

절리면이 발달한 골재석산의 최적개발을 위한 발파 및 사면유지

양형식¹⁾ · 김남수²⁾ · 김형근³⁾

Stability Evaluation and Blasting of Slopes for Optimal Development of Aggregate Quarry with Highly Damaged Discontinuities

Hyung Sik Yang, Nam Soo Kim and Hyung Geun Kim

ABSTRACT Various analytical, empirical and theoretical methods for slope stability assessment were applied on slopes to develop aggregate quarry optimally. Among them are block theory, stereographic analysis, RMR, SMR, limit equilibrium method and maximum likelihood method. Test site was estimated that slopes were apt to fail although rock quality was good. Modified direction and dip angle was suggested for stability. To reduce the overbreak and to improve the stability, the vertical blasting was recommended for new subground level.

1. 서 론

암반사면의 안정성 해석방법에는 여러 가지가 있다. FEM이나 FDM 같은 수치해석법의 적용, 불연속면의 기하학적 관계와 중력의 작용을 해석하는 평사투영법(stereograph) 또는 이의 벡터 해석인 블록이론(Goodman and Shi, 1985), 그리고 RMR이나 SMR 같은 경험적 암반분류 해석이나 이에 근거한 전문가 시스템을 설계나 평가에 적용하기도 한다. 이러한 방법들은 결과가 서로 상충하는 경우가 많아 적용상의 어려움이 적지 않다.

본 연구에서는 상기방법을 다양하게 적용하여 중소 규모의 골재 석산에서 흔히 형성되는 형태의 암반사면의 안정성을 해석하고 핵블록의 형성을 최소화하거나 파괴 모우드의 발생을 극소화하는 방향과 경사를 제시하였다. 또 사면의 안정성에 큰 영향을 미치는 요소의 하나인 발파에 따른 후방파쇄의 문제점을 최소화하기 위한 방안을 모색하였다.

먼저 현장암반의 불연속면을 계측하고 여러 가지 암석물성을 실험하였으며 이들 자료를 이용하여 RMR과 SMR 분류법(Romana, 1993)으로 분류하고 결과를 비교하였다. 대상암반의 절리군들은 scanline법으로 계측하였으며, 계측된 데이터를 DIPS 평사투영법 프로그램에 적용하였고 동일한 자료를 블록이론에도 적용하여

안정성을 평가하였으며 기존 사면에 있어서는 최적 경사를, 신개발 사면에 대해서는 최적 방향을 구하였다. 또 한계평형법(Hoek and Bray, 1981)과 Maximum Likelihood Method (Sah 외, 1994)을 적용하여 안정성 해석을 실시하고 여타 방법과 비교하였다.

2. 대상 지역

본 연구의 대상지역은 전남 여천시에 위치하고 있는 S산업(주)의 골재채취 현장 석산이다. 계측은 현재 절취작업이 진행중인 사면과 채준작업중인 사면들에 대해서 수행되었으며 이들 자료를 이용하여 각 사면의 안정성을 평가하였다. 또 현재의 작업면 바닥에 새로운 수준의 개발을 위하여 최적인 사면의 방향과 채굴방법을 제시하였다.

Fig. 1은 현장의 지형과 사면의 위치를 나타내고 있다. 그림에서 사면 1은 주 채굴 사면으로서 주변의 사면은 크게 원호를 이루고 있다. 사면 2와 3은 사면 1의 개발면을 분산하기 위하여 주 가동층 하단에 접근하는 과정에서 생성된 사면들이다. 채굴면은 수평굴 발파에 의해 많이 훼손되어 있으며 부분적으로는 역경사까지

- 1) 정회원, 전남대학교 교수
- 2) 학생회원, 전남대학교 대학원 박사과정
- 3) 학생회원, 전남대학교 대학원 석사과정

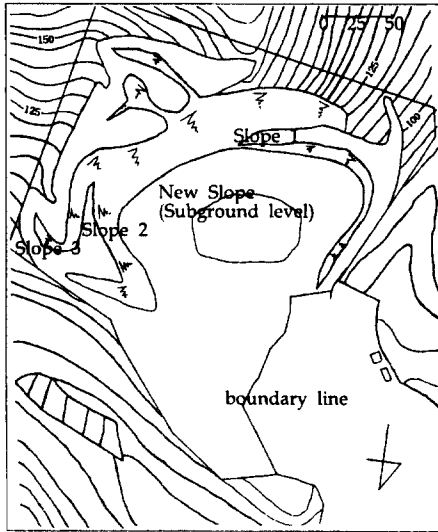


Fig. 1. Topographical map of S quarry.

