

## 절리 간격이 암반 사면의 안정성에 미치는 영향 Influence of Joint Spacing to Rock Slope Stability

윤운상<sup>1)</sup>, Woon-Sang Yoon, 권혁신<sup>2)</sup>, Hyeok-Shin Kwon, 김정환<sup>3)</sup>, Jeong Hwan Kim

<sup>1)</sup> 서울대 지구환경과학부 박사과정, Graduate Student, S. of Earth and Environmental Sciences, SNU.

<sup>2)</sup> 서울대 지구환경과학부 석사과정, Graduate Student, S. of Earth and Environmental Sciences, SNU.

<sup>3)</sup> 서울대 지구환경과학부 교수, Professor. S. of Earth and Environmental Sciences, SNU.

**SYNOPSIS** : Characteristics of joint orientation, length, spacing and their distribution are very important factors for slope stability. Especially, the effect of joint spacing is an essential factor of slope stability. This study is to analyze the effect of joint spacing in cases of sliding and toppling, which is a typical failure mode. Joint spacing can be divided into vertical spacing(spacing) and horizontal spacing(gap). And then, the spacing/length ratio of joint directly affects rock slope failure. When the ratio is below 0.05, the possibility of failure is rapidly increased. In case of toppling, the possibility of failure depends on the ratio of spacing to height of slope ratio slope. As the ratio decreases, the possibility of toppling failure increased. The critical ratio of spacing to height of slope is determined by the dip angle of the slope and the orientation of joint sets.

**Key words** : joint spacing, rock slope stability, sliding, toppling

### 1. 서 론

절리가 발달한 암반 사면에서 절리의 분포 특성, 즉 절리의 방향, 연장성, 간격은 사면의 파괴와 관련된 가장 주요한 요소 중의 하나이다. 일반적으로 암반 사면의 해석에서 흔히 사용되는 평사 투영 해석 및 활동면에 대한 한계 평형 해석은 주로 연장성이 긴 절리를 가정하여 암반 사면을 관통하는 활동면에 대한 썩기의 형성과 안전율에 대한 평가를 수행하고 있다. 그러나, 많은 경우 암반 사면의 파괴는 하나의 불연속면에 의한 파괴보다는 수개의 불연속면과 관련하여 형성된 활동면에 의해 발생하기 때문에 암반 사면의 안정성을 평가하는 데 있어서 절리 간격 요소는 간과할 수 없는 중요한 역할을 수행한다. 이에 대해 Jennings(1970) 등은 사면의 활동 파괴에 대해 절리의 간격의 영향을 검토한 바 있으며, 전도 파괴에 있어서도 Hoek and Bray(1981)에 의해 절리의 간격을 고려한 안정성 평가가 실시되었다.

이 논문에서는 암반 사면의 주요한 파괴 형태인 활동 파괴 및 전도 파괴에 대한 절리 간격의 영향을 기존 연구자들의 성과를 바탕으로 이를 검토하고, 간격과 사면 안정성의 상관 관계를 새롭게 규명하고자 한다. 활동 파괴에 미치는 간격의 영향은 주로 제한적인 절리 길이를 가지는 불연속면의 발달 상태를 위주로 분석하였으며, 전도 파괴에 있어서는 두개의 연속적인 절리의 발달상태를 중심으로 분석하였다. 또한 각각의 논의에서 수치해석적 기법을 활용하였다. 여기서 사면 내 발달하는 불연속면 간격은 두 가지 요소로 정의하여 기술하였으며, 동일 평면 상에 있는 두 절리 사이의 간격을 수평 절리 간격(gap), 평행한 두 절리의 법선 간격을 수직 절리 간격(spacing)으로 정의하였으며, 하나의 절리군에 속한 절리는 서로 평행하다고 가정하였다.

## 2. 절리 간격과 암반 사면의 활동 파괴

2차원 암반 사면의 활동 파괴는 활동면의 특성에 따라 그림 1과 같이 세가지의 형태로 구분할 수 있으며, 이 때 각 활동면은 다음과 같이 정의하였다.

