

굴곡 사면의 암반 활동 파괴 예측을 위한 평사 투영 해석

Stereographic Analysis to Predict Rock Sliding Failure of Curved Slope

윤운상¹⁾, Woon-Sang Yoon, 김정환²⁾, Jeong Hwan Kim

¹⁾ 서울대 지질학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Geological Science, Seoul Nat'l Univ.

²⁾ 서울대 지질학과 교수, Professor. Dept. of Geological Science, Seoul Nat'l Univ.

SYNOPSIS : Stereographic method is a general and basic method to analyse sliding failure potential of rock slope. Region of failure analysis using stereographic method extend to curved slope from straight slope in this paper. Curved slope is defined as the multi-face slope with free surface more than two face and has different characteristics from straight single face slope. Individual daylight envelopes of free surfaces are combined into total daylight envelope of multi-face slope. So, sliding envelope of multi-face slope is the daylight envelope except friction cone. Specially, If only single joint set is developed in the slope, single plane sliding(or plane failure) is impossible in the single-face straight slope, but possible in the multi-face slope. In the multi-face slope with only one joint set, single plane sliding occurs when orientation of sliding plane is between two side slope orientation in the sliding envelope.

Key words : slope, sliding failure, stereographic method, multi-face slope

1. 서 론

암사면의 파괴를 예측하는 방법의 하나로서 평사투영법을 이용하여 불연속면에 따른 암반 활동 조건 (rock sliding condition)을 분석하는 방법이 활발하게 적용되고 있다. 현재 국내 현장에서 가장 일반적으로 적용되고 있는 평사투영해석은 Markland(1972) 및 Hoek and Bray(1981)의 작업에 기초한 방법(그림 1)으로서 불연속면의 극점 또는 두 불연속면의 교차선을 극점으로 하는 대원(great circle)의 최대경사점이 노출범위(daylight envelope) 내에 도시되는지를 중심으로 사면 내 불안정 쉼의 형성과 활동 가능성을 예측하는 방법이며, 기본적으로 직선상의 사면을 대상으로 개발되어졌다.

이 논문에서 논의하고자 하는 굴곡 사면의 경우 현재 국도 또는 고속도로의 직선화 공사에 의하여 많은 부분이 해소되고 있으나, 대부분의 국도와 지방도의 경우 지형을 따라 형성된 도로로 인해 굴곡된 형태의 절취 사면이 상당 부분 분포하고 있으며, 택지 또는 부지 조성에 의해서도 굴곡된 형태의 절취 사면이 형성되어 있다. 이외 직선화된 도로 주변의 절취 사면에서도 측면 라운딩 처리에 의해 굴곡부가 형성되어 이에 의한 사면의 파괴가 발생하는 사례가 보고된 바 있다. 이렇게 평면 형상이 굴곡된 사면의 경우, 2개 이상의 자유면 방향을 가지게 되어 자유면 방향이 하나인 직선 사면의 파괴 조건과 현저한 차이를 보인다.

따라서 이 논문에서는 직선 사면에서의 활동 조건에 대한 분석과 함께 특히 그 동안 간과되어져 왔던 굴곡 사면의 파괴 특성과 이를 분석하기 위한 평사투영법을 제시함으로써 평사투영해석의 영역을 보다 확대시키고자 한다.

