

고인성 섬유보강 시멘트 모르타의 휨 피로성능

Flexural Fatigue Performance of Multiple-Cracking Type HPFRCC

한병찬* 김재환* 임승찬** 권영진*** 임남형**** 이진옥**** 장승엽*****
Han,ByungChan Kim,JaeHwan Lim,SeungChan Kwan,YoungJin Lim,NamHyoung Lee,JinOk Jang,SeungYup

ABSTRACT

High performance fiber reinforced cement composite(mortar) shows ultra high ductile behavior in the hardened state, because of the fiber bridging properties. Therefore, a variety of experiments have being performed to access the performance of the materials recently. In this study, a flexural fatigue test was carried out to investigate flexural fatigue behavior and provide basic data for fatigue design. Based on the flexural fatigue test, the fatigue safety of the high performance fiber reinforced cement mortar specimens was estimated. For the fatigue test, 10x10x40cm specimens were designed. A static flexural load test was also performed before the fatigue test to analyze the structural behavior of the specimens. The initiation of fatigue cracks in the specimens could be detected through the history of displacement range. Fatigue limit was predicted Weibull distribution using S-N relationship, and a satisfactory result was obtained.

1. 서론

고인성 섬유보강 시멘트 모르타(High Performance Fiber Reinforced Cement Composite, 이하 HPFRCC)는 균열면에서 랜덤하게 배치된 단섬유가 가교응력(Bridge Stress)을 발현하여, 균열의 발생·진전을 억제하는 미세균열(Multiple Crack)이 다수 형성되어 높은 에너지 흡수능력을 갖는다.

이러한 HPFRCC의 특징인 인장응력 하에서 다수의 미세균열 형성 및 변형경화 특성은 인장 및 휨인장의 피로에 대한 높은 내피로 특성을 가질 것으로 기대된다. 그러므로 HPFRCC가 진동이나 반복하중을 받는 철도교량이나 터널 등과 같은 구조물에 이용되는 경우, 매우 우수한 보수재료의 특성을 보일 가능성이 있으며, 특히 HPFRCC는 보수재료 자체만으로 일정부분 휨내력에 저항함으로써 보강효과를 부수적으로 얻을 수 있는 장점이 있다. 국내의 경우에도 교량구조물에 있어서는 시방서에 피로규정이 신설되는 등 반복하중에 대한 구조물의 피로거동에 관한 관심이 증가하고 있다. 그러나, 보수 및 보강효과를 갖는 HPFRCC에 대한 내피로 특성 연구는 매우 미진한 실정이며, 국외의 경우에도, 실험결과에 근거한 초보적인 연구단계에 있는 실정이다.

그러므로 본 연구에서는 HPFRCC에 사용되는 섬유의 종류에 따른 휨피로특성을 실험·실증적으로 비교·분석하고자 하였다. 또한 이를 통하여 HPFRCC에 대한 내피로성능 규정을 위한 기초 자료를 제시하고자 하였다.

* (주)에이엠에스엔지니어링, 기술이사, 공학박사, 정회원

** 日本 (주)DEROS 研究員, 工學博士

*** 호서대학교 소방방재학과, 교수, 공학박사, 정회원

**** 충남대학교 토목공학과, 교수, 공학박사, 정회원

***** 한국철도기술연구원 선임연구원, 공학박사, 정회원

2. HPFRCC의 제조 및 실험계획

2.1 실험개요

본 실험에는 매트릭스(모르터) 제조를 위하여 결합재로서 시멘트는 비중 3.15의 1종 보통포틀랜드시멘트, 혼화재는 비중 2.12의 보령산 플라이애시를 사용하였으며, 각 결합재의 물리·화학적 성질은 표 1 및 2에 나타난 바와 같다. 또한, 잔골재로서는 비중 2.64, 평균입경 0.2mm의 규사를 사용하였다(표 3). 섬유는 마이크로 섬유로서 길이 12.0mm, 직경 39 μ m인 PVA(Polyvinyl alcohol fiber), 길이 15.0mm, 직경 12 μ m인 고강도 PE(Polyethylene fiber) 섬유가 각각 사용되었다. 매크로 섬유는 32.0mm, 직경 200 μ m, 5연선의 SC(Steel cord)를 이용하였다(표 3).

