

## 論文

음향방출 기법을 이용한 탄소섬유시트강화 콘크리트의 미시적  
손상 거동에 관한 연구

이진경\* · 이준현\*\* · 정성륜\*\*\*

**A Study on Microscopic Damage Behavior of Carbon Fiber Sheet  
Reinforced Concrete using Acoustic Emission Technique**

J.K. Lee\*, J.H. Lee\*\* and S.R. Jeong\*\*\*

**ABSTRACT**

It was well recognized that damages associated mainly with the aging of civil infrastructures were one of very serious problems for assurance of safety and reliability. In recent, carbon fiber sheet(CFS) has been widely used for reinforcement and rehabilitation of damaged concrete beam. However, the fundamental mechanism of load transfer and its load-resistant for carbon fiber sheet reinforced concrete are not fully understood. In this study, three point bend test has been carried out to understand the damage progress and micro-failure mechanism of CFS reinforced concretes. For these purposes, four kinds of specimens are used, that is, concrete, steel bar reinforced concrete, CFS reinforced concrete, and steel bar and CFS reinforced concrete, respectively. Acoustic Emission(AE) technique was used to evaluate the characteristics of damage progress and failure mechanism of specimens. In addition, two-dimensional AE source location was also performed to monitor crack initiation and propagation processes for four types of these specimens.

## 초 록

건축 구조물의 재령이 증가함에 따른 손상은 구조물의 안전성 및 신뢰성 확보에 매우 심각한 문제이다. 최근에는 이렇게 손상을 입은 콘크리트 구조물의 보수 보강을 위해 탄소섬유시트가 광범위하게 사용되고 있지만 탄소섬유시트를 보강한 콘크리트의 파괴기구가 명확하게 규명되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 탄소섬유시트를 보강한 콘크리트의 손상거동 및 미시적 파손기구를 이해하기 위해 4가지 경우의 시험편, 즉 순수한 콘크리트, 철근 보강 콘크리트, 탄소섬유시트 보강 콘크리트, 철근과 탄소섬유시트 보강 콘크리트 시험편에 대하여 3점 굽힘 시험을 실시하였다. 이러한 시험편들의 파손기구를 명확히 하기 위해 음향방출기법이 사용되었으며 균열 발생, 성장을 모니터링하기 위해 2차원 AE 발생원 위치추정 기법이 적용되었다.

\* 부산대학교 기계설계공학과 대학원

\*\* 부산대학교 기계공학부

\*\*\* (주)SK 케미컬 프리프레그팀

## 1. 서 론

최근 국내에서 발생한 콘크리트 건축물 및 교량 등의 붕괴사고는 막대한 인명 피해 및 경제적 손실을 가져다주는 것은 물론 국가의 사회 간접 시설의 안전성 확보에 대한 경종을 울리고 있다. 특히 콘크리트 구조물의 경우 외부의 가혹한 환경이나 과도한 하중, 충격 등 무리한 사용여건, 관리소홀 등에 따라 부식 또는 재료 내부의 균열이 발생하여 구조물 자체의 내구성 저하를 초래하기 때문에 노후화된 콘크리트 구조물의 신뢰성 및 안전성 확보가 중요한 과제로 대두되고 있다. 따라서 최근에는 이렇게 손상되거나 내구성이 떨어진 콘크리트 구조물에 강판이나 탄소섬유시트, 아라미드 섬유시트 등을 부착하여 구조물 자체에 손상을 주지 않고 보강, 보수를 하고 있다.[1-3] 특히 탄소섬유시트는 부식 열화에도 안정하며 철에 비하여 비중이 상대적으로 적기 때문에 보강에 의한 중량증가는 거의 수반되지 않으며 인장강도도 강재의 약 10배 정도로 크기 때문에 이미 항공, 우주, 스포츠 분야 등에서 폭넓게 사용되어 보강재료로서 높은 평가를 받고 있다. 한편 탄소섬유시트로 보강된 콘크리트 구조물의 보강효과를 평가하기 위해서는 기존의 거시적 재료시험특성[4-5] 방법뿐만 아니라 보강된 콘크리트 구조물의 미시적 변형기구를 명확하게 이해하여야 할 필요성이 있다. 그러나 탄소섬유시트를 보강한 콘크리트 구조물에서는 준취성(quasi-brittle)적인 재료적 특성을 지니고 있는 콘크리트 재료 자체의 미시적 파손기구(골재와 기지재 사이의 부착균열, 기지재의 균열, 골재의 파괴 등)도 상당히 복잡할 뿐만 아니라 보강한 철근 또는 탄소섬유시트와 콘크리트 사이의 계면에서 계면 분리현상에 의한 균열발생, 탄소섬유시트의 파괴 등 다양한 손상인자들로 인해 파괴 메커니즘을 정확히 분석하기는 상당히 어렵다.

한편 재료내의 균열발생, 성장 등에 의해 발생하는 탄성파인 음향방출(Acoustic Emission, AE)[6-10]을 이용한 AE 콘크리트 재료내의 균열발생, 성장 등의 동적인 과정을 연속적으로 온-라인 모니터링하는데 유익한 수단으로 최근 저자들은 콘크리트 부재의 미시적 손상기구의 온-라인 모니터링을 위한 AE 적용기법을 보고한바 있다.[11-12]

따라서 본 연구에서는 앞에서 수행된 AE 적용기법을 토대로 하여 보강하지 않은 순수한 무보강 콘크리트, 철근보강, 탄소섬유시트 보강, 철근과 탄소섬유시트

를 보강한 4가지 경우의 콘크리트 시험편에 대하여 3점 굽힘 시험을 실시하여 각 시험편의 손상거동 및 미시적 파손기구를 명확히 하였으며 더불어 2차원 AE 발생원 위치 추정 기법[13]을 이용하여 균열 발생 및 성장 과정을 연속적으로 모니터링하였다.

