screening thresholds and identified outlier candidate TreeIDs by metric

	Tree Height	DBH	Crown Diameter	Crown Area	Crown Volume
Unit	m	m	m	m ²	m ³
Q1	-1.33	-0.035	-1.01	-15.283	-203.032
Q3	-0.22	0.035	-0.085	-0.511	-2.403
IQR	1.109	0.07	0.925	14.772	200.629
Lower	-2.99	-0.14	-2.3975	-37.441	-503.9755
Upper	1.446	0.14	1.3025	21.647	298.5405
OutlierIDs	29	1, 5, 26, 28	28, 29	28, 29	28, 29

Table 5. Outlier candidate cases: sensor-wise estimates and differences by metric

TreeID	P2U	RTC	Diff	Metric
29	8.092	16.648	-8.556	TreeHeight
1	0.471	0.168	0.303	DBH
5	0.275	0.015	0.26	DBH
26	0.371	0.548	-0.177	DBH
28	0.475	0.645	-0.17	DBH
28	12.438	8.614	3.824	CrownDiameter
29	2.038	10.151	-8.113	CrownDiameter
28	121.502	58.283	63.219	CrownArea
29	3.263	80.923	-77.66	CrownArea
28	884.79	466.788	418.002	CrownVolume
29	5.968	598.168	-592.2	CrownVolume

차 지표는 전반적으로 감소하는 경향을 보였는데, 예를 들어 수고의 RMSE는 1.69m에서 1.06m로 감소하여 일부 극단 사례가 오차 지표를 확대시키는 영향을 확인할 수 있었다.

본 장의 결과를 종합하면, P2U는 RTC360 대비 수고 및 수관 지표에서 전반적으로 더 작은 값을 산출하는 경향이 확인되었고, 해당 차이는 통계적으로 유의하였다. 반면 DBH는 두 장비 간 평균 차이가 거의 없고 통계적으로도 유의하지 않아, 본 표본에서는 장비 간 결과가 상대적으로 안정적인 항목으로 나타났다. 5개 변수(수고, DBH, 수관폭, 수관면적, 수관체적)에 대해 장비별 평균±표준편차, 평균차(△), MAE/RMSE, Wilcoxon 검정 p-value (및 Holm 보정 p-value), 효과크기(rank-biserial correlation), 그리고 평균차의 95% 신뢰구간을 한 번에 요약한 것이다. 또한 Fig. 6.~Fig. 10. (Scatter, 1:1 line)은 장비 간 산출값의 분포와 편향 여부를 직관적으로 보여준다.

Table 6.은 LiDAR360에서 추출한 개체목 단위 결과 엑셀을 원자료 수준에서 그대로 표로 정리한 것이다. 동일 TreeID로 매칭된 RTC360 (TLS) - P2U (MLS) 치수 결과의 대응쌍(n=41)을 제시한다. 각 행은 개체목 1주를 의미하며, 수고(TreeHeight), DBH, 수관폭(CrownDiameter), 수관면적(CrownArea), 수관체적(CrownVolume)을 두 센서별로 병렬 제시한다. 본 연구의 비교 분석은 동일 표본을 기준으로 수행되었으며, Fig. 6.~Fig. 15.(산점도 및 Bland-Altman 플롯)와 Table 5.(이상치 후보 식별)는 모두 Table 6.의 원 자료를 기반으로 구성되었다.

