Journal of the Korea Concrete Institute
Vol. 21, No. 5, pp. 589~597, October, 2009
DOI 10.4334/JKCI.2009.21.5.589

AE기법에 의한 압축력을 받는 고인성 섬유보강 시멘트 복합체의 손상 평가

김선우[1)] · 윤현도[1)*]
[1)]충남대학교 건축공학과

Assessment of the Damage in High Performance Fiber-Reinforced Cement Composite under Compressive Loading Using Acoustic Emission

Sun-Woo Kim[1)] and Hyun-Do Yun[1)*]
[1)]Dept. of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

ABSTRACT High Performance Fiber-reinforced Cement Composite (HPFRCC) shows 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 of HPFRCC and understand the micro-mechanism of cement matrix with reinforcing fiber. This study is devoted to the investigation of the AE signals in HPFRCC under monotonic and cyclic uniaxial compressive loading, and total four series were tested. The major experimental parameters include the type and volume fraction of fiber (PE, PVA, SC), the hybrid type and loading pattern. The test results showed that the damage progress by compressive behavior of the HPFRCC is a characteristic for the hybrid fiber type and volume fraction. It is found from acoustic emission (AE) parameter value, that the second and third compressive load cycles resulted in successive decrease of the amplitude as compared with the first compressive load cycle. Also, the AE Kaiser effect existed in HPFRCC specimens up to 80% of its ultimate strength. These observations suggested that the AE Kaiser effect has good potential to be used as a new tool to monitor the loading history of HPFRCC.

Keywords : HPFRCC, damage tolerance capacity, compressive behavior, AE signals, Kaiser effect

1. 서 론

고인성 섬유보강 시멘트 복합체(high performance fiber-reinforced cementitious composite, HPFRCC)는 복합체 내 혼입된 섬유에 의해 균열분산능력 및 내구성 증진과 동시에 변형경화성능을 갖게 됨으로써 반복하중 하에서도 강도 및 강성의 현저한 저하 없이 연성적인 거동을 보이게 된다. 또한 최근에는 이러한 시멘트 복합체 내에 혼입되는 보강섬유 중 마이크로 섬유(직경 50 μm 이하) 및 매크로 섬유(직경 150 μm 이상)를 동시에 사용하여 미세균열(microcrack) 및 거시균열(macrocrack)을 동시에 제어하는 등 시멘트 복합체에 보다 연성적인 성능을 부여하고자 하는 연구가 진행되고 있다.[1)] 연구 결과에 따르면, 하이브리드 섬유로 보강된 시멘트 복합체는 기존의 단일섬유보강 시멘트 복합체에 비해 강도, 연성뿐만 아니라 에너지소산능력 및 손상저항성능을 더욱 향상시킬 수 있는 것으로 보고되고 있다. 또한 최근의 국내외 연구동향을 살펴보면, HPFRCC의 성능 및 시공성[2-5)]에 관한 연구뿐만 아니라, 이를 내진성능이 요구되는 구조물의 주요 부재에 적용하기 위한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.[6,7)]

그러나 구조물은 완공 후 재료, 시공방법, 환경적 요인뿐만 아니라 바람, 지진 등과 같은 외부하중에 의해 주요 부재가 손상되며, 이에 따른 적절한 보수 및 보강이 이루어지지 않는다면 구조물이 제 성능을 발휘할 수 없거나, 붕괴를 초래할 수 있다. 따라서 구조물에 발생되는 손상정도 및 결함을 정량적으로 평가할 수 있는 기술이 선행되어야 하며, 현재 이러한 손상정도 및 결함 검출을 위한 비파괴검사에 관한 연구가 진행 되고 있다.

이러한 비파괴검사방법 중 음향방출(acoustic emission, 이하 AE) 기법은 재료 내부에 발생하는 균열 등과 같은 결함 및 손상을 실시간으로 검출할 수 있는 장점을 가지고 있다. 최근 이러한 AE 기법은 콘크리트 재료의 파괴메커니즘 규명,[8)] 위치표정(source location)을 통한 균열의 위치 또는 균열의 진전과정 규명[9)]에 적용되고 있으며, AE 기법을 이용한 구조물의 손상 검출을 통해 건전성 평가 및 안전진단 등에도 일부 사용되고 있다.

이와 같은 AE 기법은 1988년 Maji 및 Shah[10)] 등이 콘크리트의 손상도 평가를 위해 적용하기 시작하여, 최근 구조물의 건전성 평가(health monitoring)에 대한 관심

*Corresponding author E-mail : wiseroad@cnu.ac.kr
Received February 6, 2009, Revised May 29, 2009
Accepted June 11, 2009
ⓒ2009 by Korea Concrete Institute

이 증대됨에 따라 콘크리트 구조부재 내부의 파괴특성을 구명하기 위한 연구[11,12]에도 점차 적용 범위를 확대하고 있다. 그러나 섬유를 혼입한 시멘트계 복합체의 경우, 보강섬유의 가교작용으로 인해 파괴시 다수의 미세균열 발생 및 응력의 재분배가 이루어져 그 미시적 손상 및 변형 특성이 일반 모르타르 및 콘크리트와 매우 상이하다. 이에 HPFRCC의 손상진전에 따른 AE 신호특성에 관한 연구[13,14]가 일부 이루어지고 있으나, HPFRCC의 손상하중과 AE 신호특성간의 상호관계 규명에 대부분 집중되어 있으며, 다양한 섬유 및 매트릭스 조건을 갖는 HPFRCC의 손상단계별 AE신호특성에 관한 정량적 평가가 이루어지고 있지 않은 실정이다.

따라서 이 연구에서는 HPFRCC를 구조물의 주요 내진부재에 적용하기 위한 연구의 일환으로, 가장 기초적인 재료의 역학적 특성인 압축거동특성 평가에 AE 기법을 사용하였다. 이 때 단조 및 반복압축하중 하에서 섬유종류 및 혼입률에 따른 성능 및 내부의 미시적 변형상태를 평가함으로써 손상단계별 파괴특성을 규명하고자 한다.

2. 실험 연구

2.1 시험 계획

이 연구에서는 폴리에틸렌(polyethylene, PE), 폴리비닐알코올(polyvinyl alcohol, PVA) 등 마이크로 섬유와 매크로 섬유인 강섬유(steel cord, SC)를 동시에 혼입한 HPFRCC의 반복압축성능 및 손상특성을 AE 기법을 통해 평가하고자 Table 1과 같이 설계기준압축강도 50 MPa로 배합설계하였다. 공시체 제작 후 초기 건조수축을 방지하기 위해 수중양생을 실시하였으며, 실험체 제작에 사용된 PE, PVA 및 SC의 특성은 Table 2, 형상은 Fig. 1에 각각 나타내었다.

