

## 암석내 균열성장개시점의 결정을 위한 실험적 연구

김 재 동\*

### An experimental study on the determination of the crack initiation load level in rock

Jaedong Kim

---

#### ABSTRACT

In this study, 3-point bending test for the mode I state and 4-point shear test for the mode II state were adopted to verify the crack initiation load level through comparing the test results of the acoustic emission and the ASTM testing criteria, using Jecheon granite, as the rock sample.

The major result obtained in this study is that the crack initiation load levels obtained by using ASTM testing criteria and by measuring acoustic emissions showed analogous, roughly. However in case of demanding high safety, the crack initiation load level needs to be underestimated to the level that the crack begins to deform nonlinearly.

---

#### 1. 서 론

파괴역학은 1차세계대전 이후 교량, 철도레일, 금속구조물, 선박 등에서 돌발적이고 치

명적인 취성파괴현상이 빈번히 발생함에 따라 이러한 현상을 이해하고 방지하기 위하여 연구되기 시작한 분야로서, 특히 지난 25년간 금속 재료를 다루는 분야에서 많은 연구가 이루어져

---

\* 강원대학교 공과대학 자원공학과 전임강사

\* Full-time Lecturer, Dep't of Resources Engineering, Kangweon National University

왔다.

암석을 대상으로 한 파괴역학적 측면에서의 연구는 주로 지난 10여년전 부터 활발히 이루어지기 시작하여 석유, 가스, 기타 광물의 채굴이나 지열이용 등의 균열형성 기준의 재정립에 관한 문제, 암석 발파시 발생하는 응력과 균열 발생정도와의 관계, 갱도전단면 굴착기의 굴착성능을 판단하기 위한 기준의 설정에 관한 문제 등과 같은 공학적 응용분야에 있어서의 연구들과 함께 다양한 형태나 크기의 시험편에 대한 파괴인성의 측정과, 암석내에서의 균열 발생 및 전파 형태에 관한 연구에 주로 집중되고 있다.

Bieniawski<sup>1)</sup>, Ingraffea<sup>2)</sup> 등을 비롯한 여러연구자들은 암석내 균열의 성장 및 전파과정의 특성에 관한 연구결과를 발표하였고, Halleck<sup>3)</sup>, Hoagland<sup>4)</sup>, Ouchterlony<sup>5)</sup> 김재동등<sup>6)</sup> 은 파괴역학에서 중요하게 다루어지고 있는 물질상수인 파괴인성(fracture toughness) - 기준균열이 성장, 전파할때 나타나는 재료의 극한저항값, 혹은 새로운 균열의 형성시 필요한 파괴에너지량 -에 대해 시험편의 형상, 크기, 가압방법등의 변수들이 미치는 영향과 그 측정 결과를 발표한 바 있다. 그러나 현재까지도 암석에 대해서는 파괴인성의 측정을 위한 표준적인 시험법은 아직도 확립되어 있지 못한 상태이다.

암석의 파괴인성을 실험적으로 측정하기 위해서는 먼저 기존의 균열로부터 균열성장이 시작되는 하중수준을 정확히 파악하여야 하나 암석에 있어서는 현재까지 금속재료에 대한 기준에 준용하거나 또는 최대하중수준을 적용하는 등의 방법을 사용하고 있어 이에 대한 구체적인 연구가 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 암석의 파괴인성 측정을 위해 필요한 시험조건 및 자료해석방법에 관한 연구의 일환으로, mode I 및 mode II 상태하에서 균열 전파시에 발생하는 미소파괴음의 발생빈도(Acoustic E-

mission)를 측정함으로써 균열전파가 시작되는 순간의 하중수준을 규명해 보고자 하였다.

## 2. 암석시료, 실험장치 및 방법

본 연구에서는 현재 국내에서 석재용으로 산출되는 화강암을 시료로 하여 인장응력(mode I) 및 면내전단응력(mode II) 하에서 균열의 전파가 시작되는 하중수준을 파악하기 위하여 각각 삼점굴곡 시험과 사점전단시험을 실시하여 미소파괴음의 발생빈도를 측정 분석하였다.

