

AE를 이용한 탄소섬유시트강화 콘크리트의 미시적 손상 거동에 관한 연구

이진경*, 이준현**, 장일영***, 정성륜****

* 부산대학교 대학원, ** 부산대학교 기계공학부

*** 금오공과대학 토목공학과, **** (주) SK 케미칼

1. 서론

콘크리트 구조물은 최소한 50여년 이상 사용할 수 있도록 건축되어진다. 그러나 외부의 가혹한 환경이나 하중, 충격 등 무리한 사용여건에 따라 부식 또는 재료 내부에 결함이나 균열이 발생하여 구조물 자체의 내구성이 상당히 저하된다. 최근에는 이렇게 손상되거나 내구성이 떨어진 콘크리트 구조물에 강판이나 탄소섬유시트, 아라미트 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 보강재로서 높은 평가를 받고 있다. 그러나 탄소섬유시트를 보강한 콘크리트 구조물에서는 quasi-brittle한 재료적 특성을 지니고 있는 콘크리트 자체의 미시적 파손 기구도 상당히 복잡할 뿐만 아니라 보강한 철근, 탄소섬유시트와 콘크리트 사이의 계면에서의 균열발생, 탄소섬유시트의 파괴 등 다양한 손상인자들로 인해 파괴 메카니즘을 정확히 분석하기는 상당히 어렵다. 한편 재료내의 균열발생, 성장 등에 의해 발생하는 탄성파인 음향방출(AE)을 이용한 AE 기법은 콘크리트 재료내의 균열발생, 성장 등의 동적인 과정을 연속적으로 온-라인 모니터링하는데 유익한 수단이다. 따라서 본 연구에서는 음향방출 기법을 이용하여 순수한 콘크리트, 철근, 탄소섬유시트, 철근과 탄소섬유시트를 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^[4]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) 철근만 보강된 시험편
- iii) 탄소섬유만 보강된 시험편
- iv) 철근과 탄소섬유시트가 모두 보강된 시험편

한편 시험편의 단면치수 및 배근 현황, 탄소섬유시트 보강, AE 센서의 부착위치는 Fig. 1과 같다. 즉 시험편은 치수 440×100×100(mm)의 콘크리트 시험편을 사용하였으며 철근은 인장철근(D13)을 사용하였고 또한 시험편의 모서리는 보강효과를 위하여 R10mm로 곡면화 하였다. 탄소섬유시트를 부착하기 위하여 사용된 에폭시의 배합비는 주재와 경화제의 무게비가 2:1인 S사 제품을 이용하였으며 탄소섬유시트는 두께 0.11mm의 S사 범용 탄소섬유^[5]를 사용하였으며 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/m²)
- ③ 프라이머 건조 및 표면처리(7일 동안 건조)
- ④ 접착용 상도레진(주제+경화제) 도포(도포량: 400g/m²)
- ⑤ 탄소섬유시트 부착
- ⑥ 함침용 하도레진(주제+경화제) 도포(도포량: 200g/m²)

