

초청강연

# 개별요소법에 의한 터널의 안정성 해석에 있어 설계정수의 결정

김치환

우석대학교 토목공학과 조교수

## 1. 서론

불연속면이 발달한 암반 내에서 터널을 굴착하는 경우 불연속면을 고려한 터널의 역학적 안정성을 검토하는 것이 중요하다. 불연속 암반 내에 터널을 굴착하게 되면 대부분의 거동은 불연속면에서 발생하게 된다. 이는 암반 블록보다 암반 내 불연속면의 강성이 현저하게 작기 때문이다. 불연속면을 고려한 터널의 안정성 해석은 암반을 연속체로 가정할 때 필요한 입력변수 외에 여러 종류의 입력변수가 추가로 필요하다. 먼저 터널이 굴착될 암반 내에 분포한 불연속면의 연결구조를 모사할 수 있도록 정량적 조사가 필요하다. 입력한 불연속면의 네트워크가 터널을 굴착할 암반의 절리 패턴과 다를 경우 굴착에 따라 발생하는 터널의 거동이 비합리적일 수 있기 때문이다. 또 불연속면의 역학적 특성을 파악하여야 한다.

절리, 층리, 열극과 같은 불연속면의 분포 특성을 결정하기 위해서는 통계적 접근법을 이용해야 한다(Kulatilake 등, 1993). 절리의 분포 특성 중 중요한 요소인 절리의 방향, 크기, 간격의 조사 방법은 여러 연구자들에 의해 소개되었다(Priest, 1993). Priest(1993), Kulatilake 등(1993)은 조사한 절리 특성 자료를 통계 처리하는 방법 및 그 결과를 바탕으로 절리망을 구성하는 방법을 연구하였다. 특히 Kulatilake 등(1993)은 통계분석 결과로 추정된 절리망을 실제 현지 암반의 절리특성과 비교하여 적용한 방법의 유효성을 검증하기도 하였다. 또한 Dershowitz 등(1998)은 시추공에서 관찰한 절리 자료를 이용하여 3차원 절리 분포 특성을 분석하였고, 이 결과를 기초로 통계적으로 균질한 특성을 보이는 절리영역을 구분하기도 하였다.

개별요소 해석에서 절리의 역학적 거동은 절리모델을 통하여 표현된다. 현재까지 발표된 절리모델 중 Barton-Bandis 절리모델이 일반적으로 가장 많이 사용되고 있다. Barton-Bandis 절리모델은 수직응력의 크기에 따라 절리의 수직강성과 전단강성이 비선형으로 변하고 절리의

전단변위 특성뿐만 아니라 전단변위 발생 시 절리 틈의 확장까지 계산할 수 있는 특징이 있다.

본 연구에서는 경춘선 복선 철도가 통과할 예정지인 경기도 가평군 상천리에서 강원도 춘천시 남산면 백양리에 이르는 지역 일대에서 절리 분포 특성 및 역학적 특성을 조사·분석하였다. 이들 분석 결과를 활용하여 UDEC-BB해석을 수행하였다. Fig. 1은 연구 대상지역의 조사 위치도이다.

## 2. 지질 개요

본 조사 연구지역의 지질은 선캠브리아기의 변성암류인 경기편마암복합체와 이를 관입한 화성암류로 대별할 수 있으며 이들을 부정합으로 덮고 있는 제4기의 충적층이 발달, 분포하고 있다.

변성암류는 구성광물, 조직(texture) 및 암상에 따라 편마암, 편암 및 규암으로 구분되며, 편마암 내에는 각섬암이나 대리암이 소규모로 협재한다. 편마암류는 구성광물과 조직 등에 따라 호상 편마암, 화강 편마암, 우백질 편마암 등으로 구분할 수·엽리구조가 뚜렷하고 엽리의 주향은 북동방향이 우세하다. 주로 흑운모로 이루어진 암색대(melasome)와 석영, 장석으로 이루어진 명색대(leucosome)가 호상구조를 나타내는 것이 특징이다. 주 구성광물은 석영, 사장석, 흑운모이며 부정분광물로는 카리장석, 백운모, 녹니석, 견운모 등이 관찰되었다. 편암과 규암은 서로 교호하고 있다. 편암은 주로 석영 및 운모로 구성되어 있다. 규암은 우백색을 띠며 구성광물은 조립질 혹은 등립질의 석영성분이 대부분을 차지하며 그 외 운모 등으로 구성되어 있으며, 좁은 영역에 분포한다.

## 3. 개별요소법과 불연속면의 분포특성

### 3.1 개별요소법 이론

개별요소법은 Cundall이 처음 제안한 방법으로 암반

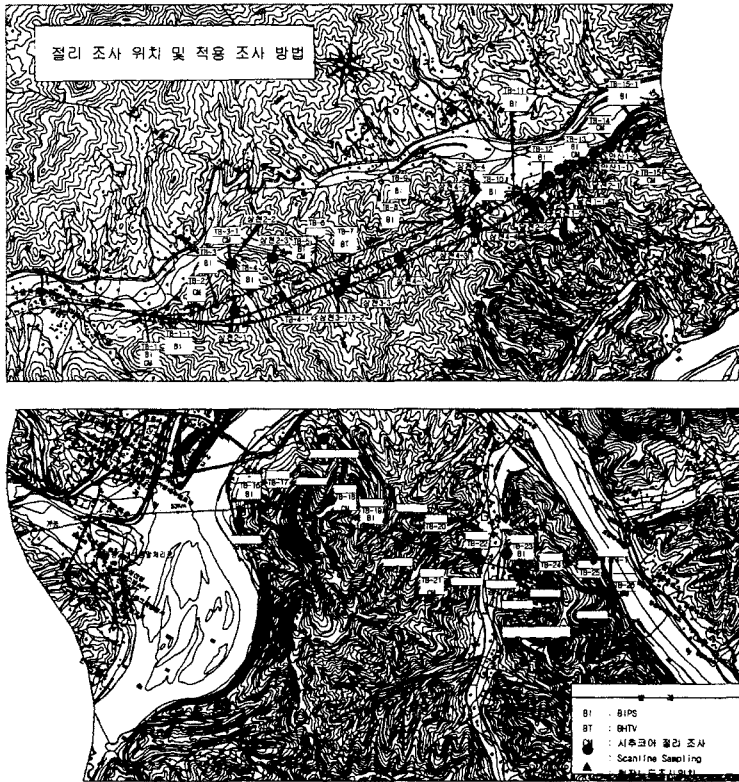


Fig. 1. Survey location.

공학 문제들을 풀 수 있는 효과적인 수치해석 기법으로 인식되고 있다. 불연속면 사이의 접촉면의 특성을 나타내기 위하여 절리의 강성을 고려하였고, 운동방정식을 수치적분하기 위하여 명시적 유한차분법(explicit finite difference method)을 사용하는 것이 그 특징이다. 암반은 절리망이 서로 연결되어 구성된 블록들의 집합체로 다루어지며, 개별 블록은 유한차분 요소망에 의해 분할된다. 본 해석에 사용한 UDEC은 Cundall 등이 개발한 개별요소법의 수치해석 기법을 사용한 프로그램이다.

### 3.1.1 Barton-Bandis 모델

Barton과 Bandis(1982)는 불연속면의 변형과 강도에 미치는 불연속면 거칠기의 영향을 일련의 경험적 관계식에 의하여 표현하였다. 이러한 관계식은 본 연구의 수치해석에 이용되는 Barton-Bandis 절리 모델(이하 BB모델)의 기초가 되며, 다음과 같은 특성을 가지고 있다.

