

音響放射法(AE)을 이용한 岩石 破壞와 關聯된 微細 龜裂源의 機構에 對한 研究

A Study on Source Mechanisms of Micro-Fracture
Related to Rock Failure Through Acoustic Emission Measurement

要 旨

花崗岩 Beam 試料에 대하여 4-Point Bending 試驗이 진행되는 동안 試料 破壞에 隨伴된 AE 信號를 Calibrated PZT Transducer와 6-Channel Recording System 으로 기록하여 分析함으로서 微細 龜裂源의 特性과 機構를 糾明하였다. 微細 龜裂의 體積은 수 μm^3 에서 150,000 μm^3 의 넓은 범위를 보였으며, 引張形 龜裂이 剪斷形에 비하여 大體的으로 큰것으로 밝혀 졌다. 龜裂源에서의 強度는 Mode I 荷重 下에서 기록된 것이 Mixed Mode 試驗에서 얻어진 것보다 그 平均値가 약 3배 정도 크게 나타났으나, 전체 AE 數에 있어서는 反對로 Mixed Mode 試驗에서 기록된 것의 약 25 % 밖에 되지 않아서 같은 크기의 破壞面을 形成하는데 必要한 에너지 要求量이 일정함을 暗示하였다. 미세 龜裂面의 方位는 垂直 및 水平에 近接한 傾斜를 가지며 走向은 최종 試料의 破壞面과 일치할 뿐만 아니라 龜裂源이 서로 破壞面에 집중되게 分布하여서 微細 龜裂이 試料龜裂을 야기시키는 原因임을 알 수 있었다. 또한, Mode I 荷重 下에서는 引張形의 微細龜裂이 압도적으로 優勢하였고, Mixed Mode 荷重 下에서는 引張과 剪斷形의 微細龜裂이 약 3.6:1 比率로 分布하여서 荷重 條件이 微細 龜裂의 機構와 密接한 關係가 있음을 알 수 있었다.

1. 序論

AE(Acoustic Emission) 또는 MS(Micro Seismism)는 物質의 損傷과 관련된 갑작스런 에너지의 解放으로 야기된 彈性波가 그 물질을 통하여 외부로 傳波되어 가는 現象으로서, 1930 년대 後半 鑛山에서 上載荷重과 彈性波 速度의 關係를 糾明하기 위한 試驗 중 우연히 알려진 이후(1), 地盤工學에서의 AE 應用을 위한 研究가 최근 활발히 進行되고 있다.

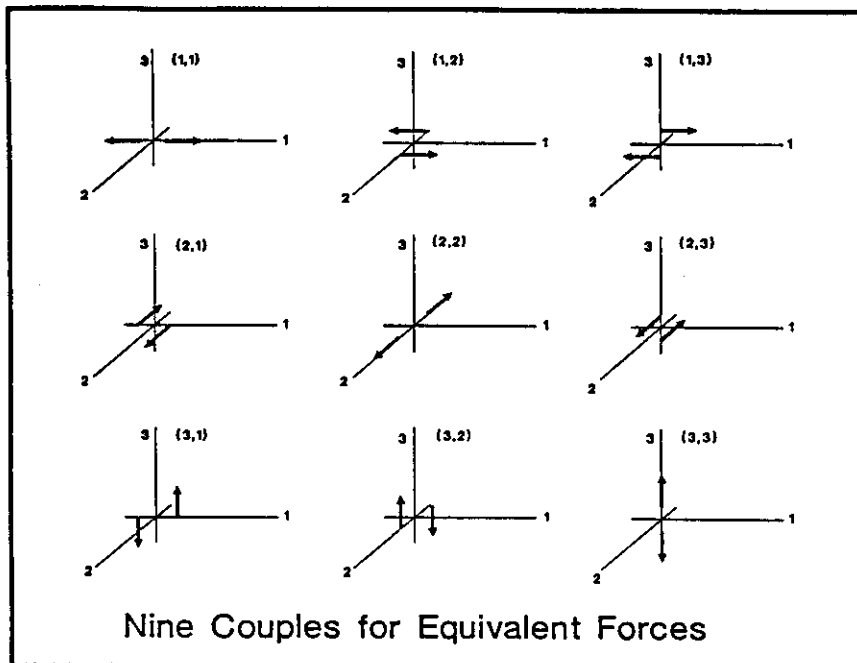
그 동안의 研究는 주로 物質의 應力度나 物理的 特性에 따른 AE 신호의 特性, 즉, Ring Down Count, Event Count, Occurance Rate, Rise Time, Frequency Spectrum, Amplitude Distribution, AE Energy, 및 Event Duration 등을 把握하여 물질의 損傷度를 糾明하는데 寄與하여 왔다. 최근 電子 器械의 발달로 外力下에서 물질이 破壞될 때 수반되는 微細한 内部 損傷에 의한 작은 에너지 放出을 遠거리에서 感知할 수 있게 되고, 感知된 信號를 分析하는데 필요한 Program 들이 開發됨에 따라 AE 와 관련된 微細龜裂源의 位置, 크기 및 機構를 糾明할 수 있게 되었다 (2,3,4).

