연구논문

갱내 채광 광산 안정성에 영향을 미치는 인자 분석

김동휘¹ · 김범준² · 백환조^{3*}

¹강원대학교 에너지자원공학과 박사과정, ²강원대학교 에너지·인프라 시스템 융합학과 석사과정, ³강원대학교 에너지자원공학과 교수

Analysis of Factors Affecting the Stability of an Underground Mine

Donghui Kim¹, Bum-Jun Kim² and Hwanjo Baek^{3*}

¹PhD Student, Department of Energy and Resources Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, Korea

²Master's Degree, Department of Integrated Energy and Infra System, Kangwon National University, Chuncheon, Korea

³Professor, Department of Energy and Resources Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, Korea

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

Received

28 December 2020

Final version Received

29 January 2021

Accepted

23 February 2021

Abstract

In this study, the stability of an underground mine was evaluated considering the hydro-mechanical characteristics of the rockmass. Recently, mining methods have changed from open-pit mining to underground mining, which has led to an increase in environmental problems and civil complaints. The effects of rock engineering characteristics and hydrogeology factors on the drift and pillar stability were analyzed because the geological conditions, ore properties, in-situ stress, and hydraulic properties vary from mine to mine. When applied to stability analysis, changes in the level of factors, such as factors of safety, was analyzed. Factors with values above the significance level of the properties of discontinuities, in-situ stress, and drift dimensions influence factors of safety were analyzed in terms of fracture size, lateral pressure ratio, fracture aperture, fracture intensity, and drift dimension. In the case of pore-water pressure, the factors of safety showed 23% decrease on the average.

Key words : Underground mine, Stability, Discontinuities, Pore-water pressure, Factors of safety

요약

본 연구는 갱내 채광 광산을 대상으로 수리역학적 특성을 고려한 갱도 안정성 연구를 수행하였다. 최근 국내의 노천 채광 광산은 민원 및 환경문제 등으로 갱내 채광으로 전환됨에 따라 갱도 안정성 및 지하수 출수문제가 발생하고 있다. 광산마다 지질조건, 광체의 특성, 초기응력, 수리학적 특성 등이 다양하기 때문에 암반 공학적 특성과 수리지질학적 인자들이 갱도 안정성에 미치는 영향을 수치해석 하였다. 안정성 해석에 적용된 인자들의 수준이 변할 때 안전율에 미치는 영향을 분석하였다. 불연속면 특성, 초기응력, 갱도 크기 중 안전율에 영향을 미치는 유의수준 이상의 인자는 불연속면 크기, 측압계수, 불연속면 간극, 불연속면 밀도, 갱도 크기이다. 간극수압을 적용한 경우 역학 해석과 비교하여 안전율은 평균 23% 감소를 유발하였다.

주요어 : 갱내 채광 광산, 안정성, 불연속면, 간극수압, 안전율

서 론

국내 석회석 광산은 민원 및 환경문제로 노천 채광에서 갱내 채광으로 전환되고 있다. 갱내 채광으로 전환하면서 갱도와 채광장의 안전성과 지하수 출수문제 등 기술적인 문제에 직면하게 되는데 대부분의 광산들은 영세하고 기술적인 인력의 부족으로 이 문제에 효과적으로 대처하지 못하고 있다. 현재 국내 석회석 광산의 갱내 채광법 설계는 68%의 광산(15개소)이 자체의 기술로 그리고 32%(7개소)의 광산은 외부전문가의 조언을 받은 것으로 나타났다(KIGAM, 2004). 설계과정에서 조사의 불충분함은 기술진이 절대 부족한 영세광산의 경우에는 더 심각한 상황이다(KIGAM, 2004). 국내 석회석광산의 대부분은 절리가 발달하고 있으며 단층 및 습곡과 같은 구조작용도 많이 받고 있어, 짧은 거리 내에서도 암반의 변화가 복잡하게 일어나는 경우가 많다(Sunwoo and Jung, 2006). 지속가능한 광산 개발을 위해서는 균열암반의 수리역학적 특성을 고려한 갱도 안정성 해석이 필요하다.

