



음향방출 기법을 이용한 섬유보강 시멘트 복합체의 정량적 손상평가

이영오¹⁾ · 윤여진²⁾ · 윤현도^{1)*}

¹⁾충남대학교 건축공학과 ²⁾건양대학교 건설시스템공학과

Quantitative Damage Evaluation of Fiber-Reinforced Cement Composite Using Acoustic Emission Technique

Young-Oh Lee,¹⁾ Yeo-Jin Yun,²⁾ and Hyun-Do Yun^{1)*}

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

²⁾Dept. of Civil System Engineering, Konyang University, Chungnam 320-711, Korea

ABSTRACT Fiber is an important ingredient in fiber-reinforced cement composite (FRCC) which can control fracture of cement composite by bridging action. In compliance with the action of the fiber and the aggregate size, it also showed a different failure mechanism. For practical application, it is needed to investigate the fracture behavior of the FRCC and to understand the micro-mechanism of cement matrix with reinforcing fiber. In order to evaluate a characteristics of fracture process in the FRCC, acoustic emission (AE) technique was used for the analysis and evaluation of FRCC damage by acoustic emission under flexural and cyclic compressive loadings. The AE signals were monitored by AMSY4 AE instrument during the entire loading period. The specimens are reinforced with 0, 1.0, 1.5 and 2.0% (by volume) Polyvinyl alcohol (PVA) fiber. The test results showed that the damage progress of the FRCC was characteristic for the fiber replacement ratio. As a result of analyzing the felicity ratio (FR) values, it is shown that this values can be used for evaluating the degree of FRCC damage. On the whole the felicity ratio values of FRCC are shown between 0.4 and 1.1. And, the AE kaiser effect was shown in the all FRCC specimen. In addition, the damage behavior and the microscopic fracture process of the FRCC are evaluated using the AE parameters, such as calm ratio, b-value and felicity ratio. The purpose of this reserch was to advance the state of knowledge regarding the applicability of acoustic emission as an evaluation method for FRCC.

Keywords : fiber-reinforced cement composite, bridging action, Kaiser effect, calm ratio, b-value

1. 서 론

최근 환경에 대한 중요성이 인식됨에 따라 건설 분야에서도 장수명이라는 키워드가 등장하였고, 이러한 사회적 요구에 맞추어 주 건설재료인 콘크리트와 같은 시멘트 복합체에 고내구성을 부여하기 위한 연구가 재료 및 구조분야에서 폭 넓게 진행되고 있다. 콘크리트의 경우 매우 취성적인 건설재료로써, 이러한 취성적 성질을 보완하고 내진성능 및 내구성을 부여하기 위하여 시멘트 복합체에 섬유를 혼입하여 균열분산능력 및 연성을 개선하기 위한 연구가 국·내외적으로 활발히 이루어지고 있다.¹⁾

이러한 섬유보강 시멘트 복합체(fiber-reinforced cement composite, FRCC)는 보강 섬유 자체의 인장강도 및 탄성계수 등 재료특성과 섬유 혼입률에 따라 상이한 균열분산능력 및 변형특성을 가지게 된다. FRCC에 관한 연구는 섬유 종류 및 혼입률에 따른 파괴양상, 강도 및 연성

등 구조성능에 관한 연구가 주를 이루고 있으며, 섬유의 혼입률에 따른 FRCC 내부의 손상에 의해 발생하는 파괴 거동에 관한 정량적 손상평가에 관한 연구는 미비한 실정이다. 콘크리트구조물의 경우 초기 또는 사용 중에 발생하는 내부결함 및 손상도를 평가하기 위한 종래의 파괴적인 방법의 적용에 큰 제약이 있기 때문에 방사선 투과 검사, 초음파탐상검사, 음향방출검사 등 여러 가지 비파괴검사들이 사용되어지고 있다.

이러한 비파괴검사 방법 중에 음향방출(acoustic emission, 이하 AE)기법은 물체가 외력을 받을 때 미세변위의 이동이나 균열의 성장 등으로 인해 원자의 재배열이 발생되면서 유발된 탄성과 특성을 근거로 하중 조건에 따른 구조물의 균열발생 위치 예측, 기 발생 균열의 진전 여부 및 진전방향 예측, 그리고 균열발생 원인이 무엇인지에 대해 판별하는데 실용적이고 객관적인 데이터를 제공하며, 결함의 실시간계측(online monitoring)이 가능하다는 장점이 있어 암반, 교량 및 산업 구조물의 진단 및 상태평가 등에 주로 적용되어져 왔다.

한편 철근콘크리트 재료를 사용하는 건설 분야의 경우 Shah와 Maji²⁾ 등이 콘크리트의 파괴기구를 구명하기 위

*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

하여 AE 기법을 콘크리트 손상 평가에 적용하였으며, 일본의 Ohtsu 등³⁾은 압축하중을 받는 콘크리트 부재의 손상 정도를 AE 기법을 이용하여 정량적으로 평가하였으며, 국내에서도 윤동진 등⁴⁾을 중심으로 다양한 방식의 콘크리트 부재의 거동과 AE 신호의 상관성에 대한 연구가 진행되어 왔으며, 최근 Takeshi Watanabe⁵⁾는 순환골재의 압축 파괴특성을 평가하기 위하여 AE 기법을 적용하였다.

이 연구에서는 PVA(polyvinyl alcohol) 섬유로 보강된 FRCC에 있어서 PVA 보강 섬유 혼입률을 변수로 휨 및 압축실험체를 제작하였으며, 혼입률에 따른 FRCC의 섬유와 골재 사이의 손상 메커니즘과 파괴특성을 AE 기법을 사용하여 분석하였다.