#### 가. 절리의 수직거동

BB 모델의 수직응력-변위 경로를 지배하는 방정식은 다음과 같다.

$$\sigma_n = \frac{-u_{nc} \cdot K_{ni}}{1 - \frac{u_{nc}}{v_{mi}}} \quad (1)$$

여기서,  $u_{nc}$  = 현재의 수직변위(mm),  
 $K_{ni}$  = 초기 수직강성(MPa/mm),  
 $v_{mi}$  = 반복하중 중  $i$ 번째 하중에 대한 최대 허용 압착량(mm)

절리에 가해지는 수직응력이 1 KPa일 때 절리의 초기 접선 수직강성은 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$K_{n_i, \tan} = -7.15 + 1.75JRC_0 + 0.02 \left( \frac{JCS_0}{e_i} \right) \text{(MPa/mm)} \quad (2)$$

여기서  $e_i$ 는 수직응력이 0일 때 초기 절리 틈새의 평균(mm),  $JRC_0$ 는 절리거칠기계수,  $JCS_0$ 는 절리면의 단축 압축강도(MPa)이다. 이 때 초기 절리 틈새의 평균은 다음 식으로 계산한다.

$$e_i = JRC \left( \frac{0.04\sigma_c}{JCS_0} - 0.02 \right) \quad (\text{mm}) \quad (3)$$

여기서  $\sigma_c$ 는 암질의 단축압축강도(MPa)이다.

절리의 초기 접선 수직강성을 구하면 다음 식을 이용하여 맞물린 절리면(mated rough joint)에 대한 임의의 수직응력에서의 접선 수직강성을 구할 수 있다.

$$K_{n, \text{tan}, \text{mat}} = K_{n, \text{tan}} \left( 1 - \frac{(\sigma_n - \sigma_{ni})}{(\sigma_n - \sigma_{ni}) + K_{n, \text{tan}} \Delta v_{\max}} \right)^{-2} \quad (\text{MPa/mm}) \quad (4)$$

여기서  $\sigma_n$ 는 접선 수직강성을 구할 임의의 수직응력(MPa),  $\sigma_{ni}$ 는 초기 수직응력으로 초기 접선 수직강성을 구할 때 가한 수직응력으로 1 KPa으로 가정한다.  $\Delta v_{\max}$ 는 절리면의 최대 압착량으로 다음 식에 의해 구한다.

$$\Delta v_{\max} = R \left( \frac{JCS_0}{e_i} \right)^S \quad (\text{mm}) \quad (5)$$

또는

$$\Delta v_{\max} = A + B \times JRC_0 + C \left( \frac{JCS_0}{e_i} \right)^D \quad (\text{mm}) \quad (6)$$

여기서 R, S, A, B, C, D는 상수로 반복하중 재하 시험 회수에 따라 다른 값을 보이며 그 값은 Table 1과 같다. 첫 번째 재하시험에서는 시료 채취 과정에서 발생하는 교란의 영향이 나타나며, 재하시험이 반복됨에 따라

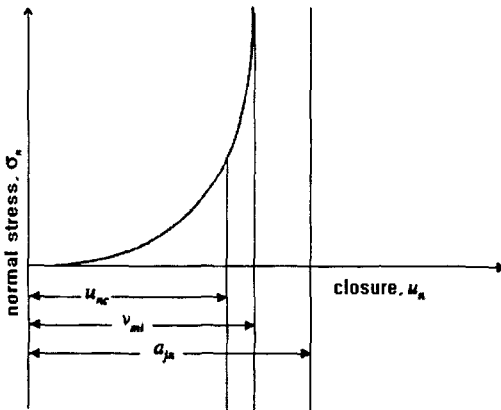


Fig. 2. Parameters used to calculate normal stress during loading cycle.

교란의 영향이 감소한다. 현장의 절리는 교란되지 않은 상태에 있기 때문에 교란의 영향이 거의 없는 세 번째 재하시험에서 절리면이 보이는 거동과 비슷한 경향을 보인다(Barton et al., 1986). 따라서 R, S, A, B, C, D는 세 번째 재하시험의 값을 사용해야 한다.

엇갈린 거친(unmated rough) 절리면에 대한 접선 수직강성은 맞물린 거친 절리면의 접선 수직강성과는 다르다. 이 때의 접선 수직강성은 다음 식으로 계산한다.

$$K_{n, \text{tan}, \text{unmated}} = \frac{K_{n, \text{tan}, \text{mat}}}{2.0 + 0.004 \times JRC_0 \times JCS_0 \times \sigma_n} \quad (\text{MPa/mm}) \quad (7)$$

절리의 접선 수직강성은 치수효과에 의한 영향을 받지 않는다. 단지 충전물의 정도, 맞물림 정도에 영향을 받는다.

나. 절리의 전단 변형

초기 접선 전단강성은 다음 식으로부터 구한다.

$$K_{s, \text{tan}} = K_j (\sigma_n)^{n_i} \quad (\text{MPa/mm}) \quad (8)$$

여기서  $n_i$ 는 0.615~1.118  $\text{MPa}^2/\text{mm}$ 이며 이 때 평균 값은 0.761이다.  $JRC > 4.5$ 일 경우  $K_j = -17.19 + 3.86JRC$  (MPa/mm)이다. 여기서 수직응력은 0.23~2.36 MPa범위이다.

임의의 전단응력에서 접선 전단강성은 다음 식을 이용하여 구한다.

$$K_{s, \text{tan}} = K_{s, \text{tan}} (1 - \tau R_f / \tau_f)^2 \quad (\text{MPa/mm}) \quad (9)$$

여기서  $\tau_f$ 는 Barton에 의한 전단강도(MPa),  $\tau$ 는 접선 전단강성을 구할 임의의 전단응력(MPa)이고,  $R_f$ 는 0.652~0.887 범위의 값으로 평균값은 0.783이다.

Barton에 의한 전단강도(Barton, 1976)는 절리면에 작용하는 수직응력에 따라 다른 식으로 표현된다.

$$\tau_f = \sigma_n \tan \left( JRC \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_r \right) \quad (10)$$

$$\tau_f = \sigma_n \tan \left( JRC \log_{10} \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_n} \right) + \phi_r \right) \quad (11)$$

여기서  $\sigma_n$ 는 불연속면에 가해진 수직응력(MPa), JCS는 불연속면의 단축압축강도(MPa),  $\phi_r$ 는 절리면의 잔류 마찰각,  $\sigma_1$ 는 최대 주응력(MPa),  $\sigma_3$ 는 최소 주응력(MPa)이다. 절리면에 작용하는 수직응력이 1 KPa에서 암질의 단축압축강도 사이의 값일 경우에 전단강도는 식

Table 1. Constants used for calculation of  $\Delta v_{max}$ .

Constant	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4
R	8.57	4.46	6.41	6.41
S	-0.68	-0.65	-0.65	-0.72
A <sub>i</sub>	-0.296	-0.1005	-0.1031	-0.1031
B <sub>i</sub>	-0.0056	-0.0073	-0.0074	-0.0074
C <sub>i</sub>	2.241	1.0082	1.135	1.135
D <sub>i</sub>	-0.245	-0.230	-0.251	-0.251

(9)와 같이 표현되고, 암질의 단축압축강도나 JCS와 비슷한 수직응력이 작용할 경우에는 식 (10)과 같이 표현된다. 또한 절리에 의한 영향을 해석하는 일반적인 경우에는 식 (9)를 사용하며 단층과 같은 대규모의 불연속면에 대해서는 식 (10)을 사용한다.

