

Brazilian 시험의 수치해석 시뮬레이션을 통한 파괴인성 산정 및 영향변수 분석

신중호¹⁾ · 박찬¹⁾ · 신희순²⁾ · 정용복³⁾ · 이희근⁴⁾

Fracture Toughness Evaluation and Influence Parameter Analysis by Numerical Simulation of Brazilian Test

Joong-Ho Synn, Chan Park, Hee-Soon Shin, Yong-Bok Chung and Hi-Keun Lee

ABSTRACT The numerical simulation of Brazilian fracture toughness test is carried out using PFC code and the influence parameters are analyzed such as shape of loading plane, size of Brazilian disc and unit particle of model, loading angle and loading rate. The flattened Brazilian disc is adopted for applying uniform load. The range of loading angle(2α) necessary to induce the tensile crack at disc center and to obtain the load-displacement curve giving the critical load for the stable crack propagation is shown as $20^\circ \sim 40^\circ$. In condition that the loading angle is 20° , the mode-I fracture toughness is evaluated almost constant in the range of particle size less than 1 mm and loading rate less than 0.01 mm/s. This range of influence parameters seems appropriate condition for the tensile crack initiation at disc center and the control of stable crack propagation, which can give the reliance in evaluation of fracture toughness by Brazilian test.

Key words : Brazilian fracture toughness test, tensile crack initiation, stable crack propagation, critical load, stress intensity factor

초 록 암석의 파괴인성 측정법으로서 최근에 연구되고 있는 Brazilian 파괴인성 시험을 PFC code를 이용하여 수치 해석적으로 시뮬레이션하였다. 이로부터 가압면 형태, 시험편과 모델링 입자의 크기 관계, 가압면 각도 범위, 하중속도 등의 영향 변수에 대한 분석 및 적정 기준에 대해 검토하였다. 균등한 하중 전달을 위해 가압면이 평면인 Brazilian 시험편을 도입하였는데, 시험편 중앙에서 초기 인장균열을 생성하고 파괴인성 산정에 필요한 안정한 인장균열 진전 시점의 임계하중이 나타나는 하중-변위 곡선을 얻을 수 있는 가압면 각도는 $20^\circ \sim 40^\circ$ 범위로 나타났다. 가압면 각도가 20° 인 경우에, 디스크 시험편의 구성입자 반경이 1 mm 이하이고 하중속도가 0.01 mm/s 이하인 조건에서는 거의 일정한 파괴인성값을 얻을 수가 있었다. 가압면 각도가 20° 이상이고 하중속도가 0.01 mm/s 이하는 파괴인성 측정에서 중요한 기본 조건인 시험편 중앙에서의 인장균열 생성 및 이 인장균열의 안정적인 진전 제어를 위한 조건인 것으로 볼 수가 있다.

핵심어 : Brazilian 파괴인성시험, 인장균열생성, 안정적 균열진전제어, 임계하중, 응력확대계수

1. 서 언

파괴인성(fracture toughness)은 재료의 선형과곡역학적 평가에 있어서 가장 중요한 파괴강도 특성이다. 암석의 파괴인성 측정을 위하여 지금까지 여러가지 시험법들이 연구되어 왔으며(Singh등, 1988), ISRM에서도 검증 과정을 거친 몇 가지 방법을 제안시험법으로 정하고 있다(ISRM, 1988, 1995). 최근에 들어 Guo등(1993), Wang등(1999) 및 정용복(2000) 등은 Brazilian 시험을 이용한 파괴인성 측정방법을 연구 보고한 바 있다. 이

방법은 기존의 ISRM 제안시험법에 비하여 시험편 및 시험방법이 비교적 간편한 특징이 있지만, 시험법과 측정 결과의 공인성과 관련되는 시험조건 및 영향 변수의 기준에 대한 규정 및 검토의 필요성을 가지고 있다.

이 Brazilian 파괴인성 시험과 관련되는 것으로서, 디

- 1)정회원, 한국자원연구소 탐사개발연구부 선임연구원
 - 2)정회원, 한국자원연구소 탐사개발연구부 책임연구원
 - 3)정회원, 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부
 - 4)정회원, 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 교수
- 접수일 : 2000년 8월 16일
심사 완료일 : 2000년 8월 23일

스크 형태의 시험편에 대한 파괴시험에서 균열 생성 및 전파에 대한 연구 보고들도 다수 발표되고 있다(Hashida 등, 1993; Yanagidani 등, 1978).

본 연구에서는 Brazilian 시험을 통한 파괴인성 측정 방법을 PFC code를 이용하여 수치해석적으로 시뮬레이션하고, 이를 통하여 균등한 가압조건과 관련한 시험편의 형태, Brazilian 디스크 시험편의 크기에 대한 모델링 입자크기의 관계, 디스크 중심에서의 초기 인장균열 생성 여부와 관련한 가압면의 각도 범위, 안정한 균열진전 제어와 관련한 하중속도 등의 영향 변수에 대해 분석하였다. 그리고 이를 통하여 Brazilian 파괴인성 측정법에 대한 시험조건의 적정 기준에 대해 검토하였다.

