

PE 섬유와 강섬유를 사용한 하이브리드 HPFRCCs의 파괴특성 및 음향방출특성

Acoustic Emission and Fracture Process of Hybrid HPFRCCs with Polyethylene Fiber and Steel Cord

김 선 우*
Kim, Sun Woo

전 수 만**
Jeon, Su-Man

김 용 철***
Kim, Yong-Cheol

윤 현 도****
Yun, Hyun-Do

ABSTRACT

The HPFRCCs show the multiple crack and damage tolerance capacity due to the interfacial bonding of the fibers to the cement matrix. For practical application, it is needed to investigate the fractural behavior and of HPFRCCs and understand the micro-mechanism of cement matrix with reinforcing fiber. The objectives of this paper are to examine the compressive behavior, fracture and damage process of HPFRCC by acoustic emission technique. Total four series were tested, and the main variables were the hybrid type, polyethylene (PE) and steel cord (SC), and fiber volume fraction. The damage progress by compressive behavior of the HPFRCCs is characteristic for the hybrid fiber type and volume fraction. And from acoustic emission (AE) parameter value, it is found that the second and third compressive load cycles resulted in successive decrease of the ring-down count rate as compared with the first compressive load cycle.

1. 서 론

현재 국내외적으로 시멘트 복합체 내에 보강섬유를 혼입하여 균열분산능력 및 연성을 개선함으로써 콘크리트의 취성적 성질을 보완하고 내진성능 및 내구성을 부여하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다.¹⁾ 이러한 고인성 시멘트 복합체(High Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composites, 이하 HPFRCCs)는 보강섬유의 종류 및 혼입율에 따라 상이한 균열분산능력 및 변형특성을 가지게 되며, 최근 연구에 따르면, 이러한 보강섬유에 사용되는 마이크로 및 매크로섬유를 적절하게 혼용하여 하이브리드(Hybrid)함으로써 시멘트 복합체에 발생하는 균열을 효과적으로 제어할 수 있는 것으로 보고되고 있다.²⁾ 그러나 하이브리드 HPFRCCs에 관한 연구는 섬유 종류 및 혼입율에 따른 파괴양상, 강도 및 연성 등 구조성능 개선에 관한 연구가 주를 이루고 있을 뿐, 마이크로 및 매크로 섬유를 하이브리드함에 따른 HPFRCCs 내부의 파괴과정, 즉 시멘트 모르타르와 골재, 시멘트 매트릭스와 섬유 계면에서의 파괴 및 거동 특성에 관한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 시멘트 복합체의 인장변형성능을 개선시킬 수 있는 HPFRCCs를 구조물에 적용하기 위해서는 균열발생에 따른 내부의 변형 및 손상에 관한 연구가 선행되어야 할 것이다. 이러한 재료 내부의 손상 발생에 따라 발생하는 탄성파를 이용, 부재의 균열발생 및 진전 등 손상도 평가를 위해 널리 적용되고 있는 음향방출(Acoustic emission, 이하 AE)기법은 항공기, 선박 등 금속재료에 주로 사용되어져 왔으나, 최근 콘크리트 및 철근콘크리트와 같은 시멘트 복합체에 적용³⁾되면서 건설 분야에 적용 범위가 확대되고 있다. 따라서 본 연구에서는 PE(Polyethylene) 섬유와 5연선 강섬유(Steel cord)를 사용한 HPFRCCs에서 압축응력 작용시 하이브리드에 따른 거동특성 및 이에 따른 재료 내부의 미시적인 파괴과정을 AE 기법을 이용하여 평가

* 정회원, 충남대 건축공학과 박사과정

** 정회원, 충남대 건축공학과 석사과정

*** 정회원, 충남대 건축공학과 겸임교수, (주)동양구조엔지니어링 소장, 공학박사

**** 정회원, 충남대 건축공학과 교수, 공학박사

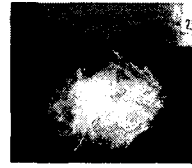
본 논문에 참여한 연구자(의 일부)는 「2단계 BK21 사업」의 지원비를 받았으며, 이에 감사드립니다.

