

## Stability graph method에 의한 석회석 지하채굴 공동의 안정성 평가

선우춘<sup>1)\*</sup>, 정용복<sup>2)</sup>

### Stability Assessment of Underground Limestone Mine Openings by Stability Graph Method

Choon Sunwoo and Yong-Bok Jung

**Abstract** The stability of underground openings is a major concern for the safety and productivity of mining operations. Rock mass classification methods provide the basis of many empirical design methods as well as a basis for numerical analysis. Of the many factors which influence the stability of openings, the span of the opening for a given rock mass condition provides an important parameter of design. In this paper, the critical span curves proposed by Lang, the Mathews stability graph method and the modified critical span curve suggested by the authors have been assessed. The modified critical span curve was proposed by using Mathews stability graph method. The modified critical span curve by the author have been used to assess the stability of underground openings in several limestone mines.

**KeyWords** Rock mass classification, Stability of underground opening, Critical span curve, Mathews stability graph

**초 록** 지하공동의 안정성은 생산성과 안전을 확보해야 하는 광산의 운영에 있어서 가장 중요한 관심사이다. 암반분류는 많은 경험적인 설계방법의 근간을 이룰 뿐만 아니라 수치해석을 위한 기초자료로 이용되고 있다. 공동의 안정성에 영향을 주는 많은 요소들 중 주어진 암반의 조건 중에서 공동폭은 하나의 중요한 설계요소가 된다. 이 논문에서는 Lang에 의해 제안된 한계 공동폭 기준, Mathews stability graph method 그리고 저자들에 의해 제안된 한계 공동폭 기준을 비교하였다. Mathews stability graph method를 이용하여 저자들에 의해 수정된 한계 공동폭 기준을 제안하였고 이것을 여러 석회석 광산 지하공동의 안정성을 평가하는 데 사용하였다.

**핵심어** 암반분류, 지하공동의 안정성, 한계 공동폭 곡선, Mathews stability graph

#### 1. 서 론

석회석은 한국에서 가장 큰 비중을 차지하는 비금속 광상이며, 생산은 노천 또는 지하채광으로 이루어지고 있지만 환경문제로 점차 지하채광이 증가하고 있는 추세이다. 국내 석회석 개발이 노천채광에서 지하채굴로 전환되면서 지하갱도 및 채광장의 안정성문제가 대두되고 있어, 지하채굴 석회석 광산에서 갱도의 안정성 판단과 갱도크기의 적정성을 검토하기 위한 목적으로 암반분류법의 적용에 대한 연구가 이루어졌다.

지하공동의 불안정한 조건은 일반적으로 천반이나 상반으로부터의 낙석이 일어나면서부터 나타나기 시작한다. 이와 같은 낙석의 크기와 양은 공동주위의 응력

조건, 암반의 강도 및 불연속면을 포함하는 암반의 상태 그리고 공동의 규모에 따라 다양하게 나타날 수 있다. 국내 금속 및 비금속 광산에서 체계적인 설계과정이나 설계방법을 적용하는 경우가 드물다. 그 첫 번째 이유는 대부분의 채광이 광물의 품위에 따라 이루어지기 때문이며, 둘째는 공학적인 재료로서의 암반의 복합적인 성격으로 인해 암반거동에 대한 예측이 어렵기 때문이다. 이에 따라 과학적이고 계획적이지 못한 광산 운영은 일반적으로 국부적인 낙석으로부터 시작하여 큰 재해로 연결되는 경우가 종종 있다. 이와 같이 안전한 지하공동의 규격 결정을 위한 설계는 근본적으로 광산운영에서의 생산성과 안전을 위해 필수적인 것이다.

현재 광산조건에 적합한 지반제어대책을 결정할 수 있는 일반적인 방법이 없기 때문에 광산의 특수한 상황에 따라 경험적으로 방법이 결정되고 있다. 지하채광 설계에서 만나게 되는 여러 형태의 불확실성에 대한 해결책으로 여전히 암반분류법이 많이 사용되고 있다.

<sup>1)</sup> 한국지질자원연구원 지반안전연구부 책임연구원

<sup>2)</sup> 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원

\* 교신저자 : 9yjkim9@hanmail.net

접수일 : 2005년 8월 9일

심사 완료일 : 2005년 8월 23일

일반적으로 지하채굴 공동 설계에 있어서 안정성을 평가할 수 있는 방법은 경험적인 방법, 관찰적인 방법 그리고 해석적인 방법으로 대별할 수 있다. 암반분류방법은 경험적인 광산 설계에 있어서 필수적인 부분을 구성한다. 최근 여러해 동안 암반분류방법은 관찰적인 방법 그리고 해석적인 방법과 함께 많이 사용되고 있다. 모든 암반분류법의 주요 목적은 과거의 경험을 기초로 하여 암반 고유의 성질을 정량화하는 것이고 그 다음으로 암반에 작용하는 외부 응력조건이 어떻게 암반의 안정성에 영향을 주는 지를 조사하는 것이다. 이러한 과정을 이해함으로써 다른 조건들에 놓여있는 암반의 거동을 성공적으로 예측할 수 있다.