첫째, 하나의 연속적 절리에 의한 활동면 (single joint system)

둘째, 두 개 이상의 절리군의 상호 교차에 의해 형성된 활동면 (joint-joint system)

셋째, 고립된 절리와 이 사이의 암교(rock bridge)에 의해 형성된 활동면 (joint-rock bridge system)

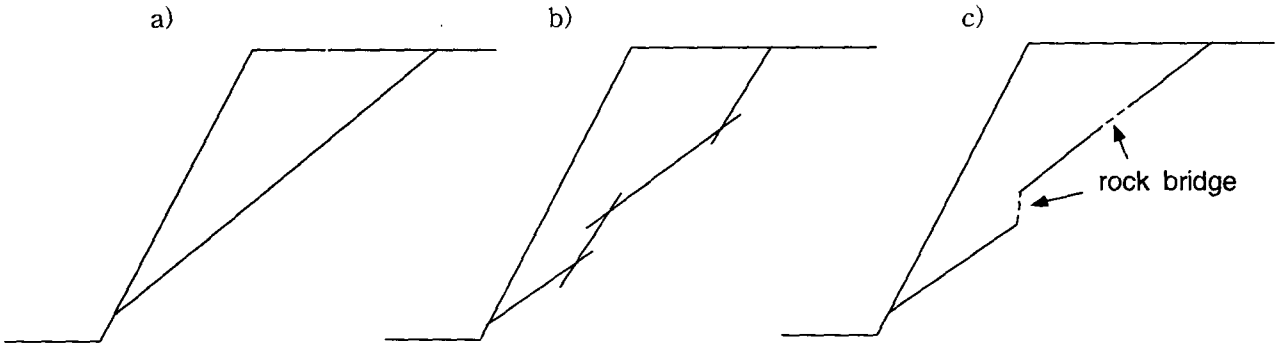


그림 1. 암반 사면의 활동면 형태. a) single joint, b) joint-joint, c) joint-rock bridge system

일반적으로 사면의 파괴면에서 확인되는 활동면의 계단상(steped) 형태가 두 번째 및 세 번째의 경우에 의한 것으로 판단되어지며, 이 중 세 번째 경우인 암교가 존재하는 활동면의 경우 활동면에 비해 대단히 작은 암교라 할 지라도 암교의 활동에 대한 강한 저항력을 가질 수 있다. 따라서 이 논문에서는 절리의 간격이 결정적 역할을 하는 세 번째 경우를 중심으로 두 개 이상의 절리군의 교차에 의한 활동면 형성으로 확장시킬 수 있는 안전율 공식으로 제안하고, 이를 토대로 사면의 활동 파괴와 간격의 상호 관계를 분석하였다.

### 2.1 Jennings(1970)와 Einstein et al(1983)의 접근

Jennings(1970)는 그림 2와 같이 동일 평면상에 존재하는 불연속면과 그 사이의 암교(rock bridge)를 고려하여 다음 식 (1)과 같이 절리 연장성(persistence, K)를 정의하고, 암교부의 전단저항력( $R_r$ , 식(2))과 절리부의 전단 저항력( $R_j$ , 식(3))에 의해, 이에 의해 전체 활동면의 전단강도( $c_a$ ,  $\phi_a$ )와 전단 저항력( $R$ )을 아래 식 (4), (5), (6)과 같이 제안하였다.

$$K = \frac{\sum JL}{\sum JL + \sum RBR} \quad (1)$$

$$R_r = (\sigma_a \tan \phi_r + c_r)A \quad (2)$$

$$R_j = (\sigma_a \tan \phi_j + c_j)A \quad (3)$$

$$c_a = (1 - K)c_r + Kc_j \quad (4)$$

$$\tan \phi_a = (1 - K) \tan \phi_r + K \tan \phi_j \quad (5)$$

$$R = \frac{A_r}{A} R_r + \frac{A_j}{A} R_j = (\sigma_a \tan \phi_a + c_a)A \quad (6)$$

JL: 절리부의 길이, RBR: 암교의 길이, A: 활동면의 총 길이,  $A_r$ : 암교부의 길이(=  $\sum RBR$ ),  $A_j$ : 절리부의 길이(=  $\sum JL$ )  
 $\sigma_a$ : 활동면에 작용하는 평균 수직응력,  $c_r$ ,  $c_j$ : 암교 및 절리의 점착력,  $\phi_r$ ,  $\phi_j$ : 암교 및 절리의 마찰각

그러나, Jennings(1970)의 경우에 불연속면이 동일 평면에 있다는 가정 하에 발생하는 파괴(in-plane failure)를 고려한 것으로서, 실제 암석의 경우에 전단 강도에 비해 인장강도가 현저히 작으므로 오히려 이러한 동일 평면상의 활동보다는 불연속면간 인장 균열의 발달에 의한 파괴(en-echelon failure)가 보다 일반적인 경우가 될 수 있다 (Einstein et al, 1983). 이에 따라 Einstein et al(1983)은 암교가 사면의 활동 파괴에 미치는 영향을 활동 불연속면과 동일 평면 또는 이 불연속면과 저각으로 형성되는 경우 (in-plane or low-angle transition) condition)와 활동 불연속면과 고각을 이루는 경우(high-angle transition)로 구분하여 암교의 전단저항력을 다음과 같이 구분하여 적용하고자 하였다(그림 3).

