

## 암반분류법과 수치해석을 이용한 석회석 광산 내 갱도의 설계

이홍우((주)태조엔지니어링)

윤용균(세명대학교)

### 1. 서론

석회석은 국내 비금속광물 생산량의 90% 정도를 점유하고 있으며, 부존량도 국내 최대인 광물 자원이다(산업자원부, 2006). 석회석 채광은 노천채광에 의한 대단위 채굴이 주를 이루고 있으나, 고품위 석회석 개발의 필요성, 관련법의 강화, 인근 주민의 반발 등에 의해 노천채광에서 갱내채광으로의 전환이 불가피한 실정이다.

시멘트용으로 사용되는 석회석을 갱내채굴로 생산하여 생산성을 높이기 위해서는 대형장비의 투입이 요구된다. 대형장비가 투입되는 경우 갱도를 대규모로 유지해야 되는 관계로 갱도의 안정성이 저하될 가능성이 있다. 또한 채광이 계속 진행될 경우 막장이 점차 심부화되고, 갱도 연장이 증가함에 따라 갱도의 안정성이 저하될 우려가 높아지게 된다. 따라서 경제성과 안정성을 유지할 수 있는 대규모 갱도의 체계적인 설계가 필요하다.

본 연구에서는 갱내 채굴로 석회석을 생산하고 있는 충북 제천시에 위치한 ○○석회석 광업소를 대상으로 RMR과 Q 암반분류법을 적용하여 기존 갱도의 안정성을 평가하였다. RMR과 Q 분류법의 적용 결과를 분석한 후 조사 대상 광산의 갱도를 설계하는데 적합한 것으로 평가된 Q 분류법을 이용하여 최대 무지보 폭을 계산할 수 있는 회귀식을 도출하였다. Q 분류법의 일종인 확장 안정성 도해법(extended Mathews' stability graph method)을 이용하여 갱도의 전체적인 안정성을 평가하였고, 갱도의 한계높이를 결정하기 위한 회귀식을 도출하였다. 또한 갱도의 폭과 높이를 결정할 수 있는 회귀식을 이용하여 석회석 광산 내 대규모 갱도를 설계하고, 설계된 갱도의 안정성을 검토하기 위하여 UDEC을 이용한 수치해석을 실시하였다.

### 2. 공학적 암반분류

광산 내 다양한 지점에서 공학적 암반분류를 실시하기 위하여 22곳의 조사지점을 선정하였다. 조사선조사법(scanline method)을 적용하여 조사한 결과 RQD는 35~85(%) 사이의 값을 가지며 평균 67% 인 것으로 조사되었다. 절리의 간격은 대체적으로 6~20 (cm) 였으며, 갱도벽면의 암반 표면은 습하거나 젖은 상태였고, 국부적으로 지하수가 천반에서 다량으로 떨어지는 곳도 분포하였다.

22 곳의 조사지점 갱도에 대한 갱도유지기간, 갱도 규격, 기본 RMR, 최종 RMR, Q 값,

RMR에 의한 자립시간, Q값에 따른 지보 범주가 표 1에 나타나 있다. 갱도의 유지 기간은 굴착한 시점부터 조사 시점까지의 경과기간을 말한다. RMR 분류 결과 기본 RMR은 대체적으로 64 이하로 나타났고, 최종 RMR은 40~45인 것으로 조사되었다. 최종 RMR에 따른 자립시간을 살펴보면 거의 모든 갱도가 ‘즉시붕괴’나 자립시간이 1주일 이내로 매우 짧은 것으로 나타났다.

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

표 1에서 보는 바와 같이 Q 분류법의 조사결과는 RMR의 자립시간 결과와는 상이한 결과를 보이고 있다. 조사지점의 갱도는 굴착 시부터 현재까지 소규모 블록의 낙반이나 미끄러짐을 제외하고는 대부분 안정한 상태를 유지되고 있는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구의 조사 대상 광산 갱도의 안정성을 평가하는 데는 RMR보다는 Q 분류법이 적절하다고 판단된다.