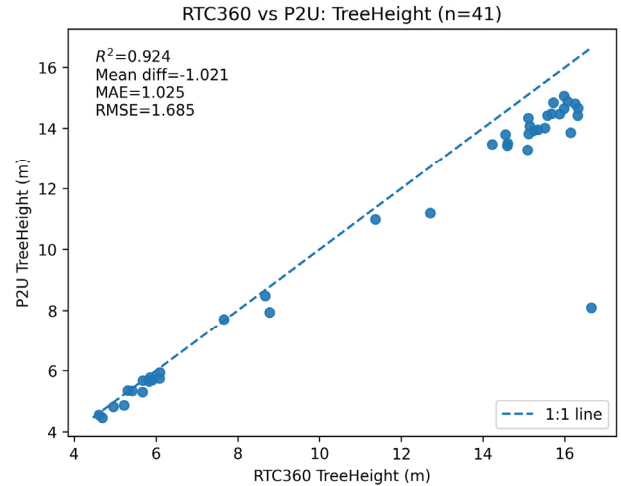


Fig. 6. Scatter plot (TreeHeight): RTC360 vs P2U

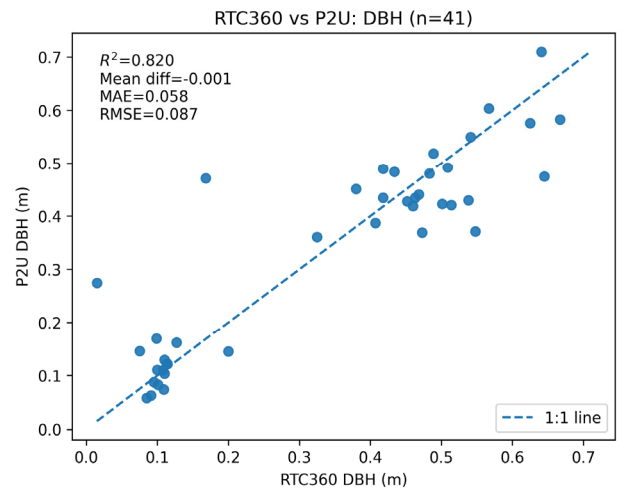


Fig. 7. Scatter plot (DBH): RTC360 vs P2U

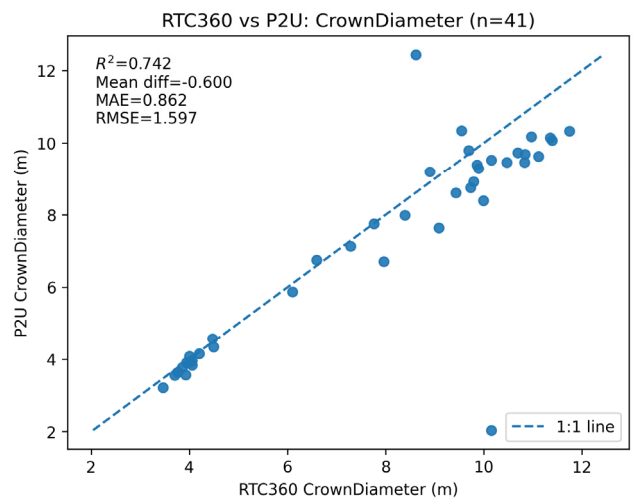


Fig. 8. Scatter plot (CrownDiameter): RTC360 vs P2U

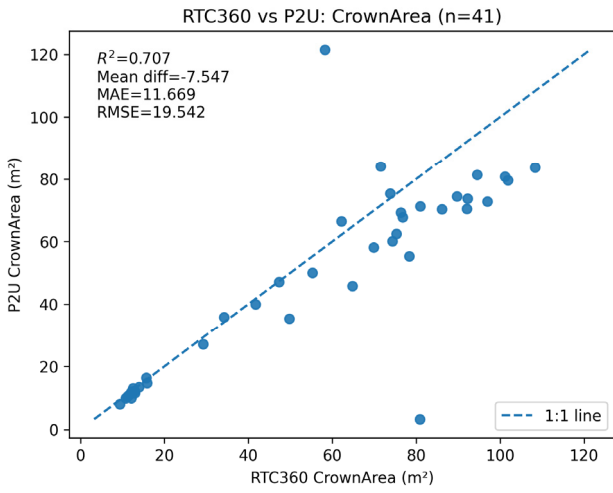


Fig. 9. Scatter plot (CrownArea): RTC360 vs P2U

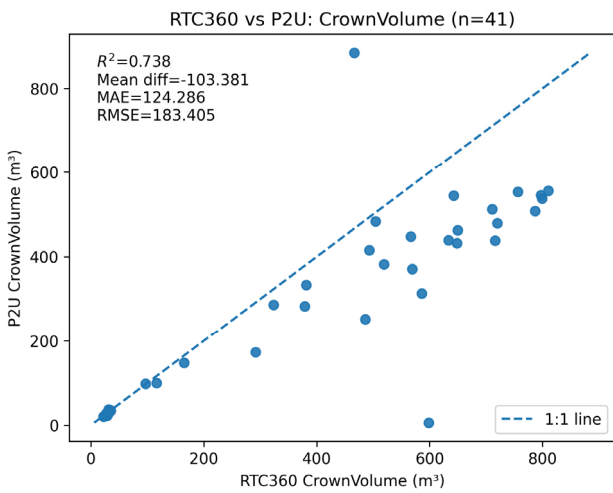


Fig. 10. Scatter plot (CrownVolume): RTC360 vs P2U