<In-plane or low-angle transition>

저항력 R = 전단 강도 × 암교의 길이

<high-angle transition>

저항력 R = 인장 강도 × 암교의 길이

이에 따라 활동면을 각각의 절리부와 암교부 절편으로 구분한 안전경계(safety margin)는 그림 2b에서 다음 식 (7)과 같이 정의된다.

$$SM = \sum_{i=0}^n SM_i = \sum_{i=0}^n (R_i - W_i \sin \theta) \quad (7)$$

SM<sub>i</sub>: 각 절편의 safety margin, R<sub>i</sub>: 각 절편의 저항력, W<sub>i</sub>: 각 절편의 중량, θ: 활동 불연속면의 경사각

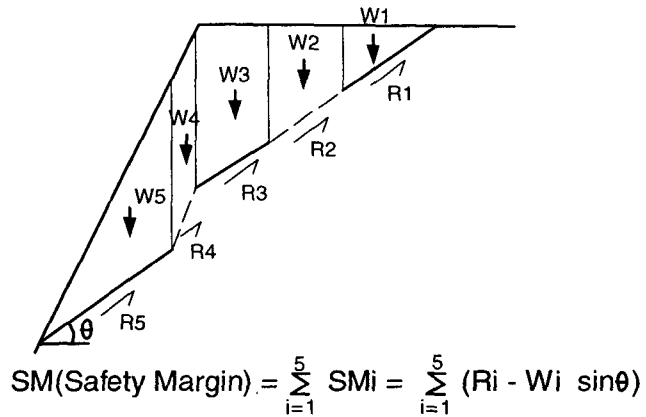
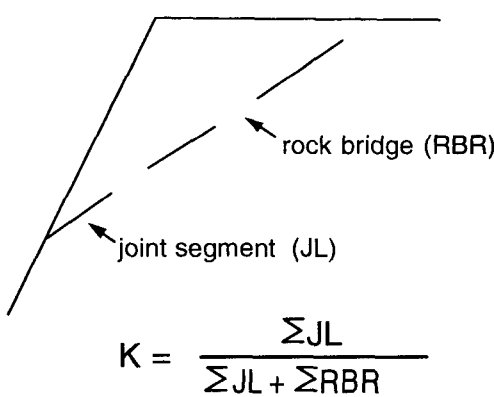


그림 2. Jennings(1970)의 절리 연장성(K)      그림 3. Einstein et al(1983)의 암교를 고려한 안전 경계

## 2.2 암교가 존재하는 활동면의 안전율

이 연구에서는 불연속면의 수직 간격(spacing) 및 수평 간격(gap)에 의해 여러 각도로 형성될 수 있는 암교에 대하여 암교의 활동이 동일한 경사각을 가진 불연속면 상에서 발생한다고 가정할 때, 암교가 놓이는 두 불연속면 사이의 수직 간격 거리(RBS)와 수평 간격 (RBG)에 의한 암교의 저항 성분을 다음 식과 같이 인장 저항(R<sub>rt</sub>, 식(8))와 전단 저항(R<sub>rs</sub>, 식(9))으로 구분하고, 이에 절리부의 전단 저항(R<sub>j</sub>, 식(10))을 더하여 전체 활동면의 총 저항력을 구하여 식 11과 같이 안전율을 정의하였다.(그림 4).

$$R_n = T_r \cdot \sum RBS \quad (8)$$

$$R_{rs} = (c_r + \sigma_n \cdot \tan \phi_r) \cdot \sum RBG \quad (9)$$

$$R_j = (c_j + \sigma_n \cdot \tan \phi_j) \cdot \sum JL \quad (10)$$

$$F.S. = \frac{\text{Total Resistance}}{\text{Driving Force}} = \frac{R_n + R_{rs} + R_j}{W \cdot \sin \theta} \quad (11)$$

RBS: 암교의 불연속면에 대한 수직 성분 길이(=spacing)

RBG: 암교의 불연속면에 대한 수평 성분 길이(= gap)