2. Brazilian 시험편 조건 및 응력분포 양상

디스크형 시험편에 직경방향으로 유한한 각도 범위의 하중이 가해질 때(Fig. 1(a) 참조), 상하 가압 중심점을 잇는 디스크 내부의 중앙 직경선 상에 분포하는 응력해는 Hondros(1959)에 의해 구해져 있는데, 극좌표계에 의한 두 응력성분은 다음과 같다(Guo 외, 1993). 여기서, P 는 가해지는 하중, R 은 디스크 반경, r 는 디스크 두께, α 는 가압면의 각도 범위, r 은 디스크 중심에서의 거리이다.

$$\sigma_{\theta} = \frac{P}{\pi R t \alpha} \left[\frac{(1-(r/R)^2) \sin 2\alpha}{1-2(r/R)^2 \cos 2\alpha + (r/R)^4} - \tan^{-1} \left(\frac{1+(r/R)^2}{1-(r/R)^2} \tan \alpha \right) \right] \quad (1)$$

$$\sigma_r = \frac{-P}{\pi R t \alpha} \left[\frac{(1-(r/R)^2) \sin 2\alpha}{1-2(r/R)^2 \cos 2\alpha + (r/R)^4} + \tan^{-1} \left(\frac{1+(r/R)^2}{1-(r/R)^2} \tan \alpha \right) \right] \quad (2)$$

한편 Griffith 파괴이론에 의거하면, 암석 내부에는 거의 편평하게 달려있는 작은 타원 형태의 미세 균열들이 내재되어 있으며 이 미세균열의 존재 형태 및 균열면에 작용하는 외부 응력 조건에 따라 파괴조건이 결정된다(Griffith, 1925). Brazilian 디스크 내부에 작용하는 상기 (1)~(2) 식의 두 응력은 주응력이 되므로, $\sigma_{\theta} = \sigma_1$ 및 $\sigma_r = \sigma_3$ 로 하면(인장을 (+)로 함), Griffith 파괴기준의 응력 조건에서 $(3\sigma_1 + \sigma_3) < 0$ 이 된다. 이로부터 상기

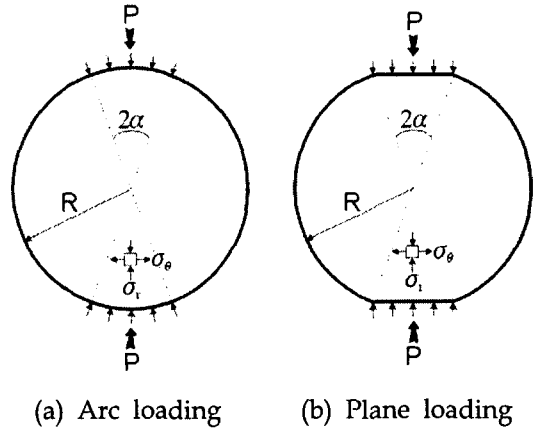


Fig. 1. Two Specimen models of Brazilian Test.

σ_{θ} 및 σ_r 을 Griffith 파괴조건식에 적용할 때, 균열선단에 발생하는 최대인장응력, σ_G 는 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_G = \frac{P}{4\pi R t \alpha} \left[\frac{(1-(r/R)^2) \sin 2\alpha}{1-2(r/R)^2 \cos 2\alpha + (r/R)^4} \right]^2 \left[\tan^{-1} \left(\frac{1+(r/R)^2}{1-(r/R)^2} \tan \alpha \right) \right]^{-1} \quad (3)$$

이 σ_G 즉, Griffith 파괴이론에 의거한 균열 선단의 최대인장응력은 가압면 각도, α 및 디스크 중심에서의 거리에 따라 달라지는데 그 분포 양상을 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 보듯이 Brazilian 디스크 내에서 균열

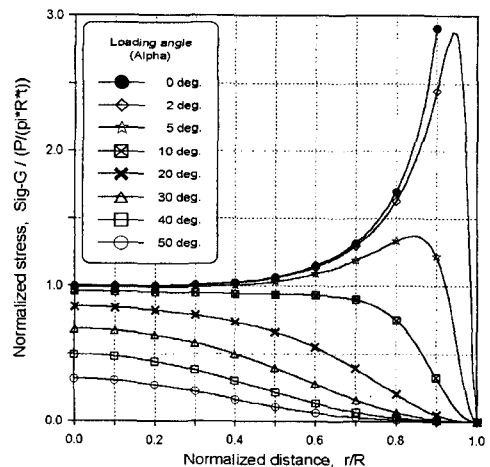


Fig. 2. Maximum tensile stress at crack edge along diametrical center line in Brazilian disc.

선단의 최대인장응력이 나타나는 지점은 가압 각도 범위에 따라 달라진다. 가압 각도가 좁으면 가압점에 인접한 지점에서 최대치가 발생하고 가압 각도가 점차 넓어질수록 최대 지점이 디스크 중심으로 이동하는데, 디스크 중심에서 최대치가 발생하기 시작하는 임계 가압 각도 범위는 $2\alpha = 19.5^\circ$ 이다.

Brazilian 시험에 의한 인장강도 측정 뿐만 아니라 특히 파괴인성 측정에 있어서 균열 발생 시작점의 파악은 매우 중요하다. 파괴인성 측정을 위해서는 Brazilian 시험에서 가압에 따라 디스크 중앙부에서 먼저 인장균열이 발생하여 이 균열의 안정한 진전에 수반되는 임계하중치가 측정되어야 한다. 따라서, 디스크 중앙에서 초기 인장균열이 발생하기 위한 기본적인 조건으로서 가압면의 각도 범위가 $2\alpha > 19.5^\circ$ 이어야 한다.

