

CASE STUDY

## Q-slope의 소개와 노천채탄장에서의 적용 사례

선우춘\*

한국지질자원연구원 지질환경연구본부

# Introduction of Q-slope and its Application Case in a Open Pit Coal Mine

Choon Sunwoo\*

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Geologic Environment Division

\*Corresponding author: [sunwoo@kigam.re.kr](mailto:sunwoo@kigam.re.kr)

Received: September 30, 2019

Revised: October 16, 2019

Accepted: October 16, 2019

### ABSTRACT

The RMR and Q-system for characterizing rock mass and drilling core, and for estimating the support and reinforcement measures in mine galleries, tunnels and caverns have been widely used by engineers. SMR has been widely used in the rock mass classification for rock slope, but Q-Slope has been introduced into slopes since 2015. In the last ten years, a modified Q-system called Q-slope has been tested by the many authors for application to the benches in open pit mines and excavated road rock slopes. The results have shown that a simple correlation exists between Q-slope values and the long-term stable and unsupported slope angles. Just as RMR and Q have been used together in a tunnel or underground space and complemented by comparison, Q-Slope can be used in parallel with SMR. This paper introduces how to use Q-Slope which has not been announced in Korea and application examples of Pasir open pit coal mine in Indonesia.

**Keywords:** Q-Slope, Slope Mass Rating, Q-System, Stability of rock slope, Rock mass classification, Bench

### 초록

노출 암반과 시추 코어를 특성화하고, 터널, 공동 및 광산 갱도에서 지보 및 보강 대책을 추정하기 위해 RMR 및 Q 분류법이 기술자들에 의해 널리 사용되어왔다. 사면에서의 암반분류는 SMR이 많이 사용되었지만 Q-Slope가 2015년부터 사면에 도입되었다. 지난 10년간, Q-slope라 불리는 수정된 Q시스템이 노천광산의 벤치, 도로사면 사면에 적용하기 위해 많은 저자들에 의해 시험되었다. 이 시험들을 통하여 Q-slope 값과 장기 안정 및 무지보 사면 경사각 사이에 간단한 상관관계가 있음이 나타내어 왔다. 터널이나 지하공간에서 RMR과 Q를 병용하면서 비교를 통해 상호보완 해왔던 것과 마찬가지로 사면에서도 SMR과 병행하여 Q-Slope를 사용할 수 있을 것이다. 국내에서 발표사례가 없는 Q-Slope의 사용방법과 인도네시아 Pasir 노천석탄광의 적용 예를 소개하고자 한다.

**핵심어:** Q-Slope, SMR, Q 분류법, 사면안정성, 암반분류, 벤치



## 1. 서론

노천채광에서 사면의 설계는 계획 및 시행단계에서의 중요한 과제 중의 하나이며, 사면설계의 목적은 안전성, 광체 회수율 그리고 경제적인 수익 측면에서 적절한 채굴방법을 찾는 것이며, 노천채굴장의 운영동안 뿐만 아니라 폐광 이후에도 안정할 수 있는 사면을 설정하는 것이다. 노천광산 사면의 안정성은 사면에서 작업 중인 근로자, 장비 등과 관련된 위험을 최소화시키는 것이 중요할 뿐 아니라 광산운영기간 내내 광물회수는 최대로 폐석은 최소로 유지해야 한다. 따라서 노천채굴장에서는 경제성의 문제로 허용수준의 안정성을 갖는 최대의 사면각을 설정하는 것이다. 사면의 설계방법이나 잠재적인 성능은 절토가 이루어질 사면구성 물체의 성질에 의해 결정되게 된다. 복잡한 지질 및 지질구조나 변화가 심한 지반재료의 성질이 중요한 변수가 될 수 있어 광체주변에 대한 세밀한 정보가 요구된다. 개발 초기단계에는 유용한 자료들이 제한적이기 때문에 초기 설계에 대한 신뢰성은 낮을 수밖에 없다. 사면설계의 과정은 유사한 지질, 지질 구조 및 물성의 특성들을 가지는 지역을 지반 공학적 모델로 분할하여, 각 영역에 대해 벤치 및 전체 사면에 대한 설계들은 요구되는 허용수준(안전율, 파괴확률 등)을 근거로 한다.

사면에서의 초기 변위는 굴착에 따른 사면구성 암반의 응력해방과 구속력의 제거와 관련된다. 사면에서 강한 암석의 변위는 일반적으로 지질구조의 표면을 따라 일어나는 미끄럼이나 사면을 구성하는 연약대와 함께 조합으로 생길 수 있다. 사면에서의 파괴는 변위속도가 일정하거나 속도가 느린 크리프 형태를 취할 수 있지만, 빈번하게는 슬라이딩 면에서 강도가 잔류강도 수준까지 감소됨에 따라서 가속될 수 있다. 경우에 따라서는 암반이 노출된 후에 시간경과에 따라 응력분포에 부정적인 영향을 주는 사면의 형태, 지하수압과 같은 요소, 강도성질과 지반재료의 거동이 변화될 수 있기 때문에 시간에 따른 거동변화에 대해서도 주의를 기울여야 한다.

사면높이가 상대적으로 높은 사면에서의 강한 암석은 지질구조가 중요한 제어요소가 될 수 있다. 반면에 연암의 높은 사면의 경우는 암반 강도가 지질구조와 함께 또는 단독적으로 중요한 역할을 할 수 있다. 또한 지질구조가 사면안정의 제어요소로 예상되는 경우에는 사면의 방향이 설계에 영향을 미칠 수 있다. 이 경우는 지질구조에 의한 평면, 켜기 또는 전도파괴에 대한 가능성과 관련된 운동학적인 고려를 기초로 하여 설계구역을 분할할 필요가 있다. 사면설계에 사용되는 주요 분석유형에는 강한 암석에서는 벤치 설계를 위한 평사투영을 기반으로 하는 운동학적인 분석, 구조적으로 제어되는 파괴들과 암반강도에 의해 안정성이 제어되는 전체 사면에 대한 한계 평형 분석 그리고 전체 사면에서의 잠재적인 변형 수준과 파괴모드를 평가하기 위한 유한요소나 개별요소 방법을 사용하는 수치해석 방법 등이 있다.

