

AE기법에 의한 하이브리드 섬유보강 시멘트복합체의 압축파괴특성 평가

Assessing Compressive Failure Characteristics of Hybrid Fiber Reinforced Cementitious Composites by Acoustic Emission

김 선 우*
Kim, Sun Woo

지 상 규**
Ji, Sang-Kyu

전 수 만**
Jeon, Su-Man

윤 현 도***
Yun, Hyun-Do

ABSTRACT

The HPFRCCs show that the multiple crack propagation, high tensile strength and ductility due to the interfacial bonding of the fibers to the cement matrix. Moreover, performance of cement composites varies according to type and weight contents of reinforcing fiber. and HPFRCCs with hybrid fiber have better performance than HPFRCCs with single fiber in damage tolerance. Total four cylindrical specimens were tested, and the main variables were the type and weight contents of fiber, which was polyvinylalcohol (PVA), polyethylene (PE). In order to clarify effect of hybrid types on the characteristics of fracture and damage process in cement composites, AE method was performed to detect micro-cracking in HPFRCCs under cyclic compression. Loading conditions of the uniaxial compression test were monotonic and cyclic loading. And from AE parameter value, it is found that the second and third compressive load cycles resulted in successive decrease of the amplitude as compared with the first compressive load cycle.

1. 서 론

현재 보강섬유를 이용하여 시멘트 복합체에 균열분산능력 및 변형경화성능을 부여함으로써 취성적 성질을 보완하고 내진성능 및 내구성을 부여하기 위한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 또한 최근에는 이러한 고인성 섬유보강 시멘트 복합체(High Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composites, HPFRCCs)를 적용한 부재의 요구성능을 만족시키기 위하여 섬유 자체의 물성을 개선¹⁾하거나 두 가지 이상의 섬유를 혼합하여 적용²⁾하는 등 국내·외에서 보다 효율적인 설계방법을 모색하고 있다. 특히 마이크로 섬유 및 매크로 섬유를 하이브리드(Hybrid)하여 적용할 경우 직경이 작은 마이크로 섬유를 통해 마이크로 균열을 제어하여 균등하게 균열분포가 발생하도록 하며, 상대적으로 직경이 큰 매크로 섬유는 이후 발생하는 매크로 균열을 제어하게 되어 단일섬유를 사용한 HPFRCCs에 비해 반복하중 하에서 연성증진 및 균열분산효과가 뛰어나 보다 높은 에너지소산능력을 갖는 것으로 보고되고 있다. 그러나 보강섬유 종류에 따라 시멘트 매트릭스와의 계면부착거동시 상이한 성능을 보이며, 이는 보강 섬유의 기계적 특성 및 화학적 부착성능에 많은 영향을 받게 된다. 따라서 하이브리드 섬유를 사용한 HPFRCCs를 주요 내진부재에 적용함과 동시에 부재의 요구성능을 만족하기 위해서는 하이브리드 섬유 혼입시 시멘트 매트릭스와의 부착메커니즘 및 마이크로/매크로 섬유의 상호작용에 관한 규명이 이루어져야 한다. 따라서 본 연구에서는 재료 내부의 미시적 변형상태를 비파괴적으로 평가할 수 있는 음향방출(Acoustic emission, AE) 기법을 사용하여 반복압축응력을 받는 하이브리드 HPFRCCs의 성능을 실험적으로 비교·평가함으로써 각 하이브리드 조건별 손상특성을 규명하고자 한다.

2. 실 험

2.1 시험체 계획 및 제작

본 연구에서는 마이크로 섬유인 PE 및 PVA 섬유를 시멘트 체적비 0.5%의 steel cord(SC)와 각각

* 정희원, 충남대 건축공학과 박사과정

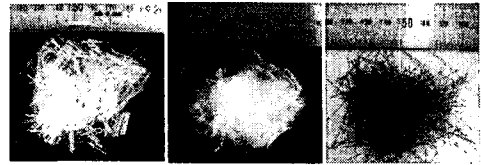
** 정희원, 충남대 건축공학과 석사과정

*** 정희원, 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)		
		PVA	PE	SC	물	시멘트	모래
SCPVA1.0	0.45	1.0	-	0.5	468.7	1041	416.6
SCPVA2.0		2.0	-	0.5	463.8	1031	412.2
SCPE0.5		-	0.5	0.5	471.1	1047	418.8
SCPE1.0		-	1.0	0.5	468.7	1041	416.6



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

표 2 보강섬유의 기계적 특성

섬유종류	비 중 (kg/cm ³)	길이 (mm)	직경 (μm)	형상비	인장강도 (N/mm ²)	탄성계수 (kN/mm ²)
PVA(REC-15)	130	12	39	307	1,600	40
PE(DYN-A)	97	15	12	1,250	2,500	75
SC	7,850	32	405	79	2,300	206

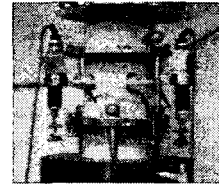


그림 2 시험체 설치

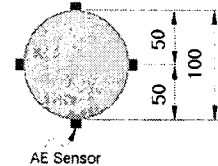


그림 3 AE 측정위치

하이브리드한 HPRCCs의 반복압축성능 및 손상특성을 AE 기법을 통해 평가하고자 표 1과 같이 콘 크리트설계기준압축강도 50N/mm²로 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.

