

## 포화된 암반에 굴착된 원형공동의 수리-역학적 거동

이 연 규<sup>1)</sup>, 신 희 순<sup>2)</sup>

### Hydro-mechanical Behavior of a Circular Opening Excavated in Saturated Rockmass

Youn-Kyou Lee and Hee-Soon Shin

**Abstract** : Excavation of an opening in a saturated porous rock may lead to the development of pore pressure around the opening due to the redistribution of initial rock stresses. The built-up of pore pressure, in turn, may affect the mechanical behavior of rock mass and give the different pattern of stress distribution around the opening from that of the case where the coupling is neglected. In this study, the short time response of an opening excavated in saturated ground under anisotropic initial stress conditions was investigated numerically. Not on the wall of opening but at a short distance from the wall, the tangential stresses were peak during the short period after excavation when the hydro-mechanical coupling is considered.

**Key words** : poroelasticity, shielding effect, hydro-mechanical coupling, tunnel

초록 : 지하수로 포화된 암반내에 공동을 굴착하면 공동 주위에서 응력의 재분배로 인하여 초기 공극수압의 변화가 발생한다. 이러한 공극수압의 변화는 다시 암반의 역학적 거동에 영향을 미치게 된다. 그러므로 공동 주변 암반에서 굴착으로 인해 형성된 공극수압이 소산과정에서 암반의 거동은 공극수압의 변화를 고려하지 않은 해석과 차이를 보이게 된다. 이 연구에서는 굴착직후 짧은 시간 동안에서 공동주변에서 발생하는 응력재분포와 공극수압변화 양상을 수치해석적으로 검토하였다. 공극수압을 고려하지 않은 탄성해석과는 달리 굴착직후 짧은 시간동안에는 공동 벽면의 직후방에서 최대접선응력이 형성되고 있음을 확인할 수 있었다.

핵심어 : poroelasticity, 방패효과, 수리-역학 결합, 터널

### 1. 서 론

포화된 암반에서는 역학적 변형과 공극수압이 상호작용을 한다. 역학적 변형이 공극수에 영향을 주는 경우 즉, 역학-수리 결합(solid-to-fluid coupling)은 암반매질에 작용하는 응력의 변화가 공극수압이나 공극수 양에 변화를 일으키기 때문에 나타난다. 역학-수리 커플링의 정도는 암반매질의 압축률, 공극수의 압축률, 공극률, 암석입자의 압축률 등에 따라 차이가 있을 수 있다. 유체가 공기와 같이 압축률이 매우 큰 경우 역학-수리 결합의 효과는 무시될 수 있다. 반면에 공극수압의 변화가 다공성 매질의 변형에 영향을 미치는 경우를 수리-

역학 결합(fluid-to-solid coupling)이라 한다. 수리-역학 결합의 좋은 예는 대수층으로부터 지하수를 개발할 때 발생하는 지반의 침하 현상이다. 위의 2 가지 결합 중 어느 한 경우만을 고려하는 일방향 문제를 비결합(uncoupled) 문제라 하고, 두 가지 결합을 동시에 고려하는 양방향 문제를 결합(coupled) 문제라 부른다(Wang, 2000). 시간 의존적인 공극수압의 변화가 매질에 발생하는 응력의 변화에 큰 영향을 미치는 경우에는 양방향 결합이 반드시 고려되어야 한다.

포화된 다공성 암반의 역학적 거동은 변형-공극수 확산의 수리-역학적 상호작용에 지배를 받는다. 포화된 공극수로 인해 발생하는 이러한 현상은 다음과 같이 요약될 수 있다(Detournay & Cheng, 1988): (i) 외력이 작용하는 경우 과잉공극수압이 발생된다; (ii) 암석의 체적변형은 유효응력에 의해 지배된다; (iii) 공극수압의 구배는 물체력(body

1) 군산대학교 해양과학대학

2) 한국지질자원연구원

접수일 : 2005년 6월 9일

force)과 같은 효과를 가져온다; (iv) 과잉공극수압은 공극수확산법칙에 의해 서서히 소산된다. 이러한 원인에 의해 포화된 암반의 체적변형은 하중속도에 영향을 받는다. 암반의 겉보기 강성은 하중속도가 빨라짐에 따라 커지는 경향이 있다. 하중속도가 빠른 경우, 공극수가 빠져나갈 충분한 시간을 갖지 못하게 되고, 증가된 공극수압은 변형을 억제시키는 역할을 하게 된다. 따라서 하중 속도가 매우 빠른 경우는 비배수조건(undrained condition)을 가정하여 근사시킬 수 있다. 반면에 하중속도가 느린 경우는 배수조건(drained condition)에 해당하며, 외력의 작용으로 발생된 과잉공극수압이 소산될 수 있는 시간이 충분하므로 공극수압은 암반의 강성 증가에 크게 기여하지 못한다. 포화된 암반에 터널을 굴착하는 경우 굴착 직후 터널 주위 암반에서 순간적으로 발생하는 응력집중 현상은 빠른 하중속도 조건을 형성시킬 수 있다. 이와 같이 암반의 변형과 공극수의 확산현상은 밀접한 상호결합 효과를 나타내기 때문에 지하암반 내 고온·저온 저장시설 등과 같은 주요 암반구조물의 설계에는 암반의 수리-역학적 상호작용에 대한 효과를 고려한 터널의 안정성 해석이 매우 중요하다.

수리-역학적 결합상호작용에 대한 가장 간단한 형태의 이론은 Biot(1941, 1955)의 poroelasticity 이론이다. Terzaghi의 비결합(uncoupled) 유효응력 이론(Terzaghi, 1956)에서 예측할 수 없었던 변형과 공극수 확산 상호작용 현상들이 Biot의 이론에 의해 예측되었고, 탄성 대수층에서 지하수 개발에 따른 대수층의 반응들을 예측하는데 응용이 되고 있다. 암석역학 분야에서도 최근 poroelasticity 이론이 도입되어 시추공의 안정성 문제, 수압과쇄 자료의 해석 등에 활발히 응용되고 있다.

이 연구에서는 포화된 탄성지반내에 원형단면의 공동이 굴착될 경우 공극수압의 변화, 응력 재분포 특성들을 poroelasticity 이론에 기초하여 살펴보았다. 수리-역학 상호결합 효과를 수치해석적으로 근사시키기 위하여 상업용 유한차분코드인 FLAC(Itasca, 1999)을 이용한 수치해석을 실시하여 수평 초기주응력비의 변화에 따른 수직원형터널 주위 암반에서 공극수압과 응력집중 특성을 분석하였다. 굴착 직후의 짧은 시간대의 해석결과는 이론적 해와 비교하여 수치해석결과의 신뢰성을 검증하였다.

