

절리 영속성이 사각 단면 지하공동에서의 사면체 블록 형성에 끼치는 영향

조태진*

Effect of Joint Persistence on the Formation of Tetrahedral Block Inside an Underground Opening

Taechin Cho*

Abstract A numerical analysis model capable of predicting the shape, the size and the potentiality of collapse of tetrahedral blocks considering the persistence obtained from the field survey of joint distribution around the underground excavation surface has been developed. Numerical functions of analyzing both the exposed trace distribution on the excavation surface and the formation of tetrahedral block controlled by the extent of joint surface have been established and linked to the previously developed three dimensional deterministic block analysis model. To illustrate the reliability of advanced numerical model the case of underground excavation in which the collapse of rock block had practically taken place was studied. Representative orientations of joint sets was determined based on the joint distribution pattern observed on the excavation surfaces. The formation of block on the roof of underground opening was analyzed to unveil the potential tetrahedral block the shape of which was very similar to the collapsed rock block. Mechanisms of collapse process has been also analyzed by considering the three dimensional shape of tetrahedral block.

Key words Underground opening, Three dimensional block analysis model, Tetrahedral block, Persistence, Mechanism of block collapse

초 록 지하공동 굴착현장에서 관찰되는 절리분포 양상에 대한 자료를 기반으로 굴착과정에서 형성될 수 있는 사면체 블록의 형상, 규모 및 붕락 가능성을 절리 영속성을 고려하여 예측하는 수치해석 기법을 개발하였다. 절리 영속성 분석결과를 이용하여 절리면의 확장성에 따른 개착면에서의 표출정도 및 블록형성 가능성 해석을 수행하는 기능을 고안하여 기존에 개발된 결정론적 3차원 블록해석모델에 접목시켰다. 개선된 수치해석모델의 신뢰성을 고찰하기 위하여 실제 블록 붕락이 발생된 굴착현장에 대한 해석을 수행하였다. 조사된 절리분포 양상에 의거하여 대표 방향성을 설정하고 잠재적 블록 형성을 분석하여 붕락된 블록 형상에 포함된 해석 결과를 도출하였으며, 이에 근거하여 굴착과정에서의 붕락 진행 미커니즘을 블록형상을 고려하여 고찰하였다.

핵심어 지하공동, 3차원 블록해석모델, 사면체 블록, 영속성, 붕락 미커니즘

1. 서 론

현대 산업의 발달과 병행하여 국가의 전략적 인프라 구축이 확대되고 있으며, 이에 따라 지하암반시설의 규모가 확대되고 기능도 다양해지고 있다. 기존의 지하시설물 건립의 경우에는 굴착 심도를 고려하여 현장 응력의 크기 및 방향성과 암석의 수리역학적 특성을 분석하여 지하공동의 안정성을 해석할 수 있었으며, 개착공동

Received: Oct. 10, 2016

Revised: Nov. 1, 2016

Accepted: Nov. 1, 2016

***Corresponding Author:** Taechin Cho
Tel) +82516296557, Fax) +82516296553
E-Mail) chote@pknu.ac.kr

Pukyong Nat. Univ. Yongsoro 45, Namgu Pusan, 48513, Korea

의 무지보 간격과 절리 간격의 상대적인 비율에 따라 현장암반의 연속체적 거동과 불연속체적 거동 해석을 차별적으로 해석할 것이 권장되었다(Brady and Brown, 2004). 최근에는 지하공동이 차지하는 인프라 기능의 다목적성이 요구되어 굴착 단면이 급속하게 확장되고 지하공동의 개착범위도 확대되었다. 지하공동 굴착의 대규모화는 굴착과정에서 무지보 간격의 증가를 유발시켜 개착 자유면에 발달된 불연속면의 공간적인 특성에 따라 형성되는 암반블록의 붕락 가능성이 증가되었다. 굴착진행과정에서의 암반블록의 붕락은 작업 환경에 대한 직접적인 위해요소로 작용할 수 있으며, 지하공동의 기능을 상실시킬 수도 있다. 잠재적인 키블록의 형성은 굴착 인근지역의 국지적인 불연속면 분포상태에 큰 영향을 받으며(Goodman and Shi, 1985), 키블록의 거동은 불연속면의 공간적 및 역학적 특성에 따라 결정된다. 현장 암반에 발달된 불연속면들의 공간적인 분포 양상을 해석하는 다양한 방법론을 Priest(1980)가 제시하였으며, 불연속면의 역학적 특성에 대한 분석방법이 Barton et al. (1985)에 의해 심도 깊게 개발되었다. 한편 Einstein et al.(1983) 및 Lajtai(1969)는 암반 내부에서의 불연속면 발달 정도를 지시하는 연속성에 대한 연구를 수행하여 압교 형성 비율에 따른 블록의 안정성을 분석하였다. 그러나 현재까지 불연속면에 대한 현장조사는 절리가 표출되는 굴착면에 한정되는 한계성에 기인하여 절리암반 거동에 대한 핵심적인 요소인 연속성을 완전하게 직접적으로 조사하는 방법론은 개발되지 못하였다. Baecher et al. (1977) 및 Warburton (1980)은 절리 형상을 대수학적인 분석이론을 적용시킬 수 있는 원형으로 가정하여 절리 규모를 통계학적으로 도출하는 방법론을 개발하였으나, 절리 조사지역이 공동 굴착현장으로 제한되어 조사결과를 활용하여 분석된 연속성에 대한 해석 결과의 신뢰성이 확보되지 못하였다. 대체적인 방법으로 Chern and Wang(1993), Song et al.(2001) 및 Menendez_Diaz et al.(2009)은 무한대의 연속성을 지닌 절리분포를 가정하여 블록해석을 수행하였다. 본 연구에서는 지하공동 굴착면에 표출된 절리들의 방향성을 측정하고, 3개 절리면의 상대적인 위치를 좌표화하여 굴착과정에서의 블록형성을 연속성을 변화시켜 분석하는 기법을 고안하였으며, Cho et al.(2012)에 의해 개발된 3차원 블록해석모델에 접목시켰다. 불연속면의 연속성을 고려하는 새로운 블록해석모델의 활용성을 설명하기 위하여 굴착과정에서 붕락이 발생된 대규모 지하공동에서의 사면체 블록의 붕락 미개니즘을 잠재적 키블록의 형성과정 및 공간적 속성을 고려하여 고찰하였다.

