

불연속면의 특성에 따른 암반사면의 안정성 해석 (Rock solpe stability analysis considering geomechanical characterization of discontinuities)

이정인, Lee, Chung-In*

요약(Abstract)

암반사면의 설계 및 시공과정에서 가장 중요한 사면의 안정성 해석을 위하여 평사투영법, 블록이론에 의한 해석방법을 연구사례를 중심으로 해설하였다. 또한 이와 같은 안정성 해석에 필요한 불연속면 조사자료의 평사투영 전산해석, 통계처리방법에 대해서도 소개하였다.

주요어(Key Words)

평사투영법(Stereographic projection), 블록이론(Block theory), 저면마찰 모형실험(Base friction model test), 개별요소법(DEM), 전도파괴(Toppling)

1. 서론

암반은 지질학적 생성과정에서 단층, 절리, 층리, 균열 등의 역학적 불연속면을 포함하고 있다. 특히 우리 나라는 지질학적으로 고생대, 중생대의 오래된 지층이 많이 분포하고 있어 이들 지층의 암반은 일반적으로 재료 자체는 견고하고 치밀하나 거듭된 조산운동과 습곡작용으로 불연속면이 많이 발달되어 있다. 이러한 불연속면은 암반사면, 터널, 기초암반의 안정성에 큰 영향을 미치며 특히 암반사면의 붕괴나 안정성은 더욱 크게 좌우된다. 따라서 암반사면의 안정성을 정확히 해석하기 위해서는 대상 암반에 발달한 불연속면의 방향, 연속성, 간격, 상태 등을 정확히 조사하여야 한다. 그러나 이와 같은 암반 불연속면의 조사는 주로 노두나 지표에 노출된 암반을 대상으로 평면적이고 한정된 지질조사 자료에 의존하게 된다. 따라서 전체 대상 암반의 불연속망을 파악하기 위하여 한정된 조사자료를 토대로 통계적, 추계론적(Stochastic)방법으로 불연속 망을 발생시키는 연구가 최근에 많이 이루어지고 있다⁽⁵⁾⁽¹⁰⁾⁽¹³⁾.

한편 암반사면의 붕괴 유형 및 안정성 해석은 주로 암반 중에 발달한 개별 불연속의 방향을 평사투영(Stereographic projection)법으로 분석하여 암반의 붕괴형태나 안정성을 해석하는 방법과 극한 평형 해석법에 의하여 안전율을 계산하여 사면의 안정성을 평가하는 방법이 현재까지 많이 활용되어 왔다. 그러나 최근에는 Goodman, Gen-hua Shi (1985)에 의하여 제안된 블록이론을 이용하여 암반 중에 발달한 불연속면에 의하여 형성되는 암반블록의 안정여부를 판단하는 연구가 많이 이루어지고 있다⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁹⁾. 또한 암석의 전도파괴(toppling failure)에서는 극한 평형법으로 안전율을 계산하기 어렵고 블록이론으로도 판정할 수 없으므로 저면 마찰 모형실험이나 개별요소법(DEM) 등에 의한 수치해석에 의하여 안정성을 해석하는 연구가 이루어지고 있다⁽⁶⁾⁽¹²⁾.

* 서울대학교 공과대학 지구환경시스템 공학부 교수

Professor, School of Civil, Urban and Geosystem Engineering, Seoul National University

이 보고에서는 이상에서와 같이 암반사면의 안정성 해석에서 최근에 많이 연구되고 있는 한정된 지질조사 자료를 이용하여 대상암반의 불연속망을 통계적으로 발생시키고 불연속면에 의하여 형성되는 암체의 블록이론에 의한 안정성 해석, 저면 마찰 모형실험과 개별요소법에 의한 전도파괴의 거동 등에 대하여 사례연구를 중심으로 해설한다.

2. 암반 사면의 설계 및 시공작업 순서

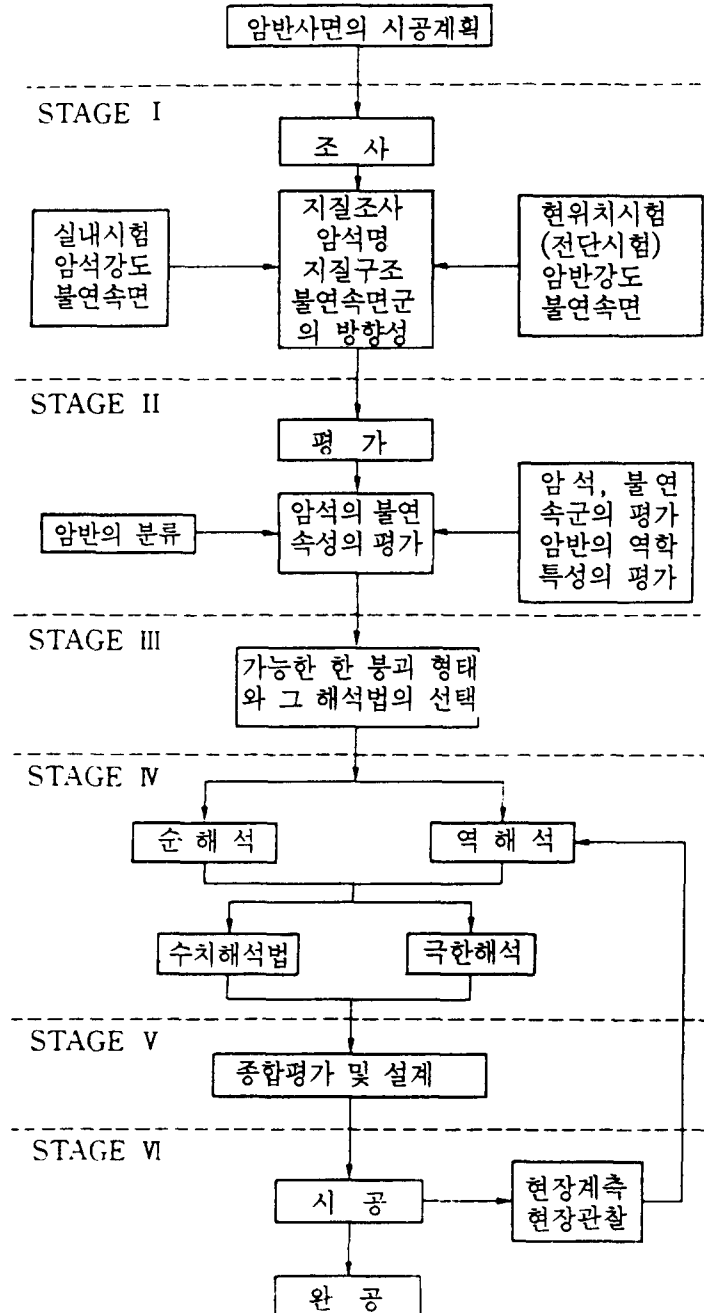


그림 1. 사면 설계의 흐름도

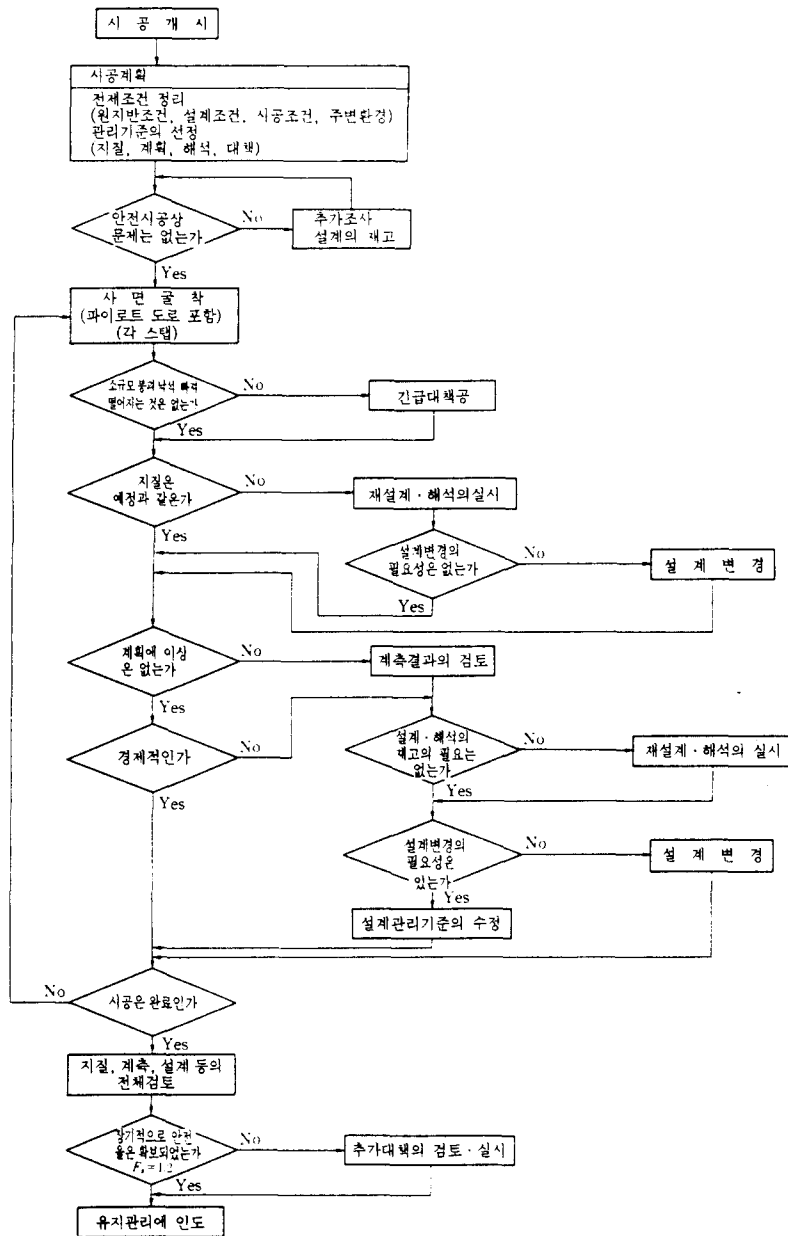


그림 2. 시공 관리의 흐름

3. 불연속면의 조사와 시험. 암반평가

3.1. 컴퓨터에 의한 불연속면의 평사투영법 해석⁽¹⁾

암반 중에 발달한 불연속면들의 우세한 방향성을 해석하기 위하여 일반적으로 많이 사용하는 평사투영법(stereographic projection) 해석은 3차원 지질구조를 2차원 평면상에 도해법으로 구면의 평면투영 원리를 이용한 것이다. 이 방법은 이미 오래 전에 (warner 1969)에 의하여 전산프로그램이 발표된 이후 현재는 우리나라에서도 평사투영법의 전산해석이 보편화되었으나 아직도 이 방법을 소개하는 문헌이 별로 눈에 띄이지 않아 그 원리 및 방법을 간단히 소개한다.