이외에도 경험적인 암반분류에 의한 안정성 해석이 있으며, 암반분류는 과거의 경험을 기초로 하여 복잡한 암반을 비슷한 거동의 집단으로 그룹화하거나 평점화하여 각 그룹의 특성을 간결하게 표현하여 암반의 해석, 설계 그리고 시공을 효율적으로 보조하는 역할을 한다. 또한 기술자들이 대상의 암반에 대해 이해할 수 있도록 도와주는 수단으로 사용된다. 암반평가를 실시하는 이유는 암석시험의 결과를 암반의 역학적 성질과 직접 연결시키기 어렵기 때문이다. 암반은 여러 종류의 불연속면을 가지는 불연속체로서 불연속면들이 암반의 강도, 변형성 및 투수성 등의 물성을 좌우하기 때문에 작업의 안전성 검토를 위하여 암반상태를 정확하게 파악해야 한다. 그러나 암반분류법이 계산 및 보다 복잡한 분석을 대신하지는 않는다. 대규모 또는 복잡한 사면의 경우, 암반역학적 분류와 운동학적 접근법만으로는 충분하지 않을 수 있다. 암석 사면의 경우 구조적으로 안정성이 제어되는 양호한 암석의 얇은 영역에서는 운동학적 평가방법이 관습적으로 사용된다. 수치모델(유한요소 또는 차분요소)은 사면의 전반적인 거동을 시뮬레이션 하거나 역해석을 수행하기 위해 필요하다(Alejano et al., 2010, Stead and Wolter, 2015).

여기서 사면의 안전성 문제는 앞서 언급된 운동학적 분석이나 수치해석이 아닌 경험적인 접근방법으로 암반분류법을 이용하는 방법에 대해 언급한다. Bieniawski(1973)의 RMR 및 Barton et al.(1974)의 Q분류법은 터널 및 지하공간 등의 설계에 사용되는 가

장 많이 사용되는 분류방법이며, 사면에서는 RMR을 근거로 하는 SMR(Romana, 1985)이 사면에 많이 사용되었지만 2015년부터 Q 분류법을 근거로 하는 Q-Slope(Barton and Bar, 2015)가 사면에 도입되었다. 터널이나 지하공간에서 RMR과 Q를 병용하면서 비교를 통해 상호보완 해왔던 것과 마찬가지로 사면에서도 SMR과 병행하여 Q-Slope를 사용할 수 있을 것이다. 여기서는 사면에 적용할 수 있는 암반분류에 대해 살펴보고, 국내에서는 아직 Q-Slope의 사용에 대한 발표사례가 없어 이 분류법의 국내 보급을 통해 사면조사에 도움을 주기 위해 이 분류법에 대해 소개하고 현장에서 적용한 사례에 대해 언급하고자 한다.

## 2. Q slope에 의한 사면안정해석

### 2.1 SMR에 의한 사면안정성 해석

RMR을 기반으로 하는 암반분류법에 의한 사면의 안정성에 대한 많은 연구들이 다음과 같이 수행되었다. Rock Mass Rating (RMR, Bieniawski, 1976 & 1989), Rock Mass Strength(RMS, Selby, 1980), Slope Mass Rating(SMR, Romana, 1985), Slope Rock Mass Rating(SRMR, Robertson, 1988), Slope Stability Probability Classification(SSPC, Hack, 1998, Hack et al., 2003), Modified Slope Stability Probability Classification (SSPC modified, Lindsay et al., 2001), Continuous Slope Mass Rating (Tomás et al., 2007) 그리고 Graphical Slope Mass Rating(GSMR; Tomás et al., 2012). 이 중에서도 사면분석에 처음으로 제안되어 많이 사용되고 있는 SMR(Slope Mass Rating)에 의한 암반분류법은 사면의 안정성을 평가하는 방법이며, 운동학적으로 중요한 방향성 성분을 갖는 암반분류이다(Moon et al., 2001).

RMR은 사면에 바로 적용이 곤란하여 주로 터널에서 지보의 적합성을 평가하는 암반분류법으로 발전되어 왔지만, SMR은 기본 RMR(Bieniawski, 1973)을 근거로 하여 사면의 안정성과 관련되는 요소들을 가지고 사면에 대한 보정요소를 고려하는 방법이며 분류등급에 따라 예상되는 파괴형태와 지보대책에 대한 방법도 제시되고 있다(Romana, 1985 and 1993, Romana et al., 2015). 이 분류법에서 고려되는 암반사면의 파괴형태는 일반적으로 평면파괴, 썩기형파괴와 전도파괴이다.

SMR 암반분류에서 고려되는 요소들은 RMR의 5가지 요소 즉 암석의 강도, RQD 값, 불연속면의 간격, 불연속면의 상태, 그리고 지하수 상태 등과 불연속면의 주향방향의 차이(F1), 사면의 경사방향과 불연속면의 경사각의 차이(F2), 불연속면의 경사(F3), 사면의 채굴방법(F4)이 있다. 다시 말하면 SMR의 값은 RMR의 5가지 요소에 대한 평점의 합과 불연속면과 사면의 방향성과 관련된 3가지 요소(F1, F2 및 F3)와 사면의 굴착방법(F4)과 관련된 보정요소들의 값으로 구해진다. 불연속면 및 사면과 관련된 보정요소는 Table 1과 같고, 사면의 굴착방법에 따른 보정요소 F4는 Table 2와 같다. 보정요소를 고려한 SMR의 값은 아래 식 (1)에 구해진다.

$$SMR = RMR_{basic} + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4 \quad (1)$$

썩기형의 파괴형태는 평면파괴에 적용하는 것과 차이가 없다. 복수군의 불연속면에 대한 암반분류는 각 불연속면의 set에 대해 적용하며, 이때 구해진 최소값의 SMR값이 사면암반의 암반분류등급에 사용된다. 이 SMR의 값에 따른 사면암반의 등급과 안정성 그리고 예상되는 파괴형태는 Table 3과 같다(Romana, 1985).