광산 안정성을 주제로 국내에서 수행된 연구들은 석회석 광산에 대해 암반분류법과 수치해석을 통해 갱도 안정성 평가를 수행한 연구(Shin *et al.*, 1996; Lee, 2007; Koo *et al.*, 2008; Jung *et al.*, 2011), 주방식 석회석 광산의 적정 광주 강도 산정 및 파쇄장의 광주 위치에 따른 안정성 연구로 구분할 수 있다(Kim *et al.*, 2010; Kim, 2013; Moon, 2013; Choi, 2020). 갱도 형상과 심도가 안정성에 미치는 영향 분석(Kim, 2014)과 석회석 광산 갱내로 유입되는 지하수 예측 및 갱도 주변 암반에서의 지하수 유동 특성 분석(Yoon, 2011; Kim *et al.*, 2013; Kim *et al.*, 2018; Kim and Baek, 2019) 등의 연구가 수행되었다. 국외의 경우 불연속면의 민감도 분석을 통해 갱도 안정성을 평가한 연구가 다수 수행되었다(Black and Aziz, 2008; Liang, 2008; Oraee *et al.*, 2016; Uddin and Reshid, 2020).

선행연구에서 확인된 바와 같이, 국내 선행연구들은 2차원 해석에 한정되어 있고 불연속면을 고려하지 않은 해석이 주를 이루고 있다. 국외는 불연속체 해석을 이용하여 갱도 안정성 평가를 수행한 연구들이 다수 존재하지만 불연속 균열망 적용과 수리역학적 연계해석에 관한 연구는 미흡하다. 따라서 본 연구에서는 불연속면 특성, 불연속면 물성, 측압계수, 갱도 크기, 지하수 영향에 대한 민감도 분석을 수행하여 갱도 안정성에 영향을 미치는 인자들을 분석하였다.

안정성 해석 모델링

현지 암반은 다양하고 복잡한 구조를 갖는 불연속면이

내재되어있다. 실제 암반에 존재하는 절리, 층리, 단층과 같은 불연속면은 암반 거동에 큰 영향을 미친다. 불연속면은 암반의 강도, 탄성계수를 저하시키는 주요 요인으로서 불연속면의 발달 정도 및 특성에 따라 암반에 위치한 구조물의 역학적 안정성은 영향을 받게 된다(Park, 2002). 안정성 해석 모델링인 수치해석은 암반 불연속면의 거동 특성을 규명하고 모사 및 분석에 활용할 수 있는 도구이다. 본 연구에서 활용한 Itasca Inc.의 3DEC(3dimensional Distinct Element Code)은 불연속체 해석을 위한 개별요소법(Discrete Element Method)에 기초한 수치해석 프로그램으로 정적 혹은 동적 하중에 놓여있는 절리 암반과 같은 불연속 매질의 반응을 모델링하는데 최적화되어있다(Itasca, 2017).

Mohr-Coulomb 파괴기준에 의한 파괴접근도

Mohr-Coulomb 파괴기준은 일반적으로 암반의 파괴 이론에 적용되고 있으며 전단응력과 전단강도 비교에 의하여 지반의 전단파괴 가능성을 판단할 수 있다(Lee *et al.*, 2016). Mohr-Coulomb 파괴접근도 방법은 암반의 응력원이 파괴 포락선에 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 파괴여유도이다(Fig. 1).

암반이 최고로 안정한 상태는 파괴접근도 R 이 1.0으로 정수압 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).

본 연구에서는 광주의 측정 지점에서 발생하는 최대 및 최소주응력을 측정한 후 Mohr-Coulomb 파괴기준에 의한 파괴접근도 방법으로 안전율을 검토하였다.

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

Fig. 1. Concept of failure proximity by Mohr-Coulomb failure criteria (Melosh and Williams, 1989).