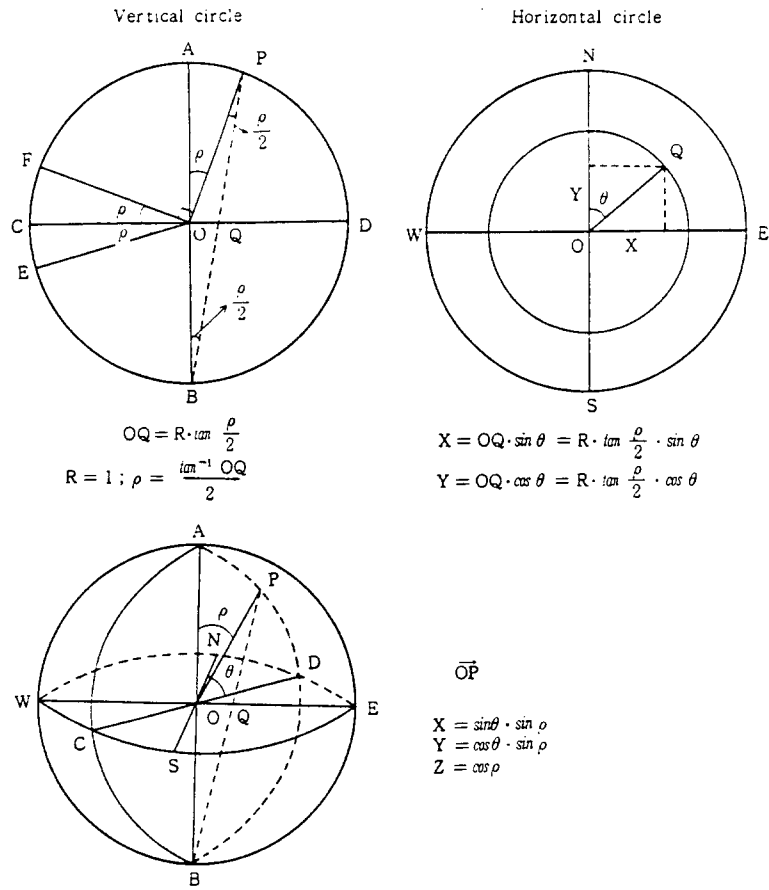


그림 3. 점 P의 수직원상에서의 위치와 수평원상에서의 위치 (Wulff net상에서의 좌표).
 위치벡터 \overrightarrow{OP} 의 구면좌표.

한 개의 불연속면은 半球上에 한점 P로 표시하며 그 점의 위치벡터 (\overrightarrow{OP})는 그림.3 에서와 같이 구면좌표, 수직·수평 원상에 각각 나타낼 수 있다.
 불연속 평면을 대표하는 점 P의 위치벡터 \overrightarrow{OP} 는

$$\overrightarrow{OP} = i \cdot R \sin \theta \cdot \sin \rho + j \cdot R \cos \theta \cdot \sin \rho + k \cdot R \cos \rho$$

로 표시되며 이 위치벡터를 평사투영망에 점으로 표시하면

$$X = R \cdot \tan \frac{\rho}{2} \cdot \sin \theta$$

$$Y = R \cdot \tan \frac{\rho}{2} \cdot \cos \theta \text{ 로 된다. } (R : \text{구의 반경})$$

임의의 두 위치벡터 \overrightarrow{V}_1 , \overrightarrow{V}_2 사이의 각 δ 는 $\delta = \cos^{-1} \frac{\overrightarrow{V}_1 \cdot \overrightarrow{V}_2}{|\overrightarrow{V}_1| \cdot |\overrightarrow{V}_2|}$ 로 구해진다.

이와 같은 방법으로 평사투영망에 표시된 많은 자료를 처리하여 우세한 불연속의 방향을 알기 위해서는 보통 두 가지 計算法이 사용된다.

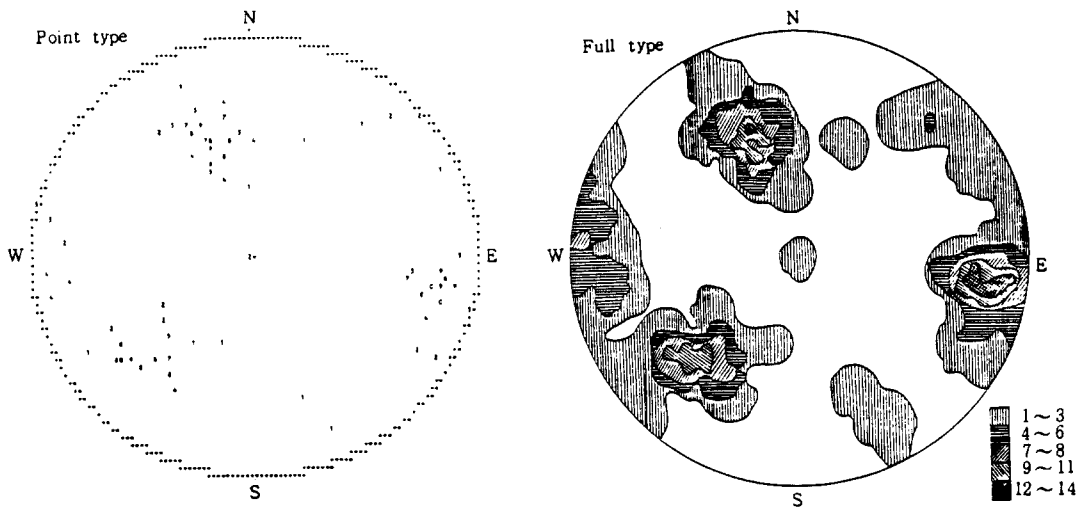


그림 4. 불연속면 조사에 의해 작성된 Contour Diagram. (3개의 절리군이 판정됨.)

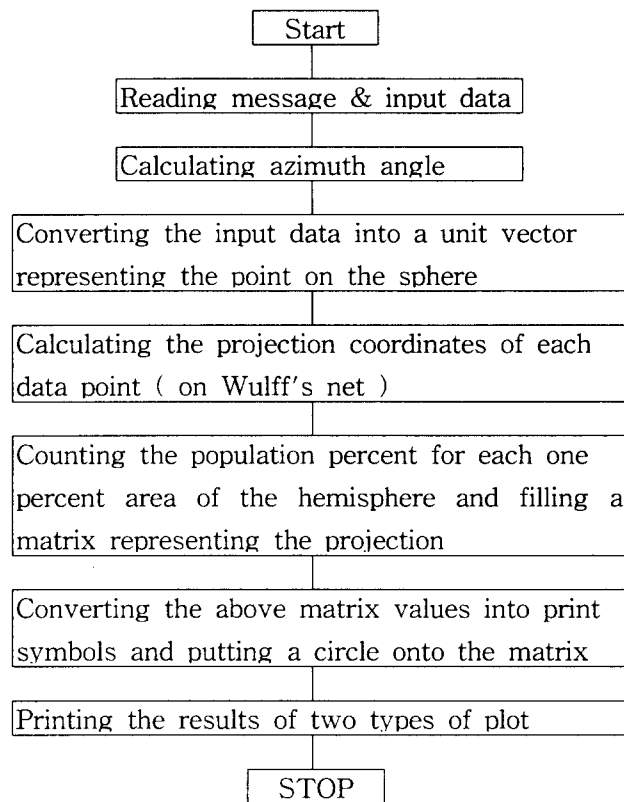


그림 5. 컴퓨터에 의한 평사투영해석의 흐름도.

하나는 Point type으로 불연속면을 나타내는 한 점에 대하여 사이각(δ)이 반구상의 면적의 1%에 해당하는 9° (0.16 rad.) 이내에 포함되는 점들의 개수를 합하여 전체 평면의 총 개수에 대한 백분율을 구하여 그 값에 해당하는 표시문자를 기준이 된 평면 위치의 좌표에 표시한다. 다른 하나는 Full type으로 좌표상의 각 지점의 벡터에 대해 사이각이 9° 이내에 포함되는 점들의 개수를 합하여 전체 평면 수에 대한 백분율을 구하여 그 값에 해당하는 표시문자를 좌표상에 표시하여 그림 4 에서와 같은 Contour Diagram을 작성한다. 이 과정에 대한 컴퓨터 프로그램의 Flow Chart는 그림 5 와 같다.

3.2. 한정된 불연속면의 조사자료. 자료로써 대상지역의 불연속면 분포를 통계적으로 추계하는 방법⁽⁵⁾⁽¹³⁾

3.2.1. 불연속면의 연장

현장에서 불연속면의 길이 측정은 노출면에서만 가능하기 때문에 직접 이용할 수 있는 정보는 2차원일 수밖에 없다. 현장에서 불연속면의 연장을 결정하는 방법은 두 가지가 있는데 첫 번째가 scanline법이고 두 번째는 window법이다. 표 1 은 불연속면의 연장과 간격에 대한 통계분포의 연구결과로 이 표에서 보면 불연속면의 연장은 log-normal 또는 지수함수분포 임을 알 수 있다. 측정구역내에서 측정 가능한 절리의 분포상태는 다음 3가지 형태로 분포하고 있음을 알 수 있다.

- 1) Intersection : window(사각형 조사규격)내에서 절리의 한쪽 끝단만을 관찰할 수 있음.
- 2) Transection : window내에서 절리의 양쪽 끝단을 관찰할 수 없음.
- 3) Containment : window내에서 절리의 양쪽 끝을 관찰할 수 있음.

표 1. 불연속면의 간격과 연장에 대한 통계법칙

Source	Spacing	Extension	Geology
Barton (1978)		LogN	metamorphic
Bridges (1976)		LogN	metamorphic
Call et al. (1976)	Exp.	Exp.	porphyritic
Cruden (1977)		Exp.	variant
Memahon (1974)		LogN	variant
Priest and Hudson (1977)	Exp.		chalk and variant
Robertson (1970)		Exp.	Debeers mine
Snow (1970)	Exp.		quartzite
Steffan et al. (1975)		Exp.	metamorphic and variant

P.J. Pahl은 절리의 평균연장을 예상하는 방법을 제안하였는데 측정구역의 측벽 방향에 수직으로 나타나는 불연속면에 대해 N을 총 절리의 수, N_i , N_l , N_c 를 위에서 말한 3가지 경우의 각각에 해당하는 절리의 수라고 한다면 절리의 평균연장 μ 는 다음과 같다.

$$\mu = h \cdot \frac{1 + N_i/N - N_c/N}{1 - N_i/N + N_c/N}$$

절리가 window의 방향과 ϕ 의 각도를 이룬다면

$$\mu = l \cdot h \frac{1 + N_t/N - N_c/N}{(l \cos \varphi + h \sin \varphi)(1 - N_t/N + N_c/N)}$$

여기서 N , N_t , N_c 는 그림 6의 $BCDD'$ 에서 측정된 절리의 수이다.

