

암석파괴시 발생하는 미세균열의 발생원에 대한 연구 A Study on Source Mechanisms of Micro-Cracks Induced by Rock Fracture

김 교 원 (Kim, Gyo Won)

시설안전기술공단

요약/Abstract

암석 시료가 파괴될 때에 발생하는 AE신호는 미세한 균열 발생시의 갑작스런 변형에너지 해방에 기인한다. 압전 압력형 탐촉자와 다채널의 기록장치를 이용하여 AE 신호파를 기록하여 분석하므로써 외적인 하중조건과 그에 따른 파괴면 및 미세균열의 특징에 대하여 연구하였다. 연구결과 미세균열의 체적은 수 μm^3 내지 $150,000\mu\text{m}^3$ 로 산출되어서 그 크기가 넓은 범위로 분포하였고 인장형 미세균열이 대체적으로 전단형 보다 큰 체적을 보였다. 또한, 균열원에서의 에너지 강도는 모드 I 하중조건하에서 발생하는 AE신호가 혼합모드 조건하에서 발생한 신호보다 약 3배정도 크게 나타났으나, 시료가 파괴되는 동안 기록된 AE신호의 숫자는 반대로 모드 I의 경우가 혼합모드의 25%에 불과하였다. 이러한 사실은 같은 크기의 파괴면을 형성하는데 필요한 에너지 요구량이 대체적으로 동일함을 암시하는 것으로 보인다.

Acoustic Emission(AE) signals are emitted by a sudden release of strain energy associated with material damage. A multi-channels of LeCroy system and piezoelectric pressure transducers are employed for AE measurement to investigate the roles of AE in the propagation of macro cracks as well as the characteristics of AE wave in occurrence, amplitude and dominant frequency with changes in macro loading modes. Deduced crack opening volume of micro cracks varied widely and implies that AE events could be caused by crystal dislocations on a small scale and grain boundary movements on a large scale. Amplitude of first arrival AE wave emitted during mode I test was approximately 3 times higher than those from mixed mode test, while the number of AE count in mode I test was only 25% of mixed mode. It may imply that the total energy required for generation of a given fracture surface is similar regardless in change of macro loading modes.

1. 서 론

AE(Acoustic Emission) 신호는 물질의 손상과 관

련되는 갑작스런 변형 에너지 해방시에 발생하는 탄성파로서 최근의 미세신호의 감지장치와 기록장치의 발달과 더불어 다양한 공학분야에서 활발한 연구가 진행되고 있다. 암석에서의 AE현상은 광물의 결정

이나 입자의 전위, 경계부의 활동, 미세균열의 발생 등의 결과로 알려져 있다(Hardy, 1977). 그러나, 원거리에서 감지될 수 있을 정도의 큰 AE 신호의 발생은 이러한 손상이 순간적으로 발생할 때 가능하며 서서히 진행되는 손상은 단위시간당 방출되는 에너지가 적어서 감지할 수 없거나 주변의 잡신호(Noise)와 구분하기 어려운 것으로 알려져 있다(Dowding and Kim, 1988).

미세균열로 발생하는 AE신호파를 4개 이상의 각기 다른 위치에서 수신한다면 각 수신점에서의 P파 도달시간을 이용하여 균열 발생원의 위치를 균질한 암석의 경우 2~3mm 오차이내로 결정할 수 있다(Aki and Richards, 1980). 본 연구에서는 6채널을 사용하여 미세균열원의 정확한 위치를 결정토록 하였다.

2. 이론적 배경

AE신호를 발생하는 미세균열원의 크기(체적이 수백 μm^3 정도)가 AE신호파의 파장(수 cm)에 비하여 아주 작기 때문에 Aki and Richards(1980)는 균열원을 한 점으로 가정하여 균열원의 메카니즘을 Fig.1의 Point Force Dipole로 설명하고 있다.

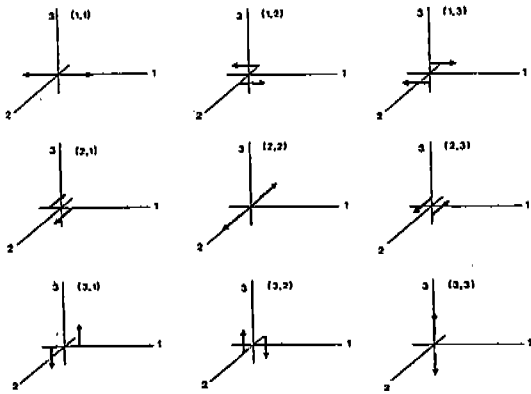


Fig. 1 Nine couples for equivalent forces.

