

# 탄소섬유보강판으로 보강된 철근 콘크리트보의 균열 발생원 탐사를 위한 Acoustic Emission의 적용

## The Application of Acoustic Emission to detect the Crack Source Location for RC Beams Strengthened With Carbon Fiber Reinforced Plates

한 상 훈\*      이 웅 종\*\*      조 홍 동\*\*\*      나 승 일\*\*\*\*  
Han, Sang Hoon      Lee, Woong Jong      Cho, Hong Dong      Na Sueng Il

### ABSTRACT

This Study was conducted to evaluate structural integrity and crack source location of RC structures strengthened with Carbon Fiber Reinforced Plates using acoustic emission. Four point bending tests were carried out RC reinforced with C.F.R.P. For the several strengthening specimens, the process of fracture was monitored by Acoustic Emission and duration and energy in AE parameters were analyzed.

The location and propagation of crack could be easily determined by monitoring AE, which concluded that AE technique could be a very useful tool to evaluate structural integrity of reinforced RC structure.

### 1 서론

사회가 발전함에 따라서 수많은 콘크리트 구조물의 유지관리는 중대한 사회문제가 되었고 균열의 진단은 중요한 연구과제라고 할 수 있다. 음향방출기술(Acoustic Emission)은 이러한 콘크리트의 균열 발생 및 재료내부의 미시적인 변형을 규명하는데 실시간 계측이 가능하다는 장점이 있다. 따라서 보수·보강된 콘크리트 구조물의 균열이 어느 정도 발생되어 있으며, 하중 단계에 따른 균열 상태를 파악하는 기술이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 음향방출기법을 이용하여 보수·보강된 콘크리트 구조물에서 발생하는 하중의 단계별 균열의 형상과 AE parameters를 분석하고 결함원 탐사 기법을 실시하여 고찰하였으며 보수·보강된 교량과 같은 대형 구조물의 모니터링에 대한 기초 자료를 마련하는데 목적이 있다.

\* 정희원, 충북대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*\* 쌍용중앙연구소 콘크리트 연구실 주임연구원

\*\*\* 충북대학교 공과대학 박사과정수료

\*\*\*\* 충북대학교 공과대학 석사과정

## 2. 시험체 제작 및 실험방법

### 2.1 시험체

본 논문에서는 보수·보강된 콘크리트 구조물의 결함원 탐사가 목적이므로 쉘 콘크리트 구조물이 노후화 또는 상당한 손상을 입었다고 가정하여, 압축강도를 비교적 낮게 채택하여 시험체를 제작하였다. 쉘시험체는  $2000 \times 250 \times 150\text{mm}$ 이고, 전단 시험체는  $2200 \times 300 \times 200\text{mm}$ 로 제작하였다.

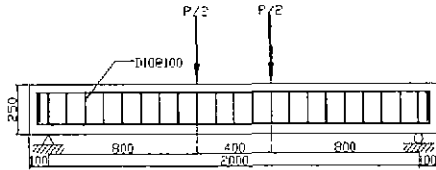


그림 1. 쉘 시험체

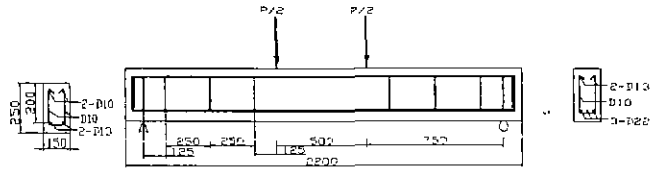


그림 2. 전단 시험체

시험체들의 설계 배합강도는  $210\text{kgf/cm}^2$ 이고, 슬럼프는 10cm, 공기량 4.5%, 28일 압축강도는  $212\text{kgf/cm}^2$ 이다. 여기서 압축강도는 9개의 공시체를 평균한 값이다. 본 실험에서 사용된 철근은 SD30의 D10, D13, D22를 사용하였다. 철근의 인장강도 시험결과로는 항복강도가  $3552\text{kgf/cm}^2$ , 인장강도는  $5218\text{kgf/cm}^2$ 로 나타났다.

### 2.2 보강재료

시험체의 보강은 탄소섬유보강판과 탄소섬유시트 두 가지의 재료를 가지고 보강을 시행하였다.

