TUNNEL & UNDERGROUND SPACE Vol. 24, No. 3, 2014, pp. 212-223
http://dx.doi.org/10.7474/TUS.2014.24.3.212
ISSN: 1225-1275(Print)
ISSN: 2287-1748(Online)

실내시험과 현장암반분류를 이용한 광산갱도의 안정성 해석

김종우*, 김민식, 이동길, 박 찬, 조영도, 박삼규

Stability Analysis of Mine Roadway Using Laboratory Tests and In-situ Rock Mass Classification

Jong Woo Kim*, Min Sik Kim, Dong Kil Lee, Chan Park, Young Do Jo, Sam Gyu Park

Abstract In this study, the stability analyses for metal mine roadways at a great depth were performed. In-situ stress measurements using hydrofracturing, numerous laboratory tests for rock cores and GSI & RMR classifications were conducted in order to find the physical properties of both intact rock and in-situ rock mass distributed in the studied metal mine. Through the scenario analysis and probabilistic assessment on the results of rock mass classification, the in-situ ground conditions of mine roadways were divided into the best, the average and the worst cases, respectively. The roadway stabilities corresponding to the respective conditions were assessed by way of the elasto-plastic analysis. In addition, the appropriate roadway shapes and the support patterns were examined through the numerical analyses considering the blast damaged zone around roadway. It was finally shown to be necessary to reduce the radius of roadway roof curvature and/or to install the crown reinforcement in order to enhance the stability of studied mine roadways.

Key words Mine roadway, Laboratory test, Rock mass classification, Stability analysis, Probabilistic assessment

초 록 본 연구에서는 고심도 금속광산갱도에 대한 안정성 해석을 수행하였다. 이를 위해 수압파쇄법으로 암반의 초기지압을 측정하였고, 현장에서 채취한 암석코어로 수많은 실내물성시험을 실시하여 무결암의 물성 값을 산출하였으며, 현장조사를 통해 GSI, RMR 분류법으로 암반을 분류하였다. 암반분류 결과에 대한 시나리오 분석과 확률론적 평가를 통해 광산 갱도를 최상조건, 평균조건, 최하조건으로 구분하였으며, 각 조건별 탄소성해석을 통해 갱도의 안정성을 평가하였다. 또한, 갱도의 형상과 발파손상대의 영향을 고려한 해석을 통해 갱도의 적절한 규격과 지보패턴을 조사하였는데, 본 광산 갱도의 안정성 제고를 위해서는 갱도의 천반 곡률반경을 감소시키거나 천정부 보강이 필요한 것으로 나타났다.

핵심어 광산갱도, 실내시험, 암반분류, 안정성해석, 확률론적 평가

1. 서 론

최근 국내 금속광물의 안정적인 공급을 유지하기 위하여 휴·폐광산을 재가행하는 추세가 늘고 있는데, 이 경우 장기간 미사용한 갱도의 안정성에 문제가 있을 수 있다. 또한, 심부채광을 계속 진행할 경우에는 고심도에 따른 과지압 환경을 대비해야하며 안정성 확보를 위한 지보체계가 요구된다.

광산갱도의 안정성 해석은 국내에서도 활발히 진행되고 있는데, 과거에는 주로 석탄광에 대한 연구가 많았다. 김종우와 이희근(1994)은 실물크기 지보시험과 수치해석을 통해 700 m 심도에 위치한 탄광 갱도의 안정성을 해석하였고, 정소걸과 신중호(2004)도 같은 심도에서 갱도 주변암반의 거동을 현장계측과 탄소성해석으로 연구하였다. 그러나 국내 석탄 산업이 사양화됨에 따라 탄광에 대한 연구는 점차 적어졌는데, 한공창과 전양수(2005)는 폐탄광의 갱도를 관광 전시장으로 활용

Received: May. 13, 2014
Revised: Jun. 5, 2014
Accepted: Jun. 9, 2014
***Corresponding Author:** Jong Woo Kim
Tel) +82432298471, Fax) +82432298466
E-Mail) jwkim@cju.ac.kr
Dept. of Civil Engineering, Cheongju University, 289 Daeseong-no, Cheongju, Chungcheongbuk-do, 360-764, Korea

하기 위한 안정성 해석을 수행한 바 있다.

이와 같이 탄광 연구사례가 적어진 이후에는 석회석 광산에 대한 연구가 활발해졌는데, 선우춘 등(2004)은 GSI, RMR 분류법으로 암반을 분류하고 암반 물성을 결정하는 방법을 연구하였다. 또한 구청모 등(2008)은 노천채굴에서 갱내채굴로 전환하는 어느 석회석 광산에 대해 안정성 평가를 하였고, 김종관 등(2010)은 파쇄시설의 갱내 구축을 검토 중인 석회석광산에서 갱도의 안정성 평가를 수행한 바 있다.

석탄광산과 석회석 광산에 비해 국내 금속광산갱도에 대한 연구사례는 매우 미흡한 편인데, 윤용균 등(2010)은 폐광 이후 재개발되는 연·아연 스카른광상인 가곡광산에 분포하는 화강암의 실내물성시험을 통해 크리프 특성을 조사하였다. 그러나 실제 금속광산 갱도의 안정성에 대한 국내 연구는 거의 없기 때문에, 휴·폐광산을 재가행하는 현재의 추세를 감안하면 국내 금속광산 갱도의 안정성 연구는 반드시 필요하다.

한편, 갱도의 안정성 검토를 위한 수치해석을 수행할 때 암반의 역학 정수를 어느 일정한 값으로 가정하여 실시하는 것이 일반적이나, 현지 암반은 암석 종류나 불연속면의 분포상황에 따라 다양한 불균질성을 보이므로 암반상태를 어느 일정한 값으로 가정하는 것보다는 미지의 암반상태를 감안한 해석이 필요하며, 갱도 주변 발파손상대의 영향을 고려한 해석도 필요하다.

본 연구에서는 400 m 이상의 고심도에 위치한 금속광산 갱도에 대한 안정성 해석을 수행하였다. 이를 위해 현장에서 채취한 백운암, 규장암, 화강암, 철광석에 대해 수많은 실내물성시험을 실시하여 암석 물성 값을 산출하였다. 또한, 수압파쇄법으로 암반의 초기지압을 측정하였고, GSI, RMR 분류법으로 현장조사를 실시하여 현지암반의 불균질성 정도를 파악하였다. 이러한 암반분류 결과에 대한 시나리오 분석과 확률론적 평가를 통해 갱도를 최상조건, 평균조건, 최하조건으로 구분하였으며, 각 조건별 탄소성해석을 통해 갱도의 안정성을 평가하였다. 또한 갱도의 형상과 발파손상대의 영향을 고려한 해석을 통해 갱도의 적정 규격과 지보패턴을 조사하였다.

