연구논문

3D 스캐닝 기법을 활용한 갱내채광 석회석 광산 광주의 안전성 분석

김동휘¹ · 김경만² · 백환조^{3*}¹강원대학교 산업기술연구소 박사후연구원, ²(재)영월산업진흥원 선임연구원, ³강원대학교 에너지자원공학과 교수

Stability Analysis of Pillar in Underground Limestone Mine Using 3D Scanning Techniques

Donghui Kim¹, Gyoungman Kim² and Hwanjo Baek^{3*}¹Postdoctoral Researcher, Institute to Industrial Technology, Kangwon National University, Kangwon, Korea²Senior Researcher, Yeongwol Industrial Promotion Agency, Kangwon, Korea³Professor, Department of Energy and Resources Engineering, Kangwon National University, Kangwon, Korea

***Corresponding Author.** Hwanjo Baek, hwanjo@kangwon.ac.kr, Department of Energy and Resources Engineering, Kangwon National University, Kangwon, Korea

Received

31 December 2021

Final version Received

27 January 2022

Accepted

22 February 2022

Abstract

In this study, point-cloud data were obtained using a laser scanner for an underground limestone mine. A total of 581 discontinuities were extracted and statistically treated using the obtained point-cloud data, and a discrete fracture network was simulated and applied to the numerical analysis model. The stability was evaluated for two pillars located in large underground openings using the numerical analysis model. The evaluation results based on the safety factor and displacement showed that the safety factor tended to decrease as it progressed from the center of the pillar to the side wall. However, the pillars showed a minimum safety factor of 1.0 or higher. For the displacement, a maximum displacement of 9 mm occurred in a part of the pillar side wall. Nevertheless, the stability of the pillar was achieved, as it was insignificant compared to the size of the pillar.

Key words : Laser scanner, Point-cloud data, Discrete fracture network (DFN), Safety factor, Displacement

요약

본 연구에서는 갱내채광 광산을 대상으로 레이저 스캐너를 이용하여 점군 데이터를 획득하였다. 획득한 점군 데이터를 활용해 총 581개의 불연속면을 추출하여 통계처리 후, 불연속 균열망을 모사하여 수치해석 모델에 적용하였다. 수치해석 모델을 활용해 대형 채광장에 위치하는 두 개의 광주를 대상으로 안정성을 평가하였다. 안전율과 변위를 기준으로 평가한 결과, 안전율은 광주의 중심에서 측벽으로 진행할수록 낮아지는 경향을 보였으나 모두 최소안전율 1.0 이상으로 나타났다. 변위의 경우 측벽 일부 구역에서 9 mm의 최대변위가 발생하였지만, 광주의 규모에 비교하면 미미한 수준으로 나타나 광주의 안정성이 확보되는 것으로 분석되었다.

주요어 : 레이저 스캐너, 점군 데이터, 불연속 균열망, 안전율, 변위

서 론

불연속면은 암반의 강도, 변형계수 등에 영향을 미치는 주요 요인으로서 불연속면의 발달 정도 및 특성에 따라 암반에 위치한 지하 구조물의 역학적 안정성은 영향을 받게 된다. 지하 구조물의 안정성을 확보하기 위해서는 현지 암반의 불연속면 발달특성(방향성, 크기, 밀도, 간격 등)을 파악해야 한다. 일반적으로 현장에서의 불연속면 조사방법은 지표나 노두에 노출된 균열을 조사하는 조사선법(scanline survey)과 조사창법(window survey)이 활용되고 있다. 하지만 이 방법은 측정자의 관점에 따라 주관적으로 판단할 수 있으며, 조사법의 특성상 노두 전체를 조사할 수 없는 한계를 가지고 있다. 최근 국내외의 많은 연구자들이 이런 한계점을 보완하기 위해서 레이저 스캐너를 이용한 조사방법을 연구하고 있다. 국내의 경우 레이저 스캐너를 이용하여 절리의 방향성을 추출하여 신뢰도를 분석한 연구(Park *et al.*, 2015; Lee and Jeon, 2016), 레이저 스캐너를 이용한 암반 절리면의 거칠기 측정에 관한 연구(Kim and Kemeny, 2009; Lee and Jeon, 2017), 주방식 하이브리드 채광법이 적용되고 있는 광산에 대하여 레이저 스캐너로 채광장을 측량하여 수직 안전광주의 안정성을 분석한 연구(Lee *et al.*, 2017), 레이저 스캐너를 이용하여 지하공동의 굴진장 및 여굴 평가와 갱내채광 광산의 공간정보 구축에 관한 연구(Noh *et al.*, 2015; Park and Jung, 2017; Park and Lee, 2019) 등이 있다. 국외의 경우 특정 광주에 대해 레이저 스캐닝을 수행하여 대상광산의 불연속 균열망 생성 및 추출에 관한 연구(Monsalve *et al.*, 2019), 정기적으로 레이저 스캐닝을 수행하여 시간에 따른 광주의 변위를 계속하여

