

인장, 전단 및 혼합모드에서 디스크 시험편을 이용한 암석의 파괴인성 측정에 관한 연구

장수호¹⁾ · 이정인²⁾

Measurement of rock fracture toughness under mode I, II & mixed-mode conditions by using disc-typed specimens

Soo-Ho Chang and Chung-In Lee

ABSTRACT : Rock fracture mechanics has been widely applied to blasting, hydraulic fracturing, rock slope and many other practical problems in rock engineering. But a measuring method for the fracture toughness of rock, one of the most important parameters in fracture mechanics as an intrinsic property of rock, has not been yet well established. To obtain mode I rock fracture toughness, the more favorable disc-typed specimens such as CCNBD, SCB, chevron-notched SCB and BDT were used in this study. Rock fracture toughness under mixed-mode and mode II conditions was measured by using the STCA applied to the CCNBD specimen. Size effects such as specimen thickness, diameter and notch length on fracture toughness were investigated. From the mixed-mode results, fracture envelopes were obtained by applying various regression curves. The mixed-mode results were also compared with three mixed-mode failure criteria. In each fracture toughness test, acoustic emission was measured to get the data for determining the load levels of different crack propagation patterns.

Key words : Fracture toughness, Disc-typed specimen, Mixed-mode, Fracture envelope

초 록 : 최근들어 발파, 수압파쇄, 암반사면 등의 암반공학 문제에서 암석파괴역학이 널리 적용되고 있다. 그러나 암석 고유의 특성으로서 파괴역학에서 가장 중요한 변수인 암석의 파괴인성 측정에 관한 방법은 아직 확립되지 못한 실정이다. 본 연구에서는 기존 파괴인성 측정법과 비교하여 많은 장점을 가지고 있는 CCNBD, SCB, CNSCB 및 BDT 등과 같은 디스크 형태의 시험편을 사용하여 Mode I 파괴인성을 측정하였다. 또한 CCNBD 시험편에 STCA법을 적용하여 혼합모드 및 Mode II 파괴인성을 측정하였다. 각 시험에서 시험편의 두께, 지름 및 노치길이 등과 같은 치수효과가 파괴인성에 미치는 영향을 조사하였다. 혼합모드 시험결과로부터 여러 회귀곡선을 적용하여 파괴포락선을 구하였고 시험결과를 혼합모드에서의 세 가지 파괴기준식과 비교하였다. 각 파괴인성 시험 시에 균열전파가 시작되는 하중수준을 정확히 파악하고 균열의 변형거동을 조사하기 위해 미소파괴음 측정을 병행하였다.

핵심어 : 파괴인성, 디스크 시험편, 혼합모드, 파괴포락선

1. 서 론

암석의 파괴는 미시적으로 암석 내부에 균열이 발생, 전파하는 파괴역학적 현상으로 규명할 수 있으므로 굴착, 발파, 파쇄 등의 작업과정을 효율적으로 수행하기 위한 기초연구로서 암석파괴역학을 이용한 연구가 중요하게 대두되고 있다. 파괴인성은 균열 개시와 전파에 대한 물질 고유의 상수로서 파괴역학에서 가장 중요한 변수 중의 하나이다. 그러나 암석에 대한 파괴인성 측정 및 파괴역학

적 연구는 비교적 최근에 연구되기 시작하여 현재까지 대부분의 연구들은 인장응력 상태 (Mode I)와 관련된 부분들을 주로 다루어 왔으며 암석내의 응력분포에서 흔히 나타나는 전단응력 상태 (Mode II) 혹은 전단응력과 인장응력이 혼재된 상태 (Mixed-mode)에서의 균열거동이나

1) 학생회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정
2) 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수
원고접수일 : 1999년 10월 18일
원고심사완료일 : 1999년 11월 13일

파괴인성의 측정에 관해서는 연구가 좀처럼 이루어지지 않았다.

현재까지 국제암반역학회에서는 파괴인성 측정에 관한 추천방법으로 CB, SR 및 CCNBD 시험편을 제안하였다 (Ouchterlony, 1988; Fowell, 1995). CB와 SR 시험편은 시험방법이 어려우며, 특히 CB 시험편의 경우 시험편의 길이가 20cm 이상이 되기 때문에 암석코어가 한정된 경우에 시험하기가 어렵다는 여러 문제점들이 제시되고 있다. 특히 두 시험편의 경우 혼합모드 시험이 불가능하다는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 디스크 형태의 시험편을 사용하는 파괴인성 시험법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며 그 결과로 1995년에 디스크 형태인 CCNBD 시험편이 국제암반역학회에 의해서 새로운 추천방법으로 제안되었다. 이외에도 SCB 시험편과 BDT 등의 디스크 형태의 시험편에 대해 연구가 진행 중이다. 이러한 디스크 형태의 시험편은 기존 CB와 SR 시험편과 비교하여 시험편의 크기가 작기 때문에 보다 많은 시험이 가능하며 하중방향에 대한 노치의 각도를 변화시켜 혼합모드 시험이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

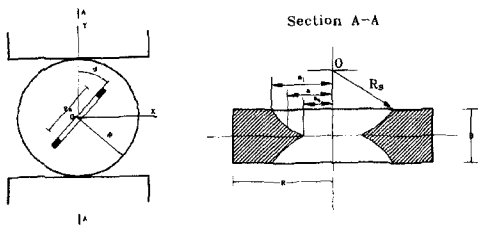
따라서 본 연구에서는 CCNBD, SCB, BDT 및 CNSCB 시험편을 이용하여 파괴인성을 측정하고 결과를 비교, 검토하였다. 또한 STCA법을 적용한 CCNBD 시험편을 통해 혼합모드 및 전단모드에서의 파괴인성을 측정하였다.

2. 파괴인성 측정방법

2.1. CCNBD 시험

CCNBD 시험편은 Brazilian 디스크 내에 세브론 노치를 성형한 시험편 (Fig. 1)으로 1980년대 중반부터 연구가 활발히 진행되었다.

Shetty et al.(1985, 1986, 1987)은 STCA법에 의해 CSTBD의 응력확대계수 해를 CCNBD 시험편에 적용하



D = Diameter of specimen, R = Radius of specimen, B = Thickness of specimen
a₀ = Initial chevron notched crack length, a₁ = Final chevron notched crack length

Fig. 1. CCNBD specimen geometry

Table 1. Standard geometrical dimensions of CCNBD specimen

Description	Values	Dimensionless expression
D (mm)	75.0	
B (mm)	30.0	$\alpha_B = B/R = 0.80$
a ₀ (mm)	9.89	$\alpha_0 = a_0/R = 0.2637$
a ₁ (mm)	24.37	$\alpha_1 = a_1/R = 0.65$
D _s (mm)	52.0	$\alpha_s = D_s/D = 0.6933$
h _c (mm)	16.95	
Y* _{min} (dimensionless)	0.84	
Notch width (mm)	≤ 1.5	
a _m (mm)	19.31	$\alpha_m = a_m/R = 0.5149$

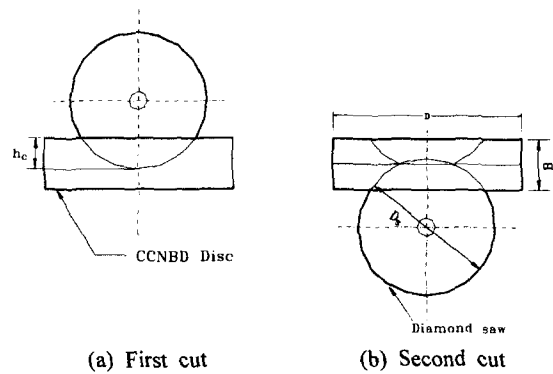


Fig. 2. Cutting Procedure of CCNBD specimen

여 세라믹의 파괴인성을 측정하였다. 그 후 국제암반역학회에서는 다른 방법에 비해 많은 장점을 가지고 있는 CCNBD 시험편을 Mode I 파괴인성 측정방법으로 제안하였다 (Fowell, 1995). 그러나 이 방법에는 혼합모드 및 Mode II 파괴인성을 측정하기 위한 해가 제시되어 있지 않다. 국제암반역학회에 의해 제안된 표준 CCNBD 시험편의 기준은 Table 1과 같다.