### 2-1. 암석시료

시험 대상 암석으로는 충북 제원군에서 산출되는 제천화강암을 채택하였다. 본 실험에 앞서 암석시료의 기본적인 물리적 성질을 조사하기 위하여 진비중 및 겉보기비중 측정, 쇼어(shore) 경도측정, 탄성파(종파 횡파)속도 측정등의 비파괴 시험과 암석코어(core) 시험편에 대해 단축압축시험, 압열인장시험, 삼축압축시험 등의 파괴시험을 실시하여 단축압축강도, 탄성계수, 프와송비, 전단강도, 내부마찰각, 인장강도 등을 구하였다. Table 1은 암석시료에 대한 물리적 기본성질의 측정치이다.

### 2-2. 실험장치 및 방법

#### 2-2-1 삼점굴곡시험(3-point bending test)

본 시험은 ASTM E 399의 시험규정<sup>7)</sup>에 제시되어 있는 방법으로 현재까지 mode I에서 암석의 파괴인성측정을 위해 가장 많이 시도되고 있는 방법이다. 시험편의 형상 및 하중점의 배치는 fig.1과 같으며, 이때 시험편의 두께 B는 폭 w의 1/2, 시험

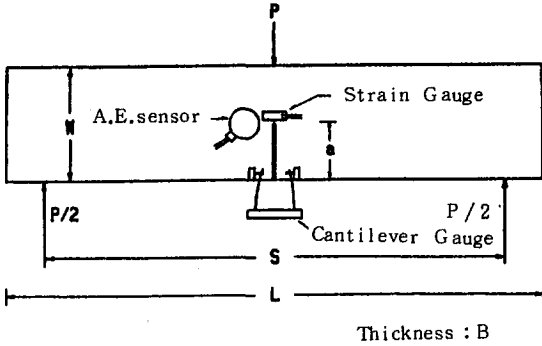


Fig. 1 Specimen in 3-point bending test

편의 길이  $L$ 은  $4.2w$  이상, 하중점간격 (bending span)은  $4w$ 를 유지하여야 한다. 사용된 시험편의 크기는  $W \times L \times B$  가  $80 \times 350 \times 40$  (mm) 가 되도록 하였다. 인공노치의 길이는  $32 - 48$  mm 범위내에서 변화시켰으며, 성형은  $0.7$  mm 두께의 암석절단용 다이아몬드톱을 사용하였고 첨단은 실패로 마무리하여 최소곡률반지름이  $0.2$  mm 이하가 되도록 하였다. 가압장치는 최대용량이 200 톤인 만능시험기 (Universal testing machine, Shimadzu UDH-200 A) 로 일정한 하중, 변위 및 변형률속도의 제어가 가능한 기종이다. 실험시에는 하중점의 변위 속도를  $0.1$  mm / min 로 일정하게 유지하였으며, 하중에 대한 균열열림변위 (crack mouth opening displacement) 와 미소파괴음의 발생빈도 (A.E.) 를 함께 측정하였다. 균열열림변위는 노치입구부에 아크릴로 만든 가이드를 접착, 고정시키고 여기에 직접 제작한 4-개이지 타입의 캔틸레버게이지 (cantilever gage) 를 설치하여 측정하였다. 하중과 캔틸레버게이지에 의해 측정된 균열열림변위는 동적변형률증폭기를 거쳐 X-Y 기록계에 자동기록하였다. 이와 함께 균열전파개시순간을 포착하고 균열전파 과정에서 A.E. 발생빈도의 변화를 조사하기 위하여 A.E. 측정기 (B & K사 제품) 를 노치첨단

과 인접한 시험편표면에 부착시켜 시간경과에 따른 하중과 A.E. 발생빈도를 기록하였다.