岩石이나 Concrete의 경우, AE 現象은 結晶이나 粒子의 轉位, 境界部의 미끄러짐, 微細龜裂의 發生 및 그 傳波등의 結果로 알려져 있다 (5). 그러나, 遠거리에서 感知 가능한 AE 現象을 야기 시키기 위하여서는 위와 같은 損傷이 순간적으로 일어나야 한다. 즉, 서서히 進行되는 損傷은 單位 時間當 放出하는 에너지가 너무나 적기 때문에 感知하는데 어려움이 따르거나 주변 Noise와 구분하기 어렵기 때문이다(6).

龜裂源의 3 次元的 위치는 4개 이상의 受信點이 주어지면 각 受信點에 도달한 P波의 相對的 時間 差 를 이용하여 均質한 岩石의 경우 精度 2-3 mm로 決定할 수 있게 된다(7). 本 研究에서는 6-Channel Recording System을 利用하여 Beam 形의 花崗岩 試料가 荷重을 받아 破壞되는 동안 發生시키는 AE 信號를 受信하였다. 研究에 사용된 Piezoelectric Transducer는 다양한 方法으로 Normalized Transducer (NBS Conical Type) 에 의하여 Calibration 되었기 때문에, 각 Transducer는 같은 條件下에서 一致한 反應을 보였다. 각 AE 는 4096 점들로 構成된 6 개의 Time History 로 記錄 되었으며, 點 間 時間差는 62.5 nano-seconds 로서 秒當 16,000,000 點들이 記錄되었다.

2. 理論的 背景

1980 년대에 들어와서 動彈性 理論에 입각하여 龜裂源의 機構를 Point Force Dipole 로 說明하려는 시도가 시작 되었다(8). 微細 龜裂源의 크기가 수백 μm 로서 AE 신호의 波長 (수 cm)에 비하여 대단히 적기 때문에 龜裂源을 하나의 점으로 가정하는 것은 타당하다. 그림 1에 보이는 9개의 Force Dipole을 組合하므로써 微細 龜裂源을 야기시키는 한 점에 作用하는 힘을 표시할 수 있다.



(그림 1) 가능한 9개의 Force Dipoles.

따라서, Force Dipole, D_{ij} ,는 微細 龜裂面上的의 變位 不連續面과 관계되며, 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$D_{ij} = C_{ijkl} b_k dA_l \quad (1)$$

단, 常數 C_{ijkl} 은 彈性 剛性 Tensor 이며, $b_k dA_l$ 은 微細 龜裂의 開口 體積 (Opening Volume)으로 龜裂源의 성질과 관계된다. 極 座標로 표시된 Transducer 위치에서의 P波 到達 強度는 다음과 같이 Force Dipole과 관계된다 (9).

$$A_{dn} = \int u_1(r, \theta, \phi) dt = \frac{1}{4\pi(\kappa+2\mu)vr} (\sin^2\phi \cos^2\theta D_{11} + \sin^2\phi \sin^2\theta D_{22} + \cos^2\phi D_{33} + 2 \sin^2\phi \sin\theta \cos\theta D_{12} + 2 \sin\phi \cos\phi \cos\theta D_{13} + 2 \sin\phi \cos\phi \sin\theta D_{23}) \quad (2)$$

여기서, A_{dn} 은 補正된 到達 強度이고, κ 와 μ 는 Lamé의 常數이다. 따라서, 龜裂源의 위치가 정해지면 상기 式에서 未知數는 6개의 D_{ij} 로서 6-Channel System을 이용하는 경우 그 解를 찾을 수 있다. 이 D_{ij} 로부터 Principal Force Dipole, F_p ,를 구하기 위하여 Eigenvalue Analysis가 도입된다. 解析 結果 얻어진 Eigenvalues는 微細 龜裂을 발생 시킨 3 Principal Force Dipoles이며, Eigen Vector는 微細 龜裂面의 方位를 나타낸다. 따라서, 식 (1)을 이용하여, 微細 龜裂의 성질과 관계되는 龜裂 開口 體積의 3 方向 主 成分을 求할 수 있다.