탄소섬유보강판의 재료 역학적인 성질은 인장강도는  $22,863\text{kgf/cm}^2$ , 인장탄성을  $1.99\text{kgf/cm}^2$ , 포아송비 0.32, 파손 변형을 1.11%이고, 콘크리트와 탄소섬유보강판을 부착시키는데 사용하는 Epoxy Resin은 인장강도  $269\text{kgf/cm}^2$ , 압축강도  $839\text{kgf/cm}^2$ , 굴곡강도  $451\text{kgf/cm}^2$ , 콘크리트 부착강도  $47\text{kgf/cm}^2$ , 경도 82, 철판과의 인장전단 접촉강도  $180\text{kgf/cm}^2$ 이다. 일 방향 탄소섬유시트의 일반적인 재료성질로서 섬유종류는 고강도 탄소섬유이고, 섬유중량은  $200\text{g/m}^2$ , 시트치수  $100\text{cm} \times 50\text{m}$ , 섬유비중,  $1.82\text{g/m}^2$ , 설계두께 0.11mm, 그리고 표준시공두께 0.45mm이다.

### 2.3 보강방법

본 실험에서는 보수·보강된 시험체의 결함원을 탐사하기 위해서 그림 3~6과 같은 방법으로 시험체를 보강하였다.

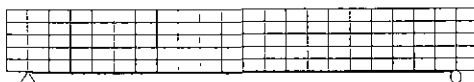


그림 3. Type I 쉘시험체 탄소섬유보강판



그림 4. Type II 쉘시험체 탄소섬유보강판-탄소섬유시트



그림 5. Type III 전단시험체 탄소섬유보강판



그림 6. Type IV 전단시험체 탄소섬유시트

보강된 시험체를 UTM bed에 설치하고 한쪽 측면에 8개의 센서를 삼각형으로 부착하여, 4점재하실험을 실시하였다. UTM으로 시험편에 하중을 제하하면 시험편내의 국부적인 변형에 의하여 AE 발생원이 발생하는데 이 발생된 AE는 센서에 의해 감지된 후 pre-amplifier에서 40dB 증폭된 후 SPARTAN2000에서 다시 2차적으로 20dB 측정된 각종 AE parameters들에 대한 분석을 실시하였다.

### 3. 실험결과 분석

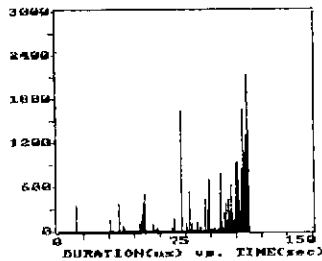
#### 3.1 보수·보강된 휨·전단 시험체의 AE특성

##### 3.1.1 최대하중의 25%

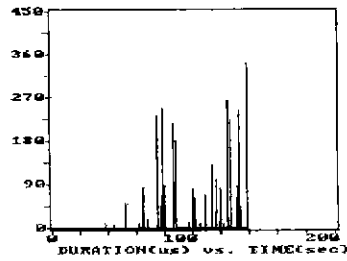
최대하중의 25%정도의 하중을 가했을때, 휨·전단시험체의 내부에 국부적인 응력집중이 발생하는 단계로 모든 Type에서 AE 발생빈도가 매우 낮으며 에너지와 지속시간 크기도 상대적으로 낮은 값을 보였으며, 각각의 하중크기와 AE특성은 표1과 같다.

| 시험체 Type | 하중크기(tonf) | 에너지(dB) | 지속시간(μsec) |
|----------|------------|---------|------------|
| Type I   | 2.45       | 80      | 1900       |
| Type II  | 2.65       | 120     | 2200       |
| Type III | 5.35       | 12      | 120        |
| Type IV  | 6.2        | 25      | 360        |

표1. 최대하중의 25% 일때의 에너지와 지속시간



(a) Type I



(b) Type IV

그림 7.