### 2-2-2 사점전단시험 (4-point Shear Test)

사점전단시험은 fig.2 와 같이 4개의 하중점을 시험편중앙에 대해 각각 대칭이 되도록 배치하여, 노치의 첨단부에 순수한 면내전단응력이 작용할 수 있도록 하는 방법이다.<sup>8)</sup> 본 시험에서는 하중점의 배치간격이 시험편중앙으로 부터 각각  $48$  mm와  $120$  mm 가 되게하여 가압하중이  $5 : 2$ 의 비율로 가해지도록 하였다. 시험편의 크기는 폭, 길이, 두께가 각각  $80, 350, 40$  (mm) 이며 길이  $30-$

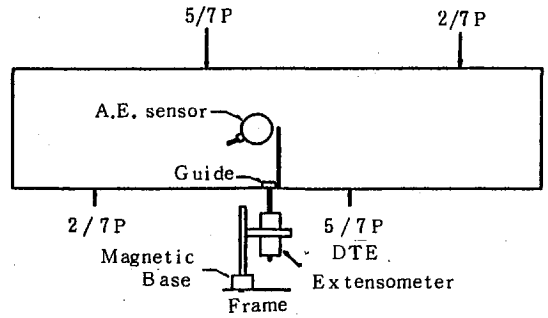


Fig. 2 Schematic diagram of 4-point shear test

$50$  mm의 노치를 삼점굴곡시험에서와 같은 방법으로 성형하였다. 실험시 하중점의 변위속도는  $0.1$  mm / min 로 일정하게 유지하였으며 면내전단응력하에서 균열표면에서의 변위는 균열방향과 평행하게 일어나므로 하중에 대한 CMSD (crack mouth sliding displacement) 의 변화량을 측정하고 이와 함께 A.E. 발생빈도도 측정하였다. 본 시험에서의 CMSD 는 DTF (Differential Transformer) extensometer 에 의해 측정된, 노치입구부 한쪽에서의 수직변위이어서, 노치

의 양입구부에서의 상대변위와는 약간의 정량적인 차이는 있겠으나 하중에 대한 균열변형 거동을 파악하는 데에는 무리가 없는 것으로 판단하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3-1. 삼점굴곡시험

본 연구에서는 암석내에서 하중에 의해 균열이 생성, 전파될 때 입자가 파괴되거나 입자간의 마찰로 부터 발생하는 Acoustic Emission의 빈도를 측정하여, 노치침단으로부터 균열이 전파하기 시작하는 순간을 포착하고, 이때의 하중수준과 ASTM E399의 시험규정 (금속재료에 대한 적용규정)에 명시되어 있는 시험결과의 해석방법에 의해 구한 하중  $p_q$ 를 비교하여 균열의 전파가 시작되는 하중수준을 나타내는  $p_q$  산정방법의 암석에 대한 적용성을 검증하고자 하였다. 따라서 본 연구에서는 구해진 균열열림변위 곡선으로부터 ASTM 시험규정을 적용하여  $p_q$ 를 구

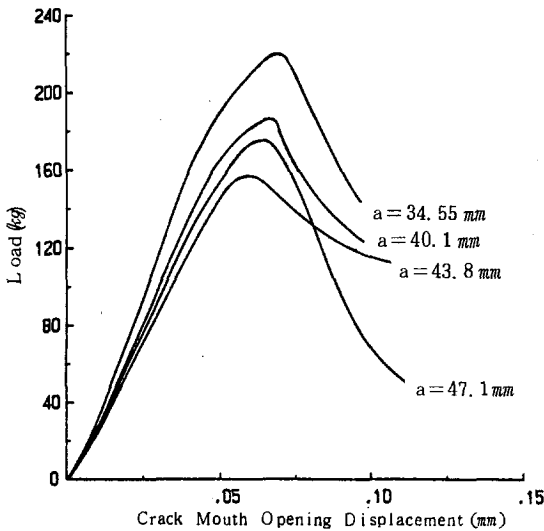


Fig. 3 Load vs. crack mouth opening displacement curves for granite with various crack length in 3-point bending test

한 후 이를 A.E. 측정 결과로 부터 해석한 균열전파개시 순간의 하중  $p_{A.E}$ 와 비교 검토하였다.

Fig. 3은 삼점굴곡시험으로 부터 얻어진 하중-균열열림변위 곡선들이다. 균열열림변위의 거동은 균열길이가 길수록 최대하중과 초기선형거동구간에서의 기울기가 감소하는 경향을 보이고 있으나, 곡선들 중 균열길이 43.8 mm의 경우와 같이 기울기의 전체적인 감소 경향과 일치하는 않는 경우도 나타나 암석이 지닌 불균질성이나 육안으로는 포착할 수 없는 결함에 의한 영향이 존재하고 있음을 알 수 있다.

