

# 섬유종류에 따른 고인성 시멘트 복합체의 음향방출특성

## Effect of Fiber on the Acoustic Emission of High Performance Fiber-Reinforced Cement Composite

김 윤 수\*  
Kim, Yun-Soo

전에스더\*\*  
Jeon, Esther

김 선 우\*\*  
Kim, Sun Woo

윤 현 도\*\*\*  
Yun, Hyun-Do

### ABSTRACT

The properties of reinforcing fiber, as tensile strength, aspect ratio and elastic modulus, have great effect on the fracture behavior of HPFRCC(High performance fiber-reinforced cementitious composite). Acoustic emission(AE) method was used to evaluate the characteristics of fracture process and the micro-failure mechanism of HPFRCC. For these purposes, three kinds of fibers were used : PP(Polypropylene), PE(Polyethylene), SC(Steel cord). In this study, the AE characteristics of HPFRCC with different fiber type(PE.15, PP2.0, SC0.75+PE0.75) distributions under four-point-bending were studied. The result show that the AE technique is a valuable tool to study the failure mechanism of HPFRCC.

### 1. 서 론

최근 콘크리트의 취성적 성질을 보완하고 내진성능 및 내구성을 부여하기 위하여 시멘트 복합체에 섬유를 혼입하여 균열분산능력 및 연성을 개선하기 위한 연구가 국·내외적으로 활발히 이루어지고 있으며, 이러한 고인성 시멘트 복합체(High Performance Fiber-Reinforced Cement Composite, 이하 HPFRCC)는 혼입되는 섬유 자체의 인장강도 및 탄성계수와 섬유 혼입율에 따라 상이한 균열분산능력 및 변형특성을 가지게 된다. 그러나 현재 HPFRCC에 관한 연구는 섬유 혼입에 따른 파괴양상, 강도 및 연성 등 구조성능에 관한 연구가 주를 이루고 있으며, 섬유와 시멘트 매트릭스 간 상호작용에 따른 HPFRCC의 미시적 파괴거동에 관한 연구는 이루어지고 있지 않은 실정이다. 한편 재료 내부의 손상에 의한 에너지 방출로 발생된 탄성파(Elastic wave)특성을 근거로 재료 내부의 손상발생 및 진전과정을 파악할 수 있는 음향방출(Acoustic emission, 이하 AE)기법은 Shah와 Maji(1988)<sup>1)</sup> 등에 의해 콘크리트의 손상도를 평가하기 위해 적용되기 시작하여, 현재 국내에서도 모르타르 및 콘크리트의 파괴거동에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 이에 본 연구에서는 혼입되는 섬유의 종류에 따른 HPFRCC의 휨파괴특성을 AE신호특성과 비교·분석하여 균열발생 및 손상진전에 따른 시멘트 복합체 내 파괴 메카니즘에 관해 규명하고자 한다.

### 2. HPFRCC의 휨거동 및 AE 신호특성에 관한 실험

#### 2.1 시험체 계획 및 제작

본 연구에서는 다양한 성능을 갖는 HPFRCC의 손상수준에 따른 AE 신호특성을 규명하기 위하여 표 1에 나타난 바와 같이 섬유보강하지 않은 Concrete 시험체, PP2.0%, PE1.5%, SC0.75%와 PE0.75%를 하이브리드하여 혼입 보강한 총 4 종류의 휨 시험체(400×100×100mm)를 각각 계획하였다. 각 시험체의 배합표는 표 2와 같고, 시험체 제작 후 건조수축을 방지하기 위하여 고온수증양생(70℃)하였다.

#### 2.2 사용재료

본 연구에서는 시멘트 복합체에 변형특성을 부여하기 위하여 각 섬유의 형상, 인장강도 및 탄성계

\* 정희원, 충남대 대학원 석사과정

\*\* 정희원, 충남대 대학원 박사과정

\*\*\* 정희원, 충남대 건축공학과 부교수, 공학박사

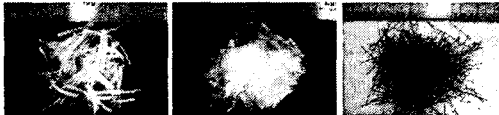
수 등이 상이한 PP, PE, Steel cord를 각각 적용하였으며, 각 섬유유형의 형상 및 기계적 특성은 그림 1 및 표 3과 같다.

