

암반분류법을 이용한 석회석 광산 내 대규모 갱도의 안정성 평가

윤용균^{1)*}, 이홍우²⁾

Evaluating the Stability of Large-scale Gangways Mined in a Limestone Mine Using Rock Classification Schemes

Yong-Kyun Yoon and Hong-Woo Lee

Abstract Rock classification schemes such as RMR, Q-system were applied to investigate the stability of large-scale gangways mined in a limestone mine. 22 areas for engineering geological surveys were selected and rock classifications at each survey point had been carried out. Considering the fact that the observed gangways have not experienced some severe failure and have been stably maintained till now, it is found that Q-system is more reasonable than RMR in evaluating the stability of unsupported span. Also, extended Mathews stability graph method which is a kind of revised Q-system was used to assess the stability of gangways and the results represent that all gangways except for one area are under stable condition. Based on above the mentioned results, the empirical equations to design the maximum unsupported span and critical height of a large-scale gangway are suggested.

Key words RMR, Q-system, Extended Mathews stability graph method, Maximum unsupported span, Critical height, Large-scale gangway

초 록 석회석 광산에 굴착된 대규모 갱도의 안정성을 평가하기 위하여 22곳의 측정지점을 선택한 후 RMR과 Q 분류법을 실시하였다. 측정 대상 갱도가 조사시점까지 안정성에 심각한 문제가 없었다는 점을 고려하면 갱도 폭에 대한 안정성을 평가함에 있어 RMR보다는 Q 분류법이 측정 결과와 부합하는 것으로 나타났다. 갱도의 전체적인 안정성을 평가하기 위하여 수정 Q 분류법의 일종인 확장 안정성 도해법을 적용한 결과 한 곳을 제외하고는 모든 측정 갱도들이 안정한 것으로 평가되었다. RMR과 Q 분류법의 적용 결과를 토대로 하여 대규모 갱도의 최대 무지보 폭과 한계높이를 평가할 수 있는 회귀식을 제안하였다.

핵심어 RMR, Q 분류법, 확장 안정성 도해법, 최대 무지보 폭, 한계높이, 대규모 갱도

1. 서 론

석회석은 국내 광산물 생산액의 75% 정도를 점유할 정도로 국내 광업을 대표하는 광종이며(산업자원부 & 한국지질자원연구원, 2006), 산업 발전에 필수불가결한 기초 소재 자원이다. 석회석 채굴은 노천채광이 주를 이루고 있으나, 고품위 석회석 개발의 필요성과 ‘산지관리법’과 ‘백두대간보호에 관한 법률’과 같은 환경관련법의 강화, 민원 등으로 인하여 노천채광에서 지하채광으로의 전환이 불가피한 실정이다.

고품질 석회석을 채굴하는 경우 갱도를 소형으로 유지해도 문제가 없으나 시멘트용으로 사용되는 석회석을 지하채굴로 생산하여 생산비를 낮추기 위해서는 대형 장비의 투입이 요구된다. 대형 장비를 투입하는 경우 장비의 원활한 가동을 위해서는 작업공간과 이동공간을 확보해야 하며 이를 위해 대규모 갱도의 설계가 필요하다. 국내에서도 석회석 지하채굴에 따른 대규모 갱도의 안정성 평가법 도입을 위한 연구가 이루어지고 있지만(선우춘과 정용복, 2005, 선우춘 외, 2005) 체계적인 설계법의 도출을 위해서는 지속적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

갱도의 설계 및 안정성을 평가하는 데는 경험적설계법, 해석적설계법, 수치해석법의 여러 방법이 사용될 수 있지만, 별다른 시험장비나 고도의 이론적 배경이 없이도 암반에 대한 기초적인 자료를 수집하여 갱도의 안정

¹⁾ 세명대학교 자원환경공학과

²⁾ 세명대학교 대학원 환경안전시스템공학과

* 교신저자 : yoon63@semyung.ac.kr

접수일 : 2007년 11월 21일

심사 완료일 : 2007년 12월 17일

성과 역학적 특성 및 지보패턴을 평가할 수 있는 공학적 암반분류법을 사용하는 것이 효율적이다. 세계적으로나 국내에서 가장 널리 사용되고 있는 암반분류법으로는 RMR, Q 분류법을 들 수 있다. 토목 터널의 경우 터널의 굴진 방향, 심도, 응력 조건 등이 공사 기간 동안 일정하게 유지되지만 광산 개발의 경우에는 완전히 다르기 때문에 기존의 RMR이나 Q 분류법을 수정하여 광산 갱도 설계에 사용하기도 한다. 광산의 고유한 특성을 고려하기 위하여 기존의 암반분류법을 수정하는 경우 MRMR(mining rock mass rating)과 같이 추가적인 영향 인자를 고려하는 경우가 있고, 반대로 초기응력이나 갱도의 굴진 방향과 같은 환경적인 요인을 무시하여 기존의 암반분류법을 좀 더 단순하게 사용하는 경우가 있다(Milne et al., 1998).