2. 불연속면의 연속성

현장 암반에 발달된 불연속면의 공간적 분포 양상과 역학적 특성을 분석하는 다양한 조사기법들이 도출되어 암반구조물의 안정성을 좌우하는 불연속면의 공간적 및 역학적 특성들이 상당한 수준의 정확도를 가지고 도출되고 있다. 그러나 기존의 절리조사 기법들은 개별 절리의 위치를 설정하기 곤란하여 편재적인(ubiquitous) 절리분포를 가정하여 구축되었으며, 절리 암반의 연속체적 거동양상을 고려하여 암반구조물의 안정성에 끼치는 영향을 정성적으로 해석할 수밖에 없는 한계성이 존재하였다. 개별 절리들의 방향성 및 공간적 분포를 도출하기 위하여 Yoon et al.(2003)은 DOM 시추시스템을 개발하여 코어에서 관찰되는 절리면의 국지좌표를 설정하여 절리 방향성과 위치를 산정할 수 있는 방법론을 제시하였다. 3차원 공간에서 불연속면을 평면으로 가정하면 평면의 방향성 벡터와 시추공 내에서 측정된 위치 좌표를 사용하여 3차원 평면식을 도출할 수 있다.

$$ax + by + cz = d \quad (1)$$

여기서 a, b, c 는 방향성 계수이며, d 는 위치 계수이다. 식 (1)에 의거하여 대수학적으로 표현되는 불연속면의 연속성을 무한대로 가정하면 절리면은 3차원 공간을 양분하는 무한한 크기의 평면이 된다. 안전측 해석을 위해서는 무한 규모의 불연속면을 가정할 수도 있지만, 절리 연속성이 분석될 경우에는 절리면의 확장 정도를 고려하여 불연속면이 암반 구조물의 안정성에 끼치는 영향을 현실적으로 해석할 수 있다.

Einstein et al. (1983)은 기준면에서 불연속적인 영역이 차지하는 비율을 연속성으로 정의하였다. 그러나 현실적으로 암반 내부에 발달된 불연속면의 확장성 조사가 불가능하기 때문에 조사면에 표출된 절리 트레이스의 길이를 측정하여 연속성을 산정하는 단순화된 식을 제안하였다.

$$K = \lim_{L_s \rightarrow \infty} \frac{\sum l_i}{L_s} \quad (2)$$

여기서, L_s : 기준선 길이

l_i : 절리 트레이스 길이

절리 트레이스는 절리면이 개착면과 교차되어 형성된 선분이기 때문에 트레이스 길이가 절리면의 크기, 즉 연속성을 대표하지는 않는다. Priest and Hudson(1981)

및 Baccher(1980)는 트레이스 길이에 대한 확률밀도를 음지수 분포로 가정하여 확률밀도분포함수 $f(l)$ 을 산정하는 기법을 고안하였다. 그러나 연속성에 의거하여 절리면의 확장성을 대수학적으로 고찰하기 위해서는 일차적으로 절리면의 형상이 설정되어야 한다. 불연속면이 암반 내부에서 차지하는 영역을 규정하는 요소인 절리 형상은 암석의 성인과 지구조적 환경에 따라 변화된다. Pallard and Aydin(1988)에 의해 퇴적층 암반에는 사변형 절리, 괴암에서는 타원형 절리, 용암의 냉각작용에 의해서는 사변형 형상의 절리들이 형성되는 것으로 조사되었다. 그러나 현장 암반에서 절리면 전체가 노출되지는 않으며, 국부적인 절리표면 특성에 의거하여 절리면의 형상과 규모를 예측하기는 불가능하기 때문에 Warburton(1980)은 원형의 절리면을 가정하여 절리직경밀도분포함수 $c(s)$ 를 이용하여 확률밀도분포함수 $f(l)$ 을 산정하는 식 (3)을 도출하였다.

$$f(l) = \frac{1}{\mu_s} \int_l^\infty \frac{c(s)}{\sqrt{s^2 - l^2}} ds \quad (l \leq s) \quad (3)$$

여기서, s = 절리직경
 μ_s = 평균 절리직경

식 (3)의 $c(s)$ 를 해석적으로 산출하는 통계확률적 기법은 Villaescusa and Brown(1992)에 제시되어있다. 절리형상을 원형으로 가정할 때 개착면에 표출된 트레이스 길이가 동일하여도 원형 절리면의 중심 위치에 따라 암반 내부에서 확장 영역이 극단적으로 상이하게 된다. Cho et al.(2012)은 DOM 시추기법의 연구과정에서 원형 절리면의 중심이 시추공 축에 위치하는 경우를 가정하고 연속성을 원의 반경으로 대체시켜 해석 단면에 표출되는 절리 트레이스를 예측하는 방법론을 고안하였다. Fig. 1에 도시된 예제적 도해에서 절리 중심좌표가 (x_j, y_j, z_j) 에 위치한 단일 절리면이 개착면에 표출되어 형성되는 절리 트레이스 범위를 개념적으로 설명

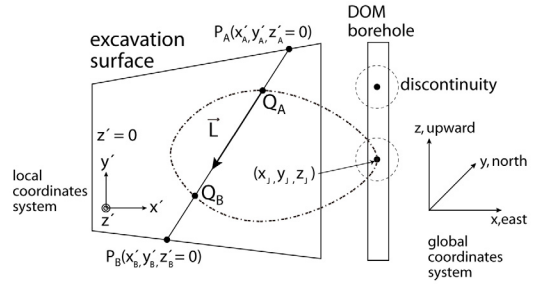


Fig. 1. Algebraic projection of discontinuity plane on the excavation surface (after Cho et al., 2012)