세브론 노치는 Fig. 2와 같이 시험편 표면으로부터 원하는 절단깊이 h_c까지 수직방향으로 회전톱을 내려 절단한 후 시험편을 고정기구와 함께 180° 회전시켜 동일한 절단깊이로 2차 절단하여 성형한다. 이때 절단깊이는 h_c는 시험편과 노치의 형상에 의해 좌우되는 함수로 표현된다.

국제암반역학회 제안법에 의해서 mode I 파괴인성은 다음처럼 계산된다.

$$K_{ic} = \frac{P_{\max}}{B\sqrt{D}} Y^*_{\min} \quad (1)$$

위 식에서 Y'_{min} 은 시험편에 대한 임계 무차원 응력확대계수이고 시험편의 치수 $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_b$ 에 의해서만 결정되고 다음 식에 의해 계산된다.

$$Y^*_{min} = ue^{u\alpha_1} \quad (2)$$

여기서 u, v 는 α_0, α_b 에 의해서만 결정되는 상수로 이에 대한 해가 국제암반역학회 제안법에 제시되어 있다. 주어진 α_0, α_b 에 해당하는 값이 없는 경우에는 그 값들을 구하기 위해 내삽법을 이용해야 한다. 본 연구에서는 선형내삽으로부터 얻은 결과와 Quadratic interpolation, Newton's interpolation polynomial과 Lagrange interpolation 등에 의한 u, v 값을 비교한 결과 큰 차이를 보이지 않아 선형내삽으로 구한 u, v 값을 사용하였다.

그러나 국제암반역학회 추천방법에 의해서 Mode I 파괴인성만을 측정할 수 있기 때문에 본 연구에서는 혼합모드 및 Mode II 파괴인성을 측정하기 위하여 STCA법을 적용하였다.

직선형 관통노치(Straight through notch)의 길이가 2a인 CSTBD 시험편에 대한 응력확대계수의 수치해는 다음과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$K_I = \frac{P}{\pi RB} (\pi a)^{1/2} N_I \quad (3)$$

$$K_{II} = \frac{P}{\pi RB} (\pi a)^{1/2} N_{II} \quad (4)$$

여기서 P는 가해진 하중이고, a는 노치길이의 1/2, N_I 와 N_{II} 는 무차원 노치길이에 대한 a/R 과 α 에 좌우되는 무차원 응력확대계수이다.

STCA를 CCNBD 시험편에 적용하면, 즉 세브론 노치의 형상을 나타내는 항을 나타내기 위하여 식 (3)과 (4)에서 B를 $B \times (a - a_0) / (a_1 - a_0)$ 로 바꾸면 다음과 같은 CCNBD 시험편에 대한 식 (5)와 (6)을 얻을 수 있다. 이때 균열면은 균열길이가 a_0 에서 a_1 까지 증가함에 따라 0에서 B까지 선형적으로 증가한다고 가정된다.

$$K_I = \frac{P}{(\pi R)^{1/2} B} \alpha^{1/2} N_I \left(\frac{\alpha_1 - \alpha_0}{\alpha - \alpha_0} \right)^{1/2} \quad (5)$$

$$K_{II} = \frac{P}{(\pi R)^{1/2} B} \alpha^{1/2} N_{II} \left(\frac{\alpha_1 - \alpha_0}{\alpha - \alpha_0} \right)^{1/2} \quad (6)$$

Fig. 3은 STCA법을 적용한 예이다. 이때 세브론 노치의 형상은 실험에서 사용될 것과 유사하게 $\alpha_0 = 0.2349$,

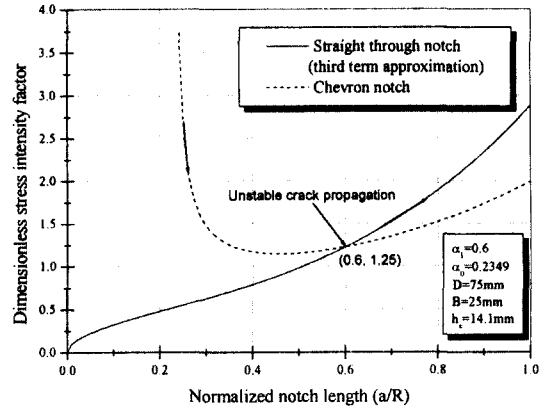


Fig. 3. Dimensionless stress intensity factors for straight-through and chevron notches in CCNBD specimen

$\alpha_1 = 0.6$ 으로 가정하였다. 세브론 노치에 대한 응력확대계수는 균열길이가 증가함에 따라 감소한다. 세브론 노치점단에서 개시된 균열이 노치의 기저 ($\alpha = \alpha_1$)까지 안정하게 성장하기 위해서는 하중이 증가해야 한다. 이 균열길이 ($\alpha = \alpha_1$)에서 그 이상의 균열성장을 위해서는 하중의 감소가 필요하기 때문에 균열은 불안정하게 되고 결국 직선형 관통노치 곡선을 따라가게 된다. 따라서 본 연구에서 사용된 CCNBD 시험편에 대하여 최대하중에 해당하는 불안정한 균열성장이 시작되는 균열길이 α_1 과 그때의 무차원 응력확대계수를 최대하중과 함께 파괴인성을 계산하기 위하여 사용하였다.

본 연구에서는 Atkinson et al.(1982)과 Fowell & Xu(1993)이 제안한 CSTBD 시험편에 대한 N_I, N_{II} 의 수치해를 적용하였다. 여기서 Atkinson 등의 해는 5차항 근사법(fifth term approximation), 3차항 근사법(third term approximation)과 소균열 근사법(small crack approximation)의 세 종류가 있으며 파괴인성 계산 시에 모두 적용하였다. Mode II 시험을 위한 노치각도는 $N_I = 0$ 일때의 해를 수치적으로 계산하였다.

위와 같은 이론에 근거하여 본 연구에서는 mode I 파괴인성에 대해 국제암반역학회 추천방법에 의한 결과와 STCA를 사용한 결과를 비교하였고 STCA에 의해 혼합모드 및 Mode II 파괴인성을 계산하였다.

2.2. SCB 시험

SCB 시험편은 Chong & Kuruppu(1984)에 의해 제안된 것으로 암석, 콘크리트, 세라믹들과 같은 재료는 인장

에 약하기 때문에 인장파괴가 야기되는 압축하중으로 시험을 하는 것이 유리하는 점에 근거하여 3점굴곡 하에서 단일노치를 가진 반원형(semi-circular) 시험편을 제안하였다 (Fig. 4).

