UAV를 활용한 정밀지형기반의 낙석위험성 분석

Rockfall Risk Analysis Based on Precise Topography using UAV

최재희* · 김남균** · 최봉진*** · 전병희****

Choi, Jaehee* · Kim, Namgyun** · Choe, Bongjin*** · Jun, Byonghee****

Abstract

In this study, the risk of rockfall on incision slopes adjacent to roads was evaluated using the RocFall program. The study area was a slope adjacent to the road leading to a university campus in Samcheok-si, Gangwon-do, with an area of 774 m² and an average slope of approximately 43°. A rock shed was installed at the lower zone of the slope. A 3D model of the terrain was generated based on point cloud data gathered using a UAV (unmanned aerial vehicle). Fast and accurate orthoimages were captured by UAV and high-resolution digital surface models (DSMs) were produced; these data were used to assess the risk of rockfall. Compared to terrain extraction using a digital elevation model (DEM) generated from an existing digital map, terrain extraction using a UAV was more effective in deriving results close to the actual situation in the field, especially for the analysis of rockfall jump height and kinetic energy. The necessity of constructing 3D topographic data using UAVs to predict rockfall disasters in mountainous regions was confirmed.

Key words : UAV, 3D Cloud Point, Photogrammetry, Rockfall, Kinetic Energy

요 지

본 연구에서는 도로에 인접한 절개지 사면에서 RocFall프로그램을 이용하여 낙석의 위험도를 평가하였다. 연구지역은 강원도 삼척시 소재 대학의 통학도로 이용되는 도로에 인접한 사면으로, 면적은 774 m², 평균 경사는 약 43°인 급경사로 사면하부에는 피암터널이 설치되어 있다. 이 지역을 대상으로 무인항공기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)를 이용하여 3D 포인트 클라우드를 기반으로 3차원 지형자료를 생성하였다. UAV 이용으로 빠르고 정확하게 정사영상과 고해상도 수치표고모델(Digital Surface Model, DSM)을 생산하고, 이 자료들은 낙석지역의 위험성 평가에 이용되었다. 기존의 수치지도를 이용하여 생성된 Digital Elevation Model (DEM)을 이용한 지형추출에 비해 UAV를 이용한 지형추출은 낙석의 도약높이, 운동에너지 해석에서 보다 현장의 실제 상황에 가까운 결과를 도출하는데 효과적이었다. 산지의 낙석위험성 평가에 UAV를 활용한 3차원 지형자료구축의 필요성을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : UAV, 3차원 클라우드 포인트, 사진측량, 낙석, 운동에너지

1. 서 론

국토의 대부분이 산지인 우리나라에서 택지개발이나 도로개설 등으로 인한 산지변형에 따른 낙석 발생사례가 많으

며, 특히 도로절개지에서 발생한 붕괴 중 낙석 비중이 40%를 차지한다(Bae et al., 2002). 국립공원은 수려한 암반경관을 중심으로 탐방로가 개설되어 있으나, 암반에 존재하는 절리에 의해 해빙기 및 여름철 집중호우 시에 낙석의 발생빈도가

*정회원, 강원대학교 방재전문대학원 석사과정(E-mail: mojij11@naver.com)

Member, Master Course Student, Graduate School of Disaster Prevention, Kangwon National University

**정회원, 산림조합중앙회 산림종합기술본부 선임연구원

Member, Senior Researcher, Forest Technology Division, National Forestry Cooperative Federation

***강원대학교 방재전문대학원 석사과정

Master Course Student, Graduate School of Disaster Prevention, Kangwon National University

****교신저자, 정회원, 강원대학교 방재전문대학원 교수(Tel: +82-33-570-6878, Fax: +82-33-570-6501 E-mail: bhjun@kangwon.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Graduate School of Disaster Prevention, Kangwon National University

매우 높아 2014년부터 2018년 사이의 5년간 국립공원에서는 33건의 낙석에 의해 3명의 사망자와 6명의 부상자가 발생하였다(KNPS, 2019). 탐방로에 대한 체계적인 낙석대책이 요구되어 낙석거동을 고려한 탐방로개설이 필요하다고 보고되었다(Cho and Kim, 2010).

낙석해석관련 국내 연구사례로서 Koo et al. (2001)은 현장실물실험을 통해 낙석의 운동에너지를 파악하였다. 400 kg의 낙석이 10 m 높이에서 낙하할 때 50 kJ의 에너지가 발생하며, 국내에서 평균적으로 발생하는 낙석을 효과적으로 방어하기 위해서는 90 kJ 정도의 에너지 흡수가 가능한 낙석방지시설이 필요하다고 하였다. 그리고 낙석방지울타리의 이격거리를 확보하는 것이 운동에너지 감소에 효과적임을 보였다. 또한 암반의 특성을 이용하여 반발계수를 추정하였다. Bae et al. (2002)은 국내의 17개 장소에 대하여 수행된 낙석발생 조사를 통하여 낙석 발생 경사면의 높이, 경사도, 낙석발생횟수, 낙석의 전체 체적, 마찰계수, 단위중량 등 일반적인 국내 낙석 현황을 조사하였다. Kim et al. (2007)은 낙석시물레이션에 적용되는 낙석의 무게를 현장조건에 맞추어 적용하기 위해 현장조사를 수행하였다. 조사선 조사와 시추조사를 통해 낙석 무게분포를 산정하고 낙석시물레이션을 실행하였다. 절리조사결과를 활용하여 낙석의 무게 분포를 추정하여 대부분의 낙석이 400 kg 이하임을 보였다. 그러나 이 결과는 암반사면에 제한된 것으로서 토사사면이나 혼합사면에 적용하기 위해서는 추가적인 검토가 필요하다. 비교적 최근의 국내 연구로서 Seo et al. (2012)은 울릉도 북동부의 낙석 위험도 평가를 위하여 도로변 약 3 km 구간을 대상으로 일본과 미국에서 사용하는 평가표를 적용하여 낙석재해 위험도 평가하였다. Lee et al. (2014)은 다양한 낙석 조건에서 낙석방지망의 효과를 분석하여 사면의 경사와 낙석의 특징을 반영한 설계가 필요하다고 하였다.

