

## 미소 파괴음 빈도 측정에 의한 화강암의 파괴인성 평가에 관한 연구

신재근<sup>1)</sup> · 이상은<sup>2)</sup> · 임한욱<sup>3)</sup>

### A study on the estimation of fracture toughness of granite by acoustic emission

Jae-Keun Shin, Sang-Eun Lee and Han-Uk Lim

**ABSTRACT** : The fracture toughness can be measured by the two testing methods using chevron-notched specimen according to the ISRM Working Group of Commission of Testing Methods. They are chevron bend (CB) test and short rod (SR) test. In this study, the suggested methods (Level I tests) were conducted on the CB and SR specimens of Chuncheon granite. In addition, the J-integral analysis was combined with an acoustic emission technique to determine the fracture toughness. The results from two testing methods were analyzed in terms of the anisotropy and the acoustic emission characteristics.

**Key words** : fracture toughness, J-integral, acoustic emission, anisotropy

**초 록** : 국제 암반역학회에서는 암석의 파괴인성 시험법으로 CB 및 SR 2가지 시험법을 제안하였다. 본 연구에서는 춘천 화강암을 대상으로 CB와 SR 시편을 제작하고 Level I 시험 및 J-적분에 의한 파괴인성 평가를 실시하였으며, 아울러 AE 법을 이용하여 J-적분으로 해석하고 그 결과를 서로 비교하였다. 또한 각각의 초기균열 방향에 따라 파괴인성 결과를 비교하여 이방성의 영향을 검토하였으며, CB 및 SR 시편이 파괴될 때 나타나는 AE 신호의 특성도 고찰하였다.

**핵심어** : 파괴인성, J-적분법, 미소 파괴음 빈도법, 이방성

#### 1. 서 론

암반공학 분야에서 파괴역학은 수압파쇄, 천공, 발파, 터널 보링, 절단 등과 같은 파괴과정을 다루는 공학적인 문제에서 균열의 거동을 해석하는데 유용한 도구로서 주목되어 왔다.

대부분의 경우 파괴역학은 재료 내에 포함되는 미소 균열의 특성을 고려하는 학문분야로, 응력해석에 의하여 균열의 강도와 그 주변에 작용하고 있는 하중, 그리고 재료 내의 균열의 기하학적 배열 등의 관계를 정량적으로 다루는 것이다. 균열의 형성과 관련하여 Bieniawski<sup>1)</sup>, Ingraffea<sup>2)</sup> 등은 암석 내 균열의 성장 및 전파과정의 특성에 관한 연구 결과를 발표하였다.

그후 Halleck<sup>3)</sup>, Hoagland<sup>4)</sup> 등은 균열의 성장과 관련하여 파괴인성의 개념을 도입하였으며, 그들은 시편의 형상, 크기, 가압방법 등 변수들이 파괴인성에 미치는 영향과 그 측정 결과를 발표한 바 있다. 1988년에는 국제암반역학회(ISRM)에서 암석시편에 대한 파괴인성 측정을

위한 표준 시험법<sup>5)</sup>을 제안하여 그후 많은 연구가 진행되어 왔다.

암석의 파괴인성 평가를 위해 지금까지 Level I 및 Level II 시험법, J-적분을 이용하는 방법 등 몇 가지 방법들이 개발되어 있으나 적용 방법들의 차이에 따라 파괴인성의 차이를 보이는 것으로 알려져 있다. 국내의 경우 Level I 및 II 시험에 의해 암석의 파괴인성을 평가하는 방법, 균열감응도를 도입하여 초기균열의 길이를 정의하는 방법 등 몇몇 논문이 발표된 바 있으나 J-적분을 이용하여 파괴인성을 측정하는 방법은 아직 시도된 바 없다.

외국의 경우 Schmidt와 Lutz<sup>6)</sup>는 금속재료를 대상으로 J-적분을 이용하여 파괴인성 계수를 구하고 시편의

1) 정회원, (주) 바우 컨설턴트 지반/터널부

2) 정회원, 만영 엔지니어링 차장

3) 정회원, 강원대학교 지구시스템공학과 교수

원고 접수일 : 2000년 2월 14일

원고심사완료일 : 2000년 6월 2일

크기와 파괴인성 계수와의 관계를 제시하였다. 또한 Hashida<sup>8,9)</sup>는 암석재료에 대한 J-적분을 이용하여 파괴인성을 평가하고, 그 결과를 Level I 및 II의 결과와 비교하였다. 또한 균열성장 개시점을 정확하게 결정하기 위해 AE 모니터링을 실시하였다.

그러나 J-적분을 구하기 위해서는 정확한 균열성장 개시점을 결정하는 것이 중요하나, 암석의 경우 개구변위 (CMOD, crack mouth opening displacement)와 하중 곡선으로부터 결정한 균열 개시점은 신뢰도가 높은 결과를 얻기 어려운 것으로 알려져 있다.<sup>7)</sup> 따라서 AE 법을 이용하여 균열성장 및 이의 전파 등을 적절히 모니터링 할 수 있는 방법들이 다수 발표된 바 있다.<sup>8,9)</sup>

일반적으로 Level I 시험보다 Level II 시험 결과는 J-적분을 이용하여 파괴인성을 구한 결과와 거의 일치하는 것으로 보고되고 있다<sup>9)</sup>. 재료의 소성적인 특성을 포함하는 Level II 시험에 의한 파괴인성은 그 계산과정 및 방법이 복잡하기 때문에 많은 시간과 노력을 기울여야 한다. 그러나 J-적분을 이용하는 방법은 균열성장의 개시점과 하중-개구변위 곡선의 면적만을 사용하므로 비교적 쉽게 재료의 탄소성 특성을 파악할 수 있는 방법으로 생각된다. 뿐만 아니라 J-적분에 의한 방법은 다른 파괴인성 평가방법과는 달리 초기균열의 길이에 따라 파괴인성값의 변화를 보이지 않기 때문에 안정한 파괴인성 평가방법으로 알려져 있다.