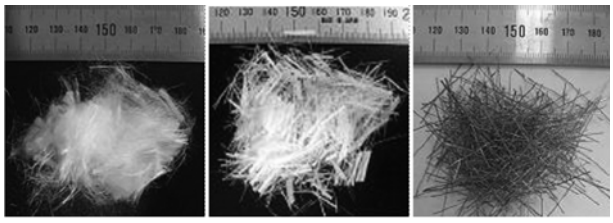
Table 1 Mixture proportions of composites

Specimen	W/C	Fiber volume fraction V_f (Vol. %)			Unit weight (kg/m^3)		
		PVA	PE	SC	Water	Cement	Sand
PE0.5	0.45	-	0.5	-	473.6	1,052	421
PE1.0		-	1.0	-	471.1	1,047	418.8
PVA1.0		1.0	-	-	471.1	1,047	418.8
PVA2.0		2.0	-	-	466.2	1,036	414.4
SCPE0.5		-	0.5	0.5	471.1	1,047	418.8
SCPE1.0		-	1.0	0.5	468.7	1,041	416.6
SCPVA1.0		1.0	-	0.5	468.7	1,041	416.6
SCPVA2.0		2.0	-	0.5	463.8	1,031	412.2

2.2 실험 방법

Fig. 2에 나타난 바와 같이 2,000 kN 용량의 UTM을 사용하여 중심축력을 단조(monotonic) 및 반복(repeated) 가력하였다. 반복 가력은 Thomas 등[15]의 콘크리트 손상단계에 관한 연구 결과에 따라 Fig. 3에 나타난 바와 같이 단조 가력시 측정된 압축강도의 30%, 50%, 80%, 100% 단계로 각각 계획하였으며, 동일하중의 반복가력시 강성저하특성 및 펠리시티(felicity) 효과[16] 등과 같은 AE 신호특성을 평가하기 위하여 손상단계별로 각각 3회씩 반복 가력하도록 하였다.

압축가력시 UTM과의 부착마찰에 의한 구속효과를 고려하여 중앙부 100 mm 구간을 축변형률 측정범위로 하였으며, KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법)에 준하여 실험을 실시하였다. 또한 가력시 콘크리트 공시체의 손상발생에 따른 AE 신호 특성을 계측하기 위하여 Fig. 4에 나타난 바와 같이 공시체의 세로축 중앙부 측면에 4개의 AE 센서를 설치하여 실험 종료시까지 AE 신호를 측정하였다. AE 센서(SE900, DECI 사)는 100~900 kHz의 광대역 센서이고 이를 프리앰프(20dB, Vallen system)를 통해 상용 AE 장비(Vallen AMSY4)를 사용하여 측정하였다.



(a) PE (b) PVA (c) Steel cord

Fig. 1 Shape of fiber

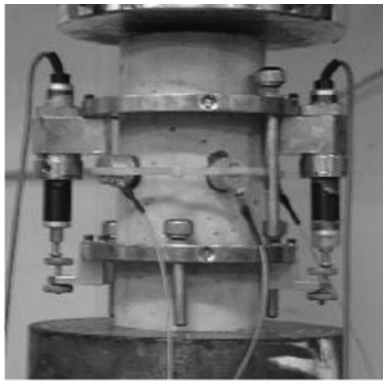


Fig. 2 Test setup

Table 2 Properties of fiber

Fiber	Specific gravity (kg/m^3)	Length (mm)	Dia. (μm)	Aspect ratio	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)
PE(DYN-A)	970	15	12	1,250	2,500	75
PVA(REC-15)	1,300	12	39	307	1,600	40
Steel cord	7,850	32	405	79	2,300	206

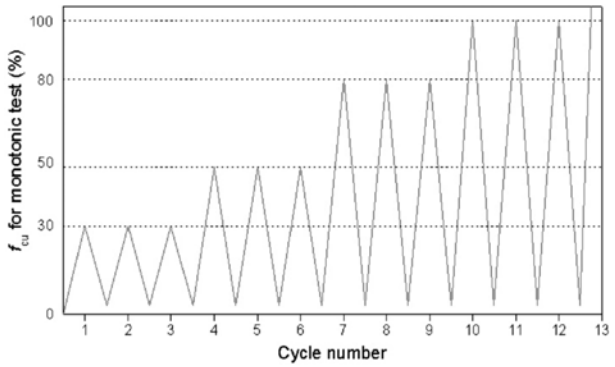


Fig. 3 Repeated loading cycle

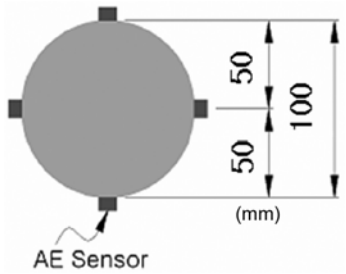


Fig. 4 Position of AE sensors

3. HPFRCC의 압축거동 및 AE 신호특성

3.1 압축거동특성

Table 3은 각 시험체의 압축강도특성을 단조 및 반복 가력에 따라 구분하여 정리한 것이다. 표에 나타난 바와 같이 단조 가력시 최대강도는 SCPVA1.0, SCPE0.5, SCPVA2.0, SCPE1.0, PE0.5, PVA1.0, PVA2.0, PE1.0 순으로 나타나 SC를 혼입한 시험체에서 단일섬유만을 혼입한 시험체보다 높은 강도를 보였으며, 최대강도시 변형률도 증가하는 경향을 나타내는 등 매크로섬유인 SC의 혼입으로 인해 강도와 연성이 증가한 것으로 판단된다.

Fig. 5는 마이크로섬유만을 혼입한 시험체의 응력-변형률 관계곡선을 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 단조 가력시에는 PVA1.0 시험체에서 초기탄성계수가 가장 높게 나타났으며 PE1.0 시험체에서 가장 낮은 값을 보였으나 모든 시험체에서 최대강도시까지 유사한 특성을 보였다. 한편, 반복 가력시에는 단조 가력시 강도의 약 80%(III단계)에서 모두 파괴되었으며, 특히 PVA2.0 및 PE1.0 시험체에서는 Ⅳ단계의 첫 번째 사이클까지 진전되는 등 반복하중 하에서도 연성적인 거동을 보였다. Fig. 6은 마이크로 섬유 및 SC를 동시에 혼입한 HPFRCC의 응력-변형률 관계곡선을 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 단조 가력시에는 SCPE1.0 시험체를 제외하고 모든 시험체에서 유사한 강도를 보인 반면, 반복 가력시에는 SCPE1.0 시험체의 최대 변형률이 가장 크게 나타났다.