SCB 시험편은 CCNBD 시험편과 마찬가지로 하중방향에 대해 일정각도를 이루도록 노치를 성형하면 혼합모드 및 Mode II 파괴인성을 구할 수 있다. Lim et al. (1994(a), 1994(b))은 혼합모드의 파괴인성을 측정하기 위한 여러 방법들 중에서 SCB 시험편과 CCNBD가 시험 결과의 신뢰성, 시험의 용이도 등에서 가장 우수하다고 하였다. 또한 Lim et al.(1993)은 노치각도 및 길이와 하중스팬에 따라 달라지는 여러 조건에서의 무차원 응력확대계수 값들을 제시하였다. 이외에도 Chong et al.(1987)은 무차원 균열길이가 $0.25 \leq a/D \leq 0.35$ 이고 $s/D = 0.8$ 인 경우에 대해 응력확대계수를 무차원 균열길이의 3차 다항

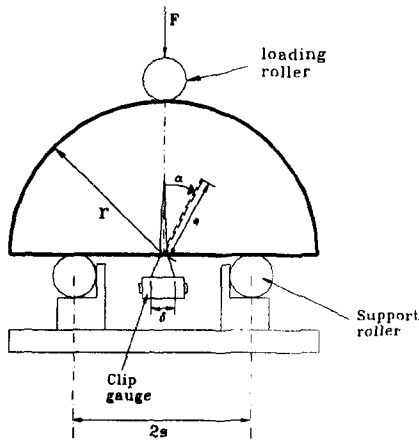


Fig. 4. Semi-circular bend (SCB) test specimen

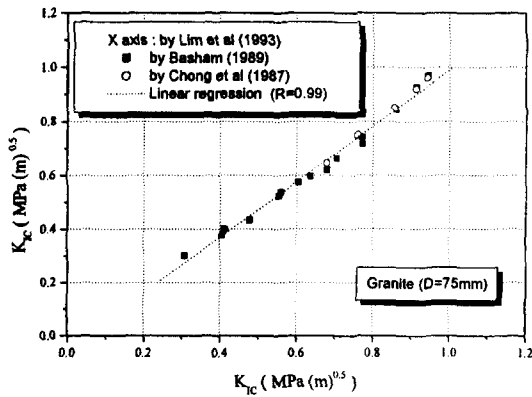


Fig. 5. Relationship of SCB results calculated by various equations

식으로 제시하였고 Basham et al.(1989)은 Mode I에 대해 응력확대계수를 무차원 균열길이의 5차 다항식으로 간단히 표현하였다. 본 연구에서는 파괴인성 계산 시에 언급한 모든 해를 적용하였으며 각 해를 적용하여 계산한 결과 $s/D = 0.8$ 이고 지름이 75 mm인 거창화강암의 Mode I 파괴인성 결과의 상관관계는 Fig. 5와 같이 상관계수가 0.99로 거의 일치함을 알 수 있었다. 파괴인성은 최대하중, 시험편의 형상과 하중스팬에 의해 계산된다.

2.3. CNSCB 시험

Kuruppu(1997)는 CNSCB 시험편에 대해 균열첨단 응력확대계수를 균열길이의 함수로 얻기 위해 3차원 유한요소 해석을 실시하였다. 그는 응력확대계수를 다음처럼 무차원화하였다.

$$K_{nd} = \frac{K_I}{P} t \sqrt{R} \quad (7)$$

여기서 K_{nd} 는 무차원응력확대계수, P는 하중, t는 시험편의 두께, R은 시험편의 반지름이다.

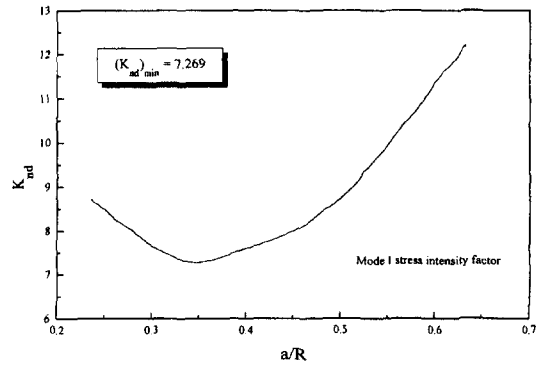


Fig. 6. Mode I stress intensity factor for the chevron-notched SCB specimen

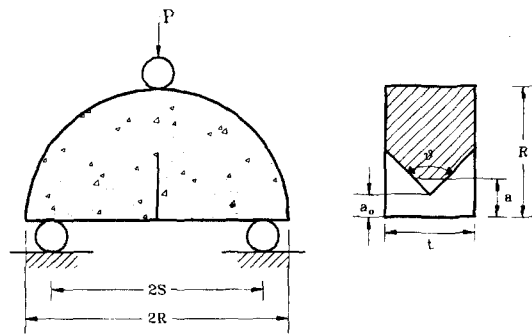


Fig. 7. Chevron notched SCB test specimen

응력확대계수는 다른 셰브론노치 시험편의 경우처럼 최소값을 갖는다. 하중이 증가하는 동안 셰브론노치에서의 초기균열은 안정하게 성장하고 최대하중 이후에 갑작스럽게 파괴가 된다. 따라서 최대하중을 임계 파괴하중으로 사용하였고 파괴인성을 결정하기 위하여 파괴하중과 Fig. 6의 응력확대계수의 최소값을 사용하였다.

시험편의 형태는 Fig. 7과 같고 $\theta = 90^\circ$, $s/R = 0.8$ 그리고 $a_0/R = 0.2$ 가 되도록 해야 한다. 셰브론노치는 높은 응력집중으로 인해 자연균열을 형성한다.

2.4. BDT 시험

Guo et al.(1993)은 간접인장강도 측정에 사용되는 압열인장 시험편을 파괴인성 측정에 적용하였다. 특징으로는 디스크 시험편 (Fig.8)에 균열이나 노치를 낼 필요가 없고 직경방향의 균열이 재하하는 동안 야기되어 시험편의 파괴가 발생한다는 점을 들 수 있다.

수직응력 $\sigma(x)$ 에 놓여있는 무한평판 내의 길이 $2c$ 의 내부균열에 대한 Mode I 응력확대계수는 다음처럼 간단하게 표현할 수 있다.

$$K_I = B P \Phi(c/R) \tag{8}$$

여기서 B와 $\Phi(c/R)$ 은 다음처럼 정의된다.

$$B = \frac{2}{\pi^{3/2} R^{1/2} t \alpha} \tag{9}$$

$$\Phi\left(\frac{c}{R}\right) = \left(\frac{c}{R}\right)^{1/2} \int_0^{c/R} \left[\phi(r/R) \left(\frac{c^2 - r^2}{R^2 - r^2}\right)^{1/2} \right] d\left(\frac{r}{R}\right) \tag{10}$$

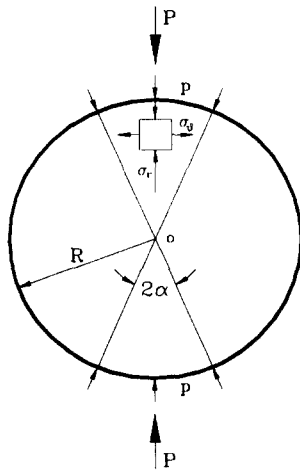


Fig. 8. Disc with diametral compression and basic notation ($p = P/\pi R t \alpha$)

$$\text{여기서 } \phi(r/R) = \frac{(1-(r/R)^2 \sin 2\alpha)}{1-2(r/R)^2 \cos 2\alpha + (r/R)^4} \tan^{-1} \left[\frac{1+(r/R)^2 \tan \alpha}{1-(r/R)^2} \right]$$

이고 R과 t(두께)의 단위는 mm, α 의 단위는 radian이다.

