

취성재료의 파괴과정에서 A.E.에 의한 파괴원 위치 결정에 관한 연구

A Study on the Determination of Source Location in the Failure for Brittle Material

안병국*

Ahn, Byung-Kook

임한욱**

Lim, Han-Uk

이상은***

Lee, Sang-Eun

Abstract

The process of localization of cracks and movement of the fracture process zone(FPZ) was studied using the acoustic-emission(AE) techniques. The rate of AE events and sources of AE activity were studied for mortar and rock specimens loaded in uniaxial compression. A series of transducers could be used to detect an AE activity. Based on the time differences between detection of the event at different transducers, source of AE activity could be detected.

The rate of AE events increased sharply before peak load. The highest rate occurred just after peak load was attained. The effective crack length estimated from the modified linear-elastic fracture mechanics seemed consistent with the optical and AE measurements.

키워드 : 미소음방출, 파괴진행영역, 균열의 진전, A.E.사상계수

Keywords : Acoustic-emission, Fracture process zone, Progress of cracks, A.E events

1. 서론

최근 국내에서 발생한 각종 토목 구조물의 대형 사고로 인해 구조물의 안정성 확보 및 내구성 향상을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 암석 및 콘크리트와 같은 취성 재료의 미시적 파괴 특성은 매우 복잡한 양상을 보이고 있기 때문에 하중 증가에 따른 이들 재료의 변형 특성 및 미시적 파괴 기구들을 명확히 파악할 필요가 있으며 실제 구조물에 적용할 때는 이들 특성들을 on-line 모니터링 하여야 한다. 이미 선진국에서는 암석 및 콘크리트에 대한 균열 거동에 대한 해석을 동역학적 이론에 근거하여 해석한 후 파괴 역학 이론을 도입하려는 연구가 주를 이루고 있다.[1][2]

재료 내부의 미시적 파괴, 미소 균열의 발생 등과 같은 재료의 변형 거동을 일으킬 때 내부로부터 급속한 에너지개방에 의해 탄성파를 방출하는데 이를 미소음방출(Acoustic Emission, AE)이라 한다. 이 AE 신

호의 검출을 통하여 재료의 물리적 특성 뿐만 아니라 재료 내부의 손상을 유추할 수 있다.

AE 발생원 위치 추정 기법은 시편의 탄성과 속도와 AE 발생원에서 발생한 신호가 각각의 변환기에 도달하는 시간차이를 이용하여 발생원의 위치를 구하는 방법이다.

암반 내에 터널이나 공동을 건설할 때 초기응력이 교란되어 응력의 재배치가 이루어진다. 이때 응력 집중 등에 의해 암반 내에는 다수의 미소 균열의 확장 및 진전이 이루어진다. 이때 응력 재분배에 의해 암반 중의 탄성과 속도는 변하는 것으로 알려져 있다. 그러나 기존의 연구는 이러한 탄성과 속도의 변화를 고려하지 않은 1차원적인 위치 추정만이 이루어졌으나,[3][4] 최근에 이르러 이방성 속도장을 고려한 암석의 파괴원을 Simplex법을 도입하여 해를 구한 연구가 보고되고 있다.[5]

본 연구에서는 먼저 모르타르 및 콘크리트에 인위적인 노치(notch)를 만들고 이를 대상으로 단축압축실험을 실시하였다. 다음으로 확장압과 대리석 시편을 대상으로 동일한 시험을 수행하면서 미소파괴 과정의 변화 추이를 추적하였다.

* 강원대학교 지구시스템공학과 조교

** 강원대학교 지구시스템공학과 교수

*** 강원대학교 지구시스템공학과 연구원, 공학박사

실험결과 얻어진 자료를 1차원 해, 등방성 및 이방성 속도장을 고려하여 파괴원 해를 구하였으며 그 결과와 육안으로 시편의 표면에서 관찰한 균열의 성장 과정을 상호 비교하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 AE 특성

AE 신호를 이용하여 재료에 대한 파괴 시험을 실시할 때 일반적으로 시간 영역 해석을 이용하며 이와 같은 해석 기술을 AE 파라미터로 정의한다. AE 파라미터를 나타내면 Fig.1과 같다.

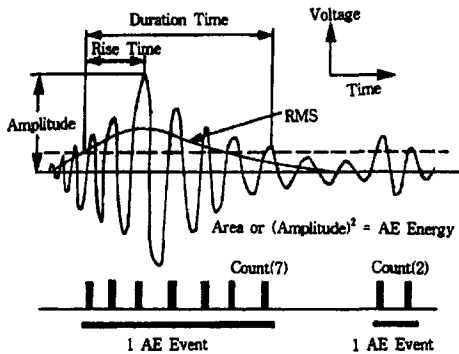


Fig. 1 Parameters of AE signals

(1) AE 계수(ringdown count and count rate) 및 사상 계수(event) - 사상 계수는 하나의 AE 신호 파형을 의미하며 AE 계수는 임계 전압을 넘는 신호의 개수로서 정의된다. 일반적으로 재료의 손상정도를 평가하는 수단으로 이용된다.

② AE 에너지 - AE 분석기 내의 디지털 적분장치를 이용하여 신호 자승의 포락선 면적을 구하는 것이다. 또는 에너지의 측정은 RMS 전압계를 이용하여 진폭의 평방평균을 구하기도 한다. AE 계수와 마찬가지로 재료 내부의 손상 정도를 평가하는 유용한 수단으로 최근에 주목되고 있다.

③ 진폭(amplitude) - AE 신호의 진폭은 손상의 강도(intensity)를 결정하는 지시자이다. 이것은 변환기의 응답 특성 뿐만 아니라 AE발생원으로부터 변환기의 위치에 의해 영향을 받는다. 진폭에 대한 보다 일반적인 접근은 파형 해석을 포함한다.

2.2 주파수 분석

시간영역에서는 시간에 따른 미소파괴음의 크기를 측정하지만 주파수 분석에서는 측정되는 미소파괴음

신호에서 가장 우세한 주파수 대역을 찾는 데 그 목적이 있다.

이를 수행하기 위하여 시간에 따라 변화하는 시간 영역의 파형을 주파수 영역으로 바꾸어야 한다. 이는 푸리에 변환(fourier transform)의 과정을 통해 이루어진다.

이는 시간영역의 함수를 어떤 일정한 주기와 진폭을 갖는 sine 곡선으로 분리해내는 것을 의미한다.

푸리에 변환은 다음 식으로 표시된다.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi f t} dt$$

$$X(f_k) = \sum_{i=0}^{N-1} x(t_i) e^{-j2\pi f_k t(t_{i-1}-t_i)} \quad (1)$$

$$(K=0,1, \dots, N-1)$$

여기서,

t : 시간 t_i, t_{i+1} : i, i+1에서의 시간

f : 주파수 f_k : k번째의 주파수

x(t) : 시간 변수의 함수

x(t_i) : t_i에서의 시간 함수

X(f) : 주파수 변수의 함수

X(f_k) : t_i에서의 주파수 함수

첫번째 식은 해석식이고, 두번째 식은 전산 푸리에 변환 식이다. 이때 주파수 영역에서 주파수 f에 대한 진폭 |X(f)|가 푸리에 스펙트럼, x(t)의 지속시간을 T로 하고, 시간이력의 평균에너지에 관계된 양 |X(f)|/T가 파워(power) 스펙트럼으로 정의된다. 변환된 주파수 영역의 함수는 복소수형으로, 다음과 같이 표시된다.

