

## 저온 열균열 현상을 이용한 초기 응력 측정법

### - 개념, 이론 및 수치해석

류창하<sup>1)</sup>, 류동우<sup>2)\*</sup>, 최병희<sup>2)</sup>, 신중호<sup>1)</sup>, John P. Loui<sup>3)</sup>

## A Novel Method for In Situ Stress Measurement by Cryogenic Thermal Cracking - Concept, Theory and Numerical Simulation

Chang-Ha Ryu, Dong-Woo Ryu, Byung-Hee Choi, Joong-Ho Synn, J. P. Loui

**Abstract** A new method is suggested herein to measure the virgin earth stresses by means of a borehole. This novel concept is basically a combination of borehole stress relieving and borehole fracturing techniques. The destressing of the borehole is achieved by means of inducing thermal tensile stresses at the borehole periphery by using a cryogenic fluid such as Liquid Nitrogen ( $LN_2$ ). The borehole wall eventually develops fractures when the induced thermal stresses exceed the existing compressive stresses at the borehole periphery in addition to the tensile strength of the rock. The above concept is theoretically analyzed for its potential applicability to interpret in situ stress levels from the tensile fracture stresses and the corresponding borehole wall temperatures. Coupled thermo-mechanical numerical simulations are also conducted using FLAC3D, with thermal option, to check the validity of the proposed techniques. From the preliminary theoretical and numerical analysis, the method suggested for the measurement of in situ stresses appears to be capable of accurate estimation of the virgin stresses by monitoring tensile crack formation at a borehole wall and recording the wall temperatures at the time of crack initiation.

**Key words** In situ stress, Thermal cracking, Cryogenic fluid, Crack initiation, Coupled T-M numerical simulation

**초 록** 시추공을 이용한 초기응력 측정을 위한 새로운 방법을 제안하였다. 이 새로운 개념의 측정법은 기본적으로 응력 해방과 파쇄 기술을 결합한 방법이다. 액화질소와 같은 극저온 액체를 이용하여 시추공 주변의 인장 열응력을 유도하여 시추공 주변의 응력을 해방시킬 수 있다. 중국에는 시추공 주변의 인장 강도가 암반의 인장 강도에 초기 지압으로 존재하는 압축 응력의 합을 초과할 때 시추공벽에 균열을 발생시킨다. 이와 같은 개념을 인장 응력으로부터 초기 응력 수준을 평가하는데 적용하기 위한 이론적 분석을 수행하였다. 또한, 제안한 방법의 유효성을 검토하기 위해 FLAC3D를 이용한 열-역학 상호작용 연속체 해석을 수행하였다. 사전 이론적 검토 및 수치해석으로부터 저온 열균열 발생 현상을 이용한 초기 응력 측정법이 시추공벽에서의 인장 균열 형성을 감시하고 시추공벽에서의 균열 개시 시점의 온도를 기록함으로써 초기 응력을 정밀하게 측정할 수 있음을 확인하였다.

**핵심어** 초기응력, 열균열, 극저온 액체, 균열 개시, 열역학 상호작용 해석

## 1. 서론

광산, 터널, 지하공동 등과 같은 지하굴착에 있어서 초기 응력에 관한 정보는 여러 가지 공학적 판단에 있어서 매우 중요하다. 또한, 안정성 해석 및 설계를 위한 수치 모델링에서 중요한 입력 변수이다. 초기 응력의 방향과 크기는 지진 및 탄성과 이벤트의 예측을 위한 지체력 연구에 있어서도 매우 중요한 인자이다.

최근까지 초기 응력 측정 기법은 수압파쇄(Fairhurst,

<sup>1)</sup> 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원

<sup>2)</sup> 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원

<sup>3)</sup> Central Mining Research Institute

\* 교신저자 : dwryu@kigam.re.kr

접수일 : 2008년 9월 29일

심사 완료일 : 2008년 10월 16일

게재 확정일 : 2008년 10월 16일

1964), 슬리브 파쇄(Stephanson, 1983), 그리고 시추공 썩(Mayer et al., 1951, USPTO 2961524)과 같은 시추공 파쇄법과 오버코어링(Leeman and Hayes, 1966; Merrill, 1967; USPTO 4491022)과 시추공 슬롯팅(Bock and Foruria, 1983) 등의 응력개방법, borehole breakout 측정법(Zoback, 1985)과 미소파열음 측정과 같은 간접적 방법 등으로 구분할 수 있다.

초기 응력 측정법으로 수압파쇄법과 오버코어링법 등이 특히 많이 이용되고 있으며 최근 수 십년간 다양한 기술적 진보를 이루어 왔다.

수압파쇄법은 가장 널리 이용되고 있으며, 대심도 초기 응력 측정에서 유일하게 성공적으로 적용되고 있는 방법이다. 그러나 특정 암종에서 수압파쇄법의 적용이 쉽지 않은 경우가 있다. 더욱이 패커를 이용하여 가압할 때 시추공 붕괴나 패커 물림 현상을 유발할 수 있는데, 이는 대심도에서 적용할 때 장비의 철수시 큰 장애요인이 된다.

수압파쇄법을 통해서 단지 두 개의 주응력만을 결정할 수 있다. 또한, 균열 개구압(reopening pressure)의 정확도와 균열 내에서 공극수압의 변동은 많은 연구자들이 의문을 제기하여 왔다(Ito et al., 2001).

반면, 오버코어링법은 3차원 상에 존재하는 6개의 응력성분 모두를 제공할 수 있다는 장점을 가진다. 그러나 이 방법은 변형을 측정에 기초한 방법으로, 이중 코어링 작업을 요구하기 때문에 적용시 매우 높은 정교함이 요구된다. 또한, 오버코어링법에 의한 초기 응력 측정은 시추공 깊이의 제약을 받는다.

상기 언급한 기존 방법의 단점들을 극복하기 위한 새로운 방법으로서 시추공 저온 열균열 현상을 이용한 초기 응력 측정법을 개발하여 이론적 타당성 및 수치해석적 검증을 수행하였다.

## 2. 이론적 분석

시추공 주변 응력들은 과거 많은 연구자들에 의해 연구되었으며, 대표적으로 Jaegar and Cook(1976)을 참조할 수 있다. 시추공 축 방향에 수직인 면에 존재하는 이방성 초기 응력을 가지는 균질한 매질에서 시추공 주변의 접선 및 반경방향, 그리고 전단 응력은 다음과 같다.

$$\sigma_{\theta} = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{2} \left(1 + \frac{3a^2}{r^2}\right) \cos 2\theta \quad (1)$$

$$\sigma_r = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{2} \left(1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^2}{r^2}\right) \cos 2\theta \quad (2)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{2} \left(1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^2}{r^2}\right) \sin 2\theta \quad (3)$$

여기서  $a$ 는 시추공의 반경이며,  $\sigma_1$ 과  $\sigma_2$ 는 시추공 축 방향에 수직인 무한 평면에서의 최대, 최소 주응력이다.  $\theta$ 는 최대 주응력  $\sigma_1$ 에서 반시계방향으로 측정된 각이다. 상기 식은 평면 변형을 조건에서의 결과식으로, 3차원 응력 분석 시 원형 공동이 하나의 주응력 방향으로 위치한다는 가정 하에서 타당하다.

