

음향방출을 이용한 콘크리트 부재의 미시적 파괴특성의 온라인 모니터링

On-Line Monitoring of Microscopic Fracture Behavior of Concrete Using Acoustic Emission

이준현*, 이진경**, 윤동진***

Joon-Hyun Lee*, Jin-Kyung Lee** and Dong-Jin Yoon***

초 록 콘크리트는 다상(multi-phase)의 재료로서 구성되어지는 복합재료의 일종으로써 준취성(quasi-brittle)적인 재료적 특성을 가지고 있기 때문에 실제 복잡한 미시적 파괴특성을 나타낸다. 따라서 콘크리트 구조물의 안전성 확보를 위해서는 먼저 하중의 증가에 따른 콘크리트 내부의 변형특성 및 미시적 파손기구를 파악하여야 하며, 특히 실제 구조물에 있어서는 이들 특성들을 비파괴적으로 상시(on-line) 모니터링 하여야 할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 3점 굽힘 하중을 받는 콘크리트 부재의 미시적 파손기구 및 각 파손기구에 대한 AE 특성을 명확히 함으로써 콘크리트 부재의 미시적 손상 및 파괴 특성을 비파괴적으로 평가하고 AE 발생원 위치 추정 기법을 이용하여 균열 발생 및 진전거동을 평가하였다.

주요용어 : 골재, 시멘트 페이스트, 음향방출, 3점 굽힘, AE 발생원 위치추정, 미시적 파손기구

Abstract Since concrete is an inhomogeneous material consisting of larger aggregates and sand embedded in a cement paste matrix, it relatively shows a complex failure mechanism. In order to assure the reliability of concrete structure, microscopic fracture behavior and internal damage progress of concrete under the loading should be fully understood. In this study, an acoustic emission(AE) technique has been used to clarify microscopic failure mechanism and their corresponding AE signal characteristics of concrete under three-point bending test. In addition 2-dimensional AE source location has been performed to monitor the progress of an internal damage and the successive crack growth behavior during the loading. The relationship between AE signal characteristics and microscopic fracture mechanism is discussed.

Keywords : aggregate, cement paste, acoustic emission, three point bending test, AE source location, microscopic failure mechanism

1. 서 론

최근 국내에서 발생한 각종 대형 구조물의 붕괴사고들로 인하여 콘크리트 구조물의 안전성 확보 및 내구성 향상을 위한 연구에 많은 관심이 모아지고 있다. 특히 콘크리트는 다상(multi-phase)의 재료로서 구성되어지는 복합재료의 일종으로써 준취성(quasi-brittle)적인 재료적 특성을 가지고 있기 때문에 실제 복잡한

미시적 파괴특성을 나타낸다. 따라서 콘크리트 구조물의 안전성 확보를 위해서는 먼저 하중의 증가에 따른 콘크리트 내부의 변형특성 및 미시적 파손기구를 파악하여야 하며, 특히 실제 구조물에 있어서는 이들 특성들을 비파괴적으로 상시(on-line) 모니터링 하여야 할 필요가 있다. 한편 기존의 콘크리트 부재의 미소 균열 검출 및 손상 평가와 관련된 연구 방법은 크게 3가지로 분류할 수 있다. 첫째, 현미경, X선 등에 의한 직접법

(1)과 초음파, 용력-변형을 곡선 등의 특이점 및 균열 발생음 측정 방법인 간접법(2), 마지막으로 모델 해석법으로 분류할 수 있다. 그러나 이러한 방법들을 효율적으로 적용하기 위해서 구체적인 평가 목적이나 측정 방법에 따라 적절한 방법을 선택하여야 하는 어려움이 있다. 한편 음향방출(acoustic emission, AE) 기법은 재료 내부의 균열 발생 및 성장 등의 동적 거동을 연속적으로 추정할 수 있는 유익한 수단이다. 이러한 AE 기법의 잇점 때문에 일본의 Ohtsu 등(3)은 압축 하중을 받는 콘크리트 부재의 손상 정도를 AE 기법을 이용하여 정량적으로 평가하였고 Yuyama 등(4)은 반복적인 피로 하중을 받는 강화된 콘크리트 시험편의 균열 진전 과정을 정량적으로 평가하고 AE 파형을 분석하였다. 또한 Popovics 등(5)은 콘크리트 표면에서의 충격에 의해 발생한 과도 응력파의 전파로 발생하는 초음파 종파와 표면파를 동시에 측정하는 one-sided 기법을 개발하였다. 그 밖에 선진 외국에서는 AE 기법을 이용한 비파괴 기법에 의해 콘크리트 구조물의 내부 결함 및 손상평가에 적용시키려는 일련의 연구(6-10)들이 보고되고 있지만 국내에서의 이와 관련된 연구는 거의 전무한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 3점 굽힘(three point bending) 하중을 받는 콘크리트 부재의 미시적 파손기구 및 각 파손기구에 대한 AE 특성을 명확히 함으로써 콘크리트 부재의 미시적 손상 및 파괴 특성을 비파괴적으로 평가하였고 또 나아가 2차원 AE 발생원 위치 추정(AE source location) 기법을 이용하여 콘크리트 부재의 균열 발생 및 진전 거동을 평가하였다.

