

Hoek-Brown 암석에서 발생한 탄성균열의 균질화

이연규^{1)*}, 전석원²⁾

Homogenization of Elastic Cracks in Hoek-Brown Rock

Youn-Kyou Lee and Seokwon Jeon

Abstract As a basic study for investigating the development of the stress-induced crack in Hoek-Brown rock, a homogenization technique of elastic cracks is proposed. The onset of crack is monitored by Hoek-Brown empirical criterion, while the orientation of the crack is determined by the critical plane approach. The concept of volume averaging in stress and strain component was invoked to homogenize the representative rock volume which consists of intact rock and cracks. The formulation results in the constitutive relations for the homogenized equivalent anisotropic material. The homogenization model was implemented in the standard FEM code COSMOSM. The numerical uniaxial tests were performed under plane strain condition to check the validity of the propose numerical model. The effect of friction between the loading plate and the rock sample on the mode of deformation and fracturing was examined by assuming two different contact conditions. The numerical simulation revealed that the homogenized model is able to capture the salient features of deformation and fracturing which are observed commonly in the uniaxial compression test.

Key words Hoek-Brown criterion, Homogenization, Strain localization, Critical plane approach, Finite element method

초 록 Hoek-Brown 암석에서 응력에 의해 발생하는 균열의 전파특성을 수치해석적으로 분석하기 위한 기초연구로서 탄성균열의 균질화 기법이 제안되었다. 균열의 개시조건으로 Hoek-Brown 경험식이 이용되었고, 균열의 방향 탐색을 위해 임계면법이 이용되었다. 균열물질과 무결암으로 구성된 대표체적에 대해 체적평균 응력 및 변형률 개념을 적용하여 균열과 신선암의 역학적 특성을 균질화시킴으로써 등가 이방성매질의 구성관계식을 유도하였다. 제안된 균질화모델을 포트란 코드로 작성하여 상업유한요소 코드인 COSMOSM에 이식하였다. 제안된 수치해석모델의 적합성을 검증하기 위하여 2차원 평면변형률조건에서 수치 일축압축시험을 실시하였다. 모델 상하부 가압면의 구속조건을 달리한 2가지 해석모델을 선정하여 구속조건이 일축압축시험편의 변형 및 파단면 형성형태에 미치는 영향이 분석되었다. 균열의 균질화를 고려한 수치 일축압축시험 결과는 실제 실험에서 발생하는 형태와 유사한 변형거동 및 파단면 형성 특성을 잘 나타내었다.

핵심어 Hoek-Brown 파괴조건식, 균질화, 변형률 국부화, 임계면법, 유한요소법

1. 서 론

암반의 파괴는 기존 암석블록들의 구조적 불안정성에 기인하는 경우도 있지만 무결암에서 발생한 균열이 전파되어 발생되기도 한다. 전자의 경우는 지압의 크기가 작은 천부 암반에서 주로 관찰되지만 후자의 경우는 고

심도 암반에서 흔히 관찰된다. 암반구조물의 안정성 해석 과정에서 절리면이나 균열면의 영향은 개별체적 또는 연속체적 접근법으로 고려될 수 있다.

구조면을 따라서 발생하는 개별 암석블록의 거동을 해석하기 위해서는 접촉면의 미끄러짐과 분리가 가능한 개별체적 접근법들이 제시되고 있다(Goodman et al., 1968; Cundall, 1988; Shi, 1993). 개별체 해석모델을 설정하기 위해서는 해석영역의 절리분포와 접촉면들의 역학적 특성에 대한 정확한 정보가 필요하지만 실측에 의해 이러한 자료를 확보하는 것은 대단히 어렵다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 절리면 입력자료를 통계적으로 발생시키는 방법이 사용되기도 한다(Baghbanan

¹⁾ 군산대학교 해양건설공학과 교수

²⁾ 서울대학교 에너지자원공학과 교수

* 교신저자 : kyoule@kunsan.ac.kr

접수일 : 2009년 4월 10일

심사 완료일 : 2009년 4월 24일

게재 확정일 : 2009년 4월 24일

& Jing, 2007).

반면에 무결암에서 과도한 응력에 의해 발생하는 균열의 전파가 암반구조물의 안정성에 미치는 영향을 해석하는 경우라면 연속체적 접근법이 효과적일 수 있다. 연속체적 접근법에서는 미소 두께를 갖는 구조면들의 역학적 특성을 주변의 무결암과 결합시켜 유도한 이방성 복합체에 대해 안정성 해석이 수행되며 Multi-laminate 모델(Zienkiewicz & Pande, 1977)이 그 대표적 예이다. 이방성 복합체를 유도하는 과정에서는 통상 균질화 기법(homogenization technique)이 사용된다. Lee et al. (2000)은 그라우트가 주입된 절리성 암반의 탄성정수를 계산하기 위해 절리면, 그라우트 및 무결암의 체적분율을 고려한 균질화 연구를 수행하였다. Pietruszczak (1999)은 이방성 흙에서 발생하는 균열을 주변의 흙 매질과 균질화시키는 연구를 수행하였다. 국내의 경우 지반공학 분야에서 그라우트 강화지반의 보강효과를 해석하기 위해 균질화기법을 적용한 사례들이 보고되고 있다(이준석 등, 2001; 방춘석 등, 2001; 배규진 등, 2003). 백용(2000)은 암반을 암석과 불연속면이 주기적으로 반복되는 구조체로 가정한 후 난수발생법으로 불연속면을 발생시킨 기본단위 구조모델에 대해 균질화기법을 적용하여 수치해석적으로 절리암반의 탄성계수를 계산하였다. 이와 같은 균질화 기법을 절리성 암반의 거동해석에 적용하면 기존 절리면의 영향뿐만 아니라 응력의 변화에 의해 새로 생성 및 전파되는 균열의 영향을 비교적 쉽게 수치해석에 반영시킬 수 있다.