Table 1. Direction of joint sets and slopes

	Dip direction	Dip	Height (m)
Joint set #1	335	84	
Joint set #2	266	54	
Joint set #3	110	53	
Slope #1	36	80	20
Slope #2	107	80	15
Slope #3	14	80	15

도 이루지만 평균적으로는 80°정도의 급경사이다. Table 1은 이 현장의 주된 절리군과 사면의 내역을 보인 것이다.

3. 계측

절리의 계측은 scanline 법에 의하였다. 바닥면으로부터 약 1.5 m 정도 높이로 5 m 길이의 측선을 설치하여 절리빈도, 충전물, 경사, 경사방향을 계측하였고 Schmidt 해머로 단축압축강도를 추정하였다.

절리간격은 절리시스템 발생의 중요 요소의 하나이며 이에 의해 채굴면의 절리 밀도나 연결성이 결정되므로 정교한 처리가 요구된다. 본 연구에서는 절리간격의 분포를 무작위(random) 분포(또는 음지수분포),

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad (1)$$

로 간주한 Priest와 Hudson(1976)의 RQD 추정식을 이용하였다. (1)식에서 λ 는 m당 평균 절리 수, $1/\lambda$ 은

절리 평균간격이다. 이로부터 이론 RQD의 일반식은

$$RQD_t^* = 100e^{-\lambda t} (\lambda t + 1) \quad (2)$$

이고, t 는 한계치로 RQD는 약 10 cm 이상의 코아를 계산하는 것이므로 0.1로 하여

$$RQD^* = 100e^{-0.1\lambda} (0.1\lambda + 1) \quad (3)$$

를 적용하였다.

절리의 방향성을 표현하는 방법에는 rose diagram을 이용한 방향성 분석법(선우, 1991), 평사투영법을 이용하는 방법 등이 있다. 본 연구에서는 scanline과 교차하는 모든 절리의 주향·경사를 측정하고 측정된 값들을 DIPS 프로그램으로 해석하여 절리군들의 주향·경사를 결정하였다. 이때 각 절리군의 방향성과 내부 마찰각과의 관계에 의해 파괴 형태와 가능성을 추정할 수 있다.

4. 안정성 해석

4.1 RMR

S산업(주)의 골재 채취 석산의 사면을 형성하고 있는 암체의 암반 등급은 사면의 부위에 따라 다르지만 대체적으로 우수한 것으로 나타났다.

Table 2는 각 사면에 대한 기초 RMR값을 나타낸 것이다.

우측정면 주사면(사면 1)의 RMR값은 86점, 좌측정면(사면 2)의 RMR값은 72점, 좌측정면(사면 1)의 RMR 값은 77점으로 이들 값은 기초 RMR이어서 사면의 방향성과 경사에 따른 보정이 필요하지만 기초 암반 등급은 아주 우수~우수에 속한다.

그러나 주사면인 사면 1은 높이가 20 m 이상으로 지나치게 높고 경사가 급하여 방향성 보정 값이 양호~불리에 해당하므로 경사방향에 의한 점수보정을 고려할 경우 이 사면들의 최종 RMR은 25~50을 감한 낮은 점

Table 2. Basic RMR value of 3 slopes in S quarry

	Slope 1	Slope 2	Slope 3
Intact strength	13	10	10
RQD(%)	19	19	19
Discontinuity Spacing	16	16	17
Discontinuity Condition	25	12	16
Groundwater Condition	15	15	15
RMR_{basic}	86	72	77

수가 되어 III(양호)-IV(불량)등급에 해당된다.

4.2 SMR

Romana(1993)에 의해 제안된 SMR 분류법은 암반 사면의 1차적인 안정성을 평가하는데 매우 유용한 방법으로 불안정한 파괴형태와 지보에 관한 간편한 방법을 제시하고 있다.

$$SMR = RMR + (F_1 \cdot F_2 \cdot F_3) + F_4 \tag{4}$$

여기서 F_1 은 절리와 사면의 주향 사이각 A에 의해 결정되고 그 범위는 1.0 (모두 거의 평행할 때)~0.15 (30°이상의 차이와 붕괴 가능성이 매우 낮은 경우)이며 다음의 식으로 표시할 수 있다.

$$F_1 = (1 - \sin A)^2 \tag{5}$$

F_2 는 평면파괴 형태의 절리인 경우 절리의 경사각 β_1 로 절리의 전단강도와 관련이 있다. 그 범위는 1.0 (절리의 경사각이 45° 이상)~0.15 (절리 경사각이 20° 미만)이며 다음의 경험식으로 쓸 수 있다.

$$F_2 = \tan^2 \beta_1 \tag{6}$$

한편 전도파괴의 경우 $F_2=1.0$ 이다.