Force Dipole, D_{ij} 는 미세균열변상의 변위 불연속면과 관계되며 다음 식으로 표시된다.

$$D_{ij} = C_{ijkl} b_k dA_l$$

여기서, 상수 C_{ijkl} 은 탄성적 강성 텐서이며 $b_k dA_l$ 은 미세 균열의 개구체적(Opening Volume)으로 균열원의 성질과 관계된다. 극좌표로 표시된 수신점 위치에서의 P파의 도달강도는 Force Dipole로 다음 식과 같이 표시된다.

$$A_{dn} = \int u_i(r, \theta, \phi) dt = \frac{1}{4\pi(\kappa+2\mu)r} (\sin^2\phi \cos^2\theta D_{11} + \sin^2\phi \sin^2\theta D_{22} + \cos^2\phi D_{33} + 2\sin^2\phi \sin\theta \cos\theta D_{12} + 2\sin\phi \cos\phi \cos\theta D_{13} + 2\sin\phi \cos\phi \sin\theta D_{23})$$

여기서, A_{dn} 은 보정된 도달강도이고 κ, μ 는 Lamé의 상수이다. 균열원의 위치를 알면 6채널로 수신된 AE신호로부터 상기 식의 D_{ij} 를 구하며 이로 부터 Eigen Value Analysis를 이용하여 3개의 Principal Force Dipole, F_p 와 미세균열면의 방위를 구하고 탄성정수를 고려하여 주 체적성분 d_p 를 구한다. 이론적으로 순수 인장형 균열은 개구방향의 성분외에는 모두 0이 되고 순수전단형 균열은 같은 크기의 두 개의 반대방향의 성분만 갖게 되나, 이들이 조합된 균열도 있기 때문에 Scruby(1986)는 다음과 같은 기준으로 미세균열을 분류하였다.

- 전단형 균열 : 체적성분에 대한 전단성분의 비, $S/V \geq 3.0$
- 혼합형 균열 : $3.0 > S/V \geq 2/3$
- 인장형 균열 : $S/V < 2/3$

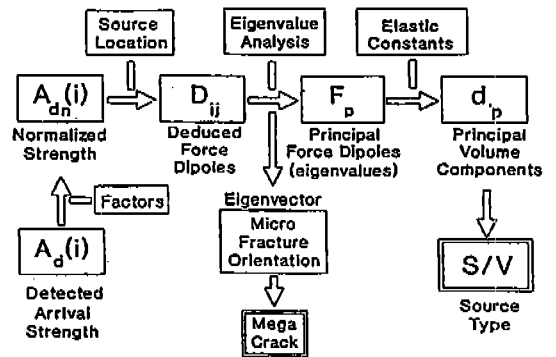


Fig. 2 Flow chart for source characterization by acoustic emission measurement.

균열의 체적성분 V는 3 주성분의 합으로 표시되며 전단성분 S는 유효소성변형의 크기로 보면 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$V = \sum b_i dA_i$$

$$S = \sqrt{(\frac{2}{3} \sum (b_i dA_i - \frac{1}{3} V)^2)}$$

이상의 과정을 도표로 표시하면 Fig.2와 같다.

3. 시험 결과

가. 시료 및 시험장치

입경 1~2mm의 세립화강암을 Fig.3과 같은 규격으로 성형하여 모드 I 및 혼합 모드의 균열이 발생되도록 4점 재하시험을 각 3개의 시료에 대하여 수행하며 6채널을 통하여 AE신호를 수신하였다. 시험은 Close-Loop, Servo-Controlled Testing Machine에 의하여 수행되었는데, 재하속도는 CMD(Crack Mouth Displacement) 속도를 0.0001in./min로 유지되도록 하였다. 재하되는 동안 발생하는 AE신호는 증폭되어 측정장치로 보내지며 계수화되어서 컴퓨터에 저장된다. 시료표면의 균열은 배율 100배의 현미경으로 관찰되었다. Fig.4는 시험장치의 모식도이다.

