

무근 콘크리트에서 균열 발생원 탐사를 위한 AE 기법의 적용

Application of Acoustic Emission Technique for Crack Source Location Search in Plain Concrete

한 상 훈^{*} 이 응 중^{**} 조 홍 동^{***} 김 동 규^{****}
Han, Sang Hoon Lee, Woong Jong Cho, Hong Dong Kim, Dong Gyu

ABSTRACT

This study was conducted to evaluate structural integrity and crack source location of plain concrete beams using acoustic emission. Three point bending tests were carried out plain concrete specimen under cyclic loadings. The variable is W/C of concrete. From the tests it was shown that a breakdown of the kaiser effect and high AE activities during unloading could be effective indices to estimate the level of deterioration in plain concrete structures. The time and location and propagation of crack could be easily determined by monitoring AE, which concludes that AE technique can be a very useful tool to evaluate structural integrity of concrete plain beams.

1. 서론

최근 대형 구조물의 손상 및 붕괴가 심각한 사회문제로 대두되고 있다. 콘크리트 구조물에 균열이 발생하면 구조물의 안전성에 크게 영향을 미치므로 구조물의 사용년수를 단축시킬 수 있다. 따라서, 구조물상에 존재하고 있는 균열이 어느 정도 발생되어 있으며 진행성 균열인지를 감지할 수 있는 측정기술이 필요하다. 이러한 점에서 측정기술의 발전 및 다른 산업의 동반발전으로 균열의 발생위치 및 시간, 진전상황을 모니터링할 수 있는 음향 방출 시스템 장비들이 개발되고 있다.

본 연구에서는 무근 콘크리트로 제작한 휨강도 공시체에 반복하중을 재하하여 AE parameters 분석, Kaiser 효과 및 Felicity 효과를 검증하고 결합원 탐사 기법을 실시하여 고찰하였다. 또한, 교량과 같은 대형 콘크리트 구조물의 상시 모니터링을 위한 기초 자료를 마련하는데 그 목적이 있다.

2. AE 정의 및 발생기구

그림 1과 같이 재료가 외력 또는 내부의 힘에 의해 변형이나 파괴가 일어나게 되면 재료내부에 축적된 변형에너지는 열에너지나 탄성파와 같은 여러 형태의 에너지로 변환된다. 이 때 외부에서 계속

* 정회원, 충북대학교 토목공학과 교수

** 쌍용중앙연구소 콘크리트 연구실 주임연구원

*** 정회원, 충북대학교 토목공학과 박사과정수료

**** 충북대학교 토목공학과 박사과정

장치에 의해서 가시적으로 검출된 탄성파를 AE라고 한다. 탄성파는 본질적으로 물체의 구성 입자들이 사방으로 진동하여 가는 현상이며, 이러한 진동이 센서에 의해서 전기적 신호로 변환될 때 비로소 AE 신호로 검출되게 된다. 이 AE 신호의 parameters를 분석함으로써 균열의 발생위치 및 진전상황, 그리고 손상정도를 추정할 수 있다. 고체 내에서의 전위의 이동이나 미소균열의 생성 및 성장 등이 대표적인 AE 발생원으로 알려져 있는데, 전자는 연속형 신호를, 후자는 돌발형 신호를 발생하는 것으로 알려져 있다.

그림 2와 같이 일단 한번의 응력을 받은 재료에 대해 재차 하중을 부과할 경우에 이미 경험한 응력수준이하에서는 AE 신호가 발생되지 않는데 이러한 현상을 Kaiser 효과라 한다. 반대로, 이미 경험한 응력보다 낮은 응력이 작용한 경우에도 AE가 발생되는데 이러한 현상을 Felicity 효과라 한다. 선행하중을 P_{1ST} , 다음 재하과정에서 AE가 발생하기 시작한 하중을 P_{AE} 로 할 때 재료의 손상정도를 나타내는 FR (Felicity Ratio)은 식 (1)과 같다.

$$FR = \frac{P_{AE}}{P_{1ST}} \quad (1)$$

식 (1)에서 계산된 값이 1보다 크면 시험편이 안정한 상태이고, 1보다 작은 값이면 시험편이 손상되어 불안정한 상태이다.