JL: 불연속면의 길이,  $\sigma_n$ : 평균 수직 응력

Tr: 암교의 인장 강도,  $c_r, c_j$ : 암교 및 절리의 점착력,

$\phi_r, \phi_j$ : 암교 및 절리의 마찰각

W: 활동 암괴의 총 중량

$\theta$ : 활동 불연속면의 경사각

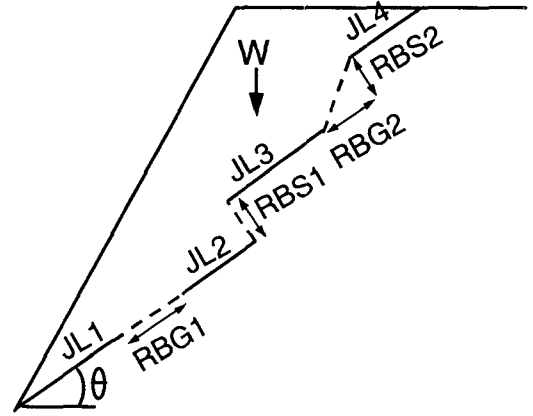


그림 4. 암교가 존재하는 활동면의 간격 성분

위에서 제안한 안전율 공식은 두 개 이상의 절리군이 교차하는 계단상 활동면에도 적용이 가능하며, 여기서는 이 식을 이용하여 암교 형태의 두가지 예(Case 1, Case 2)를 설정하여, 불연속면의 분포 특성에 따른 두 경우의 파괴 특성을 분석해 보았다 (그림 5).

두 예의 안정성 분석에 사용된 안전율 공식은 아래 식 (12), (13)과 와 같으며, 경사 90°의 법면과 2,500kg/m<sup>3</sup>의 단위 중량 및 45°의 불연속면 경사각을 가정하였다.

Case 1: 활동면에 수직인 암교 조건 (rock bridge is normal to sliding plane)

$$F.S. (\text{safety factor}) = \frac{R_n + R_j}{\text{Driving Force}} = \frac{T_r \cdot \sum RBS + (c_j + \sigma_n \cdot \tan \phi_j) \cdot \sum JL}{W \cdot \sin \theta} \quad (12)$$

Case 2: 활동면과 평행한 암교 조건 (rock bridge is parallel to sliding plane)

$$F.S. (\text{safety factor}) = \frac{R_{rs} + R_j}{\text{Driving Force}} = \frac{(c_r + \sigma_n \cdot \tan \phi_r) \cdot \sum RBG + (c_j + \sigma_n \cdot \tan \phi_j) \cdot \sum JL}{W \cdot \sin \theta} \quad (13)$$

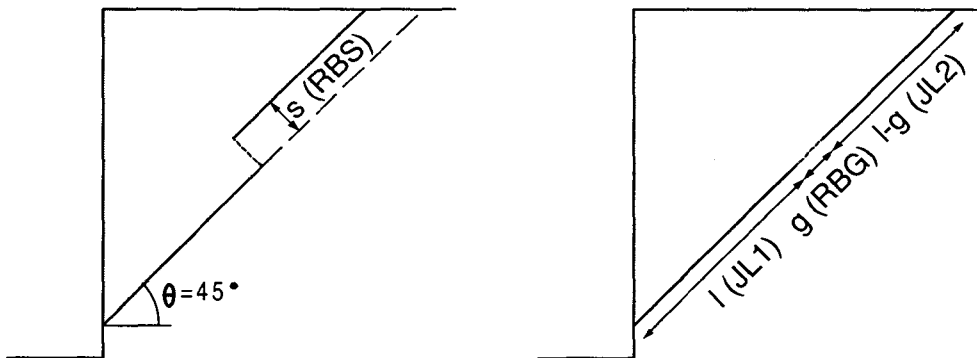


그림 5. 암교가 존재하는 활동면의 두 형태 분석, a) 활동면에 수직인 암교, b) 활동면에 평행한 암교

두 예에 대해 불연속면의 간격/길이 비에 따른 안전율과 Case 1에 대한 불연속면의 간격/길이 비의 변화에 따른 안전율이 1일 때의 임계 인장 강도, Tc(식 14)를 비교해 보았다.

$$T_c = \frac{W \cdot \sin \theta - (c_j + \sigma_n \cdot \tan \phi_j) \cdot \sum JL}{\sum RBS} \quad (14)$$

그림 6a는 암석의 인장강도를 1MPa로 가정하였을 때의 건조 시기 안전율을 도시한 것으로서 Case 2에서는 암석의 점착력이 인장강도의 2배인 경우를 고려하였다. 동일한 간격/길이 비에서 Case 1이 Case 2에 비해 2배 이상 불안정한 안전율을 보이고 있으며, Case 1의 경우 길이/간격 비가 약 0.05, Case 2에서는 약 0.02일 때, 안전율이 1인 한계 상태에 도달하는 것으로 분석되었다. 따라서 Case 1과 같이 불연속면의 사이에서 인장균열의 발달로 인한 파괴가 보다 암반 활동 파괴에 취약한 것으로 판단된다.