불연속 균열망(Discrete Fracture Network, DFN)

불연속 균열망은 실제 불연속 암반을 최대한 근접하게 모사하기 위해서 현장에서 획득한 균열 크기(fracture size), 균열 밀도(fracture intensity), 균열 방향(fracture orientation), 균열 간극(fracture aperture) 등의 균열 특성에 대한 통계적인 자료를 바탕으로 실제 불연속 암반을 모사하는 추계학적(stochastic)인 모델링 기법을 말한다(Park *et al.*, 2019).

갱도 안정성에 영향을 미치는 인자 분석

암반에 존재하는 수많은 절리, 단층 등과 같은 불연속면은 갱도 안정성에 영향을 주는 주요 인자로 불연속면의 특성을 어떻게 반영시키는가에 따라 갱도 안정성 해석 결과는 큰 차이를 나타낼 수 있다(Park, 2002). 불연속면 이외에도 간극수압과 암반의 초기응력 역시 갱도 안정성에 영향을 주는 주요 인자이다. 영향 인자 분석 방법은 암반의 파괴 근접도를 표현하는 개념인 안전율(factors of safety)을 이용하였다. 불연속면의 특성 및 물성, 갱도 크기, 초기응력 수준이 변할 때 발생하는 안전율을 무결암(intact rock) 상태의 해석 결과와 비교하여 인자별 영향을 검토하였다.

가로 50 m, 세로 50 m, 높이 50 m의 해석영역에 폭 5 m, 높이 5 m의 갱도 4개를 모델 중심에 위치시켜 모델을 구축하였다(Fig. 2). 해석 단면은 해석영역의 중심 단면을 추출하여 안정성이 가장 취약하게 나타나는 하부 갱도 천정부를 기준으로 안전율을 분석하였다(Fig. 3). 해석에 적용한

Fig. 2. Construction of numerical analysis model.

Fig. 3. Factors of safety measurement point.

Table 1. Material properties used in numerical analysis (Shin *et al.*, 1996)

Rockmass				
Density (kg/m^3)	Bulk modulus (GPa)	Shear modulus (GPa)	Friction angle (degree)	Cohesion (MPa)
2,700	23	11	44	7
Discontinuities				
Normal stiffness (GPa/m)	Shear stiffness (GPa/m)	Friction angle (degree)	Cohesion (MPa)	
6	7	37	0.1	

Table 2. Hydraulic parameters for discontinuities (Shin, 2001)

a_{zero} (mm)	a_{res} (mm)	Permeability ($\text{Pa}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1}$)
0.1	0.001	80

구성모델은 암반의 경우 Mohr-Coulomb 파괴식을, 불연속면은 Coulomb slip 모델을 적용하였다. 수치해석의 입력변수로 국내 석회암 물성치를 적용하였으며(Table 1), 갯도는 지표하 100 m에 위치하는 것으로 설정하여 초기응력이 각 방향에서 동일하게 작용하도록 하였다. 모델 내에 묘사되는 불연속면은 P_{32} (불연속면 면적/전체 체적)방법을 적용하였다. 불연속면 형태는 원형이며 방향성은 Fisher 분포, 불연속면 길이(크기)는 로그 정규 분포를 따른다. 수직응력이 0인 상태에서의 절리 틈새인 초기절리틈새(joint aperture at zero normal stress: a_{zero}), 수직응력이 가장 크게 작용할 때 더 이상 줄어들지 않는 절리 틈새인 잔류절리틈새(joint residual aperture: a_{res}), 불연속면 내에 지하수가 얼마나 통과하는 지를 나타내는 절리의 투과율을 설정하여 불연속면을 통한 지하수의 흐름을 유도하였다(Table 2). 수치해석 경계조건은 수평방향과 바닥면의 변위를 구속하고 중력만 작용하도록 설정하였다. 지하수의 영향을 고려하기 위해 세 가지 조건으로 해석을 수행하였다. 첫 번째 조건은 지하수를 고려하지 않은 역학해석으로써 불연속면이 발달한 암반에 갯도를 굴착할 때 지하수를 배제하여 역학해석만을 수행한 경우이다. 두 번째 조건은 지하수와 불연속면을 고려한 수리역학적 연계해석(fully coupled mechanical-hydraulic)을 실시하는 방법으로써 구축된 모델의 바닥부를 기준으로 지하수위가 50 m 상부에 존재하여 0.5 MPa의 간극수압을 적용한 경우와 100 m 상부에서 1.0 MPa의 간극수압이 작용하는 경우로 나누어 해석을 수행하였다.