RMR과 Q 시스템은 시간이 지나면서 공동의 안정성에 미치는 암반의 여러 요소들의 영향들을 반영하여 왔으며 이러한 암반분류 시스템들을 광산조건에 맞게 적용성을 향상시키기 위해 많은 수정들이 있었다. 본 연구에서는 국내의 석회석 광산에 부합되는 암반분류법의 적합성에 대한 평가를 시도하였다. 6개의 지하채굴 석회석광산 140 여개의 축점에서 측정이 이루어 졌고, RMR과 Q 시스템의 상관관계에 대한 분석도 실시하였다. 이 연구의 주된 목적은 국내의 석회석 광산에서의 최대 무지보 갱구폭을 결정하는 것으로서 Mathews에 의해 제안된 stability graph를 이용하여 최대 무지보 갱구폭을 결정하는 실험식을 유도하였다.

## 2. 광산관련 암반분류법과 Stability graph method

광산과 관련된 최초의 암반분류법은 1977년 Laubscher

가 RMR법에 발파와 채광에 따른 절리의 방향, 풍화정도, 유도응력 그리고 응력의 변화 등을 고려한 암반분류법인 MRMR(Mining Rock Mass Rating)이며, 후에 Laubscher(1984)는 이 MRMR를 이용하여 실험실에서 구한 일축압축강도와 관련하여 설계 암반강도 개념을 도입하였다.

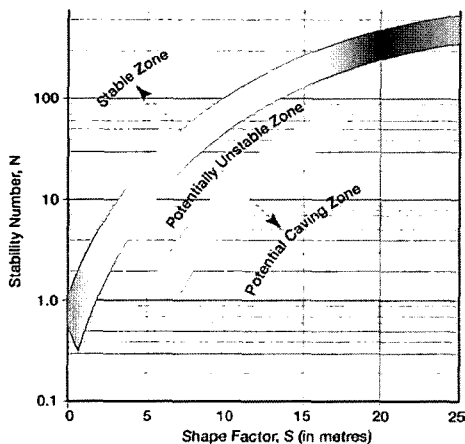
1981년에 채광 공동설계를 위한 stability graph 법을 Mathews 외(1981)가 처음으로 제안하였지만, 초기의 stability graph법은 북미지역 광산의 깊은 심도의 경암 암반의 급경사 채광공동들을 대상으로 한 것으로 자료들이 제한적이었기 때문에 이후 많은 학자들에 의해 자료가 확대되면서 수정 보완 되어졌다(Potvin 외, 1988; Nickson, 1992, Stewart & Forsyth, 1995).

이 방법은 안전한 채광공동의 규격을 결정하기 위하여 Barton의 Q를 보정하여 사용하였다. Q의 첫 4개의 요소는 그대로 사용하고 지하수저감요소(Jw)와 응력저감계수(SRF)를 1로 정의하여 구한 값인 Q'를 사용하였다. 이 stability graph는 안정성 계수(stability number)와 수리반경(hydraulic radius) 또는 형상계수(shape factor)로 도식화 되며 Fig. 1.a와 같이 안정지역, 잠재적 불안정지역, 잠재적 붕락지역으로 구분하였다.

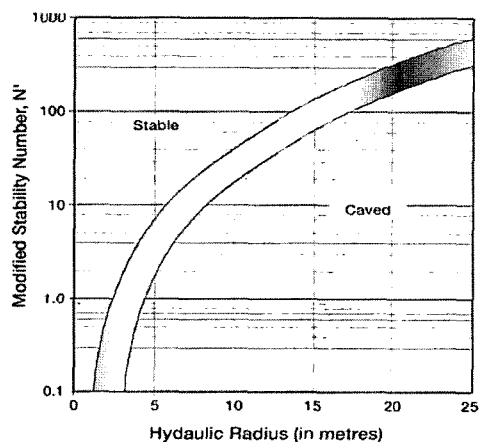
Mathews 외(1981)에 의해 제안된 안정성 계수(stability number) N은 다음과 같이 제안되었다.

$$N = Q' \times A \times B \times C \quad (1)$$

여기서, Q'는 Barton 외(1974)에 의해 제안된 Q값 중에서 응력저감계수(SRF)와 지하수저감계수(Jw)가



(a) original Mathews stability graph(After Stewart & Forsyth, 1995)



(b) Potvin's modified Mathews stability graph

Fig. 1. The Mathews stability graphs

1로 간주된 값이다. 즉 Q'는 다음 (2)식과 같다

$$Q' = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \quad (2)$$

여기서, RQD는 암질지수, Jn은 절리군의 수, Jr은 절리의 거칠기계수, Ja는 절리의 풍화·변질계수를 나타낸다.