표 1 시멘트 복합체 배합계획

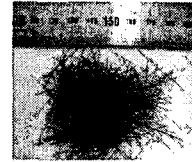
시험체명	W/C	섬유 혼입률 V _f (Vol. %)		단위중량 (kg/m ³)		
		PE	SC	물	시멘트	모래
PE0.5	0.45	0.5	-	473.6	1052	421
PE1.0		1.0	-	471.1	1047	418.8
SCPE0.5		0.5	0.5	471.1	1047	418.8
SCPE1.0		1.0	0.5	468.7	1041	416.6

표 2 보강섬유의 기계적 특성

종류	비 중 (kg/cm ³)	길이 (mm)	직경 (μ m)	형상비	인장강도 (N/mm ²)	탄성계수 (kN/mm ²)
PE(DYN-A)	97	15	12	1,250	2,500	75
SC	7,850	32	405	79	2,300	206



(a) PE



(b) SC

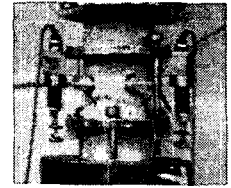
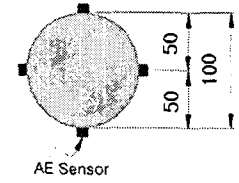


그림 2 시험체 설치상황



AE Sensor

그림 3 AE 측정위치

및 규명함으로써 향후 이러한 하이브리드 HPFRCCs를 적용한 구조부재의 손상특성을 평가하고 이를 토대로 거동예측에 관한 기초자료를 구축하고자 한다.

2. 실험

2.1 시험체 계획 및 제작

본 연구에서는 PE 섬유만을 단독으로 혼입한 경우(시멘트 체적비 0.5, 1.0%)와 시멘트 체적비 0.5%의 5연선 강섬유를 하이브리드(SC0.5%+PE0.5%, SC0.5%+PE1.0%)한 HPFRCCs의 압축강도 및 균열발생 등에 따른 손상특성을 AE 기법을 통해 평가하고자 표 1과 같이 콘크리트설계기준압축강도 50N/mm²으로 배합설계하였다. 공시체 제작 후 초기의 건조수축을 방지하기 위한 수중양생을 실시하였다. 시험체 제작에 사용된 PE 섬유 및 SC의 기계적 특성은 표 2, 형상은 그림 1에 각각 나타내었다.

2.2 시험체 설치 및 측정방법

그림 2에 나타난 바와 같이 2,000kN 용량의 UTM을 사용하여 중심축력을 가력하였으며, 압축시 UTM과의 부착마찰에 의한 구속을 고려하여 중앙부 100mm 구간을 축변형률 측정범위로 하였다. 또한 가력시 콘크리트 공시체의 손상발생에 따른 AE 신호 특성을 계측하기 위하여 공시체 중앙부에 그림 3과 같이 AE 센서를 4개 설치하여 실험 종료시까지 AE 신호를 측정하였다. AE 센서(SE900, DECI 사)는 100~900 kHz의 광대역 센서이고 이를 프리앰프(20dB, Vallen system)에 연결하여 상용 AE 장비(Vallen AMSY4)를 사용하여 측정하였다.

