

음향방출을 이용한 mortar 재료의 미시적 파괴거동에 관한 연구

A Study on Microscopic Fracture Behavior of Mortar Using
Acoustic Emission



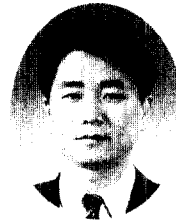
이준현*

Lee, Joon-Hyun



이진경**

Lee, Jin-Kyung



장일영***

Jang, Il-Young



윤동진****

Yoon, Dong-Jin

ABSTRACT

It is well recognized recently that acoustic emission, which is an elastic wave generated from rapid release of elastic strain energy in stressed solids, is very useful tool for on-line monitoring of microscopic behavior of deformation of material. In this study, three-point bend test was performed to evaluate the microscopic damage progress during the loading and failure mechanism of mortar beam by monitoring the characteristic of AE signal. The relationship between AE characteristic and microscopic failure mechanism is discussed. In addition, 2 dimensional AE source location based on triangular method was also done to monitor the initiation and propagation of micro crack around notch tip of mortar beam. It was shown that AE source location was very effective to predict the growth behavior of micro crack in mortar beam specimen.

KeyWord : Acoustic emission, elastic wave, elastic strain energy, on-line monitoring, three point bend test, AE source location, triangular method, microscope failure mechanism

* 정회원, 부산대학교 기계공학부 교수

** 부산대학교 기계설계공학과 박사과정

*** 정회원, 금오공과대학 토목공학과 교수

**** 한국표준과학연구원 방재기술센터 선임연구원

·본 논문에 대한 토의를 1999년 4월 30일까지 학회로

보내 주시면 1999년 6월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1 서론

최근 국내에서 발생한 각종 대형 사고들로 인하여 콘크리트 구조물의 안전성 확보 및 내구성 향상을 위한 연구에 많은 관심이 모아지고 있다. 특히 콘크리트와 같은 취성적 재료의 미시적 파괴 특성은 매우 복잡한 특성을 가지고 있기 때문에 하중 증가에 따른 이들 재료 내부의 파괴 메카니즘, 특히 미소균열의 발생 및 진행과정을 명확히 파악하여야 할 필요가 있으며 특히 실제 구조물에 있어서는 이들 특성들을 비파괴적으로 온-라인 모니터링 하여야 할 필요가 있다. 최근 선진 외국에서는 비파괴 기법의 하나인 AE 기법을 콘크리트 구조물에 적용하여 구조물의 미시적 변형 및 파손기구를 평가하려는 일련의 연구^(1,2,3,4,5,6)들이 보고되고 있지만 국내에서의 이와 관련된 연구는 현재 거의 보고되고 있지 않은 상태이다. 이러한 콘크리트에 있어서는 미소 균열의 검출 및 그 평가와 관련된 연구는 그 측정방법별로 분류해 보면 직접법⁽⁷⁾(현미경, X선 등에 의한 관측), 간접법^(8,9)(초음파 속도, 응력 변형률 곡선상의 특이점 및 균열 발생을 측정방법) 및 모델 해석법의 세 가지 방법으로 분류되며 실제 이들 방법을 효율적으로 적용하기 위해서는 구체적인 조사 목적에 따라서 적절한 측정 방법을 선택해야 하는 문제점이 있다. 이러한 문제점에 비해서 고체내부의 미소 파괴시 발생하는 탄성파방출(Acoustic Emission : AE, 가청영역보다 훨씬 높은 고주파)을 이용하는 AE기법은 검출된 AE 신호를 상세하게 분석함으로써 구조 내부의 미시적 역학변화를 연속적으로 추적 가능하다. 이 방법은 금속분야에 있어서 계측시스템의 하나로서 정착되어 있으며, 콘크리트 공학분야에서도 유용한 측정 응용분야로서 기대되고 있다.^(10,11)

따라서 본 연구에서는 하중을 받는 모르타르 부재의 미시적 파손기구 및 균열진전 특성에 대한 AE특성을 명확히 함으로써 모르타르 재료의 미시적 손상 및 파괴특성을 비파괴적으로 평가하고자 나아가 콘크리트 구조물의 온-라인 모니터링을 위한 기초를 마련하고자 한다.

