Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography
Vol. 44, No. 3, 319-337, 2026
https://doi.org/10.7848/ksgpc.2026.44.3.319

ISSN 1598-4850(Print)
ISSN 2288-260X(Online)
Original article

UAV LiDAR 기반 임도 설계를 위한 지형 정확도 및 토공량 산정 영향 분석

Analysis of Terrain Accuracy and Earthwork Volume Estimation for UAV LiDAR-Based Forest Road Design

손병택[1] · 이기훈[2]
Son, Byoung Taek · Lee, Ki Hoon

Abstract

This study analyzed how differences in input terrain data affect elevation accuracy and earthwork volume estimation in forest road design. High-density UAV (Unmanned Aerial Vehicle) LiDAR (Light Detection And Ranging) point cloud data were acquired from three forest road construction sites in Sanmak-ri, Yeongdong-gun; Gyoseong-ri, Jincheon-gun; and Okseong-ri, Jincheon-gun. High-precision terrain data were generated through ground classification and compared with conventional 1:5,000 digital topographic map data and RTK(Real Time Kinematic)-GNSS(Global Navigation Satellite System) field survey elevations. Elevation accuracy was evaluated using UAV LiDAR data with and without GCP(Ground Control Point) correction, 1:5,000 digital topographic map elevations, and RTK-GNSS measurements. Based on this comparison, cut and fill volumes were estimated under the same design conditions. The results showed that GCP corrected UAV LiDAR data had the highest agreement with RTK-GNSS elevations. In addition, cut and fill volumes differed according to the input terrain data. In Sanmak-ri, the cut volume estimated from the 1:5,000 digital topographic map was about 2.2 times that estimated from the UAV LiDAR based terrain data, while in Okseong-ri, the difference was about 4.6 times. Some sections also showed differences in the occurrence of fill volume depending on the input terrain data. These results indicate that terrain data precision and elevation representation can influence earthwork estimation in forest road design. The findings provide reference information for further studies on continuous terrain surface-based volume estimation and voxel-based 3D spatial analysis methods, such as three-dimensional grid-based approaches, for forest road earthwork estimation.

Keywords : UAV LiDAR, Forest road design, Earthwork Volume estimation, Digital terrain model, 3D spatial analysis

초 록

본 연구는 입력 지형 데이터의 차이가 임도 설계 단계의 고도 정확도와 토공량 산정 결과에 미치는 영향을 분석하였다. 영동군 산막리, 진천군 교성리, 진천군 옥성리의 세 임도 시공 대상지에서 UAV LiDAR 점군을 취득하고, 지면 분류를 통해 정밀 지형 데이터를 구축하였다. 이를 기존 1:5,000 수치지형도 및 RTK-GNSS 현장 측량 고도와 비교하였다. 분석 결과, GCP 보정 UAV LiDAR 데이터가 RTK-GNSS 고도와 가장 높은 일치도를 보였으며, 동일 설계 조건에서도 입력 지형 데이터에 따라 절·성토량 산정 결과가 상이하게 나타났다. 산막리에서는 1:5,000 수치지형도 기반 절토량이 UAV LiDAR 기반 결과의 약 2.2배, 옥성리에서는 약 4.6배로 산정되었다. 또한 일부 구간에서는 입력 지형 데이터에 따라 성토량 산정 여부에도 차이가 확인되었다. 이는 지형 데이터의 정밀도와 고도 재현성이 임도 설계의 토공량 산정 결과에 영향을 미칠 수 있음을 보여주며, 향후 연속 지형면 기반 체적 산정 및 입체격자 등 3차원 공간 분석 기법을 활용한 토공량 산정 연구의 기초 자료로 활용될 수 있다.

핵심어 : UAV LiDAR, 임도 설계, 토공량 산정, 고정밀 지형 데이터, 3차원 공간 분석

Received 2026.04.06, Revised 2026.04.11, Accepted 2026.04.23
1) Sky Forest Engineering (E-mail: 3114@skyforest.co.kr)
2) Corresponding Author, Member, Electronics and Telecommunications Research Institute (E-mail: hoony@etri.re.kr)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

도시와 산림의 경계 지역이 확대됨에 따라 산림 인접 생활권에서의 산불 피해 위험이 증가하고 있으며, 이에 따라 산불 대응 체계에서 임도의 기능적 중요성은 더욱 부각되고 있다(Korea Forest Service, 2025). 임도는 산불 진화 인력과 장비의 접근 경로로 활용될 뿐만 아니라 방화선 구축과 초기 진압 활동을 위한 공간적 인프라로서 중요한 역할을 수행하고 있다(National Institute of Forest Science, 2025). 실제 대형 산불 사례에서도 임도망의 밀도와 접근성은 진화 속도 및 피해 확산 범위에 영향을 미치는 핵심 요인으로 보고되고 있다(Jang *et al*., 2025).

그러나 우리나라는 국토의 약 63%가 산림으로 이루어진 대표적인 산림 국가임에도 불구하고 임도 인프라 수준은 산림 규모에 비해 상대적으로 낮은 상태에 머물러 있다. 한국전쟁 이후 황폐화된 산림을 성공적으로 복원하며 산림 자원량이 40년간 14배 증가하는 등 전 세계적으로 주목할 만한 성과를 이루었으나(Jeon, 2021), 전국 임도 연장은 약 26,785km, 임도 밀도는 4.3m/ha에 불과하다. 이는 독일(54.0m/ha), 오스트리아(45.0m/ha), 일본(24.1m/ha) 등 주요 임업 선진국과 비교할 때 현저히 낮은 수준이다(Korea Forest Service, 2020; Korea Forest Service, 2024). 이러한 임도망의 부족은 산림 경영 효율성을 저하시킬 뿐만 아니라 재해 대응을 위한 전략적 공간 인프라 구축에도 제약 요인으로 작용하고 있다. 특히 향후 산불 대응 역량 강화를 위해 임도망의 지속적인 확충이 요구되는 상황에서, 신규 임도의 설계 및 시공 과정에서 요구되는 지형 정보의 정확성과 설계 신뢰성 확보 또한 중요한 과제로 부각되고 있다(Lee *et al*., 2023; Lee, 2024; Lovrinčević *et al*., 2025).

이와 함께 기존 임도 설계 방식이 지닌 기술적 한계 역시 중요한 문제로 지적되고 있다. 현재의 임도 설계는 주로 국토정보플랫폼과 브이월드에서 제공되는 1:5,000 수치지형도와 현장 조사에 의존하고 있다. 그러나 1:5,000 수치지형도는 5m 등고선의 표현 특성상 저해상도 공간표현의 한계와 지형 일반화 과정에서 실제 지형의 미세한 변화나 복잡한 산림 지형 구조를 충분히 반영하기에는 한계성을 보인다. 또한 산림 지역에서는 급경사와 수목 밀집 등 환경적 제약으로 인해 정밀 측량 장비의 활용이 제한되는 경우가 많아 설계 초기 단계에서 지형 정보의 정확도를 확보하는 데 어려움이 존재한다(Lee, 2024).

최근 이러한 한계를 극복하기 위한 대안으로 무인항공기(UAV: Unmanned Aerial Vehicle), 라이다(LiDAR: Light Detection and Ranging), 위성측위시스템(GNSS: Global Navigation Satellite System) 등 고정밀 3차원 공간정보 기술이 주목받고 있다. UAV LiDAR는 레이저 펄스를 이용하여 수관 하부의 지표면 포인트 클라우드를 취득할 수 있어 산림 지역에서도 정밀한 지형 정보 구축에 활용될 수 있다. 산림 지역에서도 높은 정확도의 지형 정보를 구축할 수 있다. 또한 RTK (Real Time Kinematic) 및 PPK (Post Processing Kinematic) 기반의 GNSS 기술과 결합할 경우 센티미터급 위치 정확도를 확보가 가능하여, 산림 지역의 고정밀 지형 데이터 구축에 효과적인 방법으로 활용될 수 있다(Remzi, 2023; Lee *et al*., 2024a).

한편 브이월드와 일부 지방자치단체의 공간정보 플랫폼에서는 토공량 산정, 인허가 사전진단 등 다양한 3차원 공간 분석 기능이 제공되고 있다.(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2024; Lee *et al*., 2024b). 그러나 이러한 기능은 일반적으로 특정 영역의 토공량 총량을 산정하는 방식으로 제공되는 경우가 많다. 반면 실제 임도 설계에서는 노선 계획 이후 종단선형 설정, 측점 배치, 횡단면 작성 등을 통해 각 측점별 절·성토 단면적을 산정하고, 이를 양단면 평균법 등으로 적산하여 전체 토공량을 계산한다. 따라서 플랫폼 기반 분석 결과를 실제 임도 설계 과정에 적용하기 위해서는 입력 지형 데이터의 정밀도와 함께 설계 절차를 반영한 토공량 산정 방식의 검토가 필요하다.

이러한 배경에서 고정밀 3차원 지형 데이터의 활용이 임도 설계 단계의 고도 정확도와 절·성토량 산정 결과에 미치는 영향을 정량적으로 분석할 필요가 있다. 이에 본 연구는 UAV LiDAR 기반 고정밀 지형 데이터와 기존 1:5,000 수치지형도 기반 고도 값의 정확도를 비교하고, 동일한 설계 조건에서 입력 지형 데이터의 차이가 절·성토량 산정 결과에 미치는 영향을 분석하는 데 목적이 있다. 이를 통해 임도 설계 단계에서 고정밀 지형 데이터의 활용 가능성을 검토하고, 향후 연속 지형면 기반 토공량 산정 및 3차원 공간 분석 기법 고도화를 위한 기초 자료를 제시하고자 한다.

2. UAV LiDAR 현황 및 적용 가능성

2.1 UAV LiDAR 기술의 발전 현황

최근 공간정보 기술은 위성측위, 무인항공기, 라이다를 활용한 위치 결정과 3차원 데이터 처리 기술의 발전을 중심으로 빠르게 고도화되고 있다(Hong *et al*., 2021; Wang *et al*., 2018). 특히 UAV와 LiDAR의 융합 기술은 기존 항공사진측량 및 지상측량 방식의 한계를 보완하며, 고해상도 3차원 공간정보를 신속하게 취득할 수 있는 대안으로 주목받고 있다(Lee, 2024).

라이다는 레이저 펄스를 발사하고 반사 시간을 측정하여 거리 및 형상을 산출하는 기술로, 중장거리에서 넓은 범위의 3차원 공간정보를 획득할 수 있다(Choi, 2017). 최근에는 UAV에 라이다 센서를 탑재한 UAV LiDAR 기술이 상용화되면서, 기존 유인 항공기 기반 항공 라이다 대비 비용은 절감하면서도 높은 점밀도의 포인트 클라우드 데이터를 획득할 수 있게 되었다(Choi *et al*., 2023). 특히 산림 지역에서는 수관을 통과한 레이저 신호를 통해 지표면 탐지가 가능하여, 식생이 밀집된 곳에서도 정밀한 수치표고모델(DEM: Digital Elevation Model)과 수치표면모델(DSM: Digital Surface Model) 구축이 용이하다(Harder *et al*., 2020; Hu *et al*., 2025).

