

## 음향방출을 이용한 무근콘크리트 보의 균열 발생원 탐사기법

한상훈<sup>1)\*</sup> · 이웅중<sup>2)</sup> · 조홍동<sup>1)</sup> · 김동규<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>충북대학교 토목공학과 <sup>2)</sup>쌍용양회공업주식회사 중앙연구소

(2000년 11월 2일 원고접수, 2001년 3월 14일 심사완료)

### Crack Source Location Technique for Plain Concrete Beam using Acoustic Emission

Sang-Hoon Han<sup>1)\*</sup>, Woong-Jong Lee<sup>2)</sup>, Hong-Dong Cho<sup>1)</sup>, and Dong-Gyu Kim<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Civil Engineering, Chungbuk National University, Chungju, 361-763, Korea

<sup>2)</sup> SsangYong Cement Industrial Co. Ltd., Research Center, Daejeon, 305-345, Korea

(Received December 2, 2000, Revised March 14, 2001)

#### ABSTRACT

This study was conducted preliminarily to develop the crack source location technique for plain concrete beam using acoustic emission(AE). Before the main experiment, the test of virtual AE source location was achieved in plain concrete block. The sensor layout was mutually compared between triangular layout and rectangular layout. As the results of test, AE source location by triangular layout was evaluated more effective than that by rectangular layout.

The specimen to apply AE source location technique was manufactured in total nine specimens (each three in 40%, 50%, 60% of W/C ratio) which the experiment variable was the compressive strength level(W/C ratio). The bending loading method is selected by cyclic loadings to evaluate the degree of concrete damage. It is seen that Kaiser effect and Felicity effect exists through analysis of AE parameters in coming failure experiment. As a result of analyzing the felicity ratio(FR) values, it is shown that this values can be used for evaluating the degree of concrete damage. AE activity is started highly at the 70% of failure load without the compressive strength level. This considered by a index in constructing the system of the failure warning at application of the field structure. And the results compared the real cracking location with the source location has perceived by AE monitoring before it is appeared the primary crack by visual observation.

**Keywords :** acoustic emission, crack source location, Kaiser effect, Felicity effect

#### 1. 서 론

최근 대형 구조물의 손상 및 붕괴가 심각한 사회문제로 대두되고 있다. 콘크리트구조물은 시멘트의 수화특성에 의해 수축변형으로 균열이 발생하는 유형(비구조적인 균열로 칭함)과 외부하중에 의해 구조적인 균열이 발생하는 유형이 있다. 현행 진단기술자들이 직면하고 있는 어려움은 구조물에 발생한 균열을 구조균열과 비구조균열로 분명히 구분하는데 있다. 이를 극복하기 위해서는 비파괴기법(NDT, Nondestructive Technique)이 절대적으로 필요하다. 음향방출기법(Acoustic Emission Technique)은 균열이 활동성을 갖는가를 평가할 수 있는 유용한 데이터를 제공하여, 육안정밀조사에 의존하는 주관적인 면을 배제시킬 수 있는 기술이고, 다른 NDT방법과는 근본적인

차이점을 갖는 특징을 갖고 있다.

음향방출(AE)기법을 콘크리트구조물에 적용하려는 연구는 외국의 경우, 1959년부터 Rusch 등이 콘크리트의 파괴에 따른 내부구조의 변화와 AE의 발생특성에 관한 연구를 시작으로 꾸준한 적용연구가 수행되어 왔다<sup>1)</sup>. 국내의 경우는 최근 1990년대 말부터 연구결과가 발표될 정도로 태동기에 있다<sup>2,3)</sup>. 대부분 기존의 연구결과는 콘크리트 내의 미세한 손상 혹은 균열생성 및 진전시 발생하는 AE를 검출하여 분석함으로써 콘크리트의 손상정도를 평가하거나 균열의 발생위치 및 방향을 예측하는 연구를 수행하여 왔다<sup>4)</sup>. 그러나 AE기법을 콘크리트구조물에 적용하기 위해서는 측정대상 구조물의 센서 Layout방법, 콘크리트의 강도수준에 따른 AE특성 구명, 구조물이 파괴되기 전에 AE기법에 의한 사전예측 등은 중요한 연구주제이다.

따라서 본 연구에서는 기초적 연구로서 무근 콘크리트 보에 AE기법을 적용하기에 앞서, 모의 AE 발생원 실험을 실시하여 시스템의 성능검사와 센서의 Layout방법을 제

\* Corresponding author

Tel : 043-261-2404 Fax : 043-275-2377

E-mail : shhan@trut.chungbuk.ac.kr

안하였으며, 제안된 방법을 콘크리트의 강도수준별(3수준)로 평가하여 기존의 연구결과<sup>5~7)</sup>인 열화도 평가기준을 실험적으로 검증하고자 한다. 또한 결함원 탐사기법(Source Location)을 실시하여, 실제 발생한 균열과 측정결과를 상호 비교하여 균열진전방향을 예측할 수 있음을 확인함으로써 AE기법이 균열의 활동성 유무를 평가할 수 있는 유용한 NDT 방법임을 제시하고자 한다.