이 논문에서는 Hoek-Brown 암반에서 응력집중이 원인이 되어 발생하는 균열의 시작 및 전파 특성을 분석하기 위한 기초연구로서 균열의 역학적 특성을 주변 무결암의 역학적 특성과 결합시키는 균질화기법을 제안하였다. 균열의 개시조건으로 Hoek-Brown 경험식(Hoek & Brown, 1980)을 가정하였으며 발생된 균열의 방향은 Pietruszczak & Mroz(2001)가 제안한 임계면법(Critical Plane Approach, CPA)을 적용하여 탐색하였다. 국내에서도 횡등방성 Hoek-Brown 암석의 이방성 강도를 분석하기 위해 임계면법이 활용된 사례(이연규, 2007)가 보고되었다. 균열은 수직강성(normal stiffness)과 전단강성(shear stiffness)에 의해 지배되는 탄성거동을 하는 것으로 가정하였다. 두 구성요소의 체적분율(volume fraction)을 이용한 평균화기법에 의해 균열의 강성행렬과 주변 무결암의 탄성행렬을 균질화시켰다. 제안된 균열 균질화 기법을 수치해석코드로 구현하고 이를 상업 유한요소코드인 COSMOSM (Solidworks, 2008)에 이식하여 그 적합성 여부를 검토하였다. 이를 위하여 수치 일축 압축시험을 실시하고 탄성균열의 전파에 따른 변형거

동 및 응력분포 특성을 분석하였다.

2. 균열의 개시조건과 균열방향의 탐색

2.1 균열의 개시조건

한 지점에서 응력조건이 암석의 파괴조건식을 만족하면 그 지점에서 균열이 발생된 것으로 가정할 수 있다. 이 연구에서는 무결암의 균열개시 조건으로 Hoek-Brown의 경험식(Hoek & Brown, 1980)을 적용하였다.

$$F(\sigma_1, \sigma_3) = \sigma_1 - \sigma_3 - \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2} = 0 \quad (1)$$

여기서 σ_1 과 σ_3 은 균열발생 시점에 작용하는 최대 및 최소 주응력이다. m 과 s 는 암석의 고유한 강도상수이고 σ_c 는 일축압축강도이다.

임의 지점에서 균열의 시작 여부를 판단하고 균열의 방향을 탐색하기 위해 임계면법이 적용되었다. 임계면법을 이용하여 균열의 방향을 탐색하기 위해서는 균열개시 조건식이 균열면에 작용하는 수직응력(σ)과 전단응력(τ)으로 표시되어야 한다. 따라서 식(1)을 σ 와 τ 를 이용하여 다시 표현할 필요가 있다. Bray는 식(1)의 Mohr 포락선을 다음과 같은 매개변수 함수로 표시할 수 있음을 밝혔다(Hoek, 1983).

$$F(\tau, \sigma) = \tau - f(\sigma) = 0 \quad (2a)$$

$$f(\sigma) = (\cot\phi_i - \cos\phi_i) m\sigma_c/8 \quad (2b)$$

$$\tan\phi_i = (4h\cos^2\delta - 1)^{-0.5} \quad (2c)$$

$$\tan(\delta - \pi/2) = (h^3 - 1)^{-0.5} \quad (2d)$$

$$h = 1 + 16(m\sigma + s\sigma_c)/(3m^2\sigma_c) \quad (2e)$$

식(2)로 표시되는 Hoek-Brown 파괴포락선을 Fig. 1에 도시하였다. 강도상수 m 과 s 의 변화에 따라 다양한 형태의 포락선이 얻어진다. m 값의 증가에 따라 포락선의 비선형성이 크게 증가됨을 볼 수 있다. 또한 포락선의 형태는 s 값보다는 m 값의 변화에 더 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

한 지점에서 단위방향벡터가 $\{n\}$ 인 면에 작용하는 수직응력과 전단응력은 응력텐서 $[\sigma]$ 로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\sigma = \{n\}^T [\sigma]^T \{n\} \quad (3)$$

$$\tau = \| [\sigma]^T \{n\} - \sigma \{n\} \| \quad (4)$$

그러므로 주어진 응력텐서로부터 σ 와 τ 를 구한 후

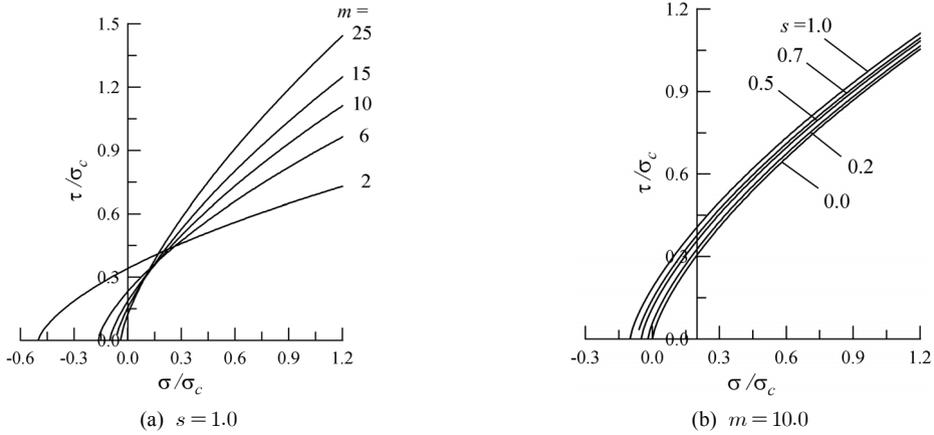


Fig. 1. Mohr envelopes corresponding to Hoek-Brown criteria.

