

# 지하공동 천장에 발달된 잠재적 사면체 블록의 판별 및 거동 양상 분석

## An Analysis for the Formation and Kinematic Behavior of Potential Tetrahedral Block on the Roof of Underground Excavation

조 태 진\*<sup>1</sup>                      Cho, Tea-Chin  
홍 관 석\*<sup>2</sup>                      Hong, Kwan-Suk  
김 일 석\*<sup>3</sup>                      Kim, Ill-Seuck

### Abstract

A computerized system capable of analyzing the formation of the potential keyblock on the roof of underground excavation, together with its kinematic behavior and the stability, has been developed. Database for the spatial characteristics of joint was established in the system and the digitized joint map was produced by superimposing the joint distribution on the layout of underground opening. Existence of a potential keyblock, assumed to be a tetrahedral wedge, was algebraically determined by utilizing the plane equation of joints consisting of the block surfaces in 3-D space. Stability of tetrahedral block subject to the body weight was also calculated by considering the kinematic behavior of block with respect to the orientations of the sliding planes. To illustrate the practical applicability the formation and the failure mode of potential keyblock developed on the roof of Eonyang Crystal cave were investigated and compared with the results of computerized system.

### 요 지

지하 굴착공동의 천장면에 형성되는 잠재적 키블록의 존재성과 운동학적 거동 양상 및 안정성을 해석적으로 분석할 수 있는 시스템을 개발하였다. 천장에서 측정된 절리들의 상대적인 위치와 방향성 자료를 이용하여 데이터베이스를 구축하였으며, 굴착설계도와 연계된 전산절리도를 작성하였다. 잠재적 키블록의 존재성과 거동양상은 사면체로 가정된 블록 옆면의 3차원 공간에서의 평면식을 절리의 방향성에 의거하여 구성하여 대수학적으로 분석되었다. 블록의 안정성 분석은 자중에 의해 미끄러짐이 발생하는 블록면의 공간 기하학적 특성을 고려하여 수행하였다. 개발된 분석 시스템의 현장활용성을 검증하기 위하여 언양 자수정동굴에서 키블록 형성 및 거동양상을 조사하여 분석결과와 비교하였다.

**Keywords :** Free falling, Joint location, Orientation, Plane equation, Potential keyblock, Sliding, Tetrahedral wedge

### 1. 서 론

지하굴착에서의 경제적 설계계획 수립 및 안정적 시

공을 위해서는 원암의 제반 역학적 특성과 현장응력 조사 이외에도 굴착현장에 발달된 불연속면의 공간적 분포에 따른 절리암반의 구조적 특성에 대한 해석이

\*1 정희원, 부경대학교 환경·해양대학 환경탐사공학과 교수

\*2 정희원, 부경대학교 응용지질학과 박사수료

\*3 정희원, 지오테크건설탄트(주) 지반공학연구소

우선적으로 수행되어야 한다. 천부에 굴착되는 소규모 지하공동의 경우 표층 지질조사 결과에 의거하여 절리 분포 상태를 유추할 수도 있으나, 공동 기능의 원활성을 도모하기 위하여 심부에서 대규모 굴착이 요구되는 경우에는 현장에 발달된 불연속면 발달상태를 굴착진행과 병행하여 조사해서 굴착계획 및 최적 보강체계 수립에 신속하게 반영시켜야 한다. 이와 같은 목표를 달성하기 위하여는 현장조사 항목 및 기간을 최소화시켜 굴착지연을 방지하고 절리발달 양상 및 구간별 보강체계 설정에 필요한 결과도출 과정을 전산화시켜 굴착계획 수립의 신속성과 정확성이 유지되어야 한다. ISRM(1978)에서 불연속면의 제반 특성에 대한 정량적 분석 방법을 제시하였고, Priest and Hudson(1981)과 Kulatilake et al.(1993)에 의해 선형조사선 또는 조사틀을 이용하여 야외측정에서 발생될 수 있는 편향성을 제거할 수 있는 통계적 분석 방법들이 발표되었다. 조사선이 특정 불연속면과 교차되는 확률을 고려하여 대표적 방향성을 산출할 수 있는 기법들이 Baecher(1980), Kulatilake and Wu(1984), Priest(1985)에 의해 개발되었으며, 각 절리군에서의 불연속면 간격에 대한 통계적 분석기법이 Priest and Hudson(1976), Sen and Kazi(1984), Mahtab et al. (1992) 등에 의해 제시되어 있다. 이상에서 제시된 방법들에 의해 분석된 불연속면의 방향성에 대한 특성자료들은 절리암반의 전체거동 양상을 해석하는데 긴요하게 사용되며(Cho, 1991), 반구투영도 기법(Priest, 1985) 및 �블록 이론(Shi and Goodman, 1985)에 의거하여 절리 교차에 의한 블록형성이 고찰되었다. 또한 Song and Lee(2001)는 절리 길이 분포에 근거하여 절리규모를 수치적으로 산정하였으며, 방향성 자료와 결합시켜 지하공동에서의 블록형성을 분석하였다(송, 2000). 그러나 이와 같은 분석결과들은 일정지역에 분포된 불연속면의 대표적인 특성들에 기초하여 산정되었기 때문에 실제 굴착현장에 직접 활용되지는 못한다는 문제점들을 내포하고 있다. 본 연구에서는 굴착과정에서 측정된 현장암반의 불연속면의 방향성 및 위치자료들을 전산화시켜 잠재적 사면체 �블록의 존재성, 위치, 형태, 규모 및 안정성을 컴퓨터를 이용하여 신속하게 분석하여 효율적인 보강 방법들이 대처될 수 있는 전산시스템을 개발하였다.

## 2. 전산절리도

전산절리도 작성은 굴착 현장에서 관찰되는 절리들을 설계도면에 직접 기재하는 과정과 디지털이저를 이용하여 절리들의 위치 및 방향성에 대한 데이터베이스를 구축하는 2단계 작업으로 수행되었다. 심부 굴착공간에서는 지구자기장을 교란시킬 수 있는 원인 제공요인들이 다수 존재할 수 있기 때문에 지자기 원리에 의거한 계측기기를 사용한 불연속면(이하 절리로 지칭)의 방향성 측정 결과에 대한 신뢰도가 매우 낮아진다. 또한 잠재적 �블록의 형성여부 등을 분석하기 위하여는 절리들의 상대적인 위치가 설정되어야 하기 때문에 전산절리도 구축 초기단계에서의 현장 절리조사 결과는 굴착 설계도 상에 직접 기재되었다. 즉, 굴착현장의 천장부분에서 관측된 절리들이 위치별로 설계도 상에 선분으로 표시되며, 각 절리들의 경사각이 측정되어 경사방향 표식과 함께 기재되었다. 굴착설계도 상에 기재된 절리들의 위치와 방향성에 대한 기본자료들은 디지털이저를 이용하여 전산 처리되었다. 이를 위하여 설계도의 방향축을 디지털이저 좌표축에 정치시키고 임의의 기준점을 설정한 후 실제 거리에 대한 축적을 산정하였다. 절리의 시점과 종점을 오른손 법칙에 의거하여 디지털이저로 선정하면 절리길이 및 경사방향이 자동적으로 산정되며, 각 절리들의 경사는 설계도 상에 기재된 수치들이 직접 입력되었다. 이와 같이 전산화된 자료들을 종합하여 절리분포에 대한 기본적인 데이터 베이스가 구축되었으며, 그래픽 프로그램을 사용하여 전산절리도가 제작되었다. Fig. 1은 경남 울주군에 소재하는 언양자수정 동굴에서 측정된 절리분포자료들을 이용하