국외 연구사례에서 낙석의 위험성을 평가하기 위해 이용되는 모델은 1) 경험적 모델, 2) 프로세스기반 모델, 3) 지리정보시스템(Geophysical Information System, GIS)기반 모델의 세 가지로 구분된다(Dorren, 2003). 경험적 모델은 주로 지형학적 인자와 낙석의 이동거리의 관계를 다룬다. 낙석의 규모에 따라 수평이동거리나 낙하물의 도달면적이 양의 상관관계를 보인다(Keylock and Domaas, 1999). Budetta (2004)는 사면 경사가 30°에서 90°로 급경사로 갈수록 낙석의 움직임은 구름(Roll) → 도약(Bounce) → 낙하(Fall)로 변화하며, 사면의 높이와 경사에 따른 낙석포착을 위한 고랑(Ditch)의 넓이와 깊이를 제시하였다. Asteriou and Tsiambaos (2016)은 실험을 통해서 충돌 시 경사면과 경사각에 따른 충돌 후의 궤도를 추정하였다.

프로세스기반 모델은 낙석의 이동거리뿐만 아니라 낙석의 움직임을 2차원으로 표현한다. Evans and Hungr (1993)는 접선반발계수(Tangential Restitution coefficient, Rt)와 연직반발계수(Normal Restitution coefficient, Rn)를 도입하여

충돌에 의한 운동에너지의 손실을 계산하였다. 이후 반발계수에 대한 실험적 연구와 현장 연구가 진행되어 반발계수의 결정이 낙석시물레이션에 매우 중요함을 보였다(Chau et al., 2002; Dorren et al., 2006). Okura et al. (2000)은 낙석이 단독이 아닌 집합체로서 어떻게 움직이는지에 대한 실험과 수치시물레이션을 수행하였다. 낙석의 수가 증가하면 낙석의 이동거리는 증가하는 반면 낙석 퇴적물의 무게중심의 이동은 감소한다. 이것은 낙석 상호간의 충돌에 의한 결과라고 판단된다.

GIS기반 모델은 경험기반 모델이나 프로세스기반 모델과 결합하여 넓은 지역에 대해 3차원적 낙석궤적을 해석한다. Raster자료를 이용하여 도약높이나 운동에너지의 3차원 가시화가 가능하며, GIS상에 위험지역을 선정할 수도 있다(Duarte and Marquinez, 2002; Guzzetti et al., 2002, 2003; Agliardi and Crosta, 2003; Lan et al., 2007).

실험적 연구 또는 경험적 자료를 이용하여 낙석 시물레이션 프로그램과 연계하여 낙석의 충격에너지 등을 산정하고 있다. Lee and Park (2003)은 네 가지 낙석 시물레이션 프로그램(RocFall, CRSP, Georock, Rockfall)에 대해 각각의 특징을 파악하여 낙석의 예측과 분석한 바 있으며, 그중 신속하고 다양한 통계처리를 위해서는 RocFall이 적합하다고 판단하였다. Lee et al. (2014)은 Rocfall 프로그램을 이용하여 비탈면 하부에 발생하는 최대운동에너지의 변화를 분석하여 낙석방지시설의 설치 규정이 합리적이지 못하다고 판단하였다.

Yilmaz et al. (2008)은 RocFall을 이용하여 낙석해석결과를 GIS와 연계해서 낙석위험지도를 제작하였다. GIS와 연계한 모델에서 현장의 지형자료로서 고해상도의 수치표고모델(Digital Elevation Model, DEM)을 이용하는 것이 중요하다. Youssef et al. (2015)은 5 m 해상도의 DEM과 1 m 해상도의 위성영상을 이용하여 지형자료를 구축하여 RocFall 프로그램을 이용하여 산지도로와 주택지에 대한 낙석위험도를 평가하였다.

고해상도 DEM을 적용하기 위하여 지상레이저스캐닝(Terrestrial Laser Scanning, TLS)을 이용하여 암석의 위치와 크기, 사면재료에 대한 상세한 3D지형자료를 생성하였으며, 이 자료들은 낙석거동해석에 적용되어 사면관리에 유용한 결과를 도출하였다(Lan et al., 2007; Abellán et al., 2009; Gigli et al., 2014).

최근 무인항공기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)의 발전으로 정사영상 제작과 정확도 연구가 활발히 진행되고 있다. UAV는 지질학적 위험에 노출 될 수 있는 자연 경사면의 지형을 정의하는 데 특히 유용할 것으로 예상된다. UAV로 빠르고 정확하게 생성된 정사영상과 고해상도 수치표고모델(Digital Surface Model, DSM)은 낙석지역의 위험성 평가에 중요한 자료로 이용된다(Manousakis et al., 2016; Sarro et al., 2018). Kim and Kwon (2019)는 인력작업이 어려운 구도심에서의 노후시설물 현황을 파악하기 위하여

UAV를 활용하여 도심지역의 3D map을 작성하였다. 또한 UAV 사진측량으로 획득하기 어려운 정보는 카메라의 국부 촬영기법을 도입하여 상세한 사진, 설명, 수치등을 기입하여 4D map으로 확장할 수 있음을 보였다. Lee et al. (2016)은 노천광산의 모니터링을 위해 UAV를 활용하였고, ± 10 cm 오차로 광산 지역의 식생분포, 지표고 변화 모니터링에 활용되었다. Lim et al. (2015)은 UAV를 이용하여 횡단면도를 추출함으로써 준설토 투기장의 토공량을 신속하고 정확하게 측정할 수 있는 방법을 제시하였다. 또한 Lee et al. (2018)은 UAV로 얻은 기본자료를 활용하여 산지재해 위험지역 분석에 적용이 가능하다고 하였다.

