

## 방사성폐기물 처분공 주변 암주에서의 균열 진전 및 손상에 대한 수치해석적 연구

### A Numerical Study on the Fracture Evolution and Damage at Rock Pillar Near Deposition Holes for Radioactive Waste

이 희 석\* Lee, Hee-Suk

#### Abstract

At Äspö hard rock laboratory in Sweden, an in-situ heater experiment called “Äspö Pillar Stability Experiment (APSE)” is prepared to assess capability to predict spalling and stability in a rock mass between deposition holes for radioactive waste. To predict reasonably fracturing process at rock pillar under a planned configuration before testing, a boundary element code FRACOD has been applied for modelling. The code has been improved to simulate explicitly fracture evolution both at rock boundaries and in intact rocks. A new inverse stress reconstruction technique using boundary element has been also developed to transfer stress field by excavation and thermal loading into the FRACOD model. This article presents the results from predictive modelling for the planned in-situ test condition. Excavation induced stresses might cause slight fracturing in the pillar walls. Typical shear fractures have been initiated and propagated near central pillar walls during 120 days of heating, but overall rock mass remained stable under the considered configuration. The effects of pre-existing joints and properties of fractures are also discussed. It is found from the results that FRACOD can properly model essential rock spalling and propagation at deep tunnels and boreholes.

#### 요 지

스웨덴 Äspö 지하실험실에서는 방사성폐기물 처분공 사이 암반에서의 파쇄 및 안정성을 예측할 수 있는 능력을 평가하기 위해 Äspö 암주 안정성 실험 (APSE)이라고 하는 현지 가열 실험이 준비되고 있다. 계획된 시험 조건하의 암주에서의 균열 진전 과정을 합리적으로 예측하기 위해 경계요소 수치해석 코드인 FRACOD가 적용되었다. 암석 경계와 무결암석 내에서의 균열 진전을 모사하기 위해 코드를 개선하였다. 또한 굴착 및 열하중에 의해 발생하는 응력분포를 FRACOD 모델에 적용하기 위해 새로운 경계요소를 이용한 역해법을 개발하였다. 이 글은 계획된 시험 조건에 대한 예측 모델링 결과를 제시한다. 굴착에 의한 응력분포는 암주 벽면에 약간의 균열을 발생시켰다. 120일 동안의 가열에 의해 암주 벽면 중앙부에서 전형적인 전단 균열들의 개시 및 전파가 일어났지만, 전반적으로 암주 내부는 고려되는 조건하에서 안정한 상태를 유지하였다. 기존 절리들의 존재와 균열 물성에 따른 영향이 또한 논의되었다. 해석 결과를 통해 FRACOD가 심부 터널 및 보어홀에서 취성 암반의 균열 진전 현상을 적절히 모델링할 수 있음을 알 수 있다.

**Keywords :** Boundary element method, Fracture initiation, Fracture propagation, Inverse technique, Rock fracture, Rock pillar, Spalling

\* 정회원, SK건설(주) Geotask팀 (Member, SK Engrg. & Construction, hslee@skec.co.kr)

## 1. 서론

한국을 비롯한 대부분의 원자력 에너지 사용 국가들에서는 심부 암반층 내 지하구조물 건설을 통한 격리가 고준위 방사성폐기물 처분을 위한 가장 현실적인 대안으로 고려되고 있다. 처분장 건설에 따른 설계, 조사, 시공, 밀폐 및 장기간의 보존과 관련된 첨단 공학적 문제들이 다양한 학문 분야에서 제기되고 연구되어 왔다. 고준위 폐기물처분장과 관련된 프로젝트는 그 공사 규모의 거대함은 물론 인류에 미치는 안전성 여부에 대한 확실한 보장에 기초해야 하므로 처분장 및 주변 환경 안전과 관련된 다양한 가능성들이 엄밀하게 평가되고 검증되어야 한다. 스웨덴을 비롯한 구미 각국에서는 암반 내 공학방벽의 안전성과 핵종이동가능성에 대한 실제현장 평가를 위해 심부 암반 내 지하실험실을 건립하여 여러 분야의 실지 규모 현지 실험을 실시하여 예측 기법의 검증과 함께 발생가능한 공학적 제문제들을 검토하고 있다.

이러한 연구의 일환으로 현재 스웨덴 Äspö 암반 지하 실험실 내 지하 450m 터널에서는 모의 처분공들 사이에 현지 굴착 및 가열 시험이 준비되고 있다(Andersson, 2003). 이 실험은 스웨덴 KBS-3 처분공 개념에 기초한 처분장 설계시 처분공 굴착 및 처분된 고준위 폐기물로부터 발생하는 열로 인한 처분공 사이의 손상 및 균열전파 가능성을 평가하고 이를 수치해석으로 예측할 수 있는 기술을 확보하기 위해 준비되었다. 열응력으로 인해 발생하는 취성 균열들의 전파 및 결합은 역학적인 안정성 측면에서 부정적으로 기능할 뿐 아니라 공학 방벽 내 추가적인 핵종이동 채널을 유도하여 장기적인 핵종이동에 영향을 줄 수 있으므로 그 가능성을 신중히 평가해야 한다.

이 때까지 심부 암반의 손상 및 파괴 손상 문제는 일반적인 탄소성 혹은 거시적 파괴이론 또는 손상역학 등에 의한 연속체적인 접근법으로는 어느 정도 다루어져 왔다(Martin and Maybee, 2001; 장수호 등, 2002). 하지만 실제 경암에서의 취성 파괴기구는 미세균열들의 성장 및 결합에 의해 개별 거시적 파괴면들이 형성되는 것이므로 연속체적인 접근으로는 구체적인 균열들의 성장과정 및 안정성 여부에 대해 엄밀하게 평가하기에 한계가 있다. 개별 균열들의 발생 및 전파를 명시적으로 고려할 수 있는 파괴역학적 접근법은 실제 취성암석의 균열진전과정을 이론적으로 명확히 설명할 수 있다. 하지만 이들 방법은 주로 미시적 균열 성장 과정을 수치해석에 직접 도입하는데 있어서의 어려움과 이와 관련된

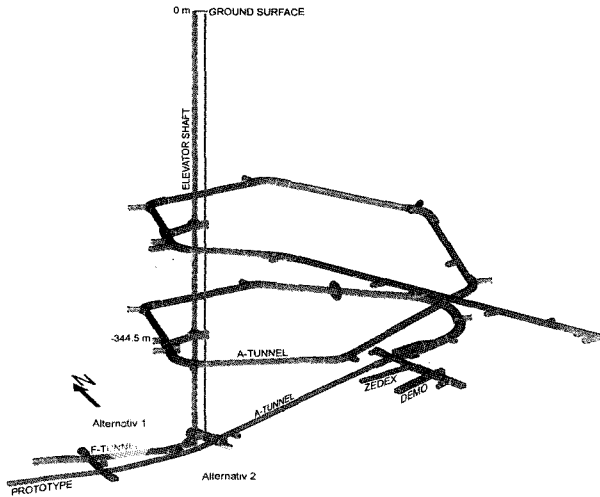
방대한 계산량의 한계로 인해 암교(rock bridge)와 같이 단순한 구조들의 해석 등에 국한되어 왔다(Li, 1993).