본 연구에서는 국제암반역학회에서 추천한 규격의 CB(chevron bending) 및 SR (short rod) 시편을 제작하고, Level I과 J-적분값을 이용한 해석을 실시하였다. 또한 정확한 J-적분값을 구하기 위해 균열이 전파될 때 발생하는 AE 에너지로부터 균열 성장 개시점을 결정하였다. 그리고 위의 두 방법에 의해 파괴인성 계수를 구하고 그 결과를 비교하였으며, 특히 파괴인성 평가를 위해 AE 법이 적용 가능한 방법인지를 검토하기 위해 초기균열 방향에 따른 이방성 영향을 토대로 그 자료를 검증하였다. 이외에도 두 시편의 파괴과정을 이해하기 위해 AE 파라메타 분석을 실시하였다.

## 2. J-적분 이론

균열 첨단부에서 형성되는 소성영역의 크기가 균열의 크기에 비해 현저히 작은 항복조건에서는 응력확대계수 K가 선형 탄성적 개념으로 구조물의 해석에 용이하게 적용될 수 있다. 그러나 대부분의 재료는 탄소성체이므로

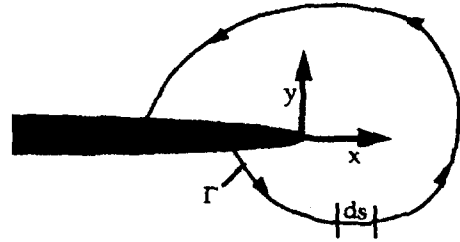


Fig. 1. Arbitrary contour around the tip of a crack

균열첨단에 소성영역이 쉽게 발생하게 된다. 이때 평면변형조건에서 파괴인성( $K_{IC}$ )을 적용하려면 시편의 두께가 충분해야 하는 단점이 있다.

위와 같은 단점을 보완하는 방법으로 Rice<sup>10)</sup>는 J-적분 (J)을 제안하였으며, 그 개념은 Fig. 1 및 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$J = \int_{\Gamma} \left( w dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right) \quad (1)$$

- Γ : 균열 첨단 주위에서 응력상태에 있는 면적을 둘러싸는 반시계 방향의 경로
- w : 단위 체적당 변형을 에너지
- $T_i$  : Γ곡선에 수직하게 바깥쪽을 향하는 응력 벡터 (traction vector)의 성분
- $u_i$  : 변위 벡터의 성분
- ds : Γ곡선에 따른 길이 증분

이와 같이 J-적분의 개념은 탄소성 재료에서 균열 첨단부의 응력과 변형률에 따라 식(1)과 같이 정의될 수 있다. 따라서 J-적분은 재료 내의 에너지 개방률과 응력 확대 변수<sup>11)</sup>로서 표현될 수 있다.

본 연구에서 사용된 J-적분과 파괴인성 K 값의 관계는 식(2) 및 (3)과 같이 표현된다<sup>10,12)</sup>.

$$J_{CB,SR} = \frac{2A}{\text{Ligament area}} \quad (2)$$

$$K_{CB,SR} = \sqrt{\frac{EJ_{CB,SR}}{(1-\nu^2)}} \quad (3)$$

여기서, A는 하중-개구변위 곡선에서의 면적이고, Ligament area는 초기균열을 형성하고 남은 부분의 면적이며, E와  $\nu$ 는 각각 탄성계수와 포아송 비이다.

### 3. 시편준비 및 실험장치

#### 3.1 시료 및 시편의 샘플링

본 연구에서 사용한 시료는 입도상 중립질에 속하는 강원도 춘천산 석재용 화강암이다. 실험실 물성 시험 결과는 코어링 한 2방향에 대해 각각 8번의 측정 결과를 평균한 값으로 Table 1과 같다. 시편의 제작은 동일한 암상에 대해 크기가 30 cm×30 cm×30 cm인 블록 형태의 암석을 대상으로 블록이 포함하고 있는 각 면에 대해 Fig. 2와 같이 주결(rift plane)과 나란한 방향으로 주 방향선(MOL, master orientation line)을 설정하였고, 나머지 면에 대해서도 이방성 검토를 위해 임의로 기준선(reference line)을 설정하였다.

한편 시편의 상·하 구분을 위해 기준선과 나란한 선을 긋고 코어링에 의한 시편의 회수 후에도 방향성을 유지할 수 있도록 하였다. CB나 SR 시편 모두 직경 54 mm인 NX 크기로, 주결에 수직인 방향, 즉 기준선과 평행한 방향으로 파괴가 이루어지도록 코어링을 실시하였다. 이때 이방성의 영향을 관찰하기 위해 Fig. 3과 같이 임의의 기준선에서 시제방향으로 각각 0°-150°까지 30° 간격으로 초기균열을 형성하였다. 그리고, 탄성과 속도와 파괴인성과의 관계를 관찰하기 위해 초기 균열을 형성하

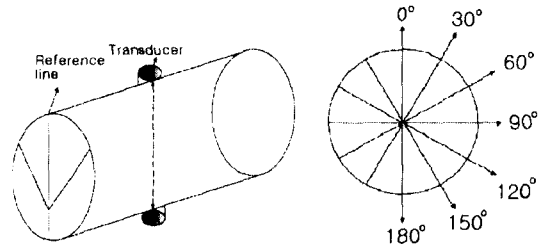


Fig. 3. Measurement of P-wave velocity of anisotropic specimen (0° : reference line direction)

