

절리위치를 고려한 암반사면의 안정성 해석

홍관석¹⁾, 조태진²⁾, 유병옥³⁾, 김일석⁴⁾

¹⁾부경대 응용지질학과, ²⁾부경대 환경탐사공학과

³⁾한국도로공사 도로연구소, ⁴⁾지오텍 컨설턴트

1. 서론

암반사면의 안정성을 해석함에 있어서 고려해야 할 가장 중요한 요소는 암반의 기하학적인 형상, 즉 구조적인 특징이다. 암반의 구조적인 특징을 평가하는 방법으로서 널리 이용되고 있는 것은 평사투영해석이다. 그러나 평사투영해석은 그 활용에 있어 다량의 자료들을 도시적으로 표현하고 해석해야하므로 자료 입력과정에서의 시간적 소모나 오류가 발생할 가능성도 배제할 수 없다. 평사투영해석에는 불연속면의 마찰각과 방향성 정보만을 이용하기 때문에 실제 사면의 붕괴 여부를 분석하는 것이 아니라 만일 붕괴가 발생하면 어떠한 유형의 붕괴가 발생하는지를 파악하기 위한 것이다.

암반사면의 안정성 해석에서 사용되는 가장 보편적인 방법은 한계평형법(limit equilibrium method)이며, 이를 토대로 한 안전율 개념으로 사면의 안정성을 평가한다. 한계평형법을 이용한 사면 안정성 해석에 의해 잠재활동면이 결정되고 안전율은 블록이 활동을 유발시키는 활동력과 이를 지지하려는 저항력의 비로 나타낸다. 그러나 한계평형식으로 분석하는 암반사면의 안정성 해석은 일반적으로 대상 사면에서 가장 크게 발생할 수 있는 가상의 블록을 가정하기 때문에 실제 사면에서 발생할 수 있는 블록의 규모보다 크게 선정되어 안정성이 과소평가되는 경향이 있으며, 이에 대한 보강대책이 과다하게 수립되는 경우가 빈번하게 발생한다. SWEDGE와 같은 컴퓨터 프로그램을 이용하여 암반사면에서의 쉼기파괴를 해석하는 방법은 불연속면들의 대표 방향성과 암반사면의 형상을 이용하여 최대크기의 쉼기블록을 선정하고 이에 대한 안정성을 분석하기 때문에 적용성에는 한계가 있다.

본 연구에서는 기존에 제시된 암반사면에서의 블록해석 이론이 갖는 한계성을 극복하기 위하여 불연속면들의 상대적인 위치와 방향성 자료를 이용하여 개별 블록의 형성위치와 규모 및 거동 양상을 분석하는 시스템을 개발하였다.

2. 전산절리도

절리의 방향성 및 위치에 대한 데이터베이스는 다음의 2가지 방법을 사용하여 구축될 수 있다. 첫 번째 방법은 현장에서 관찰되는 절리들을 설계도면에 직접 선분으로 기재하고 디지털라이저를 이용하여 절리의 위치와 방향성에 대한 데이터베이스를 구축하는 방법이며, 두 번째 방법으로는 노출된 암반면의 사진 촬영을 통해 획득된 영상을 이용하여 절리의 위

치와 방향성 자료를 입력하는 방법이 있다. 이때 절리 트레이스는 오른손 법칙에 의거하여 직선으로 표현되며, 각 절리들의 경사값에 대한 정보를 함께 기록함으로써 절리의 위치좌표와 경사방향에 대한 기본적인 데이터베이스가 구축된다. 그림 1은 대전-통영 고속도로의 대전기점 2km 지점에 위치하는 암반사면에서 측정된 절리의 분포자료들을 이용하여 형성된 전산절리도이다.

