

## 횡등방성 암반 내 터널의 이방성 해석

최미진<sup>1)</sup>, 양형식<sup>2)\*</sup>

### Anisotropic Analysis of Tunnel in Transversely Isotropic Rock

Mi-Jin Choi and Hyung-Sik Yang

**Abstract** In this study, stress difference between isotropic and transversely isotropic rock mass, and planar principal stresses at the periphery of the tunnel in the rock with various ratio of anisotropy were determined theoretically. Stress differences between isotropic and anisotropic calculations at crown, side walls and floor of a tunnel with assumed stress states were analyzed and compare each other by FLAC<sup>2D</sup>, a finite differential element method. As a result, magnitude and direction of principal stresses in the case of ignoring anisotropy were different from those of anisotropic cases, whatever the stress state was. Stress difference increased as the ratio of anisotropy increased. Direction of anisotropy affected stress difference, especially in the cases of anisotropic directions of 45° and 135° of counterclockwise from x direction.

**KeyWords** Transversely isotropic, Direction of anisotropy, Ratio of anisotropy, Tunnel direction, FLAC<sup>2D</sup>

**초 록** 본 연구에서는 횡등방성 암반에서 이방성 정도에 따른 응력 차와 3차원 주응력 하의 터널방향, 이방성 정도에 따른 터널 단면에서의 2차원 응력 차를 이론적으로 구하였다. 구해진 응력상황 하의 터널에 대하여 FLAC<sup>2D</sup>를 이용하여 이방성 고려여부에 따른 천단, 측벽, 바닥의 응력 차를 비교·검토하였다. 그 결과 이방성을 무시할 경우 응력 조건에 무관하게 주응력의 크기와 방향이 다르게 나타나며, 이방성 정도가 커질수록 응력 차가 증가함을 알 수 있다. 이방성의 방향에 따라 응력 차가 달리 나타나며, 특히 이방성의 방향이 x축으로부터 시계반대방향으로 45°와 135°에서 가장 큰 응력 차가 발생함을 확인하였다.

**핵심어** 횡등방성, 이방성 방향, 이방성 정도, 터널 방향, FLAC<sup>2D</sup>

## 1. 서 론

현지 암반의 초기 응력 산정에 있어서 이방성을 무시하고 초기응력을 측정할 경우 응력 값에 큰 차이가 발생할 수 있다. 그러므로 암반의 이방성을 고려해야 정확한 초기응력 값을 결정할 수 있다(Amadei, 1996, van Heerden, 1983).

본 연구에서는 구성방정식을 이용하여 다양한 응력조건 하의 횡등방성 암반에 대하여 이방성 정도에 따라 이방성을 고려한 경우에 대해 고려하지 않는 경우의 응력 차를 구하였다. 또 3차원 주응력과 방향이 주어진 경우

터널방향, 이방성 정도에 따른 터널 단면에서의 2차원 응력과 이 때 발생하는 이방성을 고려한 경우에 대해 고려하지 않는 경우의 응력 차를 비교한다.

이를 바탕으로 유한차분법 수치해석 프로그램인 FLAC<sup>2D</sup>를 이용하여 이방성 암반에서의 이방성 정도와 이방성 방향에 따라 이방성 고려 여부에 따른 터널 천단, 측벽, 바닥의 응력 차를 비교·검토하였다.

## 2. 이방성 암반의 초기응력

### 2.1 이방성 암반의 구성방정식

재료의 등방성을 가정할 경우 구성방정식은 간단한 Hooke의 법칙으로 표현할 수 있다. 그러나 실제 암석의 경우 방향에 따른 탄성적 성질은 동일하지 않으며 일정한 평면에 대칭해서 탄성적 성질이 일치하지만 다른 평면을 설정하였을 때는 탄성적 성질이 상이하다.

<sup>1)</sup> 전남대학교 대학원 지구시스템공학과 박사과정

<sup>2)</sup> 전남대학교 건설지구환경공학부 교수

\* 교신저자 : hsyang@jnu.ac.kr

접수일 : 2005년 7월 25일

심사 완료일 : 2005년 10월 31일

이방성 물체의 구성방정식이 완전한 이방성을 나타내기 위해서는 21개의 독립 상수가 필요하며 특정 평면이나 축에 대하여 대칭적인 탄성적 성질이 존재할 경우 독립상수의 숫자는 줄어드는데, 한 평면이 대칭면이 되고 그 평면에 수직인 모든 축에 대하여 탄성적 성질이 대칭인 경우에는 독립상수의 수는 5개로 줄어들며 이를 횡등방성(transversely isotropic, 혹은 평면이방성)이라 한다. 횡등방성은 석탄, 편암, 점판암, 화강암, 사암 같은 암석에서 찾아볼 수 있다(Amadei, 1996).