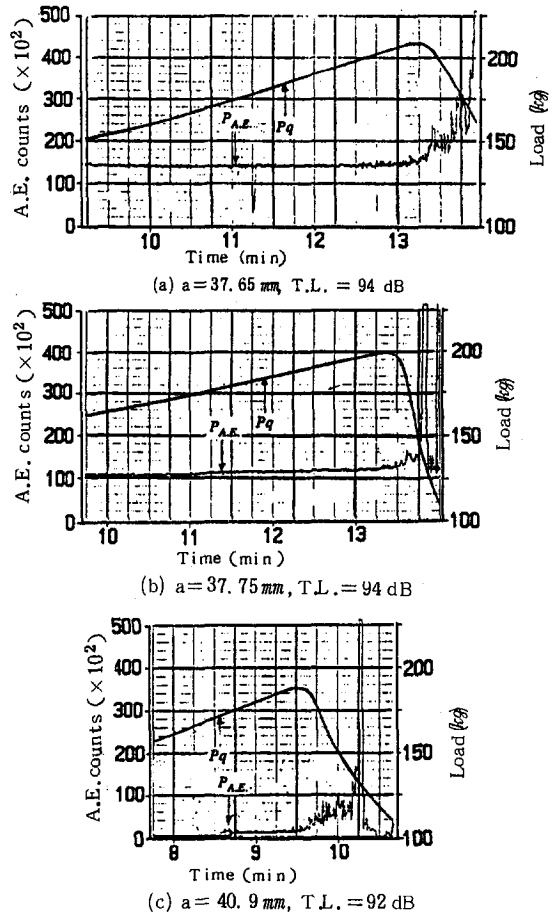


Fig. 4 A.E. counts and load vs. time curve for granite in 3-point bending test

Fig. 4는 A.E. 측정결과 중 대표적인 경우들을 예시한 것이다. Fig. 4에서 A.E. 발생빈도의 크기는 때 1초간 누적된 양이며, 기록지의 속도는 0.3mm/sec이다. 시간에 따른 A.E. 발생빈도 측정과 함께 약 5초 간격으로 하중을 측정, 기록하였다. A.E. 측정시 노이즈(noise)를 제거하기 위한 증폭한계(threshold limit)는 약 90-92 dB 수준이었으며, 측정시에는 증폭률을 과소하게 잡아 미세한 A.E. 신호가 노이즈와 함께 제거되는 경우를 없애기 위하여 2-4 dB 정도 크게하였다. A.E.의 발생빈도는 하중이 증가함에 따라 초기에는 거의 변화가 없으나, 최대하중에 근접할수록 현저한 증가를 보이며 최대 발생치는 최대하중 이후에 나타나고 있다. 따라서 암석에서 대규모적인 불안정 균열전파는 최대하중 혹은 그 이후부터 일어난다고 할 수 있으며 미세균열 발달로 부터 최대하중까지는 안정적 균열전파가 진행된다고 판단할 수 있다. A.E. 발생빈도 변화에서 균열의 전파개시점으로 판독한  $P_{A.E.}$  와 하중-균열열림변위곡선으로 부터 구한  $P_q$ 를 비교해 보면  $P_{A.E.}$ 의 수준은 (c)의 경우와 같이  $P_q$ 보다 높게 나타난 경우도 있었으나, 대부분의 경우  $P_q$ 와 비슷하거나 다소 낮게 나타남을 알 수 있었다. 그러므로 미세균열의 발달은  $P_q$ 나 혹은 그 이전에서 시작되는 것으로 판단할 수 있으며 암석과 같이 취성적인 성질이 두드러진 재료에 있어서 높은 안전도가 요구되는 경우의  $P_q$ 의 결정은 균열열림변위가 비선형거동을 시작한 하중수준으로 낮추어져야 할 필요가 있는 것으로 사료된다. 다만 발달된 미세균열이 전체적인 파괴에 영향을 미치는 정량적인 기준에 대해서는 보다 많은 연구가 필요하다고 생각된다.