본 연구에서는 RMR과 Q 분류법을 활용하여 지하 채굴을 실시하는 석회석 광산 내 굴착된 대규모 갱도의 안정성 평가를 수행하였다. 조사 대상 광산의 운반갱도와 채광갱도에서 암반분류를 실시하여 갱도의 안정성을 검토하였다. RMR을 이용하여 갱도의 자립시간을 구한 후 실제 갱도가 유지된 기간과의 비교를 통해 RMR의 적용성을 평가하였다. 또한 Q 분류법을 이용하여 현재 개설된 갱도의 폭이 무지보 상태로 유지될 수 있는 지를 평가하였다. RMR과 Q 분류법의 적용 결과를 분석한 후 조사 대상 광산의 개설된 갱도의 안정성을 평가하는데 적합한 것으로 평가된 Q 분류법을 이용하여 최대 무지보 폭을 계산할 수 있는 회귀식을 도출하였다.

갱도의 폭뿐만 아니라 갱도의 높이도 안정성에 영향을 미치기 때문에 경제성을 높이면서 안정성도 유지할 수 있는 갱도의 높이를 결정하는 것이 중요하다. RMR이나 Q 값을 이용하여 안정한 채굴 갱도의 최대 높이를 평가하는 것은 어렵기 때문에 본 연구에서는 Mawdesley 등(2001)이 제안한 확장 안정성 도해법(extended Mathews stability graph method)을 활용하여 갱도의 전체적인 안정성을 평가하였고, 채굴 갱도의 한계높이를 결정할 수 있는 회귀식을 구하였다.

2. 연구 대상 지역 현황

본 연구에서는 조사 대상 광산으로 충북 제천시에 위치하고 있는 OO석회석광업소를 선정하였다. 이 광산은 노천채광에서 지하채광으로 전환한 광산으로써 생산량이 연 50만톤 정도이다.

광체형상은 향사구조를 가지는 가창산 향사이며, 평안누층군의 갑산층 중부 석회석을 대상으로 개발하고

표 1. 조사 대상 지역 석회암의 물성

물성		값
단위중량 (kN/m^3)		26.7
흡수율 (%)		0.10
탄성파속도	종파 (m/s)	6,170
	횡파 (m/s)	2,980
일축압축강도 (MPa)		92
압열인장강도 (MPa)		7.2
탄성계수 (GPa)		45
포아송비 (ν)		0.15
점착력 (MPa)		18
내부마찰각 ($^\circ$)		46

있다. 광체의 폭은 30~80 m 정도이다. 채굴은 갱 입구에서 N30E 방향으로 360 m 지점에서 갑산층 내 중부 석회암(고품위광체)을 착맥하여 서측 날개부 광체의 주향 방향(N30W)을 따라 좌측갱이 개설되어 있고, 갱 입구에서 480 m 지점에서 동측 날개부 광체를 착맥하여 우측갱이 개설되어 있다. 주 가행대상 갱도는 410갱으로 주 운반갱도를 중심으로 상부로 1중단, 2중단이 채광중이고, 하부로는 하1단, 하2단, 하3단이 개설되어 있다. 주방식채굴법(room and pillar mining method)과 중단채굴법(sub-level open stoping)을 채택하고 있지만 맥폭에 따라 변형된 채굴법을 적용하고 있다.

광산 내 다양한 지점에서 공학적 암반분류법을 적용하기 위하여 운반갱도, 1중단, 2중단, 하1단, 하2단의 좌우측 갱도 내 22곳의 조사지점을 선정하였다(그림 1 참조). 조사선조사법(scanline method)을 적용하여 RMR과 Q 값을 얻기 위한 지질공학적 조사를 실시하였다. 가행중인 운반갱도나 채광갱도의 규격은 보통 폭이 7~15 m, 높이가 5.5~8 m인 것으로 나타났지만 폭이 20 m, 높이가 12 m 정도 되는 대형 갱도도 존재하였다. 대형 갱도들은 대부분 회수율을 높이기 위해 광주를 채 채굴함으로써 갱도가 대규모화된 것으로 판단된다.

갱내에서 획득한 석회암 블록에서 NX 코어를 채취하여 일축압축시험 및 삼축압축시험을 실시하였고, 그 시험 결과가 표 1에 나타나 있다. 점착력과 내부마찰각은 삼축압축시험을 통해 얻어진 값이다.