## 2. AE의 정의 및 발생기구

음향방출(AE)이라 함은 Fig. 1과 같이 재료가 외력 또는 부정적 내력에 의해 변형이 발생하고 재료내부에 변형에너지가 축적됨에 따라, 재료내의 임의의 점(취약부)은 탄성한도를 벗어나 변형에너지의 일부가 소멸되며, 이는 열에너지나 탄성파와 같은 여러 형태의 에너지로 변환된다. 이때 발생된 탄성파는 진동하여 재료외부에 부착된 센서에서 검출되며, 이러한 탄성파를 음향방출이라 한다<sup>5)</sup>.

콘크리트의 결함존재 여부를 판정할 수 있는 중요한 인자는 카이저 효과(Kaiser effect)와 펠리시티 효과(Felicity effect)이며, Fig. 2에 개념도를 제시하였다<sup>6)</sup>. 하중이 재하(loading)되는 동안(A→B)에 AE의 발생량도 증가하였으나, 하중이 제거(unloading)되고 (B→C), 다시 하중이 재하되는 동안(C→B)에 AE는 발생하지 않았다. 그러나 선행 하중보다 더 큰 하중이 부과되는 동안(B→D)에는 AE가 발생하였고, 2차 하중이 제거되는 동안에 AE 방출량이 중단되었다. 3차 하중이 부과되는 동안에 D점에서 AE 방출량이 발생하지 않고 더 작은 하중인 F점에서 AE가 발생하기 시작하였으며, AE 방출량은 하중이 증가함(F→G)에 따라 계속해서 발생하였다. 여기서 B점에서 관찰된 거동(선행 최대하중에 도달하기 전에 어떠한 AE도 발생하지 않는다)이 카이저효과로 알려져 있고, F점에서 관찰된 거동(선행하중 이전의 하중에서 AE가 발생)은 펠리시티 효과로 알려져 있다. 따라서 선행하중을  $P_{1ST}$ , 다음 재하 과정에서 AE가 발생하기 시작한 하중을  $P_{AE}$ 로 할 때 재료의 손상정도를 나타내는  $FR$ (Felicity Ratio)은 다음 식 (1)과 같다.

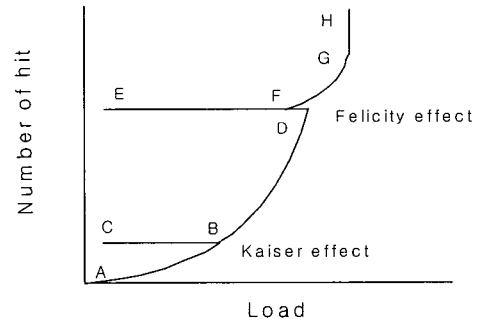


Fig. 2 Kaiser effect and Felicity effect

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

여기서,  $FR > 1$ 이면 시험편이 안정한 상태이고,  $FR = 1$ 이면 Kaiser효과가 존재하는 하중레벨이고,  $FR < 1$ 이면 시험편이 손상되어 불안정한 상태를 나타내며, 열화의 지표로서 사용 가능하다<sup>7)</sup>.

## 3. 모의 AE 발생원 실험

### 3.1 개요

모의 AE 발생원 실험은 연필심 붕괴실험시 발생하는 파를 가상의 AE파로 가정하여 실험하는 것으로서, 실제 본 실험에 앞서 센서의 성능검사와 부착상태 점검, 노이즈의 제거 등에 사용되며<sup>5)</sup>, 특히 센서의 Layout을 결정하는데 대단히 유용한 방법이다. AE분야에서 널리 사용되는 표준방법으로, 연필심은 직경 0.5 mm, 경도 2H이며 파괴되는 연필심의 길이는 0.2~0.3 mm이고, 센서로부터 10 cm 떨어진 곳에서 표면과 30°의 각도를 이루면서 연필심을 파괴한다. 이때 센서에 도달한 파로부터 파의 진전속도 및 결함원 위치추정(Source Location)이 가능하다. 결함원 위치추정의 정확도를 향상시키기 위한 가장 중요한 임계인자는 파진전속도의 정확도를 향상시키는 것이다<sup>4)</sup>. 결함원 위치추정을 목적으로 한다면 파진전속도(Wave Propagation Velocity)는 실험적으로 유도된 값을 사용하며, 1차원의 경우 다음 식 (2)와 같다.

$$V_R = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{L - 2x}{\Delta t} \quad (2)$$

여기서  $L$ 은 센서사이의 거리이고,  $x$ 는 연필심 붕괴위치이고,  $\Delta s$ 는 두 개의 센서사이의 경로거리차이고,  $\Delta t$ 는 시간차이다.

