

이방성 암반에 대한 실험/해석상의 문제

Problems Associated with Tests and Analysis of Anisotropic Rock Mass

박연준¹⁾, Yeonjun Park

1) 수원대학교 토목공학과, Dept. of Civil Engineering, University of Suwon

이방성 암반에 대한 실험/해석상의 문제

Problems Associated with Tests and Analysis of Anisotropic Rock Mass

박연준, Yeonjun Park

수원대학교 토목공학과, Dept. of Civil Engineering, University of Suwon

1. 서론

암반 거동에 대한 대부분의 해석에 있어서 암반은 등방체로 가정되고 있으나, 실제 암반은 정도의 차이는 있으나 이방성을 띄고 있다. 이러한 이방성은 퇴적암이나 변성암에만 국한되지 않으며, 대표적인 화성암인 화강암의 경우에서도 흔히 관찰된다.

본 고에서는 이방성과 관련된 일반적인 사항을 등방성과 비교하여 기술하고, 이방성 암반의 물성을 구하기 위한 시험법과 해석상의 문제를 기술하여 이방성이 강한 암반에 대한 올바른 해석 기법을 제시하고자 한다.

2. 이방성과 등방성

탄성 영역 내에서 등방체는 단 2개의 독립적인 탄성 정수를 가지나, 특별한 대칭 조건이 없는 경우, 연속체는 일반화된 Hooke의 법칙에 따라 6개의 응력성분과 6개의 변형률 성분의 관계를 나타내는 36개의 탄성정수를 가지게 된다.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{bmatrix} \quad (1)$$

변형률 에너지와 변형률 및 응력 성분의 관계는 다음과 같다.

$$\sigma_{xx} = \frac{\partial \bar{V}}{\partial \epsilon_{xx}}, \quad \sigma_{yy} = \frac{\partial \bar{V}}{\partial \epsilon_{yy}}, \quad \dots \quad \tau_{xx} = \frac{\partial \bar{V}}{\partial \gamma_{xy}} \quad (2)$$

(1)식을 $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \dots, \gamma_{xy}$ 에 대하여 각각 편미분하면 다음과 같은 관계식을 얻는다.

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial \epsilon_{yy}} = \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial \epsilon_{xx}}, \quad \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial \epsilon_{zz}} = \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial \epsilon_{xx}}, \quad \dots \quad (3)$$

이 관계식에 의하여 (1)식의 36개의 계수는 대칭이어야 하므로 ($a_{ij} = a_{ji}$) 독립적인 탄성 정수의 수는 21개로 줄어들게 된다. 이러한 일반적인 이방체는 탄성정수의 수가 과도하여 측정이 실질적으로 불가능할 뿐 아니라 거동 해석도 매우 어렵다.

실질적으로 해석이 가능한 경우는 평면이방체(transversely isotropic body)와 직교이방체(orthotropic body)로서 각각 5개와 9개의 독립적인 탄성 정수를 가진다. 이에 대한 개념적인 도시는 다음의 그림 1과 같다.

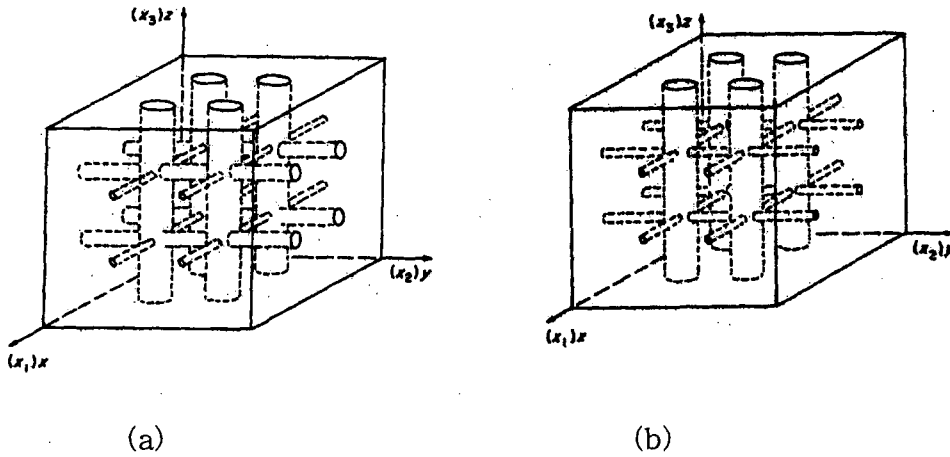


그림 1. 직교이방체(a)와 평면이방체(b) (Crouch & Starfield, 1983)