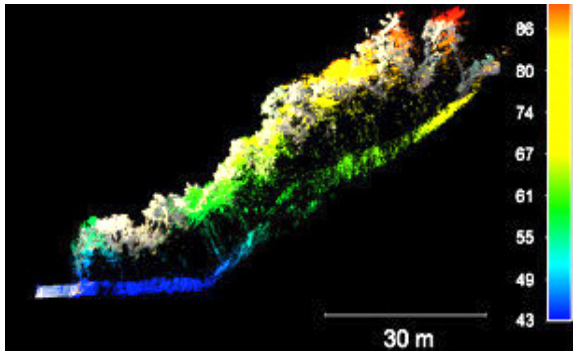


Fig. 1. Example of Pointcloud data in forest areas based on UAV LiDAR(Choi *et al*., 2023)

이러한 고정밀 공간정보 취득을 위해서는 다중 위성 시스템을 활용하는 정밀 GNSS 기술의 병행이 필수적이다(Tersus GNSS, 2024; Novatel, 2024). GNSS와 UAV를 결합하였을 때, RTK (Real-Time Kinematic) 기법의 경우 장애물로 인한 전파 차단 등 다양한 이유로 데이터가 저장되지 않아 큰 오차가 발생할 수 있다. 그러나 PPK(Post-Processed Kinematic) 기법은 센티미터급 정확도를 보장한다(Kim *et al*., 2021). 이에 따라 수목과 지형 장애물로 인해 위성 신호 수신이 불안정한 산림 환경에서는 사후 보정 기술인 PPK 방식이 효과적일 수 있다(Tomaštik *et al*., 2019). UAV LiDAR와 정밀 GNSS의 병행 활용은 산악지형을 포함한 대부분의 산림 지역에서 신뢰성 있는 3차원 좌표 취득을 가능하게 한다(Lee *et al*., 2024).

2.2 기존 임도 설계 및 측량 방식의 한계

현재 임도 측량에는 경사계, 컴퍼스, 줄자 등 전통적 도구가 여전히 사용되고 있다. 이러한 장비는 초기 산림토목사업 시기에 도입된 것으로, 간단한 현장 답사에는 유용하나 정밀도가 낮아 설계 및 시공 단계에서 오차를 유발한다. 그 결과 설계 오류와 시공 과정의 반복적인 수정 문제가 발생하고 있다. 또한 단편적인 측량 작업과 수기 위주의 종이 야장 기록 방식은 오염 및 훼손 우려가 크고 판독이 어려워 자료의 활용성과 관리 효율성을 저하시킨다.

(a)

(b)

Fig. 2. (a)Traditional surveying equipment (b) Traditional methods of surveying forest roads

Fig. 3. Example of damaged paper

임도는 「산림관리기반시설의 설계 및 시설기준」에 따라 곡선반지름, 종단기울기 등 필수 준수 사항을 엄격히 규정하고 있으나, 실제 현장에서는 이를 충분히 이행하지 못하는 사례가 다수 보고되고 있다. 전문가 면담 결과에 따르면, 곡선 구간은 산정된 곡선장과 함께 시단현, 중심점, 종단현 등 측점 표시가 체계적으로 이루어져야 한다. 그러나 산악지의 지형적 장애 요인과 재래식 작업 방식의 한계로 인해, 줄자를 이용한 교선점 중심의 단순 표기에 그치는 경우가 빈번하다. 이는 곡선

기하의 현장 재현성을 크게 떨어뜨려 결국 설계와 시공 결과의 불일치를 유발하는 주요 원인이 된다.

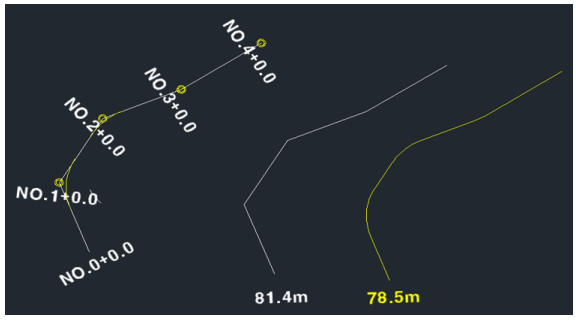


Fig. 4. Problems with traditional forest road surveys

또한 「임도설치 및 관리 등에 관한 규정」에 따르면 임도 설계 시 1:5,000 수치지형도를 DXF 또는 SHP 형식으로 활용하도록 명시하고 있다. 이에 따라 국내 산림 공간정보는 항공사진, 1:5,000 수치지형도, 현장 조사에 기반하여 구축되는 것이 일반적이다. 그러나 1:5,000 수치지형도는 등고선 및 표고점 기반으로 지형을 표현하므로, 보간을 통해 세부 표고를 산출할 수는 있으나 산악지의 국부적인 지형 기복이나 급격한 고도 변화를 정밀하게 재현하는 데에는 한계가 있을 수 있다.(Lee *et al*., 2010). 이러한 넓은 등고선 간격은 미세한 지형 변화를 충분히 반영하지 못하므로, 종단기울기, 합성기울기, 최소곡선반지름 등 「산불진화임도 시설기준」에서 요구하는 기하학적·구조적 조건을 정밀하게 검증하는 데 근본적인 제약으로 작용한다. 이 외에도 설계 노선이 변경될 때마다 현장 재조사가 필수적으로 요구되어 시간과 비용이 반복적으로 증가하는 문제가 발생한다. 더불어 설계 결과의 품질을 객관적으로 비교하거나 정량적으로 평가할 수 있는 법·제도적인 기준이 부재하여, 동일 지형 내에서도 최적의 노선을 체계적으로 도출하는 데 어려움이 따른다. 결론적으로 현행 임도 설계 체계는 정교한 설계기준을 충족하기 위해 고해상도의 3차원 지형정보를 전제로 함에도 불구하고, 실제 설계 실무에서는 일반화된 2차원 기반 지형 데이터에 의존하고 있는 구조적 한계를 가지고 있다.

2.3 국내외 적용 사례 및 선행연구

국내에서는 모바일 매핑 시스템(MMS: Mobile Mapping System), UAV LiDAR, RTK-GNSS 등 3차원 공간정보 기술이 산림 분야에 점진적으로 도입되고 있다. MMS를 활용하여 고정밀 임도망도 구축의 가능성을 보여주었으며(Choi, 2019; Park *et al*., 2023), Local UHF 기반의 RTK-GNSS는 산악지형에서도 안정적인 3차원 위치 정보 취득이 가능함을 확인하였다(Lee *et al*., 2024). 산림 공간정보의 품질 향상과 데이터 처리 효율성 증대에 기여하기 위해 UAV LiDAR를 활용하고 있다(Park *et al*., 2021; Lee, 2024). 최근에는 기후변화로 인한 재해 위험 증가에 대응하여, 임도의 구조적 안정성 확보를 위한 정밀 임도 설계 도입의 필요성도 제기되고 있다(Son *et al*., 2025).

국외에서는 UAV LiDAR 데이터를 활용한 산림 변화 모니터링, 토지피복 분류, 중심선 자동 추출 연구가 활발히 진행중이다(Wallace *et al*., 2012; Shidiq *et al*., 2017; Prendes *et al*., 2019). 최근에는 딥러닝 기법과 LiDAR-SLAM을 결합한 자동 도로 탐지 연구도 수행되어 공간 분석의 자동화 가능성을 보여주었다(Nakagomi *et al*., 2021; Even *et al*., 2021).

그러나 기존 연구의 대부분은 UAV LiDAR 데이터의 취득 정확도 검증, 지형 모델 생성, 또는 객체 자동 추출과 같은 데이터 처리 기술에 초점을 맞추고 있다. 이러한 연구들은 LiDAR 기반 공간정보 구축의 가능성을 확인하는 데에는 기여하였으나, 실제 설계 단계에서 활용되는 지형 데이터의 변화가 설계 결과에 미치는 영향을 정량적으로 분석한 연구는 제한적이다. 특히 임도 설계 과정에서 지형 데이터의 해상도 및 정확도 차이에 따라 발생하는 절·성토량 산정 결과의 변화를 체계적으로 비교·분석하거나, 3차원 데이터 기반 설계와 기존 수치지형도 기반 설계 결과의 신뢰성을 실증적으로 검증한 연구는 아직 미흡한 상황이다. 따라서 고정밀 3차원 지형 데이터를 활용한 임도 설계의 실제 효과와 설계 신뢰성을 정량적으로 평가할 필요가 있다.

2.4 임도 설계에의 적용 가능성

임도 설계는 노선 계획, 종단·횡단 기울기 결정, 곡선반지름 산정, 절·성토량 계산 등 모든 과정이 지형 정보의 정밀도에 직접적으로 의존하고 있다. 그러나 국토정보플랫폼과 브이월드에서 제공되는 1:5,000 수치지형도는 등고선 간격으로 인해 세부 설계 단계에서 지형의 미세 변화를 충분히 반영하지 못하는 구조적 제약이 존재한다. 또한 전통적인 경사계·컴파스·줄자 기반 측량은 산악지형의 장애 요소와 작업자 숙련도에 따라 측량 성과의 편차가 크게 발생하여 설계 정확도의 일관성을 확보하기에는 많은 제약사항이 따르고 있다.

반면, UAV LiDAR 기반 고해상도 DEM은 동일 대상지에서 복수 노선에 대한 경사도, 고도 변화, 절·성토량을 정량적으로 산출할 수 있는 환경을 제공한다. 접근이 제한적인 산악지역에서도 단기간에 고밀도 3차원 데이터를 확보하여 반복

적인 현장조사 없이 대안 설계 검토가 가능하다.

그러나 이러한 기술적 장점이 실제 임도 설계에서 토공량 산정의 신뢰도 향상으로 이어지는지에 대한 실증적 검증은 아직 미흡한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 UAV LiDAR 기반 정밀 지형 데이터와 기존 1:5,000 수치지형도를 활용한 설계 결과를 비교하여 고도 정확도와 절·성토량 산정 결과의 차이를 정량적으로 분석하고, 이를 통해 고정밀 3차원 지형 데이터 적용에 따른 임도 설계 신뢰도의 개선 가능성을 검토하고자 한다.

3. 실험 구상 및 방법

3.1 실험 개요

본 연구는 현행 설계 실무에서 활용되는 1:5,000 수치지형도 기반 고도 값과 UAV LiDAR 기반 정밀 지형 데이터를 동일 대상지에 적용하여, 입력 지형 데이터의 차이가 임도 설계 단계의 고도 정확도와 절·성토량 산정 결과에 미치는 영향을 비교·분석하기 위해 수행되었다. 분석에 적용한 설계 조건은 종단구배, 곡선반지름, 설계속도 등 관련 기준을 동일하게 설정하였으며, 입력 지형 데이터만을 주요 비교 변수로 두어 설계 산출물의 차이를 검토하였다.

기존 수치지형도 기반 고도 값의 경우, 국토지리정보원에서 제공하는 1:5,000 수치지형도를 DXF 형식으로 확보한 후 AutoCAD 및 QGIS를 활용하여 예정노선, 중심선, 측점 및 횡단면을 설정하였다. UAV LiDAR 기반 지형 데이터의 경우에는 동일 대상지에서 취득한 점군 데이터를 기반으로 지면점을 분류하고 DEM과 정밀 등고선을 생성하였다. 이후 두 입력 지형 데이터에 대해 동일한 노선, 동일한 측점, 동일한 계획고 및 동일한 절·성토량 산정 방식을 적용하여, 설계 방법의 차이가 아니라 입력 지형 데이터의 정밀도 차이에 따른 결과를 비교할 수 있도록 하였다.