3. Q 값을 활용한 최대 무지보 갱도 폭 결정

시멘트용으로 사용되는 석회석을 지하 채굴로 채광하기 위해서는 원가를 절감하고 채광 생산성을 높이는 것

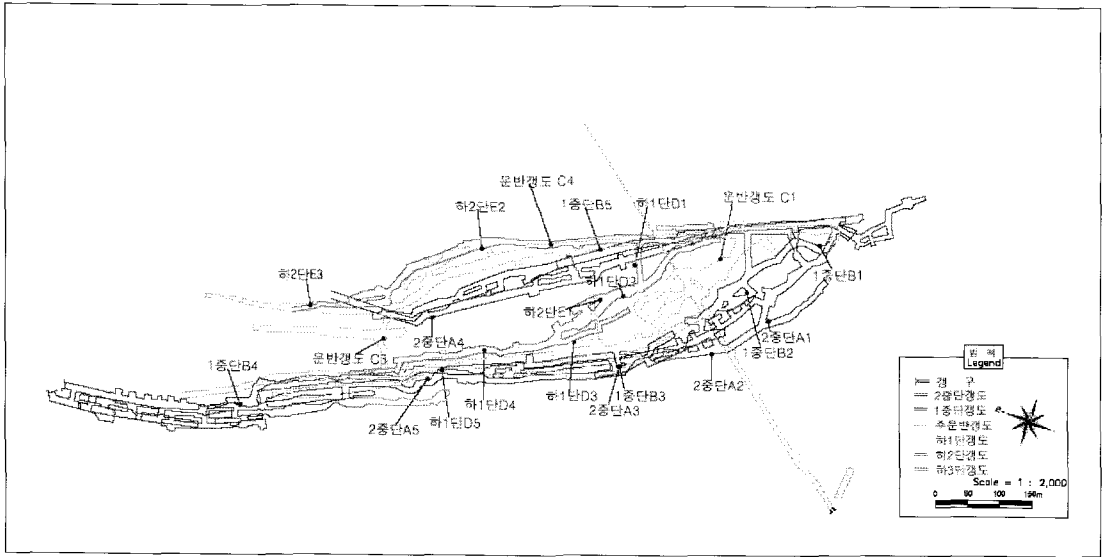


그림 1. 조사 지점

표 2. RMR 분류에 따른 자립시간과 Q 분류에 따른 지보범주

조사지점	경도 유지기간	경도 높이 (m)	경도 폭 (m)	RMR			Q-system		
				기본 RMR	최종 RMR	자립시간	Q	지보 종류	
2중단	A1	6년 8개월	6.90	10.90	56	51	3일	4.0	무지보
	A2	5년 4개월	6.50	10.80	54	42	붕괴	6.6	무지보
	A3	5년 1개월	5.50	9.80	61	49	2일	9.9	무지보
	A4	4년 6개월	6.50	9.20	56	46	1일	10.0	무지보
	A5	4년 5개월	7.20	9.70	50	45	1일	6.1	무지보
1중단	B1	8년 10개월	6.00	12.40	58	46	붕괴	8.3	무지보
	B2	8년 1개월	7.30	15.40	61	49	붕괴	7.2	무지보
	B3	6년 11개월	6.20	8.90	53	41	붕괴	3.9	무지보
	B4	5년	6.60	19.80	63	63	붕괴	8.3	무지보
	B5	7년 5개월	6.20	13.80	62	50	붕괴	4.7	시스템볼트
운반경도	C1	9년 6개월	6.50	17.40	43	38	붕괴	1.3	시스템볼트 & 숏크리트
	C2	1년 4개월	6.20	5.83	60	48	3일	6.6	무지보
	C3	7년 10개월	5.40	8.70	50	45	1일	3.0	무지보
	C4	7년 2개월	12.54	15.42	58	46	붕괴	10.0	무지보
하1단	D1	4년 11개월	5.30	7.50	56	51	1주	3.3	무지보
	D2	4년 9개월	6.10	13.20	61	56	5일	12.4	무지보
	D3	4년 2개월	5.87	17.46	63	51	붕괴	6.3	시스템볼트
	D4	3년 5개월	5.98	9.50	64	52	5일	6.3	무지보
	D5	3년 3개월	6.36	10.50	48	36	붕괴	1.5	무지보
하2단	E1	3년 3개월	6.88	11.28	58	46	붕괴	7.2	무지보
	E2	3년 2개월	7.34	10.89	56	44	붕괴	5.8	무지보
	E3	1년 10개월	6.62	8.89	57	52	6일	7.2	무지보

이 필수적이다. 채광 생산성을 제고하기 위해서는 대규모 갱도를 굴착하여 단위 출광량을 높이는 것이 중요하고, 생산 원가를 줄이기 위해서는 지보를 하지 않고 무지보 상태로 갱도를 유지하는 것이 필요하다. 따라서 석회석을 지하채굴로 생산하기 위해서는 안정성이 유지되면서도 대형 장비를 사용할 수 있는 무지보 대규모 갱도를 설계하는 것이 매우 중요하다.

