

斜面安定(VI)

鄭 亨 植*
金 明 模**

2.2 岩石斜面

2.2.1 평사투영법을 이용한 암반 사면 안정 해석

(1) 서 론

Tunnel 굴착이나 암반사면 해석시 주변의 암반의 안정성은 암반내에 존재하는 단층 혹은 절리와 같은 구조면을 잘 해석하고 조절할 수 있느냐의 여하에 달려 있는 것이다.

이러한 구조면을 공학자들이 효과적으로 해석하고 이용할 수 있는 방법으로 가장 많이 사용하는 방법인 평사투영법(stereographic projection)에 의한 방법이 있는데 이에 대해 간략하게 소개하고자 한다.

(2) 주향과 경사

암반에서의 불연속면(단층, 절리)을 표현하는 방법으로 주향(strike)과 경사(dip)가 있다(그림

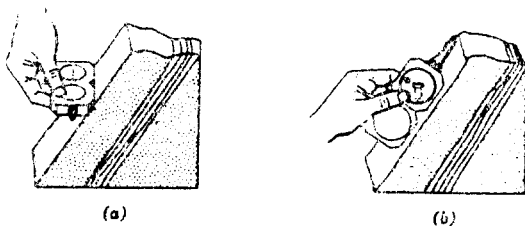
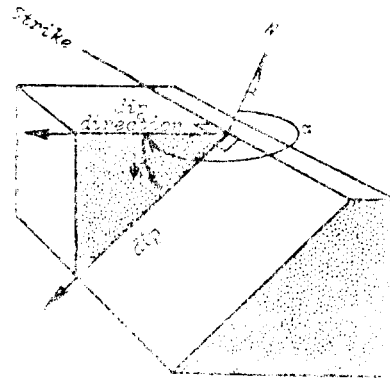


그림 1.a 야외에서 Brunton Compass 를 가지고 주향과 경사를 측정 하는 방법



Definition of geological terms

그림 1.b

1.a). 주향이란 구조면에서 수평선을 그어 북쪽을 기준으로 해서 방향을 나타낸 것(그림 1.b 참조)이고 경사는 면이 수평으로부터 기울어진 각을 나타내는 것(그림 1.b 참조)이다.

예를 들면 N30E, 50SE로 측정된 불연속면은 주향방향이 북동쪽으로 30° 이고 경사는 남동쪽으로 50° 기울어진 불연속면을 말한다. 다른 방법으로는 경사방향과 경사로 120°/50° 등과 같이 표시하기도 하는데 이 방법은 많은 자료를 처리하기 위하여 입력하는데 필요하다.

(3) 평사투영법(Stereographic Projection)

암반내의 불연속면을 표현하는 방법으로 많이 사용되는 평사투영방법은 조작이 간단하므로 구

* 正會員, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수
** 正會員, 서울대학교 공과대학 토목공학과 부교수

조지질학 분야와 암반공학에서 암반의 안정성 분석에서 많이 이용되고 있다.

1) Stereonet 의 종류

평사투영방법에 의하여 작성된 Stereonet 에는 equal area net 와 equal angle net 가 있다.

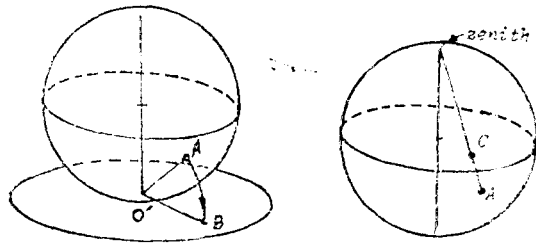
① Equal area projection (Lambert 혹은 Schmidt Projection)

그림 2.a에서 구면 위에 있는 A 점은 구와 수평면의 접촉점이 만나는 원내에 O' 점을 중심으로 이 수평면에 점 B로 투영되는데 이러한 과정이 많은 점, 즉 구표면위에 있는 Longitude 와 Latitude Circle 이 만나는 점들에 의해 반복된다면 Equal area net 가 만들어진다.

이 방법은 같은 면적의 단위로 나누어져 있고 구조 자료를 통계처리 하기 편리하기 때문에 구조 지질학자들이 많이 이용하는 방법이다.