Fig. 1과 같이 n-s-t 방향에 수직인 세 개의 평면을 탄성적 성질의 대칭면으로 하는 직교 등방성 모델을 살펴보면, 이 모델에 대한 Hooke 법칙은 다음처럼 표현될 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_2}{E_2} & -\frac{\nu_1}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_2}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_2}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_1}{E_1} & -\frac{\nu_2}{E_2} & \frac{1}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} \quad (1)$$

만일 암석이 Fig 1에 있는 3개의 ns, nt 또는 st 평면 중 1개가 횡등방성이라면 식 (1)을 적용할 수 있는데 이 경우 n, s, t 좌표계에서 암석의 변형성을 묘사하기 위해 단지 5개의 독립적인 탄성 정수가 필요하다. 여기서  $E_1$ ,  $E_2$ 는 각각 횡등방성 평면과 여기에 수직인 방향의 탄성계수이고  $\nu_1$ ,  $\nu_2$ 는 각각 횡등방성 평면에 각각 평행과 수직으로 작용하는 응력에 대한 횡등방성 평면에서의

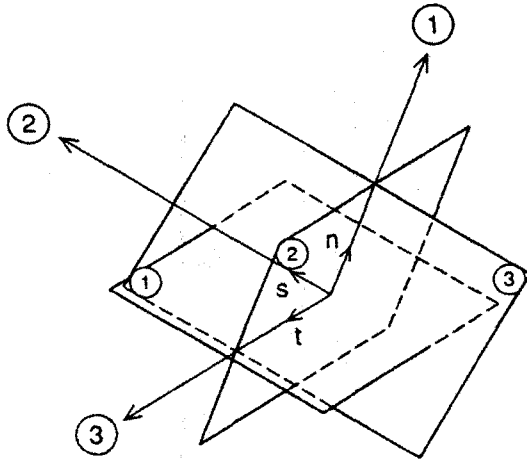


Fig. 1. Orthotropic rock with three plane of symmetry normal to the n, s, t directions(Amadei, 1996)

횡방향 변형률을 통해 구해지는 포아송 비이며,  $G_2$ 는 횡등방성 평면에 수직인 평면에서의 전단탄성계수이다.

편암, 편마암, 천매암, 사암, 셰일 등의 암석에 있어서 횡등방성 평면은 편리 또는 층리면에 평행하다고 가정한다. 계수  $G_2$ 는 Saint-Venant가 제시한 다음의 경험식을 통해  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $\nu_1$ ,  $\nu_2$ 의 항으로 표현할 수 있으며 본 연구에서도 식 (2)를 이용하여  $G_2$ 를 구하였다(Saint-Venant, 1863).

$$\frac{1}{G_2} = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + 2\frac{\nu_2}{E_2} \quad (2)$$

이 식은 경험식으로서 본 연구와 같이 이방성 정도가 높지 않은 변성암 계열의 암석은 경험식의 값과 실험값이 비교적 잘 일치하는 것으로 알려져 있다(Worotnicki, 1993).

### 2.2 이방성 암반의 초기응력측정 이론

Fairhurst & Berry(1968)는 횡등방성 암반에 대한 응력측정 이론을 정립한 바 있으며 본 연구에서는 그들의 이론에 따라서 초기응력을 결정하였다.

#### 2.2.1 이방성을 고려한 경우

먼저 횡등방성 평면이 보여 홀의 축과 수직인 경우의 응력과 변형률과의 관계식은 다음과 같다.  $\epsilon_\omega$ 를 보여 홀의 벽면에서 양의방향  $\theta$ 에 대해서 각도  $\omega$ 만큼 기울어진 점선 변형률 성분이라고 하며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_\omega = b_1\sigma_x + b_2\sigma_y + b_3\sigma_z + b_4\tau_{xy} + b_5\tau_{yz} + b_6\tau_{zx} \quad (3)$$

$b_i$ 의 값을 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} b_1 &= \left[ \frac{2}{E_1} \left( 1 - \frac{E_2}{E_1} \nu_2^2 \right) \cos 2\theta - \frac{1}{E_1} \right] \cos^2 \omega + \frac{\nu_2}{E_1} \sin^2 \omega \\ b_2 &= - \left[ \frac{2}{E_1} \left( 1 - \frac{E_2}{E_1} \nu_2^2 \right) \cos 2\theta + \frac{1}{E_2} \right] \cos^2 \omega + \frac{\nu_2}{E_1} \sin^2 \omega \\ b_3 &= \frac{\nu_2}{E_1} \cos^2 \omega - \frac{1}{E_2} \sin^2 \omega \\ b_4 &= \frac{4}{E_1} \left( 1 - \frac{E_2}{E_1} \nu_2^2 \right) \sin 2\theta \cos^2 \omega \\ b_5 &= - \frac{2}{G_2} \cos \theta \sin \omega \cos \omega \\ b_6 &= \frac{2}{G_2} \sin \omega \sin \theta \cos \omega \end{aligned} \quad (4)$$

다음은 등방평면과 보여 홀의 축이 평행한 경우의 식이다.

$$\varepsilon_{\omega} = \frac{1}{E_1} [c_1 \sigma_x + c_2 \sigma_y + c_3 \sigma_z + c_4 \tau_{xy} + c_5 \tau_{yz} + c_6 \tau_{zx}] \quad (5)$$

여기서 계수  $c_i$  는 다음과 같이 정리 할 수 있다(Van Heerden, 1983).

$$\begin{aligned} c_1 &= -[F_1(\theta)(F_3(\theta) + F_4(\theta))/H + \nu_1 F_2(\theta)] \cos^2 \omega + \nu_1 \sin^2 \omega \\ c_2 &= [F_1(\theta)(F_4(\theta) - F_3(\theta))/H + \nu_2 F_2(\theta)] \cos^2 \omega + \nu_2 \sin^2 \omega \\ c_3 &= F_2(\theta) \cos^2 \omega - \sin^2 \omega \\ c_4 &= [2F_3(\theta)F_1(\theta)/H] \cos^2 \omega \\ c_5 &= -2(1 + \nu_1)(1 + t) \sin \omega \cos \omega \cos \theta \\ c_6 &= 2(1 + \nu_1)(1 + t) \sin \omega \cos \omega \sin \theta \end{aligned} \quad (6)$$

