

대수학적 사면체 블록 판별 및 거동해석 알고리즘

조 태진¹⁾, 홍 관석²⁾, 김 일석³⁾

¹⁾부경대학교 환경과학대학, ²⁾부경대학교 응용지질학과

³⁾지오테크컨설파트(주) 지반공학연구소

1. 서론

지하굴착에서의 경제적 설계계획 수립 및 안정적 시공을 위해서는 불연속면의 공간적 분포에 따른 절리암반의 구조적 특성에 대한 해석이 우선적으로 수행되어야 한다. 천부에 굴착되는 지하공동의 경우 표층 지질조사 결과에 의거하여 절리분포 상태를 유추할 수도 있으나, 공동 기능의 원활성을 도모하기 위하여 심부에서 대규모 굴착이 요구되는 경우에는 현장에 발달된 불연속면 발달상태를 굴착 진행과 병행하여 조사해서 굴착계획 및 최적 보강체계 수립에 신속하게 반영시켜야 한다. 이와 같은 목표를 달성하기 위하여는 현장조사 기간을 최소화시켜 굴착지연을 방지하고 절리발달 양상 및 구간별 보강체계 설정에 필요한 결과도출 과정을 전산화시켜 굴착계획 수립의 신속성과 정확성이 유지되어야 한다. 기존의 블록해석 기법들을 이용한 분석결과들은 일정지역에 분포된 불연속면의 대표적인 특성들에 기초하여 산정되었기 때문에 실제 굴착현장에 직접 활용되지는 못한다는 문제점들을 내포하고 있다. 본 연구에서는 굴착과정에서 측정된 현장암반의 불연속면 분포에 대한 자료들을 전산화시켜 방향성 등에 대한 제반 특성들과 잠재적 사면체 키블록의 존재성, 형태, 규모 및 안정성을 컴퓨터를 이용하여 신속하게 분석하여 효율적인 보강 방법들이 대처될 수 있는 전산시스템을 개발하였다.

2. 사면체 해석 이론

Fig. 1a)은 경남 울주군에 소재하는 언양자수정 동굴에서 측정된 절리분포자료들을 이용하여 형성된 전산절리도이다. 전산절리도가 완성되어 사이버 공간에서의 개별 절리들의 위치 및 방향성 자료에 대한 기본적인 데이터베이스가 구축되면 굴착공간의 천장에 형성되는 잠재적 키블록의 존재성을 파악한다. 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. 전체 절리 trace에 대하여 상호 교차되는 3개의 절리 조합들을 순차적으로 추출하여 기저삼각형의 형성을 확인한다(Fig. 1b) 참조). 각각의 기저 삼각형을 구성하는 절리조합들의 공간적 특성들은 다음에 기술되는 연산과정에 사용되어 사면체 블록의 존재성 확인에 활용된다. 평면절리를 가정할 때 각 절리면의 평면식은 3차원 Cartesian 좌표축을 이용하여 다음과 같이 정의될 수 있다.

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

여기서, a_i, b_i, c_i, d_i 는 i 번째 절리면의 평면식 상수이며, 절리평면의 outward normal vector의 방향 여현 성분들을 이용하여 산정된다. 기저삼각형을 형성하는 3개 절리면의 공간식이 설정되면 선형대수 원리를 이용하여 3개 평면의 교차점에 대한 공간좌표(x_b, y_b, z_b)를 산정한다. 3개 절리면이 상호

교차되어 발달되는 사면체 블록의 형성여부는 계산된 z_b 좌표값에 의거하여 판단할 수 있다. 본 연구에서는 기저삼각형이 형성되는 굴착공간 천장면의 z -좌표를 기준값($z=0$)으로 설정하여 $z_b > 0$ 일 경우 사면체 블록이 형성되는 것을 판별하였다.

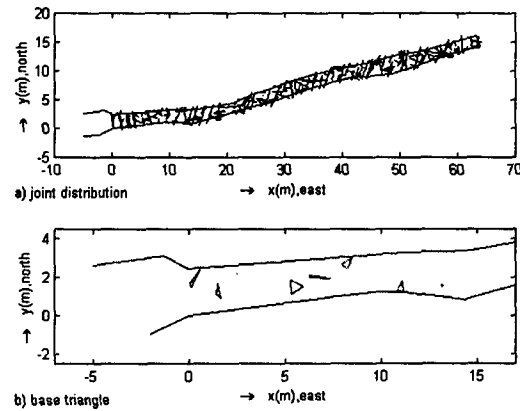


Fig. 1. Joint map of Eonyang Crystal cave.