본 연구의 세부 실험 절차는 크게 6단계로 구성하였다. 첫째, 실험 대상지를 선정하고 데이터 취득을 위한 사전 준비를 수행하였다. 둘째, 현행 설계 절차를 반영하여 기존 1:5,000 수치지형도 기반의 1차 예정노선을 수립하였다. 셋째, 비행 구역과 GNSS 기반 위치 기준을 설정한 후 UAV LiDAR 데이터를 취득하였다. 넷째, 취득된 점군 데이터를 가공하여 지면점을 분류하고, DEM 및 정밀 등고선을 생성하였다. 다섯째, 현장 조사를 통해 RTK-GNSS 기반의 측점별 3차원 위치정보를 취득하고, 이를 고도 정확도 평가의 기준값으로 활용하였다. 마지막으로, 동일 측점에서 GCP 미보정 UAV LiDAR 데이터(A), GCP 보정 UAV LiDAR 데이터(B), 1:5,000 수치지

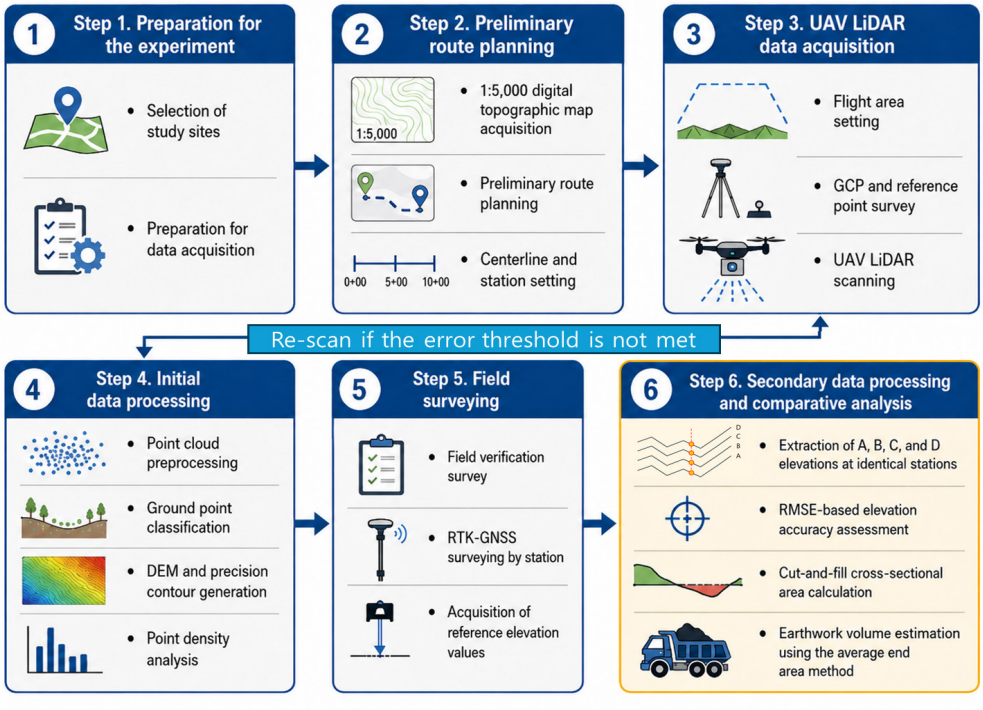


Fig. 5. Overall workflow of data acquisition, processing, and comparative analysis

형도 기반 고도 값(C), RTK-GNSS 현장 측량값(D)을 비교하여 고도 정확도를 평가하였다. 또한 고도 정확도 평가 결과를 바탕으로 GCP 보정 UAV LiDAR 기반 지형 데이터(B)를 기준 지형 데이터로 설정하고, 1:5,000 수치지형도 기반 지형 데이터(C)와 동일 설계 조건에서 측점별 절·성토 단면적을 산정한 후, 양단면 평균법을 적용하여 구간별 및 전체 절·성토량을 비교하였다.

3.2 연구 대상지 선정 및 1차 예정노선 수립

본 연구는 실제 임도 설계 및 시공이 수행될 사업지를 대상으로 하였다. 대상지는 Fig. 6과 같이 충북 영동군 양강면 산막리(a), 충북 진천군 진천읍 교성리(c), 충북 진천군 문백면 옥성리(e) 일원의 산불진화임도 및 간선임도 구간으로, 총 3개 지역을 선정하였다. Fig. 6의 (b), (d), (f)는 각 대상지인 (a), (c), (e)의 정사영상을 보여준다.(Naver map, 2026) 대상지 선정 시 다양한 임도 유형과 지형 조건을 포함함으로써 분석의 대표성과 적용 가능성을 확보하고자 하였으며, 설계 단계부터 시공 완료 이후까지의 전 과정을 모니터링하여 설계 결과와 실제 시공 결과의 비교·분석이 가능하다는 점을 고려하였다. 세 대상지는 모두 산지 임도 구간에 해당하지만, 노선 주변의 지형 조건은 서로 다른 특성을 보인다. 첫 번째 대상지인 영동군 산막리는 사면부를 따라 노선이 길게 전개되며, 중간부에 곡선부와 계곡 접근부가 함께 나타나는 지형으로, 등고선 간격이 조밀한 구간과 완만한 구간이 혼재한다. 두 번째 대상지인

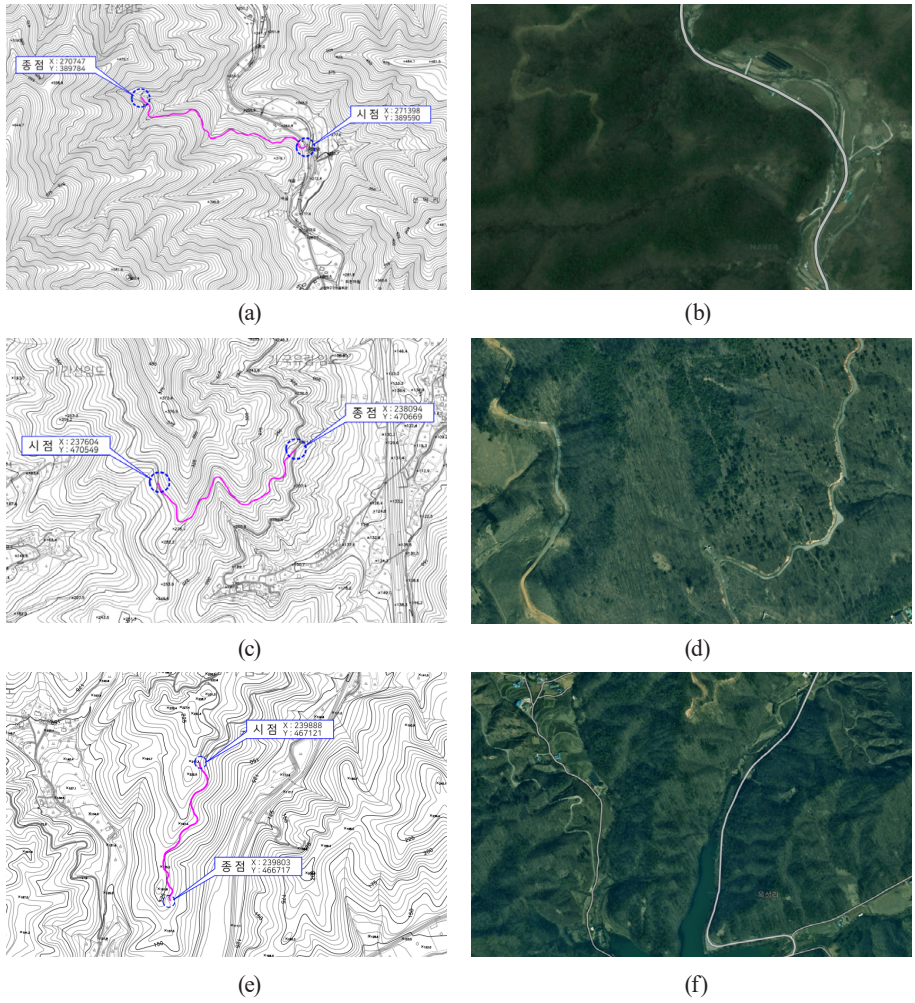


Fig. 6. Study sites and orthophotos: (a) topographic map of Sanmak-ri, Yeongdong-gun, (b) orthophoto of Sanmak-ri, (c) topographic map of Gyoseong-ri, Jincheon-gun, (d) orthophoto of Gyoseong-ri, (e) topographic map of Okseong-ri, Jincheon-gun, and (f) orthophoto of Okseong-ri

Table 1. Design parameters applied in preliminary route planning using the divider step method

Site	Design Length (m)	Design Width (m)	Applied design speed (km/h)	Applied Longitudinal Gradient (%)	Applied Minimum Curve Radius (m)
Sanmak-ri	856.00	5.00	20.00	8.00 ~ 18.00	15.00
Gyoseong-ri	857.00	5.00	20.00	8.00 ~ 18.00	15.00
Okseong-ri	500.00	5.00	20.00	8.00 ~ 18.00	15.00

진천군 교성리는 계곡부와 사면 굴곡부의 영향이 비교적 뚜렷하며, 노선이 일부 구간에서 등고선을 따라 진행하다가 중앙부에서 계곡 방향으로 굴곡되는 형태를 보이고 있다. 세 번째 대상지인 진천군 옥성리는 저수지와 연결되는 계곡성 지형의 영향을 받는 동시에, 임도 노선이 상부 능선부를 따라 설치되는 지형 조건을 가진다. 즉, 저지형 계곡부와 능선부가 함께 나타나는 지형으로, 저수지 인접 저지대에서 상부 사면 및 능선 방향으로 연결되는 고도 변화가 비교적 뚜렷하다. 따라서 세 대상지는 각각 사면부 중심 지형, 계곡·곡선부 복합 지형, 저수지 인접 능선형 지형이라는 차별적인 특성을 가지며, 다양한 산지 임도 환경에서 입력 지형 데이터의 정밀도 차이가 고도 재현성과 절·성토량 산정 결과에 미치는 영향을 비교하기에 적합한 대상지로 판단된다.

현행 임도 설계 절차를 재현하기 위해 국토지리정보원에서 제공하는 1:5,000 수치지형도를 기반 자료로 활용하여 1차 예정노선을 수립하였다. 「임도설치 및 관리 등에 관한 규정」에서는 예정노선을 당해 연도 임도노선으로 확정되기 전의 계획노선으로 정의하고 있으며, 실시설계는 「산림자원의 조성 및 관리에 관한 법률 시행규칙」 별표 2의 산림관리기반시설 설계 및 시설기준에 따라 작성한 임도 설계도서로 정의하고 있다. 또한 임도 설계 성과품은 1:5,000 수치지형도 위에 DXF 또는 Shape 파일로 제작하도록 하고, 임도중앙선, 노면 폭, 절·성토면, 구조물 등의 정보를 구분하여 작성하도록 규정하고 있다. 따라서 본 연구에서는 현행 설계 실무와 동일한 입력 자료 및 성과품 작성 체계를 반영하기 위해 1:5,000 수치지형도를 기존 설계 기준 자료로 설정하였다.

1차 예정노선은 수치지형도의 등고선 및 표고 정보를 기반으로 지형의 경사 방향과 고도 변화를 검토한 후 수립하였다. 노선 계획에는 AutoCAD와 양각기 계획법(Divider Step Method)을 적용하였으며, BP (Beginning Point)에서 EP (Ending Point)까지 등고선 간 고도차와 허용 종단구배를 고려하여 단계적으로 노선을 연결하였다. 양각기 계획법에서 적용 간격은 등고선 간 고도차를 법정 종단구배 기준으로 나누어 설정하였으며, 각 기준점에서 다음 측점의 위치를 결정한 후 곡선부 및 지형 변화 구간을 보정하였다. 측량 범위는 최종 예정노선 중심선을 기준으로 좌우 150m로 설정하여 노선 주변의 지형 분석과 대안 검토가 가능하도록 하였다. 이와 같이 수립된 1차 예정노선의 대상지별 설계 조건은 Table 1과 같다.