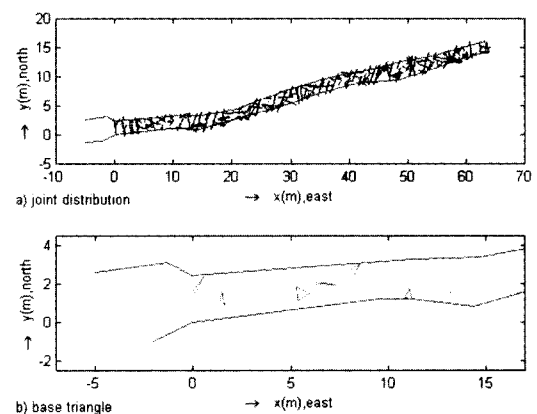


Fig. 1. Joint map of Eonyang crystal cave

Table 1. Data of the first 10 joints measured at Eonyang Crystal cave

| Joint No. | $x_{ini}(m)$ | $y_{ini}(m)$ | $x_{ter}(m)$ | $y_{ter}(m)$ | dip(°) |
|-----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------|
| 1         | -0.150       | 2.800        | 0.400        | -0.250       | 82     |
| 2         | 0.900        | 2.850        | -0.250       | 1.350        | 60     |
| 3         | 0.050        | 1.400        | 0.550        | 2.400        | 48     |
| 4         | 1.500        | 3.150        | 1.100        | 1.750        | 70     |
| 5         | 1.900        | 2.750        | 1.950        | 1.450        | 88     |
| 6         | 1.525        | 2.050        | 1.450        | 1.100        | 62     |
| 7         | 1.225        | 1.450        | 1.750        | 0.700        | 69     |
| 8         | 1.475        | 1.775        | 1.675        | 0.575        | 86     |
| 9         | 1.975        | 1.675        | 1.300        | 0.425        | 50     |
| 10        | 1.675        | -0.150       | 1.650        | 0.700        | 90     |

여 형성된 전산절리도이며, 데이터 베이스에 저장된 처음 10개 절리들의 기본적인 자료들을 Table 1에 수록하였다. 전산절리도가 완성되어 사이버 공간에서의 개별 절리들의 위치 및 방향성 자료에 대한 기본적인 데이터 베이스가 구축되면 분포된 절리들의 공간적 특성에 대한 총괄적인 통계분석 및 개별절리들의 상호 연계성에 대한 종합적인 분석이 가능해 진다.

### 3. 사면체 블록해석

전산절리도에 분포된 절리들의 상대적인 위치 및 방향성 자료를 이용하여 굴착공간의 천장에 형성되는 잠재적 키블록의 존재성을 파악할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 본 연구에서 절리는 연속적인 평면으로, 키블록은 가장 기본적인 형태인 사면체 구조로 형성되는 것으로 가정하였다. 절리들에 의해 천장내부에 사면체 블록이 존재하기 위하여는 일차적으로 천장면에 사면체의 기저삼각형이 형성되어야하며, 전산절리도에 선분으로 표시된 3개 절리 trace가 상호 교차되는 것으로 확인될 수 있다. Fig. 1b에 3개 절리가 교차되어 형성된 기저삼각형이 도시되어 있다. 기저삼각형의 형성여부를 대수적으로 판별하기 위하여 천장면을 기준 수평면으로 가정하고 동쪽 방향을 x-축, 북쪽 방향을 y-축으로 설정한 후(Fig. 2 참조) 전산절리도의 기준점에 의거하여 할당된 각 trace들의 시점과 종점 좌표를 이용하여 다음과 같은 직선식을 산정하였다.

$$y = a_i x + b_i \quad (1)$$

여기서,  $a_i$ 와  $b_i$ 는  $i$ -번째 절리 trace의 직선식 상수이다.

임의의 2개 절리 trace의 교차성은 관계식 (1)에 의거해 기술된 직선식들의 교차점이 trace 선분 내에 존재하는지를 판단하여 결정되었다. 전체 절리 trace에 대하여 상호 교차되는 3개의 절리 조합들을 순차적으로 추출하여 기저삼각형의 형성을 확인하였다. 각각의 기저 삼각형을 구성하는 절리조합들의 공간적 특성들은 다음에 기술되는 연산과정에 사용되어 사면체 블록의 존재성 확인에 활용되었다.

평면절리를 가정할 때 각 절리면의 평면식은 3차원 Cartesian 좌표축을 이용하여 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$a_i x + b_i y + c_i z = d_i \quad (2)$$

여기서,  $a_i, b_i, c_i, d_i$ 는  $i$ 번째 절리면의 평면식 상수이며, 절리평면의 outward normal vector의 방향여현 성분들을 이용하여 산정된다. x-축, y-축 방향은 관계식 (1)에 대해 설정된 방향과 동일하게 적용하였으며, z-축은 천장면을 기준으로 상부쪽을 양의 방향으로 설정하였다 (Fig. 2 참조). 절리면의 경사방향( $\alpha$ ) 및 경사( $\beta$ )는 설정된 좌표축에서 outward normal vector를 기준으로 Fig. 2에 도시된 관계를 갖는다. 기저 삼각형을 형성하는 3개 절리들 중에서 첫번째 절리면의 outward normal vector의 방향여현 성분들은 다음과 같이 정의된다.

$$n_{x1} = \cos(90^\circ - \beta_1) \cos \theta_1 \quad (3)$$

$$n_{y1} = \cos(90^\circ - \beta_1) \sin \theta_1 \quad (4)$$

$$n_{z1} = \sin(90^\circ - \beta_1) \quad (5)$$

여기서,  $n_{x1}, n_{y1}, n_{z1}$ 은 x-축, y-축, z-축에 대한 방향여현 성분이며,  $\beta_1$ 은 절리면의 경사각이다.  $\theta_1$ 은 절리면의