2. 실내물성시험

2.1 광산 개요

본 연구에서는 강원도 정선군에 위치한 한덕철광(주) 신예미광업소를 연구대상지역으로 하였다. 이 광산은 1916년 개갱된 이후 1997년에 폐광되었으나, 2001년 재개발되어 현재 심부개발을 계속 진행하고 있다. 본 광산은 국내의 주요 철광산으로 자리매김하고 있으며, 한국지질자원연구원은 이 광산에서 고심도 지하연구실험실(URL) 관련 연구(KIGAM, 2008)와 지하 암반내 복공식 에너지저장시스템 개발 관련 연구(KIGAM, 2011)를 수행한 바 있다.

이 지역의 지질은 남측부에 고생대 조선누층군 대석회암층군의 상부층인 막동석회암층과 이를 부정합으로 피복하는 평안누층군의 하부층인 홍점통의 지층 및 이를 후기에 관입한 시대미상의 석영반암과 석영규장암으로 구성된다. 막동석회암층 상부에는 흑색 내지 암흑회색을 띠는 직운산 세일층이 협재되어 있다. 본 광산의 대표적인 지질단면도는 Fig. 1과 같고, 현재 개발심도는 180 ML에 이르렀으며 중단채굴법을 적용하고 있다.

2.2 현장시추 및 초기지압

신예미광업소에 분포하는 철광석의 분포현황, 암석물성, 초기지압 등을 구하기 위하여, 갱외시추 2개 공(L=400 m)과 갱내시추 1개 공(L=200 m)을 굴착하고

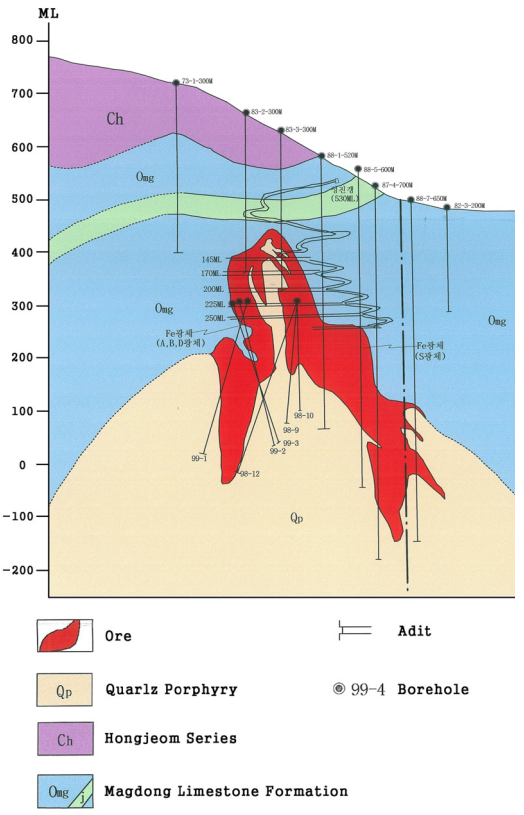


Fig. 1. Geological sectional map of studied mine(KIGAM, 2008)

총 1000 m 연장의 NX규격 시추코어를 회수하였다. 시추공 자료 분석을 통해 본 지역은 백운암, 석회암, 세일, 규장암, 스카른, 화강암, 화강반암, 철광석 등이 분포하며, 이 중 백운암, 규장암, 화강암, 철광석의 네 가지 암석이 특히 우세함을 알 수 있었다.

한편, 위의 갱내 시추작업은 본 광산의 180 ML 갱도(직상부 지표면으로부터 약 454 m 심도)에서 실시하였는데, 이 시추공을 이용하여 수압파쇄법으로 암반의 초기지압을 측정하였다. 측정 결과, 평균 측압계수는 1.197로 나타났는데 이를 후술하는 갱도의 안정성 해석에 입력변수로 반영하였다.

2.3 실내물성시험의 내용 및 결과

본 광산에서 시추코어로 회수된 백운암, 규장암, 화강암, 철광석의 물리적 성질을 구하기 위하여 비파괴시험(115회), 일축압축시험(33회), 압열인장시험(35회), 삼축압축시험(48회) 등의 실내시험을 실시하였다. 각 시험은 한국암반공학회 표준암석시험법(KSRM, 2010)에 따라 실시하였다. 한편, 비파괴시험은 암석의 단위중량, 간극률, 흡수율, 탄성파속도 등을 구하는 시험을 가리키며 시험편의 규격은 일축압축시험편과 동일하게 하였다.

시험을 통해 얻어진 암석의 물성은 단위중량, 간극률, 흡수율, P파속도, S파속도, 일축압축강도, 영률, 포아송비, 인장강도, 내부마찰각, 점착력 등이다. Table 1은 각 시험의 결과들을 통계 처리하여 네 가지 암석의 물성 평균값을 나타낸 것이며, 네 가지 암석의 평균값도 함께 나타내었다. 한편, Table 1은 각종 물성의 평균값임에 유의해야한다. 즉, 실제 시험결과에서 각 물성들은 비교적 큰 표준편차를 보였는데, 이는 암석 고유의 불균질성에 기인한다. 본 연구에서 실시한 시험수량이 사실상 적은 편은 아니지만, 향후 보다 많은 시험과 결과분석을 통해 본 광산에 분포하는 암석의 각종 역학적 특성에 관한 연구도 필요할 것으로 생각된다.

2.4 암석의 물성 평가

본 광산은 중단채굴법을 적용하여 철광석을 개발하는 광산이며, 심부채광을 계속 진행하고 있어 현재 가행심도는 지표면 하 약 500 m에 도달하였다. 본 광산에서 갱도는 철광석 광체를 따라 주로 굴착되지만 중단채굴법을 적용하기 때문에 갱도는 위의 네 가지 암석 모두에 걸쳐 임의적으로 굴착되고 있다. 따라서 본 연구에서는 갱도의 안정성 해석을 위하여 철광석 뿐 아니라 나머지 암석의 물성도 모두 조사하였다.

Table 1에서 철광석의 단위중량은 다른 암석에 비해 크게 나타났으며 네 가지 암석의 평균 단위중량은 28.96 kN/m^{3}이었다. 철광석의 간극률과 흡수율은 다른 암석에 비해 현저히 작았으며 탄성파속도는 크게 나타났다. 이와 같이 철광석은 다른 암석에 비해 무겁고 간극이 적어 강도가 더 클 것으로 예상되었지만, 실제 실험 결과는 이와 달랐다. 즉, 철광석의 일축압축강도, 인장강도, 점착력 등의 강도 특성은 다른 암석에 비해 그다지 크지는 않았는데, 실제로 철광석의 일축압축강도, 영률, 내부마찰각, 점착력 등의 강도 특성은 네 가지 암석의 평균값과 유사한 수준이었다. 네 가지 암석의 평균 일축압축강도는 166 MPa인데, 이는 국토해양부 표준품셈의 암석분류상 극경암에 해당한다.