경계요소 해석 코드인 FRACOD는 원래 파괴역학적 관점에서 다중 단열 사이의 균열 성장 및 전파과정을 명시적으로 해석하기 위해 개발되었다(Shen and Stephansson, 1993). 본 연구에서는 계획된 현지 실험의 조건에 따른 암반의 거동을 예측하기 위해 무결암 경계 및 내부에서 균열이 개시될 수 있고 실제 거시적 균열 진전과정을 합리적으로 모사할 수 있도록 코드를 개선하였다. 또한 다른 연속체 수치해석 모델로부터 구한 굴착 응력 및 열응력 결과를 FRACOD에 적용하기 위해 역해 경계요소법을 이용하여 응력 값들을 재현하였다(Lee and Jing, 2003). 이들 개발을 통해 현재 진행되고 있는 현지 가열 시험 조건을 이용하여 처분공 사이 암주의 균열 전파 및 손상 거동을 해석하였다. 또한 암주 근처에 기존의 불연속면이 있는 경우의 영향에 대해서도 평가하였다.

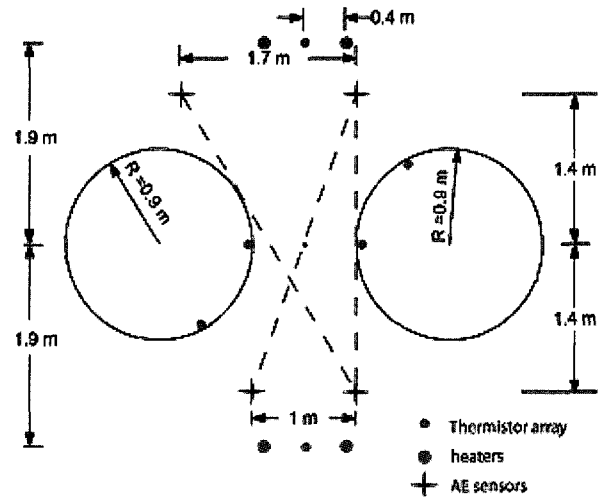
## 2. 해석방법

### 2.1 Äspö 지하실험실 현지 가열시험 개요

스웨덴 핵연료 및 폐기물 관리 회사(SKB)는 확정된 KBS-3 처분 개념에 근거하여 결정질 암반 내 300-700 m 심도의 수직 8m, 직경 1.8m의 처분공에 구리 처분용기(canister)에 밀봉된 핵연료를 처분할 계획이다. 현재 Äspö 지하실험실 최심부인 -450m 부근에서의 암반은 탄성적으로 거동하는 것으로 밝혀졌다. Äspö 암주 안정성 실험(APSE)은 초기 탄성 암반이 처분공 굴착과 열하중에 따른 암반의 손상, 균열 전파 및 파쇄 과정의 가능성에 대한 반응 정도를 효과적으로 예측하기 위해 시작되었다. 수치해석으로 대상 실험과정을 해석한 후 실제 현지 실험을 통해 수치해석이 얼마나 대상 거동을 잘 예측할 수 있는가를 평가할 예정이다. 실험 대상 암주는 -450m에서 소규모 터널 굴착 후 인버트에  $\phi 1.8$  m, 길이 6m의 두 개 모의 처분공을 1m 간격으로 보어링하여 암주를 형성한다. 이중 한쪽 보어홀에는 처분시 타설되는 충전재(backfill)에 의해 발생하는 팽창압을 고려하기 위해 1MPa의 수압을 가한다. 전기로를 설치하여 120일의 가열 동안 열하중을 가하는 동안 암주 각 지점에서의 온도 변화를 계속할 예정이다. 특수한 3D 미소파괴음(AE) 및 탄성파 센서들을 보어홀이 굴착되기 이전에 해당 암반에 부착하여 실험 동안 암반의 손상 및 파괴거동을 계속할 예정이다. 그림 1은 Äspö 지하실험실의 개략도



(a) Äspö 지하 실험실의 구조도 및 대안 부지



(b) 결정된 현지 가열 시험 사양 및 센서 위치

그림 1. Äspö 지하실험실 현지 가열 시험 개요

및 시험 위치, 그리고 계획된 시험 사양들을 보여준다. 굴착이 진행되기 전 인근 터널의 예비 입력자료들을 토대로 실시한 수치해석을 통해 굴착응력 및 열응력에 대한 민감도 분석을 실시하였으며, 암반 손상을 일으킬 최적 실험 조건들을 결정하였다(Andersson, 2003; Fredriksson et al., 2003). 120일 동안 200W/m의 가열을 통해 보어홀 벽면에서 약 40°C 상승하는 조건을 실험조건으로 선택하였다. 이를 통해 그림 1(b)에 나타난 것과 같이 위의 실험 조건을 충족시키는 열원 및 AE 센서의 위치를 결정하였다.

연속체 암반을 가정하고 3차원 경계요소 해석을 통해 정해진 조건에서 터널 및 보어홀 굴착에 따른 암반 거동을 예측하였으며 2차원 유한요소해석을 통해 120일 기간 동안의 열응력의 변화를 예측하였다. 이들 해석 자료와 파괴역학적 이론에 근거한 경계요소 코드 FRACOD를 이용하여 균열 진전 해석을 실시하였다.

## 2.2 경계요소법에 의한 단일 개시 및 전파의 모사

무한체 내의 단일 균열의 이론해에 기초한 간접 경계요소법의 일종인 변위불연속법(displacement discontinuity method, DDM)은 그 사용의 간편함과 다양한 문제의 적용성으로 인해 암반공학 분야에서 널리 사용되어 왔다(Crouch and Starfield, 1983). 원래 암반 균열의 전파 해석을 목적으로 개발된 FRACOD는 APSE 현장시험 해석을 위해 명시적인 암석 내부 및 경계에서의 균열 개시 및 미끄러짐/열림, AE 발생 등의 거동을 모사할 수 있도록 개선되었다. 여기에서는 균열전파 및 개시를 모사하기 위한 기

본 방법을 간단히 제시한다. 보다 자세한 이론적 수식화는 Shen(2002)과 Mikael Rinne et al.(2003)에 나와 있다.

### (1) 균열 전파의 모사

FRACOD에서는 미소균열의 전파에 의한 거시적 균열 생성을 파괴역학적 이론에 근거하여 구현하였으며 거시적 균열 전파를 균열 요소의 첨가를 통해 고려한다. 암반에서의 균열 전파 양상은 보통 인장 및 전단 균열에 의한 전파가 일반적이다. 일반적인 암반에서의 균열 전파 특성을 효과적으로 예측하기 위해 Shen과 Stephansson(1993)은 혼합 모드에서의 균열 전파 기준인 F-규준을 제안하였다. F-규준을 사용하면 그림 2(a)에 나타난 것과 같이 균열 첨단에서의 합성 변형률 에너지 개방률(strain energy release rate)은 (G) 모드 I 변형률( $G_I$ ) 모드 II 변형률( $G_{II}$ ) 기인한 두 부분으로 나뉘어진다. 이들 항의 정규화된 값들의 합을 파괴 하중과 그 방향을 결정하기 위해 사용한다. 즉, 균열 첨단의 임의 방향( $\theta$ )에서 다음의 F-값을 통해 균열전파를 모사한다.

$$F(\theta) = \frac{G_I(\theta)}{G_{Ic}} + \frac{G_{II}(\theta)}{G_{IIc}} \quad (1)$$

여기서  $G_{Ic}$ 와  $G_{IIc}$ 는 각각 모드 I(인장) 및 모드 II(전단) 균열 전파에 대한 임계 변형률 에너지 개방률이고  $G_I(\theta)$ 과  $G_{II}(\theta)$ 는 단위 길이의 모드 I과 모드 II 균열 성장에 대한 변형률 에너지 개방률을 각각 나타낸다. 균열 전파의 방향은 F 값이 최대 값을 보이는 방향이( $\theta = \theta_0$ ) 된다.

$$F(\theta)_{\theta = \theta_0} = \max. \quad (2)$$

최대 F 값이 1.0이 될 때 균열은 전파할 것이다. 즉,

$$F(\theta)_{\theta=\theta_0}=1 \quad (3)$$

균열이 전파하는 조건과 방향을 만족하면 새로운 변위불연속 경계요소를 균열첨단에 추가하여 새로운 조건을 만족하는 해를 다시 구하게 된다.