2 음향방출(AE)의 기본원리 및 발생원 위치추정기법

2.1 음향방출의 기본원리

일반적으로 외부로부터 하중을 받아 재료가 변형을 일으킬 때나 재료내부에 균열이 발생, 성장할 때 원자의 재배열이 일어나며, 이때 물체는 급속한 에너지 해방에 의해 탄성파를 방출한다. 이 탄성파 방출을 음향방출(Acoustic Emission, AE)이라고 부르며(Fig.1)재료 내부의 균열발생 및 성장 등의 동적변형거동을 온-라인 상태에서 모니터링 하는데 매우 유용한 수단이다. 특히 콘크리트와 같은 복합재료들로 구성된 재료내부에서의 강화입자의 미시적 파괴⁽¹²⁾, 기지재내의 미소균열의 발생⁽¹³⁾ 등과 같은 재료의 미시적 변형거동으로 인해 발생하는 AE 신호의 검출이 가능하며 이들 검출된 AE 신호들의 신호특성 즉, 사상수(event), 카운터(count), 에너지(energy), 지속시간(duration time), 상승시간(rise time) 등(Fig.2)을 분석함으로써 재료의 물리적 특성뿐만 아니라 재료내부 손상 및 특징을 유추할 수 있다.

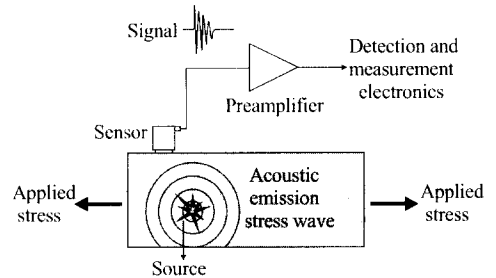


Fig.1 Basic principle of Acoustic Emission Technique

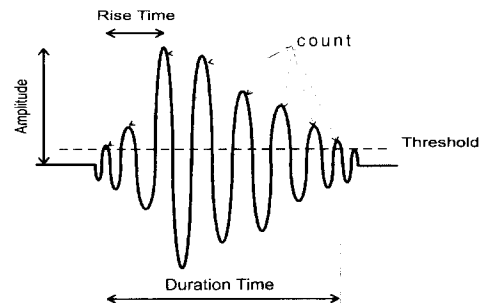


Fig. 2 Definition of AE parameters

2.2 AE 발생원 위치추정(AE source location) 방법

비파괴 시험에서 재료내부의 결함위치를 측정하기 위하여 초음파(ultrasonic wave)를 사용하는 경우가 많이 있지만 이러한 방법은 재료의 국소적인 부분만 탐지할 수 있다. 그러나 AE 시험에서는 이미 알고 있는 각시험체 재료의 탄성과 전파속도를 토대로 재료 내부의 AE 발생원에서 발생한 신호가 시험체 표면에 부착된 각각의 AE 센서에 도달하는 시간차를 이용하여 시험체 내부의 AE 발생원의 위치를 측정⁽¹⁴⁾할 수 있다. 이러한 방법은 재료의 속도를 정확하게 측정하는 것이 대단히 중요하므로 본 연구에서는 Fig.3과 같이 시험체에 두개의 센서를 부착하고 시험체 반대편에서 연필심을 부러뜨려 각각의 센서에 도달하는 신호의 시간차를 디지털 오실로스코프를 이용하여 구하였으며 두 센서간의 거리를 측정하여 모르타르의 속도를 측정하였다. 이런 방법으로 구한 모르타르 재료의 종파속도는 3990m/s이었다. 이러한 결과는 초음파 장비(PUNDIT : 54kHz)를 이용하여 모르타르 재료의 속도를 측정된 값과 1%이내의 오차를 보이는 아주 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

pencil lead fracture

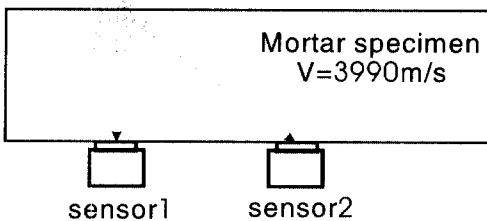


Fig.3 Schematic diagram of velocity measurement using pencil lead fracture method

일반적으로 센서의 위치선정에 따라 1차원적인 선형적(linear) 방법 및 2차원적인 삼각법(triangle), 사각법(rectangle) 등의 여러 가지 방법들이 제안되고 있지만 본 연구에서는 시험체의 규격을 고려한 예비 실험을 통해 2차원적인 삼각법 방법이 가장 적합한 것으로 나타났다. 삼각법