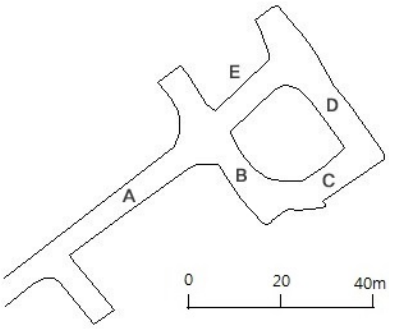
3. 현장암반분류

3.1 현장조사

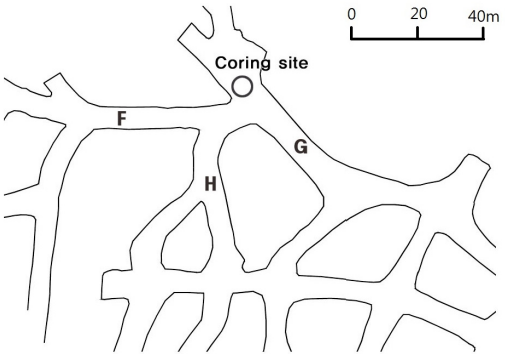
지질자원연구원(KIGAM, 2008)은 고심도 지하연구실험실(URL)과 관련하여 본 광산의 255 ML 갱도(심도 500 m)에서 Fig. 2(a)와 같이 A, B, C, D, E 등의 5개 구역에 대해 현장조사를 실시하였고, 그 결과를 이용하여 각 갱도 구역별로 암반의 GSI 분류와 RMR 분류를 실시한 바 있다. 그러나 지하 암반의 상태는 장소마다 달라지는 것이 일반적이기 때문에 본 연구에서는 추가적인 현장조사를 실시하였다.

Table 1. Average value of physical properties

Rock type	Unit weight (kN/m^3)	Porosity (%)	Absorption ratio (%)	P-wave velocity (m/s)	S-wave velocity (m/s)	UCS (MPa)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Tensile strength (MPa)	Friction angle (°)	Cohesion (MPa)
Dolostone	26.19	0.66	0.25	4961	2833	95	38	0.24	6	50	13
Felstone	24.89	1.45	0.57	4660	2827	244	60	0.22	13	59	29
Granite	24.98	1.04	0.41	4641	2874	170	52	0.20	8	58	25
Magnetite	39.80	0.15	0.04	5649	3060	157	79	0.23	10	56	14
Average	28.96	0.83	0.32	4978	2898	166	57	0.22	9	56	20



(a) 255 ML roadway (KIGAM, 2008)



(b) 180 ML roadway

Fig. 2. Field survey sites

Fig. 2(b)는 현장조사 지점을 보여준다. 현장조사는 갱내 시추작업을 실시한 180 ML 갱도(심도 454 m)에서 F, G, H 등의 3개 구역에 대해 실시하였으며, 조사항목은 암석 강도, RQD, 지하수 상태 등과 불연속면의 간격, 방향, 상태, 연속성 등이다. 조사결과를 이용하여 선행연구(KIGAM, 2008)와 마찬가지로 각 갱도 구역별로 암반의 GSI 및 RMR 분류를 실시하였다. 이와 같이 본 연구에서는 선행연구 결과 5개소를 포함하여 총 8개소에 대한 갱도 현장조사 결과를 이용하여, 본 광산 암반에 대한 공학적 분류를 실시하였다.

3.2 GSI 분류법에 의한 암반평가

GSI(Geological Strength Index)는 Hoek와 Brown(1997)에 의해 제안된 암반분류법으로써, 육안관측으로 쉽게 사용할 수 있는 실용적인 시스템을 제공한다. 이는 현지 암반의 강도와 Hoek-Brown 상수뿐만 아니라 절리암반의 탄성계수와 같은 암반 물성을 추정할 수 있기 때문에 수치해석 입력변수 결정에 유용하게 사용된다.

본 연구에서는 180ML 갱도의 3개 구역에 대해 GSI

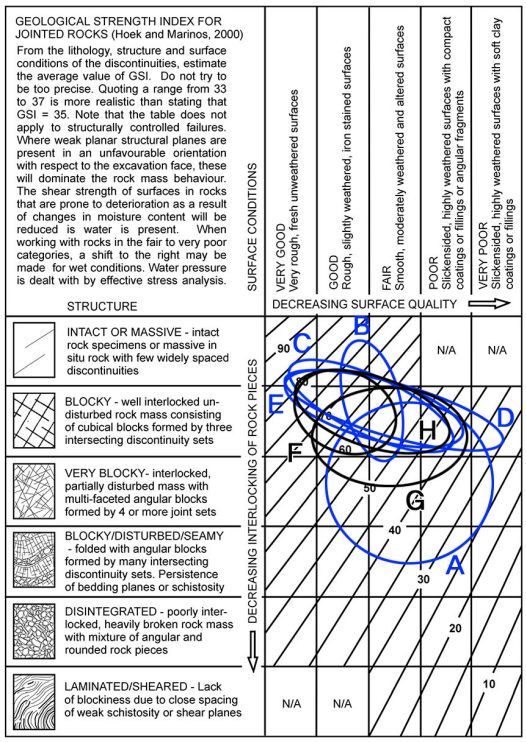


Fig. 3. Distribution of GSI values where A～E and F～H were obtained from 255ML and 180ML, respectively

분류를 수행하였는데, F갱도암반에서 GSI는 54~80, G갱도 42~80, H갱도 37~70의 값을 보였다. Fig. 3은 각 구역별 GSI값 분포를 선행연구의 결과와 함께 도시한 것이다. 여기서 A, B, C, D, E, F, G, H 등 총 8개소 암반의 평균 GSI는 각각 45, 65, 63, 58, 63, 67, 61, 54 이었으며 8개소의 GSI 평균값은 60점으로 나타났다.

3.3 RMR 분류법에 의한 암반평가

RMR 분류법은 대표적인 암반분류법으로서, 1973년에 제안된 이후 1989년에 최종수정안(Bieniawski, 1989)이 제시되었다. 본 연구에서는 RMR 최종수정안을 사용하여 180ML 갱도 3개소(F, G, H)에 대해 RMR 분류를 실시하였다. 전체적으로 암반이 지하수면 아래에 있기 때문에 암반이 젖어 있거나 습한 상태였지만 3개소의 총RMR 값은 57～66점으로 대체로 양호한 암반상태를 나타내었다.

한편, 전절과 마찬가지로 본 연구에서 실시한 RMR 분류와 선행연구(KIGAM, 2008)에서 얻어진 RMR 분류의 결과를 통합하여 정리하면 Table 2와 같다. 8개소의 총RMR 값은 53～66점으로 나타났다.

Table 2. RMR values obtained from eight different sites

Item	Site	Strength of intact rock	RQD	Spacing of discontinuities	Condition of discontinuities	Groundwater	Basic RMR	Adjustment for discontinuity orientations	Total RMR
Preceding study (255ML)	A	12	15	15	24	7	73	-7	66
	B	12	12	15	19	10	68	-10	58
	C	12	12	10	17	10	61	0	61
	D	12	12	15	16	10	65	-12	53
	E	12	12	15	19	10	68	-12	56
This study (180ML)	F	12	13	15	21	10	71	-5	66
	G	12	13	15	17	7	64	0	64
	H	12	13	10	18	4	57	0	57

3.4 시나리오 분석 및 확률론적 평가

255ML과 180ML 갱도의 8개 구역에서 구한 GSI값과 RMR값 분포 상황을 정리하면 Table 3과 같다. 각 구역별로 약간의 차이는 있지만, A 갱도를 제외하면 본 연구지역에서 두 가지 값은 좋은 상관관계를 보였다.