龜裂源의 形은 龜裂 開口 體積의 主 成分으로부터 求할 수 있는데, 순수 引張形 微細 龜裂은 開口 方向의 成分외는 모두 '0'이 되며, 剪斷形 微細 龜裂은 두개의 같은 크기의 反對方向 成分을 가지게 된다. 모든 微細 龜裂은 이 중 하나이거나 이들이 組合된 結果이기 때문에 龜裂源의 形을 分類하기 위한 基準 設定이 필요하게 된다. 균열 體積 成分(V)을 3 主 成分의 合이라 하고, 剪斷 成分(S)을 塑性論에서와 같이 유효 塑性 變形 規模라 할 때, 이들은 다음 式으로 나타낼 수 있다.

$$V = \sum b_i dA_i$$

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

위 식에서 알 수 있듯이 剪斷成分의 크기는 微細龜裂의 形狀과 關係되는데, 순수 引張形 微細龜裂은 剪斷成分이 '0'이고, 순수 剪斷形 微細龜裂은 體積成分이 '0'이 된다. Scruby(1986)가 導入한 微細龜裂의 分類 基準은 다음과 같다.

Shear Type Event; $S/V > 3.0$

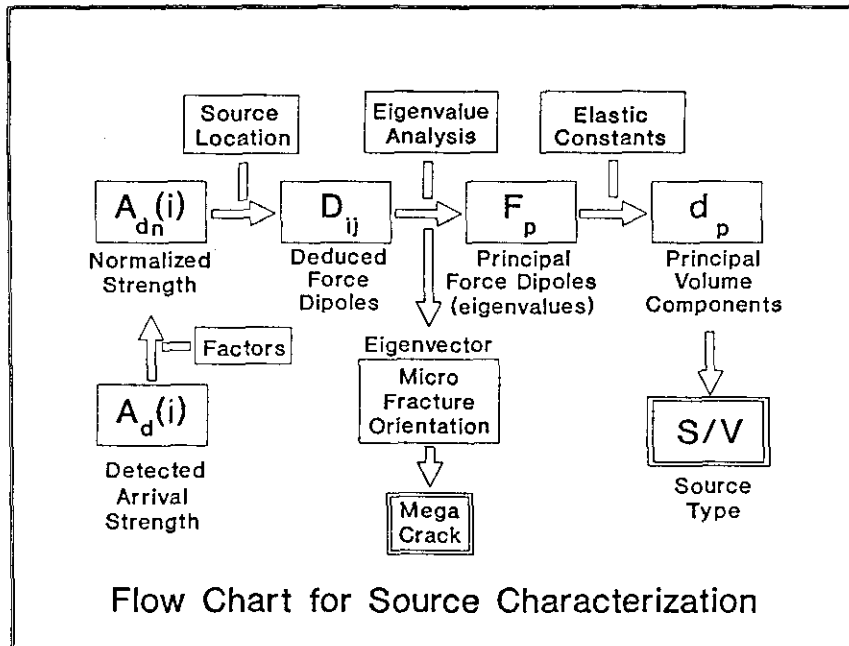
Microcrack Type Event; $3.0 > S/V > 2/3$ (4)

Pure Tension Type Event; $S/V < 2/3$

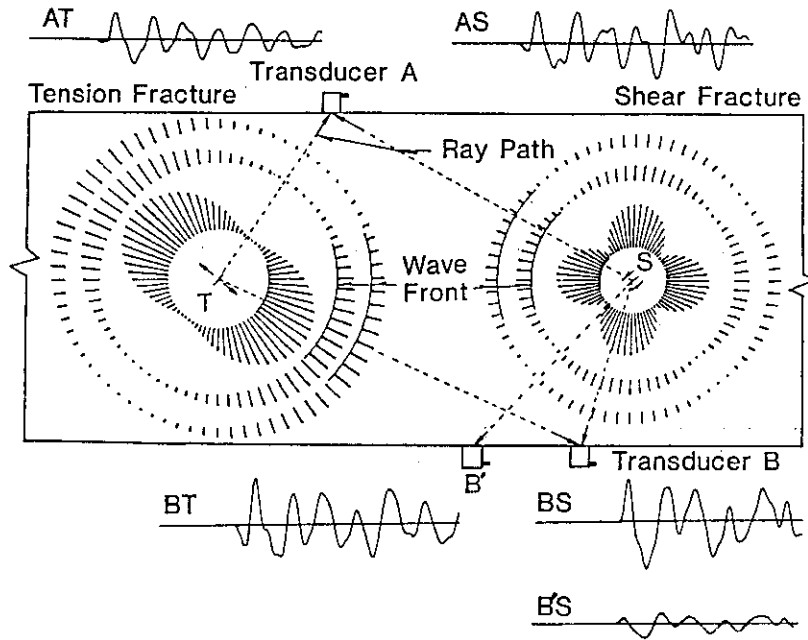
이상 설명한 AE 信號를 分析하여 物質 内部의 微細龜裂源의 特性을 糾明하는 過程을 整理하면 그림 2와 같다.