직교 이방체에서의 응력-변형률 관계는 다음의 (4)식과 같다. 9개의 탄성정수는 3개의 Young의 계수와 3개의 Poisson비, 그리고 3개의 전단탄성계수로 구성된다. 이러한 9개의 탄성 정수를 측정하여 얻는 일은 쉽지 않을 뿐 아니라, 이를 이용한 거동 해석도 매우 복잡하여 3차원 해석에서는 잘 사용되지 않으나, Crouch & Starfield는 2차원 평면변형률 조건에서 직교이방성 매질 내에 굴착된 원형 터널 주변의 응력을 해석에 적용한 바 있다.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -\nu_{yx}/E_y & -\nu_{zx}/E_z & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{xy}/E_x & 1/E_y & -\nu_{zy}/E_z & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{xz}/E_x & -\nu_{yz}/E_y & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{yz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{zx} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{bmatrix} \quad (4)$$

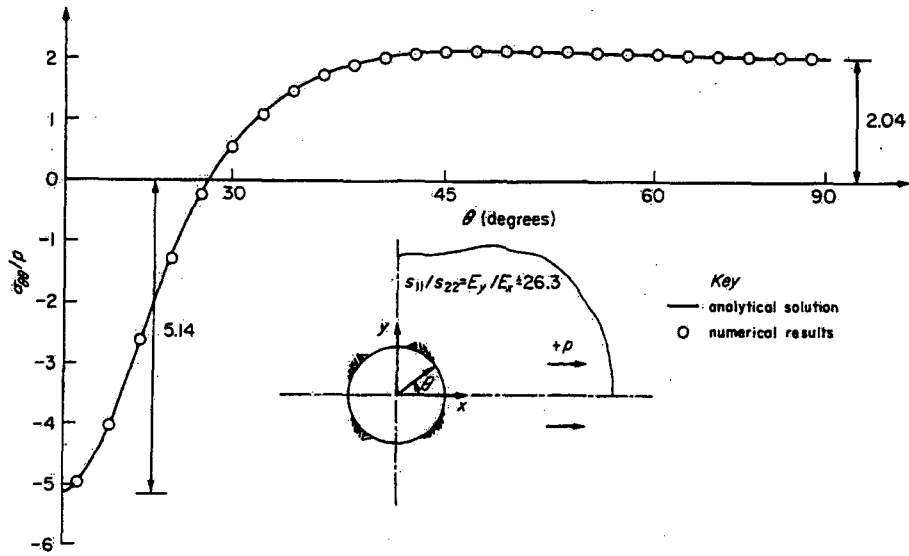


그림 2. 직교이방체 매질내에 굴착된 원형터널 주변의 접선응력 집중도(Crouch & Starfield, 1983)

등방탄성체에의 경우, x축과 공동 경계의 교점에서($\theta=0^\circ$)에서의 응력집중도는 -1, y축과의 교점에서($\theta=90^\circ$)에서는 3이나, 그림 2의 경우, E_y/E_x 가 26.3으로 이방성이 매우 커서 -5.14와 2.04로 등방해와는 큰 차이를 보이고 있다.

좀더 흔하고, 해석이 보다 용이한 이방체는 평면이방체이다. 상기의 직교이방체에서 x-y 평면상에서의 성질이 같고 z 방향만 성질이 다른 경우이므로 응력-변형을 관계는 다음과 같이 5개의 독립적인 탄성 정수로서 표현될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} = \frac{1}{E_{xy}} \begin{bmatrix} 1 & -\nu_{xy} & -\nu_z & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{xy} & 1 & -\nu_z & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_z & -\nu_z & E_{xy}/E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu_{xy}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & E_{xy}/G_{xy-z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & E_{xy}/G_{xy-z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{bmatrix} \quad (5)$$

등방체에 대한 상기 관계식은 Young의 계수와 Poisson 비의 방향성이 사라지고, 독립적인 전단계수 G_{xy-z} 도 소멸되어 우리가 잘 아는 관계를 가지게 된다.

3. 이방성의 원인

(본 절은 건설기술 자료공유 사이트 www.tomok21.com의 건설기술/암반 및 터널/암석의 이방성에서 발췌한 것임을 밝혀둡니다.)

암석의 이방성은 크게 1차적인 요인과 2차적인 요인으로 구분된다. 전자는 암석의 형성 과정과 관계가 있는 것으로서 퇴적암의 생성과정에서 나타나는 퇴적물의 분급, 건조, 다짐, 암석화작용 등이 좋은 예이다. 후자는 주변환경과 관계가 있는 것으로서 압력, 응력, 온도, 물 및 물과 반응하기 위한 화학조건 등을 가리킨다. 특히 이러한 요인들은 암석의 변성작용이나 풍화과정과 관련이 있어서 암석의 조직과 구성광물 등의 변화를 일으킨다.