### (2) 균열 개시의 모사

암석의 미세균열 개시는 대개 실험실 시험의 경우 암석 강도의 0.3-0.6 배의 응력 수준에서 미세균열 형성으로부터 시작된다(Li, 1993). 미세균열들은 응력 수준의 증가에 따라 결합되고 궁극적으로 거시적 파괴면을 형성할 것이다. FRACOD는 원래 거시적 규모에서의 균열진전을 모사하기 위해 개발되었으므로, 암석 내의 개별 미세균열을 모두 직접적으로 고려할 수 없고 현실적으로 불가능하다. 최종 거시적 파괴가 일어나기 전에 초기 단계에서의 균열 개시와 손상을 효과적으로 고려하기 위해 응력 수준이 주어진 위치에서 암석 강도의 k배에 도달할 때 균열이 개시된다고 가정하였다. 하지만 균열 표면의 물성은 무결암의 강도를 갖는 것으로 간주한다. 즉, 개시된 균열들은 거시적인 균열의 형태로 표시되지만 무결암의 미시적인 손상 및 미세균열 확장을 대표한다. 이러한

개념을 이용하여 균열 개시는 ‘응력=k×강도’ 일 경우에 시작되지만 이후 응력 증가시에 균열면의 강도를 초과하고 균열 첨단에서 파괴역학적 기준을 만족할 때 균열들의 전파 및 결합이 일어난다고 개념화 할 수 있다.

균열 전파와 마찬가지로 균열 개시 역시 인장 또는 전단 기구에 의해 발생할 것이다. 인장균열 개시를 위해 최대 인장 기준이 사용되었다. 무결암석 내 한 위치에서의 인장응력이 무결암의 인장강도의 k배를 초과할 때 새로운 암석 균열이 인장응력에 수직한 방향으로 형성될 것이다(그림 2).

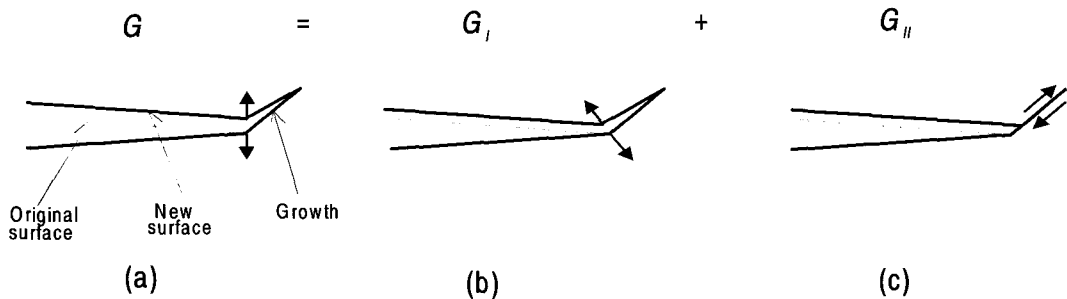
즉, 인장시의 균열 개시 임계응력은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma_{tensile} \geq k\sigma_t \quad (4)$$

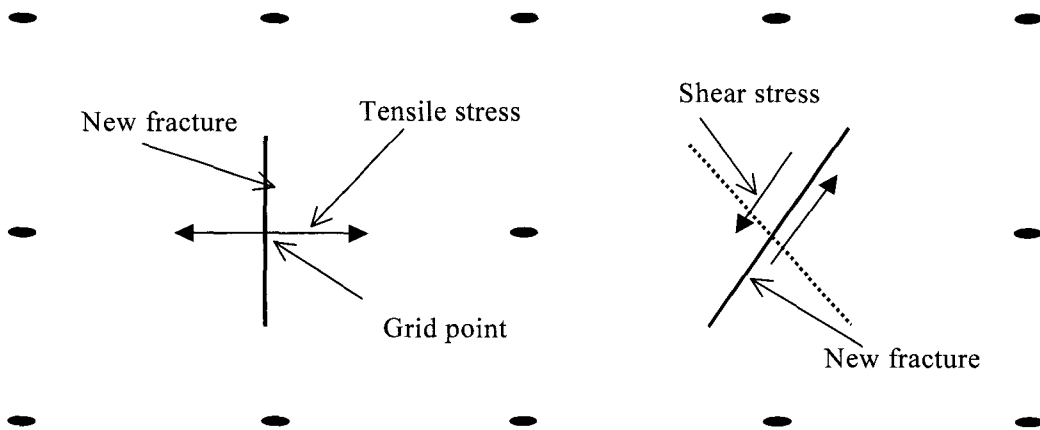
인장 균열 개시 방향은

$$\theta = \theta(\sigma_{tensile}) + \frac{\pi}{2} \quad (5)$$

여기서  $\sigma_{tensile}$ 은 주어진 위치에서의 주인장응력이고  $\sigma_t$ 는 무결암의 인장 강도,  $\theta$ 는 인장 균열 개시 방향이며,  $\theta(\sigma_{tensile})$ 는 인장응력의 방향이다. 새로 생성된 균열의 길이는 모델에서 경계요소의 크기에 의해 결정된다. 계



(a) 균열성장 기준을 위한 변형률 에너지 개방률의 정의



(b) 무결암석에서 인장 및 전단에 의한 균열 개시

그림 2. 해석에 사용된 균열 전파 및 개시 기구

산용량의 한계를 고려하여 사용된 요소들 중 최소길이와 같게 설정되었다. 균열 개시 여부를 검사하기 위해 무결암석 내에 일정간격의 격자망이 정의된다. 각 격자점에서의 응력값은 변위 불연속 경계요소 수식으로부터 구할 수 있으며, 파괴 규준을 적용하여 개시 여부를 조사할 수 있다. 균열개시가 일어나는 것으로 판명되면 새로운 균열 요소가 격자점에 생성된다(그림 2).

전단 균열개시의 경우 Mohr-Coulomb 파괴 규준이 사용되었다. 인장균열의 경우와 마찬가지로 무결암 내 주어진 점에서의 전단응력이 무결암의 전단강도의  $k$ 배를 초과할 때 새로운 암석 균열이 생성될 것이다. 즉, 전단 균열 개시의 임계응력은

$$\sigma_{shear} \geq k(\sigma_n \tan(\phi) + c) \quad (6)$$

전단 균열 개시 방향은

$$\theta_{is} = \frac{\phi}{2} + \frac{\pi}{4} \quad (7)$$

여기서  $\sigma_{shear}$ 는  $\theta_{is}$  방향의 전단응력이고,  $\sigma_n$ 은 전단 파괴면 상에서의 수직응력이며,  $c$ 와  $\phi$ 는 각각 무결암의 점착력과 내부마찰각을,  $\theta_{is}$ 는 최소주응력방향으로부터 결정되는 잠재적 전단 파괴의 방향을 나타낸다.

### 2.3 역해법에 의한 열하중 및 굴착하중 고려

실험조건을 적절히 모사하기 위해서는 해석모델에 열하중 및 굴착하중이 모델에 고려되어야 하지만 현 FRACOD는 명시적으로 이들을 고려할 수 없다. 이를 위해 특별한 역해 경계요소법이 개발되었다.

역해법(inverse solution)은 일반적으로 공급원 재현(source reconstruction)과 변수 판별(parameter identification)의 두 가지 문제가 있다(Bezerra and Saigal, 1995). 공급원 재현 문제의 경우 일반적으로 영역 내부 또는 경계에 과잉 설정된 관측 자료들을 이용하여 미지의 경계조건을 결정한다. 변수판별 문제는 탄성계수, 포아송비, 점착력과 같은 미지의 물성들을 변위나 응력 등 해석 영역에서 알려진 물리량들을 이용하여 구하는 것으로서 일반적으로 암반공학에서는 역해석(back analysis)이라고 한다. 이 연구에서는 응력재현을 위해 공급원 재현 역해법을 이용하였다.