### 3.2 모의 결함원 탐사

모의 결함원 탐사에 앞서 무근 콘크리트 블록(400×300

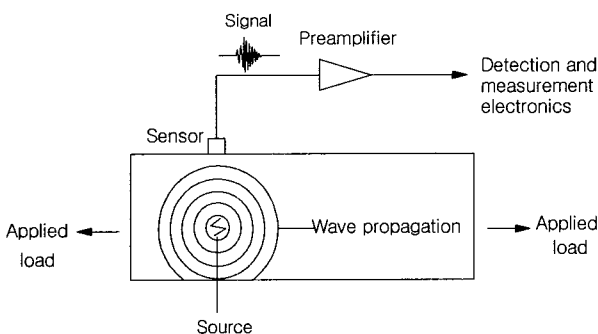


Fig. 1 Basic principle of the acoustic emission

×100 mm) 시험체 및 식 (2)를 이용하여 파진전속도를 측정하였으며 측정된 파진전속도는 3,615 m/sec이다. 이러한 결과는 총 20개의 측정치를 이용하여 선형회귀식을 적용하였으며, 이 때 회귀식의 상관계수 r은 0.950이었다.

### 3.2.1 1차원 결함원 탐사기법

R15센서 2개를 30 cm의 거리를 두고 선형배치하여 연필심 붕괴실험을 실시하였다. 연필심 붕괴위치와 결함원 탐사결과를 비교·분석한 결과는 Table 1과 같다. 결함원 탐사방법은 이론상 오차는 없어야 하나, 실제 측정시 오차가 발생하며, 원인을 분석하면 다음과 같이 정리할 수가 있다. 1) 콘크리트재로 자체가 비균질하고, 비등방성을 나타내기 때문에 AE파의 파속은 일정한 속도를 갖지 못한다. 2) 결함원 탐사방법은 음원의 위치를 알지 못하고 센서사이의 도달시간차만을 이용, 역으로 결함원의 위치를 추정하기 때문에 오차를 갖는다. 3) 연필심 붕괴시 발생하는 가상의 AE파는 항상 동일한 AE파를 발생시키지 못하고, 또한 발생한 파가 방향성(완전한 전방향성을 가지지 못함)을 갖기 때문에 오차를 갖는다. 4) 일반적으로 AE파의 진폭은 음원에서 거리(r)의 증가에 따라  $1/r^2$ 비율로 감소하는 것으로 알려져 있으며, 콘크리트와 같은 복합재료는 강재와 같은 재료보다 파의 감쇄가 더욱 심하여, 오차가 더욱 커진다. 한편, 1차원 결함원 탐사결과는 오차율이 10%이내에 존재하는 것으로 나타나 양호한 결과 값을 얻었다.

### 3.2.2 2차원 결함원 탐사기법

#### 1) 사각형 결함원 탐사기법

센서의 Layout은 Fig. 3과 같이 R15센서 4개를 가로 30 cm, 세로 20 cm 간격으로 배치하였다. 연필심붕괴위치는 먼저 Y축을 10 cm로 고정하고, X축은 0~30 cm까지 5 cm 간격으로 연필심을 붕괴시킨 곳이고, 다음에 X축을 10 cm로 고정하고서 Y축을 0~20 cm까지 5 cm간격으로 연필심을 붕괴시킨 곳이다. 연필심 붕괴위치와 결함원 탐사결과는 Table 2에 나타내었다. 위치탐사가 되지 않은 부위가 3개소에서 발생되었는데, 이의 원인은 실험방법에서 찾아볼 수 있다. 연필심 붕괴실험은 1개소당 3회 실시한 결과를 평균치로 구한 것이며, 측정회수를 증가시키면

Table 1 The test results of linear source location

Pencil lead breakage location (cm)	The results of source location(cm)	Error(cm), (error ratio, %)
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)

그만큼 탐사오차는 감소하며, 위치탐사도 가능할 것이다. 그러나 본 실험에서는 사각형탐사방법과 삼각형탐사방법의 탐사정도를 비교하기 위해 동일한 측정횟수의 선정에 의한 결과이다(즉 엄밀한 의미의 탐사불능이 아님). 또한 측정오차가 큰 부위(25%이상)도 3개소에서 발생되었다.

#### 2) 삼각형 결함원 탐사기법

센서의 Layout은 Fig. 4와 같이 R15센서 4개를 가로 20 cm, 세로 20 cm 간격으로 배치하였다. 연필심붕괴 위치는 먼저 Y축을 10 cm로 고정하고, X축은 0~20 cm까지 5 cm 간격으로 실험을 실시하였고, 다음에 X축을 15 cm로 고정하고서 Y축을 0~20 cm까지 5 cm간격으로 실험을 실시하였다. 실험결과는 Table 3과 같으며, 탐사오차가 너무 크게 발생한 부위는 2개소로 나타났다.