따라서 암석의 강도 및 변형과 관련한 이방성은 실험실조건과 현장조건에 따라서 다르게 나타나며, 미시적 관점과 거시적 관점의 이방성이 나타나게 된다. 암석이 이방성을 나타내는 요인을 정리하면 다음과 같다.

① 개별 광물입자들의 배열과 결합형태, 입자들의 모양 등과 같은 광물학적 요인

대칭적인 구조를 갖는 광물입자들로 구성된 암석은 물리적 특성이 대칭적으로 나타난다. 이러한 관계를 Neumann's Principle이라고 부른다. 이런 특징을 나타내는 재료들에는 wood, plywood, glass laminates 등이 있다.

② 암석학적 요인

광물입자들의 배열과 상호간의 방향 및 그로 인해 나타나는 결함(defects ; crystal grain 사이의 경계, 벽개면, 쌍정면, 기타 미세균열)들 이다.

③ 거시적인 규모로 나타나는 요인

층리, 편리, 엽리, 층상구조, 선구조 등의 요인을 말하며, 암석과 암반의 이방성을 결정하는데 매우 중요한 요인으로 작용한다.

실험실 시험에 사용되는 암석의 이방성은 주로 ①과 ②에 의한 이방성이며, 현지 암반의 공학적 거동과 관련한 이방성은 주로 ③의 지배를 받게 된다. 따라서 실험실 조건과 현장 조건에 대해 고려해야 하는 이방성의 요인이 다르게 되며, 이를 평가하는 방법과 이방성에 의한 공학적 거동도 다르게 된다.

4. 이방성 암석에 대한 시험법

4.1 변형성

4.1.1 일반적인 방법

3개의 서로 다른 시료를 각각 그림 3의 (a), (b) 및 (c)와 같이 성형하여 일축압축시험을 수행한 후 6개 이상의 측정값으로부터 5개의 평면이방성 탄성정수를 구한다. 이 경우, 3개의 시료는 동일한 물성을 가져야하며, 그림과 같이 원하는 방향으로 시료 성형이 가능하여야한다.

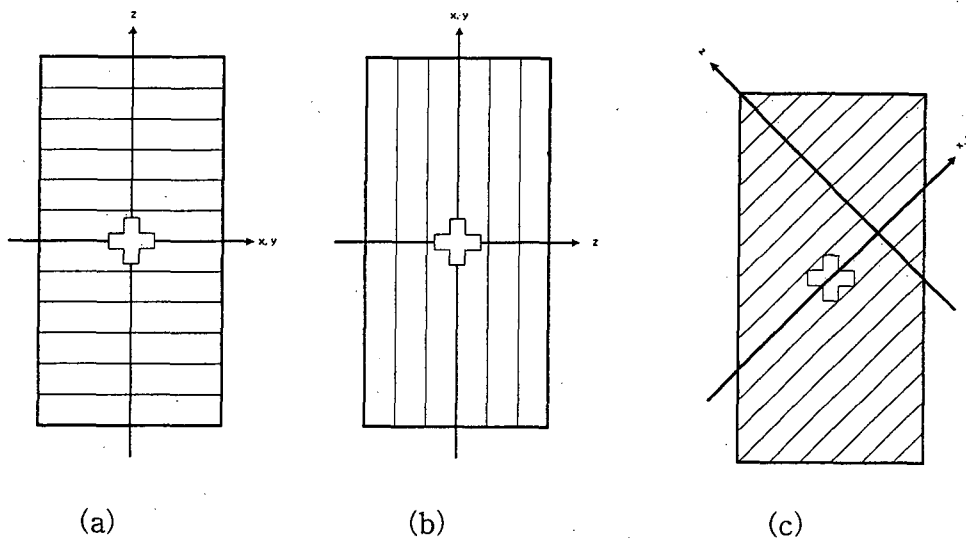


그림 3. 평면이방성 탄성정수를 구하기 위한 3개의 일축압축시험

4.1.2 단일 시료를 이용하는 방법

실제 현장에서 얻을 수 있는 시료의 제한성을 고려하여 단일 시험편에 대한 실험으로 5개의 평면이방성 탄성정수를 구하는 방법이 고안되었다(김호영, 장보안 외, 박철환). 그러나 단일 시험편에서 얻을 수 있는 관계식은 이론 상 최대 4개이므로 5개의 탄성정수를 완벽하게 구할 수 없어 근거가 미약한 제 5의 관계식을 이용하거나 2개의 Poisson비가 같다고 가정하는 등의 단순화 작업이 필요하다.