이와 같이 선행연구와 본 연구를 통해 8가지 암반분류 자료가 축적되었다. 한편, 본 광산의 심부개발을 위해서는 미지의 신규 갱도를 계속 굴착해야하겠지만, 미지의 갱도에서의 암반분류 값도 경험적으로는 이 범주 안에 있을 가능성이 크다고 생각된다.

사실상 굴착 이전 상태인 임의의 미지 갱도에 대해 GSI값이나 RMR 값을 추정하는 것은 불가능하다. 하지만 다수의 현장조사 결과를 감안하면, 가장 우수한 암반조건을 가질 경우(최상조건), 평균적인 암반조건을 가질 경우(평균조건), 가장 열악한 암반조건을 가질 경우(최하조건) 등으로 미지의 암반상태를 나누어 시나리오 분석이나 확률론적 평가를 할 수는 있다. 이러한 관점에서 Table 3에 나타난 GSI값과 RMR값의 범위를 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

먼저, GSI값은 평균 60점이고, 최하 45점, 최고 67점이다. 하지만, 선행연구의 A 갱도는 GSI값과 RMR값이 합치되지 못한 매우 특이한 경우이므로 이를 제외하면 (KIGAM, 2008), GSI는 평균 62점이고, 최하 54점, 최고 67점이다. 한편, GSI가 클수록 암반은 강한 물성으로 평가되므로 안전율을 감안하여 대상암반의 GSI 평균값을 62점보다는 60점으로 가정하더라도 최저점수와 최고점수는 평균대비 ±10점 이내의 범위에 놓이는 것을 알 수 있다. 즉, 본 광산 암반의 GSI값은 최저 50점, 평균 60점, 최고 70으로 생각할 수 있다.

다음으로, GSI값과 직접 연관이 되는 기초 RMR값을

Table 3. Distribution of GSI and RMR values

Item	Site	GSI		RMR	
		Range	mean	Basic RMR	Total RMR
Preceding study	A	25～65	45	73	66
	B	50～80	65	68	58
	C	40～85	63	61	61
	D	30～85	58	65	53
	E	40～85	63	68	56
	Partial average		59(62)*	67(66)*	59(57)*
This study	F	54～80	67	71	66
	G	42～80	61	64	64
	H	37～70	54	57	57
	Partial average		61	64	62
Average			60(62)*	66(65)*	60(59)*

* ( ) values denote the average value except site A

Table 4. Estimation of RMR values for the studied mine

Classification parameters	Lowest values	Highest values	Weighted average
1. Strength of intact rock	12	12	12.0
2. RQD	12	15	12.8
3. Spacing of discontinuities	10	15	13.8
4. Condition of discontinuities	16	24	18.9
5. Groundwater	4	10	8.5
Partial sum (Basic RMR)	54	76	66
6. Adjustment for discontinuity orientations	-12	0	-5.8
Total sum (Total RMR)	42	76	60

살펴보면, 이 값은 평균 66점이고, 최하 57점, 최고 73점이다. 이 역시 최저점수와 최고점수는 평균점수보다 평균대비 ±10점 이내의 범위에 놓인다. 총 RMR의 경우도 평균 60점이고, 최하 53점, 최고 66점이므로 마찬가지로 ±10점 이내의 범위에 있다.

마지막으로 개소별 RMR값의 분포를 이용하여 본 광산 암반상태의 극단적인 경우에 대한 시나리오 분석을 해보았다. 즉, Table 2에 나타난 8가지 RMR 분류자료를 직접 이용하여 미지의 암반에 대한 기초 RMR값을 예측하면 다음과 같다. 기초 RMR값은 무결암 강도, RQD, 불연속면 간격, 불연속면 상태, 지하수 상태 등 5가지 분류요소에 의해 결정되는데, 예를 들어 이 중 지하수 상태를 보면 8가지 지점은 습윤(damp), 젖음(wet), 소유출(dripping) 중의 한 가지를 보여, 최상조건은 습윤(10점), 평균조건은 젖음(7점), 최하조건은 소유출(4점)로 나누어진다. 이와 같이 Table 2에 나타난 기초 RMR값의 5가지 분류요소에 대해 각각 최하값, 최상값, 가중평균값을 구하면 각각은 Table 4와 같이 정리된다.

한편, 이와 같은 시나리오 분석은 설상가상(雪上加霜)의 극단적인 경우이므로 대개의 경우는 마주치지 못할 확률이 높지만 안전율 제고 차원에서는 한번쯤 고려해봄직하다. 따라서 Table 4와 같이 본 광산의 개발 중 마주치게 될 미지 암반의 기초 RMR값은 확률론적으로 최상조건일 경우 76점, 평균조건 66점, 최하조건 54점으로, 점수의 분포는 GSI값과 마찬가지로 평균대비 ±10점 정도의 범위에 존재할 것으로 예상되었다. 또한, 불연속면의 방향을 고려한 총 RMR값의 확률론적 변동 예측결과도 Table 4의 마지막 부분에 나타내었다.

4. 안정성 해석

4.1 해석 개요

전술한 암석 물성, 초기지압 측정 및 현장암반분류 결과를 활용하여 수치해석을 실시함으로써, 본 광산갱도의 안정성 해석을 수행하였다. 여기서 사용한 프로그램은 FLAC ver.5.0이다. 암반의 측압계수는 초기지압 측정결과인 1.197로 설정하였고, Hoek-Brown 파괴조건과 Mohr-Coulomb 파괴조건을 적용한 탄소성 해석을 실시하였다.

Fig. 4는 현장암반분류를 실시한 180 ML 갱도의 표준단면을 나타낸 것이다. 갱도의 규격은 5 m×5 m이고 천반곡률반경은 약 4 m이며 지표면 아래 심도는 454 m이다. 본 연구에서는 갱도의 주변 암반상태를 최상조건, 평균조건, 최하조건으로 나누어 갱도의 안정성 해석을 실시하였으며, 안정성 확보를 위한 갱도의 적정 형상과 지보패턴을 조사하였다.

4.2 파괴조건

일반화된 Hoek-Brown 파괴조건식은 식 (1)과 같다. 여기서 σ_1, σ_3는 최대 및 최소주응력, σ_c는 무결암의 일축압축강도, m_b는 암반의 파괴상수, s와 a는 암반특성과 관련한 상수이다.

