

Research Article

## 산악지형 드론 라이다 데이터 점군 분리를 위한 CSF 알고리즘 적용에 관한 연구

구 슬<sup>1)</sup> · 임언택<sup>1)</sup> · 정용한<sup>1)</sup> · 석재욱<sup>2)</sup> · 김성삼<sup>2)\*</sup>

### Study on Applicability of Cloth Simulation Filtering Algorithm for Segmentation of Ground Points from Drone LiDAR Point Clouds in Mountainous Areas

Seul Koo<sup>1)</sup> · Eon Taek Lim<sup>1)</sup> · Yong Han Jung<sup>1)</sup> · Jae Wook Suk<sup>2)</sup> · Seong Sam Kim<sup>2)\*</sup>

**Abstract:** Drone light detection and ranging (LiDAR) is a state-of-the-art surveying technology that enables close investigation of the top of the mountain slope or the inaccessible slope, and is being used for field surveys in mountainous terrain. To build topographic information using Drone LiDAR, a preprocessing process is required to effectively separate ground and non-ground points from the acquired point cloud. Therefore, in this study, the point group data of the mountain topography was acquired using an aerial LiDAR mounted on a commercial drone, and the application and accuracy of the cloth simulation filtering algorithm, one of the ground separation techniques, was verified. As a result of applying the algorithm, the separation accuracy of the ground and the non-ground was 84.3%, and the kappa coefficient was 0.71, and drone LiDAR data could be effectively used for landslide field surveys in mountainous terrain.

**Keywords:** Mountainous area, Landslide, Cloth simulation filtering, Drone LiDAR

**요약:** 드론 라이다(Drone LiDAR)는 산지의 비탈면 정상부나 접근이 불가능한 사면에 대해 근접 조사가 가능한 첨단 측량 기술로 산악지형에서 현장조사를 위한 활용이 높아지고 있다. 드론 라이다를 활용하여 지형 정보를 구축하기 위해서는 취득된 포인트 클라우드로부터 지면과 비지면 점들을 효과적으로 분리하는 전처리 과정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 상업용 드론에 탑재된 항공 라이다를 이용하여 산악지형의 점군 자료를 취득하고, 지면분리 기법 중 하나인 cloth simulation filtering (CSF) 알고리즘을 적용하고 정확도를 검증하였다. 알고리즘을 적용한 결과, 지면과 비지면에 대한 분리 정확도는 84.3%, kappa 계수는 0.71로 나타났고 드론 라이다 데이터를 산악지형의 산사태 현장조사에 효과적으로 활용할 수 있음을 확인하였다.

**주요어:** 산악지형, 산사태, 식물 시뮬레이션 필터링, 드론 라이다

Received August 29, 2023; Revised September 20, 2023; Accepted October 4, 2023; Published online October 31, 2023

<sup>1)</sup> 국립재난안전연구원 재난원인조사실 연구원(Researcher, Disaster Scientific Investigation Division, National Disaster Management Research Institute, MOIS, Ulsan, Republic of Korea)

<sup>2)</sup> 국립재난안전연구원 재난원인조사실 시설연구사(Researcher officer, Disaster Scientific Investigation Division, National Disaster Management Research Institute, MOIS, Ulsan, Republic of Korea)

\* Corresponding author: Seong Sam Kim (sskim73@korea.kr)

Copyright © 2023 by The Korean Society of Remote Sensing. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서론

예측할 수 없는 기후변화로 인하여 한반도를 비롯해 전 세계적으로 이상기후 현상이 빈번하게 발생하고 있다. 산악 지역이 전 국토의 70%를 차지하고 있는 우리나라의 경우 기후변화로 인해 여름철 강수량 증가가 뚜렷하며 지역별 편차가 크고 특정 지역에 많은 비가 내리는 국지성 집중호우가 증가하고 있다. 이러한 강우·강도의 증가에 따른 산사태 피해는 지속적으로 발생하고 있으며 최근 자연재해 중 주요 피해 요인이 되고 있다(Korea Forest Service, 2023). 특히 2023년 7월 발생한 집중호우로 인한 산사태로 대규모 인명피해(사망 24명, 부상 16명)가 발생하였으며, 이와 같은 산사태 피해로 인한 대국민 안전 확보를 위해 국가적 차원에서의 다양한 대응 방안들이 논의되고 있다.

산사태와 같은 산악지형의 재난 현장 조사는 일반적으로 간이식 측측 장비와 인력에 의한 육안 현장조사로 수행되었으며, 이러한 방법은 관측 정확도와 조사 효율성이 낮을 뿐만 아니라 현장조사자의 안전 확보에 대한 문제점도 제기되고 있다. 이처럼 산악지형에서의 산사태 피해 현장조사를 수행하는 데 있어 보다 효율적이고 과학적인 관측 기법 도입의 필요성이 증대되고 있다.