굴착 천장면 내부에 발달된 잠재적 키블록은 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 밀변들을 연장시켜 수평면에 도시하고 사면체 블록의 꼭지점을 수직 투영하면(Q), 이들 3개 점들의 상대적인 위치에 따라 Fig. 2에 도시된 형태를 취하게 된다. 블록 꼭지점의 투영점 Q 가 기저삼각형 내부에 위치하면 블록의 자유낙하 운동이 예상된다. 만일 Q 가 기저삼각형 외부에 위치하면 1개 또는 2개 면에서의 미끄러짐 거동이 발생된다.

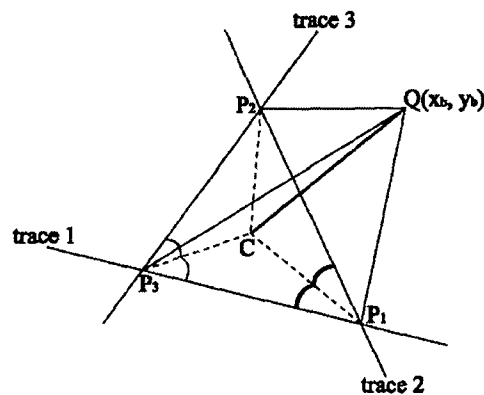


Fig. 2. Projection of block apex to the horizontal plane containing base triangle.

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. 수직방향으로 작용하는 블록하중 벡터(\vec{W})는 아래와 같이 정의된다.

$$\vec{W} = W \vec{n}_v \quad (2)$$

여기서,

$$W = V \times \gamma$$

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

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

$$\vec{W} = \vec{N} + \vec{S} \quad (3)$$

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

$$FS = (cA + N \tan \phi) / S \quad (4)$$

여기서, c와 ϕ 는 각각 절리면의 점착력과 내부마찰각이며, A는 미끄러짐 거동이 예상되는 사면체 블록면의 면적이다.

2개 블록면에서의 미끄러짐 거동은 암반사면의 썩기과괴 양상과 유사하며 블록하중을 블록면의 교선 방향 및 2개 블록면의 법선방향으로 분해하여 안전도를 분석할 수 있다. 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.

$$\vec{W} = \vec{N}_c + \vec{S}_c \quad (5)$$

\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 블록면에 작용하는 반력 \vec{R}_1 과 \vec{R}_2 는 $-\vec{N}_c$ 와 사이각 θ_1 , θ_2 를 이루고 있다. 미끄러짐 면 1과 2의 단위 법선벡터를 각각 \vec{n}_1 , \vec{n}_2 라 하면

$$\theta_1 = -\vec{N}_c \cdot \vec{n}_1 \quad (6)$$

$$\theta_2 = -\vec{N}_c \cdot \vec{n}_2 \quad (7)$$

θ_1 및 θ_2 가 산정되면 반력의 크기 R1과 R2를 아래의 관계식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$R_1 \cos \theta_1 + R_2 \cos \theta_2 = N_c \quad (8)$$

$$R_1 \sin \theta_1 = R_2 \sin \theta_2 \quad (9)$$

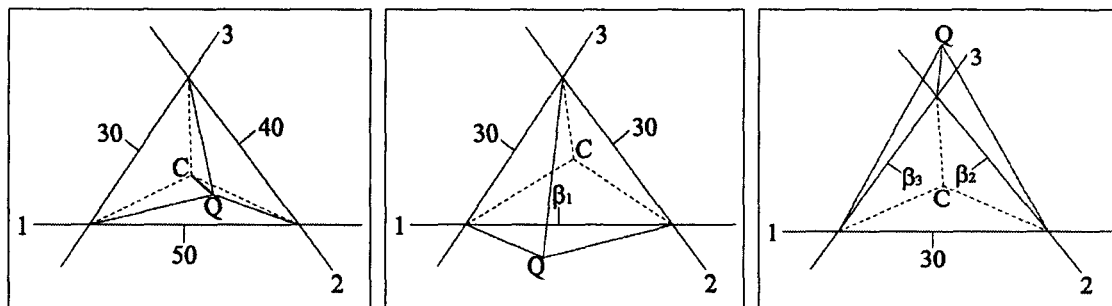
이상과 같이 사면체 블록의 자중에 의해 작용하는 2개 블록면의 반력 및 교선방향의 전단력이 결정되면 아래의 관계식에 의거하여 안전도(FS)를 산정할 수 있다.