표 1 시험체 계획

시험체명	단면 (B×D)	길이 (mm)	순경간 (mm)	설계기준압축강도 (N/mm <sup>2</sup> )
Concrete	100×100	400	300	50
PP				
PE				
SCPE				

표 2 시멘트 복합체 배합계획

시험체명	W/C	V(Vol. %)			단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )		
		PE	SC	PP	시멘트	모래	물
Concrete	0.37	-	-	-	459.0	759.0	170.0
PP	0.45	-	-	2.00	1036.0	414.4	466.2
PE		1.50	-	-	1041.5	416.6	468.7
SCPE		0.75	0.75	-	1041.5	416.6	468.7



(a) PP (b) PE (c) Steel cord  
그림 1 보강섬유의 형상

표 3 보강섬유의 기계적 특성

종류	비중 (kg/cm <sup>3</sup> )	길이 (mm)	직경 (μm)	형상비	인장강도 (N/mm <sup>2</sup> )	탄성계수 (kN/mm <sup>2</sup> )
PP	900	15	40	375	600	5
PE	97	15	12	1250	2500	75
Steel cord	7850	32	405	79	2300	206

### 2.3 실험 및 AE 측정방법

HPFRCC의 휨파괴 거동시 섬유종류에 따른 음향방출특성을 분석하기 위하여 200kN 용량의 오일잭을 이용하여 4점 가력하였으며, 콘크리트 및 HPFRCC의 최대내력 이후 급격한 처짐 증가로 인한 데이터 손실을 최대한 방지하기 위하여 초기에는 하중제어(Load control), 항복 이후에는 변위제어(Displacement control)하였다. 또한 콘크리트나 모르타르 등과 같은 시멘트 복합체의 경우 음파의 감쇠 정도가 심하기 때문에 센서의 간격을 200~300mm 이내로 제한하도록 하고 있어<sup>2)</sup>, 본 연구에서는 그림 2에 나타난 바와 같이 시험체에 간격 114mm인 총 4개의 AE 센서를 삼각형 기법으로 부착하여 실험 종료시까지 AE 신호를 측정하였으며, AE 신호를 획득하기 위하여 그림 3과 같이 시스템을 구성하였다. 측정에 사용된 AE 센서(SE900, DECI 사)는 100~900kHz의 광대역 센서를 사용하였으며, 이를 프리앰프(20dB, Vallen system)에 연결하여 신호를 증폭시킨 후, AE 장비(Vallen AMSY4)를 사용하여 데이터를 획득하였다. 또한 주위의 전기적, 기계적 잡음을 제거하기 위하여 문턱값을 50dB로 정하였다.

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 휨거동 특성

콘크리트 및 PP, PE, SC+PE 섬유유로 보강된 HPFRCC의 파괴양상 및 하중-처짐 관계를 그림 4 및 5에 나타내었다. 실험결과 콘크리트의 강성값이 HPFRCC 시험체에 비해 항복강성에서 2.25~4.67배, 최대강성에서 14.61~36.66배 크게 나타났다. 이는 콘크리트 배합에 사용된 굵은골재에 기인한 것으로 시멘트 복합체에 변형능력을 부여하기 위하여 섬유유를 혼입하는 HPFRCC에는 재료배합시 굵은골재 대신 규사만을 사용하였기 때문인 것으로 판단되었다. 또한 보강섬유유를 혼입한 HPFRCC 시험체의 항복강성을 비교한 결과 PP섬유유를 혼입한 시험체에서 가장 높게 나타났으나, 이는 초기에 인장축하부 중앙부근에 집중된 응력에 의해 시멘트 복합체에서 발생된 초기균열로, 보강된 섬유 종류와의 상관성은 미소한 것으로 판단되었다. 그러나 최대강성을 비교한 결과 PESC>PE>PP 시험체 순으로 크게 나타났으며, 이는 보강섬유유 탄성계수 크기순서와의 일치성을 보였다. 최대하중에서도 SC 및 PE를 하이브리드하여 혼입한 SCPE 시험체에서 가장 큰 값을 보였으며(SCPE>PE>