또한 Case 1에서 건조 시 또는 완전 포화 시의 간격/길이 비에 따른 암석의 임계 인장 강도를 비교해 본 결과 (그림 6b), 건조 시의 간격/길이 비에 대한 임계 인장강도는 길이 간격 비가 0.05 이하인 경우 1MPa 이상으로 급격히 증가하고 있어 사면의 안정성에 대한 주의가 필요하며, 이러한 결과는 개별요소법 수치해석 프로그램인 UDEC(Cundall & Hart, 1993)을 이용하여 비교한 결과와도 잘 일치하고 있다. 불연속면과 암교가 완전히 포화된 상태를 가정하였을 경우, 임계 인장강도는 보다 증가하여 길이 간격 비가 0.1이하일 때, 1MPa 이상으로 급격히 증가하여 보다 그 위험성이 증대됨을 알 수 있다.

따라서 암교의 형성을 가정한 사면에서 사면의 안정은 불연속면의 간격과 길이의 비에 의해 가장 큰 영향을 받으며, 특히 수직 간격(spacing)과 길이의 비가 0.05 이하에서 특별한 주의가 필요할 것으로 생각되며, 절리의 간격/길이 비에 의해 다음 표 1과 같이 평가할 수 있다.

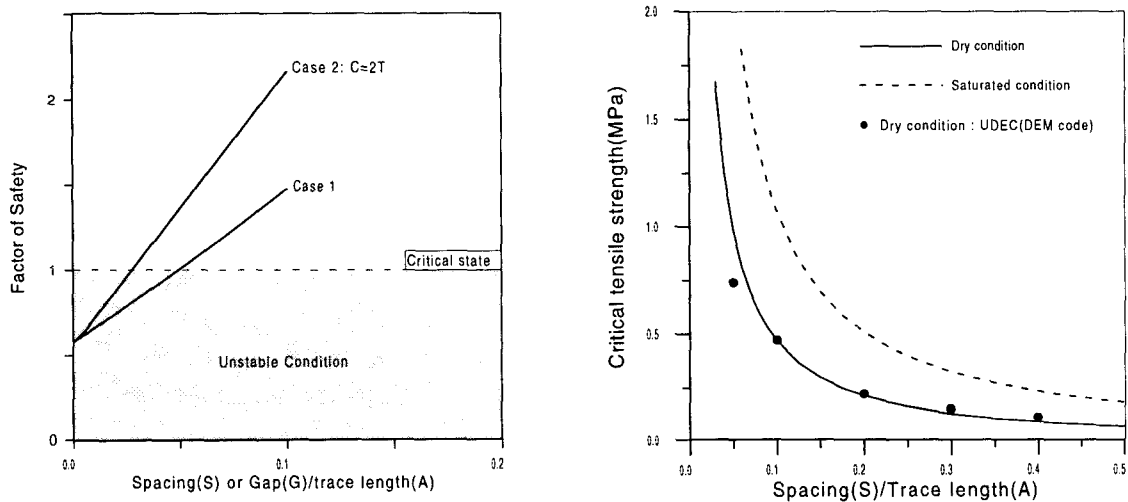


그림 6. 불연속면의 간격 및 길이에 따른 사면의 안정성(a)과 임계 인장 강도(b)

표 1. 불연속면의 간격/길이 비에 의한 절리 망 안정성 평가 등급 제안

불연속면의 간격/길이	<0.05	0.05 - 0.1	0.1 - 0.5	0.5 - 1	1 <
등급	매우 불안정	불안정	보통	안정	매우 안정

### 2.3 활동 파괴 사례 분석

위의 안전율 식을 이용하여 실제 활동 파괴된 사면 사례(김정환 외, 2000)에 대해 안정성을 평가하였다. 이 사면에서 파괴 지점으로부터의 이격 거리에 따른 불연속면의 밀도 및 간격/길이 비는 아래 그림 7과 같다. 이 사례에서 활동 파괴의 위치는 절리 밀도가 가장 높고, 간격/길이 비가 0.05이하인 지점에서 발생하여 사면의 활동 파괴가 불연속면의 간격/길이 비에 직접적으로 연관되어 있음을 잘 보여주고 있다. 이 조사 자료에 기초하여 on-lap 조건을 가정하여 활동면을 추정하고 이에 대한 사면의 안전율을 구하면 여타의 절리군의 교차를 상정하지 않은 상태에서도 인장강도 1MPa, 마찰각 25° 에서 불안정한 상태에 놓인다. 특히 암교의 고립적인 3차원 분포를 고려하거나, 여타의 절리와 교차될 가능성을 배제하지 않는다면 암교의 인장 강도가 훨씬 높은 상태에서도 사면은 불안정한 조건에 처할 수 있다 (김정환 외, 2000).