본 연구에서는 대학의 통학도로 이용되는 도로주변의 낙석위험도를 파악하기 위하여 피암터널을 대상으로 UAV 사진측량을 실시하여 현장의 지형자료를 이용하여 낙석시 물레이션을 실시하였다. 측정된 자료는 후처리 프로그램인 Pix4D를 이용하여 좌표보정 및 필터링 등을 통해 DSM 자료로 만든 후 낙석 시물레이션인 RocFall프로그램에 적용하였다. 사면의 다른 경로에서 암석의 중량에 변화를 주어 낙석을 예측하고 분석하였으며, 수치지도를 이용하여 만든 DEM을 이용한 시물레이션 결과와의 비교를 통해서 UAV의 사진측량 효용성을 검토하였다.

2. 연구방법

2.1 연구지역 선정 및 조사방법

낙석은 절개면 상부 암석의 자유운동에 의해 빠른 시간내에 발생하므로 도로이용에 많은 인명 및 재산피해를 유발할 수 있다. 본 연구에서는 강원도 삼척시에 위치한 강원대학교 도계캠퍼스 주변 급경사지를 연구대상지로 선정하였다(Fig. 1). 이 지점은 캠퍼스로 연결되는 유일한 도로이며 통학버스의 경로로서 안전의 확보가 매우 중요한 지역이다.

Fig. 1. Research Area

사면은 크게 토사사면, 암반사면, 혼합사면으로 구분되는데, 붕괴양상이 각각 다르며 피해규모도 다르게 나타난다. 토사사면은 암반사면에 비해 낙석의 속도가 느리지만 주로 호우에 의해 낙석과 함께 토사가 함께 붕괴되어 피해를 가중시킬 수 있다. 본 연구지역은 Fig. 1과 같이 도로와

피암터널 주변에 토사사면이 존재하며 식생과 함께 대형 암반이 노출되어 있어 호우 시 도로 및 주변에 붕괴 및 낙석피해가 우려된다. 연구지역에 설치된 피암터널은 보통 낙석발생가능성이 크고 낙차가 커서 기존의 낙석방지울타리 등으로 낙석방지가 불가능할 경우에 설치한다. UAV로 촬영된 연구대상지역의 면적은 37,800 m^2 , 노출된 사면 면적은 774 m^2 , 평균 경사 약 43° 로 나타났다.

2.2 UAV 사진측량(Photogrammetry)

UAV는 산지와 같은 고위험 지형에서 신속하고 상세한 현장점검, 정성/정량적 자료수집하고 고품질의 공간 결과를 생성하는데 매우 유용하다. UAV를 이용한 사진측량에 앞서 지상 기준점(Ground Control Point, GCP)을 취득하였다. 지상기준점은 주변의 나무 밀집 지역으로 인한 GPS 수신이 되지 않은 곳과 사람이 올라가기에는 위험한 곳을 제외하여 피암터널의 상부 부분과 낙석 위험지역을 중심으로 6곳의 GCP를 취득하였다(Fig. 2).

Fig. 2. Ground Control Points

Table 1에 GPS 측량의 오차를 정리해 나타내었다. 사용된 위성의 수는 5개 이상이며, 평균 수평정밀도는 0.05 m, 수직정밀도는 0.05 m로서 공공측량 작업규정 제 2017-1323호의 네트워크 RTK 측량 규정 중 허용 정밀도 규정인 수평 0.05 m, 수직 0.10 m를 준수하였다(NGII, 2018).

Table 1. Ground Control Point Errors

Point	Coordinate Information		
	Error X (m)	Error Y (m)	Error Z (m)
GCP 1	-0.009	-0.022	0.011
GCP 2	-0.027	0.052	-0.037
GCP 3	0.021	0.016	0.003
GCP 4	-0.003	-0.042	0.023
GCP 5	0.010	0.013	0.005
GCP 6	0.008	-0.019	0.002
mean	-0.00006	-0.00026	0.00134
RMSE(m)	0.0155	0.0309	0.0185

본 연구에 사용된 UAV는 DJI사의 Phantom4 모델이다. 연구 대상 지역이 경사가 급하고 좁은 골짜기 지역에 주변에 나무 등 장애물이 많아서 UAV의 운행을 Grid를 이용한 자동비행보다는 수동으로 수행하는 것이 안전하고 효율적이라 판단하였다. Fig. 3은 연구지역내 UAV의 촬영 경로와 중복도의 결과를 나타낸다.

Fig. 3. Flight Information

촬영된 연구지역의 항공사진들을 정사영상과 수치표면 모델을 제작하기 위해 Pix4D Mapper를 이용하였다. 사진접합(Align Photo), 지형구축(Building Dense Cloud), 질감구축(Build Mesh), 재질생성(Build Texture)의 과정을 수행하였으며, 수치표면모델과 정사영상을 제작할 수 있었다(Jun et al., 2019). 또한 비교분석을 위한 TIN 생성 후의 표고, 경사, 그리드 분석의 수행을 위해 Arc GIS 9.3을 이용하였다. 이렇게 UAV 사진측량을 통해서 생성된 표고자료는 수목과 인공구조물을 포함하는 Grid 해상도 1 m의 Digital Surface Model (DSM)을 생성하였다. 본 연구에서는 국토지리정보원에서 배포하는 1:5,000 수치지도를 이용하여 1 m Grid의 Digital Elevation Model (DEM)을 구축하여 낙석모델에 적용하여 두 가지 표고자료의 차이에서 발생하는 결과를 비교, 검토하였다.