추가적인 상수는 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} F_1(\theta) &= \sin^4 \theta - 2\nu_2 \sin^2 \theta \cos^2 \theta + (E_1/E_2) \cos^4 \theta \\ &\quad + (E_1/G) \sin^2 \theta \cos^2 \theta - (\nu_1 \sin^2 \theta + \nu_2 \cos^2 \theta)^2 \\ F_2(\theta) &= \nu_1 \sin^2 \theta + \nu_2 \cos^2 \theta \\ F_3(\theta) &= k_3(k_1 + 1) + (k_1 - 1)^2 - (k_1 - k_3 + 1)(k_1 - 1) \cos 2\theta \\ F_5(\theta) &= k_3(k_1 + k_3 + 1) \sin 2\theta \\ F_4(\theta) &= (k_1 + k_3 + 1)[k_1 - 1 - (k_1 + 1) \cos 2\theta] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} l_{11} &= (1 - \nu_1^2)/E_1 \\ l_{12} &= -\nu_2(1 + \nu_1)/E_1 \\ l_{22} &= (1/E_1) - (\nu_2^2/E_1) \\ k_1 &= \sqrt{l_{11}/l_{22}} \\ k_2 &= (l_{12} + 1/2G_2)/l_{22} \\ k_3 &= \sqrt{2(k_1 + k_2)} \\ t &= \sqrt{E_1/2G_2(1 + \nu_1)} \end{aligned} \quad (8)$$

### 2.2.2 이방성을 고려하지 않은 경우

다음은 등방성 암반에서의 응력과 변형률과 관계를 나타낸 구성방정식이다.

$$\varepsilon_{\omega} = \frac{1}{E_1} [a_1 \sigma_x + a_2 \sigma_y + a_3 \sigma_z + a_4 \tau_{xy} + a_5 \tau_{yz} + a_6 \tau_{zx}] \quad (9)$$

여기서 계수  $a_i$  는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} a_1 &= [2(1 - \nu^2) \cos 2\theta - 1] \cos^2 \theta + \nu \sin^2 \omega \\ a_2 &= -[2(1 - \nu^2) \cos 2\theta + 1] \cos^2 \omega + \nu \sin^2 \omega \\ a_3 &= \nu \cos^2 \omega - \sin^2 \omega \\ a_4 &= 4(1 - \nu^2) \sin 2\theta \cos^2 \omega \\ a_5 &= -4(1 + \nu) \cos \theta \sin \omega \cos \omega \\ a_6 &= 4(1 + \nu) \sin \theta \sin \omega \cos \omega \end{aligned} \quad (10)$$

### 2.3 방법 및 결과

본 절에서는 다양한 응력조건 하에 있는 횡등방성 암반의 경우 이방성이 응력에 미치는 영향에 대해 알아보 고자 다음과 같은 방법으로 이방성을 고려한 경우에 대 해 고려하지 않는 경우의 응력 차를 구하였다. 본 연구 에서는 Fig 2, 3과 같이 보어 홀의 벽면에 3개의 로제트 게이지(한 개의 로제트 당 4개의 변형률 스트레인 게이지)를 부착하는 CSIR 방식을 사용하였다.

Table 1은 CSIR방식의 로제트와 변형률 스트레인 게

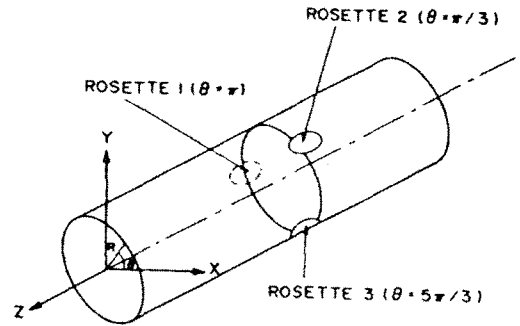


Fig. 2. The positions of the three strain gauge rosettes and the coordinate system used

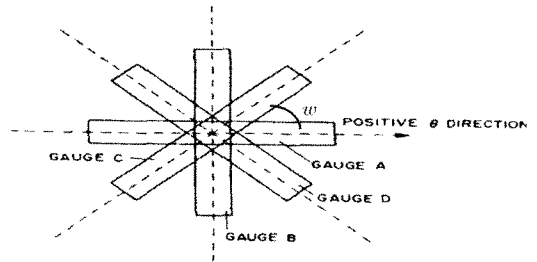


Fig. 3. Strain gauge configuration for each rosette viewed along axis of borehole

Table 1. Orientation angles for the CSIR triaxial strain

Strain gauge No.	Angle $\theta$	Angle $\omega$
1	180	0
2	180	90
3	180	135
4	180	45
5	60	0
6	60	90
7	60	135
8	60	45
9	300	0
10	300	90
11	300	135
12	300	45

이지의 방향을 나타낸다.