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

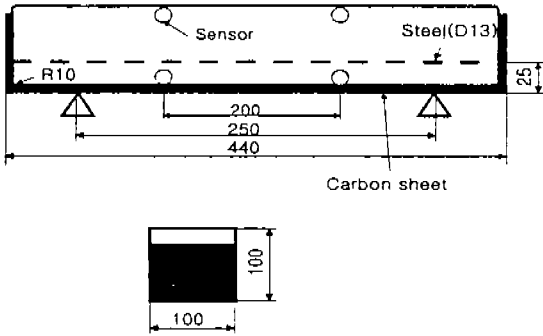


Fig. 1 Dimensions of specimen

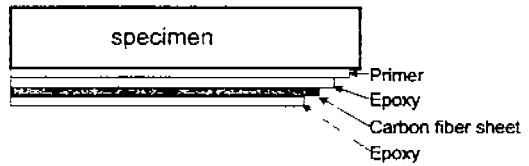


Fig. 2 Adhesive progress of carbon fiber sheet

2.2 실험방법

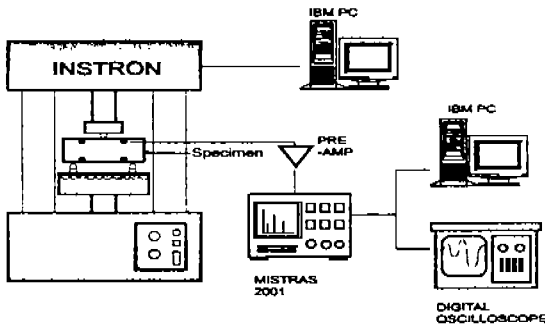


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental set-up

본 연구에서는 탄소섬유시트강화 콘크리트의 하중 증가에 따른 파괴 거동 및 손상평가를 위한 음향방출 기법의 적용성을 평가하기 위하여 Fig.3에서 보는바와 같이 탄소섬유시트 강화 콘크리트 시험편에 AE 센서를 부착하여 3점 굽힘 시험을 실시하였다.

그림에서 보여주는 바와 같이 시험편 정면에 AE 센서를 부착하고 압축 시험기(INSTRON, 10ton)에 의해 하중이 가해지면 시험편 내의 국부적인 응력 집중, 균열 발생, 성장으로 인한 탄성파가 발생한다. 이때 발생하는 탄성파, 즉 AE 신호는 AE 센서에 의해 감지되고 예비 증폭기(preamplifier)에 의해 40dB 증폭되어 AE 본체(MISTRAS 2001)로 보내어진다. AE 본체로 보내어진 신호는 여러 AE 파라미터에 의해 분석되어져 탄소섬유시

트강화 콘크리트의 파괴 거동을 명확하게 평가할 수 있는 AE 파라미터를 선택하게 된다. 하중조건은 0.5mm/min으로 변위를 제어하였으며 양지점 사이는 250mm로 정하였다. 또한 하중이 가해지는 핀과 시험편과의 마찰에 의해 발생하는 신호를 제거하기 위하여 시험편과 가력 핀 사이에 고무를 부착하였으며 문턱전압값(threshold) 값은 10mV로 정하였다. 그리고 디지털 오실로스코프(LeCroy 9310A)를 이용하여 발생하는 AE 신호의 주파수 특성을 분석하였다. 또한 탄소섬유강화시트와 콘크리트 시험편 사이의 계면에서 발생하는 균열, 혹은 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