국립재난안전연구원에서는 산사태 피해 현장에서의 조사 효율성과 현장 관측 정확도를 확보하기 위해 지상 라이더 측량을 활용(Shin et al., 2019)하거나 소형 드론과 지상 라이더를 활용하여 정량적인 관측을 통해 급경사지 재해위험성을 평가하는 방식(Kim et al., 2020)을 제안하였다. 그러나 지상 라이더의 시야각 제약으로 인해 스캐닝(scanning)이 불가능한 급경사지 폐색 지형이나 산악지형의 정상부에 대한 관측과 3차원 모델의 품질 확보를 위해 항공 라이더 드론 기술을 함께 융합하는 연구의 필요성이 제기되었다.

드론에 탑재된 광학 카메라나 라이더 스캐너를 활용하여 수집된 자료로부터 생성된 3차원 점군자료나 정사영상과 같은 정밀한 맵핑(mapping)이 가능하다. 이러한 성과물을 활용하여 산사태 발생 구간의 면적과 유출된 토사의 체적 산정, 암반 및 낙석의 크기 측정 등 세부적인 피해현황 조사를 현장에 나가지 않고도 내입으로 분석이 가능하다(Shin et al., 2017). 특히 붕괴된 사면의 경사 관측이나 토사 유출 거리와 같은 산사태 피해지역의 지

형 분석에 필요한 정밀한 수치표고자료(digital elevation model, DEM)를 생성하기 위해서는 지면과 비지면점들을 분류하는 필터링(filtering) 과정이 중요하다. Yoon et al. (2006)은 산림지역 라이더 자료의 표고를 이용하여 수종 및 밀도에 따른 라이더 자료의 수직적 분포 특성을 분석함으로써 수치표고모델을 제작하고 포인트 클라우드의 지면과 비지면을 분리하는 방안을 제안하였다.

Hwang and Lee (2011)은 산림지형 모델링을 위한 항공 라이더 데이터의 지면점 필터링 비교분석과 정확도 개선 연구를 수행하여 지형이 복잡하거나 다른 형태의 지형이 포함된 영역에서는 필터링 기법 간에 상호 보완적인 특성을 보이며 필터링 알고리즘 성능에 많은 영향을 주고 있음을 확인하였다. Kim et al. (2012)은 산림지역, 건물과 산림이 공존하는 지역, 도시지역에 대해 라이더 자료의 지면과 비지면 분류 알고리즘 중 ATIN (adaptive triangulated irregular network), ETEW (elevation threshold with expand window), PM (progressive morphology), PC (perspective center based filtering algorithm)를 적용하여 지면점을 추출한 후 정성적, 정량적인 분석을 수행하고 지역적 특성을 고려하여 최적의 필터링 알고리즘을 선정하는 방안을 제시하였다. Guiterrez et al. (2020)은 산사태 전·후 지역을 대상으로 the progressive triangulated irregular network densification, cloth simulation filtering (CSF), multiscale curvature classification 알고리즘을 적용하여 적합한 매개변수를 도출하였다. 또한 3차원 포인트 클라우드를 이용하여 지면과 비지면점을 분리하였으며, 산사태 경사면의 부피 변화를 정량적으로 분석하였다.

도심지형은 지면의 경사가 비교적 평평하거나 그 변화가 단순하지만 산악지형의 경우 경사의 변화가 심하고 복잡하다. 이러한 특징은 높이 차나 경사를 이용하여 객체를 분류하는 필터링 과정에 많은 영향을 미친다(Choi, 2013). 또한 식생이 울창한 산림지역에서는 수목의 잎과 줄기 등에 의해 시야각(field of view)이 차폐되어 라이더 레이저 신호가 지면에 도달하기 힘들며, 이에 따라 수목 아래에 있는 지면의 점 자료의 밀도가 낮아질 수 있다. 본 연구에 사용된 DJI Zenmuse L1의 경우, 레이저 신호가 산악지역의 수목을 관통하여 지면에 도달하기까지 삼중반사(third returns)까지 가능하지만 스캔 거리나 식생의 밀도에 따라 포인트 클라우드 자료의 밀도

나 품질이 결정되므로 일반적인 필터링 알고리즘을 적용하기가 쉽지 않다.

따라서 본 논문에서는 2023년 7월에 발생한 산사태 현장에서 취득된 드론 라이다 포인트 클라우드에 다양한 지면 필터링 알고리즘 중 CSF 알고리즘을 적용하여 정확도를 검증하였다. 기존의 지면 필터링 알고리즘은 지면과 비지면 점들 간의 분리 정확도를 높이기 위해 여러 복잡한 매개변수를 고려해야 하지만 CSF 알고리즘의 경우 4개의 매개변수와 2개의 임계치 입력을 통해 빠르고 효과적으로 지면을 추출할 수 있는 강점이 있다. 전체 정확도(overall accuracy)와 kappa값을 이용한 필터링 정확도 평가를 통해 산악지형의 산사태 현장뿐만 아니라 신속을 요하는 재난원인피해 조사·분석 시 공간정보 구현을 위한 기초자료로 높은 활용도가 기대된다.