$$X(f) = R(f) + jI(f) = |X(f)|e^{j\theta(f)} \quad (2)$$

여기에서 R(f)와 I(f)는 각각 푸리에 변환을 복소수로 표시한 실수, 허수부이며, |X(f)|는 X(t)의 진폭이다. 한편 θ(f)는 위상각이며, 그 값은 θ(f) = tan⁻¹[I(f)/R(f)]이다. 측정 가능한 최대 주파수인 Nyquist Frequency는 일정시간에 대해 샘플링하는 경우 f_c = 1/2ΔT 이고 그 해상도는 1/NΔT 이 된다.(ΔT : 시간간격, N : Sampling N umber)

2.3 파괴원 위치의 결정

일반적으로 배열된 검출기의 내부에 파괴원이 존재하고 있을 때에는 직접계산법(direct method)으로도

간단하면서도 정확하게 값을 얻을 수 있다. 그러나 AE 파괴원이 배열된 검출기의 외부에 존재하는 경우는 소요 검출기보다 많은 수의 검출기를 사용하여 반복적으로 오차를 줄이는 방법을 사용한다.[6]

(1) 등방성 속도장의 경우

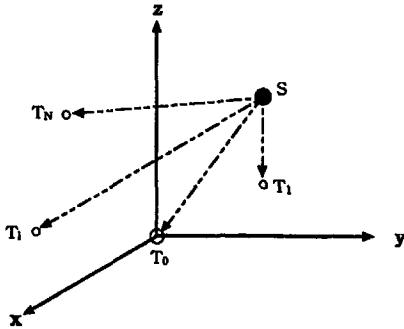


Fig. 2. Locations of the source S and transducers(T_0, T_1, \dots, T_N)

Fig.2와 같이 AE 변환기 T_0 의 위치를 원점으로 하는 3차원 좌표를 만들고, i 번째 변환기 T_i 의 좌표를 (a_i, b_i, c_i) 로 한다. 이때 파괴원의 위치는 $S(x, y, z)$ 로 한다. 또 물체내 파의 전파속도를 v , S로부터 원점까지의 파의 도달시간을 t_0 , S점에서 각각 T_0 와 T_i 까지 파의 도달시간의 차이를 t_i 라하면, 파괴원 S로부터 변환기 T_0 까지의 거리 R 은 식(3)과 같이 주어진다.

$$R_0 = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

$$R_i = \sqrt{(x - a_i)^2 + (y - b_i)^2 + (z - c_i)^2} = v(t_0 + t_i) \quad (3)$$

$$(i = 1, 2, \dots, N-1)$$

식(3)은 x, y, z, v, t_0 를 미지수로 하는 N 개의 구면 방정식이다. t_0 는 직접적으로 알 수 없는 값이기 때문에 일반적으로 이 값을 제거하고 각 변환기에서의 도달시간차 t_i 만을 이용한 식으로 변형한다. 즉,

$$\sqrt{(x - a_i)^2 + (y - b_i)^2 + (z - c_i)^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = vt_i \quad (4)$$

$$(i = 1, 2, \dots, N-1)$$

식(4)는 자승 쌍곡면 방정식이고 그 해는 $N-1$ 개의 쌍곡면 교점으로 구할 수 있다. 즉 x, y, z, v 에 관한 비선형 연립방정식으로 해를 구하기 위해서는 최소한 5개의 AE 변환기가 필요하다. 또한 이 식은 직접계산

으로 해를 구하는 것은 어렵기 때문에 각 식을 자승한 차를 가지고, i 번째와 j 번째의 차로부터 식 (5)와 같이 선형연립방정식으로 변형한다.

$$A_{ij}x + B_{ij}y + C_{ij}z + D_{ij}v^2 = E_{ij}$$

$$A_{ij} = 2(a_i t_i - a_j t_j)$$

$$B_{ij} = 2(b_i t_i - b_j t_j)$$

$$C_{ij} = 2(c_i t_i - c_j t_j) \quad (5)$$

$$D_{ij} = 2(d_i t_i - d_j t_j)$$

$$E_{ij} = t_j(a_i^2 + b_i^2 + c_i^2) - t_i(a_j^2 + b_j^2 + c_j^2)$$

$$(i = 1, \dots, N-1; j = \dots, N-1) (i \neq j)$$

식(5)로부터 $t_j \neq 0$ 이면 $N-2$ 개의 식을 얻을 수 있다. 이 식으로부터 x, y, z 를 구하기 위해서는 최저 6개의 변환기가 필요하다. 전파속도 t_i 항목이 위 공식의 각항에 포함되어 있으며 이것이 계측오차에 큰 영향을 주는 것으로 여겨진다. 계측오차가 전혀 없는 경우에는 정확한 파괴원 위치를 구할 수 있지만 실질적으로 정확한 위치를 추정하기는 어렵다. t_i 의 오차가 클 때는 일차 근사해 $X^a = (x^a, y^a, z^a)$ 에 대해 진해(眞解)는 $X^a + \Delta X = (x^a + \Delta x, y^a + \Delta y, z^a + \Delta z)$ 이다.

식(3)의 무리식을 테일러(Taylor) 전개하면 식(6)과 같이 주어진다.

$$R_i \approx R_i^a + l_i^a \Delta x + m_i^a \Delta y + n_i^a \Delta z \quad (6)$$

$$(i = 1, \dots, N-1)$$

여기서,

$$R_i^a = \sqrt{(x^a - a_i)^2 + (y^a - b_i)^2 + (z^a - c_i)^2}$$

$$l_i^a = \frac{x^a - a_i}{R_i^a}, \quad m_i^a = \frac{y^a - b_i}{R_i^a}, \quad n_i^a = \frac{z^a - c_i}{R_i^a}$$

식(3)에서 오차 ϵ_i 를 도입하여 식(6)에 대입하면 식(7)과 같다.

$$\epsilon_i = vt_i - (R_i^a - R_0^a) - (l_i^a - l_0^a, m_i^a - m_0^a, n_i^a - n_0^a) \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$(i = 1, 2, \dots, N-1)$$

식(7)의 우변 제 1, 2항을 정리해서 열벡터 $\{\delta^a\}$ 로 나타내고 방향여현의 행렬을 $[K^a]$ 로 표시하면 식(8)로 표시된다.

$$\{\epsilon\} = \{\delta^a\} - [K^a]\{\Delta X\} \quad (8)$$

이때 자승오차 ψ 는 $\psi = \{\epsilon\}^T \{\epsilon\}$ 에서 구할 수 있다. 그러나 최소자승오차로 되는 것처럼

$$\frac{\partial \psi}{\partial \{\Delta X\}} = \frac{\partial \{\epsilon\}^T \{\epsilon\}}{\partial \{\Delta X\}} = 0 \text{ 이기 때문에,}$$

$$\{\Delta X\} = ([K^a]^T [K^a])^{-1} [K^a]^T \{\delta^a\}$$

로 결정된다. 다시 $X^a + \Delta X$ 를 1차 근사해로 생각하고 식(6)으로부터의 과정을 반복하여 $\Delta X \approx 0$ 까지 반복계산을 실행하면 원하는 값을 구할 수 있다.

(2) 이방성 속도장의 경우

등방성 속도장에서 1차원 근사해로부터 개략적인 파괴원의 위치를 구한 다음 이 파괴원의 위치를 이용하여 각각의 검출기에서 검출되는 속도를 구한다.