2.3 낙석해석

낙석의 거동을 해석할 때 낙석의 중량이나 크기, 절개면의 거칠기 등 많은 매개변수를 고려해야하며, 특히 낙석의 운동에너지는 피해의 규모에 직접적으로 영향을 주며, 낙석방지망 등 방지시설의 성능 또한 운동에너지를 고려하여 설치한다. 낙석의 운동에너지는 아래의 Eq. (1)로 결정할 수 있다 (Lee et al., 2014).

$$E_i = (1 - \frac{\mu}{\tan \theta}) \cdot (1 + \beta) \cdot m \cdot g \cdot H \quad (1)$$

(여기서, E_i : 낙석에너지(kJ), θ : 사면의 경사, μ : 낙석의 등가마찰계수, β : 회전에너지 계수, m : 낙석의 중량(t), H : 낙석의 낙차(m), g : 중력가속도)

보통 $(1 - \frac{\mu}{\tan \theta}) \cdot (1 + \beta) \leq 1$ 이 되며, 낙석에 의한 운동에너지는 낙석의 규모, 낙차의 크기와 사면의 경사도와 마찰계수에 의해 결정됨을 알 수 있다. 이 식은 경사도, 낙하높이, 낙석의 등가마찰계수 등을 고려하게 간단하게 운동에너지를 계산할 수 있는 장점이 있으나, 다양한 지형에서 일어나는 낙석의 운동형태를 반영한 낙석 거동 해석에는 한계가 있다.

낙석의 다양한 운동형태와 운동에너지를 분석하기 위해서는 수학적 모델을 적용하여 이용할 수 있다. 본 연구에서는 UAV를 이용하여 사진측량을 실시하고 측량결과로부터 사면의 형상을 추출하여 RocScience사의 RocFall Ver. 7을 이용하여 낙석의 거동을 시뮬레이션 하였다. RocFall은 낙석 거동을 평가하도록 설계된 2D 분석 프로그램이며, 낙석의 운동에너지, 속도, 도약 높이, 이동거리를 통계적으로 평가하기 위해 특별히 고안된 프로그램이다(RocScience Inc., 2002). Rocfall은 확률론적 질점계 해석법을 적용하는 프로그램으로 신속하고 다양한 통계처리에 효과적인 장점이 있다(Lee and Park, 2003).

Fig. 4에 RocFall의 주요한 설정과 인자들을 정리해 나타내었다. RocFall은 목적에 따라 각기 다른 분석엔진을 선택할 수 있으며 Lumped mass 또는 Rigid body로 나누어진다. Lumped mass는 각 암석이 매우 작은 구형입자로 이루어져 있다고 보아 낙석의 형상이나 크기에 대한 영향을 검토할 수 없다. 반면 Rigid Body는 낙석의 형상이나 크기가 고려되어 낙석이 경사면을 접촉할 때 발생하는 낙석의 다양한 운동을 반영할 수 있어서 본 연구에서는 Rigid body를 선택하였다. 낙석의 발생지점에 대해서는 point seeder와 line seeder 방식이 있으며, 본 연구에서는 point seeder방식을 이용하여 단일 점에서 낙석이 발생하는 것으로 하였다. RocFall에서는 낙석무게의 평균과 표준편차를 이용하여 확률적으로 낙석의 거동을 해석할 수 있으며, 본 연구에서는 50개의 낙석을 적용하였으며, 사면 구성물질이 같은 조건에서 경사면의 형상에 따른 낙석거동의 변화를 비교, 분석하였다.

낙석이 사면에 충돌하는 과정에서 발생하는 운동에너지 변화는 낙석충돌전후의 속도비율인 반발계수(Coefficient of Restitution)를 적용하여 해석하며, 접선반발계수와 연직반발계수로 벡터성분을 나눠 입력한다. Chau et al. (2002)은 암반사면에서 연직반발계수가 0.3-0.8, 접선반발계수가 0.5-1.0의 범위이며, 토사사면에서는 연직반발계수가 0.1-0.3, 접선반발계수가 0.2-0.7의 범위를 가지며 암반사면의 반발계수가 크다는 것을 보였다. Labiouse and Heidenreich (2009)는 다양한 사면 경사와 최대 1,000 kg의 낙석으로 100 kJ의 half-scale 실험조건하에서 반발계수를 검토하였다. 그 결과 낙하높이가 증가함에 따라 연직반발계수는 크게 변하지 않는 반면, 접선반발계수는 감소하는 결과를 보였다. 사면의 구성물질에 따라 적절한 반발계수를 사용하는 것이 중요하며 유사한 조건에서의 실험값을 적용할 필요가 있음을 밝혔다.

Fig. 4. Parameters in RocFall Program

본 연구에서는 실험에 따라 다양한 충격 조건에서 암석 경사면에 충돌하는 암석에 대한 반발계수를 결정한 Chau et al. (2002)과 Azzoni et al. (1995)의 연구사례를 참고하여 RocFall tutorial이 제시한 값인 연직반발계수 0.3과 접선반발계수 0.8을 이용하였다. 또한 Azzoni et al. (1995)은 대부분의 시뮬레이션에서 낙하 블록의 초기 속도가 0으로 간주되었다고 밝혔다. 그러나 거칠거나 낮은 경사 표면의 경우 암석에 운동량을 전달하기 위해 초기 속도(1-3 m/s)를 할당할 필요가 있음을 제시하였으며(Youssef et al., 2015), 본 연구에서는 2 m/s의 초기수평속도를 적용하였다. 암석의 밀도 등 기타 입력변수는 RocFall tutorial의 추천값을 사용하였다.