표 2에는 조사지점 22곳의 갱도에 대한 유지기간, 갱도 규격, 기본 RMR, 최종 RMR, Q 값, RMR에 의한 자립시간, Q 값에 따른 지보범주가 나타나 있다. 갱도 유지기간은 굴착한 이후부터 조사 시점까지의 경과기간을 말한다. RMR 분류 결과와 기본 RMR은 대체적으로 64 이하로 나타났고, 최종 RMR은 40~55인 것으로 조사되었다. 최종 RMR에 따른 자립시간을 살펴보면 거의 모든 갱도가 '즉시 붕괴'나 자립시간이 짧은 것으로 나타났다.

Q 값은 1.3~12.4로 나타났으며, 대부분의 지점에서 4이상인 것으로 조사되었다. 조사지점의 갱도 폭과 Q 값을 이용하여 지보범주를 추정한 결과 대부분의 조사 지점에서 갱도가 무지보로 유지될 수 있는 영역에 속하는 것으로 나타났다.

표 2에서 보는 바와 같이 Q 분류법의 조사결과는 RMR의 자립시간 결과와는 상이한 결과를 보이고 있다. 표 2에 제시된 갱도는 굴착 시부터 현재까지 소규모 블록의 낙반이나 미끄러짐을 제외하고는 대부분 안정한 상태를 유지하고 있기 때문에, 최대 무지보 갱도 폭을 결정하는데 RMR 분류법을 그대로 적용하기에는 문제점이 있다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 RMR 분류법 대신 Q 분류법을 이용하여 최대 무지보 갱도 폭을 결정하였다.

최대 무지보 갱도 폭을 결정하기 위한 식을 얻기 위하여 그림 2에서와 같이 측정 갱도에 대한 등가굴착크기(equivalent dimension, De)와 Q값에 대한 회귀식을 구하면 다음 식과 같다.

$$De = 2.6 \times Q^{0.24} \tag{1}$$

등가굴착크기는 갱도의 폭(W)을 굴착지보비수(excavation support ratio, ESR)로 나눈 값임으로 이를 이용하여 (1)식을 다시 쓰면 다음과 같은 최대 무지보 폭을 평가할 수 있는 상관관계식을 얻을 수 있다.

$$W = ESR \times 2.6 \times Q^{0.24} \tag{2}$$

조사지점에서 측정된 실제 갱도의 폭과 (2)식을 통해

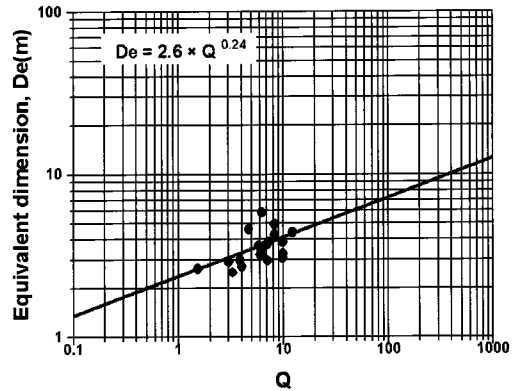


그림 2. Q값과 등가굴착크기(De)

표 3. 갱도 폭에 대한 측정값과 계산값

조사지점	Q	갱도 폭(m)		
		측정값	계산값	
2중단	A1	4.0	10.90	14.53
	A2	6.6	10.80	12.27
	A3	9.9	9.80	13.52
	A4	10.0	9.20	13.55
	A5	6.1	9.70	12.01
1중단	B1	8.3	12.40	12.94
	B2	7.2	15.40	16.72
	B3	3.9	8.90	10.81
	B4	8.3	19.80	17.26
	B5	4.7	13.80	11.29
운반갱도	C1	1.3	17.40	11.12
	C2	6.6	5.83	12.27
	C3	3.0	8.70	10.17
	C4	10.0	15.42	18.07
하1단	D1	3.3	7.50	10.39
	D2	12.4	13.20	14.27
	D3	6.3	17.46	12.11
	D4	6.3	9.50	12.11
	D5	1.5	10.50	11.54
하2단	E1	7.2	11.28	12.51
	E2	5.8	10.89	11.91
	E3	7.2	8.89	12.51

계산된 갱도의 최대 무지보 폭이 표 3에 나타나 있다. B4, B5, C1, D3의 4개 지점에서 측정된 실제 갱도 폭이 계산된 최대 무지보 폭을 초과하고 있다. B4 지점의 경우 갱도의 중앙 일부에 광주 형태의 잔주가 남아있어