3.3 공간 데이터 취득 및 정밀 지형모델 구축

UAV LiDAR 점군의 절대 위치 정확도를 확보하기 위해 지상기준점(GCP: Ground Control Point) 기반 위치 보정을 수행하였다. 먼저 연구 대상지 내에 GCP를 설치하고, 각 3차원 좌표는 PPK 방식으로 후처리하여 산출하였다. 취득된 GCP 좌표는 UAV LiDAR 점군의 지오레퍼런싱 과정에서 외부 기준 좌표로 활용되었으며, DJI Terra에서 GNSS/IMU(Global Navigation satellite System / Inertial Measurement Unit) 궤적 자료와 LiDAR 관측 자료를 결합한 후 스트립 정렬 및 위치 보정을 수행하였다. 이때 GCP 보정은 단일 기준점의 표고 차이를 전체 점군에 일괄 적용하는 방식이 아니라, 현장에서 취득한 기준점 좌표를 이용하여 점군의 절대 위치를 보정하는 방식으로 적용하였다. 이후 보정된 점군은 GRS80 기반 중부원점 좌표계인 EPSG:5186로 통일하였으며, 수직 기준은 KNGeoid18 지오이드 모델을 적용하여 정표고 체계로 변환하였다.

UAV LiDAR를 활용한 지형 스캔은 DJI M300 RTK 기체와 Zenmuse L2 LiDAR 센서를 활용하여 수행하였다. 비행고도는 100m, 속도는 5m/s로 설정하였으며, 종·횡 중복률은 80% 이상으로 유지하였다. 수목이 밀집된 산림 지형의 특성을 고려하여 라이다 센서의 5-Return 반복 스캔을 적용함으로써 임도 지역 수목의 하부 지표면 포인트 취득률을 극대화하였다.

수집된 LAS 데이터는 설계 비교 분석의 기초 자료로 활용하기 위해 DJI Terra를 통해 스트립 정렬(Strip Align) 및 지오레퍼런싱(Georeferencing)을 수행한 후, LiDAR 360 소프트웨어를 이용하여 노이즈 제거 및 지표면 분리를 실시하였다. 이 과정에서는 천 시뮬레이션 필터(CSF: Cloth Simulation Filter) 기반 지면 분류 기능을 적용하였으며, Table 2의 파라미터를 사용하여 비지면점을 분리하고 지면점을 추출하였다.

Table 2. Detailed parameter settings for CSF-based ground classification

Dataset	Value
Max Building Size	20m
Max Terrain Angle	88°
Iteration Angle	20°
Iteration Distance	0.5m
Reduce Iteration Angle When Edge Length <	5m
Stop Triangulation When Edge Length <	1m
Only Key Points	Disabled
Tolerance Above	0.15m
Tolerance Below	0.15m
Grid Size	20m

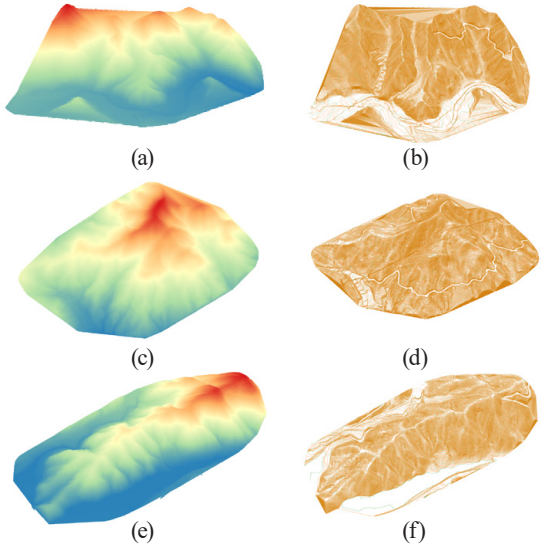


Fig. 7. 3D view about UAV LiDAR-based terrain model generation results: high-resolution DEMs of Sanmak-ri (a), Gyoseong-ri (c), and Okseong-ri (e), respectively, and (b), (d), (f) precision contour lines derived from each DEM. Red and blue in the DEMs indicate higher and lower elevations, respectively.. Green and orange contour lines represent 2.5 m and 0.5 m intervals, respectively.

추출된 데이터를 바탕으로 「수치표고모형의 구축 및 관리 등에 관한 규정」 제12조(항공레이저측량) 제1항의 점밀도 기준 충족 여부를 검토한 결과, Table 3과 같이 식생이 제거된 경우에도 평균 점 밀도가 각 대상지 별로 산막리, 교성리, 옥성리 순으로 10.01pts/㎡, 23.35pts/㎡, 18.46pts/㎡의 지표면 포인트 클라우드 데이터를 취득한 것으로 확인되었다. 최종적으로 Fig. 7과 같이 식생이 제거된 지형 모델을 기반으로 약 0.5m의 공간 해상도를 가지는 정밀 DEM을 구축하였으며, 이를 바탕으로 0.5m 간격의 고정밀 등고선을 생성하였다.

3.4 현장 검증 측량

현장 측량을 통해 취득된 각 측점별 3차원 위치정보는 고도 정확도 평가의 기준값으로 활용하였으며, 절·성토량 비교에서는 입력 지형 데이터별 산정 결과를 해석하기 위한 검증 자료로 활용하였다. 앞서 1차 가공을 통해 구축된 정밀 등고선과 DEM을 바탕으로 현장 검증 조사를 실시하였으며, 검증 대상 측점은 임도 설계 노선상에 설정된 중심선 측점으로 구성하였다. 이때의 주요 측점은 임도 설계 과정에서 BP부터 EP까지 일정 간격으로 설정되는 No.0, No.1, No.2와 같은 노선 측점을 의미한다. 측점 간격은 현행 임도 설계에서 일반적으로 적용되는 20m 간격을 기준으로 하였으며, 지형 변화가 크거나 곡선부, 구조물 설치 예상 지점 등에서는 추가 측점을 포함하였다. 이에 따라 영동군 산막리 48개 측점, 진천군 교성리 47개 측점, 진천군 옥성리 28개 측점을 현장 검증 측점으로 설정하였다. 각 측점은 Local UHF와 결합한 RTK-GNSS 방식을 활용하여 측설하였으며, 동일 측점에서 평면좌표와 표고값을 취득하였다. 현장 측량을 통해 취득된 각 측점별 3차원 위치정보는 고도 정확도 평가의 기준값으로 활용하였으며, 절·성토량 비교에서는 입력 지형 데이터별 산정 결과를 해석하기 위한 참고자료로 활용하였다.

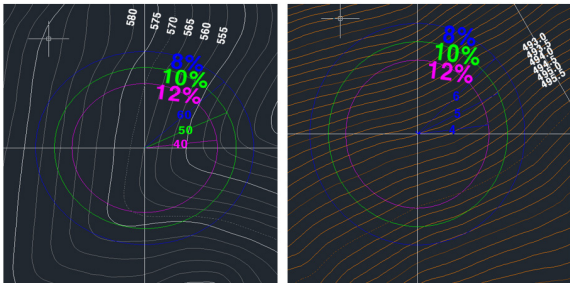
3.5 2차 데이터 가공 및 비교 분석

현장 조사가 완료된 후, UAV LiDAR 기반의 DEM과 0.5m 간격 등고선에 기존 1차 노선과 동일한 법정 기준을 적용하여 2차 예정노선을 재설계하였다. 이후 산림 임도 설계에서 활용

Table 3. Ground and vegetation point statistics for each study site

Site	Total pts	Ground pts	vegetation pts	Scanning area (m²)	Ground pts ratio (%)	Ground pts density (pts/m²)
Sanmak-ri	144,485,783	8,856,478	135,629,305	884,693.36	6.13%	10.01
Gyoseong-ri	150,621,950	23,266,373	126,755,577	996,480.35	15.51%	23.35
Okseong-ri	70,164,479	7,381,703	62,782,776	399,865.63	10.52%	18.46

되는 3차원 공간정보의 정확성을 검증하기 위해 동일 지점에 대해 현장 측량 결과, 기존 1:5,000 수치지형도, UAV LiDAR 데이터를 비교·분석하였다.



(a) (b)

Fig. 8. Comparison of (a)Existing digital topographic map and (b)Digital topographic map based on UAV LiDAR

본 연구에서는 정확도 비교를 위해 Fig. 12와 같이 네 가지 유형의 고도 데이터를 정의하였다. (A)는 GCP 보정을 적용하지 않은 UAV LiDAR 고도, (B)는 GCP 보정을 적용한 UAV LiDAR 고도, (C)는 1:5,000 수치지형도 기반 고도, (D)는 RTK-GNSS 현장 측량 고도이다.

각 데이터들의 비교는 노선측량 과정에서 설정된 각 측점의 평면좌표를 기준으로 수행하였다. (D)은 RTK-GNSS를 이용하여 설계 노선상의 각 측점에서 직접 취득한 표고값이며, (A)와 (B)는 동일 좌표계인 EPSG:5186으로 정합된 UAV LiDAR 기반 지형 데이터에서 동일 측점 좌표에 대응하는 표고값을 추출한 것이다. (C)은 DXF 형식의 수치지형도 자료를 AutoCAD 및 QGIS 환경에서 동일 측점 좌표와 중첩하여 산출하였다. 다만 대부분의 측점이 등고선상에 직접 위치하지 않았으므로, 각 측점별 횡단면도를 작성한 후 해당 횡단면에서 인접 등고선의 표고값과 측점 위치를 기준으로 선형 보간하여 표고를 산정하였다. 이를 기반으로 첫째, 동일 측점에서 현장 측량값(D)을 기준으로 UAV LiDAR 및 1:5,000 수치지형도 기반 고도값의 차이를 비교하여 데이터 간 고도 정확도를 분석하였다. 분석 절차는 동일 측점 고도 추출, 잔차 계산, 평균제곱근오차(RMSE: Root Mean Square Error)를 활용한 정량 지표 산정의 순으로 구성하였다. 둘째, 고도 비교 결과가 실제 설계 산출물에 미치는 영향을 검토하기 위해 동일 구간에 대해 GCP 보정 기반 UAV LiDAR 지형 데이터와 기존 1:5,000 수치지형도를 각각 적용하여 절·성토량을 산정하고 그 차이를 비교하였다.

분석 단위의 일관성 확보를 위해 영동군 산막리 48개 측점, 진천군 교성리 47개 측점, 진천군 옥성리 28개 측점을 기준으로 고도 정확도와 절·성토량 산정 결과를 비교하였다. 또한 고도 비교 결과가 설계 산출물에 미치는 영향을 검토하기 위해,

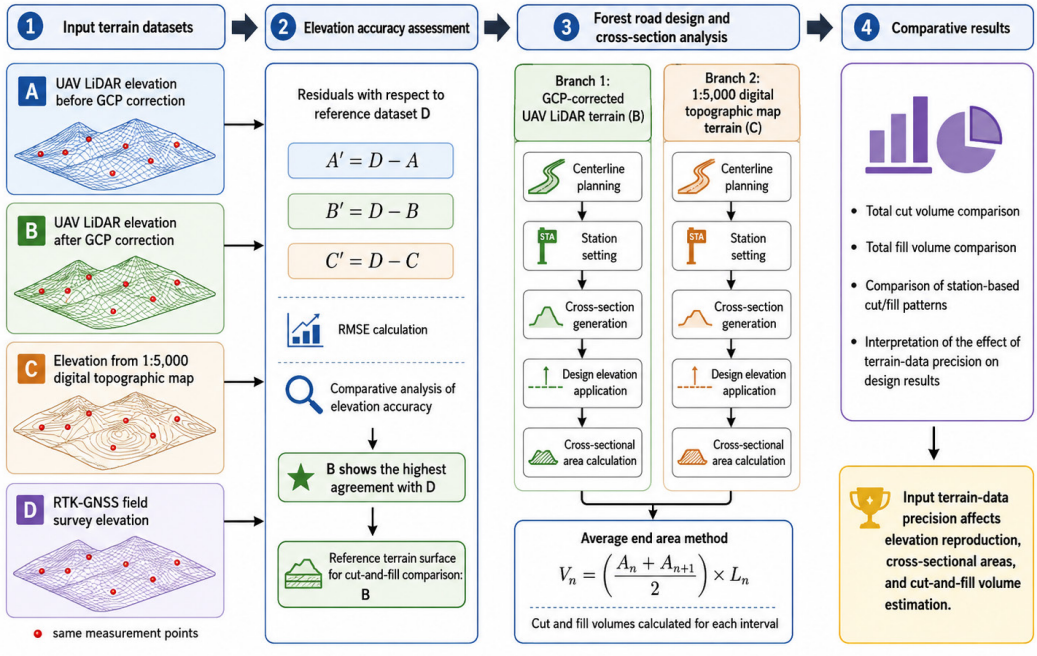


Fig. 9. Workflow of elevation accuracy assessment and cut-and-fill volume estimation

동일 구간에 대해 GCP 보정 UAV LiDAR 기반 지형 데이터와 기존 1:5,000 수치지형도 기반 고도자료를 각각 적용하여 절·성토량을 산정하고 그 결과를 비교하였다.