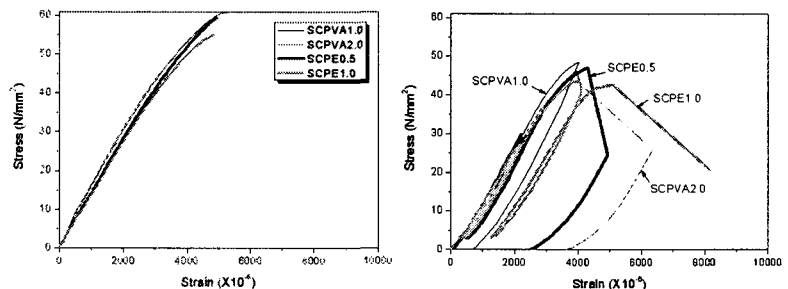
2.2 시험체 설치 및 측정방법

그림 2에 나타난 바와 같이 2,000kN 용량의 UTM을 사용하여 중심축력을 반복가력하였으며, 반복 가력은 단조가력시 측정된 압축강도의 30%, 50%, 80%, 100%으로 계획하였다. 압축시 UTM과의 부착 마찰에 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. 반복압축력을 받는 HPRCC의 압축거동 및 AE 신호특성

3.1 반복압축거동

그림 4는 가력방법에 따른 HPRCCs의 응력-변형률 관계곡선을 나타낸 것이다. 그림 4(a)에 나타난 바와 같이 단조 가력시에는 모든 시험체에서 최대강도시까지 유사한 특성을 보였으며, 최대강도는 SC 0.5%와 PVA1.0%를 하이브리드한 시험체에서 60.75N/mm²로 가장 크게 나타났다. 반복가력시 단조가력시 강도의 약 80%(Ⅲ단계)에서 모두 파괴되었었으며, 각 사이클별 최대하중시 변형률은 표 3에 나타난 바와 같다. 표에 나타난 바와 같이 동일 하중조건에서 사이클이 증가함에 따라 변형률 또한 증가하는 양상을 보였으며, 이러한 증가율은 각 하중



(a) 단조 (b) 반복
그림 4 가력방법에 따른 HPRCCs의 응력-변형률 관계

표 3 압축강도특성

시험체명	최대강도 (N/mm ²)		반복가력시 사이클별 최대변형률, (×10 ⁻⁶)							
	단조	반복	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2
SCPVA1.0	60.75	48.48	1387	1402	1412	2197	2230	2257	4020	-
SCPVA2.0	58.17	46.37	1347	1360	1382	2180	2245	2277	3917	-
SCPE0.5	59.48	46.98	1512	1527	1555	2370	2440	2445	4940	-
SCPE1.0	55.04	43.62	1315	1340	1348	2150	2188	2223	3883	5075

단계의 첫 번째 사이클과 두 번째 사이클 사이에서 크게 나타났다. 특히 SC0.5%+PE1.0%를 혼입한 시험체에서는 최대내력은 43.62N/mm²로 다른 시험체에 비해 다소 낮게 나타났으나, 다른 시험체에서는 단조가력시 최대하중의 80% 하중의 첫 번째 사이클에서 최종파괴된 반면 이후 두 번째 사이클까지 변형이 증가되는 특성을 나타내었다.

3.2 AE 신호특성

그림 5는 반복가력시 사이클 진행에 따른 응력(Stress)-진폭(Amplitude) 관계곡선을 각각 비교하여 나타낸 것이며, 각 사이클별 측정된 AE 신호의 평균 및 최대진폭을 정리하여 표 4에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 각 하중단계별 사이클이 진행됨에 따라 AE 신호는 첫 번째 사이클에서 가장 높은 진폭을 보였으며, 두 번째 사이클에서 각 시험체별로 20% 정도의 평균진폭 감소를 보였다. 또한 세 번째 사이클에서는 두 번째 사이클에 비해 약 5~7%의 진폭 감소를 보이는 등 첫 번째 사이클에서의 손상이 가장 큰 것으로 나타났으며, 이러한 AE 신호의 사이클별 진폭 감소량은 각 시험체에서의 사이클별 변형률 증가량과 유사한 것으로 나타났다. 특히 최대하중의 30%(I 단계) 가력시 AE 신호의 진폭은 PE 및 SC를 하이브리드하여 혼입한 시험체에서 PVA를 혼입한 시험체보다 높게 나타났으며, 이는 초기의 미세균열 발생시 PE 섬유가 PVA 섬유에 비해 마이크로 균열을 효과적으로 제어하였기 때문인 것으로 사료된다.