식(2)에 대입하면 균열의 발생여부를 판단할 수 있다. 이 연구에서는 $F(\tau, \sigma) \geq 0$ 일 때 균열이 발생되는 것으로 가정하였다.

2.2 균열방향의 탐색

식(3)과 식(4)를 식(2)의 $F(\tau, \sigma)$ 에 대입하면 주어진 응력조건에서 $F(\tau, \sigma)$ 는 방향벡터 $\{n\}$ 의 함수가 된다. 이 때 적절한 최적화기법을 이용하면 $F(\tau, \sigma)$ 가 최대가 되는 $\{n\}$ 을 찾을 수 있으며 이 방향에 수직인 면이 임계면이 된다. 만약 이 방향성을 갖는 면에서 $F(\tau, \sigma) \geq 0$ 이면 균열이 발생된 것으로 간주되므로 $F(\tau, \sigma)$ 를 $\{n\}$ 에 대해 최대화시킴으로써 균열의 방향이 탐색될 수 있다. 이때 $\{n\}$ 은 제한조건 $\{n\} \cdot \{n\} = 1$ 을 갖는다.

제한조건을 갖는 다변수 함수의 최적화기법으로 Lagrange 승수법(Lagrange multiplier method과 직접법의 일종인 Powell 법, 공액구배법(conjugate gradient method) 등을 이용할 수 있다(Press et al., 1992). 이 연구에서는 Lee & Pietruszczak (2008)이 이방성 Hoek-Brown 함수의 최대화 과정에서 적용한 공액구배법을 활용하여 균열의 방향 $\{n\}$ 을 탐색하였다. 공액구배법에서는 최적화되는 함수의 함수값 뿐만아니라 함수의 기울기(gradient)에 대한 정보도 필요하다. $F(\tau, \sigma)$ 의 $\{n\}$ 에 대한 기울기 함수는 Lee & Pietruszczak (2008)를 참조하여 구할 수 있다.

3. 탄성 균열의 균질화

암반의 한 지점에서 균열 발생이 확인되면 균열의 역학적 특성이 균질화기법에 의해 주변의 무결암과 결합

된다. 여기서 균열은 수직강성과 전단강성에 의해 지배되는 탄성거동을 하는 것으로 가정하였다. 이 연구에서는 구성요소의 체적분율을 활용한 평균화 기법의 일종인 Pietruszczak (1999)의 균질화 기법을 적용하였다.

Fig. 2는 법선 단위벡터가 $\{n\}$ 이고 두께가 t 인 균열면을 포함하는 암반의 대표체적(representative volume)을 나타낸다. 대표체적의 응력 및 변형률 변화율(stress and strain rate)은 체적분율을 이용한 평균화기법에 의해 다음과 같이 표시할 수 있는 것으로 가정하였다.

$$\{\dot{\sigma}\} = f_1 \{\dot{\sigma}^{(1)}\} + f_2 \{\dot{\sigma}^{(2)}\} \tag{5}$$

$$\{\dot{\epsilon}\} = f_1 \{\dot{\epsilon}^{(1)}\} + f_2 \{\dot{\epsilon}^{(2)}\} \tag{6}$$

여기서 $\{\dot{\sigma}\}$ 와 $\{\dot{\epsilon}\}$ 는 균질화된 복합체의 응력 및 변형률 성분벡터이다. 첨자 (1), (2)는 각각 무결암질과 균열 물질을 지시한다. 또한 f_1 과 f_2 는 각각 무결암질과 균

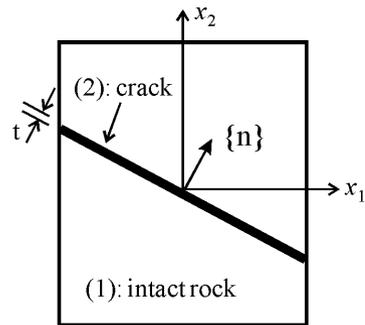


Fig. 2. Rock sample intercepted by a microcrack having orientation $\{n\}$.

열의 체적분율을 나타내며 $f_1 + f_2 = 1$ 을 만족한다. 균열에서 발생하는 변형률 변화율 $\{\dot{\epsilon}^{(2)}\}$ 은 균열면에서 발생하는 변위속도 불연속 벡터 $\{\dot{g}\}$ 와 $\{n\}$ 의 dyad곱 행렬의 대칭성분을 이용하여 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$[\dot{\epsilon}^{(2)}] = \frac{1}{2t} (\{n\} \otimes \{\dot{g}\} + \{\dot{g}\} \otimes \{n\}) \quad (7)$$

행렬로 표현된 $[\dot{\epsilon}^{(2)}]$ 는 벡터 형태의 식으로 다음과 같이 표시할 수도 있다.

$$\{\dot{\epsilon}^{(2)}\} = \frac{1}{t} [M] \{\dot{g}\} \quad (8)$$

여기서 행렬 $[M]$ 은 다음과 같이 표시된다.

$$[M]^T = \begin{bmatrix} n_1 & 0 & 0 & n_2 & n_3 & 0 \\ 0 & n_2 & 0 & n_1 & 0 & n_3 \\ 0 & 0 & n_3 & 0 & n_1 & n_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서 n_i 는 단위벡터 $\{n\}$ 의 성분이다.