## 2. 연구 이론 및 방법

### 2.1. 연구 이론

지면분리 기술은 라이다 포인트 클라우드의 지형학적 정보를 활용하여 지면과 비지면 객체를 분리하는 기술로 지난 30년 동안 수많은 종류의 기술이 개발되었다(Chen et al., 2017). 라이다 자료에서 지면과 비지면을 분리하는 필터링 과정을 거쳐 수치표고모델(DEM)을 생성하거나 지상의 객체를 제거할 수 있다(Fig. 1).

다양한 지면분리 알고리즘 중 CSF 알고리즘은 3D 컴퓨터 그래픽 분야에서 사용되는 식물 시뮬레이션 기술을 라이다 데이터의 지면 필터링에 적용할 수 있도록 고안된 방법이다(Lee et al., 2020). Zhang et al. (2016)은 상

하 반전시킨 포인트 클라우드에 뺏겨진 재질의 직물을 덮는다고 가정한다면 그 직물이 반전된 DEM의 형태가 될 것이란 점에 착안하여 CSF 알고리즘을 제안하였다. 이 CSF 알고리즘에서는 포인트 클라우드를 반전시킨 후 미리 정의된 격자의 크기를 적용하여 직물을 구성할 입자 수를 결정한다. 라이다 데이터의 가장 큰 높이 값을 이용하여 초기 직물 입자들의 위치를 정의한 후, 각 입자들은 높이 변화가 안정될 때까지 중력과 내력에 의해 하강과 상승을 반복한다. 최종 위치에 도달한 직물 surface까지의 수직 거리가 지정된 임계값보다 작으면 대상점은 지면점으로 분류된다(Fig. 2).

CSF 알고리즘은 matrix laboratory (MATLAB) 스크립트 및 범용 소프트웨어인 CloudCompare plug-in으로 활용할 수 있으며(CloudCompare, 2019), 다양한 지면분리 기술 중에서 사용자의 접근성, 편의성이 높은 기술로써 성능을 인정받고 있다(Polat and Uysal, 2015). 특히 CSF 알고리즘은 드론 데이터로부터 DEM을 추출하는데 좋은 성능을 보인다(Yilmaz et al., 2018). CSF 알고리즘은 6개 매개변수를 설정해야 한다. 기본적인 매개변수로 grid resolution (GR), time step (dT), rigidity index (RI), steep slope (ST)이 있으며 지상점의 식별을 위한 임계값 distance threshold (hcc), height threshold (hcp)가 있다. 첫 번째, GR은 인접 입자 사이의 수평 거리를 나타낸다. 이 값은 점의 밀도와 지형의 복잡성을 고려하여 경험적으로 결정된다. 두 번째, dT는 중력에 의해 입자가 상호작용하는 변위를 조절하는 값으로 dT=0.65의 고정 값으로 사용할 수 있다(Zhang et al., 2016). 세 번째, RI는 지형 유형을 나타내는 시뮬레이션 직물의 강성을 나타낸다. RI=1은 높고 가파른 경사, RI=2는 가파른 경사 또는 계

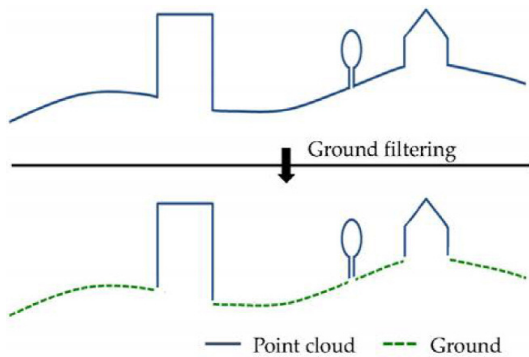


Fig. 1. Ground filtering in LiDAR surveying (Kim, 2020).

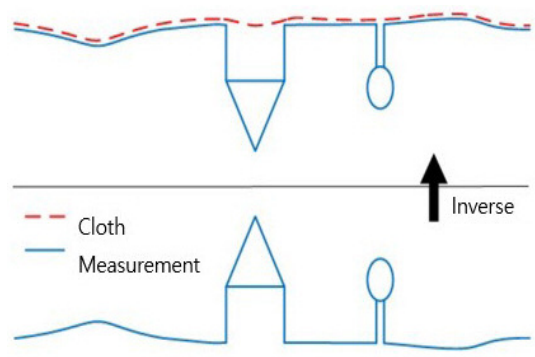


Fig. 2. Process of CSF (Source: Zhang et al., 2016).