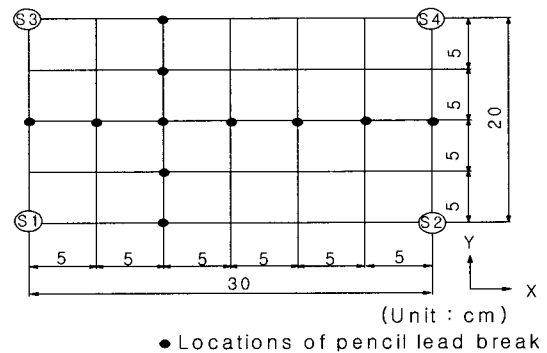


Fig. 3 Test of pencil lead break (rectangular)

Table 2 Test results of rectangular source location

Pencil lead breakage location(cm) (x, y)	The results of source location (cm) (x, y)	Error ratio(%) (x, y)
0, 10	-	-
5, 10	-	-
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	7, 67
10, 0	6.10, -1.49	39, -
10, 5	-	-
10, 10	9.69, 9.13	3, 9
10, 15	9.13, 12.87	9, 14
10, 20	7.21, 12.29	28, 39

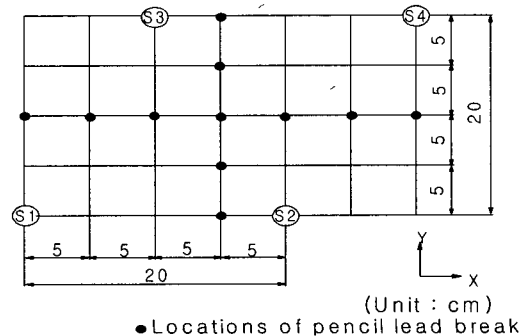


Fig. 4 Test of pencil lead break(Triangular)

**Table 3** Test results of triangular source location

Pencil lead breakage location(cm) (x, y)	The results of source location (cm) (x, y)	Error ratio(%) (x, y)
0, 10	0.00, 7.92	0, 21
5, 10	0.11, 8.82	98, 12
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	10, 54
15, 10	13.42, 7.85	11, 22
15, 15	15.30, 15.00	2, 0
15, 20	15.69, 19.84	5, 1

3) 결과분석

사각형 탐사방법과 삼각형 탐사방법을 상호 비교한 결과, 삼각형 탐사방법이 탐사오차가 작게 나타났다. 또한 본 연구 대상인 콘크리트 보에 적용시 휨인장부에 균열이 집중적으로 발생함으로 동일한 센서의 수에서 사각형 탐사방법이 넓은 면적의 탐사범위를 갖는 만큼 정밀도가 떨어지고, 삼각형 탐사방법은 하나의 센서가 부담하는 탐사영역이 작아 더욱 정밀한 계측이 가능한 장점을 갖고 있다. 따라서, 휨강도 시편의 반복 휨하중에 의한 파괴시험에서는 R15센서 4개를 사용하여 삼각형 결함원 탐사기법을 적용하였다.

4. 시험체 제작 및 실험방법

콘크리트 강도수준별 AE 특성규명 및 결함원탐사를 위한 시험체는 550×150×150 mm의 무근의 휨강도 시편이며, W/C비에 따라 각각 3개씩 총 9개를 제작하였다. 사용된 콘크리트배합은 Table 4와 같고, 콘크리트의 압축강도 측정결과는 다음 Table 5와 같다.

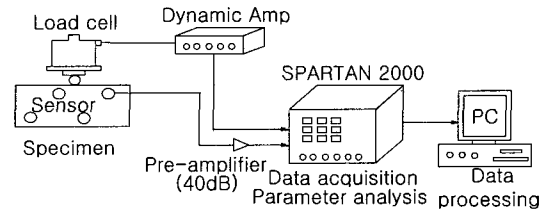
휨강도 시편에 삼각형 결함원 탐사기법을 적용하였으며, 센서는 시험편의 측면에 4개를 부착하고, 3점 휨재하 실험을 실시하였다. 실험장비의 개요도는 Fig. 5와 같으며, 하중재하 방식은 반복 휨재하방식을 채택하였다. UTM으로 시험편에 하중을 재하하면 시험편내의 국부적인 미세균열에 의하여 AE 탄성파가 발생하는데 이 발생된 AE는 센서에 의해 감지된 후 예비증폭기(pre-amplifier)에서 40 dB 증폭된 후 SPARTAN 2000에서 다시 2차적으로 20 dB 증폭되어 각종 AE 파라미터들을 검측하였고, 이에 대한 분석을 실시하였다.