■ 방법 1 (김호영, 1995)

그림 4와 같은 이방성 암석 시료에 이방성 평면에 수직한 방향으로 한 개의 strain gage의 방향을 맞추어 45°스트레인 로제트를 부착하고, 세 개의 strain 성분을 측정한다.

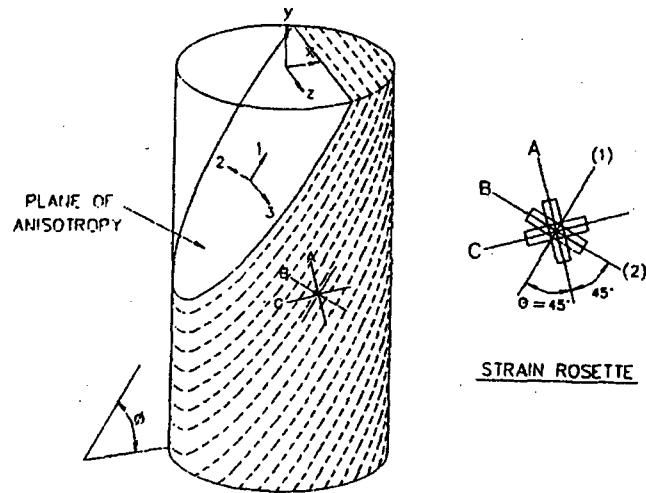


Fig. 1. Axis of anisotropy and the arrangement of strain gages.

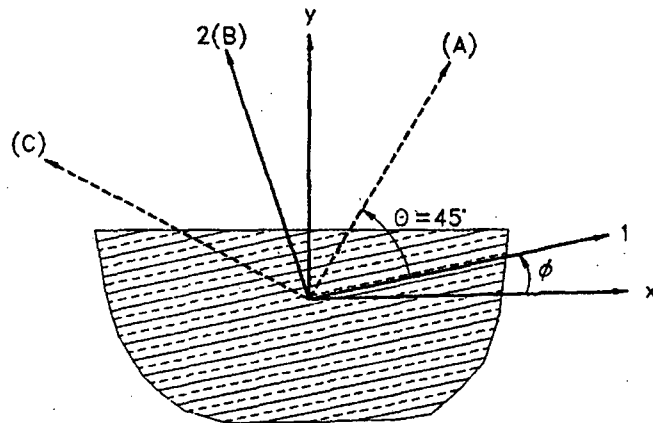


Fig. 2. Axis of coordinates in a 2-dimensional plane.

그림 4. Strain 게이지의 부착 방향 및 위치, 그리고 2차원 평면상에서의 좌표축 방향과의 상관관계도.

y-방향으로 일축 압축 응력을 가한 경우, 가해진 응력과 측정된 스트레인과는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\begin{aligned} \frac{\epsilon_A}{\sigma_y} &= \frac{A}{E_1} + \frac{B}{E_2} + \frac{C}{G_2} \\ \frac{\epsilon_B}{\sigma_y} &= \frac{D}{E_2} \\ \frac{\epsilon_C}{\sigma_y} &= \frac{A}{E_1} + \frac{B}{E_2} - \frac{C}{G_2} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 A, B, C, D는 각각 다음과 같으며,

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{1 - \sin 2(\phi + \theta)}{4} \\
 B &= \frac{1 - 2\nu^2 + \sin 2(\phi + \theta)}{4} \\
 C &= \frac{\sin^2(\phi + \theta) - \cos^2(\phi + \theta)}{4} \\
 D &= \cos^2 \phi - \nu_2 \sin^2 \phi
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\epsilon_A}{\sigma_y} \\ \frac{\epsilon_B}{\sigma_y} \\ \frac{\epsilon_C}{\sigma_y} \end{pmatrix} \tag{8}$$

다음 식으로 탄성정수 3개를 구한다.

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{E_1} &= \frac{1}{2A} \left(y_1 - \frac{2B}{D} y_2 + y_3 \right) \\
 \frac{1}{E_2} &= \frac{1}{D} y_2 \\
 \frac{1}{G_2} &= \frac{1}{2C} (y_1 - y_2)
 \end{aligned} \tag{9}$$

Parametric study를 통하여 Poisson비가 해석 결과에 영향을 줄 경우에는 별도의 실험을 통하여 구하고, 영향이 적은 경우에는 적절한 값으로 가정한다.