고도 오차의 정량적 비교는 Eq. 1과 같이 RMSE를 적용하였다. RMSE는 잔차의 제곱 평균의 제곱근으로 정의되며, 표본 기반 비교에서 분산 추정의 불편성을 고려하여 자유도 보정을 위해 n-1을 분모에 적용하였다. 여기서 n은 측점의 총 개수, yi는 n번째 D 데이터의 높이 정보 추출 값, $\hat{y}i$는 A, B, C 데이터에서 추출된 높이 정보 값으로 각각 계산하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(yi-\hat{y}i)^2} \quad (1)$$

이후 동일 노선에 대해 입력 지형 데이터에 따른 토공량 산정 결과를 비교하기 위해, 계획고와 지반고의 차이를 기반으로 절·성토량을 계산하였다. 설계 노선을 따라 일정 간격으로 횡단면을 생성하고 각 단면에서 계획고와 지반고의 높이 차이를 이용해 단면적을 산정한 후, 인접 단면 간 거리를 고려하여 체적을 적산하였다. 이때 횡단면 생성 간격은 현행 임도 설계에서 일반적으로 적용되는 20m 측점 간격을 기준으로 설정하였다. 각 횡단면에서 절토 또는 성토 여부는 계획고와 지반고의 높이 차이를 기준으로 판단하였으며, 인접한 두 단면 사이의 체적은 양단면 평균법(Average End Area Method)을 적용하여 계산하였다. 다음 Eq. (2)에서 체적 계산식 V_n의 경우, A_n과 A_{n+1}는 인접한 두 횡단면의 단면적, L_n은 두 단면 사이의 거리이다. 전체 절·성토량은 노선 전 구간에서 계산된 체적을 누적하여 산정하였다.

$$V_n = \frac{A_n + A_{n+1}}{2} \times L_n \quad (2)$$

4. 결과 및 고찰

4.1 고도 정확도 비교 분석 결과

Table 6부터 Table 8에 제시된 대상지별 고도 정확도 분석 결과는 RTK-GNSS 현장 측량 고도값(D)을 기준으로 산출한 A′=D-A, B′=D-B, C′=D-C의 잔차와 RMSE를 이용하여 비교하였다. 분석 결과, 세 대상지 모두에서 GCP 보정을 적용한 UAV LiDAR 데이터(B)의 고도값 잔차열인 B′가 가장 낮은 RMSE를 나타냈으며, 이는 B가 기준값인 RTK-GNSS 현장 측량 데이터(D)의 고도값과 가장 높은 고도 일치도를 보였음을 의미한다. 반면, 1:5,000 수치지형도 기반 데이터(C)의 고도값 잔차열인 C′는 모든 대상지에서 상대적으로 높은 RMSE를 보여, 본 연구의 측점 기반 비교 조건에서 입력 지형 데이터별 고도 재현성에 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 보다 구체적으로 살펴보면, 첫 번째 대상지인 영동군 산막리의 경우, GCP 보정을 적용하지 않은 UAV LiDAR 데이터(A)의 고도값 잔차열인 A′를 기준으로 산정한 RMSE는 ±0.30857m로 나타났으며, (B)의 잔차열인 B′의 RMSE는 ±0.20046m로 감소하였다. 이는 GCP 보정을 통해 UAV LiDAR 고도값의 수직 위치 정확도가 향상됨을 보여준다. 반면, 동일 측점에서 (C)의 잔차열인 C′의 RMSE는 ±4.59980m로 산출되어 (D)과 비교할 때 상대적으로 큰 차이를 보였다.

두 번째 대상지인 진천군 교성리에서도 유사한 경향이 나타났다. A′의 RMSE는 ±1.13088m였으나, B′의 RMSE는 ±0.18459m로 감소하였다. 이에 비해 C′의 RMSE는 ±4.03124m로 나타났다.

세 번째 대상지인 진천군 옥성리의 경우에도 A′의 RMSE는 ±0.48350m, B′의 RMSE는 ±0.18856m로 나타났으며, C′의 RMSE는 ±5.65749m로 산출되었다. 결과적으로 세 대상지 모두에서 B′가 가장 낮은 RMSE임을 확인할 수 있었다.

비교 분석 결과, 산림 지형 정보 구축 과정에서 GCP 기반 위치 보정은 UAV LiDAR기반 데이터의 수직 정확도 향상에 기여할 수 있음을 확인하였다. 또한 본 연구 대상지에서 C′는 (D)와 비교하여 4~5m 수준의 RMSE를 나타냈으며, 이는 임도 설계와 같이 지반고의 변화가 절·성토량 산정에 반영되는 업무에서 입력 지형 데이터의 선택이 설계 산출물에 영향을 미칠 수 있음을 보여준다.

Table 6. Comparative analysis of Sanmak-ri, Yeongdong-gun (Unit : m)

Point	A	B	C	D	A'(D-A)	B'(D-B)	C'(D-C)
No 0	269.09	269.00	268.88	269.260	0.170	0.260	0.380
No 1	272.41	273.46	274.48	273.412	1.002	-0.048	-1.068
No 2	275.65	275.62	277.38	275.793	0.143	0.173	-1.587
No 3	277.67	277.73	272.45	277.368	-0.302	-0.362	4.918
No 4	279.05	279.11	273.79	279.428	0.378	0.318	5.638

Point	A	B	C	D	A'(D-A)	B'(D-B)	C'(D-C)
No 5	279.66	279.65	276.21	279.629	-0.031	-0.021	3.419
No 6	284.33	285.36	282.15	285.196	0.866	-0.164	3.046
No 6+11	280.83	280.87	286.62	280.931	0.101	0.061	-5.689
No 7	283.39	283.40	286.86	283.311	-0.079	-0.089	-3.549
No 8	286.64	286.61	286.41	287.278	0.638	0.668	0.868
No 8+8	283.73	283.75	285.98	283.258	-0.472	-0.492	-2.722
No 9	288.02	288.08	282.80	288.232	0.212	0.152	5.432
No 10	289.87	289.85	287.45	289.860	-0.010	0.010	2.410
No 11	293.34	293.33	292.31	293.345	0.005	0.015	1.035
No 12	297.34	297.37	293.71	297.780	0.440	0.410	4.070
No 13	296.54	296.58	295.87	296.612	0.072	0.032	0.742
No 14	299.56	299.54	302.53	299.554	-0.006	0.014	-2.976
No 15	302.70	303.15	303.36	303.213	0.513	0.063	-0.147
No 16	303.46	303.43	306.92	303.764	0.304	0.334	-3.156
No 17	306.27	306.24	302.82	306.318	0.048	0.078	3.498
No 18	306.75	306.77	302.91	307.079	0.329	0.309	4.169
No 19	308.57	308.47	303.96	308.560	-0.010	0.090	4.600
No 20	310.61	310.57	303.75	310.586	-0.024	0.016	6.836
No 21	312.42	312.38	307.10	312.634	0.214	0.254	5.534
No 22	313.63	313.62	306.47	313.695	0.065	0.075	7.225
No 22+5	312.52	312.40	304.80	312.424	-0.096	0.024	7.624
No 23	315.75	315.62	308.40	315.706	-0.044	0.086	7.306
No 24	318.01	317.91	319.82	317.960	-0.050	0.050	-1.860
No 24+9	314.97	314.90	325.45	314.667	-0.303	-0.233	-10.783
No 25	319.10	318.93	324.66	318.900	-0.200	-0.030	-5.760
No 26	321.11	321.00	322.01	320.834	-0.276	-0.166	-1.176
No 27	323.01	322.91	326.74	323.123	0.113	0.213	-3.617
No 28	326.21	326.09	327.38	325.882	-0.328	-0.208	-1.498
No 29	327.66	327.48	326.48	327.510	-0.150	0.030	1.030
No 30	328.80	328.63	330.27	328.619	-0.181	-0.011	-1.651
No 31	330.40	330.20	338.83	330.140	-0.260	-0.060	-8.690
No 32	335.00	334.75	340.78	334.700	-0.300	-0.050	-6.080
No 33	336.96	336.74	340.33	336.749	-0.211	0.009	-3.581
No 34	337.27	337.03	345.09	337.002	-0.268	-0.028	-8.088
No 35	340.05	339.83	344.67	340.066	0.016	0.236	-4.604
No 36	342.86	342.73	346.28	342.783	-0.077	0.053	-3.497
No 37	344.76	344.67	346.98	344.458	-0.302	-0.212	-2.522
No 38	345.40	345.33	345.00	345.530	0.130	0.200	0.530
No 38+3	345.55	345.55	346.88	345.580	0.030	0.030	-1.300
No 39	350.07	350.01	356.44	350.080	0.010	0.070	-6.360
No 40	355.49	355.52	358.12	355.512	0.022	-0.008	-2.608
No 41	356.02	356.01	361.54	356.261	0.241	0.251	-5.279
No 42	358.53	358.06	365.20	357.922	-0.608	-0.138	-7.278
No 42+16	361.94	362.00	359.84	362.015	0.075	0.015	2.175
				RMSE	0.30857	0.20046	4.5998

Table 7. Summary of comparative analysis of Gyoseong-ri, Jincheon-gun (Unit : m)

Point	A	B	C	D	A'(D-A)	B'(D-B)	C'(D-C)
No 0	268.00	267.50	278.75	267.375	-0.625	-0.125	-11.375
No 1	270.17	269.53	277.71	269.586	-0.584	0.056	-8.124
No 2	272.15	271.54	277.70	271.464	-0.686	-0.076	-6.236
No 3	272.95	272.43	280.08	272.278	-0.672	-0.152	-7.802
.....							
No 42	218.29	220.41	219.05	220.195	1.905	-0.215	1.145
No 42+17	216.00	218.08	218.00	217.850	1.850	-0.230	-0.150
				RMSE	1.13088	0.18459	4.03124

Table 8. Summary of comparative analysis of Okseong-ri, Jincheon-gun (Unit : m)

Point	A	B	C	D	A'(D-A)	B'(D-B)	C'(D-C)
No 0	202.27	202.64	210.78	202.706	0.436	0.066	-8.074
No 1	201.15	201.08	210.73	200.777	-0.373	-0.303	-9.953
No 2	199.83	199.80	204.88	199.971	0.141	0.171	-4.909
No 3	197.93	197.93	200.85	197.591	-0.339	-0.339	-3.259
.....							
No 24+14	157.84	158.37	163.67	158.075	0.235	-0.295	-5.595
No 25	159.42	159.36	163.40	159.119	-0.301	-0.241	-4.281
				RMSE	0.48350	0.18856	5.65749

4.2 입력 지형 데이터에 따른 절·성토량 산정 결과 비교

앞선 4.1절의 고도 정확도 분석 결과, (B)가 (D)와 가장 높은 고도 일치도를 보였다. 다만 RTK-GNSS 현장 측량값(D)의 경우, 측점 기반 고도 검증자료로서 절·성토량 산정에 필요한 연속 지형면을 직접 구성하기에는 한계가 있다. 따라서 본 절에서는 (D)를 기준으로 한 고도 정확도 검증 결과를 바탕으로 (B)를 기준 지형 데이터로 설정하고, 현행 설계 실무에서 활용되고 있는 (C)와 동일한 설계 조건에서 절·성토량 산정 결과를 비교하였다.