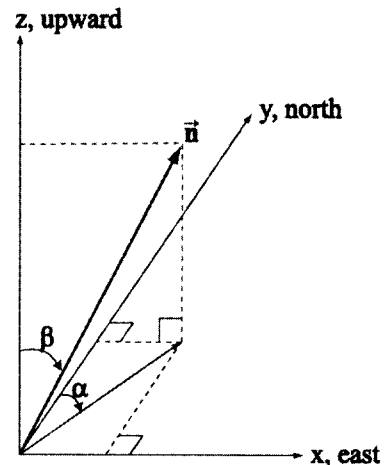


Fig. 2. Coordinates system used for block analysis

경사방향( $\alpha_1$ )에 관련되며, 다음과 같이 산정된다.

$$\theta_1 = 90^\circ - \alpha_1 \quad (6)$$

만일,  $\theta_1 < 0$  이면

$$\theta_1 = 360^\circ + \theta_1 \quad (7)$$

관계식 (3)~(5)에 의거하여 산정된 방향여현 성분과 해당 절리면 내의 임의의 좌표값( $x_1, y_1, z_1$ )을 사용하여 첫 번째 절리평면 공간식을 구성할 수 있다.

$$d_1 = a_1 x + b_1 y + c_1 z \quad (8)$$

여기서,

$$a_1 = n_{x1}, \quad b_1 = n_{y1}, \quad c_1 = n_{z1}$$

$$d_1 = a_1 x_1 + b_1 y_1 + c_1 z_1$$

동일한 방법으로 두번째와 세번째 절리평면에 대한 공간식이 각각에 대한 outward normal vector 성분을 이용하여 산정될 수 있다.

$$d_2 = a_2 x + b_2 y + c_2 z \quad (9)$$

$$d_3 = a_3 x + b_3 y + c_3 z \quad (10)$$

기저삼각형을 형성하는 3개 절리면의 공간식 (8)~(10)이 설정되면 선형대수 원리를 이용하여 3개 평면의 교차점에 대한 공간좌표( $x_b, y_b, z_b$ )를 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$\begin{aligned} x_b &= D_x / D \\ y_b &= D_y / D \\ z_b &= D_z / D \end{aligned} \quad (11)$$

여기서,

$$D = \det \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix}, \quad D_x = \det \begin{bmatrix} d_1 & b_1 & c_1 \\ d_2 & b_2 & c_2 \\ d_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix},$$

$$D_y = \det \begin{bmatrix} a_1 & d_1 & c_1 \\ a_2 & d_2 & c_2 \\ a_3 & d_3 & c_3 \end{bmatrix}, \quad D_z = \det \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & d_1 \\ a_2 & b_2 & d_2 \\ a_3 & b_3 & d_3 \end{bmatrix}$$

3개 절리면이 상호 교차되어 발달되는 사면체 블록의 형성여부는 관계식 (11)에서 계산된  $z_b$  좌표값에 의거하여 판단할 수 있다. 본 연구에서는 기저삼각형이 형성되

는 굴착공간 천장면의 z-좌표를 기준값( $z=0$ )으로 설정하여  $z_b > 0$ 일 경우 사면체 블록이 형성되는 것을 판별하였다.

굴착 천장면 내부에 발달된 잠재적 키블록은 기저삼각형 3개 밑변의 교차점들과 사면체 꼭지점을 연결하여 형성되는 3개의 옆면을 포함하고 있다. 절리의 영속성을 무한대로 가정할 때 옆면은 절리면의 일부에서 형성되기 때문에 해당 절리면과 동일한 방향성을 지니며, 사면체를 구성하는 3개 옆면의 공간적 방향성에 의거해 사면체 블록의 운동학적 거동이 지배된다. 사면체 블록의 안정성 분석에 필수적으로 요구되는 블록거동 양상(자유낙하 또는 미끄러짐)은 다음과 같은 원리를 이용하여 판정할 수 있다. 기저삼각형의 3점( $P_1, P_2, P_3$ )을 연결하는 밑변들을 연장시켜 수평면에 도시하고 사면체 블록의 꼭지점을 수직 투영하면(Q), 이들 3개 점들의 상대적인 위치에 따라 Fig. 3에 도시된 형태를 취하게 된다. 지중만에 의한 거동을 고려할 때 블록 꼭지점의 투영점 Q가 기저삼각형 내부에 위치하면 블록의 수직낙하시 옆면에서의 마찰은 발생되지 않는다. 따라서 블록의 파괴거동 양상으로 자유낙하 운동이 예상된다. 만일 Q가 기저삼각형 외부에 위치하면 1개 또는 2개 면에서의 미끄러짐 거동이 발생된다. 미끄러짐 거동이 발생하는 사면체 옆면(들)은 다음의 과정을 수행하여 판단된다. 첫째, 기저삼각형의 중심점(C)을 결정한다. 점 C는 기저삼각형의 모서리 각을 이등분하는 선들의 교차점인 내심으로 정의된다. 점 C의 x-, y- 좌표가 산정되면 점 Q의 좌표값( $x_b, y_b$ )을 사용하여 Q와 C를 연결하는 직선식이 구해진다. 이 직선식과 위에서 산정된 기저삼각형을 형성하는 3개 절리 trace의 직선식을 이용하여 3개

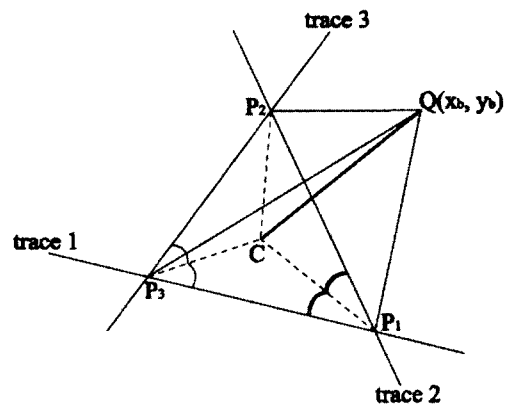


Fig. 3. Projection of block apex to the horizontal plane containing base triangle

교차지점의 좌표값들을 계산한다. 이들 좌표값들이 선분 CQ 내부에 위치하면 해당 교차점을 생성시키는 절리면에서는 미끄러짐 거동이 발생된다. 이와 같은 과정을 수행하여 최대 2개 절리면에서의 미끄러짐 거동 양상이 파악될 수 있으며, 3개 교차지점들 모두가 선분 CQ 외부에 위치하면 점 Q가 기저삼각형 내부에 투영된 경우이기 때문에 사면체 블록은 자유낙하 거동을 하게 된다.