위 식에서 α 가 정의되면 $\Phi(c/R)$ 은 균열첨단의 위치(또는 균열길이)에 따라 달라진다. $\Phi(c/R)$ 는 무차원 응력확대계수이고 B는 주어진 시험편형상과 하중조건에 따른 상수이다. 식 (8)에서 K_I 를 파괴인성 K_{Ic} 로 바꾸고 정리하면 균열(c/R)을 형성하는 임계하중을 다음처럼 예측할 수 있다.

$$P_c = \frac{K_{Ic}}{B \Phi(c/R)} \tag{11}$$

압열인장시험에 대한 국제압반역학회의 추천법에 의하면 시험편과 압축판과의 접촉각도가 10° 가 되도록 하고 있다. 본 실험에서 국제압반역학회의 추천법에 근거하였기 때문에 $\alpha = 5^\circ$ 가 되고 이때의 $\Phi_{max}(c/R)$ 은 0.112가 된다. $\Phi_{max}(c/R)$ 는 불안정한 균열전파에서 안정한 균열전파가 시작될 때의 무차원 응력확대계수로 이에 해당하는 하중의 국부적인 최소값 P_{min} 을 실험에서 결정하면 파괴인성을 계산할 수 있다. BDT 시험편에 대한 전형적인 시험결과는 Fig. 9와 같은데 불안정한 균열전파가 진행되는 ab와 안정한 균열전파가 시작되는 bc의 경계에서 P_{min} 을 결정하게 된다. 시험편의 치수를 식 (9)에 대입하여 얻은 B값, α 가 5° 일 경우 0.112값을 가지는 $\Phi_{max}(c/R)$ 과 실험에서 구한 P_{min} 을 식 (11)에 대입하면 파괴인성을 계산할 수 있다. 본 연구에서는 P_{min} 을 명확하게 식별할 수 있는 bc단계의 초기에서 대부분의 시험을 종료하였다.

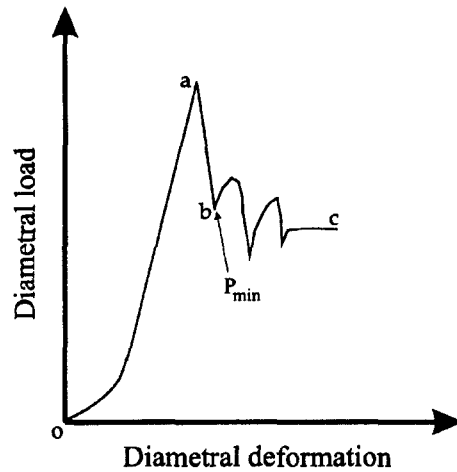


Fig. 9. Typical failure curve for BDT specimen

2.5. CB 시험

국제암반역학회 추천법에는 최대하중 만을 기록하는 Level I 시험과 암석의 비선형성을 보정하는 Level II 시험이 있으나 본 연구에서는 다른 시험편 결과에 대한 비교대상으로 Level I 시험만을 수행하였다.

3. 시험편 제작 및 시험장치

본 연구에서는 거창화강암과 여산대리석을 대상시료로 사용하였으며 대리석의 경우에는 이방성의 영향을 최소화하기 위해 divider 형식으로 노치를 성형하였다.

CCNBD 시험편의 경우에는 지름이 75 mm와 54 mm인 시료를 사용하였으며 시험편의 두께는 15 ~ 35 mm 범위로 하여 두께에 따른 치수효과를 확인하였다. 본 연구에서는 노치 성형을 위해 지름이 50 mm인 톱날을 사용하였는데 타당한 결과를 얻기 위한 시험편의 치수조건에 의해 실험가능한 시험편의 두께가 15 ~ 35 mm 이었다.

SCB 시험편은 지름이 75 mm와 100 mm인 시료를 사용하였으며 CCNBD 시험편의 경우와 마찬가지로 두께를 15 ~ 40 mm 범위로 하여 두께에 따른 치수효과를 확인하였다.

CNSCB 시험편은 지름이 75 mm, 두께는 23 ~ 32 mm 정도이고 BDT 시험편은 간접인장시험에 사용되는 압연인장시험편과 동일한 형태로 성형하였다.

혼합모드 및 Mode II 파괴인성 측정을 위한 CCNBD와 SCB 시험편은 Mode I 응력확대계수가 0일때의 노치 각도를 secant method 등의 수치적 방법으로 계산하여 Mode II에 해당하는 각도를 결정한 뒤 혼합모드와 Mode II 파괴인성 측정이 가능하도록 하중방향과 노치가 이루는 각도를 조절하였다.

CCNBD 시험편을 성형할 때 국제암반역학회에서 제시된 시험편 조건을 만족시키고 노치두께를 1 mm 정도로 하기 위하여 외경이 50 mm이고 두께가 0.8 mm인 톱날을 장착한 절단장치를 제작하였다. 또한 세브론노치를 정밀하게 성형하기 위해서는 절단깊이를 정확하게 조절해야 하므로 절단장치에 정밀도가 1/100 mm인 다이얼게이지를 부착하여 절단깊이를 확인할 수 있도록 하였다.

시험기는 미국 MTS의 재료시험기와 일본 Shimadzu사의 200톤 만능재료시험기를 사용하였다. SCB 시험편, CNSCB 시험편 및 CB 시험편을 실험하는 경우에는 3점 굴곡 하중을 가해야 하므로 직접인장시험 및 굴곡시험에 사용되는 MTS 810 system에 지름이 15 mm인 상, 하부

로올러를 장착하여 시험을 수행하였다. SCB 시험편의 경우 하중스팬 s/R은 0.8로 일정하게 하였다. 대부분의 시험은 MTS를 이용하여 변위계어로 수행하였으며 변위속도는 0.01 mm/sec로 하였다. 파괴하중 만을 측정하는 CCNBD 시험편의 일부를 200톤 만능재료시험기에서 시험하는 경우에는 100ton 용량의 로드셀과 LVDT를 미국 Instrument Division사의 System 5000 변형률 측정장치를 통하여 디지털 신호로 전환한 후 컴퓨터에 저장하였다.

4. Mode I 파괴인성 측정결과

4.1. CCNBD 시험

Fig. 10은 지름이 대략 75 mm인 화강암과 대리석에 대해 CCNBD 시험편을 사용하여 구한 Mode I 파괴인성의 결과이다. 본 연구에서 사용한 두께의 범위에서 파괴인성에 대한 두께의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 화강암에 비해 대리석의 경우가 편차가 다소 크지만 화강암과 유사한 경향을 보였다. 대리석의 경우 두께가 15 mm보다 작은 경우가 15 mm 이상인 경우보다 파괴인성이 다소 크게 나타나는데 이것은 두께가 줄어들면 파괴

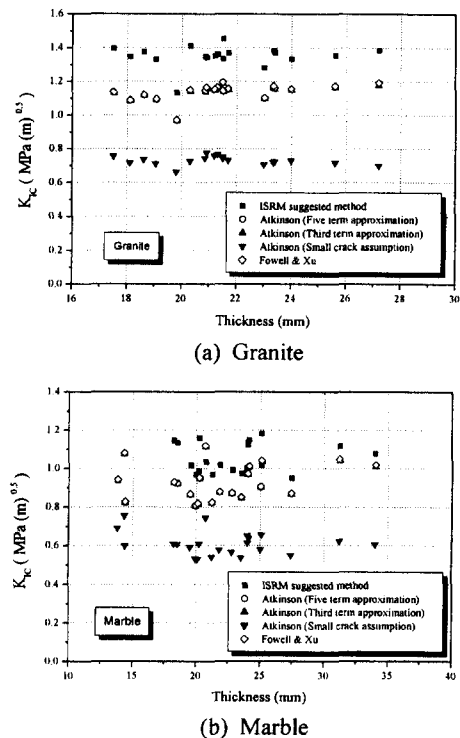


Fig. 10. Effect of thickness on mode I fracture toughness (CCNBD, $D \approx 75$ mm)

인성이 다소 크게 산출된다는 다른 연구자들의 결과와 유사하다. 따라서 지름이 75 mm인 시험편을 사용하는 경우에는 두께가 15 mm 이상이면 타당한 결과를 얻을 수 있는 것으로 보인다.