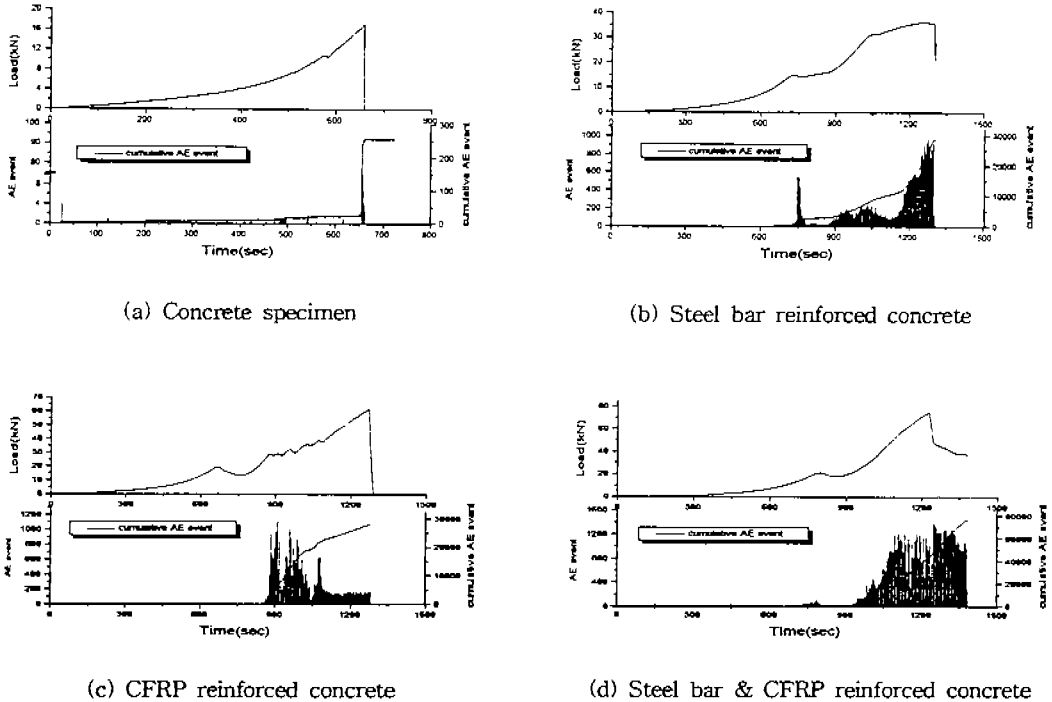


Fig. 4 Load, AE event versus Time

본 연구에서는 무보강 콘크리트와 철근 및 탄소섬유시트로 보강한 콘크리트 빔의 손상정도와 미시적 파손기구를 평가하기 위하여 AE 기법의 적용성을 평가하였다. Fig. 4는 각각의 보강 효과에 따른 시험편들의 하중 증가에 따른 AE event와의 상관관계를 나타낸 것이다. Fig. 4(a)는 무보강 콘크리트 시험편의 하중-AE event의 변화를 나타낸 것으로 하중이 점차적으로 증가함에 따라 재료 내부의 응력 집중등에 의해 소수의 AE event가 발생하며 더욱더 하중이 가해짐에 따라 발생하는 AE event가 빈번해지며 최대하중에서 급격하게 AE event가 발생하는 양상을 보여주고 있다. Fig. 4(b)는 철근을 보강한 콘크리트 시험편의 AE event 발생 양상을 나타낸 것으로 하중곡선에서 16kN 정도에서 하중이 급격히 저하하였다가 다시 증가하는 영역이 나타났다. 이렇게 하중이 감소하는 것은 기지재인 콘크리트에서 거시적 균열이 발생하여 하중이 급격히 감소한다. 특히 이 시점에서 AE event도 급격히 증가하며 콘크리트의 거시적 균열이 발생하는 하중 이전에도 다수의 AE event가 발생하였다. 이것은 하중 증가에 따라 기지재인 콘크리트와 보강한 철근과의 계면에서 미소균열 혹은 마찰에 의해서 발생하는 AE event들이다. 그리고 거시적 균열 이후 하중이 점차적으로 증가함에 따라 다수의 AE event가 발생하고 있다. 이것은 콘크리트의 거시적 균열 이후 보강한 철근에 의해 하중증가에 따라 철근과 콘크리트 사이의 계면에서 미소 균열이 발생함과 더불어 기존의 거시적 균열의 마찰에 의해 AE event가 다수 발생하고 있는

것으로 생각되어진다.

Fig. 4(c)는 탄소섬유시트만 강화한 콘크리트 시험편의 하중 증가에 따른 AE event와의 상관관계를 나타낸 것으로 콘크리트의 거시적 균열이 발생하는 시점에서 앞의 경우와는 달리 AE event가 거의 발생하지 않고 오히려 하중 증가에 따라 탄소섬유시트와 콘크리트와의 계면에서 균열이 발생하고 있다. 이 때 발생하는 AE event는 콘크리트와 탄소섬유시트간의 계면으로부터의 균열, bonding 재료인 에폭시 파단, 그리고 탄소섬유시트의 파단 등 다양한 인자들로부터 다수의 AE 신호가 발생한다. 마지막으로 Fig. 5(d)에서는 철근과 탄소섬유시트 모두 보강한 콘크리트 시험편의 AE event를 나타낸 것으로 앞의 철근만 보강한 (b)의 경우와 탄소섬유시트만 보강한 (c)의 경우의 AE event 발생양상을 합쳐놓은 것과 같은 AE event 변화를 보여주고 있다. 즉 일차적으로 콘크리트 기지재에 거시적 균열이 발생하는 영역에 도달하기 전부터 콘크리트와 철근의 계면에서 다수의 AE event가 발생하고 하중이 점차적으로 증가함에 따라 콘크리트와 철근의 계면에서 뿐만 아니라 콘크리트와 탄소섬유시트간의 계면으로부터의 균열진전, 에폭시 파단, 발생한 거시적 균열의 마찰 등으로부터 다수의 AE event가 발생하고 있다.