## 2. 실험개요

### 2.1 시험편 및 탄소섬유시트 부착공정

본 연구에서는 다음과 같은 4가지 경우의 콘크리트 시험편을 준비하여 실험을 수행하였다.

- i) 보강되지 않은 시험편
- ii) 1개의 철근이 보강된 시험편
- iii) 탄소섬유시트만 보강된 시험편
- iv) 철근과 탄소섬유시트가 모두 보강된 시험편

이러한 방법으로 제작된 콘크리트 시험편의 단면치수 및 배근 현황, 탄소섬유시트 보강, AE 센서의 부착 위치는 Fig. 1과 같다. 그림에서 보여주는 바와 같이 시험편의 치수는 440×100×100(mm)의 크기로 제작되었으며 보강한 철근은 인장철근(D13)을 사용하였고 또한 시험편의 모서리는 보강효과를 위하여 R10mm로 곡면화 하였다. 탄소섬유시트를 부착하기 위하여 사용된 에폭시의 배합비는 주제와 경화제의 무게비가 2 : 1인 S사 제품을 이용하였으며 탄소섬유시트는 두께 0.11mm의 S사 범용탄소 섬유[14]를 사용하였으며 2차원 AE 발생원 위치추정 기법을 적용하기 위하여 AE 센서간의 부착 위치는 200×85mm로 직사각형(rectangular)으로 정하였다. 또한 탄소섬유시트를 시험편에 부착하기 위한 공정이 Fig. 2에 나타나있다. 그림에서 보여주는 바와 같이 탄소섬유시트 1매의 시공은 다음의 순서로 실시하였다.

- ① 콘크리트 표면 요철제거 및 그라인딩(sand paper #1000)
- ② 프라이머 도포(도포량 : 250g/m<sup>2</sup>)
- ③ 프라이머 건조 및 표면처리(7일동안 건조)
- ④ 접착용 상도레진(주제+경화제) 도포(도포량 : 400g/m<sup>2</sup>)
- ⑤ 탄소섬유시트 부착
- ⑥ 함침용 하도레진(주제+경화제) 도포(도포량 : 200g/m<sup>2</sup>)

위와 같이 탄소섬유시트로 강화한 시험편을 15일 건조시킨 후 3점 굽힘 시험을 실시하였다. 그리고 본 연

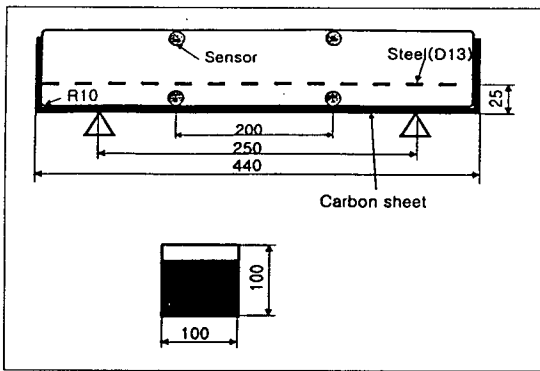


Fig. 1. Dimension of specimen

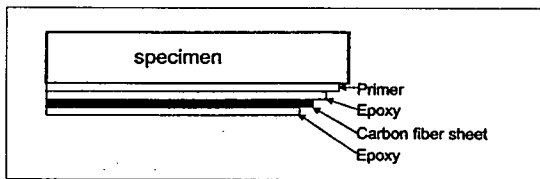


Fig. 2. Adhesive process of carbon fiber sheet

구에 사용된 콘크리트 시험편의 시방배합은 Table 1과 같다.

2.2 실험방법

본 연구에서는 탄소섬유시트를 강화한 콘크리트의 하중 증가에 따른 파괴 거동 및 손상평가를 위한 음향 방출 기법의 적용성을 평가하기 위하여 탄소섬유시트 강화 콘크리트 시험편에 AE 센서를 부착하여 3점 굽힘 시험을 실시하였다.

Fig. 3에서 보여주는 바와 같이 시험편 정면에 AE 센서를 부착하고 압축 시험기(INSTRON, 10ton)에 의해 시험편에 하중이 가해지면 시험편 내의 국부적인 응력집중, 균열발생, 성장으로 인한 탄성파가 발생한다. 이때 발생한 탄성파, 즉 AE 신호는 AE 센서에 의해 감지되고 예비증폭기(preamplifier)에 의해 40dB 증폭되어 AE 본체(MISTRAS 2001)로 보내어진다. AE 본체로 보내어진 신호는 AE 사상수(AE event), 지속 시간(Duration Time), 에너지(Energy), 진폭(Amplitude) 등의 여러 AE 파라미터에 의해 분석되어 탄소섬유시트 강화 콘크리트의 파괴 거동을 명확하게 평가할 수 있는 AE 파라미터를 선택하게 된다. 그리고 시험편에 가해지는 하중은 0.5mm/min으로 변위를 제어하였으며 양지지점 사이는 250mm로 정하였다. 또한 하중이 가해지는 편과 시험편과의 마찰에 의