하였다. 도해적 설명의 편의상 절리 트레이스의 표출 정도를 절리중심이 기점인 비정형의 쉘선영역을 사용하여 도시하였다. 연속성이 낮아 원형 절리반경이 작은 경우에는 해석 단면과 불연속면의 상대적인 위치에 근거하여 절리 트레이스가 표출되지 않는다. 연속성이 증가되는 경우 트레이스가 선분 Q_A-Q_B 로 표출되며, 무한 연속성의 경우에는 P_A-P_B 를 잇는 선분으로 표출된다. 본 연구에서도 불연속면의 연속성을 대수학적으로 해석하기 위하여 절리면의 형상으로 원형으로 가정하고 원의 반경을 연속성을 대표하는 인자로 활용하여 절리면의 확장성에 따른 암반 블록의 형상을 고찰하였다.

3. 연속성을 고려한 3차원 블록해석모델

지하공동에서의 굴착단계별 블록해석을 수행하는 3차원 모델은 굴착방향을 기준으로 국지좌표계(local coordinates)를 설정하여 굴착면에서의 절리 트레이스를 추출하고, 3차원 공간에서의 불연속면의 교차성을 분석하여 암반 내부에서 실제로 형성되는 블록을 도출한다. Fig. 2에 도시된 바와 같이 직사각형 형태로 표준화된 터널 단면에 대해 y'' -방향이 터널 축과 평행한 국지좌표계를 설정하여 터널 좌벽, 천장 및 우벽을 대수학적으로 표현할 수 있다. 굴착면 좌측 하단지점에 좌표계

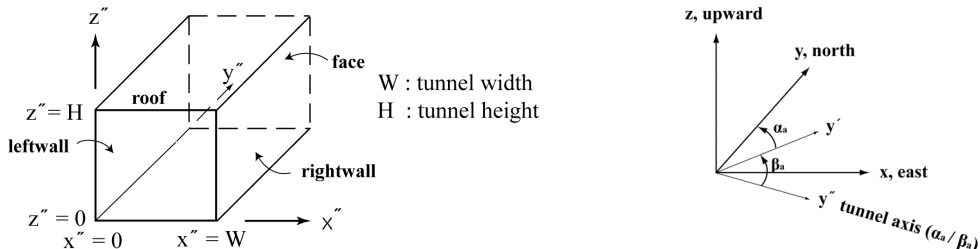


Fig. 2. Local coordinates set according to the tunnel axis and transformation to the global coordinates system

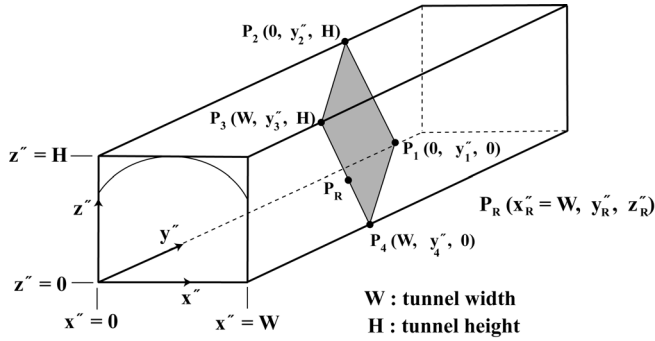


Fig. 3. Trace of joint plane intersected by excavation surface

원점을 위치시키면 터널 높이 = H, 너비 = W 인 경우 좌편은 $x'' = 0$, 천장은 $z'' = H$, 우편은 $x'' = W$ 인 국지좌표가 설정된다.

터널 축과 평행한 y'' -방향은 축선의 방향성 성분인 선주향(α_a)/선경사(β_a)를 사용하여 전체좌표에서의 방향으로 설정되며, 개착면 입의 위치에서 설정된 국지좌표계 좌표(x'', y'', z'')는 Fig. 2에 도시된 터널 축 방향성에 의거한 단계별 좌표축 회전에 의거하여 전체좌표계 좌표(x, y, z)로 변환된다. 일반적으로 굴착 공동의 바닥면을 수평상태로 가정한 경우에는 Euler angle $\gamma = 0$ 이며(Arfken, 1970 참조), 터널 축 선경사(β_a) 및 선주향(α_a)에 의거한 2단계 좌표축 회전을 통하여 전체 좌표계에서의 절리 위치가 산정된다. 일차적으로 Fig. 2에 도시된 x'' -축을 중심으로 β_a 만큼 y'' - 및 z'' -축을 시계 반대방향으로 회전시켜 ($x', y' z'$) 좌표를 산정한다.

$$\begin{Bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta_a) & \sin(\beta_a) \\ 0 & -\sin(\beta_a) & \cos(\beta_a) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{Bmatrix} = [B] \begin{Bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{Bmatrix} \quad (4)$$

x' -, y' -, z' -축 좌표가 결정된 상태에서 이차적으로 z' -축을 중심으로 x' - 및 y' -축을 α_a 만큼 시계 반대방향으로 회전시켜 전체 좌표계에서의 위치좌표 (x, y, z)를 산정한다.

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_a) & \sin(\alpha_a) & 0 \\ -\sin(\alpha_a) & \cos(\alpha_a) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{Bmatrix} = [A] \begin{Bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{Bmatrix} \\ = [A] [B] \begin{Bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{Bmatrix} \quad (5)$$

이상에서 기술된 바와 같이 국지좌표계에서 설정된 지하공동 굴착면에서의 위치좌표는 식 (5)를 사용하여 전체좌표계의 위치좌표로 변환될 수 있으며, 이와 같은 기법을 활용하여 절리면과 굴착면의 교차지점 및 터널 내부에서의 블록 위치와 거동양상을 대수학적으로 판별한다.