한편 응력의 연속성을 고려하면 균열면에 작용하는 traction $\{\dot{T}\}$ 는 무결암에 작용하는 응력으로부터 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\{\dot{T}\} = [M]^T \{\dot{\sigma}^{(1)}\} \quad (10)$$

무결암질에서의 탄성 응력-변형률 관계식, 즉 Hooke의 법칙은 다음과 같다.

$$\{\dot{\sigma}^{(1)}\} = [D] \{\dot{\epsilon}^{(1)}\} \quad (11)$$

여기서 $[D]$ 는 탄성계수와 포아송비를 이용하여 구성되는 무결암질의 탄성정수 행렬이다.

균열면의 탄성거동은 다음 구성방정식에 의해 기술될 수 있는 것으로 가정하였다.

$$\{\dot{T}\} = [K] \{\dot{g}\} \quad (12)$$

균열면 국부좌표계를 가정하면 $[K]$ 는 전단강성(K_s)과 수직강성(K_n)을 이용하여 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$[K] = \begin{bmatrix} K_s & 0 & 0 \\ 0 & K_s & 0 \\ 0 & 0 & K_n \end{bmatrix} \quad (13)$$

식(13)에서는 x_3 축이 균열면에 수직한 것으로 가정하였다.

균열면의 두께가 매우 얇다고 가정할 수 있으므로 즉, $f_1 \gg f_2$ 이므로 $1/f_1 \approx 1$ 이다. 따라서 $\{\dot{\sigma}\} \approx \{\dot{\sigma}^{(1)}\}$ 를 가정할 수 있다. 또한 식(6)과 식(8)로부터 다음 근사식이 유도될 수 있다.

$$\{\dot{\epsilon}^{(1)}\} \approx \{\dot{\epsilon}\} - \eta[M] \{\dot{g}\} \quad (14)$$

이제 식(11)과 식(12)을 식(10)에 대입하고 식(14)를 이용하면 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\{\dot{g}\} = [Q] \{\dot{\epsilon}\} \quad (15)$$

$$[Q] = ([K] + \eta[M]^T [D] [M])^{-1} [M]^T [D] \quad (16)$$

여기서 η 는 (균열의 면적/대표요소의 체적)으로서, 유한요소의 해당 Gauss point에 대응되는 체적과 동일한 구(sphere)를 가정하면 근사적으로 계산할 수 있다.

따라서 균열을 포함한 대표체적의 균질화된 탄성 응력-변형률 관계식은 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\{\dot{\sigma}\} \approx \{\dot{\sigma}^{(1)}\} = [D] \{\dot{\epsilon}^{(1)}\} = [K_h] \{\dot{\epsilon}\} \quad (17)$$

$$[K_h] = [D] ([I] - \eta[M] [Q]) \quad (18)$$

여기서 $[I]$ 는 단위행렬이다. 그러므로 균열의 역학적 특성을 균질화시킨 등가복합체의 응력-변형률 관계는 $[K_h]$ 에 의해 기술될 수 있다. 또한 $[K_h]$ 에는 변수 η 가 포함되어 있음을 주목할 필요가 있다. η 는 대표체적의 부피와 관련이 있으므로 지금까지 설명한 균질화 기법을 유한요소법으로 수행시킬 경우 유한요소의 크기 효과 해석결과에 반영되게 된다. 균열면 좌표계에서 계산된 강성행렬 $[K_h]$ 는 2절의 임계면법으로 탐색된 절리면의 방향벡터 $\{n\}$ 을 활용하여 전체좌표계로 전화시킬 수 있다.

4. 균질화모델을 이용한 해석 예제

4.1 해석코드의 작성

3절에서 설명한 균질화기법을 Fortran 코드로 구현한 후 컴파일하여 상업코드인 COSMOSM (Soliworks, 2008)에 이식하였다. 이 과정에서는 COSMOSM의 사용자 정의 재료모델 기능이 이용되었다. COSMOSM은 기계설계 분야에서 널리 알려진 범용 3차원 유한요소 프로그램이지만 사용자 정의 재료모델 기능이 잘 활용된다면 암반

공학 분야에서도 그 활용성이 클 것으로 예상된다. 사용자 정의 재료모델은 기본적으로 비선형 재료구성 모델의 개발에 활용된다. 개발된 재료구성식을 이용하여 각 하중 단계에서 주어진 증분 변형률 텐서에 대응되는 증분 응력텐서가 계산되도록 코드가 작성되어야 한다. 사용자 정의 재료모델이 완성되면 새로운 재료거동 모델이 추가 내장된 것과 같고 COSMOSM의 선처리 및 후처리 기능을 활용할 수 있으므로 새로운 구성모델을 암반구조물의 거동해석 목적에 손쉽게 적용시킬 수 있다.

4.2 수치 일축압축시험

제안한 구성모델의 적합성을 검토하기 위하여 Fig. 3에 나타난 가로 4 m, 세로 6 m인 암석블록 모델에 대해 2차원 평면변형률 조건에서 수치 일축압축시험을 실시하였다. 일반적으로 시험편과 가압판의 접촉면에서는 마찰력에 의해 전단응력이 발생할 수 있으므로 이상적인 일축응력 시험조건을 실제 실험에서 구현하는 것은 매우 어렵다. 상하부 가압면의 경계조건이 해석결과에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 2개의 해석모델 즉, Model 1과 Model 2을 설정하였다. 상하부면의 수평변위가 구속되지 않은 Model 1은 이상적인 일축압축시험조건에 해당한다. 상하 가압면의 좌우측면 수평변위가 구속된 Model 2는 가압면의 마찰력이 극단적으로 크게 작용하는 경우를 가정한 것이다. 실제 일축압축시험의 수평변위 경계조건은 두 모델에서 설정된 경계조건의 사이에 위치한다고 가정할 수 있다. 두 모델에서 하부면의 수직변위는 모두 구속되었지만 상부면에는 10단계에 걸쳐 4 mm 씩 수직변위를 증가시키면서 해석을 수행하였다. 따라서 최종 10단계에서는 상부면에 40 mm의 수직변위가 가해진다.