한편 일반적인 경계치 문제에서 일정 경계부에서 변위와 경계력이 모두 미지의 경우에는 통상의 순해법(forward solution)으로는 풀수가 없다. 하지만 영역 내부의 응력 또

는 변위가 알려져 있다면 부족한 연립방정식을 역해법을 이용하여 구할 수 있다. 일반적으로 역해법으로 구한 결과는 해의 안정성과 고유성을 항상 만족하지 않으며 따라서 의미 있는 해를 구하기 위해 특별한 형태의 반복법 또는 행렬 해법 및 조정(regularization)이 필요하다(Hansen, 1992). 이 연구에서는 응력 재현 역해법을 위해 공학 전반에서 많이 사용되는 특이값분해법(Singular Value Decomposition, SVD)을 사용하였다(Martin and Lesnic, 2002).

이러한 개념에 기초하여 다른 연속체 수치해석을 통해 구한 굴착 및 열하중에 의한 응력분포는 미지 경계조건을 갖는 경계요소로 이산화시킨 역해법 모델로 재현될 수 있다. 이를 위해 직접 경계요소 이론에 근거한 역해 경계요소 코드가 개발되었으며 주어진 응력분포를 만족하는 미지 가상 경계조건을 구하기 위해 다른 연속체 수치해석으로 구한 응력 분포를 이용하였다. 이를 통해 FRACOD의 암주모델에서 각 시간단계에서 경계조건 증분을 통해 굴착 및 열응력을 고려하였다. 보다 상세한 내용은 Lee와 Jing(2003)에 나와 있다.

### 2.4 모델 구성 및 입력자료

해석 대상 지역의 지질조건, 암석 물성 및 응력 조건이 예비 조사 자료를 통해 구해졌으며 모델에 입력되었다. 표 1은 해석에 사용된 물성 들을 나타낸다. 일반적인 무결암석 물성과 더불어 F-규준에서의 균열전파조건을 구하기 위해 모드 I과 모드 II 파괴 인성 값이 사용되었다.

표 1. 해석에 사용된 입력변수

| 종류        | 입력 변수             | 값 및 단위                    |
|-----------|-------------------|---------------------------|
| 무결 암석     | 탄성계수              | 68 GPa                    |
|           | 포아송비              | 0.24                      |
|           | 점착력               | 31 MPa                    |
|           | 내부마찰각             | 49°                       |
|           | 인장강도              | 14.8 MPa                  |
| 균열        | 모드 I (인장) 파괴인성    | 2.54 MPa*m <sup>1/2</sup> |
|           | 모드 II (전단) 파괴인성   | 6.35 MPa*m <sup>1/2</sup> |
|           | 기존 균열의 수직 강성 (Kn) | 61.5 GPa/m                |
|           | 기존 균열의 전단 강성 (Ks) | 35.5 GPa/m                |
|           | 기존 균열 마찰각         | 31°                       |
|           | 기존 균열 점착력         | 1 MPa                     |
| 새로 생성된 균열 | 인장 균열 Kn          | 320 GPa/m                 |
|           | 마찰각               | 49°                       |
|           | 점착력               | 31 MPa                    |
|           | 팽창각               | 12.1°                     |
| 전단 균열     | Kn                | 4643 GPa/m                |
|           | 마찰각               | 49°                       |
|           | 점착력               | 31 MPa                    |
|           | 팽창각               | 2.3°                      |

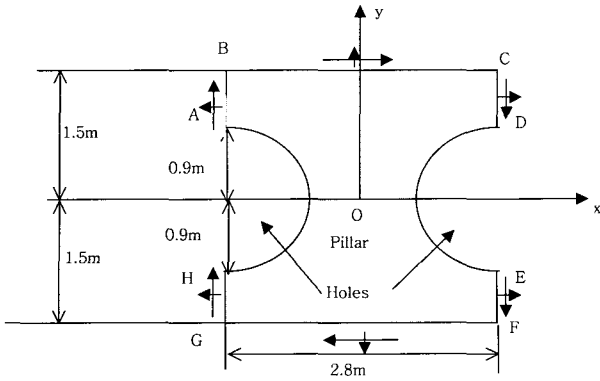


그림 3. 해석을 위한 압주모델

또한 해석시에 새로 생성된 균열의 경우 대부분의 물성들은 무결암의 물성과 동일하게 설정하였으며 수직 강성은 Barton 모델로부터 계산을 통해 구하였지만, 전단 강성의 경우 수치적 안정성을 위해 매우 큰 값을 사용하였다. 그림 3은 해석에 사용된 압주모델을 나타낸다. 압주 벽면을 따라서는 표면력이 0인 조건이 입력되었다. 그림에 경계

를 따라 나와 있는 수직 및 전단 방향 화살표들은 연속체 열역학 해석에서 구한 응력 분포를 역해법을 이용하여 재구성한 표면력 성분들을 나타내며, 이들 값들이 응력 경계조건으로 입력되었다. 즉, 역해법을 위한 미지의 경계 조건들은 AB-BC-CD와 EF-FG-GH 경계를 따라서 정해지며 원하는 응력분포에 근사하는 이들 경계에서의 경계 조건 증분들을 역해법으로 구해 각 하중단계에서의 내부 응력 상태를 재현하였다. 터널바닥으로부터의 위치가 가까우므로 3차원적으로 응력분포로 인해 각 단면에서의 굴착에 의한 응력분포가 다르므로 터널 바닥으로부터 1.5m 및 0.5m의 두 단면이 해석에 사용되었다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 역해법을 통한 응력재현