일반적으로 암석 시험편의 두께는 FPZ (Fracture Propagation Zone) 의 너비보다 작아야 하고 암석 시험편에 대해 타당한 파괴인성 값을 얻기 위해서 다음과 같은 조건을 만족해야 한다고 알려져 있다(Whittaker et al., 1992).

$$a, W-a \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_t} \right)^2$$

$$B \geq r_{mc} = \frac{27}{32\pi} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_t} \right)^2 = 0.269 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_t} \right)^2 \quad (12)$$

여기서 a는 균열길이, W-a는 균열이 전파하지 않은 시험편 길이, B는 시험편 두께, σ_t 는 인장강도, r_{mc} 는 FPZ의 임계 최대크기이다.

그러나 많은 연구자들에 의해서 식 (12)의 상수 2.5는 대부분의 암석에 보수적인 것으로 나타났고 시험편 크기 요구조건의 상수를 식 (13)과 같이 2.0으로 수정할 것을 제안하였다(Whittaker et al., 1992).

$$a, W-a \geq 2.0 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_t} \right)^2 \quad (13)$$

위의 두 식에 의해 본 연구에서 사용한 시험편의 두께와 균열길이 등을 조사해보면 식 (12)에 의한 최소두께는 화강암은 5.1 mm, 대리석의 경우는 4.9 mm로 본 연구에서 사용한 시험편의 두께는 모두 이 조건을 만족하고 식 (13)에 의한 최소 균열길이는 화강암은 38.0 mm, 대리석은 36.6 mm 이다. 이를 무차원 균열길이로 환산해보면 화강암과 대리석에 대해 각각 0.51, 0.49로 역시 조건을 만족하는 것으로 나타났다. 식 (12)에 의한 최소두께는 FPZ의 너비를 뜻하는 것으로 위의 계산에 의하면 화강암의 FPZ가 대리석보다 다소 크다는 것을 유추할 수 있다.

Fig. 11은 화강암의 파괴인성에 대한 노치길이와 형상의 영향으로 시험편의 반지름 R로 무차원화하였고 α_1 - α_0 는 세브론노치의 무차원 길이이다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 파괴인성에 대한 노치길이의 영향은 본 실험에서 사용된 시험편 형상에 대해서는 크지 않다는 것을 알 수 있다. 대리석의 경우에도 화강암의 경우보다 편차가 다소 컸으나 유사한 경향을 보였다. α_1 과 α_0 도 파괴인성 결과에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

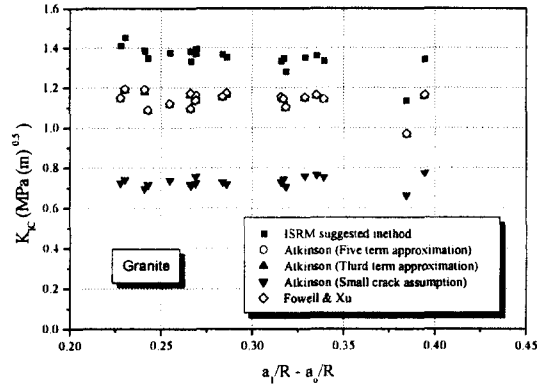


Fig. 11. Effect of α_1 - α_0 on mode I fracture toughness (CCNBD, D=75 mm)

각 그림에서 볼 수 있듯이 STCA법을 적용하여 얻은 결과들이 국제암반역학회 추천법에 의한 결과보다 작게 산출되었음을 알 수 있다. 그 중 소균열 근사법(small crack approximation)을 적용하는 경우에 매우 큰 차이를 보였다. 이것은 무차원 균열길이 a/R이 0.3이하인 경우에 사용하는 식으로서 계산식이 매우 간단하여 많이 적용되고 있으나 본 연구에서 사용한 무차원 노치길이(a/R)가 대략 0.5에서 0.6사이에 있다는 것을 고려하면 타당하지 못한 것으로 생각된다. 소균열 근사법을 제외한 나머지 STCA법에 의한 결과와 국제암반역학회 추천법의 결과는 대략 15%정도의 차이를 보이며 이는 CSTBD의 응력확대계수 식을 CCNBD로 근사하여 발생한 오차로 판단된다. Atkinson의 3차항 및 5차항 근사법과 Fowell & Xu의 식에 의한 결과는 Atkinson의 3차항 근사법이 매우 단순함에도 불구하고 거의 일치하였다.

국제암반역학회 추천법에서는 지름이 75 mm인 시험편을 추천하고 있으나 일반적으로 NX규격을 많이 사용하기 때문에 지름이 대략 54 mm인 CCNBD 시험편을 성형하여 시험하였다. 연구에서 사용한 톱날의 지름은 50 mm이므로 54 mm 시험편을 사용하는 경우에는 α_1 (α_1/R)이 0.8정도로 노치길이가 길게 얻어진다.

지름이 75 mm인 시험편들의 결과와 마찬가지로 두께와 노치길이 및 형상의 영향은 크지 않다는 것을 알 수 있었다. 그러나 앞의 결과와는 달리 ISRM 추천법에 의한 결과와 STCA법을 사용한 결과가 상당히 비슷하게 나타났다(Fig. 12). 이는 α_1 이 0.8정도가 되어야 STCA법에 의한 결과가 정확해진다는 것을 의미한다기 보다는 STCA법에 적용한 CSTBD 시험편의 응력확대계수 해를

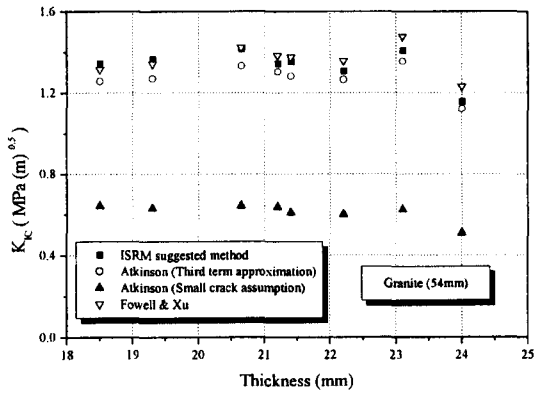


Fig. 12. Effect of thickness on mode I fracture toughness (CCNBD, D=54 mm)

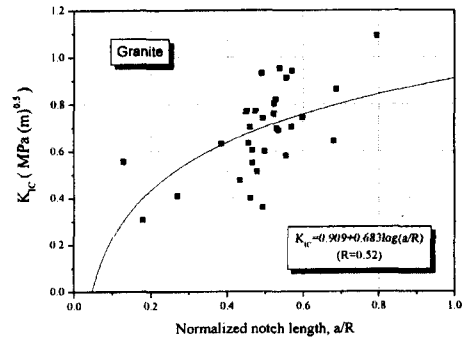
이 균열길이가 커질수록 오차가 커지는 것으로 각 논문에서 제시되었는데 이로 인한 결과로 보인다. 지름이 54mm인 경우 Atkinson의 5차항 근사법은 α_1 이 0.6이상으로 적용할 수 없다.

4.2. SCB 시험

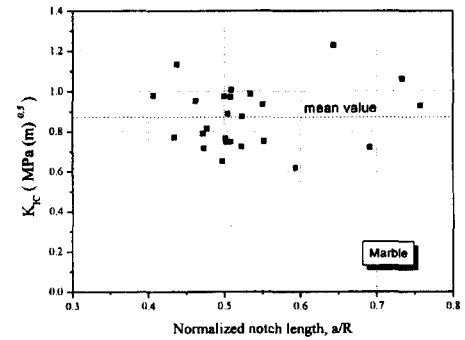
SCB 시험편에 의해 구한 Mode I 파괴인성 결과는 Fig. 13과 같이 무차원 노치길이에 대해 일정한 값을 가지지 못하고 편차가 매우 크며 CCNBD 시험편의 결과와 비교하여 볼 때 매우 작은 값으로 산출되었다.