3. 결과 및 분석

UAV를 이용한 3D 포인트 클라우드 자료는 DSM으로 생성되어 낙석거동 해석에 활용되었다. DSM 자료를 통하여 절개면의 실제 높이, 암괴의 크기, 사면의 상태 등을 조사하였다. 또한 기존의 수치지도를 이용하여 DEM을 생성하였다. 각각의 DSM, DEM 표고자료를 RocFall 프로그램에 입력하여 낙석의 궤적, 도약높이, 운동에너지를 파악하고 피암터널에 대한 영향정도를 평가하였다.

이 연구에서는 피암터널에 영향을 줄 수 있는 낙석의 경로로서 2개의 경로를 대상으로 하였다(Fig. 5). UAV로 촬영된 정사영상과 고해상도 지형자료를 GIS에서 중첩시킨 후, 낙석의 예상경로를 따라 표고프로파일을 생성하였다

(Fig. 6). 경로 1은 이미 크게 노출된 암석이 존재하는 지점으로 수평거리는 32.4 m이며, 경로 2는 사면에서 경로 1보다 더 높은 곳에 위치하여 낙석의 운동에너지가 클 것으로 예상되는 지점으로 수평거리는 54.4 m이다. 많은 경로를 대상으로 검토할 수 있으나, 시설물에 영향을 줄 수 있는 대표적인 경로를 2개로 선택하여 검토하였다.

Fig. 6에 각 경로에 대한 표고분포를 나타내었다. 회색 선은 수치지도를 이용한 DEM에서의 표고분포이고, 검은 선은 UAV 사진측량을 통해 생성된 DSM에서의 표고분포다. 각 경로의 하단부에는 터널의 상부를 지나도록 설정하였으며, 경로 1에서는 25 m, 경로 2에서는 47 m부터 터널의 상부에 해당한다. 경로 1에서 보면 경로의 상부에서 15 m 지점까지는 DSM과 DEM상의 큰 차이는 보이지 않으나 그 이상의 거리에서는 표고분포가 크게 달라지고 있다. DSM에서는 피암터널 주변에 존재하는 평탄부가 그대로 반영된 반면, DEM에서는 평탄부와 터널도 반영되지 않고 사면이 계속 유지되는 것으로 나타났다. 경로 2에서도 사면에서는 유사하게 나타났으나, 터널주변에서부터 큰 차이를 보였다. 이것은 수치지도 구축시 현장구조물에 대한 반영이 필요하다는 것을 보여준다. 이런 표고의 차이는 낙석거동의 해석결과에도 큰 차이를 만들 것으로 예상된다.

암석에 대한 조건은 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 Egg type의 500 kg, 1,000 kg의 암석을 적용하여 낙석의 도약높이와 운동에너지를 검토하였다. 먼저 Fig. 7(a)는 경로 1에서 DEM상의 사면에서 낙석의 도약높이를 보여준다. RocFall 프로그램

Fig. 5. Overlapping of Orthophoto and DSM (Left) and Photographs along the Path 1 and Path 2 at Research Site

Fig. 6. Elevation Profiles along the Path 1 (a) and Path 2 (b)

Fig. 7. Slope Geometry and Bounce Height (a) and Kinetic Energy (b) on Path 1 by Digital Map

램에서는 도약높이를 계산하여 통계적인 결과를 보여준다. 본 연구에서는 50개의 낙석의 도약높이 중 전체의 95%에 해당하는 통계적 도약높이를 나타내므로 개별적인 각각의 낙석의 도약계적과는 다르다. 낙석은 5 m 구간에서 도약한 다음 사면을 따라 이동하다가 피암터널에 도달하여 시설물에 영향을 줄 수 있는 것으로 나타났다. 20-25 m 지점에서 급경사지가 있으나 낙석의 도약은 보이지 않는다. 이것은 낙석의 도약과 거동은 낙석이 지반에 충돌할 때 발생하는 에너지의 손실량을 의미하는 반발계수에 크게 영향을 받으며, 본 연구지역은 암반사면이 아니라 거친 암석과 토층이

혼재된 지역으로서 반발계수가 낮아 낙석의 도약이 비교적 적은 것으로 예상되었다.

DEM상의 사면의 해석에서 낙석이 피암터널에 도달할 것으로 예측되었으며, 피암터널에 영향을 주는 낙석의 운동 에너지를 파악할 필요가 있다. Fig. 7(b)는 경로 1에서 낙석의 운동에너지 변화를 나타낸다. 사면의 0-5 m 지점과 15-20 m 지점에서 급경사가 있으며 이 구간에서 운동에너지가 증가하였다. 500 kg 암석의 경우 최대 운동에너지가 30 kJ까지 증가하였으며, 1,000 kg으로 증가하면 최대 운동에너지는 60 kJ로 증가하였다.