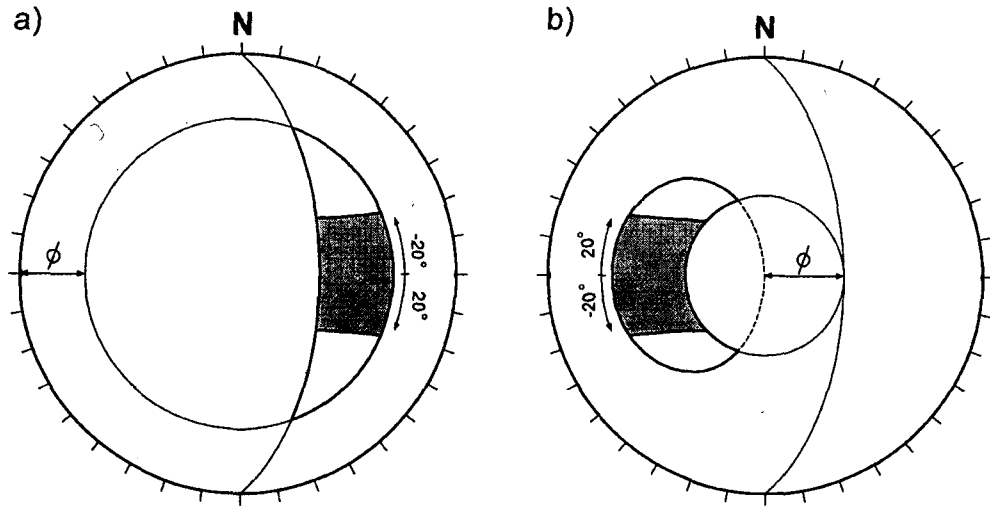


그림 1. 사면의 암반 활동 분석을 위한 Hoek and Bray(1981)의 평사 투영망
 a) 대원 도시법, b) 극점 도시법, ϕ : 마찰각, 음영부분은 평면 파괴 범위

2. 사면 형태에 따른 암반 활동 조건

여기서 주로 논하고자 하는 굴곡사면은 앞에서 언급한 바와 같이 직선 사면에 대응하는 개념으로서 직선 사면은 자유면이 하나인 일면 사면(single face slope)으로 재정의할 수 있으며, 굴곡사면은 자유면이 두 개 이상인 다면 사면(multi face slope)으로 정의할 수 있다. 실제로 평면상에서 자유면이 오직 하나인 무한 직선 사면은 존재하지 않으나, 그동안 적용되어져 왔던 평사투영법의 가정이므로 이를 일면 사면(single face slope) 조건으로 정의하고, 굴곡 사면은 볼록한 형태(convex)의 다면 사면(multi face slope)으로 정의하였다.

일반적으로 적용되는 평사투영법에서 일면 사면의 활동 파괴 조건은 썩기를 형성하는 두 불연속면의 교차선이 사면의 노출 범위(daylight envelope, Markland, 1972)에 해당하고, 그 경사각(plunge)이 마찰각(friction angle)보다 클 때 발생하며, 이러한 범위를 활동 범위(sliding envelope)라 한다. 이에 더하여 Hoek and Bray(1981)는 암반의 활동 파괴를 썩기 파괴와 평면 파괴로 구분하고 평면 파괴가 발생하기 위한 일반 조건으로서 다음과 같은 기하학적 조건을 제시한바 있다.

첫째, 활동면의 주향(또는 경사 방향, θ)은 사면의 주향(또는 경사 방향, α)에 평행하거나 거의 평행 ($\pm 20^\circ$ 이내)하여야 한다. ($\alpha - 20^\circ \leq \theta \leq \alpha + 20^\circ$)

둘째, 활동면은 사면에 노출되어야 한다. 즉 활동면의 경사각(ψ_p)은 사면의 경사각(ψ_f)보다 작아야 한다. ($\psi_p < \psi_f$)

셋째, 활동면의 경사각(ψ_p)은 그 면의 마찰각(ϕ)보다 커야 한다. ($\psi_p > \phi$)

넷째, 활동 암괴의 측면에는 저항력이 거의 없는 이완면이 존재하여야 한다.

또는 활동면이 사면의 볼록한 돌출부를 통과하여야 한다.

Hoek and Bray(1981)가 제시한 평면 파괴의 4가지 일반적 조건에서 특히 넷째 조건을 분석해 보면 측면 저항을 무시할 수 있는 조건은 암 사면의 경우 사면의 측면을 개방시키는 또 다른 자유면이 존재하거나, 활동 암괴의 측면을 절단하는 활동면 이외의 불연속면이 존재할 경우에 성립할 수 있으므로 사실상 일면 암 사면에서 단일 절리군(single joint set)에 의한 평면 파괴 조건은 성립하지 않는다. 따라서 평면 파괴 조건은 두 개 이상의 절리군이 존재할 때와 여타의 절리군의 발달 상태가 뚜렷하지 않은 상

태에서 하나의 우세한 절리군만이 분포할 경우로 구분할 필요가 있다.