시추공벽에서  $\theta = 0^\circ$  와  $\theta = 90^\circ$ 에서의 접선 응력  $\sigma_{\theta}$ 는 다음과 같다.

$$\sigma_{\theta=0^\circ} = 3\sigma_2 - \sigma_1 \quad (4)$$

$$\sigma_{\theta=90^\circ} = 3\sigma_1 - \sigma_2 \quad (5)$$

시추공벽  $r = a$ 에서는  $\sigma_r = 0$ ,  $\tau_{r\theta} = 0$ 이다. 주응력 방향의 압축력을 양의 값으로 취한다. 대부분의 경우 접선응력은 압축력이기 때문에 시추공의 응력 제거를 위해서는 온도 저하를 통해 열응력 형태로 인장응력을 발생시킨다. 열응력 분석(Bruno and Jerome, 1985)을 통해서 열응력이 매질의 전단응력을 유발하지 않는다는 것을 보여주면, 이는 응력분석을 매우 단순화 시킬 수 있다.

### 2.1 3중 균열 분석

시추공벽에서의 접선 열응력은 다음 식에 의해 주어진다(Bruno and Jerome, 1985).

$$\sigma_{\theta_t} = \frac{E}{(1-\nu)} \alpha \Delta T = C(T - T_a) \quad (6)$$

여기서,  $E$ 는 탄성계수이며,  $\nu$ 는 포아송 비,  $\alpha$ 는 선형 열팽창 계수이며,  $\Delta T$ 는 주변 온도  $T_a$ 로부터의 온도 변화이다. 그리고  $t$ 는 공벽의 온도이며,  $C = E\alpha/(1-\nu)$ 는 이축상태의 암석 열탄성 정수이다.

Fig. 1에서 주응력 방향  $\theta = 0$ 으로 시추공 축을 지나 는 평면상의 시추공벽에서 다음 조건을 만족할 때 균열이 발생이 발생한다.

$$3\sigma_2 - \sigma_1 + \sigma_T = C(T_a - T_1) \quad (7)$$

여기서,  $\sigma_t$ 는 암석의 인장 강도이며,  $T_1$ 은 균열 형성 온도이다.

시추공벽의 추가적 냉각은 최대 주응력 방향을 기준으로 다양한 각도에서 2차 균열뿐만 아니라 기존 균열

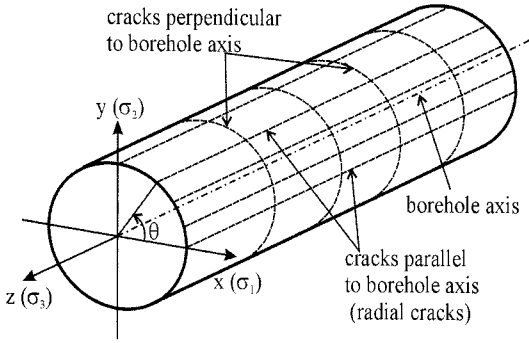


Fig. 1. Local coordinate system and the thermal cracking angles.

을 확대시킬 수 있다. 그러나 균열은 다음 조건을 만족할 때 최초 균열에 수직방향(최소 주응력방향)으로 발생하게 된다.

$$3\sigma_1 - \sigma_2 + \sigma_t = \alpha(T_a - T_2) \quad (8)$$

여기서,  $T_2$ 는 최소 주응력방향을 따라 균열이 발생하는 동안의 시추공벽 온도이다.

시추공 축방향에 수직인 균열은 다음의 조건일 때 발생할 것이다.

$$\sigma_3 + \sigma_t = \alpha(T_a - T_3) \quad (9)$$

여기서,  $T_3$ 는 시추공 축방향에 수직인 균열 형성 온도이며,  $\sigma_3$ 은 세 번째 주응력으로 시추공 축방향으로 작용한다. 상기 수식은 시추공이 하나의 주응력 방향( $\sigma_3$ )을 가진다는 가정이 필요하다.

식 (7)-(9)를 풀면 주응력을 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\sigma_1 = \frac{C}{8} [3(T_a - T_2) + (T_a - T_1)] - \frac{\sigma_t}{2} \quad (10)$$

$$\sigma_2 = \frac{C}{8} [3(T_a - T_1) + (T_a - T_2)] - \frac{\sigma_t}{2} \quad (11)$$

$$\sigma_3 = \alpha(T_a - T_3) - \sigma_t \quad (12)$$

물질 상수  $E, \nu, \alpha$  그리고  $\sigma_t$ 가 주어졌을 때 상기 주응력을 결정할 수 있다. 이들 암석 물성은 시험 위치에서 얻어진 코어 샘플을 시험하여 평가해야만 한다.

그러나 온도  $T_{1r}, T_{2r}$  그리고  $T_{3r}$ 을 얻어서 수행한 균열 개구 실험은 상기 식에서 인장 강도  $\sigma_t$ 를 제거할 수 있다. 그리고 열탄성 상수  $C$ 는 물질 상수  $E, \nu, \alpha$ 을

각각 결정하는 대신 별도의 실험을 통해서 얻을 수 있다.

## 2.2 수직 시추공

세계 각지에서 수행된 초기 지압 측정 자료들은 다음의 결과를 보여준다(Brown and Hoek, 1978; Amadei and Stephanson, 1997).

$$\sigma_v = \gamma H$$

여기서,  $\gamma$ 는 단위 중량이며  $H$ 는 심도이다. 따라서 수직 시추공의 경우, 시추공 축이  $\sigma_3$ 와 평행하다는 가정을 할 수 있으며,  $\sigma_3$ 는 기지의 값으로 간주할 수 있다. 식 (9)로부터 열탄성 상수는 다음과 같다.

$$C = \frac{(\sigma_3 + \sigma_t)}{(T_a - T_3)} = \frac{(\gamma H + \sigma_t)}{(T_a - T_3)} \quad (13)$$

식 (13)을 식 (7)과 (8)에 대입하면 각각 다음의 결과를 얻는다.

$$3\sigma_2 - \sigma_1 + \sigma_t = \frac{(\gamma H + \sigma_t)}{(T_a - T_3)} (T_a - T_1) \quad (14)$$

$$3\sigma_1 - \sigma_2 + \sigma_t = \frac{(\gamma H + \sigma_t)}{(T_a - T_3)} (T_a - T_2) \quad (15)$$

식 (14)와 (15)로부터 수평방향의 주응력 성분  $S_H(\sigma_1)$ 과  $S_h(\sigma_2)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$S_H = \frac{(\gamma H + \sigma_t)}{8(T_a - T_3)} [3(T_a - T_2) + (T_a - T_1)] - \frac{\sigma_t}{2} \quad (16)$$

$$S_h = \frac{(\gamma H + \sigma_t)}{8(T_a - T_3)} [3(T_a - T_1) + (T_a - T_2)] - \frac{\sigma_t}{2} \quad (17)$$

따라서 수직 시추공에서의 첫 번째 행정의 냉각 시험 경우, 실험실 실험으로부터 얻을 수 있는 인장 강도 값만을 필요로 한다.