방법은 Fig.4와 같이 센서1, 센서2, 센서3를 시험체에 부착하고 발생원에서 센서1과 센서2에 수신되는 신호의 시간차(Δt_1), 또는 발생원에서 센서1과 센서3에 수신되는 신호의 시간차(Δt_2)와 재료의 속도(V)와의 곱은 식(1), (2)와 같이 항상 일정한 값을 가지기 때문에 이를 이용하면 그림과 같은 각각의 센서 방향에 대한 쌍곡선을 얻을 수 있다. 그리고 각 센서에서 AE 발생원까지의 거리는 다음 식(3), (4)에 의해 구할 수 있으며 이렇게 구한 세 쌍곡선의 교점을 구하면 그 교점의 위치가 AE 발생원의 위치가 되는 것이 삼각법 방법이다.

$$\Delta t_1 V = \vec{r}_1 - \vec{R} \quad (1)$$

$$\Delta t_2 V = \vec{r}_2 - \vec{R} \quad (2)$$

$$\vec{R} = \frac{1}{2} \frac{D_1^2 - \Delta t_1^2 V^2}{\Delta t_1 V + D_1 \cos(\theta - \theta_1)} \quad (3)$$

$$\vec{R} = \frac{1}{2} \frac{D_2^2 - \Delta t_2^2 V^2}{\Delta t_2 V + D_2 \cos(\theta_3 - \theta)} \quad (4)$$

여기서,

\vec{r}_1, \vec{r}_2 = AE 발생원에서 센서2, 센서3 사이의 위치벡터

\vec{R} = AE 발생원에서 센서1 사이의 위치벡터

D_1, D_2 = 센서1에서 센서2, 센서3 사이의 위치벡터

$\theta_1, \theta, \theta_3$ = 기준점에서 센서2, 발생원, 센서3 사이의 각도

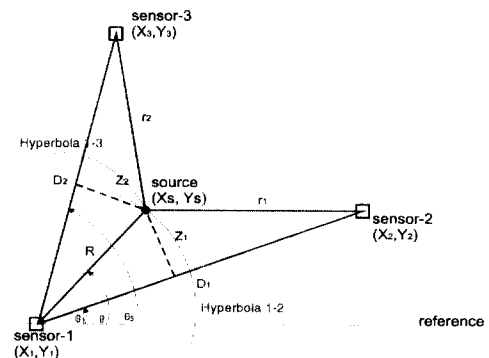


Fig. 4 AE source location in two dimension

3 재료 및 실험방법

본 연구에 사용된 모르타르 재료의 배합은 물, 시멘트 그리고 잔골재를 1:1.86:4.18 무게비(사용수량 1.76kg, 시멘트의 중량 : 3.265kg, 잔골재의 중량 : 7.35kg, 물 시멘트 비(W/C) : 0.539)로 모르타르 시험체를 제작하였으며, 압축강도는 50.8mm 입방체 모울드를 이용하여 KSL5105 규준에 의하여 실험하였다. 시험체의 강도는 Table 1에 나타내었다. 그리고 시험체는 각주형으로서 230 × 75 × 25(mm)로 정하였고 중앙부 균열을 유도하기 위하여 시험체 중앙에 10mm의 노치(두께 0.1mm의 얇은 반석판)를 삽입하였다.

Table 1 Strength of mortar specimen

	7일 강도		28일 강도	
	하중(kN)	강도(kN/cm ²)	하중(kN)	강도(kN/cm ²)
압축강도	54.9	2.2	66.6	2.7

본 연구에서는 모르타르로 구성된 재료부재의 파괴 메카니즘, 특히 미시적 내부균열의 발생 및 진전과정을 연속추정, 분석하기 위하여 Fig.5에서 보는 바와 같이 2차원 AE 발생원 위치 추정(AE source location)방법의 하나인 삼각법 방법으로 시험체에 센서를 부착하고 휨재하 시험(3점 가력)을 실시하였다.

먼저 10톤의 압축시험기(Instron 8501)에 의해 변위 제어 방식으로 시험체 중앙에 하중이 가해지면 시험체내의 국부적인 변형에 의해 AE 발생원이 발생한다.