두 개 이상의 절리군이 존재할 때의 활동 파괴 조건에 대해서는 이미 Hocking(1976)에 의하여 제시된 바 있다. Hocking(1976)은 사면의 활동 파괴 조건을 Markland(1972)의 활동 조건을 만족시키며 썩기를 형성하는 두 불연속면 중 한 면 상에서만 활동이 발생하는 일면 활동 조건(single plane sliding)과 두 불연속면의 교선을 따르는 활동이 발생하는 양면 활동 조건(double plane sliding)으로 구분하였다. 이때 일면 활동 조건은 일면 사면에서의 Hoek and Bray(1981)의 평면 파괴 조건에 해당하는 것으로서 사면의 경사 방향과, 두 불연속면의 교차선의 방향 사이에 한 불연속면의 경사 방향이 놓이는 조건에서 발생한다(그림 2, 3). 따라서 일면 사면의 경우, 한 면상에서 발생하는 활동 파괴(일면 활동 또는 평면 파괴)조건은 Hoek and Bray(1981)의 $\pm 20^\circ$ 이내의 평면 파괴 조건에 비해 Hocking(1976)의 일면 활동 조건이 보다 일반적인 해가 된다..

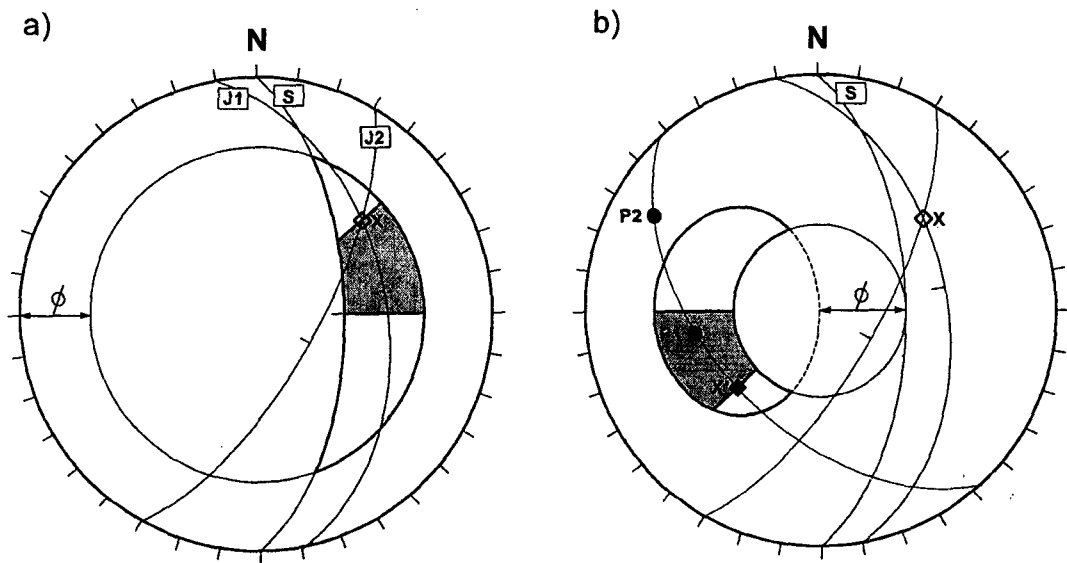


그림 2. 사면의 일면 활동 파괴 조건 (음영부분, Hocking, 1976) a) 대원 도시법, b) 극점 도시법
 J1, J2: 불연속면의 대원, S: 사면, P1, P2: 불연속면의 극점, X: 교선, X': 교선의 극점, ϕ : 마찰각

다면 사면의 경우, 노출범위(daylight envelope, D_t)는 사면을 구성하는 각 자유면들의 노출범위(D_1, D_2, \dots, D_n)의 합집합으로 정의할 수 있으며, 이 노출 범위에 대한 활동 조건은 일면 사면과 동일한 적용을 받는다.

$$D_t = D_1 \cup D_2 \cup \dots \cup D_n$$

그러나, 여타의 절리군 발달이 미약하고 뚜렷한 하나의 우세 절리군이 발달하는 암사면의 경우 그 하나의 불연속면에 의해 발생하는 활동 파괴는 일면 사면에서는 가능하지 않다. 이러한 단일 절리군에 의한 활동 파괴(일면 활동 또는 평면 파괴)는 자유면이 2개 이상인 다면 사면에서만 가능하다. 다면 사면에서 이러한 단일절리군에 의한 평면 파괴의 발생은 다음과 같은 조건이 성립할 때 가능하다 (그림 3).