단식 경사, RI=3은 평평한 지형 또는 완만한 경사를 의미한다. RI 값이 클수록 높은 강성의 직물을 의미한다. 네 번째, ST는 급경사에 적합 요인으로 급경사 처리에 대한 후처리가 필요하지 여부를 나타내는 값이다. 산악 지형의 지면 분리를 위해서는 true, 가파르지 않거나 평지에 대한 지면 분리는 false 값을 선택한다. 다섯 번째, hcc는 라이다 점의 분류를 결정하는 직물과 라이다 점 사이의 거리 임계 값을 의미한다. 일반적인 지면 필터링을 위한 hcc=0.5 m이다. 가파른 경사에서 지면분리의 경우 hcc는 최소 식생의 높이를 나타낸다. 그러므로 이 연구에서는 낮은 높이의 식생으로 인해 더 작은 값을 사용했다. 여섯 번째, hcp는 비지면 점과 인접한 지면 점 간의 높이 차이를 의미하며, 본 논문에서는 Zhang et al. (2016) 연구에서와 동일한 조건인 hcp=0.3 m로 입력하였다(Zhang et al., 2016).

## 2.2. 연구 활용장비

국립재난안전연구원에서는 재난원인조사를 위해 2022년부터 드론항공측량시스템을 도입하여 활용하고 있다. 이 드론항공측량시스템은 real time kinematic (RTK) 기능을 갖춘 드론(DJI Matrice 300)과 광학카메라(Zenmuse P1), LiDAR(Zenmuse L1), 다중분광카메라(RedEdge-P) 등의 센서와 데이터를 처리할 수 있는 소프트웨어를 포함하고 있다(Kim et al., 2022).

본 연구에서는 DJI Matrice 300 드론과 Livox Avia LiDAR 센서가 탑재된 Zenmuse L1을 활용하였다. Matrice 300

의 기체 중량은 6.3 kg, 최대 17 m/s로 비행이 가능하다. 비행시간은 최대 55분으로 RTK 기능을 사용할 경우 호버링(hovering) 정확도는 수평·수직 ±0.1 m로 나타난다. LiDAR 센서의 감지 범위는 단일반사의 경우 최대 450 m, 다중반사의 경우 190 m까지 스캔할 수 있다. 스캔모드는 비반복 스캔과 반복 스캔모드의 두 가지 모드 중 선택할 수 있으며, 단일반사에서 삼중반사까지 리턴 수를 선택하여 스캐닝 할 수 있다.

LiDAR 센서는 스캐너와 관성측정장치인 inertial measurement unit (IMU) 구성된다. 객체에 대한 3차원 좌표를 갖는 포인트 클라우드를 생성하기 위해 스캐너는 펄스 레이저(pulsed laser)를 쏘아 주변의 사물에 부딪힌 후 되돌아오는 시간을 측정하여 계산한다. IMU는 가속도 센서, 각속도 센서, 지자기 센서로 구성된다. 또한 실시간으로 스캐너의 자세 정보를 기록하고 Matrice 300 RTK로 받는 신호 정보와 함께 포인트 클라우드의 3차원 좌표를 결정한다. 이와 같이 드론 라이다를 이용하여 기존에 지상 라이다만을 사용하여 현장조사를 시행했을 때 장애물 등에 의해 생기는 음영지역이 해소될 수 있다. 또한 산지의 비탈면 정상부나 접근이 불가능한 사면에 대해 근접 조사와 지형 변화를 정량화 하기 위한 분석이 가능할 것으로 판단된다.

## 2.3 연구 방법 및 절차

논문의 연구 대상지는 경상북도 예천군 효자면 백석리 피해현장 지역이다. 2023년 7월 집중호우로 인한 토

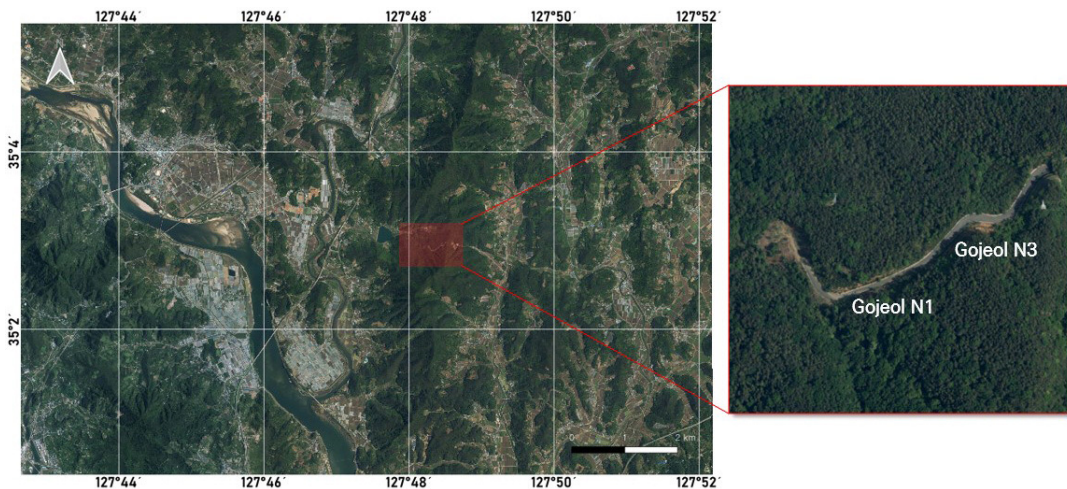


Fig. 3. Study area position and landslide occurrence section.