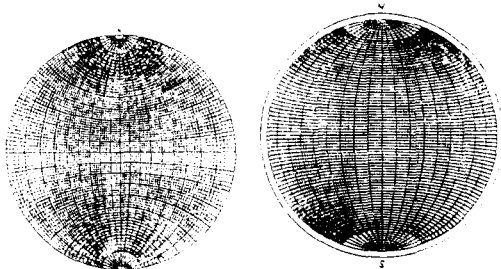
② Equal angle projection (Stereographic 혹은 Wulff projection)

그림 2.b에서 구면위에 있는 점 A 는 이 구의 Zenith(천정)에서 연결을 하게 되면 이 선과 구의 중심을 지나는 수평면과 만나는 B점에서 투영하게 되는데 구면에 있는 많은 점들에 대해 실행을 하게 되면 Equal angle net 가 만들어지



Equal area projection
그림 2.a

Equal angle projection
그림 2.b



<Wulff Net>

<Schmidt Net>

게 된다.

이 방법은 공학적 문제의 해결을 위해 필요한 기하학적인 Construction 이 등면적 투영법보다 더 정확하고 간단하기 때문에 공학자들이 좋아하는 방법이다.

2) 주향과 경사를 가진 불연속면의 투영

예를 들어 103/50, 즉 주향이 N40E 이고 경사가 50SE 인 하나의 불연속면에 대해서 Stereonet 에 투영해 보자.

① Stereonet 위에 트레이싱 종이를 얹어놓고 중심을 고정시키고 방위표시를 트레이싱 종이 위에 한다.

② Great Circle 을 작도하기 위해 북쪽으로부터 시계방향으로 N40E 인 점을 찍는다(그림 3.a).

③ 트레이싱 종이를 회전시켜 이 점이 Stereonet 상에서 북쪽이 되는 점에 고정시킨다. 경사가 50° 인 점을 표시하기 위해 Net 상의 중심을 지나는 수평선에서 원의 바깥 부분에서 중심쪽으로 50° 인 점을 찍고 이 점과 북쪽과 남쪽을 지나는 Great Circle 을 연결시킨다(그림 3.b).

④ 다음으로 이 면에 대한 축을 표시하기 위해 이 Great Circle 에서 90° 가 되는 지점에 점을 찍는다(그림 3.b).

⑤ Net 상에서 트레이싱 종이를 회전시켜 원내의 Net 의 북쪽과 트레이싱 종이의 북쪽 표시지점을 일치시킨다(그림 3.c).

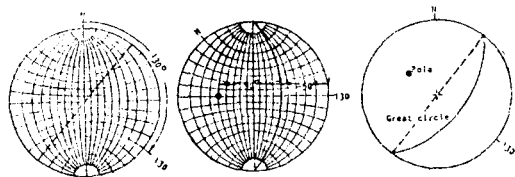


그림 3.a

그림 3.b

그림 3.c

3) 두개의 불연속면의 교선

두개의 불연속면에서 교차되는 선을 결정하는 방법에 대해 알아보자. 예를 들어 주향과 경사가 각각 130/50(즉 주향이 N40E, 경사가 50SE) 와 250/30(즉 N20W, 30SW)인 두 면이 교차되는 선의 Plunge 와 Trend 를 결정하려면

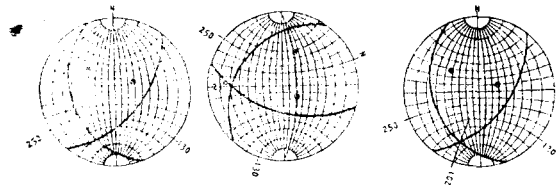


그림 4. a 그림 4. b 그림 4. c

- ① 위의 작도 방법에 의해 두면의 Pole 과 면 이 Stereonet 상에 작도를 한다(그림 4. a).
- ② 이 두 Pole 이 하나의 Great Circle 과 만나 는 선위에 위치하도록 트레이싱 종이를 회 전하여 두 면이 만나는 지점의 각도를 읽는 다. 이것의 각도(21°)가 Plunge 이다(그림 4. b).
- ③ 다시 트레이싱 종이를 회전시켜 원상태로 놓고 중심에서 두면의 만나는 점을 이은 선 을 그리면 이 선의 각도(201°)는 Trend 가 된다(그림 4. c).