## 2. 이론

### 2.1 poroelasticity 이론의 지배방정식

Biot의 poroelasticity 이론(Biot, 1941)에 의하면 포화된 다공성 매질의 거동을 지배하는 구성방정식은 매질의 변형률( $e_{ij}$ )과 매질의 단위 부피당 유체량의 변화를 나타내는  $\zeta$ 의 함수로 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_{ij} = 2Ge_{ij} + \frac{2G\nu}{1-2\nu} \delta_{ij}e - \alpha\delta_{ij}p \quad (1)$$

$$p = -\frac{2GB(1+\nu_u)}{3(1-2\nu_u)}e + \frac{2GB^2(1-2\nu)(1+\nu_u)^2}{9(\nu_u-\nu)(1-2\nu_u)}\zeta \quad (2)$$

여기서  $G$ 는 전단탄성계수,  $e$ 는 체적변형률,  $p$ 는 공극수압,  $\nu_u$ 는 비배수 포아송비,  $\nu$ 는 배수 포아송비,  $B$ 는 Skempton의 공극수압계수(Skempton, 1954)이다.  $\alpha$ 는 Biot의 유효응력계수로서 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha = \frac{3(\nu_u - \nu)}{B(1-2\nu)(1+\nu_u)} \quad (3)$$

식(1) 좌변의 첫째 및 둘째항이 Biot의 유효응력을 나타내며 이 유효응력은 매질의 변형률과 비례 관계에 있음을 보여준다. 식(2)의 공극수압  $p$ 는 매질의 변형과 매질 속에 존재하는 유체 양의 변화에 선형적으로 비례하는 것을 보여준다.

또한 poroelasticity 이론의 지배방정식들에는 다음과 같은 평형방정식, Darcy의 방정식, 그리고 유체의 연속방정식이 포함된다.

$$\sigma_{ij,j} = 0 \quad (4)$$

$$q_i = -\chi p_{,i} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + a_{i,i} = 0 \quad (6)$$

여기서  $q_i$ 는 비유출률(specific discharge) 벡터,

$\alpha$ 는 유체의 점성도에 대한 매질의 고유투수계수 비이다.

위의 지배방정식들에 의하면 포화된 다공성 매질의 거동을 poroelasticity 이론에 의해 예측하기 위해서는 5개의 유체 및 매질 관련 상수가 필요함을 알 수 있다. 5개의 상수에는 매질의 전단탄성계수( $G$ ), 배수 포아송비( $\nu$ ), 비배수포아송비( $\nu_u$ ), Skempton의 공극수압계수( $B$ ), 상수  $\alpha$ 가 포함된다. Skempton(1954)와 Rice & Cleary(1976)에 의하면  $B$  값의 범위는 (0~1), 유효응력계수  $\alpha$ 의 범위는 (0~1), 비배수 포아송비의 범위는 ( $\nu \sim 0.5$ )이다. 위의 상수들은 또한 입자 체적탄성계수( $K_s$ ), 유체의 체적탄성계수( $K_f$ ), 매질의 공극률( $\phi$ ) 등으로 표현하는 것이 편리한 경우도 있다. 유체와 입자의 비압축성을 가정하면, 즉  $K_s = K_{f \rightarrow \infty}$  이면 Biot의 유효응력은 Terzaghi의 유효응력과 같아진다. 또 유체의 압축률이 고체입자의 압축률에 비하여 매우 크다고 가정하면 즉  $K_{s \rightarrow \infty}$ 이면 공극수압계수는  $B = K_f / (K_f + \phi K)$  이 되고, 비배수 체적탄

성계수는  $K_u = K_f / \phi + K$  이 되며,  $\alpha = 1$  임을 보일 수 있다.

### 2.2 이방성 주응력하에서 원형공동의 수리-역학적 이론해

식(1), 식(2), 식(4)~(6)를 결합함으로써 다양한 형태의 수리-역학 상호작용에 대한 초기값 및 경계값 문제를 유도할 수 있다. Detournay & Cheng(1988)은 이방성 주응력하에 있는 2차원 무한평면내에 연직방향의 원형공동이 순간적으로 굴착될 때 압반내에 분포하는 공극수압 및 응력의 재분포를 해석적인 방법으로 계산하였다.

Fig.1에 나타낸 바와 같이 터널이 굴착되기 전에는 다음과 같이 이방성 수평 주응력이 작용하고 있다고 가정하였다.

$$\begin{aligned} \sigma_y &= -(P_o + S_o) \\ \sigma_x &= -(P_o - S_o) \\ p &= p_o \end{aligned} \tag{7}$$

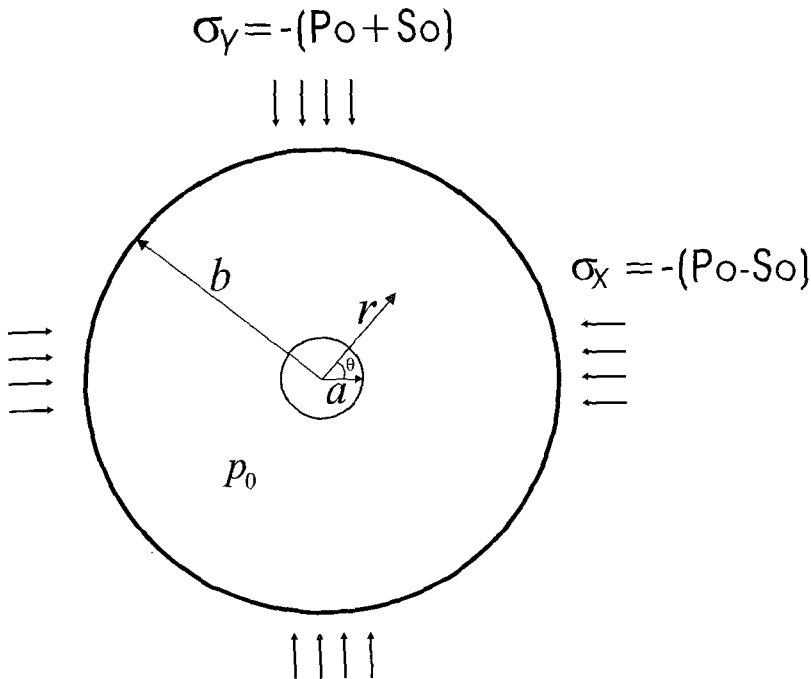


Fig. 1. Initial and boundary conditions of the problem.

여기서  $P_o, S_o$  는 각각 평균응력, 편차주응력이고  $p_o$  는 초기 공극수압이다.

$t=0$ 에서 순간적으로 터널이 굴착된다고 가정하고 굴착된 공동은 공기와 접하고 있다고 가정하면 공동벽면에서 응력성분은 모두 0고 공극수압도 터널벽면에서 0이라는 경계조건을 적용할 수 있다.