요소 A(응력계수): 이 값은 암반의 안정성을 감소시키는 높은 응력의 영향을 고려하는 것이다. A 값은 신선암의 일축압축강도 값을 공동 표면에 평행하게 유도되는 최대응력치로 나눈 값으로 정의된다. A 값은 신선암의 일축압축강도가 유도응력의 10배 이상이거나 높은 응력의 문제가 없는 경우에는 1의 값이 적용된다. 하지만 신선암의 일축압축강도가 유도응력의 2배 이하이거나 높은 응력이 공동의 안정성을 상당히 감소시킬 수 있는 경우에는 0.1의 값이 적용된다(Fig. 2.a).

요소 B(절리방향보정계수): 이 값은 분석의 대상이 되는 공동의 표면과 불연속면의 방향성이 미치는 영향에 관한 것으로 표면에 90°인 불연속면은 안정성에 문제가 되지 않기 때문에 1의 값이 주어진다. 표면에 대해 20° 이내의 경사를 가지는 불연속면은 공동내에서 전도

될 수 있기 때문에 안정성을 감소시키는 높은 응력의 영향을 고려하는 것이다(Fig. 2.b).

요소 C(지표면 방향계수): 이 값은 분석이 이루어질 표면의 방향과 관련된다. 수직벽의 설계를 위해서는 8의 값이 주어지고, 수평의 천정에 대해서는 1의 값이 주어진다(Fig. 2.c). 이 계수는 근본적으로 수평의 천정에 비해 수직벽의 성질이 더 안정하다는 것을 반영하는 것이다. 계수 C는 N의 값이 수평의 천정의 값과 비교해서 수직벽의 N 값이 8배까지 증가될 수 있다는 것을 제안하는 것이다.

수리반경(hydraulic radius)은 안정성 평가를 위해 객관적이며 보다 더 정확성을 높이기 위해 공동의 모양과 크기의 영향을 도입한 것이다. 수리 반경(hydraulic radius, HR) 혹은 형상 계수(shape factor, S)는 공동의 둘레에 대한 공동의 단면적의 비로 정의되며 다음식과 같이 표시된다.

$$HR \text{ or } S = \frac{W \times H}{2(W+H)} \quad (3)$$

여기서, W : 공동의 폭

H : 공동의 높이를 나타낸다.

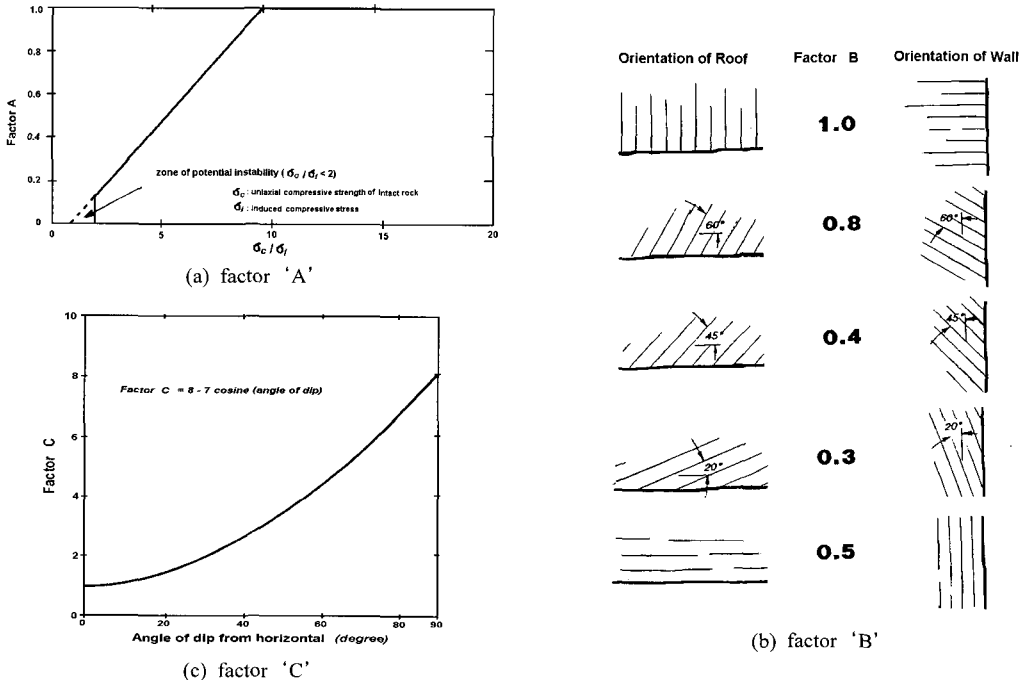


Fig. 2. Adjustment factors for determination of Mathews stability number(After Mathews et al, 1980)

대부분 Bieniawski(1989)에 의해 제안된 식 (4)를 이용해 RMR 값으로부터 Q값을 구하였지만, 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 국내 여러 석회석광산에서 구한 RMR과 Q의 상관관계에서 구한 경험식 (5)를 이용하였다. 여기서 기본 RMR을 사용한 것은 석회석 채광에서 대부분 주방식채광을 선택함으로써 각 갱도들은 서로 직교하여 방향성의 중요성이 감소하기 때문에 방향성이 보정된 값이 아니라 기본 RMR 값을 사용하였다.

$$RMR = 9 \cdot \ln Q + 44 \quad (4)$$

$$BasicRMR = 6.3 \ln Q + 45.2 \quad (5)$$

Potvin 외(1988)는 Mathews stability graph법의 평점 보정요소들을 재 정의하여 수정 stability graph method를 제안하였으며, Fig. 1.b와 같이 수리반경과 조정안정계수로 도식화 하였으며 좁은 폭의 전이지역으로 구분되는 안정지역과 붕락지역으로 구분하였다.