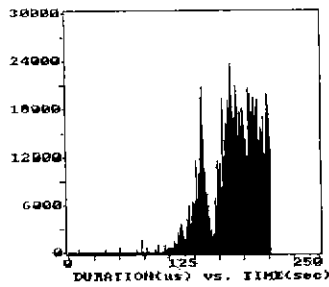
최대하중 25%일때의 지속시간

##### 3.1.2 최대하중의 50%

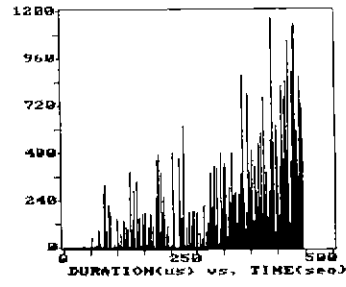
최대하중의 50%의 단계에서는 하중이 점진적으로 증가함에 따라서 균열이 진전하고 동시에 AE event도 증가하기 시작했으며, 에너지도 같이 증가하는 경향이 나타난다. 에너지의 경우 25%일 때와 비교하여 Type I의 경우 5배, Type II의 경우 4배, Type III의 경우 20배, Type IV의 경우 2배까지 증가했다. 휨시험체인 Type I, II는 주균열이 발생하기 전부터 상당수의 AE events가 발생하여 실제 육안관찰에 의한 주균열 발생 이전에 위치 파악이 가능했다. 전단 시험체인 Type III, IV는 전단균열이 발생하기 이전이라서 소수의 AE events가 전단부에 발생하기 시작했다. Type III의 경우 25% 일 때와 비교하여 에너지는 20배, 지속시간의 경우 100배이상의 증가를 보였는데 그 이유는 탄소판 컴피저트와 콘크리트를 부착하는데 사용한 에폭시수지가 하중이 증가함에 따라서 정착면으로부터 탈락하는 현상이 일어났기 때문이라고 사료된다.

| 시험체 Type | 하중크기(tonf) | 에너지(dB) | 지속시간(μsec) |
|----------|------------|---------|------------|
| Type I   | 4.91       | 320     | 24,000     |
| Type II  | 5.30       | 310     | 20,000     |
| Type III | 10.69      | 240     | 16,000     |
| Type IV  | 12.4       | 120     | 1200       |

표 2. 최대하중의 50% 일때의 에너지와 지속시간



(a) Type I



(b) Type IV

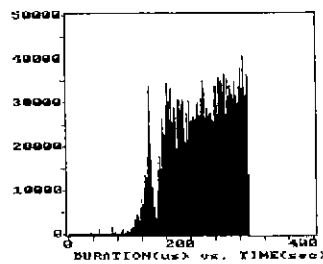
그림 8. 최대하중 50%일때의 지속시간

### 3.1.3 최대하중의 75%

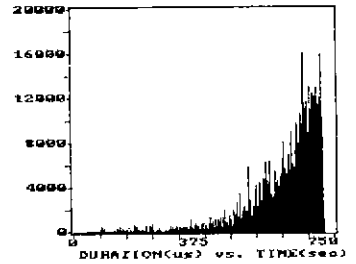
하중이 증가함에 따라서 주균열이 진전하고 상당수의 AE event가 발생하는 단계로 특히 전단 시험체인 Type III, IV는 50%일 때와 비교하여 AE event의 수가 급격히 증가하기 시작했다. 휨 시험체인 Type I, II는 50%일 때와 비교하여 75%인 경우 지속시간과 에너지가 증가하기는 했으나 25%에서 50%로 하중이 증가했을 경우와 비교하여 상대적으로 크게 변화하지는 않았다. 전단 시험체인 Type III, IV는 전단균열의 급격한 진전과 함께 50%일 때와 비교하여 지속시간과 hit는 급격한 증가를 보이기 시작했으며, 에너지의 경우에도 증가함을 알 수 있었다. Type III, IV의 이러한 AE 특성은 전단시험체의 취성파괴를 보여주는 결과이다.

| 시험체 Type | 하중크기(tonf) | 에너지(dB) | 지속시간( $\mu$ sec) |
|----------|------------|---------|------------------|
| Type I   | 7.36       | 330     | 35,000           |
| Type II  | 7.45       | 320     | 24,000           |
| Type III | 16.03      | 320     | 20,000           |
| Type IV  | 18.6       | 250     | 16,000           |

