

음향방출을 이용한 콘크리트 부재의 미시적 파괴특성의 On-Line Monitoring

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

이 준 현* 이 진 경** 장 일 영*** 윤 동 진****
Lee, Joon Hyun Lee, Jin Kyung Chang, Il Young Yoon, Dong Jin

ABSTRACT

Concrete is an inhomogeneous material consisting of larger aggregates and sand embedded in a cement paste matrix. In this study, an acoustic emission technique has been used to clarify the microscope failure mechanisms of concrete under three point bending test. AE source location has also been done to monitor the activities of internal damage and the progress of microscopic failure path during the loading. The relationship between AE characteristic and microscopic failure mechanism is discussed

1. 서론

최근 국내에서 발생한 각종 붕괴사고들로 인하여 콘크리트 구조물의 안전성 확보 및 내구성 향상을 위한 연구에 많은 관심이 모아지고 있다. 특히 콘크리트는 다상(multi-phase)의 재료로서 구성되어지는 복합재료의 일종으로서 quasi-brittle의 재료적 특성을 가지고 있기 때문에 실제 복잡한 미시적 파괴특성을 나타낸다. 따라서 콘크리트 구조물의 안전성 확보를 위하여는 먼저 하중의 증가에 따른 콘크리트 내부의 변형특성 및 미시적 파손기구를 파악하여야 할 필요가 있으며, 특히 실구조물에 있어서는 이들 특성들을 비파괴적으로 on-line모니터링 하여야 할 필요가 있다. 특히 AE 시험은 재료 내부의 균열발생 및 성장 등의 dynamic process를 on-line 상태에서 모니터링하는데 매우 유익한 수단으로 최근 AE 기법을 콘크리트에 적용하려는 일련의 연구들이 보고되고 있다.

따라서 본 연구에서는 하중을 받는 콘크리트 부재의 미시적 파손기구 및 각 파손기구에 대한 AE 특성을 명확히 함으로서 콘크리트 부재의 균열검출 기술을 확립하고 나아가 콘크리트 구조물의 on-line 모니터링을 위한 기초를 마련하고자 한다.

2. 본문

2.1 AE 이론

일반적으로 재료가 외부로부터 하중을 받아 변형을 일으킬 때나 재료내에 균열이 발생, 성장할 때 원

*정회원, 부산대학교 기계공학부 교수

**부산대학교 대학원 박사과정

***금오공대 토목공학과 교수

****한국표준과학연구소 방재기술연구센터 선임연구원

자의 재배열이 일어나며 이때 물체는 급속한 에너지 해방에 의해 탄성파를 방출한다. 이 탄성파 방출을 음향방출(Acoustic Emission, AE)이라고 부르며(그림 1) 재료 내부의 균열발생 및 성장 등의 dynamic process를 on-line 상태에서 모니터링하는데 매우 유익한 수단이다. 특히 AE는 미소균열(microcrack), 전위이동(dislocation movement), 상변위(phase transformation) 등 재료 내부의 불균질에 의한 신호들으로써 이들 신호들의 AE parameter인 event, energy, duration time, rise time 등을 분석함으로써 재료의 물리적 특성뿐만 아니라 재료 내부 손상 및 특징을 유추할 수 있다.

3. 재료 및 실험방법

3.1 재료 및 시험편

본 연구에서 사용된 콘크리트 시험편의 시방배합은 표 1에 나타나 있다. 시험편은 노치를 넣지 않고 440×100×100(mm)의 크기로 정하였다.