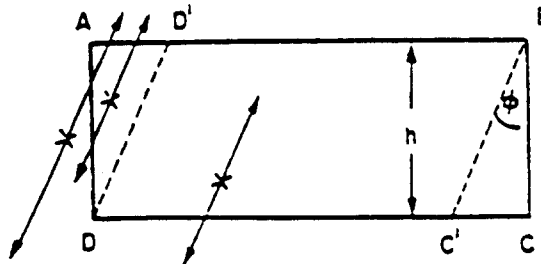


그림 6. 측정구역의 바닥에 수직이 아닌 절리의 분포

그런데 log-normal 분포에서 파라미터를 예측하기가 어렵기 때문에 log를 취하여 μ_{LN} 과 σ_{LN} 의 값을 구하여 간접적으로 예측할 수 있는데 μ_{LN} 과 σ_{LN} 은 최대근사법에 의해 예측한다. 따라서 평균연장 μ 와 표준편차 σ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\mu = \exp\left(\mu_{LN} + \frac{\sigma_{LN}^2}{2}\right)$$

$$\sigma = [\exp(2\mu_{LN} + \sigma_{LN}^2) \cdot [\exp(\sigma_{LN}^2) - 1]]^{1/2}$$

3.2.2. 불연속면의 간격(밀도)

공간 내에서의 불연속면의 위치는 편의상 불연속면을 대표하는 한점, 예를 들면 중심점으로 표시할 수 있기 때문에 공간내의 불연속면의 분포를 punctual process로 나타낼 수 있다. N punctual process에서 $N(V)$ 을 V 내의 점의 수로 정의하면 $N(V)$ 은 체적 V 에서의 절리 수를 나타낸다. 실제로 N 에서 있을 수 있는 정보란 2차원의 조인트의 교차선 뿐이다. 교차선의 위치를 이 선의 대표점으로 표시하면 평면내의 교차선의 분포는 평면에 $N(V)$ 을 투사하면 된다. 가장 간단하고 널리 이용되고 있는 punctual process는 Poisson법인데 이 방법은 다른 두 가지의 특징을 가지고 있다.

1) 돌썩 분리된 집합들 V_1, V_2, \dots, V_n (즉 $V_i \cap V_j = 0$)에 대해 임의 변수 $N(V_1), N(V_2), \dots, N(V_n)$ (즉 V_1, V_2, \dots, V_n 에서의 점의 수)는 독립적이다.

2) 임의 집합 V 에서 임의 변수 $N(V)$ 은 $\int_V \lambda dV$ 의 Poisson법칙에 따른다.

$$P(N=n) = \exp(-\lambda_v \cdot V) \frac{\lambda_v \cdot V^n}{n!}$$

불연속면의 연장, 밀도, 간격은 상호 연관되어 있는데 수학적인 고찰 및 시뮬레이션을 위해서는 연장과 밀도를 이용하는 것이 좋다. 실제로 간격은 직접 쉽게 측정하기 때문에 밀도를 예측하는데 자주 사용되고 있다. 여기서는 불연속면의 밀도에 대해 몇가지 정의를 내린다.

- 체적밀도(λ_v) : 암반의 단위부피당 불연속면의 평균 수(또는 불연속면의 중심점의 수)
- 표면밀도(λ_s) : 암반의 단위면적당 불연속면의 평균 수(또는 불연속면의 중심점의 수)

-선밀도(λ_i) : 불연속면의 간격에 역방향인 측정선과 불연속면과의 교차점의 평균 수

Poisson process의 특징에 의하면 이웃한 두점 사이의 간격 s 는 지수법칙에 따른다.

$$P(s) = \frac{1}{\lambda_l} \exp\left(-\frac{s}{\lambda_l}\right)$$

불연속면의 체적밀도 λ_v 는 표면밀도와 선밀도로서 구할 수 있다.

$$\lambda_v = \lambda_s/[2 \sin \alpha \cdot E(r)]$$

$$\lambda_v = \lambda_l/[2 \cos \alpha \cdot E(r^2)]$$

여기서,

α : 불연속면의 법선과 측정면의 법선의 사이각

θ : 불연속면의 법선과 측정선의 사이각

r : 반경

$E(r)$: 평균연장

$E(r^2)$: 연장의 2차 모멘트 : $E(r^2) = \int_0^\infty x^2 f(x) dx$, $f(x)$ 는 임의의 연장변수 x 의 밀도함수
선밀도 λ_i 는 간단히 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\lambda_i = N/L$$

여기서,

N : 측정선과 교차하는 불연속면의 수

L : 측정선의 길이

Kulatilake와 Wu (1984)는 측정 window내에 절리의 중심이 나타나는 확률을 계산함으로써 λ_i 를 예측하는 방법을 개발하였다. window내에서 절리는 3가지 출현형태로 나타나고 있다.

1) Intersection

절리가 window를 가로지르며 한쪽 끝만 window내에서 볼 수 있다. window내에 절리의 중심이 있을 확률은 다음과 같다.

$$P_i = \frac{\int_0^{2a} f(x) dx}{\int_0^\infty f(x) dx}$$

$$P_i = 1 - \exp(-a/\mu) \quad (f(x) + \frac{\exp(-x/\mu)}{\mu} \text{ 일때})$$

2) Transection

절리가 window를 가로지르며 window내에서 절리의 양끝을 볼 수 없다. 절리의 중심이 window내에 위치할 확률은 다음과 같다.

$$P_t = \frac{1}{\int_0^\infty f(x) dx} \left\{ \int_{2a}^\infty \frac{a}{x-a} f(x) dx + \int_a^{2a} f(x) dx \right\}$$

$$P_i = \frac{\exp(-a/\mu)}{\mu} \int_{2a}^{\infty} \frac{x}{x-a} \exp(-\frac{x}{\mu}) dx + 1 - \exp(-\frac{a}{\mu})$$

$$(f(x) = \frac{\exp(-x/\mu)}{\mu} \text{ 일 때})$$

3) Containment

window내에 절리의 양끝단이 나타나기 때문에 확률 P_c 는 다음과 같다.

$$P_c = 1.0$$

따라서 window내에 N개의 절리가 존재하며 이중에서 type 1의 절리의 수가 N_1 , type 2의 절리의 수가 N_2 , type 3의 절리의 수가 N_3 라고 하면 평균밀도 λ_s 는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\lambda_s = \frac{1}{L \cdot H} \left\{ N_c + \sum_{k=1}^{N_1} (P_i)_k + \sum_{k=1}^{N_2} (P_i)_k \right\}$$

여기서,

L : window의 길이

H : window의 높이

표는 상기한 이론에 근거하여 한국자원연구소에서 보령댐 절취사면의 조사자료로부터 사면에 분포하는 불연속면의 연장, 간격 등을 구한 결과를 보인 것이다.

표 2. 보령댐 절취사면의 주요 불연속면의 연장 및 밀도

사면	불연속군	연장 (m)	밀도 (개/m ²)
왼쪽사면	ST1	43.80	0.003
	ST2	17.64	0.004
	ST3	15.06	0.004
	ST4	32.48	0.002
오른쪽사면	ST1	25.60	0.004
	ST2	56.09	0.005
	ST3	15.16	0.001

3.3 사면평가대상 암반의 SMR 분류법

SMR(Slope Mass Rating)에 의한 암반사면의 분류법⁽⁴⁾⁽⁵⁾은 암반사면을 1차적으로 평가하는 방법으로 일반 암반의 평가법인 Bieniawski(1973, 1976 & 1989)의 RMR(Rock Mass Rating)을 근거로 하여 사면에 대한 요소들을 보정하는 방법으로 Romana(1985, 1988 & 1993)에 의해 제시되었으며, 여기에서는 분류등급에 따라 예상되는 파괴형태와 지보대책에 대한 방법도 제시되고 있다. RMR에 의한 암반분류는 사면에 적용하기가 곤란하며 주로 터널에서 지보의 적합성을 평가하는 암반분류법으로 발전되어 왔다.

반면에 SMR분류법은 사면에 적용하는 암반분류법으로 사면에 대한 보정요소를 고려하여 RMR을 기본으로 하여 적용하고 있다. SMR의 값은 RMR에서 고려하는 i) 암석의 강도(15) ii) RQD 값(15) iii) 불연속면의 간격(20) iv) 불연속면의 상태(30) v) 불연속면을 통과하는 지하수의 상태(15)등 5가지 요소의 평가 값과 SMR의 보정요소로 작용하는 불연속면 및 사면과 관련

된 보정요소의 값으로 구해진다.

불연속면 및 사면과 관련된 보정요소는 다음과 같다.

1) F_1 : 암반사면의 경사방향과 불연속면 경사방향과의 차이 각의 절대 값으로 구하며 F_1 은 0.15에서 1 사이의 값을 가지며 이 값은 경험적으로 아래 식으로 표현되기도 한다. 반면에 차이 각이 30° 이상일 때는 붕괴가능성이 희박한 것으로 본다.

$$F_1 = (\sin A)^2, \quad A: \text{불연속면과 사면과의 사이각.}$$

2) F_2 : 평면파괴 형태에서의 불연속면의 경사각과 관련된 요소로 불연속면의 전단거동 가능성의 척도를 나타내며 이 값은 1.00(경사각이 45° 보다 큰 경우)에서 0.15(경사각이 20° 보다 작은 경우) 사이의 값을 가지며, 또한 경험식으로 표현되기도 한다. 그리고 전도파괴에서는 F_2 는 1의 값을 가진다.

$$F_2 = \tan^2 \beta_j, \quad \beta_j : \text{불연속면의 경사각}$$

3) F_3 : 사면과 불연속면의 경사각의 차이 값으로 나타낸다. 평면파괴에서는 사면에 'daylight' 되는 불연속면의 가능성과 관련되며, 사면과 불연속면이 평행할 때는 양호한 상태이며, 사면의 경사각이 불연속면의 경사각보다 10° 이상 클 때는 불안정한 상태가 된다. 또한 전도 파괴의 경우는 전도의 성격상 불안정하거나 매우 불안정한 상태는 일어날 수 없으며 또한 갑작스런 전도파괴도 극히 드물고 전도된 사면도 그대로 유지되는 경우가 많다.

이 사면분류 방법에서는 쉼기형의 파괴에 적용하는 요소는 평면파괴에서 적용되는 요소와 특별하게 고려되는 것이 없다.

F_4 는 사면의 굴착방법에 따라 변하는 보정요소로 경험적으로 그 값은 다음과 같이 자연사면은 15, presplitting은 10, smooth blasting이 8, 일반파괴나 기계적인 리핑의 경우는 0 그리고 잘못된 발파의 경우는 -8의 값으로 고정된다. 이를 정리하면 다음과 같다.