터널굴착에 대한 블록해석을 수행하기 위하여 일차적으로 개착면에 표출된 개별 절리들의 평면식이 설정된다. 트레이스 궤적을 활용한 절리의 방향성 및 위치 산정은 다음과 같은 기법을 사용하여 수행된다. 좌편 최하부 지점 $P_1(0, y_1'', 0)$, 천장 좌측 지점 $P_2(0, y_2'', H)$, 천장 우측지점 $P_3(W, y_3'', H)$ 및 우벽 최하부 지점 $P_4(W, y_4'', 0)$ 중 3개 지점에서의 절리 트레이스 좌표를 측정한다. 이 경우 각 지점의 x'' 및 z'' 좌표는 벽면 및 천장에서의 값들이 설정되어 있어서 해당 지점까지의 굴진심도를 확인하여 y'' 좌표를 도출한다(Fig. 3 참조). 3개 지점에서의 국지좌표계 좌표는 식 (5)를 사용하여 전체좌표계에서의 위치좌표로 변환되며, 이에 의거하여 절리면의 방향성 계수 a_j, b_j, c_j 및 위치 계수 d_j 를 산정하여 평면 방정식이 구성된다. 개착면에 절리 평면이 노출되어 방향성 측정이 용이할 경우에는 국지좌표계에서 방향성이 측정된 위치 좌표를 산정한다. 국지좌표계에서 측정한 위치좌표는 좌표계 변환기법을 활용하여 전체좌표계에서의 위치좌표로 변환된다. 절리 방향성 자료를 활용하여 방향성 상수 a_j, b_j, c_j 가 산정되며, 전체좌표계에서의 위치 좌표를 이용하여 위치 상수 d_j 가 산정된다.

절리면이 터널 굴착면과 교차되어 형성되는 절리 트레이스 궤적은 국지좌표계에서 개별 절리들의 평면식 (식 (6))과 좌우 벽면 및 천장면의 평면식을 사용하여 효율적으로 산출된다.

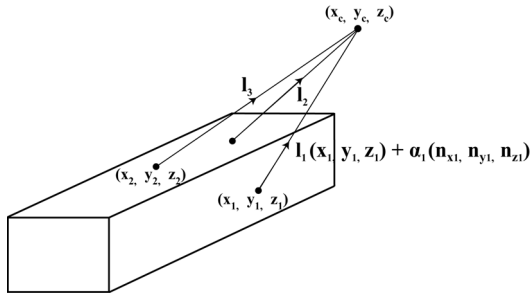


Fig. 4. Daylighting points of cross lines of three mutually intersected joint planes

$$a'x' + b'y' + c'z' = d' \tag{6}$$

여기서 a' , b' , c' 는 국지좌표계에서의 방향성 계수이고, 식 (5)의 좌표계 변환텐서를 사용하여 변환된다. d' 은 국지좌표계에서의 위치 계수이다. 국지좌표계에서의 개착면의 평면식은 다음과 같이 설정된다. 터널 좌측벽면(좌벽)은 $x' = 0$, 우측벽면(우벽)은 $x' = W$, 천장면은 $z' = H$, 막장면은 $y' = L$. 국지좌표계에서의 절리 평면식과 막장면의 평면식을 활용하여 개별 절리면이 막장면에서 형성하는 트레이스 직선식은 식 3.13과 같이 기술된다.

$$a'x' + c'z' = d' - b'L \tag{7}$$

무한 절리면이 막장면 경계에서 교차되는 지점은 다음 4가지 경우 중에서 경계조건을 만족시키는 2가지 경우이다.

제 1 경우 - 좌벽경계 $x'=0$ 에서의 z' (= $(d'-b'L)/c'$) : $0 \leq z' \leq H$

제 2 경우 - 우벽경계 $x'=W$ 에서의 z' (= $(d'-b'L-a'W)/c'$) : $0 \leq z' \leq H$

제 3 경우 - 굴착바닥 $z'=0$ 에서의 x' (= $(d'-b'L)/a'$) : $0 < x' < W$

제 4 경우 - 굴착천장 $z'=H$ 에서의 x' (= $(d'-b'L-c'H)/a'$) : $0 < x' < W$

막장 경계에 대한 교차점 $P_{F1}(x_1', y'=L, z_1)$ 및 $P_{F2}(x_2', y'=L, z_2)$ 가 결정되면 연속성을 고려한 실제 트레이스 양단 좌표를 산정하여 막장 트레이스 DB를 구축한다. 이와 유사한 방법을 사용하여 좌벽, 우벽 및 천장에서의 트레이스 분포 DB를 구축하고, 터널 좌벽, 우벽, 천장 및 막장면에 분포된 절리 트레이스의 교차에 의거하여 사면체 블록의 형성 가능성을 다음과 같이 판별한다. 일차적으로 4개 개착면에서 2개 절리 트레이스의 교차

성을 확인하고, 교차되는 지점의 좌표와 교선의 방향성 벡터를 산정한다. 둘째 단계에서 특정 절리면에서 2개의 절리 교선이 형성된 경우, 즉 3개 절리면이 상호 교차되는 경우를 판별하고 공통된 교차지점 좌표를 산정한다. 3개 절리교선의 공통적인 교차점(x_c', y_c', z_c')이 터널굴착 압반의 내부에 위치하면 사면체 블록이 형성된 경우이며, 3개 교선의 시점(x_1', y_1', z_1'), (x_2', y_2', z_2') 및 (x_3', y_3', z_3')을 연결하여 사면체 블록의 기하학적 속성인 블록의 형성 위치와 규모 등을 파악한다.