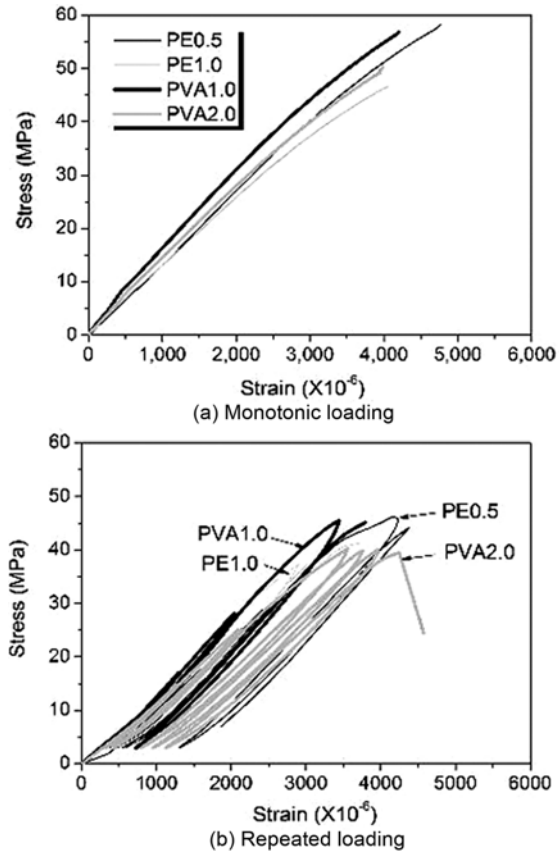


Fig. 5 Stress-strain curve of specimens with micro fibers

Fig. 7은 각 시험체의 사이클별 강성 특성을 비교하여

Table 3 Strength properties of specimen

Specimen	Monotonic loading		Repeated loading											
	f_{cu} (MPa)	ε_{cu} ($\times10^{-6}$)	f_{cu} (MPa)	ε_i ($\times10^{-6}$)										
				1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	4-1
PE0.5	58.27	4,765	46.19	1,585	1,585	1,615	2,413	2,473	2,498	4,225	4,380	-	-
PE1.0	46.72	4,060	41.28	1,098	1,078	1,100	1,747	1,750	1,768	2,908	3,015	3,095	3,725
PVA1.0	56.86	4,200	45.48	1,290	1,280	1,310	2,043	2,068	2,093	3,448	3,795	-	-
PVA2.0	50.26	3,983	40.18	1,273	1,303	1,313	2,090	2,138	2,155	3,555	3,760	3,970	4,245
SCPE0.5	59.48	4,953	46.98	1,512	1,527	1,555	2,370	2,440	2,445	4,940	-	-	-
SCPE1.0	55.04	4,828	43.62	1,315	1,340	1,348	2,150	2,188	2,223	3,883	5,075	-	-
SCPVA1.0	60.75	5,270	48.48	1,387	1,402	1,412	2,197	2,230	2,257	4,020	-	-	-
SCPVA2.0	58.17	4,803	46.37	1,347	1,360	1,382	2,180	2,245	2,277	3,917	-	-	-

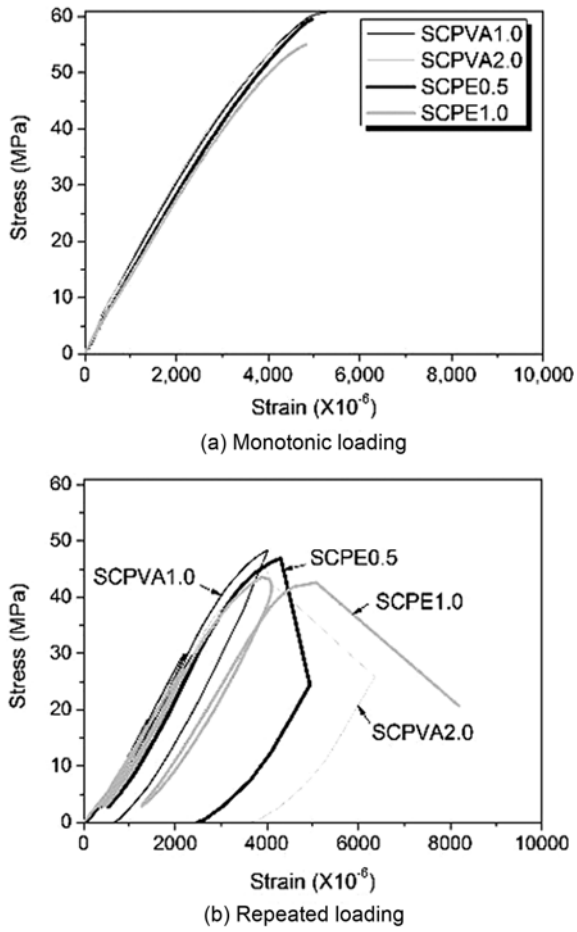


Fig. 6 Stress-strain curve of specimens with hybrid fibers

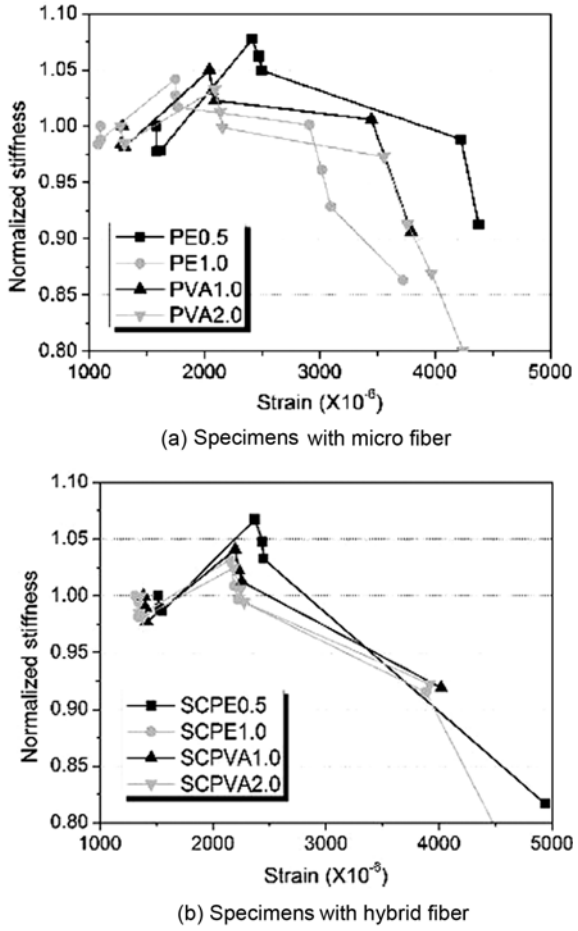


Fig. 7 Comparison of stiffnesses of specimens

나타낸 것으로 각 시험체의 사이클별 강성을 초기강성으로 나눈 것이다. 여기서 사이클별 강성은 할선강성을 사용하였다. 그림에 나타난 바와 같이 마이크로 섬유만을 단독으로 혼입한 경우인 PE1.0 시험체에서 강성 감소가 가장 크게 나타났으며, 하이브리드 섬유를 혼입한 경우에는 SCPE0.5 시험체를 제외하고 서로 비슷한 감소 경향을 나타내었다.