표 1. RMR 분류에 따른 자립시간과 Q 분류에 따른 지보범주

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

### 3. Q 값을 활용한 최대 무지보 갱도 폭 결정

광산의 갱도는 일반 토목공사의 터널과는 달리 경제성과 갱도 유지의 한시성 때문에 대부분 무지보로 유지되고 있다. 무지보로 유지하면서 갱내채굴로 채광하기 위해서는 원가를 절감하고 채광 생산성을 높이는 것이 필수적이라 할 수 있다. 석회석을 지하채굴로 생산하기 위해서는 안정성이 확보되면서도 대형장비를 원활히 운용할 수 있는 무지보 갱도를 설계하는 것이 매우 중요하다.

최대 무지보 갱도 폭을 결정하기 위한 식을 얻기 위하여 그림 1에서와 같이 조사지점 갱도에 대한 등가굴착크기(equivalent dimension, De)와 Q 값에 대한 회귀식을 구하면 다음과 같다.

$$De = 2.6 \times Q^{0.24} \quad (1)$$

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

$$W = ESR \times 2.6 \times Q^{0.24} \quad (2)$$

조사지점 갱도 중 현재까지 사용되는 갱도들은 대부분 안정한 상태로 유지되고 있기 때문에 (2)식을 최대 무지보 갱도 폭을 설계하는데 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

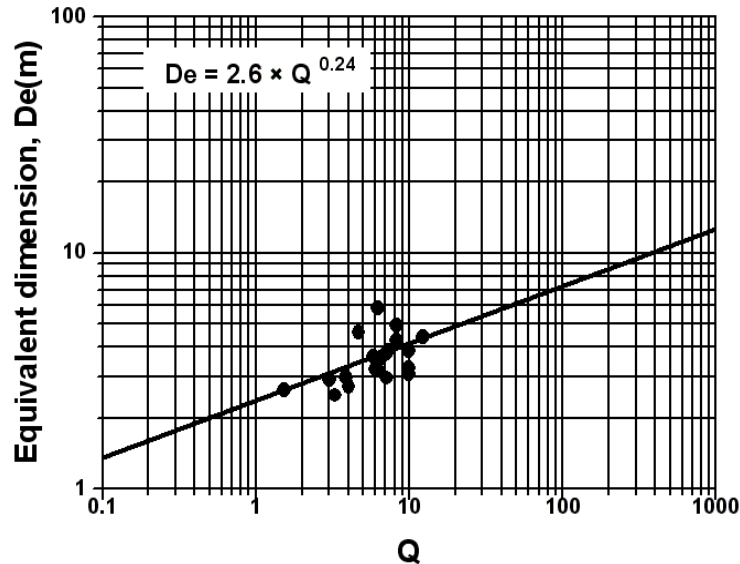


그림 1. Q 값과 등가굴착크기(De)에 대한 상관관계

#### 4. 확장 안정성 도해법에 의한 갱도의 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.

Mawdesley 등(2001)이 제안한 확장 안정성 도해법(extended Mathews' stability graph method)은 갱도의 안정성을 ‘안정영역(stable)’, ‘파괴영역(failure)’, ‘주요파괴영역(major failure)’의 3영역으로 구분한다.

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).

$$N = Q' \times A \times B \times C \quad (3)$$

여기서, Q' : 수정 Q값(SRF=1, J<sub>w</sub>=1로 가정)

A : 암반응력계수(rock stress factor)

B : 절리방향성 보정계수(joint orientation adjustment factor)

C : 표면방향계수(surface orientation factor)

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

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

여기서, W : 갱도의 폭, H : 갱도의 높이이다.