3차원 좌표계(x, y, z)를 생각하고 X, Y, Z 방향의 전파속도를 각각 v_x, v_y, v_z 로 하면, 방향여현(cosine direction) 및 방향여현을 갖는 방향에서의 전파속도 v 는 식(9)와 같이 주어진다.

$$l = \frac{|x_i - x|}{\sqrt{(X - i - X)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}}$$

$$m = \frac{|y_i - y|}{\sqrt{(X - i - X)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}} \quad (9)$$

$$n = \frac{|z_i - z|}{\sqrt{(X - i - X)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}}$$

$$v = \sqrt{v_x^2 l^2 + v_y^2 m^2 + v_z^2 n^2}$$

위 식에서 전파속도의 이방성을 고려하면 파괴원으로부터 각 변환기까지의 방향여현을 알아야 한다. v_x, v_y, v_z 의 평균속도를 사용하여 1차 근사해를 구하고, 식(9)를 이용하여 그 해를 수정하는 것이다.

평균속도를 이용하여 1차 근사해 X^a 가 구해진 후 전파 동일한 상태로 해는 $X^a + \Delta X$ 에 있다고 생각한다. 식(9)와 각 변환자 T_i 에서의 방향여현 (l_i^2, m_i^2, n_i^2)을 이용하면 전파속도 v_i 는 다음식과 같이 변환할 수 있다.

$$t_i = \frac{\sqrt{(x^a + \Delta x - a_i)^2 + (y^a + \Delta y - b_i)^2 + (z^a + \Delta z - c_i)^2}}{v_i} - \frac{\sqrt{(x^a + \Delta x)^2 + (y^a + \Delta y)^2 + (z^a + \Delta z)^2}}{v_0} \quad (i=1, 2, \dots, N-1) \quad (10)$$

위 식에 식(6)을 대입하면 식(11)과 같다.

$$t_i = \frac{1}{V_i} (R_i^a + l_i^a \Delta x + m_i^a \Delta y + n_i^a \Delta z) - \frac{1}{v_0} (R_0^a + l_0^a \Delta x + m_0^a \Delta y + n_0^a \Delta z) \quad (i=1, 2, \dots, N-1) \quad (11)$$

식(11)을 다시 전개하면 식(12)로 표현될 수 있다.

$$\left(\frac{l_i^a}{v_i} - \frac{l_0^a}{v_0}\right) \Delta X + \left(\frac{m_i^a}{v_i} - \frac{m_0^a}{v_0}\right) \Delta Y + \left(\frac{n_i^a}{v_i} - \frac{n_0^a}{v_0}\right) \Delta Z = \left(t_i - \frac{R_i^a}{v_0} + \frac{R_0^a}{v_0}\right) \quad (i=1, 2, \dots, N-1) \quad (12)$$

위 식에 오차 ϵ_i 를 도입하여 최소자승법을 적용하면, ΔX 가 결정되며 반복법에 의해 $\Delta X \approx 0$ 까지 반복하여 파괴원을 구할 수 있다. 식(12)는 전파속도 v_i 가 이방성이 아니라고 가정하면 식(8)과 일치한다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 시편의 준비

사용된 시료는 모르타르, 콘크리트, 황등 화강암, 여산 대리석의 4종류로 각주형 시편을 제작하였다. 이때 모르타르 시편의 배합 비율은 물:시멘트:모래가 1:2:4이고 콘크리트 시편은 물:시멘트:모래:자갈이 1:2:3:5.2이다. 모래의 입도 분포는 0.2-2mm로 하였고 자갈은 6-13mm로 입도를 조정하였다. 모르타르와 콘크리트 시편의 치수는 10cm×10cm×20cm이며 암석 시편의 치수는 5cm×5cm×10cm이다. 시편의 상하 단면은 표면 연마기를 사용하여 ±5/100mm까지 정밀 가공하였다.

모르타르와 콘크리트는 미소 균열의 발생지점을 확인할 목적으로 양쪽 단면으로부터 5cm 떨어진 지점에서 가압 방향과 45° 각도로 4.25cm의 노치(notch)

를 형성하였다. 이때 노치 폭은 1mm이고 양쪽 노치를 중심으로 전단 파괴가 일어나도록 유도하였으며 구체적인 시편의 형상 및 치수는 Fig. 3과 같다.

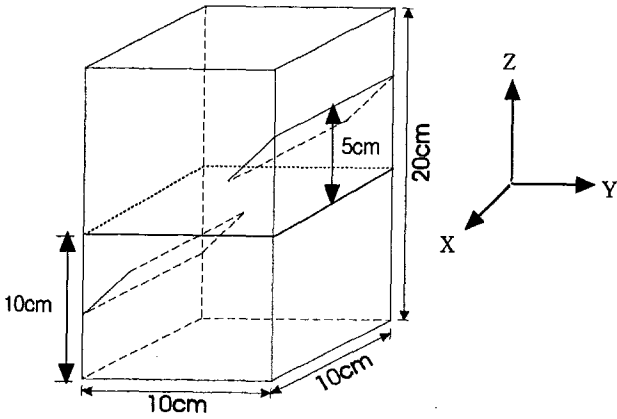


Fig. 3. Diagram of Specimen including notch

3.2 실험장치

본 실험에 사용된 압축 시험기의 최대 가압 용량은 2000 KN이다. AE 파라미터 분석을 위해 총14개의 채널로 구성되어있는 AE 분석기(미국 PAC 사, Model : LOCAN-320)가 사용되었다. 또한 파괴원 위치를 결정하기 위해서 발생된 AE 신호를 저장하는 장치가 필요하며, 이 연구에서는 샘플링 시간을 50 MHz까지 이용할 수 있는 게이지 스크오프(gagescop, Model GS512) 파형 기억 장치를 이용하였다. 파괴원 위치 결정을 위한 실험에서 응력-변형을 거동을 조사하기 위해 사용된 장비는 디지털 변형을 기록계이다.

한편 가압중인 시편의 전파속도를 측정할 때 가압 방향에 수직한 방향은 시편의 표면에 부착된 변환기를 이용하면 가능하다. 그러나 가압방향과 평행한 방향의 전파속도 측정은 시편 상·하면의 가압판과 지

지판의 영향으로 변환기를 부착할 수 없기 때문에 Fig. 4와 같이 플레이트를 제작하여 사용하였다. 그림의 플레이트 내부로 2개의 변환기를 삽입하여 하나의 변환기는 펄스 입력에 의한 발진기로 사용하였으며 다른 하나는 수신기로 이용하였다. 그리고 변환기로부터 나오는 라인은 플레이트의 가늘고 긴 홈으로 빠져 나오도록 하였다. 이때 펄스 입력은 AE 분석기의 백패널(back panel)에 있는 펄스 발생기를 이용하였다.

3.3 실험방법

각주형 시편에 종, 횡방향으로 2개의 변형을 게이지를 부착한 다음 파괴원 위치 추정을 위해 소정의 위치에 8개의 변환기를 실리카 구리스를 이용하여 시편 표면에 부착한다. 이때 2개의 변환기는 하중 및 응력 증가에 따른 가압 방향에 수직한 방향의 탄성과 전파속도를 측정하기 위해 사용되는 펄스 입력을 위한 변환기이다. 변형을 게이지와 AE 변환기를 부착한 시편을, 제작한 플레이트 위에 설치하며 이때 유압원에서 발생하는 진동에 의한 소음을 줄이기 위해 재하장치와 플레이트 사이에 실리카 구리스를 바른다. 그리고 재하 시험중에 AE, 하중, 변형을 기록, 파형 기억 장치를 위해 모니터 및 기록장치를 작동시키고 수동으로 시편을 재하판과 접촉시킨 후 초기 변형을 값 및 각 방향에 따른 탄성과 전파 속도를 구한다. 하중을 비교적 일정하게 30 N/sec의 속도로 가압하였으며 매 4.9 KN씩 증가할 때마다 하중을 일정하게 유지하고 가압 방향 및 가압 방향에 수직한 방향의 탄성과 전파속도를 측정하였다. 이때 하중이 일정하게 유지되는 동안 AE 분석기와 파형 기억장치는 일시 정지 상태로 유지한다. 그후 암석 시편이 파괴에 이를 때까지 이 조작을 반복 수행한다.