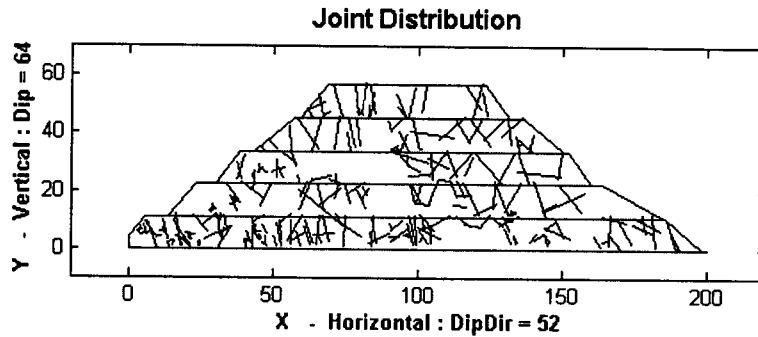
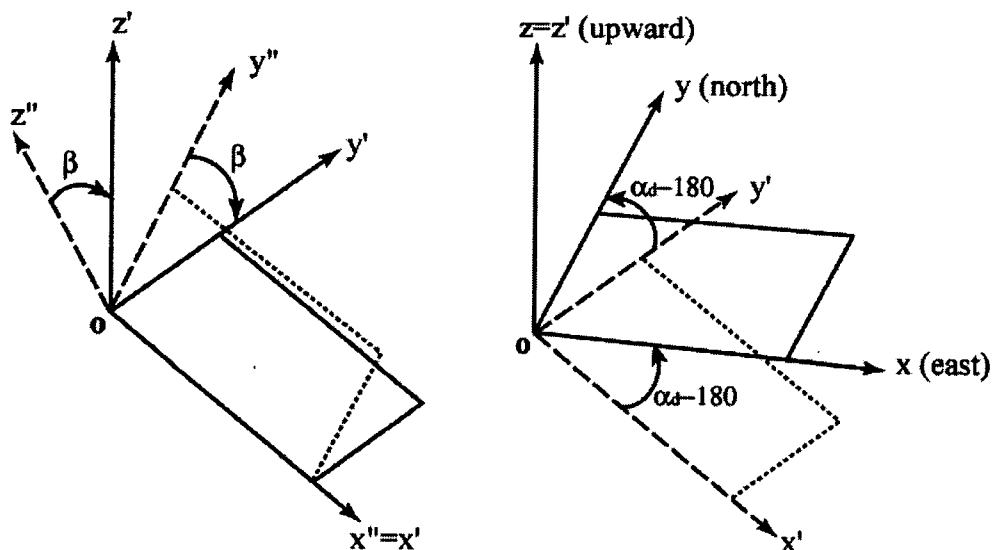


그림 1. Joint distribution on the rock slope face in Daejeon-Tongyoung Highway.

절리의 방향성은 전체 좌표계에서 표현되며, 위치는 국지 좌표계에서 측정되었기 때문에 절리들의 위치에 대한 좌표계의 변환이 요구된다. 국지 좌표계에서의 절리 위치는 전체 좌표계로의 좌표축 회전으로 수행된다. 먼저 측정된 절리좌표(x'' , y'' , z'')들은 조사면인 개착사면의 경사방향(α_d)/경사각(β_d)에 의거하여 다음의 과정으로 전체 좌표계(x , y , z)로 변환된다. 조사면은 그림 2a)와 같이 일차적으로 $x'' = x'$ 축을 기준으로 y'' 축과 z'' 축을 경사각 β_d 만큼 시계방향으로 회전시켜 수평면 상태로 변환된다.

수평상태로 회전된 조사면은 그림 2b)와 같이 이차적으로 $z' = z$ 축을 기준으로 $\alpha_d - 180^\circ$ 만큼 반시계 방향으로 회전되어 x' 축은 동쪽방향인 x 축과, y' 축은 북쪽방향인 y 축과 일치된다.



a) rotation about x'' axis,

b) rotation about z' axis

그림 2. Rotation of the Cartesian coordinates.