그러나 20 m 구간 이후에는 사면의 기울기가 감소하면서 운동에너지가 급격히 줄어서 25 m 구간 이후에는 운동에너지는 10 kJ 이하로 감소하였다. 1,000 kg 암석의 경우에도 운동에너지는 20 kJ 이하로 지속적으로 감소하였다. 이런 결과들로부터 암석의 크기와 사면의 기울기가 운동에너지의 변화에 크게 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

Fig. 8은 경로 1에서 DSM자료를 이용한 낙석 거동 해석결과를 나타내었다. 500 kg 낙석은 5 m 구간에서 도약한 다음 사면을 따라 이동하다가 20 m 지점 이전에 멈추는 것으로 예측되었으며, 1,000 kg 낙석도 비슷한 결과를 보였다. 이런 결과는 DEM에서의 결과와 매우 다른 것으로 낙석해석에서 현장자료의 반영이 중요하다는 것을 알 수 있다. 낙석의 제어하기 위한 고랑이 효과적이며 적절한 넓이나 깊이를 가지면 낙석의 운동을 정지시킬 수 있음을 보인 Budetta (2004)의 연구사례를 볼 때 피암터널 주변의 평지부분이 고랑의 역할을 하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8(b)는 경로 1에서 낙석의 운동에너지의 변화를 나타낸다. 사면의 0-5 m 지점에서 운동에너지가 증가한 이후에는 사면의 기울기가 감소하면서 운동에너지도 감소하여 일정한 범위를 유지하고 있다. 500 kg의 경우 10-20 kJ 범위를 유지하고, 1,000 kg은 30-40 kJ 범위를 유지하고 있다. 이후

20 m 지점에서 운동에너지는 소멸하여 모두 정지하고 있다. 암석의 크기가 달라도 이러한 경향은 유사하게 나타났다.

낙석의 거동을 충분히 비교검토하기 위해서 경로의 거리가 비교적 긴 544 m인 경로 2에 대하여 500 kg, 1,000 kg의 암석조건을 적용하여 낙석의 거동과 충격에너지를 검토하였다.

Fig. 9(a)는 경로 2에서 DEM상의 사면에서 낙석 거동을 보여준다. 경로 2의 수평거리는 54.4 m이며, 이 중 거리 47 m부터는 피암터널의 상부에 해당된다. 해석결과 낙석은 사면을 따라 이동하다가 피암터널에 도달하여 시설물에 영향을 줄 수 있는 것으로 나타났다. 경로 1에서는 낙석의 도약은 보이지 않았으나 사면길이가 긴 경로 2에서는 500 kg과 1,000 kg에서 모두 도약을 보이고 있다. 이것은 사면거리가 길어서 운동에너지가 축적되어 도약이 발생한 것으로 예상되었다.

Fig. 9(b)는 경로 2에서 낙석의 운동에너지 변화를 나타내며, 비교적 경로가 짧은 경로 1과는 다르게, 경로 2에서는 경사면의 거리가 길어짐에 따라 운동에너지는 지속적으로 증가하였다. 구간 중 최대 운동에너지는 500 kg의 경우 60 kJ까지 증가하였으며, 1,000 kg으로 증가하면 최대 운동에너지는 130 kJ로 증가하였다. 그리고 피암터널 구간인 47 m 이후에도 운동에너지는 30 kJ과 60 kJ을 유지하면서 낙석이 운동을 지속함을 보여준다.

Fig. 8. Slope Geometry and Bounce Height (a) and Kinetic Energy (b) on Path 1 by UAV Photogrammetry

Fig. 9. Photogrammetry Slope Geometry and Bounce Height (a) and Kinetic Energy (b) on Path 2 by Digital Map

Fig. 10(a)는 경로 2에서 DSM상의 사면에서 낙석의 도약 높이를 보여준다. DEM상 사면에서의 낙석거동과 유사하게 사면하부로 갈수록 도약높이가 증가하면서 사면을 따라 이동한다. 그러나 20 m에서 30 m사이에서 최대도약높이를 나타내며 35 m 이후의 평지에 도달하면서 도약은 급속히 줄어들어 47 m 지점에 있는 피암터널의 상부에는 낙석은 도달하지 않는다. 이것은 DEM상의 낙석거동에서 낙석이 피암터널 상부에 도달하는 반면 UAV적용 3D 지형을 이용한 DSM상의 낙석해석은 낙석이 피암터널에는 영향을 주지 않는 것을 보여주며, 낙석해석에서 현장측량자료의 중요성을 보여주는 결과라고 할 수 있다.

Fig. 10(b)는 경로 2에서 DSM상의 사면에서 낙석의 운동에너지의 변화를 나타낸다. 운동에너지는 사면을 따라 증가하지만 최대운동에너지는 DEM상의 사면보다 작은 값을 보인다. 이것은 DSM상에서는 지표면의 거칠기가 세밀하게 반영되어 낙석의 충돌각도가 달라진 결과라고 판단된다. 거리 35 m이후의 평지에서 운동에너지는 급속하게 감소하여 47 m지점에서는 운동에너지는 거의 소멸되었다. 이것으로 낙석이 피암터널에는 영향을 미치지 않을 것으로 판단되었다.

Fig. 11(a)는 경로 1과 경로 2에서 1,000 kg의 낙석을 대상으로 DEM과 DSM상의 사면에서 낙석의 도약높이(a)와

운동에너지(b)를 비교하여 나타내었다. 경로 1과 2에서 피암터널 주변에서 낙석의 도약높이에 차이가 있는 것으로 나타났다. Perret et al. (2004)은 운동에너지 크기에 따른 피해의 규모를 제시하였다. 300 kJ 이상의 고강도의 에너지는 기반시설과 주택에 중대한 피해를 줄 수 있으며, 30~300 kJ에 이르는 중강도의 에너지는 기반시설에 손상을 입히고 운송수단을 상당기간 동안 교란시킬 수 있다. 저장도 에너지는 30 kJ 이하로 건물 내에 있는 인간과 동물은 거의 위험에 처하지 않는다고 평가했다.