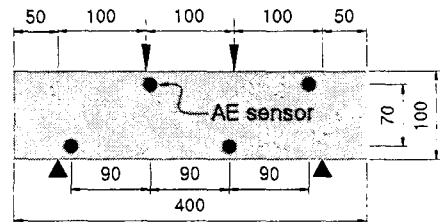


그림 2 AE센서 측정위치

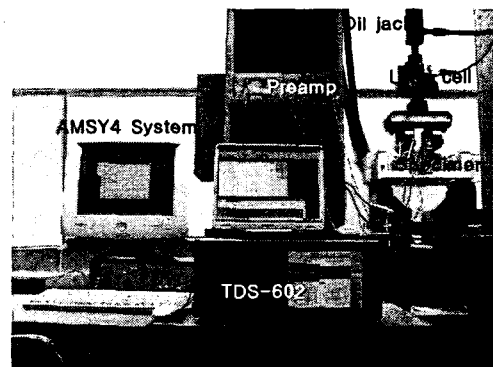
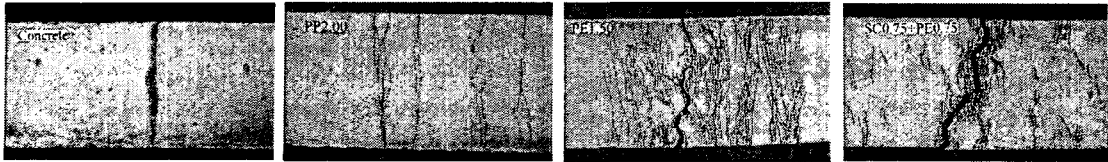


그림 3 시험체 설치 및 측정상황



(a) Concrete (b) PP (c) PE (d) SCPE

그림 4 시험체의 최종 파괴양상(밀면)

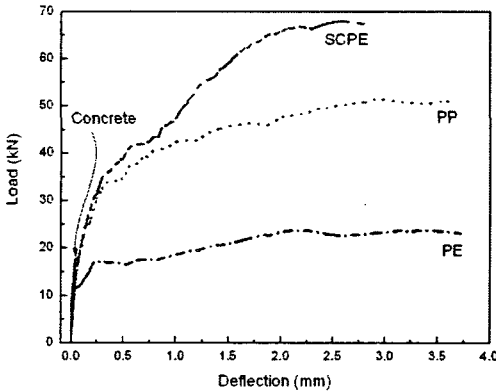


그림 5 하중-처짐 관계곡선

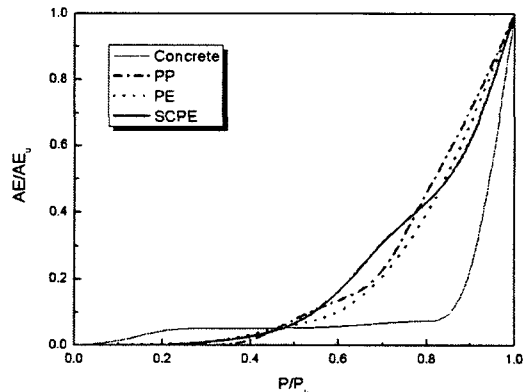
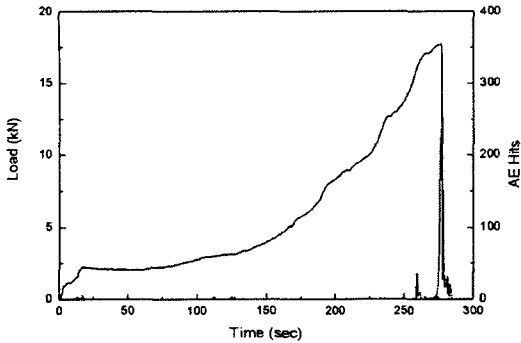