결과적으로 최초 조사면에서 설정된 국지적 절리 위치좌표 (x'' , y'' , $z''=0$)는 다음의 수식에 의거해 전체 좌표계에서의 위치좌표로 변환된다.

$$\begin{Bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{Bmatrix} = [A][B] \begin{Bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서,

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-\beta_d) & \sin(-\beta_d) \\ 0 & -\sin(-\beta_d) & \cos(-\beta_d) \end{bmatrix}$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_d - 180) & \sin(\alpha_d - 180) & 0 \\ -\sin(\alpha_d - 180) & \cos(\alpha_d - 180) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3. 블록해석

절리들의 교차성 및 방향성 자료를 이용하여 암반사면에 형성되는 잠재적인 다면체 블록의 존재성을 파악할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 이를 위하여 절리는 연속적인 평면으로 가정하며, 자유 개착면에서의 연장성은 트레이스 선분으로 한정한다. 일차적으로 국지좌표계에서 절리들의 교점을 산정하여 전체 좌표계로 변환시키며, 교차된 2개 절리의 방향성 벡터를 이용하여 교선의 방향을 산정한다. 공간상에서 교선은 다음의 직선식으로 표현된다.

$$l(x, y, z) = (x_0, y_0, z_0) + a(l_x, l_y, l_z) \quad (2)$$

여기서, (x_0, y_0, z_0) 는 교점좌표, (l_x, l_y, l_z) 는 암반 내부쪽으로 향하는 교선벡터의 성분이며, a 는 교선의 연장성을 나타내는 상수이다. 공간상에서 2개 교선의 교차성은 아래와 같은 교선 성분식을 활용하여 판정된다.

$$\begin{aligned} \text{교선 1 : } x &= x_1 + a_1 l_{1x} & y &= y_1 + a_1 l_{1y} & z &= z_1 + a_1 l_{1z} \\ \text{교선 2 : } x &= x_2 + a_2 l_{2x} & y &= y_2 + a_2 l_{2y} & z &= z_2 + a_2 l_{2z} \end{aligned} \quad (3)$$

상기한 2개 교선의 x 및 y 성분식을 이용하여, (x, y) 좌표를 공유하는 a_1 과 a_2 값을 결정한다. a_1, a_2 상수값에 의거하여 $z_1 + a_1 l_{1z} = z_2 + a_2 l_{2z}$ 경우에는 2개 교선이 교차한다. 이상의 과정을 전체 교선들에 적용하여 다면체 블록의 모서리를 형성하는 교선들의 집합을 도출한다. 실제 다면체 형성여부는 교차되는 교선의 수효와 교선 집합에 포함되어 있는 절리면 수효를 비교하여 판정한다. 각 교선에는 2개 절리면이 내재되어 있으며, 기저다

각형의 각 변들을 형성하는 절리 선분들이 순차적으로 교차하여 폐합 기저다각형이 존재할 수 있는 조건은 교선수효 = 절리수효이다. 교선 집합에 내재된 절리수가 교선수보다 많을 경우는 교선은 교차하나 특정 절리는 연장성의 한계에 따라 상호 교차되지 않은 경우이어서 다면체 블록은 형성되지 않는다. 그림 3a)는 교선수와 절리수가 동일한 경우로서, 블록이 형성되며, b)는 교선수와 절리수가 동일하지 않은 경우로서, 블록 형성이 되지 않는다.

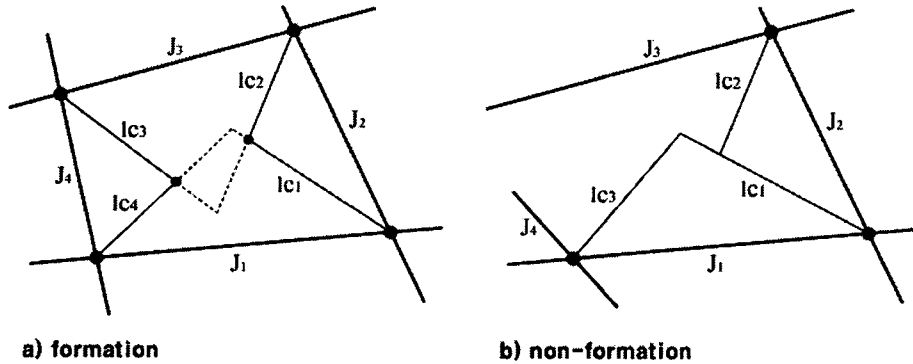


그림 3. Diagram of the block formations.