일반적으로 Brazilian 시험에서는 앞의 Fig. 1(a)와 같이 디스크 시험편에 직경방향으로 균등한 하중을 가하기 위해 ISRM의 제안시험법에 나타나 있는 것과 같은 가압장치를 사용한다. 그렇지만, 디스크와 가압장치의 곡률 반경이 다르기 때문에 실제로 정해진 가압면 범위(2α) 전체에 균등한 하중이 가해지지는 않으며 포물선 형태의 하중분포가 작용하게 된다.

이러한 일반적인 디스크형 Brazilian 시험편의 가압하중 전달의 제약을 배제하기 위하여, 본 수치해석 모델링에서는 Fig. 1(b)와 같이 상하 가압면 부분이 평면인 디스크 형태를 고려하였다. 이 상하 가압면이 평면인 디스크 시험편에 대한 이론적인 응력분포해는 없지만, 수치해석을 통해 디스크 내부의 응력분포를 구하고 앞의 원형인 디스크의 이론해와 비교하여 Brazilian 시험을 위한 적합성이 검토된 바 있다(Wang 외, 1999). 이 연구 보고에서는, 균열이 디스크 중앙부에서 생성하는 조건으로 $2\alpha = 20^\circ$ 인 평면 가압 디스크에 대하여 2차원 BEM 응력해석을 하여 일반적인 arc 형태의 가압 디스크의 이론해와 비교하였는데, 그 차이는 0.5% 이내로 거의 같은 응력 분포를 보였다.

3. 해석 모델 및 해석 조건 설정

이상의 검토에 의거하여 Brazilian 시험을 통한 파괴인성 측정의 수치해석적 시뮬레이션을 위해 평면 가압 디스크 모델을 도입하였으며(Fig. 1(b) 참조), PFC-2D code를 이용하였다.

PFC code에서는 암석재료를 작은 원형입자의 집합체

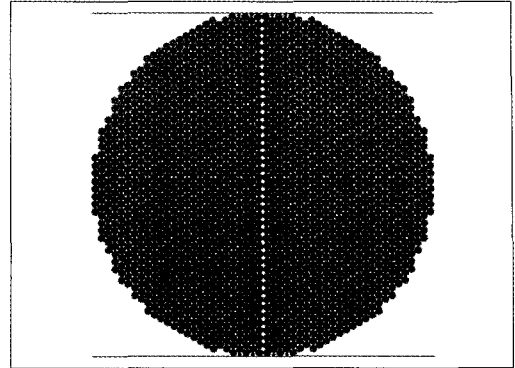


Fig. 3. Plane loading disc model for numerical simulation of Brazilian fracture toughness test using PFC.

로 모델링하며, 구형입자 상호간의 힘-변위관계식 및 운동방정식에 의거하여 변형거동을 시뮬레이션하고, 재료의 강도는 접촉 입자간의 인장 및 전단 결합강도로서 규정한다. 파괴기준은, 접촉점에서의 인장력이 법선방향의 결합강도 즉, 인장강도에 도달하면 결합은 끊어지고 법선 및 전단 접촉력은 0이 되며, 전단접촉력이 전단방향의 결합강도 즉, 전단강도에 도달하면 결합은 끊어지나 접촉력은 그대로 존재하는 것으로 규정한다.

평면 가압 디스크의 PFC 해석 모델은 Fig. 3과 같다. 동일한 크기의 입자들을 hexagonal 배열 형태로 구성하였으며, Brazilian 시험에서는 상하 가압점을 잇는 중앙 수직선 상에서 주된 인장균열이 발생하므로 이 예상 인장균열면을 고려하여 모델의 중앙에 수직선 형태의 입자경계선이 형성되도록 입자배열을 하였다.

Brazilian 시험에 의한 파괴인성 측정은 최근에 연구되고 있는 방법으로서, ISRM에서 제안시험법으로 정하고 있는 다른 파괴인성측정법과는 달리 아직 시험편의 형태, 가압면 조건, 하중 또는 변위 제어 조건 등에 대한 기준이 명확히 설정되어있지 않은 상태이다. 여기서는 수치해석 시뮬레이션을 통해 이러한 몇가지 시험 변수들에 대해 분석을 하고자 하였다. 이를 위해 평면 가압 디스크

Table 1. Analysis parameters for simulation of Brazilian fracture toughness test.

Parameter	Value (Description index)		
Particle radius, r (mm)	1.0 (B)	0.6 (L)	
Loading angle, α (°)	6 (N)	10 (M)	20 (W)
Loading rate, v (mm/s)	0.1 (F)	0.0 (S)	

With combinations of three parameters, 12 cases are tested. For example, BNF case is for $r=1.0$ mm, $a=6^\circ$, $v=0.1$ mm/s

Table 2. Mechanical properties of Brazilian disc model for numerical analysis.