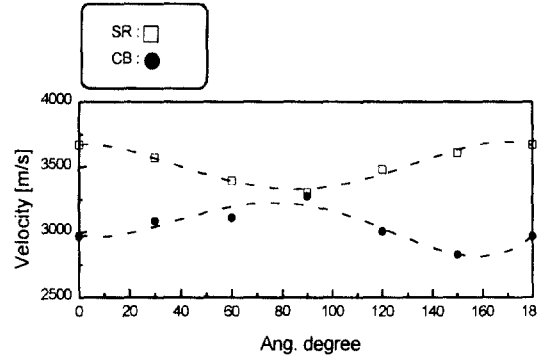


Fig. 4. The velocity anisotropy data for CB and SR specimens

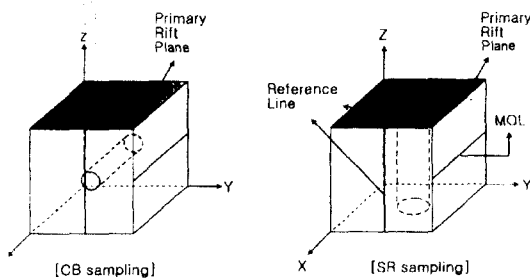


Fig. 2. Sampling for CB and SR specimens

Table 1. Physical properties of samples

Properties	Average value	
	XY plane	YZ plane
Specific gravity (gf/cm <sup>3</sup> )	2.59	2.59
Porosity (%)	1.38	1.38
Uni. compressive strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	1302	1084
Young's modulus (×10 <sup>5</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )	4.26	3.23
Poisson's ratio	0.30	0.26

기 전에 파괴 예정선을 따라 탄성과 종파의 전파속도를 측정하였으며 그 결과는 Fig. 4와 같다. 주결과 평행한 방향의 탄성과 속도는 3,640 m/sec 정도이고, 직각방향은 2,780 m/sec 이다. 이때 CB 시편은 탄성과 속도가 가장 빠른 수평(X축)방향으로, 그리고 SR 시편은 가장 느린 수직(Z축)방향으로 코어링 하였다.

제작된 CB 시편의 경우 기준선과 90°를 이루는 지점의 탄성과 속도는 대체로 3,270 m/sec로 가장 빠르며 0°가 아닌 150°에서 가장 느린 2,830 m/sec 정도로 나타났다. 그러나 SR 시편은 0°에서 3,670 m/sec 정도로 가장 빠르며 90°에서 3,300 m/sec 정도로 가장 느린 탄성과 속도의 변화를 보인다.

#### 3.2 시편의 제작 및 조건

본 연구에서는 국제암반역학회에서 제안한 CB 및 SR 시편과 동일한 치수로 시편을 제작하였다.<sup>5)</sup> 그 모식도는 각각 Fig. 5의 (a) 및 (b)와 같으며, 이때 초기균열의 사이각( $\theta$ )은 Fig. 5의 (a)와 같이 CB 시편의 경우 90°이고, SR 시편은 Fig. 5의 (b)와 같이 54.6°로 설정하였다. 파괴인성 실험에 사용된 CB 및 SR 시편의 수는 각

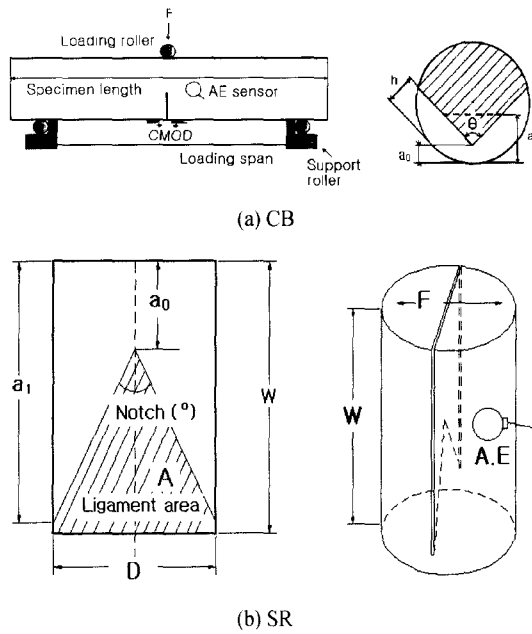
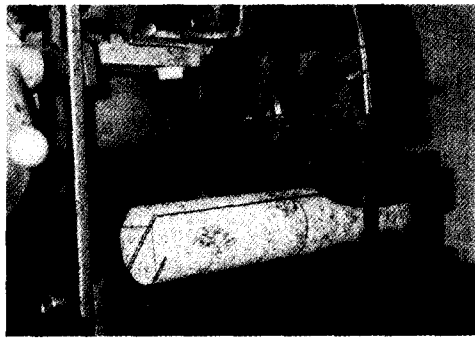
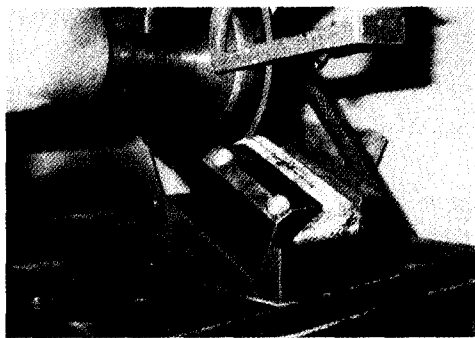


Fig. 5. Illustrations of (a)CB and (b)SR specimens, and their experimental set-ups



(a) CB



(b) SR

Fig. 6. The view of notch cutting guides for CB and SR specimens

각 60개(6방향×시편 10개)이며, 초기균열을 형성하기 위해 노치 성형 홀더와 커팅용 가이드를 제작하여 사용하였다(Fig. 6). 또한 시편 제작에 사용된 다이아몬드 톱의 두께는 0.5 mm를 사용하여 초기균열의 폭이 0.7 mm 이하가 되도록 성형하였다.