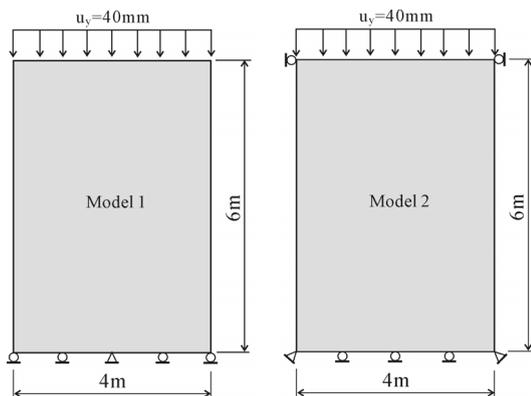


Fig. 3. Rock block models having different boundary conditions.

해석모델을 Fig. 4와 같이 균일한 크기의 96개 8절점 사각형 요소로 분할하여 유한요소해석을 실시하였다. 각 해석단계별 임의 Gauss 적분점에서 균열의 발생여부는 Hoek-Brown 경험식에 의해 판단하였고 2절에서 설명한 임계면법을 적용하여 발생된 균열의 방향을 탐색하였다. 임의 적분점에서 균열이 생성되었으면 이후 이 적분점에서 다른 방향으로 새로운 균열이 생성되지 않는다고 가정하였다. 한 적분점에서 균열이 발생되면 3절에서 설명한 균열 균질화이론에 따라 균질화된 복합매질의 강성행렬이 계산된다. 균열은 탄성거동을 하는 것으로 가정하였다. 따라서 균열이 발생한 지점의 이후 거동은 횡등방성이 된다. 해석에서 가정한 무결암과 균열면의 역학적 상수 값들은 Table 1과 같다.

2차원 해석 시 등방매질의 한 지점에서 균열의 발생은 쌍으로 발생한다. 이를 쥘레균열(conjugate crack)이라 부른다. 해석과정에서는 이 중 하나를 택하는 것이 실제 현상과 부합한다고 생각할 수 있다. 이 연구에서는

89	90	91	92	93	94	95	96
81	82	83	84	85	86	87	88
73	74	75	76	77	78	79	80
65	66	67	68	69	70	71	72
57	58	59	60	61	62	63	64
49	50	51	52	53	54	55	56
41	42	43	44	45	46	47	48
33	34	35	36	37	38	39	40
25	26	27	28	29	30	31	32
17	18	19	20	21	22	23	24
9	10	11	12	13	14	15	16
1	2	3	4	5	6	7	8
Z	X						

Fig. 4. Finite element mesh of 96 eight node elements.

Table 1. Assumed mechanical properties for rock and crack.

Constituent of the sample	Material properties
Intact rock	$E = 10 \text{ GPa}$, $\nu = 0.2$, $m = 5.0$, $s = 0.5$ $\sigma_c = 50 \text{ MPa}$
Crack	$K_s = 1.0 \text{ GPa/m}$, $K_n = 2.0 \text{ GPa/m}$

Pietruszczak & Niu (1993)가 제안한 방법에 따라 균열면의 방향벡터와 적분점 변위벡터의 내적(inner product)을 계산한 후 이 중 작은 내적값을 주는 방향을 균열의 방향으로 선택하였다.

비교를 목적으로 균열의 발생을 고려하지 않는 탄성 해석을 동시에 실시하고, 그 결과를 균열의 발생을 고려한 균질화 해석의 결과와 비교하였다.

4.3 해석결과

4.3.1 변형해석

Model 1의 경우 단계 7(상부면에 가해지는 수직변위 28 mm)부터 균열이 발생되기 시작하였지만 Model 2의 경우 단계 6(상부면에 가해지는 수직변위 24 mm)부터 균열이 발생되기 시작하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 상부면에 40 mm의 변위가 가해지는 단계 10해석에서 얻어진 Model 1과 Model 2의 변형을 30배 확대하여 도

시한 것이다.

Model 1의 탄성해석에서는 모델전체에 균질한 변형률이 발생되고 있음을 보여주고 있으며, 측면에서 수평변위는 약 3.3 mm으로 나타났다. Model 1의 균열 균질화 해석에서는 모델 상하부의 변형 형태가 서로 비대칭으로 나타나고 있음을 보여준다. 하부면 측면에서 수평변위는 13.2 mm으로 상부면 측면의 수평변위 2.6 mm에 비해 약 5배 정도 크게 나타났다. 상하부면 측면의 수평변위가 구속된 Model 2의 탄성해석 변위해석 결과 변형률분포는 상하좌우 대칭임을 알 수 있다. 반면에 균질화해석의 결과는 대체로 좌우대칭인 변형형태를 보이지만 상부영역에 비해 하부영역에서 수평변위가 다소 크게 나타나고 있음을 보여준다. 균열 균질화 모델을 적용한 해석에서는 실제 압축시험에서 흔히 관찰되는 것처럼 해석모델의 중앙부분이 측방으로 팽창되는 모습을 확연히 볼 수 있다. 균열 균질화 해석 결과에서