앞서 언급한 바와 같이 수직 시추공에 대한 균열 개구 실험을 수행할 때, 상수  $\sigma_t$ 는 식 (16)과 (17)에서 0이 되기 때문에 실험실 시험을 생략할 수 있다. 두 번째 행정의 냉각 시험에서 식 (16)과 (17)은 다음과 같이 단순화시킬 수 있다.

$$S_H = \frac{\gamma H}{8(T_a - T_{3r})} [3(T_a - T_{2r}) + (T_a - T_{1r})] \quad (18)$$

$$S_h = \frac{\gamma H}{8(T_a - T_{3r})} [3(T_a - T_r) + (T_a - T_{2r})] \quad (19)$$

### 2.3 다중 파쇄

$\sigma_2$ 의 방향으로 존재하는 높은 접선 압축력으로 인해 종종 최소 주응력의 방향으로 균열을 얻는 것이 불가능할 수 있다. 초기 균열이  $\sigma_1$ 의 방향으로 발생할 것으로 예상하지만, 이후 균열 발생들은 다양한 각도에서 발생할 수 있다. 2차 균열 발생의 응력 수준을 결정할 수 있다면, 보다 많은 방정식을 만들어낼 수 있으며, 이는 초기 응력 값의 정확성을 높일 수 있다. 시추공이 어떤 주응력 방향과도 일치하지 않을 경우 다중 균열 분석은 특히 유용하다.

초기 균열을 각  $\theta_1$ 에서 관찰하였다면, 이는 최대 주응력  $\sigma_1$ 의 방향이 된다. 따라서,  $\theta_1$ 을 0으로 두고, 이후에 발생하는 균열들이 초기 균열 방향  $\theta_1$ 을 기준으로  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  등에서 관찰되었다면, 보다 많은 방정식을 얻을 수 있다. Fig. 1은 시추공 축과 균열 방향에 대한 지역 좌표계이다. Fig. 1에서  $\theta$ 는 초기 방사상 균열을 x-축으로 하여 측정된 연속되는 방사상 균열의 각도이다.

시추공 주변에서의 접선 응력에 관한 일반식은 다음과 같이 주어진다.

$$(1 - 2\cos 2\theta)\sigma_1 + (1 + 2\cos 2\theta)\sigma_2 + \sigma_t = C(T_a - T) \quad (20)$$

상기 식은 3개의 미지수와 열탄성 상수  $C$ 를 포함한다.

보다 많은 균열 발생을 관찰할 수 있다면 미지수에 대한 최적해를 얻는 것이 가능하다. 그러나 균열이 시추공 축에 수직인 평면을 따라 관찰되면  $\sigma_3$ 은  $\sigma_1$ 과  $\sigma_2$ 에 대해 독립적이기 때문에,  $C$ 를 결정한 후 식 (12)를 사용해서 구해야 한다.

최대 주응력 방향에 대해  $0^\circ$ 와  $180^\circ$  방향으로 시추공 축에 수직인 평면에서 균열 개시가 일어날 수 있다. 균열들은 시추공경을 따라 완전한 원형 균열을 형성하면서 점차 전파할 것이다. 이와 같은 경우, 평균 온도는 균열 개시와 균열 형성 온도의 단순 평균으로 계산해야 한다.

$$T_3 = (T_{3i} + T_{3e})/2.0$$

$\sigma_1$ 와  $\sigma_2$ , 즉 다른 방향의 주응력 크기의 차이가 크게 나지 않는다면, 짧은 시간과 온도차에서 균열들이 발생할 수 있다.

다중 균열 개구 시험들로부터 식 (12)와 (20)의  $\sigma_t$ 를 제거시킬 수 있다. 이는 열탄성 상수  $C$ 만으로 주응력

결정을 가능하게 한다.

### 3. 수치 모델링

제안한 기법의 유효성 검증을 위해 열 옵션을 가진 FLAC3D를 이용하여 수치모델링을 수행한다. 인장응력이 암석의 인장강도를 초과할 때 null 영역으로 설정함으로써 균열 발전을 모델링한다. 취성 재료에서의 균열 발생과 전파를 모델링하기 위해 과거 많은 연구자들이 제안한 다양한 방법들이 있지만 이 방법은 간단하다는 장점이 있다. 이 기법은 발파에 의한 파쇄암 형성을 예측하기 위한 유한 요소법에 의해 이용되어 왔다(Saharan, 2004). 균열의 발생과 전파 방향을 모델링 전에 알 수 없을 경우, 이는 충분한 유한요소/차분 격자가 조밀하다면 균열 모사를 위한 유용한 방법이다. 시추공 근처에서 요소의 크기가 크면 균열 발생시 응력 불평형이 발생할 수 있기 때문에 가급적 피해야 한다.

NX 시추공 크기를 모사하기 위해 74 mm 직경의 시추공을 단일 strip 모델을 이용하여 평면 변형률 상태를 만든다. 회전대칭조건을 이용하여 하나의 사분면만을 생성한다. 수직 시추공 조건을 모사하기 위해 시추공 방향을 z-축 방향으로 설정한다. 최대 수평 주응력( $S_H$ )과 최소 수평 주응력( $S_h$ )이 각각 x-축 및 y-축과 평행하다고 간주한다.

시추공 내부에 재킷(매우 낮은 강성을 지닌 물체)을 모델링하고, 이 재킷은  $-196^\circ\text{C}$ 의 온도에서 액화질소를 담고 있다. 재킷을 통해 시추공벽에서 암반으로 열전달이 이루어지는 동안 비정상 열유동 해석(transient heat flow analysis)을 수행한다. 인장 응력이 암반의 인장 강도를 초과할 때까지 열역학 상호작용 해석을 수행한다. FISH 프로그램은 각 계산 단계에서 절점에서 각 요소의 응력 수준을 검토한다.

임의의 요소에 대해 인장 응력이 인장 강도를 초과할 때, 그 요소를 "null element"로 지정한다. 이는 심각한 불평형력을 초래하게 된다. 따라서 열 행정을 멈추고, 모델은 역학적 행정만을 수행함으로써 역학적 평형상태에 도달하게 된다. 이렇게 하나의 과정이 끝나면, 다시 열-역학 상호작용 과정에 대한 해석을 다시 시작한다. 이 과정은 균열이 시추공벽 경계 밖으로 발전할 때까지 계속된다. 첫 번째 균열(대개  $S_H$  방향을 따라 발생함)이 발생하는 시점의 시추공벽 온도를  $T_1$ 라 하고,  $S_H$  방향에 대해  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ ,  $\theta_4$  각도로 나타나는 2차 균열들의 발생 온도를 각각  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$ 라 한다.

수행된 예는 Table 1의 주변 암반과 재킷의 열 및 역학 물성 입력 자료를 활용하였다.