Table 1. Specified proportion

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

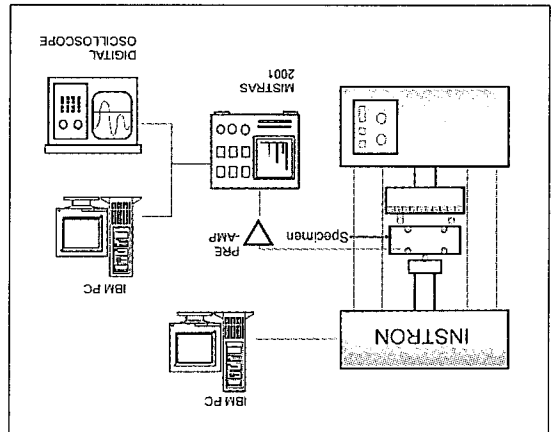


Fig. 3. Schematic diagram of the experimental set-up

해 발생하는 신호를 제거하기 위하여 시험편과 가력 핀 사이에 고무를 부착하였으며 문턱전압값(threshold level)은 18.8mV로 정하였다. 그리고 디지털 오실로스코프(LeCroy 9310A)를 이용하여 발생하는 AE 신호의 주파수 특성을 분석하였다. 또한 기지체인 콘크리트에서 균열의 발생, 성장 또는 탄소섬유시트와 콘크리트 시험편 사이의 계면에서 발생하는 균열, 철근과 콘크리트 계면에서 발생하는 균열 및 균열진전 양상을 평가하기 위하여 2차원 AE 발생원 위치추정 기법을 적용하였으며 이를 위하여 그림에서 보여주는 바와 같이 시험편 정면에 4개의 AE 센서를 직사각형(rectangular)방식으로 부착(200×85mm)하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 콘크리트의 파괴거동과 AE 인자와의 관계

본 연구에서는 무보강 콘크리트와 철근 및 탄소섬유시트로 보강한 콘크리트 빔의 손상정도와 미시적 파손 기구를 평가하기 위하여 AE 기법의 적용성을 평가하였다. Fig. 4는 보강조건이 다른 각각의 콘크리트 시험편에 대하여 보강 효과에 따른 시험편들의 하중 증가와 AE 사상수의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 4(a)는

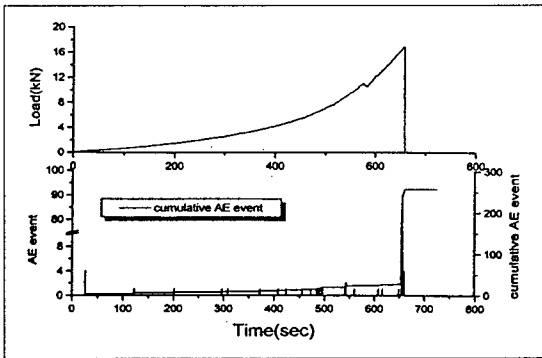


Fig. 4. (a) Concrete specimen

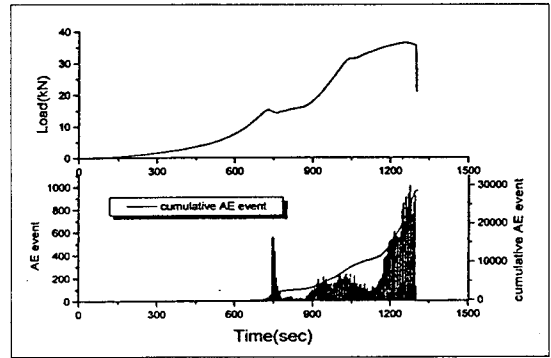


Fig. 4. (b) Steel bar reinforced concrete

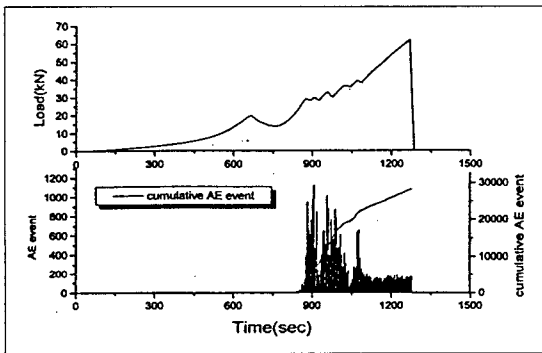


Fig. 4. (c) CFRP reinforced concrete

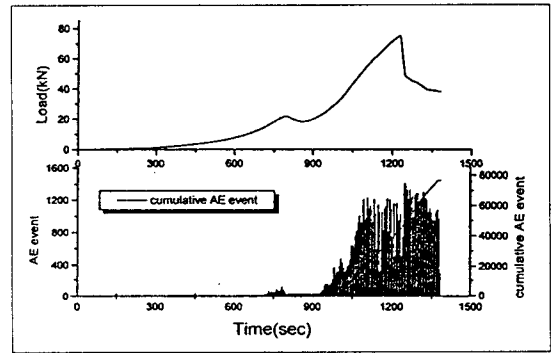


Fig. 4. (d) Steel bar and CFRP reinforced concrete

무보강 콘크리트 시험편의 하중-AE 사상수의 변화를 나타낸 것으로 하중 초기에 재료 내부의 기공 등에 의한 국부적인 응력 집중에 의해 소수의 AE 사상수가 발생하며 하중이 점차적으로 증가함에 따라 콘크리트 재료내의 기지재인 모르타르와 골재와의 계면으로부터의 부착균열(bonding crack), 기공으로부터의 균열 성장 등에 의해 AE 사상수가 증가하며 최대 하중에서는 발생한 미소 균열의 합체에 의해 시험편 배면 중앙에서 주균열이 발생함에 따라 AE 사상수가 급격하게 증가하였다. Fig. 4(b)는 철근을 보강한 콘크리트 시험편의 하중과 AE 사상수 발생 양상을 나타낸 것으로 16kN까지 하중은 점차적으로 증가하였다가 무보강 콘크리트 시험편과 마찬가지로 시험편 배면 중앙에 급격한 균열전파로 인하여 하중은 감소하였다. 그러나 보강한 철근 때문에 시험편은 완전 파단에는 도달하지 않고 보강된 철근에 의해 다시 2차적으로 하중은 증가하여 작용하중이 최대가 되는 38kN 지점까지 증가하였다. 보강한 철근에 의해 2차적으로 하중이 증가함에 따라 콘크리트와 철근 사이의 계면에서 미소 균열이 관