터널 굴착과정에서 사면체 블록은 좌벽, 천장, 우벽 및 막장면에서 연계되어 형성되며, 블록 위치는 개착면 상에 표출되는 3개 꼭짓점의 국지좌표계 값을 이용하여 판별된다. Fig. 4에 도시된 개착면 상의 3개 꼭짓점의 국지좌표 (x_i', y_i', z_i')을 이용하여 좌벽, 천장, 우벽 및 막장면에 표출된 상태를 판별한다. $x_i' = 0$ 인 경우에는 좌벽에 표출되고, $x_i' = W$ 인 경우에는 우벽에 표출된 상태이다. $z_i' = H$ 인 경우에는 천장에 표출되고, $y_i' = L$ 인 경우에는 막장에 표출된 상태이다. 사면체 블록은 단일 면, 2개 면, 3개 면에 걸쳐서 형성될 수 있다. 좌벽, 우벽, 또는 막장 단일 면 내에서 형성된 블록은 압반 내부에서 형성된 꼭짓점의 위치와 개착면에 표출된 꼭짓점과의 상대적인 위치에 따라 잠재적 미끄러짐 양상이 판별된다. 천장에 형성된 블록은 블록 꼭짓점이 기준면 상의 기저 3각형 내부에 위치하면 자유붕락, 외부에 위치하면 미끄러짐 거동이 발생된다. 인접한 2개 개착면에 걸쳐서 형성된 사면체 블록과 3개 개착면에 연계되어 형성된 사면체 블록은 미끄러짐 거동이 발생된다.

사면체 블록의 거동 양상이 판별되면 천장면에서의 자유낙하 붕락의 경우를 제외한 미끄러짐 블록에 대하여 자중에 의거한 역학적 안정성 분석을 수행한다. 터널 개착 과정에서 좌벽, 우벽, 천장 또는 막장 단일 자유면에서 블록이 형성된 경우에는 사면체를 형성하는 4개 꼭짓점 좌표를 이용하여 사면체 블록의 부피와 미끄러짐 면의 면적을 산정한다. 천장 단일면에서 미끄러짐이 발생하는 블록의 경우를 Fig. 5에 도시하였다. 사면체 블록의 부피는 꼭짓점의 국지좌표를 이용하여 다음과 같이 산정한다. 먼저 사면체 기저면을 형성하는 3개 꼭짓점 P_1 , P_2 및 P_3 의 (x', y') 좌표에 의거하여 기저 삼각형의 면적을 계산한다. 사면체 블록의 높이는 정점 A의 z' 좌표에서 터널 높이 H를 감산하여 설정된다. 사면체 블록의 부피를 산정하는 식 (8)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{사면체 부피}(V) &= \Delta P_1 P_2 P_3 \text{ 면적} \\ &\times \text{블록높이}(z_A' - H) \times \frac{1}{3} \end{aligned} \tag{8}$$

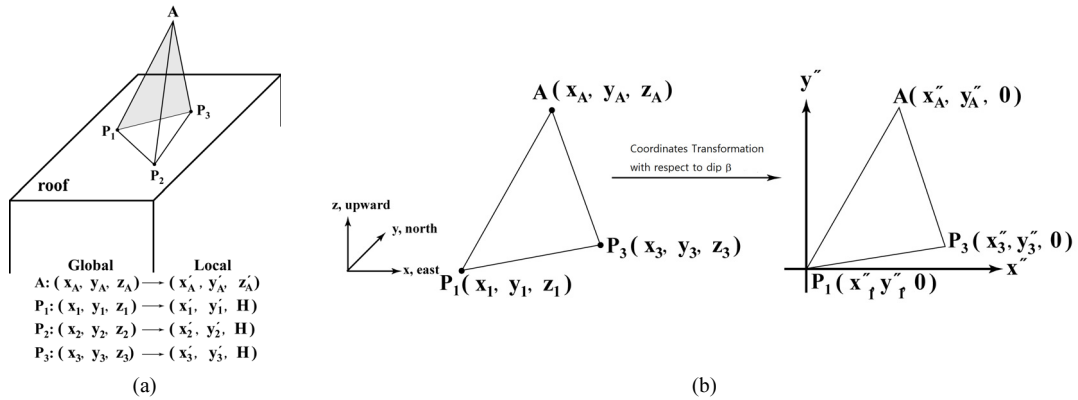


Fig. 5. Tetrahedral block formed on the roof (a) block formation, (b) sliding face

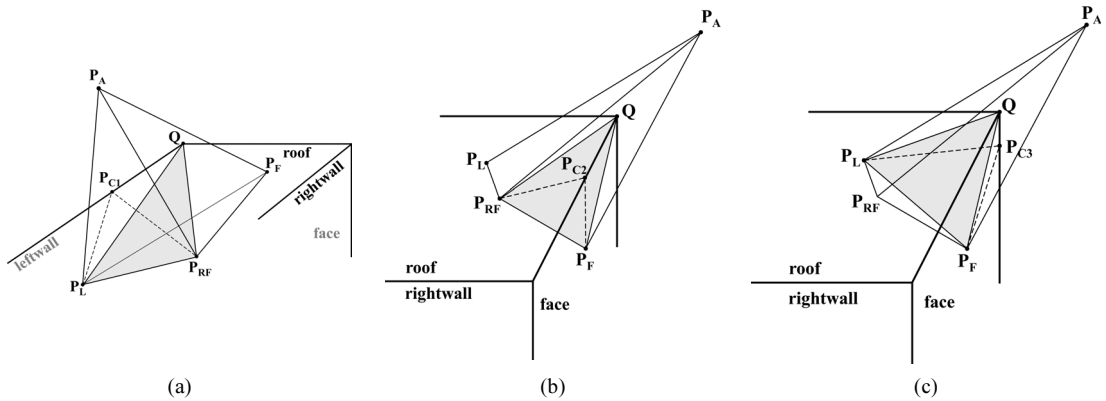


Fig. 6. Sliding faces of block formed across the three excavation surfaces (a) leftwall - roof, (b) roof - face, (c) face - leftwall

미끄러짐 면의 면적을 산정하기 위하여 해당 절리면의 경사(β)에 의거한 새로운 국지좌표계를 설정하고, 좌표계 변환을 수행하여 새로운 국지좌표를 산정한다. 이 경우 3개 꼭짓점의 z'' 좌표는 0으로 설정되며, Fig. 5(b)에 도시된 바와 같이 미끄러짐 면의 3개 꼭짓점의 (x'', y'') 좌표만을 사용하여 미끄러짐 면적이 산정된다.