**Table 1.** Adjustment rating of F1, F2 and F3 for joints (Romana, 1985)

Joint Orientation			Very favorable	Favorable	Fair	Unfavorable	Very unfavorable
F1	P	$ \alpha_j - \alpha_s $	$> 30^\circ$	30 - 20°	20 - 10°	10 - 5°	$< 5^\circ$
	T	$ \alpha_j - \alpha_s - 180 ^\circ$					
	P/T	F1	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
F2	P	$ \beta_j $	$< 20^\circ$	20 - 30°	30 - 35°	35 - 45°	$> 45^\circ$
	P	F2	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
	T	F2	1	1	1	1	1
F3	P	$\beta_j - \beta_s$	$> 10^\circ$	10 - 0°	0°	0 - 10°	$< -10^\circ$
	T	$\beta_j + \beta_s$	$< 110^\circ$	110 - 120°	$> 120^\circ$	-	-
	P/T	F3	0	-6	-25	-50	-60

P, Plane failure; T, Toppling failure,  $\alpha_j$ , joint dip direction;  $\alpha_s$ , slope dip direction;  $\beta_j$ , joint dip;  $\beta_s$ , slope dip

**Table 2.** Values corresponding to the factor F4 (Romana, 1985)

Method	Natural slope	Presplitting	Smooth Blasting	Blasting/Ripping	Deficient blasting
F4	15	10	8	0	- 8

**Table 3.** Description of SMR classes (Romana, 1985)

Class	SMR	Description	Stability	Failure	Support
I	81-100	Very good	Completely stable	None	None
II	61-80	Good	Stable	Some blocks	Spot
III	41-60	Fair	Partially stable	Some joints or many wedges	Systematic
IV	21-40	Poor	Unstable	Planar or large wedges	Important/ Corrective
V	0-20	Very poor	Completely unstable	Large wedges or circular failure	Re-excavation

## 2.2 Q-slope의 개요

터널, 지하공동 및 광산 갱도에서 지보 및 보강대책을 추정하기 위해 사용되어 온 Q 분류법은 노르웨이의 Barton et al.(1974)에 의해 개발되었다. 이 분류법은 터널 사례연구를 근거로 제안된 정량적인 분류법으로 터널지보의 설계에 사용되는 공학적인 분류체계이다. 이 분류법은 암반을 정량적으로 평가하기 위해 6개의 요소를 사용하며, 그 요소들은 RQD, 절리군의 수(Jn), 가장 상태가 나쁜 절리의 거칠기(Jr, 절리의 거칠기 계수), 절리면의 충전물 또는 변질정도(Ja, 절리의 풍화변질 계수), 지하수의 유입 상태(Jw, 지하수에 의한 저감 계수), 그리고 응력조건(SRF, 응력저감 계수)으로 구성된다. 이 요소들을 3개의 항으로 나누어 곱으로 표현한 것이 Q값이며 다음 (2)식과 같이 표현된다. RQD/Jn 항은 암괴의 크기를, Jr/Ja항은 암괴간의 상대적인 전단강도를 그리고 Jw/SRF 항은 작용응력의 상태를 나타낸다. 암질을 나타내는 Q값은  $10^{-3} - 10^3$ (0.001-1,000) 사이의 값으로 표시되어 넓은 영역의 값을 가지며, 값에 따라 예외적으로 양호에서 예외적으로 불량까지 9개 등급으로 분류되어 터널폭과 Q 값에 따라 지보방법이 제시되고 있다.

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

이에 비해 Q-slope(Barton and Bar, 2015, Bar and Barton, 2016, Bar et al., 2016)는 10여 년 전에 고안되어, 노천광산의 벤치, 일반 도로 및 고속도로 사면 등에 적용하기 위해 수정된 Q시스템이 시험되어왔다. 처음에는 도미니카 공화국의 수력발전 댐에서 20 Km 떨어진 댐 부지에 도달하기 위한 접근로의 매우 가파른 사면에서 이루어졌고, 이후에 더 발전된 형태의 Q-slope는 파나마의 우거진 열대성 우림 지형의 언덕을 관통해 굴착된 새로운 고속도로에 적용되었다. Q-slope의 목적은 지질, 암반 및 광산공학 전문가들이 하루에 수십 m씩 매우 빠르게 절단면이 형성되는 현장에서 신속하고 효과적인 방식으로 안정성을 평가하고 도로 절취면 또는 벤치 공사 중 관찰할 수 있는 암반 조건에 따라 암반상태에 맞는 최적의 경사각을 결정할 수 있도록 만들어졌다. 토목 및 채광작업 모두에서 운동학적, 한계 평형 또는 유한 요소법과 같은 분석적 기법을 사용하여 암석 절단면과 벤치의 안정성을 실시간으로 평가하는 것은 사실상 불가능하다. 굴착작업이 이러한 안정성 분석보다 일반적으로 너무 빨리 진행된다. 복잡하거나 매우 특별한 사면평가의 경우 운동학적, 한계평형 또는 수치해석으로 수행되어야 하는 것이 효율적인 방법론이다.

아시아, 호주 및 중앙아메리카 등의 여러 토목 건설 및 광산에서의 시험들이 Q-slope 값과 장기 안정 및 무지보를 위한 사면 경사각 사이에 간단한 상관관계가 있음을 보여왔다(Barton and Bar, 2015, Bar and Barton, 2016). Q-slope의 초기 목적을 수행한 사례는 Fig. 1과 2와 같다. Fig. 1과 2는 각각 노천광산과 선박운하 건설작업에서 적용된 Q-slope 작업 사례이다(Barton and Bar, 2015, Bar and Barton, 2016). Fig. 1의 사례는 굴착심도에 따라 경사가 급해지는 얇은 두께의 실트암 내의 층리면을 대상으로 Q-slope 값이 반영되었고, 그 결과로 벤치면들의 경사각이 변경되었음을 나타내는 사례이다. Fig. 2는 새로운 파나마 운하 확장을 위해 높은 절단면에 다른 각도를 갖는 사면이 설계된 사례로 심도증가에 따라 암반 질의 향상으로 더 강하고 신선한 암석이 존재하는 경우이다. Q-slope는 각각 약 0.1, 1.0 및 1.0의 값을 가지며, Q-slope 값에 따라 유지보수가 필요 없고, 보강이 없는 벤치면 경사각 40°, 60° 및 80°가 되도록 제안되었다.