2. AE의 기본 원리 및 2차원 AE 발생원 위치 추정

2.1. AE의 기본 원리

일반적으로 재료가 외부로부터 하중을 받아 변형을 일으킬 때나 재료내에 균열이 발생, 성장할 때 원자의 재배열이 일어나며 이때 물체는 급속한 에너지 해방에 의해 탄성파를 방출한다. 이 탄성파 방출을 음향방출(acoustic emission, AE)이라고 부르며 이는 재료 내부의 균열발생 및 성장 등의 동적 거동을 상시상태에서 모니터링하는데 매우 유익한 수단(11,12)이다. 특히 콘크리트 재료에 있어서의 AE는 하중의 증가에 따라 재료 내부에 발생, 성장하는 미소균열 또는 재료 내부의 기공, 골재 등과 같은 불균질상으로부터 신호가

다수 발생하며 이들 AE 신호들의 각 인자들인 사상수(event), 에너지(energy), 지속시간(duration time), 상승시간(rise time) 등을 분석함으로써 재료의 물리적 특성뿐만 아니라 재료 내부 손상 및 특징을 유추할 수 있다.

2.2. 2차원 AE 발생원 위치 추정 원리

비파괴시험에서 재료내부의 결함위치를 측정하기 위하여 초음파(ultrasonic wave)를 사용하는 경우가 많이 있지만 이러한 방법은 재료의 국소적인 부분만 탐지할 수 있다. 그러나 AE 시험에 있어서는 이미 알고 있는 각 시험체 재료의 탄성과 전파속도를 토대로 재료 내부의 AE 발생원에서 발생한 신호가 시험체 표면에 부착된 각각의 AE 센서에 도달하는 시간차를 이용하여 시험체 내부의 AE 발생원의 위치를 추정(13)할 수 있다. 따라서 이와 같은 2차원 AE 발생원 위치 추정을 위해서는 먼저 콘크리트 시험편의 종파 속도를 정확하게 측정하는 것이 대단히 중요하며 이를 위하여 본 연구에서는 Fig.1에서 보여주는 바와 같이 연필심 파괴(pencil breakage)시험법을 이용하여 속도를 측정하였다. 즉 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 두 개의 센서를 시험편에 부착하고 반대편에서 연필심을 부러뜨리며 발생하는 탄성파, 즉 AE 신호가 시험편에 부착된 각각의 센서에 도달하는 시간차를 디지털 오실로스코프를 이용하여 측정하여 콘크리트 시험편의 속도를 구하였다. 이와 같은 방법으로 구한 콘크리트 시험편의 속도는 4709m/s이었다. 한편 초음파 장비(PUNDIT, 54kHz)를 사용하여 초음파 투과(through transmission)법으로 콘크리트 시험편의 5부분을 3회에 걸쳐 측정된 종파속도의 평균값은 4757m/s로 연필심 파

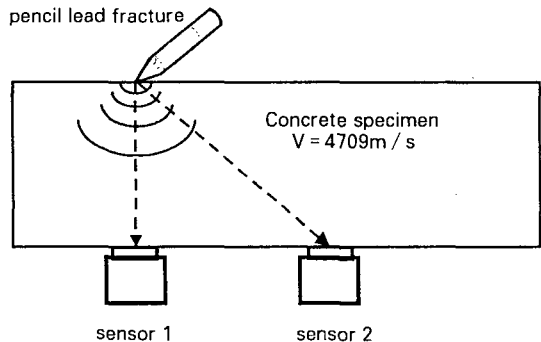


Fig. 1 Velocity measurement using pencil breakage technique

과 시험법에 의해 구한 속도값과의 오차는 1% 내외로 아주 양호한 결과를 나타내었다.

한편 2차원 AE 발생원 위치 추정은 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. 2와 같이 센서 1, 센서 2, 센서 3를 시험체에 부착하고 발생원에서 센서 1과 센서 2에 수신되는 신호의 시간차(Δt_1), 또는 발생원에서 센서 1과 센서 3에 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.

$$\Delta t_1 V = r_1 - R \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta t_2 V = r_2 - R \quad \dots\dots\dots (2)$$

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

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

여기서,

r_1, r_2 = AE 발생원에서 센서 2, 센서 3 사이의 위치벡터

R = AE 발생원에서 센서 1 사이의 위치벡터

D_1, D_2 = 센서 1에서 센서 2, 센서 3 사이의 위치벡터

$\theta_1, \theta, \theta_3$ = 기준점에서 센서 2, 발생원, 센서 3 사이의 각도

3. 재료 및 실험 방법

3.1. 재료 및 시험편

본 연구에서 사용된 콘크리트 시험편의 시방배합은 Table 1과 같이 굵은 골재의 최대치수는 19mm, 슬럼프는 13cm, 물과 시멘트의 비는 40.5%, 잔골재율은 44.55% 등으로 구성되어 있으며 Table 2에서는 시험

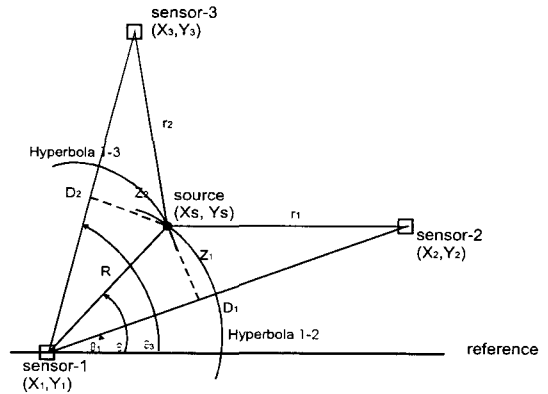


Fig. 2 AE source location in two dimension

편의 7일, 28일에서의 압축강도와 휨강도를 각각 나타내었다. 한편 사용된 시험편은 2차원 AE 발생원 위치 추정이 가능하도록 440×100×100(mm)의 크기로 정하였다.