Density (kg/m ³)	Normalstiffness (N/m)	Shearstiffness (N/m)	Frictioncoefficient	Tensilestrength (MPa)	Shearstrength (MPa)
2680	1.02e10	1.02e10	0.5	8.0	19.36

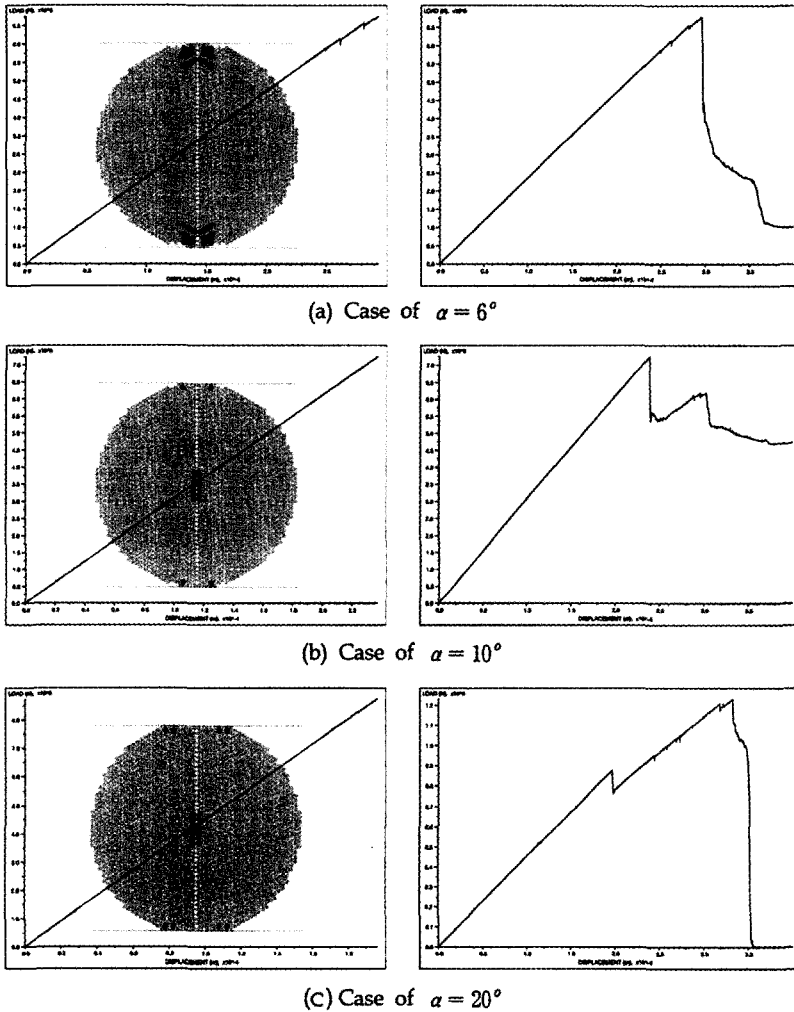


Fig. 4. Crack initiation pattern and force-displacement curve according to loading angle.

에서 상하 가압 평면의 크기 즉 가압면의 각도, 가압조건으로서 변위제어시의 변위속도, 그리고 수치해석 모델링시 구성입자의 크기 등을 분석 변수로 설정하였다. 해석에 적용한 이들 분석 변수 조건은 Table 1과 같으며, Brazilian 디스크의 반경은 일반적인 NX 코어에 해당하는 27 mm이다. 그리고 PFC 해석에 필요한 물성 입력치는 Table 2와 같다. 이 물성치는 국내의 일반적인 화강암의 물성을 참고로 하여 설정한 것이다.

4. 균열 발생 형태 및 하중-변위 양상

앞의 2절에서 언급한 가압 각도에 따른 균열발생 양상을 검토하기 위하여 세가지 가압면 각도에 따른 초기 균열발생 형태 및 하중-변위곡선 양상의 해석 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4의 해석 결과는 입자 반경이 0.6 mm인 경우로서 입자 반경이 상대적으로 큰 1.0 mm인 경우에도 같은 양상을 보였다. 가압 각도가 $\alpha = 6^\circ$ 인

경우는 가압면에 인접한 부근에서 전단파괴가 일차적으로 발생하였으며, 가압 각도가 $\alpha=10^\circ$ 및 $\alpha=20^\circ$ 인 경우는 디스크 중앙에서 인장파괴가 일차적으로 발생하였다. 이러한 해석 결과는 앞의 Fig. 2에 나타낸 완전 원형 디스크에 대한 이론적인 최대응력집중점의 발생 지점과 같은 양상으로서, 본 해석 모델인 평면 가압 디스크 모델 및 디스크 중앙에 초기 균열이 발생하기 위한 가압 각도 범위의 타당성을 보여주는 것이다.

하중-변위 곡선 양상에서, $\alpha=6^\circ$ 인 경우는 최대파괴하중 직후에 급격한 하중 저하를 보인다. 이 경우는 전단균열이 가압점 부근에서 먼저 발생한 후 이와 연결되는 인장균열이 추가로 발생하므로 인장 균열의 안정한 진전없이 시험편이 완전한 파괴에 도달하는데 기인한 것이다. $\alpha=10^\circ$ 인 경우는 최대파괴하중 직후에 중앙부 초기 인장균열의 불안정한 진전에 따른 하중 저하가 나타나다가 안정한 균열 진전에 따른 하중 증가 및 저하가 반복되면서 점차 완전한 파괴에 이르면서 하중이 떨어진다. $\alpha=20^\circ$ 인 경우도 중앙부에 인장균열이 먼저 생성되면서 최대파괴하중 이전에서 부분적인 하중 피크치를 보이지만, 가압면이 넓은 관계로 가압면의 마찰 구속으로 인해 재차 하중이 증가하다가 압축시험과 같이 추가적인 전단 파괴가 발생하여 중앙부의 인장균열과 연결됨으로써 어느

정도 인장균열 진전 후에는 시험편의 급격한 파괴가 발생한다.