조사면에서의 절리 방향성과 국지적 및 전체 좌표계에서의 위치좌표가 설정되면 절리들의 교차성 및 방향성에 의거하여 형성된 다면체 블록의 존재성을 파악한다. 암반사면 내에 실제로 블록이 존재하기 위해서는 산정된 블록의 꼭지점 위치가 사면 내부에 위치하여야 하며(그림 4의 블록 1), 이는 국지 좌표계에서의 꼭지점 z' 좌표값과 조사면에 설정된 z' 좌표값을 비교하여 판정한다.

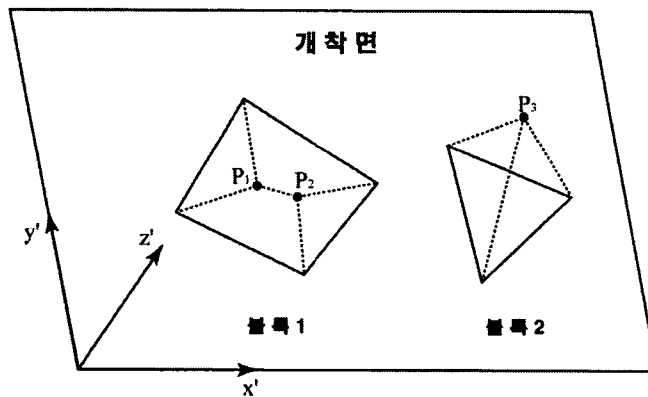


그림 4. Existence of the blocks.

블록의 존재성이 확인되면 미끄러짐이 발생하는 블록의 거동 양상을 분석한다. 블록 중에는 거동 방향이 굴착 자유면 쪽이 아니고 암반 내부쪽이므로 블록은 형성되나 안정한 상태를 유지할 수 있다(그림 4의 블록 2). 이와 같은 거동 양상은 블록을 형성하는 모서리 선에 대한 전체 좌표계에서의 방향성 벡터를 고려하여 해석한다. 사면에서의 절리 교점을 기준으로 꼭지점 방향으로 설정된 모든 모서리 벡터의 z 성분이 음의 부호일 경우에는 미끄러짐이 발생되지 않는 안정한 블록이다. 미끄러짐이 예상되는 블록의 경우에는 최대 z 성분

을 갖는 모서리를 기준으로 거동이 발생된다. 블록의 거동 양상이 분석되어 미끄러짐이 발생하는 블록 형성 절리면과 미끄러짐 방향이 결정되면 블록 규모를 산정하여 암석 밀도에 따른 자중을 계산한다. 블록 규모 산정을 위해 기저면 면적과 블록 높이를 다음과 같이 계산한다. 기저면 면적은 기저면을 형성하는 다각형을 면적 산정이 용이한 삼각형으로 분해한 후 개별 삼각형 면적을 합산하는 방법으로 계산한다. 블록 높이는 꼭지점 좌표를 국지 좌표로 변환시킨 후 기저면이 형성되는 자유면에 수직인 축 방향의 국지 좌표로 정의된다. 복수의 꼭지점이 형성된 다면체 블록의 경우에는 블록 분해기법을 활용하여 각각의 부피를 구한 후 분해된 블록 부피를 합산하여 총 부피를 계산한다(그림 5 참조). 블록의 안전도는 조태진 외(2001)이 제안한 블록하중에 의한 벡터 분해법을 사용하여 해석을 수행하였다.