본 실험에 사용된 매트릭스의 배합은 표 4에 나타난 바와 같이 물결합재비는 40%, 플라이애시 대체율은 20%, 모르터 용적에 대한 잔골재 용적비는 15%로 설정하였으며, 비빔시 섬유의 분산성 향상을 위해 메틸셀룰로오스계 증점제를 단위수량에 대하여 중량비로 0.25% 첨가하였다. 표 5는 시험체 일람을 나타낸 것이다. 시험체는 피로응력 수준을 결정하기 위한 정적 휨 시험체 5종류와 휨피로 시험체 14종류로 각각에 대하여 2개씩 제작하였다. 시험체의 크기는 100 \times 100 \times 400mm로 하였다.

표 1. 시멘트의 물리적 성질

시멘트 종류	비중	분말도 (cm ² /g)	응결도 (h:m)		강열 감량 (%)	안정 성	압축강도 (MPa)		
			초결	종결			3일	7일	28일
1종 보통	3.15	3,630	3:35	5:35	0.97	양호	22.7	29.8	38.8

표 2. 잔골재의 물리·화학적 성질

잔골재 종류	비중	흡수율 (%)	평균입경 (mm)	화 학 성 분 (%)				
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
규 사	2.64	0.38	0.20	96.9	1.44	0.34	0.11	0.03

표 3. 마이크로 및 매크로 섬유의 물리적 성질

종 류	비 중	길이 (mm)	직경 (μ m)	인장강도 (MPa)	신률 (%)	비 고
SC	7.84	32.0	200.0	2,600	-	5연선
PVA	1.30	12.0	100.0	1,600	10.0	오일링 처리
PE	0.90	15.0	12.0	2,800	-	프리즈마 처리

표 4. 매트릭스의 배합

W/B (wt.%)	FA/B ¹⁾ (wt.%)	S/M ²⁾ (vol.%)	단 위 중 량 (kg/m ³)				MC ³⁾ (W \times wt.%)
			Water	Cement	Fly-ash	Sand	
40	20	15	433	866	217	370	0.25

1) 결합재 총 중량에 대한 플라이애시의 중량비
2) 모르터 총 용적에 대한 잔골재의 용적비
3) MC ; Methyl Cellulose계 증점제

표 5. 실험계획

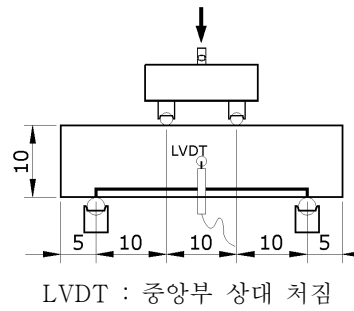
Loading Type	시험체 명	V _r ¹⁾ (vol.%)				응력수준	섬유의 형상
		Macro SC	Macro		Total		
			PVA	PE			
Flexural Static	S-Mortar	-	-	-	-	1.00	PVA
	S-PE1.0	-	-	1.00	1.00	1.00	
	S-PE1.0+SC0.5	0.50	-	1.00	1.50	1.00	
	S-PVA2.0	-	2.00	-	2.00	1.00	
	S-PVA2.0+SC0.5	0.50	-	2.00	2.50	1.00	
Flexural Fatigue	PE1.0-0.45	-	-	-	-	0.45	고강도 PE
	PE1.0-0.59	-	-	1.00	1.00	0.59	
	PE1.0-0.65	-	-	-	-	0.65	
	PE1.0-0.90	-	-	-	-	0.90	
	PE1.0+SC0.5-0.45	-	-	-	-	0.45	PE
	PE1.0+SC0.5-0.65	0.50	-	1.00	1.50	0.65	
	PE1.0+SC0.5-0.90	0.50	-	1.00	1.50	0.90	
	PE1.0+SC0.5-0.95	0.50	-	1.00	1.50	0.95	
	PVA2.0-0.45	-	2.00	-	2.00	0.45	SC
	PVA2.0-0.59	-	2.00	-	2.00	0.59	
	PVA2.0-0.90	-	2.00	-	2.00	0.90	
	PVA2.0+SC0.5-0.45	0.50	-	2.00	2.50	0.45	
PVA2.0+SC0.5-0.65	0.50	-	2.00	2.50	0.65		
PVA2.0+SC0.5-0.90	0.50	-	2.00	2.50	0.90		

1) 모르터 총 용적에 대한 섬유의 체적 혼입율 (V_r)

2.2 가력 및 측정방법

정적 휨시험 및 휨피로시험은 4점 휨시험 방법(Four point bending test)을 이용하였으며 200kN 용량의 피로시험기를 사용하였다. 도입할 피로응력을 결정하기 위한 정적시험의 경우는 재하속도가 2mm/min로써 변위제어 하였다.