또 F_3 는 사면과 절리의 경사각 사이의 관계로서 방향 및 경사의 적합도에 따라 0점에서 -60까지 보정된다. 또 F_4 는 굴착방법에 의한 경험적인 보정 요소이며 Table 3과 같은 점수가 부과된다.

사면과 절리의 경사각 사이의 관계는 사면과 절리가 평행할 때는 양호, 사면 경사각이 절리의 경사각보다 10°이상일 경우는 매우 불리한 조건이 발생하는 것으로 판단하였다. 사면 1, 2의 경우, 토폴링 파괴가 예상되고 (DIPS 해석결과 참조), 사면 2의 경우 평면파괴의 가능성도 포함하고 있다.

굴착방법에 의한 경험적인 보정요소는 수평굴 발파

로서 사면의 상태가 좋지 못하여 모두 과도 발파로 적용하였다.

보정계수를 적용한 각 사면에 대한 SMR값은 Table 4와 같다.

4.3 평사투영 해석

평사투영도에서 파괴 조건의 판정은 불연속면과 채굴면이 이루는 기하적 관계에 의하며 불연속면의 경사 방향이 사면의 경사방향과 거의 일치하고 경사가 불연속면의 경사보다 급한 경우는 평면파괴가, 두 불연속면의 교선의 경사방향이 사면의 경사방향과 거의 일치하고 사면 경사가 교선의 경사보다 급한 경우는 췌기파괴가, 불연속면의 경사방향이 사면의 경사방향과 거의 반대인 경우는 전도파괴가 예상되며 명백한 탁월방향인 없는 불연속면들이 무수히 산재하는 경우에는 원호파괴를 예상할 수 있다.

Fig. 2는 주채굴사면인 사면 1에 대한 평사투영도이다. 사면은 10으로 표시된 원호이며 각 절리군은 1, 2, 3으로 표시된 원호들이다. 그림에서 daylight envelope내에 극점들이 별로 포함되지 않는다. 평사투

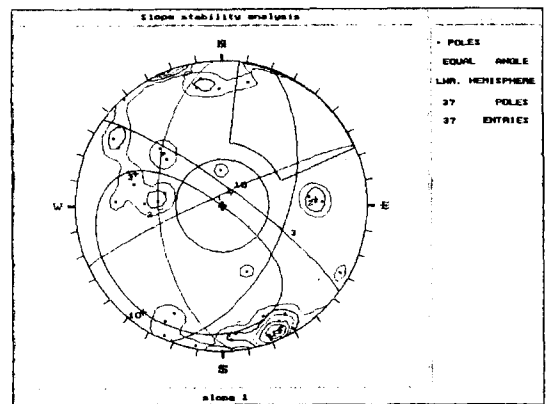


Fig. 2. Slope stability analysis on slope 1.

Table 3. Raiting adjustment for slope excavating method

Slope excavation	Natural slope	Presplitting	Smooth blasting	Traditional blasting	Excessive blasting
Adjustment	15	10	8	0	-8

Table 4. SMR evaluation of 3 slopes in S quarry

Slope	Basic RMR	F_1	F_2	F_3	F_4	SMR	Grade	Class	Stability	Failure mode	Support
1	86	0.15	1.0	-25	-8	74	II	Good	Stable	Rather blocky	Occasionally
2	72	1.0	1.0	-50	-8	13	IV	Very bad	Very unstable	Great plane failure	Reexcavation
3	77	0.15	1.0	-50	-8	61	II	Good	Stable	Rather blocky	Occasionally

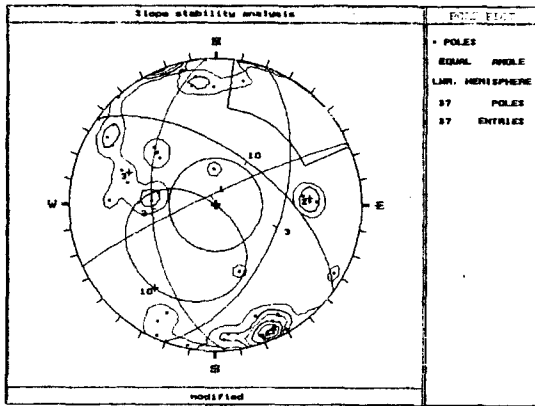


Fig. 3. Slope stability analysis on modified slope 1.

영 해석 결과 절리군 3에 의한 평면파괴의 가능성이 약간 있고 또 절리군 1의 일부가 포함되어 전도(토폴링) 파괴의 가능성이 있는 것으로 나타났다. 이 사면의 경우 방향의 설정이 유리하여 방향성 조정에 의한 개선은 많지 않아 보인다. Fig. 3은 절리군 1의 전도파괴를 방지하기 위해 사면의 경사를 60/035로 조정하여 평사투영 해석한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 전도파괴 영역에 포함된 극점의 수가 줄고, daylight envelope 내에 포함된 극점의 수도 미미하여 평면파괴의 가능성도 현저히 감소한 것을 볼 수 있다.