찰되었으며 최대 하중에서는 발생한 미소 균열이 합체되어 기지재인 콘크리트가 여러 부분으로 부서져서 떨어져 나옴에 따라 시험편은 철근에 의한 보강효과는 유지되지 않고 급격한 하중감소 현상을 보인다. 한편 철근을 보강한 시험편의 하중 증가에 따른 AE 사상수는 기지재인 콘크리트 시험편에 거시적인 균열이 관찰되기 전에 다수의 AE 사상수가 발생하였다. 이것은 강화된 철근과 콘크리트 사이의 계면에서 하중이 증가함에 따라 다수의 AE 사상수가 발생하고 있음을 보여준다. 이러한 결과는 뒤의 Fig. 8의 2차원 AE 발생원 위치 추정 결과에서 콘크리트와 철근과의 계면에서 다수의 AE 발생원이 발생하는 것과 매우 잘 일치함을 보여준다. 특히 시험편에 거시적인 균열이 발생하고 난 후 보강한 철근에 의해 다시 하중이 증가함에 따라 철근과 콘크리트 사이의 계면에서 미소 균열이 발생함과 더불어 기존의 거시적 균열의 마찰 등에 의해 AE 사상수가 급격하게 증가하였다.

Fig. 4(c)는 탄소섬유시트만 강화한 콘크리트 시험편의 하중 증가에 따른 AE 사상수와의 상관관계를 나

타낸 것으로 콘크리트 시험편은 앞의 철근을 보강한 콘크리트 시험편과 마찬가지로 1차적으로 20kN에서 지지재인 콘크리트에서 가력지점과 시험편 저면과 45° 방향으로 저면에서 거시적 균열이 발생하여 가력지점으로 전파함에 따라 하중이 감소하는 영역이 관찰되지만 보강한 탄소섬유시트 효과 때문에 하중은 다시 점차적으로 증가한다. 하중이 증가함에 따라 발생한 거시적 균열로부터 지지재인 콘크리트와 보강한 탄소섬유시트 사이의 계면으로 균열이 전파하여 계면 분리 현상이 발생하고 작용하중이 최대하중에 도달하게 되면 탄소섬유시트의 파단에 의해 최종 파괴에 도달하게 된다. 이때 발생하는 AE 사상수의 발생은 콘크리트 시험편에 거시적 균열이 발생하는 지점에서 앞의 경우들과는 달리 소수의 AE 사상수만 발생하고 오히려 하중이 2차적으로 증가하여 콘크리트와 탄소섬유시트간의 계면에서 계면분리 현상이 발생함에 따라 다수의 AE 사상수가 발생하였다. 이때 발생하는 AE 사상수는 콘크리트와 탄소섬유시트간의 계면으로부터의 균열, 접촉 재료인 에폭시 파단, 그리고 탄소섬유시트의 파단 등 다양하게 발생하는 AE 신호들로서 다수의 AE 사상수가 발생한다. 마지막으로 Fig. 4(d)에서는 철근과 탄소섬유시트 모두 강화된 콘크리트 시험편의 파괴 거동과 AE 사상수 변화를 나타낸 것으로 타 시험편과 마찬가지로 20kN에서 시험편에 거시적 균열이 발생함에 따라 일차적으로 하중 감소 현상이 발생하고 보강한 철근과 탄소섬유시트에 의해 하중은 다시 급격하게 증가한다. 하중이 2차적으로 증가함에 따라 철근과 콘크리트 시험편의 계면으로 다수의 거시적 균열이 발생하여 가력 지점으로 성장하며 탄소섬유시트와 콘크리트 시험편의 계면으로 계속해서 균열이 성장한다. 최대 하중에서 시험편은 더 이상 하중을 지탱할 수 없을 정도로 균열이 성장, 합체되어 하중은 급격히 감소한다. 이때 발생하는 AE 사상수 변화는 앞의 철근만 보강한 (b)의 경우와 탄소섬유시트만 보강한 (c)의 경우의 AE 사상수 발생 양상을 합쳐 높은 것과 같은 변화를 보여주고 있다. 즉 일차적으로 콘크리트 지지체에 거시적 균열이 발생하는 영역에 도달하기 전부터 콘크리트와 철근과의 계면에서 다수의 AE 사상수가 발생하고 다시 2차적으로 하중이 증가하는 영역에서 발생하는 AE 사상수는 콘크리트와 철근과의 계면뿐만 아니라 콘크리트와 탄소섬유시트간의 계면으로부터의 계면분리현상에 의한 AE 발생, 에폭시 파단, 그리고 발생한 다수의 거시적 균열들의 마찰 등 아주 다양한 현상으로부

터 AE 사상수가 다수 발생하고 있다.