3.2. 실험 방법

본 연구에서는 Fig. 3 (a)에서 보는 바와 같이 2차원 AE 발생원 위치 추정 방법의 하나인 삼각법으로 시험편에 센서를 부착하고 3점 굽힘시험을 실시하였다. 먼저 유압 만능 시험기(Tensilon, 25ton)에 의해 시험편에 하중이 가해지면 시험편내의 국부적인 변형에 의한 AE 발생원이 발생한다. 이때 발생된 AE 발생원은 AE 센서에 의해 감지된 후 예비 증폭기(PAC, 1220A)에 의해 40dB 증폭된 후 AE 본체(MIS-

Table 1 Specified proportion

굵은 골재 최대 치수 (mm)	슬럼프 (cm)	W/C (%)	잔 골재율 s/a (%)	단위량(kg/m ³)			
				물 (W)	시멘트 (C)	잔골재 (S)	굵은 골재 (G)
19	13	40.5	44.55	196.1	484.2	732.9	908.44

Table 2 Strength of concrete

		7일 강도		28일 강도	
		하중 (ton)	강도 (kg/cm ²)	하중 (ton)	강도 (kg/cm ²)
콘크리트	압축 강도	31.29	398.4	24.5	312
		33.94	432.1	20.5	261
	휨강도	2.97	66	3.6	80

TRAS 2001)에서 각각의 센서에 의해 감지된 신호를 분석하여 2차원 AE 발생원 위치추정 프로그램에 의해 발생원의 위치가 결정된다. 이때 사용된 AE 센서는 R15 공진형 센서(100~300kHz)가 사용되었다. 한편 각 미시적 파손기구에 대응하는 AE 파형 특성과 각종 AE 인자들을 분석하기 위하여 광대역 센서(WD, 100~1200kHz)를 추가로 시험편 정면 정중앙에 부착하여 디지털 오실로스코프(LeCroy 9310A)에서 파형을 분석하였으며 AE 본체에서 AE 인자들에 대한 분석이 이루어졌다. 또한 3점 굽힘시험에서 가해지는 하중 속도는 0.5mm/min으로 변위를 제어하였으며 주위의 전기적, 기계적 잡음을 제거하기 위하여 문턱 전압값(threshold level)은 17.8mV로 하였다. 그리고 시험편 양 지지점 사이의 거리는 200mm로 정하였다. 한편 본 연구에 사용한 실험장치의 전체 개요도를 Fig. 3 (b)에 나타내었다.

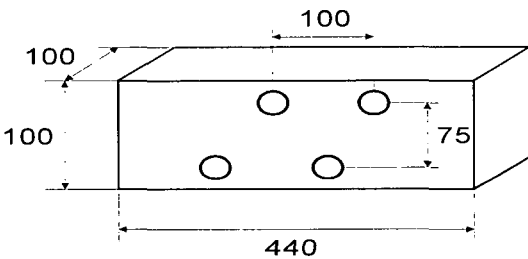


Fig. 3 (a) Dimension of concrete specimen and position of AE sensor attachment

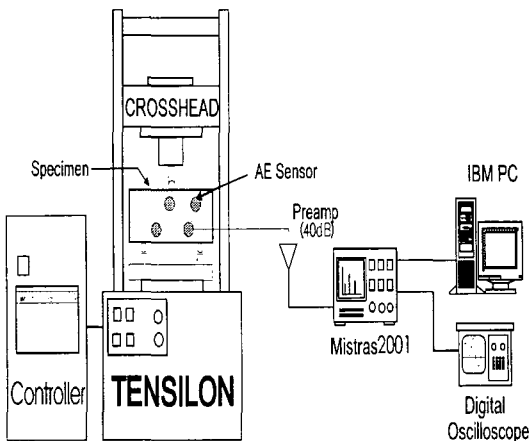


Fig. 3 (b) Schematic diagram of experimental set-up for three point bending test

4. 실험 결과 및 고찰

4. 1. 하중 변화에 따른 AE 인자 특성

일반적으로 음향 방출 기법은 재료 내부의 균열 발생 및 성장으로 인해 발생하는 AE 발생원의 AE 인자들을 분석함으로써 재료 내부의 변형 특성과 미시적 파손 기구를 평가할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 3점 굽힘 하중을 받는 콘크리트 부재의 미시적 변형 거동 특성 및 이로 인한 AE 발생신호 특성을 검토하였다.