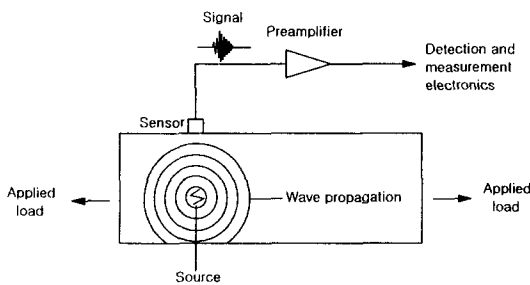


그림 1. 음향방출의 원리

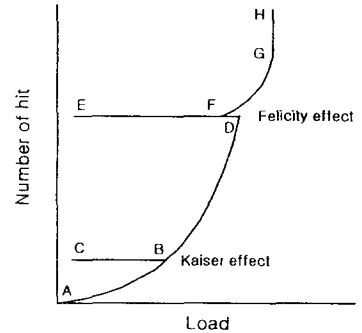


그림 2. Kaiser 효과와 Felicity 효과

3. 모의 AE 발생원 실험

3.1 개요

모의 AE 발생원 실험은 본 실험에 앞서 센서의 배치방법, 부착 등 시스템 성능 검사를 하는 것으로서 연필심을 센서로부터 각각 일정한 거리에서 파괴한다. 일반적으로 널리 사용하는 연필심은 직경 0.5mm, 경도 2H이며 파괴되는 연필심의 길이는 0.2~0.3mm이다. AE 분야에서 널리 사용되는 표준방법은 센서로부터 10cm 떨어진 곳에서 표면과 30°의 각도를 이루면서 연필심을 파괴한다. 이때 가장 높은 진폭값이 올바른 값이 아니라 허용범위 내에서의 일정한 진폭값이 올바른 값이다.

3.2 결함원 탐사

400×300×100mm인 무근 콘크리트 블록에서 5cm간격으로 연필심 파괴를 실시하여 결함원 탐사의 정확도를 측정하였으며 1차원 결함원 탐사기법과 2차원 결함원 탐사기법 중 사각형 탐사기법과 삼각형 탐사기법을 적용하였다.

3.2.1 1차원 결함원 탐사기법

R15센서 2개를 30cm의 거리를 두고 선형배치하여 연필심 파괴실험을 실시하였다. 결과는 표 1과 같으며, 거리의 증가에 따른 오차의 변동이 생긴 원인은 콘크리트 재료의 불균질성의 영향때문이며, 본 실험 결과에 의하면 전반적으로 1차원 결함원 탐사기법이 AE 결함원 탐사기법으로 적절하다고 사료된다.

표 1. 연필심 파괴 실험 결과 (1차원)

위치(cm)	탐사위치(cm)	오차(cm, %)
5	5.2	0.2 (4.0)
10	9.9	-0.1 (1.0)
15	15.6	0.6 (4.0)
20	20.4	0.4 (2.0)
25	26.7	1.7 (6.8)

3.2.2 2차원 결함원 탐사기법

1) 사각형 결함원 탐사기법

그림 3과 같이 R15센서 4개를 가로 30cm, 세로 20cm 간격으로 배치하였다. 먼저 Y축을 10cm로 고정하고, X축은 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30cm인 곳에서 연필심 파괴실험을 실시하고, 다음에 X축을 10cm로 고정하고서 Y축을 0, 5, 10, 15, 20cm인 곳에서 연필심 파괴실험을 실시하였다. 실험결과에는 표 2에 나타내었으며, 무근 콘크리트에서 파의 감쇠가 심하여 모의 결함원 파괴실험위치 중 3개소에서 결함원 탐사가 되지 않았다. 또한, 오차가 심한 위치도 다수 있음을 알 수 있었다.

표 2. 연필심 파괴 실험 결과 (사각형)

위치(cm)	탐사위치(cm)	오차(%)
0, 10	—	위치탐사 안됨
5, 10	—	위치탐사 안됨
10, 10	9.78, 11.10	2, 11
15, 10	13.72, 9.09	9, 9
20, 10	19.47, 9.99	3, 0.1
25, 10	25.29, 10.57	1, 6
30, 10	32.23, 3.28	오차 심함
10, 0	6.10, -1.49	오차 심함
10, 5	—	위치탐사 안됨
10, 10	9.69, 9.13	3, 9
10, 15	9.13, 12.87	9, 14
10, 20	7.21, 12.29	오차 심함

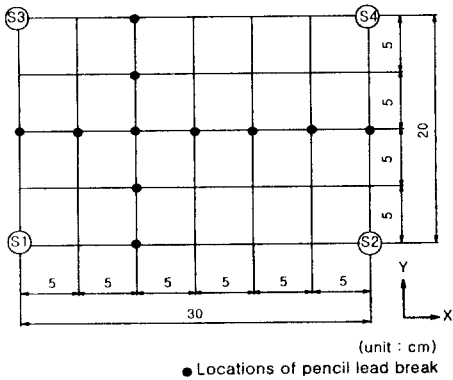


그림 3. 연필심 파괴 실험 (사각형)