중첩의 원리를 이용하여 해석모델은 각각 (i) 정수압상태의 초기응력  $P_o$ 가 작용하는 경우, (ii) 공극수압  $p_o$ 가 작용하는 경우, (iii) 편차주응력  $S_o$ 가 작용 경우에 대한 해를 구한 후 합하여 원하는 결과를 얻을 수 있다. 이 때 각 경우에 대한 공동벽면에서의 경계조건은 다음과 같이 주어진다:

case 1:

$$\sigma_{rr}^{(1)} = P_o, \quad \sigma_{r\theta}^{(2)} = 0, \quad p^{(1)} = 0$$

case 2:

$$\sigma_{rr}^{(2)} = 0, \quad \sigma_{r\theta}^{(2)} = 0, \quad p^{(2)} = -p_o$$

case 3:

$$\sigma_{rr}^{(3)} = -S_o \sin 2\theta, \quad \sigma_{r\theta}^{(3)} = S_o \sin 2\theta, \quad p^{(3)} = 0$$

Detournay & Cheng(1988)은 위의 3가지 경우에 대한 해석 해를 구하기 위하여 라플라스변환을 이용하였다. 라플라스변환 영역에서 지배방정식의 해를 구한 후 이를 다시 수치라플라스 역변환 방법을 이용하여 시간영역에의 근사 해로 구하였다. 또한 터널 벽면 부근에서 굴착 직후 짧은 시간동안에 발생하는 응력성분 ( $\sigma_{rr}, \sigma_{\theta\theta}, \sigma_{r\theta}$ ), 공극수압 ( $p$ ), 변위 ( $u_r, u_\theta$ )에 대한 점근해를 다음과 같은 해석적 함수로 제시하였다.

case 1: 이러한 응력조건은 정수압 상태의 무한 평면내에 원형 공동이 존재하는 경우에 해당하는 것으로 Kirsch 해를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다. 응력과 변위는 암반의 탄성정수와 시간에 무관하게 나타난다. 또한 굴착으로 인한 공극수압도 발생되지 않는다.

$$\sigma_{rr} = -P_o \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = -P_o \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right)$$

$$\sigma_{r\theta} = 0$$

(8)

$$u_r = -\frac{P_o}{2G} \frac{a^2}{r}$$

$$u_\theta = 0$$

$$p = 0$$

case 2: 초기 공극수압  $p_o$  만 작용할 때 굴착 직후 짧은 시간동안에 발생하는 응력, 공극수압 및 변위의 점근해는 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_{rr} = -2\eta p_o \left\{ \left(\frac{a}{r}\right)^{3/2} \left[ \sqrt{\frac{4ct}{a^2\pi}} \exp\left(-\frac{(r-a)^2}{4ct}\right) - \left(\frac{r}{a}-1\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{r-a}{\sqrt{4ct}}\right) \right] - \frac{a^2}{r^2} \sqrt{\frac{4ct}{a^2\pi}} \right\}$$

$$\sigma_{\theta\theta} = 2\eta p_o \left\{ \left(\frac{a}{r}\right)^{3/2} \left[ \sqrt{\frac{4ct}{a^2\pi}} \exp\left(-\frac{(r-a)^2}{4ct}\right) + \operatorname{erfc}\left(\frac{r-a}{\sqrt{4ct}}\right) \right] - \frac{a^2}{r^2} \sqrt{\frac{4ct}{a^2\pi}} \right\} + 2\eta p_o \left\{ \frac{1}{8} \sqrt{\frac{a}{r}} \left(1 - \frac{a}{r}\right) \left[ \sqrt{\frac{4ct}{a^2\pi}} \exp\left(-\frac{(r-a)^2}{4ct}\right) - \left(\frac{r}{a}-1\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{r-a}{\sqrt{4ct}}\right) \right] \right\}$$

$$\sigma_{r\theta} = 0 \quad (9)$$

$$u_r = 2\eta \frac{ap_o}{2G} \left\{ \sqrt{\frac{a}{r}} \left[ \sqrt{\frac{4ct}{a^2\pi}} \exp\left(-\frac{(r-a)^2}{4ct}\right) - \left(\frac{r}{a}-1\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{r-a}{\sqrt{4ct}}\right) \right] + \frac{a}{r} \sqrt{\frac{4ct}{a^2\pi}} \right\}$$

$$u_\theta = 0$$

$$\frac{p}{p_o} = 1 - \sqrt{\frac{a}{r}} \operatorname{erfc}\left(\frac{r-a}{\sqrt{4ct}}\right) - \frac{1}{8} \sqrt{\frac{a}{r}} \left(1 - \frac{a}{r}\right) \times \left[ \sqrt{\frac{4ct}{a^2\pi}} \exp\left(-\frac{(r-a)^2}{4ct}\right) - \left(\frac{r}{a}-1\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{r-a}{\sqrt{4ct}}\right) \right]$$

여기서  $\operatorname{erfc}(\ )$ 는 여오차함수(complementary error function)이고  $t$ 는 시간을 나타낸다. 그리고  $\eta$ 와  $c$ 는 각각 poroelastic 상수와 공극수 확산상수로서 암석입자가 비압축성이라는 가정을 할 경우 다음과 같이 표현된다.

$$c = (K_h / \rho_w g) / \left( \frac{\phi}{K_w} + \frac{1}{K + \frac{4}{3}G} \right)$$

$$\eta = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \quad (10)$$

식(10)에서  $K_h$ 는 매질의 수리전도도(hydraulic conductivity),  $\rho_w$ 는 유체의 밀도  $g$ 는 중력가속도이며,  $K$ ,  $G$ 는 매질의 배수 체적탄성계수 및 전단탄성계수이다.

식(9)은 case 2에서 최대접선인장응력이 공동 벽면에서 발생하고 그 크기는  $2\eta p_o$  임을 보여준다.

case 3: 크기  $S_o$ 의 편차주응력이 작용하는 경우 공동 굴착에 의해 발생하는 응력성분, 공극수압 및 변위는 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_{rr} = S_o \left[ 1 - 4 \frac{a^2}{r^2} + 3 \frac{a^4}{r^4} \right] \cos 2\theta$$

$$\sigma_{\theta\theta} = S_o \left[ -1 + 4 \frac{\nu_u - \nu}{1-\nu} \sqrt{\frac{a}{r}} \operatorname{erfc} \left( \frac{r-a}{\sqrt{4ct}} \right) - 3 \frac{a^4}{r^4} \right] \cos 2\theta$$

$$\sigma_{r\theta} = S_o \left[ -1 - 2 \frac{a^2}{r^2} + 3 \frac{a^4}{r^4} \right] \sin 2\theta \quad (11)$$

$$u_r = \frac{aS_o}{2G} \left[ 4(1-\nu_u) \frac{a}{r} - \frac{a^3}{r^3} \right] \cos 2\theta$$

$$u_\theta = \frac{aS_o}{2G} \left[ -2(1-2\nu_u) \frac{a}{r} - \frac{a^3}{r^3} \right] \sin 2\theta$$

$$p = S_o \frac{4}{3} B(1+\nu_u) \left[ -\sqrt{\frac{a}{r}} \operatorname{erfc} \left( \frac{r-a}{\sqrt{4ct}} \right) + \frac{a^2}{r^2} \right] \cos 2\theta$$

case 3에서 암석입자가 비압축성이라는 가정을 하면 Skempton의 공극수압계수  $B$ 와 비배수포아송비  $\nu_u$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$B = K_w / (K_w + \phi K) \quad (12)$$

$$\nu_u = \frac{3K_u - 2G}{2(3K_u + G)} \quad (13)$$

여기서 비배수 체적탄성계수  $K_u$ 는 물의 체적탄성계수  $K_w$ 와 공극률  $\phi$ 를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_u = K_w / \phi + K \quad (14)$$

위 3가지 경우에서 얻은 해를 더함으로써 이방성 주응력하에서 터널 주변 탄성암반의 단기 수리-역학적 상호작용 해가 구해진다.