붕괴 징후가 있는 광주를 예측한 연구(Slaker, 2015; Kukutsch *et al.*, 2016), 사면의 안정성 분석(Oppikofer *et al.*, 2009; Kasperski *et al.*, 2010)과 낙석 및 침식에 관한 연구(Rosser *et al.*, 2005; Schürch *et al.*, 2011) 등이 있다. 국내의 연구사례를 분석한 결과, 토목 및 건설현장과 광업분야에서 레이저 스캐너를 활용한 연구가 다수 진행되었으며 앞으로도 레이저 스캐너의 활용도는 증가할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 갱내채광 광산을 대상으로 레이저 스캐너를 이용하여 3D 공간좌표를 기록하는 점군 데이터(point-cloud data)를 획득하고 광주의 형상을 3D로 모델링 하였다. 또한, 광주 주변에 분포하는 불연속면의 특성(방향성, 길이, 밀도)에 대한 정보를 통계 처리하여 불연속 균열망을 구현하였다. 최종적으로 3D로 구현된 광주와 불연속 균열망을 수치해석에 적용하여 광주의 안정성을 분석하였다.

현장 개요

연구지역은 강원도 정성군에 위치한 갱내채광 석회석 광산이며, 풍춘층 상부 고품위 석회석을 대상으로 개발되고 있다(Fig. 1). 화강암과 접하는 풍춘 석회암은 전반적으로 백색 석회암으로 입상 당정질 산출 특징을 보이며 대부분 고품위 석회석 광산에서는 풍춘층을 관입한 산상~염기성 암맥이 다수 확인된다(Kim *et al.*, 2016).

해당 광산은 주방식 채광법을 적용하고 있으며 폭 9~12 m, 높이 6 m의 크기로 1~3편까지 개발되었다. 특히 3편의 경우 대형 채광장이 개설되어 있으며 채광장 중앙에는 두 개의 대형 광주가 존재하고 있어(Fig. 2), 이에 대한 안정성 검토가 필요한 실정이다.

Fig. 1. Geological map of test-bed mine (Kim *et al.*, 2016).

Fig. 2. Large pillars in test-bed mine.

Test-bed 광산 데이터 취득

본 연구에서는 레이저 스캐너를 활용하여 3편에 존재하는 대형 채광장을 중심으로 측량을 수행하고 점군 데이터를 취득하였다. 취득한 점군 데이터를 활용하여 대형 채광장 및 광주를 3D로 구현하였고, 불연속면의 특성을 분석하여 DFN 모델의 입력 변수로 활용하였다(Fig. 3).

3D 레이저 스캐닝

측량에 사용된 3D 레이저 스캐너는 Trimble Inc.의 X7 모델이다(Fig. 4). X7은 고정식 레이저 스캐너로, 자동으로 수평을 보정 할 뿐만 아니라 형상 정합 알고리즘으로 어두운 광산 현장 내에서도 자동 정합이 가능하다. Table 1은 X7의 주요 성능을 정리한 것이다(Trimble, 2021).

측량 시 음영지역이 최소화되고 점군 데이터의 정합이 용이하도록, 스캐닝 간격을 조절해 가면서 채광장과 광주 및 갱도를 대상으로 측량을 수행하였다. 각 측점(station)에서의 측정시간은 약 2분으로 설정하였으며 이때 각 측점에서 취득된 점군 데이터는 약 11,000,000 포인트이다. 스캔이 완료된 후 점군 데이터 후 처리 소프트웨어인 RealWorks (Trimble Inc.)를 이용하여 점군 데이터를 정합(resigntration)하였다. 점군 데이터에는 암반과 관련된 정보 뿐만 아니라 케이블이나 사람 등 불필요한 피사체의 공간정보도 포함되어 있다. 따라서 정합을 완료한 후, 불필요한 데이터를 제거하여 최종 점군 데이터를 완성하였다(Fig. 5).