■ 방법 2 (장보안 외, 2001)

김호영의 방법과 측정 방법은 동일하나 이방성 각도 θ 가 45° 보다 큰 경우에는 다음의 식을 이용하여 E_1 , E_2 , G_2 및 ν_{12} 를 구한다

$$\begin{aligned}
 \nu_{21} &= \frac{\nu_{21}(y_1 - y_2 + y_3) \cos^2 \theta}{y_2(\sin^2 \theta - \nu_{12}) + \nu_{12} \sin^2 \theta (y_1 + y_3)} \\
 E_1 &= \frac{(1 - \cos 2\theta)(\cos^2 \theta - \nu_{21} \sin^2 \theta)}{2(y_1 + y_3)(\cos^2 \theta - \nu_{21} \sin^2 \theta) - y_2 \cdot (1 - 2\nu_{21} + \cos 2\theta)}
 \end{aligned} \tag{10}$$

$$E_2 = \frac{\cos^2 \theta - \nu_{21} \sin^2 \theta}{\nu_2}$$

$$G_{21} = \sin \frac{2\theta}{2(y_1 - y_3)} = \frac{\sin \theta \cos \theta}{y_1 - y_3}$$

반면 이방성 각도 θ 가 45° 보다 작은 경우에는 다음의 식을 이용하여 E_1 , E_2 , G_2 및 ν_{21} 을 구한다

$$\nu_{12} = \frac{y_2 \nu_{21} \sin^2 \theta}{(y_1 + y_3)(\cos^2 \theta - \nu_{21} \sin^2 \theta) - y_2(\cos^2 \theta - \nu_{21})}$$

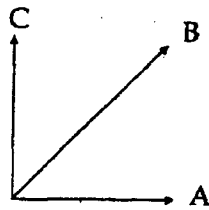
$$E_1 = \frac{\sin^2 \theta - \nu_{12} \cos^2 \theta}{y_1 - y_2 + y_3}$$

$$E_2 = \frac{\cos^2 \theta (\sin^2 \theta - \nu_{12} \cos^2 \theta)}{y_2 (\sin^2 \theta - \nu_{12}) + \nu_{12} \sin^2 \theta (y_1 + y_3)} \quad (11)$$

$$G_{12} = \frac{\sin \theta \cos \theta}{y_1 - y_3}$$

나머지 한 개의 Poisson 비는 적절히 가정하여도 큰 오차가 발생하지 않는다고 하였다.

■ 방법 3 (박철환, 2001)



(a) strain rosette parallel to axis

그림 5. 스트레인 로제트의 배열(박철환, 2001)

박철환은 동일한 위치에 45도 로제트를 상기한 그림 5와 같이 수평 및 수직, 그리고 45도의 방향으로 부착하여 응력 및 변형률을 측정하고, 이로부터 다음 4개의 관계식을 얻어 5개의 탄성정수를 얻는데 사용하기를 추천하였다.

$$A = \frac{1}{E_1} \sin^2 \theta + \frac{-\nu_2}{E_2} \cos^2 \theta$$

$$\begin{aligned}
B &= \frac{-\nu_2}{E_2} \sin^2 \theta + \frac{1}{E_2} \cos^2 \theta \\
C &= \frac{1}{G_2} \sin \theta \cos \theta \\
D &= \frac{-\nu_1}{E_1} \sin^2 \theta + \frac{-\nu_2}{E_2} \cos^2 \theta \\
\text{where } A &= \frac{\epsilon_1}{\sigma_y}, \quad B = \frac{\epsilon_2}{\sigma_y}, \quad C = \frac{\gamma_{12}}{\sigma_y} \quad \text{및} \quad D = \frac{\epsilon_3}{\sigma_y}
\end{aligned} \tag{12}$$

4개의 관계식으로부터 5개의 탄성 정수를 결정할 수는 없으므로 저자는 Lekhnitskii (1963)가 제시한 다음의 제 5의 관계식을 제시하였으나 이의 사용을 추천하지는 않았으며, 보다 합리적인 새로운 수식의 제안을 예고한 바 있다.

$$G_2 = \frac{E_2}{1 + E_2/E_1 + 2\nu_2} \tag{13}$$

4.2 강도

강도의 이방성은 주로 불연속면 군에 의한 이방성 암석을 중심으로 연구되었다. 김영수 등(2001)은 셰일의 강도 이방성을 조사하기 위하여 Hoek과 Brown이 제안한 이방성 암반의 강도식을 이용하여 시험 결과와 비교하였다. 이방성 평면의 각도 $\beta^\circ=0$ 일 때를 신선암(intact rock)으로 가정하면, 경험적인 이론과 $m(\beta), s(\beta)$ 의 방정식은 다음 식과 같다. 여기서, $A_1, A_2, A_3, P_1, P_2, P_3$ 는 상수이다.