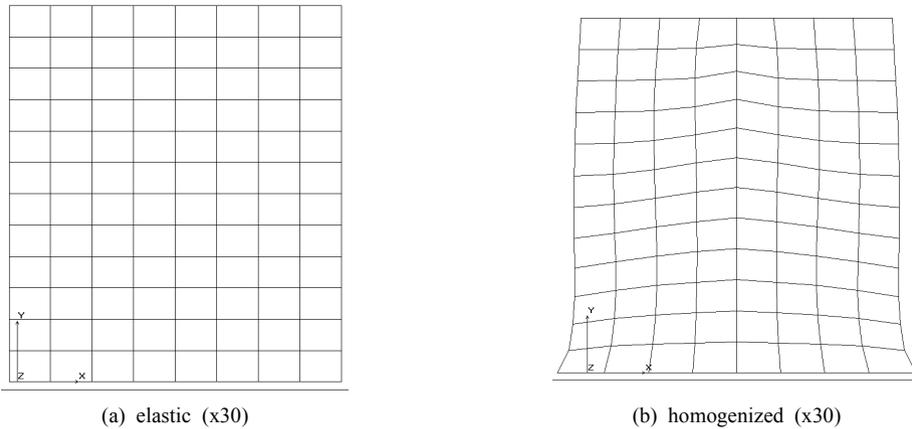


Fig. 5. Deformed meshes for Model 1 at step 10.

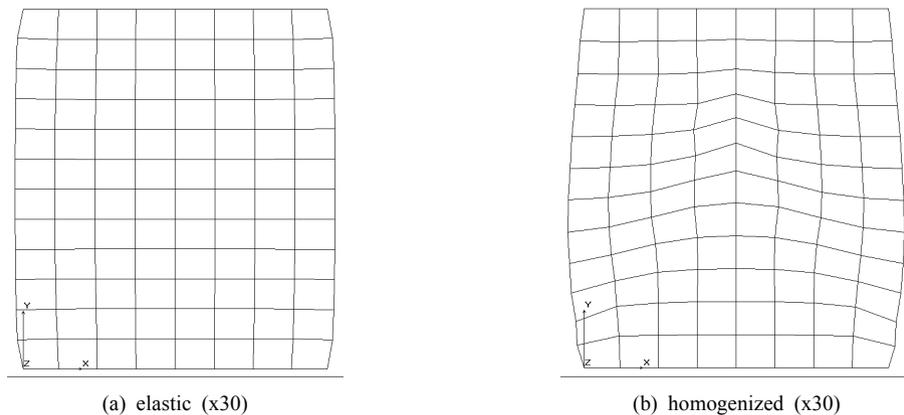


Fig. 6. Deformed meshes for Model 2 at step 10.

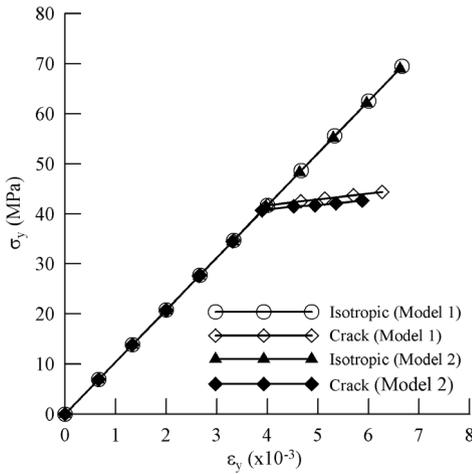


Fig. 7. $\sigma_y - \epsilon_y$ relation at element 48.

는 또한 변형의 국부화(localization) 현상도 뚜렷이 나타나고 있다. Model 2의 균질화 해석에서 얻어진 변형 모습이 실제 실험에서 관찰되는 시료의 변형 형태와 대체로 유사한 것으로 판단된다.

해석 모델의 우측면 중앙부에 위치하는 48번 요소에서 발생하는 수직응력 σ_y 와 수직변형률 ϵ_y 의 관계를 Fig. 7에 도시하였다. 전술한 바와 같이 Model 1의 경우 단계 7부터 균열이 발생되기 시작하였지만 Model 2의 경우 단계 6부터 균열이 발생되기 시작하였다. 탄성해석의 경우 σ_y 와 ϵ_y 는 정비례 관계에 있으나 균열 균질화 해석의 경우 균열 발생 이후 응력의 증가율이 현저히 낮아지는 특성을 보여주고 있다. 이는 균열의 발생으로 인해 균질화 복합체의 강성이 낮아지기 때문으로 판단된다. 이러한 해석결과는 암석시험에서 거시적으로 나타나는 비선형 거동이 미시균열의 전파와 밀접한 관련이 있음을 암시한다. 한편 48번 요소에서는 균열발생 이후 Model 2에 비해 Model 1에서 다소 큰 σ_y 가 계산됨을 보여준다.