이방성을 고려하고 3개의 주응력의 크기 상관관계에 따라 구별되는 5가지 종류의 주응력조건하에 있는 횡등방성 암반에 보어 홀이 횡등방성평면에 수직인 경우와 평행한 경우에 대해 이방성 정도( $E_2/E_1$ ) 0.5, 1.0, 2.0에 대한 이방성을 고려하지 않는 경우의 응력과 비교하였다. 본 절에서 이방성 정도가 1.0인 경우 영률은 다음과 같은 식을 이용하였다.

$$E = \sqrt{E_1 \cdot E_2} \tag{11}$$

Table 2와 3은 횡등방성 암반에서 임의로 가정한 다섯 가지 주응력조건 하에서 응력 값과 이방성 정도에 따른 영률이다.

Table 4는 이방성을 고려한 다섯 가지 주응력 조건하에 있는 횡등방성 암반의 경우 구성방정식을 이용하여 이방성을 고려하지 않고 해석한 경우의 주응력을 나타낸다.

본 절에서는 다섯 가지 응력 조건하에 있는 횡등방성 암반의 경우 이방성 정도에 따라 등방성으로 해석할 경우의 주응력을 나타내었다. 등방성으로 해석할 경우 이방성 정도가 0.5인 경우 10~70 %의 응력 차가 발생하며 이방성 정도가 2.0인 경우에는 20~80 %의 차가 발

**Table 2.** Assumed five combination cases of principal stresses examples in transversely-isotropic rock

Classification	$\sigma_1 \gg \sigma_2 > \sigma_3$	$\sigma_1 > \sigma_2 \gg \sigma_3$	$\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$	$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$	$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$
Stress values(MPa)	5>>>3>2	4>3>>1	3=3>2	3>2=2	3=3=3

**Table 3.** Elastic modulus of transversely-isotropic rock

	$E_2/E_1=0.5$		$E_2/E_1=1.0$		$E_2/E_1=2.0$	
	$E_1$ (GPa)	$E_2$ (GPa)	$E_1$ (GPa)	$E_2$ (GPa)	$E_1$ (GPa)	$E_2$ (GPa)
All stresses classification	40	20	28.3	28.3	20	40
	40	20	28.3	28.3	20	40
	40	20	28.3	28.3	20	40
	40	20	28.3	28.3	20	40
	40	20	28.3	28.3	20	40

**Table 4.** Principal stress results calculated by the constitutive equation

Stress classification on transversely isotropic rock	$(E_2/E_1)$ ratio	A vertical situation on transversely isotropic plane			A parallel situation on transversely isotropic plane		
		$\sigma_1$ (MPa)	$\sigma_2$ (MPa)	$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_1$ (MPa)	$\sigma_2$ (MPa)	$\sigma_3$ (MPa)
$\sigma_1 \gg \sigma_2 > \sigma_3$ (5>>>3>2)	0.5	3.5	3.3	3.1	3.8	3.0	1.8
	1.0	5.0	3.0	2.0	5.0	3.0	2.0
	2.0	6.3	3.6	1.1	5.8	3.9	2.6
$\sigma_1 > \sigma_2 \gg \sigma_3$ (4>>>3>1)	0.5	2.8	2.7	1.6	3.3	3.3	1.2
	1.0	4.0	3.0	1.0	4.0	3.0	1.0
	2.0	5.3	3.9	0.5	4.6	3.3	1.0
$\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ (3=3>2)	0.5	2.3	4.1	3.4	2.7	4.5	2.2
	1.0	3.0	3.0	2.0	3.0	3.0	2.0
	2.0	4.1	4.9	1.5	3.5	4.5	2.8
$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ (3>2=2)	0.5	2.2	3.2	2.5	2.4	2.6	1.8
	1.0	3.0	2.0	2.0	3.0	2.0	2.0
	2.0	3.8	2.8	1.3	3.5	3.3	2.8
$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ (3=3=3)	0.5	2.4	5.1	5.1	2.8	5.0	3.0
	1.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	2.0	4.0	5.2	2.3	3.5	5.3	4.4

생한다. 또한 응력조건과 무관하게  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 의 크기와 방향이 달라지는 현상이 나타났다. 그러므로 횡등방성 암반의 경우 이방성을 고려해야 한다.

**3. 좌표변환을 통한 터널 단면에서의 초기응력 결정**

본 절에서는 3차원 주응력이 주어진 경우 좌표변환을 통하여 이방성 정도와 터널 방향에 따른 터널 단면에서의 이방성을 고려한 경우에 대한 고려하지 않는 경우의 응력 차를 알아보려고 한다.

**3.1 좌표변환을 통한 응력식**

3차원 직각좌표계의 6개 응력 요소  $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{yz}$  및  $\tau_{zx}$ 가 주어지면 물체 내 임의점 P에서의 응력 상태가 완전히 결정된다. 즉 이들 응력 요소들로부터, P 점을 통하는 임의의 다른 평면상의 수직응력 및 전단응력을 계산할 수 있다.