### 3.2 불연속면의 분포특성

노출된 암반에서 불연속면의 방향과 간격, 크기를 측정함으로써 비교적 광범위한 영역에서 암반 내 여러 불연속면의 지질학적 관계를 관찰할 수 있고 터널 등 암반 구조물의 설계나 굴착에 암반공학적 자료로 활용할 수 있다. 체계적인 방법의 하나로 통계이론에 따른 자료획득과 분석 이론을 적용하였다. 절리조사 방법 중 가장 빈번하게 활용하고 있는 것은 조사선법(scanline sampling method)과 조사창법(window sampling method)이 있다. 본 연구에서는 조사선법을 적용하여 불연속면의 방향, 불연속면의 간격 및 불연속면의 크기를 통계적으로 분석하고 이를 바탕으로 개별요소법의 절리망을 생성하도록 한다.

#### 3.2.1 불연속면의 방향

노두나 시추공에서 불연속면의 방향을 측정할 후 암반의 불연속면의 분포특성을 나타내는 통계모델을 활용하여 설계 지점에서의 불연속면 방향을 분석할 수 있다. 통계적 모델은 지질학적 과정에 따라 생성된 암반에는 서로 평행한 불연속면이 몇 개의 군(cluster)으로 형성된다는 사실에 근거를 두고 있다.

먼저 암반에서 불연속면의 방향을 측정할 때 발생하는 조사선 방향에 의한 통계적 편기(sampling bias)를 제거하도록 한다. 다음 우세한 방향의 불연속면을 군별로 구별하는 방법을 논한다. 이렇게 구한 불연속면의 군과 Fisher분포를 기초로 통계 분석한 불연속면의 방향을 상호 연관시키도록 한다.

##### 가. 불연속면 방향의 편기 보정

불연속면에 대한 법선과 조사선 사이의 각도에 따라 다음과 같이 보정이 필요하다. 교차각  $\delta$ 에 따라 다음과

같은 가중치로 보정하여야 한다.

$$W = \frac{1}{\cos \delta} \quad \delta < 90^\circ \quad (12)$$

W : 가중치

$\delta$  : 조사선과 불연속면의 법선이 이루는 예각

여기서는 허용최대 가중치는 10으로 한다. 이에 대응하는 교차각  $\delta$ 를 계산하면 84.3도가 되고 교차각이 이 값보다 클 경우에도 최대 보정값은 10이 되는 것이다.

##### 나. 불연속면 군의 식별과 영역 결정

육안에 의한 절리군의 식별은 개개인의 능력과 주관적인 판단에 따라 오차가 발생할 수 있다. 이러한 주관적인 식별의 한계를 극복하기 위해 일관되고 객관적인 분석방법으로 불연속면군의 방향을 결정하는 방법이 Shanley and Mahtab, Mahtab and Yegulalp에 의해 보고되어 있다. 무작위로 분포한 암반의 불연속면과 같이 무작위로 발생하는 사건을 확률로 표현하는데는 포아송 분포(Poisson process)가 있다. 포아송 분포에서 무작위의 불연속면이 관찰될 확률  $P(t, v)$ 는  $v$ 의 관찰영역에서  $t$ 개의 불연속면이 나타날 확률로 다음과 같이 주어진다.

$$P(t, v) = \frac{e^{-\lambda v} (\lambda v)^t}{t!} \quad (13)$$

여기서 영역  $v$ 는 불연속면의 법선방향의 범위로 생각할 수 있으며 이것은 특정 방향 축과 이루는 원추사잇각  $\psi$ 로 표현될 수 있다.  $t$ 는 정수로 원추 사잇각의 범위가  $v$ 일 때 관찰되는 불연속면의 개수이고  $\lambda$ 는 단위 영역에서 측정된 불연속면의 개수이다.

이 원추사잇각  $\psi$ 의 크기에 따라 반구원 상에서 등분포된 임의의 방향의 일부를 비례하여 표시하게 된다. 이 비례값을  $c$ 라 할 때 다음과 같다.

$$c = 1 - \cos \psi \quad (14)$$

만약 반구원상의 임의의 방향에서 조사 공간을 단위 크기로 고려한다면  $v = c$ 로 간주할 수 있다. 따라서 빈도  $\lambda$ 는 전체 샘플의 크기  $n$ 과 같다. 원추사잇각  $\psi$ 에  $t$ 개 이상의 불연속면이 포함될 확률은 다음과 같이 주어진다.

$$P(>t, c) = 1 - \sum_{j=0}^t \frac{e^{-nc} (nc)^j}{j!} \quad (15)$$

어느 불연속면의 법선이 원추사잇각  $\psi$  내부에 포함되면 원추각  $\psi$ 에서 밀집(dense)되었다고 하고 불연속면들

을 같은 군(cluster)에 속하는 것이다. 밀집된 법선 중 어느 하나와 원추사잇각  $\phi$ 보다 작은 각도를 이루는 불연속면의 법선이 있다면 이것도 같은 군의 불연속면에 편입된다.

다. 불연속면 군의 방향

각 절리군의 방향 범위는 투영된 불연속면 법선의 운곽선이나 시각적인 판단 혹은 밀집군 판별이론에 의해 정할 수 있다.

조사선의 방향에 따라 가중치  $w_i$ 으로 보정된 표본수의 합  $N_w$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$N_w = \sum_{i=1}^N w_i \tag{16}$$

일반적으로  $w_i \geq 1.0$ 이며 결과적으로  $N_w/N$ 는 약 1.5에서 5사이의 값을 갖는데 표본수가 실측 표본수보다 인위적으로 증가되어 통계분석에서 오차가 커지게 된다. 이 때문에 Priest는 다음과 같은 정규화 가중치  $w_{ni}$ 를 추천하였다.

$$W_{ni} = \frac{w_i N}{N_w} \tag{17}$$

$$\sum_{i=1}^N w_{ni} = N$$

M개의 방향값을 가진 절리군의 대표 혹은 평균방향값은 M개 법선벡터  $n_i$ 의 합  $r_n$ 이 되고 이의 직교좌표계의 각 성분으로 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} r_{xn} &= \sum_{i=1}^N n_{xi} \\ r_{yn} &= \sum_{i=1}^N n_{yi} \\ r_{zn} &= \sum_{i=1}^N n_{zi} \end{aligned} \tag{18}$$

라. 불연속면의 Fisher 분포

Fisher는 방향을 결정하는 중요한 기본원리로 표본값의 방향은 모집단의 참값 방향 주변에 분포한다고 가정하였다. 이 가정은 임의의 절리군 내에서는 불연속면의 법선들이 참값 주변에 분포되어있다는 것과 같은 것이다.

모집단에서 무작위로 선택한 표본의 방향이 참 방향으로부터  $\theta$ 와  $\theta + d\theta$  사이에 있을 확률을  $P(\theta)$ 로 가정하면

$$P(\theta) = \eta e^{K \cos \theta} d\theta \tag{19}$$

여기서 K는 분포 형태를 조절하는 Fisher상수,  $\eta$ 는 변수

모집단의 K는 선택한 M개 표본의 단위벡터로부터 추정할 수 있다. M이 큰 경우에는 본 연구에서 적용한 K의 추정치 k는 다음과 같다.

$$k = \frac{M-1}{M-|r_n|} \tag{20}$$

그러면 참값을 나타내는 방향으로부터  $\theta$ 이내에 무작위의 방향값이 존재할 확률은 다음과 같다.

$$P(<\theta) \approx 1 - e^{K(\cos\theta - 1)} \tag{21}$$

이를  $\cos\theta$ 에 대한 식으로 변환하면 다음과 같다.

$$\cos\theta \approx 1 + \frac{\ln(1 - P(<\theta))}{K} \tag{22}$$

3.2.2 불연속면의 간격 분포

가장 일반적인 의미에서 불연속면의 간격은 어느 불연속면에서 다른 불연속면까지의 거리를 뜻한다. 불연속면의 간격은 불연속면의 빈도의 역수이며 암반을 공학적으로 분류할때 암질의 표현하는 척도로 활용되고 있다.