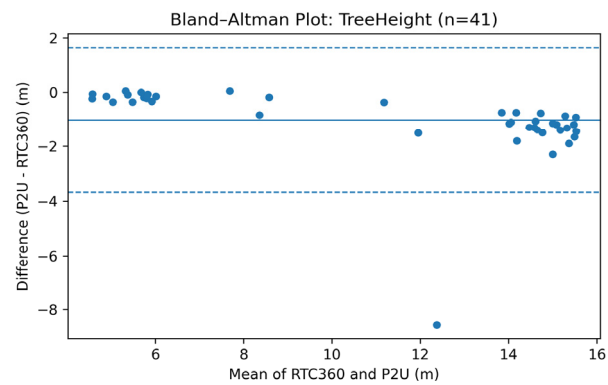


Fig. 11. Bland-Altman plot (TreeHeight)

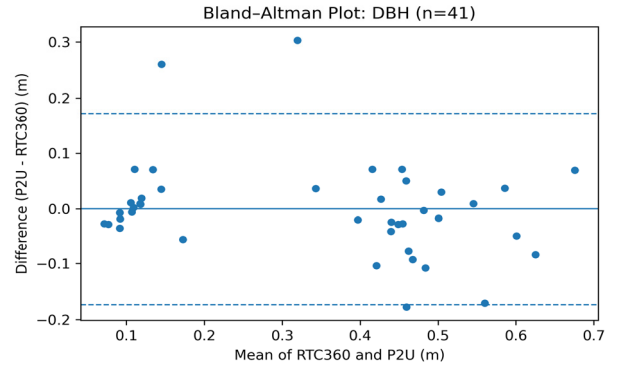


Fig. 12. Bland-Altman plot (DBH)

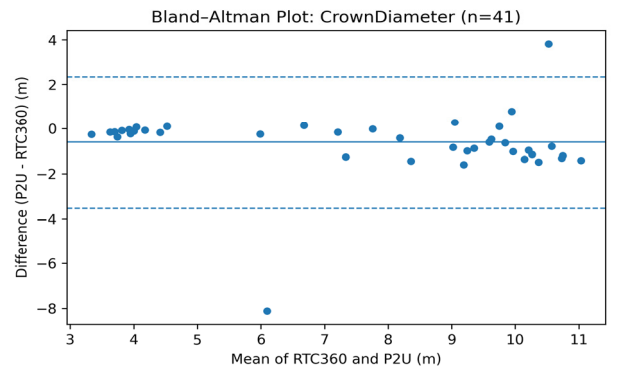


Fig. 13. Bland-Altman plot (CrownDiameter)

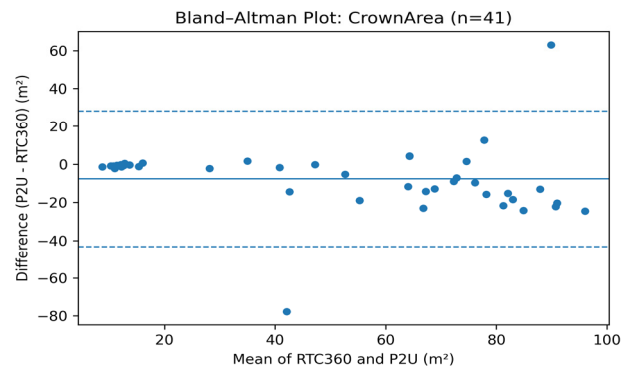


Fig. 14. Bland-Altman plot (CrownArea)

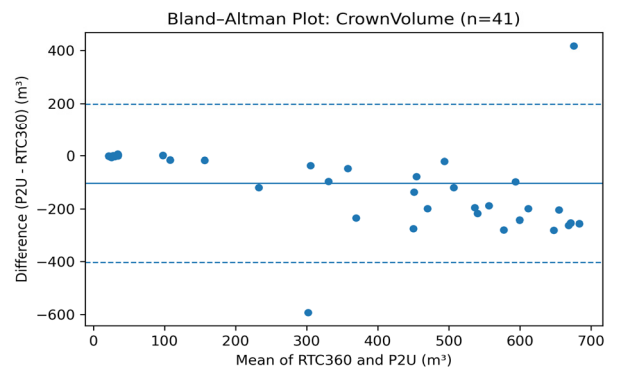


Fig. 15. Bland-Altman plot (CrownVolume)