사유출로 대규모 인명피해가 발생한 곳으로 국립재난 안전연구원에서는 드론 광학카메라와 라이더를 이용하여 붕괴지점, 붕괴양상 등 피해원인조사를 실시하였다. 대상지는 경사의 방향이 한 방향으로 일정하게 나타나며 수목이 우거진 지역과 인근 과수원 작물로 인한 낮은 높이의 식생, 건물 등이 고루 분포되어 있다. 연구 데이터의 공간적 범위는 Fig. 3과 같다.

본 연구에서는 접근 불가능한 산악지형의 산사태 피해현장을 대상으로 사면의 상부나 급경사의 단면, 주변 환경의 전반적인 조사를 실시하기 위해 DJI Matrice 300 드론과 Livox Avia LiDAR 센서가 탑재된 Zenmuse L1로 스캐닝하여 드론 항공 라이더 포인트 클라우드를 취득하였다. 포인트 클라우드 자료의 전처리 과정으로 statistical outlier removal (SOR) 공간 필터를 적용하여 라이더 원시 데이터에 기록되어 있는 모든 반사 값들 중 먼지나 오류로 존재하는 오류를 제거한다. 또한 데이터의 정량적 평가를 위한 참조자료로써 포인트 클라우드를 수동으로 분류한다. 지형 변화를 정량화 하기 위해 CSF 알고리즘을 적용하고 매개변수를 지형의 조건에 맞게 조정한다. RI=1 (높고 가파른 경사, ST=True) 값으로 고정하고 나머지 두 개의 매개변수(GR, hcp)에 대해 GR=0.1, hcp=0.2부터 더블링(doubling)하여 매개변수의 최적 조건을 도출하였다.

### 3. 연구결과

#### 3.1. 연구자료 전처리 결과

연구 대상지인 산사태 피해현장의 넓이는 130,551 m<sup>2</sup>, 길이 833.581 m이며 고도는 최소 633.033 m, 최고 486.893 m로 원시 데이터 포인트 클라우드 수는 24,017,294점이다. 모든 센서는 특성상 측정 시 에러가 존재한다. 라이더 원시 데이터의 경우, 모든 반사 값이 기록되어 탐지 물체가 존재하지 않더라도 먼지나 오류로 인한 아웃리어(outlier)가 생성된다. 따라서 연구를 수행하기 전, 원시 데이터에 존재하는 아웃리어를 제거하기 위해 통계학적 정보를 이용한 SOR 필터를 적용하였다. 전체 데이터에서 0.5%의 데이터가 아웃리어로 간주되어 정제된 전체 포인트 클라우드 수는 23,897,805점이다. 또한 데이터의 정량적 평가를 위한 참조자료로 라이더 후처리 프로그램 RiSCAN PRO를 이용하여 포인트 클라우드를 수동 분류하였으며 지면은 10,528,505점, 비지면은 13,369,300점이었다.

#### 3.2. Cloth Simulation Filtering 알고리즘을 이용한 지면 필터링

본 연구에서는 CSF 알고리즘의 매개변수를 RI=1 (높고 가파른 경사, ST=true) 값으로 고정하고 GR=0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6, hcp=0.2, 0.4, 0.8, 1.6 3.2까지 더블링하여 최적의 매개변수를 도출하고자 하였다(Table 1). 그 결과 인접 입자간 수평 거리를 나타내는 GR의 경우 0.8 m 이