Fig. 5(a)는 하중이 증가함에 따른 각 시험편들의 지속시간(duration time)의 변화를 나타낸 것으로 무보강 콘크리트 시험편인 경우 발생하는 AE 신호의 대부분이 800 $\mu$ s이하의 낮은 지속시간을 보이고 있으며 철근을 보강한 시험편인 경우 시험편에 거시적 균열이 발생하기 이전에 발생하는 AE 신호는 앞에서 언급하였듯이 콘크리트와 철근과의 계면에서 발생하는 신호들로서 1,000 $\mu$ s이하의 지속시간을 나타내고 있다. 그러나 2차적으로 하중이 증가함에 따라 시험편의 균열 발생, 기존의 거시적 균열의 마찰 등에 의한 신호들은 4,000 $\mu$ s 정도의 지속시간을 보이는 신호들이 다수 발생하였다. 또한 탄소섬유시트만을 보강한 시험편인 경우 콘크리트와 탄소섬유시트간의 계면분리 또는 발생한 거시적 균열의 성장 등에 의한 신호들은 대부분 4,000~10,000 $\mu$ s 범위의 지속시간을 나타내는 AE 신호들이 다수 발생하며 특히 300,000 $\mu$ s까지의 아주 긴 지속 시간을 보이는 신호들도 다수 포함되어 있다. 그러나 철근과 탄소섬유시트 모두를 보강한 시험편인 경우 2차적으로 하중이 증가함에 따라 시험편에 거시적 균열이 발생, 성장 또는 계면 분리현상 등에 의한 AE 신호들은 대부분이 비교적 긴 5,000-15,000 $\mu$ s의 지속 시간을 나타내었다. 그리고 100,000 $\mu$ s이상의 긴 지속 시간을 나타내는 AE 신호들도 극소수 발생하였다.

한편 Fig. 5(b)는 발생한 AE 신호들의 진폭(amplitude)과 지속시간과의 관계를 나타낸 것으로 무보강 콘크리트 시험편인 경우 Fig. 5(a)에서 언급하였듯이 800 $\mu$ s이하의 낮은 지속시간을 보이며 그때 AE 신호의 진폭은 60dB이하의 낮은 진폭을 나타내었다. 그러나 철근을 보강한 시험편인 경우 4,000 $\mu$ s정도의 지속시간과 90dB 이하의 신호들이 대부분 발생하고 특히 지속시간은 4,000 $\mu$ s 정도이지만 진폭이 90~100dB로 높은 신호들이 소수 발생하였다.

탄소섬유시트를 보강한 시험편인 경우 앞의 철근을 보강한 시험편에 비하여 지속시간과 진폭이 더 큰 신호들이 다수 발생하며 특히 진폭이 90dB이상이며 그에 따라 지속시간 또한 300,000 $\mu$ s까지의 아주 긴 신호가 다수 발생하였다.

마지막으로 철근과 탄소섬유시트를 보강한 콘크리트 시험편인 경우 하중이 증가함에 따라 발생하는 AE 신호들의 진폭특성은 탄소섬유시트만을 보강한 시험편과 비슷하게 광범위한 영역의 진폭변화를 보이지만 지속시간이 10,000 $\mu$ s 이상의 긴 신호들이 다수 발생하

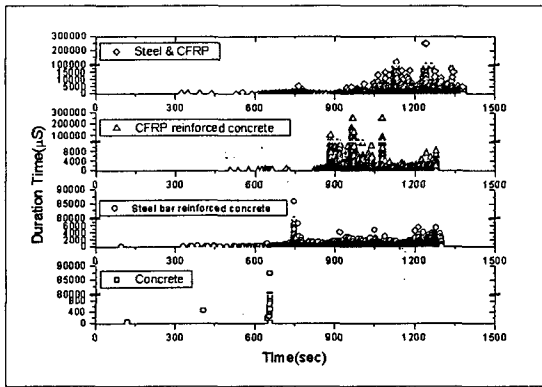


Fig. 5. (a) Duration time versus Time

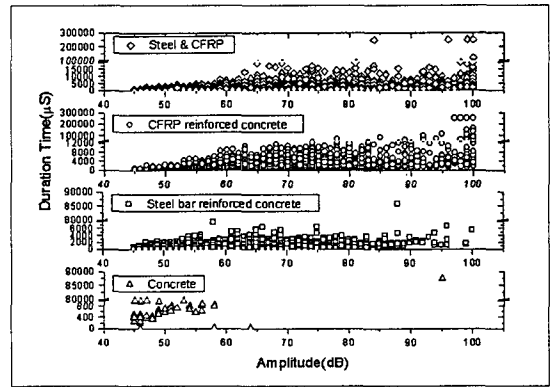
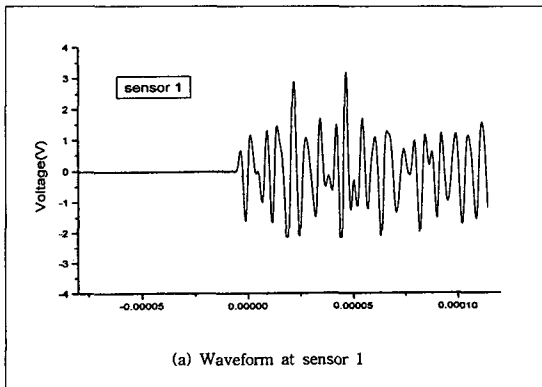
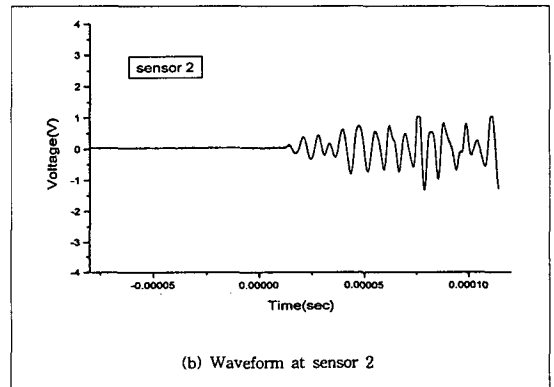


Fig. 5. (b) Duration time versus Amplitude



(a) Waveform at sensor 1



(b) Waveform at sensor 2

Fig. 6. Typical Waveforms due to pencil breakage test

였다.