그림 4는 터널 바닥으로부터 1.5m 단면에서 굴착시

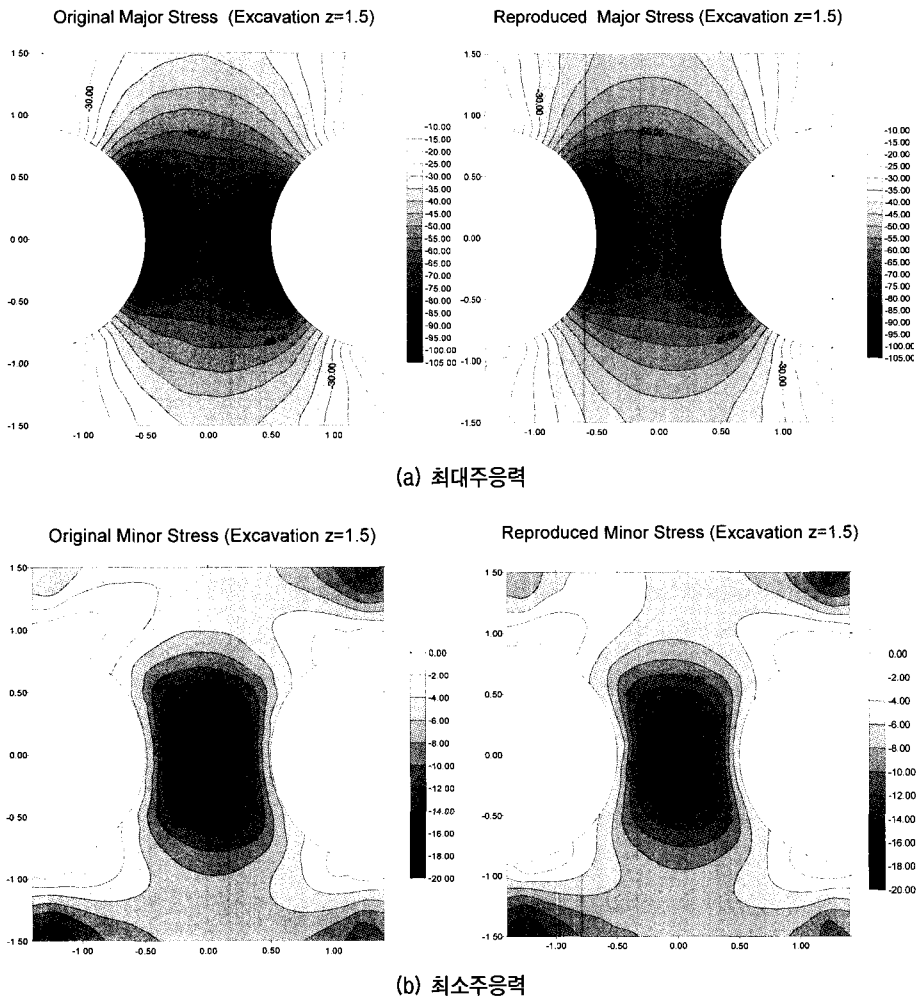


그림 4. 터널 바닥면으로부터 1.5m 단면에서의 응력 분포의 비교 (왼쪽: 다른 수치해석으로 구한 원래 분포, 오른쪽: 역해법으로 재현한 분포)

원래의 (다른 수치해석을 통한 결과) 응력 분포와 역해 방법으로 재현된 응력 분포를 비교한 것이다. 재현된 응력은 최대 및 최소 주응력 모두 거의 동일함을 알 수 있다. 수치적으로 비교했을 때 경계와 아주 가까운 부근에서의 응력은 약간의 오차를 보였지만 대부분의 경우 1% 미만으로서 허용가능한 수준을 보였다. 터널 바닥으로부터 0.5m 단면의 경우 정확도가 1.5m 단면에 비해 약간 떨어졌는데 이는 원래 주어진 모델이 터널바닥면과 가까우므로 굴착 유도 응력이 3차원적으로 분포하지만 이를 2차원 역해모델을 통해 강제 근사시켰기 때문이라고 생각된다. 열응력 분포의 경우 모든 경우에 매우 뛰어난 정확도를 보였다. 상세한 결과 비교는 Lee와 Jing (2003)과 Rinne et al.(2003)에 나와 있다.

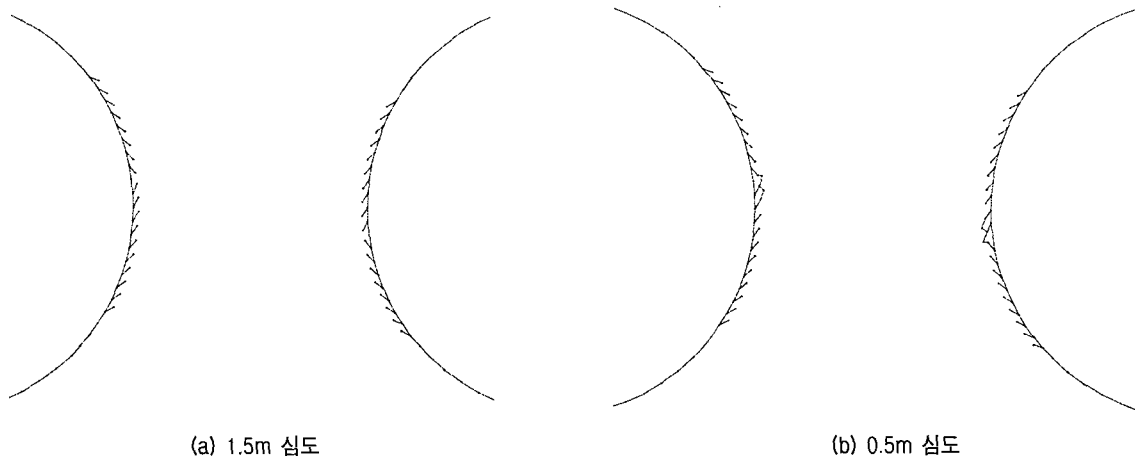
### 3.2 균열 진전 양상

암주모델을 이용하여 각 시간 단계에 따른 균열 진전 양상을 해석하였다. 그림 5는 굴착 이후 두 심도 단면에서의 균열 진전 양상을 보여준다. 터널 바닥으로부터 1.5m 단면의 경우 암주 중앙 벽면부를 중심으로 균열들이 발생하였음을 알 수 있다. 하지만 균열의 전파가 전파가 없는 상황으로 미루어 벽면 부근의 미세균열 생성을 통한 약간의 손상으로 간주할 수 있다. 이에 비해 0.5m 단면의 경우 중심부를 따라서의 손상이 더욱 뚜렷하게 발생하여 약간의 거시 균열들의 전파가 발생하였다. 이는 터널 바닥면의 영향으로 인해 응력 암주에서의 응력집중이 0.5m 단면의 경우 훨씬 크게 발생했기 때문이라 생각된다.

그림 6은 가열후 30일 및 120일이 지난 이후 각 단면들에서의 균열 진전 상황을 보여준다. 가열 개시 직후부

터 균열들이 전파가 활발히 일어났으며, 30일까지의 온도경사가 다른 시기에 비해 매우 크므로 균열 발생 및 전파가 이 시기에 집중됨을 볼 수 있다. 1.5m 심도의 경우 균열의 전파가 중앙 벽면 부근에서만 제한적으로 일어남을 알 수 있다. 하지만 0.5m 심도의 경우 열응력 증가에 따라 균열들이 계속적으로 암주 무결암석 부분으로 전파되어 손상 영역이 점점 커지고 있다. 또한 왼쪽 보어홀 벽면에서 몇 개의 균열들의 전파로 큰 규모의 균열면이 형성되고 무결 암석 내부에서의 균열 발생도 점점 증가함을 볼 수 있다. 복잡한 균열 결합이 발생하는 조건을 제외한 거의 모든 경우에 균열들은 전단균열의 형태로 전파하였는데, 이는 현지 응력 상태가 매우 높은 심부 암반에서의 전형적인 균열 진전 양상과 일치한다(Guenot, 1989). 잠재적으로 균열들의 전파 방향은 전형적인 썩기형 파괴의 징후를 보이지만, 열응력 증가에 따라 암주 내부에서의 본격적인 균열들간의 결합이 일어나지 않고 균열들은 안정한 형태로 성장하였다. 또한 오른쪽 보어홀의 경우 1MPa의 팽창압의 영향으로 인해 왼쪽 보어홀에 비해 그 균열 진전 정도 훨씬 줄어들었음을 볼 수 있다.