첫째, 활동면의 주향(또는 경사방향, θ)은 양측 사면의 주향(또는 경사방향, α, β)사이에 놓여야 한다. ($\alpha < \theta < \beta$)

둘째, 활동면의 경사각(ψ_p)은 사면의 경사각(ψ_f)보다 작아야 하며, 인장 균열이 존재하지 않을 때에는 사면의 하부 최대 돌출 길이(Y')와 높이(H)의 비에 의해 최소값이 제한된다.

$$(\psi_p < \psi_f \text{ 또는 } \tan^{-1}(H/Y') < \psi_p < \psi_f; \text{ 인장 균열이 없을 때})$$

셋째, 활동면의 경사각(ψ_p)은 그 면의 마찰각(ϕ)보다 커야 한다. ($\psi_p > \phi$)

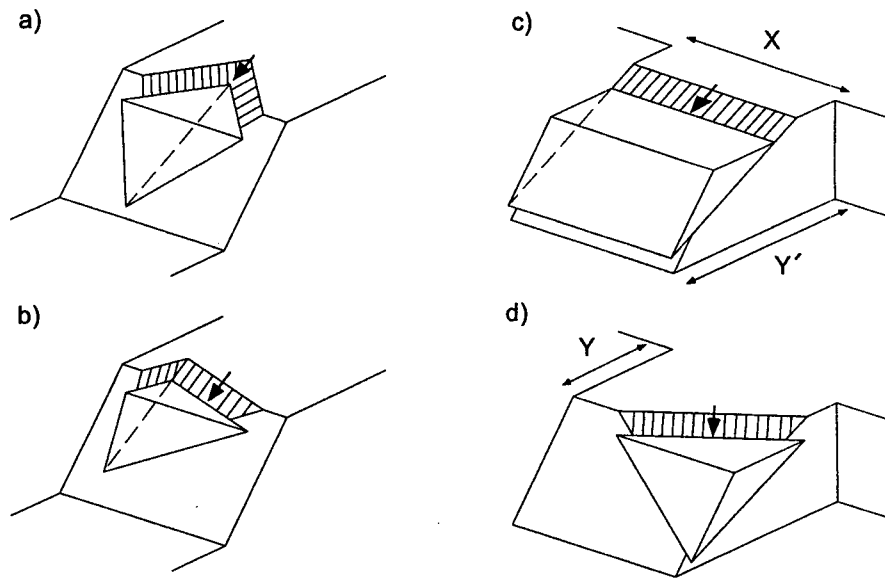


그림 3. 암반 사면의 일면 활동 파괴 형태, a), b) 일면 사면, c), d) 다면 사면
 c), d)에서 X: 평균 사면길이, Y: 상부 최대 돌출거리, Y': 하부 최대 돌출거리

3. 다면 사면의 암반 활동 예측을 위한 평사투영망

여기서는 다면 사면을 그 일반적 형태에 따라 이면(two face), 삼면(three face), 곡면 호상(curved face or arcuate) 사면에 대해 활동 파괴 예측을 위한 평사 투영망을 제시하고, 절리군의 방향 및 평균 사면의 길이(X)와 돌출 거리(Y)에 따라 최대활동파괴규모에 대한 분석을 실시하고자 하였다 (그림 4).

평균 사면의 길이 X는 평면 상에서 양측 사면(side slope)의 끝점을 이은 평균 사면(mean slope)의 길이로 정의하고, 돌출 거리 Y는 평면 상에서 평균 사면에서 최대 돌출부까지의 거리로 정의된다. 최대 평면 활동 면적의 산출을 위한 양측 사면의 방향과 활동면 또는 불연속면의 각관계 분석을 위해 양측 사면이 평균 사면 방향과 이루는 각을 측면 사면각 α , β 라 하고, 활동면 또는 불연속면의 주향이 평균 사면방향과 이루는 예각을 평면 활동각 θ 로 하여 분석하였다.