이러한 해석 결과 분석으로부터 Brazilian 시험에 의한 파괴인성의 도출을 위해서는 세가지 가압 각도 조건 중에서 $\alpha=10^\circ$ 인 경우의 해석 결과를 이용하는 것이 적합한 것으로 나타났으며, $\alpha=20^\circ$ 인 경우도 디스크 중앙부의 인장균열 발생조건은 부합되나 넓은 가압면의 마찰구속 및 전단파괴 영향으로 파괴인성 계산에 필요한 안정한 인장균열 진전과 관련되는 임계 하중치를 결정하기가 어려운 면을 보였다.

5. 입자결합 파괴 수 및 A.E. 양상과의 연관성

PFC 모델링에서는 접촉 입자간에 작용하는 접촉력과 결합강도와의 관계로부터 파괴 여부를 판정한다. 즉, 접촉점에서의 법선방향 인장접촉력 또는 전단방향 접촉력이 인장 결합강도 또는 전단 결합강도보다 크면 입자간의 결합이 끊어지고 그 점에서 파괴가 일어난 것으로 규정한다.

따라서 파괴가 발생해 가는 과정에 따른 접촉입자간 결합 파괴 수를 도출할 수가 있는데, 세가지 가압 각도

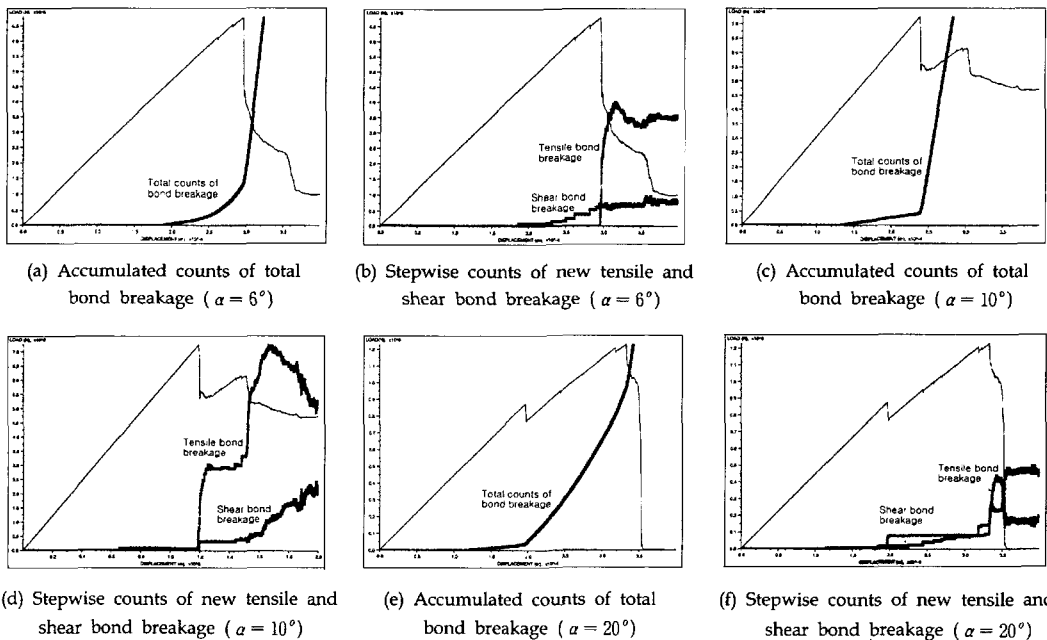


Fig. 5. Counts of bond breakage according to progressive failure.

Table 3. Comparison of tensile strength calculated using Eqn. (4) and (5).

Case	Maximum failure load P_{max} (KN)	Tensile strength using Eqn. (4) $\sigma_{t,4}$ (MPa)	Tensile strength using Eqn. (5) $\sigma_{t,5}$ (MPa)	Ratio of two values $\sigma_{t,5}/\sigma_{t,4}$
BNF	664.7	7.84	7.72	0.985
BNS	664.2	7.83	7.72	0.986
BMF	713.1	8.41	8.07	0.960
BMS	712.1	8.40	8.06	0.960
LNF	680.8	8.03	7.91	0.985
LNS	679.6	8.01	7.90	0.986
LMF	727.0	8.57	8.22	0.959
LMS	725.3	8.55	8.21	0.960

조건의 해석 모델에 대한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 전체적으로 총 결합파괴 수는 최대파괴하중 부근에서 급격히 증가하는 것으로 나타났다. $\alpha=6^\circ$ 인 경우는 최대파괴하중 이전부터 전단결합 파괴 수가 점진적으로 증가하면서 주된 인장균열이 발생하는 최대하중지점부터 인장결합 파괴 수가 급격히 증가하고 있다. $\alpha=10^\circ$ 인 경우는 최대파괴하중 이전에는 인장결합 및 전단결합 파괴가 없다가 최대하중점부터 인장결합 파괴 수가 급증하고 전단결합 파괴 수도 약간씩 나타나고 있다. $\alpha=20^\circ$ 인 경우는 최대하중 이전에 일차 하중 피크치가 나타나는 시점에서 인장결합 파괴 수가 나타나고 이후에 최대하중점까지 인장결합 파괴 수의 증가는 없고 전단결합 파괴 수가 증가하다가 최대하중점에서 두가지 모두 급증하고 있다. 인장결합 및 전단결합 파괴 수의 발생 양상은 앞의 4절에서 검토한 초기 균열 발생 양상과 일치하는 것이다.