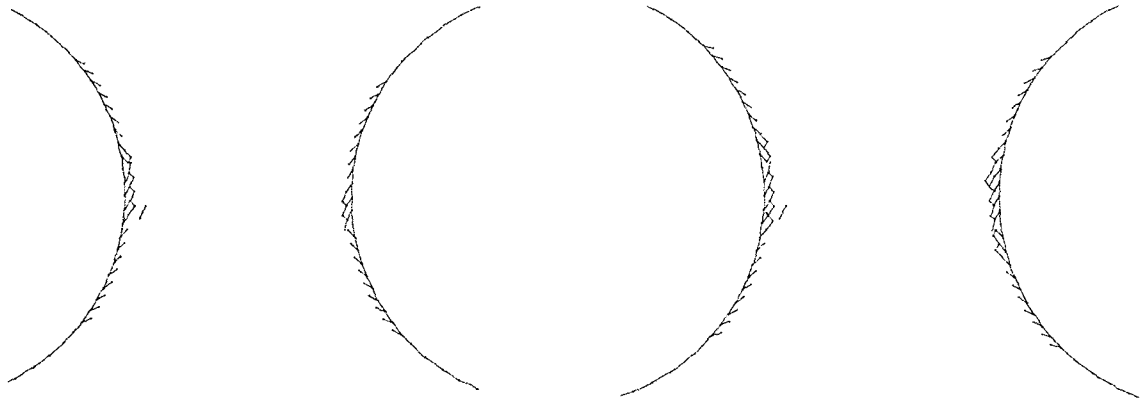
그림 7에 나타난 것과 같이 0.5 m 심도 단면에서 굴착 이후와 가열후 120일 경과시의 최대주응력 분포를 개략적으로 살펴보면(하얀 부분의 값이 높음) 균열 진전에 따라 최대주응력값이 최대인 지점이 가열 이후 암주 벽면에서 내부쪽으로 이동하고 있음을 볼 수 있다. 이러한 주응력 지대의 변화는 기존에 벽면에서 발생한 균열들로 인해 응력완화가 발생하고 균열 진전시 최대 응력집중은 균열 침단에 작용하기 때문이다. 불안정한 균열전파와 결합으로 완전히 균열면이 분리된다면 이들 응력



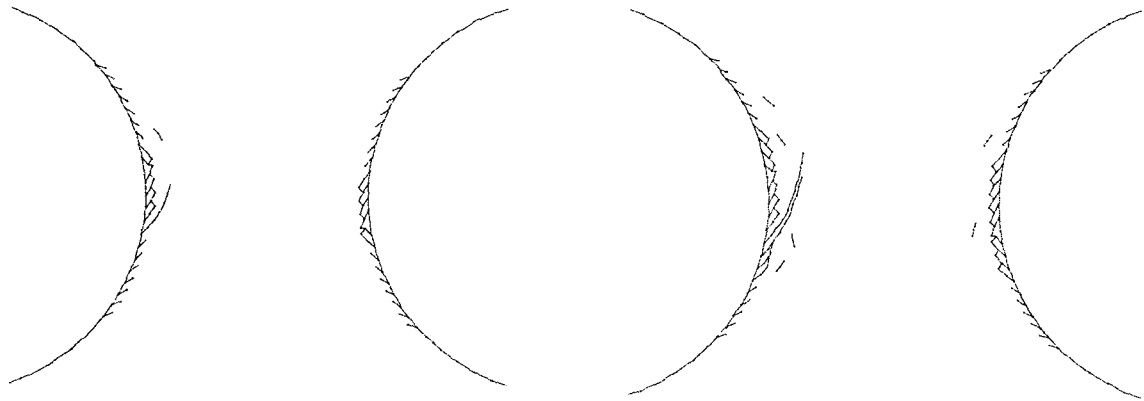
(a) 1.5m 심도

(b) 0.5m 심도

그림 5. 굴착 이후 암주 각 단면에서의 균열 발생 및 전파 예측 거동

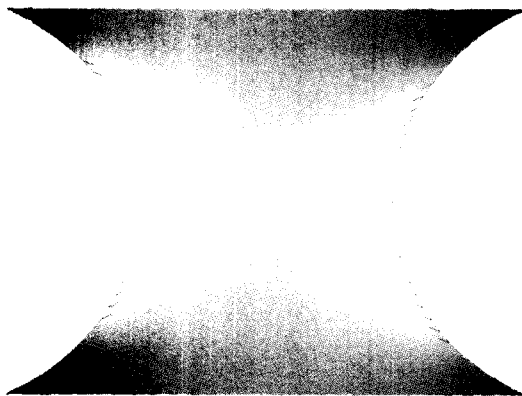


(a) 1.5m 심도 (왼쪽: 30 일 이후, 오른쪽: 120일 이후)

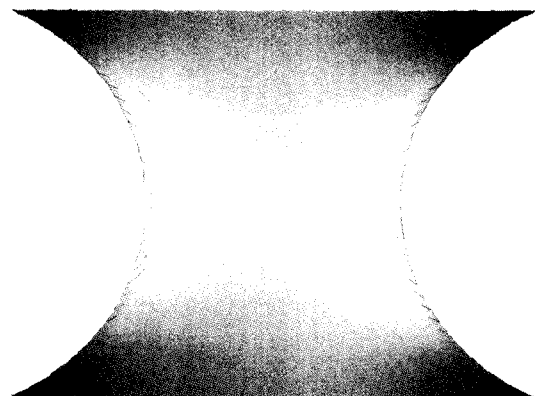


(b) 0.5m 심도 (왼쪽: 30 일 이후, 오른쪽: 120일 이후)

그림 6. 가열 시험 동안 암주 각 단면에서의 균열 진전 예측 거동



(a) 굴착 이후



(b) 120일 동안의 가열 후

그림 7. 굴착시와 가열후 0.5m 단면의 최대주응력 분포 (흰색이 최대)

완화 경향은 매우 클 것으로 예상된다.

표 2는 시간 전개에 따른 균열 양상의 특징 및 최대 응력 값들을 요약한 것이다. 해석 결과는 120일까지 주어진 열응력 하에서는 어느정도 암주 벽면의 손상 및 균열 성장이 일어나지만 본격적인 암주 파괴에 이르지 않고 국부적인 파쇄가 발생할 가능성이 있음을 보여준다. 하지만 이는 입력자료의 불확실성이나 기존에 존재

하는 절리면들이나 암반의 불균질성, 현지 암반 상태를 고려하지 않은 것으로서 실제 현지 조건하에서는 이들 성장 균열들이 불안정한 균열 결합 및 파괴가 발생할 가능성도 배제할 수 없다. 이러한 불확실성들은 실제 보어홀이 굴착되고 주변 암반에 대한 정보가 해석에 더 정확히 고려될 수 있을 때 현저히 감소시킬 수 있을 것으로 생각된다.



표 2. 각 하중단계별 균열 진전 결과에 대한 요약

|      |                          | 1.5 m   | 균열 양상                 | 0.5 m 심도 | 균열 양상                         |
|------|--------------------------|---------|-----------------------|----------|-------------------------------|
| 굴착   | 최대압축응력(MPa)              | 115.9   |                       | 141.3    |                               |
|      | 최대인장응력(MPa)              | 3.84e-5 | 암주 벽면을 따라서 균열 개시      | 5.27     | 암주벽면을 따라서 균열 개시 및 중앙부 균열 전파   |
|      | 최대 변위(e <sup>-3</sup> m) | 1.58    |                       | 1.86     |                               |
| 30일  | 최대압축응력(MPa)              | 152.4   |                       | 152.5    |                               |
|      | 최대인장응력(MPa)              | 2.86    | 암주 벽면 중앙부 균열 전파       | 7.18     | 암주 벽면 주변 균열 전파 및 결합 대규모 균열 전파 |
|      | 최대 변위(e <sup>-3</sup> m) | 1.79    |                       | 2.03     |                               |
| 60일  | 최대압축응력(MPa)              | 167.8   |                       | 171.3    |                               |
|      | 최대인장응력(MPa)              | 3.07    | 암주 부근 제한된 영역에서의 균열 결합 | 8.02     | 대 균열 전파 및 확장                  |
|      | 최대 변위(e <sup>-3</sup> m) | 1.94    |                       | 2.21     |                               |
| 90일  | 최대압축응력(MPa)              | 177.9   |                       | 181.5    |                               |
|      | 최대인장응력(MPa)              | 3.27    | 암주벽근처 내부에서의 균열 개시     | 8.44     | 암주 내부 영역으로의 균열 개시 및 확장        |
|      | 최대 변위(e <sup>-3</sup> m) | 2.06    |                       | 2.33     |                               |
| 120일 | 최대압축응력(MPa)              | 181.8   |                       | 185.7    |                               |
|      | 최대인장응력(MPa)              | 3.30    | 암주벽근처 내부에서의 균열 개시     | 9.80     | 암주 내부 영역으로의 균열 개시 및 확장        |
|      | 최대 변위(e <sup>-3</sup> m) | 2.16    |                       | 2.43     |                               |