$$\begin{aligned}
\sigma_1 &= \sigma_3 + \sqrt{m(\beta) \sigma_c \sigma_3 + s(\beta) \sigma_c^2} \\
m(\beta) &= m_i (1 - A_1 e^{-\psi}) \\
s(\beta) &= 1 - P_1 \zeta^4 \\
\psi &= \frac{\beta_m - \beta}{A_2 + A_3(90^\circ - \beta)} \\
\zeta &= \frac{\beta_s - \beta}{P_2 + P_3(90^\circ - \beta)}
\end{aligned} \tag{14}$$

여기서, σ_c : $\beta^\circ=0$ 일때의 일축 압축강도

m_i : $\beta^\circ=0$ 일때의 m 값

β_m : m 이 최소일때의 β 값

β_s : s 가 최소일때의 β 값

김영수 등은 또한 Ramamurthy 등에 의해 다음과 같이 제안된 비선형 파괴이론을 사용하여 실험 결과와 비교하였다.

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\sigma_3} = B_j \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_3} \right)^{\alpha_j} \quad (15)$$

$$\frac{\alpha_j}{\alpha_{0^{\circ}}} = \left(\frac{\sigma_{cj}}{\sigma_{c0^{\circ}}} \right)^{1 - \alpha_{0^{\circ}}}$$

$$\frac{B_j}{B_{0^{\circ}}} = \left(\frac{\alpha_{0^{\circ}}}{\alpha_j} \right)^{0.5}$$

여기서, σ_1, σ_3 : 최대, 최소 주응력

α_j : 응리각도 $j(\beta^0)$ 에 따른 $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_3}$ 와 $\frac{\sigma_c}{\sigma_3}$ 사이의 경사.

B_j : 응리각도 $j(\beta^0)$ 에 따른 재료상수.

σ_{cj} : 식(1)에서 나온 응리각도에 따른 일축 압축강도 예측식.

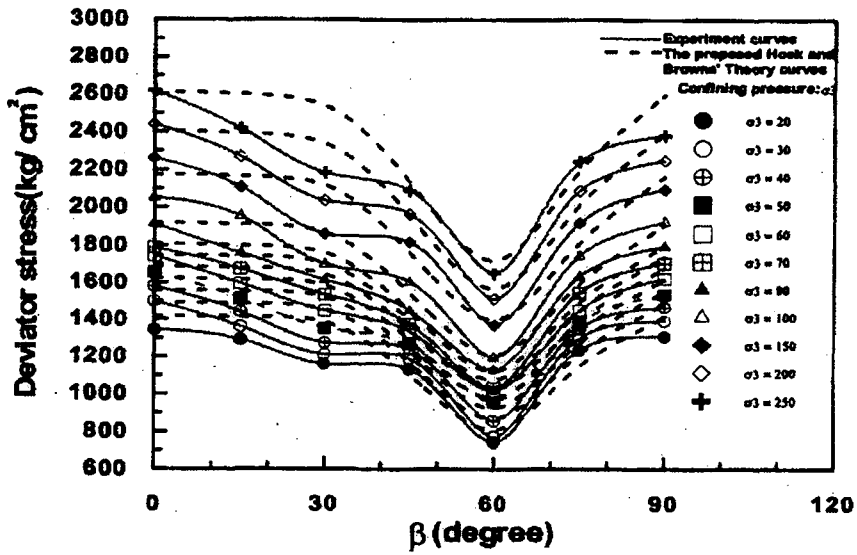
$\alpha_{0^{\circ}}$: 응리각도 0° 에서의 일축 압축강도.

$\alpha_{0^{\circ}}, \beta_{0^{\circ}}$: 응리각도 0° 에서의 α, β 의 값.