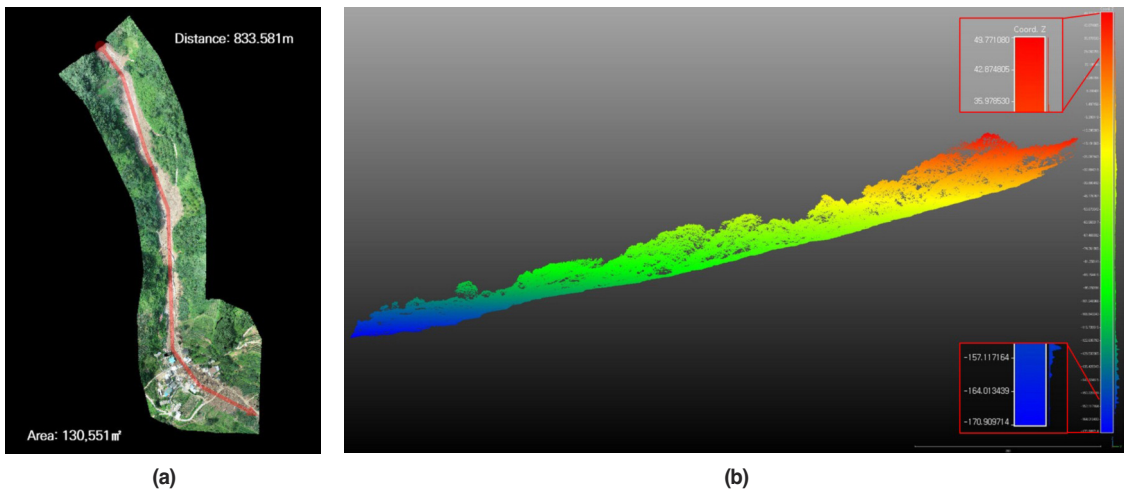
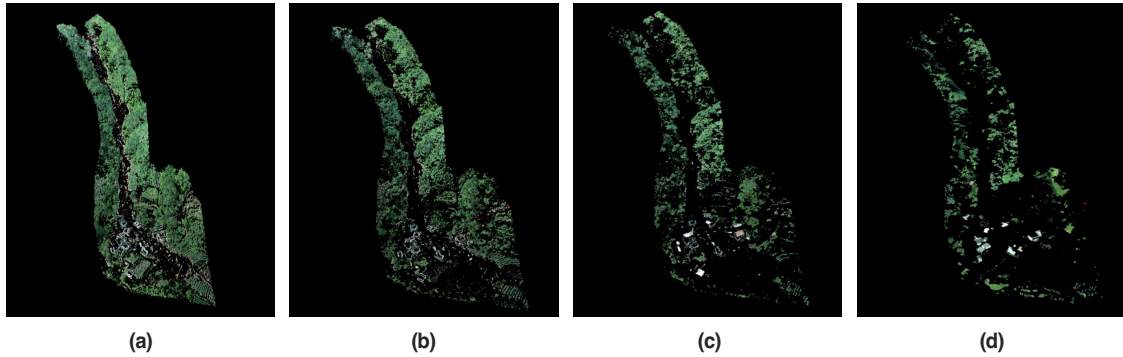


Fig. 4. LiDAR data: (a) point cloud of the study area and (b) Z score distribution.

**Table 1.** Ground filtering results

GR	hcp	Total (pts)	Reference ground (pts)	Filtered ground (pts)	Filtered non-ground (pts)
0.1	0.2	23,897,805	10,528,505	18,933,388	4,964,417
0.2	0.4	18,933,388	10,528,505	17,213,328	1,720,060
0.4	0.8	17,213,328	10,528,505	14,094,245	3,119,083
0.8	1.6	14,094,245	10,528,505	11,887,566	2,206,679
1.6	3.2	11,887,566	10,528,505	9,048,243	2,839,323



**Fig. 5.** Non-ground LiDAR data: (a) GR=0.1, hcp=0.2, (b) GR=0.2, hcp=0.4, (c) GR=0.4, hcp=0.8, and (d) GR=0.8, hcp=1.6.

하인 구간에서 지면과 비지면의 변화는 크지 않으나 0.8 m 이상인 경우 지면을 비지면으로 분리하는 오류가 발생하였다. 높이 값 임계치  $h_p$ 는 0.8 m와 1.6 m에서 가장 적절한 지면과 비지면을 분리하였으며 이후 값이 증가할수록 지면을 비지면으로 분리하는 오류가 나타났다 (Fig. 5). 따라서 본 연구에서는 지면 필터링의 정확성과

효율성을 고려하여 최적의 매개변수를 RI=1, GR=0.8 m,  $h_p$ =1.6 m로 결정하였다.

도출된 매개변수(RI=1, GR=0.8m,  $h_p$ =1.6m)를 활용하여 지면과 비지면 점들을 분류한결과, 전체 정확도는 84.3%, kappa 계수는 0.71로 어느 정도 신뢰할 수 있는 수준의 지면 필터링 결과로 나타났다(Table 2).

**Table 2.** Accuracy assessment

Total (pts)	TP (pts)	FP (pts)	TN (pts)	FN (pts)	TPR	PPV	OA	Kappa
14,094,245	11,107,743	1,785,917	779,823	420,762	0.96	0.86	0.84	0.71

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN}, PPV = \frac{TP}{TP + FP}, OA = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN}, K = \frac{OA - P(e)}{1 - P(e)}$$

$$\text{where, } P(e) = \frac{(TP + FN)(TP + FP) + (FP + TN)(FN + TN)^2}{(TP + FP + FN + TN)^2}$$

TP: true positive, TN: true negative, FN: false negative, FP: false positive.