Table 6. LiDAR360 extraction data of RTC360 & P2U

TreeID	(P2U) TreeHeight	(RTC360) TreeHeight	(P2U) DBH	(RTC360) DBH	(P2U) CrownDiameter	(RTC360) CrownDiameter	(P2U) CrownArea	(RTC360) CrownArea	(P2U) CrownVolume	(RTC360) CrownVolume
1	8.486	8.674	0.471	0.168	7.136	7.285	39.998	41.682	147.879	164.81
2	14.423	15.57	0.451	0.38	7.633	9.083	45.76	64.791	252.45	486.248
3	14.415	16.317	0.492	0.509	8.916	9.791	62.43	75.29	370.757	569.064
4	15.059	15.981	0.441	0.468	8.752	9.731	60.165	74.368	432.086	648.446
5	10.989	11.363	0.275	0.015	9.288	9.89	67.755	76.814	282.672	379.05
6	5.352	5.307	0.083	0.101	3.548	3.702	9.886	10.765	22.096	24.499
7	5.651	5.837	0.088	0.095	3.21	3.461	8.091	9.408	21.612	25.123
8	7.942	8.782	0.145	0.2	5.87	6.103	27.063	29.255	100.089	116.135
9	14.653	15.98	0.43	0.538	10.143	11.351	80.8	101.198	556.17	810.165
10	13.434	14.59	0.421	0.514	9.691	10.837	73.768	92.236	512.18	710.576
11	4.546	4.609	0.063	0.091	4.336	4.497	14.765	15.882	28.695	31.461
12	13.922	15.24	0.423	0.501	10.179	10.968	81.375	94.481	553.353	756.385
13	13.287	15.087	0.419	0.46	10.326	11.743	83.736	108.299	479.411	719.916
14	14.334	15.109	0.428	0.452	10.068	11.39	79.604	101.891	537.97	798.915
15	13.792	14.544	0.583	0.667	9.389	9.861	69.233	76.365	544.664	642.564
16	4.864	5.217	0.074	0.109	4.57	4.47	16.401	15.692	36.28	33.184
17	5.939	6.091	0.11	0.108	3.952	4.055	12.266	12.913	34.949	34.84
18	11.193	12.708	0.361	0.325	6.71	7.962	35.366	49.791	172.846	292.045
19	7.707	7.659	0.162	0.127	6.752	6.597	35.803	34.178	98.265	96.877
20	13.811	15.118	0.604	0.567	8.606	9.432	58.172	69.878	382.469	519.342
21	13.469	14.218	0.519	0.489	7.747	7.762	47.141	47.313	286.725	323.732
22	14.014	15.515	0.369	0.473	9.735	10.688	74.433	89.716	462.364	649.725
23	14.068	15.138	0.435	0.463	9.799	9.695	75.422	73.82	447.439	566.53
24	13.95	15.34	0.484	0.434	9.529	10.155	71.316	80.986	438.867	633.454
25	4.817	4.962	0.169	0.099	3.631	3.765	10.357	11.133	24.941	27.439
26	14.484	15.676	0.371	0.548	9.197	8.897	66.429	62.171	415.705	493.363
27	14.665	16.318	0.71	0.641	9.461	10.471	70.307	86.119	438.532	715.67
28	14.878	16.065	0.475	0.645	12.438	8.614	121.502	58.283	884.79	466.788
29	8.092	16.648	0.48	0.483	2.038	10.151	3.263	80.923	5.968	598.168
30	14.802	16.248	0.576	0.625	9.625	11.112	72.759	96.982	545.433	797.29
31	5.305	5.666	0.146	0.075	3.562	3.923	9.963	12.089	22.486	28.606
32	13.846	16.142	0.387	0.407	8.39	9.988	55.285	78.35	313.942	586.311
33	14.468	15.868	0.435	0.418	10.346	9.542	84.072	71.511	483.469	504.107
34	4.458	4.69	0.058	0.085	3.907	3.944	11.989	12.214	20.986	22.142
35	5.698	5.916	0.104	0.11	4.082	3.999	13.084	12.561	37.036	31.52
36	5.679	5.682	0.129	0.11	4.146	4.206	13.498	13.897	28.558	30.18
37	5.334	5.42	0.111	0.1	3.917	4.019	12.049	12.686	28.896	30.25
38	5.752	6.085	0.122	0.114	3.833	4.059	11.539	12.94	26.413	27.355
39	5.785	5.864	0.122	0.113	3.768	3.853	11.148	11.659	28.119	27.664
40	14.842	15.717	0.55	0.541	9.467	10.826	70.396	92.052	508.15	786.988
41	13.501	14.602	0.489	0.418	7.984	8.391	50.067	55.3	333.867	381.257