이때 발생된 AE 발생원은 AE 센서에 의해 감지되지만 아주 미약한 신호이기 때문에 1차적으로 예비 증폭기(1220A)에 의해 40dB 증폭된 후 AE 본체(MISTRAS 2001)에서 2차적으로 다시 40dB 증폭되어 각종 AE 파라미터에 의한 분석이 이루어진다. 한편 모르타르내의 각 미시적 파손기구에 대응하는 AE 파형 특성을 명확하게 하기 위하여 디지털 오실로스코프(LeCroy 9310A)에서 파형을 분석하였다. 또한 휨재하 시험에서 가해지는 하중 속도는 0.1mm/min으로 하였고 AE 센서는 R15공진형 센서를 사용하였으며 주위의 전기적, 기계적 잡음을 제거하기 위하여 하한계값(threshold) 레벨은 45dB로 정하였다.

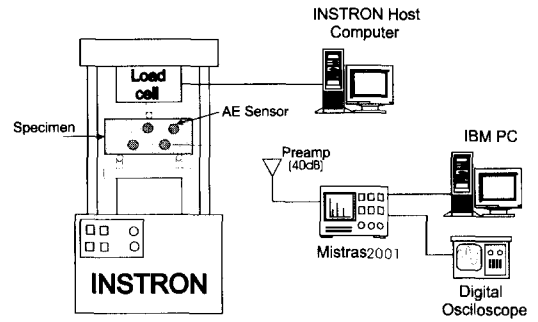


Fig.5 Schematic diagram of experimental set-up for three point bending test

4 실험 결과 및 고찰

4.1 하중변화에 따른 AE 파라미터의 상관관계

본 연구에서는 하중 증가에 따른 모르타르 재료내부의 변형 특성과 미시적 파손기구를 비파괴적으로 평가하고 이들 파손기구를 명확히 하기 위하여 휨재하 시험과 음향방출 기법을 적용한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

Fig.6은 모르타르 시험체에 하중이 증가함에 따라 발생하는 AE 사상수의 특성을 3영역으로 나누어 나타낸 것으로 그림에서 보여주는 바와 같이 하중이 0.6kN까지의 범위, 즉 비교적 탄성 영역의 초기단계인 제 I 영역에서는 하중의 증가와 더불어 소수의 AE 사상수가 발생한다. 이는 노치 선단부 주위의 국부적인 응력집중, 즉 파괴 진행영역(fracture process zone)내의 부분적인 미소 균열의 발생에 의한 신호로써 아주 미약한 신호가 검출된다.

한편 하중이 증가하여 모르타르의 최대하중 지점인 II 영역에 이르면 시험체내의 파괴진행영역의 확대와 더불어 이들 주변에 분포하는 공극(porosity)들로부터의 미소균열이 전파, 합체하여 노치선단부로부터 미소 균열이 시험체 중앙으로 점차적으로 성장하게 되면 이로 인하여 제 I 영역에서 보다 II 영역에서는 AE 사상수가 점차적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 그러나 이 영역에서의 균열 성장속도는 일시적인 내력에 의한

모멘트의 증대로 인하여 급격한 균열진전은 일어나지 않는다. 그러나 III 영역에서는 앞의 II 영역에서 발생한 미소 균열의 전파로 인해 최대 하중점에서는 급격하게 거시 균열로 성장함에 따라 현저한 AE 사상수의 증가를 보여주고 있다. 실험중에 관찰되는 거시균열의 성장은 시험체 높이 방향의 3/4 지점까지 급격하게 성장함이 관찰되었다.

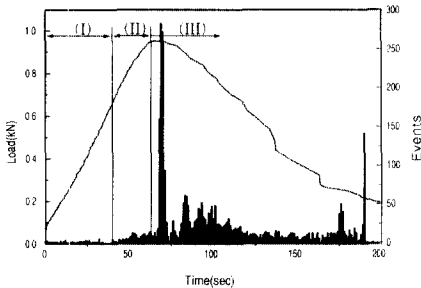


Fig.6 Load and Events vs Time

Fig.7은 하중이 증가함에 따른 모르타르 재료의 AE 에너지의 변화를 나타낸 것으로 AE 에너지는 다음식에 의해 구할 수 있다.

$$E = \int_{t_1}^{t_2} V(t)^2 dt$$

여기서 t_1 , t_2 는 시간, $V(t)$ 는 전압값이다.