이러한 접촉입자간 결합 파괴 수는 암석의 파괴시험에서 측정되는 AE 발생양상과 유사한 경향을 보여준다. 즉, PFC 해석에 의한 입자결합 파괴 수의 산정을 통하여 파괴진행에 따른 AE 발생 양상을 유추할 수 있으며, 특히 인장파괴 및 전단파괴 양상을 구분하여 평가할 수 있을 것으로 보인다.

6. 인장강도 비교

Brazilian 디스크 시험에서 가압면 각도 범위가 극히 작은 선하중 조건의 경우에 디스크 중심에서 발생하는 두 응력 성분 σ_θ 및 σ_r (Fig. 1의 극좌표계 참조)은 (4)식과 같으며, 일반적으로 인장강도는 이 식을 이용하여 $\sigma_t = P/\pi R t$ 로 산정한다.

$$\sigma_\theta = +\frac{P}{\pi R t}, \quad \sigma_r = -\frac{3P}{\pi R t} \quad (4)$$

한편, 실제로 유한한 가압 범위를 가지는 경우에 Brazilian 디스크 중심에 발생하는 두 응력해는 앞의 (1)~(2) 식으로부터 (5)식과 같이 얻어진다.

$$\sigma_\theta = +\frac{P}{\pi R t} \left(\frac{\sin 2\alpha}{\alpha} - 1 \right), \quad \sigma_r = -\frac{P}{\pi R t} \left(\frac{\sin 2\alpha}{\alpha} + 1 \right) \quad (5)$$

12가지 해석조건 중에서 가압면의 각도가 $2\alpha=40^\circ$ 인 경우는 가압면이 큰 관계로 Brazilian 인장 시험의 양상과는 다르게 나타났으므로, 이를 제외한 나머지 8가지 조건에 대한 최대하중값으로부터 상기 (4)식 및 (5)식에 의한 인장강도를 계산한 결과는 Table 3과 같다. 여기서 각 해석조건의 명칭은 앞의 Table 1에 나타나 있는 각 변수 값의 index를 이용하여 조합하여 나타낸 것이다. (4)식 및 (5)식으로 계산된 인장강도는 $\alpha=6^\circ$ 인 경우는 약 1.5%, $\alpha=10^\circ$ 인 경우는 약 4%의 차이를 보였다. 해석에 적용한 인장결합강도 입력치는 8.0 MPa 인데, 디스크 중심에서 초기 인장균열의 발생 조건을 만족하는 $\alpha=10^\circ$ 인 경우에 유한한 가압면 각도 범위를 고려한 (5)식으로 계산한 값이 실제 입력치에 보다 근접하는 것으로 나타났다.

7. 파괴인성 산정

입자크기, 가압 각도 및 가압 속도의 3가지 영향변수 조합에 의한 12가지 경우에 대한 해석결과로부터 파괴인성 산정에 필요한 임계하중 및 균열발생 양상을 Table 4에 나타내었다. 여기서, 파괴인성 산정에 필요한 임계하중은 최대하중점 이후 불안정한 초기 인장균열 발생에

Table 4. Results of numerical simulation of Brazilian test.

Case	Critical load P_c (KN)	Crack initiation pattern
BNF	398.9	Initial shear crack near loading point
BNS	396.7	"
BMF	540.7	Initial tensile crack at center
BMS	509.2	"
BWF	1,182.0	"
BWS	1,166.0	"
LNF	420.5	Initial shear crack near loading point
LNS	417.4	"
LMF	535.8	Initial tensile crack at center
LMS	529.7	"
LWF	1,104.0	"
LWS	1,031.0	"

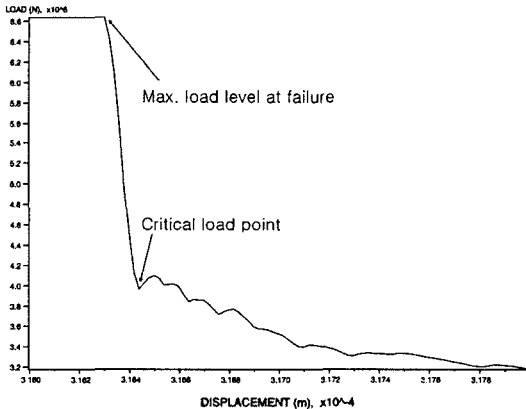


Fig. 6. Determination of critical load for stable crack propagation.

따른 급격한 하중 저하에 이어서 안정한 균열 전진이 발생하는 시점의 하중으로서 이는 적정한 시험조건에 의해 얻어진 하중-변위 곡선에서 비교적 용이하게 찾을 수가 있는데, Fig. 6은 해석 결과로 얻어진 하중-변위 곡선의 최대파괴하중 이후에서 임계하중을 결정하는 한 예이다.