2. 실험

2.1 실험체 계획 및 사용 재료

본 연구에서는 AE 신호특성을 이용하여 FRCC의 섬유 혼입률에 의한 파괴 메커니즘을 분석하기 위하여, 단면 $100 \times 100 \times 400$ mm의 휨실험체와 $F100 \times 200$ 의 반복 압축실험체를 섬유를 혼입하지 않은 PVA-0-SP 실험체와, 1.0, 1.5, 2.0%를 혼입한 PVA-1.0-SP, PVA-1.5-SP, PVA-2.0-SP의 총 네 개의 실험체를 설계기준강도 50 MPa인 FRCC를 사용하여 제작 하였다. 보강섬유는 마이크로 섬유인 PVA 섬유로써 인발과정에서 주위의 시멘트 경화물에 의해 섬유표면이 거칠게 되어 길보기상 마찰부착강도가 크게 되는 현상이 나타나는 것으로 보고된 바 있다. 섬유의 분산성능 및 시공성 확보를 위하여 플라이애쉬 및 실리카퓌름을 첨가하였다. FRCC의 배합비는 Table 1에 나타내었고, 사용된 섬유와 잔골재의 입형, 물리적 특성 및 혼화재의 물리적 특성은 그림 Figs. 1, 2와 Tables 2~4에 각각 나타내었다.

2.2 실험체 설치 및 측정 방법

본 연구에서는 FRCC의 섬유혼입률에 따른 파괴 메커니즘을 분석하기 위하여 Fig. 3에 나타난 바와 같이 실험



Fig. 1 Aggregate shape

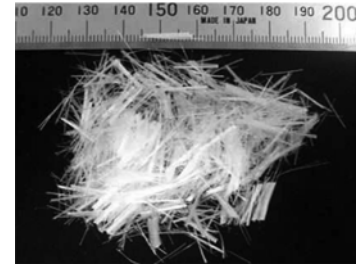


Fig. 2 Fiber shape

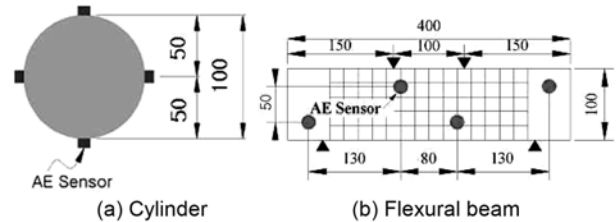


Fig. 3 Specimen measurement and location of the AE sensor (mm)

Table 3 Physical properties of aggregates

Type	Specific gravity	Absorption ratio (%)	Size (mm)
Silica	2.64	0.38	0.3

Table 4 Physical properties of admixture

Type	Specific gravity	Fineness (cm ² /g)	Unit water ratio (%)
FA	2.12	2.976	101
SF	2.10	200,000	-

Table 1 Mix proportion of FRCC

Mix type	Fiber volume fraction (%)	Warse of fine	W/B (wt.%)	Unit weight (kg/m ³)				
				PVA	C	FA ¹⁾	SF ²⁾	S
PVA-0-SP	0	SP ³⁾	0.33	20	626	564	63	626
PVA-1.0-SP	1.0							
PVA-1.5-SP	1.5							
PVA-2.0-SP	2.0							

¹⁾FA : fly-ash ²⁾SF : silica fume ³⁾SP : silica powder

Table 2 Physical properties of fiber

Type	Length (mm)	Specific gravity	Dia. (μm)	Aspect ratio (l / d)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)
PVA	12	1.3	39	384	1,323	25.35

험체를 설치하였으며, 압축시험체의 경우 2,000 kN 용량의 UTM을 사용하여 반복 가력 하였다. 가력수준은 단조 가력 시 측정된 압축강도의 30%, 50%, 80%, 100%로 계획하였으며, 카이저(Kaiser effect) 및 펠리시티(Felicity effect)효과와 같은 AE 신호특성을 평가하기 위하여 각 손상단계별로 3회씩 반복가력 하였다. AE 센서는 Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 공시체 측면 중앙부 주변에 원형으로 4개의 센서를 설치하였으며, 컴프레시미터를 설치하여 LVDT로 부터 공시체의 변형량을 측정하였다. 휨 시험체의 경우 200 kN 용량의 만능재료시험기(UTM)를 사용하여 4점가력 하였으며, 중앙부의 처짐을 측정하기 위하여 중앙부 측면에 LVDT를 각각 설치하였다. AE 센서(SE900, D사)는 Fig. 3 (b)에 나타난 바와 같이, 시험체 측면에 삼각형 탐사기법(triangle method)을 적용하여 부착하였으며, AE 센서는 100~900 kHz의 광대역 센서를 사용하였고, 측정된 신호는 프리앰프(20dB, Vallen system)로 신호를 증폭시킨 후 AMSY4를 이용하여 측정하였으며, 문턱값 (threshold)은 34 dB을 사용하였다.

3. 실험 결과

3.1 응력과 변형률과의 관계

Fig. 4는 반복압축시험체의 응력과 변형률과의 관계를 나타낸 것으로 그림에서 보는 바와 같이 PVA-0-SP, PVA-1.0-SP 시험체의 경우 계획하였던 압축강도에 못 미치는 30 MPa의 최대응력을 나타내었다. 또한 섬유 혼입률이 많을수록 최대 변형률이 증가하는 경향을 나타내었으며, 섬유혼입률 1.0과 1.5를 경계로 강성의 차이를 보이고 있다. Fig. 5의 휨시험체의 경우 반복압축시험체와는 달리 PVA-1.5-SP 시험체가 가장 큰 응력을 보이고 있으며, PVA-2.0-SP 시험체가 가장 큰 변위를 나타내었다.