### 3.3 가압 장치 및 AE 계수 시스템

시험에 사용된 시험기는 13톤 정도의 용량을 가진 만능재료시험기 (United 사의 SFM 모델)를 이용하였다. 초기균열의 개구변위는 ±1 mm의 용량을 가진 LVDT를 사용하여 측정하였으며, 독일 HBM 사의 디지털 변형률 측정장비로써 자동 저장하였다. Level I 시험을 위한 하중속도는 시편이 10초 이내에 파괴가 되도록 하였고, AE 시험을 위한 하중속도는 0.1 mm/min로 실시하였다. AE 측정장비는 미국 PAC 사의 LOCAN-320을 사용하였으며, 미소 파괴음을 검출하기 위해 광대역 변환기 WD-A를 이용하였다. 주변잡음을 제거하고, 완전한 신호만을 얻기 위하여 예비실험을 실시한 결과 측정 주파수 범위는 100-600 KHz로 결정하였다. 또한 1개의 AE 사상계수(event)가 10-20개의 AE 계수(count)를 갖도록 PDT 50 μs, HDT 130 μs, HLT 180 μs, 그리고 임계 전압값(threshold)을 0.18 볼트로 설정하였다. 이때 임계 전압값은 Floating 방법을 사용하였는데, 이 방법은 각각의 사상 계수의 최대 진폭으로부터 임계 전압값을 설정한다.

## 4. 시험결과 및 해석

### 4.1 Level I 시험에 의한 해석

Level I 시험은 최대하중만을 측정하여 파괴인성을 평가하는 방법이다. Fig. 7은 초기균열의 방향에 따른 파괴인성계수의 분포를 나타낸 것이다. CB 시편에 대한 초기 균열 방향에 따른 파괴인성 값은 기준선으로부터 90°에서 1.03 MPa√m 로 가장 작은 값을 보이고 150°에서 1.17 MPa√m 로 가장 큰 값을 나타내고 있으며, 그 평균값은 1.129 MPa√m 이다. SR 시편에 대한 파괴인성 값은 0°에서 1.132 MPa√m 로 가장 작은 값을 나타내고, 90°에서 1.23 MPa√m 로 가장 큰 값을 보였다.

위 결과를 분석해보면 두 시편 모두 탄성과 속도와 반비례하는 경향을 보였다. 이와 같은 현상은 암석내의 미소 균열의 발달방향과 가압방향이 일치할 경우(short transverse) 파괴인성 값이 작아지는 결과를 보인다는

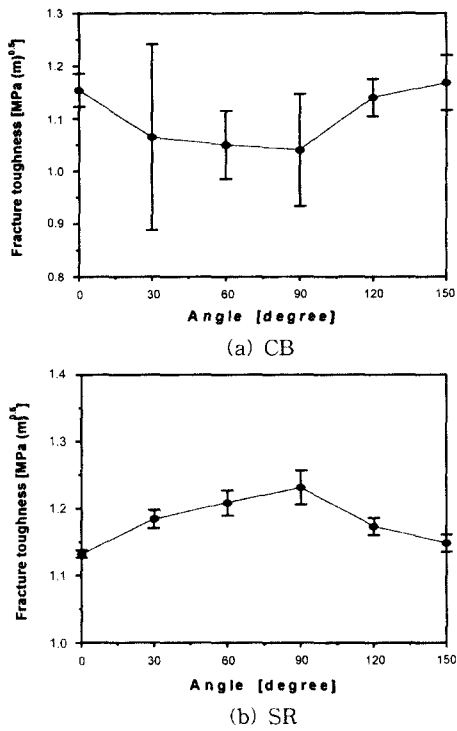


Fig. 7. The results of level I fracture toughness tests

Back<sup>13)</sup>의 결과와 잘 일치한다. 여기서 CB와 SR 시편의 파괴인성 값이 90°와 150° 등 서로 다른 방향에서 다르게 나타나는 것은 Fig. 4에서 설명한 바와 같이 서로 파괴방향이 주결에 수직한 방향으로 이루어지도록 하기 위해 샘플링 방향을 설정하였기 때문이다.

4.2 AE에 의한 해석

CB와 SR 시편에 의한 하중-개구변위 곡선과 AE 계수와의 관계를 나타내면 Fig. 8과 같다.

CB 시편의 경우 재하 초기에는 미소한 AE 신호가 검출되나, SR 시편은 CB 시편에 비해 많은 AE 신호가 발생하였다. CB 시편의 하중과 개구변위 사이의 관계는 비교적 선형적인 관계를 보이나, SR 시편은 CB 시편에 비해 보다 비선형적 특성을 보이고 있다.