3.2 진폭 특성

Figs. 8 및 9은 단조 및 반복 가력시 사이클 진행에 따른 응력(stress)-진폭(amplitude) 관계곡선을 각각 비교하여 나타낸 것이며, 반복 가력시 각 사이클별 측정된 AE 신호의 평균 및 최대진폭을 정리하여 Table 4에 나타내었다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 단조 가력시에는 초기 가력시 90 dB 이상의 다소 높은 진폭이 나타난 것을 제외하고 최종 파괴시까지 60~80 dB의 신호가 고르게 나타났으며, 최종 파괴시 80 dB 이상의 신호가 측정되었다. 또한 하이브리드 섬유를 혼입한 경우 단일 섬유에 비해 다소 낮은 진폭특성을 나타내었다.

반복 가력시에는 Fig. 9에 나타난 바와 같이 각 하중단계별 사이클이 진행됨에 따라 AE 신호는 첫 번째 사이클에서 가장 높은 진폭을 보였으며, 마이크로 섬유를 단독으로 혼입한 경우 Fig. 9(a)~(d)에 나타난 바와 같이 두 번째 사이클에서 각 시험체별로 12~17% 정도의 평균진폭 감소를 보였다. 또한 세 번째 사이클에서는 두 번째 사이클에 비해 약 8~12%의 진폭 감소를 보이는 등 첫 번째 사이클에서의 손상이 가장 큰 것으로 나타났다. 특히 최대하중의 30%(I단계) 가력시 첫 번째 사이클에서 AE 신호의 진폭은 PVA1.0 시험체에서 가장 높게 나타났으나 두 번째 사이클 가력시 진폭 감소량이 25.81%를 보여 I단계 하중에서의 손상이 다른 시험체에 비해 심각한 것으로 나타났다. Fig. 8(e)~(h)에 나타난 바와 같이 하이브리드를 섬유를 혼입한 경우에는 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% 감소를 보이는 등 첫 번째 사이클에서의 손상이 가장 큰 것으로 나타났으며, 특히 최대하중의 30%(I단계) 가력시 AE 신호의 진폭은 PE 및 SC를 하이브리드하여 혼입한 시험체에서 PVA를 혼입한 시험체보다 높게 나타나 초기의 미세균열 발생시 PE 섬유가 PVA 섬유에 비해 미세균열을 효과적으로 제어하였기 때문인 것으로 사료된다. 이러한 AE 신호의 사이클별 진폭 감소량은 보강섬유의 하이브리드 여부에 관계없이 각 시험체에서의 사이클별

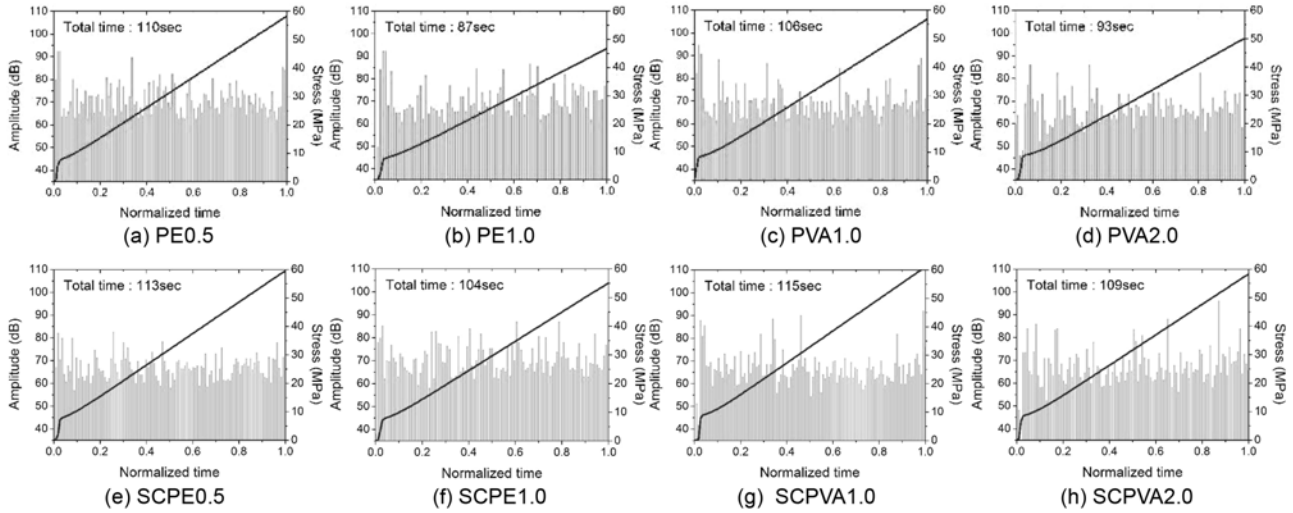


Fig. 8 Amplitude-time relationship for monotonic loading

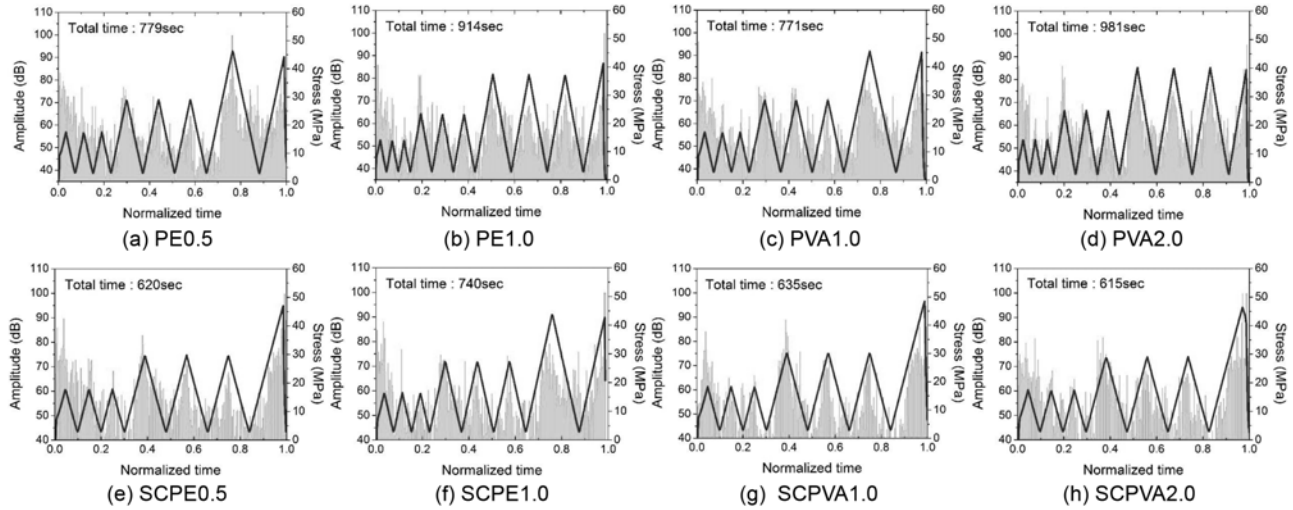


Fig. 9 Amplitude-time relationship for repeated loading

Table 4 Average and peak amplitude of AE signals

Specimen	Average amplitude (dB)										Peak amplitude (dB)									
	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	4-1	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	4-1
PE0.5	69	56	51	57	52	48	61	61	-	-	83	77	68	77	73	64	100	88	-	-
PE1.0	63	84	46	57	51	46	56	53	53	53	86	72	63	81	69	68	76	68	73	73
PVA1.0	67	53	48	58	84	49	59	59	-	-	96	69	66	76	76	71	79	83	-	-
PVA2.0	66	50	47	56	52	46	57	56	57	59	86	73	72	86	69	59	79	75	78	95
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	-	-
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	-	-	-

변형률 증가량과 유사한 것으로 나타났다.