5. 결론

5.1. 시사점

본 연구는 보문역 가로수길을 대상으로 Leica RTC360 (TLS)과 Leica Pegasus Two: Ultimate (P2U, MLS)로 취득한 LiDAR 점군을 동일 형식(LAS)으로 통일한 뒤, LiDAR360에서 동일한 처리 체계로 개체목 분할 및 치수 산정을 수행하고, 동일 개체로 매칭된 41주(N=41)에 대해 장비 간 결과 차이를 비교하였다. 비교 변수는 도시 가로수 인벤토리에서 핵심적으로 활용되는 수고(TreeHeight), 흉고직경(DBH), 수관폭(CrownDiameter), 수관면적(CrownArea), 수관체적(CrownVolume)이며, 결과 비교는 평균 차이(장비 간 경향)와 함께 MAE 및 RMSE를 중심으로 정리하였다. 또한 자동 추출 기반 데이터의 특성을 고려하여 이상치 여부를 점검하고, 이상치 제외 후에도 결론이 유지되는지 민감도 분석을 통해 확인하였다.

분석 결과는 다음과 같이 요약된다. 첫째, P2U는 RTC360에 비해 수고와 수관 관련 지표(수관폭·수관면적·수관체적)를 전반적으로 더 작게 산출하는 경향이 확인되었고, 해당 차이는 통계적으로 유의하였다. 수고는 P2U 평균 10.63m, RTC360 평균 11.65m로 평균 차이가 약 -1.02 m였으며, 수관체적은 P2U 평균 276.82m³, RTC360 평균 380.20m³로 평균 차이가 약 -103.38m³로 나타나, 변수 중 장비 간 차이가 가장 크게 관찰되었다. 둘째, DBH는 두 장비 간 평균 차이가 거의 없었고 통계적으로도 유의하지 않아, 본 표본에서는 장비 간 결과가 상대적으로 안정적인 항목으로 나타났다. 셋째, 일부 개체에서 장비 간 차이가 극단적으로 크게 나타나는 이상치가 확인되었으나, 이상치 후보를 제외한 민감도 분석(N=36)에서도 “수고·수관 지표는 P2U가 더 작게, DBH는 유의한 차이 없음”이라는 전체 경향이 유지되어, 관찰된 결론이 특정 소수 사례에 의해 좌우되지 않는 것으로 판단된다.

본 연구는 도시 가로수 조사에서 장비 선택과 결과 해석에 대해 다음의 실무적 시사점을 제공한다. DBH는 본 사례에서 장비 간 평균 수준이 유사하게 나타나, MLS 기반 조사의 활용 가능성이 상대적으로 높게 평가된다. 반면 수고 및 수관 지표는 P2U가 체계적으로 더 작게 산출되는 경향이 확인되었으므로, TLS 결과와 MLS 결과를 단순 병합하여 장기 모니터링 데이터로 사용하는 경우, 서로 다른 장비로 측정된 결과를 동일 기준으로 직접 비교하는 경우에는 주의가 필요하다. 특히 수관체적과 같이 산출값 차이와 변동 폭이 큰 지표는 장비 혼용 시 해석 오류 위험이 커질 수 있으므로, 목적 변수가 수관체적·수관면적 등 수관 중심 지표일 때는 취득 설계와 전처리·분할 품질관리를 강화하거나, TLS 기반 보정 표본을 확보하는 전략이 필요하다. 또한 자동 추출 기반 결과는 개체목 분할 실패, 인접 객체 혼입, 포인트 부족 등으로 이상치가 발생할 수 있으므로, 최소한의 이상치 점검과 재검토 절차를 표준 프로세스로 포함하는 것이 바람직하다.