표 3. 절리방향, 경사를 고려한 보정계수

SMR보정계수	매우 유리	유리	보통	불리	매우 불리
$ \alpha_j - \alpha_s $ F_1	$> 30^\circ$ 0.15	$30 \sim 20^\circ$ 0.40	$20 \sim 10^\circ$ 0.70	$10 \sim 5^\circ$ 0.85	$< 5^\circ$ 1.00
$ \beta_j $ F_2	$< 20^\circ$ 0.15	$20 \sim 30^\circ$ 0.40	$30 \sim 35^\circ$ 0.70	$35 \sim 45^\circ$ 0.85	$> 45^\circ$ 1.00
$\beta_j - \beta_s$ F_3	$> 10^\circ$ 0	$10 \sim 0^\circ$ - 6	0° - 25	$0 \sim - 10^\circ$ - 50	$< - 10^\circ$ -60

α_j : 절리 경사방향

α_s : 사면 경사방향

β_j : 절리경사

β_s : 사면경사

결과적으로 이러한 보정요소를 고려한 SMR의 값은 아래 식으로 구하며 이 값에 따른 등급은 표 4와 같다.

$$SMR = R + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4$$

표 4. SMR에 의한 암반 분류 등급표

등급	SMR	판정	안정성	예상파괴
I	81~100	매우 양호	매우 안정	-
II	61~80	양호	안정	약간의 블록
III	41~60	보통	부분적 안정	일부 불연속면 다수의 썩기형 파괴
IV	21~40	불량	불안정	평면파괴 큰 썩기형 파괴
V	0~20	매우 불량	매우 불안정	대규모 평면파괴 토사형의 파괴

여러 set의 불연속면이 존재할 경우는 각각의 불연속면 set에 대한 암반평가를 실시하여 그 중에서 가장 낮은 SMR의 값을 현지 암반의 SMR값으로 정한다.

3.4. 불연속면의 거칠기와 전단강도.

암반사면의 안정성을 해석함에 있어 중요한 요소의 하나는 잠재적인 파괴면의 전단강도인데 이 잠재 파괴면은 단일 불연속면으로 구성되거나 무결암질의 일부균열을 포함한 몇 개의 불연속면으로 구성되는 복잡한 경로를 따르기도 한다.

사면의 파괴가 시험한 것과 유사한 단일 절리면을 따라 일어나기 쉬운 사면을 설계할 때에는 암석 자연절리면의 전단시험에서 얻어진 결과를 사용할 수 있지만 몇 개의 절리를 포함한 복잡한 파괴과정과 무결암의 파괴가 예상되는 사면을 설계할 때에는 이 전단 시험결과를 직접 사용할 수 없다. 후자의 경우에는 시험에서의 전단과정과 암반에서 예상되는 파괴과정간의 차이를 고려하여 전단강도 시험결과에 수정을 가해야 하며 이러한 수정은 불연속면의 거칠기, 풍화, 압력수의 존재, 전단면의 규모 등을 고려하여야 한다.

불연속면의 거칠기(roughness)를 고려한 전단강도는 Ladangi와 Archambault, Patton, Barton의 제안식들이 유명하며 최근에는 Barton의 경험식이 가장 많이 이용되고 있다.

$$\tau = \sigma_n \tan \left[\phi_r + JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma} \right) \right]$$

이 식에서 JCS는 불연속면의 압축강도, JRC는 절리 거칠 계수(joint roughness coefficient)이다. JRC는 Barton이 제시한 절리 기복의 도시곡선으로 5~20까지 몇 단계로 구분 정성적으로 결정하도록 되어 있어 사용자의 주관에 따라 달리 적용될 수 있는 단점이 많아 최근 이를 정량적으로 측정하여 사용할 수 있는 수정식이 많이 연구되고 있다⁽⁷⁾⁽⁸⁾.

4. 암반사면의 안정성 해석방법

4.1. 평사투영법을 이용한 해석법

여러 형태의 사면 파괴는 다양한 지질구조와 관련되므로 불연속면의 평사투영시 투영된 극점들은 서로 다른 분포 양상을 띄게 된다. 그림 7은 사면 파괴 형태와 평사 투영에 의해 나타난 구조와의 관계를 보여주고 있다. 원형 파괴는 극점이 집중 방향없이 산발적으로 나타나는 경우에서 발생 가능하며, 사면의 방향과 같은 방향으로 한 곳에 극점이 집중적으로 분포할 때

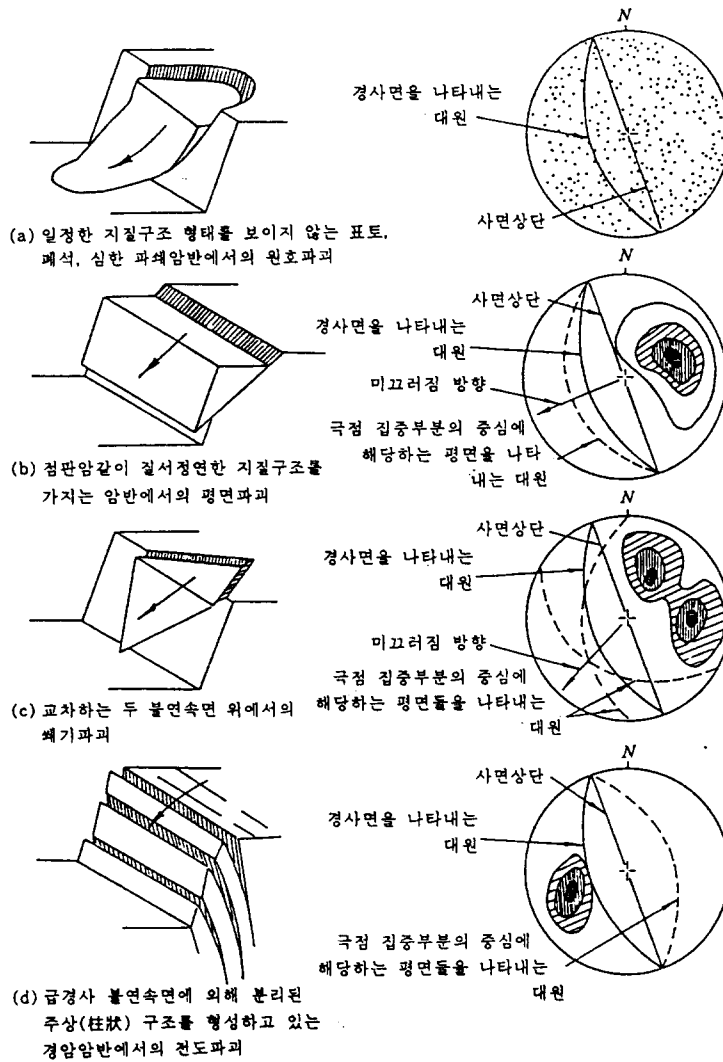


그림 7. 사면의 파괴형태와 평사투영에 의해 나타난 구조와의 관계

는 평면 파괴가 일어날 수 있다. 한편 쉼기파괴는 극점이 사면의 방향과 같은 방향으로 두 곳에 집중되는 경 발생하며 전도파괴(Toppling)는 사면의 방향과 반대방향에 극점이 우세하게 나타나는 경우에 일어난다. 이상에서 알 수 있듯이 사면파괴는 불연속면의 방향뿐만 아니라 사면 자체의 방향과 경사에도 크게 영향을 받으므로 투영시 반드시 사면의 방향을 나타내어야 한다. 그림 7은 파괴 유형별 평사 투영 결과를 명료하게 파악하기 위하여 단순화시켜 보인 것이다. 그러나 실제 암반 사면에서는 다양한 지질 조건이 복합적으로 존재하므로 하나의 암반 사면에서도 다양한 파괴가 일어날 수 있다.

4.1.1. 평면파괴

평면파괴는 암반 사면의 경우 비교적 드문 파괴 형태로서 평면 파괴가 일어날 조건은 다음과 같다.

- a) 슬라이딩이 일어날 가능성이 있는 면의 주향이 사면의 주향과 20° 이내일 경우
- b) 파괴면의 경사가 마찰각보다 크고 사면의 경사보다 작을 경우(그림 8)

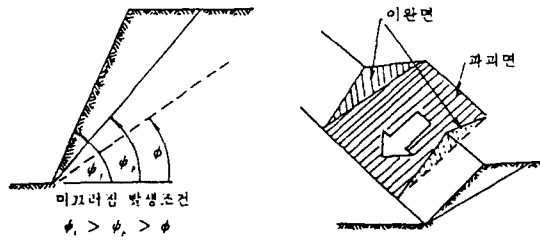


그림 8. 평면파괴의 조건

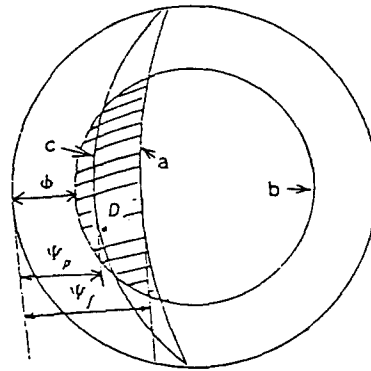


그림 9. 평면파괴의 평사투영해석

c) 슬라이딩의 측면 경계면이 슬라이딩이 발생할 수 있도록 무시할 정도의 작은 저항면을 지니는 면일 경우(그림 9)

평사투영을 통해서 평면 파괴 가능성을 규명하고 이를 통해서 사면의 최대 안전각을 구하는 방법은 다음과 같다. 먼저 그림 9에서와 같이 stereonet 상에 사면의 주향과 경사를 나타내는 대원 (a)를 그리고 불연속면의 마찰각 값에 해당하는 소원 (b)를 그린다. 이 때 불안정한 영역은 대원 (a)와 소원 (b)로 이루어진 빗금친 영역으로서 이 영역에 불연속면의 경사 벡터 D가 존재할 경우 평면 파괴가 일어날 수 있다. 그러므로 사면의 최대 안전각을 얻기 위해서는 D를 포함할 수 있는 대원 (c)를 작도하고 이 대원에 해당하는 각도가 사면의 최대 안전각이라고 할 수 있다.

4.1.2. 썩기 파괴

썩기 파괴는 두 개의 불연속면을 따라서 발생하는 암석 블록의 미끄러짐으로 인한 파괴 형태로서 기본적인 역학 관계는 평면 파괴와 유사하다고 할 수 있다. 썩기 파괴는 그림 10에서 볼 수 있는 바와 같이 다음의 조건에서 발생할 수 있다.

$$\Psi_{f_i} > \Psi_f > \phi$$

여기서,

Ψ_{f_i} : 사면의 경사

Ψ_f : 두 개의 불연속면의 교선의 경사

ϕ : 마찰각

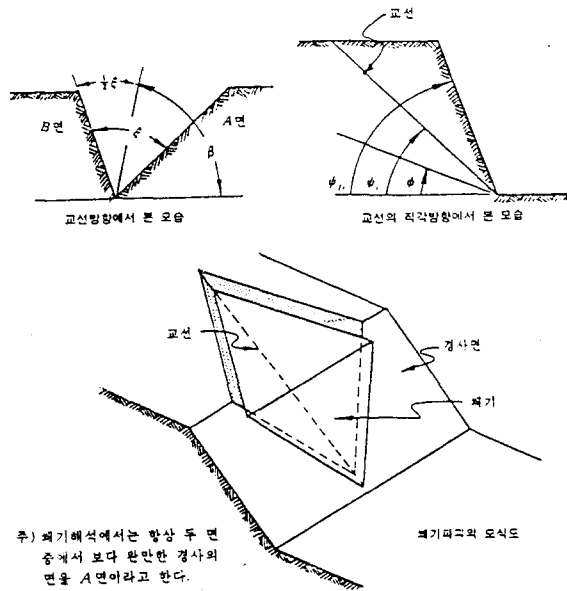


그림 10. 썩기파괴의 기하학적 표현

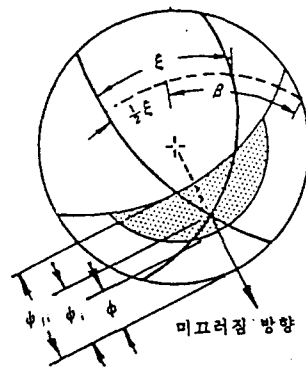


그림 11. 썩기파괴의 평사투영해석

이러한 썩기 파괴의 조건은 평사 투영 해석을 통해서 쉽게 규명할 수 있는데, 이는 평면 파괴와 유사하며 경사 벡터 대신에 불연속면들의 교선으로 이루어지는 교선 벡터 I를 고려한다는 점이다. 해석 방법은 그림 11과 같이 사면의 방향성을 나타내는 대원 (a)와 마찰원 (b)로 이루어지는 부분이 불안정 영역이 되며 이 영역에 교선 벡터가 포함될 경우 썩기 파괴의 가능성이 있다. 이 때 불안정한 사면의 최대 안전각은 교선 벡터를 포함하는 대원 (c)를 그리고 이에 해당하는 각이 사면의 최대 안전각이 된다.