사면체 블록의 운동학적 거동양상이 분석되면 블록의 옆면을 형성하는 절리들의 방향성에 의거하여 블록의 안정성이 산정된다. 본 연구에서는 일차적으로 블록의 하중만을 고려하여 미끄러짐 거동이 예상되는 블록의 안정성 분석을 수행하였다. 블록하중은 블록의 부피와 단위하중에 의해 산정되며, 수직방향으로 작용하는 블록하중 벡터( $\vec{W}$ )는 아래와 같이 정의된다.

$$\vec{W} = W \vec{n}_v \quad (12)$$

여기서,

$$W = V \times \gamma$$

$$\vec{n}_v = 0 \hat{i} + 0 \hat{j} + (-1) \hat{k}$$

V는 블록의 부피,  $\gamma$ 는 단위하중이며,  $\hat{i}$ ,  $\hat{j}$ ,  $\hat{k}$ 는 각각 x-, y-, z- 방향을 나타내는 벡터원소이다. 단일 절리면에서 미끄러짐 거동이 발생할 경우에는 수직방향으로 작용하는 블록하중 벡터를 미끄러짐이 발생하는 절리면의 법선방향 성분( $\vec{N}$ )과 전단방향 성분( $\vec{S}$ )으로 분해하여 안전도를 산정할 수 있으며, 이들은 다음의 관계식을 형성한다(Fig. 4 참조).

$$\vec{W} = \vec{N} + \vec{S} \quad (13)$$

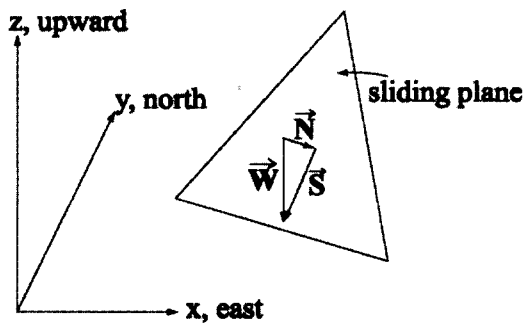


Fig. 4. Decomposition of body weight vector on the sliding plane

절리면 법선방향의 단위벡터  $\vec{n}$ 의 성분들은 관계식 (3)~(5)에 의거하여 산정된 절리면의 outward normal vector의 방향여현과 동일하나 방향이 반대이다.

$$\vec{n} = -n_x \hat{i} - n_y \hat{j} - n_z \hat{k} \quad (14)$$

결과적으로 미끄러짐 면에 법선방향으로 작용하는 힘  $\vec{N}$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$\vec{N} = N \vec{n} \quad (15)$$

$$N = W (\vec{n}_v \cdot \vec{n}) = W n_z \quad (16)$$

전단방향으로 작용하는 힘  $\vec{S}$ 는 관계식 (13)을 이용하여 산정된다.

$$\vec{S} = \vec{W} - \vec{N} = S \vec{s} \quad (17)$$

여기서,

$$S = W \sqrt{1 - n_z^2}$$

$$\vec{s} = [n_z n_x \hat{i} + n_z n_y \hat{j} + (n_z^2 - 1) \hat{k}] / \sqrt{1 - n_z^2}$$

블록하중에 의해 미끄러짐 면에서 작용하는 2개 성분의 힘의 크기 N과 S가 결정되면 한계평형이론을 사용하여 사면체 블록의 안전도(FS)를 계산할 수 있다.

$$FS = (cA + N \tan \phi) / S \quad (18)$$

여기서, c와  $\phi$ 는 각각 절리면의 점착력과 내부마찰각이며, A는 미끄러짐 거동이 예상되는 사면체 절리면의 면적이다.

2개 절리면에서의 미끄러짐 거동은 암반사면의 썩기 파괴 양상과 유사하며 블록하중을 절리면의 교선 방향 및 2개 절리면의 법선방향으로 분해하여 안전도를 분석할 수 있다. 관계식 (3)~(5)에 의거해 산정된 2개 절리면의 단위 법선벡터를 각각  $\vec{n}_1$ ,  $\vec{n}_2$ 라 하면 절리면이 교차되어 형성되는 교선벡터  $\vec{T}_c$ 는  $\vec{n}_1$ 과  $\vec{n}_2$ 의 벡터곱으로 산정된다.

$$\vec{T}_c = \vec{n}_1 \times \vec{n}_2 \quad (19)$$

이때,  $\vec{T}_c$ 는 2개 절리면의 상대적인 위치에 따라 상부 또는 하부방향으로 향하게 된다.  $\vec{T}_c$ 의 z- 성분이 상부방향을 향하면 각 성분을 역전시켜 하부방향을 지시하게 조

정한 후, 3개 성분값을 이용하여 단위크기를 갖는 교선 벡터  $\vec{T}$ 을 산정한다.

$$\vec{T} = l_x \hat{i} + l_y \hat{j} + l_z \hat{k} \quad (20)$$

교선을 기준으로 수직방향으로 작용하는 하중벡터  $\vec{W}$ , 교선과 평행한 방향의 전단력 벡터  $\vec{S}_c$  및 교선에 대한 법선력 벡터  $\vec{N}_c$ 는 아래의 관계를 갖는다(Fig. 5 참조).

$$\vec{W} = \vec{N}_c + \vec{S}_c \quad (21)$$

전단력 벡터  $\vec{S}_c$ 는 관계식 (12)에서 정의된 단위 수직 벡터  $\vec{n}_v$ 와 단위 교선벡터  $\vec{T}$ 을 사용하여 산정된다.

$$\begin{aligned} \vec{S}_c &= (\vec{W} \cdot \vec{T}) \vec{T} \\ &= W (\vec{n}_v \cdot \vec{T}) \vec{T} \\ &= W (-l_z) \vec{T} \\ &= S_c \vec{T} \end{aligned} \quad (22)$$

법선력 벡터  $\vec{N}_c$ 는 관계식 (21)에 의거하여 다음의 과 정으로 산정된다.

$$\begin{aligned} \vec{N}_c &= \vec{W} - \vec{S}_c \\ &= -W\hat{k} - W(-l_z)(l_x\hat{i} + l_y\hat{j} + l_z\hat{k}) \\ &= W [ l_z l_x \hat{i} + l_z l_y \hat{j} + (l_z^2 - 1) \hat{k} ] \\ &= N_c \vec{n}_c \end{aligned} \quad (23)$$

여기서,

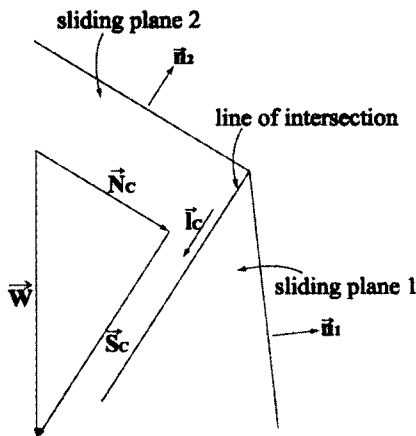


Fig. 5. Decomposition of body weight vector for the case of sliding on two block faces

$$\begin{aligned} N_c &= WM \\ M &= [(l_z l_x)^2 + (l_z l_y)^2 + (l_z^2 - 1)^2]^{1/2} \\ &= [1 - l_z^2]^{1/2} \\ \vec{n}_c &= [ l_z l_x \hat{i} + l_z l_y \hat{j} + (l_z^2 - 1) \hat{k} ] / M \end{aligned}$$