**Table 1.** The thermal and mechanical properties of surrounding rock and jacket.

| Material                                      | Surrounding rock        | Jacket                  |
|---|-------------------------|-------------------------|
| Thermal and Mechanical Properties             |                         |                         |
| Coefficient of thermal expansion ( $\alpha$ ) | 6.64e-6 /°C             | 2.0e-7 /°C              |
| Thermal conductivity ( $k$ )                  | 2.63 W/m/°C             | 3.0 W/m/°C              |
| Specific heat at constant pressure ( $C_p$ )  | 710 J/kg/°C             | 500 J/kg/°C             |
| Density ( $\rho$ )                            | 2,500 kg/m <sup>3</sup> | 1,000 kg/m <sup>3</sup> |
| Tensile strength ( $\sigma_t$ )               | 5 MPa                   | -                       |
| Young's Modulus (E)                           | 20 GPa                  | 0.02 GPa                |
| Poisson's ratio ( $\nu$ )                     | 0.25                    | 0.25                    |

### 3.1 2차원 평면 변형률 조건의 해석

평면 변형률 조건은 공경 74 mm의 단일 평판 모델(single strip model)을 이용하여 구성할 수 있다. 시추공축과 x-, y-축을 따라 대칭되는 평면을 사용하여 시추공의 한개 사분면과 주변 암반을 구성하였다. 시추공은 수직 시추공 조건을 모사하기 위해 z-축 방향과 같게 설정하였다. 최대 수평 응력( $S_H$ )은 x-축과 평행하게 간주하고 최소 주응력은  $S_h$ 는 y-축과 평행하다고 가정한다.

초기 응력 조건은  $\sigma_{xx} = 10$  MPa,  $\sigma_{yy} = 7$  MPa,  $\sigma_{zz} = 20$  MPa,  $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{zx} = 0$  MPa으로 설정하였다.

#### 3.1.1 초기 냉각 행정

Fig. 2는 냉각과 열 균열 발생의 열역학 모델링의 다양한 단계를 보여준다. Fig. 2(a)-(f)로부터 초기 냉각 행정 동안 일련의 파괴 과정을 보여준다. 시추공경에서 x-축방향으로 균열들이 발생하는데, x-축방향은 최대 주응력( $S_H$ ) 방향이다. 이어서 발생하는 2차 및 3차 균열은 최대 주응력  $S_H$  방향에 대해 9.5°와 17.5°에서 각각 발생하였다(Fig. 2(b)와 (c)). 모든 균열들은 시추공축과 평행한 수직균열로서 간주할 수 있다. 일반적으로 균열이 7~10°의 간격으로 발생하는 것을 수치해석으로부터 알 수 있다. 새로운 균열이 발생하였을 때 초기 균열들은 2~3요소에 해당하는 만큼 암반 속으로 발전하는 것을 관찰할 수 있다(Fig. 2(d)-(f)). 7개의 균열들을 0, 9.5, 17.5, 25.5, 32.5, 41.5 그리고 53.5°에서 각각 관찰할 수 있다. 수치 모델링 동안, 시추공벽의 온도는 균열 발생 여부의 관찰과 병행하였다. 이 균열들은 시

추공벽 온도 -56.85, -66.12, -73.6, -89.76, -102.9 그리고 -113.6°C에서 발견되었다.

이 연구에서 임계 평면 응력을 20 MPa이며, 이는 y-축 방향의 접선 응력(23 MPa)보다 작다. 따라서 최대 주응력  $S_H$ 에 수직인 균열은 파악할 수 없으며, y-축 방향의 균열에 앞서 시추공벽에 수직인 수평 균열이 발생하였다. 3방향으로 암반 파쇄에 대한 연구를 위해 보다 정교한 3차원 모델링이 필요하다.

#### 3.1.2 분석

초기 응력 측정을 위한 새로운 방법의 잠재성 및 검증을 위한 수치 모델링 결과를 분석하기 위해 다양한 각도에서의 균열 발생 과정 동안 시추공벽에서의 이론적 응력값과 열응력의 수치해석 추정치와 비교하였다.

Fig. 3은 x-축에 대해 시추공경의 다양한 각도에서 이론적 접선 응력을 보여준다. 이들 이론해들은 식 (1)을 이용하여  $a = r$ 에 대해 계산된 값이다. 식 (6)을 이용하여 균열 발생 시점에서 7개의 균열각에 대한 수치해를 공벽 온도로부터 계산하였으며, 인장 강도치를 차감한 결과는 Fig. 3과 같다.

$\theta = 0$ 에서의 첫 번째 균열 발생을 위해 필요한 수치해석으로부터 얻은 인장 열응력값( $-\sigma_t$ )은 이론 접선 응력치와 잘 일치한다(Fig. 3). 그러나 나머지 2차 및 3차 균열들의 경우 이론 응력 수준들을 초과하여 나타났다. 이는 초기 균열들 주변에서 응력 해방으로 인한 결과로서, 이는 1차 발생 균열이 2차 및 3차 균열 발생에 필요한 응력 집중에 심대한 영향을 미치기 때문이다. 따라서 첫 번째 냉각 행정에 대해서 식 (7)에 의한 단일 방정식으로 정확하게 얻을 수 있다. 응력 해방은 인장 응력 집중 뿐만 아니라 압축력에 대해서도 응력 제거 효과를 가지기 때문에 암반의 인장 강도가 주변 응력 수준과 비교하여 낮을 경우 이와 같은 불일치는 감소할 수 있을 것이다.

#### 3.1.3 균열 개구 시험

2차 냉각 행정과 균열 개구를 모사하기 위해, 시추공을 다시 녹여서 원래 온도 상태로 돌려놓는다. 이는 재킷으로부터 액화질소를 회수하여 수분동한 상온의 공기로 시추공 주변에 불어 넣어줌으로써 가능하다. 동시에 안정화될 때까지 온도를 모니터링 한다. 이는 먼저 생성된 균열들을 닫히게 하고, 균열에 압축력을 작용하도록 한다. 시추공을 재냉각함으로써 인장 응력을 발생시킨다. 이는 초기 균열을 특정 시추공벽 온도에서 초기 각도에서 개구시킬 것이다. 균열은 인장강도가 없기 때문에 인장 강도 인자는 자동적으로 응력 방정식 식