4.1.3. 전도 파괴(toppling)

전도파괴는 파괴형태에 따라 다음과 같이 분류할 수 있다.

가) 굴곡 전도파괴(flexural toppling)

이는 잘 발달된 급경사의 불연속면에 의해 분리되어 있는 연속적인 주상의 암반이 사면의 전면 방향으로 휘어지면서 굴곡되어 파괴되는 파괴 현상으로서 미끄러짐, 사면 선단(toe)의 침

식 또는 굴삭 등으로 인하여 파괴가 시작되며, 이는 깊고 넓은 인장 균열을 생성하면서 암반 속으로 침투하여 사면의 후반부로 균열이 전파하여 전체적인 파괴가 이루어진다.(그림 12.)

나) 블록형 전도파괴(block toppling)

그림 13 에 나타난 것처럼 이는 경암의 암주들에 서로 수직적인 절리들이 넓은 간격으로 분포되었을 때 발생한다. 파괴양상은 사면의 선단을 형성하는 짧은 암주들을 후반부의 긴 암주들이 전복하면서 생기는 하중에 의해 전반부로 슬라이딩이 발생하며, 이러한 사면선단의 슬라이딩은 파괴가 사면의 상부로 전개되는 동기가 된다.

다) 복합 전도 파괴(block flexure toppling)

그림 14에서 볼 수 있는 바와 같이 이러한 파괴양상은 수많은 회전절리에 의해 분리된 암주들에서 발생하는 반연속적인 굴곡으로 특징 지워진다.

전도파괴를 평사투영 해석을 통해서 규명하는 방법은 다음과 같다. 그림.15에서와 같이 사면의 경사가 α , 불연속면의 경사가 δ 일 때 전도파괴가 일어날 조건은 먼저 층과 층사이의 미끄러짐이 발생해야 하며 이는 아래의 조건식으로 나타낼 수 있다.

$$(90 - \delta) + \phi_i < \alpha$$

또다른 전도파괴의 조건은 불연속면의 주향과 사면의 주향은 30° 이내이어야 한다는 조건이다. 평사투영 해석에서 위 조건식은 사면의 주향과 경사를 나타내는 대원(a)에서 불연속면의 마찰각 ϕ_i 만큼 이동한 영역이며 불연속면과 사면의 주향의 차이는 30° 이내여야 한다는 조건을 더하면 그림 15 의 빗금친 영역이 된다. 이러한 빗금친 영역이 불안정한 영역으로서 이 영역 내에 불연속면의 수직벡터 N이 존재하면 전도파괴가 발생하게 된다. 그러므로 전도파괴가 발생할 수 있는 사면의 최대안전각은 수직벡터 N으로부터 마찰각 ϕ_i 만큼 이동한 점을 지나는 대원(b)에 해당하는 값이다.

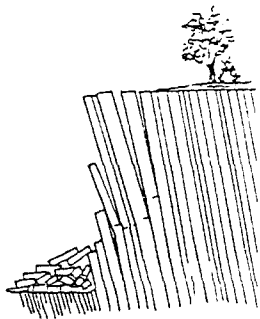


그림 12. 굴곡 전도파괴

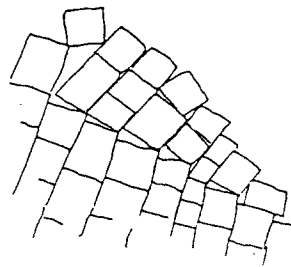


그림 13. 블록형 전도파괴

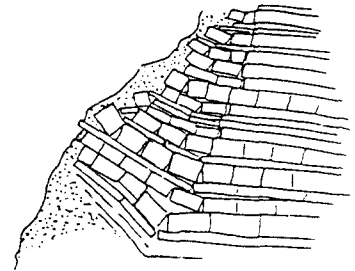


그림 14. 복합 전도파괴

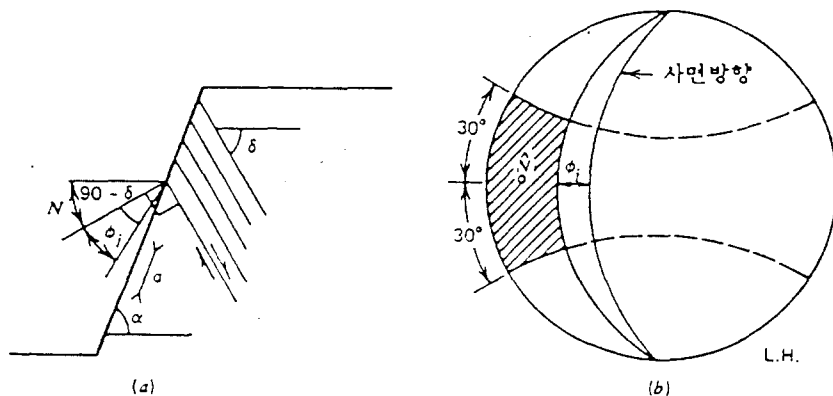


그림 15. 전도파괴의 평사투영해석

그림 16은 이상에서 설명한 평사투영법을 이용한 사면 안정해석을 전산해석할 수 있는 서울대 공대 암반공학 연구실이 보유하고 있는 프로그램의 흐름도를 나타내며 표.5는 이 프로그램을 사용하여 서울 무악재 위험절개지의 대상지역에 안정성해석을 한 결과이다⁽²⁾. 표 6은 이 지역의 암반조사에서 얻어진 불연속면들을 평사투영해석하여 얻어진 우세 절리군을 표시하고 있다.

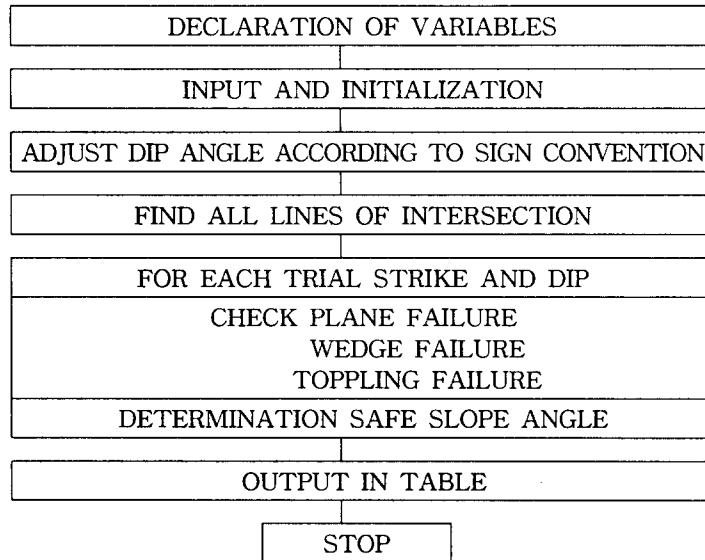


그림 16. 프로그램의 흐름도

표 5. 각 지역별 사면안정해석 결과⁽²⁾

지 역	사면의 방향 및 경사 (°)	파 괴 유 형		최 대 사면 안정각 (°)
		전체적	국부적	
A	N30W, 76SW	T ₃	I ₁₂ , I ₂₃	44
B	N33W, 73-84SW	T ₃	I ₁₂ , I ₂₃ , I ₁₃	45
C	N35W, 50-87SW	T ₂	I ₁₂ , I ₂₃	45-48
D	N34W, 69-75SW	T ₂	-	42
E	N32W, 78SW	STABLE	I ₁₂	68

여기서 T : 전도파괴

I : 썩기파괴

1,2,3 ; Joint set 번호

표 6. 서울 홍재동 무악재 절개지의 우세 절리군

지 역	Joint set (strike, dip, °)			
	Jt. 1	Jt. 2	Jt. 3	Jt. 4
A	N25 W, 80 SW	N55 E, 81 NW	N30 W, 86 NE	-
B	N52 E, 70 SE	N20 E, 73 NW	N30 W, 80 NE	N80 W, 83 SW
C	N35 E, 85 NW	N40 W, 80 SW	N40 E, 83 SE	-
D	N20 E, 65 NW	N30 W, 80 SW	N75 W, 80 SW	N65 E, 75 SE
E	N80 W, 67 SW	N20 E, 80 NW	N22 E, 75 SE	-

4.2 블록이론(Block theory)에 의한 해석법

현지암반을 불연속면들에 의해 발생하는 암석블록들의 집합체라고 할 때 이 암석블록들의 거동은 암반내 구조물의 안정성에 중요한 영향을 미친다고 할 수 있다. 블록의 거동양상은 암석블록의 경계부를 구성하는 자유면과 불연속면들의 상대적인 위치와 방향, 그리고 블록에 작용하는 힘의 방향에 따라 결정되는데 이 때 자유면이 생성되는 즉시 이동하게 되는 불안정한 블록을 키블록(Key block)이라고 한다.

블록이론은 터널이나 사면 등에 존재하는 절리군들의 방향성을 조사하고 여기에서 얻은 정보로부터 현지 암반구조물에 나타날 수 있는 모든 종류의 키블록들의 형상과 발생위치, 이동방향등을 규명하여 구조물의 안정성 평가에 적용하는 방법이다.

블록이론에서의 주요 가정들은 다음과 같다.

첫째, 모든 절리는 평면으로 이루어져 있다 : 절리의 방향은 하나의 법선벡터로 나타낼 수 있는 평면이다.