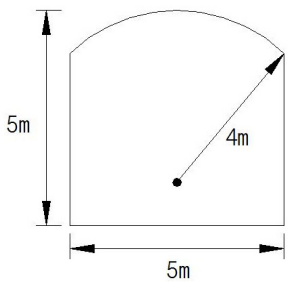


Fig. 4. Sectional view of mine roadway

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c(m_b\frac{\sigma_3}{\sigma_c}+s)^a \quad (1)$$

Hoek 등(2002)은 갱도 주변암반의 발파손상대를 고려할 경우 각 상수는 아래와 같이 표현하였는데, 여기서는 발파손상이나 응력이완에 의해 암반이 교란되는 정도를 나타내는 지수로서 교란계수(D)가 적용되었다.

$$\frac{m_b}{m_i} = \exp(\frac{\mathrm{GSI}-100}{28-14\mathrm{D}}) \quad (2)$$

$$s = \exp(\frac{\mathrm{GSI}-100}{9-3\mathrm{D}}) \quad (3)$$

$$a = \frac{1}{2}+\frac{1}{6}(e^{-\mathrm{GSI}/15}-e^{-20/3}) \quad (4)$$

실제로, 갱도 주변암반은 발파에 의해 이완되는데, Hoek 등(2002)이 제시한 교란계수 가이드라인에 의하면, 고품질의 조절발파나 TBM 굴착의 경우에는 암반 교란이 최소화되기 때문에 D=0이며, 이와 반대로 발파 품질이 불량하면 D=0.8을 적용하지만 발파손상대의 영역을 벗어난 일반적인 암반의 경우에는 D=0이 적용된다.

한편, 지반공학 분야에서 널리 사용되는 Mohr-Coulomb 파괴조건식은 식 (5)과 같다. 여기서 c와 ϕ는 점착력과 내부마찰각으로서 전단강도정수로 일컬어진다.

$$\tau = c + \sigma\tan\phi \quad (5)$$

본 연구에서는 Hoek-Brown 파괴조건을 이용하여 현장암반의 물성을 산출하고 이를 수치해석의 입력변수로 사용하였다. 또한 Mohr-Coulomb 파괴조건을 적용한 탄소성해석을 실시하여 갱도의 안정성을 평가하였다.

4.3 지반정수 결정

Mohr-Coulomb 탄소성 해석을 위해서는 암반의 단위중량, 변형계수, 포아송비, 내부마찰각, 점착력, 인장강도 등의 물성이 필요하다. 실제로 지하 구조물의 안정성 해석 시 주어진 지반정수는 공동 주변의 거동에 매우 큰 영향을 미치기 때문에 수치해석의 정확도를 높이기 위해서는 최대한 현지 암반특성을 고려하여 입력 물성을 산정하여야 한다(Lee et al., 2012).

전술한 바와 같이 본 광산의 미지 암반에 대한 GSI값을 추정하면 평균값은 60점이었다. 또한 최저점수와 최고점수는 이보다 ±10점 이내의 범위에 놓인다. 따라서 본 광산 암반의 GSI값은 최상조건 70점, 평균조건 60점, 최하조건 50으로 판단된다. 또한 이는 RMR값 평가 결과와도 부합한다.

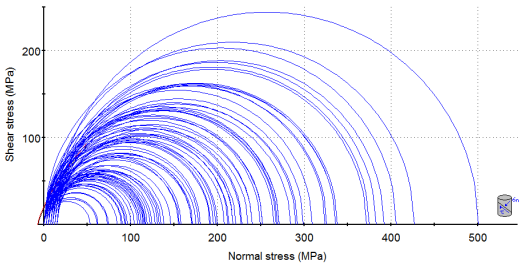


Fig. 5. Mohr circles obtained from laboratory tests

본 연구에서는 이러한 GSI값을 Hoek-Brown 파괴조건에 적용하여 암반의 조건별 물성 값을 구하였다. 즉, Table 1에 나타낸 실내시험으로 구한 무결암의 물성 값을 조건별 암반 물성 값으로 환산한 후, 이를 입력변수로 사용하여 갱도의 안정성 해석을 실시하였다. 지반정수 결정과정을 구체적으로 설명하면 다음과 같다.

먼저, 암석물성시험 자료처리용 프로그램인 RocData Ver.4.0을 이용하여 무결암에 대한 일축압축시험 자료(33개)와 삼축압축시험 자료(48개)를 분석하였다. Fig. 5는 여기서 얻어진 총 81개의 Mohr 응력원들을 나타낸 것으로서, Mohr-Coulomb 파괴조건을 적용하여 구한 무결암의 점착력은 23 MPa, 내부마찰각은 57°이었으며, Hoek-Brown 파괴조건을 적용하여 구한 무결암의 파괴상수 m_i 값은 22로 나타났다.

다음으로, 현지암반의 GSI값이 70점, 60점, 50점인 경우에 대해서 암반의 물성 값을 각각 구하였다. Table 5의 D=0인 부분은 암반물성 산출 결과를 나타낸 것으로, 이는 갱도 벽면에서 멀리 이격되어 발파손상대의 영역을 벗어난 암반에 대한 입력변수로 사용된다.

한편, 발파에 의해 교란되는 광산갱도 주변암반 즉, 발파손상대 영역에 대해서는 D=0.8을 적용해야 한다. Table 5의 D=0.8 부분은 이때 구해진 암반 물성을 나타낸 것으로, 이는 발파손상대 영역의 암반에 대한 입력변수로 사용된다.

한편, Table 5에서 D=0과 D=0.8의 각 수치들을 비교하면 암반이 교란될 경우 각종 물성 값은 상대적으로 작게 되는 것을 알 수 있는데, 이는 발파손상이나 응력이완에 의해 갱도벽면 부근의 암반은 강도가 저하된 것을 의미한다. 이와 같은 각 조건의 암반 물성 분포를 그림으로 나타내면 Fig. 6과 같다. 여기서 GSI값은 최상조건 70점, 평균조건 60점, 최하조건 50점으로 각각 표시하였고, D=0인 경우와 D=0.8인 경우를 함께 나타내

Table 5. Rock mass properties for numerical analysis

Disturbance factor	GSI value	Young's modulus (GPa)	Friction angle (°)	Cohesion (MPa)	Tensile strength (MPa)
D=0	GSI=70	42	51	8	1
	GSI=60	30	49	6	0.4
	GSI=50	18	46	5	0.2
D=0.8	GSI=70	17	46	6	0.5
	GSI=60	10	41	5	0.2
	GSI=50	5	36	4	0.07

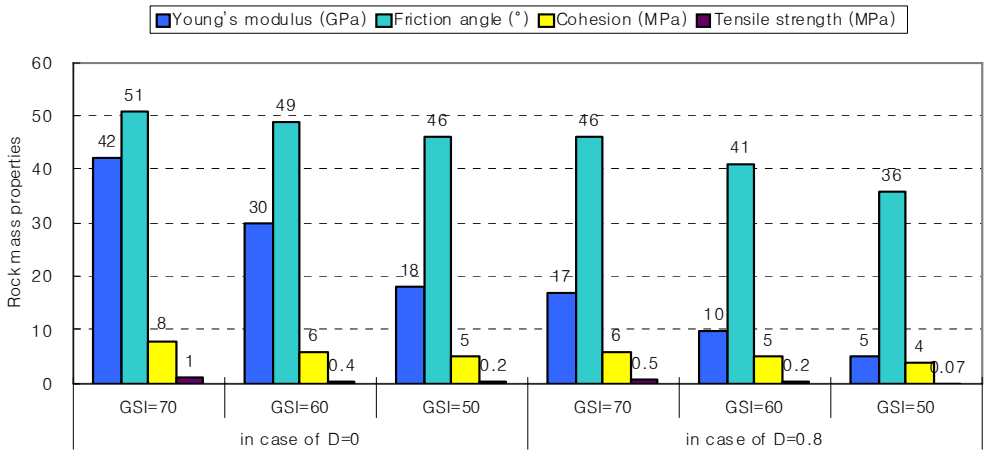


Fig. 6. Distribution of input values for numerical analysis

었다. 단, 본 해석에 있어서 암반의 단위중량과 포아송비는 Table 1의 값을 그대로 적용하였다.