절·성토량 산정은 각 측점에서 산출된 절토 및 성토 단면적을 기반으로 인접 측점 간 평균 단면적에 구간거리를 곱하는 양단면 평균법을 적용하여 수행하였다. 이에 따라 Table 9는 영동군 산막리 대상지의 절토 구간에 대한 양단면 평균법 산정 결과를 나타내며, Table 10은 동일 대상지의 성토 구간에 대한 양단면 평균법 산정 결과를 나타낸다.

Table 9에 제시된 영동군 산막리 대상지의 절토량 산정 결과, (B)에서 산출된 총 절토량은 16,508.0 ㎥로 산정되었으며, (C)에서 산출된 총 절토량은 36,958.8 ㎥로 산정되었다. 두 자료 간 절토량 차이는 20,450.8㎥로 나타났으며, (C)에서 산출된 절토량은 (B)에서 산출된 절토량의 약 2.24배에 해당하였다. 이를 총 노선 연장 856m를 기준으로 환산하면 m당 약 23.9㎥, 100m 구간당 약 2,389.1㎥의 절토량 차이가 발생한 것으로 나타났다.

Table 10에 제시된 성토량 산정 결과에서는 (B)에서 산출된 총 성토량이 6,949.4㎥, (C)에서 산출된 총 성토량이 9,580.6㎥로 산정되었다. 두 자료 간 성토량 차이는 2,631.2㎥였으며, (C)에서 산출된 성토량은 GCP 보정 UAV LiDAR 기반 지형 데이터(B)를 적용한 성토량의 약 1.38배로 나타났다. 이는 동일한 노선과 계획고 조건에서도 입력 지형 데이터의 고도 재현 차이가 절토량뿐만 아니라 성토량 산정 결과에도 영향을 미칠 수 있음을 보여준다.

Table 9. Sectional cut volumes calculated using the average end area method for Sanmak-ri, Yeongdong-gun

Section	L_n (m)	UAV LiDAR (B)			Digital Topographic Map (c)		
		Cut area (A_n, m²)	Cut area (A_{n+1}, m²)	Cut volume(m³)	Cut area (A_n, m²)	Cut area (A_{n+1}, m²)	Cut volume(m³)
No.0~No.1	20.0	0.0	19.8	198.0	0.0	27.0	270.0
No.1~No.2	20.0	19.8	59.7	795.0	27.0	45.8	728.0
No.2~No.3	20.0	59.7	51.8	1,115.0	45.8	0.0	458.0
No.3~No.4	20.0	51.8	40.8	926.0	0.0	0.0	0.0
No.4~No.5	20.0	40.8	23.1	639.0	0.0	0.0	0.0
No.5~No.6	20.0	23.1	55.8	789.0	0.0	8.0	80.0
No.6~No.7	20.0	55.8	10.3	661.0	8.0	46.3	543.0
No.7~No.8	20.0	10.3	21.1	314.0	46.3	16.3	626.0
No.8~No.9	20.0	21.1	9.6	307.0	16.3	0.0	163.0
No.9~No.10	20.0	9.6	21.3	309.0	0.0	0.4	4.0
No.10~No.11	20.0	21.3	30.4	517.0	0.4	16.6	170.0
No.11~No.12	20.0	30.4	35.3	657.0	16.6	3.3	199.0
No.12~No.13	20.0	35.3	6.1	414.0	3.3	1.2	45.0
No.13~No.14	20.0	6.1	14.3	204.0	1.2	55.7	569.0
No.14~No.15	20.0	14.3	30.1	444.0	55.7	33.0	887.0
No.15~No.16	20.0	30.1	11.5	416.0	33.0	49.1	821.0
No.16~No.17	20.0	11.5	33.9	454.0	49.1	0.0	491.0
No.17~No.18	20.0	33.9	19.4	533.0	0.0	0.0	0.0
No.18~No.19	20.0	19.4	4.6	240.0	0.0	0.0	0.0
No.19~No.20	20.0	4.6	3.5	81.0	0.0	118.6	1,186.0
No.20~No.21	20.0	3.5	3.2	67.0	118.6	92.1	2,107.0
No.21~No.22	20.0	3.2	1.4	46.0	92.1	134.8	2,269.0
No.22~No.23	20.0	1.4	7.3	87.0	134.8	160.1	2,949.0
No.23~No.24	20.0	7.3	6.8	141.0	160.1	19.8	1,799.0
No.24~No.25	20.0	6.8	7.5	143.0	19.8	77.9	977.0
No.25~No.26	20.0	7.5	5.2	127.0	77.9	12.4	903.0
No.26~No.27	20.0	5.2	10.3	155.0	12.4	43.9	563.0
No.27~No.28	20.0	10.3	30.9	412.0	43.9	68.1	1,120.0
No.28~No.29	20.0	30.9	47	779.0	68.1	26.9	950.0
No.29~No.30	20.0	47	9.5	565.0	26.9	17.1	440.0
No.30~No.31	20.0	9.5	19.3	288.0	17.1	124.8	1,419.0
No.31~No.32	20.0	19.3	35.4	547.0	124.8	101.0	2,258.0
No.32~No.33	20.0	35.4	22.1	575.0	101.0	65.0	1,660.0
No.33~No.34	20.0	22.1	28.2	503.0	65.0	93.4	1,584.0
No.34~No.35	20.0	28.2	2.1	303.0	93.4	42.8	1,362.0
No.35~No.36	20.0	2.1	2.2	43.0	42.8	37.6	804.0
No.36~No.37	20.0	2.2	16.8	190.0	37.6	25.0	626.0
No.37~No.38	20.0	16.8	0.0	168.0	25.0	0.0	250.0
No.38~No.39	20.0	0.0	0.8	8.0	0.0	67.9	679.0
No.39~No.40	20.0	0.8	59.3	601.0	67.9	100.9	1,688.0
No.40~No.41	20.0	59.3	6.4	657.0	100.9	58.8	1,597.0
No.41~No.42	20.0	6.4	1.4	78.0	58.8	62.6	1,214.0
No.42~No.42+16	16.0	1.4	0.1	12.0	62.6	0.0	500.8
Total	**856.0**	**-**	**-**	**16,508.0**	**-**	**-**	**36,958.8**

Table 10. Sectional fill volumes calculated using the average end area method for Sanmak-ri, Yeongdong-gun

Section	L_n (m)	UAV LiDAR (B)			Digital Topographic Map (c)		
		Fill area (A_n, m²)	Fill area (A_{n+1},m²)	Fill Volume(m³)	Fill area (A_n, m²)	Fill area (A_{n+1},m²)	Fill Volume (m³)
No.0~No.1	20.0	0.4	0.0	4.0	0.9	0.0	9.0
No.1~No.2	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
No.2~No.3	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0	32.9	329.0
No.3~No.4	20.0	0.0	0.0	0.0	32.9	48.0	809.0
No.4~No.5	20.0	0.0	0.0	0.0	48.0	34.1	821.0
No.5~No.6	20.0	0.0	0.0	0.0	34.1	0.0	341.0
No.6~No.7	20.0	0.0	6.6	66.0	0.0	0.0	0.0
No.7~No.8	20.0	6.6	6.9	135.0	0.0	0.0	0.0
No.8~No.9	20.0	6.9	0.5	74.0	0.0	65.5	655.0
No.9~No.10	20.0	0.5	27.8	283.0	65.5	41.2	1,067.0
No.10~No.11	20.0	27.8	0.0	278.0	41.2	4.6	458.0
No.11~No.12	20.0	0.0	0.0	0.0	4.6	7.1	117.0
No.12~No.13	20.0	0.0	4.7	47.0	7.1	7.4	145.0
No.13~No.14	20.0	4.7	0.7	54.0	7.4	0.0	74.0
No.14~No.15	20.0	0.7	0.0	7.0	0.0	0.0	0.0
No.15~No.16	20.0	0.0	2.8	28.0	0.0	0.0	0.0
No.16~No.17	20.0	2.8	0.1	29.0	0.0	27.3	273.0
No.17~No.18	20.0	0.1	4.0	41.0	27.3	58.9	862.0
No.18~No.19	20.0	4.0	1.7	57.0	58.9	65.9	1,248.0
No.19~No.20	20.0	1.7	0.7	24.0	65.9	0.0	659.0
No.20~No.21	20.0	0.7	1.1	18.0	0.0	0.0	0.0
No.21~No.22	20.0	1.1	5.8	69.0	0.0	0.0	0.0
No.22~No.23	20.0	5.8	10.5	163.0	0.0	0.0	0.0
No.23~No.24	20.0	10.5	12.1	226.0	0.0	0.0	0.0
No.24~No.25	20.0	12.1	26.6	387.0	0.0	0.0	0.0
No.25~No.26	20.0	26.6	4.9	315.0	0.0	0.3	3.0
No.26~No.27	20.0	4.9	16.3	212.0	0.3	0.0	3.0
No.27~No.28	20.0	16.3	0.0	163.0	0.0	0.0	0.0
No.28~No.29	20.0	0.0	7.1	71.0	0.0	18.5	185.0
No.29~No.30	20.0	7.1	3.8	109.0	18.5	0.0	185.0
No.30~No.31	20.0	3.8	6.8	106.0	0.0	0.0	0.0
No.31~No.32	20.0	6.8	7.4	142.0	0.0	0.0	0.0
No.32~No.33	20.0	7.4	12.5	199.0	0.0	0.0	0.0
No.33~No.34	20.0	12.5	10.4	229.0	0.0	0.0	0.0
No.34~No.35	20.0	10.4	18.5	289.0	0.0	0.0	0.0
No.35~No.36	20.0	18.5	15.8	343.0	0.0	0.0	0.0
No.36~No.37	20.0	15.8	0.0	158.0	0.0	17.6	176.0
No.37~No.38	20.0	0.0	43.3	433.0	17.6	37.8	554.0
No.38~No.39	20.0	43.3	24.1	674.0	37.8	0.0	378.0
No.39~No.40	20.0	24.1	0.4	245.0	0.0	0.0	0.0
No.40~No.41	20.0	0.4	28.2	286.0	0.0	0.0	0.0
No.41~No.42	20.0	28.2	38.1	663.0	0.0	0.0	0.0
No.42~No.42+16	16.0	38.1	2.2	322.4	0.0	28.7	229.6
Total	**856.0**	**-**	**-**	**6,949.4**	**-**	**-**	**9,580.6**

Table 11. Summary of total cut and fill volumes calculated using the average end area method for Gyoseong-ri and Okseong-ri (Unit : m^2)

Class	Gyoseong-ri		Oksung-ri	
Dataset	Total Cut (m^3)	Total Fill (m^3)	Total Cut (m^3)	Total Fill (m^3)
UAV LiDAR (B)	761.9	19.96	419.1	214.8
1:5,000 Digital Map (C)	1,982.7	62.2	1,909.5	0.0
Cut Difference	+1,220.8	+42.24	+1,490.4	-214.8
Ratio	2.6	3.1	4.6	-

Table 11은 양단면 평균법을 적용하여 산정한 교성리 및 옥성리 대상지의 총 절·성토량을 나타낸다. 교성리의 경우 (C)에서 산출된 절토량은 (B)에서 산출된 절토량의 약 2.6배로 나타났으며, 옥성리에서는 약 4.6배로 산정되었다. 특히 옥성리에서는 (B)는 성토량이 214.8㎥로 산정된 반면, (C)는 성토량이 0.0㎥로 산정되어 입력 지형 데이터에 따라 성토량 산정 여부가 달라지는 양상이 확인되었다.