### 3-2. 사점전단시험

면내전단응력하에서 기존균열로 부터 균열

의 전파가 시작되는 하중수준을 구하는 것은 인장응력하에서의 결과해석시와 마찬가지로 응력확대계수의 측정에 매우 중대한 의미를 지닌다. 그러나 사점 전단시험에 의한 파괴인성 측정결과를 발표한 바 있는, Huang<sup>8)</sup> 등의 연구보고에서는 균열전파가 시작되는 하중수준에 대한 고찰은 전혀 언급되지 않고 있다. 본 연구에서의 A.E. 측정은 사점전단시험에서 하중-CMSD의 측정과 함께 실시하였으며, 측정조건은 삼점굽곡시험에서의 경우와 동일하다. 먼저 A.E. 발생 시작시의 하중수준과 비교하기 위하여 fig. 5에 보인 바와 같이 하중-CMSD 곡선이 초

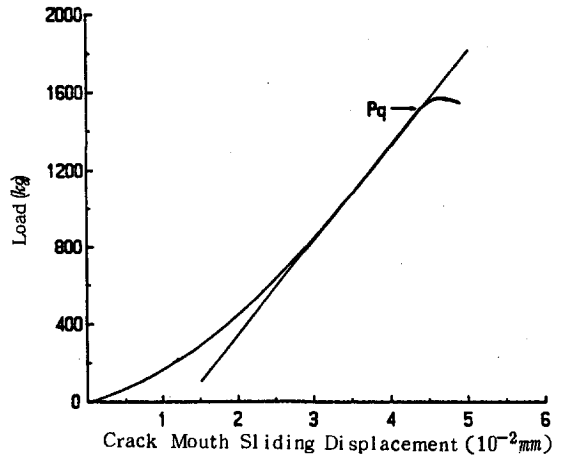


Fig.5 Typical load vs. crack mouth sliding displacement curve for granite in 4-point shear test

기선형거동구간을 벗어나기 시작할 때의 하중을  $P_q$ 로 가정하였으며, fig. 6의 하중-시간곡선상에 이를 다시 표시하였다. fig. 6은 화강암에 대한 사점전단시험에서 측정된 시간에 따른 하중의 변화와 A.E. 발생빈도 분포를 예시한 것이다. A.E.는 하중이 최대하중에 접근할수록 급격한 증가를 보이기 시작하여, 최대 하중 및 최대하중 직후에서 가장 많이 발생하고 있으며, (c)의 경우와

같이 균열길이 비교적 긴 경우에는 A.E. 발생 빈도량이 상대적으로 적게 나타나는 경향을 보여 균열전파개시에 따른 A.E. 발생빈도의 변화를 확인하기에 어려움이 있었다. 사점전단시험에서는 시험편의 파단이

작되는 하중  $P_{A.E.}$ 와  $P_q$ 를 비교해 보면 fig.6(a)와 같이 현저한 차이를 보이는 경우도 있으나, 대체로 (b)와, (c)의 경우처럼 유사한 수준을 보이고 있다. 사점전단시험에서는 삼점굴곡시험에 비해 최대하중의 크기가 10-15배에 달하고 최대하중 전에 나타나는 CMSD의 비선형거동구간이 짧아 인장응력하에서와 같은 엄격한  $P_q$  결정 기준을 적용하기는 어렵다고 생각되며 따라서 하중-CMSD곡선의 비선형거동이 시작될 때의 하중  $P_q$ 를 균열성장개시점으로 보는 것이 타당할 것으로 판단된다. 이러한 결과는 삼점굴곡시험에서 A.E. 발생빈도측정에 의해 안전도를 고려한 경우, 균열성장개시점의 하중 수준으로 제시한  $P_q$  결정기준과 일치한다.