4.4 해석대상 및 내용

180 ML 갱도를 대표 단면으로 하여 해석을 실시하였다. Fig. 7은 요소망을 나타낸 것으로 갱도 규격은 5 m×5 m이고 해석영역은 45 m×45 m이다. 갱도 굴착 이전의 초기응력 상태는 현장 초기지압 측정결과를 반영하였고 현장조건과 같이 갱도를 전단면 굴착하였다.

한편, 갱도 주변 암반의 변형거동은 암반조건이나 발파조건에 따라 달라진다. 첫째, 암반조건은 전술한 암반분류 평가를 통해 본 광산의 경우 최상, 평균, 최하조건으로 나누어졌다. 둘째, 발파조건에서 발파손상대의 영역 범위는 갱도벽면에서 1~2 m로 설정하였다. 실제로 Cheng and Liu(1990)은 대만에 위치한 폭 22.4 m, 높이 46.5 m 규격의 Mingtan cavern에 대한 현장계측 결과 발파손상대는 공동 벽면 약 2 m 범위라고 보고하였

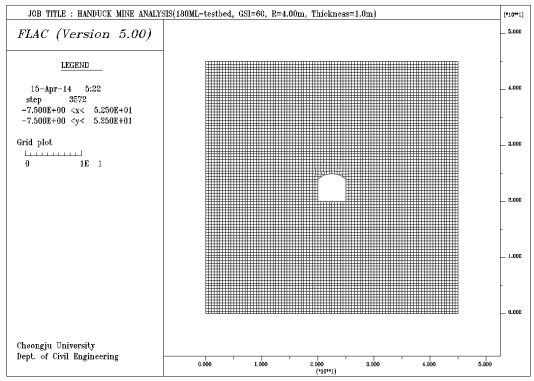


Fig. 7. Mesh for numerical analysis

는데, 본 광산갱도는 폭 5 m, 높이 5 m로서 규모가 작기 때문에 발파손상대를 1~2 m로 가정하였다.

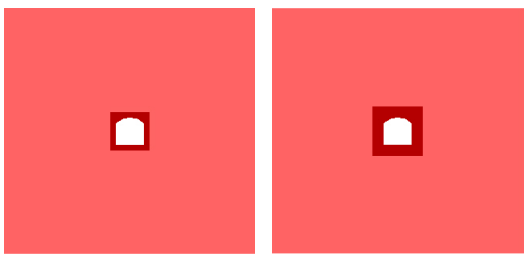
이와 같이, 본 해석에서는 암반조건을 최상조건, 평균

조건, 최하조건으로 나누고, 발파손상대의 두께를 갱도 벽면 1 m인 경우와 2 m인 경우로 나누어 총 6가지 해석을 우선적으로 실시하였다. 또한, 적정 지보패턴을 결정하기 위한 해석과 갱도의 적정 형상을 알아보기 위한 해석도 실시하였다.

4.5 암반 및 발파조건에 따른 해석결과

총 6가지 해석 중에서 두 가지 경우에 대해서만 해석결과를 언급하고자한다. 첫째는 암반 및 발파조건이 모두 평균적인 조건일 때, 즉 GSI값 60점, 발파손상대 두께 1 m일 경우이고, 둘째는 암반 및 발파조건이 모두 최하조건일 때, 즉 GSI값 50점, 발파손상대 두께 2 m일 경우이다. Fig. 8은 이 두 가지 경우에서 발파손상대의 크기를 비교한 것이다.

첫째의 경우에서, Fig. 9는 갱도 굴착 후의 변위백터도를 나타낸 것이다. 여기서 최대 변위백터는 4.762 mm이며 암반내 모든 변위는 갱도 중앙부를 향해 발생하였다. 갱도 천정, 측벽, 바닥 변위 중에서 측벽 변위가 비교적 큰 것은 측압계수의 영향에 기인한다. 한편, 이 경우에 있어서는 굴착 후 갱도 주변에 소성파괴영역이 발생하지 않았다.



(a) thickness of 1 m (b) thickness of 2 m

Fig. 8. Comparison of blast damaged zones

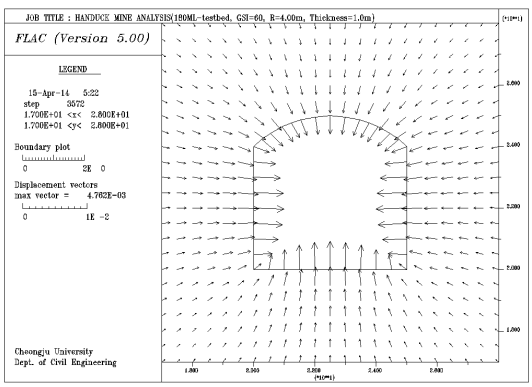


Fig. 9. Displacement vectors around roadway

둘째의 경우에서도, 변위발생양상은 Fig. 9와 유사하였지만 변위 발생량은 달랐다. Fig. 10은 두 가지 경우에서 발생한 천정, 측벽, 바닥부의 수직 또는 수평변위를 비교한 것으로, 최하조건은 평균조건에 비해 2배 이상의 변위를 보였다. 또한, 이 경우에 있어서는 Fig. 11와 같이 갱도 천정부와 모서리 부분에 소성파괴영역이 발생하기도 하였다. 이와 같이 암반 및 발파조건이 열악할 경우에는 본 광산갱도의 안정성은 저하됨을 알 수 있었다.