**Table 4** Mixing proportion of concrete

Specimen	W/C (%)	Max size of aggregate (mm)	Slump (cm)	S/a (%)	Air content (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )			
						Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate
Type- I	40	25	6.0	46	3.1	193	483	767	931
Type- II	50	25	7.0	48	3.8	193	386	839	940
Type-III	60	25	6.1	50	3.5	193	322	901	931

**Table 5** Compressive strength of concrete

Series	W/C(%)	Compressive strength(kgf/cm <sup>2</sup> )		
		3d	7d	28d
Type- I	40	315	425	551
Type- II	50	258	327	430
Type- III	60	183	244	344



**Fig. 5** Schematic diagram of experimental setup

5. 실험결과 분석

5.1 휨강도 공시체의 AE 특성

휨강도 시편에 대해 파괴시까지의 반복 휨하중(Table 6 참조)을 재하하여 AE 파라미터를 분석한 대표적인 일례는 Fig. 6(시험체명 Type III-2)과 같다. 그림 6(a)는 하중대 히트(Hits)의 관계를 나타내고, 하중대 히트의 관계를 정확하게 보기 위하여 그림을 상세하게 나타낸 것이 Fig. 6(b)이다. Fig. 6(c)와 (d)는 각각 시간과 에너지, 시간과 히트의 관계를 나타내고있다.

여기서 히트는 각각의 센서에 대한 이벤트(Event)로 AE 파라미터중의 하나이다. Fig. 6(a)와 Fig. 2를 상호 비교하면 카이저 효과와 펠리시티 효과가 존재하는 것을 확인할 수 있다.

콘크리트의 압축강도수준별 휨강도시편에 대해 반복 휨재하 실험후의 손상정도평가를 위한 각 시험체의 FR 분석결과는 Table 6과 같다.

하중단계 I에서 Type I은 모두 카이저 효과가 나타났으며, Type II에서 2개는 카이저 효과, 1개는 펠리시티 효과가 나타났고, Type III에서 1개는 카이저 효과, 2개는 펠리시티 효과가 나타났다. 하중단계 II에서 Type I은 카이저 효과가 나타난 반면에 Type II, III은 모두 펠리시티 효과만 나타났는데, 이와 같은 실험결과는 강도 수준별 반복 휨하중 재하시 하중비율에 의한 결과로서 정밀한 실험(강도수준별 반복 재하수와 재하하중비율의 세밀한 구분) 수행시 강도수준에 관계없이 모두 유사한 효과가 나타날 것으로 사료된다.

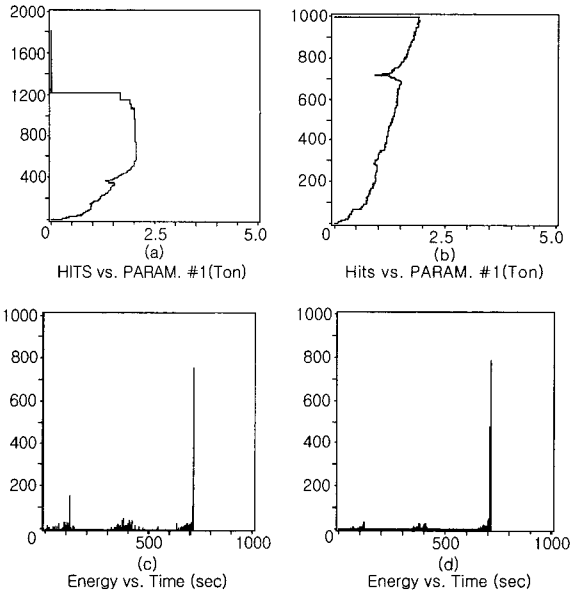


Fig. 6 Analysis of AE parameters for concrete beam specimen

한편 AE활동성 증가시의 하중과 휨과외 하중 측정결과는 Table 7과 같다. 압축강도 수준별 휨강도는 일반적인 콘크리트의 압축강도와 휨강도비 1/5~1/8보다 상당히 저평가 되었음을 확인할 수 있다(W/C비 40%와 50%인 경우). 이의 원인은 시험시 반복하중의 재하속도 및 크기의 차이와 기타 측정오차에 의한 현상으로 판단된다. 이를 극복하기 위해서는 변위제어 방식이 필요하다.

Table 7의 시험결과에 의하면 강도수준에 관계없이 AE 활동성이 증가시 하중과 휨과외 하중의 비율이 Type I 은 평균 74%, Type II는 평균 77%, Type III은 평균 76%로 나타났다. 즉 최대 휨강도의 70%대에서 AE의 활동성이 매우 증가되었으며, 이런 특성치는 철근 콘크리트 구조물로 확장할 경우, 더 큰 연성을 확보하고 있으므로 실구조물의 AE모니터링 구축시 파괴경보의 하나의 인자로서 활용이 가능할 것으로 보이며, 이에 대한 더 많은 연구가 필요하다고 판단된다.