$\vec{N}_c$ 는 미끄러짐이 발생하는 2개 블록면 교선의 법선방향으로 작용하는 힘이며, 안전도 해석을 위해서는  $\vec{N}_c$ 에 의해 2개 블록면의 법선방향으로 형성되는 반력  $\vec{R}_1$ 과  $\vec{R}_2$ 를 산정하여야 한다.  $\vec{N}_c$ 를 포함하며 블록면의 교선과 직각을 이루는 평면을 가정하면(Fig. 6 참조) 블록면에 작용하는 반력  $\vec{R}_1$ 과  $\vec{R}_2$ 는  $-\vec{N}_c$ 와 사이각  $\theta_1, \theta_2$ 를 이루고 있다. 미끄러짐 면 1과 2의 단위 법선벡터를 각각  $\vec{n}_1, \vec{n}_2$ 라 하면

$$\theta_1 = -\vec{N}_c \cdot \vec{n}_1 \quad (24)$$

$$\theta_2 = -\vec{N}_c \cdot \vec{n}_2 \quad (25)$$

$\theta_1$  및  $\theta_2$ 가 산정되면 반력의 크기  $R_1$ 과  $R_2$ 를 아래의 관계식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$R_1 \cos \theta_1 + R_2 \cos \theta_2 = N_c \quad (26)$$

$$R_1 \sin \theta_1 = R_2 \sin \theta_2 \quad (27)$$

이상과 같이 사면체 블록의 자중에 의해 작용하는 2개 블록면의 반력 및 교선방향의 전단력이 결정되면 아래의 관계식에 의거하여 안전도(FS)를 산정할 수 있다.

$$\begin{aligned} FS &= [ c_1 A_1 + R_1 \tan \phi_1 + c_2 A_2 \\ &\quad + R_2 \tan \phi_2 ] / S_c \end{aligned} \quad (28)$$

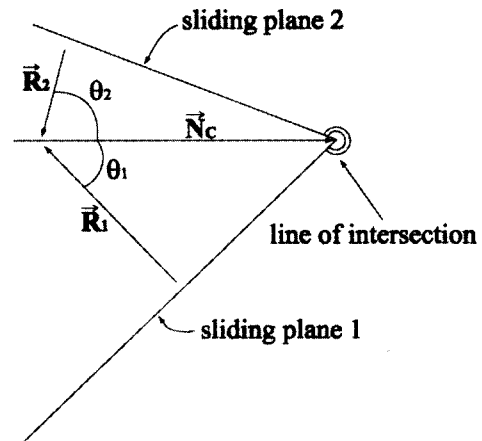


Fig. 6. Reaction vectors  $\vec{R}_1$  and  $\vec{R}_2$  normal to the sliding planes 1 and 2, respectively

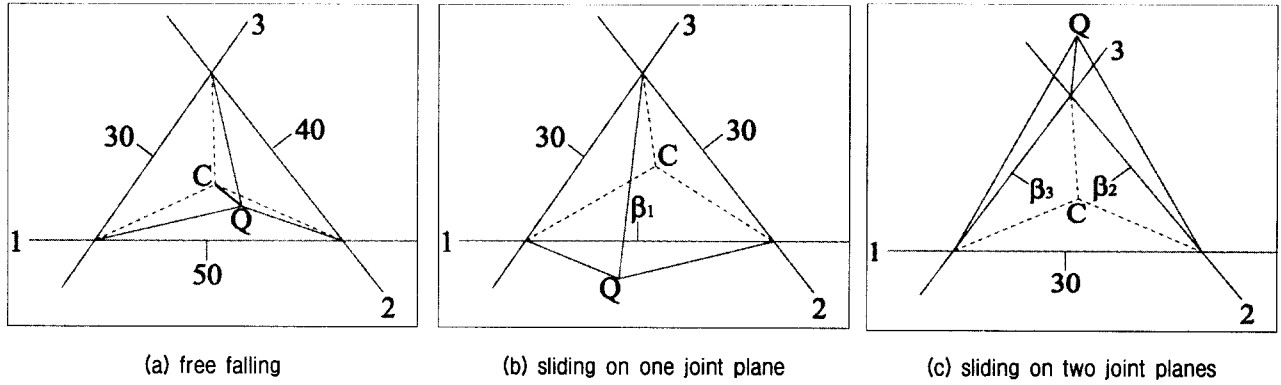


Fig. 7. Joint maps showing tetrahedral wedges of different failure modes( $\beta_1$  : dip angle of joint plane 1,  $\beta_2$  : dip angle of joint plane 2,  $\beta_3$  : dip angle of joint plane 3)

여기서,  $c$ 와  $\phi$ 는 블록을 형성하는 절리면의 점착력과 내부마찰각이며,  $A$ 는 미끄러짐이 발생하는 블록면의 면적이고, 첨자 1과 2는 블록면 번호를 지시한다.

#### 4. 모델분석

잠재적 키블록의 거동양상에 대한 전산해석 모델의 정확성을 입증하기 위하여 Fig. 7에 표시된 가상의 절리 분포에 의거하여 형성된 사면체 블록의 거동양상 및 안전도를 산정하였다. Fig. 7a)에 도시된 3개 절리의 방향성은 상부방향에 블록꼭지점을 형성하며, 수평면에 수직투영할 경우 점  $Q$ 가 기저삼각형 내부에 위치하여 선분  $\overline{CQ}$ 는 기저삼각형을 형성하는 절리 trace와 교차하지 않는다. 블록 옆면을 형성하는 절리의 연속성을 무한대로 가정하면 사면체 블록은 자유낙하 거동을 하게 된다. Fig. 7b)에 도시된 3개 절리 중 절리 1의 방향성은 사면체 블록이 형성될 경우 꼭지점의 투영점  $Q$ 를 기저삼각형 외부에 위치시키며, 따라서 선분  $\overline{CQ}$ 가 절리 1의 trace와 교차되어 절리면 1에서 미끄러짐이 발생된다. 절리면 2와 3의 경사각을  $30^\circ$ 로 고정시키고 절리면 1의 경사각을 변화시켜 사면체 블록의 안전도를 산정하였다. 이때, 결과 검증의 편의를 위하여 절리면 1의 점착력을 무시하였다. 절리면의 내부마찰각을  $45^\circ$ 로 가정하고 경사각 변화에 따라 산정된 블록 안전도를 Table 2에 수록하였다. 전산해석 모델에서 도출된 블록 안전도는 관계식 (18)에 의거하여 산정된 분석 결과와 정확히 일치하고 있으며, 절리 경사각 =  $45^\circ$ 에서 한계평형상태로 나타난다. Fig. 7c)에 도시된 사면체 블록은 꼭지점  $Q$ 가 기저삼각형 외부에 위치되며, 선분  $\overline{CQ}$ 가 절리 2, 3의 trace와 교차되어 2개 블록면에서의 미끄러짐을 야기시킨다. 미끄러짐이 발생하지 않는 절리면 1의 경사각을