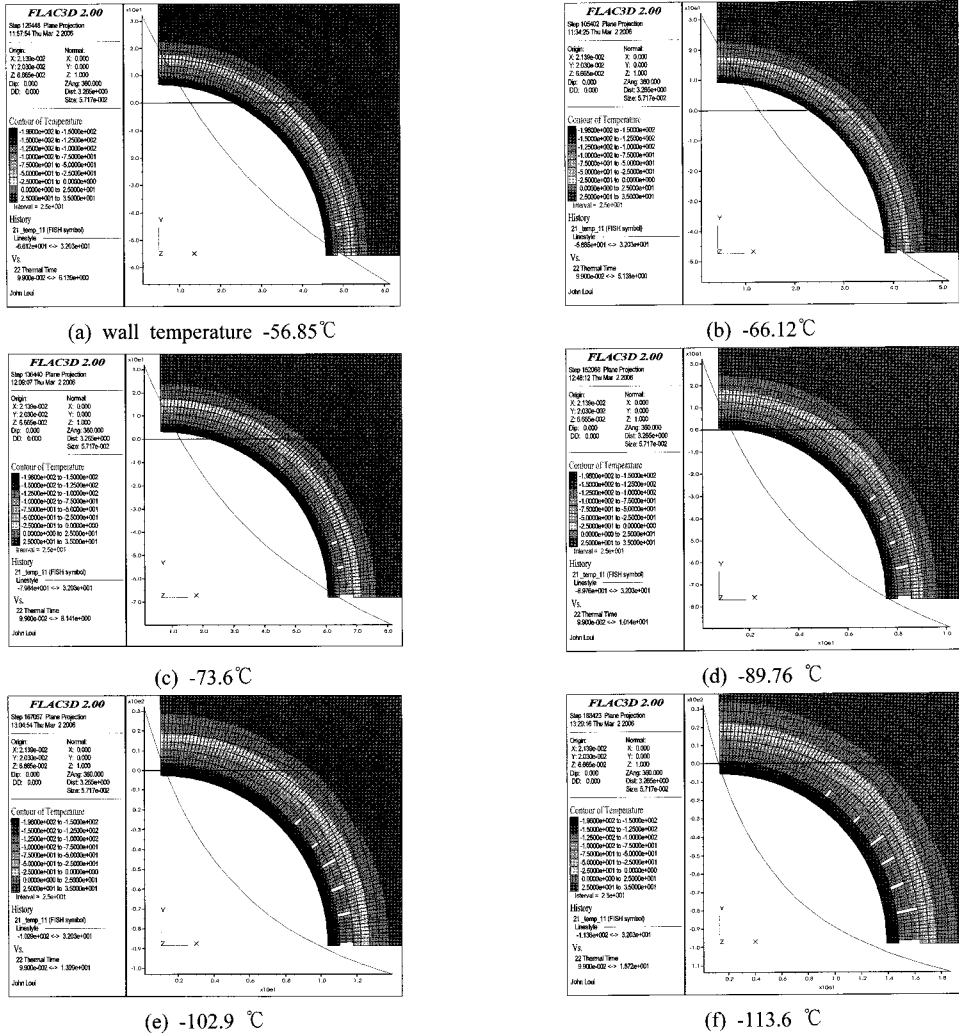


Fig. 2. Sequence of thermal cracking during first cooling cycle - Example 1.

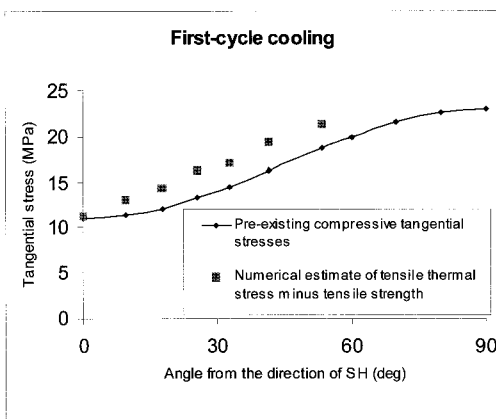


Fig. 3. Theoretical and numerical estimates of tangential stresses for first-cycle cooling - Example 1.

(20)에서 제거된다. 이는 임의의 두 방정식으로부터 미지의 두 주응력에 대한 해를 구할 수 있다.

다음 과정을 통해 2차 냉각 행정, 즉 균열 개구 시험을 모사할 수 있다.

- a) 1차 냉각 행정에 의해 형성된 균열을 매핑한다.
- b) 균열 요소를 탄성 요소로 재변환 및 인장강도가 없는 물체로 표시한다.
- c) 온도가 대기 온도로 안정화시키고, 매질의 모든 열응력을 영으로 초기화한다.
- d) 재킷 표면에서의 온도  $-196^{\circ}\text{C}$ 로 재적용시키고 2차 냉각 행정을 시작한다.
- e) FISH 프로그램을 이용하여 균열 개구 현상 뿐만 아

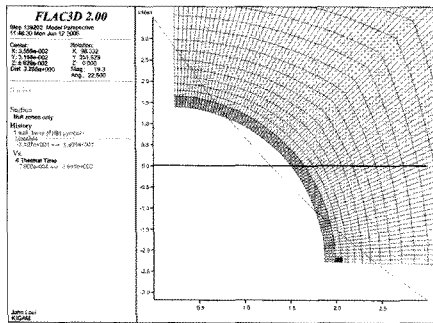
니라 시추공벽의 온도를 모니터링한다.

균열 요소로 인장강도가 없는 물체로 선언하였기 때문에, 존재하던 압축 응력이 인장 열응력에 의해 상쇄될 때 이들 요소에서 균열이 발전할 것으로 예상할 수 있다. 2차 냉각 행정동안 균열 개구는 Fig. 4와 같다. 첫 번째 균열 개구 현상은 x-축을 따라 관찰할 수 있다 (Fig. 4(a)). 균열 개구시 시추공벽의 온도는 -30.5°C이며, 이는 1차 냉각 행정에서의 온도에 비해 매우 낮은 온도이다. 이후 연속되는 균열 확장 및 균열 생성은 9.5, 17.5, 25.5, 32.5, 41.5 그리고 53.5°에서 관찰할 수 있다(Fig. 4(b)-f)). 이와 같은 방향을 따라 균열 개구 현

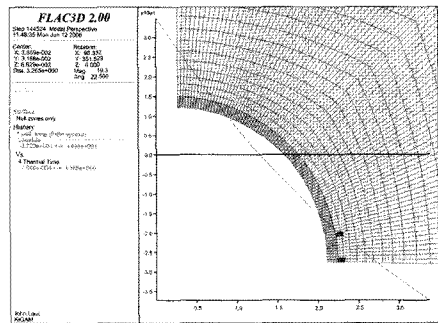
상 동안 시추공벽 온도는 각각 -32.97, -37.6, -41.1, -50.1, -62.17과 -75.3°C이다.

균열 개구시 열응력의 수치해석에 의한 추정치는 기존재하는 이론 점선 응력값에 대해 도시한 결과는 Fig. 5와 같다. 주지해야 할 점은 균열 개구에 있어 인장 강도를 영으로 설정한다는 점이다. Fig. 5로부터 수치해석에 의한 추정치는 이론치에 매우 근사하게 나타났다.

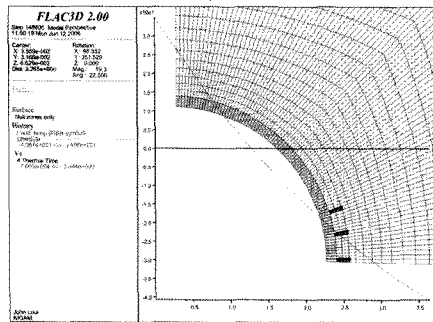
따라서 두 각도에서의 균열 개구 온도는 두 개의 주응력  $S_H$ 와  $S_V$ 을 계산하는데 이용할 수 있다. 그러나 이 해는 주응력을 열탄성 상수  $C$ 에 의해 표현할 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이, 수직 시추공에 대해  $C$ 는 다음과 같이 추정할 수 있다.