3.2 반복압축 시험체의 AE 신호특성

3.2.1 펠리시티비를 이용한 손상도 평가 이론

콘크리트 재료에 있어서 결함의 존재 여부를 판정할 수

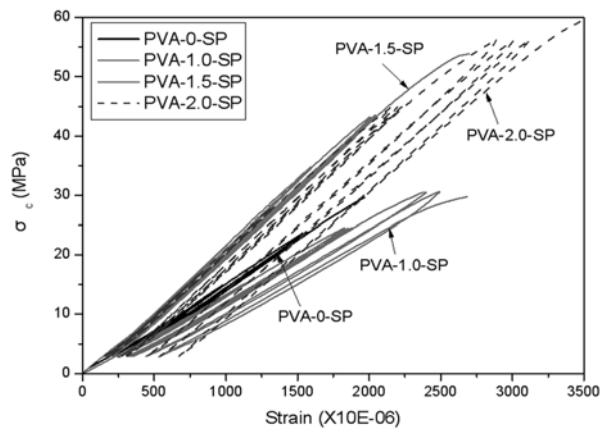


Fig. 4 Stress-strain curve of cyclic compression specimens

있는 중요한 인자로 카이저 효과와 펠리시티 효과가 있다. 카이저 효과란 하중이 증가하는 동안 AE 신호도 증가하게 되고, 최대하중 이후 하중을 제거 한 후 다시 하중이 증가하는 동안 선행 최대하중에 도달하기 전에 AE 신호는 발생하지 않게 되는데 이러한 현상을 카이저 효과라 하며, 하중의 제거 후 다시 하중을 가했을 때 선행 최대하중 이전에서 AE 신호가 증가하는 현상을 펠리시티 효과라고 한다. 여기서 이전 재하단계에서의 최대하중을 P_{max} , 하중제거 후 재차 하중을 가했을 때 AE 신호가 발생하기 시작한 하중을 P_{AE} 라 할 때 재료의 손상정도를 나타내는 FR(Felicity ratio)은 다음 식과 같다.

$$FR = \frac{P_{AE}}{P_{max}} \quad (1)$$

여기서, $FR > 1$ 이면 시험편이 안정한 상태이고, $FR \approx 1$ 이면 카이저 효과가 존재하는 하중레벨이고, $FR < 1$ 이면 시험편이 손상되어 불안정한 상태를 나타내게 되며, 이는 성능저하 및 손상 정도의 지표로 사용 가능하다. 식 (1)은 ASME code section, article 11⁶⁾에 규정되어 있다.

Table 5는 각 사이클에서의 펠리시티비 값을 비교하여 나타낸 것으로 하중의 재하는 기측정된 압축강도를 기준으로 I(30%), II(50%), III(80%), IV(100%)의 4단계를 각 단계별 3사이클씩 하중을 재하하였다. 콘크리트의 강도 수준에 관계없이 콘크리트의 손상여부를 판단할 수 있는 카이저 효과와 펠리시티 효과를 시험적으로 확인할 수 있다고 제시한 이용중 등⁷⁾과 플라이애쉬 시멘트를 이용한 모르타르 시편에서 카이저 효과가 존재한다고 한 Tam과 Weng⁸⁾의 논문에서 비추어 볼 때, 섬유보강 시멘트 복합체를 사용한 시험체에서도 카이저 효과가 나타났다. Fig. 6은 섬유 혼입률에 따른 펠리시티비를 비교하여 나타낸 것으로 전반적으로 펠리시티비 0.4 이상의 값을 나타내었으며, 모든 시험체의 4사이클에서 펠리시티비 1을 넘는 카이저효과가 나타났고, PVA-2.0-SP 시험체의 경우

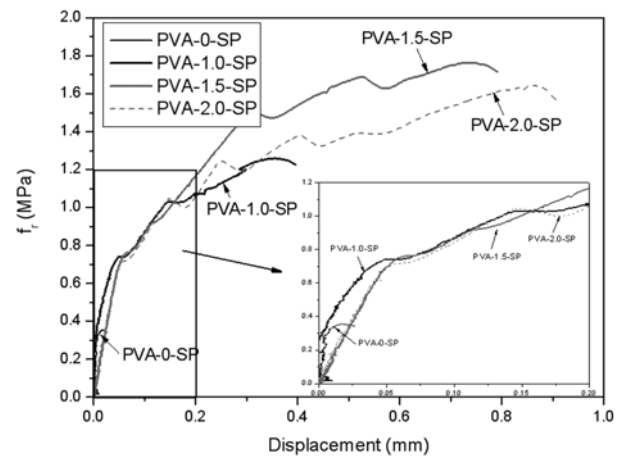


Fig. 5 Rupture modulus-displacement curve of flexural specimens

Table 5 Felicity ratio of specimens

Specimen	Cycle	P _{AE}	P _{max}	FR	Note	Specimen	Cycle	P _{AE}	P _{max}	FR	Note		
PVA-0-SP	I	1	3.02			PVA-1.5-SP	I	1	5.59				
		2	3.77	7.34	0.51			FE	2	8.01	10.15	0.79	FE
		3	5.28	7.00	0.75			FE	3	8.31	9.76	0.85	FE
	II	4	7.11	6.97	1.02		KE	II	4	10.95	10.06	1.09	KE
		5	8.41	11.89	0.71		FE		5	15.61	16.49	0.95	FE
		6	9.93	11.91	0.83		FE		6	13.10	17.34	0.76	FE
	III	7	8.68	11.83	0.73		FE	III	7	16.88	16.85	1.00	KE
		8	9.03	18.92	0.48		FE		8	16.85	27.86	0.6	FE
		9	9.29	19.11	0.49		FE		9	15.41	27.86	0.55	FE
	IV	10	16.36	19.13	0.86		FE	IV	10	26.49	27.85	0.95	FE
		11	-	23.76	-				11	25.11	34.31	0.73	FE
		12	-	-	-				12	23.87	34.52	0.69	FE
PVA-1.0-SP	I	1	6.10	-	-	PVA-2.0-SP	I	1	10.45	-	-		
		2	5.95	9.71	0.61			FE	2	10.07	13.43	0.75	FE
		3	5.61	9.30	0.60			FE	3	12.14	13.20	0.92	FE
	II	4	9.13	9.12	1.00		KE	II	4	14.86	12.75	1.17	KE
		5	9.46	15.01	0.63		FE		5	17.79	22.30	0.80	FE
		6	9.25	14.87	0.62		FE		6	19.15	22.62	0.85	FE
	III	7	11.50	15.25	0.75		FE	III	7	23.59	22.24	1.06	KE
		8	12.23	24.22	0.50		FE		8	26.07	36.09	0.72	FE
		9	12.95	24.11	0.54		FE		9	26.95	35.49	0.76	FE
	IV	10	14.57	24.19	0.60		FE	IV	10	27.93	35.75	0.78	FE
		11	15.75	30.47	0.52		FE		11	31.27	45.10	0.69	FE
		12	-	30.38	-				12	32.91	44.83	0.73	FE