그림 6. 손상 진전에 따른 누적 AE 이벤트 수

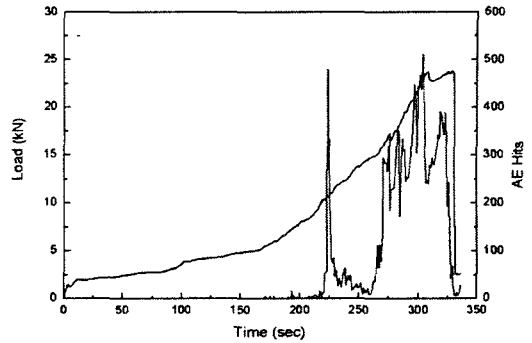
PP>Concrete), 최대변위는 PE>SCPE>PP> Concrete 순으로 크게 나타났다. 이는 보강섬유의 인장강도 및 탄성계수가 시멘트 복합체 내 응력 발생시 섬유와 시멘트 매트릭스 간 부착응력을 통해 이러한 응력을 적절히 분배하여 다수의 미세균열이 분포되도록 제어함으로써 시멘트 복합체의 강도 및 변형능력이 개선된 것으로 사료된다.

### 3.2 AE 신호특성

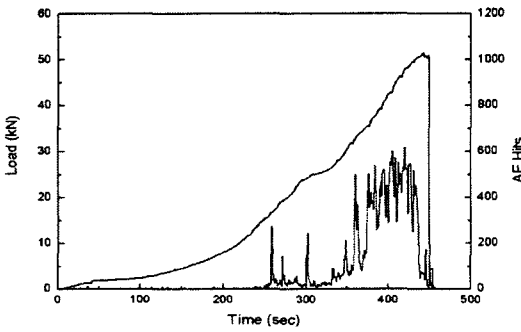
그림 6은 각 시험체의 단계별 하중 및 누적 AE 이벤트 수를 최대하중 및 그 때의 누적 AE 이벤트 수로 무차원화시킨 하중 및 손상 진전에 따른 누적 AE 이벤트 수를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 Concrete 시험체에서는 최종 이벤트 수의 약 10% 이하의 값을 나타내다가 0.8Pu 이후 최대 내력 도달과 동시에 급격한 증가를 보였다. 그러나 섬유보강한 PP, PE, SCPE 시험체는 0.4Pu 이후 하중의 진전과 동시에 이벤트 값이 증가하는 등 완만한 곡선을 보였다. 이는 HPRCC에서 보강섬유의 가교작용으로 인해 시멘트 복합체의 응력을 재분배하여 급격한 파괴를 방지하였기 때문인 것으로 판단되었다. 그림 7은 경과시간에 따른 하중 및 AE 히트 수의 관계곡선을 섬유종류별로 각각 비교하여 나타낸 것이다. 그림 7(a)에 나타난 바와 같이 Concrete 시험체에서 AE 히트 수는 초기균열시 6의 값을 나타내었으나, 최대내력에 도달하여 253의 값을 나타내기까지 AE 신호는 거의 발생되지 않았다. 이는 초기균열 이후 하중 증가에 따른 새로운 휨균열이 발생되지 않고 골재와 시멘트 페이스트의 부착응력에 의한 응력집중현상으로 인해 기 발생된 균열폭의 급격한 증가와 동시에 콘크리트가 급격한 파괴에 이르는 것을 의미한다. 그림 7(b)의 PP 시험체에서는 최대하중의 44%인 10.48kN(0.44Pu) 가력시 히트 수 479가 나타난 이후 100 이하의 AE 히트 수가 발생하다가, 15.88kN(0.67Pu) 이후부터 최종 파괴시까지 172~511의 값이 반복적으로 발생되었다. 그림 7(c)의 PE 시험체에서는 초기균열 발생 이후 16.71kN(0.32Pu)의 하중에서 274개의 히트 수가 발생되기 시작하여 최종 파괴에 이르기까지 최대 617의 값이 나타나는 등 AE 신호가 지속적으로 발생되었다. 그림 7(d)의 SCPE 시험체에서는 5.85kN(0.9Pu)에서 117개의 히트 수가 발생하기 시작하여 34.74kN(0.5Pu)부터 125~950개의 히트 수가 지속적으로 발생되다가 최종 파괴시 1163개가 발생되는 등 콘크리트 및 다른 HPRCC 시험체에 비해 비교적 많은 수의 히트 수가 발생되었다. 각 시험체의 하중 및 AE 히트 수의 관계를 비교·분석한 결과, 본 연구에서 사용한 콘크리트에서 인장균열이 발생하여 최종 파괴된 경우에는 약 250개의 최대 히트 수가 나타났으나 HPRCC의 경우에는 PP2.0%, PE1.5%, SC0.75%+PE0.75%의 섬유가 혼입됨에 따라 각각 511, 617, 1163개의 히트 수가 나타났다. 이는 부재의 휨인장 파괴시 콘크리트는 하부 인장균열폭의 급격한 증가로 인해 취성적 파괴를 일으키는 반면, 섬유 보강된 경우에는 보강섬유의 가교작용으로 인해 인장축 중앙부에 집중되는 응력을 적절히 분산시키고, 부재에 유발되는 손상 시기를 다소