그러나 일부 식생의 높이가 주변 지면보다 낮음으로써 인접한 지면을 높은 객체로 인식한 것 같이 지면이 아닌 지역을 지면으로 추출한 누락과 실제 지면이 지면으로 추출되지 않은 누락이 발생했다(Fig. 6b). 이처럼 일부 건물 지붕이 지면데이터로 오분류 되고 환경적인 요인에 의해 데이터의 누락이 발생한 지역과 고도가 낮

은 지역에서는 지면 데이터가 비지면으로 오분류 되어 정확도에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 하지만 지형자료 구축을 위해 CSF 알고리즘을 적용하여 지면과 비지면을 분리한 후에도 나타나는 오류들은 사용자가 수동으로 추가 분리하여 보완한다면 재난원인피해 조사·분석시 더욱 효과적으로 활용할 수 있을 것이다.

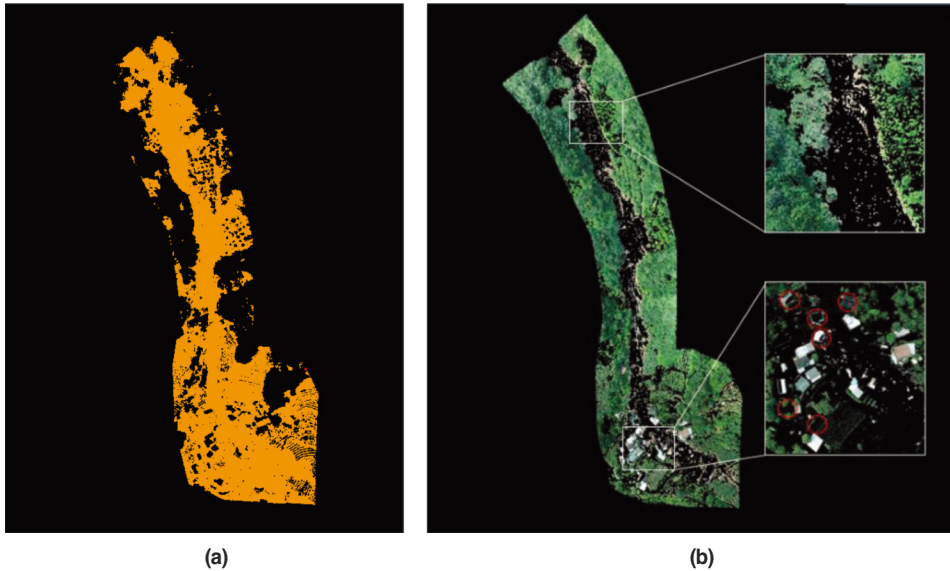


Fig. 6. CSF filtering (RI=1, GR=0.8 m, hcp=1.6 m): (a) ground, (b) non-ground and errors.

#### 4. 결론

본 연구는 드론 항공 라이다를 활용하여 산악지형에 대한 포인트 클라우드 데이터를 취득하고, 라이다 자료의 지형학적 정보를 사용하여 산악지형의 지면·비지면 점들을 분리하는 연구를 수행하였다. 기존의 지면 필터링 알고리즘은 높은 정확도를 달성하기 위해 여러 복잡한 매개변수를 설정해야 하지만 본 연구에서는 간단한 매개변수 입력과 사용자의 접근성이 높은 CSF 알고리즘을 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 산악지형의 드론 라이다 데이터로부터 지면 분리 필터링을 위한 CSF 알고리즘을 적용하여 매개변수 GR=0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6,  $h_{cp}$ =0.2, 0.4, 0.8, 1.6 3.2까지 더블링하여 지면과 비지면을 분리한 결과 최적의 매개변수 조건은 RI=1, GR=0.8 m,  $h_{cp}$ =1.6 m로 나타났다.

둘째, 매개변수(RI=1, GR=0.8 m,  $h_{cp}$ =1.6 m)를 활용하여 지면과 비지면을 분리하였으며 그 결과 전체 정확도는 84.3%, kappa 계수는 0.71로 나타났다.

셋째, 산악지형에서 발생한 산사태 지형자료 점군의 생성과 피해 조사를 위한 지면 필터링 자료처리에 기존 지면 필터링 기법인 CSF 알고리즘을 효과적으로 적용할 수 있음을 확인할 수 있었다. 하지만 산악지형에서의 산사태 지역은 경사가 가파르고 수목이 울창하며 산사태 발생 양상에 따라 토사유출 폭이 좁아 라이다 데

이터 취득에 한계가 발생할 수 있다. 본 연구에서 활용된 드론 라이다의 경우, 최대 감지거리 450 m, 삼중반사 펄스를 갖는 특성이 있지만 실제 산림이 울창한 지역에서 취득할 수 있는 지표면이나 식생관련 포인트 클라우드의 점밀도는 아주 낮은 것으로 확인되었다. 또한 기존의 다양한 지면분리 알고리즘 중 적합한 알고리즘을 적용하지 못하고 CSF 알고리즘만으로 분석이 이루어진 본 연구의 한계가 있다. 향후 산악지형에 대한 다양한 알고리즘을 적용하여 산사태 지형에 특화된 알고리즘을 도출하는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

#### 사사

본 연구는 행정안전부 국립재난안전연구원의 주요 사업(이동형 로봇기반 재난사고 현장조사 공유 기술개발(NDMI-주요-2023-06-02))으로 수행되었습니다.

#### Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

## References

- Chen, Z., Gao, B., and Devereux, B., 2017. State-of-the-art: DTM generation using airborne LiDAR data. *Sensors*, 17(1), 150. <https://doi.org/10.3390/s17010150>
- Choi, H. S., 2013. *Automatic extraction of ground points from airborne LiDAR data in forest area*. Doctoral dissertation, Inha University, Incheon, Republic of Korea.
- CloudCompare, 2019. Documentation of CloudCompare v2.6. Available online: [https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/CSF\\_\(plugin\)#Algorithm\\_Details](https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/CSF_(plugin)#Algorithm_Details) (accessed on Aug. 22, 2023).
- Gutierrez, I., Gjermundsen, E. F., Harcourt, W. D., Kuschnerus, M., Tonion, F., and Zieher, T., 2020. Analysis of filtering techniques for investigating landslide-induced topographic changes in the OETZ Valley (Tyrol, Austria). *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, V-2-2020, 719–726. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-2-2020-719-2020>
- Hwang, S. R., and Lee, I. P., 2011. Comparative analysis and accuracy improvement on ground point filtering of airborne LIDAR data for forest terrain modeling. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 29(6), 641–650. <https://doi.org/10.7848/ksgpc.2011.29.6.641>
- Kim, E. M., and Cho, D. Y., 2012. Comprehensive comparisons among LiDAR filtering algorithms for the classification of ground and non-ground points. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 30(1), 39–48. <https://doi.org/10.7848/ksgpc.2012.30.1.039>
- Kim, H. G., 2020. *Iterative multi-resolution cloth simulation filtering for tidal creek extraction from airborne LiDAR data*. Doctoral dissertation, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea.
- Kim, S. S., Kim, D. S., Shin, D. Y., and Nho, H. J., 2020. Assessment and analysis of disaster risk for steep slope using drone and terrestrial LiDAR. *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science*, 28(4), 13–24. <http://doi.org/10.7319/kogsis.2020.28.4.013>
- Kim, S. S., Sin, D. Y., Jung, Y. H., Lim, Y. T., Koo, S., and Jung, Y. Y., 2022. *Study on improving disaster site mapping performance of multi-sensors based disaster investigation robot* (NDMI-PR-2022-06-02). National Disaster Management Research Institute. <https://www.ndmi.go.kr/viewer/skin/doc.html?fn=e6039f8d5eb37b27ed1ca12fbc3c9ecf&rs=/viewer/result/202310>
- Korea Forest Service, 2023. *Comprehensive measures to prevent landslides nationwide*. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Korea Forest Service. [https://www.forest.go.kr/kfsweb/cop/bbs/selectBoardArticle.do?bbsId=BBSMSTR\\_1069&mn=NKFS\\_06\\_09\\_01&nttId=3186713](https://www.forest.go.kr/kfsweb/cop/bbs/selectBoardArticle.do?bbsId=BBSMSTR_1069&mn=NKFS_06_09_01&nttId=3186713)
- Lee, J. B., Jung, J. H., Kim, H. J., 2020. Segmentation of seabed points from airborne bathymetric LiDAR point clouds using simulation filtering algorithm. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 38(1), 1–9. <https://doi.org/10.7848/ksgpc.2020.38.1.1>
- Polat, N., and Uysal, M., 2015. Investigating performance of airborne LiDAR data filtering algorithms for DTM generation. *Measurement*, 63, 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.12.017>
- Shin, D. Y., Sim, J. S., and Lee, K. S., 2019. Application of the steep slope risk assessment using the three dimensional spatial information data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-3/W8, 381–386. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W8-381-2019>
- Shin, H. S., Um, J. S., and Kim, J. H., 2017. A study on damage scale tacking technique for debris



- occurrence section using drones image. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 35(6), 517–526. <https://doi.org/10.7848/ksgpc.2017.35.6.517>
- Yilmaz, C. S., Yilmaz, V., and Gungor, O., 2018. Investigating the performances of commercial and non-commercial software for ground filtering of UAV-based point clouds. *International Journal of Remote Sensing*, 39(15–16), 5016–5042. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1420942>
- Yoon, J. S., Lee, K. S., Shin, J. I., and Woo, C. S., 2006. Characteristics of airborne LiDAR data and ground points separation in forested area. *Korean Journal of Remote Sensing*, 22(6), 533–542. <https://doi.org/10.7780/kjrs.2006.22.6.533>
- Zhang, W., Peng, W., Qi, J. B., and Wang, H. T., 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>