극한강도의 80%인 7사이클에서도 카이저 효과가 나타났으며, 4, 7사이클에서 높은 펠리시티비를 나타낸 후 최종 하중단계인 단계에서 손상에 의해 급격히 낮은 펠리시티비를 보이고 있다. PVA-1.5-SP 실험체의 경우 7사이클에서 0.95로 비교적 높은 펠리시티비를 보이고 있다. 또한 섬유 혼입률 1.0%인 PVA-1.0-SP 실험체의 경우 4 사이클에서 카이저 효과가 나타난 것을 제외하고, 모든 사이클에서 전반적으로 낮은 펠리시티비를 보이고 있다

며, 섬유 혼입률이 많을수록, 비교적 높은 펠리시티비를 보이고 있다.

3.2.2 Calm ratio에 의한 정량적 손상평가

AE의 정량적 손상평가 방법 중 Luo 등⁹⁾의 경우 교각에서 발생한 시간에 따른 균열폭과 AE 히트수와의 관계로부터 calm ratio와 RTRI ratio라는 damage degree를 분석하였으며, Ohtsu 등¹⁰⁾의 경우 시간에 따른 AE 히트수와 하중과의 관계로부터 calm ratio와 load ratio를 적용한 damage degree를 음향방출 기법의 손상도 평가에 적용하고 있다. 손상의 구분에 관한 내용은 NDIS-2421¹¹⁾에서 설명하고 있으며, 본 연구에서는 Luo 등⁹⁾이 적용한 calm, RTRI ratio를 적용하여 반복압축하중 하에서 damage degree를 평가하였다. 여기서 calm ratio와 RTRI ratio의 정의를 Fig. 7에 나타내었으며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$RTRI = \frac{Displacement_{AE}}{Displacement_{max}} \quad (2)$$

여기서, Displacement_{AE}는 AE 신호가 발생하기 시작하는 시점 D에서의 변위이고, Displacement_{max}는 최대변위 E 점이다.

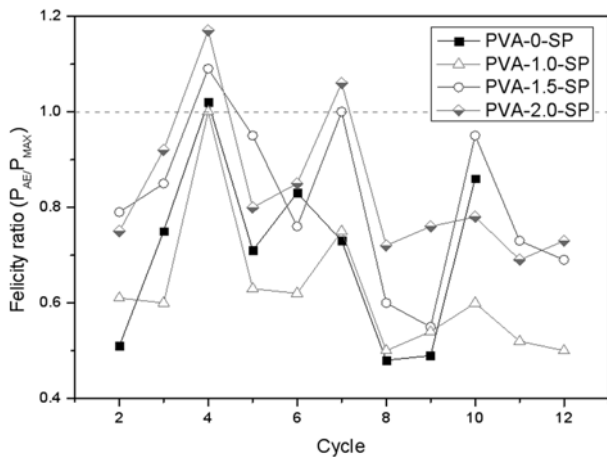


Fig. 6 Felicity ratio for the fiber replacement ratio

$$Calm = \frac{Cumulative\ AE\ activity_e}{Cumulative\ AE\ activity_p} \quad (3)$$

여기서, Cumulative AE activity_e는 최대변위 이후 변위가 끝나는 시점까지의 AE 히트수, C점에서의 히트수와 B점에서의 히트수의 차이이고, cumulative AE activity_p는 변위가 시작하는 시점에서부터 최대변위까지의 AE 히트수, B점에서의 히트수와 A점에서의 히트수의 차이이다.

식 (2)와 (3)으로부터 구한 calm ratio와 RTRI ratio의 상관관계로 부터 damage degree를 평가할 수 있는데, Chitsu 등¹⁰⁾의 경우 CMOD(crack-mouth opening displacement)를 근거로 calm ratio의 손상을 0.05를 경계로 damage degree를 구분하였으며, RTRI의 경우 0.8을 경계로 damage degree를 구분하였다. 손상의 범위는 3단계로 구분하여 정의 하였으며 손상수준이 가장 작은 damage degree 1부터 손상수준이 가장 큰 damage degree 3 으로 나누었다. 그러나 Ohtsu 등³⁾의 실험체와 비교해 볼 때 이 연구에서는 섬유 혼입에 의한 영향으로 인해 calm ratio의 범의를 재설정할 필요가 있어 Fig. 9에서 보는 바와 같이 calm ratio의 범위를 0~0.2까지 설정하였으며, 0.05를 경계로 손상 단계를 구분하였고, RTRI의 경우 Ohtsu 등¹⁰⁾과 동일하게 설정하였지만, 각 사이클에서 손상정도의 분석을 통하여