불연속면과 조사선이 교차하는 현상을 1차원 포아송 분포(Poisson process)를 따른다고 할 수 있다. 빈도수를  $\lambda$ 라고 하면 임의의 조사선을 따라서 간격 x에서 k개의 사건이 일어날 확률  $P(k,x)$ 는 다음 식과 같다.

$$P(x,k) = \frac{e^{-\lambda x} (\lambda x)^k}{k!} \tag{23}$$

무작위의 불연속면 간격 Xt라 하면 확률  $P(Xt < x)$ , 즉 Xt가 x보다 작을 확률은 조사선 길이 x이내에서 조사선과 불연속면이 교차하는 확률과 같다.

$P(Xt \leq x)$ 는 누적확률분포 F(x)로 다음과 같다.

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x} \tag{24}$$

확률밀도분포 f(x)는 누적확률 F(x)를 x에 대해서 일차 미분한 것이므로

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} = \lambda e^{-\lambda x} \tag{25}$$

이것은 불연속면이 무작위로 분포하면 불연속면의 확률밀도분포는 평균간격은  $1/\lambda$  인 음지수 함수(negative exponential function)로 분포한다는 것이다.

**3.2.3 불연속면 크기**

불연속면의 간격이 무작위 상태로 음지수 분포함수로 나타나므로 불연속면의 길이도 음지수 분포로 나타난다는 가정은 합리적이다. 불연속면의 크기를 분석하는데 있어 불연속면의 형상을 원판으로 가정하는 것이 일반적이다.

가. 원판 형상의 불연속면

주어진 절리군의 불연속면을 지름  $s$  인 원형으로 가정하고 지름은 확률밀도분포  $c(s)$ 에 따라 분포된 것으로 가정한다. 그러면 원형 불연속면의 지름은 다음 식과 같은 누적확률분포  $C(s)$ 가 된다.

$$C(s) = \int_0^s c(t)dt \tag{26}$$

원형 불연속면의 평균지름을  $\mu_s$  라 한다.

$$\mu_s = \int_0^\infty sc(s)ds \tag{27}$$

전체 평면 상에서 불연속선의 길이  $f(l)$ 의 확률밀도 분포는 다음과 같다.

$$f(l) = \frac{l}{\mu_s} \int_l^\infty \frac{c(s)ds}{\sqrt{s^2-l^2}} \quad (l \leq s) \tag{28}$$

나. 불연속선의 반 추적길이

노두의 크기가 제한되어 있고 노두의 한쪽 모퉁이에서 조사선법을 이용하여 불연속면을 조사하게 되는 것이 일반적이다. 이에 따라 불연속선의 길이를 측정하는 것도 조사선을 중심으로 어느 한쪽 방향으로 가능하다. 조사선과 불연속선이 교차하는 점에서 불연속선의 한쪽 끝점까지의 길이를 불연속선의 반 추적 길이(semi trace length)라 한다.

불연속선의 반 추적 길이에 대한 분포  $h(l)$ 을 Priest and Hudson이 다음과 같이 보고하였다.

$$h(l) = \int_l^\infty \frac{f(m)dm}{\mu_l} \tag{29}$$

$m$  : 불연속선 전체 길이

$\mu_l$  : 불연속선 전체길이 분포  $f(m)$ 의 평균

다. 불연속선 반 추적 길이의 관찰한계 조사할 수 있는 최대 불연속선의 길이는 노두 경계로

제한 받아 노두 바깥까지 불연속선이 연장된 것인지 알 수 없다. 관찰 한계 길이를  $c$ 라 하면 이보다 긴 불연속선의 반 추적 길이의 확률밀도함수  $i(l)$ 은 다음과 같다.

$$i(l) = \frac{h(l)}{H(c)} \quad l \leq c \tag{30}$$

여기서

$$\int_0^c h(l)dl = H(c)$$

또  $i(l)$ 의 평균  $\mu_{iL}$ 은 다음과 같다.

$$\mu_{iL} = \int_0^c \frac{lh(l)dl}{H(c)} \tag{31}$$

**3.2.4 암반 내 불연속면 네트워크의 모델링**

현지 암반에서 무작위로 분포한 불연속면을 조사선법 등으로 조사한 결과로부터 불연속면의 네트워크를 모델링하여 개별요소 해석시 절리망 구성에 이용하였다.

불연속면의 네트워크를 모델링하기 위한 가정은 다음과 같다. 암반 내 불연속면 군을 구별할 수 있고 불연속면의 방향은 Fisher 상수로 방향 분포 특성을 표현할 수 있다. 불연속면은 무작위로 분포하고 조사선법 등으로 관찰 빈도를 알 수 있어야 한다. 불연속면은 원판 형상으로 가정하고 지름의 분포특성은 연속함수로 표현할 수 있다고 가정한다.

불연속면의 네트워크를 모델링하기 위한 입력자료는 불연속면의 군과 대표 방향 및 방향 분포특성, 불연속면의 관찰 빈도, 불연속면의 크기와 크기 변화 특성이다.

불연속면의 네트워크를 모델링하기 위해 모델링 영역  $xg1 < xg2, yg1 < yg2, zg1 < zg2$ 를 직교 좌표계에서 정한다. 다음에 불연속면을 각 군별로 생성하되 불연속면의 중심을 0과 1 사이의 무작위 변수로 부터 포아송 좌표  $xr, yr, zr$ 를 결정한다. 불연속면의 대표 방향으로 부터 벗어난 편차각  $\theta r$ 을 Fisher 분포에 따라 구한다. 일차원 각도  $\theta r$ 은 0에서  $2\pi$  범위의 균등분포에 따른 임의각도로 대표방향을 중심으로 한 3차원의 값으로 변환한다.

원판으로 가정한 불연속면의 지름도 조사한 모집단의 분포 특성을 고려하여 불연속면의 방향을 생성하는 순서와 같은 방법으로 결정한다. 불연속면의 생성은 암반의 단위부피당 혹은 단위 길이당 나타나는 빈도가 실제 관찰한 결과와 같을 때까지 반복 수행된다.

## 4. 절리 조사 및 시험

### 4.1. 조사 방법 및 조사 수량

절리 분포 특성 조사는 노두에서는 조사선법을 이용하여 절리의 방향 뿐만 아니라 간격, 연장성을 함께 조사하였다. 지하 절리 분포 조사 방법으로는 시추공 벽면의 조음과 특성이나 이미지 영상을 이용한 BHTV(Bore Hole Televiewer), BIPS(Borehole Image Processing System)를 함께 적용하였다. Table 2에 각 조사 방법의 특성을 정리하였다. 지하의 절리 분포 특성 조사를 위한 BHTV, BIPS 및 시추코어상의 절리 조사는 시추공 직경의 유한함으로 인하여 절리의 크기를 결정할 수 없다는 단점이 있다.

시추코어를 이용한 절리 조사는 시추코어에 존재하는 절리에 대한 조사로 개별요소 해석의 입력 물성으로 이용되는 절리 거칠기 계수(Joint Roughness Coefficient, 이하 JRC)와 절리면 압축강도인 JCS(Jointwall Compressive Strength, 이하 JCS)를 조사하기 위한 목적으로 수행하였다.