2) 삼각형 결함원 탐사기법

그림 4와 같이 R15센서 4개를 가로 20cm, 세로 20cm 간격으로 배치하였다. 먼저 Y축을 10cm로 고정하고, X축은 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30cm인 곳에서 연필심 파괴실험을 실시하였으며 다음에 X축을 15cm로 고정하고서 Y축을 0, 5, 10, 15, 20cm인 곳에서 연필심 파괴실험을 실시하였다. 실험결과에는 표 3과 같고 2개를 제외한 발생원에서 거의 정확하게 위치표정되었다.

복합체인 콘크리트에서는 파의 감쇠가 심하여 동일한 면적을 탐사할 경우에는 삼각형 탐사기법이 사각형 탐사기법보다 효율적이다. 따라서, 횡강도 공시체시험에서는 R15센서 4개를 사용하여 삼각형 결함원 탐사기법을 실시하였다.

표 3. 연필심 파괴 실험 결과 (삼각형)

위치(cm)	탐사위치(cm)	오차(%)
0, 10	0.00 , 7.92	0, 21
5, 10	0.11 , 8.82	오차 심함
10, 10	9.54 , 7.63	5, 24
15, 10	13.06 , 8.17	13, 18
20, 10	20.69 , 8.15	3, 18
25, 10	26.04 , 9.85	4, 2
30, 10	29.98 , 7.69	0.1, 23
15, 0	13.45 , -0.72	11, -
15, 5	13.39 , 2.26	오차 심함
15, 10	13.42 , 7.85	11, 22
15, 15	15.30 , 15.00	2, 0
15, 20	15.69 , 19.84	5, 1

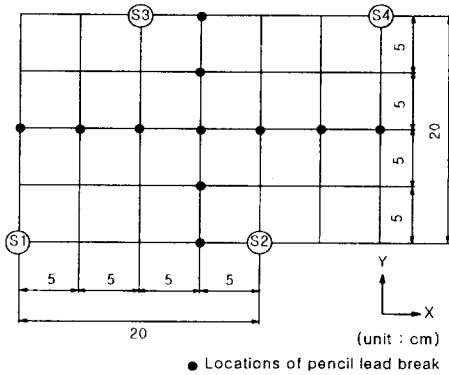


그림 4. 연필심 파괴 실험 (삼각형)

4. 시험체 제작 및 실험방법

휨강도 공시체는 550×150×150mm의 크기로 물-시멘트비에 따라 각각 3개씩 총 9개를 제작하였다. 휨강도 공시체에서는 삼각형 결함원 탐사기법을 이용하여 시험편의 옆면에 4개의 AE 센서를 부착하고, 3점 휨재하실험을 실시하였다. 실험장비의 개요도는 그림 5과 같으며, 하중재하방식은 물-시멘트비에 따라 파괴하중을 예상하여 반복하중을 재하하였다. UTM으로 시험편에 하중을 재하하면 시험편내의 국부적인 변형에 의하여 AE 발생원이 발생하는데 이 발생된 AE는 센서에 의해 감지된 후 pre-amplifier에서 40dB 증폭된 후 SPARTAN2000에서 다시 2차적으로 20dB 증폭되어 각종 AE parameters들에 대한 분석을 실시하였다.

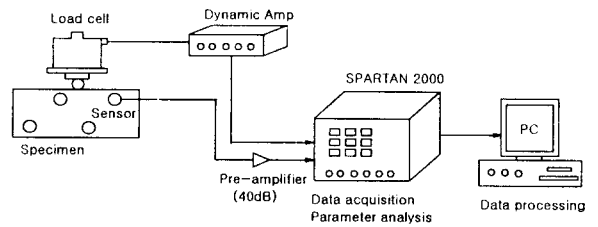


그림 5. 실험장비의 개요도

표 4. 콘크리트 배합

휨강도 공시체	W/C (%)	굵은 골재 최대치수 (mm)	슬럼프 (cm)	잔골재율 (%)	공기량 (%)	단위중량 (kg/m ³)			
						물	시멘트	잔골재	굵은 골재
I	40	25	6.0	46	3.1	193	483	767	931
II	50	25	7.0	48	3.8	193	386	839	940
III	60	25	6.1	50	3.5	193	322	901	931