$30^\circ$ 로 고정하고 절리면 2와 3의 경사각을 동일하게 설정한 후, 경사각 변화에 따른 안전도를 산정하여 Table 3에 수록하였다. 이때 절리면 2와 3의 점착력은 무시하였으며, 내부마찰각은  $45^\circ$ 로 가정하였다. 모델 분석결과는 2개 블록면에서 미끄러짐이 발생할 경우 내부마찰각보다 높은 경사각에서도 안정성이 유지되어 블록면 경사각  $60^\circ$ 에서 한계평형상태에 도달하며, 관계식 (28)에

Table 2. Safety factor of tetrahedral block for the case of sliding on one joint plane

| dip | safety factor |
|-----|---------------|
| 30  | 1.732         |
| 35  | 1.428         |
| 40  | 1.192         |
| 45  | 1.000         |
| 50  | 0.839         |
| 55  | 0.700         |
| 60  | 0.577         |
| 65  | 0.466         |
| 70  | 0.364         |

$\phi=45^\circ$

Table 3. Safety factor of tetrahedral block for the case of sliding on two joint planes

| dip | safety factor |
|-----|---------------|
| 40  | 1.892         |
| 45  | 1.633         |
| 50  | 1.412         |
| 55  | 1.215         |
| 60  | 1.033         |
| 65  | 0.859         |
| 70  | 0.689         |

$\phi_2 = \phi_3 = 45^\circ$

의거해 산술적으로 안전도를 계산하여 정확성을 검증하였다. 이와 같이 1개면 미끄러짐 경우(Table 2 참조)에 비해 안정성이 증가되는 데에는 다음의 2가지 요인이 작용하고 있다. Fig. 7c)에 도시된 절리 2, 3의 경사각은 60°이며, 경사방향을 고려하여 산출되는 교선의 선경사

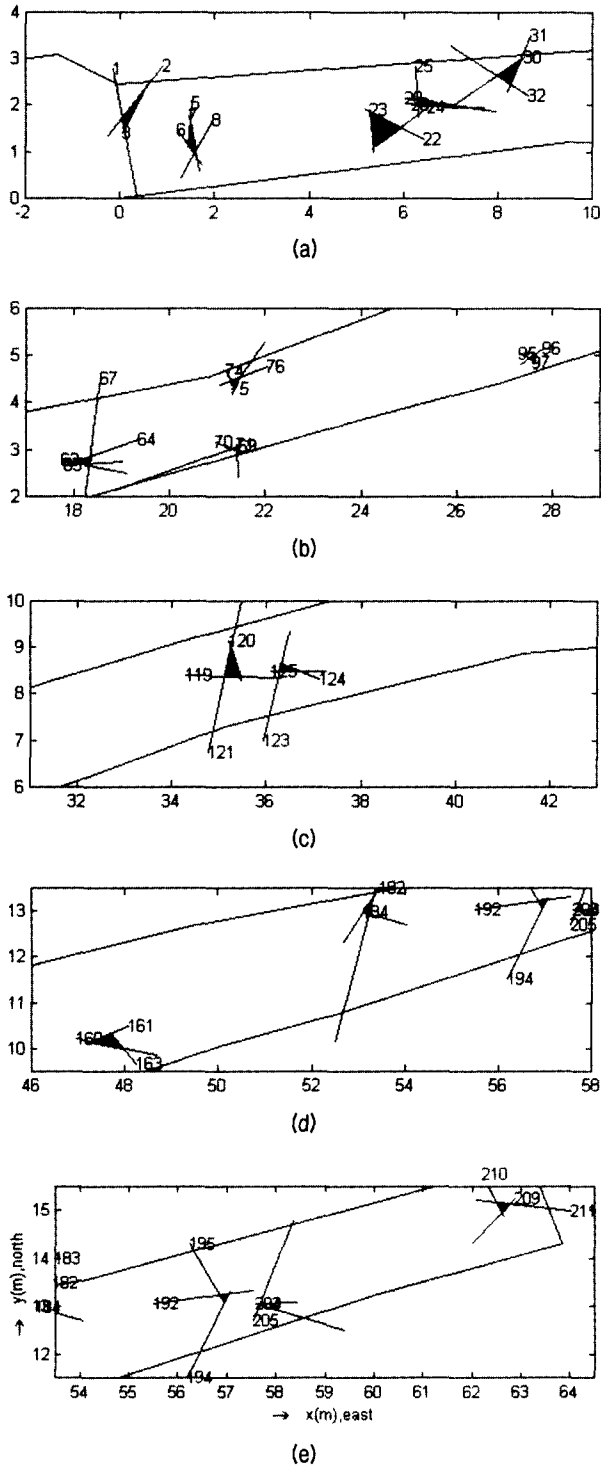


Fig. 8. Joint map showing base triangles of tetrahedral wedges - Eonyang crystal tunnel

는 50.8°이다. 결과적으로 블록하중에 의해 교선방향으로 형성되는 전단력의 감소와 결과적인 법선력의 증가를 유발시킨다. 또한 2개 면에서의 미끄러짐에 의해 전단지지력이 높게 형성되며, 이는 법선력에 의해 형성되는 반력의 증가로 나타난다. 블록하중을 1,000N으로 가정하였을 경우 Fig. 6에 도시된  $N_c = 632.5N$ ,  $\theta_1 = \theta_2 = 37.8^\circ$ ,  $R_1 = R_2 = 400N$ 으로 산정되었으며, 관계식 (28)에 의거한 안전도 산정에서 총반력은 800N으로 법선력 632.5N보다 증대된 안정성 유지효과를 나타내었다.