불연속면 특성 분석

불연속 균열망은 실제 불연속암반을 최대한 근접하게 묘사하기 위해 현장에서 획득한 불연속면의 방향, 크기, 밀도 등의 통계적인 자료를 바탕으로 실제 불연속암반을 묘사하는 추계학적(stochastic)인 모델링 기법을 말한다(Park *et al.*, 2019). 본 연구에서는 오픈소스 소프트웨어인 CloudCompare를 활용하여 점군 데이터를 솔리드로 변환한 후,

Fig. 3. Laser sacnning and DFN modeling process.

Fig. 4. Laser scanner used in this study.

Table 1. Specification of X7

Range	0.6 m~80 m
Range Noise	< 2.5 mm @ 30 m
Laser wavelength	1,550 nm
Scan speed	500,000 points/sec
Max. field of view	360°(horizontal) × 282°(vertical)
Operating Temperature	-20°C~50°C
Weigh	5.8 kg

대형 채광장에 분포하는 불연속면의 특성을 분석하였다.

불연속면 방향성은 실제 현장에서 경사와 주향을 이용하여 불연속압반을 조사하는 가장 기초적인 자료이다(Kim, 2021). 방향성을 나타내는 대표적인 분포는 피셔 분포이며, 이는 경사각은 일정한 주방향에 대해 분포하고 주향은 무작위로 분포시키는 방법이다(Fisher, 1953; Einstein and Baecher, 1983; Priest, 1993). 주방향에 대한 군집도는 피

셔상수 K 로 대표할 수 있다(Fisher, 1953). 본 연구에서는 CloudCompare에 있는 Facets를 이용하여 대형 채광장에 분포하는 불연속면의 방향성을 추출하였다. Facets는 least-square fitting algorithm을 이용하여 불연속면의 방향성을 자동으로 측정할 때 유용하다(Dewez *et al.*, 2016). Facets의 순서는 첫 번째로 모델을 구성하는 점들이 인접한 점들과 연결되어 기본 평면을 만들고 두 번째로 기본 평면은 주변의 다른 평면들과 그룹화가 되며 최종적으로 서로 평행하는 평면들은 같은 집단으로 병합이 된다(Dewez *et al.*, 2016). 병합된 평면들 중에는 실제 불연속면이 아닌 평면들도 측정이 되므로 이에 대한 보정이 필요하다. 본 연구에서는 클리노미터를 활용해 현장에서 측정한 방향성을 기준으로 필터링을 수행하였다. Fig. 6은 대형 채광장 주변에 존재하는 불연속면의 방향성 분석을 완료한 모습이며, Fig. 7은 Dips 소프트웨어를 활용하여 대표 방향성과 피셔상수 K 를 분석한 결과이다.

Fig. 5. 3D visualization of point-cloud obtained from test-bed mine.

Fig. 6. Fracture orientation measurements obtained using Facets plugin.

Fig. 7. Orientation distributions of fracture sets.

불연속면 길이에 대한 분포함수는 흔히 음지수분포, 로그-정규분포 또는 정규분포 등을 따른다(Kim, 2021). 2D 길이 자료로부터 3D 불연속면 크기를 도출해 내기 위해 set 1은 184개, set 2는 397개의 불연속면 길이를 수동으로 측정하여 분포함수를 결정하였다. 정규성 검정에서는 SPSS 소프트웨어를 활용하였다. 정규성 검정의 기준은 왜도는 절대값 3 미만, 첨도는 절대값 8을 초과하지 않으면 분포함

수가 적합하다고 판단하였다(Kline, 2015). Set 1의 경우 왜도 1.6, 첨도 3.2로 로그-정규분포로 나타났고 set 2는 왜도 0.7, 첨도 0.6으로 정규분포가 적합하다는 결과를 얻을 수 있었다(Fig. 8).

불연속면 밀도는 암반 내 존재하는 불연속면의 정도를 정량적으로 평가하는 기준이다(Kim, 2021). P_{AB} 의 아래 첨자 A는 조사대상 구역의 차원(1D-line, 2D-surface, 3D-volume)을 의미하고, 아래첨자 B는 측정된 불연속면의 차원(0D-count, 1D-line, 2D-plane, 3D-volume)을 의미한다(Itasca, 2017). 밀도 측정에는 CloudCompare에 있는 Compass 기능을 활용해 측정된 불연속면 길이의 합에서 조사구역의 넓이로 나눈 값인 P_{2l} 을 산정하였다. 최종적으로 산정된 불연속면의 특성 분석 결과는 Table 2와 같다.

