드론 매핑 기반 산불 피해지 붕괴 위험 평가 및 대책 방안 연구

박정욱, 정용한, 구슬, 김성삼†
국립재난안전연구원 재난원인조사실
e-mail:sskim73@korea.kr

Study on Drone Mapping-based Assessment and Countermeasures Planning of Landslide Hazards in Post-wildfire Areas

Jungwook Park, Yonghan Jung, Seul Koo, Seongsam Kim†
Division of Disaster Scientific Investigation, National Disaster Management Research Institute

요 약

본 연구는 2025년 3월 발생한 산불로 피해를 입은 경상북도 영양군 4개소를 대상으로 드론 기반 항공촬영 영상을 활용하여 산불 피해지의 지형 특성과 2차 재해 가능성을 분석하였다. 이를 위해 DJI Matrice 350 RTK 기체와 Zenmuse P1 카메라를 이용하여 취득한 영상을 드론매핑 SW로 처리하여 정사영상과 3차원 지형모델(DSM, DTM)을 생성하였으며, 피해 전·후 비교, 경사도 산출, 사면-주택 간 거리 분석, 전소 주택 현장 검토를 수행하였다. 분석 결과는 주택 인근 산지의 경사도가 30.7~41.7°로 나타났으며, 토사 피해 예상 거리가 주택 및 사찰로부터 12m, 31m, 34m, 65m 범위인 것을 확인하였다. 특히 사찰 건물이 표층붕괴 위험 범위에 포함되어 문화재적 피해가 우려되었다. 또한 집중호우 시 일부 주택은 산불 피해로 인한 지형적 취약 요인이 2차 재해로 확산될 수 있음을 확인하였다. 따라서 드론 기반 촬영영상은 산불 피해지의 생활권 인근 사면에 대해 정량적이고 신속한 위험 평가를 가능하게 하며, 옹벽·게비온·낙석방지울타리 설치 및 대피 권고와 같은 방재 대책 수립에 기초자료로 활용될 수 있다. 본 연구의 목적은 산불 피해 이후 단기간 내 생활권 안전성을 진단하고, 2차 재해 예방 정책에 기여할 수 있는 새로운 조사 방법론을 제시한다는 데 있다.

1. 서론

최근 기후변화로 인한 고온·건조 기후의 장기화로 대형 산불 발생 빈도가 증가하고 있다[1]. 우리나라의 경우 2022년 경북 울진과 강원 삼척에서 발생한 산불은 약 16,320 ha 이상의 산림을 소실시켰으며, 이는 진화 소요 시간이 213시간 43분으로 국내 산불 중 최장 기간에 해당한다. 산불은 단기간에 산림자원을 소실시킬 뿐만 아니라 토양의 물리적·화학적 성질을 변화시켜 빗물 침투 저하, 토양 유실 증가, 사면 불안정화 등 2차 재해로 이어진다[2]. 특히 우리나라와 같이 급경사 산지가 많은 환경에서는 산불 이후 산사태, 토석류와 같은 재해 위험이 가중되어 산불 피해지에 대한 정확한 평가 필요하다. 그러나 기존 산불 피해 조사는 현장 조사와 위성영상 분석에 의존하면서 한계가 존재한다. 현장 조사는 광범위한 피해지를 신속히 파악하기 어렵고, 연구자의 접근성에 제약이 따른다. 위성영상은 넓은 면적을 관측할 수 있다는 장점이 있으나, 공간해상도가 수십 m 단위로 낮아 피해지의 정밀 공간분석에 한계가 있으며, 촬영 시기 또한 기상 조건과 위성 궤도에 의존한다는 단점이 있다[3,4]. 이에 비해 드론(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)은 고해상도 영상을 짧은 시간 내에 획득할 수 있으며, 저비용·고효율적이라는 점에서 산불 피해지 조사에 효과적인 대안으로 주목받고 있다. 특히, 고해상도 RGB 카메라 기반 항공촬영을 활용하면 정사영상(Orthoimage)을 제작하여 피해 전·후 비교분석, 식생 소실 면적 산출, 사면 안정성 검토 등이 가능하다[5]. 또한, DJI Terra 등 상용 소프트웨어의 발전으로 드론 데이터 처리의 자동화 수준이 높아져 실무 적용성이 크게 향상되었다.