### 3. 수평 초기응력의 이방성에 따른 원형공동의 단기간 수리-역학적 거동

#### 3.1 해석모델의 설정

수치해석적 방법으로 2절의 이론해에 근사한 해를 얻고 또 수평 초기주응력의 이방성 크기의 변화에 따른 터널 주변 암반의 단기 수리-역학적 거동을 살펴보기 위하여 유한차분코드인 FLAC (Itasca,1999)를 이용한 수치해석을 실시하였다.

해석모델의 대칭성을 이용하여 전체모델 영역의 1/4만을 유한차분망으로 모델링하였다. 터널의 반경은 2m이고 터널중심에서 외부 경계까지의 거리는 100m로 설정하여 외부 경계를 터널에서 충분히 멀리하였다. Fig.2는 해석모델의 변위 및 공극수압 경계조건을 보여준다. 모델의 좌측면에서는 x방향 변위속도를, 하부면에서는 y방향의 변위속도를 0으로 구속시켰다. 외부원 경계에서는 양 방향의 변위속도를 0으로 구속시켰다. 터널벽면에서 변위는 구속되지 않으며 공극수압이 0으로 유지되도록 초기조건을 설정하였다. Fig.3은 해석에 이용된 유한차분요소망을 보여준다. 60×24의 요소수로 해석영역을 분할하였다. 터널 부근에서 응력 및 공극수압의 변화율이 크게 예상되므로 터널근처에서 요소의 크기를 충분히 작게 하였다.

2절에서 제시된 해석 해는 총 경과시간이 정규화 시간(normalized time,  $ct/a^2$ )기준으로  $10^{-2}$ 보다 작은 단기 시간에 적용 가능하다는 Detournay & Cheng(1988)의 연구결과에 따라 이 연구에서도 주어진 입력자료 조건하에서 정규화 시간이  $10^{-2}$ 보다 작은 범위에서 해석이 완료되도록 하였다. 해석은 수리-역학적 상호결합 효과를 근사적으로 모사하기 위하여 수리계산과 역학계산을 반복하여 수행하였다.

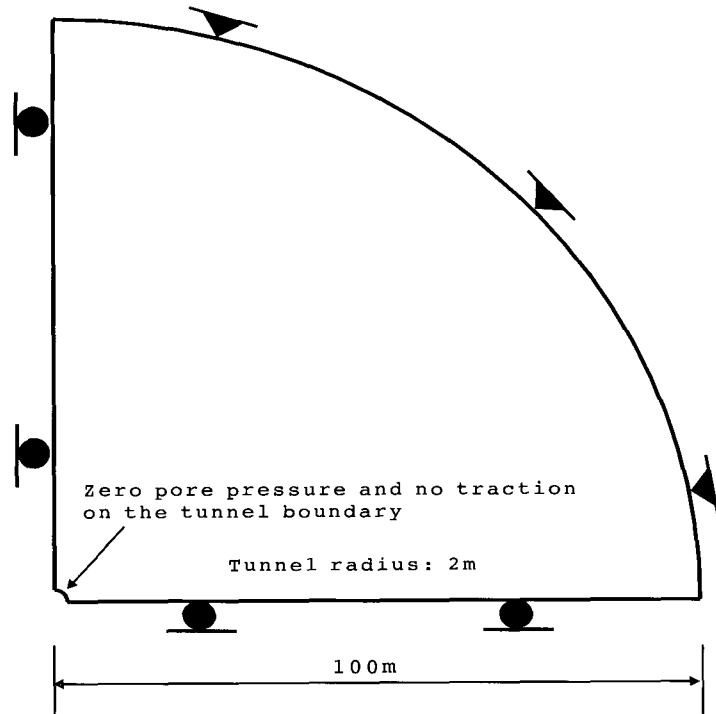


Fig. 2. Definition of the numerical model.

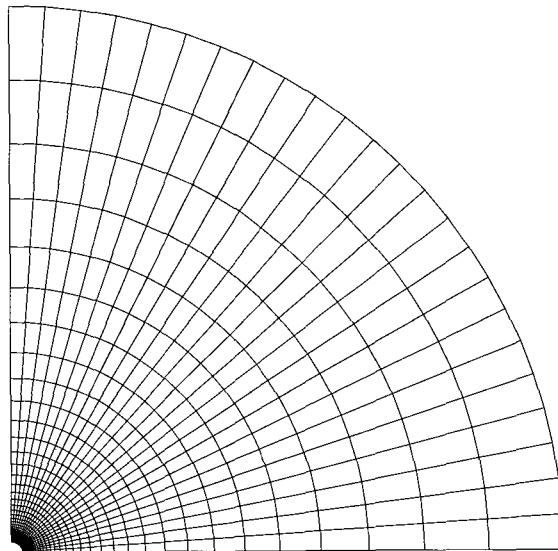


Fig. 3. Finite difference mesh.

Table 1. Input values assumed in the numerical study

Bulk modulus $K$ , (GPa)	Shear modulus $G$ , (GPa)	Initial pore pressure $p_o$ , (MPa)	Hydraulic conductivity $K_h$ , (cm/sec)	Bulk modulus of water $K_w$	porosity, $\phi$
4.00	6.67	2.00	$0.98e^{-6}$	2.00	0.30
case 1 : $\sigma_y=8.00$ MPa, $\sigma_x=4.00$ MPa					
case 2 : $\sigma_y=8.00$ MPa, $\sigma_x=8.00$ MPa					
case 3 : $\sigma_y=8.00$ MPa, $\sigma_x=12.00$ MPa					

3.2 해석 입력자료

해석에 이용된 역학 및 수리 입력자료는 Table 1과 같다.

사용된 입력자료를 이용하는 경우 확산상수  $c$  는 약  $4.3e^{-3}m^2/sec$  이다. 2절의 해석 해에 대응되는 결과를 얻기 위해서는 총 경과 정규화시간 이 약  $10^{-2}$ 보다 작아야하므로 이 연구에서는  $10^{-3}$  택하였다. 이 경우 허용 가능한 최대 해석 시간은 약 0.93초가 된다. 따라서 약 0.93초까지의 해석결과만이 2절의 수리-역학적 결합해과 직접적인 비교가 가능하다. 이 연구에서는 해석 경과시간 이 0.005초, 0.05초, 0.5초 인 3가지 경우에 대하여

암반에 발생하는 반경방향 변위, 접선응력, 공극수압 분포를 분석하였다.