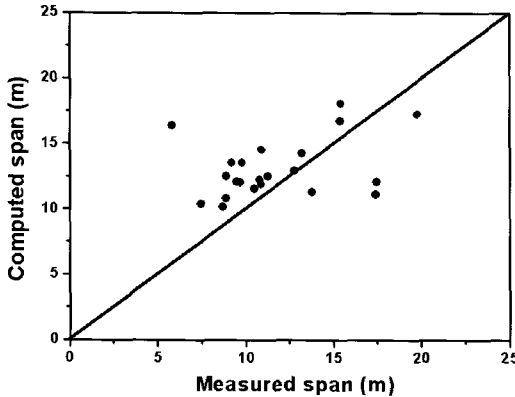


그림 3. 측정된 갱도 폭과 계산된 최대 무지보 갱도 폭

이를 고려하는 경우 실제 갱도 폭이 감소되어 안정성에는 문제가 없을 것으로 판단된다. B5 지점은 용식동굴이 존재하고 있고 육안으로도 불안정한 형태를 보인다. C1, D3 지점은 갱도의 벽면에 파쇄대가 발달되어 있고 파쇄대를 따라 박리현상이 일어나는 것으로 관찰되었다.

그림 3에는 표 3에 제시된 조사 갱도의 실제 폭과 계산에 의해 예측된 최대 무지보 폭이 나타나 있다. 중앙값 아래에 위치한 4개의 점들은 실제 폭이 계산된 최대 무지보 폭을 초과한 불안정한 지점들을 나타낸다.

(2)식을 이용하여 각 조사지점의 최대 무지보 폭을 계산한 결과 4개 지점을 제외하고는 예측된 최대 무지보 폭은 조사지점의 실제 갱도 폭보다 작은 것으로 나타나 조사 지점의 갱도는 대부분 안정성에 문제가 없을 것으로 생각된다. 또한 본 연구 대상 광산의 갱도 중 현재까지 사용되는 갱도들은 대부분 안정한 상태로 유지되고 있기 때문에 (2)식을 최대 무지보 갱도 폭을 설계하는데 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 확장 안정성 도해법에 의한 갱도의 안정성 평가 및 한계높이 결정

확장 안정성 도해법(extended Mathews' stability graph method)은 수정 Q 분류법의 한 종류로서 무지지 채굴법(open stoping)의 설계에 사용된다. 갱도의 안정성 여부를 평가하기 위하여 암반의 강도 및 지질구조, 갱도 주변의 응력상태, 갱도의 크기 및 형상과 방향과 같은 정보를 활용한다.

Mathews가 최초로 제안한 안정성 도해법은 수집된 자료를 바탕으로 '안정영역(stable zone)', '잠재적 불안정영역(potentially unstable zone)', '잠재적 붕괴영역(potentially caving zone)'의 3영역으로 구분하고 각 영

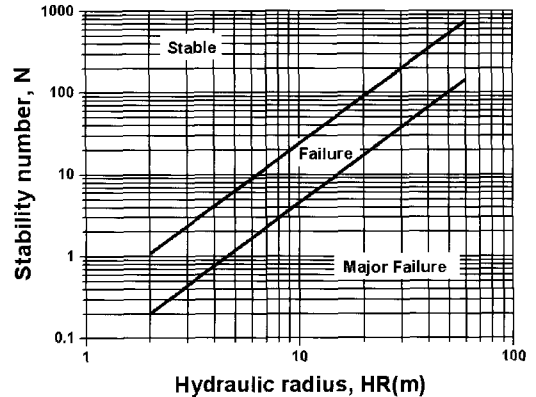


그림 4. 확장 안정성 도해법(Mawdesley et al., 2001)

역 경계에 천이영역을 두었다(Mawdesley et al., 2001). Potvin 등(1989)은 최초의 안정성 도해법을 수정하여 '안정영역(stable zone)', '붕괴영역(caved zone)'으로 나누고 그 사이에 케이블볼트를 이용하여 안정성을 유지할 수 있는 영역을 제시하였다. Stewart and Forsyth (1995)는 최초의 안정성 도해법을 수정하여 '잠재적 안정영역(potentially stable)', '잠재적 불안정영역(potentially unstable)', '잠재적 주요 파괴영역(potential major failure)', '잠재적 붕괴영역(potential caving)'의 4영역으로 구분하였다.