引張 및 剪斷 龜裂로 부터 放射되는 波는 時間과 距離에 따라 減衰되면서 전파되어 간다. 均質한 媒質에서 AE 波의 傳波 過程을 모식적으로 그림 3에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 龜裂源의 形에 따라 波의 傳波 양식이 구분되는데, 龜裂源과 Transducer 相對적인 위치에 따라 수신된 波의 크기와 Polarity가 달라지게 된다. 즉, 引張 龜裂 T에서 발생하여 수신점 A에 도달한 波 AT는 수신 거리가 짧음에도 불구하고, 더 큰 減衰가 豫想된 먼 거리의 수신점 B에서 기록된 波 BT 보다 그 첫 파동의 強度가 적은데 이는 龜裂 T를 발생시킨 힘의 方位와 關係하여 龜裂源에서의 變位가 方位에 따라 상이하기 때문이다. 引張 龜裂에 의한 波는 모든 방향에서 그 첫 파동이 항상 같은 Polarity를 가지게 된다. 한편, 剪斷 龜裂 S에 의한 수신점 A에 도달한 波 AS는 수신점 B 및 B'에서의 波 BS 및 B'S와 상반되는 첫 파동의 Polarity를 보이고 있다. 이와 같은 龜裂源의 形이나 龜裂源과 수신점의 相對적인 위치에 따라 一定

한 파동의 特徵에 의하여 수신된 AE 波로 부터 龜裂源의 特性을 把握하는 것이 可能하
 게 된다.



(그림 2) AE 分析으로 부터 龜裂源의 特性을 糾明하는 過程圖.

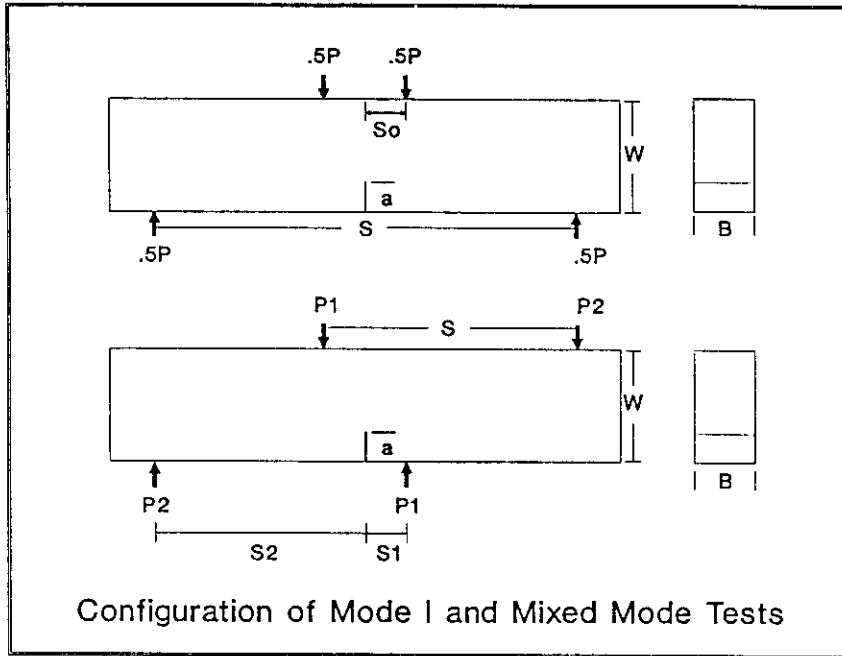


(그림 3) 引張 및 剪斷 龜裂源에 의한 AE 波의 傳波 模式圖.

3. 實驗的 研究 및 結果

1) 試料 및 實驗 設置

細粒 花崗岩(Charcoal Granite: 粒徑= 1-2 mm) 시료에 대하여 그림 4에 나타낸 바와 같은 4-Point Bending 試驗이 수행되는 동안 6-Channel을 통하여 AE 信號를 기록하였다. 荷重은 두개의 다른 형태로 주어졌는데, 이는 서로 다른 荷重 條件下에서 발생하는 AE의 特性을 糾明하기 위함 이었다. 즉, Mode I 試驗에서는 주로 引張形의 微細 龜裂이, Mixed Mode 試驗에서는 引張形과 아울러 剪斷形의 微細 龜裂이 기대되었다.