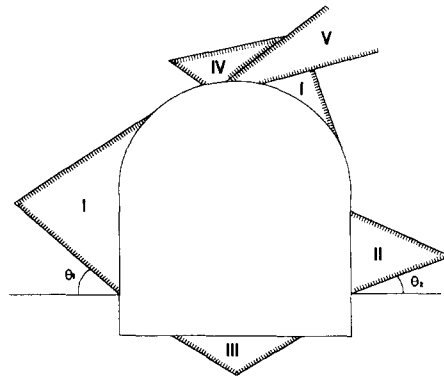
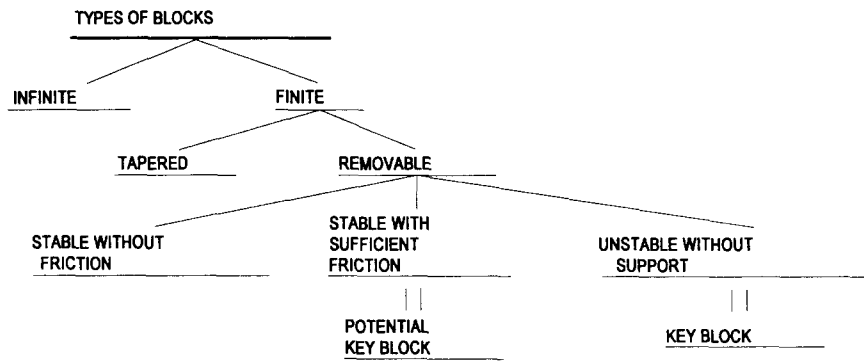
둘째, 절리는 연속성의 특성을 지니며 블록은 기존의 절리들의 조합에 의하여 생성된다 : 블록을 구성하는 절리는 그 방향만을 고려하며 암반내 연장정도는 무시하고 새로운 불연속면의 생성은 없다고 가정한다.

셋째, 암반은 강체이다 : 암반내에 존재하는 응력 등에 의한 암석블록의 변형이나 파괴는 고려하지 않는다.

넷째, 각 절리군을 대표하는 방향들을 입력자료로 이용한다 : 현지에 존재하는 모든 절리의 방향이 입력자료로 이용되는 것이 아니며 이 절리들을 몇 개의 군으로 분류한 뒤 각 절리군을 대표하는 하나의 평균 방향정보만을 취한다. 따라서 절리군이 n 개 존재할 때 입력자료로 사용되는 절리의 방향자료는 n 개가 된다.

블록은 먼저 유한성과 무한성에 따라 분류하는데 암반 내에서 불연속면과 자유면에 의해 경계가 설정되어 일정한 부피를 갖는 다면체를 유한블록(Finite block)이라 하며 특정방향으로 무한한 연장성을 가지는 블록을 무한블록(Infinite block)이라고 한다. 유한블록은 다시 테이퍼드블록(Tapered block)과 거동가능블록(Removable block)으로 분류할 수 있다. 테이퍼드블록은 블록에 작용하는 힘의 방향이나 크기에 상관없이 기하학적인 구조로 인하여 암반내에 갇혀서 자유공간으로의 이동이 불가능한 블록이다. 거동가능블록은 다시 안정블록(Stable block)과 잠재적(Potential) 키블록, 그리고 키블록으로 구분된다. 안정블록은 블록에 작용하는 합력의 방향과 자유면의 방향 관계에 따라 이동이 제지되는 것으로서 불연속면에서의 마찰에 의한 저항력이 없다고 가정하여도 변위를 일으키지 않는다. 반면에 잠재적 키블록이나 키블록의 경우는 합력이 블록의 거동을 가능하게 하는 방향으로 작용하며 이동여부는 접촉면의 마찰각에 따라 결정된다. 즉, 키블록은 외부에서의 지보력이 없는 한 즉시 자유공간으로 이동하게 되나 잠재적 키블록은 접촉면의 마찰저항력으로 인하여 거동하지 않는 경우이다. 키블록 중에는 암반내에 접촉면을 가지지 않으므로 불연속면의 마찰각에 상관없이 합력의 방향을 따라 이동하는 경우(Lifting)가 있다.

상기내용을 요약하면 다음의 도표와 같으며 그림 17 에는 2차원 공동 주변에서 발생할 수 있는 대표적인 블록들이 종류별로 도시되어 있다.



($\theta_2 < \psi < \theta_1$, ψ : 마찰각)

그림 17. 공동주변에 발생하는 블록의 분류 :

I-키블록, II-잠재적 키블록, III-안정블록, IV-테이퍼드블록, V-무한블록

4.2.1. 유한성 및 거동성 해석

하나의 공간은 무한 평면에 의하여 두 개의 반무한 공간으로 나뉘어진다. 모든 블록한 형태의 블록은 그 경계부를 구성하는 평면들에 의해 만들어지는 반무한 공간들의 교집합으로 이루어진다고 볼 수 있다. 블록을 구성하는 절리면들을 평사투영도에 나타낼 때 절리면의 경계가 되는 원호들로 둘러싸여 만들어지는 2차원 폐각형들을 절리피라미드라 부른다.

블록이론에서는 절리 피라미드를 간단하고 효과적으로 표현하는 방법으로서 블록코드를 사용한다. 각 절리면에 대하여 상부 반무한 공간을 '0'으로 표기하며 하부 반무한 공간을 '1'로 나타낸다. 환산된 숫자들을 절리의 번호와 같은 순서대로 나열하는데 만약 절리피라미드에 특정 절리가 포함되어 있지 않다면 '2'로 표기한다.

이제 표 7 에 나타난 바와 같이 경사와 경사방향을 갖는 3개의 절리와 1개의 자유면을 평사 투영도에 나타내 보자. 그림 18에 그 결과가 나타나 있다. 투영구의 수평면 경계를 나타내는 기준원(Reference circle)이 점선으로 그려져 있고 자유면은 파선 형태이며 그 밖의 절리면들은 실선의 대원으로 표현되어 있다. 절리면 대원들에 의해 둘러싸여 있는 닫힌 영역들은 각각 하나의 절리 피라미드를 의미한다. 예를 들어 블록코드가 101 인 영역은 $L1_0 \cap U2_0 \cap L3_0$ 을 의미하는 것으로서 1번과 3번 절리면 대원의 외부이며 2번 절리면 대원의 내부에 있음을 나타낸다. 그림에서 각 절리 피라미드의 곡선 경계는 2차원에서의 절리 피라미드의 직선 경계에 해당한다.

N 개의 절리로 구성되는 절리 피라미드의 총 개수는 2^N 개이며 이중에서 평사 투영도에 나타나는 절리 피라미드는 $N^2 - N + 2$ 개 이다. 따라서 평사 투영도에 나타나지 않는 절리 피라

미드는 $2N - (N^2 - N + 2)$ 개가 존재한다. 평사 투영도에 나타나지 않는 절리 피라미드의 경우 그 블록은 테이퍼드 형태임을 나타낸다. 그림 4.3.2의 경우 $N = 3$ 이므로 총 8개의 절리 피라미드가 존재하며 이중에서 테이퍼드블록은 0 개 이다. 블록의 입체 형상을 생각해 보면 3개의 절리면과 1개의 자유면으로 구성되는 4면체 블록에서는 테이퍼드가 존재할 수 없음을 쉽게 알 수 있다.

그림 18에서 블록의 유한성을 판정하기 위하여 먼저 자유면의 방향을 결정할 필요가 있다. 표 7에서 자유면의 경사각이 15° 로 나타나 있는데 이 면의 상부공간이 자유 공간이라 하면 이 그림에서 자유면을 나타내는 파선 형태의 대원의 내부가 공간 피라미드(SP)가 된다. 이 때 이 대원의 내부에 포함되는 절리 피라미드가 곧 유한 블록에 해당한다. 그림에서 블록코드가 011인 블록이 유일하게 유한성을 가지는 것을 알 수 있다. 또한 평사 투영도에 나타나는 블록은 테이퍼드 형태가 아니므로 011 블록은 동시에 거동가능한 블록이 됨을 알 수 있다. 만약 자유공간이 자유면의 하부에 존재한다면 파선 형태의 대원의 외부를 공간 피라미드로 하게 되므로 그림에서 블록코드가 100 인 블록만이 유한 하며 동시에 거동이 가능함을 알 수 있다.

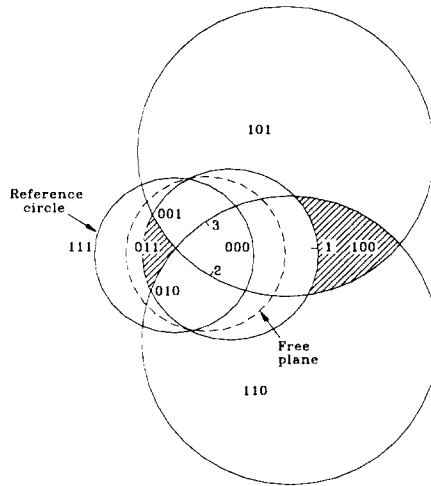


그림 18. 유한성과 거동성을 판별하기 위한 블록이론의 해석 예

표 7. 절리와 자유면의 방향자료

절리 또는 자유면	경사 / 경사방향
1	30 / 90
2	65 / 50
3	65 / 130
자유면	15 / 90

4.2.2. 블록이론에 의한 안정성 해석 결과⁽⁴⁾

표 8은 S대 도서관 후면 암반사면의 절리군의 우세방향을 표시하고 있다. 표 8에 정리된 지역별 절리군 방향자료를 이용하여 블록이론에 의한 해석을 실시하였다. A지역에서 3개, C지역에서 4개의 절리군이 존재하므로 이 두지역에서 해석을 수행하였으나 B지역의 경우는 절리군이 2개이므로 블록이 형성되기 위해서는 동일 절리군의 반복을 허용하여야 한다. 이럴 경우에

평행한 절리면을 가지는 블록이 형성되는데 이러한 블록은 현장에서 사실상 거동이 불가능하므로 본 연구에서는 B지역 사면을 블록이론에 의한 해석대상에서 제외하였다. 본 해석에서 사용한 평사투영법은 하반구 투영법이다.

(1) A지역

사면과 3개의 절리면을 평사투영하고 절리피라미드를 분석한 결과가 그림 19에 나타나 있다. 이 그림에는 8개의 절리피라미드가 존재한다. 은선으로 표시된 사면의 경우 원의 외부 평면이 자유공간이 되므로 이 자유공간의 부분집합이 되는 절리피라미드가 곧 거동가능블록이 된다. 이러한 조건을 만족하는 절리피라미드는 reference circle 의 내부에 있는 '011' 뿐이다. 011블록의 입체형상은 그림 20에서 볼 수 있는 바와 같은 사면체이다. 이 그림은 남쪽의 상부에서 관찰한 모습이다. 블록코드(011)에서 알 수 있는 바와 같이 1번 절리의 상부공간속에 블록이 포함되므로 1번 절리면이 이 블록을 지지하는 밑면이 된다. 미끄러지는 방향의 선경사와 선주향은 각각 50° , 150° 이다. 절리면의 마찰각을 29° 로 결정하였으므로 이 블록은 1번 절리면을 따라 평면파괴를 일으키는 것으로 판단된다. 이 때의 안전율은 0.47로 계산되었는데 이는 곧 키블록을 의미한다. 이러한 평면파괴형태는 평사투영법을 이용한 해석에서도 관찰된 바 있다. 그림 21에는 이 블록에 작용하는 합력의 방향에 따른 안정성의 변화를 판단할 수 있는 평사투영도가 나타나 있다. 그림에서 'R'은 합력벡터를 가리키는 것으로서 10° 간격의 등마찰각선(은선으로 표시)을 통하여 임계마찰각을 알려준다. 여기에서 임계마찰각이란 미끄러짐이 발생할 수 있는 절리면 마찰각의 최대값을 의미한다. 011블록의 경우 'R'이 50° 선상에 위치하므로 절리면의 마찰각이 50° 이하일 경우 평면파괴가 발생함을 알 수 있다. 만약 합력의 방향이 바뀌어 'R'이 실선의 대원(마찰각 90°) 밖에 존재할 경우는 마찰각에 관계없이 합력방향으로 이동(falling 또는 lifting)하게 된다.