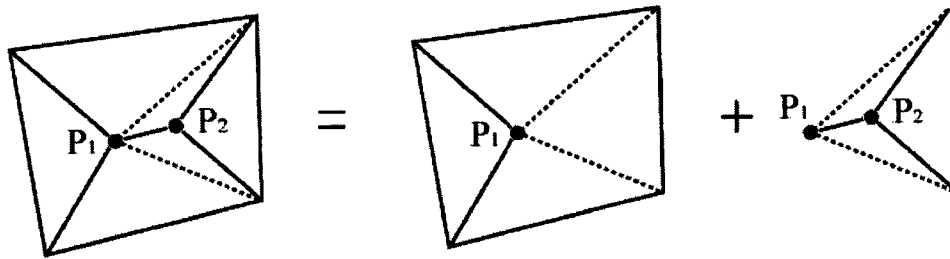


그림 5. Volume of the block with the multi sides.

4. 현장 사례

암반사면에 대한 암석블록 모델의 현장 활용성 고찰을 위해 대전-통영 고속도로의 대전기점 2km 지점에 위치하는 암반사면에서 절리조사를 수행하였다. 현장조사에 의해 암반사면에 노출되어 있는 총 246개 절리들의 상대적인 위치와 방향성 자료에 대한 데이터베이스가 구축되었으며, 측정된 절리들의 분포상태를 사면 현황도에 도시하여 전산절리도를 작성하였다(그림 1).

조사대상 사면에서 측정된 절리들의 방향성에 의거하여 분석된 절리군 해석 결과, 4개 절리군이 도출되었으며(표 1, 그림 6), Fisher 상수도 매우 조밀한 군집형성을 지시한다(그림 7).

표 1. Result of the joint set analysis

	dip direction	dip	Fisher constant
set 1	075.0	66.8	11.6
set 2	353.1	65.5	22.7
set 3	032.7	19.8	50.0
set 4	146.8	41.8	66.1