3.2 2차원 AE 발생원 위치추정

본 연구에서는 재료내부의 균열 발생, 진전 양상 및 결함위치를 추정하기 위하여 Fig.1에서 보여주는 바와 같이 시험편에 4개의 센서를 부착하여 2차원 AE 발생원 위치추정 기법을 적용하였다.

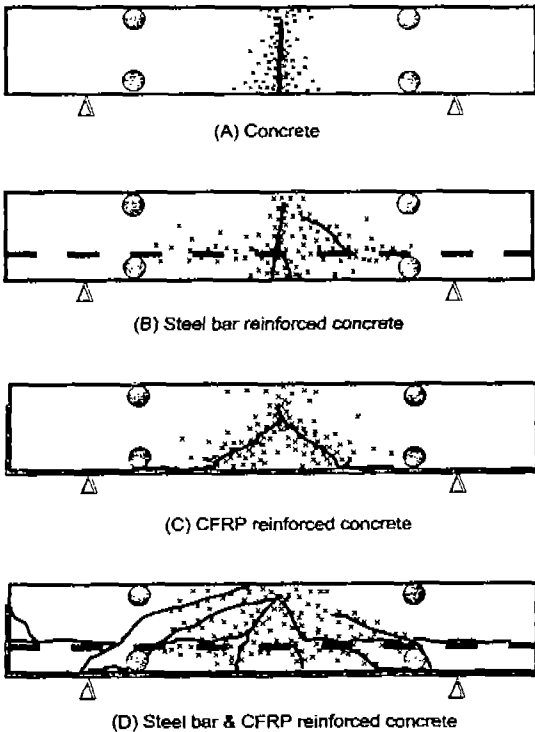


Fig.5 2-dimensional AE source location at four different types of specimen

Fig. 5는 보강조건이 다른 시험편들의 2차원 AE 발생원 위치추정 경과를 나타낸 것으로 Fig.5(a)는 무보강 콘크리트 시험편의 경우를 나타낸 것으로 발생한 균열을 따라 AE 발생원이 집중적으로 발생하고 있음을 보여주고 있다. AE 발생원은 하중이 점차적으로 증가함에 따라 급힌 모우멘트가 최대가 되는 시험편 배면 중앙에서 극부적인 응력집중에 의해 소수 발생하였으며 시험편에 순간적으로 균열이 발생함에 따라 균열을 따라 다수의 AE 발생원이 발생하였다.

Fig. 5(b)그림은 철근을 보강한 콘크리트 시험편의 AE 발생원의 위치 추정 결과를 나타낸 것으로 하중 초기에 시험편에 균열은 전혀 발생하지 않았지만 철근과 기지재인 콘크리트와의 계면 사이에서 다수의 AE 발생원의 발생이 관찰되었다. 그리고 하중이 증가함에 따라 콘크리트에서 거시적 균열이 발생함과 동시에 균열을 따라 다수의 AE 발생원이 발생하였다. 이와 같은 결과는 앞의 Fig. 4(b)에서 철근을 보강한 시험편의 AE event와 하중과의 관계에서 기지재인 콘크리트의 주균열 발생전에 다수의 AE event가 발생하고 있는 것과 아주 잘 일치하고 있음을 보여준다. Fig. 7(c)의 탄소섬유시트 강화 콘크리트 시험편과 (d)의 철근과 탄소섬유시트 강화 콘크리트 시험편의 2차원 AE 발생원 위치 추정결과도 균열을 따라 다수의 AE 발생원이 발생하여 2차원 AE 발생원 위치추정 기법이 시험편의 손상