4.3.2 최대전단변형률 해석

암석의 파괴에서 나타나는 파단면은 일반적으로 미시적인 균열의 성장과 결합의 결과로 나타난다. 제안된 균열 균질화 해석법이 이러한 파단면 형성 특성을 표현할 수 있지는 지 확인하기 위하여 다음 식으로 표현되는 최대전단변형률(γ_{max})의 분포를 도시하였다:

$$\gamma_{max} = \sqrt{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2} \quad (19)$$

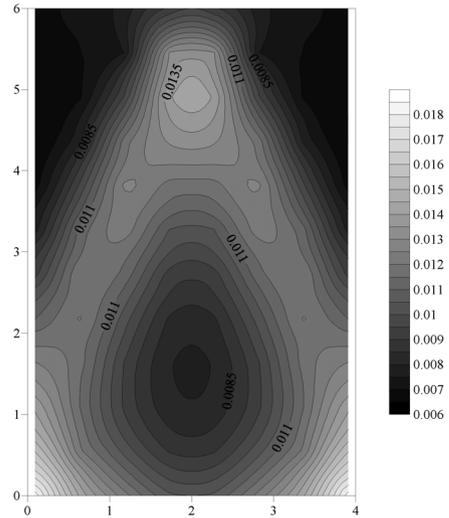


Fig. 8. Distribution of γ_{max} for model 1 at step 10 (homogenized analysis).

최대전단변형률의 분포를 해석한 결과 전단대(shear band)는 모델의 중심부에서 발달되기 시작하며 대칭성을 보이며 경사지게 발전되는 것으로 나타났다. Fig. 8은 Model 1의 균열 균질화 해석단계 10에서 얻어진 최대전단변형률 분포이다. 모델의 상부 중앙으로부터 양측 사선방향으로 전단대가 형성되고 있음을 뚜렷이 보여준다. γ_{max} 의 최대값이 발생하는 부분은 상부면 중앙으로부터 하부 약 1 m 지점이다. 이러한 전단대는 거시적인 파단면으로 간주될 수 있다. Fig. 5(a)에서 유추할 수 있듯이 탄성해석에서 얻어지는 γ_{max} 의 분포는 전 영역에서 균질하게 나타난다.

Model 2의 탄성 및 균질화 해석단계 10에서 얻어진 γ_{max} 의 분포를 Fig. 9에 도시하였다. Model 1과 달리 탄성해석의 경우도 γ_{max} 의 분포는 불균질하게 나타나며 모델의 중앙부에 γ_{max} 의 집중현상이 관찰되지만 γ_{max} 의 국부화 현상이 뚜렷이 나타나지는 않는다. 반면에 균열 균질화 해석에서는 γ_{max} 가 국부화된 전단대가 매우 뚜렷이 나타난다. 또한 전단대의 형태도 Model 1의 경우와 차이를 보인다. γ_{max} 의 최대값이 나타나는 지점도 Model 1에 비하여 깊어졌음을 볼 수 있다. 이러한 결과는 암석 시험시 가압면과 암석시료의 마찰이 시료의 파괴모드에 큰 영향을 미친다는 실험적 관찰결과를 균열 균질화를 통한 수치해석을 통해 재현할 수 있음을 보여준다. Fig. 9(b)에서 볼 수 있는 약간의 비대칭성은 켈레 균열 중 하나를 선택하는 과정에서 나타나는 현상으로 이해될 수 있다.

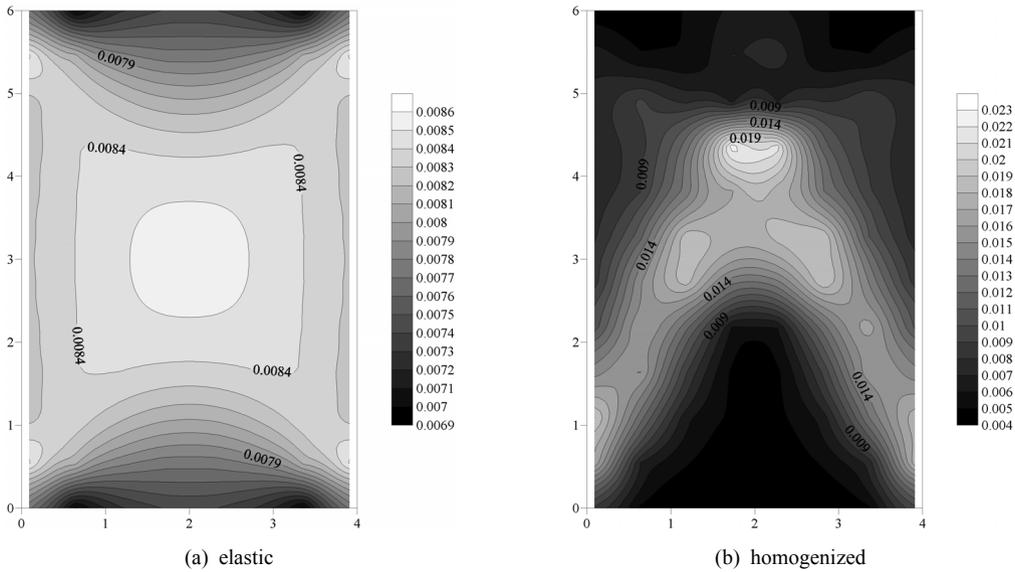


Fig. 9. Distribution of γ_{max} for model 2 at step 10.

5. 요약 및 결론

Hoek-Brown 암석에서 발생하는 균열의 전파특성을 해석하기 위한 기초연구로서 균열의 발생조건, 균열방향의 탐색법, 그리고 발생된 균열과 주변 무결암의 균질화 기법이 제시되었다. 균열의 개시조건으로 Hoek-Brown 파괴조건식이 이용되었다. 균열의 방향은 균열개시 함수의 최대화를 통해 임계면을 찾는 임계면법을 적용하여 탐색하였다. 균열과 무결암을 결합시켜 등가의 이방성 복합체를 형성시키는 균질화 기법으로는 Pietruszczak (1999)가 제안한 구성요소의 체적분율에 기초한 체적평균기법이 적용되었다. 제안된 균열탐색 및 균질화 기법을 Fortran언어를 사용하여 프로그램화 및 컴파일 후 유한요소 상용 코드인 COSMOSM에 이식하였다. 제안된 기법의 유효성을 검증하기 위하여 상하부 가압면의 경계조건을 달리 한 수치 일축압축시험을 실시하여 모델의 변형특성 및 최대전단변형을 분포특성이 고찰되었다. 이 연구에서 균열은 탄성거동을 하는 것으로 가정되었다.