또한 CB 시편의 AE 응답 특성은 파괴하중까지 많은 AE 발생을 관찰할 수 없지만 파괴하중의 70% 응력수준(약 110 kgf)에서 급격한 AE 발생을 관찰할 수 있다. 그러나 SR 시편은 파괴하중까지 CB 시편에 비해 많은 양의 AE 발생이 관찰되지만 육안으로 급격한 AE 발생 지점을 찾는 것은 명확하지 않고 완만하게 증가하는 경향

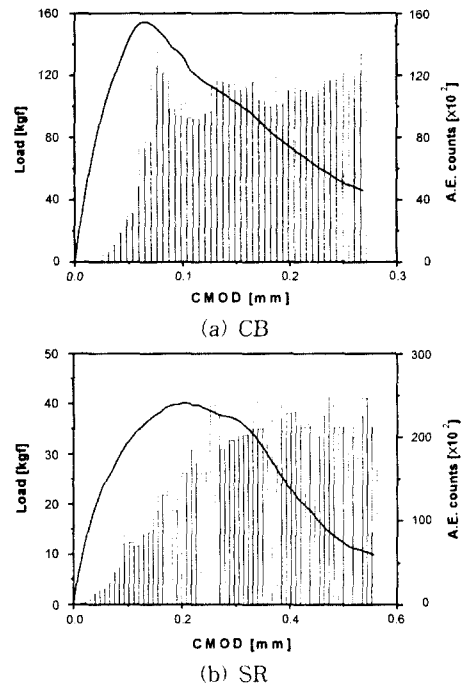


Fig. 8. The load and AE counts versus CMOD

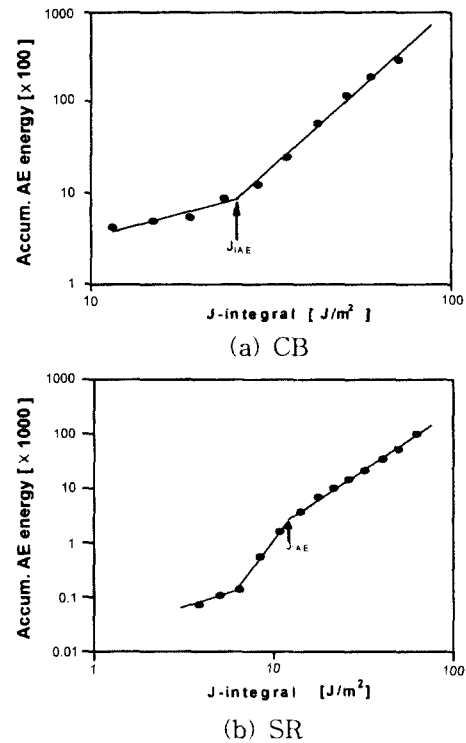


Fig. 9. Accumulative AE energy vs. J-integral

을 보였다. 이와 같은 현상은 소성변형을 보이는 금속의 파괴인성 실험 결과와 유사한 특징을 보인다<sup>14)</sup>. 이 결과로부터 두 시편의 하중-개구변위 관계와 AE 응답 특성이 차이를 보이는 것은 하중의 증가에 따라 초기균열 첨단부 주위에 분포하는 소성영역이 SR 시편에서 보다 크게 발달하기 때문으로 생각된다.

한편, J-적분을 이용하여 파괴인성을 구하기 위해서는 균열성장의 개시점을 정확히 결정해야 한다. Fig. 8의 하중과 개구변위 및 AE 응답과의 관계로부터 균열성장의 개시점을 결정하는 것은 비교적 주관적 경향에 따라 좌우되기 때문에 재료의 파괴인성을 정확히 평가하기란 어려울 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 J-적분값과 누적 AE 계수 및 에너지의 결과를 log-log 함수로 도시하였을 때 크게 변화되는 지점을 AE 법에 의한 파괴인성값  $J_{IAE}$ 로 결정하였다. 이때 변화하는 지점은 중회귀분석을 이용하였다.

Fig. 9는 대표적인 CB와 SR 시편의 AE 누적 에너지(accumulative AE energy)와 J-적분값의 관계를 나타낸 것이다. 이때 CB 시편은 2개의 직선으로, SR 시편은 3개의 직선으로 근사가 가능하였다. CB 시편의 경우

AE 누적 에너지의 급격한 증가점으로서  $J_{IAE}$ 로 정의하는 것이 가능하였고, 이 결과로부터 결정된  $K_{IAE}$  값은 Fig. 10(a)와 같다.

그러나 SR 시편의 경우 첫 번째 직선구간은 초기균열 첨단의 미소파괴로 인한 AE 발생 특성으로 생각되며 파괴하중의 55% 정도에 해당한다. 두 번째 직선구간은 파괴하중의 70% 정도까지로 안정적으로 미소균열의 전파가 일어나는 구간으로 여겨진다. 세 번째 구간에서는 소성영역의 발달로 균열의 확장 및 전파 등이 활발히 발생하여 거시적인 균열성장이 일어나는 구간으로 판단된다. 따라서, 여기서는 두 번째 굴곡 지점을  $J_{IAE}$ 로 결정하였다. 이 결과는 Fig. 10(b)와 같다. 이와 같이 SR 시편은 CB 시편과는 다른 특징을 보이는데, 이는 SR 시편이 CB 시편에 비해 균열 첨단주위의 소성영역이 크기 때문이라고 판단되며 복합적층판의 파괴인성실험을 실시한 결과<sup>15)</sup>와 유사한 특징을 보이고 있다.

한편, 초기균열의 방향과 파괴인성과의 관계를 식(4)와 같이 이방성 지수로서 표현하였다.

$$\text{이방성 지수} = \left( \frac{\text{최대 파괴인성}}{\text{최소 파괴인성}} - 1 \right) \times 100 (\%) \quad (4)$$

Level I 해석에 의한 파괴인성의 최대값(CB : 150°, SR : 90°)과 최소값(CB : 90°, SR : 0°)의 차이, 즉 초기균열의 방향에 따른 이방성 지수는 CB 시편이 12% 정도, SR 시편이 8.7% 정도의 차이가 나타나는데 반해 AE를 이용한 파괴인성 결과는 CB 시편이 26%, SR 시편은 31%로 비교적 뚜렷이 나타났다. 즉 이방성 지수가 J-AE에 의한 해석이 크게 나타나므로 이방성을 나타내는데 보다 효과적인 방법이라고 할 수 있다. 이와 같은 현상은 개구변위와 하중곡선과의 면적을 이용하는 J-적분값을 이용하므로 재료의 소성 특성에 대한 값이 포함되어 있기 때문으로 생각되며, 또한 AE 법을 이용하는 균열 개시점이 이방성에 따라 다소 큰 차이를 보이기 때문으로 판단된다. 두 가지 방법에 의해 구한 파괴인성 결과를 요약하여 제시하면 Table 2와 같다.