그러나 임시로 유지되는 채굴사면을 낮게 유지하는 것은 시공상의 불이익이 있으므로 다만 전도파괴의 가능성을 낮게 하고 수직발파 시공시의 천공용이도를 감안하여 경사를 1:3 즉 약 72°로 조정하였다. Fig. 4는 최종적으로 결정된 사면에 대한 해석 결과이다. 경사 60°의 경우보다 daylight envelope 내에 3번 절리군의

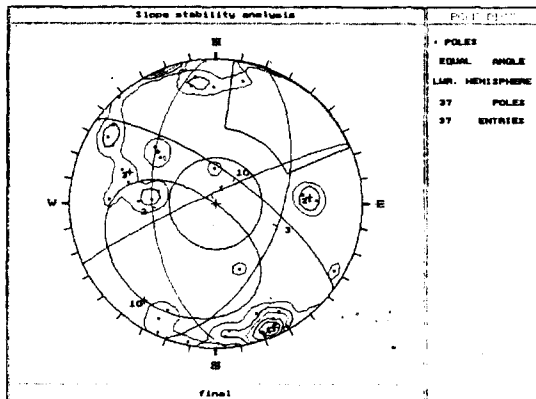


Fig. 4. Slope stability analysis on decided slope 1.

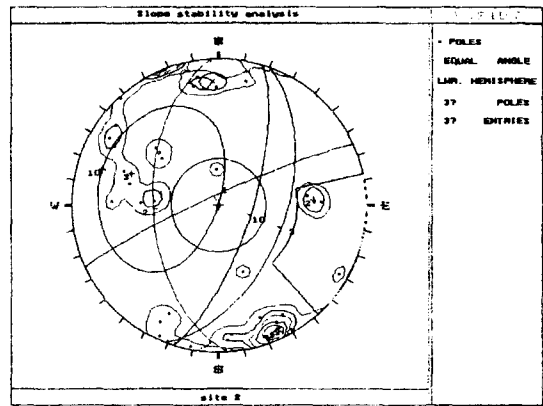


Fig. 5. Slope stability analysis on slope 2.

촉점들이 위치하여 평면파괴의 가능성이 더 많지만 채굴면의 방향과 절리군의 방향이 어긋나 있어서 큰 규모의 평면파괴 가능성은 없을 것으로 판단된다.

Fig. 5는 사면 2에 대한 해석결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 절리군 3의 극점들이 대부분 daylight envelope내에 포함되어 있다. 따라서 사면 2에서는 절리군 3에 의한 평면파괴의 가능성이 세 사면 중에서 가장 높은 것으로 나타났다. 또한 절리군 2에 의한 전도파괴의 가능성도 나타났다. 실제로 제2사면 주변에서는 낙반 사고가 수차례 발생한 바 있다.

절리군 2의 전도파괴와 절리군 3의 평면파괴를 방지하기 위해서는 경사를 40°로 낮춰야 하기 때문에 방향 조정이 더 합리적이다. 경사를 현재 상태와 유사하게 유지하고 방향을 바꾸는 경우 사면 2도 조정 사면 1과 같이 72/035로 하는 것이 적합한 것으로 된다. 이 경우 사면 2는 사면 1과 같아지므로 지형도에서 사면 2의 개발은 중단하고 사면 3의 경사와 경사 방향을 72/035로 조정하여 개발하는 것이 된다.

4.4 Block 이론

블록이론을 적용하여 현존 사면의 안정성을 평가한 결과 다수의 잠재핵블록이 형성되어 불연속면 간의 전단강도가 상실되거나 저하할 경우에는 안전율이 낮아질 것이 우려된다. 따라서 가급적 핵블록의 형성을 막아야 하고 이는 기존 절리면에 대해서 가장 바람직한 방향으로 채굴면의 방향과 경사를 조정하게 된다.

여기서는 기존 사면의 경우에 대해서는 경사를 조정하고 앞으로 가행하게 될 사면에 대해서는 경사를 수직발파에 적절한 값으로 정하고 사면의 방향을 결정하도록

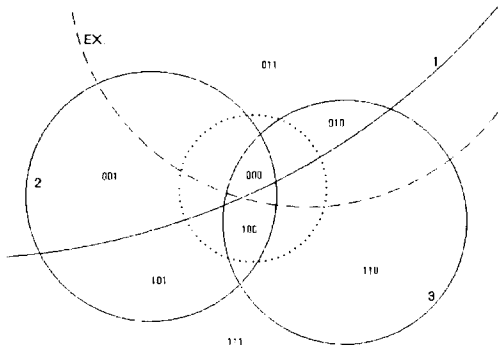


Fig. 6. Joint blocks of slope 1.