한편 Fig.7의 I 영역에서는 탄성한계내에서 노치선단부의 응력집중에 의해 발생한 발생원의 에너지로써 아주 낮은 에너지 레벨을 나타내고 있다. 하지만 II 영역에서는 미소균열의 성장으로 인하여 I 영역보다 비교적 높은 에너지 레벨을 보이고 있으며 특히 최대 하중점에서는 매우 높은 에너지 레벨을 나타낸다. 그리고 최대 하중 이후의 거시적 균열의 전파로 인하여 발생하는 발생원 영역인 III 영역에서의 에너지 레벨은 I, II 영역보다 현저히 높게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig.8은 하중증가에 따른 각 영역에서 발생하는 발생원의 AE 지속시간의 변화를 나타낸 것이다. 탄성영역인 I 영역에서는 비교적 낮은 지속시간을 나타내고 있으며 노치선단부에서 미소균열이 발생 성장하는 II 영역과 거시적 균열로 발달하는

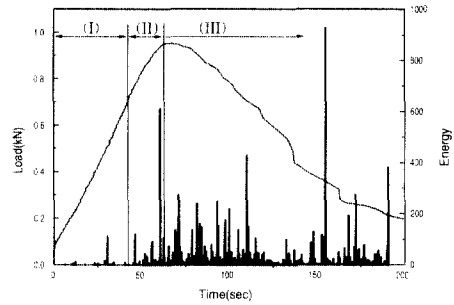


Fig.7 Load and Energy vs Time

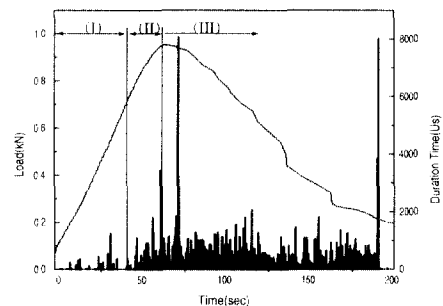
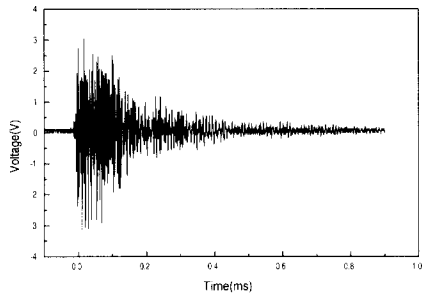


Fig.8 Load and Duration Time vs Time

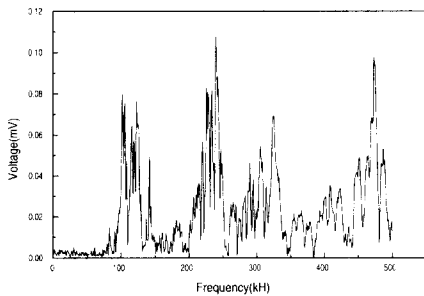
III 영역에서의 지속시간은 비슷한 경향을 보이고 있다. 하지만 앞의 AE 사상수 변화의 결과에서와 같이 III 영역에서 가장 높은 지속시간을 나타내고 있으며 이는 에너지 레벨의 변화결과인 최대 하중점에서 가장 높은 에너지 레벨을 나타내는 것과는 또다른 경향을 보인다. 그리고 III 영역에서의 에너지 레벨이 II 영역에서보다 확연히 높은 점과는 달리 지속시간은 II, III 영역에서 거의 비슷한 양상을 보인다. 이는 II 영역에서부터 모르타르 시험체의 노치선단부에 미소균열이 발생하여 진전하는 영역이므로 균열진전으로부터 발생된 신호로서 II 영역이나 III 영역에서의 지속시간은 비슷한 경향을 보이는 것으로 생각되어진다.