최근 연구들은 드론을 활용하여 산사태 발생지를 3차원 모델링하고, 사면 안정성 평가나 산사태 발생 가능성 예측에 적용하는 사례가 증가하고 있다. Choi et al.(2024)은 2020년 8월 전라남도 곡성군에서 발생한 산사태를 대상으로 드론 기반 LiDAR와 RGB 이미지를 활용하여 피해 범위와 사면의 변화를 정밀하게 분석하였다. 이 연구에서는 산사태의 발생 지점, 이동 거리, 침식 및 퇴적된 부피 등을 3D 모델을 통해 정량적으로 분석하였으며, 이러한 정보를 기반으로 향후 산사태 위험도를 평가하고 대응 전략을 수립하였다. [6]. 또한 Lim et al. (2024)는 산림 지역에서 GCP 측량과 RTK 드론을 활용하여 위치 정확도를 평가하였으

며, 산사태 발생 면적을 산출하였다[7]. 이와 같이 기존 연구들은 드론이 산불 피해지의 정밀 지형분석에 활용 가능함을 입증했지만, 생활권과 밀접한 주택 인근 산불 피해지역을 대상으로 2차 재해 위험을 평가한 연구는 부족하다. 특히 주택 인근 산불 피해지역은 단순한 산림 훼손에 그치지 않고, 사면 붕괴나 토석류 발생을 통해 인명 및 재산피해로 직결되는 2차 재해가 발생할 수 있다. 따라서 이들 지역에서는 보다 시급하고 정밀한 피해 조사 및 분석이 요구된다. 따라서 본 연구는 정책적 활용 가능성을 생활권 재해 관리 차원으로 확장하고자 한다.

이를 위해 본 연구에서는 광각 카메라를 탑재한 드론을 활용하여 피해지역을 항공 촬영하고, 정사영상 및 포인트 클라우드를 생성하였다. 이를 바탕으로 피해 전·후 지형 변화를 정량화하고 경사도 및 토양 노출 분석을 수행하였다. 이러한 접근은 장비 운용 부담과 비용을 최소화하면서도 주거지 인근 산불 피해지의 신속한 위험 평가를 수행하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 연구 대상지

본 연구의 대상지는 2025년 3월 대규모 산불이 발생한 경상북도 영양군 4개소로 주택과 인접한 산지가 다수 포함되어 있다. 해당 지역은 높이 24 m ~ 130 m, 길이 137 m ~ 570 m, 경사 31° ~ 42° 급경사 지형으로 구성되어 있으며, 강우 시 산사태 및 토석류 발생이 인명·재산 피해로 이어질 수 있는 위험 지역으로 선정하였다. 대상지에 대한 자세한 내용은 다음 표 1과 같다.

[표 1] 연구 대상지

대상지	주소	높이 [m]	길이 [m]	경사 [°]
1	경상북도 영양군	24	304	36
2		62	475	31
3		68	137	42
4		130	570	36

2.2 데이터 취득 장비 및 방법

본 연구에서는 항공촬영 영상을 취득하기 위해 기체로 DJI사의 회전익 드론 Matrice 350 RTK를 사용하였으며, Zenmuse P1 광학 카메라 센서를 탑재하였다. 주요 사양은 표 2와 같다.