사면체 블록이 2개 자유면에 교차되어 형성된 경우에는 터널 모서리와의 교차지점 좌표를 활용하여 블록 부피 및 미끄러짐 면적이 산정된다. 사면체 블록이 3개 자유면에 연계되어 형성된 양상을 Fig. 6에 도시하였다. 3개 자유면에서 단일 사면체 블록이 형성되기 위해서는 좌벽-천장-막장 또는 우벽-천장-막장에 기저 삼각형의 꼭짓점이 위치하여야 하며, 막장 좌 상부지점(Fig. 6의 Q 지점) 또는 우 상부 지점이 사면체 블록 내부에 위치하게 된다. 결과적으로 블록 규모는 기저 삼각형 $P_L P_{RF} P_F$ -점점 P_A 에 의해 정의된 영역에서 터널 굴착으로 제거된

영역을 차감하여 산정된다. 사면체 $P_L P_{RF} P_F - P_A$ 부피는 위에서 설명한 좌표계 변환 알고리즘을 활용하여 계산된다. 부피 보정을 위하여 우선적으로 사면체 $P_L P_{RF} P_F - Q$ 부피를 산정한다. 이때 Fig. 6(a)에 도시된 영역을 살펴 보면 좌벽을 기준으로 사면체 $Q P_L P_{RF} - P_{C1}$ 이 차지하는 영역도 보정되어야 한다. 또한 막장에 기준할 경우에는 (Fig. 6(b)) $Q P_{RF} P_F - P_{C2}$ 영역, 천장을 기준으로(Fig. 6(c)) $Q P_L P_F - P_{C3}$ 영역이 추가로 보정되어 최종 블록 부피가 산출된다. 미끄러짐 면적은 블록면을 형성하는 3개 꼭짓점 좌표와 블록면과 교차되는 터널 모서리 지점의 좌표를 이용하여 산정된다. Fig. 6(a) 경우에 $\Delta P_A P_L P_{RF} - \Delta P_{C1} P_L P_{RF}$ 영역이 미끄러짐 면적이며, 상기한 좌표계 변환 알고리즘을 이용하여 용이하게 산정된다. 천장-막장에서 미끄러짐 거동이 발생하는 Fig. 6(b) 경우에는 $\Delta P_A P_{RF} P_F - \Delta P_{C2} P_{RF} P_F$, 막장-좌벽면에서 미끄러짐 거동이 발생하는 Fig. 6(c) 경우에는 $\Delta P_A P_L P_F - \Delta P_{C3} P_L P_F$

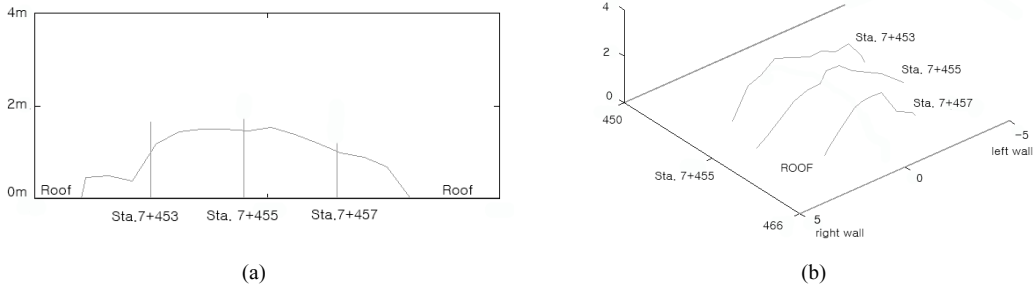


Fig. 7. Profiles of collapsed block (a) longitudinal section, (b) transverse section

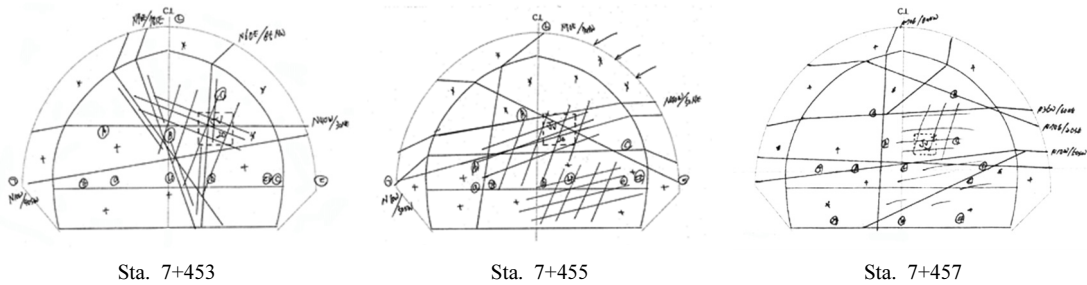


Fig. 8. Joint mappings on the excavation faces

영역이 미끄러짐 면적이다.

블록부피와 미끄러짐 면적이 산정되면 블록을 형성하는 암석의 단위하중을 고려하여 블록 하중을 결정하고 미끄러짐 면의 전단강도 파라미터인 점착력(c_j)과 마찰각(ϕ_j)을 이용하여 운동학적 안정성을 산정한다. 2개 블록면에서의 미끄러짐 거동은 썩기파괴 양상과 유사하여 블록하중을 블록면의 교선방향 및 2개 블록면의 법선방향으로 분해하여 안전도를 분석한다.