Fig. 4는 하중 증가에 따른 AE 사상수의 변화특성을 나타낸 것으로 결과에서 보여주는 바와 같이 크게 3영역으로 나눌 수 있다. 즉 초기하중이 점차적으로 증가함에 따라 AE 사상수가 1초에 약 50개 미만으로 비교적 소수의 AE 신호가 발생하는 stage I 영역과 하중 증가와 더불어 AE 사상수가 급격히 증가하며 하중이 최대점까지 도달하는 stage II 영역, 마지막으로 하중이 급격히 감소함에 따라 AE 사상수가 점차적으로 감소하는 stage III 영역으로 나눌 수 있다.

stage I 영역에서는 초기 하중이 작용함에 따라 시험편 내의 기공 주변에서의 응력 집중과 시멘트 입자의 파괴, 골재부분과 페이스트(paste)부분과의 박리 현상에 의한 본드균열(bond crack)에 의해 발생한 미약한 에너지의 신호들이 소수 발생한다. 하중이 점차적으로 증가함에 따라 AE 사상수도 점차적으로 증가하며 이때 발생하는 AE 발생원은 본드균열 등에서 발생한 미소 균열이 기지재인 페이스트로 전파하면서 발생한 신호들로서 AE 사상수가 점차적으로 증가하고 있음을 보여주고 있다. 그리고 stage II 영역에서는 앞의 stage I 영역과 비교해 다수의 AE 사상수가 발생하는 영역으로써 특히 이 영역에서는 콘크리트 시험편에 작용하는 하중이 점차적으로 증가함에 따라 시험편의 표면상에서의 미소 균열들은 관찰되지 않고 있지만 다수의 AE 신호가 현저하게 증가함을 보여주고 있으며 작용하중이 최대 하중에 도달하면 앞에서 관찰되지 않았던 표면균열이 일시에 시험편 높이의 3/4가량 발생, 성장한다. 특히 이때 관찰되는 표면균열은 굽힘 모멘트가 최대로 작용하는 시험편 배면 중앙의 앞, 뒷면에서 동시에 발생하여 아주 짧은 순간에 중앙으로 전파되어 합체된다. 한편 이 영역에서의 AE 발생 신호들은 뒤의 시험편 파단면의 관찰결과에서 보여주는 바와 같이 주로 콘크리트 시험편에 있어서의 페이스트내의 균열전파 및 골재의 파단으로 인한 신호들이 대부분임을 알 수 있

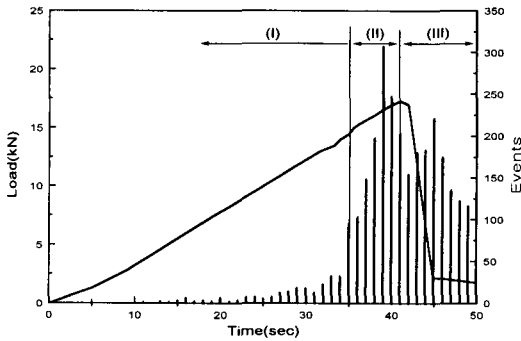


Fig. 4 Load and event vs time

다. 따라서 콘크리트 시험편은 최대 하중이 작용하는 지점에 있어서 일시에 시험편 두께 방향의 3/4지점까지 급격한 거시 균열로 성장하여 실제 콘크리트 부재로서의 하중지탱이 거의 불가능한 실질적인 파괴에 도달한다. 한편 최대 하중에서 실질적인 파괴에 도달한 시험편은 stage III 영역에서 보여주는 바와 같이 급격한 하중감소현상을 나타내며 시험편이 두 부분으로 최종 분리되며 이 영역에서 발생하는 AE 신호들은 잔여 리거먼트(ligament)부에 대한 균열 성장으로 인한 골재 및 페이스트 파단, 균열면의 마모 등의 복합적 현상에 의한 것으로 생각되어진다.

Fig. 5는 하중증가에 따른 AE 에너지와의 상관관계를 나타낸 것으로 하중 초기, 즉 탄성영역에서 발생하는 신호는 에너지가 상당히 낮다. 이와 같이 stage I 영역에서 발생하는 신호는 앞에서 언급하였듯이 시멘트 입자의 파괴, 그리고 골재와 페이스트와의 박리현상에 의해 발생하는 본드균열 또는 점차 하중이 증가함에 따라 페이스트 내로 전파하는 신호로써 전반적으로 20dB 이하의 낮은 에너지 레벨을 보여준다. 하지만 하중이 증가하여 stage II 영역에 도달하면 주균열이 발생하며 콘크리트 내부의 크고 작은 골재들의 파괴에 의한 신호가 다수 발생한다.

이때 골재의 파단에서 발생하는 신호의 에너지 레벨은 그림에서 보여주는 바와 같이 1700dB 까지 특히 높은 에너지 레벨을 보여주며 골재의 크기 또는 파단 형태 등에 따라 에너지 레벨의 차이는 있지만 다른 영역보다 훨씬 높게 나타난다.