실무 적용 관점에서 중요한 것은 관측 방식 간 차이가 실제 의사결정에 미치는 영향이다. 도시 가로수 인벤토리에서는 DBH를 직경 구간으로 등급화하여 관리·점검 주기, 전정 우선순위, 예산 산정 등에 활용하는 경우가 많다. 본 연구에서 DBH의 평균차는 거의 0에

근접했으나(MeanDiff ≈ -0.05cm), MAE가 약 5.8cm로 나타나, 등급 경계 부근 개체에서는 장비만으로도 등급 오분류가 발생할 수 있음을 의미한다. 수고는 P2U가 RTC360 대비 평균 약 -1.02m (약 -8.8%) 낮게 산출되어, 수고 기준의 위험도 분류, 전선·시설물 간섭 위험 판단 등 임계값 기반 판단이 포함된 업무에서 경계 부근 개체의 과소평가 가능성을 시사한다. 또한 수관체적은 P2U가 RTC360 대비 평균 -103.38m³ (약 -27.2%)의 편향을 보였고 (MAE 124.29m³), 수관면적도 -7.55m² (약 -13.9%)로 과소추정되어, 그늘 제공량/열섬 완화 성과평가, 전정량·가지 부산물 산정, 수관 기반 위험도 평가, 탄소·생태계서비스 산정 등 수관 지표를 직접 KPI로 쓰는 업무에서 결과를 체계적으로 낮게 평가할 위험이 있다. 특히 TLS 기준선으로 장기 모니터링을 수행하던 노선에 MLS 데이터가 무보정으로 혼입되면, 센서 교체 시점의 편향이 수관 감소로 오인되어 관리 우선순위와 성과평가를 왜곡할 수 있다.

따라서 실무에서는 (1) 업무 목적에 맞는 허용오차 기준(예: DBH 등급 단위, 수고·수관 지표의 허용 상대오차)을 사전에 명시하고, (2) 센서 혼용이 불가피한 경우에는 동일 개체에 대한 교차측정 표본을 확보하여 변수별 보정식 또는 센서별 기준선을 설정하며, (3) 수관체적·수관면적과 같이 장비 간 편향이 큰 지표를 핵심 의사결정 변수로 사용할 때는 TLS를 참조로 유지하거나 MLS 결과에 강화된 QC를 결합하는 운영 전략이 필요하다.

학술적으로 본 연구는 기존 비교 연구가 상관·회귀 지표에 머물거나, 수고·DBH 등 일부 치수만 다루는 경향 때문에 수관체적과 같은 3차원 수관 지표의 교환가능성을 충분히 제시하지 못했던 연구공백을 보완하였다[18,29,30~33]. 또한 LAS 형식과 LiDAR360 처리과정을 동일하게 통일한 조건에서 TLS와 MLS 결과를 비교하여, 평균차와 MAE/RMSE뿐 아니라 LoA와 비례편향까지 함께 제시함으로써 두 센서를 혼용하거나 교체할 때 생길 수 있는 체계적 편향을 사전에 진단하고 보정 필요성을 판단할 수 있는 분석 틀을 제안하였다[27,28,30~34]. 특히 수관체적에서 큰 편향과 넓은 LoA가 관찰된 점은, 센서를 바꾸는 것만으로도 디지털 트윈에서 시간에 따른 변화량을 잘못 해석할 위험이 있음을 실증적으로 보여준다는 점에서 의미가 있다[27,28].

5.2. 연구 한계 및 향후 연구 방향

한편 본 연구의 결론은 다음의 한계 내에서 해석되어야 한다. 첫째, 본 연구는 현장 실측을 포함한 절대 정확도 검증이 아니라, 동일 처리 체계에서 산출된 결과의 장비 간 상대 비교(일치도 관점)에 초점을 두었다. 따라서 어느 장비가 더 정확하든 단정하기보다는, 두 장비 결과가 항목별로 얼마나 다르게 나타나는지를 실증적으로 제시하는 데 의미가 있다. 둘째, 분석 대상은 단일 구간(보문역 가로수길)과 41주 표본에 한정되어 있어, 수종·수형·식재 밀도·도심 차폐 조건·계절(잎 상태) 등이 달라질 경우 결과가 달라질 가능성이 있다. 셋째, 치수 추출은 LiDAR360의 특정 워크플로우와 파라미터 설정에 기반하므로, 다른 소프트웨어 또는 다른 설정을 적용하면 장비 간 차이의 크기와 패턴이 변할 수 있다. 넷째, 이상치 사례에 대해서는 결과 장에서 정량적으로 식별하고 민감도 분석으로 영향은 점검했으나, 각 사례의 발생 원인(분할 오류/혼입/차폐/정합 등)을 점검 수

준에서 완전히 규명하기에는 추가 자료와 세부 검토가 필요하다.