5. 실험결과 분석

5.1 휨강도 공시체의 AE 특성

그림 6은 휨강도 공시체의 AE parameters의 한 예이다. 그림 6a는 하중 대 hits의 관계를 나타내고, 하중 대 hits의 관계를 정확하게 보기 위하여 그림을 상세하게 나타낸 것이 그림 6b이다. 그림 6c와 d는 각각 시간과 에너지, 시간과 hits의 관계를 나타내고 있다. Type I-1은 하중 2.38tf에서 휨파

괴되었으며 1.71tf이후부터 상당수의 hits가 발생했다. Type I-2는 하중 2.38tf에서 시험편이 파괴되었으며 1.82tf이후부터 상당수의 hits가 발생했다. Type II-1은 하중 2.22tf에서 파괴되었으며 1.77tf이후부터 상당수의 hits가 발생했다. Type II-2는 하중이 1.97tf에서 시험편이 파괴되었으며 1.43tf이후부터 상당수의 hits가 발생하였다. Type II-3은 하중 2.12tf에서 파괴되었으며 1.66tf이후부터 상당수의 hits가 발생하였다. Type III-1은 하중 2.04tf에서 파괴되었으며 1.55tf이후부터 다수의 hits가 발생하였고, 하중을 제거하는 과정에서도 상당수의 hits가 발생하였는데 이것은 시험편이 상당히 손상되었음을 보여주는 결과이다(그림 6b). Type III-2는 하중 2.06tf에서 파괴되었으며 1.55tf이후부터 상당수의 hits가 발생하였다. Type III-3은 하중 2.07tf에서 파괴되었으며 1.61tf이후부터 다수의 hits가 발생했다. 파괴하중부근에서 수백개의 AE hits가 발생했으며 이때 발생한 hits는 에너지도 매우 크며, 또한 최대하중이후에 짧은 시간동안에 상당수의 hits가 발생하였다. 이와 같은 특징은 연성이 거의 없는 무근 콘크리트가 하중을 견디지 못하고 한꺼번에 큰 에너지를 방출하면서 취성파괴됨으로써 나타난 결과이다. 휨강도 공시체는 하중이 증가함에 따라 시험편내의 미소 불균질에서의 응력집중에 의한 소수의 낮은 에너지 신호가 발생하였고, 최종 하중단계에서의 신호는 높은 에너지와 낮은 주파수 성분을 갖으며, 발생빈도도 매우 높다. 하중단계 I에서 type I은 모두 Kaiser 효과가 나타났으며 type II에서는 2개는 Kaiser 효과, 1개는 Felicity 효과가 나타났고, type III에서는 1개는 Kaiser 효과, 2개는 Felicity 효과가 나타난다. 하중단계 II에서 type I은 Kaiser 효과가 나타난 반면에 type II, III은 모두 Felicity 효과만 나타났는데, 이와 같은 실험결과는 물-시멘트비에 따른 시험편의 강도수준에 따라 손상되는 하중단계의 차이 때문인 것으로 사료된다.

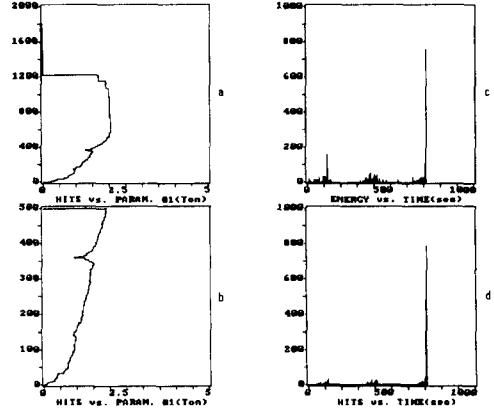


그림 6. 휨강도 공시체의 AE parameters

물-시멘트비에 관계없이 마지막 하중단계에서 type I은 대부분 최대하중의 71.8~76.5%, type II는 72.6~79.7%, type III은 75.2~77.8%이후부터 AE 활동성이 매우 높아지기 시작하였다.