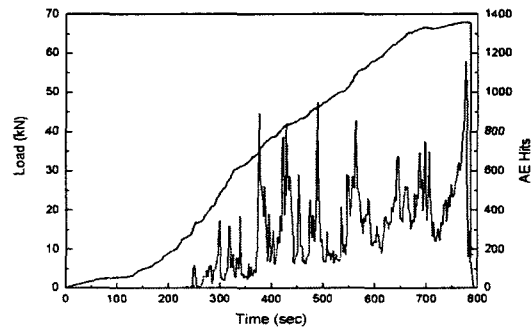
(a) Concrete



(b) PP



(c) PE



(d) SCPE

그림 7 섬유 종류에 따른 하중-AE 히트 수 관계곡선

지연시킨 것으로 판단되었다. 또한 보강섬유의 인장강도 및 탄성계수, 혼입율에 따라 각각의 최대 히트 수가 다르게 나타나 이러한 AE 신호특성을 근거로 HPRFRC를 적용한 부재에의 AE 기법 적용 및 내부의 손상메카니즘에 대한 규명이 가능할 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

- 1) 시험체의 하중 및 AE 히트 수 및 이벤트 수와의 관계를 비교·분석한 결과, 보강섬유의 인장강도 및 탄성계수, 혼입율에 따라 각각의 최대 히트 수가 다르게 나타났으며, 이벤트 수에서는 콘크리트의 경우 최종 파괴에 근접한 하중단계에서 급격히 증가하였으나, HPRFRC 시험체에서는 0.4Pu 이후 최대내력까지 완만한 증가를 보이는 등 손상이 진전됨에 따라 시험체 내부의 응력을 적절하게 분산시키는 것으로 판단되었다. 각 하중단계별로 나 이러한 AE 신호특성을 근거로 HPRFRC를 적용한 부재에의 AE 기법 적용 및 내부의 손상메카니즘에 대한 규명이 가능할 것으로 사료된다.
- 2) 본 연구에서 HPRFRC의 휨거동 특성 및 이에 따른 AE 신호특성을 분석한 결과, HPRFRC에서 보강되는 섬유 종류에 따른 시멘트 복합체 내 응력분포 특성 규명에 AE 기법의 적용가능성이 높은 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 논문은 2004년도 건설교통부(과제번호 04핵심기술 C02)의 연구비 지원으로 수행된 연구의 일부이며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. A.K. Maji, S.P. Shah(1988). "Process Zone and Acoustic Emission Measurement in Concrete", Experimental Mechanics
2. Uomoto. T.(1987) "Application of Acoustic Emission to the Field of Concrete Engineering", J. Acoustic Emission, Vol. 6, No.3, pp.137-144.
3. Keru Wu, Bing Chen, Wu Yao(2000) "Study on the AE characteristics of fracture process of mortar, concrete and steel-fiber-reinforced concrete beams", Cement and Concrete Reserch, Vol.30, pp.1495-1500.