휨피로시험의 경우 단진재하로써, 정적 재하시험으로부터 얻은 평균 휨강도에 대하여 각각의 도입 피로응력에 해당하는 하중을 가력하는 하중제어방식을 택하였다. 피로하중의 형태는 사인파(Sinusoidal load)로 하였으며, 최대 도입 피로응력으로부터 최대 휨강도의 10%까지를 가력 영역으로 선정하였고, 재하속도는 6Hz로 하였다. 측정은 동적변형측정기를 이용하여 하중, 변위, 그리고 변형특성을 필요시 240Hz의 속도로 3초간 수집한 후 측정결과를 정리하였다. 시험체에 부착된 측정 장치 및 시험상황은 그림 1과 같다.



(a) 측정 장치

(b) 가력 상황

그림 1. 시험장치 및 측정장치

3. 정적 휨 거동 특성

표 6 및 그림 2는 섬유 종류에 따른 휨강도 및 변위를 나타낸 것으로 최대 휨강도의 경우 단섬유로 보강한 HPFRCC(13.84 ~ 17.37MPa)가 모르터(4.96MPa)에 비하여 2.79 ~ 3.50배 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 최대 휨강도시 중앙부 처짐에 있어서도 모르터(0.089mm)에 비하여 HPFRCC의 경우 1.72 ~ 4.21mm로써 매우 큰 변형성을 보이고 있었다. 모든 HPFRCC는 초기균열 이후에도 응력이 증가하며 다수의 균열을 발생시키는 유사변형경화현상을 나타내었다. 섬유 종류별 휨강도 비교에서는 PVA2.0+SC0.5 시험체가 가장 크게 나타났으며 PVA2.0이 가장 작게 평가되었다. 한편 최대 휨응력시 처짐 특성은 PE1.0 시험체가 4.21mm로써 가장 큰 변형특성을 보였다.

표 6. 정적 휨성능 실험결과

시험체명	측정 결과				
	초기 균열 응력 (MPa)	초기 균열시 변위량 (mm)	최대 휨응력 (MPa)	최대 휨응력시 변위량 (mm)	초기/최대 응력
S-Mortar	4.96	0.089	4.96	0.089	1.00
S-PE1.0	5.74	0.206	11.20	2.82	1.95
S-PE1.0+SC0.5	5.80	0.246	12.25	2.39	2.11
S-PVA2.0	5.54	0.127	12.87	1.89	2.32
S-PVA2.0+SC0.5	7.54	0.192	16.15	2.28	2.14

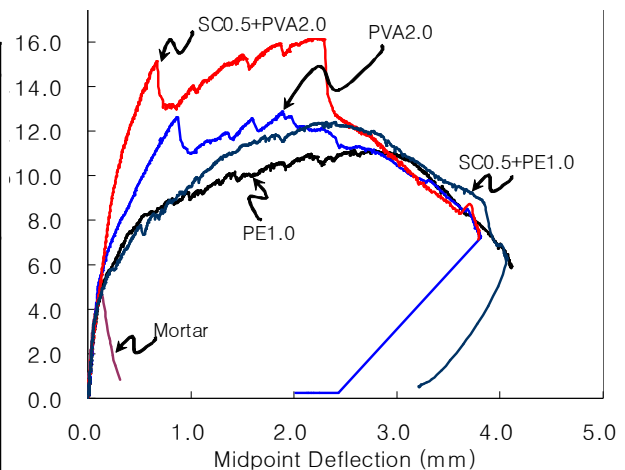


그림 2. 정적 휨시험 시 응력-변형을 곡선

4. 휨 피로 특성

4.1 휨 피로시 균열 및 파괴특성

표 7 및 그림 3~6은 각각 도입된 피로응력에 대한 반복회수시 처짐 및 휨응력도-변형률 관계의 실험 결과를 나타낸 것이다. PE섬유를 1.0% 혼입한 PE1.0 시리즈의 경우 피로응력비 0.4에서는 1000000 반복회수까지도 파괴가 발생하지 않았으며, 이를 고려하여 피로응력비를 0.45로 증가시킨 PE1.0+SC0.5