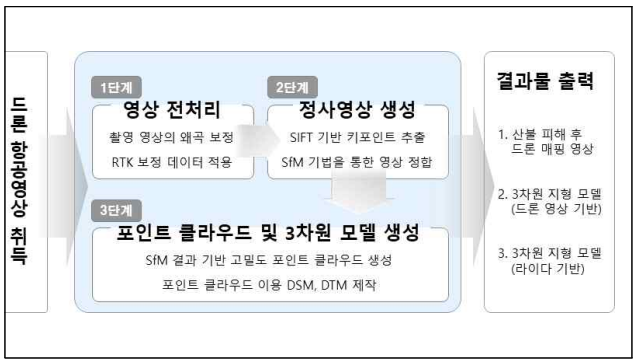
촬영은 2025년 4월 28일부터 29일까지 맑은 기상 조건에서 수행되었으며, 비행고도 150 m, 전방(종) 중복도 80%, 측방(횡) 중복도 80%로 설정하였다. 데이터 취득은 자동 비행계획을 기반으로 수행되었으며, DJI Pilot 2를 사용하여 RTK 기반의 궤적 데이터를 동시에 기록하였다.

[표 2] 기체 및 센서 장비 사양

장비명	주요사양	
	구분	내용
Matrice 350 RTK	크기	810×670×430mm
	무게	6.47kg(베터리 장착 시)
	비행속도	최대 23m/s
	비행시간	최대 55분
	호버링정확도	수평±0.1m, 수직±0.3m
	RTK정확도	수평±1.0cm,수직±1.5cm
Zenmuse P1	크기	198×166×129mm
	무게	800g
	센서크기	359.24mm
	유효픽셀	45MP
	사진크기	8192×5460(3:2)
	조리개범위	f/2.8~f/16

2.3 데이터 처리 절차 및 분석 지표

취득한 항공영상은 산불 피해지 지형 분석을 위해 DJI Terra 소프트웨어를 활용하여 처리하였다. 데이터 처리 절차는 그림 1과 같다.



[그림 1] 드론 영상데이터 매핑 처리 절차

본 연구에서 활용한 주요 분석 지표는 다음과 같다.

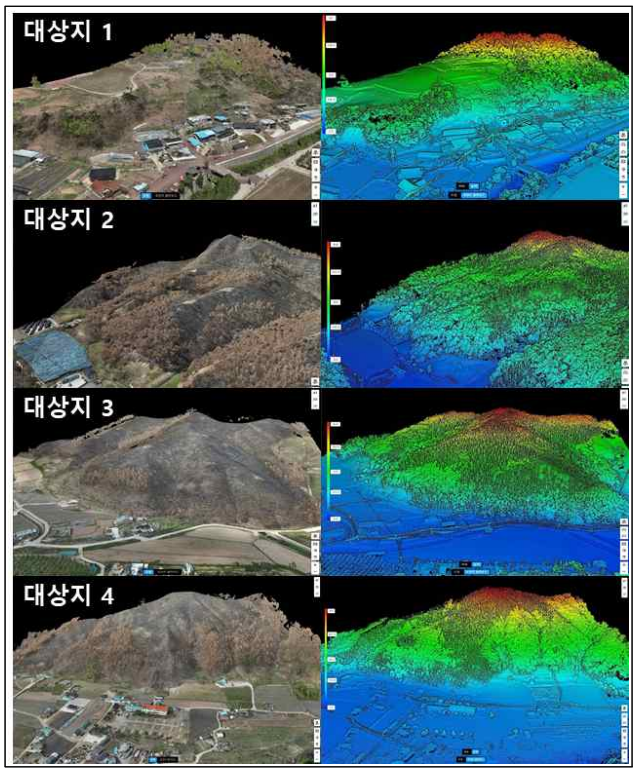
[표 3] 위험성 분석지표

분석지표	상세 내용
산불 피해 규모	위성영상과 드론 영상을 비교하여 피해 규모
사면 경사	주택 인근 급경사지 경사 및 산사태 취약성
사면-주택 거리	생활권 인근 토사 피해 가능 범위
지형적 위험 요인	전소 주택 현장 자료와 지형적 위험 요인 분석

3. 결과 및 분석

3.1 3차원 지형 모델링 결과

그림 2는 분석을 드론 영상 기반으로 3차원 모델과 포인트 클라우드 생성 결과로 피해지의 사면 형상을 정밀하게 재현한 것을 확인 할 수 있다. 모델 생성을 위한 포인트클라우드 수가 최소 약 5억개에서 최대 8억 9천만개 생성하였으며, 필터링을 통해 지면점과 식생점을 분리하였다. 모델에 대한 정확도는 지상 샘플 거리(Ground Sample Distance, GSD)가 대상지 별로 0.78 cm/px, 1.38 cm/px, 1.19 cm/px 그리고 1.23 cm/px이며, 표준편차가 2.3 cm, 2.8 cm, 2.6 cm 그리고 3 cm로 산불 피해지 정밀 분석이 가능한 정도로 판단하여 분석을 수행하였다[8]. 모델링에 대한 자세한 내용을 표 4에 나타내었다.