다른 광산과 관련된 암반분류법으로는 미국의 중단 붕락식 광산에서 연층갱도의 지보를 위해 개발된 Kendorski 외(1983)와 석탄광산의 갱도지보를 위한 Unal(1983)에 의해 제안된 암반분류법 등이 있다.

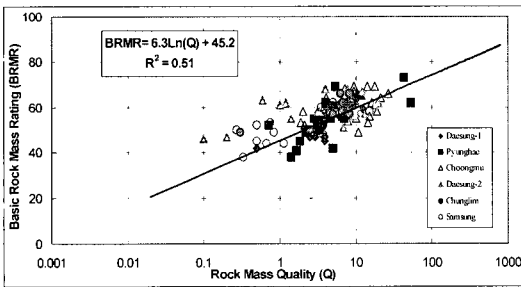


Fig. 3. Correlation between rock quality index Q and Basic Rock Mass Rating

### 3. 최대 무지보 공동폭 곡선

Fig. 4와 같이 Lang 외(1991)는 cut and fill 채광법의 갱도를 위해 RMR과 한계공동폭으로 도식화하여 한계 공동폭의 설계방법(critical span design method)을 개발하였다. 한계 공동폭은 노출된 공동내에서 그럴 수 있는 최대원의 직경을 나타낸다. 여기서 공동의 한계 너비는 바로 노출된 공간에서 공동이 안정조건에 도달하기 위한 주변 암반과 관계된다. 이와 같이 한계공동폭의 설계방법은 국내의 석회석 공동의 설계에 있어 무지보 최대 공동폭을 결정할 수 있는 간단한 보조수단으로 사용될 수 있다. 절리방향요소는 사용하지 않았고, 절리의 경사가 30이하이면 RMR값에서 10점을 감했고, 높은 응력이나 rock burst의 경향이 있는 암반조건에서는 20점을 감점시켰다. Pakalnis(1993)는 공동의 안정성과 관련하여 다음 Table 1과 같이 3개의 범주로 분류하여 정의하였다.

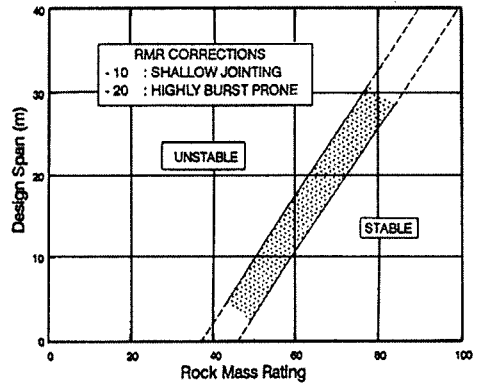


Fig. 4. Design span versus RMR(Lang et al., 1991)

Table 1. The stability of an excavation classified into three categories

Stable Excavations	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. No uncontrolled falls of ground</li> <li>b. No noticeable movement in the back</li> <li>c. No extraordinary support measure requirement</li> </ul>
Potentially Unstable Excavations	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Requirement of extra ground support to prevent potential falls of ground</li> <li>b. Movement in the back of 1mm or more within 24 hours.</li> <li>c. Increase in the frequency of popping and cracking indicating ground movement</li> </ul>
Unstable Excavations	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Area has collapsed</li> <li>b. Support was not effective in maintaining stability</li> </ul>

### 4. 국내석회석 광산의 적용

앞에서 설명된 Mathews stability graph와 한계 공동 폭 설계법을 이용하여 본 연구지역 광산의 자료를 분석하였다(Table 2 참조). Fig. 5는 조사한 석회석광산에서의 무지보 공동폭과 RMR의 관계를 나타내는 것으로 대부분의 석회석 광산의 갱도내 암반의 RMR값은 40에서 70사이의 값을 가진다. 이 그래프상에서 안정범주를 나타내는 직선은 Lang 외(1991)의 기준을 따른 것으로 이 기준에 의하면 대부분의 광산 갱도가 불안정하거나 잠재적 불안정에 속하는 것을 볼 수 있다. Fig. 5에서와 같이 조사광산에서 적당한 지보 대책을 세우면 45% 정도의 갱도가 안정한 상태가 되지만, 여전히 55%는 불안정한 상태로 남아있게 된다. 실제적으로 이 조사광산의 갱도들은 상당부분이 안정한 상태를 보이고 있기 때문에 이 기준이 우리 경우에 적합하지 않으며 안정 기준에 대한 수정과 함께 새로운 기준 범위를 책정하고자 한다.