앞에서도 검토한 바와 같이 디스크 중심에서 초기 인장 균열이 발생할 가압 각도 조건인 $2\alpha > 19.5^\circ$ 을 만족하는 경우는 $2\alpha = 20^\circ$ 및 $2\alpha = 40^\circ$ 인 경우인데, 후자의 경우는 가압면이 비교적 큰 관계로 초기 인장균열 발생 후에 가압면의 마찰 구속 및 전단파괴의 영향으로 Brazilian 인장시험의 전형적인 곡선 형태를 보이지 않았다. 따라서,

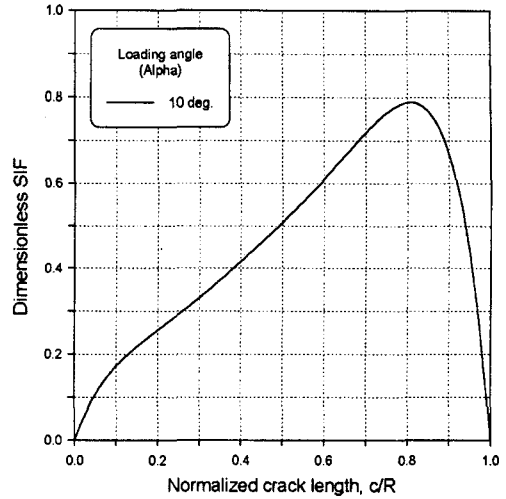


Fig. 7. Dimensionless stress intensity factor for $2\alpha = 20^\circ$.

여기서는 Table 4의 12가지 해석 경우 중에서 가장 적정한 조건인 $2\alpha = 20^\circ$ 인 경우의 해석 결과를 이용하여 파괴인성을 산정하였다.

Brazilian 인장시험을 통한 모드-I의 파괴인성 산정식은 (6)식과 같다.

$$K_{IC} = \frac{P_c}{\sqrt{Rt}} \Phi_{max} \quad (6)$$

여기서 Φ_{max} 는 응력확대계수, Φ 의 최대치이다. 본 해석에서 이용한 평면 가압 디스크 형태에 대한 응력확대계수의 이론적 해는 없지만 수치해석을 통하여 근사해를 얻을 수가 있으며, 그 결과가 보고된 바 있다(Wang 외, 1999). 본 해석에서 필요한 조건인 $2\alpha = 20^\circ$ 인 경우에 대해 얻어진 이 응력확대계수 근사식을 이용하여 Fig. 7에 그래프로 나타내었다. 이 경우에 최대 무차원 응력확대계수는 균열길이가 디스크 반경의 0.8배인 경우에 나타나며 이때 최대 무차원 응력확대계수는 $\Phi_{max} = 0.78$ 이다. 이 최대 무차원 응력확대계수는 가압 각도가 넓어질수록 균열길이가 짧은 쪽으로 이동하고 최대치도 작아지는 경향을 보이는 것으로 알려져 있다.

앞의 Table 4에서 $2\alpha = 20^\circ$ 인 4가지 경우에 대한 임계하중으로부터 (6)식으로 계산된 모드-I 파괴인성값, K_{IC} 는 Table 5와 같다. 이 결과에 의하면 가압 각도가 디스크 중심에서 초기 인장균열이 발생하는 조건을 만족할 때, 입자 크기가 디스크 반경의 0.037배 및 0.022배로 작고, 하중속도가 0.1 mm/s 및 0.01 mm/s인 경우 모두 거의 비슷한 값을 보였다. 입자 크기는 단위 인장

Table 5. Results of fracture toughness evaluated for the case of $2\alpha=20^\circ$.

Case	BMF	BMS	LMF	LMS
K_{Ic} (MPa \sqrt{m})	2.567	2.417	2.543	2.514

균열의 진전 길이와 관련되며 하중속도 또한 안정한 균열진전을 제어할 수 있는 조건과 관련된다. 실제로 일반적인 암석의 경우에 본 해석의 입자 크기와 관련지을 수 있는 광물 입자 크기를 1 mm 내외로 본다면 NX 코어를 이용한 Brazilian 디스크의 반경은 약 27 mm 이므로 시험편의 크기면에서는 적합하다고 볼 수 있다. 그리고 가압 속도의 경우, 0.1 mm/s의 경우에도 파괴인성 산정치는 0.01 mm/s의 경우와 비슷한 값으로 얻을 수 있었지만 전체적인 하중-변위 곡선에서 최대하중 직후에 급격한 압력 저하 경향이 뚜렷하여 안정한 균열 진전의 임계하중치가 명확히 나타나지 않는 경우도 있다. Mellor등(1971)에 의하면 NX 크기의 시험편에 대한 Brazilian 시험의 경우 0.1 mm/s 정도도 가능하다고 하고는 있지만, 파괴인성 측정을 위한 안정한 균열 진전이 요구되는 경우에는 0.01 mm/s 이하가 적절한 가압속도 범위로 보인다.