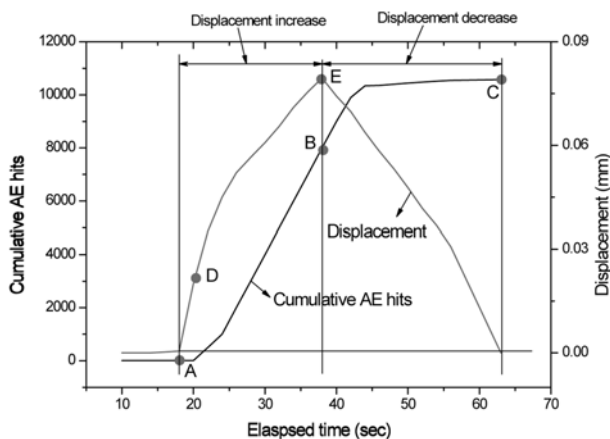


Fig. 7 Definition of calm ratio and RTRI ratio⁹⁾

Calm	Damage degree 3 (high)	Damage degree 2 (middle)
	Damage degree 2 (middle)	Damage degree 1 (low)
	RTRI	

Fig. 8 Classification of damages by two ratios recommended by NDIS-2421¹¹⁾

경계를 0.8이 아닌 0.6으로 낮추어 평가하였다.

Fig. 9는 calm ratio와 RTRI ratio의 상관관계를 나타낸 것으로 섬유를 혼입하지 않은 PVA-0-SP 실험체의 경우 1사이클에서 손상이 가장 큰 damage degree 3을 나타내었으며, 2, 3사이클에서 damage degree 2로 최대응력의 30%에서 손상이 지배적으로 발생하였고, 섬유를 혼입한 실험체의 경우 PVA-0-SP 실험체와는 달리 1단계에서 damage degree 2를 나타내었으며, PVA-1.0-SP, PVA-2.0-SP 실험체의 경우 damage degree 2가 지배적으로 나타났다. 또한 PVA-2.0-SP 실험체의 경우 다른 실험체와는 달리 최종과과 이전시점인 10사이클 이후에서 damage degree 3으로 손상이 다소 크게 발생한 것을 볼 수 있다. PVA-1.5-SP 실험체의 경우 섬유의 효과적인 가교작용에 의해 damage degree 1이 다른 실험체보다 많이 나타났다.

PVA-1.0-SP 실험체의 경우 다른 실험체와는 달리 4사이클에서 damage degree 3을 보이고 있으며, calm ratio도 대부분 0.10을 상회하는 값을 보이고 있다. 이는 섬유의 혼입률이 많은 PVA-2.0-SP와 상반되는 경향을 보이고 있으며, PVA-2.0-SP 실험체의 경우 3단계 이후 손상이 진전된 단조 압축 시험에서 나타난 바와 같이 반복 시험에서도 3단계 이후 7, 10, 11, 12 사이클에서 damage degree 3을 갖는 손상이 나타났다. 펠리티비에 의한 손상평가에서 PVA-2.0-SP 실험체의 경우 7사이클에서 펠리티비 1.0을 넘는 카이저 효과가 나타났고, damage degree 3의 범위에 속하는 10사이클의 경우 펠리티비 역시 낮게 나타났다. 펠리티비와 calm ratio에 의한 손상평가의 경우 calm에 의한 damage degree 3의 범위에 속하는 사이클에서의 손상은 펠리티비에 의한 손상평가와 상관성을 보이고 있으며 두 기법의 상관관계를 분석하기 위하여 차후 더 많은 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3.3 휨실험체의 AE 신호 특성

3.3.1 휨하중 하에서 시멘트 복합체의 손상단계 정의

Fig. 10은 휨실험체에서의 손상단계를 나타낸 것으로 FRCC의 단계별 손상을 분석하기 위하여, 손상단계를 총 4단계로 정의하였다. 시험시작부터 초기균열이 발생하는 시점까지를 I단계, 초기균열부터 변형경화 이전까지를 II 단계, 실험체 내부의 섬유의 가교작용에 의해 변형이 서서히 진행되는 변형 경화시점부터 최대하중 까지를 III 단계, 최대하중부터 변형연화를 지나 시험이 종료되는 시점까지를 IV단계로 정의하였다.

3.3.2 b-value를 이용한 손상도 평가

휨하중 하에서 섬유보강 시멘트 복합체의 손상평가를 위하여 내부 공극의 미세 파괴에 의해 발생한 신호의 정량적 평가가 가능한 b-value를 적용하였으며, Gutenberg 와 Richter에 의해 제안된 b-value의 경우 대규모 지진의 분석 및 암석역학에 적용되어져 왔으며, 콘크리트 및 토