국내 석회석 자료의 stability graph법 적용은 앞에서 언급된 Mathews stability graph법(Fig. 1.a)이나 수정 Mathews stability graph법(Fig. 1.b)보다 새로 개선된 확장 Mathews stability graph법(Mawdesley 외, 2001)

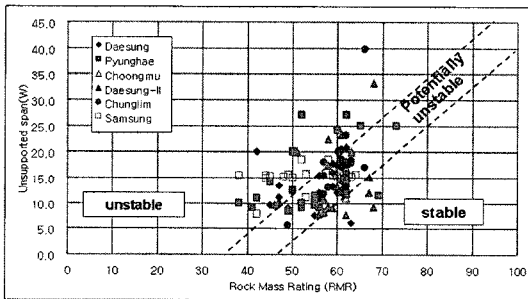


Fig. 5. Critical span curve (after Lang et al.; 1991) for the limestone mines considered in the present study of the present investigation

을 적용하여 검토하였다. 확장 Mathews stability graph 법은 이전의 stability graph법에서 양축을 log-log scale로 작도하여 자료의 적용범위를 확대시켰으며 공동의 안정성의 범주는 안정, 파괴, 대규모 파괴로 나누었다(Fig. 6).

Fig. 6과 같이 확장 Mathews stability graph법에 따르면 삼성, 대성, 대성 II의 일부 갱도만이 파괴에 위치하게 되는 것을 볼 수 있으며, 이러한 갱도들은 지보대책을 수립한다면 안정성이 개선될 수 있는 갱도들이다. 이 결과는 앞에서 설명한 Lang 외(1991)의 기준에 의한 평가결과(Fig. 5)와는 전혀 다르게 나타나고 있다.

본 연구에서 석회석 광산을 대상으로 최대 무지보 갱도폭의 결정을 위해 현장에서 조사된 무지보 채광장 및 갱도의 폭과 RMR의 관계에 대해 Fig. 7과 같이 도식화하였고, 현장시험에서 얻어진 자료들을 회귀분석을 통하여 무지보로 갱도를 유지할 수 있는 갱도폭을 구하기 위한 식 (6)과 같은 경험식을 구하였다. 여기서 RMR 값은 방향보정을 하지 않은 기본 RMR을 사용하였다.

$$W = 0.3 \text{ (Basic RMR)} \tag{6}$$

여기서 W는 시험조사 석회석광산의 지하채굴작업장

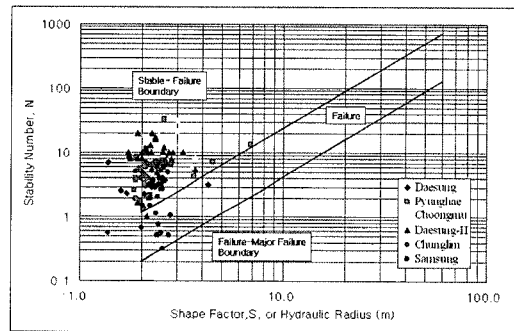


Fig. 6. Extended Mathews stability graph based on logistic regression

Table 2. The location and situation of surveyed mines

Mine	Location	Rock	depth (m)	miming method
Daesung	Jeicheon	limestone	220 ~ 300	room and pillar
Pyunghae	Uljin	limestone	80 ~ 210	room and pillar
Choongmu	Jungseon	limestone	30 ~ 170	room and pillar
Daesung II	Samcheog	limestone	30 ~ 150	room and pillar
Chunglim	Youngwoel	limestone	20 ~ 310	room and pillar
Samsung	Youngwoel	limestone	80 ~ 200	room and pillar

에서의 암반조건에 맞는 무지보로 유지할 수 있는 갱도 폭을 나타낸다.

이 자료들은 일부를 제외하고는 현장에서 대부분 안정적으로 유지되고 있는 공동들에 대한 자료들이다. 통계학적으로 안정지역으로 정의된다 할지라도 경우에 따라서는 불안정한 상태에 놓이게 될 수도 있다. 이와 같은 안정과 불안정의 애매한 지역을 포함시키기 위해 평균값에서 85%의 확률 범위내 점들을 안정성으로 포함시켰다. 이 기준선은 Fig. 7의 도표상에 점선으로 표시하였으며 안정의 한계를 나타내는 한계선으로 정의하고자 한다. 이 한계선 상부의 점들에 위치하는 지하공동은 대부분 불안정한 공동임을 의미하며, 점선과 실선사이의 점들은 비록 불안정한 공동일지라도 적당한 지보대책을 수립하면 안정화 될 수 있는 공동들로 간주할 수 있다.