Q-slope의 주요한 적용 분야는 노천 채광장에서의 개별 벤치의 각도 결정, 작업현장의 수많은 사면 절단면들(예: 터널, 댐 또는 광산 부지), 특히 지질조건의 변화가 심한 도로 또는 철도 절단면 그리고 구릉지에서의 접근 도로 및 주거 부지 등 여러 분야에 적용 가능하다. Q-slope 적용은 다양한 구조를 갖는 영역에서 일정한 사면 경사각으로 굴착될 때, 자주 볼 수 있는 국부적인 파괴로 인한 유지보수(및 벤치 폭의 요구)를 줄일 수 있다고 보고하고 있다(Barton and Bar 2015).



Fig. 1. Changing geologic structure orientations (steepening of bedding planes down slope) help to explain the appropriately steepened bench face angles in a large opencast mine setting, Laos.(after Barton & Bar, 2015)

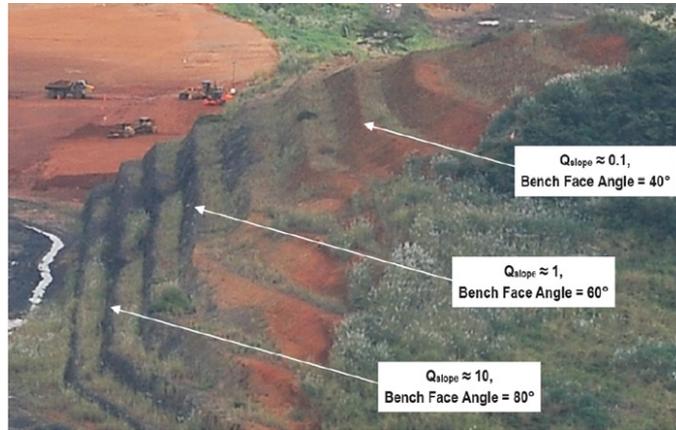


Fig. 2. Convenient example of differentiated saprolite, weathered rock, and fresher rock mass qualities help to explain the appropriately steepened, unreinforced permanent slopes. (after Barton and Bar 2015)

### 2.3 Q-SLOPE의 평점 및 계산식

Q-slope 방법은 Q(Barton et al., 1974)의 여섯 개의 매개 변수 중 암질지수(RQD), 절리군 개수(Jn), 절리 거칠기 계수(Jr) 및 절리 변질계수(Ja)는 그대로 사용된다. Q-slope를 계산하는 공식(Barton & Bar, 2015)은 Q의 공식과 거의 비슷하며 계산식은 식 (3)과 같다. 요소 RQD, Jn, Jr 및 Ja 들에 대한 서술 및 값들은 Q-시스템(Barton et al., 1974)과 동일하기 때문에 여기서는 설명을 생략한다.

$$Q_{slope} = \frac{RQD}{J_n} \times \left( \frac{J_r}{J_a} \right)_o \times \frac{J_{wice}}{SRF_{slope}} \tag{3}$$

$\left( \frac{J_r}{J_a} \right)_o$  는 Q-시스템과 같은 평점을 갖지만, ‘방향성’ 및 ‘썩기’ 보정요소를 포함한다.  $J_{wice}$  는 일반 Q에서  $J_w$  요소와 같은 것으로 얼음의 썩기 효과와 열대 우림지역의 침식 효과를 포함하는 새로운 구조의 경사면을 나타낸다. 변화된 두 매개변수중 하나인  $J_{wice}$  는 영구적으로 노천의 상태로 있을 암석사면에 적절하게 적용하기 위해 더 넓은 범위의 환경조건을 고려한 것이다. 이러한 조건들은 암석 종류와 지역적으로 스펙트럼상 한 쪽에서 반대쪽 끝까지 계절적으로 발생할 수 있는 극심한 침식을 일으키는 집중호우나 얼음의 영향에 의한 썩기효과를 포함시킨 것이다.  $SRF_{slope}$  는 심도가 깊은 터널, 지하공동 등의 응력의 영향과 달리 심도가 더 얇은 사면에 맞게 새로운 범주를 정한 것이다.

그러나 마찰저항을 나타내는 Jr 및 Ja는 필요에 따라서 잠재적으로 불안정한 썩기들의 경우 썩기를 형성하는 각각의 개별 표면에 대해 영향을 적용할 수 있도록 했다. 불연속면 방향계수(O-계수)에 대해서는 Table 4에 설명되어 있다. 사면파괴와 같은 사면의 안정성에서는 특히 불연속면의 방향성이 미치는 영향이 크기 때문에 암석사면에서 불연속면의 방향성 가중치를 허용하고 있다. 불연속면 세트 A의 방향성 계수는 사면에 가장 불리하게 작용하는 불연속면 세트에 적용하며, 필요하다면 불연속면 세트 B의 방향성 계수는 2차적으로 영향을 미칠 수 있는 불연속면 세트(즉, 잠재적으로 불안정한 썩기의 경우)에 적용한다. 예를 들어 불연속면  $J_1$  세트에 대해  $(J_r/J_a)_1 \times 0.5$ 와  $J_2$  세트에 대해서는  $(J_r/J_a)_2 \times 0.9$  등과 같이 적용된 방향성 요소들은 적절한 경우에는 간단하게 전체 썩기 마찰저항 감소에 대한 추정값을 제공한다. 방향성 계수의 사용에 대한 이해를 돕기 위한 예제는 다음과 같다(Table 4 참조). 사면 암

반에 다음과 같은 특성을 갖는 두 개의 불연속면 세트가 분포하고 있다고 가정한다. 1) 불연속면 세트 A는  $J_r=1.5$  및  $J_a=2$ 의 값을 가지며, 사면에서 우세하게 발달하고 있는 불연속면으로 사면에 대해 매우 불리한(very unfavorable) 방향성을 갖는다. 따라서 Table 4와 같이 O-계수는 0.5가 된다. 2) 연속면 세트 B는  $J_r=2$ ,  $J_a=1$ 의 값을 가지며, 사면에서 다소 덜 우세하게 발달하고 있는 불연속면으로 사면에 대해 불리한(unfavorable) 방향성을 갖는다. 따라서 Table 4와 같이 O-계수는 0.9가 된다.