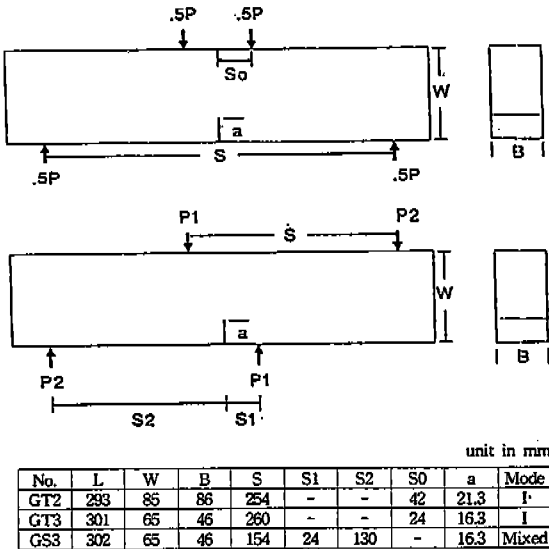


Fig. 3 Configuration of specimens for mode I and mixed mode tests.

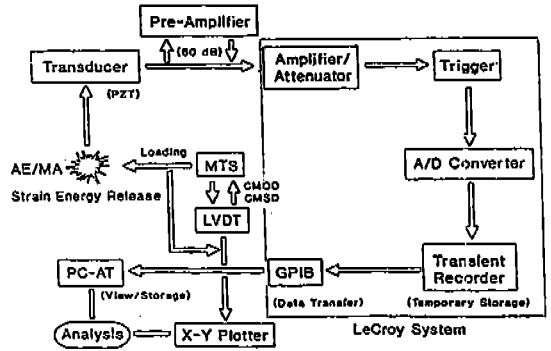


Fig. 4 Schematic diagram of testing system.

나. AE파의 특징

6개의 압전 탐촉자로 측정된 AE파는 미세균열 발생원의 상대적인 거리와 균열면의 방위에 따라 Fig. 5에서와 같이 첫 파동의 특성이 달라진다. 시료내부에서의 균열이나 표면에서의 반사에 의한 파형의 교란 등으로 인하여 해석에는 첫 파동만 이용되었다. 첫 파동의 주파수는 대체로 200~350kHz이었고 강도는 수십 mv의 범위였다. Fig.6에 나타난 바와 같이 재하되는 동안 파괴하중의 90%에서 기록가능한 크기의 AE가 처음 발생하여 CMD 0.04mm 이후에서는 일정한 AE발생 빈도를 보이고 있다. 이는 시료의 탄성변형 시기에는 AE발생 수는 적으나 시료 파괴가 시작되면서는 일정한 속도로 균열이 진행되며 그에 따라 AE 발생이 증가하고 있음을 암시한다.

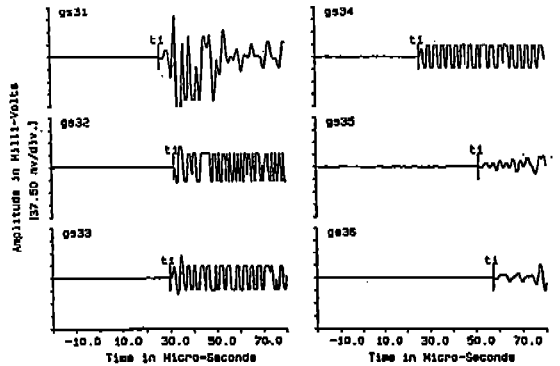


Fig. 5 Typical AE waves detected through 6 channels.