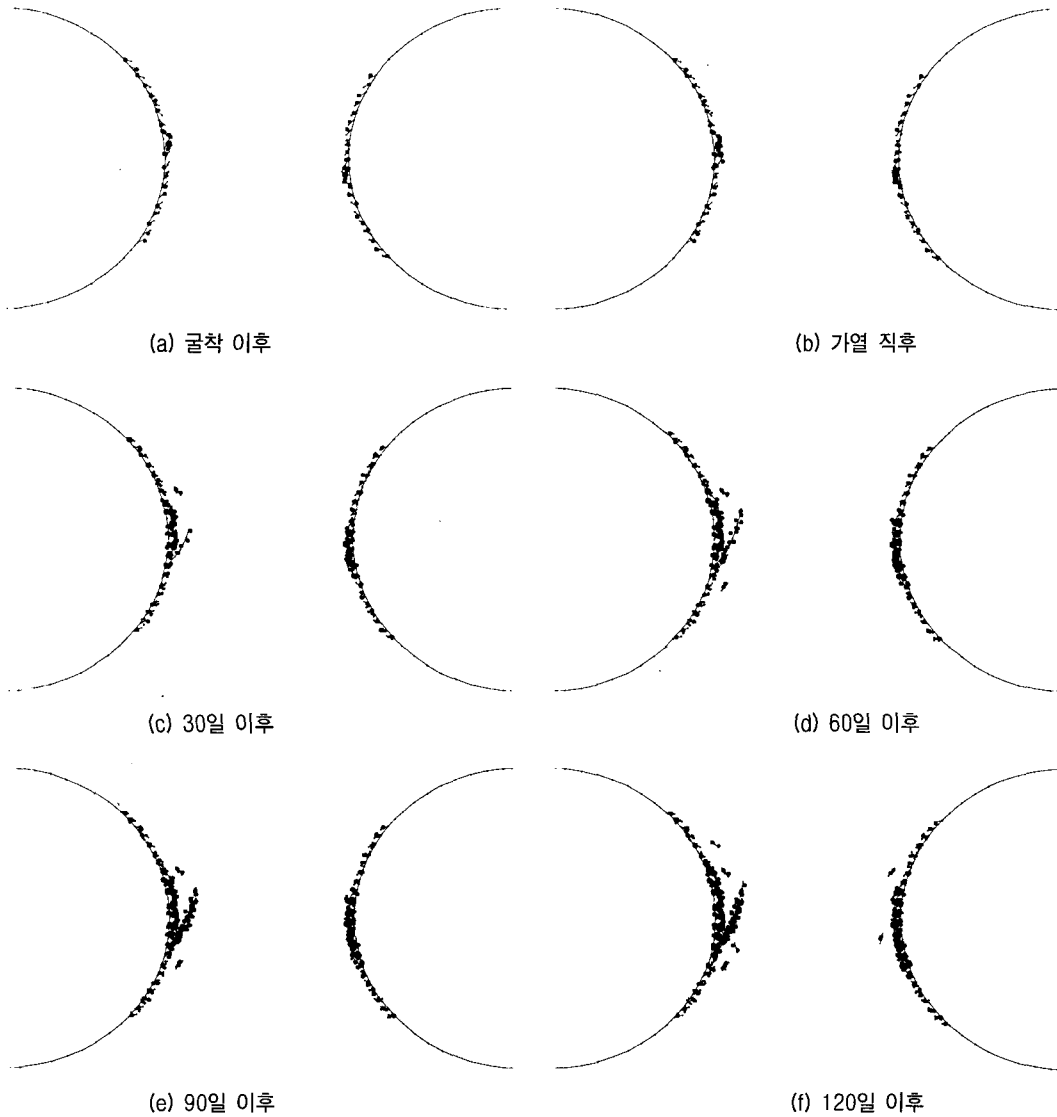


그림 8. 1.5 m 심도에서 각 하중 단계에 따른 AE 발생 양상

거시적인 파괴면이 발생하지 않는 이상 현지 실험시에 암반의 손상 및 균열 전파 정도는 AE 계측 결과에 의해서만 판별될 수 있다. 그림 8은 0.5m 심도에서 각 하중 단계에 따른 AE 발생 양상을 도시한 것이다. 모델에서 AE 발생의 정도와 위치는 균열 발생 및 전파, 이동 양상에 의존하므로 AE 발생이 암주 벽면 중심부 근처에 집중됨을 볼 수 있다. 균열 전파가 무결암석 내부로 진전됨에 따라 AE 역시 벽면 내부 15cm 내부에서도 검출되었다. 1.5m 심도의 경우에는 전체적으로 AE의 발생이 벽면 근처에서만 집중되었으며 이 역시 균열 진전 양상과 일치한다.

### 3.3 기존 절리 및 균열 물성의 영향

기존 절리가 암반 내에 존재한다면 이로 인해 암주 내의 응력분포를 완전히 변화시키고 균열 진전 양상도 크게 변화하게 된다. 일반적으로 절리의 길이 및 위치,

벽면과의 연결도 여부, 절리면의 마찰 특성 및 거칠기와 같은 많은 조건에 따라 서로 다른 매우 거동을 보이므로 이들 절리의 영향을 바로 일반화시키기에는 무리가 있다. 간단한 원거리 응력 모델을 통한 여러 가지 형태의 민감도 분석 결과 전반적으로 기존 절리면의 존재는 공동벽면에 작용하는 응력 집중을 절리가 존재하는 부근으로 전이시킬 가능성이 있음이 밝혀졌다. 이러한 경향은 특히 단층과 같이 규모가 큰 절리면의 경우 더욱 뚜렷이 나타났다. 이러한 예로서 그림 9는 공동 벽면에 수평 절리면이 있는 경우와 암주 사이를 가로지르는 거대 절리면이 있는 경우 균열 발생 양상을 보여준다. 그림 9(a)의 오른쪽 공동에서의 거동이 절리가 없는 경우라고 볼때 상대적으로 균열 발생 빈도가 작음을 알 수 있다. 절리면의 변형으로 인해 절리면 부근을 따라서 응력 집중이 발생하고 AE도 많이 발생하고 있음을 볼 수 있다. 균열 물성도 균열진전 양상에 큰 영향을 미친다. 균열