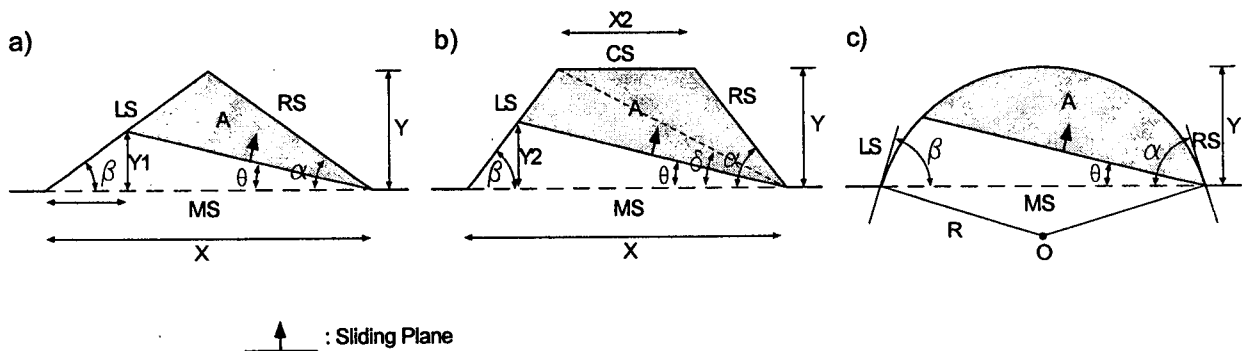


그림 4. 다면 사면의 평면 상의 형태 구분 a) 이면 사면, b) 삼면 사면, c) 곡면 호상 사면
 RS: 우측사면, LS: 좌측사면, CS: 중앙사면, MS: 평균사면, X: 평균사면길이, Y: 최대돌출거리
 A: 활동(음영부) 면적, α, β : 측면 사면각, θ : 평면 활동각, R: 원호의 반지름, O: 원호의 중점

3.1 이면 사면(two face slope: triangular shape)

이면 사면은 두 개의 자유면에 의해 형성된 굴곡 다면 사면으로서 사면 상부의 평면은 그림 4 a)와 같다. 이면 사면의 노출 범위는 이면 사면을 이루는 두 개 사면의 노출범위를 합친 범위와 같다. 그림 5는 이면 사면의 활동 범위를 불연속면의 대원(girdle) 또는 극점(pole) 도시에 의해 분석할 수 있도록 한 평사 투영망이다. 그림 5의 예는 평균 사면(NS/60E)에 대해 각각 30° ($\alpha = \beta$)의 측면 사면각을 가지는 양측 사면으로 구성된 이면 사면으로서 불연속면의 마찰각이 30° 인 예이다. 이 때, 단일 절리군에 의해 발생하는 일면 활동 범위는 음영 처리된 부분으로서 사면 활동 범위에서 두 양측 사면의 경사 방향 사이에 해당하는 범위가 된다.

이면 사면에서 단일 절리군에 의한 일면 활동 조건은 $-\alpha < \theta < \alpha$ 로서 평면에서 이면 사면의 평균 사면 길이 X와 돌출 거리 Y가 주어질 때, α 와 X, Y는 다음의 관계를 가지며, Y/X의 비가 작아질수록 α 각 역시 작아진다.

$$\tan \alpha = \frac{Y}{\frac{X}{2}} = \frac{2Y}{X}$$

이 때 평면 상에서 단일절리군에 의한 최대 활동 면적 A는 다음과 같다.

$$A = \left(\frac{1}{2} \times X \times Y\right) - \left(\frac{1}{2} \times X \times Y\right) = \frac{1}{2} \cdot X \cdot \left(Y - X \cdot \frac{\sin \alpha \cdot \sin \theta}{\sin(\alpha + \theta)}\right)$$