3. 중심축력을 받는 HPFRCC의 강도 및 AE 신호특성

3.1 강도특성 및 AE 이벤트 수

PE 섬유혼입률 및 하이브리드에 따른 각 시험체의 강도는 SCPE0.5 (59.48N/mm²)>PE0.5(58.27N/mm²)>SCPE1.0(55.01N/mm²)>PE1.0(46.72N/mm²) 순으로 크게 나타났으며, 특히 PE1.0 시험체에서의 강도저하는 배합시 시공불량 또는 섬유의 매트릭스 내 분리가 원활히 이루어지지 않았기 때문으로 판단된다. 한편

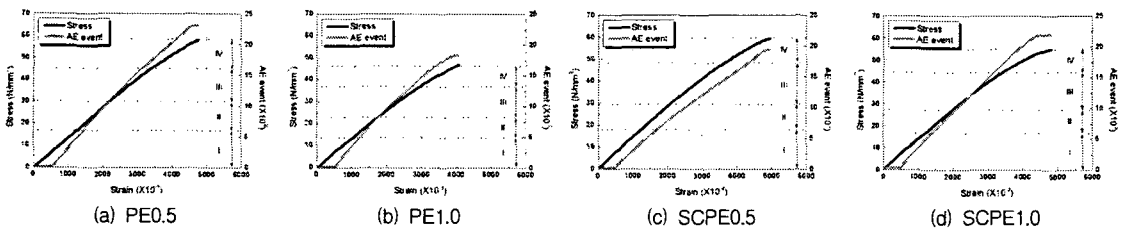


그림 4 응력-변형률 및 이벤트수 관계

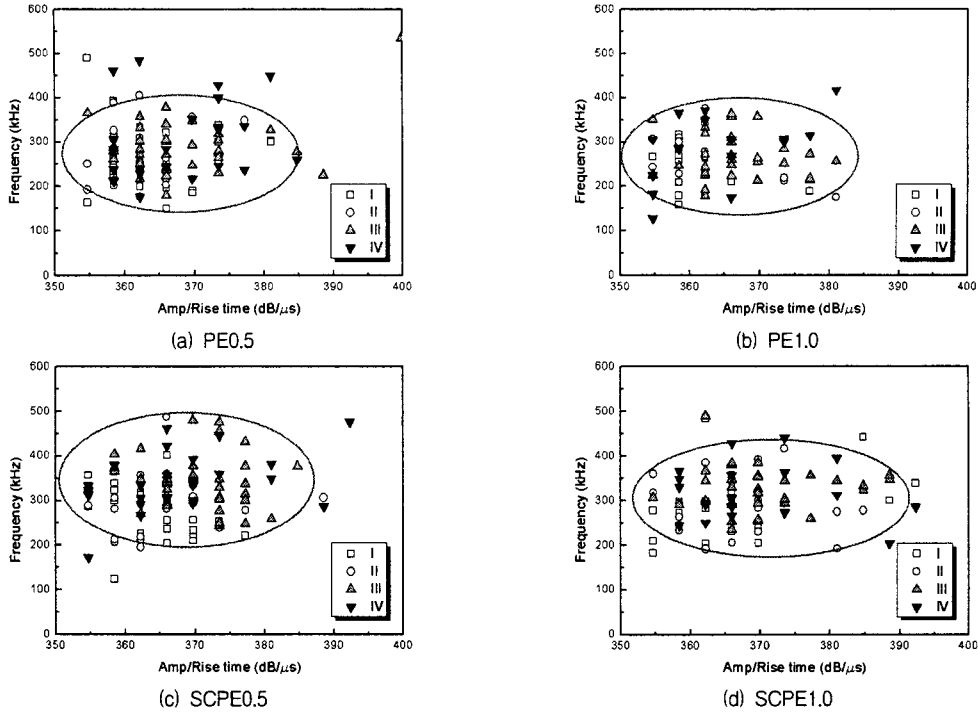


그림 5 AR-주파수 관계곡선

최대강도시 변형률은 $SCPE0.5 (4952.5 \times 10^{-6}) > SCPE1.0 (4827 \times 10^{-6}) > PE0.5 (4765 \times 10^{-6}) > PE1.0 (4060 \times 10^{-6})$ 순으로 나타나 PE 및 SC를 하이브리드한 경우가 대체적으로 강도 및 변형률 증가를 보였다. 또한 이를 누적이벤트수와 손상단계⁴⁾에 따라 비교한 결과, 그림 4에 나타난 바와 같이 변형률에 대한 강도 증가량 및 누적이벤트 수는 SCPE0.5 시험체에서 응력의 기울기와 유사하게 나타난 것을 제외하고 거의 유사하게 초기균열 이후부터 증가하는 경향을 보였다. 각 시험체의 최종 누적이벤트수는 $PE0.5 (23088) > SCPE1.0 (22033) > SCPE0.5 (19445) > PE1.0 (18297)$ 순으로 나타나 누적이벤트수를 이용한 콘크리트의 강도예측에 관한 연구결과⁵⁾와 같이 이러한 관계를 HPRCC에도 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