향후 연구는 다음 방향으로 확장할 수 있다. 첫째, 일부 표본에 대해 DBH·수고 등의 현장 실측을 확보하여 절대 정확도를 함께 제시함으로써, 장비 간 상대 차이를 정확도 관점으로도 연결할 필요가 있다. 둘째, 대상지를 복수 구간으로 확장하고 수종·식재 조건을 다양화하여, 장비 간 차이가 어떤 조건에서 확대되는지(예: 수관 중첩, 차폐가 큰 구간, 수고가 큰 개채 등)를 체계적으로 정리할 필요가 있다. 셋째, 점군 품질 지표(점밀도, 수관 상부 결측, 줄기 포인트 확보 비율 등)와 치수 차이 간의 관계를 정량적으로 분석하여, 장비 간 차이의 발생 메커니즘을 보다 설득력 있게 설명할 수 있다. 넷째, 본 연구에서 Bland-Altman 등 일치도 시각화를 제시하였으나, 센서 혼용을 위한 보정식의 구축 및 검증은 후속 연구에서 수행할 필요가 있다. 본 연구의 센서 간 상대 차이를 실제 값으로 연결하기 위해, 후속 연구에서는 (1) 참값 확보, (2) 표본 설계, (3) 보정/검증의 3단계를 명시적으로 포함하는 연구 설계를 적용할 필요가 있다.

첫째, DBH는 직경테이프를 2인 2회 이상 반복 측정하여 관측오차를 추정하고, 수고는 레이저 하이포미터/거리계 기반 측정을 병행하여 재현성을 확보한다. 수관폭은 직교 2방향(도로 방향/직각 방향) 현장 실측을 기본으로 한다. 둘째, 최소 3개 이상의 도심 가로 구간을 선정하고, 수고/수관 규모 구간별 층화표본으로 각 구간 30~50주 이상을 확보한다. 잎 상태는 분리하거나 동일 조건으로 통제하여 계절 요인을 명시적으로 다룬다. 셋째, 참값 대비 TLS/MLS 각각의 편향(Δ), 오차(MAE/RMSE), LoA를 산출하고, 차폐·점밀도·수관 상부 결측률 등 점군 품질 지표를 공변량으로 포함해 오차 발생 메커니즘을 모형화한다. 또한 센서 혼용을 목표로 하는 경우, 교차측정 표본으로 센서 변환식을 구축한 뒤, 교차검증으로 일반화 성능을 검증하여 보정식의 적용 가능 범위를 함께 제시한다.

종합하면, 본 연구는 동일 구간·동일 처리 체계에서 RTC360(TLS)과 P2U(MLS)의 수목 치수 산출 결과를 비교한 결과, DBH는 장비 간 평균 차이가 거의 없었던 반면 수고 및 수관 지표에서는 P2U가 RTC360 대비 더 작게 산출되는 경향이 뚜렷하게 나타났음을 확인하였다. 이러한 결과는 도시 가로수 LiDAR 조사에서 조사 효율(MLS)과 수관 지표의 안정성(TLS) 사이의 상충관계를 항목별로 구체화해 보여주며, 장비 선택·스케 설계·품질관리·장비 혼용 시 해석 기준 마련에 필요한 기초 근거를 제공한다.