이 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 제안된 균열 균질화기법을 활용할 경우 Hoek-Brown 암반에서 균열의 발생 및 전파과정을 수치해석적으로 모사할 수 있다는 점을 수치 일축압축시험을 통해 확인할 수 있었다. 거시적인 파단면은 균열전파에 따른 변형률의 국부화에 의해 형성된 전단대의 확대 진행의 결과로 발생됨을 확인할 수 있었다.

- 2) 시료와 가압판의 마찰이 시험편의 변형과 파괴면 형성에 큰 영향을 미친다는 사실이 제안된 균열탐색법과 균열 균질화 기법을 적용한 수치 일축시험 결과에 잘 반영되어 나타나고 있음을 알 수 있었다.
- 3) 이 연구에서는 비록 탄성균열을 가정하였지만 균열 발생 이후 해석모델에서 발생하는 응력의 증가는 균열 발생 이전에 비해 크게 감소함을 볼 수 있었다. 이는 모델의 거시적인 비선형 거동이 미시적인 탄성 균열의 전파과정에서 기인될 수도 있다는 점을 암시한다.
- 4) 이 연구에서 제안된 균열 균질화 해석모델은 3차원 응력 및 변형률 조건에서 수립되었으므로 앞으로 3차원 모델의 해석에 쉽게 응용될 수 있을 것으로 추측되며, 만약 균열면의 탄소성거동이 고려된다면 거시적인 변형률 경화 및 연화 현상의 해석에도 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사사

이 논문은 2008년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2008-314-D00502).

참고문헌

1. 배규진, 신휴성, 최용기 (2003), 터널 보강용 강관 다단 그라우팅 공법의 이방성 보강 메카니즘 규명에 관한 연구, 한국지반공학회논문집 19(6), pp.245-259.

2. 백용 (2000), 균질화 이론에 근거한 불연속성 암반의 탄성계수에 영향을 미치는 불연속면의 조사 인자에 관한 연구, 한국지반공학회논문집 16(4), pp.63-70.
3. 이연규 (2007), 임계면법을 이용한 횡등방성 암석의 강도 예측, 터널과 지하공간, 17, pp.119-127.
4. 이준석, 방춘석, 최일윤, 엄주환 (2001), 비등방 항복합수를 적용한 강화지반의 탄소성해석(I), 대한토목학회논문집 21(3-C), pp.197-205.
5. 방춘석, 이준석, 이상덕 (2001), 그라우팅 및 강관단단 병용공법의 설계기법에 관한 연구, 대한토목학회논문집 21(5-C), pp.197-205.
6. Baghbanan, A. and L. Jing (2007), Hydraulic properties of fractured rock masses with correlated fracture length and aperture, Int J. Rock Mech. & Min. Sci. 44, pp.704-719.
7. Cundall, P.A. (1988), Formulation of a three-dimensional distinct element model - Part I. A scheme to detect and represent contact in a system composed of many polyhedral blocks. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech. Abstr. 25(3), pp.107-116.
8. Goodman, R.E., R.L. Taylor, T.L. Brekke (1968), A model for the mechanics of jointed rock, J. Soil Mech. and Found. Div. ASCE, 94(SM3), pp. 637-657.
9. Hoek, E. and E.T. Brown (1980), Underground excavation in rock, Institute of Mining and Metallurgy, London.
10. Hoek, E. (1983), Strength of jointed rock masses, Geotechnique 33, pp.187-223.
11. Lee, Y.K. and S. Pietruszczak (2008), Application of critical plane approach to the prediction of strength anisotropy in transversely isotropic rock masses, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. 45, pp.513-523.
12. Lee, J.S., C.S. Bang, Y.J. Mok and S.H. Joh (2000), Numerical and experimental analysis of penetration grouting in jointed rock masses, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. 37, pp.1027-1037.
13. Pietruszczak, S. and X. Niu (1993), On the description of localized deformation, Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech. 17, pp.791-805.
14. Pietruszczak, S. (1999), On homogeneous and localized deformation in water-infiltrated soil, Int. J. Damage Mech. 8, pp.233-253.
15. Pietruszczak, S. and Z. Mroz (2001), On failure criteria for anisotropic cohesive-frictional materials. Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech. 25, pp.509-524.
16. Press, W.H., S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling and B.P. Flannery (1992), Numerical recipes in Fortran. Cambridge University Press.
17. Shi, G.E. (1993), Block system modeling by discontinuous deformation analysis, Computational Mechanics Publications.
18. Solidworks, (2008), COSMOSM user's guide, Solidworks Corp., USA
19. Zienkiewicz, O.C. and G.N. Pande (1977), Time-dependent multilaminar model of rocks - A numerical study of deformation and failure of rock masses, Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech. 1, pp.219-247.



이 연 규

1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1989년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 1994년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사
 Tel: 063-469-1864
 E-mail: kyoulee@kunsan.ac.kr
 현재 군산대학교 해양과학대학 해양시스템공학과 교수



전 석 원

1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1989년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 1996년 미국 아리조나 주립대학 공학박사
 Tel: 02-880-8807
 E-mail: sjeon@rockeng.snu.ac.kr
 현재 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 교수