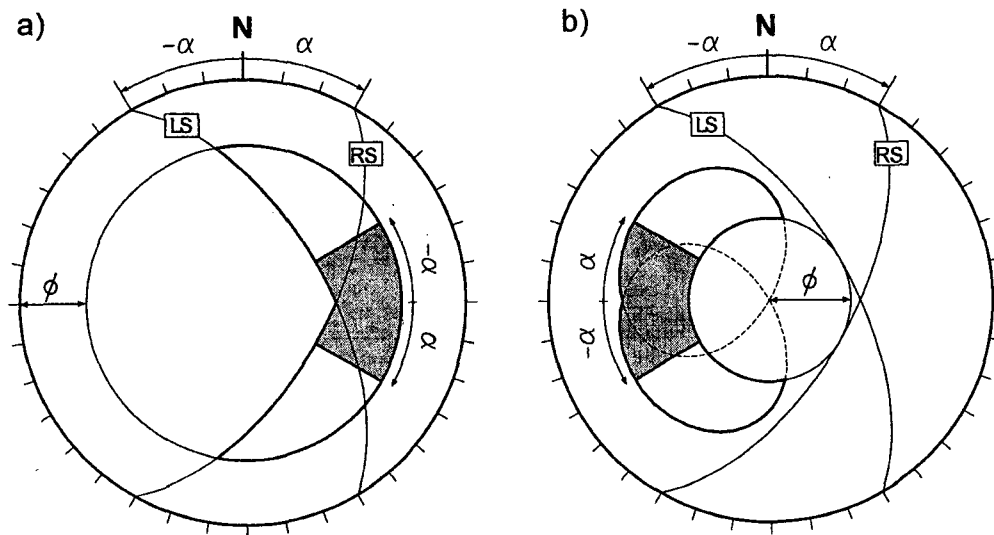


그림 5. 이면 사면의 활동 범위와 단일 절리 일면 활동 범위(음영 부분).

a) 대원 도시법, b)극점 도시법, LS: 좌측사면, RS: 우측사면, α : 측면 사면각, ϕ : 마찰각

3.2 삼면 사면(three face slope: quadrangular shape)

삼면 사면은 세 개의 자유면에 의해 형성된 굴곡 다면 사면으로서 양측 사면과 중앙 사면(central

slope)으로 구성되며, 사면 상부의 평면은 그림 5 b)와 같다. 삼면 사면의 노출 범위는 삼면 사면을 이루는 세 개 사면의 노출범위를 합친 범위와 같다. 그림 6은 삼면 사면의 활동 범위를 불연속면의 대원 (girdle) 또는 극점(pole) 도시에 의해 분석할 수 있도록 한 평사 투영망이다. 그림 6의 예는 평균 사면 (NS/60E)에 대해 각각 30°의 측면 사면각을 가지는 양측 사면과 평균 사면과 동일한 방향의 중앙 사면으로 구성된 삼면 사면으로서 불연속면의 마찰각은 30°로 가정하였다. 이 때, 단일 절리군에 의해 발생하는 일면 활동 범위는 음영 처리된 부분으로서 사면 활동 범위에서 두 양측 사면의 경사 방향 사이에 해당하는 범위가 된다.

삼면 사면에서 단일 절리군에 의한 일면 활동 조건은 양측 사면각 α , β 가 동일하다면, $-\alpha < \theta < \alpha$ 로서 이 때, 측면 사면각 α 는 삼면 사면의 X, Y 거리에 관계없이 별도로 주어지며, 평면 상에서 단일 절리군에 의한 최대 활동 면적 A는 양측 사면의 끝점에서 삼면 사면의 모서리를 연결하는 대각선과 평균 사면이 이루는 각 δ 와의 관계에 따라 다음의 관계를 가진다.

$$\delta \leq \theta < \alpha, \quad A = \frac{1}{2} \times Y \times \frac{Y}{\tan \theta} - \frac{1}{2} \times Y \times \frac{Y}{\tan \alpha} = \frac{1}{2} \cdot Y^2 \cdot \frac{\tan \alpha - \tan \theta}{\tan \theta \cdot \tan \alpha}$$

$$\theta < \delta, \quad A = \frac{1}{2} \times Y \times (X + X_2) - \frac{1}{2} \times X \times Y_2 = (XY - \frac{Y^2}{\tan \alpha}) - (\frac{1}{2} \cdot X^2 \cdot \frac{\sin \alpha \cdot \sin \theta}{\sin(\alpha + \theta)})$$