및 균열진전을 평가하는데 양호한 결과를 나타내었다. 그러나 탄소섬유시트와 콘크리트 시험편 사이의 계면에서 발생하는 균열 및 에폭시 수지의 파단에 의해 발생하는 AE 발생원의 위치는 부착한 센서의 범위 밖이므로 정확하게 위치추정을 할 수 없었다. 따라서 탄소섬유시트와 콘크리트 사이의 계면에서 발생하는 AE 발생원 또는 탄소섬유시트의 파단에 의한 AE 발생원의 위치 추정을 정확하게 하기 위해서는 최소한 6개의 센서를 사용하여 3차원 AE 발생원 위치추정을 하는 것이 효과적인 것으로 사료된다.

4. 결론

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

1. 무보강, 철근보강, 탄소섬유시트 보강, 그리고 철근과 탄소섬유시트를 보강한 콘크리트 시험편 모두 하중 증가에 따라 일차적으로 기지재인 콘크리트가 파단되었으며 보강한 철근, 탄소섬유시트 등에 의해 하중은 계속 증가하였으며 최종적으로 콘크리트가 조각으로 부서짐으로 완전 파단에 도달하였다.
2. 콘크리트 시험편의 최종 파괴양상은 무보강 시험편의 경우 굽힘 모우멘트가 최대인 시험편 배면 중앙에서 높이 방향으로 거시적 균열이 발생하며 철근만 보강한 시험편도 시험편 배면 중앙에서 주균열이 발생하고 하중이 점차 증가함에 따라 철근과 콘크리트 계면에서 균열이 발생, 성장하였다. 탄소섬유시트로 보강한 시험편에서는 시험편 배면 중앙과 지지점 사이에서 45° 방향으로 주균열이 발생하여 가력지점으로 진전하며 하중이 증가함에 따라 콘크리트와 탄소섬유시트간의 계면으로 균열이 성장하였다. 마지막으로 철근과 탄소섬유시트로 보강한 시험편도 가력지점과 45° 방향으로 주균열이 발생하며 하중증가에 따라 철근과 콘크리트 계면을 따라 다수의 주균열이 발생하여 최종적으로 단부로부터 발생한 균열과 합체되어 완전파단에 이른다.
3. 하중 증가에 따른 AE event는 모든 시험편에서 일차적으로 기지재인 콘크리트가 파단될 때 다수의 AE event가 발생하고 철근이 보강된 시험편은 하중 초기, 즉 기지재인 콘크리트에 거시적 균열이 발생하기 전에 철근과 콘크리트의 계면으로부터 다수의 AE event가 발생하였다. 특히 탄소섬유시트가 콘크리트로부터 분리될 때 두드러지게 많은 AE event가 발생하였다.
4. 2차원 AE 발생원 위치 추정기법에서 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 위치추정 기법을 적용하는 것이 더욱 유효할 것으로 생각되어진다.

참고문헌

1. Hiroya Hagio, Hideo Katsumata, Kohzo Kimura, Yoshiro Kobatake, "A Study of Existing Reinforced Concrete Structure Retrofitted by Carbon Fiber", ACCM-1, pp.107-1~107-4, 1998
2. Atsushi Yokoyama, Kazuakki Nishiyabu, "Fracture Behavior of Concrete Beam Strengthen with Composite Materials", ACCM-1, pp.103-1~103.4, 1998
3. G. Spadea, F. Bencardino, "Behavior of Fiber-Reinforced Concrete Beams under cyclic Loading", J of Structural Engineering, pp.660~668, 1997
4. 이준현, 이진경, 장일영, 윤동진, "음향방출을 이용한 mortar 재료의 미시적 파괴거동에 관한 연구", 콘크리트 학회지 제10권 6호, pp.203~211, 1997
5. SK 케미칼 정밀화학 사업본부 프리프레그사업팀, "SK 탄소섬유시트공법 기술자료", 1998