Fig. 10은 손상진전에 따라 나타나는 AE 신호를 진폭별로 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 9(a)~(d)에 나타난 바와 같이 마이크로섬유를 단독으로 혼입한 경우, 60~70 dB의 진폭을 갖는 신호가 가장 많이 측정되었으며, PE1.0 시험체를 제외하고 모든 시험체에서 60~70 dB의 신호가 최종 파괴시까지 측정되었다. 또한 진폭이 높은 신호일수록 낮은 하중 및 변형률에서는 거의 나타나지 않다가 손상이 진전됨에 따라 점점 높은 진폭을 갖는 신호가 발생되는 특성을 보였다. 한편, 하이브리드 섬유를 혼입한 시험체에서는 Fig. 10(e)~(h)에 나타난 바와 같이 마이크로 섬유를 단독으로 혼입한 경우와 유사하게 60~70 dB

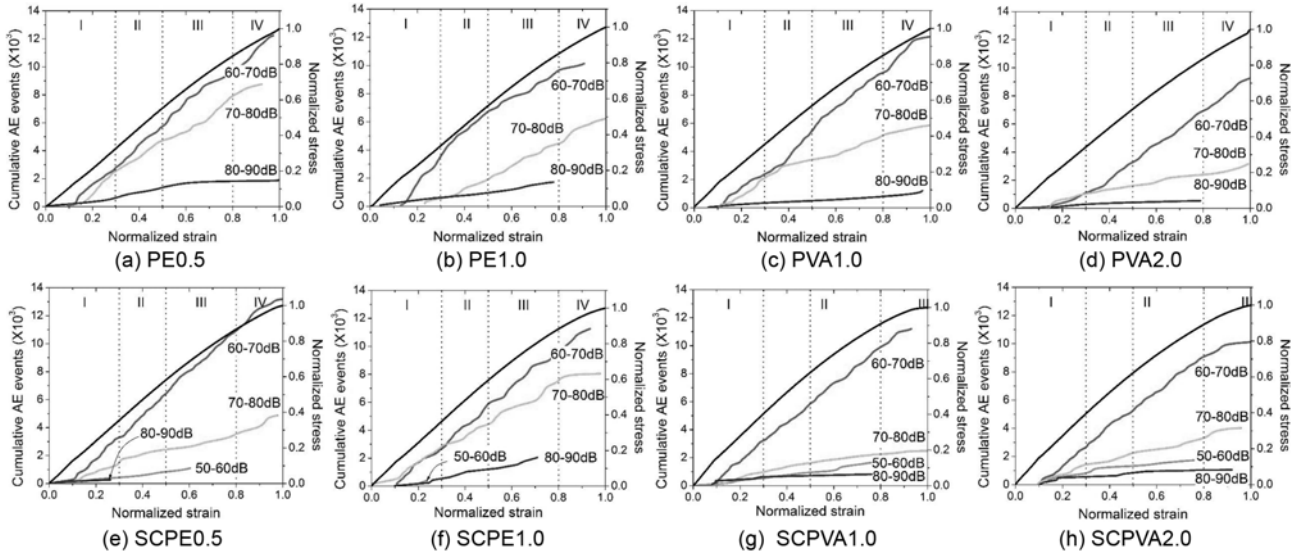


Fig. 10 Categorization of acoustic events on the basis of amplitude for monotonic cycle

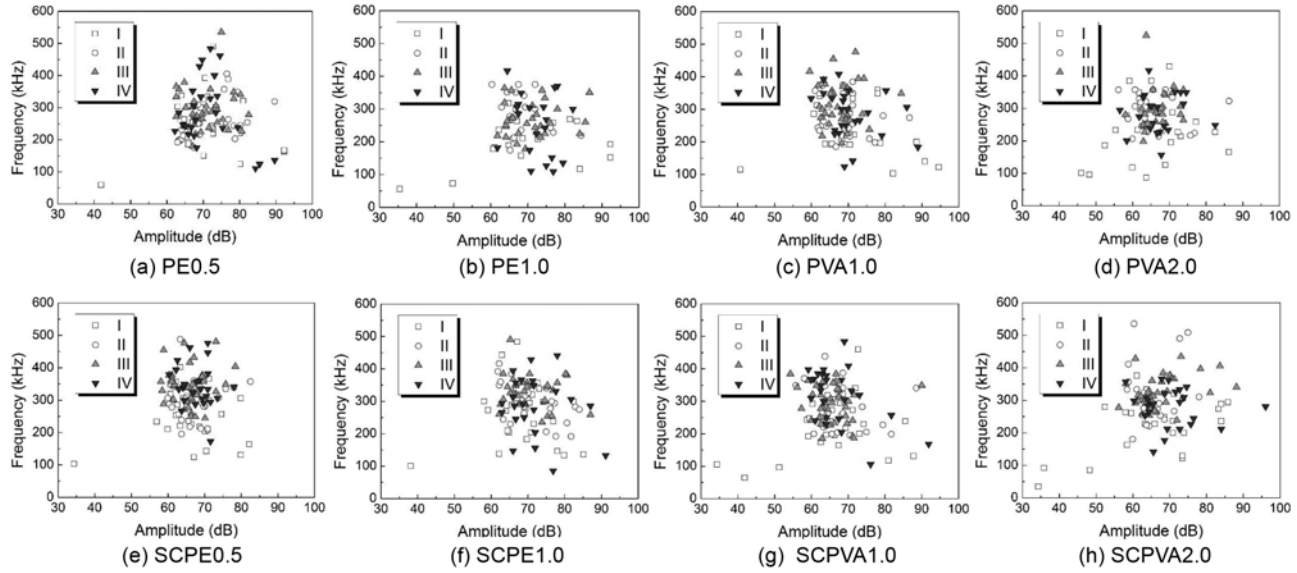


Fig. 11 Frequency-amplitude relationship for monotonic loading

의 신호가 가장 많은 분포를 보였다. 그러나 SCPE1.0 시험체를 제외하고 50~60 dB의 진폭을 갖는 신호가 최대하중의 약 80%까지 측정되는 것으로 보아 SC의 혼입에 따른 매크로 균열 제어 및 마이크로 섬유의 혼입률 증가에 기인한 것으로 사료된다.