$$FS = [c_1A_1 + R_1 \tan \phi_1 + c_2A_2 + R_2 \tan \phi_2] / S_c \quad (10)$$

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

3. 모델 분석

잠재적 키블록의 거동양상에 대한 전산해석 모델의 정확성을 입증하기 위하여 Fig. 3에 표시된 가상의 절리분포에 의거하여 형성된 사면체 블록의 거동양상 및 안전도를 산정하였다. Fig. 3a)에 도시된 3개 절리의 방향성은 상부방향에 블록꼭지점을 형성하며, 수평면에 수직투영할 경우 점 Q가 기저삼각형 내부에 위치하여 선분 \overline{CQ} 는 기저삼각형을 형성하는 절리 trace와 교차하지 않는다. 블록 옆면을 형성하는 절리의 영속성을 무한대로 가정하면 사면체 블록은 자유낙하 거동을 하게 된다. Fig. 3b)에 도시된 사면체 블록은 꼭지점의 투영점 Q를 기저삼각형 외부에 위치시키며, 따라서 절리면 1에서 미끄러짐이 발생된다. Fig. 3c)에 도시된 사면체 블록은 꼭지점 Q가 기저삼각형 외부에 위치되며, 선분 \overline{CQ} 가 절리 trace 2 및 3과 교차되어 2개 블록면에서의 미끄러짐을 야기시킨다. 2개 블록면에서 미끄러짐이 발생할 경우 내부마찰각보다 높은 경사각에서도 안정성이 유지되며, 산술적으로 안전도를 계산하여 정확성을 검증하였다.



a) free falling b) sliding on one joint plane c) sliding on two joint planes

Fig. 3. Joint maps showing tetrahedral wedges of different failure modes.
 (β_1 : dip angle of joint plane 1, β_2 : dip angle of joint plane 2,
 β_3 : dip angle of joint plane 3)

전산모델의 현장 활용성을 고찰하기 위하여 Fig. 1에 도시된 전산절리도에 의거하여 언양자수정 동굴 천장면에서의 사면체 블록 형성 및 거동양상에 따른 안정성을 분석하였다. 사면체 블록형성의 기본 요건인 기저삼각형은 29개가 확인되었으며, 이 중에서 19개 사면체 블록의 형성이 판별되었다(Fig. 4). 19개 사면체 블록 중에서 자유낙하된 블록은 4개, 단일면 미끄러짐 양상은 13개, 2개면 미끄러짐은 2개 블록에서 발생되어 미끄러짐 거동에 의한 블록파괴가 동굴안정성에 중요한 요소로 작용한다. 동굴천장에 형성된 사면체 블록의 파괴분포를 파괴거동 양상별로 고찰하였다.

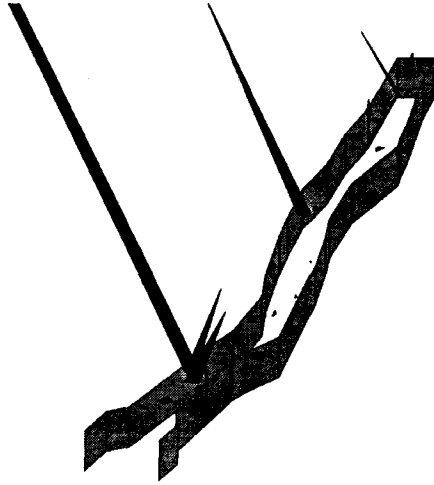


Fig. 4. Distribution of potential tetrahedral wedges on the roof of Eonyang crystal cave.

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 0.334m³으로 19개 블록 중 최상위급 규모를 나타낸다. 사면체 블록을 형성하는 절리면의 연속성이 무한대일 경우에 블록 자중에 의한 안전도를 산정하였다. 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. 이와 같은 현상은 절리면의 연속성에 기인하여 블록 옆면에 rock bridge가 형성되어 자연적인 보강효과에 의해 블록이 지지되고 있으며, 일부가 절단된 것은 동굴 굴착과정에서 부수적으로 발생된 것으로 사료된다. 2개면 미끄러짐이 발생될 것으로 분석된 블록 13에서도 유사한 양상이 관찰되었다. 블록 13의 경우 안전도는 자체 지지력이 발휘될 수 있는 수준을 나타내고 있으며 절단부위도 기저면 주위에 국한되어 있다.

4. 결론

지하굴착 공동천장에 형성된 잠재적 사면체 블록의 존재성과 거동양상 및 안전도를 현장 절리분포 조사결과에 의거해 산정할 수 있는 해석시스템을 개발하였다. 해석시스템의 정확도는 예제적 절리분포에 의거하여 형성된 사면체 블록의 거동양상을 분석하여 검증하였다. 현장 활용성은 언양 자수정 동굴 천장에 발달된 사면체 블록의 거동양상 및 안전도를 해석하고 현장조사 결과와 비교 분석하여 설명하였다. 개발된 해석시스템을 이용하여 잠재적 키블록 거동을 고려한 지하굴착 설계 및 현실적 보강계획 수립이 원활히 진행될 수 있을 것으로 기대된다.