### 3.2 2차원 AE 발생원 위치추정

본 연구에서는 재료내부의 균열 발생, 진전 양상 또는 결합위치를 측정하기 위하여 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 시험편에 4개의 AE 센서를 부착하여 2차원 AE 발생원 위치추정 기법[11-12]을 적용하였다. 정확한 AE 발생원 위치를 추정하기 위해서는 시험편의 종파속도를 정확하게 측정하는 것이 대단히 중요하기 때문에 본 연구에서는 2개의 센서를 시험편에 부착하고 반대편에서 연필심을 부러뜨려 발생한 탄성파를 디지털 오실로스코프를 이용하여 얻은 파형을 이용하여 콘크리트 시험편의 종파속도를 구하였다. Fig. 6은 디지털 오실로스코프를 이용하여 얻은 파형을 나타낸 것으로 Fig. 6(a)는 센서1에서 얻은 파형이며 (b)는 센서2에서 얻은 파형을 나타낸 것이다. 그림에서 보여주는 바와 같이 발생한 탄성파가 두 센서에 도달하는데 걸

리는 시간차와 두 센서간의 거리를 측정하여 콘크리트 시험편의 종파속도를 구하였다. 이렇게 측정된 콘크리트 시험편의 종파속도는 4200m/s이었다.

Fig. 7은 보강조건이 다른 시험편들의 2차원 AE 발생원 위치추정 결과를 나타낸 것으로 그림에서 보여주는 바와 같이 4가지 경우의 시험편 모두 발생한 균열을 따라 AE 발생원이 집중적으로 발생하고 있음을 보여주고 있다. Fig. 7(a)는 무보강 콘크리트 시험편의 경우로써 AE 발생원은 하중이 점차적으로 증가함에 따라 굽힘 모우멘트가 최대가 되는 시험편 배면 중앙에서 국부적인 응력집중에 의해 소수 발생하였으며 시험편에 순간적으로 균열이 발생함에 따라 주균열을 따라 다수의 AE 발생원이 발생하였다.

Fig. 7(b) 그림은 철근을 보강한 콘크리트 시험편의 AE 발생원 위치 추정 결과를 나타낸 것으로 하중 초기에 시험편에 균열은 전혀 관찰되지 않았지만 철근과 기지재인 콘크리트와의 계면 사이에서 다수의 AE 발

생원의 발생이 관찰되었다. 그리고 하중이 증가함에 따라 콘크리트에서 거시적 균열이 발생함과 동시에 균열을 따라 다수의 AE 발생원이 발생하였다. 이와 같은 결과는 앞에서 언급하였듯이 Fig. 5(b)에서 철근을 보강한 시험편의 AE 사상수와 하중과의 관계에서 기지체인 콘크리트의 주균열 발생전에 다수의 AE 사상수가 발생하고 있는 것과 아주 잘 일치하고 있음을 보여 준다. Fig. 7(c)의 탄소섬유시트 강화 콘크리트 시험편과 (d)의 철근과 탄소섬유시트 강화 콘크리트 시험편의 2차원 AE 발생원 위치 추정 기법이 시험편의 손상 및 균열진전을 평가하는데 양호한 결과를 나타내었다. 그러나 탄소섬유 시트와 콘크리트 시험편 사이의 계면에서 발생하는 균열 또는 에폭시 수지의 파단에 의해 발생하는 계면분리에 의한 AE 발생원의 위치는 부착한 센서의 범위 밖이므로 정확하게 위치추정을 할 수 없었다. 이와 같이 탄소섬유시트와 콘크리트 시험편과의 계면에서 발생하는 AE 발생원 또는 탄소섬유시트의 파단에 의한 AE 발생원의 위치추정을 정확하게 하기 위해서는 최소한 센서 6개 이상을 사용하여 3차원

AE 발생원 위치추정을 하는 것이 효과적인 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

### 3.3 시험편의 파괴양상

Fig. 8은 무보강 콘크리트 시험편 및 철근, 탄소섬유시트를 보강한 콘크리트 시험편의 균열 발생, 성장 및 파괴 양상을 나타낸 것으로 무보강 콘크리트 시험편인 Fig. 8(a)에서는 작용하중이 최대 하중에 도달하면 굽힘 모멘트가 최대가 되는 시험편 배면 중앙에서 높이 방향으로 급격하게 균열이 발생, 성장하여 시험편 높이의 3/4지점까지 전파하였다. 이때 시험편은 더 이상 하중을 지탱할 수 없는 거의 완전 파단에 도달한다. Fig. 8(b)는 철근이 강화된 콘크리트 시험편의 균열 발생 양상으로써 2차적으로 하중이 증가함에 따라 철근과 콘크리트 계면으로부터 거시적 균열이 발생하여 가력지점으로 성장하였다. 하중이 증가함에 따라 성장하는 균열들이 서로 합체되고 이로 인해 기지체인 콘크리트의 일부가 떨어져 나옴으로써 더 이상 시험편은 하중을 지탱할 수 없는 단계에 도달한다.

Fig. 8(c) 그림은 탄소섬유 시트를 보강한 시험편의 파단 양상으로써 앞의 무보강 시험편이나 철근을 보강한 시험편과는 파단 양상이 다르게 나타나고 있다. 즉 시험편 중앙에서 거시적 균열이 발생하는 앞의 경우들과는 달리 탄소섬유시트 보강 시험편은 그림에서 보여주는 바와 같이 가력지점과 시험편 저면과 45° 방향으로 저면으로부터 거시적 균열이 발생하여 하중이 점차적으로 증가함에 따라 시험편 중앙으로 균열이 진전하고 또한 탄소섬유 시트와 콘크리트의 계면으로 균열이 성장하여 계면분리현상이 발생하였다. 하중이 더욱더 증가함에 따라 탄소섬유시트와 콘크리트와의 계면 분리 현상은 현저해 지고 특히 최대 하중점에서는 탄소섬유시트가 전단되며 그때의 에너지 방출로 인해 시험편은 여러 부분으로 파단되어 완전파괴에 도달한다.