표 1. 시방배합

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

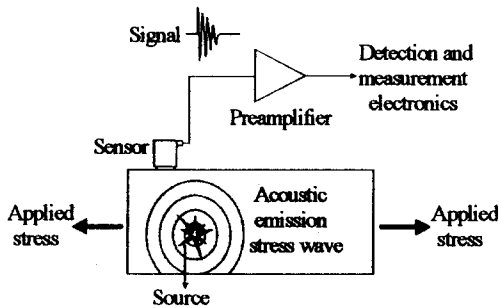


그림 1. 음향방출기법의 원리

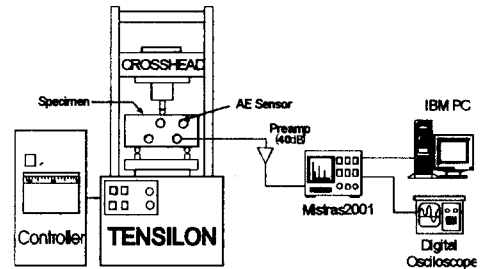


그림 2. 3점 굽힘시험에 대한 시험 개요도

3.2 실험방법

본 실험에서는 그림 2에서 보는 바와 같이 2차원 AE 발생원 위치 추정(AE source location)방법의 하나인 triangular 방법으로 시험편에 센서를 부착하고 3점 굽힘시험(three point bending)을 실시하였다. 먼저 Tensilon(10ton)의 load cell에 의해 시험편에 하중이 가해지면 시험편내의 국부적인 변형에 의한 AE 발생원이 발생한다. 이때 발생된 AE 발생원은 AE 센서에 의해 감지된 후 1차적으로 예비 증폭기(1220A)에 의해 40dB 증폭된 후 주AE장비(MISTRAS 2001)에서 2차적으로 다시 40dB 증폭되어 각종 AE parameter들에 대한 분석이 이루어진다. 이때 사용된 AE 센서는 R15공진형 센서가 사용되었다. 한편 monitor내의 각 미시적 파손기구에 대응하는 AE파형특성을 명확하게 하기 위하여 광대역 센서(WD)를 추가로 부착하여 디지털 오실로스코프(LeCroy 9310A)에서 파형을 분석하였다. 또한 3

점 굽힘시험에서 가해지는 하중속도는 0.5mm/min으로 하였고 주위의 전기적, 기계적 잡음을 제거하기 위하여 threshold level은 180 μ V로 하였다. 그리고 시험편 양 지지축 사이의 거리는 100mm로 정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 콘크리트에서의 하중변화와 AE parameter와의 상관 관계

그림 3에서는 콘크리트 시험편에서 AE 센서를 시험편 정면에 부착하고 3점 굽힘시험을 한 결과를 나타낸 것으로 하중의 증가에 따른 AE event의 특성을 나타낸 것이다.

그림에서 보여주는 바와 같이 앞의 mortar 시험편과 마찬가지로 영역 I에서는 초기 하중이 증가함에 따라 시험편내의 미소 불균질에서의 응력 집중에 의해 미약한 에너지의 신호들과 콘크리트 내부의 골재부분과 paste부분의 경계면에서 발생한 bond 균열의 발생에 의한 신호들이 소수 발생한다. 그리고 II영역에서는 다수의 AE event가 발생한다. 특히 이 영역에서는 최대 하중에 도달하기 전까지 시험편 표면에서의 균열발생은 전혀 보이지 않는다. 하지만 최대 하중에 도달하면 갑자기 균열이 시험편폭 크기의 2/3지점까지 발생한다. 균열은 굽힘모멘트가 최대인 시험편 아랫부분 중앙에서 발생하며 초기에는 시험편 앞쪽과 뒤쪽에서 동시에 균열이 발생하여 아주 짧은 순간에 중앙으로 전파되어 합체된 후 급격하게 시험편 윗부분으로 빠르게 전파된다. 이 영역에서는 파단된 시험편의 파단면을 관찰함으로써 paste내의 균열전파로 인한 신호가 다수이고 또한 골재의 파단에서 나오는 신호도 약간 섞여 있음을 알 수 있었다.

그리고 최대 하중이후 하중이 감소함에 따라 다수의 AE event가 관찰되고 있는 III영역에서는 완전 파단에 이르기까지 시험편내의 균열이 성장, 전파하면서 발생한 신호로서 II영역에서 발생한 신호보다 AE 에너지나 duration time이 작게 나타나고 있다.

특히 표 2에서는 콘크리트의 각 stage의 변형거동에 대응하는 AE parameter 특성분류를 나타내었다.

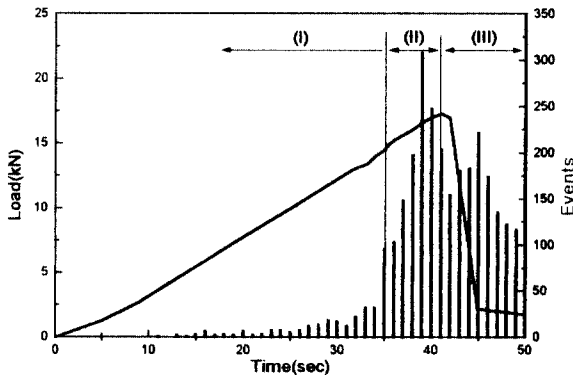


그림 3. 하중증가에 따른 AE event와의 관계

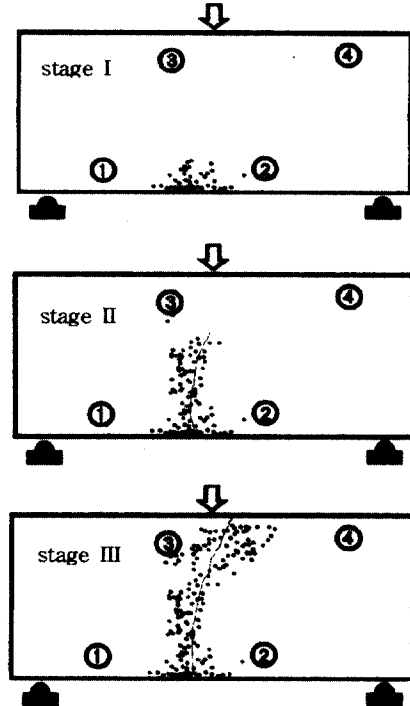


그림 4. 3점 굽힘시험에서 AE 발생원 위치추정

표 2. 콘크리트의 각 stage 변형거동에 대응하는 AE 특성 분류

	Energy(dB)	Duration Time(μ s)	AE Events(N/sec)
Stage I	~ 20	200 ~ 500	1 ~ 20
Stage II	~ 1700	~ 29000	100 ~ 300
Stage III	~ 200	~ 1500	100 ~ 200