Table 2와 같이 J-적분에 의한 파괴인성값은 Level I 시험 결과에 비해 전반적으로 약간 높은 값을 보이는데, 이 결과는 Level II 시험과 같이 재료의 소성특성이 포함되어 있기 때문으로 생각할 수 있다. 특히 이방성 특성을 규명할 때 재료의 탄성 특성만을 고려하는 Level I 시험에 비하여 탄소성 특성을 포함하는 J-적분을 이용하는 방법이 보다 효과적인 방법임을 입증하였다.

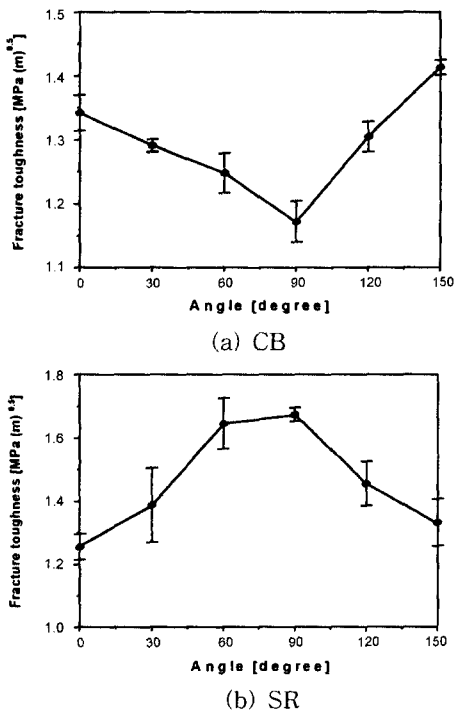
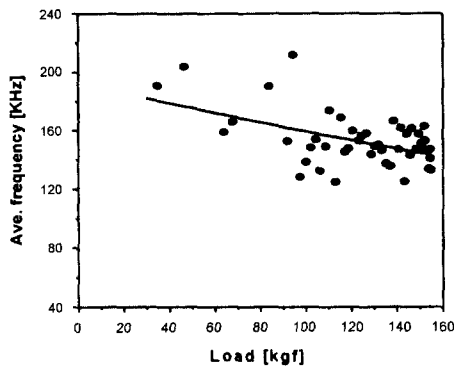


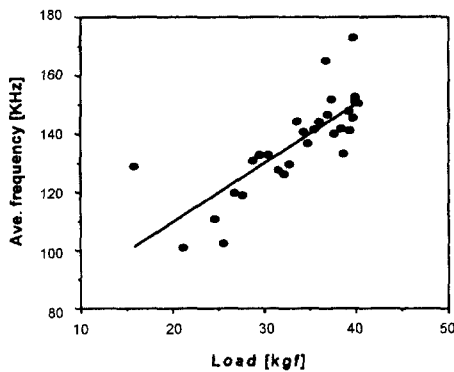
Fig. 10. The results of fracture toughness by AE method

Table 2. The summarized results of fracture toughness test  
Unit : MPa√m

Angle (degree)	Analysis Method	Level I test		J-integral/AE method	
		CB	SR	CB	SR
0		1.154	1.132	1.342	1.255
30		1.067	1.184	1.291	1.387
60		1.050	1.208	1.248	1.647
90		1.040	1.231	1.172	1.667
120		1.140	1.173	1.305	1.455
150		1.168	1.148	1.413	1.332
Ave. value		1.129	1.179	1.292	1.458



(a) CB

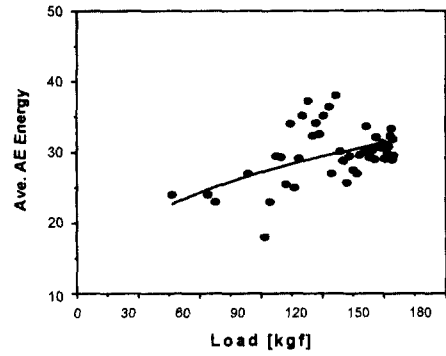


(b) SR

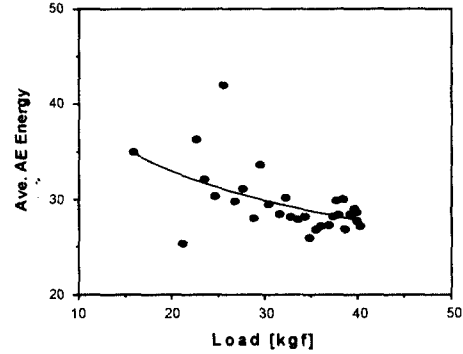
Fig. 11. Ave. frequency(KHz) vs. load(kgf)

### 4.3 AE 신호의 특성 고찰

AE 신호특성은 재료의 파괴기구와 서로 상관관계를 갖는 것으로 보고되고 있다<sup>16)</sup>. 일반적으로 금속의 경우 고강도, 이방성, 비균질 재료와 결합을 내포하는 취성재료일수록 진폭이 높고, 지속시간(duration time, 임계 전