References

- [1] M. Dassot, T. Constant, M. Fournier, The use of terrestrial LiDAR technology in forest science: Application fields, benefits and challenges, *Annals of Forest Science*, 68(5), 2011, pp.959-974.
- [2] X. Liang et al., Terrestrial laser scanning for forest inventories, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 2016, pp.63-77.
- [3] K. Calders et al., Terrestrial laser scanning in forest ecology: Expanding the horizon, *Remote Sensing of Environment*, 251, 2020, 112102.
- [4] S. Bauwens et al., Forest inventory with terrestrial LiDAR: A comparison of static and hand-held mobile laser scanning, *Forests*, 7(6), 2016, p.127.
- [5] A. Bienert et al., Comparison and combination of mobile and terrestrial laser scanning for natural forest inventories, *Forests*, 9(7), 2018, p.395.
- [6] A.E.L. Stovall et al., Comparing mobile and terrestrial laser scanning for measuring and modelling tree stem taper, *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 96(5), 2023, pp.705-717.
- [7] M. Herrero-Huerta et al., Automatic tree parameter extraction by a Mobile LiDAR System in an urban context, *PLoS ONE*, 13(4), 2018, e0196004.
- [8] Y. Chen et al., Rapid urban roadside tree inventory using a mobile laser scanning system, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(9), 2019, pp.3690-3700.
- [9] B. Wu et al., A voxel-based method for automated identification and morphological parameters estimation of individual street trees from mobile laser scanning data, *Remote Sensing*, 5(2), 2013, pp.584-611.
- [10] L. Li et al., A dual growing method for the automatic extraction of individual trees from mobile laser scanning data, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 120, 2016, pp.37-52.
- [11] H. Guan et al., Street-scene tree segmentation from mobile laser scanning point clouds, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B3, 2016, pp.221-225.
- [12] M. Münzinger et al., Mapping the urban forest in detail: From LiDAR point clouds to 3D tree models, *Urban Forestry & Urban Greening*, 74, 2022, 127637.
- [13] K. Calders et al., Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning, *Methods in Ecology and Evolution*, 6(2), 2015, pp.198-208.
- [14] P. Raunonen et al., Fast automatic precision tree models from terrestrial laser scanner data, *Remote Sensing*, 5(2), 2013, pp.491-520.
- [15] J. Hackenberg et al., SimpleTree—An efficient open source tool to build tree models from TLS clouds, *Forests*, 6(11), 2015, pp.4245-4294.
- [16] GreenValley International, LiDAR360 user guide (version 8.0), GreenValley International, 2021.
- [17] D.E. Bowler et al., Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence, *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 2010, pp.147-155.
- [18] J.M. Bland, D.G. Altman, Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement, *The Lancet*, 327(8476), 1986, pp.307-310.
- [19] D.J. Nowak, D.E. Crane, Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA, *Environmental Pollution*, 116(3), 2002, pp.381-389.
- [20] S. Delagrange et al., PypeTree: A tool for reconstructing tree perennial tissues from point clouds, *Sensors*, 14(3), 2014, pp.4271-4289.
- [21] H. Kaartinen et al., An international comparison of individual tree detection and extraction using airborne laser scanning, *Remote Sensing*, 4(4), 2012, pp.950-974.
- [22] B. D'hont et al., Evaluating airborne, mobile and terrestrial laser scanning for urban tree inventories: A case study in Ghent, Belgium, *Urban Forestry & Urban Greening*, 99, 2024, 128428.
- [23] M. Holopainen et al., Tree mapping using airborne, terrestrial and mobile laser scanning - A case study in a heterogeneous urban forest, *Urban Forestry & Urban Greening*, 12(4), 2013, pp.546-553.
- [24] J.-R. Roussel et al., Removing bias from LiDAR-based estimates of canopy height: Accounting for the effects of pulse density and footprint size, *Remote Sensing of Environment*, 198, 2017, pp.1-16.
- [25] C. Vatandaşlar, M. Zeybek, Extraction of forest inventory parameters using handheld mobile laser scanning: A case study from Trabzon, Turkey, *Measurement*, 177, 2021, 109328.
- [26] Y. Wang et al., Is field-measured tree height as reliable as believed - A comparison study of tree height estimates from field measurement, airborne laser scanning and terrestrial laser scanning in a boreal forest, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 147, 2019, pp.132-145.
- [27] B. Ketzler et al., Digital twins for cities: A state of the art review, *Built Environment*, 46(4), 2020, pp.547-573.
- [28] V.V. Lehtola et al., Digital twin of a city: Review of technology serving city needs, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 114, 2022, 102915.
- [29] J.M. Bland, D.G. Altman, Measuring agreement in method comparison studies, *Statistical Methods in Medical Research*, 8(2), 1999, pp.135-160.
- [30] O. Gerke, Reporting standards for a Bland-Altman agreement analysis: A review of methodological reviews, *Diagnostics*, 10(5), 2020, 334.
- [31] S. Haghayegh et al., A comprehensive guideline for Bland-Altman and intra class correlation calculations to properly compare two methods of

- measurement and interpret findings, *Physiological Measurement*, 41(5), 2020, 055012.
- [32] M.A. Mansournia et al., Bland-Altman methods for comparing methods of measurement and response to criticisms, *Global Epidemiology*, 3, 2021, 100045.
- [33] A. Carkeet, A review of the use of confidence intervals for Bland-Altman limits of agreement in optometry and vision science, *Optometry and Vision Science*, 97(1), 2020, pp.3-8.
- [34] P. Taffè et al., The Bland-Altman method should not be used when one of the two measurement methods has negligible measurement errors, *PLoS ONE*, 17(12), 2022, e0278915.