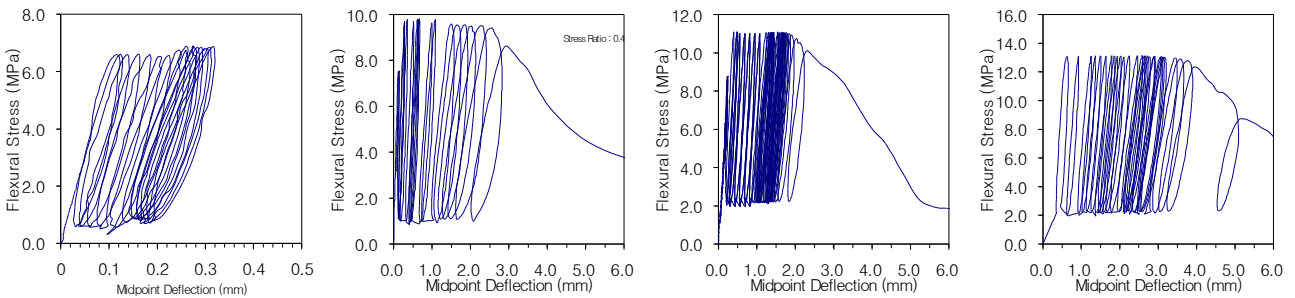
및 PVA2.0, 그리고 PVA2.0+SC0.5시험체의 경우도 반복회수 100000 이상까지 파괴되지 않음을 알 수 있었다. 그러나 피로응력비가 증가할수록 파괴 시 반복회수는 급격히 감소하였다.

초기균열은 섬유의 종류 및 변수별 피로 응력에 관계없이 모든 시험체의 하단 중앙부에서 발생하였으며 피로반복회수가 증가하면서 상부로 진전되었다. 그러나 모르타 시험체와는 다르게 초기 균열 이후에도 시험체는 급격히 파괴되지 않았으며 상부로 균열이 진전되는 동시에 균열이 분산되는 특성을 관찰할 수 있었다. 최종파괴는 분산된 미세 균열 중 하나의 균열 폭이 급작스럽게 증가(Localized)하면서 파괴되었다. 그림 7은 피로응력비 별 균열 분산특성을 예시한 것이다. 정적 휨거동 특성과 마찬가지로 본 연구에서 대상으로 하는 HPFRCC은 피로하중 하에서 휨균열 이후 상부로의 진전과 함께 분산된 미세균열(Multiple Crack)이 발생하였으며, 피로 응력비 높아질수록(그림 7(b)) 균열수도 증가함을 알 수 있었다. 한편, 피로응력비가 낮은 경우(그림 7(a)) 상대적으로 분산된 균열의 수가 감소하는 것을 알 수 있었으나 이는 매트릭스내에 작용하는 응력레벨이 작기 때문으로 판단되었다.