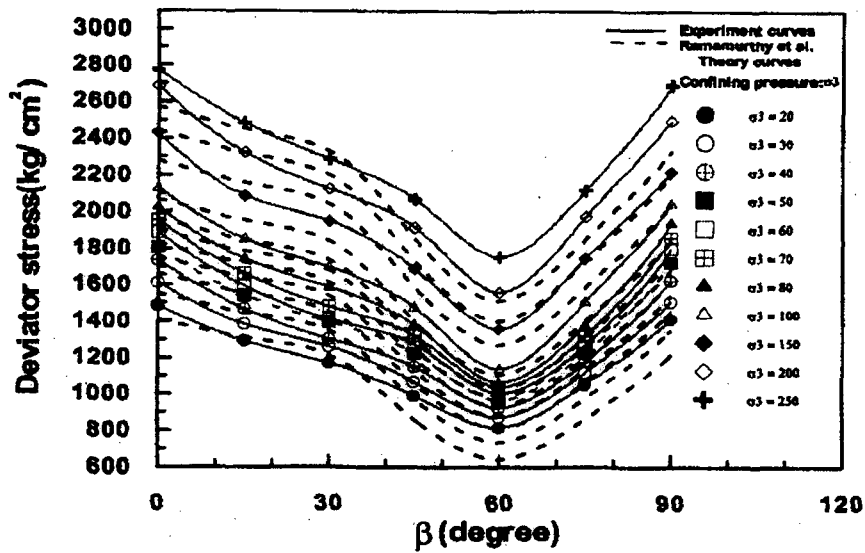
하지만, 상기 식들은 β^0 에 따른 일축 압축강도(σ_c)를 고려하지 않았으므로 다음과 같이 n지수를 통한 일축 압축강도 ($\sigma_c(\beta^0)$)의 변화를 고려하였다.

$$\sigma_c(\beta^0) = A - D(\cos 2(\beta_m - \beta))^n \quad (16)$$

대표적인 결과는 다음의 그림 6과 같다.



(a) Hoek and Brown이 제안한 식에 의한 추세선: 붉은 세일



(b) Ramamurthy와 Raos가 제안한 식에 의한 추세선: 검은 세일

그림 6. 불연속면에 의한 강도 이방성(김영수 외, 2001)

5. 해석상의 문제

이방성과 관련된 대표적인 연구 결과는 footing과 관련하여 Gaziev와 Erlikhman이 발표한 등응력선도이다(그림 7) 등방 지반에서 응력 bulb는 원형으로 나타나지만 이방성의 정도와 방향에 따라 다양한 모양의 응력 bulb가 생성됨을 알 수 있다.

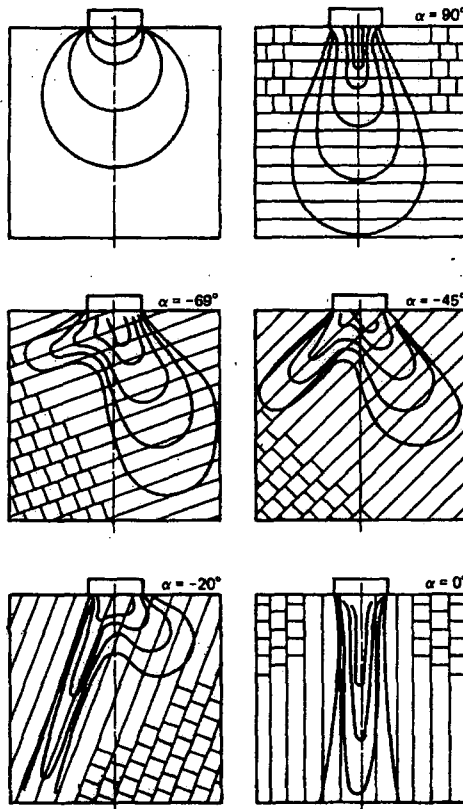


그림 7. Footing에 의한 이방성 지반에서의 등응력선도(Gaziev와 Erlikhman, 1971)

터널과 관련된 연구로는 인접한 2개의 공동이 규칙적인 불연속면을 가진 이방성 암반 내에 굴착된 예를 들 수 있다. 불연속면의 전단계수와 무결암의 전단계수의 비에 따라 우측 공동 주변에서의 수직 및 수평 응력은 그림 8에 나타난 바와 같이 등방 암반 내에서의 응력 분포와는 다름을 알 수 있다. 불연속면의 전단탄성계수가 작을수록 응력 집중은 높아지며, 최대 응력의 위치도 공동에서 멀어짐을 알 수 있다. 이러한 사항은 공동이 지보 설계에 적절히 반영되어야 할 것이다.