록 하였다.

사면 1 주변의 절리면과 채굴면이 이루는 절리피라미드는 Fig. 6과 같다. 이들 절리에 의해 결정되는 잠재 핵블록은 010이며 이를 피하기 위해 새롭게 형성될 사면의 방향은 경사를 72도로 유지할 경우 경사방향을 346도로 하는 것이 가장 좋을 것으로 판명되었다(Fig. 7). 블록이론은 절리군의 발달이 대단히 규칙적인 경암에서 형성되는 구조물에 가장 잘 적용될 수 있다. 절리의 변화가 많고 과도파쇄가 이루어지는 당 사면에서는 블록이론에 의해 경사방향을 채택할 때 절반에 육박하는 축점이 daylight envelope에 포함되는 결과를 초래하게 된다.

4.5 한계평형법

평면파괴의 해석을 크게 두 가지로 구분해 보면 사면에 속하지 않는 위쪽 부분에서 인장균열이 발생하는 경우와 사면 내에 인장균열이 발생하는 경우를 들 수 있다.

한계평형법의 적용을 위해서는 다음과 같은 가정이

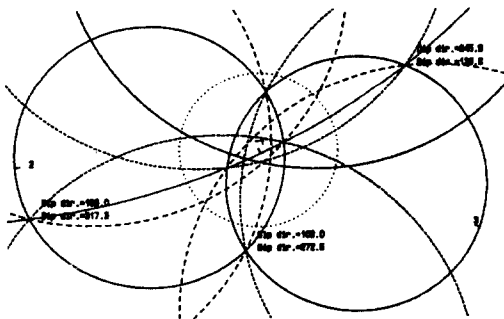


Fig. 7. Determination of direction for slope 1 by block theory.

필요하다(Hoek and Bray, 1981).

- 활동면과 인장균열의 주향은 사면방향에 평행하다.
- 인장균열은 수직이고 인장균열 깊이까지 물이 차 있다.
- 물은 인장균열의 저부를 따라 활동면으로 들어가고 활동면을 따라 침윤한다.
- 각각의 힘 W(Block의 무게), U(활동면에서 수압에 의해 위로 작용하는 힘), V(인장균열에서의 수압)들은 활동체의 중심을 향해 작용한다. 또 이 বল력에서 회전력에 의해 야기되는 모멘트는 없다고 가정하고 따라서 파괴는 단지 활동에 의해서만 발생한다고 본다. 이 가정은 실제거동은 아니지만 발생하는 모멘트는 무시할 수 있을 정도로 작다.

이러한 사면에서의 안전율(F)은 아래 식으로 정의된다(Fig. 9 참조).

$$F = \frac{CA + (W \cos \psi_p - U - V \sin \psi_p) \tan \phi}{W \sin \psi_p + V \cos \psi_p} \tag{7}$$

단, H는 사면의 높이, z는 인장열극의 깊이, ψ_p 는 사면의 경사, ϕ 는 내부마찰각이며, A는 점착력 작용거리로서 $A = (H - z) \operatorname{cosec} \psi_p$ 로 표시된다. 또 활동면에서 수압에 의해 위로 작용하는 힘 U는 물의 단위중량을 γ_w , 열극내 물의 깊이 z_w 라 할 때 $U = 1/2 \cdot \gamma_w z_w (H - z) \operatorname{cosec} \psi_p$ 로, 인장균열에서의 수압 V는 $V = 1/2 \cdot \gamma_w z_w^2$ 로 표시된다. 그리고 C는 점착력이며 W는 활동하는 암반의 중량이다.

사면의 상부에 인장균열이 존재할 때는

$$W = \frac{1}{2} \gamma H^2 [(1 - (Z/H)^2) \cot \psi_p - \cot \psi_f] \tag{8}$$

이며 사면 내에 인장균열이 존재할 때는

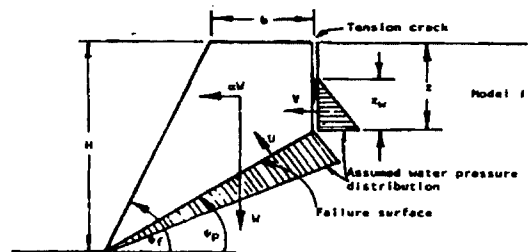


Fig. 9. Hydraulic pressure distribution on the tension crack and sliding plane.

$$W = \frac{1}{2} \gamma H^2 [(1 - Z/H)^2 \cot \psi_f (\cot \psi_p \tan \psi_f - 1)] \quad (9)$$

이다. 경사면이 급하고 출수가 없으므로 완전히 건조되었다고 보면 V, U는 0이므로

$$F = \frac{CA}{W \sin \psi_p} + \cot \psi_p \tan \phi \quad (10)$$

으로 된다.