그리고 마지막으로 급격한 하중 감소 영역인 stage III에서는 이미 내부적으로 주균열이 발생한 시험편이 하중이 가해짐에 따라 완전히 두 부분으로 분리 될 때

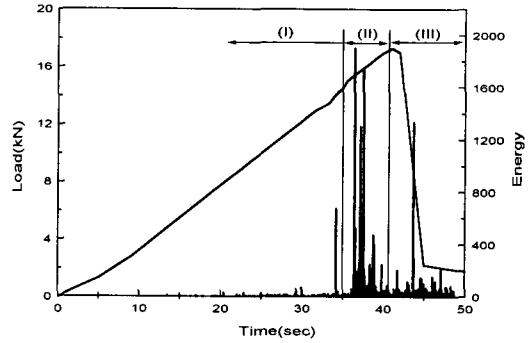


Fig. 5 Load and energy vs time

까지 발생한 신호들으로써 200dB까지의 에너지 레벨을 보여주고 있다.

Fig. 6은 하중이 증가함에 따라 AE 발생원의 지속시간의 변화를 나타낸 것으로 그림에서 보여주는 바와 같이 stage I 영역에서는 비교적 낮은 지속시간이 나타난다. 즉 시멘트 입자 파괴, 본드균열 등에서 발생하는 신호는 앞의 에너지 레벨과 비슷하게 낮은 지속시간을 보여준다. 이 영역에서는 200-500 μ s까지의 지속시간을 보이고 있다. 또한 stage II 영역의 골재의 파괴에서 발생한 신호의 지속시간은 최고 29000 μ s까지 대단히 높게 나타나고 있으며 잔여 리거먼트부의 균열성장 및 시험편의 균열면의 마모 등에 의해 발생하는 stage III 영역에서의 AE 발생원은 주로 1500 μ s까지의 지속시간을 보이고 있으며 stage I 영역에 비해 비교적 높게 나타난다.

한편 본 연구에서는 콘크리트 시험편의 3점 굽힘 시

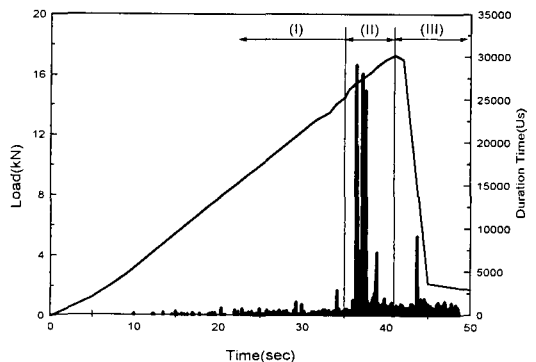


Fig. 6 Load and duration time vs time

험시 각 하중영역에 따라 발생하는 AE 발생원의 파형을 분석하기 위하여 광대역(WD)센서를 사용하여 디지털 오실로스코프 상에 수신된 AE 파형특성에 대하여 검토하였다.

Fig. 7 (a)는 앞의 Fig. 4의 stage I 영역에서 주로 관찰되는 콘크리트 시험편 내부의 골재와 페이스트의 박리현상에 의한 본드균열의 발생에 의한 AE 파형을 나타낸 것으로 연속형 파형 형태를 보여주고 있으며 이때 이들 파형의 주파수 성분은 Fig. 7 (b)에 나타낸 바와 같이 주로 100 - 300kHz의 주파수 대역을 나타낸다.

Fig. 8 (a)는 stage I 영역의 후반부와 stage II 영역에서 주로 관찰되는 기지재인 페이스트의 파괴에 의한 파형의 대표적인 예를 나타낸 것으로 측정결과에서 보여주는 바와 같이 Fig. 7 (a)의 본드균열에 의한 연속형 파형 형태와는 달리 돌발형 파형 형태를 보여주고 있다. 이때 발생한 돌발형 파형의 주파수는 100 - 500kHz까지의 광범위한 주파수 대역을 나타낸다.

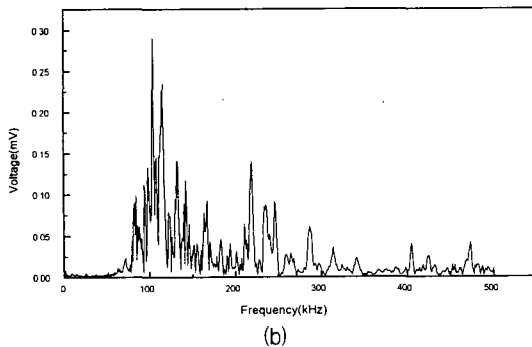
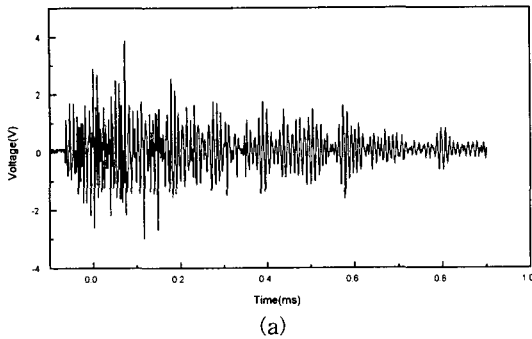
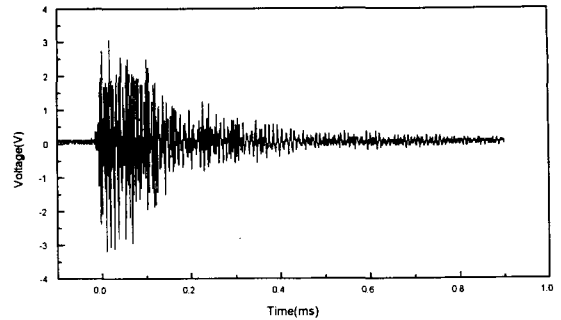
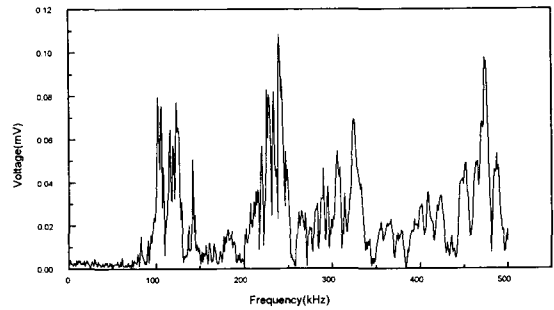