그림 6은 각 하중단계별로 측정된 AE 신호의 주파수(Frequency)-진폭 관계곡선을 나타낸 것이다. 그림 6(c)~(d)에 나타난 바와 같이 PE 및 SC를 하이브리드하여 혼입한 시험체에서는 주파수와 진폭의 비례성향이 다른 시험체에 비해 비교적 뚜렷이 나타났으며, 특히 I 단계에서 80dB의 진폭을 넘는 AE 신호가 다수 측정되었다. 이는 마이크로 섬유와 매크로 섬유를 하이브리드한 경우 마이크로 섬유의 기계적 특성 및 계면부착성능에 따라 초기에서 파괴시까지의 마이크로 균열제어능력이 상이하기 때문인 것으로 사료되며, 이러한 현상은 SCPVA1.0 시험체에서도 일부 측정되어 보강섬유의 성능 보완에 혼입율이 다소 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

부재의 손상에 따른 AE 에너지(Energy)량은 지속시간(Duration time), 진폭, 주파수 등 여러 가지 요인에 의해 영향을 받으며, 그림 7은 이 중 AE 에너지와 지속시간의 상관관계를 하중단계별로 비교하여 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 SCPVA1.0 시험체 및 SCPE0.5 시험체에서는 손상이

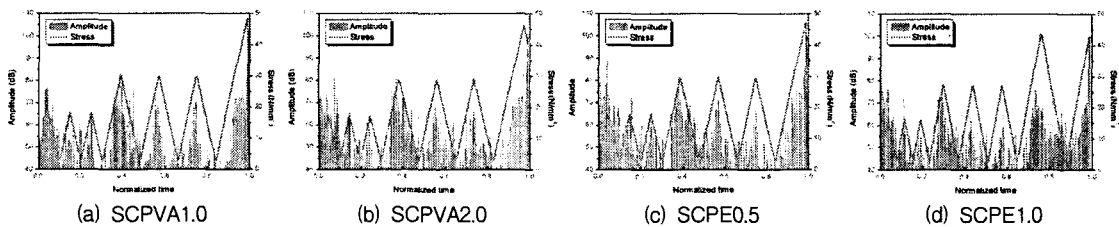


그림 5 응력-진폭 관계곡선

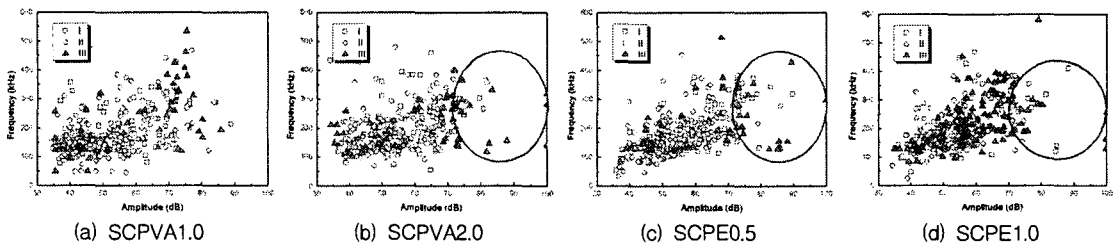


그림 6 주파수-진폭 관계곡선

표 4 사이클별 진폭 측정결과

시험체명	평균진폭 (dB)								최대진폭 (dB)							
	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2
SCPVA1.0	62	50	47	59	51	49	59	-	84	65	66	89	72	72	86	-
SCPVA2.0	66	54	49	59	53	49	62	-	81	68	65	82	68	67	88	-
SCPE0.5	70	58	50	59	53	50	62	-	90	73	68	83	71	68	87	-
SCPE1.0	69	51	49	57	51	48	58	61	88	77	60	75	74	72	79	88