세 사면 모두 절리군 3에 의한 평면파괴의 가능성이 있으나 채굴면에 대해 주향이 평행에 가까운 사면은 제 2사면 뿐이므로 해석은 제 2사면에 적용한다.

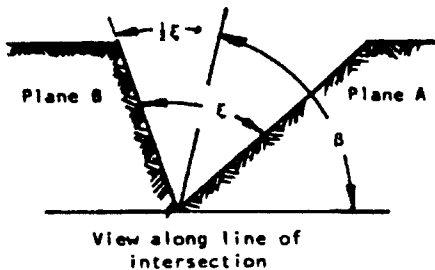
S산업(주) 현장의 요소들은 점착력 C=5 kPa, 사면의 경사각 $\psi_f=80^\circ$, 절리군의 경사각 $\psi_p=53^\circ$, 단위중량 $\gamma=2.6 \text{ t/m}^3$, 공극수압비 $\gamma_w=0$, 사면의 높이 H=15 m, 내부마찰각 $\phi=26^\circ$, 인장균열의 깊이 $z=0$ 등이다.

해석 결과, A=18.8 m, W=168.8 ton/m로부터 안전율 F는=1.06으로 되어 불안한 안정을 유지하고 있다. 따라서 부분적으로 전단강도가 낮은 경우에는 파괴가 시작될 수 있다.

1.5 정도의 안전율을 확보하기 위해서는 점착력을 8 kPa 이상으로 향상시키거나, 사면의 높이를 10 m 이하로 유지하여야 한다. 생산을 위한 채굴사면에서는 점착력의 강화가 곤란하므로 발파에 의한 과도파쇄를 줄이고 가급적 사면의 높이를 10 m 이하로 유지할 것이 요구된다.

평사투영 해석에서는 주 사면에 대하여 교차선 I₁₃에 의한 썩기 파괴의 가능성이 있는 것으로 나타났다.

썩기파괴의 경우(Fig. 10) 썩기파괴가 마찰력에 의해서만 저항하고 마찰각은 양쪽면 모두에서 같다고 가정하였다(Hoek and Bray, 1981).



$$F = \frac{\sin \beta}{\sin 1/2\xi} \cdot \frac{\tan \phi}{\tan \psi_f} \quad (11)$$

$\xi=43^\circ$, $\beta=74.5^\circ$, $\psi_f=50^\circ$, $\phi=26^\circ$ 이므로 안전율은 F=1.07이 된다. 이는 평면파괴의 경우와 비슷한 값이나 평사투영도 상의 썩기파괴 가능성에 대비하면 다소 높은 값이다.

4.6 Maximum Likelihood Method

안정성 해석의 최적식으로서 원호파괴로 가정할 경우

$$F = 2.27 \left(\frac{c \operatorname{cosec} \psi_f}{\gamma H} \right) + 1.54(1 - \gamma_w) \cot \psi_f \tan \phi \quad (12)$$

이며 썩기파괴로 가정할 경우

$$F = 0.175 \left(\frac{c \operatorname{cosec}^2 \psi_p}{\gamma H (\cot \psi_p - \cot \psi_f)} \right) + 1.46 \cot \psi_p \tan \phi \quad (13)$$

를 적용한다. (Sah, 등, 1994)

당 사면은 암반이 파쇄되어 사면 내 절리가 개방된 경우들이 많이 있으나 풍화에 따른 원호상 파괴는 찾아볼 수 없다. 원호파괴를 가정한 경우의 안전율은 (12)식을 적용하여 F=0.39로 되고 썩기파괴로 가정할 경우에는 (13)식을 적용하여 F=0.74가 된다. 그러나 사실적인 값이라고 할 수는 없다.

4.7 검토

한계평형법 (Limit Equilibrium Method)에서는 1 내외의 안전율을 보이고 있는데 비하여 Maximum Likelihood Method에 의한 해석결과에서는 1 미만의 낮은 안전율을 보인다. 이러한 결과는 RMR이나 SMR

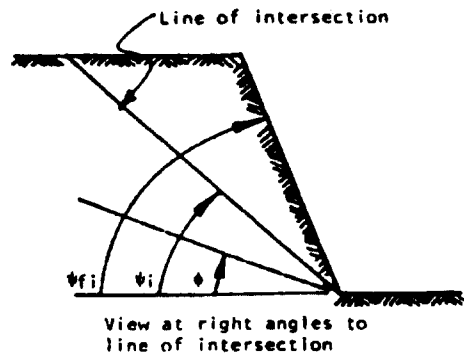


Fig. 10. Wedge failure on two joint surface with friction only.