3D 불연속 균열망 모사

3D 불연속 균열망 모사에 사용된 소프트웨어는 3DEC (Itasca Inc.)이다. 3DEC에서 균열망을 모사하는데 필요한 인자는 불연속면의 방향성, 길이, 밀도이다. Table 2의 결과를 기초로 3D 불연속 균열망을 모사하였다. 균열망의 발생 영역은 가로 100 m, 세로 100 m, 높이 40 m로 설정하였다. 균열의 형태는 원형이며 방향성은 Fisher 분포를 따른다.

(a) Set 1

(b) Set 2

Fig. 8. Fracture length distribution.

Fig. 9. Generation of three-dimensional DFN model.

Table 2. Results of fracture characteristics around the large underground openings

		Set 1	Set 2
Orientation	Dip direction / Dip	290 / 80	070 / 73
	Fisher constant (K)	73.93	30.39
Length	Distribution function	Log-normal distribution	Gaussian distribution
	Mean (m)	5.57	1.66
	Standard deviation	1.56	0.73
Intensity	P_{2l} (m^{-1})	0.2	0.15

균열의 밀도는 3D 모델링에서 가장 많이 사용하는 면적으로 밀도를 표현하는 방법을 이용하였다. 균열의 길이는 set 1은 로그-정규분포로 set 2는 정규분포로 설정하여 표준편차의 범위 내에서 광주를 중심으로 무작위로 분포시켜 총 6,409개의 균열을 모사하였다(Fig. 9).

광주 안정성 평가

대형 채광장 중앙에 위치한 두 개의 광주를 대상으로 안정성을 평가하였다. 안정성 해석 모델에 적용한 구성모델은 탄소성모델인 Mohr-Coulomb 파괴식을, 불연속면은 Coulomb slip 모델을 적용하였다. 안정성 해석의 입력인자는 test-bed 광산 인근에서 수행된 자료를 참고하여 적용하였다(Table 3). 안정성 평가 방법으로는 암반의 파괴 근접도를 표현하는 개념인 안전율(safety factor)과 변위(displacement)를 기준으로 판단하였다. 안전율 평가 기준은 광주의 안전율이 1.0 미만의 결과를 나타낼 경우 진행성 파괴의 위험이 높은 것으로 판단하였고, 최소안전율 1.0~1.5 미만일 경우 붕괴우려는 없으나 보강이 필요한 범주, 1.5 이상일

경우 안정한 상태로 평가하였다(Brown, 1980). 변위의 경우 절대적인 크기보다는 경향 파악에 중점을 두었다.

해석모델 설정

해석모델의 크기는 대형 채광장을 중심으로 가로 100 m, 세로 100 m, 높이 40 m로 불연속 균열망 발생 영역과 동일하게 설정하였다(Fig. 10). 채광장은 지표하 50 m에 위치하는 것으로 설정하였고 측압계수는 1로 설정하였다. 경계조건은 수평방향과 바닥면의 변위를 구속하고 중력만 작용하도록 하였다. 앞서 모사한 3D 불연속 균열망을 모델에 인식시키고 초기응력이 재분배 되도록 한 뒤 대형 채광장이 굴착된 것으로 설정하여 해석을 수행하였다. 해석이 완료된 후, 광주 주변 영역을 추출하여 남서와 북동방향으로 안정성 평가를 진행하였다(Fig. 11).

Mohr-Coulomb 파괴기준에 의한 파괴접근도

Mohr-Coulomb 파괴기준은 일반적으로 암반의 파괴 이론에 적용되고 있으며 전단응력과 전단강도를 비교하여 지반의 전단파괴 가능성을 판단한다(Lee *et al.*, 2016). Mohr-

Table 3. Material properties used in stability assessment model of large pillars (Sunwoo *et al.*, 2004)

Rockmass					
Density (kg/m ³)	Bulk modulus (GPa)	Shear modulus (GPa)	Friction angle (degree)	Cohesion (MPa)	Tensile strength (MPa)
2,730	7.63	4.8	39	8.33	1.25
Discontinuities					
Normal stiffness (GPa/m)	Shear stiffness (GPa/m)		Friction angle (degree)	Cohesion (MPa)	
3.13	8.13		38	0.04

Fig. 10. Stability assessment model of large pillars.