8. 결 언

본 연구에서는 Brazilian 시험을 통한 파괴인성 측정 방법을 PFC code를 이용하여 수치해석적으로 시뮬레이션하고, 이를 통하여 균등한 가압조건과 관련한 시험편의 형태, Brazilian 디스크 시험편의 크기에 대한 모델링 입자크기의 관계, 디스크 중심에서의 초기 인장균열 생성 여부와 관련한 가압면의 각도 범위, 안정한 균열진전 제어와 관련한 하중속도 등의 영향 변수에 대해 분석하였다.

일반적인 원형 Brazilian 시험편의 경우는 실제 시험에 있어서 가압면 전체에 균등한 하중을 전달하는데 제약이 있으므로, 본 해석에서는 상하 가압면이 평면인 디스크 형태를 적용하였다. 이론적 분석 및 본 해석 결과, 파괴인성 측정을 위해 요구되는 디스크 중앙에서의 초기 인장균열을 생성하는 가압 각도(2α)는 20° 이상인 것으로 나타났으며, 가압면 각도가 40° 정도로 커지면 인장균열과 함께 전단파괴의 영향이 뚜렷하여 임계하중점 결정에 필요한 하중-변위 곡선을 얻기가 어려웠다.

PFC 해석을 통하여 점진적 파괴에 수반되는 입자간 결합의 파괴 수를 도출하여 인장파괴 및 전단파괴 양상을 평가할 수가 있었으며 이는 실제 파괴시험에서 나타나는 AE 발생과 유사한 양상을 보임으로써 간접적으로 암석파괴에 따른 AE 발생 양상을 유추할 수가 있을 것으로 보인다.

가압 각도가 $2\alpha=20^\circ$ 인 경우에, 산정된 파괴인성은 다른 영향변수인 입자 반경 크기(0.6 mm 및 1.0 mm)와 하중속도(0.1 mm/s 및 0.01 mm/s)의 변화 조건에서 모두 비슷한 수준의 값으로 나타났는데, 하중속도가 0.1 mm/s인 경우는 최대하중 이후에 안정한 균열진전 시점의 임계하중이 뚜렷하지 않은 경우도 있어서 안정한 인장균열 제어를 위해서는 0.01 mm/s 이하가 적절한 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 정용복, 2000, 저온하에서의 암석의 변형 거동 및 파괴 특성에 관한 연구, 서울대학교 박사학위논문, 206p.
2. Griffith, A.A., 1925, The theory of rupture, Proc. 1st Int'l. Congress for Applied Mechanics, Delft, 55-63.
3. Guo, H., N.I. Aziz and L.C. Schmidt, 1993, Rock fracture-toughness determination by the Brazilian test, Engineering Geology, 33, 177-188.
4. Hashida, T. and H. Takahashi, 1993, Significance of AE crack monitoring in fracture toughness evaluation and non-linear rock fracture mechanics, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr, 30. 1, 47-60.
5. ISRM Commission on Testing Methods, 1988, Suggested methods for determining the fracture toughness of rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr, 25. 2, 71-96.
6. ISRM Commission on Testing Methods, 1995, Suggested methods for determining mode I fracture toughness using cracked chevron notched Brazilian disc(CCNBD) specimens, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr, 32. 1, 57-64.
7. Mellor, M. and I. Hawkes, 1971, Measurement of tensile strength by diametral compression of discs and annuli, Engineering Geology, 5, 173-225.
8. Singh, R.N. and A.G. Pathan, 1988, Fracture toughness of some British rocks by diametral loading of discs, Mining Science and Technology, 6, 179-190.
9. Wang, Q.Z. and L. Xing, 1999, Determination of fracture toughness K_{Ic} by using the flattened Brazilian disk specimen for rocks, Engineering Fracture Mechanics, 64, 193-201.
10. Yanagidani, T., O. Sano, M. Terada and I. Ito, 1978, The observation of cracks propagating in diametrically compressed rock discs, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr, 15, 225-235.



신 중 호

1983년 서울대학교 공과대학 자원공
학과, 공학사
1985년 서울대학교 공과대학 자원공
학과, 공학석사
1990년 서울대학교 공과대학 자원공
학과, 공학박사

Tel : 042-868-3242

E-mail : jhsynn@kigam.re.kr

현재 한국자원연구소 탐사개발연구부 선임연구원



박 찬

1988년 한양대학교 공과대학 자원공
학과, 공학사

Tel : 042-868-3245

E-mail : chan@kigam.re.kr

현재 한국자원연구소 탐사개발연구부 선임연구원



신 희 순

1976년 서울대학교 공과대학 자원공
학과, 공학사
1978년 서울대학교 대학원 자원공학
과, 공학석사
1986년 서울대학교 대학원 자원공학
과, 공학박사

Tel : 042-868-3240

E-mail : shinhs@kigam.re.kr

현재 한국자원연구소 탐사개발연구부 책임연구원



정 용 복

1994년 서울대학교 공과대학 자원공
학과, 공학사
1996년 서울대학교 대학원 자원공학
과, 공학석사
2000년 서울대학교 대학원 지구환경
시스템공학부, 공학박사

Tel : 02-880-7232

E-mail : cozy@rockeng.snu.ac.kr

현재 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부
박사과정



이 희 근

1970년 서울대학교 공과대학 자원공
학과, 공학사
1973년 서울대학교 대학원 자원공학
과, 공학석사
1977년 일본 교오또대학(京都大學)
대학원 자원공학과, 공학박사

Tel : 02-880-7222

E-mail : irram@plaza.snu.ac.kr

현재 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수