에서의 결과와도 많은 차이를 나타냄을 알 수 있다.

본 연구의 대상 사면은 십여년 전부터 채굴작업이 진행되어 왔던 사면으로 일반 토질사면 보다는 사면높이가 매우 높고 경사가 가파르다. 그러나 사면높이가 높은 일반 토질사면에서 발생할 수 있는 붕괴나 heaving 등이 일어나지 않았던 것으로 보아 토질사면에서 흔히 발생하는 원호파괴의 해석은 불합리한 것으로 생각된다. 따라서 Maximum Likelihood Method의 적용은 재고하여야 할 여지가 있다고 여겨진다.

반면 암반사면의 굴착상태에 따른 SMR의 조정방법은 재래식 수평발파를 주로하는 우리나라의 석재광산사면에는 과소하게 적용되는 것을 알 수 있다. 즉 일반적으로 우리나라의 중소규모의 골재광산에서는 수평굴 발파를 적용하며 대체적으로 암반사면이 역경사에 가까운 불안정사면으로 되는데 SMR에 있어서는 이러한 정도의 발파굴착에 대한 보정점수가 마련되어 있지 않은 형편이다. 따라서 SMR에 의한 평가시 실제 보다 사면의 안정성이 과대평가되는 경향을 보인다고 생각된다.

한편 평사투영법과 블록이론에 의한 암반사면의 평가결과는 암반의 강도나 절리면의 풍화정도와 같은 요소를 고려할 수 없다. 따라서 이들은 불연속면의 상태 보다는 방향성에 따른 파괴의 가능성이나 양상을 나타낸다. 그러면서도 평사투영법은 많은 수의 불연속면 측정 자료를 활용하여 확률론적인 접근이 이루어지는데 대하여 블록이론은 대표적으로 절리군이 형성된 경암 사면에 대해 특히 적용성이 높다고 볼 수 있다.

따라서 이러한 점을 고려한다면 당 사면의 경우, RMR이나 SMR에 의한 판정은 다소의 과대 평가가 이루어진다고 볼 수 있고 절리군의 형성이 뚜렷하나 사면 별로 변동을 보이고 있는 점에서 평사투영에 의한 적용이 더 신빙성이 있다고 판단된다. 한계평형법의 적용은 절리의 방향성 등을 충실히 고려하여야 할 것으로 판단된다.

이들 방법들의 적용 가중치와 인자를 망라하는 인공 지능형의 전문가시스템이 개발 중이며 앞으로 좀 더 신뢰성이 높은 안정성 평가가 이루어질 것으로 기대된다.

5. 발파

골재석산 사면의 안정에 가장 큰 영향을 미치는 것은 불연속면의 방향과 경사이며 이 면들의 역학적 강도와 마찰각 등도 사면의 붕괴가능성을 좌우한다. 중소규모

의 속성상 지형적인 영향에 따라 사면의 방향이 결정되므로 조절가능한 인자는 굴착방법과 사면의 경사라고 할 수 있다. 특히 굴착방법은 사면 내의 불연속면의 저항성에도 큰 영향을 미치고 잘못된 발파에 따라 절리면이 활성화되는 등의 어려움도 많으므로 굴착방법의 선택은 대단히 중요한 의미를 띠고 있다.

본 연구에서는 수직천공에 의한 발파를 표준으로 하였다. 사면의 높이가 20 m 이상으로 높은 사면에서 수평천공에 의한 발파를 실시할 경우, 역경사 사면(overhang)의 생성을 초래할 수 있다. 이는 결과적으로 전도 및 붕락의 위험 등 사면의 안정성에 커다란 위험요소로 작용할 수 있다. 또한 대의 발생이 증가되어 상대적으로 많은 소할발파 비용을 지불하게 되어 결국 생산비용의 상승을 초래하게 된다. 더욱이 각 사면, 특히 사면 2의 경우 전도파괴의 가능성이 매우 높기 때문에 절대적으로 수평천공 발파는 지양해야 할 것으로 판단되었다.

본 연구에서의 발파계획은 새로 채굴이 시작될 바닥면에 대해 수립하였다. 발파당 채굴부피는 크리셔의 작업능력에 의해 결정할 수 있다. 본 사면의 채굴작업 진행속도를 고려하여 새로운 사면의 채굴 속도를 조정한다.