3.4 AE 계측 시스템

본 연구에서는 암석 시편 내부에서 발생하는 AE를 고정밀도의 감도로써 계측하기 위하여 광대역 변환기 WD-A(미국, PAC 사)를 사용하였고 잡음을 제거하기 위해 주파수 대역은 100-1000 KHz로 설정하였다. 또한 사용된 사전증폭기(preamp.)는 1220-30H HIGH PASS(미국, PAC 사)로 30 KHz 이상의 주파수 성분에 적합한 증폭기를 사용하였다.

Fig. 5는 모르타르와 콘크리트 파괴실험시 파괴원 위치 추정을 위해 사용된 6개의 변환기의 위치를 나타낸 것으로 1번과 2번 변환기는 가압 중의 전파속도를 측정하기 위해 수신기로서 사용된다. 또한 이것은 가압중에는 파괴원 위치 추정을 위한 변환기로 사용

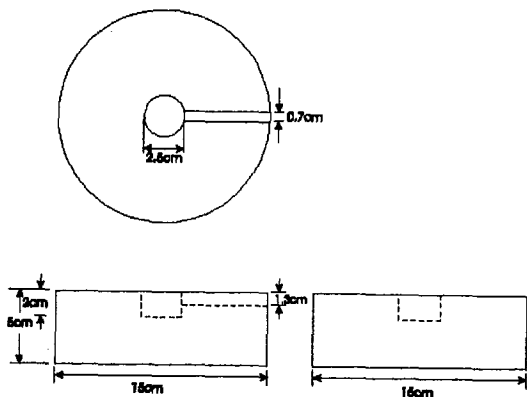


Fig. 4. Plate manufactured for measuring P-wave velocity at loading direction

된다. 1번과 2번 변환기의 반대편에 부착된 변환기는 펄스 입력을 위한 발진기로 사용하였다. 다만, 황동 화강암과 여산 대리석은 기하학적으로 위와 동일하게 변환기를 배치하였으나 모르타르와 콘크리트에 비해 절반 치수로 하였다.

Fig 6은 본 실험의 실험 과정을 블록 다이어그램으로 표시한 것이다. 하중을 증가시키면 시편 내부에서는 기존 균열의 확장 및 진전, 새로운 균열의 형성 등에 의해 발생된 파괴음이 전파되어 시편 표면에 부착

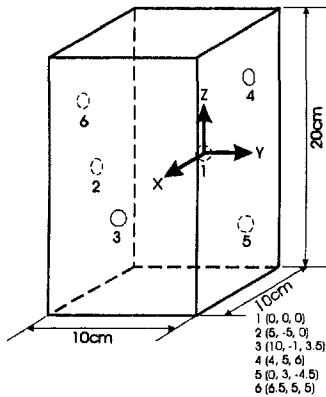


Fig. 5. The location of transducers

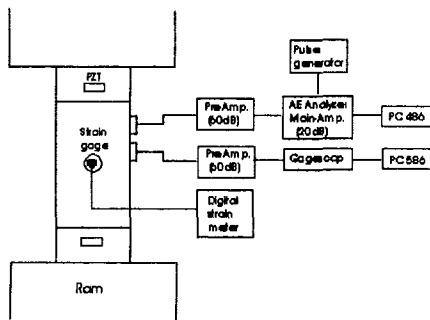


Fig. 6. Block diagram of experimental setup for AE measurements

된 6개의 AE 변환기에 도달하게 된다. 변환기에 도달된 신호는 사전증폭기에서 60 dB로 1차 증폭되며 증폭된 신호는 다시 AE 분석기의 주증폭기(mainamp.)를 통해 20 dB로 증폭된다. 증폭된 신호는 A/D 전환기를 통해 AE 파라미터로서 계수화된다.

파괴원 위치 추정을 위해 검출된 파형은 게이지 스코우프 카드 4개를 내장한 개인용 컴퓨터가 사용되며, 이것은 1차 증폭된 신호로부터 T자형 BNC 커넥터를 통해 개인용 컴퓨터의 하드 드라이버에 샘플링 시간 간격 5 MHz로 자동 기억시킨다.

4. 실험 결과 및 해석

4.1 주파수 대역의 분포

각각의 시편에 대해 파괴 응력의 10, 50, 90% 응력 수준에 따른 주파수 분석 결과는 Fig. 7과 같다.

Fig. 7(a)는 모르타르의 하중 수준별 주파수 응답 특성을 나타낸 것으로 파괴 응력의 10% 응력 수준에서 탐지된 파형의 주파수 분석 결과 1, 2, 6번 채널의 경우는 어느 정도 범위를 갖는 평탄한 대역을 보이는 것이 관찰되나 3, 4, 5번 채널은 100 KHz 부근에서 최대를 보인 후 뚜렷하게 감소하는 경향을 보인다. 이 결과는 거리에 따라 고주파수 대역의 감소를 보임에 따라 신호의 감쇠 현상이 일어남을 예측할 수 있다. Fig. 7(a)의 두 번째 기둥(column)은 50% 응력 수준으로 첫 번째 기둥에 비해 변환기와 파괴원과의 거리가 비교적 멀리 있으나 첫 번째보다 신호의 진폭이 큰 경우이다. 첫 번째 기둥의 주주파수는 102-117 KHz로 나타났지만 두 번째는 34-107 KHz로 저주파 경향을 보이고 있다. 이것은 단지 거리가 멀리 떨어져 있어 고주파 성분의 감쇠 영향으로 추정할 수 있다. 세 번째 기둥은 90%의 응력 수준에서 첫 번째와 두 번째에 비해 상대적으로 8배 정도 훨씬 큰 신호의 주파수를 보인다. 고주파수 대역과 저주파수 대역의 구분이 뚜렷함을 보이고 있다. 도달시간은 2, 6, 1, 3, 4, 5의 순으로 탐지되었다. 이때 주주파수 분포는 83-229 KHz이다. 모르타르 시편의 주파수 대역은 대체적으로 50-500 KHz의 분포를 보인다. 이 같은 현상은 탐지된 파형의 진폭이 상대적으로 크면 일반적으로 고주파수 대역을 보이고 있으나 이는 거리에 따라 영향을 받는 것으로 생각된다.

Fig. 7(b) 콘크리트 시편의 파괴 실험에서도 모르타르와 동일한 주파수 응답 특성을 보이지만 주주파수는 97-493 KHz로 더 크게 관찰되었다. 이것은 일반적으로 모래와 시멘트로만 제작된 고른 입자 분포를 갖는 모르타르에 비해 자갈이 혼합되어 파괴 규모가 다소 큰 때문으로 판단된다.

Fig. 7(c)와 (d)의 경우의 주파수 대역 분포는 일반적으로 100 - 500~900 KHz이나 주주파수는 화강암이 98-532 KHz, 대리석은 98-444 KHz이다. 이 시편들 또한 위에 고찰한 주파수 응답 특성 경우와 유사한 경향을 보인다.