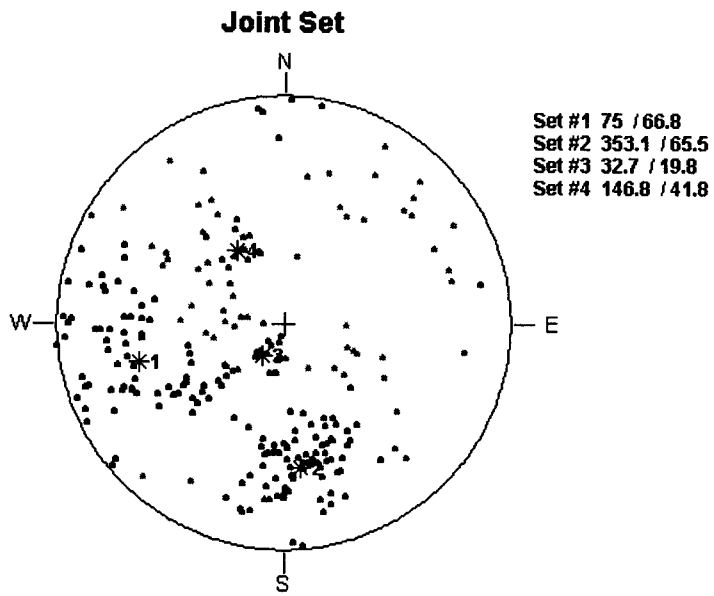


그림 6. Lower hemisphere equal angle projection of discontinuities

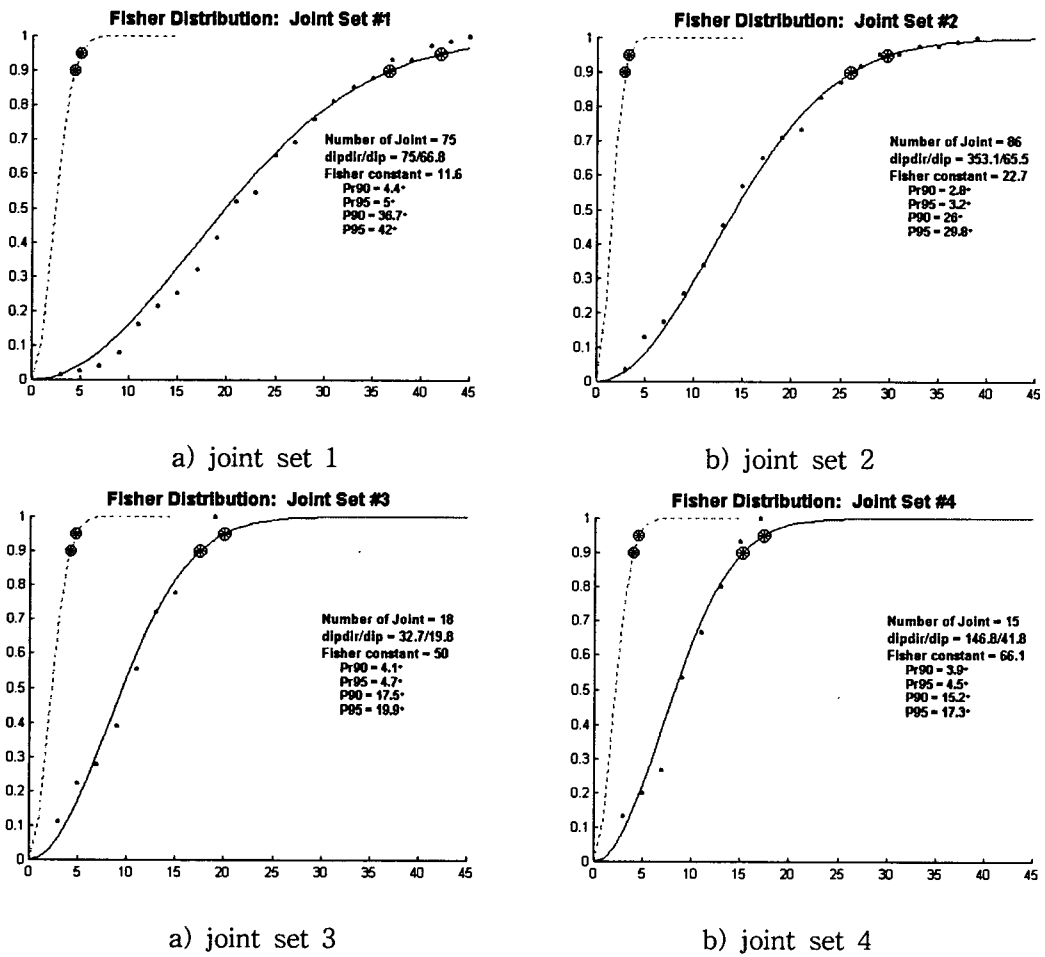


그림 7. Fisher distribution

평면 및 전도파괴 분석을 위하여 4개 절리군의 대표 방향성과 절리들의 극점을 반구투영면에 도시하였다(그림 8). 4개 절리군의 대표 방향성만을 고려할 때 극점들은 투영면 상의 평면 및 전도파괴 영역에 벗어나 있어 평면파괴나 전도파괴를 유발시키지 않는 것으로 분석되었다. 그러나 절리군 1에 소속된 일부 절리들의 극점들은 평면파괴를 유발시킬 수 있는 것으로 나타난다. 현장 사면에서 이들 절리들의 분포양상을 그림 9에 도시하였다. 평면파괴를 야기시킬 수 있는 절리들은 사면 우측부에 집중되어 있으며, 사면 좌측 하단부에서도 일부 절리들에 의해서 전도파괴가 발생할 수 있을 것으로 분석되었다.