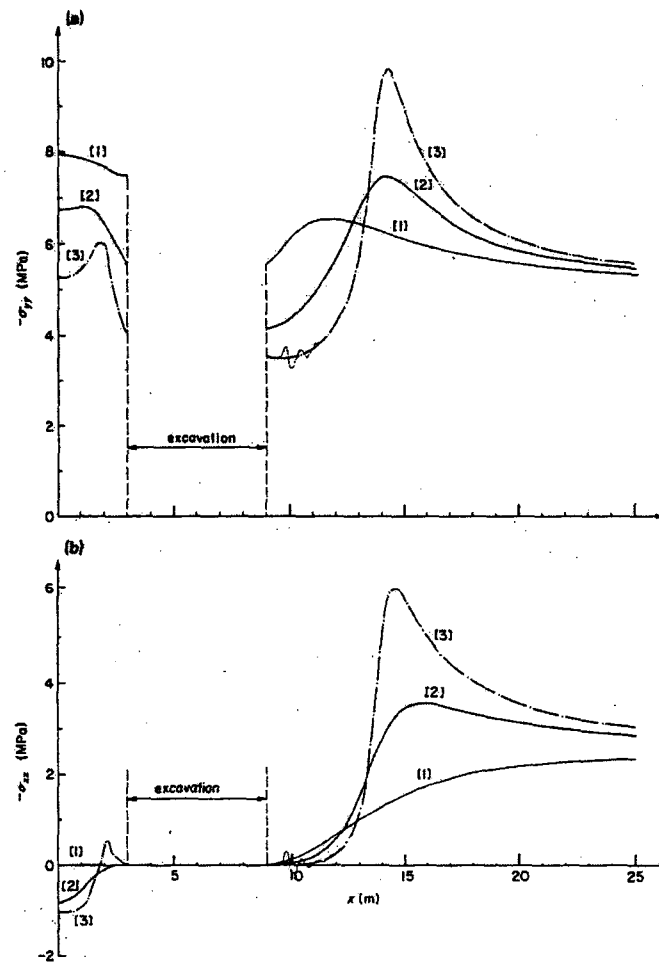
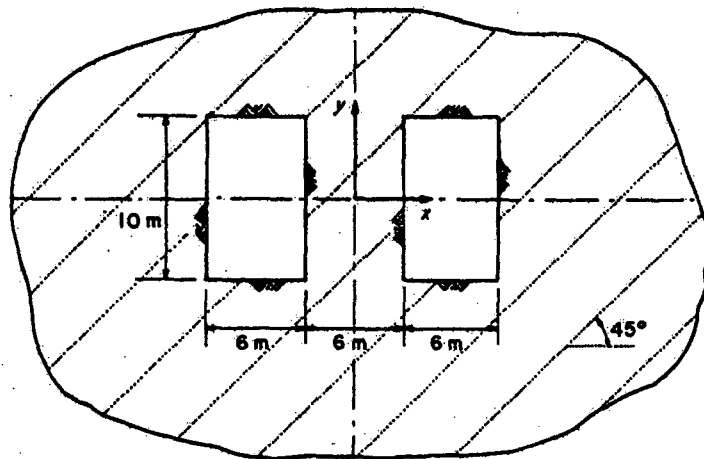


그림 8. 층상 암반 내에 굴착된 2개의 터널 주변에서의 응력집중
 (Crouch & Starfield, 1983) [1] 등방 [2] $G_1=G/10$ [3] $G_1=G/50$

6. 맺음말

본 고에서는 이암 및 셰일과 같은 이방성 암반에서의 실험 및 해석상의 문제를 살펴보았다. 이방성과 등방성의 차이를 탄성학적 측면에서 고찰하였고, 이방성의 원인을 기술하였으며, 이방성 암반의 물성을 구하기 위한 시험법을 알아보았다. 또한 footing과 터널에서 이방성 암반이 등방성 암반과 얼마나 다른 거동을 보이는지 살펴보았다.

본 고는 새로운 연구 결과를 수록하지는 않았으나, 기존 자료를 선택적으로 나열하여 현업 종사자들에게 이방성과 관련한 문제점을 인식시키고, 필요시 설계에 반영할 수 있도록 하고자 하였다.

참고문헌

1. 김영수(2002), "셰일(혈압)의 이방성 파괴 특성", 한국지반공학회지, 제 17권 2호, pp. 13~20
2. 김호영(1995), "이방성 암석에 대한 탄성계수의 실험적 결정", 한국암반공학회지, vol.5, pp. 318~322
3. 박철환(2001), "이방성 암석의 탄성상수 분석연구", 한국암반공학회지, vol.11, pp.59~63
4. 장보안(2001), "단일 시편을 이용한 평면 이방성 암석의 탄성계수 결정", 한국암반공학회지, vol.11, pp.72~78
5. 퇴적암의 이방성 특성 (<http://www.tomok21.com>)
6. Crouch, S. L. and A. M. Starfield 1983, *Boundary element methods in solid mechanics* George Allen & Unwin.
7. Gaziev, E. and S. Erlichman 1971, Stresses and strains in anisotropic foundations, Proc. Symp. on Rock Fracture, ISRM(Nancy), paper II-1.
8. Lekhnitskii, S. G. 1963, *Theory of elasticity of anisotropic elastic body*, Holden-Day Inc.