[그림 2] 영상(좌) 및 라이다(우) 기반 3차원 지형 모델

[표 4] 대상지별 모델 생성 결과

대상지	포인트 클라우드 수 [-]	GSD [cm/px]	RMSE [m]
1	50,895,236	0.78	0.023
2	69,040,450	1.38	0.028
3	75,588,850	1.19	0.026
4	89,807,756	1.23	0.03

3.2 산불 피해 전·후 비교

그림 3는 경상북도 영양군 4개소에 대한 산불 피해 전 위성지도와 산불 피해 후 드론 영상 기반으로 제작된 3차원 지형 모델을 비교한 결과이다. 산불 피해 전 위성지도와 피해 후 드론매핑 영상을 비교한 결과는 위성지도에서는 조밀한 산림이 분포하였으나 피해 후 영상에서는 광범위한 수목 소실과 토양 노출이 확인되었다. 특히 전소 된 주택의 개수를 육안으로 확인할 수 있었으며, 주택 인근 사면에서 식생 소실이 뚜렷하게 나타났다.

[그림 3] 산불 전 위성지도(좌) 및 산불 후 드론매핑 영상(우)

3.3 사면 경사도 분석

사면 경사는 DJI Terra 소프트웨어를 이용하여 주택과 인접한 경사도를 산출하였으며, 대상지별 35.8°, 30.7°, 41.7° 그리고 36.2°이다. 한 곳을 제외한 나머지 모두 34.0° 이상의 급경사지에 해당되며 집중호우 시 2차 재해 위험이 증가함으로 별도의 재해예방 관리가 필요하다.

3.4 사면-주택 간 거리 분석

사면 하부 생활권 시설의 위험도를 평가하기 위해 주택 및 사찰 건물과 인접한 사면 하단부까지의 거리를 측정하였다. 또한 사면 높이 분석과 지형 모델링을 기반으로 토사가 집중적으로 휩쓸릴 수 있는 예상 거리를 도출하였다. 분석한 결과로 사면 하단부로부터 각각 12 m, 31 m 34 m 그리고 65 m의 예상 토사 도달

[표 5] 대상지별 토사 피해 예상 거리 및 경사

대상지	토사 피해 예상 거리 [m]	포함된 시설물 [동]	경사 [°]
1	12	주택 2	35.8
2	31	사찰 2	30.7
3	34	주택 1	41.7
4	65	주택 2	36.2

범위를 산출하였다. 해당 범위 내에는 주택 5동과 사찰 건물 2동이 포함되는 것으로 확인하였으며, 표 5에 위험도 분석 결과를 정리하였다.

4. 결론

본 연구에서는 경상북도 영양군 4개소 산불 피해지를 대상으로 드론 기반 항공촬영과 3차원 지형분석을 수행하여, 주택 및 사찰 인근 사면의 2차 피해 위험을 평가하였다. 연구 결과를 통해 대상지 별로 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

대상지 1의 경우, 산지와 인접한 남측 주택들 대부분은 화재에 의해 소실되었다. 또한 서측의 주택 2동이 토사 피해 예상 거리인 12 m 이내에 위치하여 주택의 개구부로 붕괴토사 유입이 우려된다. 이를 방지하기 위해 배후 산지 하단부에 개비온을 3단으로 설치하여 주택 방향 붕괴토사의 유입을 차단할 필요가 있다.