(3), (4)식을 이용하여 구한 안정수와 수리반경을 활용하여 본 연구에서 고려한 22곳의 조사지점에 대한 확장 안정성 도표를 작성하였다(그림 2 참조). 그림 2에서 보듯이 조사지점 갱도들은 1개 지점이 ‘안정영역’과 ‘파괴영역’의 경계에 있는 것을 제외하고는 모두 안정한 것으로 나타났다. 이러한 해석 결과는 측정 갱도 중의 일부가 부분적으로 불안정한 상태를 보이지만 전체적으로는 안정한 상태를 보여주는 관찰 결과와도 일치한다.

갱도를 설계하는 경우 안정한 한계높이를 구하기 위한 관계식을 얻기 위하여 Q'값과 수리반경과의 상관관계를 분석하였다(그림 3 참조). 회귀분석을 통해 얻어진 상관관계식은 다음과 같다.

$$HR = 2.01 (Q')^{0.03} \quad (5)$$

상기 회귀식을 결정하는데 있어 22곳의 조사지점 중에서 부분적인 낙반도 관찰되지 않은 대단히 안정한 15개 지점만을 선정하여 상관관계식을 결정하였다.

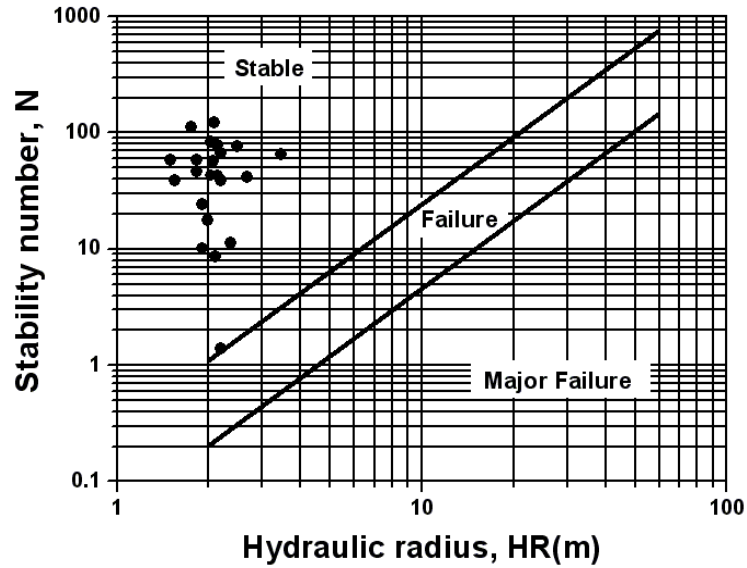


그림 2. 확장 안정성 도해법에 의한 조사지점 갱도의 안정성 해석

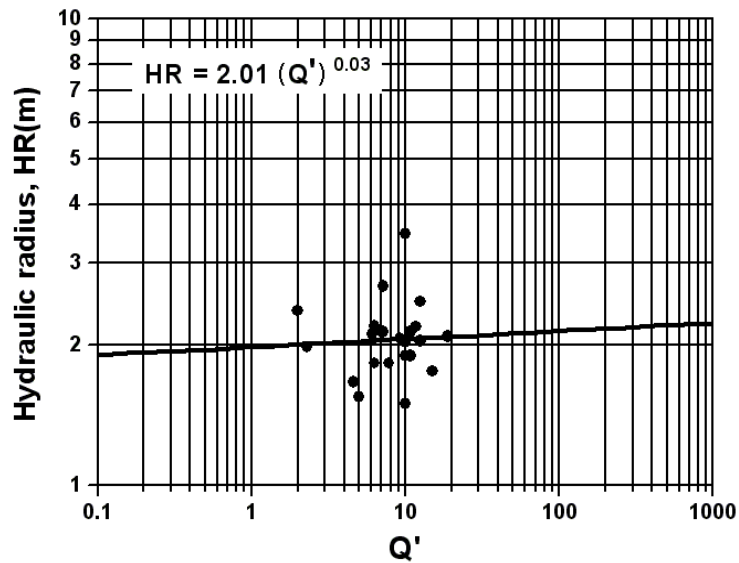


그림 3. Q'값과 수리반경

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

$$H = \frac{4.02 \times W \times (Q')^{0.03}}{W - 4.02(Q')^{0.03}} \quad (6)$$

## 5. 수치해석에 의한 갱도의 안정성 검토

(2), (6)식을 이용하여 결정한 대규모 갱도의 안정성을 평가하기 위하여 UDEC을 이용한 수치해석을 실시하였다.