마지막으로 Fig. 8(d) 그림은 철근과 탄소섬유시트를 보강한 시험편으로써 주균열 발생 양상은 탄소섬유시트를 보강한 (c) 시험편의 경우와 마찬가지로 가력 지점과 저면 사이에서 45° 방향으로 균열이 발생하였다. 그리고 2차적으로 하중이 점차적으로 증가함에 따라 철근과 콘크리트 기지체 경계면에서 균열이 발생, 전파하여 다수의 거시적 균열로 성장하였다. 또한 탄소섬유시트와 콘크리트 시험편의 계면으로 균열이 성장함에 따라 계면박리현상이 현저하게 증가하였다. 한편 작용하중이 최대하중에 도달하게 되면 탄소섬유시트가 파

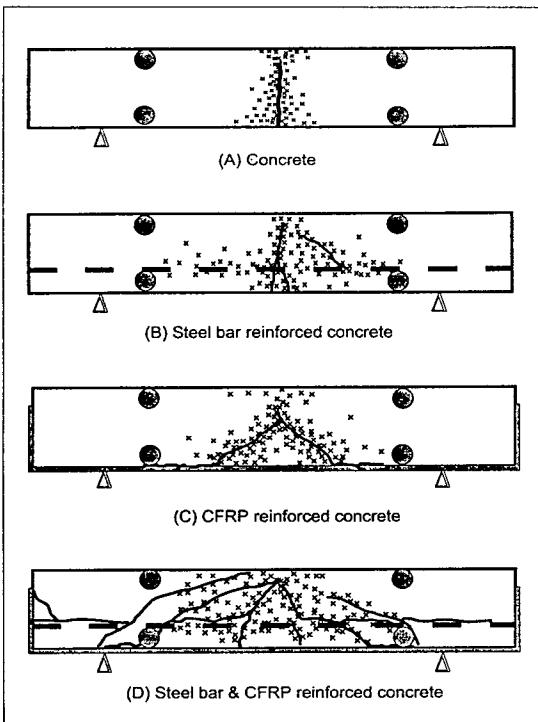


Fig. 7. 2-Dimensional AE source location at four different types of specimen

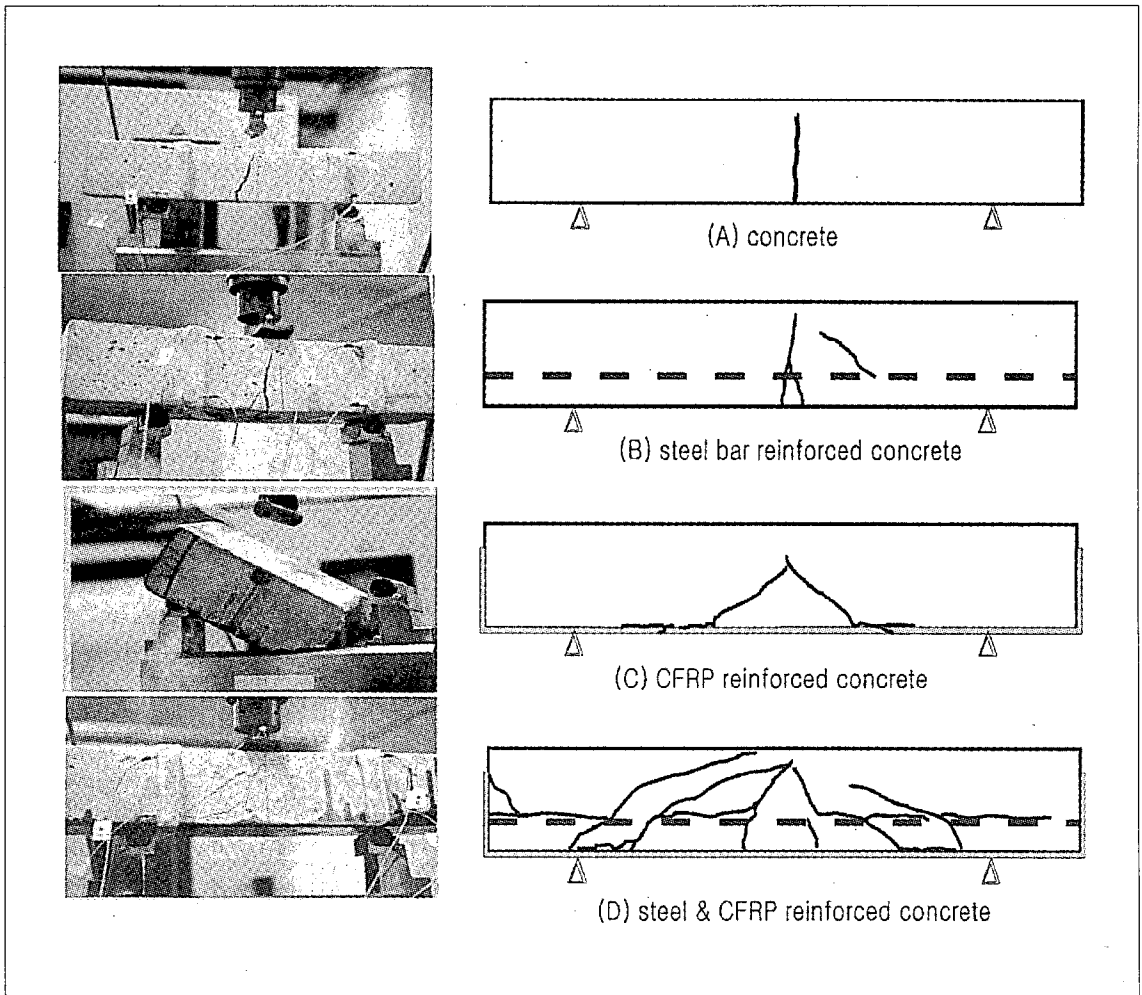


Fig. 8. Schematic diagram illustrating the characteristic of micro-failure mechanism for four different types of specimen