이러한 이유는 선균열 성형(pre-cracking)을 수행하지 않았기 때문으로 보여진다. 그러나 Lim et al.(1994)등의 여러 연구자들은 선균열 성형을 수행하지 않고서도 다른 시험편을 사용한 결과들과 비슷한 결과를 얻었으며 암석에서 파괴하중으로 선균열 성형을 수행하기는 매우 어려우며 단조하중 하에서 선균열 성형을 하는 경우에도 일반적으로 암석은 하중이 파괴하중의 85 ~ 95%에 이를 때까지 균열성장이 발생하지 않기 때문에 매우 어렵다. 이러한 이유들로 인하여 본 연구에서는 선균열 성형을 수행하지 않았다.

선균열 성형을 하지 않은 경우에는 노치주위에 연약면이 존재하고 선균열 성형을 하게되면 균열면에 균열을 닫히게 하는 닫힘응력(closure stress)이 존재하게 된다. 또한 인공노치보다 선균열 성형을 하여 얻은 자연균열은 입자를 관통하여 파괴가 일어나므로 더 많은 에너지가 필요하게 된다. 이러한 이유로 인해 선균열 성형을 하지 않은 경우에 선균열 성형을 한 경우보다 파괴하중이 작게 얻어져 본 연구에서와 같이 결과적으로 파괴인성 측정값들이



(a) Granite



(b) Marble

Fig. 13. Mode I fracture toughness values vs. normalized notch length curve from SCB tests

작게 나온 것으로 보인다.

그런데 화강암에 비해서 대리석의 결과는 편차가 매우 크긴 하지만 CCNBD 시험편의 결과와 다소 비슷하게 나온 이유는 암석의 구조적인 측면에서 볼 때 위에서 설명한 것처럼 균열이 입자를 관통할 때 필요한 에너지의 정도로 판단된다. 대리석은 화강암에 비해서 결정구조가 덜 치밀하며 연암이기 때문에 균열이 전파할 때 에너지가 덜 필요하기 때문인 것으로 보인다. 선균열 성형을 수행하지 않고서도 타당한 결과를 얻었던 Lim et al.(1994)의 연구에서도 비교적 연암인 이암, 오일셰일이나 콘크리트와 같은 재료를 사용했던 것으로 보아 위 해석이 타당한 것으로 보인다. 따라서 SCB 시험편을 사용할 경우에 타당한 파괴인성 결과를 얻기 위해서는 특히 경암인 경우 반드시 선균열 성형을 수행해야 할 것이다.

4.3. CNSCB 시험

CNSCB 시험편의 결과는 CCNBD 시험편의 결과보다 다소 크게 산출되었지만 평균값의 상대오차는 화강암의 경우가 3.1%, 대리석의 경우가 5.0%로 유사한 결과를 산

출하는 것으로 보인다. 따라서 세브론노치가 아닌 직선형 노치를 가진 SCB 시험편과 비교하여 볼 때 세브론노치가 암석의 파괴인성을 측정하는 데 있어서 매우 유용함을 알 수 있다.

V형태의 세브론노치를 사용하는 경우에는 균열이 전파함에 따라 균열앞면의 길이가 점차적으로 증가하고 추가적인 균열전파를 위해서는 하중이 증가되어야 한다. 이러한 이유로 인하여 안정한 균열전파가 일어나고 시험하는 동안 자연적으로 선균열이 발생된다. 또한 세브론노치를 사용하여 시험하는 경우에는 균열길이의 측정이나 변위 측정 또는 복잡한 계산방법 등이 필요하지 않고 단지 파괴 하중만을 기록하면 된다는 장점이 있다.

이러한 이유로 인하여 앞에서 논의한 바와 같이 암석에서 선균열 성형을 수행하는 것이 어렵다는 것을 고려하면 타당한 파괴인성 값을 얻기 위해서 세브론노치를 사용하는 것이 필수적이라고 생각된다.

4.4. BDT 시험

실험으로부터 얻은 BDT 시험편의 전형적인 하중-변위 곡선은 Fig. 14와 같다.

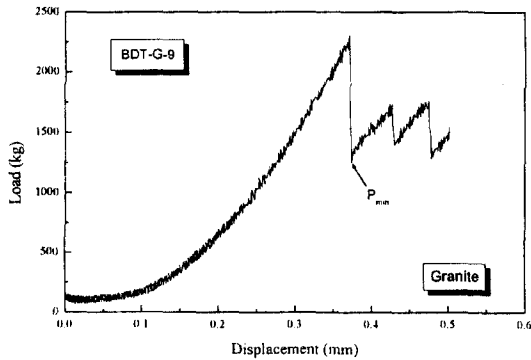


Fig. 14. Typical load vs. displacement curve from BDT test

BDT 시험편에 의해 측정된 Mode I 파괴인성은 화강암의 경우 $1.2894\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, 대리석은 $0.9865\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 의 평균값을 가지는 것으로 나타났다. 국제암반역학회의 CCNBD 시험편에 의한 결과와 비교하여 볼 때 파괴인성이 다소 작게 측정되고 편차가 다소 크지만 시험이 간단하고 시험 전에 균열이나 노치를 만들 필요가 없으므로 노치에 의한 불확실성을 피할 수 있다는 점을 고려하면 시험이 단순함에도 불구하고 Mode I 파괴인성 측정을 위한 좋은 방법이 될 수 있는 것으로 판단된다.

이상의 Mode I 파괴인성 측정 결과를 정리하면 Table 2와 같다. 지름 75 mm인 CCNBD 시험편의 결과가 CNSCB 시험편의 결과를 제외하고 표준편차가 가장 작게 나타났다. CNSCB 시험편은 단지 5회 시험을 하였기 때문에 반복에 따른 시험결과의 신뢰성을 확인하기 위하여 추가시험이 필요한 것으로 보인다.

4.5. CB 시험과 CCNBD 시험의 비교

화강암, 편마암, 화강편마암 등의 5종의 암석코어에 대해 CB 시험편과 국제암반역학회 추천법에 의해 계산된 지름 54 mm의 CCNBD 시험편으로 파괴인성을 측정하고 그 결과를 비교한 결과 상관계수가 0.97로 상관관계가 매우 좋은 것으로 나타났다. 1개의 시료를 제외하고는 CCNBD 시험편의 결과가 약 10%정도 크게 얻어졌다.

또한 본 연구에서는 파괴인성과 기타 암석의 물리적, 역학적 성질들과의 관계를 조사하였다. 파괴인성 측정이 다소 어렵고 비용이 많이 소모되기 때문에 여러 연구자들 (Whittaker et al., 1992)은 암석의 물리적, 역학적 성질들과의 관계를 유도하여 파괴인성 또는 암석의 파괴거동을 예측하고자 하였다.

본 연구에서는 암석코어가 CB 및 CCNBD 시험과 기타 암석시험을 수행하기에 부족하였기 때문에 CB 시험편을 시험한 후에 반으로 쪼개진 암석을 성형하여 SR시험

Table 2. Summary of mode I fracture toughness values

	Granite			Marble		
	Mean ¹	S.D. ²	Number	Mean ¹	S.D. ²	Number
CCNBD(D≅75mm)	1.3509	0.0634	19	1.0605	0.0785	19
CCNBD(D≅54mm)	1.3376	0.0815	8	1.1815	0.1134	9
SCB	0.6836	0.1874	31	0.8711	0.1536	27
CNSCB	1.3932	0.0274	5	1.1133	0.0367	5
BDT	1.2894	0.1545	9	0.9865	0.1586	10

¹($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$), ²Standard deviation

Table 3. Relationship between some physico-mechanical properties and fracture toughness of rock

Physico-mechanical properties of rock	Correlation coefficient (R)
Specific gravity	0.51
Porosity	-0.60
P wave velocity	0.80
S wave velocity	0.66
Uniaxial compressive strength	0.55
Young's modulus	0.21
Poisson's ratio	-0.16

을 하기도 한다는 점에 착안하여 CB 시험을 수행한 후에 이를 단축시료로 성형하여 사용하였다. 또한 본 연구의 주된 암종인 거창화강암과 여산대리석의 결과도 해석에 포함하였다. 시험결과를 정리하면 Table 3과 같다.