수치해석에 사용된 입력자료가 표 2에 표시되어 있다. 변형계수는 Hoek & Diederichs(2006)의 경험식을 이용하여 결정하였고 인장강도와 점착력, 마찰각은 Hoek-Brown 파괴기준식(Hoek et al., 2002)을 사용하여 계산하였다.

표 3에는 조사지점에서 측정한 절리 자료에 대한 결과가 표시되어 있다. 절리군의 방향성은 DIPS 프로그램을 이용하여 결정하였다. 절리의 간격 및 연장성을 그대로 반영할 경우 모델이 복잡해지기 때문에 해석 모델의 간격 및 연장성을 조사 결과의 20배로 하여 해석에 적용하였다.

표 2. 암반 및 절리면의 물성

구 분		입력값
암반 물성	단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	26.7
	변형계수 (GPa)	9.98
	포아송비	0.15
	인장강도 (MPa)	2.32
	점착력 (MPa)	6.8
	내부마찰각 (°)	46
절리면 물성	절리면 압축강도 (MPa)	52
	절리면 점착력 (MPa)	0.05
	절리면마찰각 (°)	43.5
	절리면 수직강성 (GPa/m)	5.32
	절리면 전단강성 (GPa/m)	9.86

표 3. 절리군의 방향성, 간격, 연속성

절리군	경사방향	경사	간격(m)	연속성(m)
set 1	154	66	0.4	9
set 2	094	80	0.3	7
set 3	218	78	0.5	10

해석 경계면의 영향을 최소화하고 갱도의 크기를 고려하여 좌우측 해석영역을 240m로 하였고, 상부는 지표면까지 하부는 해석갱도의 바닥부에서 약 70m까지 모델링하였다. 좌우측 경계와 아래 경계는 롤러 조건을 부여하여 변위를 구속하였다. 측압계수는 본 광산에 대한 참고자료를 참고하여 0.5로 하였다. 해석 요소망이 그림 4에 나타나 있다. 요소망에서 4

개의 갱도는 기존에 개설된 갱도의 규격을 그대로 반영하였으며, 그림 4에서 밑에서 두 번째에 위치한 갱도는 (2),(6)식에 의해 결정된 대규모 갱도(이하 해석갱도라 칭함)를 모사한 것이다.

해석순서는 갱도가 굴착되기 이전의 원 지반상태에 대한 해석을 실시하여 모델을 평형상태에 이르게 한 후 갱도를 굴착하는 것으로 하였다.