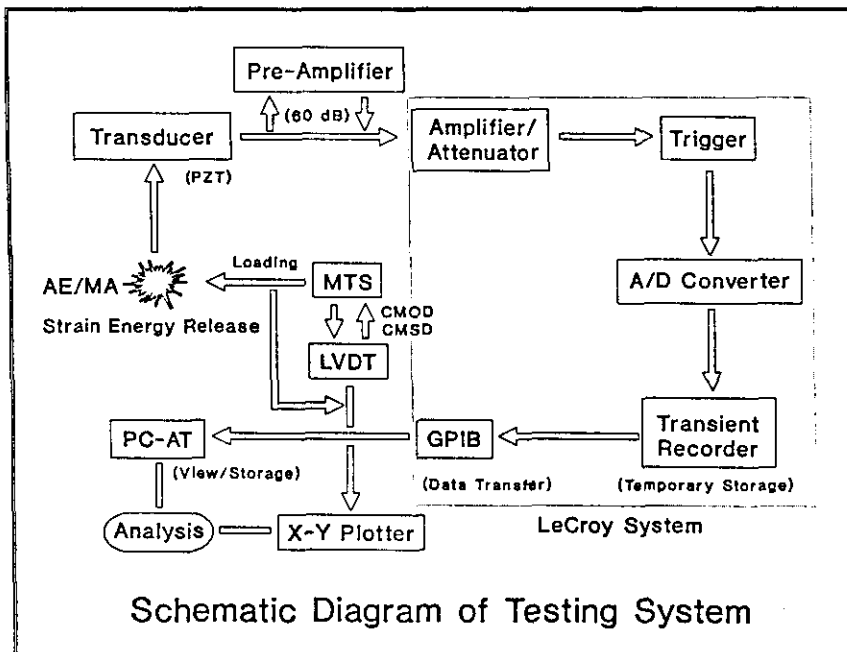
No.	L	W	B	S	S1	S2	S0	a	Mode
GT2	293	85	86	254	-	-	42	21.3	Mode I
GT3	301	65	46	260	-	-	24	16.3	Mode I
GS3	302	65	46	154	24	130	-	16.3	Mixed

단위: mm

(그림 4) 試料 形態 및 規格

荷重은 Close-Loop, Servo-Controlled Testing Machine에 의하여 일정 速度의 CMOD 또는 CMSD (0.0004 mm)로 조정되었으며, 이들 변위는 精度 0.00001 in. 의 LVDT에 의하여 測定 되었다. 또한, 시료 표면에 나타나는 균열은 試驗 중 배율 100 배의 현미경으로 관찰되어 각 荷重 단계별로 기록되었다. 전반적인 實驗 설치는 그림 5에 나타낸 바와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 Transducer에 의하여 수신된 신호는 System

에 도달하기 전에 1,000 배 (60 dB)로 增幅되며, 이 增幅된 信號에 의하여 그 크기가 一定 水準 이상인 경우 System이 自動으로 Trigger되어 作動하게 된다. System 내에서 信號는 숫자화 (A/D Converter)되고 최종적으로 Computer에 저장되게 된다.



(그림 5) 實驗 設置의 模式圖.

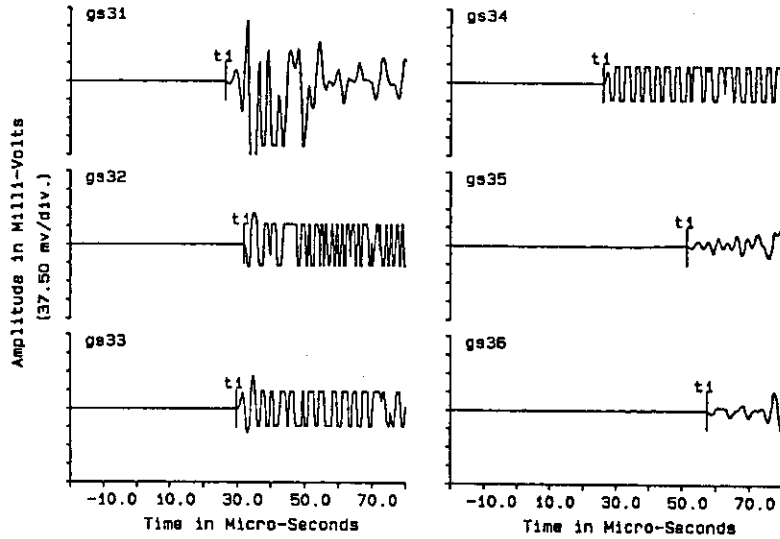
2) AE 波의 一般의 特性

6-Channel을 통하여 기록된 典型的인 AE 波는 그림 6에 보이는 바와 같이 微細 龜裂源과 수신점의 相對的인 거리와 方位에 따라 도달 시간과 첫 파동의 크기에 차이를 보이고 있다. Time History 중 단지 그 첫 파동만 解析에 이용되었는데 이는 제한된 시료의 크기 때문에 시료표면의 反射 또는 내부의 屈折에 의한 후속파의 교란을 防止하기 위함이었다. 첫 파동의 周波數는 200 - 350 kHz이었고, Millivolt Amplitude는 거리 및 수신점의 相對的인 位置에 따라 차이를 보이지만 대체로 수십 mv의 범위에 들었다.