4. 굴착현장의 블록 붕락 해석

터널 굴착과정에서 붕락된 암반블록의 형성 위치, 형상 및 거동 양상을 3차원 블록모델을 활용하여 해석하였다. 터널 굴착 현장에는 엽리가 발달된 반상 편마암이 분포하며, 50° 이상의 고경사 엽리가 다수 발달되어 있다. 암반붕락이 발생된 구간은 터널 시점부 기준 Sta. 7+451 ~ 7+458 구간이다. 블록의 규모는 면적 = 39 m², 체적 = 42 m³, 중량 = 113.4 ton으로, 대규모 붕락이 발생되었다. 굴착현장에서의 조사 결과에 의거하면 붕락된 블록은 공동 천장부에 국한되어 형성되어 있다. 천장면에서 측정된 붕락형상에 의거하여 굴착진행 방향으로의 블록 종단면도와 3개 굴착지점에서의 횡단면도

를 재구성하여 Fig. 7에 도시하였다. 굴진 축과 평행한 방향으로의 종단면도 상에는 블록 형상은 비정형화되어 있지만 Sta. 7+453 지점까지 급경사의 블록면이 형성되었으며, 이후에 굴진 진행방향으로 점진적인 블록 형성 심도가 감소된다. Fig. 7에 도시된 3개 위치에서의 횡단면도를 고찰하면 막장면에서 가장 멀리 위치한 Sta. 7+453 지점에는 상당한 규모의 블록단면이 나타나며, 3각형 형태의 단면 규모가 Sta. 7+455 지점까지 유지되다가, 막장면에 인접된 Sta. 7+457 지점에서는 약 50% 정도로 감소된 블록 단면을 나타낸다.

블록 붕락구간인 터널 시점부 기준 Sta. 7+453, 7+455 및 7+457 지점에서 수행된 막장면 조사결과(Fig. 8)를 활용하여 절리면의 방향성과 상대적인 위치를 추정하였다. 3개 막장면에서 관찰된 절리들은 관측지점별로 약간 변화된 분포양상을 나타내지만, 공통적으로 영속성이 높을 것으로 사료되는 고경사 및 저경사 절리들이 천장 및 좌우벽면에 서로 교차되어 발달되어 있다. 한편, 영속성이 낮을 것으로 판단되는 절리들은 막장면 내에 국한되어 관측되었다. 전체적으로 불연속면 조사가 굴착지역에 한정되어서 방향성이 측정된 불연속면의 개체수가 매우 제한되어 있다. 결과적으로 절리군 형성에 대한 분석은 수행되지 못 하였으며, 3개 막장면에서 영

속성이 높고 출현빈도가 상대적으로 높은 절리들의 방향성을 종합적으로 고찰하여 다음과 같이 4개의 대표적인 절리 방향성을 도출하였다: $J_1 = N70E/70SE(160/70)$, $J_2 = N40W/50NE(050/50)$, $J_3 = N10W/50SW(260/50)$, $J_4 = N70E/80NW(340/80)$.

4개 대표적 절리 방향성을 기반으로 천장면에 형성되는 사면체 블록의 형성에 대한 해석을 수행하였다. 막장면에서는 현장 암반에 발달된 절리면들이 제한적으로 표출되며, 현장에서 측정된 절리 위치에 의거하여서는 봉락된 사면체 블록을 재현시킬 수 없기 때문에 동일한 방향성을 갖는 절리들이 터널 굴착 내부에서도 발달할 수 있다고 가정하고 다음과 같이 사면체 블록의 형성 가능성을 고찰하였다. Fig. 7에 도시된 봉락양상을 고찰할 때 사면체 블록은 Sta. 7+451 지점에서 고경사를 나타내며, 터널 굴진방향을 고려하면 대표절리 J_3 방향성과 부합된다. 현장 봉락양상을 고려하여 일차적으로 Fig. 8의 Sta. 7+453 막장면에서 관찰된 J_3 절리의 위치를 천장면의 정점으로 수직 이동시켜 사면체 블록의 한 면을 형성하였다. 이차적으로 ($J_1 - J_2$), ($J_2 - J_4$) 및 ($J_4 - J_1$) 조합의 절리면 교선의 방향성을 산정한 결과 ($J_1 - J_2$) 교선의 방향성이 블록 형성에 기여하는 것으로 판단되었으며, 교선이 J_3 면에 관통하는 지점을 산정하여 3개 절리면의 공동지점, 즉 원형 절리들의 원점으로 설정하였다. 한편, 블록발생 확률을 산정하기 위하여는 3개 대표적인 방향성을 갖는 절리들의 semi-trace length가 다수 측정되어 연속성에 대한 통계적인 확률분포함수가 도출되어야 하지만 현장 절리조사 자료 수효가 극히 한정되어있어서 확률분포함수를 도출하지 못 하였으며, 대안적으로 절리 반경을 임의로 변화시켜 터널 천장에 표출되는 절리 트레이스를 도출하고, 블록 형성 가능성을 Fig. 3에 도시된 방법론을 활용하여 대수학적으로 분석하였다. 3개 절리방향군의 조합에 대한 블록 형성을 분석한 결과 절리 반경 15m 이상인 J_1 , J_2 , J_3 조합에 의해 Fig. 9에 도시된 바와 같이 실제 블록형성에 가장 부합되는 해석 결과가 도출되었다.