불연속면 상태

불연속면 밀도 0.05 m^{-1} 을 기준으로 2, 4, 6, 8배 증가시켜 해석을 수행하였다. 불연속면 방향성, 위치는 모델 내에 랜덤하게 분포시키고 직경 3 m 크기의 불연속면을 발생시켜 해석을 수행하였다. Fig. 4는 무결암 해석 결과(안전율: 7.35)

Fig. 4. Influence of fracture intensity (F_S : factors of safety, F_{Si} : factors of safety of intact rock and bwt: below water table). **Fig. 5.** Influence of fracture size (F_S : factors of safety, F_{Si} : factors of safety of intact rock and bwt: below water table).

를 기준으로 불연속면 밀도 변화에 따라 발생한 안전율을 비교한 결과이다. 역학해석만 수행한 경우 무결암과 비교해 불연속면 밀도가 증가할수록 안전율은 25%, 48%, 54%, 68%, 73% 감소하는 것으로 나타났다. 간극수압이 0.5

Fig. 6. Influence of fracture aperture (F_S : factors of safety, F_{SI} : factors of safety of intact rock, bwt: below water table, z_n : joint aperture at zero normal stress and r_n : joint residual aperture).

MPa 작용할 경우 역학해석과 비교해 평균 20%, 1.0 MPa의 간극수압이 작용할 경우 안전율은 평균 30% 감소하는 것으로 나타났다.

불연속면 크기를 1 m에서 5 m까지 증가시켜 해석을 수행하였다. 불연속면 방향성, 위치는 모델 내에 랜덤하게 발생시키고 각각의 해석조건과 일치하도록 직경을 변화시켜 불연속면을 발생시켰다. Fig. 5는 무결암 해석 결과(안전율: 7.35)를 기준으로 불연속면 크기 변화에 따라 발생한 안전율을 비교한 결과이다. 역학해석만 수행한 경우 무결암과 비교해 크기가 증가할수록 안전율은 48%, 41%, 26%, 15%, 12% 감소하는 것으로 나타났다. 간극수압이 0.5 MPa 작용할 경우 평균 15%, 1.0 MPa의 간극수압이 작용할 경우 평균 20% 감소하였다.

초기절리틈새 25 μm, 잔류절리틈새 0.25 μm를 기준으로 2, 4, 6, 8배 증가시켜 해석을 수행하였다. 불연속면 방향성, 위치는 모델 내에 랜덤하게 분포시키고 직경 3 m 크기의 불연속면을 발생시켰다. Fig. 6은 무결암 해석 결과(안전율: 7.35)를 기준으로 불연속면 간극 크기 변화에 따라 발생한 안전율을 비교한 결과이다. 역학해석만 수행한 경우 무결암과 비교해 안전율은 30% 감소하였고 간극 크기 변화에 따라 안전율은 큰 차이를 보이지 않았다. 0.5 MPa와 1.0 MPa의 간극수압이 작용할 경우 안전율은 역학해석과 비교해 각각 평균 41%, 54% 감소하였다.

불연속면 물성

쿨롬 슬립 질리모델의 입력인자인 수직강성, 전단강성, 마찰각, 점착력의 수준이 변할 때 안전율에 미치는 영향을 분석하였다. 불연속면의 경사, 경사방향, 위치는 모델 내에 랜덤하게 분포시키고 직경 3 m 크기의 불연속면을 발생시켰다.