4.3 입력 지형 데이터별 지반고 차이에 따른 절·성토 단면적 산정 양상 분석

앞서 확인된 절·성토량 산정 결과의 차이가 각 측점에서 어떠한 방식으로 발생하는지를 검토하기 위해, 영동군 산막리 구간을 대상으로 (B)와 (C) 간 지반고 차이가 두드러진 5개 측점을 선정하여 비교하였다. Fig. 12의 단면도에서 빨간색 지형선은 (B)의 횡단면, 파란색 지형선은 (C)의 횡단면을 나타내며, 녹색 선은 계획고를 나타낸다. 또한 녹색 음영은 절토 영역, 분홍색 음영은 성토 영역을 보여준다.

No.7 지점의 경우 계획고는 283.24m이며, (B)의 지반고는 283.40m, (C)의 지반고 286.86m로 나타났다. 두 지형 데이터 간 지반고 차이는 3.46m였으며, 이에 따라 절토 단면적은 (B) 기준 10.3㎡에서 (C) 기준 46.3㎡로 달라지는 것으로 나타났다. 또한 GCP 보정 UAV LiDAR 기반 지형 데이터(B) 기준에서는 성토 단면적 6.6㎡가 함께 산정되었으나, 1:5,000 수치지형도 기반 데이터(C)의 기준에서는 성토 단면적이 0.0㎡로 산정되었다. 이는 동일한 계획고 조건에서도 입력 지형 데이터가 제공하는 지반고 차이에 따라 절·성토 단면적 산정 양상이 달라질 수 있음을 보여준다.

No.14 지점에서도 유사한 양상이 확인되었다. 해당 지점의 계획고는 298.67m이며, (B)는 299.54m, (C)의 지반고는 302.53m로 나타나 두 자료 간 2.99m의 지반고 차이가 발생하였다. 이에 따른 절토 단면적은 (B) 기준 14.3㎡, (C) 기준 55.7㎡로 산정되었으며, 성토 단면적은 (B) 기준 0.7㎡, (C) 기준 0.0㎡로 나타났다. 이처럼 지반고 차이가 계획고와의 높이 차이에 반영되면서 단면별 절토 면적 산정 결과가 상이하게 도출되었다.

No.25 지점에서는 계획고 319.21m 조건에서 (B)는 318.93m, (C)는 324.66m로 나타났다. 두 지형 데이터 간 지반고 차이는 5.73m였으며, (B) 기준에서는 절토 단면적 7.5㎡와 성토 단면적 26.6㎡가 함께 산정된 반면, (C) 기준에서는 절토 단면적 77.9㎡, 성토 단면적 0.0㎡로 산정되었다. 이는 입력 지형 데이터에 따라 계획고와 지반고의 상대적 관계가 달라지면서 절토와 성토의 산정 비중이 달라질 수 있음을 보여준다.

No.32 지점에서는 계획고 333.19m 조건에서 (B)는 334.75m, (C)는 340.78m로 나타나 6.03m의 지반고 차이가 확인되었다. 이에 따라 GCP 보정 UAV LiDAR 기반 지형 데이터(B) 기준 절토 단면적은 35.4㎡, 성토 단면적은 7.4㎡로 산정되었으나, (C) 기준에서는 절토 단면적 101.0㎡, 성토 단면적 0.0㎡로 산정되었다.

No.39 지점에서도 계획고 351.55m 조건에서 (B)는 350.01m, (C)는 356.44m로 나타나 6.43m의 차이를 보였다. 이 지점의 경우 GCP 보정 UAV LiDAR 기반 지형 데이터(B) 기준에서는 절토 단면적 0.8㎡와 성토 단면적 24.1㎡가 산정된 반면, (C) 기준에서는 절토 단면적 67.9㎡, 성토 단면적 0.0㎡로 산정되었다.

이상의 대표 측점 분석 결과, 입력 지형 데이터 간 지반고 차이는 계획고와의 상대적 관계를 변화시키고, 그 결과 각 측점의 절토 및 성토 단면적 산정 결과에 차이를 발생시키는 것으로 나타났다. 특히 계획고와 지반고의 차이가 작거나 절토와 성토의 경계에 위치한 측점에서는 입력 지형 데이터에 따라 절·성토 산정 양상이 달라질 수 있었다. 이러한 측점별 단면적 차이는 인접 측점 간 평균 단면적과 구간거리를 이용하는 양단면 평균법의 체적 적산 과정에 반영되므로, 최종적으로 전체 절·성토량 산정 결과의 차이로 이어진다. 따라서 절·성토량 산정 결과의 차이는 단순한 총량 차이가 아니라, 각 측점에서 발생한 지반고 차이가 단면적 산정과 구간별 체적 적산

과정에 순차적으로 반영된 결과로 해석된다.

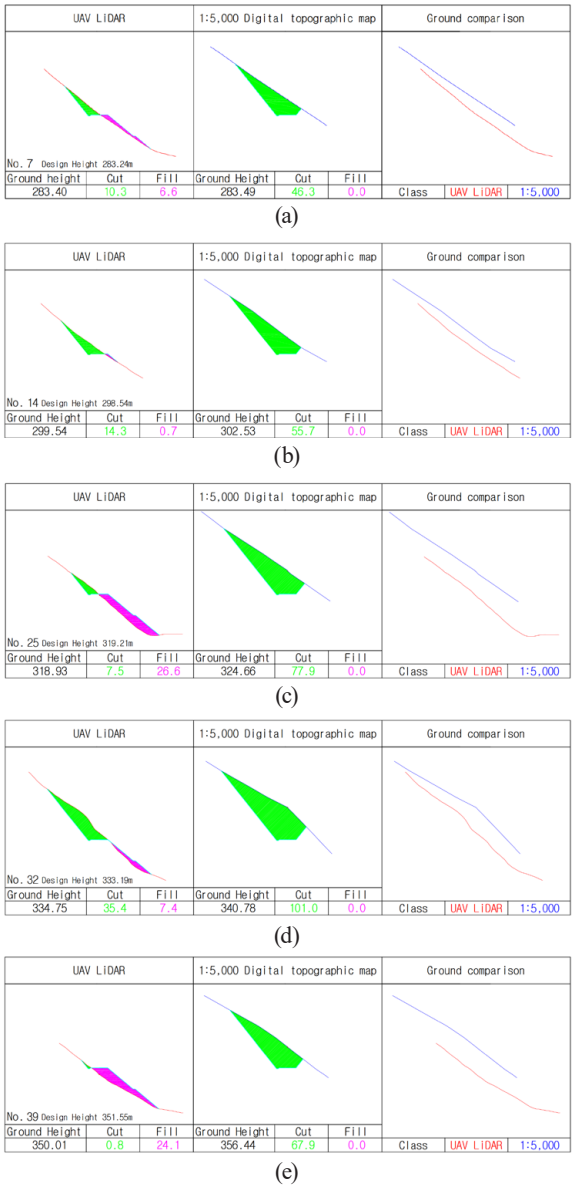


Fig. 10. Comparative analysis of cut and fill volumes according to ground level: (a) No. 7, (b) No. 14, (c) No. 25, (d) No. 32, and (e) No. 39. The red polyline indicates the UAV LiDAR-based ground cross-section, the blue polyline indicates the 1:5,000 digital topographic map-based cross-section, and the green line indicates the design elevation. The green shaded area represents cut volume, while the pink shaded area represents fill volume.

4.4 설계 신뢰성 확보를 위한 고찰

분석 결과, 입력 지형 데이터의 고도 차이는 단면 높이 차이로 반영되며, 이후 단면적 산정과 체적 적산 과정을 거쳐 토공량 산정 결과의 차이로 이어질 수 있다. 특히 절토와 성토의 경계에 위치한 구간에서는 지반고 차이에 따라 절토 또는 성토의 산정 양상이 달라질 수 있으며, 이는 입력 지형 데이터의 정밀도 차이가 임도 설계 결과에 영향을 미칠 수 있음을 보여준다.

기존 1:5,000 수치지형도는 광역적인 지형 파악과 초기 노선 계획에는 활용 가능하지만, 절·성토량 산정과 같이 세밀한 고도 변화가 직접 반영되는 설계 항목에서는 지형 기복 재현성 측면에서 한계가 나타날 수 있다. 이러한 한계는 설계 단계에서 산정된 절·성토량과 실제 현장 지형 조건 간 차이를 발생시킬 수 있으며, 결과적으로 시공 단계에서 노선 조정, 구조물 위치 검토, 절·성토 계획 수정 등 설계 조정의 필요성을 높일 가능성이 있다. 따라서 임도 설계 단계에서는 평면 위치 정확도뿐만 아니라 수직 정확도와 지형 기복 재현성을 함께 고려할 필요가 있으며, RTK-GNSS 현장 측량값과 높은 고도 일치도를 보인 GCP 보정 UAV LiDAR 기반 지형 데이터의 현장 적용성을 추가적으로 검토할 필요가 있다.

향후에는 시공 후 횡단면 실측자료, 고밀도 현장 측량자료 또는 연속 지형면 기반 체적 산정 결과와 비교하여 UAV LiDAR 기반 토공량 산정 결과의 현장 적용성을 추가적으로 검토할 필요가 있다. 또한 임도 설계와 같이 지형 기복과 체적 산정이 중요한 분야에서는 점군 밀도나 평면 정확도 중심의 평가뿐만 아니라, 설계 과정에서 체적 산정 결과의 신뢰성을 함께 검토할 수 있는 평가 기준 마련이 필요하다.

5. 결 론

본 연구에서는 UAV LiDAR 및 RTK-GNSS 기반의 고정밀 3차원 지형 데이터를 활용하여 입력 지형 데이터의 차이가 임도 설계 단계의 고도 정확도와 절·성토량 산정 결과에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 GCP 미보정 UAV LiDAR 데이터(A), GCP 보정 UAV LiDAR 데이터(B), 기존 1:5,000 수치지형도 기반 고도자료(C), RTK-GNSS 현장 측량값(D)을 동일 측점에서 비교하였으며, RTK-GNSS 현장 측량값(D)을 기준으로 고도 정확도를 평가하였다.

분석 결과, 세 대상지 모두에서 (B)가 (D)와 가장 높은 고도 일치도를 보였으며, (C)는 상대적으로 높은 RMSE를 나타냈다. 절·성토량 산정에서는 (D)와 가장 높은 고도 일치도를 보인 (B)를 기준 지형 데이터로 설정하고, 현행 설계 실무에서

활용되는 (C)와 동일한 설계 조건에서 산정 결과를 비교하였다. 그 결과, 세 대상지 모두에서 입력 지형 데이터에 따라 절토량과 성토량 산정 결과가 상이하게 나타났다. 특히 일부 측점에서는 지반고 차이에 따라 절토와 성토의 산정 양상이 달라지는 사례가 확인되었으며, 이는 동일한 노선과 계획고 조건에서도 입력 지형 데이터의 고도 재현성이 계획고와 지반고의 관계, 단면적 산정 및 체적 적산 결과에 영향을 미칠 수 있음을 보여준다.