3.3 진동수-진폭 관계

Fig. 11은 각 시험체의 손상단계별 진동수(frequency)와 진폭의 관계를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 I, III단계에서는 하이브리드 여부에 관계없이 유사한 경향을 보이고 있으나, Ⅱ단계에서는 60~85 dB의 진폭영역에서 각 섬유의 혼입률이 증가함에 따라 낮은 혼입률에서는 400 kHz 이상의 진동수를 나타낸 반면, 혼입률이 증가함에 따라 대부분의 신호가 400 kHz 이하에서 측정되는 경향을 보였다. 한편 Fig. 11(a), (e)에 나타난 바와 같이 PE 섬유를 0.5% 혼입한 시험체에서는 진폭과 주파수의 관계가 대체적으로 비례하는 반면, 이를 제외한 PE1.0% 및 PVA를 혼입한 시험체에서는 동일한 진폭영역에서 진폭이 증가함에 따라 주파수 영역은 감소추이를 보임을 알 수 있었다. 이는 HPFRCC에 보강 섬유 혼입시 시멘트 체적비에 의해 혼입률을 결정하나, 혼입률과 동시에 직경 및 비중과 같은 섬유 고유의 물리적 특성에 따라 시멘트 매트릭스와의 부착응력으로 인해 인장저항성능이 상이하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 하이브리드 섬유를 혼입한 시험체의 경우 SCPE0.5 시험체를 제외하고 80 dB 이상, 200 kHz 이하의 신호가 측정되어 마이크로 섬유와 매크로 섬유를 하이브리드한 경우 마이크로 섬유의 물리적 특성 및 계면부착성능에 따라 초기에서 파괴시까지의 미세균열에 대한 제어능력이 상이하게 나타났다.

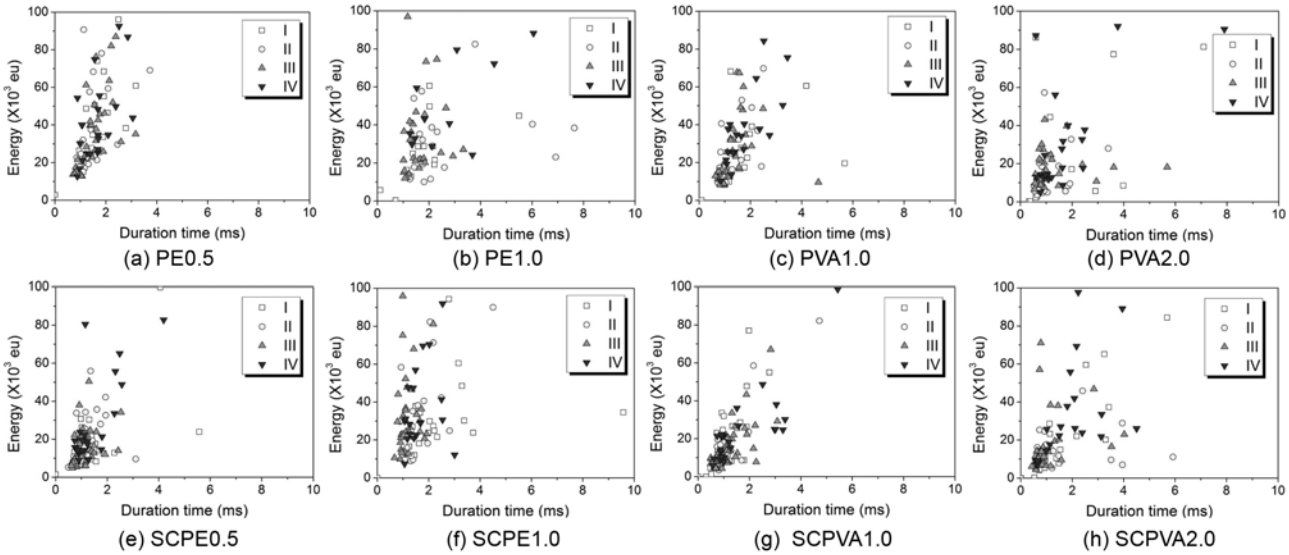


Fig. 12 Energy-duration relationship for monotonic loading

3.4 에너지-지속시간 관계

부재의 손상에 따른 AE 에너지(energy)량은 지속시간(duration time), 진폭, 진동수 등 여러 가지 요인에 의해 영향을 받으며, Fig. 12는 이 중 AE 에너지와 지속시간의 상관관계를 하중단계별로 비교하여 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 PE0.5 및 PVA1.0 시험체에서는 손상이 진전됨에 따라 지속시간과 에너지의 비례적 관계가 비교적 뚜렷하게 나타났으나 PE1.0 및 PVA2.0 시험체에서는 II, III단계에서 4 ms 이상의 지속시간을 갖는 신호가 발생함과 동시에 에너지에 대한 지속시간의 기여분이 비교적 작게 나타났으며, SC를 혼입한 시험체(Fig. 12(e)~(h))에서도 유사하게 나타났다. 이러한 현상은 손상이 진전됨에 따라 AE 신호의 지속시간은 증가되나 진폭 및 주파수 등과 같이 AE 에너지량에 영향을 미치는 요인이 감소하였기 때문이다. 또한, HPFRCCs에 혼입된 보강섬유로 인해 시멘트 매트릭스에 전달되는 응력에 의한 마이크로 및 매크로 균열 제어능력이 상이하기 때문인 것으로 판단된다.

3.5 펠리시티 비

Fig. 14에 나타난 바와 같이 콘크리트 재료에서 손상 발생시 측정되는 AE 신호특성을 통하여 결함의 존재여부를 판정할 수 있으며, 이를 이용한 펠리시티비(felicity ratio)는 다음 식 (1)과 같다.[16]

$$FR = R_{AE}/P_{MAX} \tag{1}$$

여기서 P_{AE}는 이전 사이클에서의 최대하중이며, P_{MAX}는 다음 재하과정에서 AE 신호가 발생하기 시작한 하중이다. 또한, FR > 1이면 시험편이 안정한 상태, FR≒1이면