A지역에서 011블록과 유사한 구조를 갖는 블록으로서는 사면에 노출된 암괴가 있다. 두 블록 모두 같은 절리면을 지지면으로 한다. 따라서 011블록에 대한 보강문제는 암괴의 안정성 해석결과에 따르면 될 것으로 보인다.

표 8. S대 도서관 후면 암반사면의 지역별 절리군 및 사면의 방향

지역	경사 / 경사방향	
	절리군	사면
A	1번 : 50 / 150 2번 : 62 / 192 3번 : 64 / 58	80 / 168
B	1번 : 82 / 213 2번 : 89 / 140	43 / 198
C	1번 : 66 / 61 2번 : 10 / 104 3번 : 73 / 190 4번 : 25 / 198	40 / 140

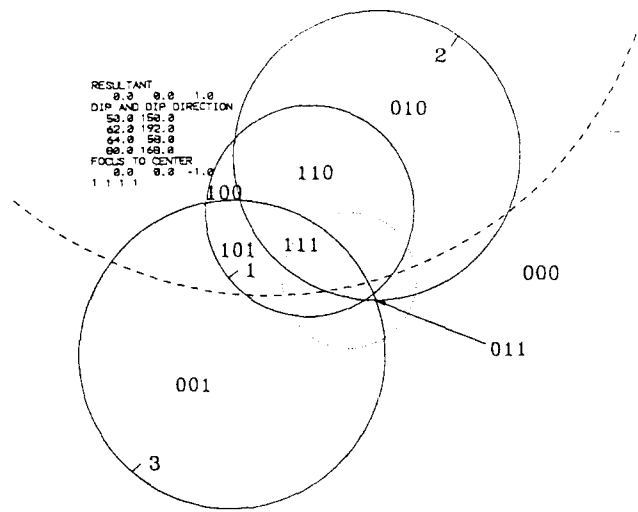


그림 19. 블록이론에 의한 A지역의 평사투영도와 절리피라미드

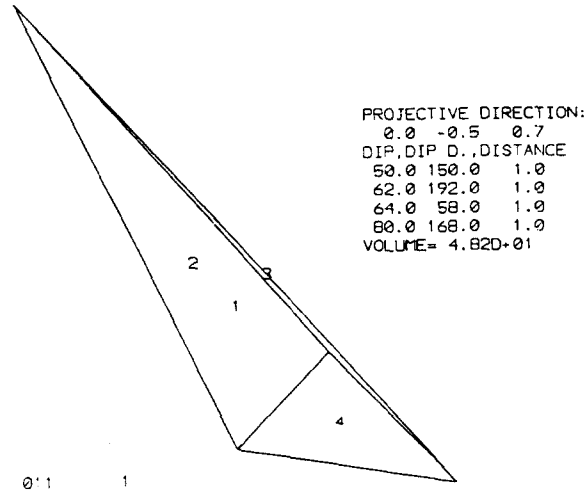


그림 20. A지역 011블록의 입체형상

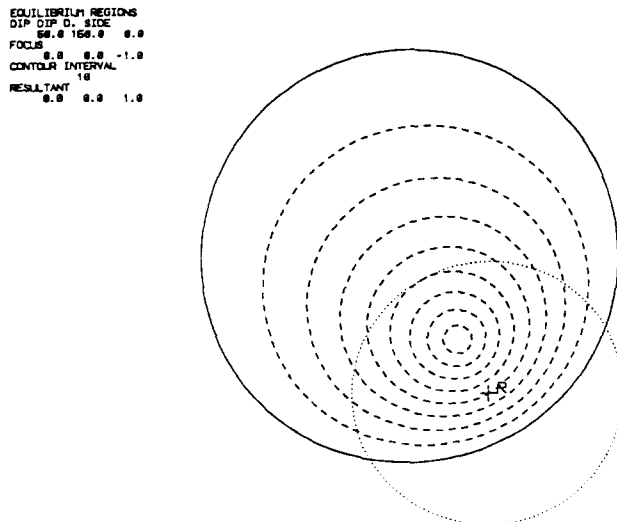


그림 21. A지역 011블록의 안정성 해석도

(2) C지역

이 지역 절리군의 교차에 따라 형성되는 절리피라미드는 그림 22와 같다. 총 16개의 절리피라미드 중 '0110' 과 '1001' 는 테이퍼드 블록이므로 평사투영도에는 14개만이 나타나 있다. 사면을 의미하는 은선의 외부공간, 즉 자유공간에 포함되어 있는 절리피라미드는 '0000', '0001', '0100'의 3개 이다. 거동가능블록인 이들 3개 블록 중 '0100'블록의 형상이 그림 23에 나타나 있다. 그림에서 1 ~ 4번까지는 절리면을 의미하고 5번은 사면을 의미한다. 자중방향을 합력의 방향으로 할 때 0100블록은 1번 절리면(66/61)과 4번 절리면(25/198)이 지지면이 된다. 미끄러짐의 방향을 계산한 결과 0000블록과 0001블록은 선경사와 선주향이 각각 10°, 104° 인 방향을 따르며 0100블록은 15°, 144° 인 방향을 따르는 것으로 나타났다.

안전율을 분석한 결과 0000블록과 0001블록은 3.14, 0100블록은 2.54 을 보였다. 이것은 평사투영법에 의한 안정성 해석결과에서 C지역에 나타나는 쉼기과괴가 모두 불안정성이 없는 것으로 판단된 것과 일치된 양상이다. 그림 24에는 0100블록에 작용하는 합력의 방향에 따른 안정성의 변화에 대한 평사투영도가 나타나 있다. 이 그림에서는 임계마찰각이 13° 정도로 나타나 있다.

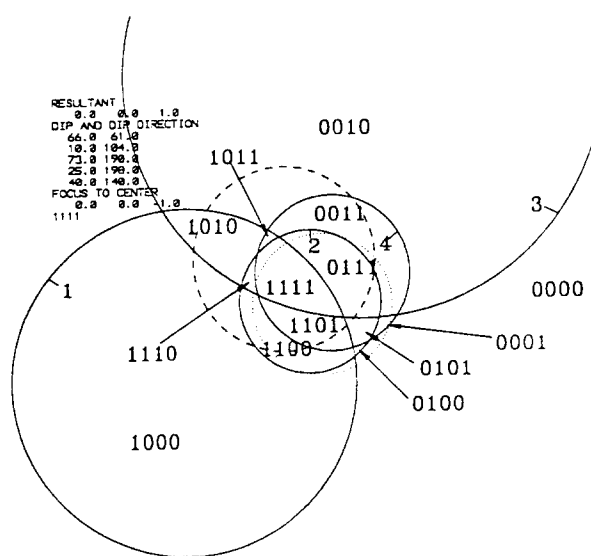


그림 22. 블록이론에 의한 C지역의 평사투영도와 절리피라미드

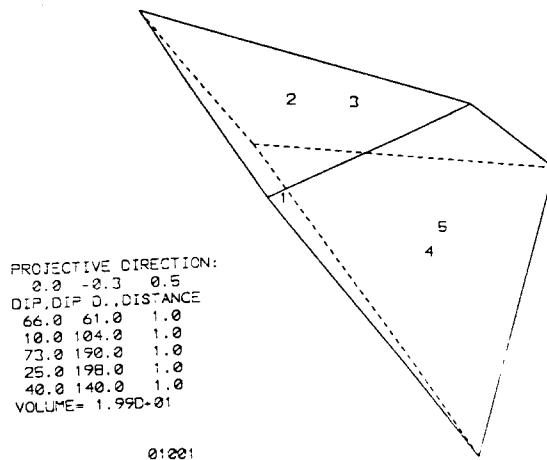


그림 23. C지역 0100블록의 입체형상

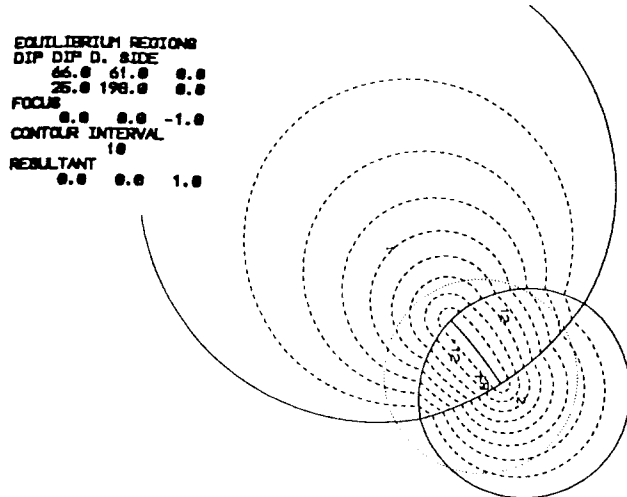


그림 24. C지역 0100블록의 안정성 해석도

4.3. 저면마찰 모형 실험에 의한 전도파괴(toppling) 해석

저면 마찰법은 암반사면의 이차원 모델에서 중력의 효과를 관찰하기 위한 시험법으로서, 이 방법은 중력 하중을 나타내기 위하여 모델재료의 저면에 마찰 전단력을 가함으로서 변형거동 및 파괴형태를 알 수 있다. 마찰 전단력은 그림 25의 시험장치에서와 같이 모델의 바닥면에서 거친 면을 이동시킴으로써 발생된다. 이 실험법은 Goodman, Egger, Esaki, 국내에서는 김영근 & 이회근 등에 의하여 연구되었으며 블록 모형재료로는 석고, 플라스틱, 목재 등을 사용하여 블록전도파괴의 거동을 연구할 수 있다. 저면 마찰 시험에서 모델이 받는 미소요소 dz의 인장력 증분 dT는 그림 26에서

$$dT = \mu_b \cdot \gamma \cdot t \cdot dx \cdot dz$$

여기서 μ_b 는 모델과 벨트사이의 마찰력

γ 는 모델재료의 단위중량

t 는 모델의 두께이다.