3.2 AR-주파수 관계

그림 5는 각 시험체에서 측정된 파형 중 상승시간(Rise time)에 대한 진폭(Amplitude)의 비(AR)를 주파수(Frequency)와 손상단계별로 비교하여 나타낸 것이며, 그림에 나타난 바와 같이 손상단계 I, II에서는 모든 시험체에서 유사한 신호특성을 보였다. 특히, 손상단계 III, IV에서는 PE만을 혼입한 시험체에서는 그림 5(a) 및 (b)에 나타난 바와 같이 200~400kHz의 주파수를 보인 반면, PE 및 SC를 하이브리드한 시험체에서 200~500kHz의 주파수를 보여 다소 높게 나타났다. AR 값 또한 PE 및 SC를 하이브리드한 시험체에서 다소 높게 나타나 PE 섬유와 SC의 혼입에 따른 음향신호특성을 나타내었다.

3.3 주파수-진폭 관계

그림 6은 각 시험체의 손상단계별 주파수와 진폭의 관계를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 I, III단계에서는 섬유혼입을 및 하이브리드 여부에 관계없이 유사한 경향을 보이고 있으나, II단계에서는 60~85dB의 진폭영역에서 PE 섬유만을 혼입한 시험체에서는 진폭과 주파수의 관계가 대체적으로 비례[그림 6(a), (b)]하는 반면, PE 및 SC를 하이브리드한 시험체에서는 동일한 진폭영역에서 진폭이 증가함에 따라 주파수 영역은 감소 추이를 보임을 알 수 있었다. 이는 HPRCCs에 보강 섬유 혼입시 시멘트 체적비에 의해 혼입율을 결정하며, 이에 따라 동일한 혼입율이라 할지라도 직경 [PE(12 μ m), SC(405 μ m)] 및 비중 [PE(97kg/cm³), SC(7,850kg/cm³)]에 따라 시멘트 매트릭스와의 부착응력에