수치해석적으로 도출된 블록 형상에 근거하여 다음과 같이 봉락 발생의 미케니즘을 고찰하였다. 절리 조합(J_1 , J_2 , J_3)의 상호 교차에 의해 블록 형성의 근원적 요소인 사면체 정점의 꼭짓점이 굴착 이전에 형성되었으며, 굴착 진행에 따라 잠재적인 사면체 블록의 기저면이 공동 천장에 표출되었다. 사면체 꼭짓점을 천장면에 투영하면 삼각형의 기저면 안에 위치하여 블록의 파괴양상은 자유낙하 봉락으로 분석되지만, Fig. 8에 도시된 바와 같이 블록의 기저면이 천장면에 완전히 표출되기 이전에 봉락하였다. 사면체 블록의 입체적 형상을 고려할

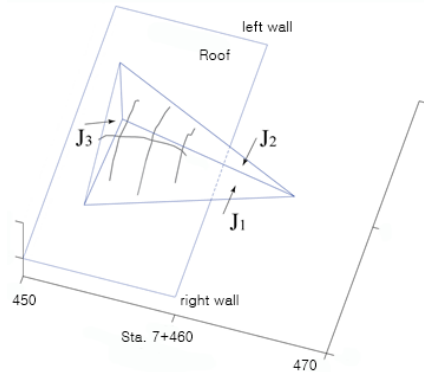


Fig. 9. Configuration of collapsed block on the tunnel roof

때 막장면과 거의 평행한 주향을 갖는 약 50° 경사의 절리면에 의해 최대 블록 두께를 갖는 블록 시점부가 형성되었으며, 굴착이 진행됨에 따라 굴진방향과 유사한 주향을 갖는 2개의 절리면의 교선이 완만한 경사를 나타내어 꼬리 형태의 블록이 형성되었다. 추가적인 굴착에 의해 더욱 가늘어진 블록 꼬리 부분이 노출되었으며, 미 굴착 영역에 의한 압고 효과가 감소되었다. 결과적으로 암반 자체의 저항력은 저하되고 블록 시점부에 편중된 하중에 의한 봉락 모멘트는 증가되어 블록의 꼬리 끝단이 천장면에 완전히 표출되기 이전에 봉락이 발생된 것으로 판단된다.

5. 결론

지하공동 굴착과정에서 형성되는 사면체 블록의 공간적 특성 및 봉락 가능성을 절리 연속성을 고려하여 분석하는 수치해석모델을 개발하고, 블록 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다. 블록 봉락이 발생된 굴착현장에서 조사된 절리 자료를 활용하여 실제 봉락된 위치에서의 암반 블록의 형상을 수치해석적으로 재구성하고 봉락 원인을 규명할 수 있었다. 굴착 현장에서 관찰된 절리들은 개체 수는 낮아도 연속성이 매우 커서 잠재적인 사면체 블록을 형성할 확률이 매우 높아 터널 안정성에 큰 영향을 끼치는 것으로 사료되었다. 일반적으로 터널 굴착이 진행됨에 따라 막장면 인근의 개착부에서 블록이 형성되어 보강작업 이전에 봉락이 발생되지만, 잠재적 사면체 블록의 형태가 굴착 방향으로 가늘어지는 경우에는 블록 형상에 따른 과도한 하중 편중에 의해 블록의 기저면이 완전하게 표출되기 이전에 봉락될 가능성이 높은 것으로 판단되었다.

사 사

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2015년)에 의하여 연구되었음.

References

1. Arfken G. 1970. Mathematical methods for physicists. 2nd ed. New York. Academic Press.
2. Baecher G. B. 1980. Progressively censored sampling of rock joint traces. J. of Mathematical Geology, Vol. 12, No. 1, pp. 33-40.
3. Baecher G.B., Lanney N.A. and Einstein H.H. 1977. Statistical description of rock properties and sampling. Proc. 18th US Symposium. Rock Mech. 5C1-1 - 5C1-8.
4. Barton N., Bandis S.C. and Bakhtar K. 1985. Strength, deformation and conductivity of rock joints. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 22. No. 3, pp. 121-140.
5. Brady B.H.G. and Brown E.T. 2004. Rock Mechanics for Underground Mining. Kluwer Academic Publishers.
6. Chern J.C. and Wang M.T. 1993. Computing 3-D key blocks delimited by joint traces on tunnel surfaces. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 30. No. 7. pp. 1599-1604.
7. Cho T.F., Lee S.B. and Won K.S. 2012. Three-dimensional deterministic block analysis model for information-oriented excavation design. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 55. pp. 63-70.
8. Einstein H. H., Veneziano D., Baecher G. B. and O'Reilly K. J. 1983. The effect of discontinuity persistence on rock slope stability. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 20, No. 5, pp. 227-236.
9. Goodman R.E. and Shi G. 1985. Block Theory and its application to rock engineering, Prentice-Hall, London
10. Lajtai E.Z. 1969. Shear strength of weakness planes in rock. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 6, pp. 499-515.
11. Menendez-Diaz A., Gonzalez-Palacio C., Alvarez-Vigil A.E., Gonzalez-Nicieza C. and Ramirez-Oyanguren P. 2009. Analysis of tetrahedral and pentahedral key blocks in underground excavations. Comput Geotech. Vol. 36. pp. 1009-1023.
12. Pollard D. and Aydin A. 1988. Progress in understanding jointing over the past century. Geological Society of America Bulletin. Vol. 100. pp. 1181-1204.
13. Priest S.D. 1980. The use of inclined hemisphere projection methods for the determination of kinematic feasibility, slide direction and volume of rock blocks. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 17, pp. 1-23.
14. 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.
15. Song J.J., Lee C.I. and Masahiro S. 2001. Stability analysis of rock blocks around a tunnel using a statistical joint modeling technique. Tunneling and Underground Space Technology. Vol. 16. pp. 341-351.
16. Villaescusa E. and Brown E. 1992. Maximum likelihood estimation of joint size from trace length measurements. Rock Mechanics and Rock Engineering. Vol. 25. pp. 67-87.
17. Warburton P. M. 1980. Stereological interpretation of joint trace data: influence of joint shape and implication for geological surveys. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 17, pp. 306-316.
18. Yoon K.S., Cho T.F., You B.O. and Won K.S. 2003. A new approach for borehole joint investigation - Development of Discontinuity Orientation Measurement drilling system. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. (Technology roadmap for rock mechanics, South Africa.). pp. 1355-1358.

조 태 진



1980년 서울대학교 자연과학대학 해양학과 이학사
1986년 University of Wisconsin-Madison 공학석사
1988년 University of Wisconsin-Madison 공학박사

Tel: 051-629-6557

E-mail: chotc@pknu.ac.kr

현재 부경대학교 에너지자원공학과 교수