Table 3에서 알 수 있듯이 파괴인성과 탄성과 속도, 특히 P파속도와 가장 좋은 상관관계를 보이는데 이는 파괴인성과 P파속도의 상관계수가 0.90으로 얻어진 다른 연구자의 결과(Whittaker et al., 1992)와 일치한다. 일반적으로 탄성과속도는 암석의 광물조직, 밀도, 공극율, 특히 파쇄정도와 깊은 관련이 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 탄성과속도가 기타 물리적, 역학적 특성에 비해서 파괴에 대한 암석의 저항도를 보다 잘 나타낼 수 있는 것으로 보인다.

5. 혼합모드 및 Mode II 파괴인성 측정결과

혼합모드 및 Mode II 파괴인성은 STCA법을 적용한 CCNBD 시험편과 SCB 시험편에 의해 측정하였다. 그러나 SCB 시험편의 결과들은 Mode I 파괴인성 결과와 마찬가지로 좋지 못한 결과가 얻어져 해석에서 제외하였다. 파괴인성은 Atkinson의 5차항 근사법으로 계산된 결과를 사용하였다.

Mode II 파괴인성은 3장에서 설명한 바와 같이 CCNBD 시험편의 Mode I 응력확대계수가 0일때의 노치각도를 secant method 등의 수치적 방법으로 계산하여

Mode II에 해당하는 각도를 결정한 뒤 계산된 노치각도가 시험시에 하중방향에 대해 정확히 유지되도록 주의하여 측정하였다. 화강암과 대리석 모두 Mode II 파괴인성을 3회 측정하였으며 그 평균값이 Table. 4에 제시되어 있다. 혼합모드 파괴인성은 시험편의 형상에 대한 Mode II 노치각도를 계산한 뒤 0°에서 Mode II 각도 사이의 각도를 선택하여 기록한 뒤 측정하였다.

실험결과를 혼합모드에서의 세 가지 파괴기준인 G_{max} (최대 에너지개방율 이론), σ_{max} (최대응력이론) 및 S_{min} (최소 변형률에너지밀도 이론)들과 비교하였다. 그 결과 Fig. 15에서처럼 실험결과들은 세 가지 파괴기준에 의해

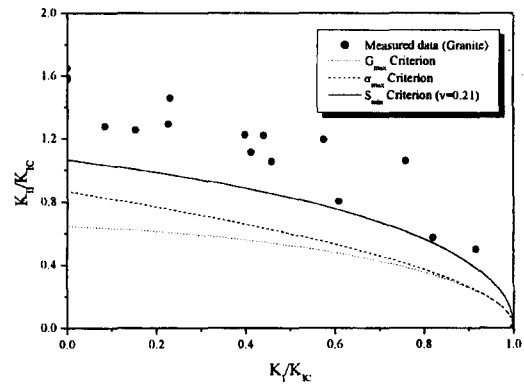


Fig. 15. Comparison between experiment results and three mixed mode criteria (Granite)

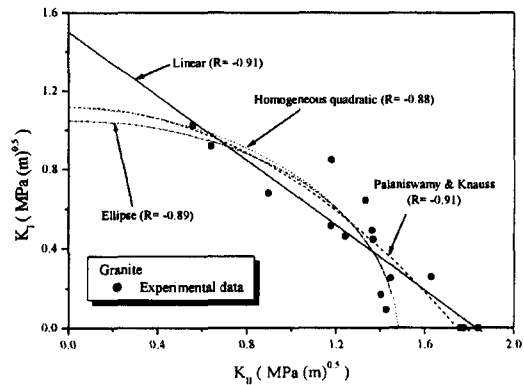


Fig. 16. K_I vs. K_{II} empirical regression curves (Granite)

Table 4. Comparison of K_{IIc}/K_{Ic} ratios by experiment, three mixed mode criteria and an empirical regression curve

Rock type	K_{IIc}/K_{Ic}	Experimental results	G_{max}	σ_{max}	S_{min}	Empirical regression Curve
Granite		1.6028	0.627	0.866	1.043	1.562
Marble		1.8574	0.627	0.866	0.935	1.986

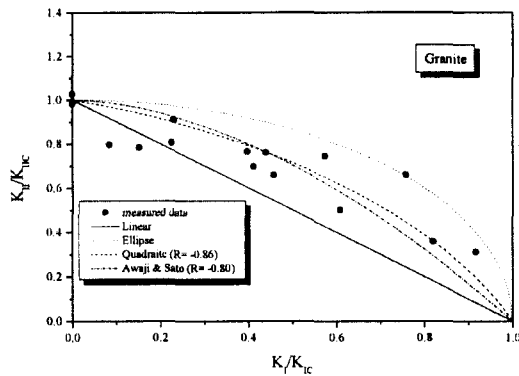


Fig. 17. K_I/K_{IC} vs. K_{II}/K_{IC} empirical regression curves (Granite)

예측되는 값들보다 크게 얻어졌다. 세 가지 파괴기준 중 S_{min} 이 실험결과에 가장 가까웠으며 이는 Ingraffea(1981)의 결과와 일치한다. 또한 S_{min} 은 재료의 특성(포아송비)을 고려한다는 장점을 가지고 있다. 따라서 암석의 파괴 및 균열전파 등에 대한 수치해석시 혼합모드 파괴기준으로 S_{min} 을 사용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

몇몇 연구자들은 혼합모드 측정결과로부터 파괴포락선(fracture envelope)을 구하기 위한 여러 경험적인 회귀곡선들을 제안하였다(Whittaker et al., 1992; Awaji & Sato, 1978). 곡선의 x축과 y축은 사용되는 회귀곡선에 따라 K_I-K_{II} (Fig. 16) 또는 $K_I/K_{IC}-K_{II}/K_{IC}$ (Fig. 17)로 나타낼 수 있다. 상관계수는 화강암의 경우 -0.80 ~ -0.91, 대리석의 경우 -0.63 ~ -0.70으로 회귀곡선에 따른 상관계수의 차이는 그다지 크지 않았다. 이상의 결과로부터 시험대상 재료와 시험목적에 따라 적절한 경험적인 회귀곡선을 선택하여 적용하여도 큰 차이가 없을 것으로 판단된다. 대리석의 결과는 시험결과의 편차가 다소 커서 상관계수가 화강암보다 좋지 못하였다.

본 연구에서 얻어진 시험결과와 세 가지 파괴기준 및 경험적인 회귀곡선(Palaniswamy & Knauss, 1978)으로부터 예측한 Mode II 파괴인성과 Mode I 파괴인성의 비(K_{II}/K_{IC})를 비교한 결과는 Table 4와 같다. 여기서 Palaniswamy & Knauss가 제안한 경험적인 회귀곡선은 식 (14)과 같으며 상수 C는 회귀분석으로부터 결정되는 값으로 K_{II}/K_{IC} 로 정의된다. 즉, 혼합모드 파괴인성 측정결과를 Palaniswamy & Knauss가 제안한 식에 대입하여 회귀분석으로부터 상수 C를 결정하게 된다.

$$\frac{K_I}{K_{IC}} + \left(\frac{K_{II}}{CK_{IC}}\right)^2 = 1 \quad (14)$$

여기서 C는 K_{II}/K_{IC} 로 회귀분석으로 결정되는 상수이다.