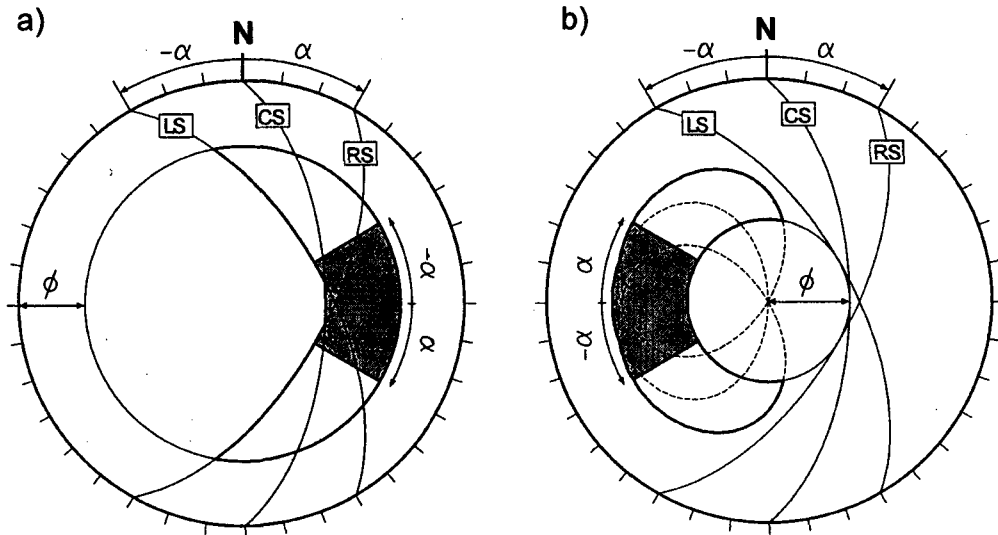


그림 6. 삼면 사면의 활동 범위와 단일 절리 일면 활동 범위(음영 부분).

a) 대원 도시법, b)극점 도시법, LS: 좌측사면, RS: 우측사면, CS: 중앙사면, α : 측면사면각, ψ : 마찰각

3.3 곡면 사면(curved face slope: arcuate shape)

곡면 사면 중 호상 사면은 원호 형태의 평면을 가지는 사면으로서 호를 이루는 무수히 많은 자유면의 조합으로 이루어진 형태이며, 사면 상부의 평면은 그림 4 c)와 같다. 곡면 호상 사면의 경우 양측 사면은 호상 사면의 양단 접선 방향이 이루는 사면이며, 측면 사면각 α , β 는 호상 사면의 이 접선과 평균 사면이 이루는 각으로 정의할 수 있다. 또한, 호상 사면의 노출범위는 호를 이루는 무수한 자유면의 노출범위를 합친 범위이다. 이 때, 각 자유면의 경사각이 동일하다면, 즉 호상 사면 전 구간의 경사각이

동일하다면 노출범위는 양측 사면의 노출범위와 양측 사면의 극점 또는 대원의 최대 경사점을 연결하는 소원이 이루는 범위이다. 그림 7은 전 구간에서 경사각이 동일한 곡면 호상 사면의 활동 범위를 불연속면의 대원(girdle) 또는 극점(pole) 도시에 의해 분석할 수 있도록 한 평사 투영망이다. 그림 7의 예는 평균 사면(NS/60E)에 대해 각각 30°의 접선 측면 사면각의 양측 사면을 가지는 호상 사면으로서 역시 불연속면의 마찰각은 30°로 가정하였다. 이 때, 단일 절리군에 의해서 발생하는 일면 활동 범위는 음영 처리된 부분으로서 사면 활동 범위에서 두 양측 사면의 경사 방향 사이에 해당하는 범위가 된다.

곡면 호상 사면에서 단일 절리군에 의한 일면 활동 조건은 측면 사면각이 동일하다면 여타 다른 사면과 같이 $-\alpha < \theta < \alpha$ 이다. 특히 원호에서 평균사면의 길이 X와 돌출 거리 Y는 원호의 반지름 r과 다음의 관계를 가지므로 측면 사면각 α 는 사면의 평균사면길이 X와 돌출 거리 Y이 주어진다면 삼각함수 공식에 의해 아래와 같이 구할 수 있다.

$$r = r \cdot \cos \alpha + Y, \quad \cos \alpha = (r - Y) / r$$

$$X = 2 \cdot r \cdot \sin \alpha, \quad \sin \alpha = X / 2r$$

$$\sin \alpha = \frac{X \cdot Y}{\left(\frac{X}{2}\right)^2 + Y^2}$$

이 때 평면 상에서 단일절리군에 의한 최대 활동 면적 A는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A = \pi \cdot r^2 \cdot \left(\frac{2\alpha - 2\theta}{360}\right) - \frac{1}{2} r^2 \sin(2\alpha - 2\theta)$$