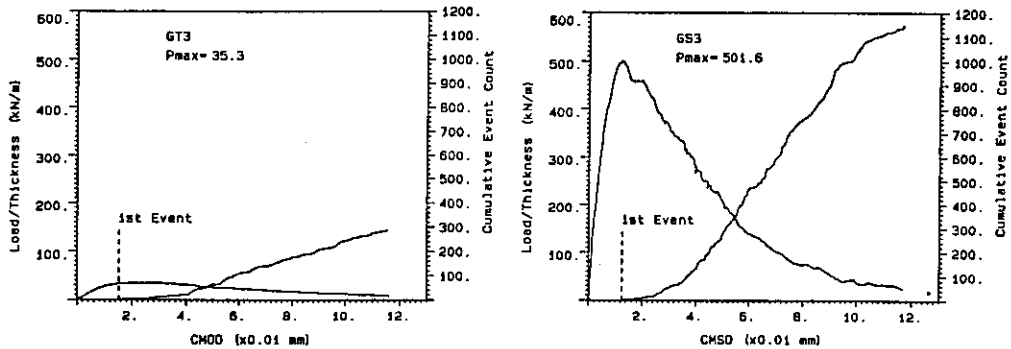
試驗 중 荷重이 增加되면서 最高 荷重의 약 90%에서 첫 AE가 發生하여 CMD가 增加함에 따라 점차 AE 發生 頻度가 增加하여 CMD가 0.04 mm 정도되면서 일정한 發生 頻도를 보이고 있다. 이로 미루어 보면 彈性 變形 중 일 때에는 시료 내부에 損傷의 정도가 크지 않음을 알 수 있다. 그림 7에 CMD-荷重 및 CMD-AE 수의 관계를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 Mode I 荷重 下의 GT3 試驗에서는 전체 290 개의 AE가 발생되었으며, Mixed Mode 荷重 下의 GS3 試驗에서는 1160 개가 기록되었다. GT3 試驗에서는 상대적인 Arm 길이가 길었기 때문에 그 最高 荷重이 GS3에 비하여 적었다.

龜裂源에서의 P 波의 強度는 GT3의 경우 0.476-3280.0 N- μ m의 범위로서 平均 300.7 N- μ m이며, GS3의 경우 0.215-4150.0 N- μ m의 범위로 平均 109.5 N- μ m 이었다. 여기서 흥미있는 것은 Mode I 試驗에서 얻어진 龜裂源의 強度가 Mixed Mode에서 보다 약 3배 정도 크고, 전체 AE 數는 반대로 약 25 % 정도 밖에 되지 않는다는 사실이다. 두 試料의 최종 破壞 면적이 비슷하다고 假定한다면 破壞에 소요된 에너지가 비슷할 것이기 때문에 언급한 바와 같은 결과는 당연한 현상인지 모른다.

EVENT: gs3#.0202
11.29.32.95.

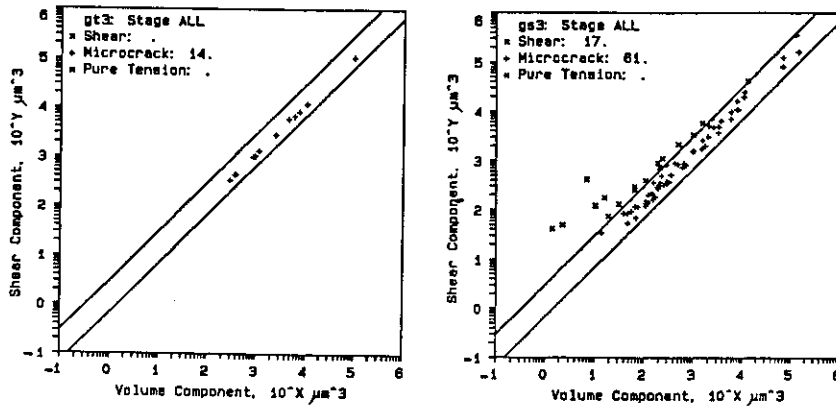


(그림 6) 6-Channel 에서受信된 典型的인 AE 波.



(그림 7) CMD 와 荷重 및 AE 數의 關係.

前述한 식 4에 따라 龜裂源의 形을 分類한 結果는 그림 8에 있다. Mode I 荷重 下의 GT3 試驗에서는 分析 가능한 AE 中에 剪斷形 龜裂源이 없는 것으로 나타났으나, Mixed Mode 試驗인 GS3에서는 전체의 약 22 %가 剪斷形 微細龜裂로 분류되었다. 또한, 龜裂源의 體積 成分을 比較하여 보면, 剪斷形 龜裂은 대략 $600 \mu\text{m}^3$ 미만이나, 引張形 龜裂은 최대 $150,000 \mu\text{m}^3$ 으로서 引張形 龜裂이 전반적으로 큰 것으로 나타났는데, 이는 引張 龜裂이 剪斷 龜裂 보다 더 큰 에너지를 放出함을 暗示한다.