공동의 모양과 크기는 공동의 안정성에 영향을 주는 중요한 요소 중의 하나이다. 주어진 암반 조건 중에서 채광공동의 안정에 대한 구조적인 해석을 위한 여러 방법들의 적용은 주로 공동의 기하학적 성질에 의존한다. 이와 같이 주어진 암반의 조건에서 공동의 안정성은 그것의 규격 즉 채광장의 길이, 폭과 너비에 의해 정의되

며, 그리고 광체를 채광하기 위한 채굴공동은 광체의 모양과 채택된 채광법에 따라 결정지어진다. 대부분의 분류시스템은 공동의 폭 한 요소만을 고려하여 안정성을 정의하고 있다. 이것의 이유는 대부분의 자료가 터널과 같이 길이가 길고 공동의 폭이 제한적인 것으로 유도되었기 때문이며, 반면에 광산에서는 긴 규모의 공동은 광추를 도입함으로써 안정성을 증가시킨다. 채광장의 안정한 무지보 폭을 결정하기 위해서 공동의 한계 높이를 추정해야 하는 것도 필수적이다.

공동의 안정한 폭에 대한 공동의 한계 높이를 구하기 위해 Fig. 8과 같이 RMR과 지하공동의 수리반경과의 연관관계를 조사하였다. 현 조사 석회석광산에서의 RMR값은 40과 70사이에 주로 분포하며, 이 그래프로부터 공동의 형상계수는 RMR값과 비례하는 것을 볼 수 있으며 회귀분석으로부터 다음과 같은 식 (7)을 유도하였다.

$$S = 0.02(RMR) + 1.5 \tag{7}$$

여기서, S 는 형상 계수 또는 수리반경을 나타낸다 Fig. 8의 점선내에 위치하는 공동들은 대부분 중단 붕

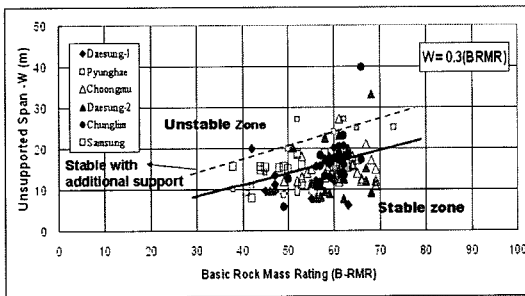


Fig. 7. Modified critical span curve for the limestone mines considered in the present study

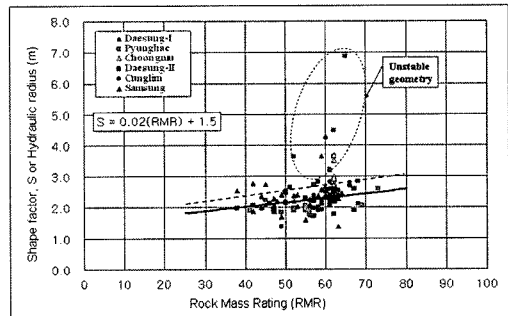


Fig. 8. Correlation between Rock Mass Rating(RMR) and Shape Factor(S)

Table 3. The measured and computed dimensions of locations in Samsung limestone mine.

Site	Measured Width (m)	Measured Height (m)	RMR	Stability Factor (S)	Computed Width (m)	Computed Height(m)
1	15.5	7.6	53	2.56	15.9	7.55
2	15.3	8.5	49	2.45	14.7	7.49
3	15.6	7.0	45	2.40	13.5	7.45
4	15.0	7.5	50	2.50	15.0	7.50
5	15.7	7.0	53	2.56	15.9	7.55
6	15.0	5.5	44	2.38	13.2	7.44

락들에 의해 형성된 대규모의 공동들이 대부분이다. RMR 값이 40 이하인 경우는 형상계수는 2.5 이하이며, 동시에 RMR 값이 70에서는 형상계수는 3 이하의 값을 갖는다. 측정된 RMR 값에 대해 식 (3)과 식 (6)을 사용하여 조사 석회석 광산의 채광장 공동 또는 갱도의 한계 높이를 구하는 것이 가능하다.

Table 3은 삼성석회석에서 측정된 실제 갱도의 크기와 각 갱도에서 측정된 암반의 RMR 값에 따라 계산된 갱도의 크기를 나타내는 일부의 자료이다. 대부분의 측정점에서 높이는 2번 측정 외에서는 대부분 안정 높이 범위내에 포함되지만 갱도폭의 경우는 안정범위를 약간씩 벗어나는 경우가 여러 곳이 있음을 볼 수 있다. Fig. 9.는 조사 광산들의 측정된 실제 갱도의 크기와 각 갱도에서 측정된 암반의 RMR 값에 따라 계산된 갱도의 크기를 나타내는 것이다. 실선의 아래에 속하는 점들의 갱도의 규격은 계산된 갱도보다는 규격이 큰 갱도들로 안정성에 문제가 될 수 있는 갱도들이다. 갱도폭에 있