4) Pole density diagram

야외에서 수십개 내지 수백개의 불연속면을 측정하여 이것을 Stereonet 상에 Pole 을 찍게되 면 많은 수의 Pole 을 통계처리할 필요성을 갖게 된다. 이러한 통계처리를 하기 위한 방법이 Pole density diagram 이다.

이 방법은 Stereonet 상에 여러 개의 Pole 을 찍고 이에 대한 밀도분포곡선을 그리므로써 우 세한 방향의 불연속면을 찾아낼 수 있고 암반에 작용했던 응력을 추정해 낼 수 있다.

야외에서 측정한 Pole 을 Stereonet 에 Plot 한 것을 가지고 Pole density diagram 을 그리려면

- ① Net 상에 있는 Pole 의 수를 센다.
- ② Net 위에 Count Net(그림 5. a)을 얹어 놓 고 각 육각형 내에 들어 있는 점들의 수를 육각형의 중심에 쓴다(그림 5. b).
- ③ 여기서 주의해야할 것은 원둘레 상에 놓여 있는 반쪽의 육각형내에 있는 점들은 Net 의 반대쪽에 있는 반쪽의 육각형내에 있는 점과 더하여 셈하고 이 수치를 양쪽의 육각 형에 기입한다.
- ④ 그림 5. b에서 C와 같이 반원내에 들어있 는 점들과 그 반대쪽의 반원내에 들어있는

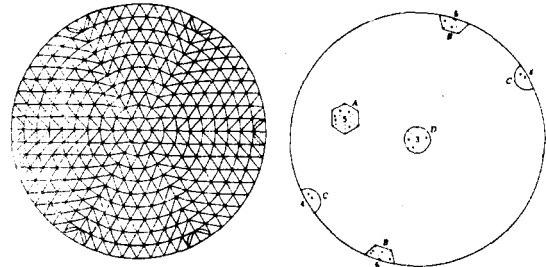


그림 5. a Kalsbeek Counting Net 그림 5. b

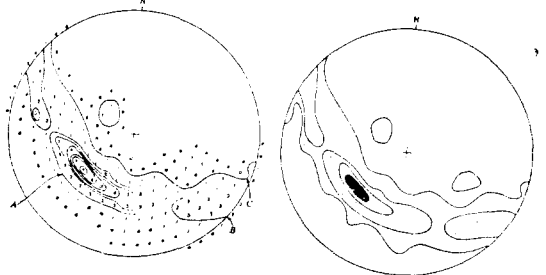


그림 5. c 그림 5. d

점들을 더하여 주고 중심(D)에서는 원내에 들어있는 점들의 수를 셈한다.

- ⑤ 점들의 수를 셈하고 기입이 끝났으면 각 지 점에서 이 점들의 밀도를 계산한다.

(그림 5. c)

계산하는 방법은(각 지점에서 점들의 수/ 전체 Pole 수) $\times 100(\%)$ 이다.

- ⑥ 이 밀도를 각 지점에서의 점들을 셈한 숫자와 바꿔쓰고 Net 상에 기입된 밀도가 같 은 지점을 곡선으로 연결하면 된다.

(그림 5. d)

(4) 암반 사면 안정 해석

전절에서 설명한 ‘평사 투영법’을 이용하면 암반내의 절리를 평사 투영도(stereonet)상에 나타낼 수 있을 뿐만 아니라 절리면을 따라 분리된 암체의 미끄러짐 또는 뿔힘에 대한 안정성 여부도 분석할 수 있다.

1) 예비 지식

평사 투영법을 이용한 암반 사면 안정 해석을 수행하기 위해서는 다음과 같은 예비지식이 있어야 한다.