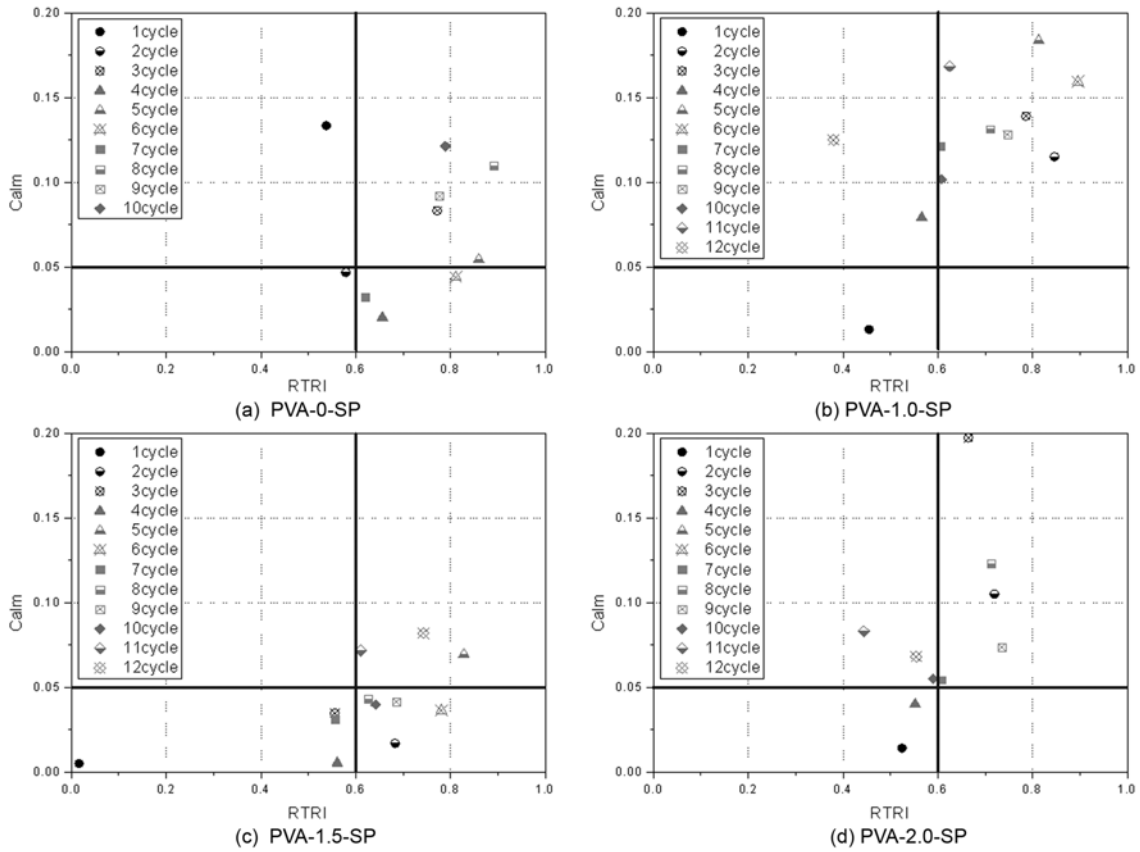


Fig. 9 Damage estimation for calm ratio and RTRI ratio

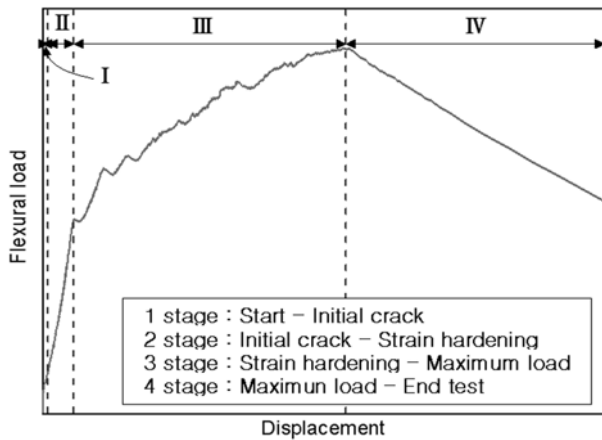


Fig. 10 Definition of the damage stage

목공학에도 국부적으로 적용되어지고 있다. Gutenberg와 Richer는 각각의 최대 진폭에서의 이벤트를 누적시켜 Gutenberg-Richter(GR) 관계로 다음과 같이 표현하였다.

$$\log N(W) = a - bW \quad (4)$$

여기서, $N(W)$ 은 같은 진폭을 갖는 누적 이벤트수이고, a , b 는 GR계수이다. 식 (4)로부터 AE 데이터 분석에 직접적으로 적용할 수 있으며, AE 이벤트에서 진폭의 경우 최대 진폭값 보다 더 높은 데시벨의 값을 갖기 때문에 매개변수 b 에 20배를 한 수정값을 적용하며 이러한 수정값은 AE-b parameter로 정의한다. 손상의 초기단계

에서 마이크로균열이 발생하게 되고, 이때 b -value는 크게 나타나며, 매크로 균열 및 손상이 크게 발생할 때 b -value는 작게 나타난다.

b -value에 의한 손상평가에 있어 Sammond 등¹²⁾의 경우 암석에서 1.2, 1.7을 경계로 손상의 범위를 정하고 있는데, 섬유보강 시멘트 복합체의 경우 암석이나 일반적인 실험체와는 달리 섬유와 골재간의 상호작용에 의해 발생한 신호의 영향으로 Sammond가 정의한 값을 1.2, 1.3, 1.4로 수정하여 적용하였으며, Table 6과 같이 섬유를 보강한 실험체에서 b -value에 의한 손상을 정의 하였다. Fig. 11과 Table 7은 각 실험체의 b -value에 의한 손상평가를 나타낸 것으로 PVA-0-SP 실험체의 경우 취성적 휨 파괴로 인해 단계별 손상을 평가하기 곤란하기 때문에 분석에 있어 제외하였다.

Sammond 등¹²⁾의 경우 단순히 AE-b 값에 의한 손상을 정의 하였는데, 섬유보강 실험체의 경우 AE-b 값 이외에도 a 값에 의한 손상의 구분이 필요한 것으로 판단되며, Table 6에 나타난 바와 같이 정의하였다. PVA-1.0-SP 실험체의 경우 섬유의 가교작용이 다른 실험체보다 적게 나타나 2단계에서 손상지수 5가 나타났으며, 최종 파괴 시점인 4단계 역시 0.7이하의 AE-b 값을 보이고 있다. PVA-1.5-SP 실험체의 경우 초기균열 시점인 1단계에서 AE-b값은 b -value에 의한 손상 평가에 따른 손상지수 2를 보이고 있으며 a 값은 2와 4 사이의 값을 갖는 것으로 나타났다. 2단계에서 초기균열 이후 변형경화 이전 시점까지 섬유의 가교작용에 의해 마이크로 균열이 발생하는

Table 6 Damage estimation for the b-value

Range	Damage index	Damage definition	Classification for the a value	
$0 < b\text{-value} < 0.7$	1	Damage for bridging action prior to the final failure	.	
$0.7 < b\text{-value} < 1.2$	2	Appear a macro crack for damage	$a < 2$	Damage that occurred prior to the experiment terminated
			$2 < a < 4$	Generate crack on the initial stage
			$a > 4$	Macro crack on the stage for effect on the bridging action of fiber
$1.2 < b\text{-value} < 1.3$	3	Develop of macro crack	.	
$1.3 < b\text{-value} < 1.4$	4	Distribution of equality micro crack	.	
$1.4 < b\text{-value}$	5	Appear a micro crack, increase of macro crack width	.	