Fig. 7 Typical example of waveform and its frequency spectrum corresponding to bond crack in concrete



(a)



(b)

Fig. 8 Typical example of waveform and its frequency spectrum corresponding to paste fracture

4. 2. AE 발생원 위치 추정 결과

본 연구에서는 AE 발생원의 위치 추정을 위하여 앞에서 언급하였듯이 2차원 평면에서 삼각법으로 시험편 정면에 센서를 부착하고 발생원으로부터 발생한 AE 신호가 각각의 센서에 도달하는 시간차를 이용하여 AE 발생원 위치추정을 실시하였다.

Fig. 9에서 보여주는 바와 같이 stage I 영역에서는 초기 하중에 의한 콘크리트 시험편 내에 존재하는 기공 등의 주변에 발생하는 응력 집중에 의한 미소 균열, 시멘트 입자의 파괴와 본드균열에 의한 다수의 AE 발생원이 급힘 모멘트가 최대로 작용하는 시험편의 배면 중앙에 발생하고 있으며 이는 앞의 Fig. 4의 초기 하중에 의한 AE 사상수의 발생 결과와도 매우 잘 일치함을 보이고 있다. 한편 하중이 점차로 증가하여 시험편 내에 발생한 다수의 미소 균열들이 성장, 합체하여 주균열로 급격히 성장하여 시험편 전체 높이의 3/4지점까지 전파하는 stage II 영역에서는 다수의 AE 발생

원이 균열 진전 방향을 따라 발생하며 특히 이 지점에서 콘크리트 시험편은 실질적인 파괴에 도달하게 된다. 그리고 마지막으로 stage III 영역에서는 앞의 급속한 균열 성장을 보였던 stage II 영역으로부터 최종 파단에 도달할때 발생하는 AE 신호들로서 시험편의 잔여 리거먼트부의 균열성장 및 시험편의 균열면의 마모 등에 기인하는 AE 발생원이 다수 검출되고 있다. 한편 이때 발생하는 AE 신호 특성들은 앞의 Fig. 5 - 6에서 보여주는 바와 같이 stage II 영역에 비교해 매우 낮은 에너지 및 AE 지속시간을 가진다.

한편 이들 각 영역에 있어서의 AE 발생원들은 시험편 표면에서 관찰한 균열 성장 경로와 아주 잘 일치함을 Fig. 9의 결과에서 알 수 있으며 이는 본 콘크리트 시험편의 균열 발생 및 성장 거동을 모니터링 하는데 2차원 AE 발생원 위치 추정이 유효함을 보여주고 있다.

4. 3. 콘크리트의 미시적 파손기구 및 AE 특성

본 연구에서는 콘크리트의 파손기구 특성에 따른 AE 신호특성을 보다 정량적으로 검토하기 위하여 앞에서 언급한 각 하중단계에 대한 시험편의 파단면 특성을