Fig.9(a)는 모르타르 시험편의 균열 진전시 발생하는 AE 파형을 나타낸 것으로 시멘트 페이스트의 파괴시 발생하는 신호이다. 이러한 시멘트 페이스트의 파괴에 의한 돌발형 신호는 진폭(amplitude)이 비교적 낮게 나타나고 균열진전시

전 영역에 걸쳐 다수 발생된다. Fig.9(b)는 시멘트 페이스트 파단에 의해 나타나는 신호의 주파수영역을 나타낸 것으로 100 - 500kHz까지 광범위한 주파수 대역을 나타내고 있으며 특히 100, 240, 320, 470kHz에서는 높은 진폭을 나타낸다. 이처럼 모르타르가 하중을 받아 최종 파단에 이르기까지 발생되는 신호는 진폭의 변화만 있을 뿐 전반적으로 500kHz까지 광범위한 주파수 대역을 가지는 돌발형 신호들이 다수이다.



(a)



(b)

Fig.9 Typical example of waveform and its frequency spectrum corresponding to paste fracture in mortar

4.2 AE 발생원 위치추정(AE source location) 결과

본 연구에서는 AE 발생원의 위치 추정을 위하여 앞에서 언급하였듯이 2차원 평면에서 삼각법 방법으로 Fig.10과 같이 시험체 정면에 센서①, ②, ③, ④를 부착하고 발생원으로부터 발생한 신호의 각각의 센서에 도달하는 시간차를 이용하여

AE 발생원 위치추정을 실시하였다.

Fig.10은 모르타르 시험편의 AE 발생원 위치추정의 결과를 나타낸 것으로 stage I 영역에서는 시험체에 하중이 가해지는 초기로서 시험체 노치선단부위에서 균열은 발생하지 않았지만 국부적인 응력집중에 의한 재료내부 부착파괴와 재료 내부의 불연속으로부터 소수의 AE 발생원이 나타난다. 이는 앞의 Fig.6의 하중에 따른 AE 사상수와외의 결과와도 매우 잘 일치한다. 하중이 점차로 증가하여 시험체에 균열이 발생하고 점차적으로 성장하여 시험체 전체 높이의 2/3지점까지 전파하는 stage II영역에서는 다수의 AE 발생원이 균열진전 방향을 따라 발생한다. 그리고 마지막으로 stage III영역에서는 앞의 AE 사상수 결과에서와 같이 최대하중점 이후 균열이 점점 증가함에 따라 다수의 AE 사상수가 발생하였고 이는 AE 발생원 위치추정기법의 결과에서도 알 수 있는 바와 같이 이 영역에서도 다수의 AE 발생원 위치 추정을 할 수 있었다. 특히 Fig.10에서 알 수 있는 바와 같이 AE 발생원들이 하중이 증가함에 따라 균열 진전방향을 따라서 발생하고 있는 점으로 보아 삼각법 방법의 AE 발생원 위치 추정기법이 아주 양호한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있었다.

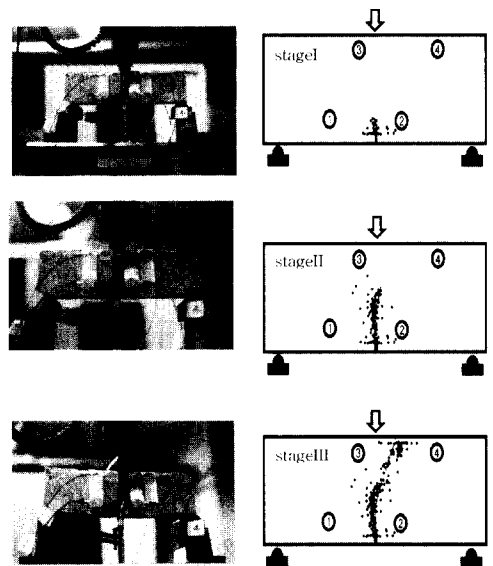


Fig.10 AE Source Location in Mortar Beam at Three Loading Stages

4.3 모르타르의 미시적 파손 기구 및 AE 특성

Fig. 11은 본 연구결과로부터 얻어진 모르타르의 미시적 파손기구^(15,16) 및 이들 각 파손 기구로부터 측정된 AE 신호 특성을 도식적으로 나타낸 것이다. 그림에서 보여 주는 바와 같이 초기 하중이 가해짐에 따라 모르타르내의 시멘트 페이스트와 잔골재간의 부착 파괴가 발생한다. 이때 발생하는 AE 신호는 낮은 에너지 레벨과 낮은 지속시간을 나타내고 광범위한 주파수 대역을 나타낸다. 그리고 하중이 점점 증가함에 따라 페이스트와 잔골재간의 경계면에서 부착파괴가 발생하여 균열이 성장하는 단계로 발전된다. 이때 발생하는 AE 신호는 낮은 에너지와 그리 높지 않은 지속시간, 광범위한 주파수 대역을 보이고 있다. 이때의 재료의 미시적 부착파괴는 길이가 짧고 일정한 방향을 가지고 있지 않지만 이들 미소균열들의 합체에 의한 주균열로의 성장에 의해 발생하는 신호들은 높은 에너지 레벨과 높은 지속시간, 그리고 광범위한 주파수 대역을 나타낸다.