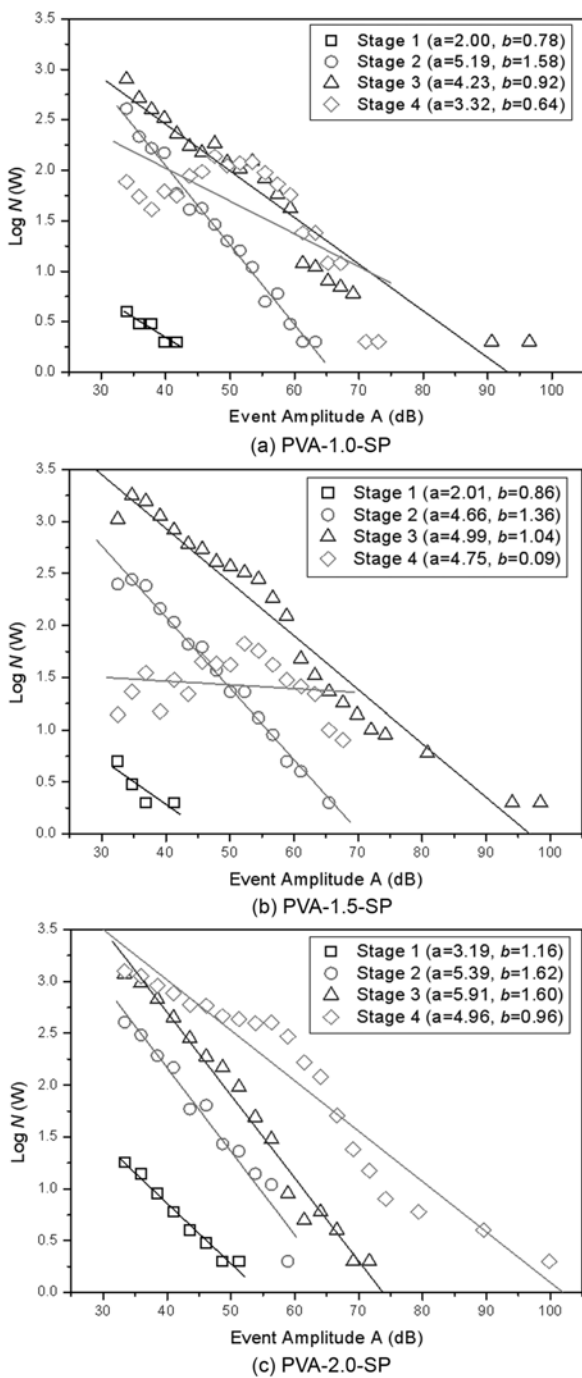


Fig. 11 Accumulation distribute of amplitude for AE event

Table 7 Comparison of a, b value for b-value damage estimation

Stage	PVA-1.0-SP		PVA-1.5-SP		PVA-2.0-SP	
	a	b	a	b	a	b
1	2.00	0.78	2.01	0.86	3.19	1.16
2	5.19	1.58	4.66	1.36	5.39	1.62
3	4.23	0.92	4.99	1.04	5.91	1.6
4	3.32	0.64	4.75	0.09	4.96	0.96

상지수 3을 보이고 있으며, 이후 손상단계 3인 변형 경화 시점에서 손상에 의한 매크로 균열이 발생하는 손상지수 2가 나타났으며 이때의 a값은 4이상으로 1단계와 차이를 보이고 있다. 최대하중 이후 균일한 균열의 분포와 매크로 균열의 진전으로 손상지수 4가 나타났고, 이후 최종 파괴 시점에서 손상지수 1의 낮은 AE-b값을 보이며 최종 파괴되었다. PVA-2.0-SP 실험체의 경우 섬유가교작용에 의해 2, 3단계에서 마이크로 균열이 지배적으로 나타나는 손상지수 5가 나타났으며, 이후 4단계에서 손상지수 1로, 손상에 의한 매크로 균열이 진전되며 최종 파괴되었다.

4. 결 론

- 1) 펠리시티비에 의한 반복 압축 실험체의 손상도를 평가한 결과 이전 연구자의 연구 결과와 같이 섬유보강 실험체에서도 카이저 효과가 나타났다. 또한 4사이클에서 모든 실험체의 경우 1.0 이상의 높은 펠리시티비를 보이고 있으며 섬유를 1.5% 이상 혼합한 실험체의 경우 7사이클에서도 카이저 효과가 나타나, 이전 연구 결과와 비교해 볼 때 펠리시티비에 의한 손상평가를 섬유보강 시멘트 복합체에 적용 가능할 것으로 판단된다.
- 2) Calm ratio에 의한 반복압축 실험체의 손상평가의 경우 calm ratio의 범위를 수정하여 0~0.2까지 설정하였으며, 0.05를 경계로 손상 단계를 구분하였고, RTRI값은 경계를 0.8이 아닌 0.6으로 낮추어 평가할 경우, 섬유보강 시멘트 복합체에서 손상이 가장 큰 3단계에서 1단계까지 정량적 평가가 가능한 것

으로 나타났다.