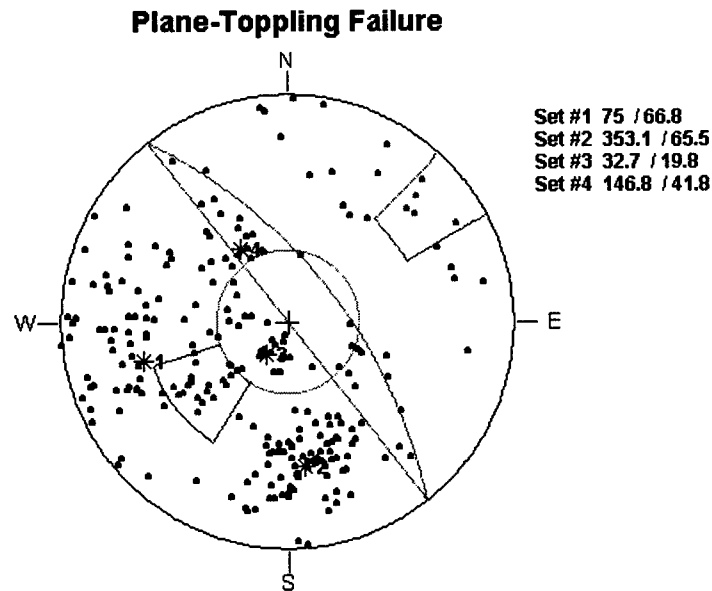


그림 8. Stereographic projection for the plane and toppling failure of rock slope.

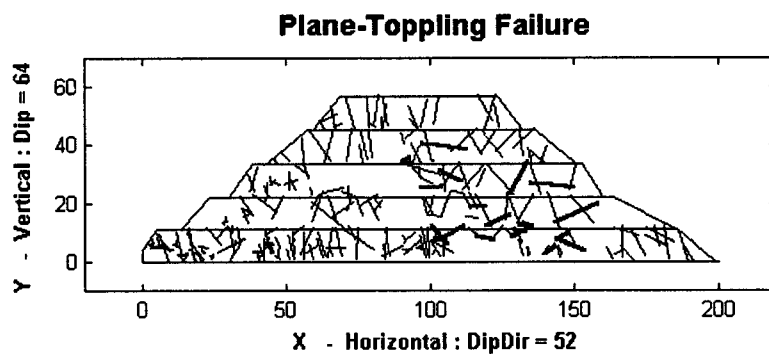


그림 9. Joint distribution causing plane failure of rock slope.

썩기파괴에 대한 평사투영해석 결과, 절리군 J₁, J₂의 교차로 인해 썩기파괴의 가능성이 있는 것으로 분석되었다. 그러나, 그 외의 절리군 조합으로 인해 발생 가능한 썩기파괴는 없는 것으로 분석되었다(그림 10).

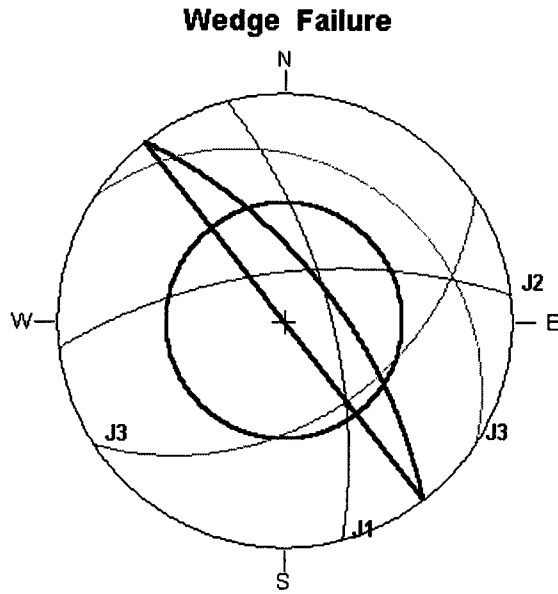


그림 10. Stereographic projection for the wedge failure of rock slope.