4.6 지보설계

암반 및 발파조건이 모두 최하조건일 때는 Fig. 11과 같이 주로 천정부에 소성파괴영역이 발생하였는데, 이는 낙반으로 이어질 수 있으므로 적정 지보가 요구된다. 하지만 본 갱도는 단기적인 안정성만 요구되는 광산갱도이며 소성파괴영역의 범위가 크지 않아 체계적인 록볼트나 강재지보 시공은 필요하지 않으며, 국부적인 록볼트 내지는 일정한 두께의 숏크리트 시공이 바람직한

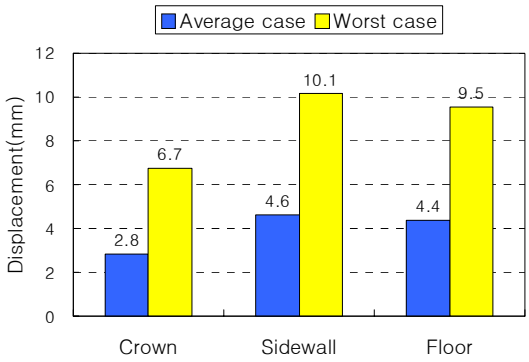


Fig. 10. Comparison of roadway displacement

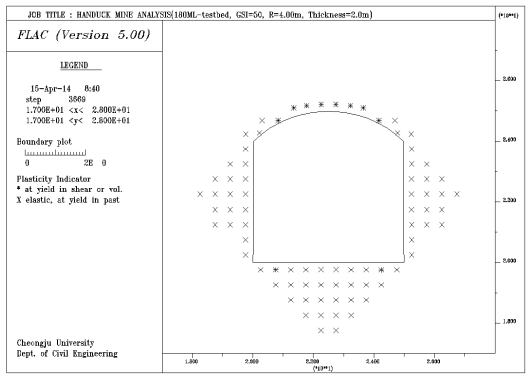


Fig. 11. Plastic zones at worst case

것으로 판단된다. 특히 본 광산은 광화작용 과정에서 암반의 각력 구조가 일부 관찰되므로, 소규모 낙반을 대비한 천정부 보강은 필요하다고 생각된다.

본 연구에서는 최하조건에서의 적정 지보량을 조사하기 위하여 갱도 천정부와 측벽부에 숏크리트를 타설하는 경우를 알아보았다. 모두 세 가지 경우를 해석하였는데, 첫째는 천정부에 두께 5 cm, 둘째는 천정부와 측벽부에 두께 5 cm, 셋째는 천정부에 두께 10 cm의 숏크리트를 타설하는 경우를 각각 해석하였다.

세 가지 경우에서 천정부 변위는 순서대로 6.434 mm, 6.393 mm, 6.237 mm로 나타났는데, 이는 무지보인 경우에 발생한 변위 6.732 mm에 비하면 각각 4.6%, 5.3%, 7.9% 감소한 것에 해당한다. 또한, Fig. 12는 각 경우의 소성영역 분포를 비교한 것으로, 천정부에 두께 10 cm의 숏크리트를 타설하는 마지막 경우가 최소 변위를 보일 뿐 아니라 갱도 천정부의 소성파괴영역도 없어져서 가장 안정한 지보패턴으로 나타났다.

4.7 갱도의 형상에 따른 특성 비교

본 광산갱도는 전술한 해석결과에 의거하면, 현재 개발심도(180ML)에서는 Fig. 4와 같이 천반 곡률반경이 4 m인 아치형 갱도를 적용하여도 무방할 것으로 판단된다. 그러나 갱도는 전혀 예기치 못했던 매우 열악한 암반 조건에 놓일 수도 있으며 개발심도가 더 깊어진 경우도 대비해야하기 때문에, 본 연구에서는 Fig. 13과 같이 갱도의 형상을 변화시킨 4가지 갱도에 대해 해석하였다. 이들은 규격이 5 m×5 m로 동일하지만 천반곡률이 서로 다른 형태이다.

이 해석에 있어서, 대상암반은 실제 물성보다는 매우 연약한 물성으로 취급하여 GSI값이 20점인 암반 물성으로 가정하였는데, 이는 매우 열악한 암반 조건을 가정하기 위해서이다. 여기서 입력된 암반 물성은 영률 3 GPa, 내부마찰각 36°, 점착력 3 MPa, 인장강도 0.02 MPa로써, 이들은 Table 5에 비해 매우 작은 값에 해당한다.

Fig. 14는 4가지 경우의 갱도 변위를 비교한 것으로, 사각형 갱도의 변위가 가장 크며 천반 곡률반경이 작아질수록 변위는 감소하여 곡률반경 2.5 m인 아치형 갱도의 변위가 가장 작게 나타났다. 이는 아치형 공동에서 천반 곡률반경을 매개변수로 한 연구사례(김종우, 1996)의 결과와 부합한다.

한편, Fig. 15는 4가지 갱도 주변의 소성영역 분포를 비교한 것으로, 사각형 갱도는 소성파괴영역이 갱도 주변에 넓게 발생하는데 비해, 천반 곡률반경이 작은 갱도일수록 소성파괴영역의 범위는 점차 감소하였다.

따라서 갱도의 천반 곡률반경이 작아질수록 갱도의 안정성은 증가함을 알 수 있었다. 한편, 본 광산의 경우에는 전술한 바와 같이 현재의 개발심도에 해당하는 지압 수준이나 암반조건에서는 천반 곡률반경이 4 m인

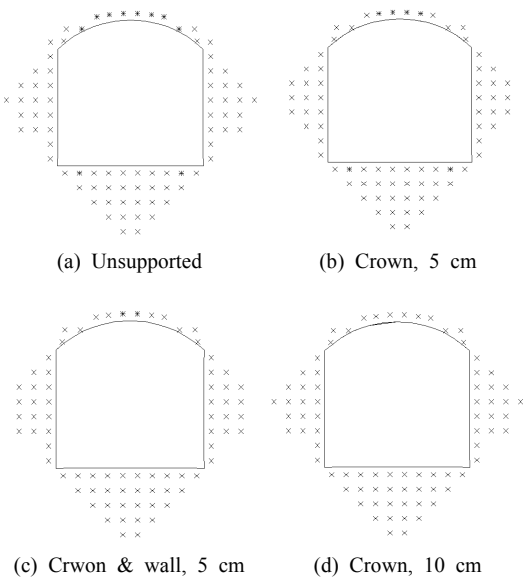


Fig. 12. Comparison of plastic zones at different shotcrete conditions

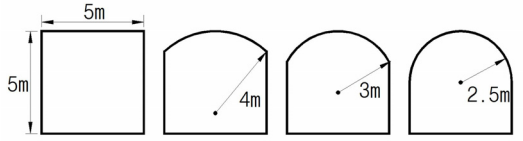


Fig. 13. Four different roadway shapes

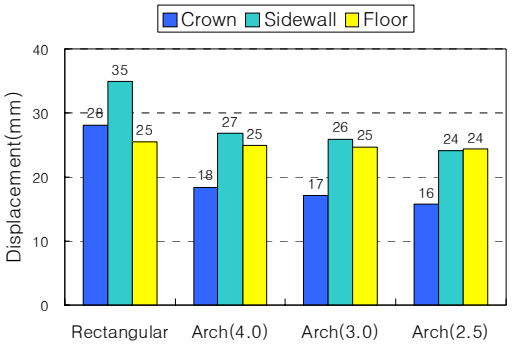
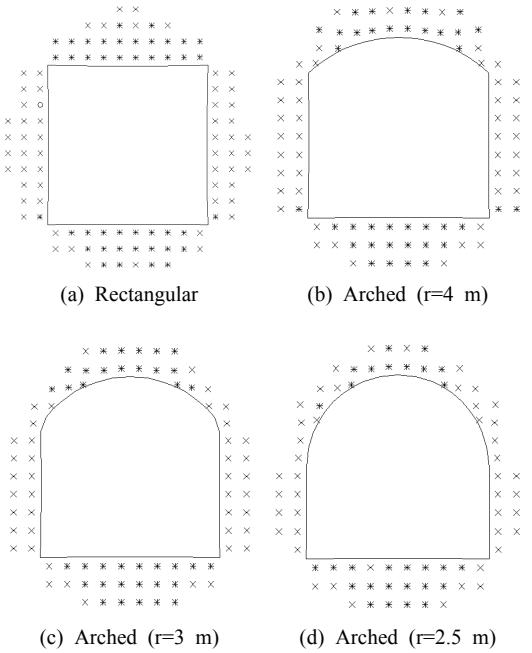