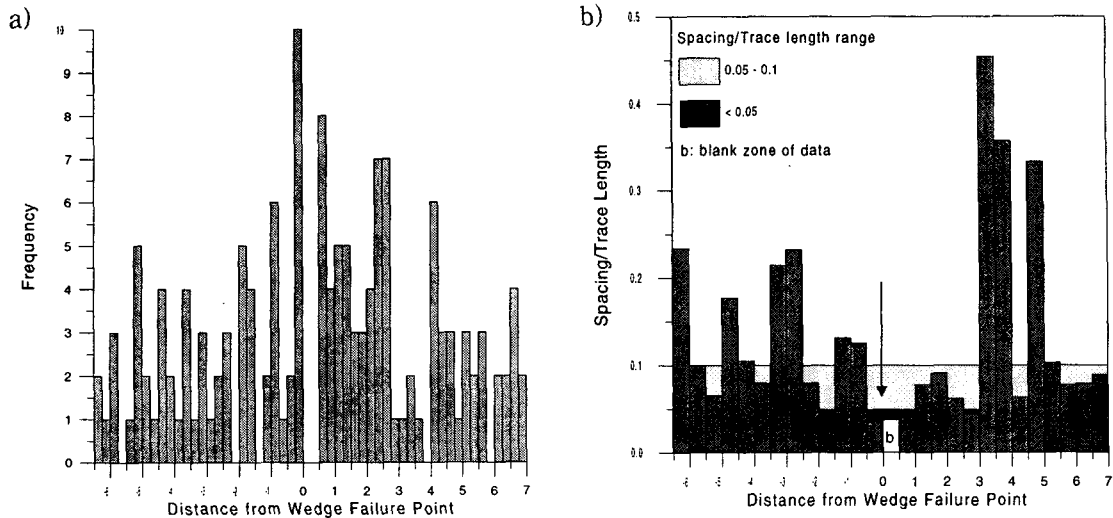


그림 7. 파괴 지점(0)으로부터의 거리에 대한 불연속면 분포. a) 절리 밀도, b) 간격/길이 비

### 3. 전도 파괴에 대한 절리 간격의 영향

전도 파괴는 활동 파괴와 함께 암반 사면의 주요 파괴 형태이다. 여기서는 Hoek and Bray(1981)이 단일 블록에 대해 제시한 전도 조건을 연장성이 좋은 두 개의 직교 절리군이 발달하는 암반 사면의 전도 조건으로 확장하고자 한다. 이를 위하여 개별요소법 수치해석 프로그램인 UDEC(Cundall & Hart, 1993)을 사용하였다.

#### 3.1 Hoek and Bray(1981)의 단일 블록 전도 조건

Hoek and Bray(1981)은 경사면 위에 놓여 있는 단일 암반 블록의 경우 중량벡터(W)가 밑면(b)의 내부에 놓일 때, 저면 경사각( $\beta$ )이 마찰각( $\phi$ ) 보다 크면 블록의 미끄러짐이 발생하며, 블록이 높고 폭이 작은 경우( $h > t$ , 높이  $h$ , 폭  $t$ ), 중량 벡터 W가 밑면의 외부에 놓이게 되면 블록은 접촉하고 있는 최하부 모서리에 대하여 회전하며, 전도하게 될 것으로 예측하였다. 이러한 단일 블록에 대하여 활동(sliding) 또는 전도(toppling)가 발생할 조건을 그림 8의 4개 영역으로 구분하였으며, 이와 같은 조건에서 전도 파괴에 대한 안전율은 다음 식(15)와 과 같이 구할 수 있다.

- 영역 1:  $\beta < \phi, t/h > \tan \beta$  : 안정
- 영역 2:  $\beta > \phi, t/h > \tan \beta$  : 활동 파괴
- 영역 3:  $\beta < \phi, t/h < \tan \beta$  : 전도 파괴
- 영역 4:  $\beta < \phi, t/h < \tan \beta$  : 활동+전도

$$\begin{aligned}
 F.S. &= \frac{\sum (\text{resisting moments})}{\sum (\text{driving moments})} \\
 &= \frac{W \cos \beta \cdot (t/2)}{W \sin \beta \cdot (h/2)} = \frac{(t/h)}{\tan \beta} \quad (15)
 \end{aligned}$$