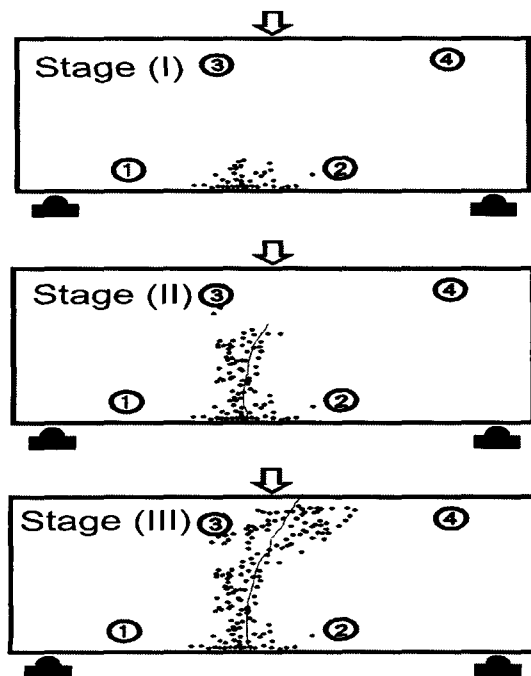


Fig. 9 AE source location at three loading stages

관찰하였다. Fig. 10은 3점 굽힘 하중하에서 파단된 콘크리트 시험편의 파단면의 대표적인 예를 보여주는 것으로 파단면 관찰에서 알 수 있는 바와 같이 하중초기(stage I) 단계에서 관찰되는 파단면의 특성은 골재와 페이스트의 경계면에서 골재가 페이스트로부터 분리되는 본드균열의 발생부가 다수 관찰되고 있으며 이때 발생된 다수의 본드균열들이 기지재(matrix)인 페이스트내를 성장, 합체함으로써 점차적인 최종 파단에 도달하게 된다. 특히 Fig. 10의 파단면의 특성에서 보여주는 바와 같이 시험편 파단면의 저면에서부터 균열 전파방향을 따라 위로 올라갈수록 다수의 골재 파손(aggregate fracture)이 관찰되고 있다. 즉 본 연구에 있어서의 콘크리트의 미시적 파손기구는 하중이 점차적으로 증가함에 따라 본드균열의 발생, 성장, 페이스트 균열 및 골재의 파단 순으로 파괴가 진행됨을 보여주고 있다.

Fig. 11은 앞의 Fig. 10의 콘크리트 시험편의 파단면 관찰 및 AE 신호 특성 해석결과를 토대로 얻어진 콘크리트의 미시적 파손기구 및 이들 각 파손기구로부터 측정된 AE 신호특성을 도식적으로 나타내었다. Fig. 11에서 보여주는 바와 같이 초기 하중이 가해짐에 따라 골재와 페이스트의 경계면에서 본드균열이 발생한다. 이때 발생하는 AE 신호는 20dB 이하의 낮은 에너지 레벨과 300kHz이하의 낮은 주파수 대역을 나타낸다. 그리고 하중이 점점 증가함에 따라 초기의 주 균열에서 기지재인 페이스트를 전파하는 균열이 발생하고 성장하는 단계로 발전된다. 이때 발생하는 AE 신호는 20dB이하의 낮은 에너지이지만 상대적으로 500kHz까지의 광범위한 주파수 대역을 보이고 있다. 마지막으로 골재의 파단에 이르는 단계에서는 특히 높은 1700dB까지의 에너지 레벨, 500kHz까지의 광범위한 주파수 대역을 나타내고 있다. 따라서 이와 같이 콘크리트 부재가 굽힘 하중을 받을 때 각각의 영역에서 발생하는 AE 신호의 여러 인자들이 서로 다른 특성을 나타내기 때문에 이를 분석함으로써 콘크리트 부재의 손상정도, 잔여수명 등을 추정하고 모니터링하는데 AE 기법이 유효함을 보여주고 있다.

또한 Table 3에서는 본 연구에서 얻은 결과를 토대로 콘크리트 부재의 파손 기구 특성에 대한 AE 신호들의 각 주요 인자들의 정량적인 값을 수치적으로 나타낸 것으로서 국부적인 응력집중에 의해 발생하는 소수의 미소균열로 인한 20dB 이하의 낮은 에너지와 200 - 500 μ s까지의 지속시간을 나타내는 stage I 영역, 굽

격한 균열 진전이 발생하는 stage II 영역에서는 골재 파단 등에 의해 1700dB까지의 에너지 레벨과 29000 μ s까지의 지속시간을 보이는 AE 신호 특성을 나타낸다. 마지막으로 stage III 영역에서는 200dB까지의 에너지 레벨과 1500 μ s까지의 지속시간을 보여주고 있으며 주

파수 대역은 전 영역에서 500kHz까지 광범위하게 나타나고 있다.

Table 3 AE parameter values in each stage I, II, III

Parameter \ Stage	Energy(dB)	Duration Time(μ s)	Frequency (kHz)
Stage I	~ 20	200~500	100 ~ 500
Stage II	~ 1700	~ 29000	100 ~ 500
Stage III	~ 200	~ 1500	100 ~ 500

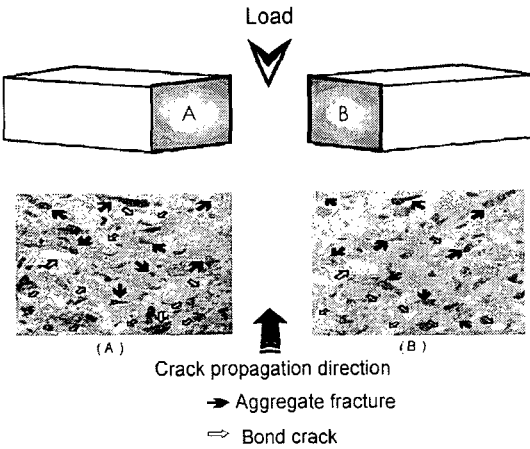


Fig. 10 Typical example showing the characteristic of fracture surface of concrete specimen