4.2 AE 발생원 위치 추정(AE Source location)

AE 시험에서 단지 몇 개의 AE 센서들을 이용하여 가장 정확하게 측정할 수 있는 것이 AE 발생원 위치 추정이다. AE 발생원 위치 추정 기법은 각 시험편 재료의 속도를 알고 있음으로 해서 AE event가 각각의 센서에 도달하는 시간차를 이용하여 발생원의 위치를 정확하게 측정하는 방법과 또는 각각의 센서에서 받은 신호의 Amplitude의 차를 계산함으로써 AE 발생원 위치 추정을 하는 방법이 있다. 본 연구에서는 전자의 방법을 사용하였으며 앞에서 언급했듯이 triangular 방법을 이용하여 2차원 평면에서 시험편 정면에 센서를 부착하고 AE 발생원 위치 추정을 실시하였다.

그림 4는 콘크리트 시험편에서 AE 발생원 위치 추정을 한 것으로 그림에서 보는 바와 같이 센서 ①, ②, ③, ④를 triangular 방법으로 시험편에 부착하고 윗면에서 하중을 가하였다. 먼저 하중이 가해지는 초기에는 균열은 발생하지 않았지만 재료 내부의 불연속과 시멘트 입자의 파괴에서 발생한 신호로서 stage I에 속하며 하중이 점차로 증가하여 시험편에 균열이 시험편 전체 높이의 3/4정도까지 전과한 경우인 stage II영역에서는 다수의 AE event가 균열진전 방향을 따라 발생하였다.

그리고 마지막으로 stage III영역에서는 앞의 AE event의 결과에서도 알 수 있는 바와 같이 최대 하중이후 균열이 점점 증가함에 따라 다수의 AE event가 발생하였고 이는 AE 발생원 위치 추정 기법의 결과에서도 알 수 있는 바와 같이 이 영역에서도 다수의 AE 발생원 위치추정을 할 수 있었다. 특히 그림에서 보여주는 바와 같이 발생하는 발생원들이 균열전파 방향을 따라 다수 발생하고 있는 점으로 보아 triangular 방법의 AE 발생원 위치 추정 기법이 아주 양호한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있었다.

4.3 콘크리트의 미시적 파손기구 및 AE 특성

그림 5는 본 연구결과로부터 얻어진 콘크리트의 미시적 파손기구 및 이들 각 파손 기구로부터 측정된 AE 신호특성을 도식적으로 나타내었다. 그림에서 보여주는 바와 같이 하중의 증가에 따른 콘크리트의 미시적 파손기구와 이에 대응하는 AE 특성은 크게 3가지 형태로 나눌수 있다. 즉 콘크리트의 파손기구는 주로 bond 균열, paste 균열, aggregate 파단에 의해 지배되고 있음을 알 수 있다. 비교적 하중초기에는 골재(aggregate)와 paste의 경계면에서 bond crack이 발생하며 이 bond crack의 발생에 의해 나타나는 AE 신호는 비교적 낮은 AE 에너지 레벨과 낮은 주파수 특성을 나타낸다. 그리고 하중이 점점 증가함에 따라 초기의 주균열에서 matrix인 paste를 전파하는 균열이 발생하고 성장하는 단계로 발전된다. 이때 발생하는 AE 신호는 bond 균열 발생에 의한 AE 신호특성과 비교해 다소 높은 AE 에너지 레벨과 상대적으로 광범위한 주파수 대역을 보이고 있다. 마지막으로 골재의 파단에 이르는 단계에서는 높은 에너지 및 고주파 영역에서의 높은 AE진폭(Amplitude) 특성을 나타낸다

그림 6은 콘크리트 시험편의 파단면을 나타낸 것으로 파단면 관찰에서 알 수 있는 바와 같이 콘크리트 시험편의 파단초기에는 골재와 paste의 경계면에서 골재가 paste로부터 이탈한 흔적이 다수이며 윗

부분으로 갈수록 골재의 파단이 증가함을 알 수 있다.

이는 앞의 콘크리트 파괴특성과 매우 잘 일치하는 것으로 하중이 점점 증가함에 따라 bond crack, paste crack, 골재 파단의 순으로 파괴가 진행되고 있음을 알 수 있다.