또한 모르타르 시험편의 파단면을 관찰해 보면 파단면에 많은 공극들이 분포하고 있음을 알 수 있다. 균열이 진전하여 공극을 관통할 때 발생하는 신호들은 균열 발생, 성장에 의한 신호보다 훨씬 높은 진폭을 나타내지만 주파수 대역은 앞의 신호들과 비슷한 경향을 보이고 있다. 그리고 Table 2는 각각의 영역 I, II, III에서 발생하는 신호들의 AE 파라미터 값을 나타낸 것으로 이들 AE 파라미터들의 정량적인 특성으로부터 모르타

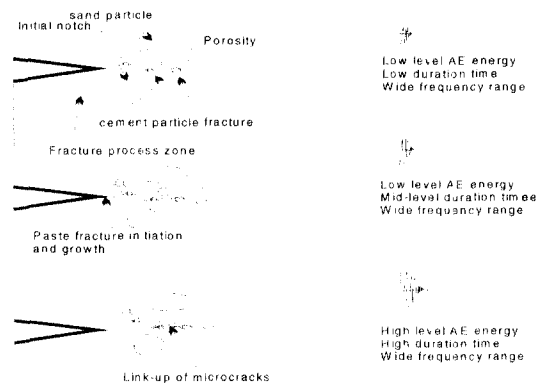


Fig.11 Schematic diagram showing the microscopic fracture behavior and its corresponding AE characteristics

르 시험체의 미시적 파손기구의 해석이 가능함을 알 수 있다.

Table 2 AE parameter values in each stage I, II, III

Parameter Stage	Energy(dB) Distribution	Duration Time(μ s) Distribution	Frequency (kHz)
Stage I	~ 15	~ 400	100 ~ 500
Stage II	~ 100	~ 1000	100 ~ 500
Stage III	~ 360	~ 1100	100 ~ 500

5 결론

본 연구에서는 휨거동을 하는 모르타르 부재의 재료 내부의 변형 특성과 미시적 파괴 기구를 명확히 규명하기 위하여 비파괴 기법의 하나인 AE를 이용하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 하중의 증가에 따른 모르타르 시험체의 미시적 변형거동 및 AE 특성은 크게 3영역으로 특징 지을 수 있음을 알 수 있었다. 즉
 - i) 하중 초기에 시험체 내의 미소 불균질에서의 국부적인 응력집중에 의해 발생하는 소수의 미소균열로 인한 낮은 AE 사상수의 발생을 보이는 stage I
 - ii) 점차적인 하중증가와 더불어 시멘트 페이스트 균열성장에 따른 AE 사상수가 점차적으로 증가하는 stage II
 - iii) 최대 하중점에서 급격한 거시균열로 성장함에 따른 현저한 AE 사상수가 발생하는 stage III, 이 영역에서는 시험편 폭의 3/4지점까지 급격한 균열발생이 관찰
2. 모르타르 시험편의 AE 발생원 위치추정에서 초기하중 단계에서는 노치 선단부위에 소수의 AE 사상수가 발생하고 최대 하중에서는 시험체에 발생하는 균열을 따라 다수의 AE 사상수가 발생하므로 삼각법 방법이 시험편의 AE 발생원 위치 추정기법에 아주 적합함을 알 수 있었다.
3. 모르타르의 파괴특성은 초기하중에서는 국부적

인 응력집중에 의한 신호와 시멘트 페이스트와 잔골재간의 부착 파괴에서 발생하는 낮은 에너지와 넓은 주파수 특성을 보이고 하중이 점차로 증가함에 따라 페이스트 균열의 성장이 일어나며 최종적으로 발생된 미소균열의 합체에 의한 균열진전이 이루어진다. 이때 발생하는 신호들은 높은 에너지 레벨과 지속시간, 광범위한 주파수 대역을 나타낸다.