Coulomb 파괴접근도 방법은 암반의 응력원이 파괴포락선에 어느 정도 접근하였는가에 따라 파괴 및 파괴 가능성을 판단할 수 있으며, 이는 식 (1)과 같이 파괴접근도(R)로 표현할 수 있다(Lee *et al.*, 2016).

$$R = \min \left[\frac{d_1}{D_1}, \frac{d_2}{D_2} \right] \quad (1)$$

여기서, D_1 과 D_2 는 유효응력, 압축, 인장영역의 파괴포락선까지 거리를 나타내는 접근도이고 d_1 과 d_2 는 응력원에서 포락선까지의 거리를 나타내는 파괴여유도이며 Fig. 12와 같다(Kim *et al.*, 2021).

암반이 최고로 안정한 상태는 파괴접근도 R 이 1.0인 정

수압 상태일 때이고, 파괴접근도 R 이 0이면 완전 파쇄암을 나타낸다(Melosh and Williams, 1989). 식 (2)와 같은 안전율(F_s) 개념으로도 표현할 수 있으며, 안전율이 1.0 이하이면 암반이 파괴되기 쉬운 불안정한 상태로 간주한다(Melosh and Williams, 1989).

$$F_s = \frac{D_1}{r} = \frac{D_1}{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}} = \frac{\left(\frac{c}{\tan \phi} + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right)}{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}} \sin \phi = \frac{\left(\frac{2c}{\tan \phi} + \sigma_1 + \sigma_3 \right)}{\sigma_1 - \sigma_3} \sin \phi \quad (2)$$

Fig. 11. Areas used for stability assessment.

Fig. 12. Concept of failure proximity by Mohr-Coulomb failure criteria (Melosh and Williams, 1989).

Fig. 13. Calculation zones of safety factor.

(a) Pillar A

(b) Pillar B

Fig. 14. Safety factor at pillars A and B.

안전성 평가 결과

안전율의 경우 광주의 측정 지점에서 발생하는 최대 및 최소주응력을 측정 후 Mohr-Coulomb 파괴기준의 파괴 접근도 방법으로 안전율을 검토하였다. 검토 위치는 Fig. 13과 같이 광주별로 구역을 나누고 중앙을 기준으로 좌우로 5개의 안전율을 산출하였다(Fig. 14). A와 B 광주 모두 중심부와 비교해 측벽에서의 안전율이 낮게 나타났지만, 최소안전율 1.0 이상을 보여 안정성은 어느 정도 확보된 것으로 판단된다.

Fig. 15는 광주에 발생한 변위 분포도를 나타낸 것이다.

(a) S-W direction

(b) N-E direction

Fig. 15. Displacement distributions of pillars A and B.

Fig. 16. Bedding observed in pillar B.

남서방향의 B 광주 측벽 일부 구역에서 약 9 mm의 최대변위가 발생하였지만(Fig. 15(a)), 광주의 규모를 고려하였을 때 안정성에는 큰 영향을 주지 않을 것으로 보인다. 최대변위가 발생한 구역은 실제 현장에서도 다수의 층리 분포와 부분적으로 암반의 탈락이 발생하는 구역이다(Fig. 16). 따라서 다른 구역에서 발생한 1~5 mm와 비교해 상대적으로 높은 변위가 발생한 것으로 판단된다.

이상의 결과들을 종합해 볼 때 현재의 암반 조건이 유지될 경우 채광장의 안정성은 확보되는 것으로 분석된다.

결 론

본 연구에서는 갱내채광 광산을 대상으로 레이저 스캐너를 활용해 불연속면과 갱도 및 광주를 측량하여 점군 데이터를 획득하였다. 획득한 점군 데이터를 활용하여 불연속 균열망과 채광장 및 광주를 3D로 구현하고 광주의 안정성 평가를 수행하였다. 이상의 연구로부터 도출된 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

대형 채광장을 중심으로 총 581 개의 불연속면을 추출하여 통계처리 후 불연속 균열망을 모사하였다. 기존의 조사선과 조사창법과 비교하였을 때, 접근하기 힘든 부분도 샘플링이 가능하였고 시간 절약과 객관적인 자료 취득이 가능하였다. 그동안 직사각형 또는 원형 형태로 구현된 갱도와 광주를 수치해석에 적용해 현장 상황을 충분히 반영하지 못했다. 하지만 레이저 스캐너를 통해 실제 형상과 동일한 갱도와 광주를 수치해석에 적용할 수 있어 해석 결과의 신뢰도를 높일 수 있을 것으로 생각한다.