- 3) 휨하중 하에서 손상평가는 b-value의 범위를 1.0, 1.2, 1.7로 구분하여 정의 하였으나 섬유보강 시멘트 복합체의 경우 손상의 구분 범위가 크기 않기 때문에 1.2, 1.3, 1.4로 수정 적용 하였으며, 또한 손상에 의한 매크로 균열이 발생하게 되는 $0 < b\text{-value} < 1.2$ 범위의 경우 a값에 의한 손상을 구분하여 평가하였으며, Table 6에서 보는바와 같이 이 연구에서 구분한 손상평가를 섬유보강 시멘트 복합체에 적용하여 단계별 손상 평가가 가능할 것으로 판단된다.
- 4) 섬유보강 시멘트 복합체를 펠리시티비와 b-value에 의해 분석한 결과 일반적인 섬유보강 시멘트 복합체의 손상과 상관관계가 있는 것으로 판단된다. 또한 철근콘크리트 실험체와의 차이에서 나타나는 영향을 고려하여 기존연구의 정량적 분석방법을 섬유보강시멘트 복합체의 손상평가에 적용할 경우 음향방출 기법에 의한 정량적 손상평가가 가능할 것으로 판단되며 평가방법의 적용에 관한 세부적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2009년도 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 윤현도, 김선우, 전에스더, “섬유 혼입조건에 따른 섬유보강 고인성 시멘트 복합체의 인장거동 특성,” 대한건축학회 논문집, 22권, 12호, 2006. pp. 79~86.
2. Maji, A. K. and Shah, S. P., “Process Zone and Acoustic Emission Measurement in Concrete Experimental Mechanics,” *Experimental Mechanics*, Mar., 1988, pp. 27~33.

3. Ohtsu, M., Tomoda, Y., and Fujioka, T., “Estimation of Initial Damage in Concrete by Acoustic Emission,” *Proceedings 4th FENDT*, 1997, pp. 569~577.
4. 윤동진, 박휘립, 이승석, “철근콘크리트 빔의 노화도 평가를 위한 음향방출 기술의 응용,” 비파괴검사학회지, 20권, 4호, 2000, pp. 276~284.
5. Watanabe, T., “Compressive Failure in Concrete of Recycled Aggregate by Acoustic Emission,” *Construction and Building Materials*, 2006, pp. 470~476.
6. 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.
7. 이웅중, 조홍동, 이종열, 한상훈, “음향방출을 이용한 콘크리트의 손상도 평가,” 콘크리트학회 논문집, 14권, 5호, 2002, pp. 750~758.
8. Tam, M. T. and Weng, C. C., “Acoustic Emission Kiser Effect in Fly-Ash Cement Mortar under Compression,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, Nov., 1995, pp. 212~217.
9. Luo, X., Haya, H., Inaba, T., Shiotani, T., and Nakanishi, Y., “Damage Evaluation of Railway Structures by Using Train-Induced AE,” *Construction and Building Materials*, Oct, 2003, pp. 215~223.
10. Ohtsu, M., Uchida, M., Okamoto, T., and Yuyama, S., “Damage Assessment of Reinforced Concrete Beams Qualified by Acoustic Emission,” *ACI Structural Journal*, 2002, pp. 411~417.
11. “Recommended Practice for in Situ Monitoring of Concrete Structures by Acoustic Emission, Japanese Society for Non-destructive Inspection (NDIS),” NDIS 2421, 2000 (in Japanese).
12. Sammonds, P. R., Meredith, P. G., Murrel, S. A. F., and Main, I. G. “Modelling the Damage Evolution in Rock Containing Pore Fluid by Acoustic Emission,” Eurock '94, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 1994, pp. 897~904.

요 약 섬유는 가교작용에 의한 시멘트 복합체의 파괴를 조절할 수 있는 섬유보강 시멘트 복합체의 중요한 재료로 섬유의 혼입률에 따라 다른 파괴메커니즘을 나타내기도 한다. 일반적인 연구에서 섬유를 보강한 시멘트 매트릭스의 마이크로 메커니즘에 대한 이해를 통하여 섬유보강 시멘트 복합체의 파괴거동을 평가할 필요가 있다. 이 연구에서는 섬유보강 시멘트 복합체의 파괴거동을 평가하기 위하여, 반복압축, 휨하중 하에서 음향방출 기법에 의한 섬유보강 시멘트 복합체의 손상을 평가하고 분석하였다. 실험체는 PVA 섬유를 0, 1.0, 1.5, 2.0%를 치환한 총 4개의 실험체를 계획하였다. 기존 연구의 경우 기본적인 AE 신호에 의한 분석 방법을 제시하고 있으나 이 연구에서는 이전 연구자들에 의해 제시되었던 음향방출 기법을 이용한 정량적 손상평가를 섬유보강 시멘트 복합체에 적용하여 분석하였다. 펠리시티비에 의한 손상평가의 경우 기존 연구 결과와 같이 모든 실험체에서 카이저 효과와 함께, 펠리시티비가 0.4~1.1로 나타나 펠리시티비에 의한 섬유보강 시멘트 복합체의 손상 정도를 평가 할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 휨 실험체의 경우 손상을 평가하기 위하여 calm ratio, b-value 및 felicity ratio를 사용하였다. 이 연구의 목적은 섬유보강 시멘트 복합체의 손상을 평가하는데 있어 음향방출 기법을 활용한 정량적 손상평가 방법의 적용 가능성을 평가하고 차후 연구를 위한 기본 데이터를 확보하고자 한다.

핵심어 : 섬유보강 시멘트 복합체, 가교작용, 카이저 효과, calm ratio, b-value