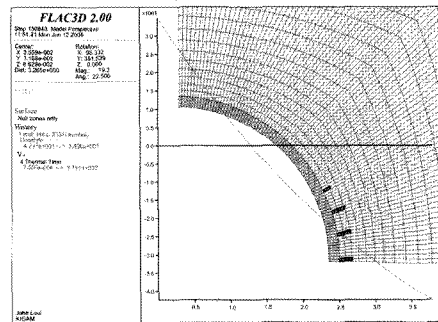
(a) wall temperature -30.5°C



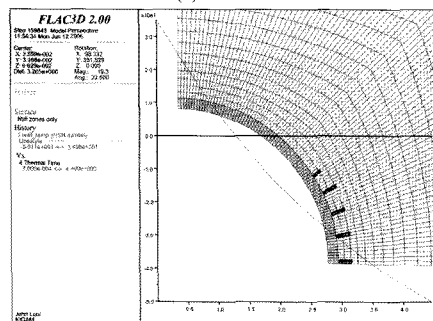
(b) -32.97°C



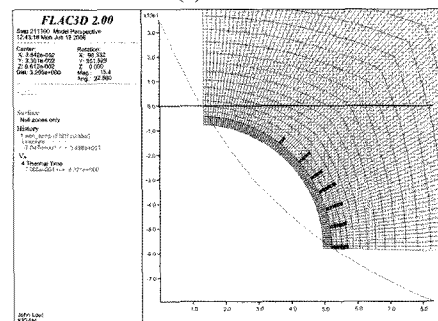
(c) -37.6°C



(d) -41.1°C



(e) -50.1°C



(f) -75.3°C

Fig. 4. Sequences of thermal cracking during second cooling cycle - Example 1.

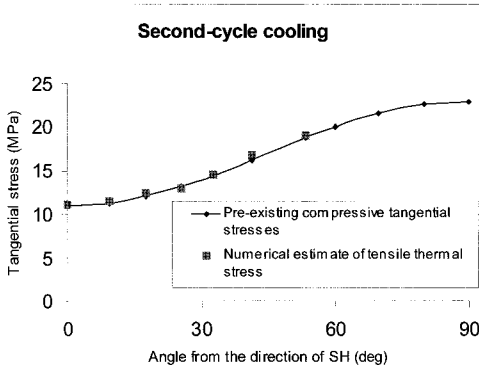


Fig. 5. Theoretical and numerical estimates of tangential stresses for second-cycle cooling - Example 1.

$$C = \frac{\gamma H}{(T_a - T_{3r})}$$

여기서,  $T_{3r}$ 은 시추공 축에 수직인 수평균열의 개구 시 시추공벽의 온도이다. 그러나 다른 모든 조건들은 실험실 시험으로부터 추정할 수 있다. 2차원 분석에서 시추공 축에 수직인 수평 균열 발생은 파악할 수 없으며, 이는 3차원 해석을 필요로 한다.

만약 열탄성 상수  $C$ 이  $0.1771 \text{ MPa}^\circ\text{C}$ 이란 것을 알면 주응력을 추정할 수 있다.

7개의 균열각 등을 고려하여 주응력에 대한 최소 자승해를 구한 결과,  $R^2 = 0.99$ 로서  $\sigma_1 = 10.17 \text{ MPa}$ 과  $\sigma_2 = 7.06 \text{ MPa}$ 을 얻을 수 있었다. 이들 값들은 수치 모델에서 적용한  $\sigma_{xx}$ 와  $\sigma_{yy}$  값과 매우 유사한 값이다.

### 3.2 3차원 해석

앞선 2차원 평면 변형률 조건에서의 해석은 시추공에 수직인 평면에서의 열균열 모델링을 수행할 수 없다. 따라서 저온 열응력이 가해질 구간에 해당하는 충분한 길이를 가지는 시추공 단면을 고려한 3차원 모델을 FLAC3D에서 구성한다. 3차원 모델링 과정은 앞서 2차원 예와 같다. 초기 응력 수준은 다음과 같다.

초기 응력 조건은  $\sigma_{xx} = 5 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_{yy} = 2 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_{zz} = 3 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{zx} = 0 \text{ MPa}$ 으로 설정하였다.

직교 평면에서의 전단 응력은 작용하지 않는다. 즉, 주응력은 축 방향을 따라 작용하는 것으로 가정하고, 시추공은 z 축을 하나의 주응력 방향으로 위치시킨다.

#### 3.2.1 초기 냉각 행정

초기 냉각 시험동안, 인장 균열은 주응력 방향인 x-축

방향에서 시추공 축에 평행한 평면상에 모델링한 시추공의 단면을 따라 개시한다. 이 초기 균열 형성은 Fig. 6과 같다. 시추공에 평행한 평면상의 같은 균열들이 x 축에 다양한 각도에서 관찰할 수 있다(Fig. 6(b)-(f)).

이와 동시에 x-축 방향으로부터 시작하는 시추공에 수직인 균열들 또한 관찰할 수 있으며, y-축 방향에 도달할 때까지 시추공벽을 따라 전파 발전하여 완전한 원판 수직 균열을 형성한다. 이 균열 형성은 Fig. 6(b)-(f)에서 확인할 수 있다. 수직 균열은 시추공 길이방향을 따라 5~8 mm의 간격으로 발생함을 알 수 있다. 균열 형성 개시와 완전한 균열 형성의 평균 온도는 다음과 같이 계산한다.

$$T_3 = (T_{3i} + T_{3e})/2.0 \quad (21)$$

$\sigma_1$ 와  $\sigma_2$ , 즉 다른 방향의 주응력 크기의 차이가 크게 나지 않는다면, 짧은 시간과 온도차에서 균열들이 발생할 수 있다. 본 예의 경우, 수직 균열 형성의 평균 온도는  $15.3^\circ\text{C}$ 이다. 수직 균열 형성을 위한 응력은 식 (12)를 이용하여 계산한 결과  $2.14 \text{ MPa}$ 이다.

다중 균열 개구 시험들로부터 식 (12)와 (20)의  $\sigma_t$ 를 제거시킬 수 있다. 이는 열탄성 상수  $C$ 만으로 주응력을 결정 가능케 한다.

Fig. 6에서, 6개의 균열들을 x 축을 기준으로  $0^\circ$ 와  $59.25^\circ$  사이에서 관찰할 수 있다.  $0, 11.25, 23.25, 35.25, 47.25$  그리고  $59.25^\circ$ 에서 초기 균열 개시에 대응하는 시추공벽 온도는 각  $-10.7, -16.07, -27.8, -45.96, -69.63$ , 그리고  $-85.03^\circ\text{C}$ 이다.

Fig. 7은 접선응력의 이론치와 수치해석 결과에 대한 비교이다. 초기 균열 형성에 있어서 앞선 경우처럼 잘 일치함을 알 수 있다. 그러나 이후에 발생하는 균열 각에 대해서 다소 과추정 결과를 보인다. 다중회귀 분석 결과  $\sigma_1 = 6.8 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_2 = 2.3 \text{ MPa}$  그리고  $\sigma_t = 6.47 \text{ MPa}$ 이다. 이 값들은 15-35% 오차 범위에 속한다.