표 3. 최대하중의 75%일때의 에너지와 지속시간



(a) Type I



(a) Type IV

그림 9. 최대하중 75%일 때 지속시간

### 3.1.4 최대하중

최대하중에 도달하면서 모든 시험체에서 AE 발생빈도가 증가하면서 지속시간도 상당히 큰 값을 보였다. 이러한 특성은 시험편이 큰 손상을 입은 단계임을 보여주는 지표로서 파괴가 진전될수록 가칭영역에 속하는 AE음파가 상당수 발생하였다. 즉 에너지는 상대적으로 작고 주기가 증가하는 AE 음파가 발생한다는 것이다. 동일한 휨·전단 시험체에서 에너지의 크기가 II가 I보다, IV가 III가 큰 값을 보이는데, 이것은 최대하중의 크기와 동일한 특성을 보인다. 따라서, 지속시간이 보수·보강

| 시험체 Type | 하중크기(tonf) | 에너지(dB) | 지속시간( $\mu$ sec) |
|----------|------------|---------|------------------|
| Type I   | 10.02      | 360     | 64,000           |
| Type II  | 10.608     | 480     | 80,000           |
| Type III | 21.38      | 320     | 40,000           |
| Type IV  | 24.8       | 300     | 50,000           |

표 4. 최대하중일때의 에너지와 지속시간

된 시험체의 보강방법의 효율성을 판단할 수 있는 주요한 파라미터라고 사료된다.

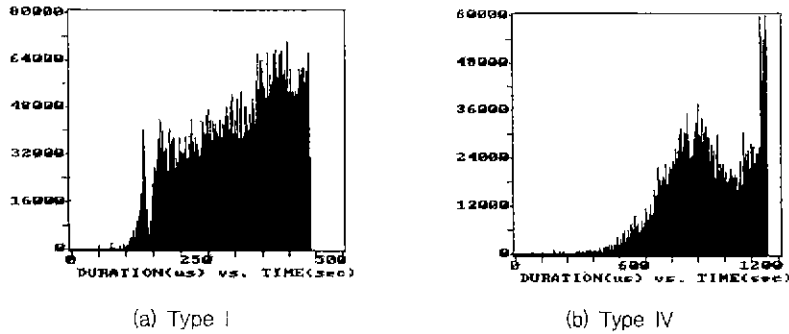


그림 10. 최대하중일때의 지속시간

#### 4. 결함원 탐사결과

시험체들에 대하여 삼각형 결함원 탐사시험을 이용하여 결함원 위치탐사를 실시하였다.

실제 균열위치와 결함원 탐사위치를 그림 10과 그림 11에 나타내었다. 그림 10은 보수·보강된 휨 시험체의 결함원 탐사결과이고, 그림 11은 보수·보강된 전단시험체의 결함원 탐사결과이다.

최대하중의 25%에 해당하는 하중의 경우 Type I, II, III, IV 시험체에서 육안으로 관찰이 가능한 균열은 거의 나타나지 않고 내부손상에 의한 음향신호만 임의로 분포되는 경향을 보였다. 최대하중의 50%의 경우에 휨시험체인 Type I, II에서는 주균열이 시작되기 시작했으며, 그와 동시에 AE event 또한 증가하기 시작했다. 전단시험체인 Type III와 IV는 최대하중의 50%일 때까지 AE event가 소수만 발생하였다. Type I의 경우 1번과 2번 센서사이의 하단부근에서 상당수의 event가 발생했으며, Type II의 경우에는 5번과 6번센서 사이에서 상당수의 event가 발생하기 시작했다. 실제로 이곳에 응력이 집중되면서 주균열이 발생 진전되어 결국에 거시적인 파괴가 일어나는 곳이다.

Type III와 IV의 경우 최대하중의 75%일 때 AE event가 활성화되기 시작했으며, III와 IV 시험체 모두 5번 센서와 6번센서 사이에서 전단균열이 진전되고 있음을 알 수 있었다.

모든 시험체에서 AE events가 균열 진전방향쪽으로 발생하였으며, 균열 발생위치 및 시간뿐만 아니라 균열 진전방향도 정확하게 탐사하였다. 즉 보강방법과 휨, 전단 시험체에 상관없이 균열발생위치를 사전에 잘 탐사하고 있음을 일었다. 따라서 삼각형 결함원 탐사기법이 AE 결함원 탐사기법으로 아주 양호한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있었다.