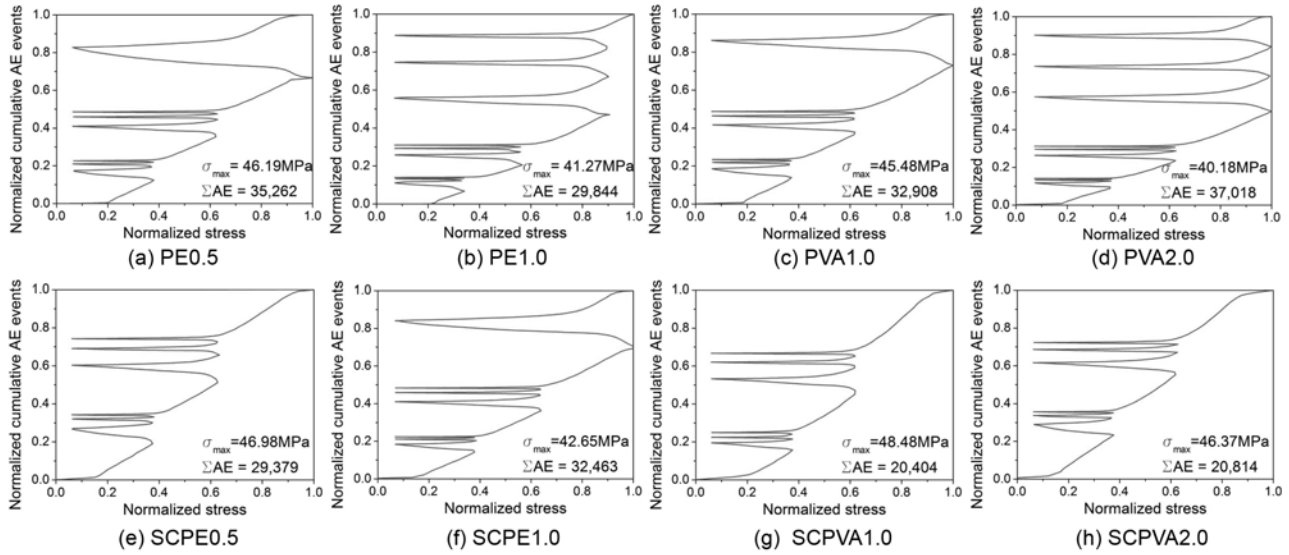


Fig. 13 Cumulative acoustic events for repeated loading

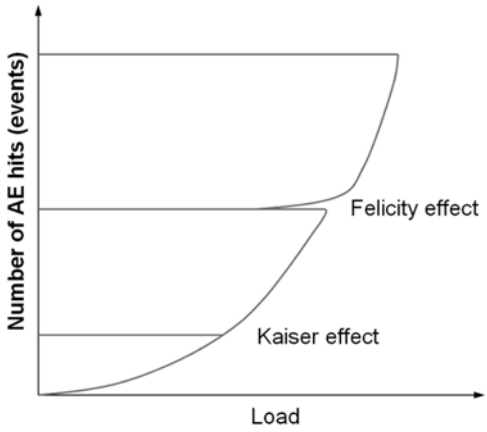


Fig. 14 Kaiser and felicity effect

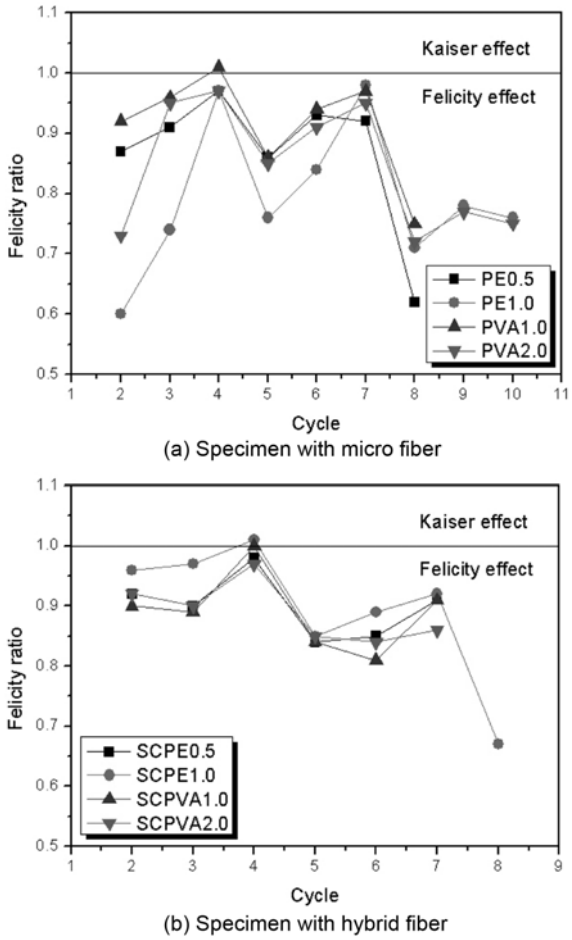


Fig. 15 Comparison of felicity ratio

카이저효과가 존재하는 상태, FR < 1이면 시험편이 손상된 상태를 나타낸다.

Fig. 13은 반복 가력에 의한 각 시험체의 누적 이벤트수-응력 관계를 나타낸 것이며, 여기서 계산된 펠리시티비를 각 시험체별로 정리하여 Fig. 15에 나타내었다. 모든 시험체에서 카이저 효과가 소멸되는 시기인 제하과정에서도 AE 신호가 측정되었으며, 이는 하중 제거 단계에서 보강섬유가 탄성 복원력으로 인해 수축함으로써 섬유와 시멘트 복합체 계면에서 미세한 마찰력이 유발되었기 때문인 것으로 판단된다. 마이크로 섬유를 단독 혼입한 시험체 중 PE1.0 및 PVA2.0 시험체에서는 Fig. 15(a)에 나타난 바와 같이 두 번째 사이클에서의 FR값이 0.60 및 0.73을 보여 다른 시험체에 비해 첫 번째 사이클에서의 손상이 심각한 것으로 판단되었으며, 하중단계별 첫 사이클인 4, 7 사이클에서는 모든 시험체가 0.92 이상의 값을 보여 HPFRCC에서도 카이저 효과가 존재함을 알 수 있었다. 또한 모든 시험체에서 7회째 사이클 이후 FR값이 급격히 감소되는 등 Ⅲ단계 이후의 손상 정도가 심각한 것으로 나타났다. 한편, 하이브리드 섬유를 혼입한 경우에는 Fig. 15(b)에 나타난 바와 같이 초기의 FR값이 0.90 이상의 값을 보여 마이크로 섬유를 단독 혼입한 경우에 비해 안정한 상태를 나타내었으며, 단조 가력시 최대하중의 50%(II단계)인 4 사이클에서 0.97 이상의 값을 보였다.