터널 총연장 8.6 km를 대상으로 28개소의 노두에서 조사선법으로 지표 절리 조사를 수행하였으며, 총 16개의 시추공에서 BHTV 및 BIPS를 실시하였고, 총 17공의 시추코어에 대하여 코어 절리 조사를 수행하여 총 6,847개의 절리에 대한 데이터를 획득하였다. 각 조사 방법을 통해 얻은 절리 데이터 수는 Table 3과 같다.

### 4.2. 절리 역학적 특성 조사 자료의 처리

시추코어 절리 매핑을 통하여 각 시추공에서 절리면의 프로파일과 슈미트 해머 반발계수를 측정하였다. 절리면의 프로파일은 프로파일 게이지를 이용하여 절리면의 형상을 추출하였다.

JRC는 프로파일 게이지로 추출한 절리면 형상은 표준 프로파일 곡선(Barton & Choubey, 1977)과 육안으로 비교하여 1~20까지의 값 중 한 값으로 결정하였다. JCS는 슈미트 해머 반발계수, R을 타격각도에 대한 보정 후 다음 식에 대입하여 결정하였다(Barton & Choubey, 1977).

$$JCS = 10^{0.887R + 1.01}$$

## 5. 균질절리영역의 구분

방향, 연장성, 간격 등의 절리 분포 특성은 이들 블록

Table 2. Measuring items of each surveying method.

Item	Scanline survey	BHTV & BIPS	Core joint survey
Orientation	○	○	X
Spacing	○	○	○
Size	○	X	X
JRC	○	X	○
JCS	○	X	○

의 형상, 크기, 위치를 좌우하기 때문에 개별요소법을 이용한 터널 안정성 해석에 중요한 입력 자료로 활용된다. 따라서 현실적이고 신뢰성 있는 해석을 위해서는 터널 구간의 암반에 분포하는 절리의 분포특성을 결정하는 것이 중요하다.

한편 절리 분포 특성은 위치별 또는 심도별로 다른 양상을 보이거나, 일정 범위 내에서는 유사한 분포 특성을 보이는 영역이 존재하며, 이 영역을 균질절리영역(fracture domain)이라 한다. 따라서 본 연구에서는 개별 조사 위치별 절리 데이터 분석 수행 후, 인접 조사 위치 결과와의 비교를 통하여 균질절리영역을 구분하고 각 영역 내의 절리 분포 특성을 결정하였다.

현재까지 발표된 균질절리영역을 구분하는 방법은 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 첫째는 육안에 의한 방법으로 절리군의 평균방향을 비교하는 방법이다. 즉 개별 조사 위치별 평사투영결과로 나타나는 극점을 인접 조사 위치의 극점과 비교하여 절리군 평균방향의 유사성 평가에 근거하여 구분한다. 두 번째 방법은 iteration에 의한 방법으로 Dershowitz 등(1998)이 제안한 방법이다. 이들은 같은 시추공에서 심도에 따른 절리분포특성 변화양상을 분석한 후 심도별 균질절리영역을 구분하였다. 심도별 절리분포특성을 표현하는 지수로서  $Q'$ 를 도입하였으며, 심도에 따른  $Q'$ 의 변화 양상 분석에 기초하여 심도에 따른 균질절리영역을 구분하였다. 이들은 또한 절리군의 평균 방향(경사방향/경사각), Fisher 상수(K), Spherical 표준편차, 평균 경사방향/경사각 사이의 각도, 빈도수를  $Q'$ 로 사용할 수 있음을 주장하였다. 본 연구에서는 첫 번째 방법을 이용하여 균질절리영역을 구분하였다. 또한 단층, 암종경계선을 균질절리영역 구분에 활용하였다.

전체 터널 구간 8.6 km 구간을 14개의 균질절리영역으로 구분하였고, 각 영역별 절리 분포 특성을 결정하였다. 각 영역의 연장 및 절리 분포 특성은 Table 4와 같다. Table 4에서 절리군의 대표 방향은 경사방향/경사각

Table 3. Joint survey methods and quantities of acquired joint data for each tunnel.

Survey Method	Tunnel Name						Total
	Sangchon	Daljon 1	Daljon 2	Ansan	Sochon	Kyonggang	
Scanline sampling	10 outcrops	-	4 outcrops	2 outcrops	7 outcrops	5 outcrops	28 outcrops 1,470joints
BHTV	2B/Hs	-	-	-	-	-	2B/Hs 690 joints
BIPS	6B/Hs	2B/Hs	2B/Hs	1B/Hs	2B/Hs	1B/Hs	14B/Hs 1,430 joints
Core joint sampling	4B/Hs	-	1B/Hs	2B/Hs	7B/Hs	3B/Hs	17B/Hs 3,320 joints

으로 나타내었다. 암종에서 G는 편마암, Q는 규암, L은 석회암을 의미한다. 각 균절절리영역의 연장은 80~1,640 m로 편차가 아주 심하다. Fig. 3에 전체 터널 구간내의 14개의 균절절리영역의 결정은 단층 및 암종경계를 활용하였음을 나타내었다. 따라서 조사단계에서 개략적인 균절절리영역을 구분하고, 각 영역 내에서 절리 분포 특성을 분석함으로써 개별요소 해석시 절리망 구성에 필요한 자료를 얻을 수 있었다.

## 6. 물성 결정

### 6.1 개요

수치해석시 도출되는 결과의 신뢰성은 입력 물성의 신뢰성에 의해 좌우된다. 따라서 합리적이고, 객관적인 방법을 통한 입력 물성 결정이 필수적인 사항이다.

개별요소해석을 위해서는 절리 물성과 암반 블록 물성이 필요하다. 절리 물성은 절리망 구성을 위한 분포특성 외에

절리의 변형 특성과 강도 특성을 표현하는 역학적 특성으로 이루어진다. 분포 특성은 조사선에 의한 자료를 통계적 기법에 의해 처리하여 균절절리영역별로 결정하였다.

### 6.2 절리의 역학적 물성

개별요소해석에서 절리의 역학적 거동을 수치적으로 표현하기 위해 BB 모델을 적용하였다. 현재까지 연구결과에 의하면 BB 모델을 사용한 경우가 MC 모델을 사용한 경우에 비해 현장 암반의 거동에 보다 가까운 해석 결과를 얻을 수 있음이 알려져 있다(최성웅 등, 1999).

BB 모델의 입력 물성으로는 JRC, JCS, 기본 마찰각이 필요하다. Fig. 4는 시추공별로 JRC와 JCS를 정규분포로 회귀 분석하여 평균값 및 표준편차를 구한 결과이다. Fig. 5에 각 시추공의 JRC와 JCS를 회귀 분석하여 구한 평균값을 나타내었다. 시추공별 JRC, JCS는 매우 불규칙한 변화양상을 보이며, 같은 균절절리영역 내에 있는 시추공 사이에도 편차가 심함을 확인할 수 있다. 즉