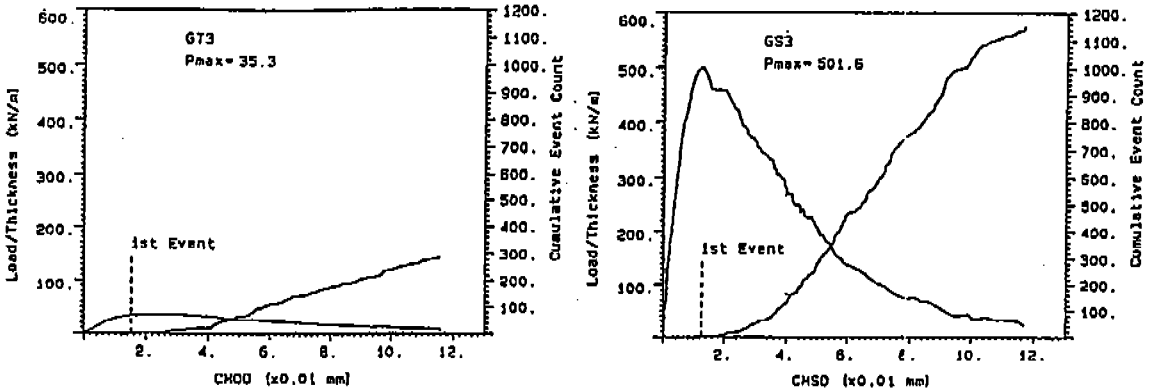


Fig. 6 Relation of CMD-Load-AE count(GT3 and GS3).

다. 미세균열의 분류

재하조건에 따라서 미세균열의 형태를 분류하면 Fig.7과 같이 모드 I 재하조건에서는 전단형 미세균열이 없으나 혼합모드에서는 약 22%가 전단형 미세균열로 분류되었다. 또한, 전단형 미세균열의 체적성

분은 약 600m³미만이나 인장형 균열은 최대 150, 000m³으로서 인장형 균열이 전반적으로 큰 체적임을 나타내었다. 즉, 인장형 미세균열이 전단형에 비하여 상대적으로 큰 에너지를 방출함을 의미한다.

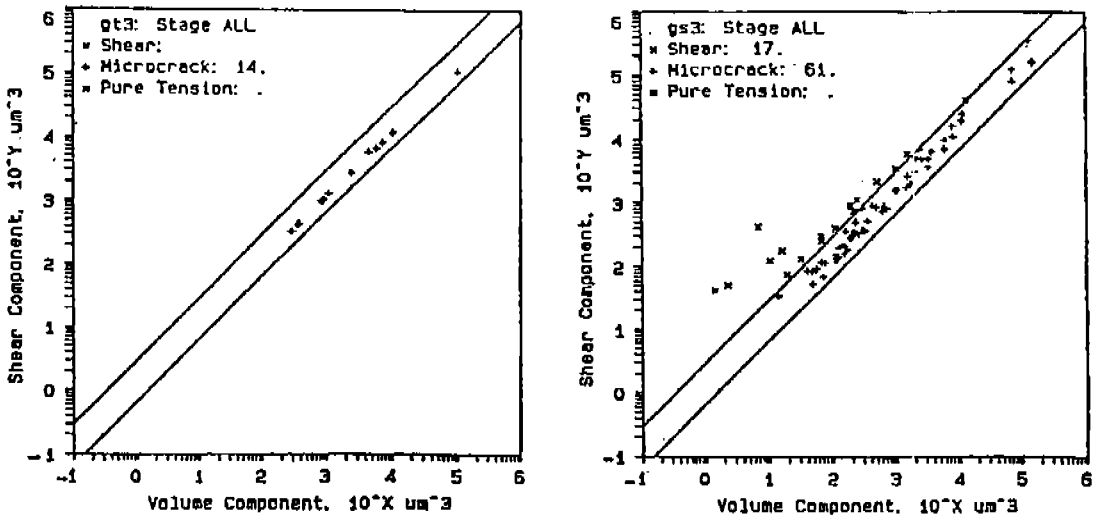


Fig. 7 Classification of micro-cracks.

라. 미세균열 발생원과 파괴면의 관계

GT3 시료에 대한 모드 I 시험시 載荷-除荷-再載荷(Loadong-Unloading-Reloading)를 반복하면서 얻어진 CMOD-하중 곡선은 Fig.8과 같다.

시험의 각 단계에서 측정된 AE신호로부터 산출한 미세 균열의 발생위치와 현미경으로 관측된 시료의 파괴면의 관계는 Fig.9에 나타내었다. AE신호는 除荷나 再載荷단계에서 보다는 載荷단계에서 많이

발생하였으며, 미세균열의 발생원은 시료 파괴면 주위에 집중되었다. 이는 시료 파괴가 미세균열이 상호 연결·확장되므로서 진행됨을 나타낸다.