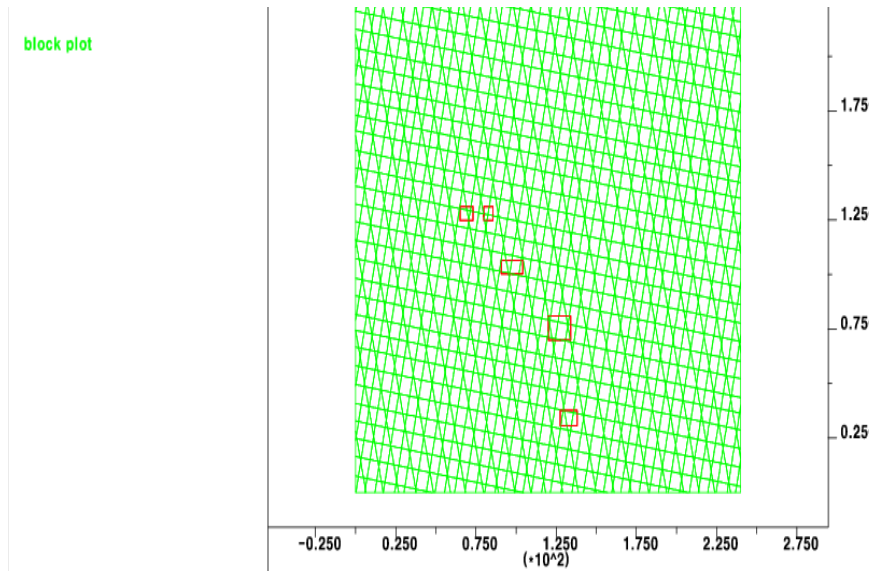


그림 4. 요소망

### 5.1 해석결과

갱도의 굴착으로 인해 갱도 주변부에서는 응력의 재 분포가 발생하며 이로 인해 갱도의 측벽과 천반부에 국부적으로 응력집중이 발생되어 갱도의 안정성에 영향을 미치게 된다. 그림 5는 갱도 주변부에서 발생한 최대주응력 분포의 양상을 보여준다. 최대 응력이 발생된 지점은 해석 갱도의 측벽에서 발생하였으며, 최대주응력은 10MPa 정도로 나타났다. 이 지점에서의 무결암의 일축압축강도가 92MPa 임을 감안하면 안정상 큰 문제는 없을 것으로 판단된다.

그림 6은 갱도의 굴착으로 인한 주변부의 변위양상 분포를 보여주는 그림이다. 최대 변위가 발생된 지점은 해석갱도의 바닥부에서 발생하였으며, 최대 변위는 5.7cm 정도로 나타났다. 그림 7은 해석갱도의 천반부 주요 지점에서의 변위를 관찰한 결과를 보여주는 그림으로서 발생한 변위는 모두 수렴되어 안정화됨을 알 수 있다. 그림 8은 갱도 주변부에 발생하는 소성영역과 전단변위 발생을 보여주고 있다. 인장과괴영역이 1중단과 해석갱도의 바닥부에서 발생되고 있으나 규모가 크지 않은 것으로 나타났다. 또한 최대 전단변위는 해석갱도의 바닥부에서 4.6cm 정도로 나타났다.

수치해석 결과 갱도의 굴착으로 인한 주변부에서의 변위는 대부분 수렴하는 것으로 나타났으며, 최대 주응력도 갱도를 유지하는 데는 큰 문제가 없는 것으로 나타났다. 따라서 (2)

식과 (6)식을 이용하여 설계된 대규모 갯도는 안정한 것으로 판단되며, 기존에 개설된 갯도에 미치는 영향도 작은 것으로 나타났다.