상기에 기술한 최초의 안정성 도해법뿐만 아니라 그 후에 수정된 안정성 도해법들은 각 영역 간에 천이영역이 있고 그 천이영역의 범위가 넓은 관계로 명확하게 영역을 구분하는 것이 쉽지 않다는 단점을 가지고 있다. Mawdesley 등(2001)은 400개 이상의 측정 자료를 로지스틱 회귀분석하여 각 영역의 위치를 최적화한 확장 안정성 도해법(extended Mathews' stability graph method)을 제안하였다. 그림 4에서 보는 바와 같이 확장 안정성 도해법은 '안정영역(stable)', '파괴영역(failure)', '주요 파괴영역(major failure)'의 3영역으로 구분된다. 확장 안정성 도해법은 천이영역을 설정하지 않은 관계로 측정 대상 갱도의 안정성을 명확하게 판단할 수 있고 최초의 안정성 도해법에서 제시한 방법으로 계수를 평가한다는 장점이 있다. 본 연구에서는 확장 안정성 도해법을 사용하여 갱도의 전체적인 안정성을 평가하고 갱도의 한계높이를 결정하였다.

안정성 도해법은 안정수(stability number, N)와 수리반경(hydraulic radius, HR)의 2개의 계수를 계산하여 갱도의 안정성 평가 및 설계를 수행한다. 안정수는 주어진 응력조건 하에서 암반의 자립 정도를 나타내주는 계수로서 다음 식과 같이 표시된다(Hoek et al., 1995).

$$N = Q' \times A \times B \times C \tag{3}$$

여기서, Q' : 수정 Q값(SRF=1, J_w=1로 가정)

A : 암반응력계수(rock stress factor)

B : 절리방향성 보정계수
(joint orientation adjustment factor)

C : 표면방향계수(surface orientation factor)

암반응력계수(A)는 심부에 있는 무지지 갱도의 주벽면에 발생하는 응력 상태를 반영한다. 즉 안정성을 저하시키는 압축유도응력의 영향을 고려하는 것이다. 이 계수는 무결암의 일축압축강도(σ_c)를 갱도 벽면에 접선 방향으로 작용하는 최대주응력(σ_1)으로 나눈 값(σ_c/σ_1)으로 정의된다. 계수 A는 0.1~1.0사이의 값을 갖으며 σ_c/σ_1 이 클수록 A는 큰 값을 갖는다.

절리방향성 보정계수(B)는 막장의 안정성에 대한 절리의 영향을 반영한다. 지질구조면에 의한 파괴의 대부분은 갱도 벽면과 예각을 이루는 가장 불안정한 절리(임계절리)를 따라 발생한다. 계수 B는 임계절리의 방향과 갱도 각 벽면 방향과의 차이에 따라 달라진다. 계수 B는 0.3~1.0사이의 값을 갖으며 임계절리와 벽면과의 교차각이 작아질수록 B값은 감소한다.

표면방향계수(C)는 중력에 의한 천반 블록의 낙반이나 벽면 블록의 미끄러짐에 의한 갱도의 파괴를 고려한다. 계수 C는 1.0~8.0 사이의 값을 취하며 천장은 1.0, 수직인 벽면은 8.0의 값을 갖는다.

수리반경 또는 형상계수(shape factor, S)는 갱도의 형상과 크기를 고려하는 계수다. 수리반경은 갱도의 주변장에 대한 갱도의 단면적의 비로 정의되며 다음 (4)식과 같이 표시된다.

$$HR = \frac{W \times H}{2(W + H)} \tag{4}$$

여기서, W : 갱도의 폭, H : 갱도의 높이다.

(3), (4)식을 이용하여 구한 안정수와 수리반경을 활용하여 본 연구에서 고려한 22곳의 조사지점에 대한 확장 안정성 도표를 작성하였다(그림 5). 그림 5에서 보듯이 현재 개설되어 있는 갱도들은 1개 지점이 '안정영역'과 '파괴영역'의 경계에 있는 것을 제외하고는 안정한 것으로 나타났다. 이러한 해석 결과는 측정 갱도 중의 일부가 부분적으로 불안정한 상태를 보이지만 전체적으로는 안정한 상태를 보여주는 관찰 결과와도 일치한다.