3차원 주응력의 경사방향과 경사가 주어진 경우 축변환을 이용하여 터널 방향에 따른 단면에서의 2차원 응력을 구할 수 있다. 2차원 터널 단면에서의 응력은 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_1 \cos^2(x', x) + \sigma_2 \cos^2(x', y) + \sigma_3 \cos^2(x', z) \\ \sigma_y &= \sigma_1 \cos^2(y', x) + \sigma_2 \cos^2(y', y) + \sigma_3 \cos^2(y', z) \\ \tau_{xy} &= \sigma_1 \cos(x', x) \cos(y', x) + \sigma_2 \cos(x', y) \cos(y', y) \\ &\quad + \sigma_3 \cos(x', z) \cos(y', z) \end{aligned} \tag{12}$$

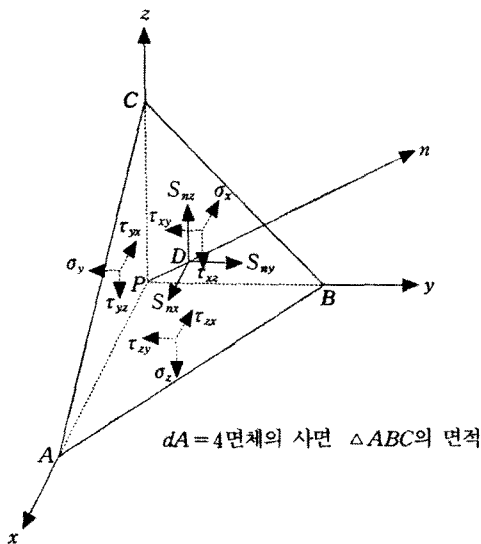


Fig. 4. Stress components on a tetrahedron

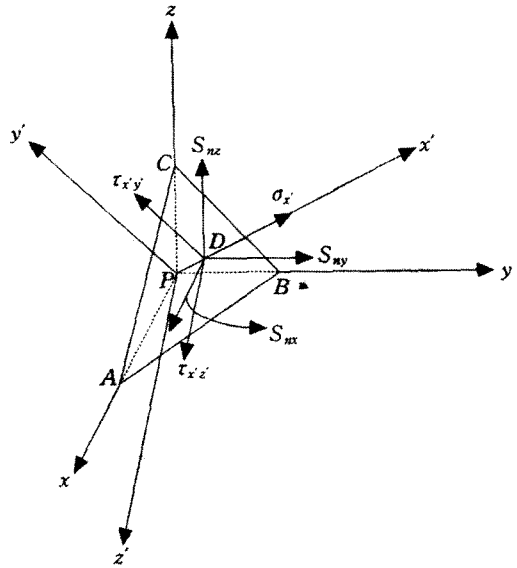


Fig. 5. Stress for axis of coordinates transformation

**3.2 방법 및 결과**

3차원 주응력의 경사와 경사방향에 주어진 경우 터널 방향에 따른 2차원 터널 단면에서 이방성을 고려한 경우에 대한 고려하지 않는 경우의 응력 차를 이방성 정도에 따라 알아보았다. Fig 6은 터널의 좌표계를 나타낸다.

터널은 경사방향(trend)과 경사(plunge)를 가지고 있으나 이 연구에서는 수평 터널(경사 0°)로 가정하였으며, 경사방향은 x축으로부터 0°에서 180°까지 시계반대방향으로 15°간격으로 정하여 이방성 정도가 1.0, 1.25, 2.0인 경우의 터널 단면에서의 응력 차를 구하였다. Van Heerden(1983) 논문의 3차원 주응력과 경사 그리고 경사방향을 참고하였다. Table 5는 3차원 주응력, 경사, 경사방향을 나타낸다.

Table 6은 이방성 정도에 대한 터널 방향에 따른 2차원 터널단면에서의 응력이다.

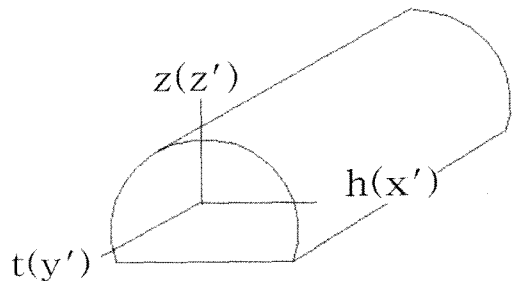


Fig. 6. Coordinate system of a tunnel

**Table 5.** Assumed In-situ principal stresses and directions(dip direction:  $\alpha$  dip:  $\delta$ )

Modulus ratio	$\sigma_1$ (MPa)	$\alpha$ (°)	$\delta$ (°)	$\sigma_2$ (MPa)	$\alpha$ (°)	$\delta$ (°)	$\sigma_3$ (MPa)	$\alpha$ (°)	$\delta$ (°)
1.00	14.72	188	37	4.63	286	11	2.25	30	50
1.25	15.55	187	38	4.45	283	8	1.38	23	51
2.00	16.19	186	37	3.66	280	5	-0.49	16	53

(+: tensile stress, - : compress stress)

**Table 6.** Stress by tunnel direction in two-dimension tunnel section

$E_2/E_1$ stress(MPa) tunnel direction	1.0			1.25			2.0		
	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\tau_{xy}$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\tau_{xy}$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\tau_{xy}$
0°	4.5	10.2	0.5	4.4	10.2	0.4	3.6	10.2	0.4
15°	4.7	10.1	-1.0	4.6	10.0	-1.1	3.9	9.9	-1.3
30°	5.5	9.3	-2.2	5.5	9.1	-2.3	4.9	8.9	-2.6
45°	6.9	7.9	-2.9	6.9	7.7	-2.9	6.5	7.3	-3.3
60°	8.4	6.4	-2.7	8.4	6.2	-2.7	8.2	5.6	-3.0
75°	9.6	5.2	-1.9	9.6	5.0	-1.8	9.5	4.3	-2.0
90°	10.2	4.5	-0.5	10.2	4.4	-0.4	10.2	3.6	-0.4
105°	10.1	4.7	1.0	10.0	4.6	1.1	9.9	3.9	1.3
120°	9.3	5.5	2.2	9.1	5.5	2.3	8.9	4.9	2.6
135°	7.9	6.9	2.9	7.7	6.9	2.9	7.3	6.5	3.3
150°	6.4	8.4	2.8	6.2	8.4	2.7	5.6	8.2	3.0
165°	5.2	9.6	1.9	5.0	9.6	1.8	4.3	9.5	2.0
180°	4.5	10.2	0.5	4.4	10.2	0.4	3.6	10.2	0.4

(+: tensile stress, - : compress stress)

다음은 횡등방성 암반에서 이방성을 고려한 경우에 대한 고려하지 않는 경우의 이방성 정도에 따른 응력 차를 나타내는 그래프이다.