- ① 두 힘의 벡터 합성

그림 6. a에 보인 두힘 F_1, F_2 의 합력을 평사

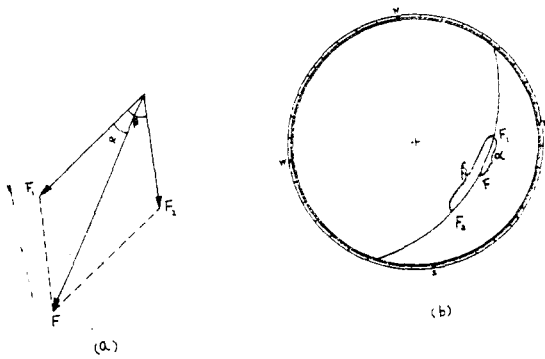


그림 6 두 힘의 벡터 합성

투영도에 나타내려면, 우선 그림 6.a와 같은 보조 작업을 통하여 합력의 크기와 작용 방향을 결정한 후에 평사 투영도 상에 두힘 F_1 과 F_2 를 포함하는 평면을 결정하고 보조 작업에서 구한 합력의 작용 방향을 고려하여 합력 F 의 위치를 구한다(그림 6.b).

② 마찰원뿔(cone of friction)

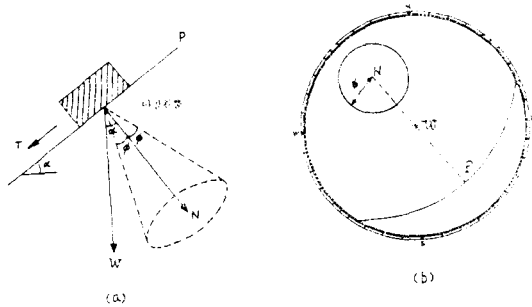


그림 7 마찰원뿔

그림 7.a에 보인 평면 P 와 평면상의 물체(여기서는 암체) 사이의 마찰각이 ϕ 이면 평면위의 암체가 미끄러지지 않기 위해서는 암체의 작용력이 같은 그림에 나타낸 마찰원뿔 내에 있어야 한다. 이 마찰원뿔을 평사 투영도에 나타내면 그림 7.b와 같다. 그림 7에 보인 예의 경우는 암체의 작용력 방향 (W)이 마찰원뿔 밖에 있으므로 불안정한 상태에 있다.

③ 암체 안정을 위한 보강

그림 8.a에 보인 암체는 자중하에서 불안정한 상태에 놓여 있다. 이 암체를 안정시키려면 암체의 자중과 암체 보강력의 합력 방향이 마찰원뿔 내에 있도록 하여야 한다. 같은 그림의 R_d

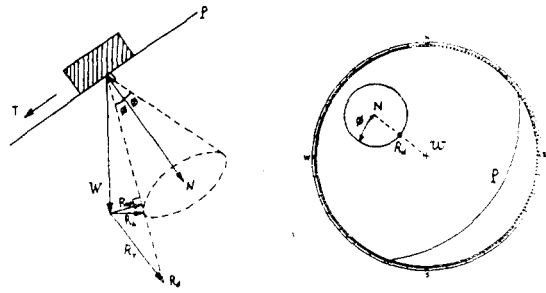


그림 8 암체 안정을 위한 보강

는 최소한의 합력방향을 나타내며 보강력은 보강 방향에 따라 그 크기가 달라지는데 가장 효율적인 방향으로의 보강력은 R_{op} , 횡방향 보강의 경우 R_h , 그리고 평면에 수직 방향 보강의 경우 R_v 만큼의 보강력이 필요하다. 보강 후 합력 R_d 를 투영도 상에 나타내면 그림 8.b와 같이 되는데, 이 그림은 암체의 수직 방향과 중력 방향 그리고 합력 R_d 가 같은 평면 위에 있음을 보여준다.

④ 점착력이 있는 면에서의 미끄러짐

그림 9.a에 보인 평면 P 와 암체 사이에 점착력이 작용하는 경우의 미끄러짐에 대한 총 저항력은 $R_N \tan \phi + C$ 가 되고 이때 등마찰각(equivalent friction angle)은 ϕ_e 가 된다. 즉, $R_N \cdot \tan \phi_e = C + R_N \tan \phi$ 이다. 그러나 이 ϕ_e 는 마찰원뿔과 같은 방법으로 투영도 상에 나타낼 수가 없는데 그 이유는 암체의 연직 방향력 R_N 의 크기가 달라지면 점착력 C 가 상수이기 때문에 ϕ_e 값도 따라서 달라지기 때문이다.

특정한 R_N 값에 해당되는 ϕ_e 의 궤적을 투영도에 나타내면 그림 9.b의 점선과 같다.