경로 2에서 DEM상의 운동에너지는 터널에서 60 kJ에 도달해서 시설물에 영향을 줄 수 있는 수준인 것으로 나타났다. 현장조사 결과를 반영한 DSM상의 운동에너지는 터널에의 영향은 없는 것으로 예측되었다. 이런 결과들을 통해 경사면에서 낙석이 구조물에 미치는 영향을 조사할 때 수치지도를 이용하여 지형을 생성하는 것보다 현장의 지형을 측량하여 반영하는 것이 해석의 결과에 큰 차이를 가져올 수 있다는 것을 알 수 있었다. 현장지형의 반영과 함께 산지의 실제 조건으로서 수목 등도 반영할 필요가 있다(Perret et al., 2004; Dorren et al., 2005). UAV 3D 클라우드 포인트 측량은 수목을 포함한 현장의 지형정보를 고해상도로 획득할 수 있다는 점에서 매우 유용하고 판단되며 향후 연구를 통해서 수목

Fig. 10. Slope Geometry and Bounce Height (a) and Kinetic Energy (b) on Path 2 by UAV Photogrammetry

Fig. 11. Comparison of Bounce Height (a) and Kinetic Energy (b) between DEM and DSM

등도 고려한 낙석의 거동해석도 이루어질 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 절취된 비탈면의 낙석피해방지를 위하여 UAV를 이용한 현장측량자료와 수치지도를 이용하여 표고 자료를 적용하여 RocFall프로그램을 이용해 낙석의 무게와 사면의 경로에 따른 변화를 분석하였다. 측량여건이 열악한 산지에서도 UAV측량의 RMSE가 0.015~0.031 m의 범위로 확인되어 정확도를 유지할 수 있음을 보였다. 본 연구지역은 암반이 혼합된 토사사면에 해당되며, 암반사면보다 낮은 반발계수를 적용하여 시뮬레이션을 하였다. 사면의 평균경사는 43°이며, 낙석의 추정 경로 1은 이미 크게 노출된 암석이 존재하는 지점으로서 수평거리는 32.4 m이며, 경로 2는 사면에서 더 높은 곳에 위치하여 낙석의 운동에너지가 클 것으로 예상되는 지점으로 수평거리는 54.4 m이다. 암석에 대한 조건은 Egg type의 500 kg, 1,000 kg의 암석을 적용하여 낙석의 도약높이와 운동에너지를 검토하였다.

경로 1과 2에서 피암터널 주변의 지표고가 반영된 DSM에서는 낙석이 도달하지 않는 반면, 현장의 지표고가 반영되지 않은 DEM의 경우 피암터널 구간에서도 1 m 이상의 낙석의 도약이 발생하는 것으로 나타났다. 경로 2에서 DEM상의 운동에너지는 터널에서 60 kJ에 도달해서 시설물에 영향을 줄 수 있는 수준인 것으로 나타났으나, 현장조사 결과를 반영하여 DSM을 적용한 운동에너지 예측 결과는 터널에의 영향은 없는 것으로 추정되었다. 이런 결과들을 통해 경사면에서 낙석이 구조물에 미치는 영향을 조사할 때 수치지도를 이용하여 지형을 생성하는 것보다 현장의 지형을 측량하여 반영하는 것이 해석의 결과에 큰 차이를 가져올 수 있다는 것을 알 수 있었다. 기존의 수치지도를 그대로 이용하는 것보다는 UAV를 이용하여 3D 클라우드 포인트를 생성한 다음, 고해상도 지형자료를 이용하여 낙석의 거동을 예측하는 것이 현장의 지형조건을 정확하게 반영하기 위한 적절한 방법이 되었다. UAV 사진측량은 현장접근이 어려운 산지에서 작업이 이루어지는 만큼 안전사고에 각별히 유의해야 하며, 동시에 현장에서의 낙석의 위험성을 판단하는데 효과적으로 이용될 수 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2018년도 한국연구재단 지역대학 우수과학자 지원사업의 연구비지원(2018RIDIA3B07049326)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

Abellán, A., Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., and Vilaplana,

- J.M. (2009). Detection of millimetric deformation using a terrestrial laser scanner: Experiment and application to a rockfall event. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 9, pp. 365-372.
- Agliardi, F., and Crosta, G.B. (2003). High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 40, No. 4, pp. 455-471.
- Asteriou, P., and Tsiambaos, G. (2016). Empirical model for predicting rockfall trajectory direction. *Rock Mech. Rock Eng.*, Vol. 49, No. 3, pp. 927-941.
- Azzoni, A., La Barbera, G., and Zaninetti, A. (1995). Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol. 32, No. 7, pp. 709-724.
- Bae, G.J., Koo, H.B., and Back, Y. (2002). Study on suggestion a standard installation for damage reduction alarm system using cut-slope data. *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 12, No. 1, pp. 53-61.
- Budetta, P. (2004). Assessment of rockfall risk along roads. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 4, pp. 71-81.
- Chau, K.T., Wong, R.H.C., and Wu, J.J. (2002). Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, Vol. 39, No. 1, pp. 69-77.
- Cho, Y.S., and Kim, Y.S. (2010). Analysis for behavior of rockfall movement by Cheonbuldong Valley of Seoraksan National Park. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 26, No. 5, pp. 49-55.
- Dorren, L.K.A. (2003). A review of rockfall mechanics and modelling approaches. *Progress in Physical Geography*, Vol. 27, No. 1, pp. 69-87.
- Dorren, L.K.A., Berger, F., and Putters, U.S. (2006). Real-size experiments and 3-D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 6, pp. 145-153.
- Dorren, L.K.A., Berger, F., Le Hir, C., Mermin, E., and Tardif, P. (2005). Mechanisms, effects and management implications of rockfall in forests. *Forest Ecology and Management*, Vol. 215, No. 1-3, pp. 183-195.
- Duarte, R.M., and Marquínez, J. (2002). The influence of environmental and lithologic factors on rockfall at a regional scale: An evaluation using GIS. *Geomorphology*, Vol. 43, No. 1-2, pp. 117-136.
- Evans, S.G., and Hungr, O. (1993). The assessment of rockfall