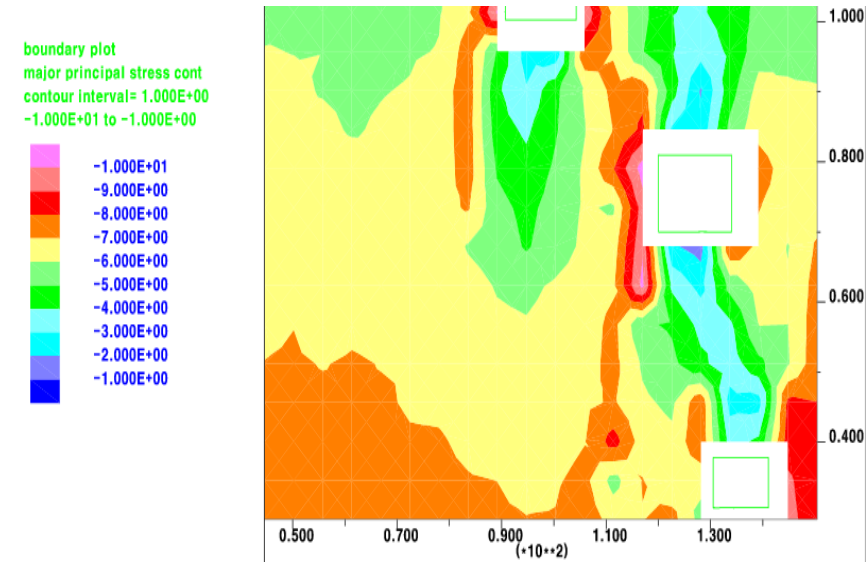


그림 5. 갯도 주변부의 최대 주응력 분포도

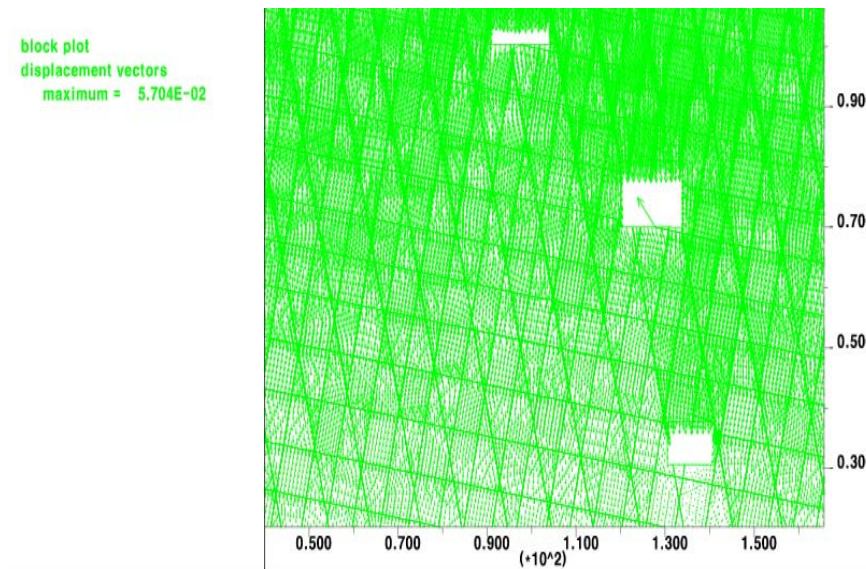


그림 6. 갯도 주변부의 변위 분포도



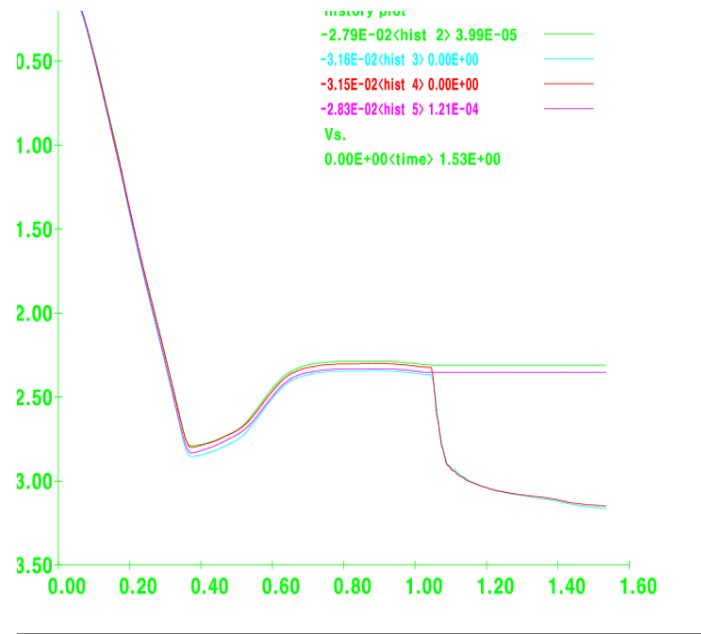


그림 7. 해석강도 천반의 변위량

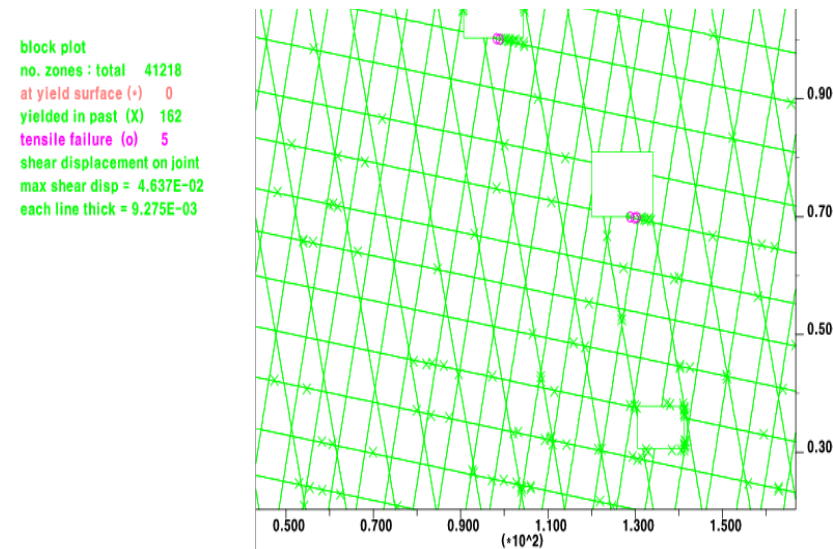


그림 8. 소성영역 및 전단변위 발생도

## 6. 결론

본 연구에서는 갱내 채광을 실시하고 있는 석회석 광산을 대상으로 암반분류와 확장 안정

성 도해법을 적용하여 갱도의 안정성을 평가하고 대규모 갱도를 설계할 수 있는 경험식을 제안하였다. 또한 수치해석을 이용하여 경험식에 의해 설계된 대규모 갱도의 안정성을 평가하였다. 본 연구로부터 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 1) 22곳의 조사지점을 선택하여 암반분류를 수행한 결과 RMR에 의한 갱도의 자립시간이 '즉시붕괴'나 매우 짧은 자립시간을 가지는 것으로 나타났으나, Q 분류법에 의하면 지보가 필요 없거나 국부적인 볼팅 만으로 안정성이 유지되는 것으로 나타났다. 조사지점의 갱도가 굴착 시부터 조사지점까지 안정성에 심각한 문제가 없었다는 점을 고려하면 RMR 보다는 Q 분류법을 사용하여 갱도 폭에 대한 안정성을 평가하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.