단되는 것이 아니라 탄소섬유시트와 콘크리트의 단부로부터 균열이 발생하여 철근과 콘크리트의 계면을 따라 발생한 균열과 합체되어 가력 지점으로 성장함에 따라 시험편은 더 이상 하중을 지탱하지 못하고 완전 파괴에 이른다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 철근, 탄소섬유시트로 보강된 콘크리트 부재의 파손 기구를 명확히 하기 위하여 AE 기법을 적용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 철근과 탄소섬유시트를 보강한 콘크리트 시험편은 시험편 배면 중앙과 가력지점과 45° 방향으로 주균열이 발생하며 최종적으로 단부로부터 발생한 균열과 합체되어 완전파괴에 이른다.

2) 일차적으로 콘크리트가 파단될 때 다수의 AE 사상수가 발생하고 철근이 보강된 시험편인 경우 콘크리트에 균열이 발생하기 전에 철근과 콘크리트의 계면으로부터 다수의 AE 사상수가 발생하였다.

3) 무보강 시험편에서 800 $\mu$ s 이하의 지속시간과 60dB 이하의 진폭을 갖는 AE 신호가 발생하며 철근을



보강한 시험편에서는 철근과 콘크리트의 계면에서  $1,000\mu\text{s}$ 이하의 지속시간을 갖는 신호가 발생하였다. 그리고 탄소섬유시트를 보강한 시험편인 경우  $4,000\sim 10,000\mu\text{s}$ 의 지속시간을 갖는 신호들이 탄소섬유시트와 콘크리트와의 계면박리현상에 의해 검출되었으며 철근과 탄소섬유시트를 보강한 시험편은  $5,000\sim 15,000\mu\text{s}$ 의 긴 지속시간을 갖는 신호들이 발생하였다.

4) 2차원 AE 발생원 위치 추정 기법에서 무보강, 철근보강 시험편은 비교적 정확하게 발생원의 위치를 추정하였지만 탄소섬유시트로 보강된 시험편들은 탄소섬유시트와 콘크리트 부재의 계면으로부터의 AE 발생원은 정확히 추정할 수 없었다. 이를 위해서는 3차원 AE 발생원 위치 추정 기법을 적용하는 것이 더욱 유효할 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성 평가 연구센터의 지원하에 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Hiroya Gagio, Dideo Katsumata, Kohzo Kimura, Yoshiro Kobatake, "A Study of Existing Reinforced Concrete Structure Retrofitted by Carbon Fiber", ACCM-1, 1998, pp. 107-1~107-4.
2. Atsushi Yokoyama, Kazuakki Nishiyabu, "Fracture Behavior of Concrete Beam Strengthened with Composite Materials", ACCM-1, 1998, pp.103-1~103-4.
3. Spadea, G., Bencardino, F. "Behavior of Fiber-Reinforced Concrete Beams under cyclic Loading", J of Structural Engineering, 1997, pp.660~668.
4. 오병환, 강동욱, 조재열, "강판 휨보강된 철근 콘크리트보의 파괴기구 및 박리하중산정 이론연구", 콘크리트학회지 제9권 6호, 1997, pp.243~254.
5. 정란, 박현수, "탄소섬유시트 보강 콘크리트용 무기계 폴리머 접착제의 내화 및 구조성능", 콘크리트학회지 제10권 5호, 1998, pp.109~115.
6. 이진경, 이준현, "음향방출을 이용한 콘크리트 부재의 미시적 파괴특성의 온-라인 모니터링", 한국비파괴검사학회 추계학술발표회 논문집, 1998, pp.332~347.
7. Lee, J.H., Yoon, J.H., Kwon, O.Y., "Acoustic Emission Monitoring of Fracture Process of SiC/Al composites under Cyclic Loading," Proc. of 4th International Symposium on Acoustic Emission from Composite Materials, Seattle, U.S.A, 1992, pp.300~309.
8. Lee, J.H., Sung, W.J., "Acoustic Emission Characterization of Single and Dual Fiber Reinforced Metal Matrix Composite," Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 17A, 1997, San Diego, U.S.A.
9. Taketo Uomoto, Shigeru Sato and Sadaaki Yamamoto, " Determination of Applied Compressive Stress in Concrete Structure by Acoustic Emission Measurement," Progress in Acoustic Emission III, 1986, pp.538~545.
10. Chen, H.L., Cheng, C.T., and Chen, S.E., "Determination of Fracture Parameters` of Mortar and Concrete Beams by Using Acoustic Emission," Material Evaluation, 1992, pp.888~894.
11. 이준현, 이진경, 장일영, 윤동진, "음향방출을 이용한 mortar 재료의 미시적 파괴거동에 관한 연구", 콘크리트 학회지 제10권 6호, 1997, pp.203~211.
12. 이준현, 이진경, 윤동진, "음향방출을 이용한 콘크리트 부재의 미시적 파괴특성의 온라인 모니터링", 한국비파괴검사 학회지, 제19권 1호, 1999 pp.25~33.
13. Ronnie K. Miller, Paul McIntire, "Nondestructive Testing Handbook," Vol 5, Acoustic Emission Testing, ASNT, 1987.
14. SK 케미컬 정밀화학 사업본부 프리프레그 사업팀, "SK 탄소섬유시트공법 기술자료", 1998.