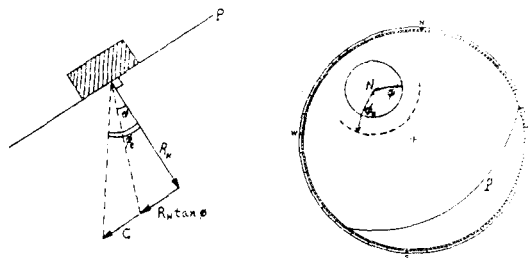


그림 9 점착력이 있는 경우

⑤ 수압의 영향

그림 10.a에 보인 평면 P 위에 놓인 암체에 수압이 작용하는 경우에는 암체의 평면 P에 대한 작용력이 자중(W)과 수압(U)의 합력(R) 방향으로 작용하게 되며, 이 합력 R은 투영도에 그림 10.b와 같이 나타난다. 수압은 항상 접촉면에 연직 방향으로 작용하게 된다.

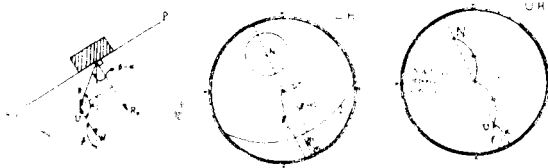


그림 10 수압의 영향

⑥ 불연속면 교차선상에서의 미끄러짐

2개 불연속면의 교차선상의 미끄러짐(그림 11 참조)에 대한 총 저항력은 $R_{N_1} \tan \phi_1 + R_{N_2} \tan \phi_2$ 로 표현할 수 있는데, 여기서 R_{N_1} 과 R_{N_2} 는 각각 불연속면 1과 2에 작용하는 암체의 법선 방향 하중이고 ϕ_1 과 ϕ_2 는 각각 암체와 불연속면 1과 2 사이의 마찰각이다. 그리고 암체의 활동력은 $W \sin \alpha$ 또는 $R \tan \alpha$ 로 나타낼 수 있으며 R_N 은 R_{N_1} , R_{N_2} 와 그림 11.b의 관계에 있다. 그러므로 미끄러짐이 발생하지 않기 위해서는 아래의 식,

$$R_{N_1} \tan \phi_1 + R_{N_2} \tan \phi_2 \geq R \tan \alpha$$

을 만족시켜야 하며 이 식을 만족시키는 영역을 평사 투영도상에 나타내면 그림 11.c의 빗금 부분과 같다.

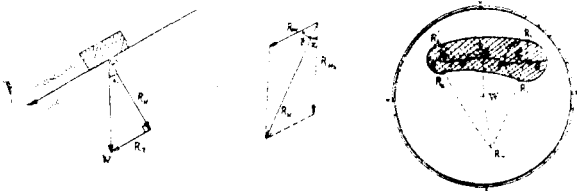
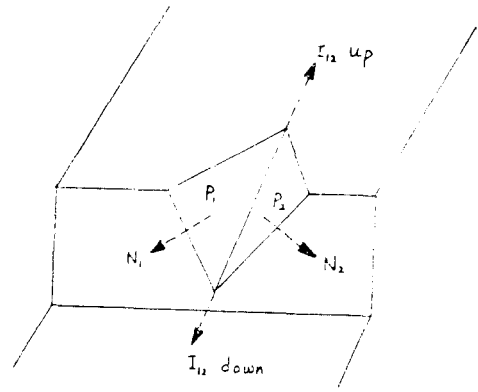


그림 11 2개 불연속면 교차선상의 미끄러짐

2) 2개의 불연속면을 갖는 암체(2-plane wedge)의 안정 문제

그림 12에 보인 것과 같이 기반암 위에 2개의 불연속면을 갖는 암체가 놓여 있는 경우, 이



Plane	Strike	Dip	Friction angle
1	N30W	45SW	30°
2	N40E	60SE	20°

그림 12 2개의 불연속면을 갖는 암체

암체가 활동을 일으킬 수 있는 형태는 표 1에 나타낸 것과 같이 모두 5가지이다. 이 활동 형태는 암체의 기반암에 대한 작용력 방향에 따라 결정되는데(표 1 참조), 예를 들면 불연속면 P_1 으로 활동이 일어나기 위해서는 우선 암체의 작용력이 I_{12up} , I_{12down} , N_1 , P_1 방향내(그림 13.a, b의 어두운 부분)에 있어야 하고, 불연속면 P_1 의 마찰원뿔 밖으로 작용하여야 한다. 그림 12에 보인 암체가 어떤 방향으로의 활동에 대해서도 안전하기 위해서는 암체의 작용력 방향이 그림 13.a의 빗금친 영역내에 있어야 한다.