한편 취성 재료는 진폭분포로 추정하건데 파괴 하중이나 응력에 가까워질수록 일반적으로 파괴 규모가 증대되는 것으로 알려져 있다.[7] 따라서 주파수 대역의 분포 역시 위의 고찰로부터 추정하면 파괴 응력에

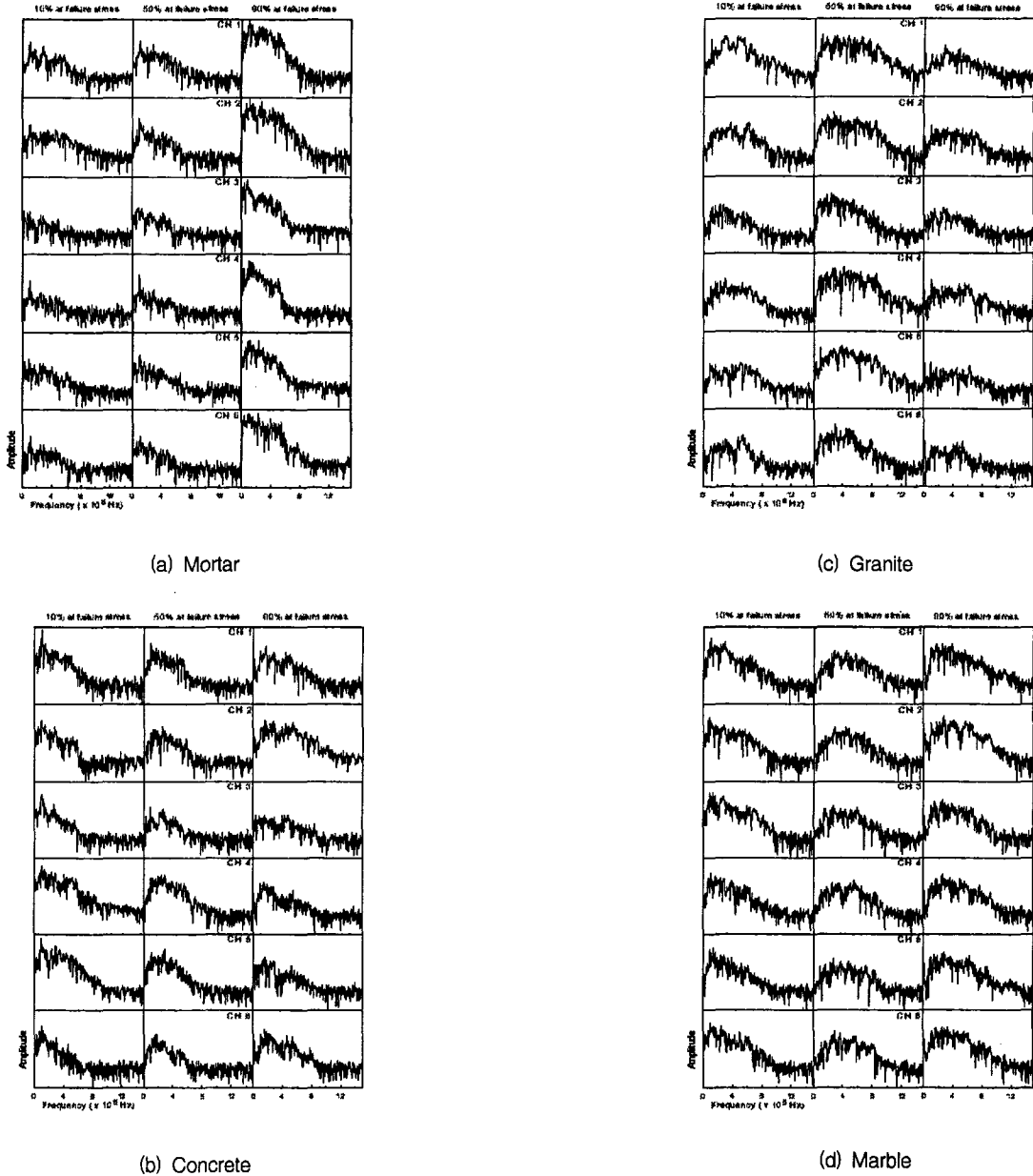


Fig. 7. Frequency analysis of waveforms detected by 6-transducers at various stress level in each specimen

가 가워질수록 일반적으로 고주파 대역의 분포를 보인 것으로 추정된다.

4.2 응력 수준에 따른 전파속도의 변화

암석에 단축압축을 가하면 암석 내에서는 가압 방향과 평행한 방향으로 초기에 기존의 균열이나 공극이 닫히는 현상이 발생한다. 그 이후 균열이 진전되고 새로운 균열이 발생하게 된다. 즉 가압 방향으로서는 기존의 균열 및 공극이 닫히면서 일반적으로 전파 속도가 빨라지게 되며 가압 방향과 수직인 방향으로서는 전파 속도가 느려지는 경향을 보인다. 이와 같은 현상으로 인하여 암석 내의 전파속도는 약 40-50%까지 이

방향을 보이는 것으로 보고되고 있다.[8]

그러나 위와 같은 현상은 암석의 결정 조직, 배열, 그리고 암석의 물성(특히, 공극율) 등에 따라 달라지는데 그 결과는 앞에서 설명한 바와 같은 전파 속도의 이방성 결과가 얻어지지 않고 오히려 가압 방향에 수직인 방향으로의 전파 속도가 빨라지는 경우도 보고되어 있다.[9]

각 시편에 대해 각각의 하중 및 응력 수준에 따른 탄성과 속도 변화를 나타내면 Fig. 8과 같다.

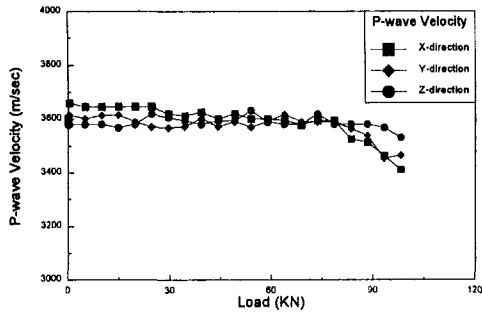
Fig. 8(a)와 (b)는 모르타르와 콘크리트 시편의 파괴 실험에서 가압 하중에 따른 P파 전파 속도의 변화를 나타낸 것이다. 이 시편은 Fig. 3과 같이 양쪽에

45°의 각도를 갖는 노치를 형성한 것이다. 이때 노치의 폭은 1mm이고 노치의 길이는 4.24cm이다. 가압방

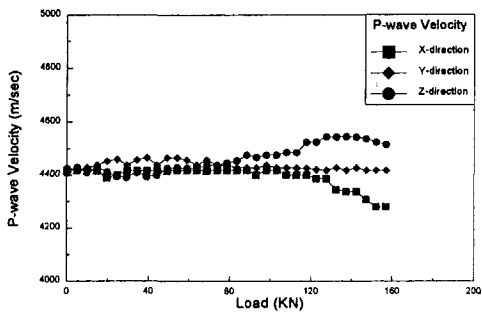
향과 수직한 두 방향 즉 X와 Y 방향의 P파 속도의 변화는 두 시편 모두 X 방향의 전파 속도 X, Y 방향의 전파속도 보다 이방성이 다소 큰 것으로 보인다. 이것은 X 방향 전체에 걸쳐 응력 집중이 작용된 결과이며 Y 방향에서는 단지 중심축 부분에서만 응력 집중이 작용되기 때문이다. 또한 Z 방향 역시 노치를 따라 응력 집중이 분포되기 때문에 그 부분을 제외하고는 탄성과 전파 속도의 변화가 거의 없을 것으로 판단된다.

한편, 화강암은 가압 방향과 평행한 방향에서는 공극 및 기존 균열의 닫힘 현상으로 인하여 상당한 전파 속도의 증가를 보이며, 반면에 수직한 방향에서는 전파 속도가 감소함을 알 수 있다. 이 결과는 Soga 등[10]의 연구 결과와 비교적 잘 일치한다.