전산모델의 현장 활용성을 고찰하기 위하여 Fig. 1에 도시된 전산절리도에 의거하여 언양자수정 동굴 천장면에서의 사면체 블록 형성 및 거동양상에 따른 안정성을 분석하였다. 총 225개의 절리 trace를 대상으로 모델 분석을 수행한 결과 사면체 블록형성의 기본 요건인 기저삼각형은 29개가 확인되었으며, 이 중에서 사면체 블록이 형성되는 19개 기저삼각형을 Fig. 8에 도시하였다. 또한 동굴 천장 내부에 형성된 사면체 블록의 3차원적 배열도를 Fig. 9에 도시하였으며, 사면체 블록의 거동에 대한 모델 분석결과를 Table 4에 수록하였다. 19개 사면체 블록 중에서 자유낙하된 블록은 4개, 단일면 미끄러짐 양상은 13개, 2개면 미끄러짐은 2개 블록에서 발생되어 미끄러짐 거동에 의한 블록파괴가 동굴안정성에 중요한 요소로 작용하고 있다. 한편 블록을 형성하는 절리 조합을 고찰해보면 절리 7과 8은 블록 2, 3 형성에 모두 연계되어 있으며, 절리면 7에서 공통적인 미끄러짐 거동이 발생되었다. 또한, 절리 65는 블록 7, 8, 9 형성에 전부 관련되어 있어 단일 절리면의 방향성과 역학적 특성이 복수의 사면체 블록 형성 및 파괴거동 양상에 영향을 끼칠 수 있는 예를 보여준다.

동굴천장에 형성된 사면체 블록의 파괴분포를 파괴

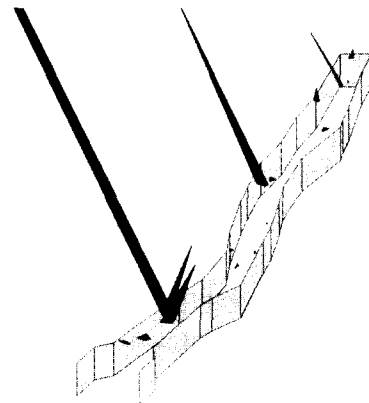


Fig. 9. Distribution of potential tetrahedral wedges on the roof of Eonyang crystal cave



Table 4. Results of model analysis for the tetrahedral block on the roof of Eonyang Crystal cave

| block number | joint combination forming tetrahedral block |     |     | area of base triangle (m <sup>2</sup> × 10 <sup>-3</sup> ) | volume of tetrahedral block (m <sup>3</sup> × 10 <sup>-3</sup> ) | failure mechanism <sup>1</sup> |    |    | factor of safety <sup>2</sup> |
|--------------|---|-----|-----|--|--|--------------------------------|----|----|-------------------------------|
|              |   |     |     |  |  | face                           |    |    |                               |
|              |   |     |     |  |  | #1                             | #2 | #3 |                               |
| 1            | 1   | 2   | 3   | 78.30  | 2.900  | 0                              | 0  | 0  | ND <sup>3</sup>               |
| 2            | 6   | 7   | 8   | 51.20  | 5.100  | 0                              | 1  | 0  | 0.049                         |
| 3            | 7   | 8   | 9   | 1.90   | 0.035  | 1                              | 0  | 0  | 0.049                         |
| 4            | 23  | 24  | 25  | 235.30   | 272.600  | 0                              | 1  | 0  | 0.255                         |
| 5            | 26  | 29  | 30  | 61.70  | 1,345.500  | 0                              | 1  | 0  | 0.404                         |
| 6            | 31  | 32  | 33  | 104.90   | 127.300  | 1                              | 1  | 0  | 0.317                         |
| 7            | 64  | 65  | 66  | 11.30  | 0.300  | 0                              | 0  | 1  | 0.676                         |
| 8            | 64  | 65  | 68  | 30.20  | 1.100  | 0                              | 1  | 0  | 0.012                         |
| 9            | 65  | 66  | 68  | 39.40  | 1.200  | 0                              | 1  | 0  | 0.012                         |
| 10           | 70  | 71  | 72  | 5.20   | 0.200  | 0                              | 1  | 0  | 0.074                         |
| 11           | 75  | 76  | 77  | 13.10  | 0.200  | 0                              | 0  | 0  | ND <sup>3</sup>               |
| 12           | 96  | 97  | 98  | 2.20   | 0.041  | 0                              | 0  | 0  | ND <sup>3</sup>               |
| 13           | 120   | 121 | 122 | 98.20  | 334.000  | 1                              | 1  | 0  | 1.242                         |
| 14           | 124   | 125 | 126 | 40.50  | 2.300  | 0                              | 0  | 1  | 0.149                         |
| 15           | 161   | 162 | 164 | 96.10  | 4.400  | 0                              | 0  | 0  | ND <sup>3</sup>               |
| 16           | 183   | 184 | 185 | 23.60  | 5.800  | 1                              | 0  | 0  | 0.00 <sup>3</sup>             |
| 17           | 193   | 195 | 196 | 13.80  | 14.300   | 0                              | 0  | 1  | 0.404                         |
| 18           | 204   | 205 | 206 | 1.10   | 0.034  | 0                              | 0  | 1  | 0.162                         |
| 19           | 210   | 211 | 212 | 25.80  | 4.100  | 0                              | 0  | 1  | 0.049                         |

<sup>1</sup> 0 : free falling, 1 : sliding

<sup>2</sup> c=0, φ=35°

<sup>3</sup> ND : not determined

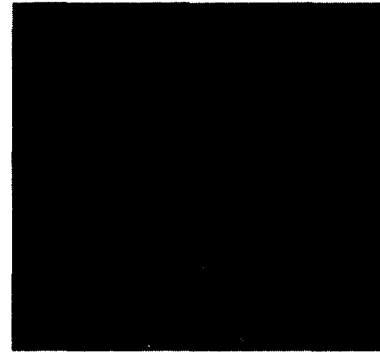
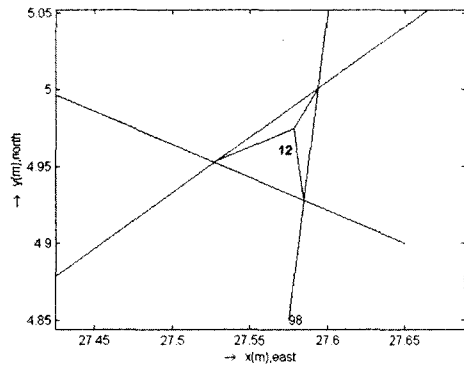
거동 양상별로 고찰하였다. 동굴의 폭이 2m 이내로 협소하여 대규모 사면체 블록은 형성되지 않았다. 자유낙하 거동이 발생된 블록들의 규모도 매우 제한되어 있다. 미끄러짐이 발생하는 블록 규모는 일정 범위에서 변화하나 일반적으로 자유낙하 블록보다는 규모가 크다. 이는 미끄러짐 거동이 발생되기 위한 블록형태를 형성하기 위하여 요구되는 기하학적 요인에 의거한 것으로 고찰된다. 참고적으로 2개면 미끄러짐 거동이 발생된 블록 13의 부피는 0.334m<sup>3</sup>으로 19개 블록 중 최상위급 규모를 나타낸다. 이와 같은 잠재적 키블록들의 규모는 안정성 분석과정에서 자중력 산정에 직접 관계되며, Table 4에 수록된 기저삼각형의 면적 및 둘레 길이 등과 함께 최적 보강체제 수립에 기본 자료로 활용될 수 있다.