Fig. 7과 8에서  $\sigma_x$ 는 이방성 정도가 커질수록 터널 횡방향, 즉 x축과 평행할 때 오차가 크게 발생하며  $\sigma_y$ 는 x축과 평행할 때 응력 오차가 낮으며 x축에 수직할 때(y방향) 응력 오차가 크게 발생한다.

전단응력의 경우  $E_2/E_1=1.25$ 일 경우, 터널방향이 x축과 평행한 경우와 수직할 경우 응력 오차가 크게 발생한다.

횡등방성 암반에서 이방성 정도가 1.25인 경우 이방성을 고려하지 않고 해석을 수행할 경우 터널방향에 따라 다르지만  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ 의 오차는 최대 4.25 % 정도 발생하며  $\tau_{xy}$ 의 오차는 최대 20 % 정도 발생하며 이방성의 비가 2.0인 경

우에는  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ 오차의 경우 최대 20 % 정도의 오차가 발생하며  $\tau_{xy}$ 의 경우 최대 30 % 정도의 오차가 발생한다.

다음은 이방성 정도에 따른 주응력 오차를 나타낸 그래프이다.

Fig. 9는 이방성 정도에 따른 주응력의 오차를 나타내고 있으며 최대주응력 보다는 최소주응력의 오차가 크게 발생함을 알 수 있다. 그리고 이방성 정도가 커질수록 오차가 크게 발생함을 알 수 있다. 이방성 정도가 1.25인 경우 최대 전단응력은 3 % 내외의 오차를 보이나 이방성 정도가 2.0 이상인 경우에는 최대 전단응력의 오차가 최고 13 % 정도 발생하므로 이방성이 강한 횡등방성 암반에서는 이방성을 고려해야 한다고 사료된다.

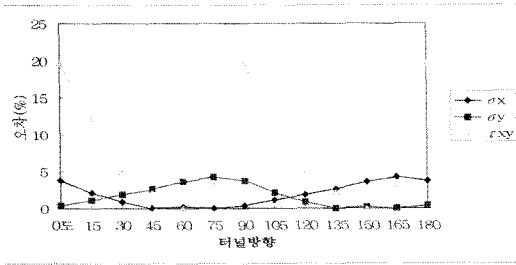


Fig. 7. Stress error in case of  $E_2/E_1=1.25$

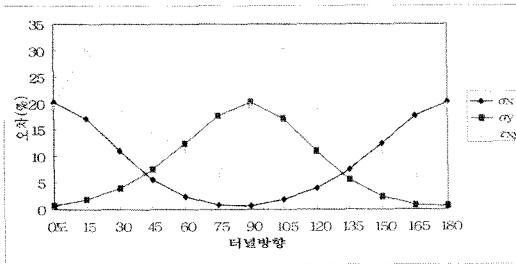


Fig. 8. Stress error in case of  $E_2/E_1=2.0$

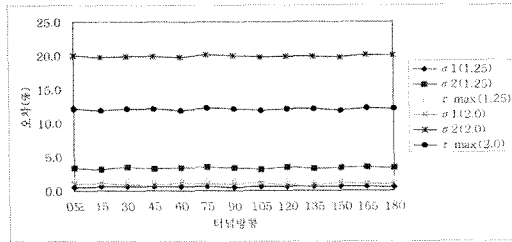


Fig. 9. Error of Principal stresses according to  $E_2/E_1$  ratio

### 4. 수치해석을 통한 응력 결정

#### 4.1 해석모델 및 방법

본 연구에서는 2차원 유한차분 해석 프로그램인 FLAC 2D를 이용하여 이방성 정도에 따른 횡등방성 암반에서 이방성을 고려한 경우에 대한 고려하지 않을 때 이방성 방향에 따른 터널 천단, 측벽, 바닥 부분에서의 응력 오차를 비교·검토하고자 한다. 이방성 방향은 x 축으로부터 시계 반대방향으로 0°에서 180°까지 15° 간격( $\theta$ )으로 설정하였다. 본 연구에서는 해석시간의 단축을 위하여 록 볼트와 슛크리트는 생략하였다.

지반은 암반 등급(RMR) III에 속하는 편마암으로 구성되어 있으며, 지반의 물성치는 Table 7과 같다.