광주의 안정성 평가 결과, 안전율은 광주의 중심에서 측벽으로 진행할수록 낮아지는 경향을 보였으나, A와 B 광주 모두 최소안전율 1.0 이상으로 나타났다. 변위의 경우 B 광주 측벽 일부 구역에서 9 mm의 최대변위가 발생하였고, 그 외 지점에서는 1~5 mm의 변위가 발생하여 광주의 규모에 비교하여 미미한 수준으로 나타났다. 안전율과 변위를 기준으로 평가한다면 현재 대형 채광장에 존재하는 두 개의 광주는 안정성이 확보되는 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 레이저 스캐너 기법이 불연속면 특성 분석과 갱도 및 광주의 형상을 구현하는데 효과적으로 적용될 수 있음을 확인할 수 있었다. 현재 대부분의 광산은 광산 구조물, 갱도, 채굴 면적, 불연속면 정도 등을 2D 도면을 기반으로 기록 및 관리하고 있어 안전사고 발생 시 정확한 정보를 제공하지 못하고 있다. 레이저 스캐너를 활용하여 정교한 측량성과를 기반으로 갱도를 설계 한다면 장기적인 광산개발 및 관리와 채굴계획에 도움을 줄 수 있을 것으로 보인다.

사 사

이 논문은 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2021R111A3A0403710311)의 결과입니다. 지원에 감사드립니다.

References

- Brown, E.T., 1980. *Underground excavations in rock*, CRC Press, Florida, USA, 536p.
- Dewez, T.J.B., Girardeau-Montaut, D., Allanic, C., and Rohmer, J., 2016. Facets: a cloudcompare plugin extract geological planes from unstructured 3d point clouds, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 4, p.799-804.
- Einstein, H.H. and Baecher, G.B., 1983. Probabilistic and statistical methods in engineering geology, *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 16(1), p.39-72.
- Fisher, R.A., 1953. Dispersion on a sphere, *Proceeding of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 217(1130), p.295-305.
- Itasca Consulting Group Inc., 2017. *3DEC user manual*, Minneapolis, USA.
- Kasperski, J., Delacourt, C., Allemand, P., Potherat, P., Jaud, M., and Varrel, E., 2010. Application of a terrestrial laser scanner (TLS) to the study of the Séchillience Landslide (Isère, France), *Remote Sensing*, 2(12), p.2785-2802.
- Kim, C.H. and Kemeny, J., 2009. Measurement of joint roughness in large-scale rock fracture using lidar, *Tunnel & Underground Space*, 19(1), p.52-63.
- Kim, D.H., 2021. *Stability analysis of underground mines considering the hydro-mechanical characteristics of fractured rockmass*, PhD Thesis, Kangwon National University, Chuncheon, Korea, 123p.
- Kim, D.H., Kim, B.G., and Baek, H.J., 2021. Analysis of factors affecting the stability of an underground mine, *Journal of the Korean Society of Mineral & Energy Resources Engineers*, 58(1), p.75-84.
- Kim, Y.H., Kim, G.B., Choi, S.G., and Kim, C.S., 2016. SWIR application for the identification of high-grade limestones from the upper puncheon formation, *Economic and Environmental Geology*, 49(5), p.335-347.
- Kline, R.B., 2015. *Principles and practice of structural equation modeling*, Guilford publications, New York, USA, 534p.
- Kukutsch, R., Kajzar, V., Waclawik, P., and Nemcik, J., 2016. Use of 3d laser scanner technology to monitor coal pillar deformation, *Proceeding of the 16th Coal Operators Conference*, Mining Engineering, University of Wollongong, Australia,