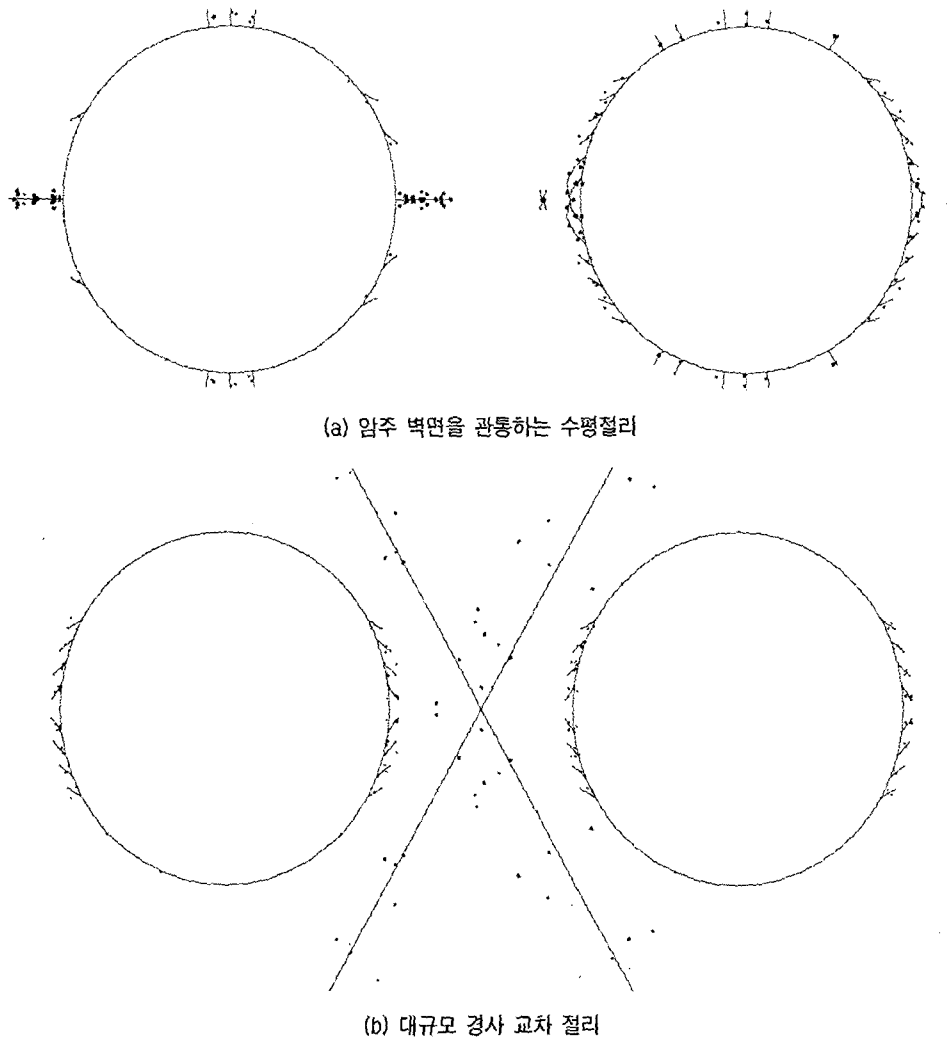


그림 9. 기존 절리가 암주 균열 진전에 미치는 영향 ( $\sigma_x/\sigma_y = 10MPa/50MPa$ )

표 3. 새로 생성된 균열 물성에 따른 균열 진전 거동의 경향성

| 물성   | 낮은 값          | 높은 값          |
|------|---------------|---------------|
| 점착력  | 많은 균열 개시 및 전파 | 적은 균열 개시 및 전파 |
| 마찰각  | 많은 균열 개시 및 전파 | 적은 균열 개시 및 전파 |
| 수직강성 | 적은 균열 개시 및 전파 | 많은 균열 개시 및 전파 |
| 전단강성 | 적은 균열 개시 및 전파 | 많은 균열 개시 및 전파 |

진전에 가장 큰 영향을 미치는 변수들로서는 절리 강성 및 파괴 인성 값이다. 일반적으로 파괴인성이 증가할수록 균열 전파에 필요한 하중 역시 증가한다. 심부 암반의 경우 모드 II 파괴인성이 균열전파에 더욱 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 아직까지 균열 진전과정에서 새로 생성된 균열면에 대한 특성은 제대로 파악되어 있지 않다. 이들 물성에 의한 균열 진전의 양상을 살펴보기 위해 여러 가지 민감도 분석을 실시하였으며 표 3에 대체적인 경향을 정리하였다. 직접적인 강도 변수들이 점착력과 마찰각이 전단 및 수직강성에 비해 훨씬 더 민감한 경향을 보였다. 앞으로 이들 새로 생성된 균열의 물성에 대한 더욱 자세한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

#### 4. 결론

이 연구에서는 경계요소 해석 코드인 FRACOD를 이용하여 스웨덴 SKB 지하실험실에서의 현지 가열실험 과정에서의 균열진전 과정을 해석하였다. 무결 암석에서의 현실적인 균열진전 과정을 모사하기 위해 코드를 개선하였으며 역해법에 의한 응력 재현과정을 통해 굴착 및 열응력을 적절히 고려하였다. 예측결과는 심부 암석에서의 전형적인 전단균열 전파 형태를 보였으며 균열 진전이 암주 벽면 부근에 집중되어 일어남을 보여주었다. 향후 실제 실험 과정에서 획득된 보다 정확한 입력자료와 현지조건을 이용한 결과 보정을 통해 해석의 정확도를 증대시킬 수 있을 것이다.

아직까지 취성 균열 진전에 대한 수치 해석이 간단한 기하형상이나 단순화된 균열 시스템에 머무르고 있는 시점에서 본 해석은 실제 암반 현장에 개별 취성 균열 진전 및 파괴를 현실적으로 모사할 수 있는 가능성을 보여주었다. 앞으로 이방성이나 불균질성, 그리고 파괴 이후 거동 등과 같은 다양한 문제들을 보다 정확히 고려할 수 있도록 기능이 보완된다면 경계요소를 이용한 개별 균열들의 파괴 진전 해석은 다양한 암반공학 문제에서 그 적용성이 점점 증대 될 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

이 논문은 한국과학재단의 2001 전반기 해외 Post-doc. 연수지원비에 의하여 연구되었으며 이에 깊이 감사드립니다. 또한 연구를 위한 프로젝트 재정 지원 및 모델 해석 자료를 제공한 스웨덴 SKB에 깊이 감사드리는 바입니다.

## 참 고 문 헌

1. 장수호, 이정인, 이연규 (2002), "손상모델을 이용한 심부터널 주변 암반의 손상영역 평가", 한국지반공학학회 논문집, 제18권 5호, pp.99-108.
2. Andersson, C. (2003), *Feasibility study: Äspö pillar stability experiment*. International Progress Report, IPR-03-01, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, Stockholm.
3. Bezerra, L., and Saigal, S. (1995), "Inverse Boundary Traction Reconstruction with the BEM", *Int. J. Solids Struct.* Vol.32(10), pp.1417-1431.
4. Crouch, S. L., and Starfield, A. M. (1983), *Boundary element methods in solid mechanics*, London, George Allen and Unwin.
5. Fredriksson, A., Staub, I., and Janson, T. (2003), *Äspö pillar stability experiment: design of heaters and preliminary results from coupled 2D thermo-mechanical modelling*, International Progress Report, IPR-03-03, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, Stockholm.
6. Guenet, A. (1989), "Borehole breakouts and stress fields", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* Vol.26, pp.185-195.
7. Hansen, P. C. (1992), *Regularization Tools: A Matlab package for analysis and solution of discrete ill-posed problems*, Technical University of Denmark, Denmark.
8. Lee, H. S., and Jing, L. (2003), An inverse stress reconstruction algorithm for modelling coupled thermo-mechanical effects of rock structures, *Engineering Analysis with Boundary Element* (submitted for publication).
9. Li, C. (1993), *Deformation and failure of brittle rocks under compression*, Doctoral Thesis, Lulea University of Technology, Sweden.
10. Martin, C. D., and Maybee, W. G. (2000), "The strength of hard-rock pillars". *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci.* Vol.37, pp.1239-1246.
11. Martin, L., and Lesnic, D. (2002), "Boundary element solution for the Cauchy problem in linear elasticity using singular value decomposition", *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* Vol.191, pp.3257-3270.
12. Rinne, M., Shen, B., and Lee H. S., (2003), *Äspö pillar stability experiment: modelling of fracture stability by FRACOD*, International Progress Report, IPR-03-05, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, Stockholm.
13. Shen, B. (2002), *FRACOD Version 1.1*, User's manual. Fracom Ltd.
14. Shen, B., and Stephansson O. (1993), "Modification of the G-criterion of crack propagation in compression", *Int. J. Eng. Frac. Mech.* Vol.47(2), pp.177-189.

(접수일자 2003. 6. 10, 심사완료일 2003. 9. 15)