2차원 해석의 경우 평면변형률 조건에 의한 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 모델의 크기는 가로 150 m,

Table 7. Input data

unit weight( $kg/m^3$ )	$\nu_{xy}$	$\nu_{xz}$	$\theta$					
2400	0.27	0.25	15° 간격					
ratio of anisotropy 1.0			ratio of anisotropy 1.25	ratio of anisotropy 2.0				
$E_x$ (GPa)	$E_y$ (GPa)	$G_{xy}$ (GPa)	$E_x$ (GPa)	$E_y$ (GPa)	$G_{xy}$ (GPa)	$E_x$ (GPa)	$E_y$ (GPa)	$G_{xy}$ (GPa)
3.0	3.0	1.18	3.0	3.75	1.34	3.0	6.0	1.69

세로 100 m이고 터널 단면 크기는 폭은 12 m, 높이는 9 m이며 토피의 두께는 30 m이다. 해석에 사용된 해석 요소망은 Fig 10과 같다.

#### 4.2 해석결과

횡등방성 암반에서 이방성( $E_2/E_1$ )의 정도가 1.0, 1.25, 2.0인 경우에 대하여 이방성의 방향에 따른 터널의 천단, 우측 벽, 좌측 벽, 바닥 부분에서의 응력변화를 알아보았다.

Fig 11은 이방성 정도에 따른 터널의 천단과 측벽, 그리고 바닥부분에서의  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ 의 응력을 그래프로 나타내었다.

그래프에서 터널의 천단, 우측 벽, 좌측 벽, 바닥의 주응력은 이방성 방향 90°를 중심으로 좌우대칭의 분포를 보였다.

횡등방성 암반에서 등방성인 경우와 이방성 정도가 1.25, 2.0인 경우와 비교한 결과 이방성 정도가 1.25인 경우 터널의 천단, 우측 벽, 좌측 벽, 바닥에서 최대주응력의 변화가 이방성의 방향에 따라 크게 변화하며 이방성 정도가 2.0인 경우에는 x축으로부터 45°와 135°에서 최대주응력과 최소주응력이 가장 크게 나타난다.

횡등방성 암반에서의 이방성 정도에 따른 이방성을 고려한 경우에 대한 고려하지 않는 경우의 응력 차를

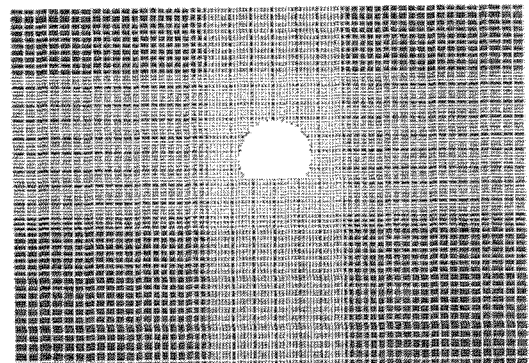


Fig. 10. Grid of the numerical model

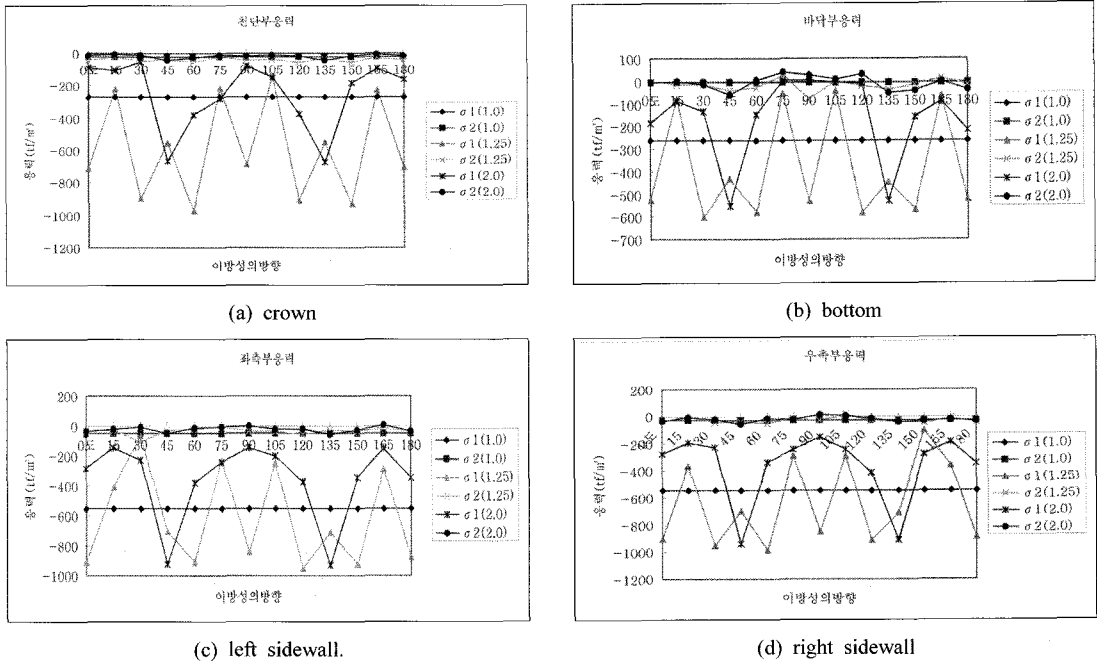


Fig. 11. Principal stresses around tunnel(+: tensile stress, -: compress stress)

살펴보면 이방 비가 2.0인 경우 터널의 우측 벽과 좌측 벽의 경우 45°와 135°에서 가장 큰 응력 차가 발생하며 대체적으로 20~93%의 응력 차가 발생한다. 또한 터널의 천단과 바닥에서는 응력 차가 대체적으로 10~160%의 응력 차가 발생하였다.