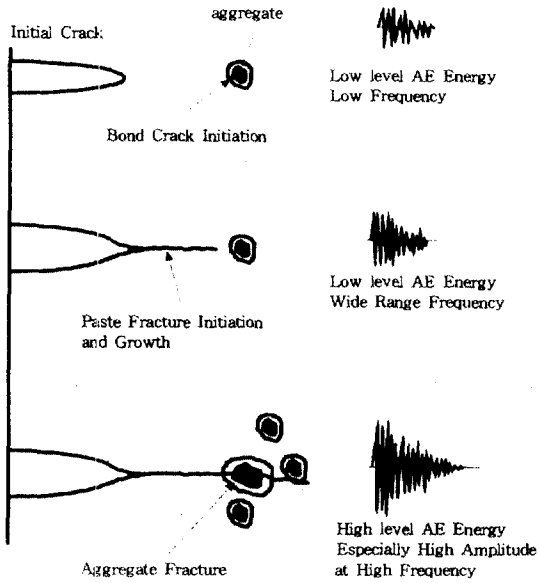


그림 5. 콘크리트의 미시적 파괴거동과 AE 특성

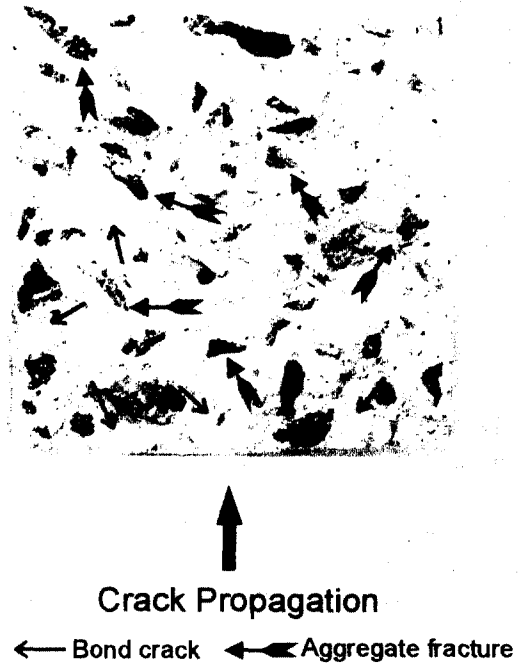


그림 6. 콘크리트 시험편의 파단면의 특성

5. 결론

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

1. 하중의 증가에 따른 콘크리트 시험편의 미시적 변형거동 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 event의 발생을 보이는 stage I
- ii) 점차적인 하중증가와 더불어 AE event 수가 현저하게 증가하는 stage II, 특히 이 영역에서는 하중이 최대하중지점 근처에 도달하게 되면 시험편폭의 약 2/3 지점까지 급격한 균열발생이 관찰
- iii) 급격한 하중감소에 따라 AE event 수가 점차적으로 감소하는 stage III

2. 콘크리트 시험편의 AE 발생원 위치 추정에서 하중이 가해지는 초기에서는 시험편 아랫면에 소수의

AE event가 발생하고 최대 하중에서는 시험편에 발생하는 균열을 따라 다수의 AE event가 발생하므로 triangular 방법이 시험편의 AE 발생원 위치 추정 기법에 아주 적합함을 알 수 있었다.

4. 콘크리트의 파괴특성은 초기하중에서는 골재부분과 paste의 경계면에서 발생하는 bond crack으로 인한 낮은 AE 에너지와 주파수 특성이 관찰된다. 그러나 하중이 점차로 증가함에 따라 paste, 골재의 파단순으로 파괴가 일어나며 이때 발생하는 신호는 점차적으로 높은 AE 에너지와 넓은 대역의 주파수 특성을 보이고 있다.

후기

본 연구는 1997년 한국표준과학연구원 방재기술연구센터 기관고유사업의 일환으로 수행되었으며 관계자들께 감사를 드린다.

참고문헌

- [1] Berthelot, J. and J. Robert "Modeling concrete damage by acoustic emission" Journal of Acoustic Emission, 6, 1987, pp43-60
- [2] Lockner, D.A., J. D.Byerlee, V.Duksenko, A.Ponomarev, and A.Sidorin "Observations of quasi-static fault growth from acoustic emission" submitted for publication in Fault Mechanics and Transport Properties of Rocks, T-F. Wand and B.Evans, Editors
- [3] Labuz, J.F., S.P. Sha h, and C.H. Dowding. "Measurement and description of tensile fracture in granite" Journal of Engineering Mechanics, 115, 1989,pp 1935-1949
- [4] Nomura, N., 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
- [5] 이준현, "초음파 및 음향방출을 이용한 콘크리트 부재의 균열검출에 관한 연구", 한국표준과학연구원, 연구보고서, 1997