조사대상 광산의 대규모 갱도를 설계하는 경우 안정

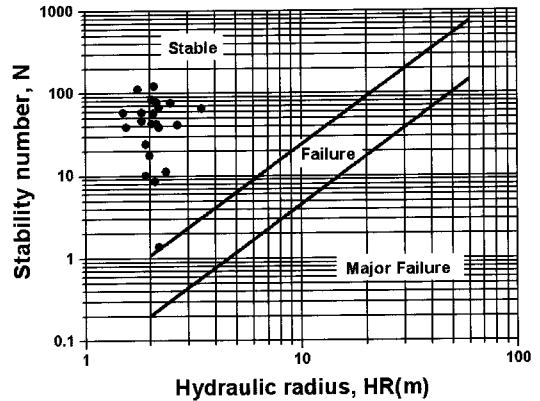


그림 5. 확장 안정성 도해법에 의한 조사지점 갱도의 안정성 해석

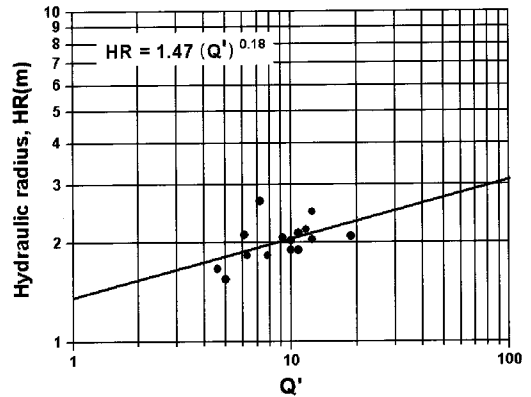


그림 6. Q'값과 수리반경

한 한계높이를 구하기 위한 관계식을 얻기 위하여 Q'값과 수리반경과의 상관관계를 분석하였다(그림 6 참조). 회귀분석을 통해 얻어진 상관관계식은 다음과 같다.

$$HR = 1.47 (Q')^{0.18} \tag{5}$$

상기 회귀식을 결정하는데 있어 22곳의 조사지점 중에서 15개 지점만을 선정하여 상관관계식을 결정하였다. 제외된 7개의 지점 중 4개 지점(B5, C1, C4, D3)은 최대 무지보 갱도 폭을 결정하기 위한 회귀식을 유도할 때 제외한 지점이다. 2개 지점(A3, C2)은 천반에서 다량의 출수와 낙반이 관찰된 곳이고, 1개 지점(D5)은 Q값이 1.5로 낮아 잠재적인 불안정성이 있을 것으로 예상되어 제외되었다.

(5)식을 (4)식에 대입하면 갱도 폭(W)과 Q'을 이용하여 갱도의 한계높이(H)를 계산할 수 있는 다음과 같은

표 4. 갱도 높이에 대한 측정값과 계산값

조사지점	Q'	수리반경 (m)	갱도 높이 (m)		
			측정값	계산값	
2 중단	A1	6.1	2.11	6.90	6.95
	A2	10.0	2.03	6.50	7.17
	A3	15.0	1.76	5.50	7.86
	A4	10.0	1.90	6.50	8.10
	A5	9.2	2.07	7.20	7.71
1 중단	B1	12.5	2.04	6.00	6.67
	B2	7.2	2.48	7.30	5.90
	B3	7.8	1.83	6.20	8.23
	B4	12.5	2.48	6.60	5.55
	B5	7.1	2.14	6.20	6.17
주운반갱도	C1	2.0	2.37	6.50	5.37
	C2	10.0	1.50	6.20	16.49
	C3	4.6	1.67	5.40	8.15
	C4	10.0	3.46	12.54	5.98
하1단	D1	5.0	1.55	5.30	9.64
	D2	18.8	2.09	6.10	6.58
	D3	6.3	2.20	5.87	5.61
	D4	6.3	1.83	5.98	7.68
	D5	2.3	1.98	6.36	6.79
하2단	E1	10.8	2.14	6.88	7.00
	E2	11.7	2.19	7.34	7.18
	E3	10.8	1.90	6.62	8.40

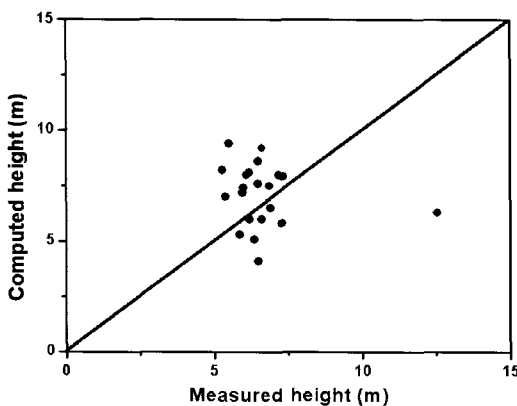


그림 7. 측정된 갱도 높이와 계산된 갱도 한계높이

관계식을 얻을 수 있다.