Fig. 7은 무결암 해석 결과(안전율: 7.35)를 기준으로 수

Fig. 7. Influence of normal stiffness (F_S : factors of safety, F_{SI} : factors of safety of intact rock and bwt: below water table).

Fig. 8. Influence of shear stiffness (F_S : factors of safety, F_{SI} : factors of safety of intact rock and bwt: below water table).

Fig. 9. Influence of friction angle (F_S : factors of safety, F_{SI} : factors of safety of intact rock and bwt: below water table).

직강성의 변화에 따른 안전율을 비교한 결과이다. 역학해석의 경우 26%, 간극수압이 0.5 MPa 작용한 경우 37%, 간극수압이 1.0 MPa 조건에서는 41%의 안전율 감소가 발생하였다. 역학해석과 간극수압을 적용한 결과 모두 수직강성 변화에 따른 안전율 변화는 발생하지 않았다.

Fig. 8은 무결암 해석 결과(안전율: 7.35)를 기준으로 전단강성의 변화에 따른 안전율을 비교한 결과이다. 역학해석의 경우 27%, 간극수압이 0.5 MPa 작용한 경우 37%, 간극수압이 1.0 MPa 조건에서는 41%의 안전율 감소가 발생하였다. 역학해석과 간극수압을 적용한 결과 모두 전단강성 변화에 따른 안전율 변화는 발생하지 않았다.

Fig. 9는 무결암 해석 결과(안전율: 7.35)를 기준으로 마찰각의 변화에 따른 안전율을 비교한 결과이다. 역학해석

Fig. 10. Influence of cohesion (F_s : factors of safety, F_{si} : factors of safety of intact rock and bwt: below water table).

의 경우 26%, 간극수압이 0.5 MPa 작용한 경우 37%, 간극수압이 1.0 MPa 조건에서는 41%의 안전율 감소가 발생하였다. 역학해석과 간극수압을 적용한 결과 모두 마찰각 변화에 따른 안전율 변화는 발생하지 않았다.

Fig. 10은 무결암 해석 결과(안전율: 7.35)를 기준으로 점착력의 변화에 따른 안전율을 비교한 결과이다. 무결암 해석 결과(안전율: 7.35)를 기준으로 점착력의 변화에 따른 안전율을 비교한 결과이다. 역학해석의 경우 26%, 간극수압이 0.5 MPa 작용한 경우 37%, 간극수압이 1.0 MPa 조건에서는 41%의 안전율 감소가 발생하였다. 역학해석과 간극수압을 적용한 결과 모두 점착력 변화에 따른 안전율 변화는 발생하지 않았다.

초기응력

갱도 안정성 평가를 위해서는 대상 암반에 대한 물리적, 역학적 성질을 가능한 정확히 파악할 필요가 있다. 그 중에서도 특히 암반의 초기응력을 파악하는 것은 지하구조물의 안정성 검토에 있어서 매우 중요한 요소이다(KAERI, 1999). 초기응력의 영향을 평가하기 위하여 수평응력과 수직응력의 비인 측압계수(lateral pressure ratio)를 0.5, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0의 범위로 변화시켜 해석을 수행하였다(Fig. 11). 불연속면의 경사, 경사방향, 위치는 모델 내에 랜덤하게 분포시

Fig. 11. Conditions of lateral pressure ratio: (a) 0.5, (b) 0.8, (c) 1.0, (d) 1.5 and (e) 2.

Fig. 12. Influence of lateral pressure ratio (F_S : factors of safety, F_{SI} : factors of safety of intact rock and bwt: below water table).

키고 직경 3 m 크기의 불연속면을 발생시켰다.