- p.99-107.
- Lee, C.K., Lee, K.I., and Kang, J.G., 2016. An assessment of rock pillar stability in tunnel asymmetric diverging area using the Mohr-Coulomb failure theory, *Journal Korean Geosynthetics Society*, 15(4), p.17-23.
- Lee, S.D. and Jeon, S.W., 2016. A study on the extraction of slope surface orientation using lidar with respect to triangulation method and sampling on the point cloud, *TUNNEL & UNDERGROUND SPACE*, 26(1), p.46-58.
- Lee, S.D. and Jeon, S.W., 2017. A study on the roughness measurement for joints in rock mass using lidar, *TUNNEL & UNDERGROUND SPACE*, 27(1), p.58-68.
- Lee, S.J., Kim, B.R., Jin, Y.H. and Choi, S.O., 2017. A study on the stability analysis of underground mine using lidar, *TUNNEL & UNDERGROUND SPACE*, 27(6), p.406-421.
- Melosh, H.J. and Williams Jr, C.A., 1989. Mechanics of graben formation in crustal rocks: A finite element analysis, *Journal. of Geophysical Research: Solid Earth*, p.13961-13973.
- Monsalve, J.J., Baggett, J., Bishop, R., and Ripepi, N., 2019. Application of laser scanning for rock mass characterization and discrete fracture network generation in an underground limestone mine, *International Journal of Mining Science and Technology*, 29(1), p.131-137.
- Noh, Y.S., Kim, J.K., Ko, Y.H., Kim, S.J., Chung, S.K., and Yang, H.S., 2015. A study on assessment of advance and overbreak in underground excavation utilizing 3d scanner, *Journal of Korean Society of Explosives & Blasting Engineering*, 33(4), p.1-6.
- Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Blikra, L., Derron, M.H., and Metzger, R., 2009. Characterization and monitoring of the Åknes rockslide using terrestrial laser scanning, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(3), p.1003-1019.
- Park, J.C., Kim, J.S., Lee, C.S., and Kwon, S.G., 2019. Hydraulic analysis of a discontinuous rock mass using smeared fracture model and dfn model, *TUNNEL & UNDERGROUND SPACE*, 29(5), p.318-331.
- Park, J.K. and Jung, K.Y., 2017. Application of laser scanner for mine management and mining plan, *Asia-Pacific Journal of Multimedia Services Convergent with Art, Humanities, and Sociology*, 7(6), p.693-700.
- Park, J.K. and Lee, K.W., 2019. Construction of mine geospatial information by total station and 3d laser scanner, *Journal of the Korea Academia-Industrial*, 20(3), p.520-525.
- Park, S.H., Lee, S.G., Lee, B.K., and Kim, C.H., 2015. A study on reliability of joint orientation measurements in rock slope using 3d laser scanner, *TUNNEL & UNDERGROUND SPACE*, 25(1), p.97-106.
- Priest, S.D., 1993. *Discontinuity analysis for rock engineering*, Chapman & Hall, London, United Kingdom, 274p.
- Rosser, N.J., Petley, D.N., Lim, M., Dunning, S.A., and Allison, R.J., 2005. Terrestrial laser scanning for monitoring the process of hard rock coastal cliff erosion, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 38(4), p.363-375.
- Schürch, P., Densmore, A.L., Rosser, N.J., Lim, M., and McArdell, B.W., 2011. Detection of surface change in complex topography using terrestrial laser scanning: application to the Illgraben debris-flow channel, *Earth surface Processes and Landforms*, 36(14), p.1847-1859.
- Slaker, B.A., 2015. *Monitoring underground mine displacement using photogrammetry and laser scanning*, PhD Thesis, Virginia Tech, Virginia, USA, 144p.
- Sunwoo, C., Chung, S.K., Choi, S.O., Jung, Y.B., Jeon, Y.S., and Lee, S.K., 2004. *A study on the safety and environmental control of underground opening in limestone quarries*, KR-03, Daejeon, Korea, 121p.
- Trimble, 2021.12.02., <https://geospatial.trimble.com>.

김 동 휘

2011년 강원대학교 공과대학 에너지·자
원공학과 공학사
2013년 강원대학교 공과대학 에너지·자
원공학과 공학석사
2021년 강원대학교 공과대학 자원공학과
공학박사

현재 강원대학교 산업기술연구소 박사후연구원
(E-mail; haffy_kdh@naver.com)

김 경 만

2006년 강원대학교 공과대학 지구시스템
공학과 학사
2008년 강원대학교 공과대학 지구시스템
공학과 석사
2017년 강원대학교 공과대학 자원공학과
박사

현재 (재)영월산업진흥원 선임연구원
(E-mail; kimgm@yipa.or.kr)

백 환 조

1984년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1986년 서울대학교 대학원 자원공학과 공
학석사
1994년 University of Texas at Austin, 토
목공학과 공학박사

현재 강원대학교 에너지자원공학과 교수
(E-mail; hwanjo@kangwon.ac.kr)