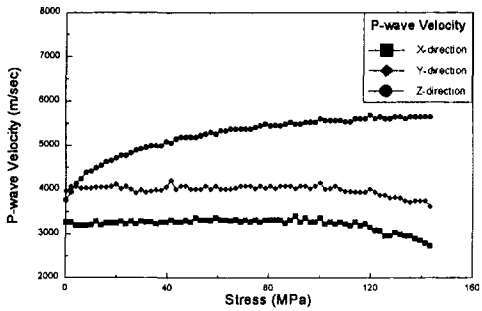
그러나 대리석의 경우 가압 방향과 평행한 방향에서의 P파 전파 속도 변화는 화강암의 경우와 유사한 특징을 보이나 수직한 방향에서는 오히려 P파 전파 속도가 증가하는 특이한 현상을 보인다. 이 같은 현상은 S파로부터 속도 이방성을 고려한 Chandra S. Rai 등의 연구[9]와 비교적 일치한다. 이것은 대리석의 벽개 발달과 같은 미세 균열의 방향성에 그 영향이 있을 것으로 추측된다. 위의 결과를 요약하면 Table 1과 같다.



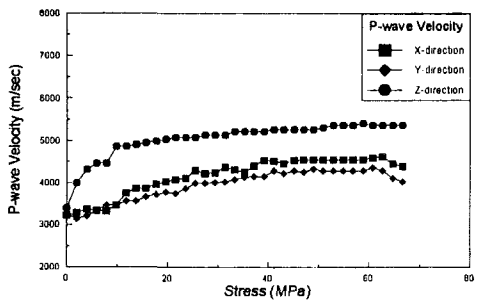
(a) Mortar



(b) Concrete



(c) Granite



(d) Marble

Fig. 8. The relation between stress vs. P-wave velocity

Table 1. The variation of P-wave velocity at ultimate failure

	Mortar	Concrete	Granite	Marble
Parallel to loading axis	3% decrease	2% increase	48% increase	59% increase
Perpendicular to loading axis	3-7% decrease	0-3% decrease	25-35% decrease	10-15% increase

4.3 파괴원 위치 추정 결과

- (1) 1차원 근사해, 등방성, 이방성 속도장에 의한 파괴원
- (가) 모르타르와 콘크리트

Fig. 9는 모르타르와 콘크리트의 시편에 대하여 미소 파괴음 전파 속도가 응력이 0 상태에서 3방향의 초기속도 변화가 없다고 가정하고 해석한 경우이다. ㉠은 파괴원 위치 추정에서 설명한 바와 같이 1차원 근사해, ㉡는 3방향 속도의 평균값을 이용하여 반복법에 의해 구한 파괴원 위치 즉, 등방성 속도장을 이용한 해석, ㉢는 3방향 속도가 모두 다른 조건에서 반복법에 의해 구한 파괴원 위치, 즉 이방성 속도장을 이용한 해석을 나타낸 것이다. Fig. 10은 Fig. 9와 동일한 시편에 대한 실험으로 응력수준에 따른 전파속도의 이방성을 고려한 경우이다.

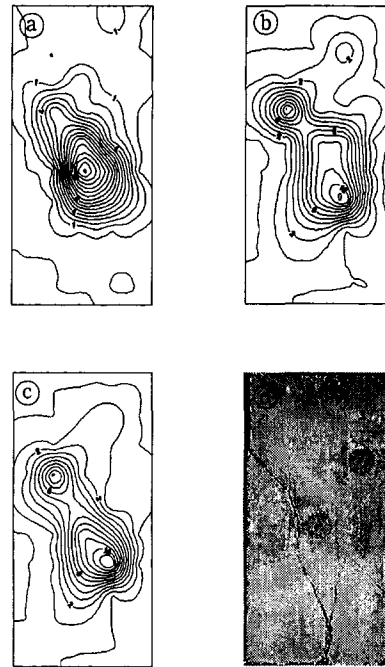
Fig. 9(1)에서 모르타르 시편을 보면 등방성과 이방성 속도장에 의한 해석 결과는 거의 동일한 결과를 보이는데 이것은 모르타르의 P파의 초기속도가 3600 m/sec로 각 방향에 따라 특이하게 변화를 보이지 않을 뿐만 아니라 각각의 하중 수준에서도 전파 속도의 변화는 거의 없기 때문이다.

Fig. 9와 Fig. 10의 그림을 비교해 보면 ㉔의 경우 이방성 속도를 고려하였기 때문에 파괴원 해석이 서로 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

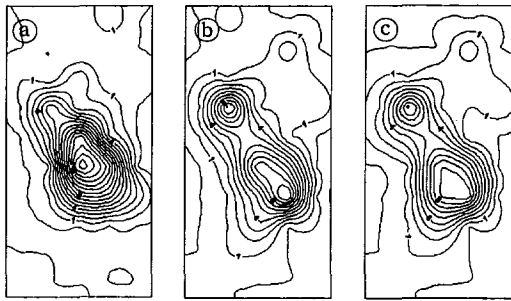
1차 근사해의 경우는 Fig. 9와 Fig. 10 모두 시편 중심부에서 파괴원의 밀도가 높은 것으로 나타났는데 실제 관찰된 균열의 발생지점과 상당한 오차를 보인다. 이같은 결과는 비선형 연립 방정식의 해를 구할 때 오차에 대한 고려없이 해석하였기 때문이다.

한편, 등방성과 이방성 속도장에 의한 파괴원 해석 결과는 파괴된 시편의 형상과 비교할 때 표면 균열이 발생된 지점과 상당히 유사한 형태를 지닌다.

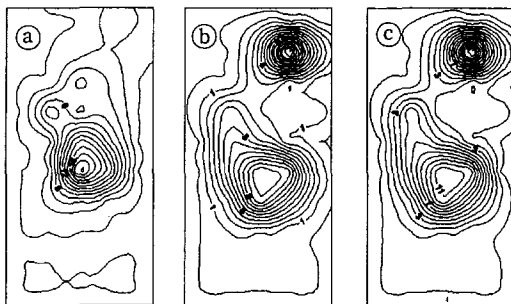
이들 결과로부터 하중 수준에 따라 전파 속도의 변화를 고려하는 경우, 초기 속도로 해석한 경우보다 파괴된 모양과 잘 일치하며, 1차원 근사해, 등방성 속도



(1) Mortar (total number of samples : 90)



(1) Mortar (total number of samples : 91)



(2) Concrete (total number of samples : 112)

Fig. 9. Contour of AE sources determined by initial velocity at zero stress, ㉑ 1st approximation, ㉒ isotropic, and ㉓ anisotropic velocity, in Mortar and Concrete specimen (Y-Z plane)

Fig. 10. Contour of AE sources determined by the variation of P-wave velocity at each direction in 0-100% stress of failure strength, ㉑ 1st approximation, ㉒ isotropic, ㉓ anisotropic velocity, ㉔ view of failure plane, in Mortar and Concrete specimen

장을 고려한 해석, 이방성을 고려한 해석의 순으로 실제 관찰된 표면 균열 및 파괴면과 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

(나) 화강암과 대리석

앞 부분에서 확인된 것처럼 1차원 근사해는 상당한 오차를 보이고 있음이 확인되었기 때문에 화강암과 대리석 시편들은 등방성 속도장과 이방성 속도장에 의한 파괴원 해석만을 비교하기로 한다.

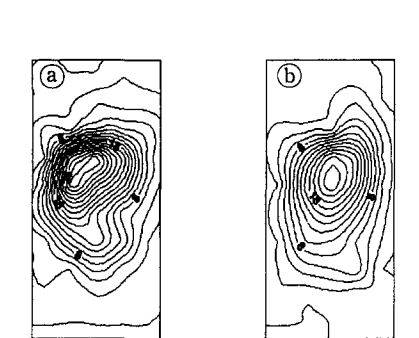
Fig. 11은 화강암과 대리석 시편에 대하여 Fig. 9와 같은 조건으로 파괴원해석을 한 결과이다. 그리고 Fig. 12는 Fig. 10과 같은 조건에서 해석한 결과이다.