$$H = \frac{2.94 \times W \times (Q')^{0.18}}{W - 2.94(Q')^{0.18}} \quad (6)$$

조사지점에서 측정된 실제 갱도의 높이와 (6)식을 통해 계산한 갱도의 한계높이가 표 4에 표시되어 있으며, 그림 7은 이들 결과를 도시한 것이다. 그림에서 보듯이 중앙값 아래에 위치하는 8개의 지점(A1, B2, B4, B5, C1, C4, D3, E2)이 예측된 한계높이를 초과하고 있지만 확장 안정성 도해법에 의한 결과에 따르면 측정된 모든 갱도는 안정성에 심각한 문제는 없는 것으로 나타나고 있기 때문에 한계높이를 결정하는 데 (6)식을 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 대규모 갱도를 굴착하여 채광을 실시하고 있는 석회석 광산을 대상으로 RMR과 Q 분류법을 적용하여 갱도의 안정성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 22곳의 조사지점을 선택하여 암반분류를 수행한 결과 RMR에 의한 갱도의 자립시간은 ‘즉시붕괴’나 매우 짧은 것으로 나타났으나, Q 분류법에 의하면 지보가 필요없거나 국부적인 볼팅만으로 안정성이 유지되는 것으로 나타났다. 조사지점의 갱도가 조사지점까지 안정성에 심각한 문제가 없었다는 점을 고려하면 RMR보다는 Q분류법을 사용하여 갱도 폭에 대한 안정성을 평가하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.
- 수정 Q분류법의 일종인 확장 안정성 도해법을 적용하여 조사지점 갱도들에 대한 안정성 평가를 수행한 결과 안정영역과 파괴영역의 경계에 있는 1곳을 제외한 모든 갱도들이 안정한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 육안 관측 결과와도 일치하기 때문에 무지 지 채굴법을 적용하여 채광을 하는 광산의 안정성 평가에 확장 안정성 도해법을 적용하는데 문제가 없을 것으로 생각된다.
- Q 분류법과 확장 안정성 도해법을 이용한 갱도의 안정성 평가 결과를 토대로 하여 석회석 광산 내 대규모 갱도를 설계하는데 사용할 수 있도록 최대 무지보 폭과 갱도의 한계높이를 평가할 수 있는 회귀식을 도출하였다.

상기의 결론에서 보는 바와 같이 확장 안정성 도해법은 무지 지 채굴법을 적용하는 광산의 갱도 안정성을 평가하는데 효과적인 것으로 나타났다. 그러나 확장 안정성 도해법을 이용하여 갱도 안정성을 평가한 결과 1곳을 제외하고는 모두 안정한 것으로 나타났지만 실제 관

찰 결과에 따르면 일부 갱도에서 소규모의 낙반이나 미끄러짐이 발생하였기 때문에 확장 안정성 도해법을 그대로 적용하기 보다는 국내 광산 개발조건에 맞게끔 수정을 하여 사용하는 것이 필요할 것으로 생각된다. 또한 안정수를 구성하는 계수들의 값을 결정하는 데도 주의할 필요가 있다. 특히 암반응력계수(A)를 결정하기 위해서는 갱도 벽면에 발생하는 최대주응력을 아는 것이 필요하지만 보통은 초기응력을 토대로 하여 최대주응력을 가정하기 때문에 계수 A에 대한 적절한 값을 얻기가 어렵다. 따라서 정확한 암반응력계수를 결정하기 위해서는 수치해석을 통해 갱도 벽면에 발생하는 최대주응력을 평가하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

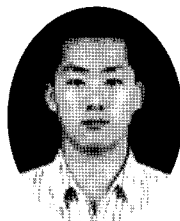
1. 산업자원부, 2006, 2005년도 광산물 수급현황, 산업자원부, 331p.
2. 선우춘, 정용복, 2005, Stability graph method에 의한 석회석 지하채굴 공동의 안정성 평가, 터널과 지하공간(한국암반공학회지) 15.5, 369-377.
3. 선우춘, 정소길, 최성웅, 정용복, 전양수, 이상권, 2005, 석회석 광산 갱내 채광장 및 갱도의 안전유지 기술연구, 산업자원부, 150p.
4. Hoek, E., P.K. Kaiser and W.F. Bawden., 1995, Support of underground excavations in hard rock, Balkema, 215p.
5. Mawdesley, C., R. Trueman and W.J. Whiten, 2001, Extending the Mathews stability graph for open-stope design, Trans. Instn Min. Metall. 110.1, A27-A39.
6. Milne, D., J. Hadjigeorgiou and R. Pakalnis, 1998, Rock mass characterization for underground hard rock mines, Tunnelling and Underground Space Technology 13.4, 383-391.
7. Potvin, Y., M.R. Hudyma and H.D.S Miller, 1989, Design guidelines for open stope support, CIM Bull. 82, 926, 53-62.
8. Stewart, S.B.V. and W.W. Forsyth, 1995, The Mathew's method for open stope design, CIM Bull. 88.992, 45-53.



윤용균

1985년 서울대학교 공과대학 자원공학과 (공학사)
1987년 서울대학교 대학원 자원공학과 (공학석사)
1992년 서울대학교 대학원 자원공학과 (공학박사)

Tel: 043-649-1318
E-mail: yoon63@semyung.ac.kr
현재 세명대학교 자원환경공학과 교수



이홍우

2005년 세명대학교 자원환경공학과(공학사)
2007년 세명대학교 대학원 환경안전시스템공학과(공학석사)

Tel: 011-9149-1069
E-mail: nawang0813@hanmail.net