#### 3.2.3 균열 개구 시험

2차 냉각 행정과 균열 개구 모델에서 2차 냉각 행정은 앞서 2차원 검증의 경우와 같은 과정을 수행한다. 1차 냉각 행정 동안 기록된 균열을 대략적으로 도시하였다. Fig. 8은 균열 개구의 다른 단계를 보여준다. Fig. 8에서  $0, 11.25, 23.25, 35.25, 47.25$  그리고  $59.25^\circ$ 에서 반경방향 균열 개구에 대응하는 온도는 각각  $22.57, 17.1, 8.75, -5.5, -23.0$  그리고  $-39.5^\circ\text{C}$ 이다. 수직 균열 개구 현상은  $17^\circ\text{C}$ 의 공벽 온도에서 발생하여(Fig. 8(b)),  $2.4^\circ\text{C}$ 에서 완전한 원판 균열을 형성하는데, 전체 평균



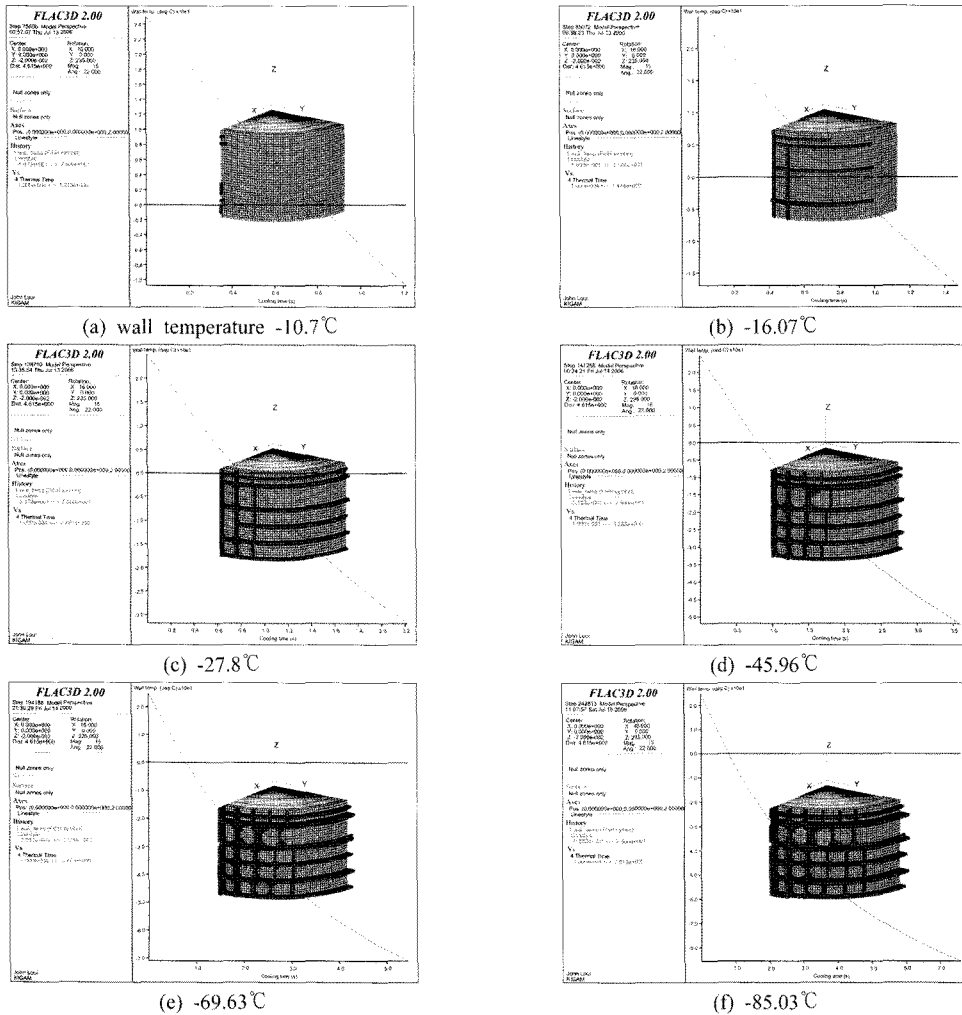


Fig. 6. Sequence of thermal cracking during first cooling cycle - Example 2.

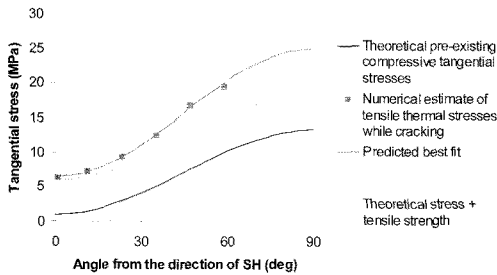


Fig. 7. Theoretical and numerical estimates of tangential stresses for first-cycle cooling- Example 2.

온도는 9.7°C이다. 이 평균 온도에서의  $\sigma_{zz}$  수준은 2.7 MPa이며, 이는 15% 오차 내에 해당한다.

Fig. 9는 균열 개구 열응력들에 대한 수치해석적 추정

치와 시추공경 밖에 존재하는 이론적 접선 응력 수준의 비교이다. 2차원 검증에서처럼, 수치해석적 추정치는 균열개구 시험에서 이론치와 상당히 부합하는 결과를 보였다. 최소 자승법을 이용한 다중 선형 회귀는  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ 에 대한 최적 적합치로서 5.78과 2.13 MPa를 각각 보였다. 이는 주응력의 15% 오차범위 내의 값이다.

#### 4. 결론

본 연구에서 이론 및 수치해석적 타당성 검토로부터 새롭게 제안된 저온 열균열 현상을 이용한 암반 초기응력 측정법은 시추공벽에서의 인장 균열 형성을 감시하고 시추공벽에서의 균열 개시 시점의 온도를 기록함으로써 초기 응력을 정밀하게 측정할 수 있는 것으로 나