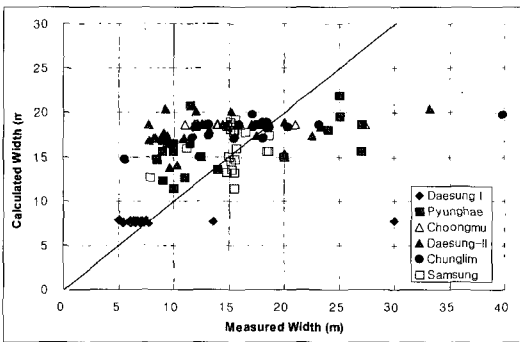
어서는 계산된 갱도 폭보다 상당히 큰 갱도들을 관찰할 수 있는데 이런 갱도의 대부분은 광체의 품위확보를 위해 갱도의 안정성보다는 생산에 중점을 둔 갱도들로 기존의 광주들을 채굴함으로써 갱도가 확장된 것들이 대부분이다. 반면에 갱도의 높이는 계산치보다 적은 경우가 많은 부분을 차지하고 있어 높이에서는 안정성의 문제가 적지만 Fig. 9 b)의 타원내 점들처럼 계산치보다 큰 경우는 대부분 중단 봉락들에 의해 형성된 높이가 높아진 채굴적 공동들이 대부분이다.

### 5. 국내 석회석광 적용기준의 수정

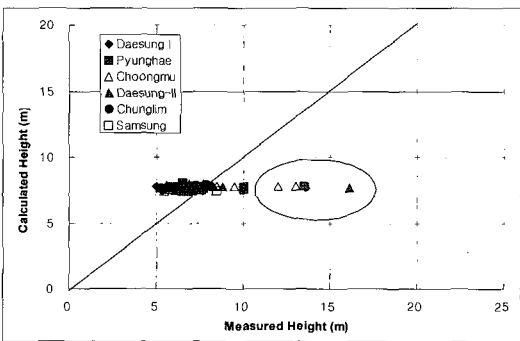
Lang의 기준에 의한 안정성 평가(Fig. 5)는 확장 Mathews stability graph법에 의한 안정성 평가(Fig. 6)와는 서로 상반된 결과를 보이고 있다. 이러한 차이는 Lang의 기준을 설정한 자료들은 국내 석회석 광산의 자료와 광산의 채광심도가 다르고 대상암반의 암종 등의 차이와 안정에 대한 주관적인 판단의 차이로 볼 수 있을 것이다.

반면에 현장시험에서 얻어진 자료들의 회귀분석을 통하여 안정조건을 만족시키는 갱도폭을 구하는 경험식식 (6)에 의한 평가와 Mathews의 확장 stability graph 법에 의한 안정성 평가는 비슷한 경향을 나타내고 있음을 볼 수 있다.

지하채굴공동이 대형화되고 있는 국내 광산들 대부분은 석회석을 채광하는 광산들이며, 석회석 광산의 대형 갱도들에 대한 안정성 판단기준이 전무한 상황에서 최소한의 안전 판단기준을 제시하는 것이 본 연구의 목적이다. 따라서 국내 석회석 광산의 조건에 맞도록 확장 Mathews stability graph법(Fig. 6)과 최대 무지보 갱도폭의 경험식(Fig. 7)의 결과를 이용하여 Lang의 기준에 의한 안정성 평가(Fig. 5)를 수정하여 Fig. 10과 같이



(a) width



(b) height

Fig. 9. Comparison between the calculated and measured width(a) and height(b) of opening

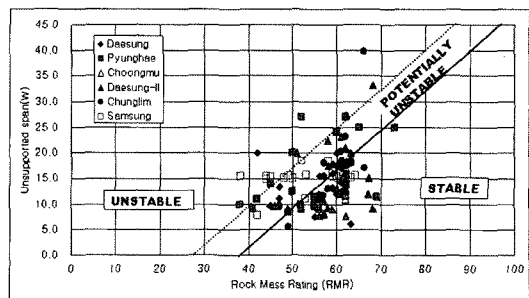


Fig. 10. Modified critical span curve including the data sets of the mine sites of the present investigation

새로운 한계 공동폭의 곡선을 제시하고자 한다. 점선과 실선사이의 구역은 잠재적으로 불안정한 구역으로 설정하였으며 여기서는 적절한 지보대책이 이루어진다면 채광장 공동을 안정화시킬 수 있는 구역으로 설정하였다. 이와 같은 기준을 이용한다면 한국의 다른 석회석 광산의 비슷한 암반조건에서도 경도 구역을 결정하는데 있어서 쉽고 간단하게 적용할 수 있을 것이다.

## 6. 결 론

RMR과 안전한 무지보 공동폭 그리고 안정성 계수들은 조사 석회석광산에서 좋은 상관관계를 보였다. 채굴된 공동이 안정할 때 통계치리에 의해 구해진 경험식을 이용하여 계산된 한계 공동폭 뿐만 아니라 공동의 한계 높이는 시험현장에서 조사된 결과와 상당히 부합되고 있음을 볼 수 있었다.