3.3 해석결과

Fig.4 ~ Fig.6은 각각 초기수평주응력 이방성비 ( $\sigma_x/\sigma_y$ )가 0.5, 1.0, 1.5 인 3가지 경우에 대하여 경과시간 0.5초 후의 공동의 반경방향 변위를 해석해와 비교한 것이다. 수평축을 기준으로 반시계 방향으로 회전한 지점에서 반경방향 변위를 해석하는 실선으로 수치해석 해는 원형기호로 표시하였다. 해석해와 수치해석 해는 거의 일치하는 결과를 보여준다. 수평방향 최대 주응력 방향으로 최대 반경방향 변위가 발생하고 있음을 보

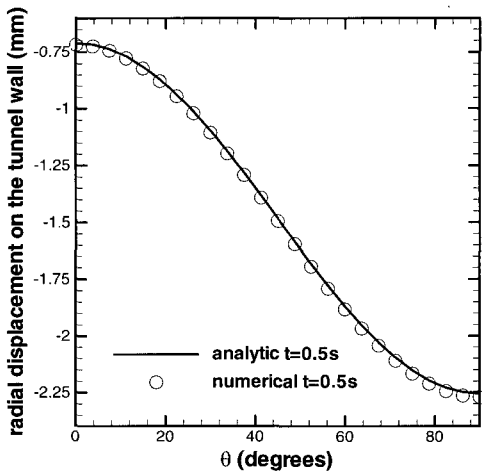


Fig. 4. Radial displacements on the wall ( $\sigma_x/\sigma_y=0.5$ ).

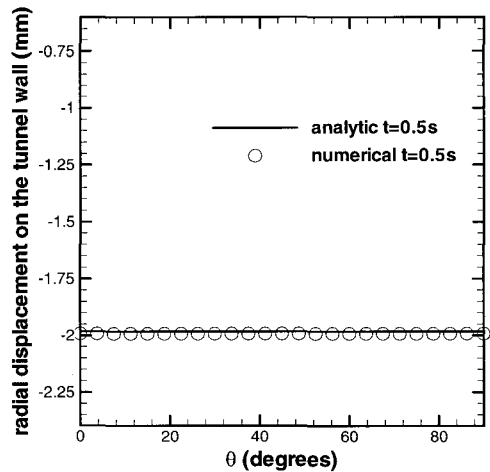


Fig. 5. Radial displacements on the wall ( $\sigma_x/\sigma_y=1.0$ ).

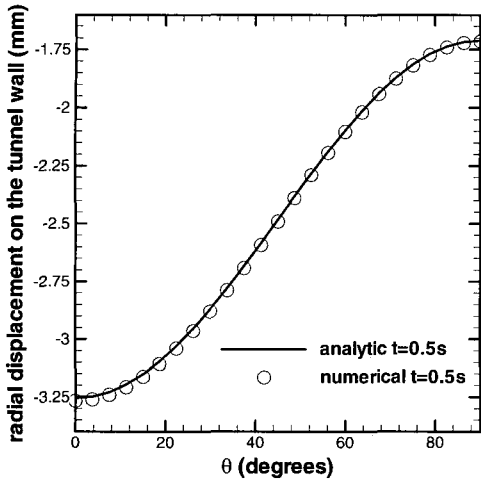


Fig. 6. Radial displacements on the wall ( $\sigma_x/\sigma_y=1.5$ ).

여준다. 최대반경방향 변위는 case 1의 경우 터널 천장부에서 약 2.25mm, case 3의 경우는 측벽부에서 약 3.25mm의 값을 나타낸다. 정수압 상태인 case 2의 경우는 터널 벽면의 모든 점에서 같은 반경방향 변위(약 2.0mm)를 보인다.

Fig.7 ~ Fig.9는 터널의 x축을 따라 발생하는 공극수압의 변화를 시간 0.005초, 0.05초, 0.5초 경과시간에 대해 해석해와 수치해석 해를 비교 도시한 것이다. 해석해와 수치해석 해가 거의 일치하고 있음을 볼 수 있다. 공동벽면에서 초기조건으로 주어진 공극수압이 0이 되어야 하므로 벽면 근처에서 급속한 공극수압의 저하를 관찰할 수 있다. 시간이 지남에 따라 공극수압의 저하율을 감소하고 있음을 보여준다. 이는 시간의 경과에 따라 공동 굴착영향으로 인한 공극수압의 교란이 더 깊숙이 진행되고 있음을 잘 보여준다. 터널 벽면을 통한 배수 때문에 나타나는 터널 벽면 근처의 공극수압 저하로 터널 벽면에 근접하여서는 암반의 강성이 배수조건에 가까워지는 경우 근접하게 되고, 벽면에서 멀어지면서 점차 비배수 조건의 강성으로 근사시킬 수 있음을 보여준다.

초기수평주응력 이방성비 ( $\sigma_x/\sigma_y$ )가 1인 경우 공극수압은 심도 약 0.3m 깊이에서 초기 공극수압 2MPa으로 빨리 회복되는 것을 볼 수 있으나  $\sigma_x/\sigma_y$  값이 0.5, 1.5인 경우에서 초기 공극수압에

도달하는 깊이가 훨씬 깊어진다. 이것은 이방성 초기응력 조건하에서는 터널 벽면 근처에서는 초기 최대 주응력 방향과 직각인 방향으로 인장응력이 발생되고 이에 따라 공극수의 배수가 쉽게 발생하기 때문으로 생각된다.

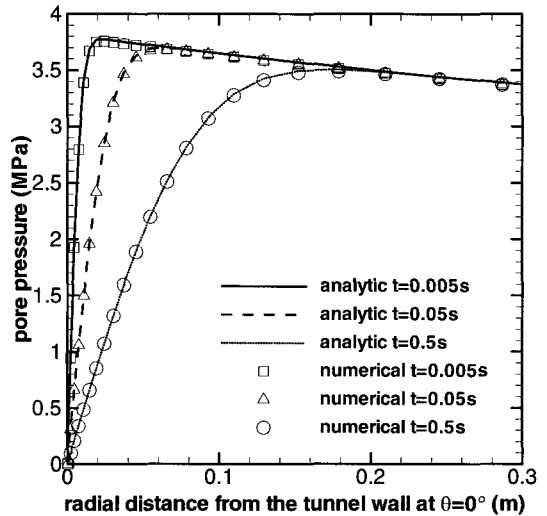


Fig. 7. Variation of pore pressure ( $\sigma_x/\sigma_y=0.5$ ).