횡등방성 암반에서의 이방성 정도가 증가함에 따라 이방성을 고려한 경우에 대한 고려하지 않는 경우의 응력 차가 증가하였다.

이방성 정도 1.25의 경우 지그재그 형태의 응력 변화가 이방성 정도가 증가함에 따라 x축으로부터 시계반대방향의 45°와 135°에서 응력 차가 크게 발생함을 알 수 있다.

그러므로 횡등방성 암반에서 지하구조물이 건설될 경우 이방성을 고려해야 하나 특히 이방성의 방향이 x축으로부터 시계반대방향으로 45°와 135°일 때 응력 차가 크게 발생하므로 더욱 주의해야 할 필요성이 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 횡등방성 암반에서 다양한 응력조건에서 이방성 정도에 따른 보어 홀의 응력 차를 알아보고, 좌표 변환을 통해 터널 방향에 따른 응력 차, 그리고 유한차분 수치해석 프로그램인 FLAC<sup>2D</sup>를 이용하여 터널의 천단, 우측 벽, 좌측 벽, 바닥에서 이방성 고려 여부

에 따른 응력 차를 구하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 횡등방성 지반에서 등방 해석을 할 때 응력조건에 관계없이 이방성 정도가 0.5 이상인 경우,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ 의 크기와 방향이 다르게 나타난다. 이때 응력 차는 10~70% 정도 발생하며 이방성 정도가 2.0인 경우에는 20~80%의 응력 차가 발생한다. 그러므로 이방성이 강한 횡등방지반의 경우 이방성을 고려해야 할 것으로 생각된다.
2. 횡등방성 암반 내 터널이 존재할 경우 터널 방향과 이방성 정도에 따라 응력 차이가 있으며 이방성 정도가 1.25인 경우 모든 터널 방향에서 최대 전단응력이 3% 내외의 차를 보이나 이방성 정도가 2.0인 경우는 모든 터널 방향에서 13% 정도의 최대 전단응력 차가 발생한다. 그러므로 이방성이 일정 이상일 경우의 횡등방성 암반에서는 이방성을 고려해야 할 것으로 보인다.
3. 이방성 정도가 2.0인 지반 내에 터널이 존재할 때 천단과 바닥에서 이방성을 고려한 경우에 대한 고려하지 않는 경우의 응력 차는 이방성 방향에 따라 10~160% 정도이며 좌측 벽과 우측 벽의 경우 20~93%의 응력 차가 발생한다. 특히 이방성의 방향이 x축으로부터 시계반대방향으로 45°와 135°에서 차가 크게 발생한다.

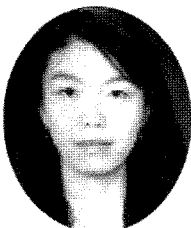


횡등방성 암반 내 지하 구조물이 건설될 경우 이방성을 고려하지 않고 해석할 경우 응력해석에 큰 차이가 나타나므로 이방성을 고려한 설계가 필요하다.

## 참고문헌

1. 김호영, 1995, 이방성 암석에 대한 탄성계수의 실험적 결정, 한국암반공학회지 5, pp.318~322.
2. 민기복, 이정인, 최해문, 2002, 공벽변형법에 의한 이방성 암반의 초기응력 측정에 관한 연구, 한국암반공학회 12, pp.237~247.
3. 박철환, 2001, 이방성 암석의 탄성상수 분석연구, 한국암반공학회지 11.1, pp.59~63.
4. 양형식, 장명환 저, 2002, 암석파괴이론, 전남대출판부, pp.226~229.
5. 이희근, 양형식, 2002, 암석역학, 서울대학교 출판부, p.12~16, pp.419~420.
6. 장보안, 나광희, 장명환, 2001, 단일 시편을 이용한 평면 이방성 암석의 탄성계수 결정, 한국암반공학회지 11.1, pp.72~78.
7. Amadei, B., 1996, Important of anisotropy when estimating and measuring in-situ stress in rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 33.3, pp.293~325
8. Amadei, B., Stephansson, O., 1997, Rock Stress and Its Measurement, Chapman & Hall.
9. Berry, D. S., 1968, The theory of stress determination by means of stress relief techniques in a transversely isotropic medium, Tech. Rept. No.5-68, Missouri River Division, Corps of Engineers, Omaha, Nebraska 68101.
10. Saint-Venant B., 1863, Sur la distribution des elasticites autour de chaque point d' un milieu de contexture quelconque. J. de Mathematiques Pures et Appliquees p.7~8, pp.353~430, pp. 257~261.(In France)
11. van Heerden, W. L., 1983, Stress strain relations applicable to overcoring techniques in transversely isotropic rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 20.6, pp.277~282.
12. Worotnicki, G., 1993, CSIRO triaxial stress measurement cell, Comprehensive Rock Engineering, 3, pp.329~394.

### 최 미 진



2003 조선대학교 공과대학 자원공학과  
학사  
2005 전남대학교 대학원 지구시스템공학과  
석사

Tel: 062-530-0824  
E-mail: wangle@hanmail.net  
현재 전남대학교 대학원 지구시스템공학과  
박사과정

### 양 형 식



1979 서울대학교 공과대학 자원공학과  
학사  
1981 서울대학교 대학원 자원공학과 석사  
1987 서울대학교 대학원 자원공학과 박사

Tel: 062-530-1724  
E-mail: hsyang@jnu.ac.kr  
현재 전남대학교 건설지구환경공학부  
교수