(a) CB



(b) SR

Fig. 12. Load vs. ave. AE energy

압값을 넘는 AE 신호의 경과시간)과 상승시간(rise time, 임계 전압값을 넘는 순간부터 최대 진폭까지 걸리는 시간)이 짧은 돌발형 신호를 가지며, 반면에 연성재료일수록 진폭이 비교적 낮고, 지속시간이 긴 연속형 신호를 나타내는 것으로 알려져 있다. 그러나 암석은 구성 광물의 형태나 조직 등에 따라 그 변화가 다양하여 금속과 같이 그 신호 특성을 구별하기 어렵기 때문에 파괴 진행에 따른 AE 특성을 검토하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

하중의 증가에 따른 CB 및 SR 시편에 대한 AE 신호의 평균 주파수 변화는 Fig. 11에, 그리고 평균 AE 에너지의 관계는 Fig. 12에 제시되어 있다. CB 시편의 경우 재하 초기에는 미세 균열의 발달로 Fig. 12(a)와 같이 낮은 진폭을 갖는 신호가 발생되어 고주파수 대역을 보이고 있으나 하중이 증가할수록 큰 규모의 AE 신호가 검출됨에 따라 재하 초기에 비해 저주파수 대역을 보인다. 대체로 균열성장의 개시점인 파괴하중의 65% (102 kgf) 정도 이하에서는 160-220 KHz 범위의 주파수를 나타내며 65%이상에서는 120-170 KHz의 대역을

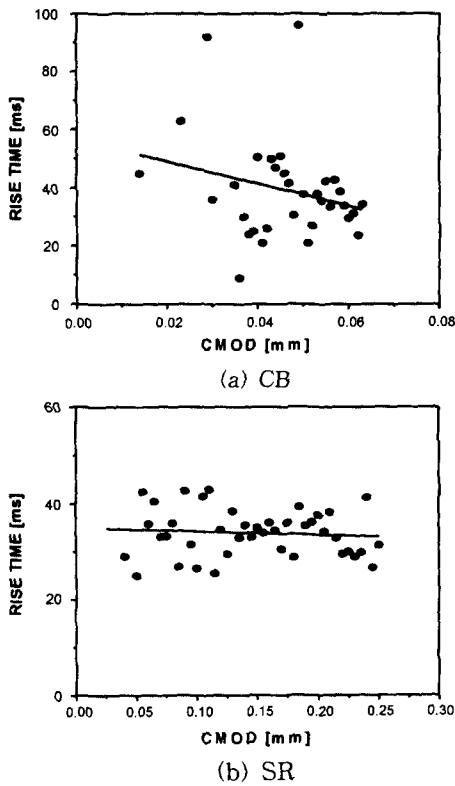


Fig. 13. Rise time vs. CMOD curve

보이고 있다. 이와 같은 현상은 하중이 증가함에 따라 진폭의 규모가 큰 즉, 에너지의 규모가 큰 신호가 방출되어 신호의 폭 또한 넓어지기 때문에 주파수가 상대적으로 낮은 것으로 생각된다. 이 결과는 Hardy<sup>17)</sup>의 결과와 비교적 일치한다.

반면, SR 시편의 주파수 분석결과는 균열성장 개시점인 파괴하중의 70% (28 kgf) 정도 이하의 하중수준에서는 100-120 KHz, 그 이후는 120-170 KHz 정도의 범위를 보이고 있다. 이 결과는 하중이 증가함에 따라 Fig. 12(b)와 같이 평균 AE 에너지가 감소하기 때문에 상대적으로 주파수가 높은 신호가 발생된 것으로 생각된다.

Fig. 13은 CB 및 SR 시편에 대한 상승시간(rise time)을 나타낸 것이다. CB 시편의 경우 파괴 하중에 가까워질수록 상승시간의 감소가 이루어지는데 반해 SR 시편은 그 변화폭이 거의 없음을 알 수 있다. 즉, CB 시편은 재하초기에는 SR 시편과 유사한 특성을 보이나 하중이 증가할수록 파괴 메커니즘의 변화가 일어남을 예측할 수 있다.

파괴 메커니즘을 고찰해 볼 때, CB 시편은 재하 초기

에는 미세균열의 발생이 주로 인장에 의해 발생되나, 하중이 증가할수록 균열의 결합 등에 의해 상대적으로 균열의 미끄러짐이 많이 발생하는 것으로 생각할 수 있으며<sup>16)</sup>, SR 시편은 파괴의 전과정에 걸쳐 인장 균열이 발생된 것으로 예상된다. 이 결과는 직접 및 간접 인장 시험의 결과로 인하여 그 파괴메커니즘이 서로 다르게 나타나는 것으로 추측할 수 있다. 또한 지속시간(duration time)도 상승시간과 유사한 현상을 나타냈다.

4.2절의 가압하중과 AE 에너지 및 계수와의 관계를 살펴보면, 하중-개구변위 곡선의 변화는 암석내 균열의 전파과정을 잘 표현하고 있다. 특히 비선형을 보이기 시작하는 단계에 이르면 거시적인 균열의 진전이 급속히 진행되는 것을 관찰할 수 있다. 이와같이 AE 법이 암석내 균열의 전파에 따른 미시적 변형을 고려하여 파괴인성값을 구하므로 대상 재료의 고유값으로 신뢰성과 안전성이 높은 값을 제공할 수 있을 것으로 생각된다. 뿐만 아니라 AE 법을 이용하는 균열개시점은 암석의 이방성 특성을 파악하는 주요 수단으로 이용될 수 있을 것이다.