**Table 4.** Discontinuity orientation factor\_ O-factor(after Barton & Bar, 2015)

Set A	Set B	O-factor Description
2.0	1.5	Very favourably oriented
1.0	1.0	Quite favourable
0.75	0.9	Unfavourable
0.50	0.8	Very unfavourable
0.25	0.7	Causing failure if unsupported

Note: Orientation adjustment for joints in rock slopes.

Apply Set A orientation-factor to most unfavourable joint set.

If required, apply Set B orientation-factor to secondary joint set in case of potentially unstable wedge formation.

불연속면 중 하나의 불연속면만(세트 A)이 즉 평면파괴 또는 전도파괴만이 발생 가능하여 안정성에 영향을 미친다고 판단하는 경우에는 식 (4)와 같이 계산하여 값을 적용할 수 있다. 반면에 두 개의 불연속면군이 쐐기형 블록을 형성하여 쐐기형 파괴가 발생 가능하여 사면의 안정성에 영향을 미친다고 판단하는 경우에는 식 (5)와 같이 계산하여 값을 적용할 수 있다.

$$\left(\frac{J_r}{J_a}\right)_o = \left(\frac{1.5}{2} \times 0.5\right) = 0.38 \quad (4)$$

$$\left(\frac{J_r}{J_a}\right)_o = \left[\left(\frac{1.5}{2} \times 0.5\right) \times \left(\frac{2}{1} \times 0.9\right)\right] = 0.68 \quad (5)$$

환경 및 지질조건 계수인  $J_{wice}$ 는 사면이 매우 오랫동안 외부환경에 노출되기 때문에 지하암반을 대상으로 하는 원래 Q 시스템의  $J_w$ 보다는 사면에서는 더 강력한 매개 변수가 된다. Table 5는  $J_{wice}$  등급을 나타내며 사면 보강(slope reinforcement measure;  $J_{wice} \times 1.5$ )이나 배수대책(drainage measures;  $J_{wice} \times 1.3$ ) 또는 두 가지 모두에 대한 작업 보정 계수( $J_{wice} \times 1.5 \times 1.3$ )도 포함한다.

강도감소계수(Strength Reduction Factor)인  $SRF_{slope}$ 는 Table 6에 설명되어 있고,  $SRF_a$ ,  $SRF_b$  및  $SRF_c$  중에서 최대값을 채택하여 사용한다. Table 6의  $SRF_a$ 는 물리적 조건의 강도 감소 계수로서 풍화 및 침식에 대한 민감성(현재 또는 예상되는)으로 인해 사면의 조건을 평가하는 데 사용한다. 응력과 관련된  $SRF_b$ 는 암석의 강도와 사면에 작용하는 불리한 현지응력과 비에 대한 강도감소계수를 나타낸다.  $SRF_c$ 는 사면에 발달하고 있는 주요 불연속면 즉 단층, 전단 또는 연약대 및 절리 등에 존재하는 점토 충전물과 방향성이 사면의 안정성에 나쁜 영향을 미칠 수 있는 불연속면에 대한 강도감소계수를 나타낸다.

**Table 5.** Environmental and geological condition number  $J_{wice}$  (after Barton & Bar, 2015)

Jwice	Desert Environ.	Wet Environ.	Tropical Storms	Ice Wedging
Stable structure, competent rock	1.0	0.7	0.5	0.9
Stable structure, incompetent rock	0.7	0.6	0.3	0.5
Unstable structure, competent rock	0.8	0.5	0.1	0.3
Unstable structure, incompetent rock	0.5	0.3	0.05	0.2

Note:

When drainage measures are installed, apply  $J_{wice} \times 1.5$

When slope reinforcement measures are installed, apply  $J_{wice} \times 1.3$

When drainage and reinforcement are installed, apply both factors  $J_{wice} \times 1.5 \times 1.3$ .

**Table 6.**  $SRF_{slope}$  : Strength Reduction Factor (use maximum of SRFa, SRFb and SRFc) (after Barton & Bar, 2015)

SRFa - Physical condition		
A	2.5	Slight loosening due to surface location
B	5	Loose blocks, signs of tension cracks and joint shearing, susceptibility to weathering
C	10	As B, but strong susceptibility to weathering effects
D	15	Slope is in advanced stage of erosion and loosening due to periodic water erosion and/or ice-wedging effects
E	20	Residual slope with significant transport of material down-slope
SRFb - Stress		
F	2.5-1	Moderate stress-strength range ( $\sigma_c/\sigma_1$ : 50-200)
G	5-2.5	High stress-strength range ( $\sigma_c/\sigma_1$ : 10-50)
H	10-5	Localised intact rock failure ( $\sigma_c/\sigma_1$ : 5-10)
J	15-10	Crushing or plastic yield ( $\sigma_c/\sigma_1$ : 2.5-5)
K	20-15	Plastic flow of strain softened material ( $\sigma_c/\sigma_1$ : 1-2.5)

\*Note:  $\sigma_c$  = unconfined compressive strength (UCS)

$\sigma_1$  = maximum principal stress

SRFc - Major Discontinuity		Discontinuity Orientation			
		Favo- urable	Unfav- ourable	Very Unfav-ourable	Causing Failure if Unsupported
L	Major discontinuity with little or no clay	1	2	4	8
M	Major discontinuity with RQD <sub>100</sub> due to clay and crushed rock	2	4	8	16
N	Major discontinuity with RQD <sub>300</sub> due to clay and crushed rock	4	8	12	24

note : RQD<sub>100</sub> = 1 meter perpendicular sample of discontinuity

RQD<sub>300</sub> = 3 meter perpendicular sample of discontinuity

Barton and Bar(2015)는 Fig. 3과 Fig. 4와 같이 Q-slope를 분석한 실질적인 데이터베이스를 기반으로 보강이나 지보가 필요 없는 사면의 경사각에 대한 간단한 공식을 도출했다. 이 자료들은 중앙 아메리카(도미니카 공화국과 파나마), 호주, 동남아시아(파푸아 뉴기니와 라오스), 유럽(슬로베니아) 지역에서 도출된 자료들이며, 암석종류는 화성암인 현무암, 섬록암, 조립현무암, 화강암, 몬조나이트, 몬조섬록암, 몬조나이트 반암, 집괴암 등, 퇴적암인 사암, 셰일, 실트암, 석회암, 이암, 역암 및 호상 함철암 등 그리고 변성암인 편암, 스키타, 천매암 및 규암 등 다양하게 포함되어 있다(Fig. 3 참조). Fig. 3은 도로 및 노천채광 벤치에 대해 Q-slope를 사