시험결과로부터 계산된 K_{II}/K_{IC} 는 세 가지 파괴기준에 의해 예측된 값과 다소 차이는 보이지만 경험적인 회귀곡선으로부터 예측된 값과는 비슷한 경향을 보인다. 따라서 Mode II 파괴인성을 측정하기 어려운 경우 혼합모드 시험결과를 Palaniswamy & Knauss가 제안한 회귀곡선에 적용하여 Mode II 파괴인성과 Mode I 파괴인성의 비율을 예측할 수 있을 것으로 보인다.

6. 결 론

본 연구결과를 구체적으로 기술하면 다음과 같다.

1) 본 연구에서 사용된 Mode I 파괴인성 시험방법 중 CCNBD 시험편이 다른 방법과 비교하여 편차가 작고 연구에서 사용된 시험편의 형상과 크기에 대해 노치형상, 두께 및 지름의 영향이 없는 것으로 나타나 효과적인 Mode I 파괴인성 시험방법으로 생각된다. 국제암반역학회의 CCNBD 추천법과 STCA법을 적용한 결과의 상대오차는 대략 15%의 차이를 보였다.

2) SCB 시험에 의해 얻어진 Mode I 파괴인성은 편차가 크고 무차원 노치길이에 대해 일정한 경향을 보이지 않았다. 이는 선균열 성형을 수행하지 않은 결과에 의한 것으로 판단되며 특히 경암인 경우에는 반드시 선균열 성형을 수행해야 할 것으로 보인다. 그러나 암석의 선균열 성형이 용이하지 않다는 점을 고려하면 세브론노치를 사용하는 것이 필수적일 것으로 생각된다.

3) CNSCB 시험과 BDT 시험에 의한 Mode I 파괴인성 결과는 CCNBD 시험편과 비교하여 유사한 값을 가지며 특히 BDT 시험결과는 편차가 다소 크게 나타났으나 시험이 간단하고 인공노치로 인한 불확실성을 피할 수 있다는 점에서 효과적인 Mode I 파괴인성 시험방법인 것으로 판단된다.

4) CB 시험편에 대한 Level I 시험결과와 CCNBD 시험편에 의한 결과는 상관계수가 0.97로 상관관계가 매우 우수하게 나타났다. 또한 파괴인성과 암석의 물리적, 역학적 특성들과의 상관관계를 조사한 결과 P파속도와 파괴인성과의 상관관계가 가장 우수하였다.

5) 혼합모드 및 Mode II 파괴인성 측정결과는 혼합모드의 세 가지 파괴기준보다 다소 크게 나타났다. 세 가지 파괴기준 중 S_{min} 이론이 실험결과에 가장 유사하였으며 재료의 특성을 반영한다는 장점을 가지고 있어 암석파괴

의 수치해석시 S_{min} 이론을 적용하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

6) 실험으로부터 구한 Mode II 파괴인성과 Mode I 파괴인성의 비율은 세 가지 파괴기준에 의해 예측한 값과 비교적 큰 차이를 보였으나 경험적인 회귀곡선에 의해 예측된 값과는 유사하였다. 따라서 Mode II 파괴인성을 측정하기 어려운 경우에는 회귀분석으로부터 얻은 비율로부터 예측하는 것이 가능한 것으로 보인다.

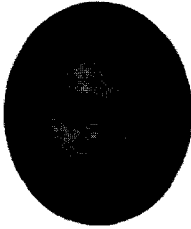
용어 설명

CB	: Chevron Bend
SR	: Short Rod
CCNBD	: Cracked Chevron Notched Brazilian Disc
SCB	: Semi-Circular Bend
BDT	: uncracked Brazilian Disc Test
CNSCB	: Chevron Notched Semi-Circular Bend
STCA	: Straight-Through Crack Assumption
CSTBD	: Cracked Straight Through Brazilian Disc

참고 문헌

- 김재동, 1988, 암석의 파괴인성 측정과 균열전파에 관한 연구, 서울대학교 공학박사 학위논문.
- Atkinson, C., Smelser, R.E. and Sanchez, J., 1982, Combined mode fracture via the cracked Brazilian disk test, *Int. J. Fracture*, 18, 4, 279~291.
- Awaji, H. & Sato, S., 1978, Combined mode fracture toughness measurement by the disk test, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 100, 175~182.
- Chong, K.P. & Kuruppu, M.D., 1984, New specimen for fracture toughness determination for rock and other materials, *Int. J. Fracture*, 26, R59~R62.
- Chong, K.P., Kuruppu, M.D. & Kuszmaul, J.S., 1987, Fracture toughness determination of layered materials, *Engineering Fracture Mechanics*, 28, 1, pp. 43~54.
- Fowell, R.J. & Xu, C., 1993, The cracked chevron notched Brazilian disc test - Geometrical consideration for practical rock fracture toughness measurement, *Int. J. Rock Mech. Sci. and Geomech. Abstr.*, 30, 7, 821~824.
- Fowell, R.J., 1995, Suggested method for determining mode I fracture toughness using cracked chevron notched Brazilian disk (CCNBD) specimen, *Int. J. Rock Mech. Sci. and Geomech. Abstr.*, 32, 1, 57~64.
- Guo, H., Aziz, N.I. & Schmidt, L.C., 1993, Rock fracture-toughness determination by the Brazilian test, *Engineering Geology*, 33, 177~188.
- Ingraffea, A.R., 1981, Mixed-mode fracture initiation in Indiana limestone and Westerly granite, *Proc. 22nd US Symp. Rock Mech.*, 199~204.
- Lim, I.L., Johnston, I.W. & Choi, S.K., 1993, Stress intensity factors for semi-circular specimens under three-point bending, *Engineering Fracture Mechanics*, 44, 3, 363~382.
- Lim, I.L., Johnston, I.W., Choi, S.K. & Boland, J.N., 1994, Fracture testing of a soft rock with semi-circular specimens under three-point bending. Part 1, 2., *Int. J. Rock Mech. Sci. and Geomech. Abstr.*, 31, 3, 185~212.
- Lim, I.L., Johnston, I.W. & Choi, S.K., 1994, Assessment of mixed-mode fracture toughness testing methods for rock, *Int. J. Rock Mech. Sci. and Geomech. Abstr.*, 31, 3, 265~272.
- Ouchterlony, F., 1988, Suggested method for determining the fracture toughness of rock, *Int. J. Rock Mech. Sci. and Geomech. Abstr.*, 25, 1, 71~96.
- Palaniswamy, K. & Knauss, W.G., 1978, On the problem of crack extension in brittle solids under general loading, *Mechanics Today*, 4, 87~148.
- Shetty, D.K., Rosenfield, A.R. & Duckworth, W.H., 1985, Fracture toughness of ceramics measured by a chevron-notch diametral-compression test, *J. Am. Ceram. Soc.*, 68, 12, C325~C327.
- Shetty, D.K., Rosenfield, A.R. & Duckworth, W.H., 1986, Mixed-mode fracture of ceramics in diametral compression, *J. Am. Ceram. Soc.*, 69, 6, 437~443.
- Shetty, D.K., Rosenfield, A.R. & Duckworth, W.H., 1987, Mixed-mode fracture in biaxial stress state : Application of the diametral-compression(Brazilian disk) test, *Engineering Fracture Mechanics*, 26, 6, 825~840.
- Whittaker, B.N., Singh, R.N. & Sun, G., 1992, *Rock Fracture Mechanics - Principles, Design and Applications*, Elsevier.

장 수 호



1996년 서울대학교 공과대학 자원공
학과, 공학사

1998년 서울대학교 대학원 자원공학
과, 공학석사

TEL : 02-880-7232

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

현재 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정

이 정 인



1963년 서울대학교 공과대학 자원
학과, 공학사

1965년 서울대학교 대학원 자원학
과, 공학석사

1974년 일본 동북대학 대학원 자원
공학과, 공학박사

TEL : 02-880-7221, 8708

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

현재 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 교수