## 5.2 결함원 탐사결과

휨강도 공시체에 삼각형 결함원 탐사기법을 이용하여 결함원 위치탐사를 실시하였다. 육안조사에 의한 실제 균열위치와 결함원 탐사위치 결과를 상호 비교한 결과는 Fig. 7~Fig. 14에 나타내었다. 육안조사결과에 의하면 최대하중에 도달하기 전까지 시험편에서 균열발생은 전혀 관찰되지 않았고(취성파괴 영향), 최대하중에 도달 후 갑자기 균열이 시험편 높이의 약 3/4까지 진전하여 최대하중 이후에 짧은 시간동안 시험편은 하중이 감소하면서 완전과단에 이르렀다. 한편, 결함원 탐사과정 중 육안조사에서는 확인할 수 없었던 시험편 내의 미세한 균열이 성장,

음향방출을 이용한 무근콘크리트 보의 균열 발생원 탐사기법

Table 6 Felicity ratio of concrete beam specimen

Series	Loading sequence	FR	Note
I	1 Stage I	1.0/1.0=1.0	Kaiser effect
	1 Stage II	1.55/1.5=1.03	Kaiser effect
	1 Stage III	—	Failure(2.38 ton)
	1 Stage IV	—	—
2	2 Stage I	1.02/1.0=1.02	Kaiser effect
	2 Stage II	1.59/1.5=1.06	Kaiser effect
	2 Stage III	1.78/2.0=0.89	Felicity effect
	2 Stage IV	—	Failure(2.38 ton)
1	1 Stage I	1.01/1.0=1.01	Kaiser effect
	1 Stage II	1.48/2.0=0.74	Felicity effect
	1 Stage III	—	Failure(2.22 ton)
2	2 Stage I	0.94/1.0=0.94	Felicity effect
	2 Stage II	1.39/1.5=0.93	Felicity effect
	2 Stage III	—	Failure(1.97 ton)
3	3 Stage I	1.13/1.0=1.13	Kaiser effect
	3 Stage II	1.42/1.5=0.95	Felicity effect
	3 Stage III	—	Failure(2.12 ton)
1	1 Stage I	1.00/1.0=1.00	Kaiser effect
	1 Stage II	1.46/1.5=0.97	Felicity effect
	1 Stage III	0.17/2.0=0.085	Felicity effect
	1 Stage IV	—	Failure(2.04 ton)
2	2 Stage I	0.94/1.0=0.94	Felicity effect
	2 Stage II	0.94/1.5=0.63	Felicity effect
	2 Stage III	—	Failure(2.06 ton)
3	3 Stage I	0.96/1.0=0.96	Felicity effect
	3 Stage II	1.39/1.5=0.93	Felicity effect
	3 Stage III	—	Failure(2.07 ton)

Table 7 Test result between AE activity and failure load

Series	Load at high AE activity [a]	Bending failure load [b]	[a]/[b]	
			(%)	Average
I	1 1.71	2.38	72	74
	2 1.82	2.38	76	
II	1 1.77	2.22	80	77
	2 1.43	1.97	73	
	3 1.66	2.12	78	
III	1 1.55	2.04	76	76
	2 1.55	2.06	75	
	3 1.61	2.07	78	

진전하고 있음을 상당수의 AE 발생량으로부터 모니터 할 수가 있었다. 특히 균열이 발생하기 전에 센서 1번과 센서 2번 사이의 하단부근에서 상당수의 이벤트가 발생하였는데, 이 부근에 응력집중이 생겨서 결국 주균열이 발생하여 거시적인 파괴가 일어나는 곳이다. Type I에서는 다수의 AE 이벤트가 균열진전방향 쪽으로 발생하였으며, 균열 발생위치 및 균열진전방향도 탐사가 가능하였다. 또한, Type II, III도 대체적으로 균열진전과 균열발생위치를 사전에 잘 탐사하고 있음을 알 수 있었다. 본 시험결과에 의하면 삼각형 결함원 탐사기법이 AE 결함원 탐사기법으로서 아주 양호한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

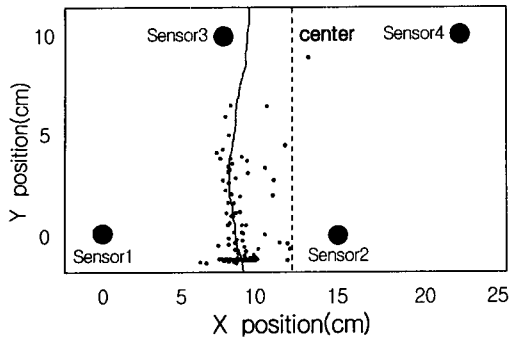


Fig. 7 Real crack and AE source location(I-1)