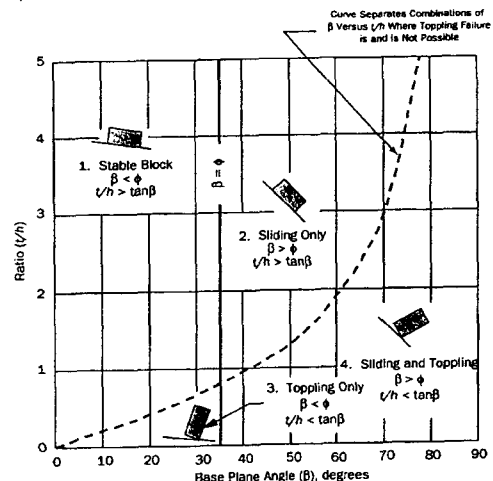


그림 8 단일 블록 파괴 영역

이러한 단일 블록에 대해 저면 경사각을  $10^\circ, 30^\circ$  로 상정하여  $t/h$  조건을 변화시키며 UDEC 해석을 실시한 결과, Hoek and Bray(1981)의 그래프와 완전히 일치하는 해석 결과를 보이고 있다 (그림 9a).

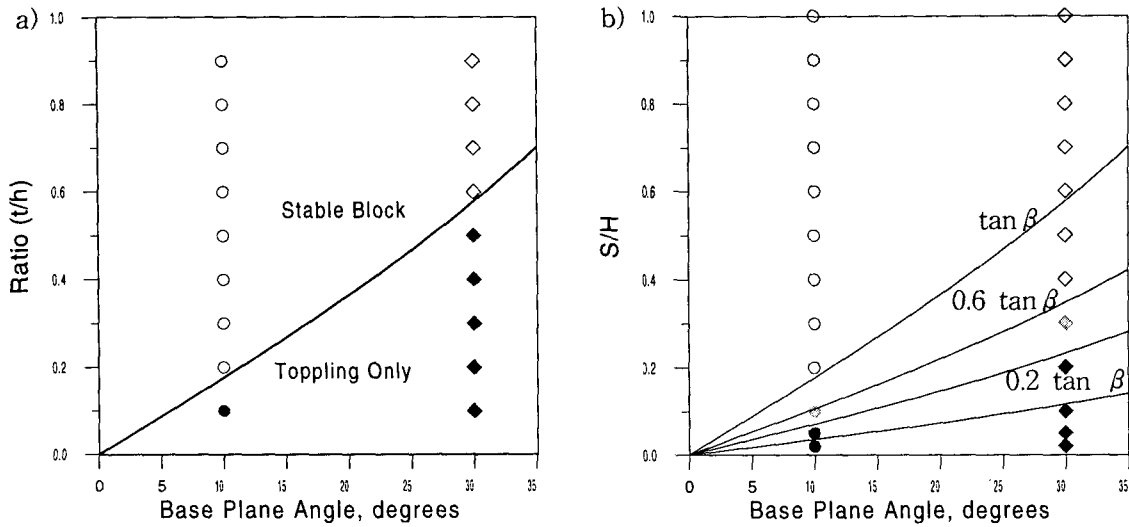


그림 9. 전도 파괴에 대한 UDEC 해석 결과 비교. a) 단일 블록 조건과 t/h, b) 암반 사면 조건과 S/H

### 3.2 암반 사면의 전도 조건

실제 사면에서 형성되는 암반 블록은 단일 블록으로 존재하지 않으므로 실제 암반 사면에서는 암반 블록의 모멘트 이외에 연속적 절리와 사면 경사 및 높이에 의해 결정되는 암주(rock column)의 형태와 인접 암반 블록간의 전단 저항을 고려하여야 한다. 따라서 단일 암반 블록에 대한 전도 조건은 그대로 암반 사면의 전도 조건에 대입하여 사용할 수 없으며, 이에 대해 Hoek and Bray(1981)는 사면에 발달한 수개의 암반 블록의 형태와 전단 강도를 고려하여 인접 암반 블록의 관계에 의해 다소 복잡한 과정을 통하여 안전율을 계산한 바 있다. 여기서는 앞서의 단일 블록의 파괴 영역 기준을 활용하여 실제 사면에 손쉽게 접근할 수 있는 파괴 영역의 기준을 수치해석적 기법을 사용하여 설정하고자 한다.

개별 요소법을 이용한 수치 해석을 위하여 10m 높이의 사면을 가정하여 두 개의 동일한 간격을 가지는 연속적인 직교 절리군을 발생시켰다. 이 때, 각각의 단일 블록은 t/h 비가 1이며, 저면 경사각, 즉 저경사의 절리 경사각이 10°, 30° 일 때, 사면 경사각을 70°, 80°, 90° 로 조건을 달리하며 해석하였다. 해석 모델은 강체 모델을 적용하였으며, 불연속면은 점착력과 인장 강도가 없는 절리로 가정하고, 마찰각을 35° 로 주었다.