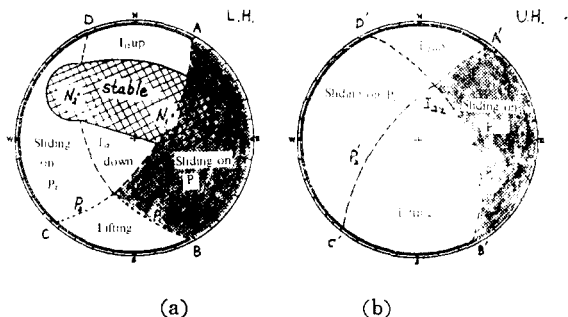


그림 13 2면 암체의 사면 안정 분석에

표 1. 2면 암체의 활동 형태

활동 형태	암체 작용력 방향이 드는 범위
Sliding on P_1	$I_{12u,d}, N_1, P_1$
P_2	$I_{12u,d}, N_2, P_2$
I_{12uP}	N_1, I_{12u}, N_2
$I_{12\text{ down}}$	N_1, I_{12d}, N_2
Lifting	$P_1, P_2, I_{12u,d}$
Stable	N_1, N_2

3) 3개의 불연속면을 갖는 암체(3-plane wedge)의 안정 문제

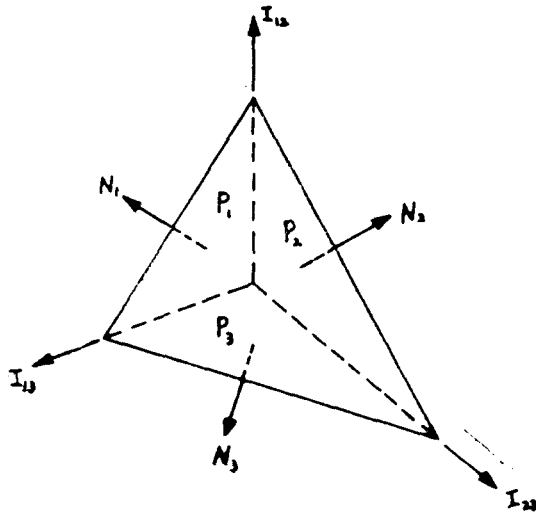


그림 14 3개의 불연속면을 갖는 암체

그림 14에 보인 것과 같이 3면이 불연속면인 삼각뿔 형태의 암체가 활동을 일으킬 수 있는

Plane	Strike	Dip	Friction angle
1	N	90°	30°
2	E	70°N	30°
3	Horizontal	0°	30°

형태는 표 2에 나타낸 것과 같이 모두 7가지이다. 그리고, 그림 14에 보인 것과 같은 불연속면을 갖는 암체의 경우에 평사 투영도상의 안정한 영역은 그림 15a, b에 빗금친 부분과 같다.

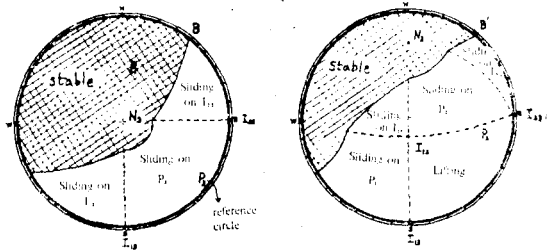


그림 15. 3면 암체의 사면 안정 분석에

표 2. 3면 암체의 활동 형태

활동 형태	암체 작용력 방향이 드는 범위
Sliding on P_1	I_{13}, N_1, I_{12}
P_2	I_{12}, N_2, I_{23}
P_3	I_{13}, N_3, I_{23}
I_{12}	N_1, I_{12}, N_2
I_{23}	N_2, I_{23}, N_3
I_{13}	N_3, I_{13}, N_1
Lifting	I_{12}, I_{23}, I_{13}
Stable	N_1, N_2, N_3