한편, CB 및 SR 시편에 대한 AE 특성을 분석한 결과 서로 다른 현상을 보이고 있다. 이와 같은 현상은 광물입자의 크기 및 배열, 조성, 재하형태, 파괴형태 등 여러 요인이 있으나, 두 시편 내부의 소성영역의 발달상태와 밀접한 관련이 있을 것으로 생각된다. 추후 CB 및 SR 시편의 미소파괴 특성이나, 현미경 관찰 및 AE 파동 분석으로 파괴메커니즘을 규명하는 것이 요구된다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 춘천 화강암을 대상으로 CB 및 SR 시편을 제작한 다음, Level I 및 AE 측정에 의한 파괴인성 평가 실험을 실시하였다. 두 시편에 대한 파괴인성 및 AE 특성과 초기 균열의 방향에 따른 이방성 등을 비교·검토하였는데 그 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) Level I 및 J-적분을 이용한 파괴인성 평균값은 CB 시편이 각각 1.129 MPa $\sqrt{m}$ , 1.292 MPa $\sqrt{m}$ 이며, SR 시편은 1.179 MPa $\sqrt{m}$ , 1.458 MPa $\sqrt{m}$ 로 J-적분/AE 법에 의한 파괴인성 값이 큰 값을 보였다.
- 2) 초기균열의 방향 즉, 이방성에 따른 파괴인성 값의 평가 결과 최대값과 최소값의 차이는, Level I 해석에 비해 AE 측정에 의한 파괴인성 값이 보다 큰 차이를 보이고 있다.
- 3) 두 시편의 파괴과정에 따른 AE 특성을 비교한 결



과 CB 시편의 주파수는 파괴진행에 따라 점차 감소하는 반면에, SR 시편은 점차 증가하는 경향을 보였고, CB 시편의 지속 시간 및 상승시간은 하중이 증가할수록 점차 감소하였으며, SR 시편은 거의 변화가 없었다.

이상의 결과를 종합해 볼 때 암석의 파괴인성 평가를 위해 AE 법의 적용이 효과적임을 알 수 있었다.

### 참고 문헌

1. Bieniawski, Z. T., 1968, Mechanism of brittle fracture of rock Part 1, Theory of the fracture process, Int. J. Rock Mech. in. Sci., 5, 529-549.
2. Ingraffea, A. R., 1977, Discrete fracture propagation in rocks : Laboratory tests and finite element analysis, Ph. D these, Univ. of Colorado.
3. Halleck, P. and Kumnick, A. J., 1980, The influence of orientation on moduli in Berkeley granite, Proc. 21st U. S. Symp. on Rock Mech., 235-242.
4. Hoagland, R. G., Hahn, G. T. and Rosenfield, A. R., 1973, Influence of microstructure on fracture propagation in rock, Rock Mech., 5, 77-106.
5. ISRM Commission on Testing Method, 1988, Suggested Methods for Determining the Fracture Toughness of Rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sic. & Geomech. Abstr., 25, 71-96.
6. Schmidt R. A. and Lutz T. J., 1979,  $K_{IC}$  and  $J_{IC}$  of Westerly granite effects of thickness and in-plane dimensions, Fracture Mechanics Applied to Brittle Materials, 166-182
7. 김재동, 1989, 암석내 균열성장 개시점의 결정을 위한 실험적 연구, 강원대학교 산업기술연구소 논문집.
8. Hashida, T., 1993, Fracture Toughness Testing of Core-based Specimens by Acoustic Emission, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 30, 61-69.
9. Hashida, T. and Takahashi, H., 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, 47-60.
10. Rice, J. R., 1968, A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentrations by Notches and Cracks, J. Appl. Mech., 35, 379-386.
11. Anderson, T.L., 1995, Fracture Mechanics, Fundamentals and Applications, CRC Press, 117-130.
12. David B., 1986, Elementary Engineering Fracture Mechanics, 4th ed., Martinus Nijhoff Pub.
13. Baek, H., 1994, Evaluation of fracture mechanics properties and microstructural observations of rock fractures, Ph. D. Dissertation. Dept. of Civil engineering, The University of Texas at Austin, 200p.
14. 이상국, 오세규, 남기우, 1995, 음향방출법에 의한 탄소 섬유 복합 재료의 인장 및 파괴 인성시험시의 파괴 거동에 관한 연구, 비파괴검사학회지, 15, 1, 277-290
15. 박창수, 1994, AE를 이용한 복합적층판의 파괴인성 평가에 관한 연구, 충남대 석사학위 논문, 70p
16. 이상은, 1999, Acoustic Emission에 의한 岩石의 破壊源 位置 決定과 微小 破壞 메커니즘에 關한 研究, 강원대학교 공학박사학위논문.
17. Hardy, Jr., Rao, M. V. M. S., 1989, An evaluation of the amplitude distribution of AE activity in rock specimens stressed to failure, Proc. 30th US Rock Mech. Symp. Balkema, Rotterdam, 261-268

---

**신 재 근**



1998년 강원대학교 공과대학 자원공  
학과, 공학사  
2000년 강원대학교 공과대학 자원공  
학과, 공학석사

Tel : 02-3453-4077

E-mail : jkshin@bau.co.kr

현재 (주)바우 컨설턴트 지반/터널부

---

---

**이 상 은**



1991년 강원대학교 공과대학 자원공  
학과, 공학사  
1993년 강원대학교 대학원 자원공학  
과, 공학석사  
1999년 강원대학교 대학원 자원공학  
과, 공학박사

Tel : 011-366-9367

현재 만영엔지니어링 차장

---

---

**임 한 옥**



1966년 서울대학교 공과대학 자원공  
학과, 공학사  
1980년 서울대학교 대학원 자원공  
학과, 공학석사  
1985년 서울대학교 대학원 자원공  
학과, 공학박사

1996-1998년 강원대 공과대학원장 겸 산업대학원장

Tel : 0361-250-6253

E-mail : hulim@cc.kangwon.ac.kr

현재 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과 교수

---