대상지 2의 경우, 사찰 뒤편 산지의 하부 경사는 30.7°로 완만하고 중간 높이 부근에 과거 표층붕괴가 발생한 상태이다. 사찰 2동이 토사 피해 예상 거리인 31 m 이내 거리이며, 산지의 규모와 두꺼운 토층심도를 고려했을 때 목조건축물인 사찰의 피해가 예상된다. 이를 방지하기 위해 사찰 배후 산지 하단부에는 콘크리트 도수로를 설치하고 상부에는 옹벽을 보강할 필요가 있다.

대상지 3의 경우, 인가 배면 41.7° 급경사 산지로 표층토의 점착력 유실로 인한 표층유실 가능성이 존재하며, 지표면 내 공동과 오목지형이 다수 확인되었다. 토사 피해 예상 거리는 34 m로 산출되어 주택 1동이 범위내에 위치하여 집중호우 시 표층붕괴와 세굴 발생이 가능하다. 이에 따라 일정 기준 이상의 강우량 발생 시 주민 대피가 요구된다.

마지막으로 대상지 4의 경우, 배후 산지는 절리가 발달한 암반 위로 다수의 탈락 암괴가 분포하는 테일러스 지형이며, 표층식생 소실로 낙석 위험이 존재한다. 토사 피해 예상 거리는 65 m로 주택 2동이 범위에 포함된다. 이에 따라 집중호우 시 낙석 및 토석류 피해 가능성이 높으며, 산지 하단부에는 높이 2 m 낙석방지 옹벽과 상단 낙석방지울타리, 만곡부 지형 하단부에는 다단식 골막이 설치가 필요하다.

최종적으로, 드론 기반 항공촬영과 3차원 지형분석을 통해 산불 피해지 사면의 정량적 위험평가가 가능하였으며, 분석 결과로 4개소 모두 생활권 시설이 토사 피해 예상 범위 내에 위치하여 직접적인 2차 피해 위험에 노출되었음을 확인하였다. 따라서 옹벽, 게비온, 낙석방지울타리 설치 등 과학적 근거 기반의 방재 대책을 마련하는 것이 필요하다.

감사의 글

본 논문은 국립재난안전연구원의 연구과제(NDMI-주요-2025-06-01) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

[1] Park, J. C., Suh, J. G., Baek, M. H., “Climatic and Forest Drivers of Wildfires in South Korea(1980-2024); Trends, Predictions, and the Role of the Wildland-Urban Interface”, Forests, Vol. 16 No. 9, Article 1476, Sept., 2025.

[2] Shakesby, R. A., “Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: Review and future research directions,” Earth-Science Reviews, Vol. 105 No. 3, pp. 71-100, Mar., 2011.

[3] Chuvieco, E., Aguado, I., Yebra, M., “Remote sensing contributions to wildfire monitoring,” International Journal of Wildland Fire, Vol. 19, No. 7, pp. 1-14, Jul., 2010.

[4] 이형주, 이종수, 윤현석, “재해관리를 위한 사면재해 취약지역 공간자료의 전략적 활용방안 연구”, 한국지형공간정보학회지, 제 28권 제 4호, pp. 69-78, 12월, 2019년.

[5] Wallace, L., Lucieer, A., Watson, C., Turner, D., “Development of a UAV-LiDAR system with application to forest inventory,” Remote Sensing, Vol. 4, No. 6, pp. 1519-1543, Jun., 2012.

[6] Choi, S. K, Ramirez, R. A., Lim, H. H., Kwon, T. H., “Multi-source remote sensing-based lanslide investigation: the case of the August 7, 2020, Gokseong Landslide in South Korea” Scientific Reports, Vol 14, pp. 12048, May., 2024.

[7] 임언택, 정용한, 구슬, 김성삼, “드론매핑을 활용한 집중호우 산사태 피해 조사 및 분석” 대한원격탐사학회지, 제 40권 제 6호, pp. 1347-1357, 12월, 2024년.

[8] 이영승, 이동국, 유영걸, 이현직, “드론 사진측량을 이용한 산림훼손지역의 훼손 현황 분석” 한국지형공간정보학회지, 제 24권 제 3호, 10월, 2016년.