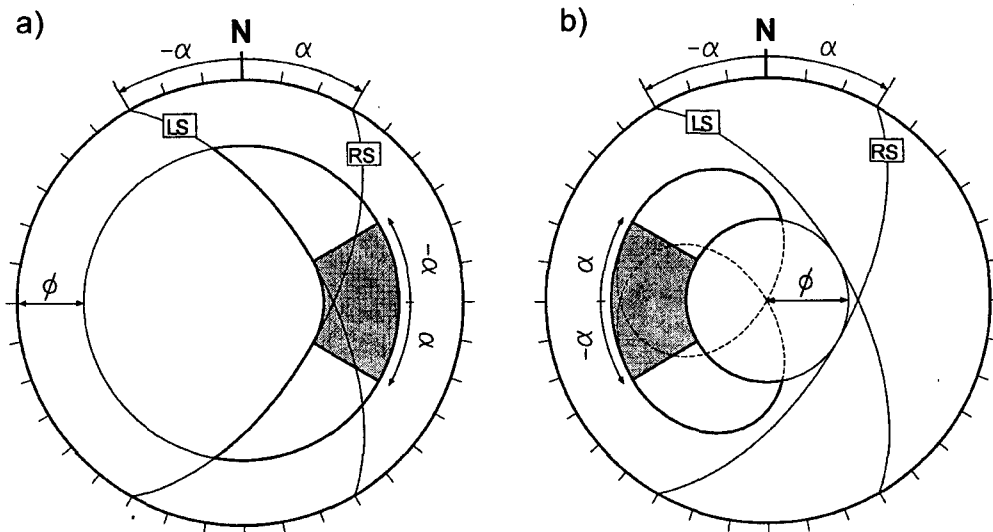


그림 7. 곡면 사면의 활동 범위와 단일 절리 일면 활동 범위(음영 부분)

a) 대원 도시법, b) 극점 도시법, LS: 좌측사면, RS: 우측사면, α : 측면사면각, ϕ : 마찰각

4. 결 론

이 연구에서는 굴곡 사면 또는 다면 사면의 암반 활동 예측을 위한 평사 투영 해석법과 평면 상에서 단일 절리군에 의한 최대 일면 활동 면적에 대해 다루었다.

위에서 언급한 바와 같이 다면 사면의 경우 단일 사면에서의 모든 활동 조건을 포함하고 있으며, 이때 다면 사면의 노출범위(daylight envelope, D_i)는 사면을 구성하는 자유면들의 노출범위($D_1, D_2 \dots D_n$)의 합집합으로 정의할 수 있다.

특히 단일면 사면과는 달리 2개 이상의 자유면 방향을 가지고 있어 단일 절리군에 의해서도 평면 파괴(또는 일면 활동)의 발생이 가능하며, 이 때의 활동 조건은 다음과 같다.

첫째, 활동면의 주향(또는 경사방향, θ)은 양측 사면의 주향(또는 경사방향, α, β)사이에 놓여야 한다. ($\alpha < \theta < \beta$)

둘째, 활동면의 경사각(ψ_p)은 사면의 경사각(ψ_f)보다 작아야 하며, 인장 균열이 존재하지 않을 때에는 사면의 최대 돌출 길이(Y')와 높이(H)의 비에 의해 최소값이 제한된다.

($\psi_p < \psi_f$ 또는 $\tan^{-1}(H/Y') < \psi_p < \psi_f$; 인장 균열이 없을 때)

셋째, 활동면의 경사각(ψ_p)은 그 면의 마찰각(φ)보다 커야 한다. ($\psi_p > \varphi$)

이상의 활동 범위 기준에 의해 이면, 삼면, 곡면 호상 사면 등 대표적인 다면 굴곡 사면에 대해 적용할 수 있는 평사 투영법과 각 사면에서의 단일절리군에 의한 평면상의 최대 활동 면적을 구하였다. 최대 활동 면적은 측면 사면각 또는 다면 사면의 평균 사면 길이 및 돌출 거리에 의해 제한 받으며, 활동면이 평균 사면의 방향과 이루는 각이 커질수록 급격히 작아진다. 따라서 Hoek and Bray(1981)가 제시한 $\pm 20^\circ$ 의 평면 파괴 범위는 다면 사면에서의 일반적인 일면 활동 조건으로 볼 수는 없으나, 활동 가능한 암괴의 최대 활동 면적과 관련하여 재해도가 큰 암반 활동 범위 분석의 유의미한 기준으로 활용할 수 있을 것이다.

5. 참고 문헌

1. Hocking, G.(1976), "A method for distinguishing between single and double plane sliding of tetrahedral wedges", Int. J. Rock Mechanics and Mining Science, Vol. 13. p 225-226.
2. Hoek, E., and Bray, J.(1981), "Rock slope engineering", Inst. Min. Metall, London, Eng., 309p.
3. Markland, J. T.(1972), "A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge sliding type of failure is expected", Imperial College Rock Mechanics Research Report No. 19, 10 p

사사

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