Fig. 11에서 (1) 그림을 보면 좌측(a) 등방성 해석은 수평 중심축에서 좌상부로 파괴원이 집중된 경향을 보이고 있으며 우측(b) 이방성 해석은 수평 중심축에서 약간 위로 파괴원이 집중되었음을 보인다. 이 두 그림을 비교하면 서로 상이한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 이것은 가압 방향과 수직인 X 방향의 초기 전파 속도가 가압 방향과 평행한 Z 방향과 Y방향에 비해 상대적으로 초기 전파 속도가 상대적으로

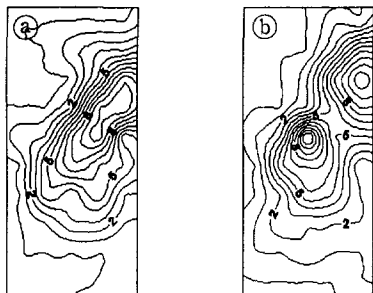
느리기 때문인 것으로 생각할 수 있다.

대리석의 경우 좌측(a) 그림과 우측(b) 그림 간의 전체적인 등고선의 경향은 유사하다. 이것은 모르타르와 콘크리트 시편의 경우에서 검토한 바와 같이 3방향의 초기 전파 속도가 거의 동일하기 때문이다. 그러나 파괴원 발생 지점을 살펴보면 집중적으로 파괴원이 분포된 지역만 약간의 차이가 있음을 알 수 있다. 이것은 단지 가압 방향과 평행한 방향으로의 전파 속도가 수직 방향에 비해 약간 빠르기 때문인 것으로 생각된다. 이들 결과를 고려해보면 이방성 해석의 경우 등방성 해석에 비해 우측 및 위쪽 방향에 파괴원이 집중된다.

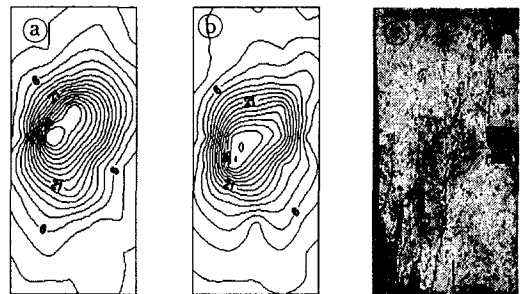
Fig. 12의 (1) 그림을 보면 등방성 해석과 이방성 해석의 경우 비슷한 형태를 취하고 있으나, (a)는 집중 분포된 파괴원의 위치가 좌상부로 치우쳐 있는데 반하여 (b) 그림은 중앙점에서 좌측 좌하부, 그리고 우상부에 파괴원이 밀집하여 분포한다. 그림 (c)의 파괴면 형태와 비교해 보면 등방성 보다 이방성 해석이 보다 유사함을 알 수 있다.



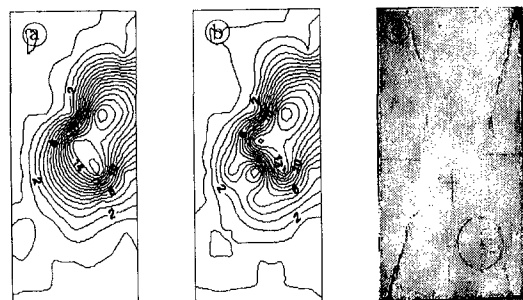
(1) Granite (total number of samples : 350)



(2) Marble (total number of samples : 131)



(1) Granite (total number of samples : 496)



(2) Marble (total number of samples : 163)

Fig. 11. Contour of AE sources determined by initial velocity at zero stress, (a) isotropic, (b) and anisotropic velocity, in Granite and Marble specimen (Y-Z plane)

Fig. 12. Contour of AE sources determined by the variation of P-wave velocity at each direction in 0-100% stress of failure stress, (a) isotropic, (b) anisotropic velocity, (c) view of failure plane, in Granite and Marble specimen

(2) 하중 및 응력의 증가에 따른 파괴원 위치

하중 및 응력의 증가에 따라 변화되는 3방향의 전파 속도를 고려한 이방성 속도장 해석에 의해 파괴원 위치를 추정하고 각 단계별 하중 및 응력 수준별로 파괴 진행 과정을 추적하였다.

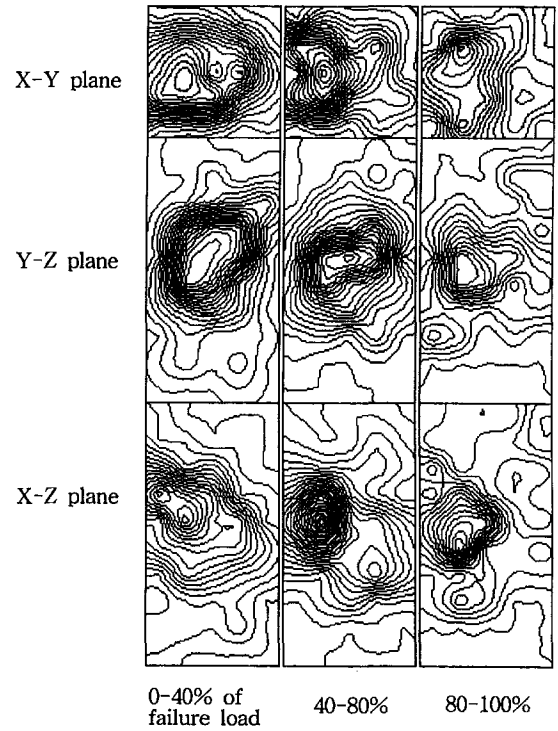
앞 부분에서는 파괴면 형상을 고려하여 Y-Z 평면을 대상으로 하였으나 여기서는 파괴 과정을 추적하기 위해 X-Z, Y-Z, X-Y면 등에 대하여 검토하였다.

Fig. 13의 (a), (b)는 각각 화강암 및 대리석 시편들의 파괴원 위치를 0-40%, 40-80%, 80-100%의 응력 단계 별로 나타낸 것이다.

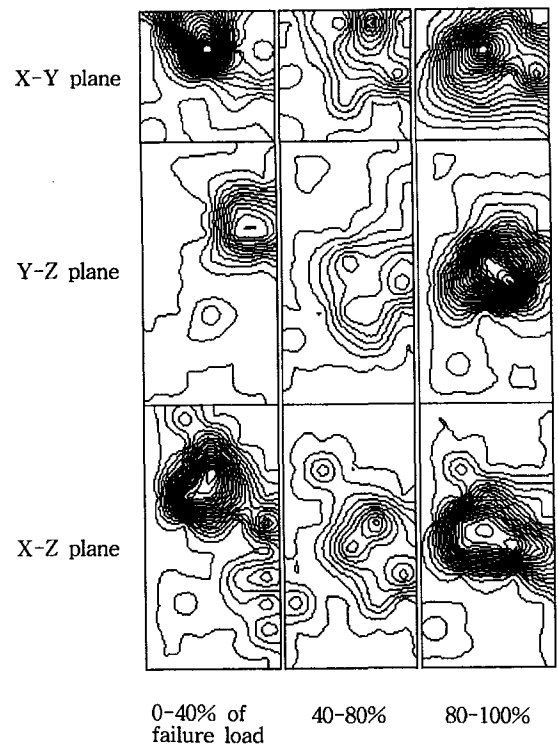
Fig. 13의 (a)는 화강암의 파괴원 분포 과정을 각 응력 단계 별로 도시한 것으로 각각의 응력 수준에서 파괴원 분포는 거의 동일한 모양을 나타낸다. X-Y 면을 기준으로 할 때 파괴원의 분포의 밀도는 0-40% 응력 수준의 경우 좌하부, 40-80% 응력 수준은 X축 선상의 좌측 중심부에서 좌상부와 좌하부, 80-100% 응력 수준에서는 좌상부에서 많은 파괴원 분포를 보인다. Y-Z 면을 기준으로 할 때 0-40% 응력 수준에서는 Y축 선상의 좌측, 상부, 우측 상부에 집중된 파괴원을 볼 수 있으며, 40-80%에서는 0-40%의 경우와 거의 유사한 경향을 보인다. 80-100% 응력 수준에서는 다시 좌측부와 아래 방향에 많은 균열의 분포를 보인다. X-Z 면을 고려할 때 모든 응력 수준에서 X축 선상의 좌측에 많은 AE가 관찰되었다.