다만 본 연구에서 활용한 (D)는 고도 정확도 평가를 위한 측점 기반 자료로 취득되었으므로, 전체 설계 구간의 연속적인 기준 지형면을 구성하는 데에는 한계가 있었다. 이러한 한계를 보완하기 위해 향후에는 시공 후 횡단면 실측자료, 현장 측량 기반 지표면 자료, 연속 지형면 기반 체적 산정 결과 및 실제 시공 토공량 자료와의 비교를 통해 UAV LiDAR 기반 토공량 산정 결과의 현장 적용성을 검증할 필요가 있다. 또한 입체격자 등 연속적인 지형 구조를 표현할 수 있는 3차원 공간분석 기법을 활용하여 설계 구간 전반의 지형 변화를 보다 세밀하게 반영한 토공량 산정 연구가 병행된다면, 임도 설계 과정에서 토공량 산정의 연속성과 신뢰성 향상에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부와 국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 : RS-2025-02317649, 국토정보 고도화를 위한 입체격자체계 적용 및 활용 기술 개발)

References

Choi, S. K., Ramirez, R. A., and Kwon, T. H. (2023), Acquisition of high-resolution topographic information in forest environments using integrated UAV-LiDAR system: System development and field demonstration, *Heliyon*, Vol. 9, No. 9. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20225.

Choi, S. M. (2019), *A Study on building a MMS-based precision forest road network for maintenance management*, Doctor's thesis, Choongnam University, Daejeon, Korea, 11p. (In Korean with English abstract)

Choi, H. Y. (2017), LiDAR Sensor Technology and Industry Trends. *The Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 66, No. 9, pp. 12-17. (In Korean with English abstract)

Even, P., Morin, S., and Dubois, F. (2021), A new LiDAR-based framework for forest road extraction in mountainous terrains, *Journal of Geomatics and Environmental Research,* Vol. 17, No. 4, pp. 99-108.

Harder, P., Pomeroy, J. W., and Helgason, W. (2020), High-resolution mapping of vegetation and ground surface using unmanned aerial vehicle LiDAR, *The Cryosphere*, Vol. 14, pp. 1919-1937. https://doi.org/10.5194/tc-14-1919-2020

Hong, S., Park, S.-Y., Lee, S., Kim, J., and Park, J.-I. (2021), Special issue on recent advancements in simultaneous localization and mapping (SLAM) and its applications, *ETRI Journal*, 43, pp. 77-579. https://doi.org/10.4218/etr2.12398

Hu, Z., Wang, L., Chen, X., Yu, K., and Liu, J. (2025), Impacts of UAV-LiDAR flight altitude and forest canopy on the estimation accuracy of understory terrain, *Journal of Mountain Science*, Vol. 22, No. 7, pp. 2485-2496. https://doi.org/10.1007/s11629-024-9436-8

Jang, M. N., Ahn, S. J., Han, S. H., Kwon, K. N., and Kwon, C. G. (2025), Impact of Forest Roads on the Mitigation of Wildfire Spread: A Comparative Analy sis of Major 2023 Wildfires in Korea and Simulation Results, *Journal of Korean Society of Forest Science,* Vol. 114, No. 4, pp. 550-557.(In Korean with English abstract)

Jeon. S. K. (2021), *Going Beyond Forest Big Data Innovation to Future Value, Monthly Software Oriented Society*, SPRi, Seoul, pp. 24-33. https://www.spri.kr/posts/view/23177?code=industry_trend

Kim, S. W., Lee, Y. J., and Lee, H. D. (2021), Applicability Investigation of the PPK GNSS Method in Drone Mapping, *Journal of the Korean Cadastre Information Association*, Vol. 23, No. 3, pp. 155-165. (In Korean with English abstract) https://doi.org/10.46416/JKCIA.2021.12.23.3.155

Korea Forest Service. (2025), *It is necessary to establish a comprehensive forest fire response strategy using forest roads!*, https://www.forest.go.kr/kfsweb/cop/bbs/selectBoardArticle.do;jsessionid=ta3Jfr00M71z9zQccxV7Zf9Fod2AcvVQp4xpKMQSaKrfvMGqlhxs1rh6ndF1AKjt.frswas02_servlet_engine5?nttId=3207444&bbsId=B

BSMSTR_1036&pageUnit=10&pageIndex=1&searchtitle=title&searchcont=&searchkey=&searchwriter=&searchWrd=&ctgryLrcls=&ctgryMdcls=&ctgrySmcls=&ntcStartDt=&ntcEndDt=&mn=NKFS_04_02_01&orgId=(last date accessed: 11 March 2026).

Korea Forest Service. (2024), *Design and Facilities Standards for Forest Management Infrastructure, Korea Forest Service*, Daejeon, 14p.

Korea Forest Service. (2020), *Strengthen the Function of Absorbing forest carbon and the Competitiveness of the Forest Industry Through Expansion of New Forest Construction and Systematic Management*, https://www.forest.go.kr/kfsweb/cop/bbs/selectBoardArticle.do;jsessionid=42g8Hh7dIun1JI6IBfOgBd7iKZx1kZCob32S9lMFqmM36NEaVmidr1ZRcdwa5vHu.frswas01_servlet_engine5?nttId=3153081&bbsId=BBSMSTR_1036&pageUnit=10&pageIndex=1&searchtitle=title&searchcont=&searchkey=&searchwriter=&searchWrd=&ctgryLrcls=&ctgryMdcls=&ctgrySmcls=&ntcStartDt=&ntcEndDt=&mn=NKFS_04_02_01&orgId=(last date accessed: 28 February, 2026).

Korea Forest Service, (2016), *[Forest Resources]Forest Road Construction and Management Guidelines*, https://www.forest.go.kr/kfsweb/cop/bbs/selectBoardArticle.do;jsessionid=SjDemrRFjPjTY14lV5JWLnMacVoZ179cTWR9Q30VmQ1eRxT9yiea2gPl1kwGrFqB.frswas02_servlet_engine5?nttId=3089408&bbsId=BBSMSTR_1069&pageUnit=10&pageIndex=2&searchtitle=title&searchcont=&searchkey=&searchwriter=&searchWrd=%EC%82%B0%EB%A6%BC%EB%B3%91%ED%95%B4%EC%B6%A9+%EB%B0%A9%EC%A0%9C&ctgryLrcls=&ctgryMdcls=&ctgrySmcls=&ntcStartDt=&ntcEndDt=&mn=NKFS_06_09_01&orgId=(last date accessed: 03 March 2026).

Lee, H. J., Koo. D. S., and Park, C. H. (2010), Advanced National Base Map by Using High-REsolution Digital Aerial Photograph, *Journal of the Korean society for geospatial information science*, Vol. 18, No. 1, pp. 135-143. (In Korean with English abstract)

Lee, K. H. (2024), A Study on the Efficiency of Cadastral Survey in Forest Areas Based on UAV LiDAR, *Journal of Cadastre & Land Information*, Vol. 54, No. 1, pp. 5-17.(In Korean with English abstract)
https://doi.org/10.22640/lxsiri.2024.54.1.5

Lee, K. H., Kwon, S. H., and Baek, C. Y. (2024a), A Study on Cadastral Surveying of Forest Areas Using GNSS Methods, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 42, No. 4, pp. 253-264. (In Korean with English abstract)
https://doi.org/10.7848/ksgpc.2024.42.4.253

Lee, K. H., Lee, S. W., Yu, I. J., and Lim, S. Y. (2024b), A Study on the Institutional Limitations of the National Digital Twin Pilot Project and Proposing Improvement Measures, *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science*, Vol. 32, No. 2, pp. 67-82. (In Korean with English abstract)
https://doi.org/10.7319/kogsis.2024.32.2.067

Lee, K. W. and Park, J. K, (2023), Utilization of Forest Geospatial Information for Forest Road Design, *Proceedings of 2023 KAIS Autumn Conference*, KAIS, 14-16 December, Korea, pp. 15-16.

Lovrinčević, M., Papa, I., Janeš, D., Hodak, L., Pentek, T., and đuka, A. (2025). New Possibilities of Field Data Survey in Forest Road Design. *Sensors*, Vol. 25, NO. 13, 4192.
https://doi.org/10.3390/s25134192

Ministry of Land Infrastructure and Transport, (2024), *National Digital Twin Platform Bilingual Leaflet (Korean-English)*, https://www.vworld.kr/v4po_brddata_s002.do?pageIndex=1&bodIde=&fileCheck=Y&repyCheck=Y&searchCondition=3&searchKeyword=&searchOrder=1&brdIde=28020(last date accessed: 16 March 2026).

Nakagomi, H., Sato, T., and Matsuo, S. (2021), Application of U-Net and LiDAR-SLAM for forest road detection and analysis. *International Journal of Advanced Forest Technology*, Vol. 19, No. 2, pp. 154-167.

National Institute of Forest Science, (2025), *The effect of forest fire response proven through domestic and international research, needs to be continuously expanded!*, https://nifos.forest.go.kr/kfsweb/cop/bbs/selectBoardArticle.do%3Bjsessionid%3DL82S4ssTBHKk18bpCMp1EYsLdYcUCE7FwKjWd2inNO3dNQvwlBH6mKb2lBdDQrg6.frswas01_servlet_engine5?bbsId=BBSMSTR_1036&ctgryLrcls=CTGRY150&ctgryMdcls=

&ctgrySmcls=&mn=UKFR_03_03_01&ntcEndDt=&ntcStartDt=&nttId=3207026&orgId=kfri&pageIndex=4&pageUnit=10&searchWrd=&searchcont=&searchkey=&searchtitle=title&searchwriter=

Naver Map, Seongnam, https://map.naver.com/ (last date accessed: 10 Dec 2025).

Novatel, Calgary, https://docs.novatel.com/Waypoint/Content/Utilities/RTCM_Version_3.htm (last date accessed: 28 February 2026).

Park, J. and Lee, K. (2023), Generation of Forest Road Construction Management Data Using Mobile Mapping System. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 24, No. 6, pp. 371-376. https://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.6.371

Park, J. and Lee, K. (2021), Pointcloud Density Analysis for Data Acquisition Condition for Utilization of UAV LiDAR, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 22, No. 7, pp. 131-136. (In Korean with English abstrat) https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.7.131

Remzi. E., (2023), Comparative us of PPK-integrated close-range terrestrial photogrammetry and a handheld mobile laser scanner in the measurement of forest road surface deformation, *Measurement*, 206. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112322.

Shidiq, I. P. A., Rahman, S. M., and Sato, Y. (2017), Vegetation classification using UAV-LiDAR data, *Journal of Forest Science and Technology*, Vol. 14, No. 2, pp. 45-57.

Son, J. Y., Jeong, E. J., Park, S. H., Woo, H. T., Youn, Dong. Ho., and Lee, M. S., (2025), A Study on Improving Policies and Standards for Disaster-Prevention Forest Roads : A Survey of Expert Perceptions, *International Conference of KSFE-FETEC 2025*, KEFE, 30 June-2 July 2025, Seoul, South Korea p.116-116.

Tersus GNSS, Box Hill, https://www.tersus-gnss.com/tech_blog/what-is-rtcm-why-does-your-rtk-firmware-updating-matter (last date accessed: 2 March 2026).

Tomaštik, J., Mokroš, M., Surovy, P., Grznarova, A., and Merganič, J. (2019), UAV RTK/PPK Method-An Optimal Solution for Mapping Inaccessible Forested Areas? *Remote Sensing*, Vol. 11, No. 6. https://doi.org/10.3390/rs11060721

Wallace, L. O., Lucieer, A., Watson, C., and Turner, D. (2012), Development of a UAV-LiDAR system for forest mapping. *Remote Sensing*, Vol. 4, No. 6, pp. 1519-1543. https://doi.org/10.3390/rs4061519

Wang, J. A., Ma, H. T., Wang, C. M., and He, Y. J. (2018), Fast 3D reconstruction method based on UAV photography, *ETRI Journal*, Vol. 40, No. 6, pp. 788-793. https://doi.org/10.4218/etrij/2017-0298