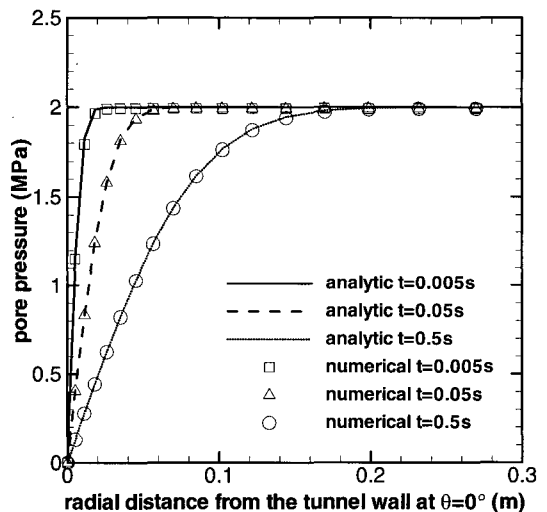


Fig. 8. Variation of pore pressure ( $\sigma_x/\sigma_y=1.0$ ).



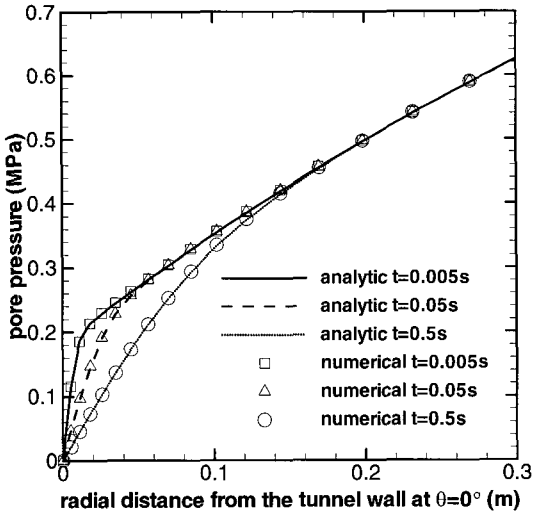


Fig. 9. Variation of pore pressure ( $\sigma_x/\sigma_y=1.5$ ).

Fig.10 ~ Fig.12는 해석시간 0.5초 시점에서 공동 벽면 부근에서 터널 굴착으로 인하여 교란되는 공극수압의 분포를 보여준다. 주로 응력집중이 크게 발생하는 지점에서 공극수압의 변화율이 크게 나타나는 것을 관찰할 수 있다.  $\sigma_x/\sigma_y$ 가 0.5인 경우, 측벽부가 이 부분에 해당하고  $\sigma_x/\sigma_y$ 가 1.5인 경우 천장부가 이 영역에 해당한다. 이러한 응력집중부에서는 터널 근접부에서 높은 응력 집중에 공극수가 재빨리 배수되지만, 그 배후에서는 암석입자들의 다짐으로 인하여 공수의 배출이 쉽지 않아 초기 공극수압보다 높은 과잉공극수압이 형성된다.  $\sigma_x/\sigma_y$ 가 1.0인 경우는 공극수압의 감소 범위가 넓지 않으며 초기 공극수압보다 높은 과잉공극수압도 형성되지 않음을 볼 수 있다.

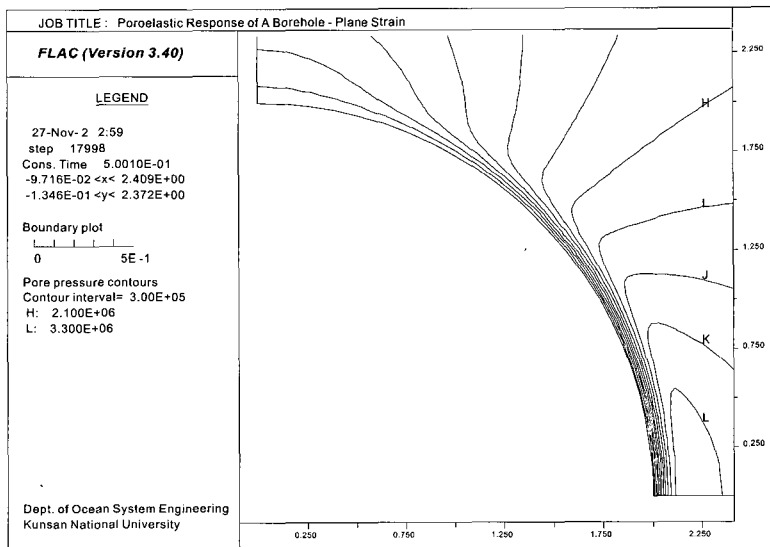


Fig. 10. Distribution of pore pressure ( $\sigma_x/\sigma_y=0.5, t=0.5s$ ).

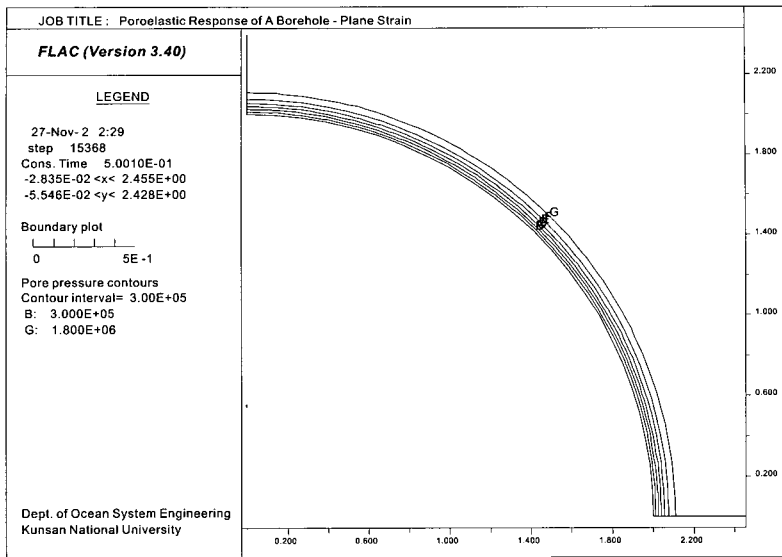


Fig. 11. Distribution of pore pressure ( $\sigma_x/\sigma_y=1.0, t=0.5s$ ).

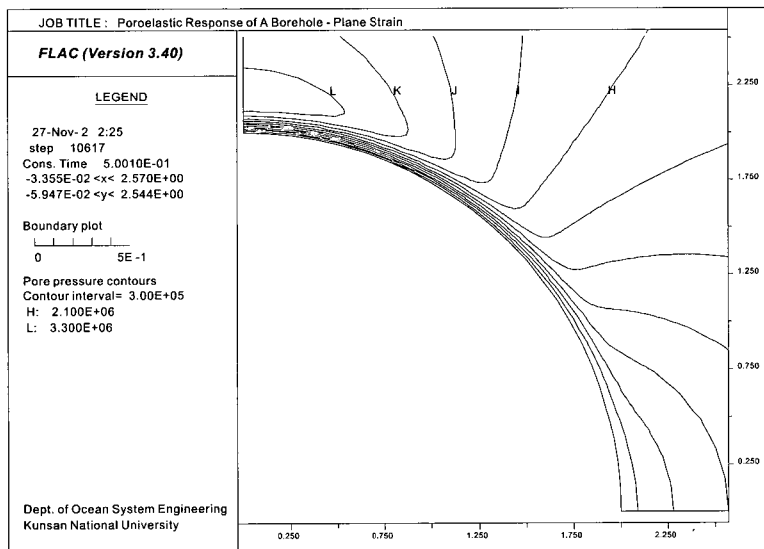


Fig. 12. Distribution of pore pressure ( $\sigma_x/\sigma_y=1.5, t=0.5s$ ).