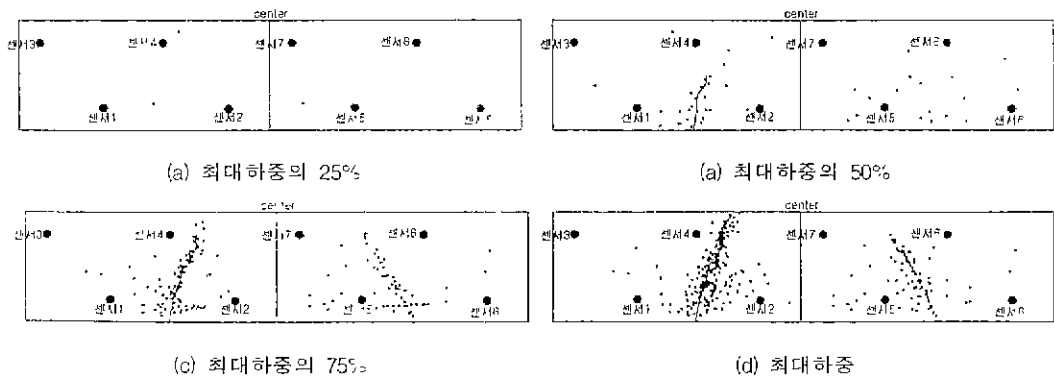


그림 11. 실제균열과 결함원 탐사위치 I(Type I)

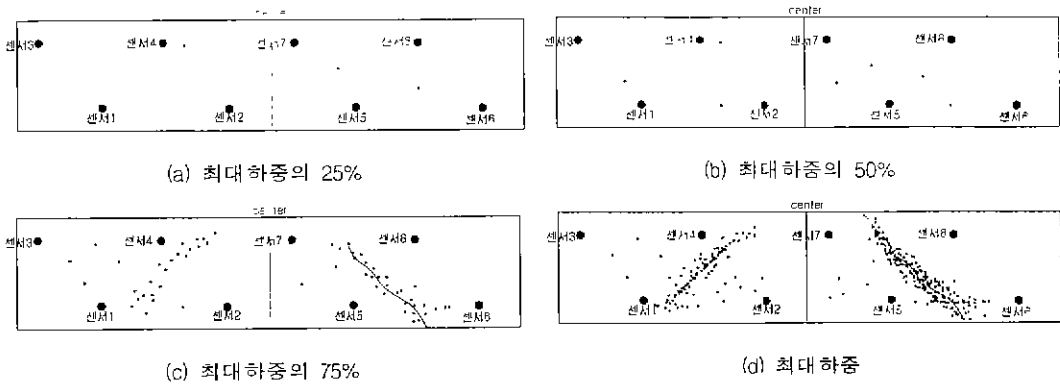


그림 12. 실제균열과 결함원 탐사위치 II(Type IV).

### 5. 결론

- (1) 지속시간의 크기가 클수록 최대과과하중의 크기가 증가한 결과를 보이므로, 지속시간이 동일한 시험체에서 보강방법의 효과를 알 수 있는 주요한 파라미터라고 사료된다.
- (2) 보강방법에 관계없이 AE를 이용하여 휨·전단 시험체에서 균열의 발생·진전등의 특성을 미리 알 수 있었다. 따라서, 보수·보강된 철근콘크리트 구조물에서 결함원 탐사기법으로써 AE가 매우 적절한 기법이라고 사료된다.
- (3) 보수·보강된 휨 시험체의 경우 보강방법에 관계없이 최대하중의 50%이후부터 AE 활동성이 높아지기 시작했으며, 이런 결과는 50%일때부터는 콘크리트의 인장부위는 파단이 났고 이후부터 철근과 보강재료인 탄소판 컴퍼지트가 하중을 받기 때문인 것으로 판단되며, 보수·보강된 전단 시험체의 경우는 최대하중의 75%이후부터 AE 활동성이 높아지기 시작했으며, 이런 결과는 전단시험체의 취성파괴 특징이 나타난 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

1. Yayama, S., Okamoto, T., and Nagataki, S., "Acoustic Emission Evaluation of Structural Integrity in Repaired Reinforced Concrete Beams", Material Evaluation, Vol. 52, No. 1, pp. 86~90, 1992
2. Ohstu, M., "Acoustic Emission Characteristics in Concrete Specimens in Splitting Tensile Test", Progress in Acoustic Emission, Vol. 6, No. 2, 1987
3. 오병환, 권일범, 김용재, 김광수, "음향방출 특성을 이용한 콘크리트 부재종류 및 하중상태에 따른 균열손상연구", 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, pp. 543~546, 1999