1 발파당의 채굴부피는 폭 6 m, 길이 34 m, 높이 10 m로 해서 부피는 2,000 m³ 정도로 하며, 3 열로 열당 천공수는 17 공으로 한다. 사면의 높이가 10 m이기 때문에 천공장은 12 m로 하고 공간간격과 열간간격은 2

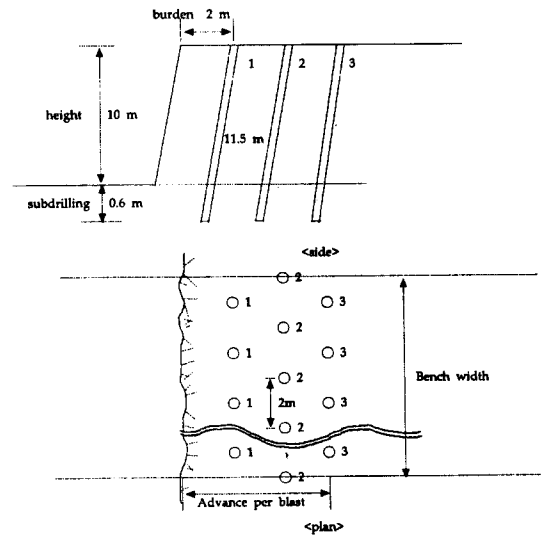


Fig. 11. Blasting pattern.

m로 한다. 사면의 경사와 경사방향은 60/036으로 한다. Fig. 11은 발파 패턴도를 그린 것이다.

새로운 사면에서의 발파 결과는 SMR 결과에서 재래식 발파로 간주하더라도 '우수' 이상의 평가를 받을 수 있고 또 후방파쇄(back break)가 제어되어 역사면이 방지되며 사면의 유지에 절대적인 기여가 된다. 실제 시공 결과에서도 이후 어떤 형태의 사면 붕락이 발생하지 않았다.

6. 결 론

S산업(주) 골재 석산의 가행중 및 채준중 사면에 대하여 여러 가지 방법으로 안정성을 검토한 결과는 다음과 같다.

1) 기초 RMR에 의한 등급은 사면 1(우측 정면, 주사면), 사면 2(좌측 측면), 사면 3(좌측 정면)이 각각 86, 72, 77으로 우수하였으나 총 RMR은 방향성이 불리하여 III등급 정도에 해당하였다. SMR분류에 의한 등급은 사면 1과 사면 3은 74, 61로 II등급에 해당되고 사면 2는 13으로 IV등급에 해당하였다.

2) 평사투영해석에 의해 주사면은 경사방향을 현행으로 고정하고 경사를 1:3 즉 72도로 조정하였다. 제2사면은 방향성이 좋지 않아 주사면과 같은 방향으로 개발 하는 것이 좋을 것으로 판단되었다.

3) 한계평형법에 의한 해석 결과, 썩기과괴가 예측되는 제1사면과, 평면과괴가 예측되는 제2사면은 1 내외의 낮은 안전율을 보였다. 그러나 Maximum Likelihood Method에서는 원호과괴와 썩기과괴에 대하여 낮은 안전율을 보여 기존의 해석과 큰 차이를 보였다.

4) 역경사면의 발생을 방지하여 전도과괴의 위험요

소를 감소시키고, 또한 옥석의 발생을 억제하기 위해 신규사면에 대해서 수직발파 패턴을 제시하였다.

감사의 말씀

본 연구는 산학협동재단이 지원한 "절리면이 발달한 골재석산의 최적개발을 위한 발파 및 사면유지" 연구 결과의 일부이다. 재단관계자와 협동연구비를 제공해주신 S산업(주) 박석근 사장님 이하 관계자 여러분, 그리고 논문 전반에 걸쳐 토의하고 오류를 수정하여주신 한국자원연구소 선우 춘 박사님에게 심심한 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 선우 춘, 1991, 불연속면의 빈도분포 해석을 위한 전산 program, 한국자원공학회지 28, 113~121
2. 양형식, 대한광업진흥공사, 1995, 암반역학 전문가 시스템 (ROMES 1.0), 한국컴퓨터 프로그램보호회 등록번호 95-01-12-1882
3. Goodman. R.E. and G. Shi, 1985, Block Theory and Its Application to Rock Engineering, Prentice-Hall, 157-202
4. Hoek, E. and J.W. Bray, 1981, Rock Slope Engineering, Inst. Min. Metall., London, 150-155, 199-203.
5. Priest, S.D. and J.A. Hudson, 1976, Discontinuity spacings in rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 13, 135-148
6. Romana, M.R. 1993, A geomechanical classification for slope : Slope Mass Rating, in Comprehensive Rock Engineering, Pergamon Press, Vol. 3, 575-600
7. Sah, N.K., P.R. Sheorey and L.N. Upadhyaya, 1994, Maximum likelihood estimation of slope stability, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 31.1, 47-53