Fig.13 ~ Fig.15는 터널벽면으로부터  $x(\theta=0^\circ)$  방향 반경방향 거리에 따른 접선응력의 변화를 해석시간 0.005초, 0.05초, 0.5초에 대하여 해석해와 비교 도시한 것이다. 접선응력 값은 수평 반경방향에 연하여 놓여있는 요소들의 중점에서 값으로 얻

밀한 의미에서 수평방향에서 구해진 접선응력은 아니지만, 대체적인 경향성을 추정하는데 도움을 줄 수 있다. 주목할 점은  $\sigma_x/\sigma_y$ 가 0.5, 1.1인 경우 최대 접선응력은 터널의 벽면에서 발생하는 것이 아니라 벽면의 조금 안쪽에서 발생하는 현상을 보

여준다. Detournay & Cheng(1988)은 이러한 현상을 방패효과(*shielding effect*)라 부르고 있다. 공극수압의 영향을 고려하지 않는 탄성해석의 경우 최대 접선응력은 터널벽면에서 나타나게 된다. 이러한 현상은 터널 벽면 근접부에서는 배수가 빨리 발생하여 암반의 강성이 배수 탄성정수에 의해 좌우되고 터널벽면에서 먼 부분에서는 아직 배수가 충분히 발생되지 않아 비배수 탄성정수에 의해 암반의 강성이 결정되기 때문이다. 따라서 포화된 암반터널의 경우 굴착직후 매우 짧은 시간 동안에 터널 벽면 내부에서부터 파괴가 진행될 수 있음을 보여준다.  $\sigma_x/\sigma_y$ 가 1.5인 경우에는 수평방향에서 방패효과가 거의 나타나지 않고 있음을 보여준다. 그러나 도표로 나타내지는 않았지만  $\theta=90^\circ$  방향에서 방패효과를 예상할 수 있다.

포화된 암반 중에 터널을 굴착할 경우, 터널 벽면부근에서 접선응력은 공극수압을 고려하지 않는 탄성해와 큰 차이가 있음을 보았다. 따라서 주요 암반구조물의 설계시 수리-역학적 상호결합 모델을 적용하여 암반구조물의 안정성을 평가하는 것이 중요하다는 것일 알 수 있다.

굴착 직후가 아닌 어느 정도 시간이 지난 시점의 공극수압 분포와 접선응력의 분포 특징을 알아보기 위하여 굴착 후 경과시간 20초에서의 결과를 분석하였다. Fig.16은 수평초기응력의 이방성비  $\sigma_x/\sigma_y$ 가 0.5인 경우에 대하여 공동 굴착 후 20초

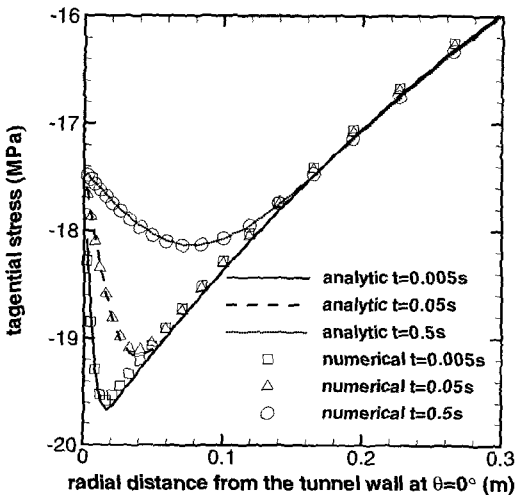


Fig. 13. Variation of tangential stress ( $\sigma_x/\sigma_y=0.5$ ).

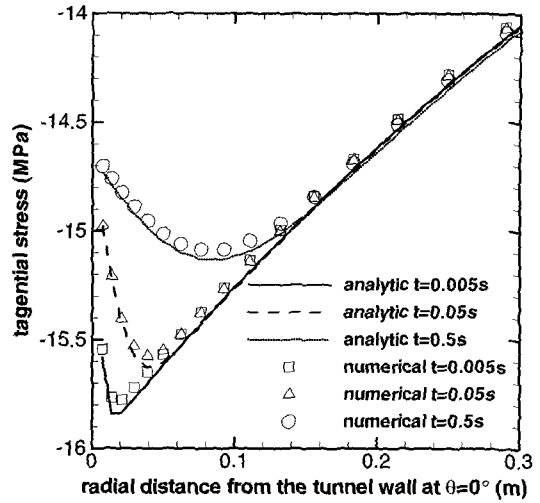


Fig. 14. Variation of tangential stress ( $\sigma_x/\sigma_y=1.0$ ).

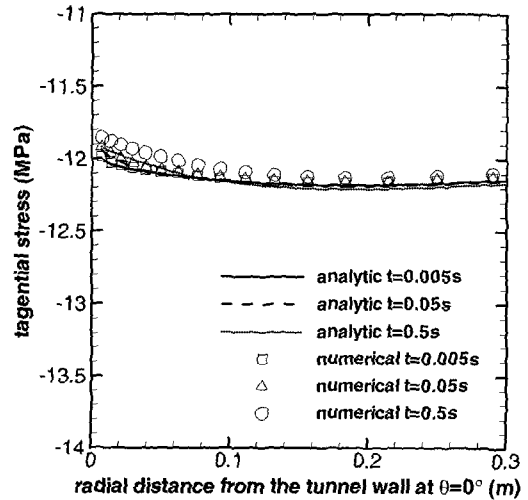


Fig. 15. Variation of tangential stress ( $\sigma_x/\sigma_y=1.5$ ).

가 지난 시점에서 x방향 반경거리에 따른 공극수압의 변화를 도시한 것이다. 터널 굴착 후 20초 지난 시점은 2장의 이론 해를 적용할 수 없는 시점이다. Fig. 7과는 달리 굴착 직후 발생되었던 과잉간극수압이 소산되어 터널 벽면에서 멀어질수록 공극수압은 서서히 증가되고 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 17은 수평초기응력의 이방성비  $\sigma_x/\sigma_y$ 가 0.5인 경우에 대하여 공동 굴착 후 20초가 지난 시

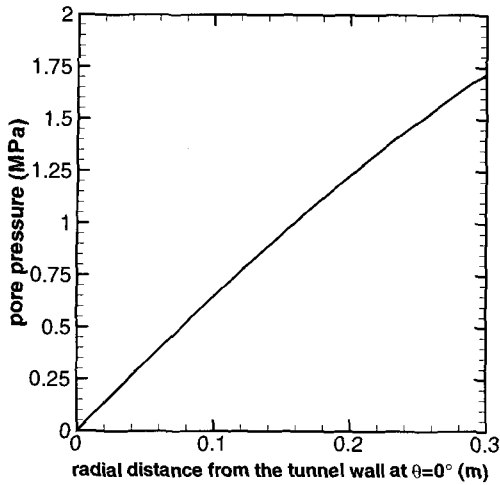


Fig. 16. Variation of pore pressure ( $\sigma_x/\sigma_y=0.5$ ,  $t=20s$ ).