Fig. 12는 측압계수 1이 적용된 무결암 해석 결과(안전율: 7.35)를 기준으로 측압계수 변화에 따라 발생한 안전율을 비교한 결과이다. 측압계수가 증가할수록 안전율은 감소하는 경향을 나타냈다. 무결암 해석 조건과 동일한 1.0의 측압계수가 적용된 경우 역학해석만 수행한 경우 26%, 간극수압이 0.5 MPa 작용할 경우 37%, 간극수압이 1.0 MPa 작용하는 경우 41%의 안전율 감소가 나타났다. 측압계수 크기에 따라 갱도 주변의 안전율은 상이하게 나타나므로 반드시 지반조사 결과를 반영하여 안정성 해석을 수행하는 것이 합리적이라고 판단된다.

갱도 및 광주의 크기

갱내 광산을 대상으로 더 많은 채산성 확보를 위해 제한된 영역에서 갱도 및 광주의 크기를 변화시켜 해석을 수행하였다. 3 m × 3 m의 갱도를 기준으로 7 m × 7 m까지 갱도 폭은 1 m씩 증가시키고 광주는 1 m씩 감소시켜 해석을 수행하였다(Fig. 13). 불연속면의 경사, 경사방향, 위치는 모델 내에 랜덤하게 분포시키고 직경 3 m 크기의 불연속면을 발생시켰다. Fig. 14는 폭 5 m, 높이 5 m의 갱도 크기를 적용한 무결암 해석 결과(안전율: 7.35)를 기준으로 갱도 크기 변화에 따라 발생한 안전율을 비교한 결과이다. 갱도 크기가 증가할수록 안전율은 감소하는 경향을 나타냈다. 무결암 해석 조건과 동일한 갱도 크기인 폭 5 m, 높이 5 m의 경우 역학해석만 수행한 경우 26%, 간극수압이 0.5 MPa 작용할 경우 35%, 간극수압이 1.0 MPa 작용하는 경우 40%의 안전율 감소가 발생하였다. 갱도 크기가 증가할수록 갱도 주변 암반에 응력집중이 발생하여 안전율은 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 13. Conditions of drift dimension: (a) 3 m × 3 m, (b) 4 m × 4 m, (c) 5 m × 5 m, (d) 6 m × 6 m and (e) 7 m × 7 m.

Fig. 14. Influence of drift dimension (F_S : factors of safety, F_{SI} : factors of safety of intact rock and bwt: below water table).

영향 인자 분석 결과

불연속면 상태(밀도, 크기, 간극), 불연속면 물성(수직강성, 전단강성, 마찰각, 점착력), 측압계수, 갱도 크기 중 안전율에 유의수준(significance level) 이상의 영향을 미치는 인자를 분석하였다. 분석 방법은 인자와 결과 변화의 유의수준을 검토하고 두 변수 사이의 관련성을 분석하는 피어슨 상관계수(Pearson's correlation coefficient)를 활용하였다. 상관계수 0.8 이상을 영향 인자 평가 기준으로 설정하였다.

상관계수가 0.8 이상인 인자는 불연속면 밀도, 불연속면 크기, 불연속면 간극, 갱도 크기, 측압계수로 도출되었다(Fig. 15). Table 3은 해석 조건에 따라 도출된 안전율 상관계수 결과이다. 역학해석의 경우 불연속면 크기, 측압계수, 불연속면 밀도, 갱도 크기 순서로 분석되었다. 간극수압이

Table 3. Factors above significance level as a result of factors of safety

Mechanics analysis of rockmass	Fracture size	Lateral pressure ratio	Fracture intensity	Dimension of drift
	0.98	0.98	0.94	0.89
0.5 MPa pore water pressure applied	Fracture size	Lateral pressure ratio	Fracture intensity	Fracture aperture
	0.98	0.98	0.96	0.95
1.0 MPa pore water pressure applied	Fracture size	Fracture aperture	Lateral pressure ratio	Fracture intensity
	0.98	0.98	0.98	0.97
				Dimension of drift
				0.91

Fig. 15. Results of influence factors analysis (bwt: below water table).