- 2) 확장 안정성 도해법을 적용하여 조사지점 갱도들에 대한 안정성 평가를 수행한 결과 안정영역과 파괴영역의 경계에 있는 1곳을 제외한 모든 갱도들이 안정한 것으로 나타났다.
- 3) Q 분류법과 확장 안정성 도해법의 분석 결과를 토대로 하여 안정한 대규모 갱도의 폭과 높이를 결정할 수 있는 경험식을 도출하였다.
- 4) 경험식에 의해 결정된 대규모 갱도의 안정성을 검토하기 위하여 수치해석을 실시한 결과 변위는 대부분 수렴되는 것으로 나타났으며, 응력의 집중은 갱도의 측벽에서 발생하였으나 그 정도는 크지 않은 것으로 나타났다.

#### 참고문헌

1. 산업자원부, 2006, 2005년도 광산물 수급현황, 산업자원부, 331p.
2. Hoek, E., P.K. Kaiser and W.F. Bawden., 1995, Support of underground excavations in hard rock, Balkema, 215p.
3. Hoek, E., C. Carranza-Torres and B. Corkum, 2002, Hoek-Brown failure criterion-2002 edition, Proc. the fifth North American Rock Mech. Sympo., Toronto, 267-273.
4. Hoek, E. and M.S. Diederichs, 2006, Empirical estimation of rock mass modulus, Int. J. Rock Mech. Min. Sci.43, 203-215
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.