5. 결론

본 연구에서는 콘크리트 시험편을 제작하여 3점 굽힘 시험을 실시하여 AE 특성과 AE 발생원 위치 추정을 평가한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 하중의 증가에 따른 콘크리트 시험편의 미시적 변형 거동 및 AE 특성은 크게 3영역으로 특징지을 수 있음을 알 수 있었다. 즉, i) 하중 초기에 시험편 내의 미소 불균질에서의 국부적인 응력집중에 의해 발생하는 소수의 미소균열로 인한 낮은 AE 사상수의 발생을 보이는 stage I, ii) 점차적인 하중증가와 더불어 AE 사상수가 현저하게 증가하는 stage II, 특히 이 영역에서는 하중이 최대하중지점 근처에 도달하게 되면 시험편 폭의 약 3/4 지점까지 급격한 균열발생이 관찰, iii) 급격한 하중감소에 따라 AE 사상수가 점차적으로 감소하는 stage III
- 2) 콘크리트 시험편의 미시적 파괴거동 특성을 이해하기 위한 2차원 AE 발생원 위치 추정 결과 하중초기, 즉 stage I 영역에서는 굽힘 모멘트가 최대로 작용하는 시험편 중앙 배면에 주로 AE 발생원이 존재하며 하중이 점차적으로 증가하는 stage II, III 영역에서는 stage I 영역에서 이미 발생한 미소균열들이 주균열로 성장하는 균열성장 경로 주변에 AE 발생원이 집중적으로 존재함을 알 수 있었다. 또 이들 각 영역에 있어서의 AE 발생원들을 시험편 표면에서 관찰한 균열 성장경로와 비교 검토한 결과 아주 잘 일치함을 알 수 있었으며 이는 2차원 AE 발생원 위치추정이 콘크리트 부재의 균열발생, 성장 거동을 모니터링 하는데 유효함을 보여주는 결과이다.
- 3) 콘크리트의 재료의 파괴특성은 초기하중에서는 골재부분과 페이스트의 경계면에서 발생하는 본드균

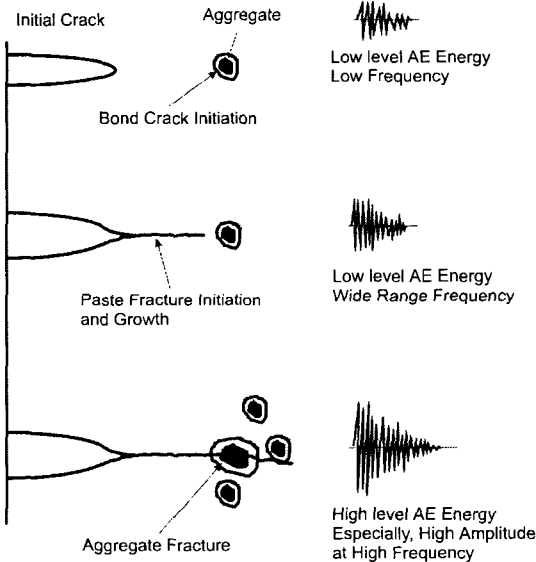


Fig. 11 Schematic diagram showing microscopic fracture behavior and its corresponding AE signal characteristic in concrete specimen

열로 인한 낮은 AE 에너지와 주파수 특성이 주로 관찰되며 하중이 점차로 증가함에 따라 페이스트, 골재의 파단순으로 파괴가 진행된다. 또 이때 발생하는 신호는 점차적으로 높은 AE 에너지와 넓은 대역의 주파수 특성을 보이고 있으며 특히 골재 파단 시 발생하는 AE 신호는 가장 높은 에너지 및 진폭 특성을 보여줌을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 1997년 한국표준과학연구원 방재기술연구센터 기관고유사업의 일환으로 수행되었으며 관계자들에게 감사의 말씀을 드린다.

참고문헌

- [1] 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)
- [2] 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)
- [3] Masayasu Ohtsu, Yuichi Tomoda and Taisaku Fujioka, "Estimation of initial damage in concrete by acoustic emission", Processings 4th FENDT '97, KSNT, pp. 569-577, (1997)
- [4] 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, pp. 751-756, (1994)
- [5] 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)
- [6] J. Berthelot and J. Robert, "Modeling concrete damage by acoustic emission", Journal of Acoustic Emission, 6, pp. 43-60, (1987)
- [7] J. F., Labuz, S. P. Shah and C. H. Dowding, "Measurement and description of tensile fracture in granite", Journal of Engineering Mechanics, 115, pp. 1935-1949, (1989)
- [8] Nomura, H. Mihashi, A. Suzuki and M. Izumi, "Aspects of fracture process zone of concrete" Progress in Acoustic Emission V, The Japanese Society for NDI, (1990)
- [9] S. Yuyama, T. Okamoto, R. Tomita, H. Fujiwara, S. Dajio, M. Ohtsu and 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, pp. 1-8, (1992)
- [10] Shigenori Yuyama, Takahisa Okamoto, and Shigeyoshi Nagataki, "Acoustic emission evaluation of structural integrity in repaired reinforced concrete beams", Materials Evaluation, Vol. 52, No. 1, pp. 86-90, (1992)
- [11] 이준현, 이진경, 장일영, 윤동진, "음향방출을 이용한 콘크리트 부재의 미시적 파괴특성의 On-Line Monitoring", 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, pp. 677-682, (1998)
- [12] 이진경, 이준현, 윤동진, "음향방출을 이용한 mortar의 미시적 파괴거동에 관한 연구", 한국비파괴검사학회 춘계학술발표회, pp. 323-332, (1998)
- [13] Ronnie K. Miller and Paul McIntire, "Nondestructive testing handbook", Vol. 5, Acoustic Emission Testing, ASNT, (1987)