5.2 결함원 탐사결과

휨강도 공시체에 삼각형 결함원 탐사기법을 이용하여 결함원 위치탐사를 실시하였다. 실제 균열위치와 결함원 탐사위치를 그림 7~14에 나타내었다. 최대하중에 도달하기 전까지 시험편에서 균열발생은 전혀 관측되지 않았고(취성파괴영향), 최대하중에 도달하면 갑자기 균열이 시험편 높이의 약 3/4까지 진전하며 최대하중이후에 짧은 시간동안 시험편은 하중이 감소하면서 완전파단에 이르기까지 시험편 내의 균열이 성장, 진전하면서 상당수의 hits가 발생하였다. 균열이 발생하기 전에 센서 1번과 센서 2번 사이의 하단부근에서 상당수의 events가 발생하였는데, 이 부근에 응력집

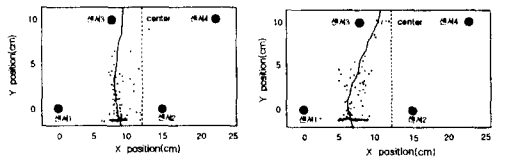
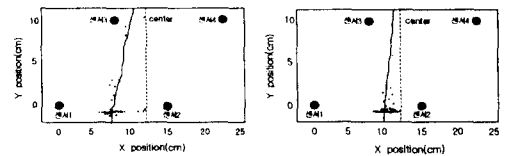


그림 7~8 실제 균열과 결함원 탐사위치 I



중이 생겨서 결국 주균열이 발생하여 거시적인 파괴가 일어나는 곳이다.

Type I에서는 다수의 AE events가 균열 진전방향 쪽으로 발생하였으며, 균열 발생위치 및 시간 뿐만 아니라 균열진전방향도 정확하게 탐사하였다. 또한, type II, III도 대체적으로 균열진전과 균열발생위치를 사전에 잘 탐사하고 있음을 알 수 있었다. 즉, 물-시멘트비에 상관없이 균열발생위치를 사전에 잘 탐사하고 있음을 알았다. 따라서, 삼각형 결함원 탐사기법이 AE 결함원 탐사기법으로 아주 양호한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있었다.

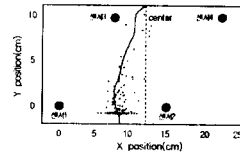


그림 9~11 실제 균열과 결함원 탐사위치 II

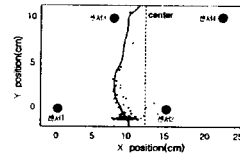
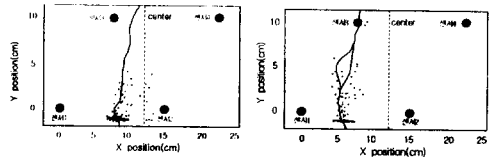


그림 12~14 실제 균열과 결함원 탐사위치 III

6. 결론

- (1) 센서의 검측범위가 동일할 경우에 삼각형 결함원 탐사기법이 사각형 결함원 탐사기법보다 무근 콘크리트에서 보다 경제적이고 적합한 기법임을 알 수 있었다.
- (2) 물-시멘트비에 관계없이 무근 콘크리트의 손상여부를 판단할 수 있는 Kaiser효과와 Felicity 효과를 확인할 수 있었다.
- (3) 물-시멘트비에 관계없이 최대하중의 약 70~80%이후부터 AE 활동성이 매우 높아지기 시작함을 알 수 있었으며, 이런 결과는 무근 콘크리트의 취성파괴의 특징인 것으로 판단된다.
- (4) Kaiser 효과의 소멸과 하중제거단계에서의 높은 AE 활동성이 무근 콘크리트에서 손상정도를 판단하는 기준이 될 수 있음을 확인할 수 있었다.
- (5) AE 기법으로 무근 콘크리트 시험편을 모니터링함으로써 균열발생위치를 사전에 예측 가능하며 진전상황 및 발생시간도 알 수 있었다. 따라서, AE가 결함원 탐사기법으로 매우 적절하다고 사료된다.

참 고 문 헌

1. Yuyama, S., Okamoto, T., and Nagataki, S., "Acoustic Emission Evaluation of Structural Integrity in Repaired Reinforced Concrete Beams", Materials Evaluation, Vol. 52, No. 1, pp. 86~90, 1992.
2. 건설교통부, "강교량의 안전진단을 위한 비파괴검사법 적용기술의 개발-Acoustic Technique을 중심으로-", 연구보고서, pp. 106~142, 1996.
3. 김형석, "강판형교에서 결함검출을 위한 AE기법의 적용방법에 관한 연구", 연세대학교 대학원, 석사 학위논문, 1996. 12.
4. 이준현, 이진경, 장일영, 윤동진, "음향방출을 이용한 콘크리트 부재의 미시적 파괴특성의 On-Line Monitoring", 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, pp. 677~682, 1998.