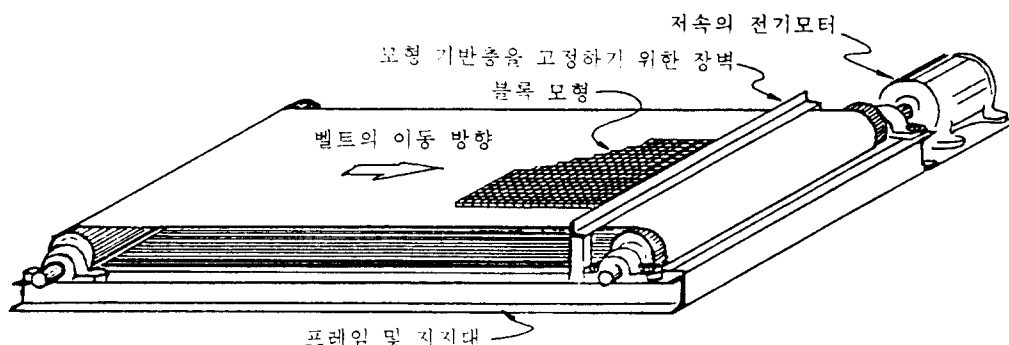


그림 25. 블록 모형에서의 전도파괴 효과를 실증하는데 사용할 수 있는 저면마찰모형시험 장치

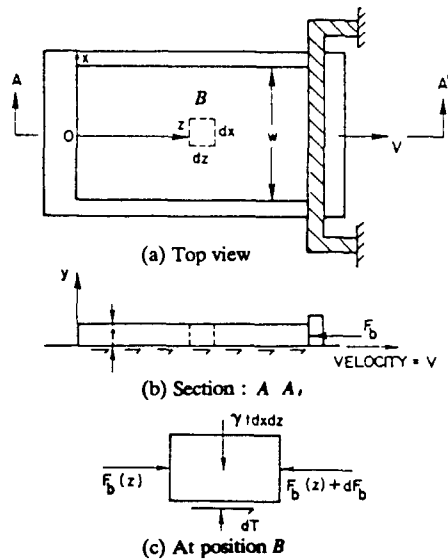


그림 26. 저면마찰시험 모델 (After J.W.Bray et al., 1981)

실제 중력 하에서 각요소의 면적에 작용하는 물체력 dF 는

$$dF = \gamma \cdot t \cdot dx \cdot dz$$

벨트의 이동시 고정벽에 대한 반발력으로 모델저면에 생기는 마찰력은 다음과 같다.

$$dF_b = \int_0^z \cdot dT$$

폭 W , 심도 Z 모델에 대한 마찰력은

$$dF_b(z) = \mu_b \cdot \gamma \cdot t \cdot W \cdot Z$$

따라서 벨트속도와 평행한 방향에서 모델의 수직응력은

$$\sigma_z = \mu_b \cdot \gamma \cdot z$$

이 식은 중력하에서 수직응력과 유사성을 보여준다

그림 27과 그림 28은 저면마찰 모형실험의 결과의 한 예를 보인 것으로 전도파괴가 일어나는 파괴영역과 파괴면 아래의 약간의 전도 현상이 일어나는 불안정영역 그리고 변형이 거의 일어나지 않는 안정한 영역을 주절리 경사각과 사면의 경사각과의 관계를 보인 것이다.

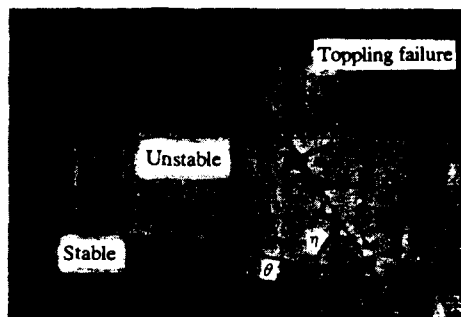


그림 27. 블록사면모형의 전도파괴

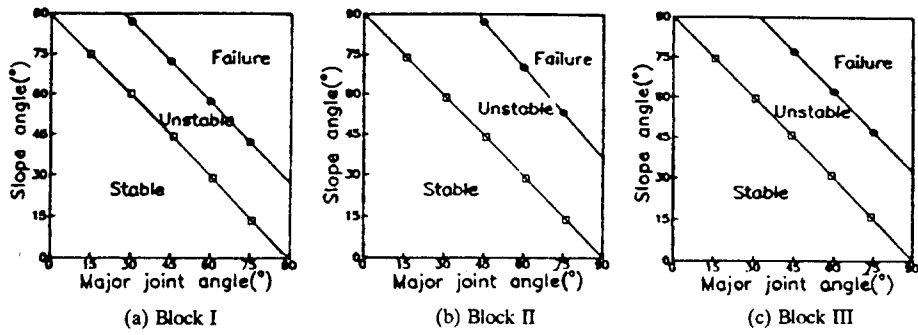


그림 28. 주절리 경사에 따른 사면파괴각과 안정각의 변화

4.4. 개별요소법에 의한 해석법

개별요소법은 암반을 절리나 단층 등으로 나누어진 블록들의 집합체라고 보고 블록들의 접촉면에서 발생하는 힘과 변위와의 관계를 운동방정식에 의거 해석함으로써 블록들의 거동을 예측하는 수치해석적 기법이다. 여기서 블록들은 다시 변형(deformation)을 하지 않는 강성블록(rigid block)과 변형이 가능한 블록(deformable block)으로 구별되는데 변형가능블록의 내부는 유한차분법을 이용하여 연속체 요소로 분할되어 응력 및 변형량이 계산된다.

개별요소법에 의한 수치해석법 중 흔히 많이 사용되는 program UDEC 은 Cundall(1971) 이 개발한 Explicit Formula로서 블록의 이동에 의해 경계면에 발생하는 접촉력 및 변위를 계산한다. 블록의 이동은 블록 시스템을 가로질러 경계면에 전달되는데 이는 동적으로 블록 시스템의 물리학적 특성으로 속도가 전파됨을 의미한다. 수치해석적인 관점에서 이러한 동적인 거동은 시간이라는 매개변수를 도입하여 표시한다. 이때 시간의 크기는 매 계산단계에서 각 블록의 이웃 블록들에 대한 침투가 즉각 전달되지 않을 정도로 충분히 작아야 한다. 이러한 과정은 연속체에서 유한차분법에서 사용하는 방법과 유사하다. 이 개별요소법에 의한 블록 시스템의 변위 계산은 동적인 계산식에 기초를 두고 있기 때문에 정적인 문제에 이 방법의 적용은 시스템이 안정된 상태로 수렴하게 하기 위하여 Damping 상수를 도입하여 동적 이완(Dynamic relaxation)을 시킨다. 이 방법에 사용되는 알고리즘은 강성 블록사이의 상호작용을 나타내는 힘-변위 관계식과 각 블록에 작용하는 힘과 모멘트에 의한 운동방정식에 기초를 두고 있다.

이 개별요소법은 주로 사면의 전도파괴의 거동을 해석하는데 많이 이용되며 특히 전향의 저면마찰모형시험과 병행하여 안정성 해석 및 설계기법으로 많이 활용될 것으로 기대된다.

개별요소법에 관한 자세한 이론은 많이 소개되어 있으므로 여기서는 생략하고 전향의 저면마찰모형 조건을 개별요소법으로 해석한 결과의 예를 그림 29 와 그림 30 에 보여주고 있다.

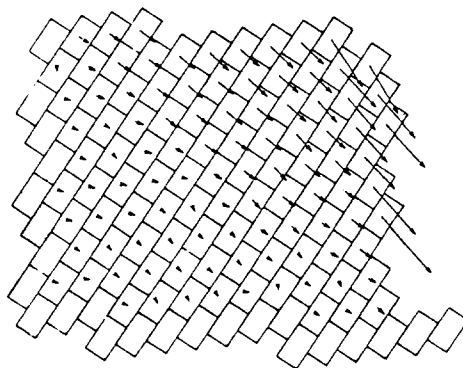


그림 29. 주 절리각이 75° 인 개별요소해석 결과

5. 결론

연속체 역학으로써 암반역학에 관한 연구는 그 동안 많은 발전을 하여 왔으나 단층, 절리 등의 불연속면을 포함하고 있는 불연속체로서의 암반 구조물의 역학적 성질에 관한 연구는 아직도 해결해야 할 많은 여지가 있다.

암반 사면의 역학적 안정성 해석은 터널, 기초암반 등 다른 암반구조물에 비하여 불연속면의 기하학적 분포나 역학적 특성에 가장 많은 영향을 받는 불연속체로서 접근해야 하기 때문에 정답을 얻기란 용이하지 않다.

이 보고에서는 암반 사면의 설계 및 시공작업에서 조사계획단계에서 문제가 되는 불연속면의 평사투영법 전산해석, 한정된 불연속면 조사자료로써 전체 대상지역의 불연속면을 추계하는 통계학적 방법, 사면평가를 위한 SMR 암반분류법을 소개하고 암반사면의 안정성 해석에서 평사투영, 블록이론에 의한 해석방법과 저면마찰모형시험, 개별요소법에 의한 해석법에 대하여 최근의 사례연구를 인용하여 해설하였다. 흔히 지반공학 기술자는 암반사면의 안정성 해석을 특정한 극한 평형이론에 의하여 안전율을 정확히 계산하려고 하지만 이보다는 여러 가지의 해석방법에 의하여 종합적으로 검토하여 안전하게 공학적 판단을 내리는 것이 무엇보다도 중요한 것임을 강조한다.

참고문헌

1. 이정인, 1986, Rockbolt 지보기술 광산적용 시험연구, 대한광업진흥공사 연구보고서, pp. 55-77
2. 서울특별시, 1991, 무악재 위험절개지 안전진단용역 보고서, pp. 61-56
3. 장근무, 1989, Block theory를 이용한 암반사면의 안정성 해석, 서울대 대학원 공학석사 학위논문
4. 이정인, 1996, 상명대학교 도서관 후면 암반사면 안전진단 및 대책에 관한 연구용역 보고서, 서울대 에너지·자원 신기술연구소 보고서, pp. 24-66
5. 한국자원연구소, 1995, 보령댐 절취 암반사면에 대한 안전연구, 한국암반공학회, pp 62-70, pp. 143-154
6. 이정인 역, 1995, 암반사면공학, 도서출판엔지니어즈, pp. 307-324
7. 이정인, 1997, 불연속 암반의 역학적성질과 암반구조물의 안정성 평가, 한국지반공학회 '97 봄 학술발표회 논문집, pp. 17-31
8. 이상돈, 강준호, 이정인, 1994, 절리면의 거칠기에 따른 암석절리의 전단강도 및 변형거동에 관한 연구, 한국암반공학회지, vol. 4, pp. 261-273
9. 송재준, 이정인, 1996, 터널굴착에서 불연속면에 의한 공동주변 암반블록의 안정성해석
10. 장현익, 장근무, 이정인, 1996, 통계적 접근법에 의한 불연속 암반의 지하수 유동해석, 암반공학회지, vol. 6, pp. 30-38

11. Chung-In Lee, Young-Ho Suh, Keu-Moo Chang, Seoung-Cheol Shin, 1992, Stability Analysis and Remedial Works on a Rock Slope at the Muak Pass in Seoul city. Asian Regional Symposium on Rock Slopes, New Delhi India, pp. 147-152
12. Y.G. Kim, H.K. Lee, 1992, Slope Stability Analysis in discontinuous Rocks by base friction model test and its numerical analysis, Asian Regional Symposium on Rock Slopes, New Delhi India, pp. 195-202
13. Gianpaoligiani, 1992, Rock Slope Stability Analysis, A.A. Balkema, pp. 167-185