Fig. 14. Comparison of displacements among four different roadway shapes



(a) Rectangular (b) Arched (r=4 m)

(c) Arched (r=3 m) (d) Arched (r=2.5 m)

Fig. 15. Comparison of plastic zones at different roadway shapes

아치형 갱도도 안정성에 큰 문제는 없으나, 예기치 못한 암반조건을 만나거나 심부개발에 따른 과지압을 고려하면 천반 곡률반경을 보다 감소시킨 아치형 갱도를 적용하는 것이 바람직하다고 생각된다. 단, 이 경우에는 갱도의 굴착단면적이 작아지고 작업상 유효단면적이 감소되므로 주의할 필요가 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 정선군의 신예미광업소를 대상으로 고심도에 위치한 금속광산갱도의 안정성 해석을 수행하였다. 본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 본 현장에서 채취한 4가지 암석에 대해 수많은 실내시험을 실시하여 무결암 물성 값을 산출하였으며, 수압파쇄법으로 암반의 초기지압을 측정하였다.
2. 갱도 현장조사를 통해 GSI, RMR 분류를 실시하였고, 암반분류 결과에 대한 시나리오 분석 및 확률론적 평가를 통해 현장 암반상태를 최상, 평균, 최하조건으로 구분하였으며 조건별 암반 물성 값을 추정하였다.
3. 현장 암반상태와 갱도 주변 발파손상대 범위를 고려한 조건별 탄소성해석을 실시하였다. 이때 최하조건의 경우에는 갱도 천정부에 소성파괴영역이 발생하여 갱도 안정성이 결여되므로 지보해석을 실시하였으며, 천정부 10 cm 두께 숏크리트 설치가 적정 지보패턴으로 나타났다.
4. 갱도의 형상을 변화시킨 해석을 통해 천반 곡률반경이 작아질수록 갱도의 안정성은 증가함을 알 수 있었다.
5. 이 연구의 결과는 국내 금속광산갱도의 안정성 평가에 기초 자료로 활용될 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부에서 지원한 한국지질자원연구원 기관고유사업인 “심부 금속광체 정밀물리탐사 및 채광기술 개발”의 일환으로 수행되었습니다.

Reference

1. Kim, J.W. and Lee, H.K., 1994, A study on the deformation behavior of steel support and the determination of support loads in deep tunnels, Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, 31.1, 60-69.
2. Chung, S.K. and Synn, J.H., 2004, Elasto-plastic analysis and in-situ measurement on rock behaviors with stepwise excavation of the steep soft seam at a great depth, Tunnel and Underground Space, 14.4 295-303.
3. Han K.C. and Jeon, Y.S., 2005, Evaluation of the stability for underground tourist cavern in an abandoned mine, Tunnel and Underground Space, 15.6, 425-431.
4. Sunwoo, C., Karanam, U.M.R., Chung S.K. and Jeon, Y.S., 2004, A study on the characteristics of rock mass by GSI in limestone mine, Tunnel and Underground Space, 14.2, 86-96.
5. Koo, C.M., Jeon S.W. and Lee, I.W., 2008, Underground mine design and stability analysis at a limestone mine, Tunnel and Underground Space, 18.4 243-251.
6. 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 and Underground Space, 20.3,. 145-152.
7. Yoon, Y.K., Kim B.C. and Jo, Y.D., 2010, Creep characteristics of granite in gagok mine, Tunnel and Underground Space, 20.5, 390-398.
8. KIGAM, 2008, Construction of deep underground research laboratory and core technology development, GP2008-005-2008(2).
9. KIGAM, 2011, development of underground energy storage system in lined rock cavern, GP2009-019-2011(3).
10. Korean Society for Rock Mechanics, 2010, Standard test method for rock, CIR, Seoul.
11. Hoek, E. and Brown, E.T., 1997, practical estimates of

rock mass strength, Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. 34, 1165-1186.
12. Bieniawski, Z.T., 1989, Engineering rock mass classifications, New York, Wiley.
13. Hoek, E., Carranza-Torres, C. and Corkum, B., 2002, Hoek-Brown criterion - 2002 edition. Proc. NARMS-TAC Conference, Toronto, 1, 267-273.
14. Lee, Y.S., Park, D.H., Sunwoo, C., Kim G.W. and Kang, J.S., 2012, Numerical design approach to determining the dimension of large-scale underground mine structures, Tunnel and Underground Space, 22.2 120-129.
15. Kim, J.W., 1996, Deformation behaviors of arches openings related with roof curvature, Tunnel and Underground Space, 6.1 10-18.

김 종 우

1986년 서울대학교 자원공학과 공학사
1988년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1993년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 043-229-8471
E-mail: jwkim@cju.ac.kr
현재 청주대학교 토목공학과 교수

이 동 길

1999년 세명대학교 공과대학 자원공학과 공학사
2001년 한양대학교 공과대학 자원공학과 공학석사
2006년 한양대학교 공과대학 자원공학과 공학박사

Tel: 042-868-3228
E-mail: ldk@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 탐사개발연구실 선임연구원

조 영 도

1977년 인하대학교 공과대학 자원공학과
1982년 인하대학교 대학원 자원공학과 공학석사
2007년 광운대학교 화학공학과 공학박사

Tel: 042-868-3223
E-mail: jyd@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 탐사개발연구실 책임연구원

김 민 식

2012년 청주대학교 토목환경공학과 공학사
2014년 청주대학교 토목환경공학과 공학석사

Tel: 043-271-3304
E-mail: anotheriori@nate.com
현재 ㈜나노지오이엔씨 사원

박 찬

1988년 한양대학교 공과대학 자원공학과 공학사
2000년 수원대학교 공과대학 토목공학과 공학석사
2006년 충남대학교 공과대학 토목공학과 공학박사

Tel: 042-868-3245
E-mail: chan@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원

박 삼 규

1988년 부산대학교 자연과학대학 지질학과 이학사
1990년 부경대학교 대학원 응용지질학과 이학석사
1996년 오사카대학 공학연구과 토목공학전공 공학박사

Tel: 042-868-3096
E-mail: samgyu@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 탐사개발연구실 책임연구원