용하여 역해석한 자료이고, Fig. 4는 사면높이 30m 이하 사면에서의 약 200개의 개별 Q-slope를 분석한 자료이다. 불안정 영역은 좌상단 영역에 표시되고, 보수적인 안정사면은 우하단 영역에 표시되어 있고 그리고 불확실한 사면 안정성 범위는 중앙대각선 영역에 표시되어 있다. 따라서 30m 이하의 사면을 보강이나 지보 없이 설정할 수 있는 가장 가파른 사면 경사각( $\beta$ )에 대한 계산 공식은 식(6)과 같다.

$$\beta = 20 \log_{10} Q_{slope} + 65^\circ \quad (6)$$

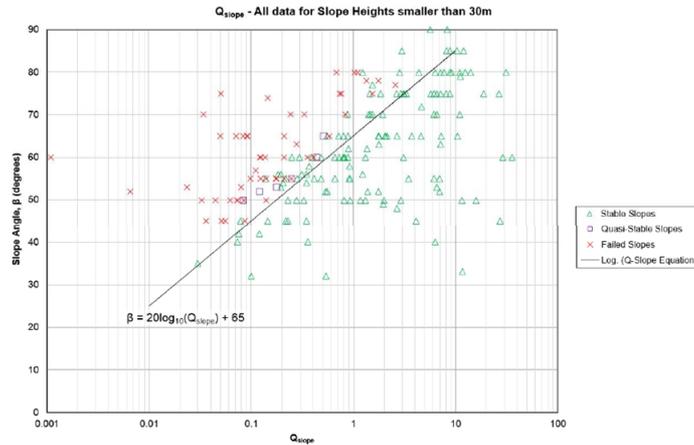


Fig. 3. Q-slope supporting data -412 case studies (after Barton & Bar, 2015)

Q-slope는 보강재가 필요 없는 사면 작업장 접근로의 절단면, 도로 또는 철도 절단면 또는 노천채광 광산에서의 개별 벤치에 사용하기 위한 것으로 노천채광 광산에서의 전체 사면 또는 램프 간 사면과 같은 채광 중에 여러 굴착 단계에 의해 개발되는 대규모 사면의 안정성을 평가하기 위한 것은 아니다. 암석사면의 유형에 따라 Q-slope의 적용은 SRF를 적용하기 때문에 강한 암석사면이나 연약한 연암사면도 같은 방식으로 평가되지만, 토사체는 Q-slope를 사용하여 평가할 수 없다.

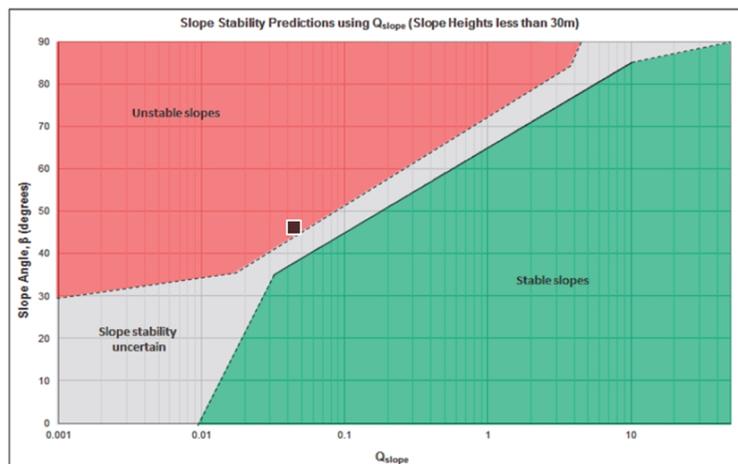


Fig. 4. Q-slope stability chart. The unstable area is shown in red, and the conservative stable slope area is shown in green. (after Barton & Bar, 2015) (black square represents the case of Pasir coal mine bench)

### 3. KIDECO Pasir 노천석탄광의 Q-SLOPE 적용의 예

KIDECO Pasir 노천석탄광은 인도네시아 East Kalimantan의 Balikpapan 서측 130 km 지점에 위치하고 있으며 전체 탄광의 면적은 504 km<sup>2</sup> 이른다. 본 탄광을 구성하고 있는 파시르 노천광의 지질은 하상퇴적으로 생성된 제3기의 사암, 이암, 석탄층으로 구성되어 있다. 15개의 다른 탄층이 서로 평행하게 부존하며 탄폭은 1 m에서 25 m까지 다양하다. 지표에 노출된 80-90° 경사의 수직 석탄층을 중심으로 직상하반에는 탄층과 탄층 사이에 이암층과 사암층이 번갈아 가며 호층을 이루고 있다. 각 암종들의 강도는 50 MPa 이하로 매우 낮다. 암상의 분포는 이암이 약 80-85%, 사암이 10-15%, 석탄이 5-10%로 구성되고 있다. 이중 이암층의 영향으로 강우시 습윤 상태가 되면 지표면은 거의 불투수층에 가까운 특성을 나타낸다(Sunwoo et al., 2007). 로또 강북지역의 탄층은 남북방향의 대규모 향사구조에 나타나고 있으며, 남쪽으로 경사진 습곡축을 중심으로 동익부와 서익부가 서로 다른 주향방향 및 경사각을 나타낸다. 이 지역 퇴적암 층리의 주향은 북북서 방향이고 경사는 80° 이상의 고각을 이루며 서쪽으로 경사진 것과 동쪽으로 경사진 것이 있다. 노천채광법의 하나인 Strip 채탄법으로 탄층과 탄층 사이에 부존하는 이암층이나 사암층에 천공 및 발파를 실시하여 암반을 먼저 이완시킨 후에 암석층의 폐석들은 적재장비인 shovel이나 backhoe를 이용하여 100-150톤 트럭에 의해 폐석처리장으로 운반처리 된다. 폐석을 제거한 후에는 석탄층을 대상으로 backhoe를 이용하여 30톤 트럭에 적재 운반시킴으로써 채탄이 이루어진다.