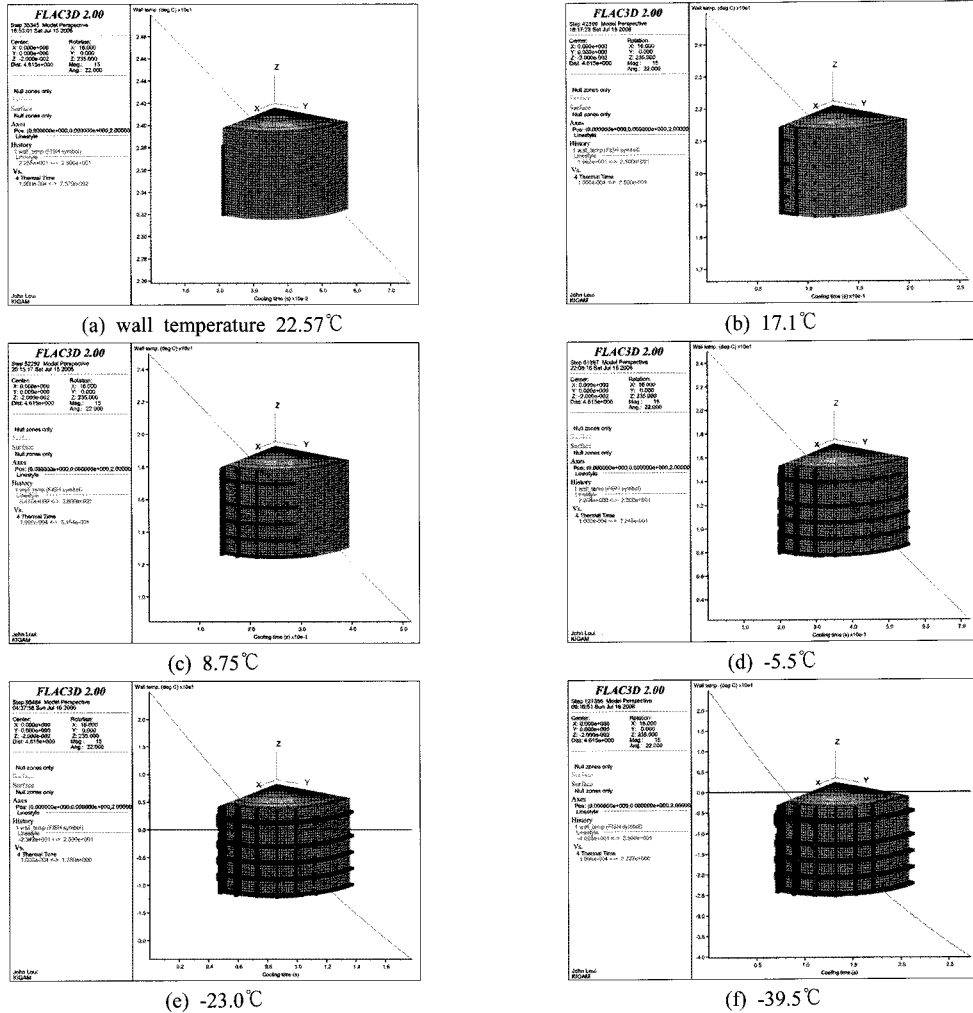


Fig. 8. Sequences of thermal cracking during second cooling cycle - Example 2.

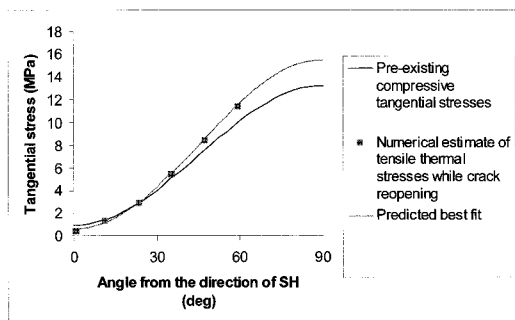


Fig. 9. Theoretical and numerical estimates of tangential stresses for second-cycle cooling - Example 2.

타났다. 시추공벽 주위를 냉각시키는데 소요되는 시간은 단지 수 분정도일 것이다. 이 방법은 모든 방향의 시

추공에 적용가능하다. 또한 시추공축을 따라 형성된 균열의 방향을 모니터링함으로써 세 개의 주응력 성분을 얻을 수 있다. 수압파쇄법과 마찬가지로 시추공을 사용하기 때문에 깊은 심도에서도 적용가능하다는 장점을 가진다.

그러나 제안한 측정법은 아직 개념 수준이며, 추가적인 실험 및 수치해석적 연구를 통해 다양한 조건에서의 타당성을 확보할 필요가 있다. 향후 실제 현장 적용을 위해서는 시추공 냉각을 시키고 균열 발생을 감시할 수 있는 장치나 방법 등에 대해 보다 구체적인 설계가 필요하다. 응력 측정의 정밀도를 높이기 위해서는 균열의 개시 및 시추공벽의 온도 변화의 정확한 측정에 달려있다. 시추공 축에 대해 다양한 응력 크기 및 방향 하에서 추가적인 3차원 수치해석을 통한 검증과 T-H-M 상호작용

용에 관한 연구를 토대로 지하수가 존재할 경우에 대한 검증은 추가적으로 수행해야 한다. 또한 동결팽창압, 열 충격 등의 영향을 고려한 이론적 검토도 필요할 것이다.

## 참고문헌

1. Amadei, B. and Stephansson, O. (1997) Rock stress and its measurement, 1st Ed., Chapman and Hall, London.
2. Bock, H. and Foruria, V. (1983) A recoverable borehole slotting instrument for in situ stress measurements in rock, Proc. Int. Symp. On Field measurements in Geomechanics, Zurich, Balkema, Rotterdam, 15-29.
3. Brown, E. T. and Hoek, E. (1978) Trends in relationships between measured in situ stresses and depth, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abst., 15, 211-215.
4. Bruno, A. B. and Jerome, H. W. (1985) Theory of thermal stresses, Dover Publications, Minneola, New York.
5. Fairhurst, C. (1964) Measurement of in situ rock stresses with particular references to hydraulic fracturing, Rock Mech. Eng. Geol., 2, 129-147.
6. FLAC3D manual ver 2.0, ITASCA.
7. Ito T., Sato A. and Hayashi K. (2001) Laboratory and field verification of a new approach to stress measurements using a dilatometer tool, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 38, 1173-1184.
8. Jaeger, J. C. and Cook, N. G. W. (1976) Fundamentals of rock mechanics, 2nd Ed., Chapman and Hall, London.
9. Kaiser, J. (1950) An investigation into the occurrence of noises in tensile tests or a study of acoustic phenomena in tensile tests, Unpublished Doctoral Thesis, Tech. Hosch, Munich.
10. Leeman, E. R. (1964) The measurement of stress in rock - Part I, J. S. Afr. Inst. Min. Metall., 65, 45-114.
11. Leeman, E. R. and Hayes, D. J. (1966) A technique for determining the complete state of stress in rock using a single borehole, Proc. 1st Cong. Int. Soc. Rock Mech. (ISRM), Lisbon, 2, 17-24.
12. Mayer, A., Habib, P. and Marchand, R. (1951) Underground rock pressure testing, Proc. Int. Conf. Rock Pressure and Support in the workings, Liege, 217-221.
13. Merrill, R. H. (1967) Three component borehole deformation gage for determining the stress in rock, U.S. Bureau of Mines Report of Investigation RI 7015.
14. Stephansson, O. (1983) Rock stress measurement by sleeve fracturing, Proc. 5th Cong. Int. Soc. Rock Mech. (ISRM), Melbourne. Balkema, Rotterdam, F129-137.
15. Saharan, M. R. (2004) Dynamic modelling of rock fracturing by distress blasting, Ph.D. Thesis, University of McGill, Canada.
16. Zoback, M. D. (1985) Well bore breakouts and in situ stress, J. Geophys. Res., 90, 5523-30.

**류창하**

1976 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
1979 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학석사  
1989 University of Utah(in USA) 공학  
박사  
Tel: 042-868-3236  
E-mail: cryu@kigam.re.kr  
현재 한국지질자원연구원 지구환경연구  
본부 책임연구원

**류동우**

1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
1996년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학석사  
2000년 서울대학교 대학원 지구환경  
시스템 공학부 공학박사  
Tel: 042-868-3099  
E-mail: dwryu@kigam.re.kr  
현재 한국지질자원연구원 지구환경연구  
본부 선임연구원

**최병희**

1988 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
2002 전남대학교 대학원 자원공학과  
공학석사  
2005 전남대학교 대학원 지구시스템공  
학과 공학박사  
Tel: 042-868-3237  
E-mail: bhchoi@kigam@re.kr  
현재 한국지질자원연구원 지구환경연구  
본부 선임연구원

**신중호**

1983년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
1985년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학석사  
1990년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학박사  
Tel: 042-868-3242  
E-mail: jhsynn@kigam.re.kr  
현재 한국지질자원연구원 지구환경연구  
본부 책임연구원

**John Porathur Loui**

B.Tech. Mining Eng. 1994 I.I.T., Kharagpur  
Ph.D. Rock Mechanics 2000 I.I.T., Kharagpur  
Tel: +91326-2201061, 2203070 Ext. 4231  
E-mail: johnlouip@yahoo.com  
현재 Central Mining Research Institute,  
India