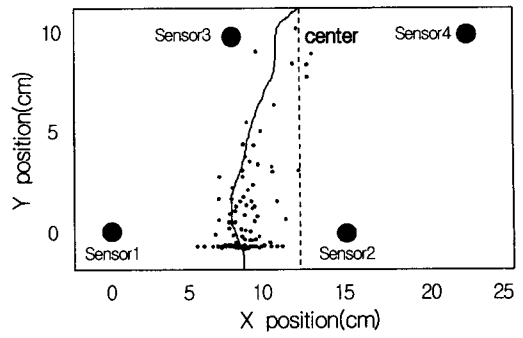


Fig. 11 Real crack and AE source location(II-3)

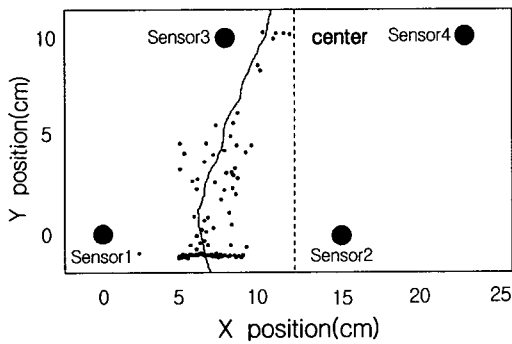


Fig. 8 Real crack and AE source location(I-2)

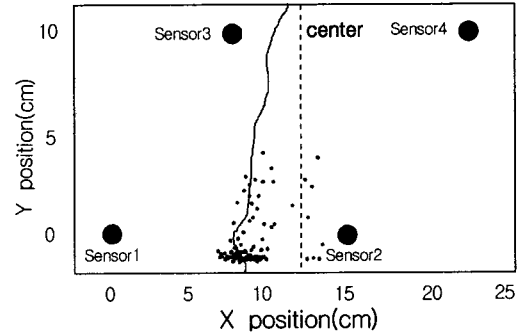


Fig. 12 Real crack and AE source location(III-1)

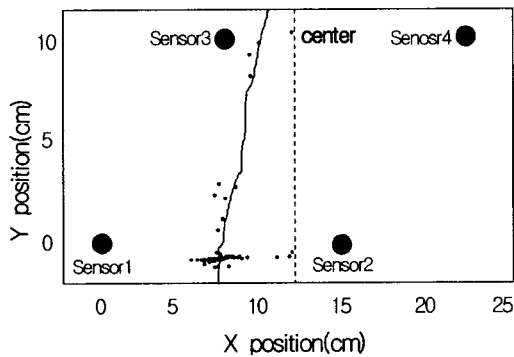


Fig. 9 Real crack and AE source location(II-1)

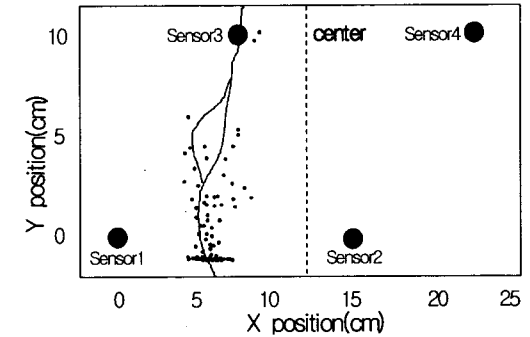


Fig. 13 Real crack and AE source location(III-2)

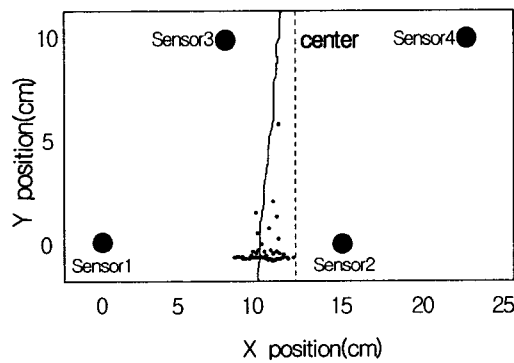


Fig. 10 Real crack and AE source location(II-2)

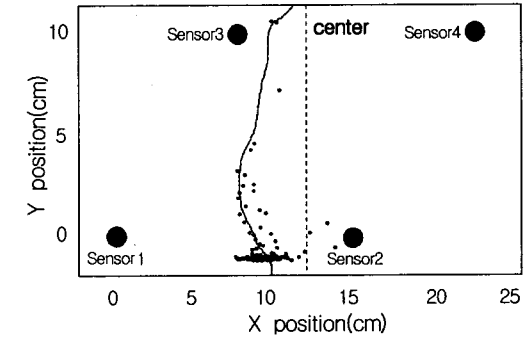


Fig. 14 Real crack and AE source location(III-3)

## 6. 결 론

## 참고문헌

1) 모의 결합원 탐사(연필심 붕괴실험) 결과에 의하면 센서의 검출범위가 동일할 경우에 삼각형 결합원 탐사기법이 사각형 결합원 탐사기법보다 경제적이고 적합한 기법임을 알 수 있었다.