사면체 블록을 형성하는 절리면의 연속성이 무한대일 경우에 블록 자중에 의한 안전도를 산정하였다(Table 4 참조). 이때 절리면의 점착력은 무시하였으며, 내부마찰각은 35°로 가정하였다. 자유낙하 거동이 예상되는 4개 사면체 블록의 붕락이 현장조사에서도 관찰되었으며, 블록 12에 대한 현장 사진을 Fig. 10a)에 도시하였다. 1개면에서 미끄러짐이 발생하는 경우 블록의 안전도는

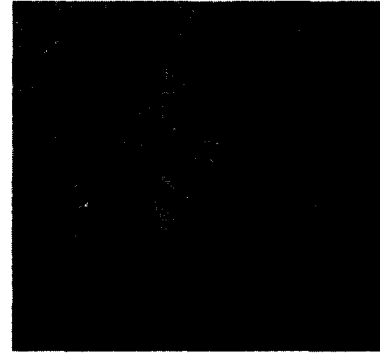
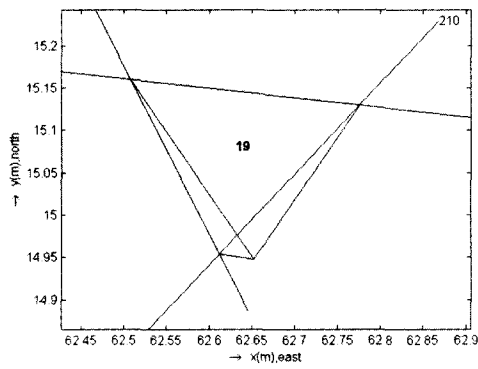
매우 낮게 산정되며, 실제 현장관찰에서도 규모가 작은 블록들에서 미끄러짐 파괴 거동을 확인하였다. 한편, 상대적으로 규모가 크고 블록 꼭지점이 천장 내부 깊숙한 곳에 위치한 블록 19의 경우 블록파괴는 미끄러짐면 전체에서 발생되지 않고 블록 일부가 절단된 형태로 진행된 것으로 관찰되었다(Fig. 10b) 참조). 이와 같은 현상은 절리면의 연속성에 기인하여 블록 옆면에 rock bridge가 형성되어 자연적인 보강효과에 의해 블록이 지지되고 있으며, 일부가 절단된 것은 동굴 굴착과정에서 부수적으로 발생한 것으로 사료된다. 2개면 미끄러짐이 발생할 것으로 분석된 블록 13에서도 유사한 양상이 관찰되었다(Fig. 10c) 참조). 블록 13의 경우 Table 4에 수록된 안전도는 자체 지지력이 발휘될 수 있는 수준을 나타내고 있으며 절단부위도 기저면 주위에 국한되어 있다.

### 5. 결론

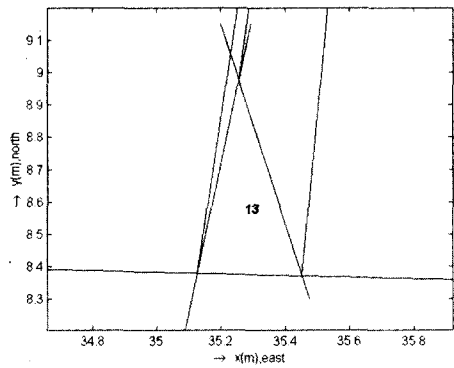
지하굴착 공동천장에 형성된 잠재적 사면체 키블록의 존재성과 거동양상 및 안전도를 현장 절리분포 조사 결과에 의거해 산정할 수 있는 해석시스템을 개발하였



(a) Free falling - block 12



(b) Sliding on single face - block 19



(c) Sliding on two faces - block 13

Fig. 10. Tetrahedral blocks of different failure modes

다. 개별 절리들의 상대적인 위치와 방향성에 대한 데이터베이스를 구축하여 굴착 설계영역에 대한 전산절리도를 형성하였으며, 블록을 형성하는 절리면의 3차원적 방향성을 대수적으로 해석하여 사면체 블록의 역학적 거동 특성을 분석하는 이론적 방법도 제시되었다. 해석 시스템의 정확도는 예제적 절리분포에 의거하여 형성된 사면체 블록의 거동양상을 분석하여 검증하였다. 현장 활용성은 언양 자수정동굴 천장에 발달된 사면체 블

록의 거동양상 및 안전도를 해석하고 현장조사 결과와 비교 분석하여 설명하였다. 현 단계에서 개발된 해석시스템은 공동 천장면에서의 잠재적 키블록 해석에 국한되기는 하지만 지하굴착 설계 및 현실적 보강계획 수립에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

1. 송재준(2000), 절리길이 분포의 통계적 모델링과 터널주변 암반 블록의 거동성 해석, 박사학위논문, 서울대학교.
2. Baecher, G. B.(1980), "Progressively censored sampling of rock joint traces", J. of Mathematical Geology, Vol.12, No.1, pp.33~40.
3. Carvalho, J., Hoek, E., and Li, B.(1992), Unwedge, Rock Engineering Group. University of Toronto.
4. Cho, T., Plesha, M., and Haimson, B. C.(1991), "Continuum Modelling of Jointed Porous Rock", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics., Vol.15.
5. Goodman, R. E. and Shi, G.(1985), Block Theory and Its Application to Rock Engineering, Prentice-Hall Inc.
6. ISRM(1978), "Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Mass", J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol.15, No.6, pp.319~368.
7. Kulatilake, P. H. S. W. and Wu, T. H.(1984), "Sampling bias on orientation of discontinuities", Rock Mechanics and Rock Engineering. Vol.17, pp.243~253.
8. Kulatilake, P. H. S. W., Wathugala, D. N. and Stephansson, O. (1993), "Joint network modelling with a validation exercise in stripa mine, Sweden", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol.30, pp.503~526.
9. Mahtab, A., Xu, S., Grasso, P., and Kendorski, F. S.(1992), "Use of alternative distributions for characterizing joint extent and spacing", Proc. Fractured and Jointed Masses. Lake Tahoe. CA. pp.205~210.
10. Priest, S. D. and Hudson, J. A.(1976), "Discontinuity spacings in rock", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 13, pp.135~148.
11. Priest, S. D. and Hudson, J. A.(1981), "Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol.18, pp.183~197.
12. Priest, S. D.(1985), Hemispherical Projection Methods in Rock Mechanics, George Allen and Unwin, London.
13. Sen, Z. and Kazi, A.(1984), "Discontinuity spacing and RQD estimates from finite length scanlines", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol.21, No.4, pp.203~12.
14. Song, J. J. and Lee, C. I.(2001), "Estimation of joint length distribution using window sampling", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.38, No.4, pp.519~528.

(접수일자 2001. 2. 20)