0.5 MPa 작용한 경우 불연속면 크기, 측압계수, 불연속면 밀도, 불연속면 간극, 갱도 크기 순서이고, 1.0 MPa의 간극 수압 조건에서는 불연속면 크기, 불연속면 간극, 측압계수, 불연속면 밀도, 갱도 크기 순서로 분석되었다. 균열압반의 안전율은 불연속면의 물성보다는 불연속면 상태, 측압계수, 갱도 크기가 큰 영향을 주는 인자임을 확인하였다. 본 연구의 영향 인자 분석 결과는 불연속면의 민감도 분석을 통해 균열압반의 안정성을 평가한 국외 연구(Thareja, 2016; Varma *et al.*, 2019; Uddin and Reshid, 2020)와 유사한 결과를 확인할 수 있었다.

결 론

본 연구에서는 불연속 균열망 모델을 적용한 3차원 불연속체 해석을 통해 불연속면 특성, 불연속면 물성, 초기응력, 갱도 크기에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 이상의 연구로부터 도출된 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

불연속면 상태, 불연속면 물성, 초기응력, 갱도 크기의 인

자들 중 안전율에 영향을 미치는 유의수준 이상의 인자는 불연속면 크기, 측압계수, 불연속면 간극, 불연속면 밀도, 갱도 크기이다. 변위에 영향을 미치는 유의수준 이상의 인자는 측압계수, 불연속면 크기, 불연속면 간극, 불연속면 밀도, 갱도 크기, 수직강성으로 분석되었다.

간극수압을 적용한 경우 역학해석과 비교하여 안전율은 평균 23% 감소를 유발하여 불연속면 유효응력 및 전단강도의 중요 영향 인자로 파악할 수 있다.

객관적인 설계기준과 자료가 결여된 상태에서 기술자의 경험과 상황에 따라 채광장 설계가 이루어지고 있는 영세광산의 경우, 본 연구에서 제시한 영향 인자 분석 결과를 참고한다면 실무에 좀 더 효과적으로 적용할 수 있는 하나의 대안이 될 것으로 기대한다.

사 사

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2019R1I1A3A01061863)의 결과입니다. 지원에 감사드립니다.

References

- Black, D.J. and Aziz, N., 2008. Improving UIS gas drainage in underground coal mines, *Proc. of the 16th Coal Congress of Turkey*, Zonguldak, Turkey, p.157-170.
- Choi, K.H., 2020. *A study on pillar stability in room and pillar limestone mine*, Master Thesis, Hanyang University, Seoul, Korea, 98p.
- Itasca Consulting Group Inc., 2017. *3DEC user manual*, Minneapolis, USA.
- Jung, Y.B., Sunwoo, C., Park, C., Lee, B.J., Cheon, D.S., Lee, D.K., and Jo, Y.D., 2011. Stability analysis on old hard rock mine and suggestion of the unsupported spans of haulage, stope and pillar for redevelopment. *J. of the Korean Society*