현장 사면에 발달된 썩기블록들의 분포양상 및 안전도를 분석하였으며, 이때 암반 사면의 안정성에 대한 안전측 해석을 수행하기 위하여 절리들의 마찰각은 일반적으로 암반에 적용되는 30° 로 가정하였으며 점착력은 고려하지 않았다. 분석 결과, 그림 11에 도시된 바와 같이 총 30개의 썩기블록이 형성되어 있으며, 개별 썩기블록들의 규모와 안전도 등을 표 2에 수록하였다. 8번 블록은 미끄러짐이 발생되지 않는 형태로 형성되어 있으며, 대부분의 블록들도 안전율이 1보다 커서 전체적으로 안정한 상태를 유지하고 있다. 전체 블록중 규모가 크고 안전율이 낮은 20번과 26번 블록에 대한 세부적인 분석결과를 그림 12에 도시하였다. 두 블록은 다각형 썩기블록으로 2개 면에서 미끄러짐이 발생하는 것으로 나타났다.

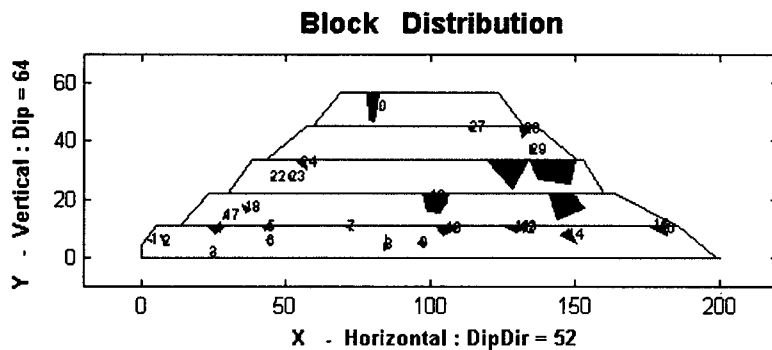


그림 11. Wedge block distribution on the rock slope

☒ 2. Result of block analysis for the rock slope

block No.	volume (m ³)	base area (m ²)	slope depth (m)	perimeter (m)	safety factor
1	0.0466	0.4063	0.3442	2.9922	1.35
2	0.2229	2.1148	0.3163	8.642	3.48
3	0.0091	0.1722	0.1591	2.2127	1.17
4	32.2787	9.8214	9.8597	15.0529	3.48
5	15.6858	3.352	14.0387	8.8318	8.22
6	0.0516	0.2707	0.5718	3.362	0.82
7	1.2747	2.0577	1.8584	8.2486	2.93
8	0.2697	2.5146	0.3218	10.763	Non-sliding
9	1.873	1.5059	3.7313	5.6421	1.62
10	2.5689	14.5195	0.5308	20.1004	0.68
11	2.1764	11.7579	0.5553	19.6418	1.58
12	0.0885	1.704	0.1557	6.2791	0.49
13	0.36153	4.2789	0.2535	10.7022	0.49
14	2.297	10.7741	0.6396	15.6746	0.56
15	1.0024	1.5703	1.9149	6.5648	2.06
16	14.5678	9.1465	4.7781	15.6631	2.09
17	0.1050	1.0674	0.2952	5.0067	3.43
18	0.3690	2.7927	0.3964	8.1377	1.05
19	7.5027	6.2461	3.6036	11.7268	1.58
20	67.7764	42.3004	5.2593	26.6931	0.96
21	32.0801	67.9888	2.0565	34.1713	0.48
22	0.0192	0.2828	0.2031	2.4557	1.31
23	0.1330	0.7496	0.5324	4.3803	1.32
24	1.5713	4.7734	0.9875	11.4919	0.49
25	47.41	683.3457	2.081	38.2598	0.56
26	139.0561	97.022	5.0608	42.0616	0.75
27	16.6693	2.194	22.793	7.0418	15.6
28	10.7033	8.8713	3.6195	14.1223	1.55
29	0.7309	2.5889	0.847	7.7086	2.55
30	21.2938	26.9114	4.1992	25.4039	3.13