- hazard at the base of talus slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 30, No. 4, pp. 620-636.
- Gigli, G., Morelli, S., Fornera, S., and Casagli, N. (2014). Terrestrial laser scanner and geomechanical surveys for the rapid evaluation of rock fall susceptibility scenarios. *Landslides*, Vol. 11, No. 1, pp. 1-14.
- Guzzetti, F., Crostab, G., Dettic, R., and Agliardi, F. (2002). STONE: A computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls. *Computers & Geosciences*, Vol. 28, No. 9, pp. 1079-1093.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., and Wieczorek, G.F. (2003). Rockfall hazard and risk assessment in the Yosemite Valley, California, USA. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 3, No. 6, pp. 491-503.
- Jun, B.H., Kim, N.G., Jun, K.W., and Choi, B.J. (2019). Safety management of steel pipe scaffold using UAV. *J. Korean Soc. Disaster Secur.*, Vol. 12, No. 3, pp. 59-67.
- Keylock, C., and Domaas, U. (1999). Evaluation of topographic models of rockfall travel distance for use in hazard applications. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, Vol. 31, No. 3, pp. 312-320.
- Kim, D.H., Ryu, D.W., Kim, S.C., Yoon, S.K., and Lee, W.J. (2007). Estimation of weight distribution of rockfall block by joint measurement and study on its application to rockfall simulation. *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 23, No. 11, pp. 67-76.
- Kim, Y.G., and Kwon, J.W. (2019). The maintenance and management method of deteriorated facilities using 4D map based on UAV and 3D point cloud. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, Vol. 19, No. 3, pp. 239-246.
- Koo, H.B., Park, H.J., and Paik, Y.S. (2001). Characteristics and energy absorbing capacity for rockfall protection fence from in-situ rockfall tests. *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 17, No. 6, pp. 111-121.
- Korea National Park Service (KNPS). (2019). *Rockfall in National Park is scientifically managed* (March 11, 2019, Press release). Retrieved from <http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?pagerOffset=400&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=&orgCd=&boardId=952395&boardMasterId=1&boardCategoryId=&decorator=>
- Labouse, V., and Heidenreich, B. (2009). Half-scale experimental study of rockfall impacts on sandy slopes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 9, pp. 1981-1993.
- Lan, H., Martin, C.D., and Lim, C.H. (2007). RockFall analyst: A GIS extension for three-dimensional and spatially distributed rockfall hazard modeling. *Computers & Geosciences*, Vol. 33, No. 2, pp. 262-279.
- Lee, D.G., Yu, Y.G., Ru, J.H., and Lee, H.J. (2016). change monitoring in ecological restoration area of open-pit mine using drone photogrammetry. *Journal of the Korean Society for Geospatial Information Science*, Vol. 24, No. 4, pp. 97-104.
- Lee, J.D., Park, S.B., and Bae, W.S. (2014). A study on efficient design of rockfall prevention netting. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 15, No. 12, pp. 53-59.
- Lee, J.H., Jun, K.W., and Jun, B.H. (2018). Application of drones for the analysis of hazard areas in mountainous disaster. *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 33, No. 3, pp. 65-70.
- Lee, J.Y., and Park, H.D. (2003). Comparison of commercial softwares for rockfall simulation and analysis & prediction of rockfall. *Proceedings of the Annual Conference*, Korean Society of Civil Engineers, pp. 3800-3805.
- Lim, S.B., Seo, C.W., and Yun, H.C. (2015). Earthwork management for dredged soil dumping area by using drone. *Proceedings of KSCE 2015 Convention*, Korean Society of Civil Engineers, pp. 99-100.
- Manousakis, J., Zekkos, D., Saroglou, F., and Clark, M. (2016). Comparison of UAV-enabled photogrammetry-based 3D point clouds and interpolated DSMs of sloping terrain for rockfall hazard analysis. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLII-2/W2, pp. 71-77.
- National Geographic Information Institute (NGII). (2018). *Public survey work rules*.
- Okura, Y., Kitahara, H., Sammori, T., and Kawanami, A. (2000). The effects of rockfall volume on runout distance. *Engineering Geology*, Vol. 58, No. 2, pp. 109-124.
- Perret, S., Dolf, F., and Kienholz, H. (2004). Rockfalls into forests: Analysis and simulation of rockfall trajectories: Considerations with respect to mountainous forests in Switzerland. *Landslides*, Vol. 1, pp. 123-130.
- RocScience Inc. (2002). *RocFall user's guide: Risk analysis of falling rocks on steep slopes*.

Sarro, R., Riquelme, A., García-Davalillo, J.C., Mateos, R.M., Tomás, R., Pastor, J.L., et al. (2018). Rockfall simulation based on UAV photogrammetry data obtained during an emergency declaration: Application at a cultural heritage site. *Remote Sensing*, Vol. 10, No. 12, 1923. doi:10.3390/rs10121923

Seo, Y.S., Jang, H.S., and Kim, K.Y. (2012). Assessment of rockfall hazard in the northeast region of Ulleung-Do. *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 22, No. 3, pp. 353-363.

Yilmaz, I., Yildirim, M., and Keskin, I. (2008). A method for mapping the spatial distribution of RockFall computer program analyses results using ArcGIS

software. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 67, No. 4, pp. 547-554.

Youssef, A.M., Pradhan, B., Al-Kathery, M., Bathrellos, G.D., and Skilodimou, H.D. (2015). Assessment of rockfall hazard at Al-Noor Mountain, Makkah City (Saudi Arabia) using spatio-temporal remote sensing data and field investigation. *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 101, pp. 309-321.

Received	May 12, 2020
Revised	May 14, 2020
Accepted	June 16, 2020