미세균열면의 방위와 시료파괴면의 방위의 관계를 규명하기 위하여 미세 균열면에 수직으로 작용하는 힘의 벡터(즉 면의 극)를 Fig.10과 같이 스테레오 네트상에 투영하였다. 미세균열면의 주향은 대체로 시료파괴면의 방위와 일치하는 Y축방향이며 경사각은 거의 수직인 것(①)과 거의 수평인 것(②)이 우

세한 것으로 나타났다. 즉, 이 결과도 미세균열이 시료의 파괴면의 형성에 직접적인 영향을 미치고 있음을 나타내고 있다.

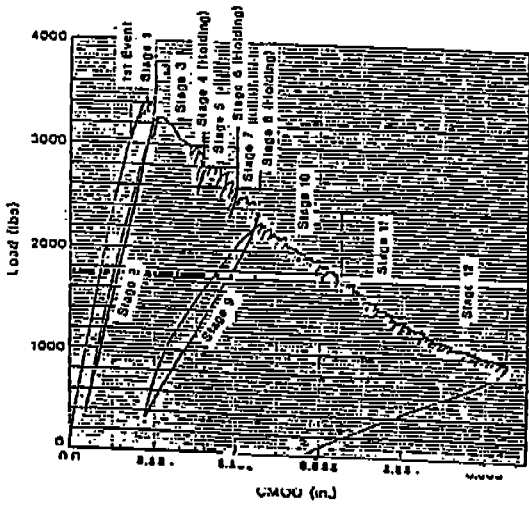


Fig. 8 CMOD-load curve and test stages (GT3).

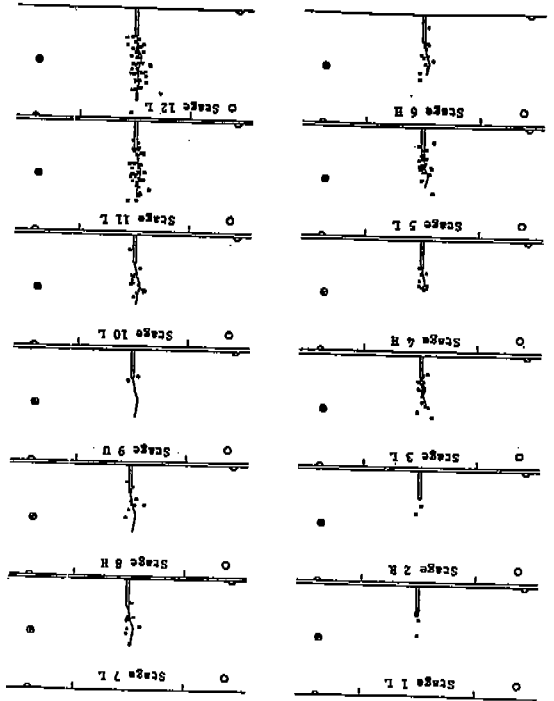


Fig. 9 Relation between micro-crack source and macro crack trace at different test stages (GT3).

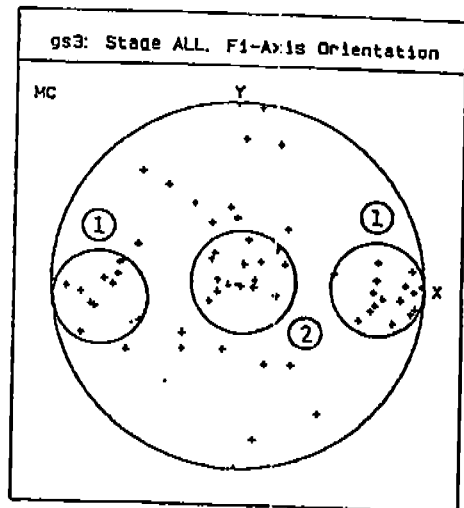
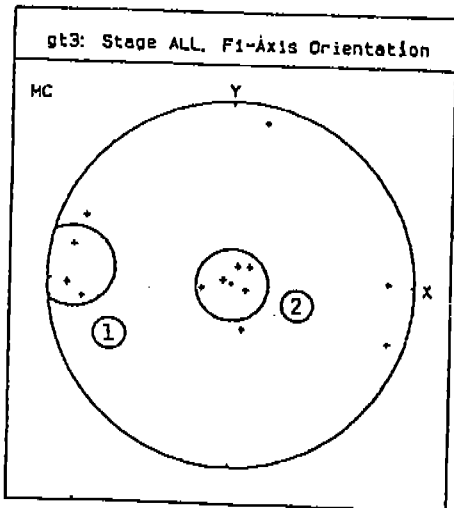


Fig. 10 Stereo net projection of poles of micro-crack surface.