Table 4. Joint geometry characteristics in each fracture domain

Domain	Length of Domain (m)	Rock type	Joint set 1			Joint set 2			Joint set 3		
			Orient.	Semitrace Length (m)	Spacing (m)	Orient.	Semitrace Length (m)	Spacing (m)	Orient	Semitrace Length (m)	Spacing (m)
1	1,150	G	155/54	1.68	0.43	264/67	4.08	0.73	072/82	1.0	1.0
2	680	G	162/79	2.12	0.4	358/33	2.36	2.15	105/82	1.56	1.18
3	1,640	G	067/70	3.32	0.56	243/50	1.0	1.40	323/59	1.0	2.12
4	410	G	141/74	2.93	0.30	264/67	1.84	1.30	200/70	2.1	0.8
5	280	G	217/34	2.08	0.23	156/68	2.88	0.25	347/45	0.60	0.8
6	340	Q	262/81	0.92	0.30	114/78	1.40	2.0	082/80	0.92	0.30
7	310	G	132/79	2.62	1.03	216/46	1.14	2.80	182/66	1.76	7.40
8	80	G	112/73	4.26	0.32	246/71	4.42	0.56	332/24	1.42	0.41
9	420	G	024/73	1.80	0.63	121/70	3.46	0.51	071/72	1.96	0.53
10	800	G	160/51	3.00	0.34	273/24	3.60	0.40	071/70	3.20	0.26
11	990	G	123/57	2.62	0.79	305/49	10.48	0.73	011/88	3.28	0.85
12	580	G	186/70	2.56	0.15	292/74	1.53	0.39	068/50	0.80	0.19
13	330	L	190/67	7.26	0.19	074/29	3.24	0.32	290/72	2.52	0.25
14	240	Q	011/87	13.1	0.42	073/35	7.36	1.7	296/79	0.98	1.88



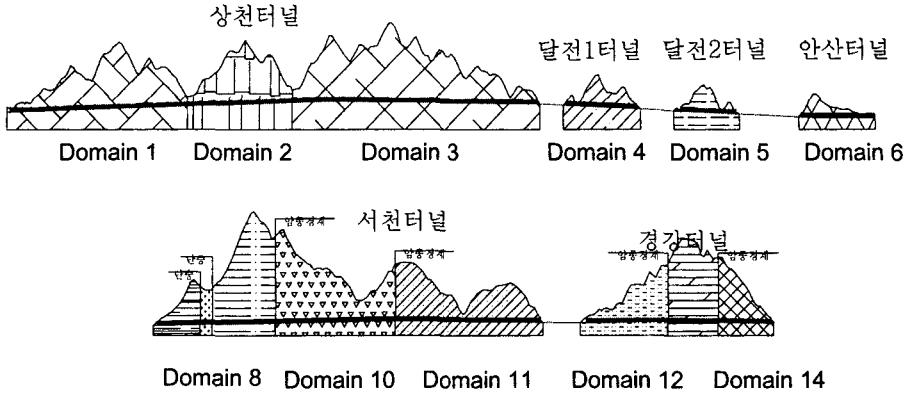


Fig. 3. Boundary of each fracture domain, fault and rock type.

균질절리영역과 각 영역 내의 절리의 역학적 특성은 상관관계가 약함을 의미한다. 이러한 현상은 균질절리영역 구분시 절리 분포 특성과 단층, 암종경계만을 고려하였기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 결과에 근거하여 절리 물성은 해석단면에 가장 인접한 시추공의 JRC와 JCS를 적용하였다.

또한 기본 마찰각은 Barton과 Choubey(1977)의 데이터를 이용하여 암종별로 결정하였다. 즉 편마암 23°, 석회암 26°를 해석에 적용하였다.

6.3 주요 암반 블록 물성

6.3.1 물성 결정 기본 방향

가. 암종에 따른 물성 변화

무결암은 절리와 함께 암반을 구성하는 주 요소로 암반의 역학적 거동에 큰 영향을 미친다. 또한 암종에 따라 그 역학적 특성이 달라진다. 본 연구의 대상지역에는 변성암인 편마암, 편암과 관입된 규암이 존재하는 것으로 분석되었다. 이들 암석들은 그 역학적 특성에서 큰 차이를 보이며, 이에 따라 이들 암석으로 구성된 암반 또한 서로 다른 역학적 특성을 보일 것으로 예상된다.

Fig. 6은 암석 실내 시험을 통해 얻은 편마암의 단축 압축강도와 Hoek-Brown 지수,  $m_b$ 를 회귀 분석한 결과와 각 암종별 단축압축강도와  $m_b$  값이다. 이들 값은 암종별로 큰 편차를 보임을 확인할 수 있다. 단축압축강도 및  $m_b$  값은 변형계수 및 전단상수(점착력, 마찰각) 산정시 큰 영향을 미치는 변수로서 이들 암석 구성으로 구성된 암반의 물성도 큰 편차를 보일 것으로 예상할 수 있다. 이러한 경향을 고려하여 암반 블록의 물성은 암종별로 다른 물성을 적용하였다.

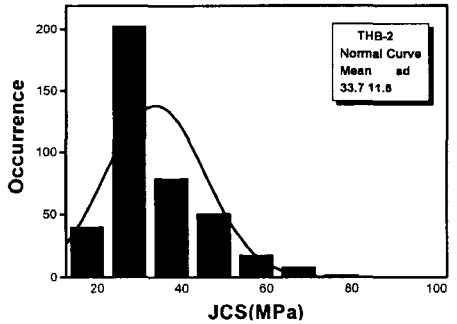
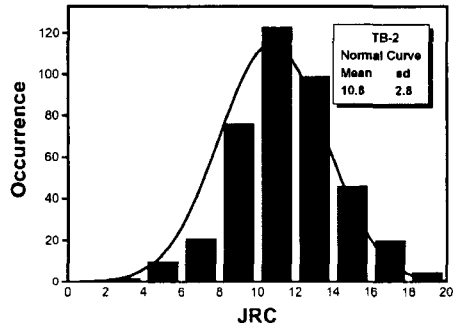


Fig. 4. Determination of JRC and JCS.

나. 암반등급에 따른 물성 결정

현재까지 연속체 해석 물성 결정하는 방법은 암반을 경암, 보통암, 연암, 풍화암(도로공사 분류기준) 등으로 구분한 후 각 암종에 대한 물성을 결정하는 방법과 지보 패턴 결정에 사용되는 암반분류를 이용하여 암반을 구분한 후 각 등급에 대한 물성을 결정하는 방법으로 대별할 수 있다.

터널 안정성 해석의 목적 중 하나가 적용 표준지보패턴의 지보 적정성을 검증하는 것이며, 이 때 표준지보패

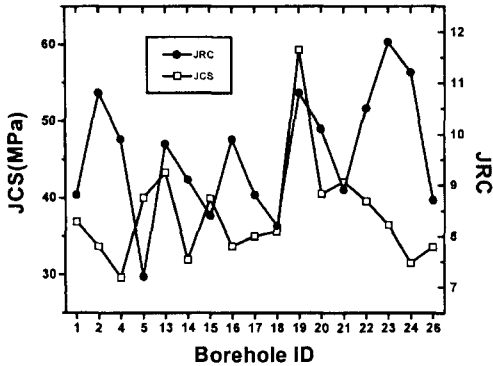


Fig. 5. Variations of JRC and JCS in boreholes.

턴은 RMR 분류에 의해 구분한 암반등급을 이용하여 해당 등급의 암반에 적용함을 감안할 연속체 해석 물성은 RMR 분류에 의한 암반등급별로 결정하는 것이 합리적일 것이다. RMR 분류를 이용하여 분류한 동일한 암반 등급내에서도 RMR 값은 20만큼의 편차를 보이기 때문에 각 암반 등급의 물성을 한 값으로 결정하기 보다는 등급별 범위값으로 결정하는 것이 합리적이라 판단된다.

따라서 본 연구에서는 연속체 해석 물성을 RMR 분류에 의한 등급별 범위의 값으로 결정하였으며, 연속체 해석 물성은 각 등급별 범위값 중 최소값을, 개별요소법 해석의 암반 블록 물성은 각 등급별 범위값 중 최대값을 해석에 적용하였다.