구성암석이 연약하고 지역 특성상 많은 열대우림의 강우 영향으로 지표수와 지하수에 의해 발생하는 많은 문제점들이 산재하고 있다. 이 광산에서 사면 파괴형태는 모든 형태의 사면파괴가 관찰되며, 토사사면에서 나타나는 원호파괴를 비롯하여 전도파괴, 평면파괴, 지표수 세굴에 의한 침식 등이 흔하게 나타난다. 또한 전체 사면의 변형에 의해 사면 상부에 인장균열들이 발생하고 있다. 이러한 인장균열들은 지층의 주향방향으로 발달되어 있어, 지표수가 인장균열을 통해 쉽게 침투하여 사면의 불안정성을 가속화시키고 있다. 사면을 구성하는 이암의 경우도 물로 포화될 경우 팽창으로 변위가 심하게 일어난다. 사암은 물과의 접촉에 의해 강도저하가 뚜렷하게 나타나며, 손으로 만져도 부서질 정도로 연약한 사암에서 부분적으로는 햄머타격에 자국이 쉽게 남는 강도에서 많은 차이를 보이고 있다.

KIDECO광산 Roto 채광장의 사면은 8 m 높이의 벤치와 6 m의 berm, 그리고 운반로의 경우 35 m 폭으로 구성되어 있으며, 전체 사면구배는 초기에는 25-28° 정도에서 운영되었으나 심도가 깊어짐에 따라 현재는 거의 20° 정도의 경사각으로 운영되고 있다. 사면의 벤치의 경우 45°를 유지하고 있다. 채광장 전체 사면각이 아닌 소단을 이루고 있는 벤치각을 결정하기 위해 Q-slope를 적용했다. 우세한 불연속면으로 발달하고 있는 층리의 경사는 상당히 급경사를 이루고 사면의 주향과 거의 평행하게 발달하고 있으며, 사면의 경사와 역경사인 경우도 존재하여 전도파괴의 위험 가능성이 있어 사면의 안정성에는 불리한 방향성을 나타낸다. 암반사면이 노출이 되면 강우와 이에 따른 지표수에 의해 풍화와 심한 침식이 이루어지고 있다.

사면굴착 직후의 암반(Fig. 5 참조)을 대상으로 벤치의 각을 결정하기 위해 사면 암반을 대상으로 Q-slope의 요소들에 대한 평점을 Table 7과 같이 부여하였다. 암석이 연약할지라도 불연속면이 발달하지 않아 시추코어의 RQD는 80% 정도이고(Fig. 6), 불연속면은 주로 층리를 포함하여 하나의 절리와 부분적으로 단층들이 발달하며 표면은 단층경면이 발달하여 매우 매끄럽다. 불연속면은 사면의 주향과 거의 평행하게 발달하는 고각의 층리들로서 경우에 따라서는 사면의 경사와 역경사인 경우도 발달하여 전도파괴의 가능성으로 사면의 안정성에 불리한(Unfavorable) 방향성을 나타내어 O-factor 값을 0.75로 결정하였다. 이암의 발달과 지하수에 의한 영향으로 불연속면은 연화된 점토광물 충전되어 있다. 광산지역은 열대우림 지역으로 우기에는 많은 강수량을 나타내며 암반이 노출된 후에는 강도가 급격히 약화되는 암반이다. 사면은 많은 강수량의 물 효과에 의한 표면 침식과 이완이 진행되며 이에 따라 암반이 파괴되거나 장기간 큰 변위를 나타내는 소성거동을 보인다.

**Table 7.** The values of Q-slope factor for determining the angle of the bench

	factor	description
RQD	80 %	Investigations of drilling cores (See Figure 6)
Jn	E = 6	Two joints sets(including bedding) plus random faults
Jr	D = 1.5	Slickensided, undulating
Ja	H = 8	Low over-consolidation, softening, clay mineral fillings
O-factor	0.75	Unfavourable
Jwice	0.3	Tropical Storms, stable structure, incompetent rock
SRF	SRFa = 15	Slope is in advanced stage of erosion and loosening due to periodic water erosion and/or ice-wedging effects
	SRFb = 15	Crushing or plastic yield
	SRFc = N/A	

**Fig. 5.** A slope of Roto South area in KIDECO**Fig. 6.** The drilling core of the Roto South area in KIDECO

Table 7과 같이 요소에 부여된 값들을 기초하여, Q-slope의 값 및 최소 경사각( $\beta$ )를 구하면 다음 (7)과 (8)식 같다. Q-slope의 값은 약 0.038 그리고 이 값에 따른 벤치의 각은  $36.5^\circ$ 로 추정되었다.

$$Q_{slope} = \frac{80}{6} \times \left[ \left( \frac{1.5}{8} \times 0.75 \right) \right] \times \frac{0.3}{15} = 0.0375 \quad (7)$$

$$\beta = 20 \log_{10} 0.0375 + 65^\circ = 36.5^\circ \quad (8)$$

Fig. 4의 검은 점은 채굴장내의 벤치의 경사각 45°와 Q-slope의 값 0.038에 대한 것으로 벤치는 불안정한 영역에 속하게 된다. 따라서 이 사면에서의 벤치 각을 36° 전후로 하여 벤치를 형성하는 것이 좋지만, 현재 채광장 사면에서 벤치각의 경우 45°를 유지하고 있어 채광작업 동안 벤치사면의 불안정성을 유발할 수 있다.

## 4. 결론

Q-slope는 굴착 중이나 굴착 후 현장에서 사면의 안정성 및 사면각의 결정을 빠르게 평가할 수 있게 해준다. 특히 광산 작업장에서 Q-slope를 사용하면 채광 실시계획에 지연가능성을 줄여주고 국부적인 벤치파괴나 이와 관련된 복구작업이 절감될 수 있을 것이다.