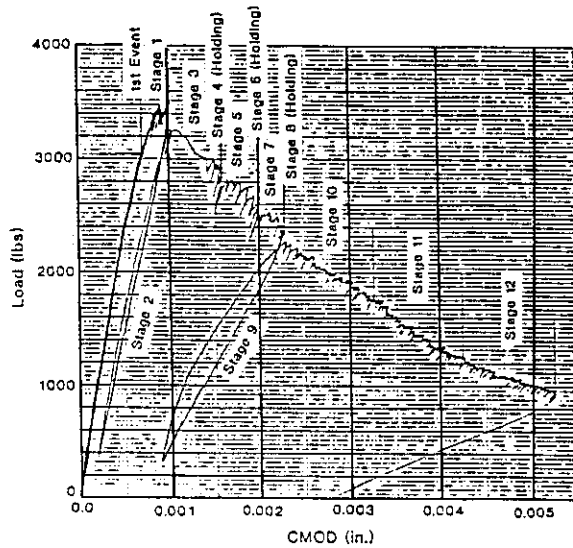


Remark: SH; Shear Type Source
 MC; Microcrack Type Source
 PT; Pure Tension Type Source

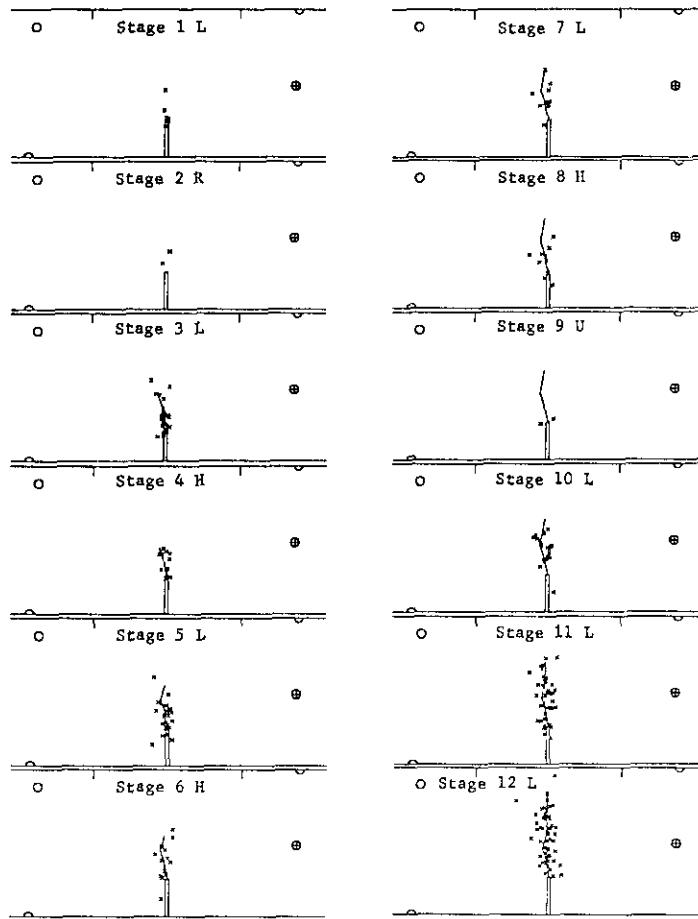
(그림 8) 龜裂源의 分類

3) 微細 龜裂源과 破壞面의 關係

그림 9 와 10에 Mode I 荷重下의 GT2 試驗에 대한 CMOD-Load 曲線에 따른 段階의 구분 및 相關 단계 별 微細 龜裂源과 시료 表面에서 관찰된 龜裂의 關係를 나타내었다. 微細 龜裂은 Unloading 이나 Reloading 할 때 보다 Loading 단계에서 많이 發生하였으며, 微細 龜裂源은 試料 龜裂 周邊에 集中되게 나타나서 微細 龜裂이 試料 破壞의 직접적인 原因임을 보여 주고 있다.

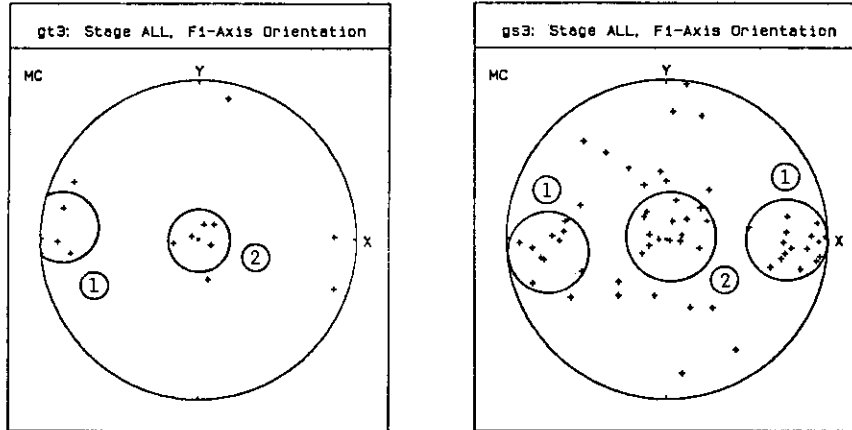


(그림 9) CMOD-Load 曲線과 段階 勾分.