4. 결　　론

이 연구에서는 보강섬유 종류 및 하이브리드에 따른 HPFRCC의 단조/반복압축응력 작용시 손상 진전 및 AE 신호특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 각 시험체에서 측정된 AE 신호의 하중 단계별 사이클 반복에 따른 진폭 감소량은 각 시험체에서의 사이클별 변형률 증가량과 유사한 것으로 나타났으며, 이를 이용한 재료의 손상예측이 가능할 것으로 사료된다. 또한 진폭이 높은 신호일수록 낮은 하중 및 변형률에서는 거의 나타나지 않다가 손상이 진전됨에 따라 점점 높은 진폭을 갖는 신호가 발생되는 특성을 보였으며, 하이브리드 섬유를 혼입한 경우 SCPE1.0 시험체를 제외하고 50~60 dB의 진폭을 갖는 신호가 최대하중의 약 80%까지 측정되는 등 SC의 혼입에 따른 매크로 균열 제어로 인한 AE 신호의 진폭 감소가 나타났다.
2) 보강 섬유의 비중, 직경, 인장강도, 탄성계수 등과 같은 물리적 특성에 따라 발생하는 손상의 AE 신호특성은 상이하게 나타났으며, 상대적으로 보강섬유의 혼입률이 증가한 PE1.0 및 PVA2.0 시험체에서 4 ms 이상의 지속시간을 갖는 신호가 발생함(II, III단계)과 동시에 에너지에 대한 지속시간의 기여분이 비교적 작게 나타나는 등 최종파괴강도 및 변형능력에 영향을 미치는 초기 손상 이후의 미세균열 제어능력이 상이하게 나타났다.
3) 인장 및 변형능력을 개선시키기 위하여 보강섬유를 단독 및 하이브리드하여 혼입한 HPFRCC에서도 콘크리트에서 관찰되는 카이저 효과 및 펠리시티 효과를 확인할 수 있었으며, 모든 시험체에서 반복하중의 크기 증가시 FR값이 0.92~1.01을 나타내는 등 카이저 효과에 가까운 수치를 보여 시멘트 복합체 내 보강된 섬유로 인해 발생하는 균열을 제어하여 응력을 재분배함으로써 제하시 시험체의 손상을 복

원시키는 역할을 하는 것으로 판단되었다. 또한 하이브리드 섬유를 혼입한 경우 사이클 진전에 따른 손상이 점진적으로 나타나 단일 섬유를 혼입한 것에 비해 손상제어 및 분산능력이 뛰어난 것으로 판단되었다.

참고문헌

1. Yun, H. D., Kim, S. W., and Jeon, E., "Tensile Response and Fracture Process of High-Performance Hybrid Fiber-Reinforced Cement Composites," *Key Engineering Materials*, Vol. 324-325, 2006, pp. 715~718.
2. Li, V. C. and Wu, H. C., "Conditions for Pseudo Strain-hardening in Fiber Reinforced Brittle Matrix Composites," *Journal Applied Mechanics Review*, Vol. 45, No. 8, 1992, pp. 390~398.
3. Naaman, A. E. and Najm, H., "Bond-Slip Mechanisms of Steel Fibers in Concrete," *ACI Material Journal*, Vol. 88, No. 2, 1991, pp. 135~145.
4. Fukuyama, H., Suwada, H., Mukai, T., Watanabe T., and Nomura, S., "Structural Test on High Performance Seismic Resistance Elements with High Strength, Stiffness, Ductility," *Proceedings of AIJ annual meeting*, Structure IV, 2005, pp. 487~490.
5. 김윤용, 김정수, 김진근, 하기주, "고인성 섬유복합재료 ECC (Engineered Cementitious Composites)의 시공성," 한국콘크리트학회 학술발표논문집, 17권, 1호, 2005, pp. 313~316.
6. Yun, H. D., S. Kim, W., Jeon, E., and Park, W. S., "Effect of Matrix Ductility on Damage Tolerance of Digonally Reinforced Coupling Beams," *Key Engineering Materials*, Vol. 324-325, 2006, pp. 723~726.
7. 하기주, 신종학, 김윤용, 홍건호, 양승혁, 김진근, "고인성섬유 복합모르타르 PC판넬을 활용한 철근콘크리트 골조의 리모델링을 위한 보강시스템 개발," 한국콘크리트학회 학술발표논문집, 18권, 1호, 2006, pp. 66~69.
8. Ohtsu, M. and Watanabe, H., "Quantitative Damage Estimation of Concrete by Acoustic Emission," *Construction and Building Materials*, Vol. 15, 2001, pp. 217~224.
9. Wu, K., Chen, B., and Yao, W. "Study on the AE Characteristics of Fracture Process of Mortar, Concrete and Steel-fiber-reinforced Concrete Beams," *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, 2000, pp. 1495~1500.
10. Maji, A. K. and Shah, S. P., "Process Zone and Acoustic Emission Measurement in Concrete," *Experimental Mechanics*, Vol. 28, No. 1, 1988, pp. 27~33.
11. Puri, S., "Assessing the Development of Localized Damage in Concrete under Compressive Loading Using Acoustic Emission," Purdue University, 2003, 111 pp.
12. Colombo, Ing. S., Main, I. G., and Forde, M. C., "Assessing Damage of Reinforced Concrete Beam Using b-value Analysis of Acoustic Emission Signals," *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 15, No. 3, 2003, pp. 280~286.
13. 윤현도, 김선우, 전에스더, "보강섬유 종류에 따른 고인성 시멘트 복합체의 손상과정 및 음향방출특성," 대한건축학회 구조계 논문집, 22권, 9호, 2006, pp. 35~42.
14. Kumar, A. and Gupta, A. P., "Acoustic Emission in Fiber Reinforced Concrete," *Experimental Mechanics*, Vol. 36, No. 3, 1996, pp. 258~261.
15. Hsu, T. T. C., Slate, F. O., Sturman, G. M., and Winter, G., "Micro-cracking of Plain Concrete and the Shape of the Stress-Strain Curve," *ACI Journal, Proceedings*, Vol. 60, No. 2, 1963, pp. 209~224.
16. Yuyama, S., Okamoto, T., and Nagataki, S., "Acoustic Emission Evaluation of Structural Integrity in Repaired Reinforced Concrete Beams," *Materials Evaluation*, Vol. 52, No. 1, 1994, pp. 86~90.

요 약 고인성 섬유보강 시멘트 복합체는 시멘트 매트릭스 내 보강된 섬유의 계면부착응력에 의해 다수의 미세균열분산 및 손상저항성능을 갖게 되나, 이를 구조물에 적용하기 위해서는, 고인성 섬유보강 시멘트 복합체의 파괴거동을 규명함과 동시에 보강섬유에 따른 시멘트 매트릭스의 마이크로 파괴메커니즘에 대한 이해가 요구된다. 이 연구에서는 단조 및 반복가력시 고인성 섬유보강 시멘트 복합체의 파괴특성 및 음향방출신호특성을 규명하기 위하여 총 4 시리즈의 시험체가 사용되었으며, 주요 실험변수는 섬유의 종류(PE, PVA, SC), 혼입률, 하이브리드 타입, 가력방법(단조, 반복)이다. 실험결과, 고인성 섬유보강 시멘트 복합체의 압축거동에 따른 손상진전은 섬유의 혼입률 및 하이브리드에 따라 상이하게 나타났다. 또한 음향방출신호로부터, 각 하중단계의 2, 3번째 사이클에서의 진폭 감소 특성이 나타났으며, 이는 각 사이클별 변형률 증가와의 관련성을 보여 이를 이용한 강도 예측이 가능할 것으로 판단된다. 또한 최대강도의 80%까지 펠리시티 효과 및 카이저 효과가 나타났으며, 하이브리드 섬유 혼입시 매크로 균열 제어로 인해 손상의 복원 및 분산능력이 뛰어난 것으로 나타났다.

핵심용어 : 고인성 섬유보강 시멘트 복합체, 손상저항성능, 압축거동, 음향방출신호, 카이저 효과