### 6.3.2 변형계수

연속체 해석 물성 또는 개별요소 해석의 암반 블록 물성을 결정하는 방법에 대해서는 많은 가이드(암반공학회 등, 1999)가 발표되었다. Table 5에 변형계수 결정시 국내외에서 가장 많이 사용되는 주요 방법, 제안자, 특징 및 적용성을 정리·비교하였다. 본 연구에서는 암종별 역학적 특성 변화, 암반분류 결과, 터널 시공조건(터널 심도)를 고려할 수 있는 Barton이 제안한 방법을 사용하여 변형계수를 결정하였다.

### 6.3.3 전단상수(점착력, 마찰각)

Table 6에 전단상수 결정시 국내외에서 가장 많이 사용되는 주요 방법, 제안자, 특징 및 적용성을 정리·비교하였다. 본 연구에서는 암종별 역학적 특성 변화, 암반분류 결과를 고려할 수 있는 Hoek-Brown 강도 기준식에 의해 전단상수를 결정하였다.

상기 방법에 의해 결정한 암반 등급별 입력물성은 Table 7과 같다. 개별 요소 해석시 암반 블록 물성은 각 등급별 물성의 최대값을 적용하였다.

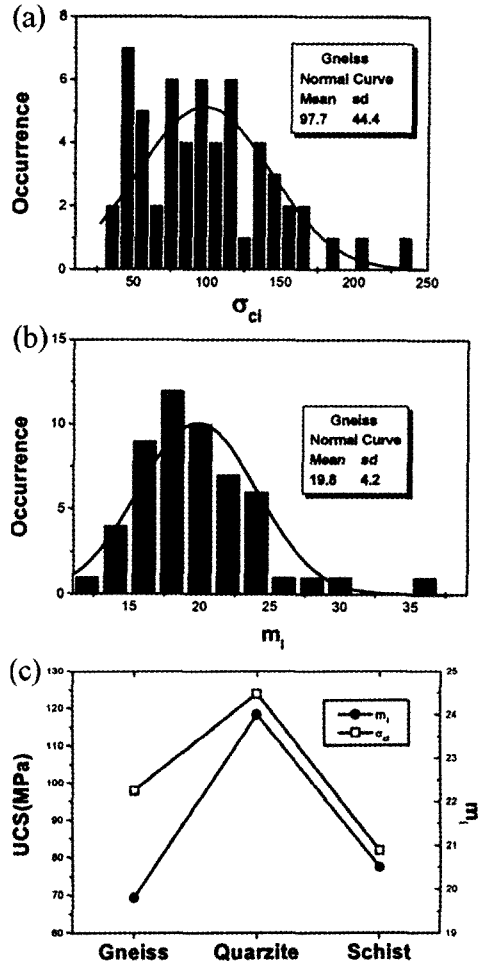


Fig. 6. Uniaxial compressive strength and Hoek-Brown index,  $m_1$ . (a) UCS of gneiss, (b)  $m_1$  of gneiss. (c) UCS and  $m_1$  for each rock material.

## 7. 해석 사례

### 7.1 해석 모델

터널 구간의 균질절리영역 중 절리의 연장성이 가장 긴 균질절리영역 14에 대한 UDEC-BB 해석 사례를 소개한다. Fig. 7에 해석 영역 및 경계조건을 도시하였다. 축압계수는 0.5를 적용하였다.

### 7.2 해석 결과 및 분석

Fig. 8의 (a)는 최종 시공단계의 변위도이다. 최대 변위는 4.67 mm로 인버트에서 발생한다. 최대 절리면 전단 변위도 2.2 mm로 인버트에서 발생한다.

Fig. 8의 (b)는 최종 시공단계의 주응력 벡터이다. 최

대 주응력의 최대값은 2.6 MPa로 응력집중이 가장 크게 발생하는 우각부에서 발생하였다. 최소 주응력 최소값은 인장력으로 변위에 의한 응력이완이 가장 큰 인버트에서 발생하며 그 값은 0.12 MPa 이다.

Fig. 8의 (c), (d)는 각각 최종 시공단계의 슛크리트 압축력, 록볼트 축력으로 최대값은 절리면 전단 변위가 크게 발생하는 위치에서 발생한다.

### 8. 결론 및 제언

본 연구의 대상지역은 절리가 잘 발달한 암반으로 절리가 터널 시공 및 안정성에 지대한 영향을 미칠 것으로 예상되어 절리 영향을 고려할 수 있는 개별요소 해석의 필요성이 대두되었다. 본 연구에서는 개별요소 해석

(UDEc-BB)에 필요한 각 입력 물성을 절리 분포 특성, 절리 역학적 특성, 암반 블록 물성으로 구분하여 각 물성을 결정하는 방법에 대해 다루었다. 또한 제시한 방법에 의해 결정된 입력 물성을 이용하여 수행한 해석 사례를 소개하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 노두절리조사, 시추공 절리조사 결과를 근거로 심도 변화에 따른 균질절리영역의 수직적 분포를 분석한 결과 절리군의 수와 각 절리군의 대표 방향이 변하지만 노두 절리조사 결과와 지하 절리 조사 결과를 비교해 볼 때 지표와 지하의 절리 분포 특성의 상관관계를 발견할 수 있다. 따라서 터널 심도 암반에 접근이 불가능할 경우 노두 조사결과를 이용하여 터널 심도의 절리 분포특성을 유추할 수 있을 것이다.

Table 5. Comparisons of methods for evaluating deformation modulus.

제안식 및 제안자	특 징	적 용 성
$E_m = 2 \times RMR - 100$ Bieniawski(1978)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 도수터널, 대규모 양수 발전소 건설시 평판재하시험으로 얻은 변형계수와 RMR과의 관계</li> <li>· 50&lt;RMR&lt;80 인 범위에서 유도되었으며, 이 때의 오차범위는 18.2% 이하</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 50&lt;RMR&lt;80인 범위에서 얻은 식으로 이 범위의 RMR에서 적용성이 좋음.</li> <li>· RMR&gt;80에서는 계산된 변형계수는 대부분의 무결암 탄성계수보다 높은 값을 보이므로 적용 불가.</li> </ul>
$E_m = 10^{(RMR-10)/40}$ Serafim & Pereira(1983)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 댜기초의 역해석 결과로부터 얻은 식</li> <li>· RMR&lt;50 인 범위에서 유도하여 Bieniawski의 방법 보완</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Hoek(1998)은 모든 RMR 범위에서 적용가능함을 주장</li> <li>· RMR&gt;80에서는 변형계수는 가파르게 증가하여 대부분의 무결암 탄성계수보다 높은 값을 보이므로 적용 불가.</li> </ul>
$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{\frac{(GSI-10)}{40}}$ Hoek(1998)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 암석의 단축압축강도가 100 MPa 이하인 암질이 불량한 암반의 변형계수는 불연속면이 아닌 무결암의 특성에 의해 지배된다는 관찰결과에 근거하여 Serafim &amp; Pereira 식에 단축압축강도항 도입</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 단축압축강도 &lt;100 MPa 인 암반에서 적용 가능</li> <li>· 암질이 양호한 GSI&gt;80 범위에서는 변형계수가 가파르게 증가하여 대부분의 무결암 탄성계수보다 높은 값을 보이므로 적용 불가.</li> </ul>
$Q_c = Q \times \frac{\sigma_c}{100}$ & Barton 그래프 Barton	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 암반의 변형계수가 암질 뿐만 아니라 봉압에도 영향을 받는다는 관찰결과에 근거하여 봉압을 지배하는 심도 고려</li> <li>· 무결암이 암반의 변형계수에 미치는 영향을 고려하기 위하여 무결암의 단축압축강도항 도입</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 적용한계 없음</li> <li>· 각종 조사결과(암반등급, 무결암의 단축압축강도, 탄성과 속도)와 터널시공 조건(심도)을 고려할 수 있으므로 가장 합리적인 방법.</li> </ul>

Table 6. Comparisons of methods for evaluating cohesion and friction angle.