참고문헌

- Berthelot, J. and J. Robert. "Modeling concrete damage by acoustic emission" Journal of Acoustic Emission, 6, 1987, pp.43-60
- Maji, A. D., C. Ouyang, and S. P. Shah. "Fracture mechanisms of quasi-brittle materials based on acoustic emission". Journal of Materials Research, 5, 1990, pp.207-217
- Labuz, J. F., S. P. Shah, and C. H. Dowding. "Measurement and description of tensile fracture in granite" Journal of Engineering Mechanics, 115, 1987, pp.1935-1949
- S. Yuyama, T. Okamoto, R. Tomita, H. Fujiwara, S. Dajio, M. Ohtsu, M. Shigeishi. "Discrimination of Cracking and Estimation of Cracking Width Developed in Reinforced Concrete Structures by Acoustic Emission". AECM-4, Seattle, Washington, U.S.A. 1992, pp.1-8
- Shigenori Yuyama, Takahisa Okamoto, and Shigeyoshi Nagataki, "Acoustic Emission Evaluation of Structural Integrity in Repaired Reinforced Concrete Beams", Materials Evaluation, Vol.52, No.1, 1992, pp.86-90
- Shigenori Yuyama, Takahisa Okamoto, Mitsuhiro Shigeishi, and Masayasu Ohtsu. "Quantitative Evaluation and Visualization of Cracking Process in Reinforced Concrete by a Moment Tensor Analysis of Acoustic Emission", Materials Evaluation, Vol.53, No.6, 1994, pp.751-756
- 山田博章, "耐久性診断と非破壊検査方法 - X 선 -", 콘크리트工学, Vol.26, No.7, 1988
- J. S. Popovics, W. J. Song, J. D. Achenbach, J. H. Lee and R. F. Andre. "One-sided stress wave velocity measurement in concrete", to be appeared in ASCE, J. Eng. Mechanics, 1998
- Joon-Hyun Lee, Won-Su, Park, J. S. Popovics and J. D. Achenbach, "Application of one-sided stress wave velocity measurement technique to evaluate freeze-thaw damage in concrete", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, to be appeared, Snowbird, U.S.A. 1998
- 이준현, 이진경, 장일영, 윤동진, "음향방출을 이용한 콘크리트 부재의 미시적 파괴특성의 On-Line Monitoring", 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, 1998, pp.677-682
- 이진경, 이준현, 윤동진, "음향방출을 이용한 mortar의 미시적 파괴거동에 관한 연구", 한국비파괴검사학회 춘계학술발표회논문집, 1998, pp.323-332
- J. H. Lee, J. H. Kim, D. J. Yoon, O. Y. Kwon, "Acoustic Emission monitoring of fracture process of SiC/Al composites under cyclic loading" proc. of 4th International symposium on Acoustic Emission from Composite Materials, Seattle, U.S.A. 1992, pp.300-309
- J. H. Lee, W. J. Sung, "Acoustic Emission Characterization of Single and Dual fiber reinforced Metal Matrix Composite". Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 17A, San Diego, U.S.A. 1997
- Ronnie K. Miller, Paul McIntire. "Acoustic Emission Testing" Nondestructive Testing Handbook V.5, ASNT, 1987
- 吉本 彰, "콘크리트 變形과 破壊", 姜昶求 譯, 岡技術, 1995
- 오병환 "콘크리트의 균열 및 파괴역학" 최신 콘크리트공학, 1992, pp.477-517

요 약

고체내부의 미소파괴시 발생하는 탄성과 방출을 이용하는 음향방출(Acoustic Emission, AE)기법은 구조물 또는 재료 내부의 미시적 변형기구를 이해하는데 매우 유익한 수단으로 최근 각 분야에서 다양하게 응용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 모르타르 부재의 휨재하 시험시 부재 내부에 발생하는 미시적 손상거동 및 파괴특성을 시험시 연속적으로 모니터링한 AE 신호특성으로부터 평가하였다. 나아가 삼각법을 이용한 2차원 AE 발생원 위치추정으로부터 모르타르 시험체 노치선단 주변에 대한 AE 발생원 위치를 명확히 하였으며 이들 결과로부터 미소균열의 성장 거동을 연속적으로 모니터링 하였다.

(접수일자 : 1998. 7. 11)