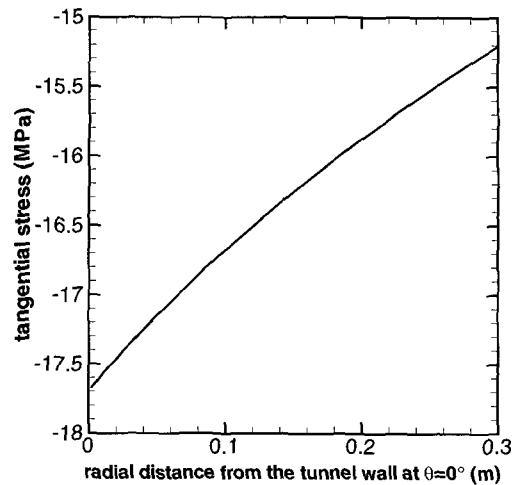


Fig. 17. Variation of tangential stress ( $\sigma_x/\sigma_y=0.5$ ,  $t=20s$ ).

점에서 x방향 반경거리에 따른 접선응력의 변화를 보여준다. 이 경우도 Fig.13과 달리 공동벽면 내부에서 방패효과에 의한 응력집중이 발생하지 않고 반경방향 거리에 따라 서서히 응력집중이 낮아지고 있음을 볼 수 있다.

지금까지의 해석결과에서 보았듯이 초기지압 조건에 따라서는 굴착 직후 아주 짧은 시간동안에 터널 벽면 안쪽에서 발생하는 응력집중 현상으로 인해 암반이 파괴에 이를 수 있음을 알 수 있다. 공극수압과 역학적 변형의 상호작용을 고려하지 않는 일반적인 탄성 및 탄소성 해석을 이용하여 터널의 안정성 해석을 수행하는 경우, 터널벽면 직후방에서 굴착과 거의 동시에 발생하는 이러한 응력집중 현상을 고려할 수 없다는 위험성을 가지고 있다는 것을 추측할 수 있다. 따라서 중요한 암반 구조물의 설계에서는 수리-역학적 상호결합 해석을 통한 안정성 해석이 필요함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

이 연구에서는 지하수로 포화된 암반 내에 수직 원형터널을 굴착할 경우 발생할 수 있는 역학적 수리적 상호작용의 영향을 살펴보기 위하여 단기간 수리-역학적 상호결합 해석을 실시하였다. 수리-역학적 상호결합 해석 결과는 초기지압의 이방성

에 받을 수 있으므로 초기수평주응력 이방성비  $\sigma_x/\sigma_y$  0.5, 1.0, 1.5의 3가지 경우를 가정하고 반경 2m인 수직터널에 대한 해석을 실시한 후 그 결과를 분석하였다.

수리-역학적 거동의 상호결합 효과를 근사적으로 모델링하기 위하여 유한차분 코드인 FLAC을 이용하여 수리계산과 역학계산을 번갈아 수행하였다. 수치해석 결과의 신빙성을 확보하기 위하여 이론적 해석 해와 비교를 실시하였다. 임의 해석시간에 대한 해석해는 해석적 함수로 표현할 수 없고 무한 수열형태로 근사적으로 주어지지만, 공동 굴착 직후 아주 짧은 시간동안에 발생하는 변위, 공극수압분포, 응력분포는 여오차함수를 이용한 점근해로 얻을 수 있다. 이 연구에는 수치해석 해와 이 단기간 점근해를 상호 비교 도시하여 수치해석 결과의 신뢰성을 확인하였다.

수치해석 결과 터널 근접부에서 변위, 공극수압, 접선응력의 분포는 해석해와 거의 일치함을 볼 수 있었다. 이러한 해석 결과는 초기수평 주응력의 이방성비에 따라 큰 차이를 보였다. 응력집중이 크게 발생하는 영역에서 특히 공극수압의 교란과 접선응력의 변화가 크게 나타났다. 접선응력 해석에 대한 결과에서 최대 접선응력은 탄성해석처럼 벽면에서 발생하는 것이 아니라 벽면 직후방에서 발생되고 있음을 보여주었다. 이는 공동 굴착 직후

벽면 인접부에서는 배수조건이 형성되고, 먼 지점에서는 비배수조건이 형성되기 때문에 나타나는 현상으로 주로 응력집중이 크게 발생하는 지점에서 그 현상이 뚜렷하였다. 이 것은 초기지압 조건에 따라 터널 파괴가 벽면 직 후방에서 시작될 수 있음을 보여주었다.

암반의 공극률, 수리전도도 등에 따라 그 정도와 지속시간이 차이가 있을 수 있지만 터널 굴착 직후 터널 벽면 직 후방에서 방패효과에 의한 입력 집중 현상이 나타나고 있음을 알 수 있었다. 터널 굴착 직후 순간적으로 발생된 응력집중에 의해서도 터널주변 암반의 파괴가 발생할 수 있다. 따라서 수리-역학적 상호결합 해석을 통한 터널의 굴착 후 단기간 거동 해석이 포화된 암반에 굴착되는 중요 터널의 안정성 해석과정에서 매우 중요함을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

1. Biot, M.A., 1941, General theory of three-dimensional consolidation, J. Appl. Phys., Vol. 12, pp. 155-164.
2. Biot, M.A., 1955, Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid, J. Appl. Phys., Vol. 26, pp. 182-185.
3. Detournay, E. and A. H-D. Cheng, 1988, Poroeleastic response of a borehole in a non-hydrostatic stress field, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 25, pp. 171-182.
4. Itasca Consulting Group Inc., 1999, FLAC User's Guide.
5. Rice, J.R. and M.P. Cleary, 1976, Some basic stress-diffusion solutions for fluid saturated elastic porous media with compressible constituents. Rev. of Geophys. and Space Phys., Vol. 14, pp. 227-241.
6. Skempton, A., 1954, The pore pressure coefficients A and B, Geotechnique, Vol. 4, pp. 143-147.
7. Terzaghi, K., 1956, Theoretical soil mechanics, John Wiley and Sons, Inc.
8. Wang, H.F., 2000, Theory of linear poroelasticity with applications to geomechanics and hydrogeology, Princeton University Press.



이 연 규

1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
1994년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사  
E-mail: kyoulee@kunsan.ac.kr

현재 군산대학교 해양과학대학 해양시스템공학전공 부교수



신 희 순

1976년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
1978년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
1986년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사  
Tel: 042-868-3240

E-mail: shinhs@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부장 책임연구원