방법 및 제안자	특 징	적 용 성
RMR 1 Bieniawski(1978)	· 근거 데이터 제시 없음	· 사면에 적용(Bieniawski, 1989)
RMR 2 Serafim & Pereira(1983)	· 댜기초의 역해석 결과로부터 도출	· 심도가 낮은 기초 및 사면에 적용
Hoek-Brown 강도 기준식 Hoek(1998)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 각종 암석강도시험 결과 활용하여 지수 결정, RMR(Q) 분류결과를 이용한 GSI 결정</li> <li>· 무결암 특성 및 암반분류 결과 반영 가능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 터널에 적용가능</li> <li>· 심도가 낮은 기초 및 사면에 대해서는 1988년에 제안된 교란/불교란 구분이 있는 방법 적용이 적합</li> </ul>

Table 7. Summary of input parameters for each rockmass class.

값		등급				
		Type-I	Type-II	Type-III	Type-IV	Type-V
Deformation Modulus (GPa)	Gneiss	45.0~47.4	17.0~39.1	4.5~28	1.6~9.3	< 3.1
	Quarzite	46.0~54.5	19.0~54.5	5.0~20	1.75~5.62	< 5.8
	Schist	42.0~46.6	15~32.2	3.8~21.3	1.0~6.8	< 2.1
Cohesion (MPa)	Gneiss	11.4~16.0	5.0~13.9	2.43~5.0	1.3~2.43	< 1.1
	Quarzite	14.5~18.2	8.4~12.3	4.7~6.4	2.6~3.3	< 1.6
	Schist	8.7~17.5	4.2~8.7	2.2~4.2	1.1~2.2	< 1.1
Friction Angle (°)	Gneiss	46~55	42~49.9	38~42.5	3~38.1	< 33
	Quarzite	47~49.7	44~46.8	40~44.1	35~39.6	< 35
	Schist	46~48.0	43~46.0	38~42.6	34~38.2	< 34

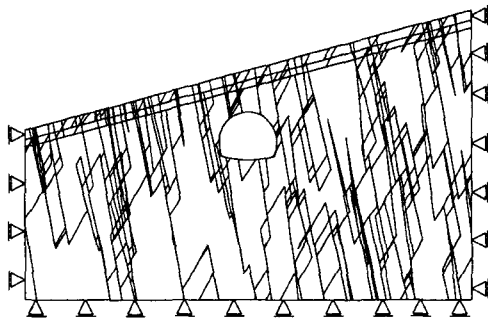


Fig. 7. Model and boundary conditions.

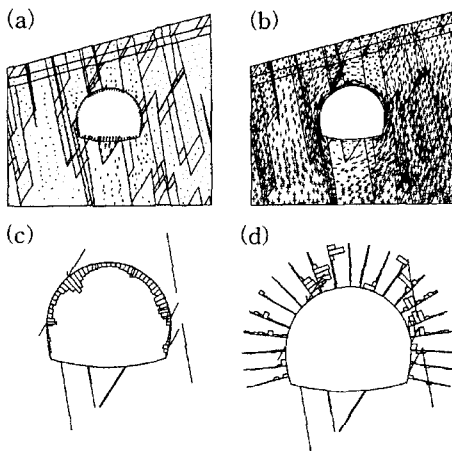


Fig. 8. Calculation results at the final construction stage. (a) Displacement vector, (b) Principal stress, (c) Shotcrete axial force and joint shear displacement, (d) Rockbolt axial force and joint shear displacement.

2) 터널구간을 총 14개의 균질절리영역으로 구분하여 각 영역별 절리 분포 특성을 결정하였으며, 이를 개별요

소 해석시 절리망 구성을 위한 입력자료로 활용하였다. 조사/설계단계에서 터널 심도에 존재하는 절리 자료에 대한 접근이 불가능하고 절리 조사가 가능한 노두가 불충분하다는 제한 조건으로 인하여 세밀한 균질절리영역 구분이 뚜렷하지 않지만 절리의 분포 특성 뿐만 아니라 암층, 단층, 주요 지질 구조대를 종합적으로 고려하여 개략적인 영역을 구분할 수 있었다. 균질절리영역 구분시 평사투영결과를 육안하는 비교하는 방법을 사용하였는데, 이 방법은 다분히 주관적인 요소가 개입할 수 있으므로 좀 더 객관적인 구분이 가능한 통계적 기법이 필요할 것으로 사료된다.

3) 암반 불연속면의 역학적 특성인 절리면 거칠기와 강도는 균질절리영역과 상관관계가 없는 것으로 분석되어 각 해석단면에서 가장 가까운 시추공의 분석 결과를 입력 물성으로 적용하였다. 이 방법에 따르면 시추를 수행하지 않은 지역에서 개별요소 해석을 수행할 때 절리의 역학적 물성을 결정할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 향후 균질절리영역과 절리 역학적 특성간의 상관관계에 대한 추가 분석이 필요할 것으로 사료된다.

4) 암반 블록의 물성은 암종별 역학적 특성 차이를 고려하여 암종별로 다른 값으로 결정하였다. 또한 터널 안정성 해석의 목적 중 하나가 표준지보패턴의 적정성을 검토하기 위함임을 고려하여 표준지보패턴 적용 근거가 되는 RMR에 의한 암반 등급별로 결정하였으며 암반 등급별 범위값으로 결정하여 그중 최대값을 개별요소 해석에 적용하였다.

5) 암반의 불연속면의 방향, 간격 및 길이를 조사선법에 의해 조사하여 통계 처리한 결과를 이용하여 개별요소법의 절리망을 생성함으로써 터널의 안정성 해석의 공학적 합리성을 높일 수 있을 것으로 예상된다.

6) Barton-Bandis 절리모델을 사용함으로써 입력물성인 절리의 거절기, 절리면의 강도 등을 현지암반에서 신속하고 경제적으로 다량 측정하여 통계 처리함으로써 개별요소법에 필요한 입력물성의 신뢰도를 높일 수 있을 것으로 예상된다.

### 참 고 문 헌

1. 최성웅, 정소걸, 1999, Barton-Bandis joint model을 이용한 절리 암반 사면의 안정성 해석, 한국암반공학회지, 터널과 지하공간, Vol. 9, pp. 141-148.
2. 한국암반공학회 등, 1999, 건설기술자를 위한 지반조사 및 시험 기술, pp. 599-617  
Barton, N., 1976, The strength and rock joints, Int. Rock Mech. Min. Sci. & Geom., Abstr., Vol. 13, pp. 255-279.
3. Barton, N. and Choubey, V., 1977, The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice, Rock Mech., Vol. 10, pp. 1-54.
4. Barton, N *et al*, 1986, Rock mechanics modelling of the Ecofisk reservoir subsidence, Proc. 27th U.S. Symp. on Rock Mech., Alabama, pp. 267-274.
5. Bieniawski, Z.T., 1989, Engineering Rock Mass Classification, John Willey & Sons.
6. Dershowitz, W., LaPointe, P. and Cladouhos, T., 1998, Derivation of Fracture Spatial Pattern Parameters from Borehole Data, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 35, Paper No. 134.
7. 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.
8. Priest, S.D., 1993, Discontinuity Analysis for Rock Engineering, Chapman & Hall, London.



### 김 치 환

- 1983년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사  
1985년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사  
1990년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학박사

Tel : 0652-290-1468

E-mail : kimchee@hanimail.com

현재 우석대학교 토목공학과 조교수