4. 결 론

세립질 화강암의 보형(Beam) 시료가 모드 I 및 혼합모드의 재하조건하에서 파괴되는 동안 수신된 AE신호를 분석하여 시료 파괴와 관련된 미세 균열의 특징을 규명하였다.

- 1) 모드 I 재하조건하에서 발생한 AE신호는 혼합모드에 비하여 숫적으로는 25%에 불과하나 개개 미세균열의 크기는 약 3배정도 큰 것으로 밝혀져서 일정한 규모의 시료 파괴면을 형성하는데 필요한 에너지 총량은 대체로 동일한 것으로 판단된다.
- 2) 인장형 미세균열의 체적이 전단형 균열보다 최대 수 백배 정도 큰 것으로 나타났다.
- 3) 모드 I 재하조건에서는 인장형 미세균열이 압도적으로 우세하였고 혼합모드 조건에서는 인장 및 전단형 균열의 비가 3.6 : 1로 분포하여서 미세균열의 형태는 재하조건(외력조건)과 밀접하게 관계되는 것으로 판단된다.
- 4) 재하 초기에 AE신호의 발생이 거의 없어서 시료가 탄성변형 중일 때에는 물질의 손상이 거의 없는 것으로 확인되었고, 시료 파괴가 진행되면서 AE신호가 증가하여서 AE신호는 회복 불가능한 시료의 파괴와 관계됨을 확인하였다.
- 5) 미세균열의 발생원은 시료 파괴면 주변에 집중되고 균열면과 파괴면의 주향이 대체적으로 일치하는 것으로 나타나서 시료의 파괴는 내부의 미세균열이 원인임을 확인하였다.

참 고 문 헌

Aki, K. and Richards, P.G., 1980, Quantitative Seismology Theory and Methods, vols. 1 & 2, Freeman and co., San Francisco, 932pp.

Chang, H.S., 1984, Determination of Acoustic Source Location by a Least Squares Iterative Technique, MSc. Thesis, Dept. of Civil Engineering, Northwestern University, Evanston, IL., 124pp.

Dowding, C.H. and Kim, G.W., 1988, Micro Seismic Motions from Expansive Agent induced Rock Fracturing, Final Project Report, U.S. Corps of Engineers, Waterways Experiment Station,

15-24.

Hardy, H.R., Jr., 1977, Emergence of Acoustic Emission/Microseismic Activity as a Tool in Geomechanics, Proceeding of 1st Conference on Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials, The Pennsylvania University, Pa., Trans Tech Publication, 13-31.

Kim, G.W., 1989, Refinements of Acoustic Emission Measurement to Deduce Three Dimensional Rock Fracture Source Mechanisms, PhD Dissertation, Dept. of Civil Engineering, Northwestern University, Evanston, IL.

Obert, L., 1977, The Microseismic Method : Discovery and Early History, Proceedings of 1st Conference on Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials, The Pennsylvania University, Pa., Trans Tech Publication, 11-12.

Ohtu, M., 1982, Source Mechanisms and Waveform Analysis of Acoustic Emission in Concrete, Jour. of Acoustic Emission, vol.1, no.2, 103-112.

Scrubby, C.B., Baldwin, G.R., and Stacey, K.A., 1985, Characterization of Fatigue Crack Extension by Quantitative Acoustic Emission, International Jour. of Fracture, vol.28, 201-222.

Scrubby, G.B., 1986, The Characterization of Crack Growth by Acoustic Emission, Progress in Acoustic Emission III, The Japanese Society of NDI, 1-8.

김교원
 경기도 안양시 동안구 관양동 1588-9
 시설안전기술공단
 TEL : 0343)80-3192
 FAX : 0343)80-3216