- of *Mineral & Energy Resources Engineers*, 48(3), p.268-281.
- Kim, D.H. and Baek, H.J., 2019. Stability assessment of an underground limestone mine considering hydro-mechanical characteristics of fractured rock mass. *J. of Korean Society of Mineral & Energy Resources Engineers*, 56(6), p.573-581.
- Kim, D.H., Kim, G.M., Choi, Y.S., and Baek, H.J., 2013. A study on the hydraulic modelling of the rock mass in a limestone mine. *J. of the Korean Society of Mineral & Energy Resources Engineers*, 50(1), p.113-123.
- Kim, D.H., Kim, G.M., Kim, D.H., Jung, S.J., and Baek, H.J., 2018. Prediction of the groundwater inflow by three-dimensional hydrogeologic modelling at an underground mine. *J. of the Korean Society of Mineral & Energy Resources Engineers*, 55(5), p.383-394.
- Kim, J.G., Yang, H.S., Kim, W.B., Jang, M.H., and Ha, T.W., 2010. Stability analysis on the crushing facility space in mine tunnel. *Tunnel & Underground Space*, 20(3), p.145-152.
- Kim, M.S., 2014. *A Study on the stability of deep rock tunnel by laboratory tests and numerical analysis*, Master Thesis, Cheongju University, Cheongju, Korea, 81p.
- Kim, S.J., 2013. *Stability analysis of the inclined pillars by statistical analysis*, Master Thesis, Chonnam National University, Gwangju, Korea, 61p.
- Koo, C.M., Jeon, S.W., and Lee, I.W., 2008. Underground mine design an stability analysis at a limestone mine. *Tunnel & Underground Space*, 18(4), p.243-251.
- Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), 1999. *Mechanical stability analysis of a high-level waste repository for determining optimum tunnel and deposition hole spacing*, KAERI/TR-1302/99, Daejeon, Korea, 76p.
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), 2004. *A study on the safety and environmental control of underground opening in limestone quarries*, KR-04(c)-17, Daejeon, Korea, 194p.
- 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. *J. Korean Geo-synthetics Society*, 15(4), p.17-23.
- Lee, H.W., 2007. *A study on design and evaluating the stability of a large-scale gangway using rock classification schemes and numerical analysis*, Master Thesis, Semyung University, Jecheon, Korea, 75p.
- Liang, Y., 2008. Key technique of safe mining in low permeability and methane-rich seam group. *J. of the Chinese Society of Rock Mechanics & Engineering*, 27(7), p.1370-1379.
- Melosh, H.J. and Williams Jr, C.A., 1989. Mechanics of graben formation in crustal rocks: A finite element analysis. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, p.13961-13973.
- Moon, H.S., 2013. *Stability estimation of a single pillar in the underground mine facility cavern by numerical analysis*, Master Thesis, Chonnam National University, Gwangju, Korea, 39p.
- Oraee, K., Oraee, N., Goodarzi, A., and Khajepour, P., 2016. Effect of discontinuities characteristics on coal mine stability and sustainability: A rock fall prediction approach. *Int. J. of mining science & technology*, 26(1), p.65-70.
- 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.J., 2002. *Effects of geometric, mechanical joint parameters on the behavior of a large cavern in jointed rock mass*, Doctoral Dissertation, Ulsan University, Ulsan, Korea, 130p.
- Shin, H.J., 2001. *Hydrogeological characterization of fractured crystalline rock and it's application to discrete fracture network model*, Doctoral Dissertation, Yonsei University, Seoul, Korea, 156p.
- Shin, H.S., Sunwoo, C., Han, K.C., and Park, Y.H., 1996. Study on the stability of tunnel and rock mass classification in Danyang limestone quarry. *Tunnel & Underground Space*, 6(2), p.131-143.
- Sunwoo, C. and Jung, Y.B., 2006. A study on the rock mass failure and dimension of gangway in underground limestone mines. *J. of the Korean Society of Mineral & Energy Resources Engineers*, 43(5), p.416-428.
- Thareja, R., 2016. *Numerical modeling methodology for weak rock masses in Nevada gold mines*, Doctoral Dissertation, Nevada, USA, 111p.
- Uddin, M.N. and Rashid, H.U., 2020. Numerical investigation on the stability of an underground mine opening in the presence of pre-existing natural fractures. *Int. Journal of Geology & Mining*, 6(1), p.318-326.
- Varma, M., Maji, V.B., and Boominathan, A., 2019. Numerical modeling of a tunnel in jointed rocks subjected to seismic loading. *Underground Space*, 4(2), p.133-146.
- Yoon, Y.K., 2011. Evaluation of groundwater flow through rock mass around development openings of mine. *Tunnel & Underground Space*, 21(5), p.370-376.

김 동 휘

현재 강원대학교 에너지자원공학과 박사과정
(本學會誌 第56卷 第6号 参照)

백 환 조

현재 강원대학교 에너지자원공학과 교수
(本學會誌 第56卷 第6号 参照)

김 범 준

2020년 강원대학교 공과대학 에너지자원
공학과 공학사

현재 강원대학교 에너지·인프라 시스템 융합학과 석사과정
(E-mail; kbj2730@naver.com)