KIDECO 광산의 로또 채광장의 전체사면각은 현재 20° 내외로 적용하여 전체사면의 안정성을 확보하고 있지만, 사면벤치의 경우 45°를 유지하고 있어 벤치는 불안정한 상태를 나타낸다. 현재 사면의 암반상태에 Q-slope를 적용한 결과는 사면벤치의 최소각을 36° 내외로 유지할 것을 제안한다.

SMR과 같이 RMR을 기반으로 하는 사면 관련 암반분류법은 사면암반의 등급을 평가하여 그 등급에 대한 사면의 안정성 여부, 가능 파괴형태 및 보강대책을 제시하고 있지만 Q-slope는 사면의 안정여부와 지보대책이 필요 없는 사면의 사면각을 결정하는 점에서 차이를 보이고 있다. 앞으로는 SMR과 병용함으로써 SMR에 의한 사면의 안정성 판단과 사면각의 빠른 결정을 위해서는 노천 광산이나 도로설계에서의 이용이 확장될 수 있을 것이다. 국내에서 Q-slope를 적용한 실적 발표가 없지만 많은 연구가 수행되어 국내암반에 적절한 경험식 유도도 필요하다고 본다.

일부 노천광산의 경우 하루에도 수십 미터씩 사면을 형성해야 하는 작업속도에 대응하기 위해 Q-slope를 사용할 필요도 있지만, 사면 전체의 안정성이나 보다 정밀한 분석을 위한 대체물로서 사용할 의도로 개발된 것은 아니다. 따라서 현장에서는 시간이 충분 한 경우에는 현장 조사 및 계측자료 등을 분석하고 수치해석과 같은 보다 상세한 분석들이 동시에 이루어져야 한다.

## 사사

본 연구는 한국지질자원연구원에서 수행하고 있는 ‘시추공 기반 심지층 특성규명 InDEPTH 요소기술 개발(19-3423)’ 연구과제의 일환으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Alejano L.R., I. Gómez-Marquez, R. Martínez-Alegria, 2010, Analysis of a complex toppling-circular slope failure. Eng Geol., 114, pp. 93-104.

- Bar N. and N.B Barton, 2016, Empirical slope design for hard and soft rocks using Q-slope. In: ARMA, 50th US Rocks Mechanics geomechanics symposium. <https://www.onepetro.org/conference-paper/ARMA-2016-384>.
- Bar N., N. Barton, C.A. Ryan, 2016, Application of the Q-slope method to highly weathered and saprolitic rocks in Far North Queensland, Proceedings of the ISRM international symposium, Eurock 2016, Cappadocia, pp. 585-590.
- Barton N., Bar N., 2015, Introducing the Q-slope method and its intended use within civil and mining engineering projects, In: EUROCK 2015 and 64th Geo-mechanics, Salzburg, pp. 157-162.
- Barton N.R., Lien, R. & Lunde, J., 1974, Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics. Volume 6, pp. 189-236. Springer-Verlag.
- Bieniawski Z.T., 1973, Engineering classification of rock masses, Trans S. Afr Inst Civ Eng, vol.15, no.12, pp. 335-344.
- Bieniawski Z.T., 1976. Rock mass classification in rock engineering, in: Bieniawski Z.T. (Ed.), Exploration for rock engineering, Proceedings of the Symposium Expl. Rock Engineering, Johannesburg, pp. 97-106.
- Bieniawski Z.T., 1989, Engineering Rock Mass Classification, Wiley, Chichester, 251p.
- Hack R., Price, D., Rengers, N.A., 2003. A new approach to rock slope stability - a probability classification (SSPC). B. Eng. Geol. Environ, vol. 62, pp. 167-184.
- Hack, R., 1998, Slope Stability Probability Classification, vol.43, ITC Delft Publication, Enschede, Netherlands, 273p.
- Lindsay, P., Campbell, R.N., Fergusson, D.A., Gillard, G.R., Moore, T.A., 2001, Slope stability probability classification, Waikato Coal Measures, New Zeland. Int. J. Coal Geol., vol. 45, pp. 127-145.
- Moon V., Russell G. and Stewart M., 2001, The value of rock mass classification systems for weak rock masses: a case example from Huntly, New Zealand, Eng. Geol., 61, pp. 53-67.
- Robertson A.M., 1988, Estimating weak rock strength, in: Sastry, K.V.S. (Ed.), Proceedings of the SME Annual meeting, Society of Mining Engineering, Phoenix, pp. 1-5.
- Romana M., 1985, New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes, in: Proceedings of the International Symposium on the Role of Rock Mechanics in Excavations for Mining and Civil Works. International Society of Rock Mechanics, Zacatecas, pp. 49-53.
- Romana M., 1993. SMR classification: Romana, M Proc 7th ISRM International Congress on Rock Mechanics, Aachen, 16-20 September 1991V2, P955-960. Publ Rotterdam: A A Balkema, 1991. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts 30, A231-A231.
- Romana M., R. Tomás and J.B. Serón, 2015, Slope Mass Rating (SMR) geomechanics classification: thirty years review, Conference 13th ISRM Congress, Quebec, Canada.
- Selby M.J., 1980, A rock mass strength classification for geomorphic purposes: with test from Antarctica and New Zeland. Zeitschrifts für Geomorphologie 24, 31-51.
- Stead D. and Wolter A., 2015, A critical review of rock slope failure mechanisms: the importance of structural geology, J Struct Geol., vol.74, pp. 1-23.
- Sunwoo C., Ryu C.H., Choi B.H., Ryu D.W. and Jung Y.B., 2007, A study on the improvement of productivity and slope stability of weak rock in large scale open pit coal mine, KIGAM Report, NP2007-006-2007(1), 195p.
- Tomas R., A. Cuenca, M. Cano, J. Garcia-Barba, 2012, A graphical approach for slope mass rating (SMR), Eng. Geol., vol.124, pp. 67-76.
- Tomas R., J. Delgado, J.B. Seron, 2007, Modification of slope mass rating(SMR) by continuous functions. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., vol.44, pp. 1062-1069.