Lang의 기준에 의한 안정성 평가에 의해 제안된 한계 공동폭 기준은 본 연구조사지역의 석회석 공동에서 공동의 안정성 평가에 적용하기가 곤란하였지만, 현장시험에서 얻어진 자료들의 회귀분석을 통하여 안정조건을 만족시키는 경도폭을 구하는 경험식에 의한 평가와 확장 Mathews stability graph법에 의한 안정성 평가는 비슷한 경향을 나타내고 있음을 볼 수 있다.

지하채굴공동이 대형화되고 있는 국내 광산들 대부분은 석회석을 채광하는 광산들이며, 석회석 광산의 대형 경도들에 대한 안정성판단 기준이 전무한 상황에서 최소한의 안전 판단기준을 제시하기 위해 국내 석회석 광산의 조건에 맞도록 확장 Mathews stability graph법과 최대 무지보 경도폭의 경험식의 결과를 이용하여 Lang의 기준에 의한 안정성 평가를 수정하여 새로운 한계곡선을 제시하였다.

안정성 평가는 조사된 자료들의 질과 양에 의해 좌우된다. 앞으로 이러한 기준의 신뢰도를 높이기 위해 보다 많은 자료의 수집과 현장조사, 수치해석 등을 통하여 기준에 대한 수정 보완 작업이 필요할 것이다. 또한 RMR 및 Q의 평가가 여전히 주관적인 방법으로 평가되기 때문에 조사 지역의 상대적인 중요성과 자료의 성질을 파악하여 안전성 평가의 최종 결론에서 확신을 증진시키도록 주의해야 한다. 현재로서는 안정성 평가에 있어서 경험적인 방법들이 precursor로서 잘 활용될 수 있을 것이다.

## 참고문헌

1. Barton, N., R. Lien, and J. Lunde, 1974, Engineering classification of rock masses for design of tunnel support, *Rock Mech.*, vol. 6, pp. 183-236.
2. Bieniawski, Z.T., 1989, *Engineering Rock mass classifications*, Published by John Wiley & Sons, 251p.
3. Kendorski, F., R. Cummings, Z.T. Bieniawski, & E. Skinner, 1983, Rock mass classification for block caving mine drift support, *Proc. 5th Int. Cong. Rock Mech.*, ISRM, Melbourne, pp. B51~B63.
4. Lang, B., R. Pakalnis, S. Vongpaisal, 1991, Span Design in wide cut and fill stope at Detour Lake Mine, *93rd Annual General Meeting, Canadian Institute of Mining*, Vancouver, Paper No. 142.
5. Laubscher, D.H., 1977, Geomechanics classification of jointed rock masses-
6. Mining applications, *Trans. Inst. Min. Metall.*, vol. 86, pp. A1-A7.
7. Laubscher, D.H., 1984, Design aspects and effectiveness of support system in different mining conditions, *Trans. Inst. Min. Metall.*, vol. 93, pp. A70-A81.
8. Mathews, K.E. et al., 1981, Prediction of stable excavation spans for mining at depths below 1000m in hard rock, (CAMMET) Report DSS Serial No. OSQ80-00081.
9. Mawdesley, C., R. Trueman, and W.J. Whiten, 2001, Extending the Mathews stability graph for open stope design, *Transactions of Institution of Mining and Metallurgy*(Sect. A : Min.technology), v. 110. No.1, pp. A27-39.
10. Nickson, S.D., 1992, Cable support guidelines for underground hard rock mine operations, M.App.Sc thesis, University of British Columbia.
11. Pakalnis, R. and S.S. Vongpaisal, 1993, 'Mine design on empirical approach' innovative mine design for the 21st century, Bawden & Archbald eds., Balkema, pp. 455-461.
12. Pakalnis, R. and S.S. Vongpaisal, 1998, *Empirical Design Methods-UBC Geomechanics*, 100th CIM AGM, Montreal.
13. Potvin, Y., M. Hudyma, H.D.S. Miller, 1988, The stability graph method for open stope design, 90th CIM AGM, Edmonton, May.
14. Potvin, Y., M. Hudyma, H.D.S. Miller, 1988, Design guidelines for open stope support, *CIM Bulletin*, vol. 82, No. 926, June, pp. 53-62.
15. Steward, S.B.V. and W.W. Forsyth, 1995, The Mathews method for open stope design, *CIM Bulletin*, vol. 88, No. 992, p. 45-53.
16. Unal, E., 1983, Design guidelines and roof control standards for coal mine roofs, Ph.D thesis, Pennsylvania State University, University Park, 355p.



**정용복**



1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
1996년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학석사  
2000년 서울대학교 대학원  
지구환경시스템 공학부 공학박사

Tel: 042-868-3097

E-mail: ybjung@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부  
선임연구원

**선우춘**



1978년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
1984년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학석사

1985년 Paris VI 대학(France) DEA  
1988년 Paris VI 대학 지구구조학과  
(France) 공학박사

Tel: 042-868-3235

E-mail: sunwoo@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부  
자원개발안전연구실장, 책임연구원