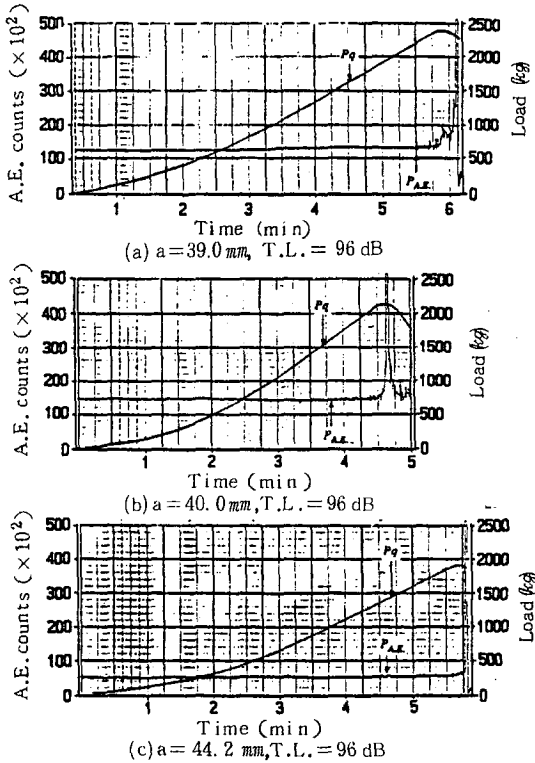


Fig.6 A.E. counts and load vs. time curve for granite in 4-point shear test

대부분의 경우 최대하중의 직후에서 폭발적으로 일어났으므로 A.E.의 최대발생점이 최대하중과 거의 일치하는 것은 매우 당연한 것으로 볼 수 있으며, 삼점굴곡시험에서 최대발생점이 최대하중 이후의 불안정전파가 진행될 때 나타난 것과 비교해 볼 때 시험조건의 영향을 받는 것으로 보여 fig.6의 결과만으로 최대발생점을 규명하기에는 다소 무리가 있다 판단된다. A.E.의 발생이 시

#### 4. 결 론

본 연구를 수행하여 얻은 결과를 구체적으로 기술하면 다음과 같다.

1) 삼점굴곡시험의 자료 해석에서 금속에 대해 적용하고 있는 ASTM 시험기준을 적용하여 구한 균열발생시의 하중수준( $P_q$ )과 A.E. 발생빈도 측정에 의해 구한 균열전파개시 순간의 하중수준( $P_{A.E.}$ )을 비교한 결과 대체로 일치한다고 볼 수 있으나 보다 높은 안전도가 요구되는 경우에는 대해서는 실험 결과해석시 하중수준을 균열변형이 비선형적으로 나타나는 수준까지 낮출 필요가 있다고 판단된다.

2) 사점전단시험에서는 균열의 전파에 의한 A.E.의 발생시점과 균열이 비선형거동을 시작하는 순간의 하중수준은 대체로 일치하였다. 이는 삼점굴곡시험에서와 유사한 결과이다.

3) 결론적으로 인장 및 면내전단응력을 받고 있는 암석에 있어서 균열의 성장 전파가 시작되는 하중수준은 균열이 비선형변형거동

을 시작할 때로 보는 것이 타당하며, 암석의 파괴를 목적으로 하는 공학적 응용분야에서는 최대하중수준을 적용하여도 좋을 것으로 판단된다.

#### REFERENCE

1. Bleniewski, Z. T., "Mechanism of brittle fracture of rock Part 1, Theory of the fracture process", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 5, pp. 529~549 (1968)
2. Ingraffea, A. R., "Discrete fracture propagation in rocks: Laboratory tests and finite element analysis", Ph. D. these, Univ. of Colorado, (1977)
3. Halleck, P. and Kumnick, A. J., "The influence of orientation on fracture toughness and tensile moduli in Berkeley granite", *Proc. 21st U. S. Symp. on Rock Mech.*, pp. 235~242 (1980)
4. Hoagland, R. G., Hahn, G. T. and Rosenfield, A. R., "Influence of microstructure on fracture propagation in rock", *Rock Mech.*, Vol. 5, pp. 77~106 (1973)
5. Ouchterlony, F. and Zongqi, S., "New methods of measuring fracture toughness on rock cores", *SveDeFo report* 1983 : 10 (1983)
6. Roh, Y. R., Kim, J. D. and Lee, C. I., "The determination of fracture toughness of granite and its numerical analysis", *Proc. 2nd conf. of APCS - 86.* pp. 525~531 (1986)
7. ASTM E 399 - 81, "Standard test method for plane strain fracture toughness of metallic materials", (1981)
8. Huang, J. A. and S. Wang, "An experimental investigation concerning the comprehensive fracture toughness of some brittle rocks", *Int. J. Rock, Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstract.* Vol. 22, No. 2, pp. 99~104 (1985)