Fig. 13의 (b)는 대리석의 파괴원 분포 과정을 응력 단계별로 도시한 것이다. X-Z 면을 기준으로 할 때 파괴원의 분포는 0-40% 응력 수준에서는 X축 선상으로부터 약간 좌측의 위쪽 방향에 집중된 파괴원의 위치를 보이며, 40-80% 응력 수준에서는 우측 상부에 파괴원이 집중적으로 분포하고 있고 약간의 파괴원이 X축의 우측 부분에 분포한다. 80-100% 응력 수준에서는 중심축 위에서 다수의 파괴원이 존재하며 좌우측과 상하 방향으로 파괴 영역이 확산되어 있음을 관찰할 수 있다. Y-Z 면으로 고려하는 경우 0-40% 응력 수준에서의 파괴원 분포는 우측 상부에서 집중되어 있으며 40-80% 응력 수준에서는 파괴원의 수는 전자에 비해 상당히 적으나 우측 중심부에서 상, 하로 넓은 분포를 보인다. 그리고 80-100%의 응력 수준에서는 우측 중심부에서 좌측 상부와 우측 하부에 파괴원이 집중되어 있으며 일반적으로 축방향에 -45° 와 $+45^\circ$ 의 각도로 등고선이 대칭 구조를 보인다. 따라서 중심부에서 이 각도를 중심으로 양쪽면으로 파괴가 진행되었다는 것을 암시하는 것으로 생각할 수 있다. X-Z 면을 기준으로 할 때 0-40%의 응력 수준에서

의 파괴원은 좌측 상부에 집중되며 40-80%의 응력 수준에서는 중심부에서 우측 하부로 파괴원이 발달하고 있음을 볼 수 있다. 또한 80-100%의 응력 수준에



(a) Granite



(b) Marble

Fig. 13. Contour of AE sources for each specimen in 0-40%, 40-80%, and 80-100% stress level of failure stress

서도 그 전단계의 응력 수준에서의 파괴원 분포와 동일한 형태를 나타내나 파괴원 빈도수는 현저하게 증가되었음을 알 수 있다.

5. 결 론

미소 파괴음을 이용하여 파괴원의 위치를 정확히 결정하기 위해서는 전파속도의 이방성, 탄성파의 도달 시간 그리고 부착된 변환기의 좌표가 구해져야한다.

본 연구에서는 인공적으로 노치를 만든 모르타르와 콘크리트, 화강암 및 대리석 등 4종류에 대하여 실험을 실시하였다. 해석방법은 압축과정에서 각 방향의 탄성파 전파속도의 변화를 고려한 즉 이방성 속도장에서 반복법의 하나인 최소자승법으로 해석하였다. 그 결과 얻어진 주요 내용은 다음과 같다.

1. 가압 하중 및 응력 수준에 따라 탄성파 전파 속도의 변화는 모르타르와 콘크리트 시편의 경우 노치를 형성한 부분에 국부적으로 집중 응력이 작용되어 거의 변화가 없었다. 화강암은 기존에 있던 공극의 닫힘 현상으로 인하여 가압 방향과 평행한 방향으로는 전파 속도가 48% 증가하였고 수직한 방향으로는 25-35% 감소하였다. 그러나 대리석은 화강암과는 달리 가압 방향과 수직한 방향의 전파 속도가 증가하였는데 이것은 대리석의 광물학적 결정 요인과 벽개와 같은 미세 균열의 발달에 기인하는 것으로 추측된다.

2. 주파수 대역의 분포는 모르타르와 콘크리트 시편은 50-500 KHz이고 화강암과 대리석은 100-900 KHz이다. 일반적으로 주주파수의 크기는 모르타르, 콘크리트, 대리석, 화강암의 순서이다. 이것은 재료내 입자들의 상대적인 크기 및 균열 강도에 차이가 있기 때문으로 생각된다.

3. 본 연구에서는 1차원 근사해와 최소 자승법에 의해 오차를 최소화시키는 반복법을 적용하여 등방성 및 이방성 속도장에 의한 해석을 하였다.

1차원 근사해와 등방성 속도장에 의한 해석결과는 실제 관찰한 표면의 균열상태와 비교해 볼 때 서로 다른 지점에서 파괴원이 존재한다.

화강암과 대리석의 경우 등방성 속도장에 의한 해석을 통하여 파괴원을 결정할 수도 있지만 실제 표면의 균열과는 차이를 보인다. 그러나 이방성 속도장에 의한 해석의 경우 파괴원의 위치가 표면 균열 결과와 거의 일치함을 확인하였다.

4. 이방성 속도장에 의한 해석으로 파괴원의 위치를 추적한다면 응력수준에 따른 재료내의 파괴 진행 사항을 보다 정확히 예측할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Labuz, J. F., Shah S. P. and Dowding, C. H., "Measurement and description of tensile fracture in granite", *J. of Engineering Mechanics*, 115, pp. 1935-1949, 1987.
- [2] Berthelot, J. and Robert, J., "Modelling concrete damage by acoustic emission", *J. of Acoustic Emission*, 6, pp. 43-60, 1987.
- [3] 고향제, "단축 압축 응력하의 원주형 시편 및 원형 공동 평판의 A.E. source location에 관한 연구", *서울대학교 석사학위 논문*, 1983.
- [4] 김홍, "암석모형에서의 경사공의 수압파쇄 기구 및 미소파열음에 의한 파열 발전의 추적에 관한 연구", *서울대학교 석사학위 논문*, 1990.
- [5] 이규상, "암석의 이방성 속도를 고려한 미소파열음 발생의 3차원 음원추적", *서울대학교 석사학위 논문*, 1996.
- [6] Godson, R. A. and Bridges, M. C., "A 32-channel rock noise source location system", *2nd Conf. on Acoustic Emission /Microseismic Activity in Geologic and Structures and Materials*, pp. 118-161, 1980.
- [7] 목진호, "암석의 압축하중에서 Kaiser 효과에 관한 연구", *강원대학교 석사학위 논문*, 1997.
- [8] Lockner, D. A., Walsh, J. B. and Byerlee, J. D., "Changes in seismic velocity and attenuation during deformation of granite", *J. of Geophysical Research*, Vol. 82, pp. 5374-5378, 1977.
- [9] Chandra S. Rai and Kenneth E. Hanson, "Shear-wave velocity anisotropy in sedimentary rocks : A laboratory study", *Geophysics*, Vol. 53, pp. 800-805, 1988.
- [10] Soga, N., Mizutani, H., Spetzler, H. and Martin III, R. J., "The effect of dilatancy on velocity anisotropy in Westerly granite", *J. of Geophysical Research*, Vol. 83, pp. 4451-4458.