2) 콘크리트의 강도수준에 관계없이 콘크리트의 손상여부를 판단할 수 있는 카이저 효과와 펠리시티 효과를 실험적으로 확인할 수 있었다.

3) 콘크리트의 강도수준에 관계없이 최대하중의 약 70% 범위에서 AE 활동성이 매우 높아지기 시작함을 알 수 있었으며, 이는 실구조물의 파괴경보시스템 구축시 중요한 하나의 인자로 사용이 가능할 것으로 판단된다. 다만 휨강도 수준별 AE활동성과의 관계는 추가 실험을 통하여 검증되어야 할 것으로 사료된다.

4) 카이저 효과의 소멸과 하중제거 단계에서의 높은 AE 활동성이 콘크리트의 손상정도를 판단하는 기준이 될 수 있음을 확인할 수 있었으며, FR를 활용하면 보수·보강된 구조물의 일체성 평가기준으로도 활용이 가능하다고 판단된다.

5) AE 기법을 적용하여 무근 콘크리트 보의 휨파괴실험을 육안관찰과 AE측정을 동시에 모니터링 함으로써 균열발생위치의 예측이 가능했으며 균열전진 모니터링도 가능함을 확인할 수가 있었다. 따라서 AE기법이 결합원 탐사기법으로서 효율적인 NDT 방법임을 확인할 수 있었다.

1. 大津政康, “アコースティック・エミッションの特性と理論,” 森北出版株式會社, 1988, pp.7~8.
2. 이준현, 이진경, 장일영, 윤동진, “음향방출을 이용한 mortar재료의 미시적 파괴거동에 관한 연구,” 한국콘크리트학회지 제10권 6호, 1998, 12, pp.203~211.
3. 오병환, 김응재, 김광수, 유성원, “음향방출특성을 이용한 콘크리트 부재종류 및 하중상태에 따른 균열손상 연구,” 한국콘크리트학회논문집 제11권 4호, 1999, 8, pp.107~116.
4. Stephen W. H., and Carol K. S., “Acoustic Emission Monitoring as a Non destructive Testing Technique in Reinforced Concrete,” *ACI Materials Journal*, Vol.94, No.6, 1997, pp.510~519.
5. Adrian A. P., “Acoustic Emission Inspection,” ASM international, *Metals Handbook*, Vol.17, 1989, pp.278~294.
6. Physical Acoustics Corporation, “Acoustic Emission for Bridge Inspection,” Report No. FHWA-RD-94, 1995, pp.5~10.
7. Yuyama S., Okamoto T. and Nagataki S., “Acoustic Emission Evaluation of Structural Integrity in Repaired Reinforced Concrete Beams,” *Materials Evaluation*, Vol.52, No.1, 1992, pp.86~90.

## 요 약

본 연구는 AE기법을 이용하여 콘크리트구조물의 균열발생원 탐사방법을 개발하기 위한 기초적인 연구이다. 본 실험에 앞서 무근 콘크리트 블록에 모의 AE 발생원 실험을 실시하였다. 센서배치에서는 삼각형 결합원 탐사기법과 사각형 결합원 탐사기법을 적용하여 비교·분석하였다. 실험 결과 콘크리트 보에서는 삼각형 결합원 탐사기법이 사각형 결합원 탐사기법보다 효과적인 것으로 분석되었다.

콘크리트 보에 균열원 탐사기법을 적용하기 위한 시험체는 콘크리트의 압축강도 수준비(물-시멘트비)를 실험변수로 즉, 물-시멘트비를 40%, 50%, 60%로 하여 각각 3개씩 총 9개를 제작하였다. 콘크리트의 손상정도를 평가하기 위해 하중재하방식은 반복 하중재하방식을 채택하였고, 파괴실험시 발생하는 AE 파라미터를 분석하여, 카이저효과와 펠리시티효과를 실험실적으로 확인하였다. 또한, FR값을 분석한 결과 구조물의 열화도지수로서 사용 가능함을 확인하였다. 콘크리트 강도수준에 관계없이 최대 하중의 70%대에서 AE의 활동성이 높아지기 시작함을 알 수 있었으며, 실구조물에 적용시 파괴경보시스템구축에 적용 가능한 하나의 인자로 사료된다. 한편, 실제 균열 발생위치와 결합원탐사방법을 비교한 결과 육안조사에 의해 주균열이 발생하기 전에 AE 모니터링으로 사전 감지가 가능하였다.

**핵심용어 : AE기법, 균열발생원, 카이저효과, 펠리시티효과**