(그림 10) 荷重 段階 別 龜裂源의 位置와 測定된 試料 龜裂의 關係.

微細 龜裂面의 方位를 확인하기 위하여 龜裂面에 鉛直으로 작용하는 힘, F_1 , 을 Stereo Net 상에 投影하면 그림 11과 같다. 여기서 각 점은 균열면의 Pole로서 微細 龜裂面이 크게 두개의 傾斜度, 즉, 거의 垂直인 것 ①과 거의 水平인 것 ②으로 구분되고 있음을 보여 주고 있다. 두 경우 모두 走向은 Y 軸 方向으로 시료의 최종 龜裂面과 一致함을 알 수 있다.



(그림 11) Stereo Net 上에 投影한 龜裂面의 極.

4. 結論

花崗岩 Beam 試料가 Mode I 및 Mixed Mode 4-Point 荷重으로 破壞되는 동안 放出한 일련의 AE 信號를 分析한 結果를 綜合하여 다음과 같은 微細 龜裂源의 特徵과 機構를 밝힐 수 있었다.

1) Mode I 荷重 下에서는 微細 龜裂源의 強度가 Mixed Mode 荷重下에서 보다 약 3배 정도 크지만, 記錄된 전체 AE 수는 Mixed Mode 시험의 25 % 밖에 되지않아서, 같은 크기의 試料 龜裂을 야기 시키는데 필요한 에너지는 一定함을 暗示하였다.

2) 引張形의 微細 龜裂은 최대 體積이 $150,000 \mu\text{m}^3$ 이나, 剪斷形은 $600 \mu\text{m}^3$ 미만으로 引張形이 相對적으로 큰 體積을 나타 내었다.

3) Mode I 荷重 下에서는 引張形 微細 龜裂이 압도적으로 優勢하였고, Mixed Mode 荷重 下에서는 引張 및 剪斷 龜裂이 3.6:1 比率로 分布하여서 微細 龜裂의 발생 機構가 荷重 條件과 밀접히 關係됨을 보여 주었다.

4) 첫 AE信號는 荷重이 最高 荷重의 약 90%에 달하였을 때 발생하여서 시료가 彈性 變形 중 일 때는 物質의 損傷이 크지않음을 알 수 있고, 시료 龜裂이 傳波되면서 AE信號의 發生 頻度가 增加하여 AE信號는 回復 不可能한 物質의 損傷과 關係됨을 確認하였다.

5) 微細 龜裂源은 試料 龜裂面 周邊에 集中되고 그 走向이 상호 일치하여 試料의 破壞는 内部의 微細 龜裂이 原因임을 알 수 있다. 그러나, 微細 龜裂面의 傾斜가 垂直 및 水平으로 양분되는 特徵을 보였는데, 이는 微細 龜裂들이 垂直 및 水平의 階段形으로 모여서 試料 龜裂을 형성하였을 可能性을 暗示하고 있다.

REFERENCES

1. 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, pp. 11-12.
2. Ohtsu, M. (1982), "Source Mechanisms and Waveform Analysis of Acoustic Emission in Concrete", Jour. of Acoustic Emission, Vol. 1, No. 2, pp.103-112.
3. Scruby, C.B., G.R. Baldwin and K.A. Stacey (1985), "Characterization of Fatigue Crack Extension by Quantitative Acoustic Emission", International Jour. of Fracture, Vol. 28, pp.201-222.
4. Scruby, C.B. (1986), "The Characterization of Crack Growth by Acoustic Emission", Progress in Acoustic Emission III, The Japanese Society of NDI, pp.1-8.
5. Hardy, H.R., Jr. (1977), "Emergence of Acoustic Emission/Microseismic Activity as a Tool in Geomechanics", Proceedings of 1st Conference on Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials, The Pennsylvania University, Pa., Trans Tech Publication, pp. 13-31.
6. Dowding, C.H. and G.W. Kim (1988), "Micro Seismic Motions from Expansive Agent induced Rock Fracturing", Final Project Report, U.S. Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, pp. 85.
7. 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., 124 pp.
8. Aki, K. and P.G. Richards (1980), Quantitative Seismology Theory and Methods, Vols. 1 & 2, Freeman and Co., San Francisco. 932 pp.
9. 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.