해석 결과, 90° 경사각의 사면에서 10° 저면 경사각일 때, 절리 간격 1m 이하에서 파괴가 발생하였으며, 30° 인 조건에서는 절리 간격 3m 이하에서 파괴가 발생하였다. 사면 경사각이 80° 일 때, 10° 저면 각 조건에서 절리 간격이 0.5m 이하, 30° 저면각 일 때, 2m 이하 간격에서 파괴가 발생하였다. 70° 경사면에서는 10°, 30° 저면 경사각에서 각각 0.5m 이하, 1m 이하의 절리 간격에서 파괴가 발생하였다.

이러한 결과는 사면의 규모에 비해 절리의 간격이 좁아질수록 전도 파괴의 발생 가능성이 높아지는 것을 지시하며, 또한 사면의 경사각이 낮아지면 사면의 전도 파괴 가능성 역시 낮아진다는 것을 의미한다. 이 때, 단일 블록의 폭과 높이의 비(t/h)를 절리 간격(S)과 사면 높이(H)의 비 S/H로 대체하여 저면 경사각( $\beta$ )에 대해 도시하면 그림 9b와 같다.

그림 9b에서 암반 사면의 전도 파괴 영역의 S/H는 단일 블록의 전도 파괴 영역인 t/h 비가  $\tan \beta$  이하인 영역에 비해 낮은 값을 보이며, 각각의 경사각 조건에서 전도 파괴 영역의 S/H는 90° 사면에서  $0.6 \tan \beta$ , 80° 사면에서  $0.4 \tan \beta$ , 70° 사면에서  $0.2 \tan \beta$  이하에 근사된다. 따라서 일반적인 경암반 사면의 구배 조건인 1:0.3 내외의 구배를 가지는 사면이 존재한다면 연속적인 절리의 간격이 사면 높이의 0.1 이하의 간격을 보일 때, 전도 파괴가 발생할 가능성이 높다.

## 4. 결 론

암반 사면의 주요 파괴 형태인 활동 파괴와 전도 파괴에 대해 절리 간격의 영향을 분석하였다.

암반 사면의 불연속면이 제한적 연장성을 가지고 있을 때, 암반 사면의 활동 파괴는 두 개 이상의 절리군의 조합 또는 절리 사이의 암교에 의해 그 안정성 여부가 결정되며, 이는 절리의 간격과 길이의 비에 의하여 제어된다. 일반적으로 사면 파괴의 위치는 이 절리 간격/길이 비가 최소인 구간에서 발생할 가능성이 가장 크며, 이 비가 0.05 이하 일 경우 그 파괴의 위험이 급격히 증대한다.

연속적인 두 개 이상의 절리가 발달한 사면에서의 거동 특성을 분석한 결과, 저면 경사각이 절리의 마찰각보다 작을 때, 직교 절리군 조건에서 사면의 경사 방향으로의 블록 회전에 의한 전도 파괴가 우세하게 발생하며, 이 때의 절리 간격/사면 높이의 비는 단일 블록에서의 폭/높이의 비에 비해 낮은 수준이며, 절리 간격/사면 높이의 비가 낮을수록, 사면의 경사각이 높을수록, 저면 경사각이 클수록 사면의 전도 파괴 위험성은 높아진다.

## 5. 참고 문헌

1. 김정환, 윤운상, 최재원, 권혁신, 김세현 (2000), "암반 사면의 파괴 예측을 위한 단열 구조 특성화 및 평가 시스템 개발 연구" 서울대학교, 한국자원연구소, p188.
2. Einstein, H. H., Veneziano, D., Baecher, G. B. and O'Reilly, K. J. (1983) "The effect of discontinuity persistence on rock slope stability", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 20, 227-236
3. Cundall, P. A., and Hart, R. D. (1993), "Numerical modelling of discontinua", Comprehensive Rock Engineering, 2-1, 231-261.
4. Hoek, E. and Bray, J. (1981) "Rock Slope Engineering", Inst. Min. Metall, London, Eng., 309p
5. Jeninnings, J. E., 1970, "A mathematical theory for calculation of the stability of open cast mine". Proc. Symp. on the theoretical background to the planning of open pit mines, Johannesburg, 82-102.

## 사사

이 논문은 과학기술부에서 시행하는 중점국가연구개발사업의 하나인 자연재해방지기술개발사업으로 수행한 내용이다. 연구에 많은 조언을 해주신 한국자원연구소 김원영 부장님께 감사드린다.