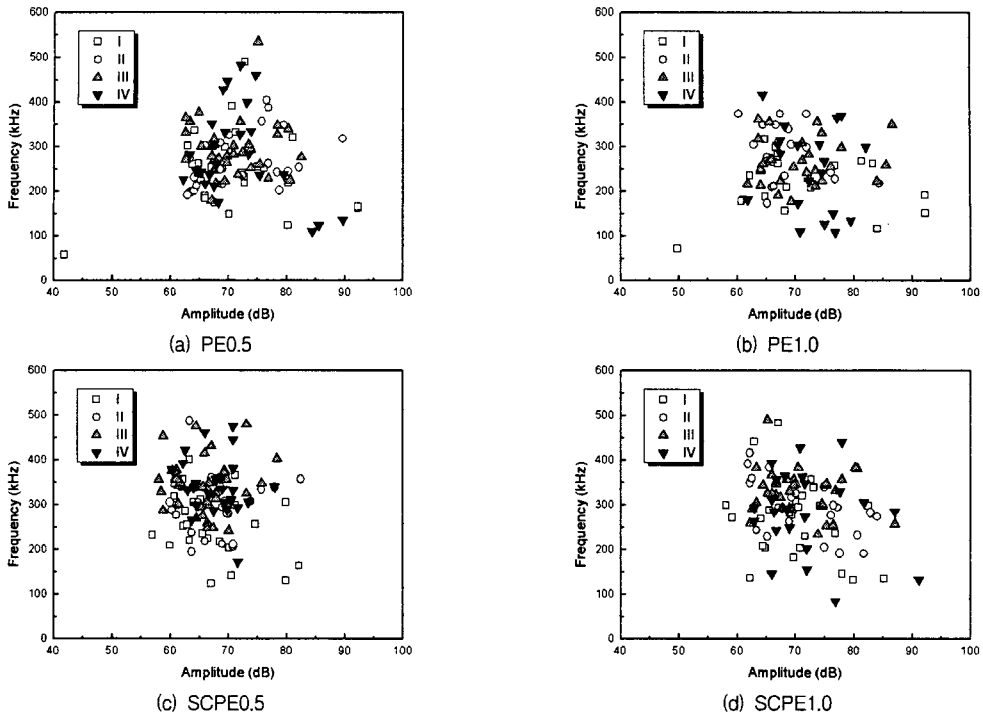


그림 6 주파수-진폭 관계곡선

의해 인장저항능력이 상이하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 III, IV단계에서는 PE 섬유를 0.5% 혼입한 시험체[그림 6(a), (c)]에서 80dB 이하의 값을 보인 반면, PE 섬유를 1.0% 혼입한 시험체[그림 6(b), (d)]에서는 80~95dB의 값을 나타내었다.

5. 결론

- 1) PE 및 SC를 사용한 HPFRCCs의 압축거동과 AE 신호특성의 상관관계를 비교한 결과, 누적 AE 이벤트 수가 각 시험체의 강도 증가량과 유사하게 나타났다. 따라서 본 연구에서 사용된 HPFRCCs를 구조부재에 적용시 AE 신호특성을 이용해 강도특성에 관한 예측이 가능할 것으로 판단되며, 다양한 보강섬유를 적용한 HPFRCCs의 강도특성과 AE 신호특성과의 규명을 통해 각 보강섬유의 특성에 따른 HPFRCCs 부재의 건진성 평가가 가능할 것으로 사료된다.
- 2) AR, 주파수, 진폭 등과 같은 AE 신호특성을 분석한 결과, 시멘트 복합체 내부에 혼입된 섬유의 종류에 따라 고유의 AE 신호범위를 갖는 것으로 나타났으며, 이를 이용하여 HPFRCCs의 거동특성에 큰 영향을 미치는 보강섬유와 시멘트 매트릭스 간의 상호작용의 규명에 관한 가능성을 확인하였다.

참고문헌

1. 윤현도, 김선우, 전에스터, 박완신(2006), "고인성 섬유보강 시멘트 복합체를 사용한 대각보강된 커풀링 보의 내진성능", 대한건축학회 논문집, V.22, No.4, pp.57-64
2. 윤현도, 양일승, 한병찬, 福山洋, 전에스터, 김선우(2004), "하이브리드 섬유 보강 고인성 시멘트 복합체의 반복인장거동", 대한건축학회 추계학술발표대회, V.24, No.2, pp.119-122
3. 김선우, 윤현도, 한민기, 전에스터(2005), "전단 항복형 철근콘크리트 보에서 골재종류에 따른 음향방출 특성", 한국구조물진단학회 추계학술발표대회
4. Thomas T. C. Hsu, F. O. Slate, G. M. Sturman, and George Winter(1963). "Micro-cracking of Plain Concrete and the Shape of the Stress-Strain Curve", ACI Journal, Proceedings, Vol. 60, No. 2, pp.209-224.
5. Masayasu Ohtsu and Hiroshi Watanabe(2001), "Quantitative damage estimation of concrete by acoustic emission", Construction and Building Materials, V.15, Issues 5-6, pp.217-224