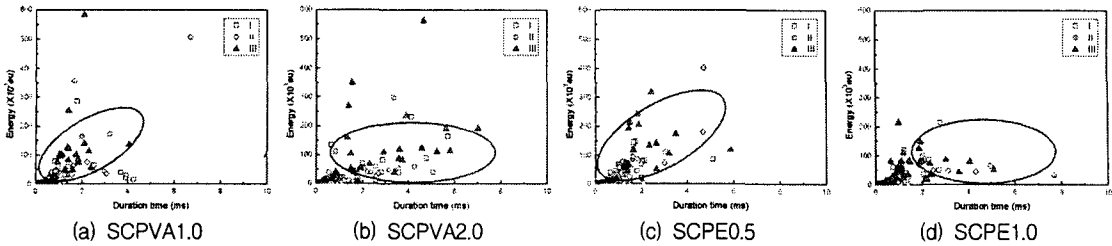


그림 7 에너지-지속시간 관계곡선

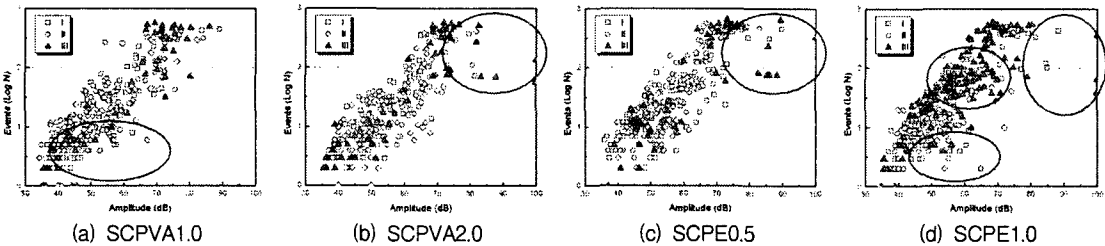


그림 8 이벤트수-진폭 관계곡선

진전됨에 따라 지속시간과 에너지가 비례적인 관계를 나타내며 증가하였으나, SCPVA2.0 및 SCPE1.0 시험체에서는 초기 손상단계에서는 이러한 비례적 관계를 보이다가 최대하중의 50%(II 단계) 이후부터 지속시간의 증가량에 비해 에너지 증가량이 적은 것으로 나타났다. 이러한 현상은 손상이 진전됨에 따라 AE 신호의 지속시간은 증가되나 진폭 및 주파수 등과 같이 AE 에너지량에 영향을 미치는 요인이 감소하였기 때문이며, 이는 HPRCCs 내에서 시멘트 매트릭스에 전달되는 응력에 따른 마이크로 및 매크로 균열을 제어하는 보강섬유의 혼입량에 기인한 것으로 판단된다.

위에서 분석한 결과와 같이 HPRCCs의 손상발생에 따른 AE 신호특성은 보강섬유의 종류 및 혼입율에 따라 다르게 나타났으며, 각 시험체의 AE 신호특성 중 손상단계별 이벤트(Event) 수와 진폭을 비교하여 그림 8에 나타내었다. 이벤트 수는 손상진전에 따라 로그(Log)의 형태로 증가하므로 본 논문에서는 측정된 이벤트 수에 로그를 취하여 진폭특성과 비교하고자 하였다. 그림에 나타난 바와 같이 측정된 이벤트 수는 그림에 나타난 바와 같이 진폭의 증가량과 비례하는 것으로 나타났으며, 특히 그림 8(d)에 나타난 바와 같이 최대하중의 80%(III 단계) 가력시 50~70dB의 진폭 및 1.6~2.2의 이벤트값을 갖는 신호들이 측정되었다. 이는 III 단계 가력시 두 번째 사이클에서 발생된 신호로 각 단계별로 이미 손상을 입은 상태에서 반복가력시 나타난 변형을 증가와 함께 측정되는 것으로 판단된다.

4. 결 론

- 1) 각 시험체에서 측정된 AE 신호 중 하중단계별 진폭특성은 사이클이 진행됨에 따라 각각 20% 및 7%의 감소율을 보여 각 시험체에서의 사이클별 변형을 증가율과 유사한 것으로 나타났으며, 이러한 특성을 이용한 HPRCCs의 손상예측이 가능할 것으로 사료된다.
- 2) 반복압축가력시 각 시험체의 손상특성을 AE 신호와 비교/분석한 결과, 모든 시험체에서 55~70dB의 진폭을 갖는 AE 신호가 거의 나타나지 않은 반면 SC0.5%+PE1.0%를 혼입한 HPRCCs에서는 III 단계의 두 번째 사이클 가력시 50~70dB의 진폭을 갖는 신호들이 측정되었다. 이는 III 단계의 첫 번째 사이클에서 손상을 입은 시멘트 복합체에 동일한 크기의 하중 작용시 PVA 섬유에 비해 약 2 배 정도 큰 인장강도와 탄성계수를 갖는 PE 섬유의 가교작용으로 인해 균열 증가로 인한 횡변형을 적절하게 제어하였기 때문인 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 윤현도, 전에스터, 박완신, 한병찬, 양일승, 이영석(2005), "플루오르화에 의한 탄소섬유의 표면개질 및 매입인발 특성", 대한건축학회 논문집, Vol.21, No.8, pp.27-34
2. 윤현도, 양일승, 한병찬, 福山洋, 전에스터, 김선우(2004), "하이브리드 섬유 보강 고인성 시멘트 복합체의 반복 인장거동", 대한건축학회 추계학술발표대회 논문집, Vol.24 No.2, pp. 119-122