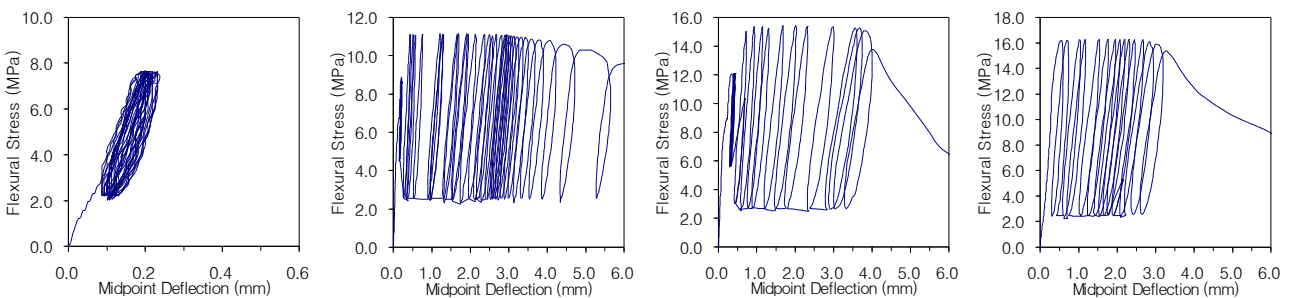
표 7. 실험결과

시험체명	피로 응력 MPa	반복회수 시 처짐(회/Log)						파괴시 반복 회수
		10	100	1000	10000	100000	1000000	
		1 ¹⁾	2	3	4	5	6	
PE1.0-0.40	6.68	0.138	0.161	0.185	0.209	0.282	0.311	-
PE1.0-0.59	9.86	0.290	0.357	0.527	0.649	-	-	37954
PE1.0-0.65	11.06	0.375	0.408	0.486	-	-	-	7712
PE1.0-0.90	15.04	0.932	1.372	-	-	-	-	760
PE1.0+SC0.5-0.45	7.66	0.194	0.194	0.200	0.219	0.229	0.231	-
PE1.0+SC0.5-0.65	11.06	0.385	0.439	0.523	-	-	-	5610
PE1.0+SC0.5-0.90	15.34	0.735	0.956	-	-	-	-	722
PE1.0+SC0.5-0.95	16.17	1.181	1.775	-	-	-	-	719
PVA2.0-0.45	6.23	0.189	0.121	0.175	0.204	0.267	0.304	1205890
PVA2.0-0.59	8.17	0.112	0.302	0.367	0.474	1.102	-	113086
PVA2.0-0.90	12.46	0.625	0.756	-	-	-	-	306
PVA2.0+SC0.5-0.45	7.82	0.124	0.218	0.277	0.317	0.398	0.470	-
PVA2.0+SC0.5-0.65	11.29	0.469	0.546	0.663	0.775	-	-	79547
PVA2.0+SC0.5-0.90	15.63	0.621	0.782	1.173	1.863	-	-	13908

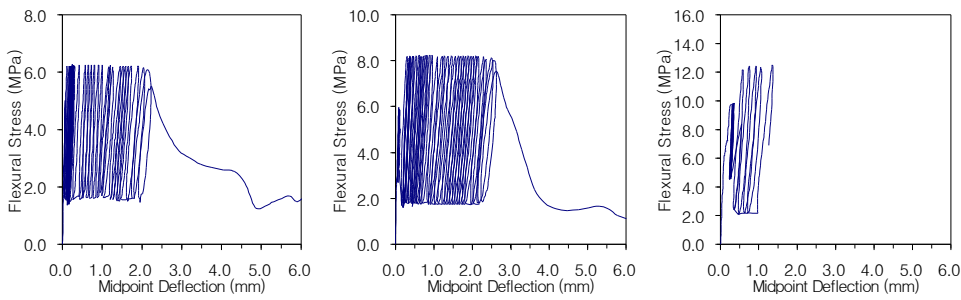
1) 반복회수에 대한 로그(Log₁₀)



(a) 피로응력비 0.4의 경우 (b) 피로응력비 0.59의 경우 (c) 피로응력비 0.65의 경우 (d) 피로응력비 0.90의 경우
그림 3. PE1.0시리즈의 도입 피로응력별 거동특성



(a) 피로응력비 0.4의 경우 (b) 피로응력비 0.65의 경우 (c) 피로응력비 0.90의 경우 (d) 피로응력비 0.95의 경우
그림 4. PE1.0+SC0.5시리즈의 도입 피로응력별 거동특성

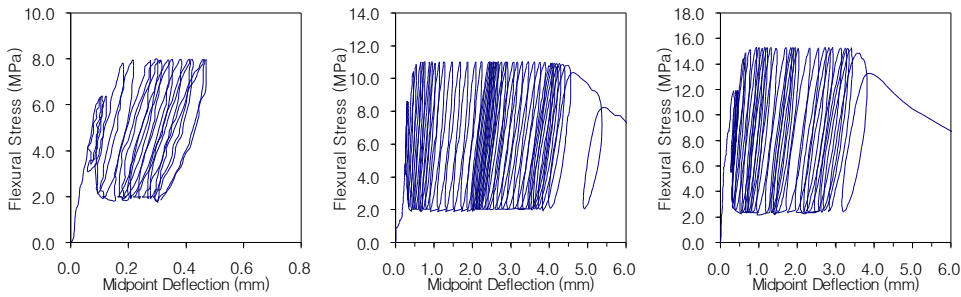


(a) 피로응력비 0.45의 경우 (b) 피로응력비 0.59의 경우 (c) 피로응력비 0.90의 경우

그림 5. PVA2.0시리즈의 도입 피로응력별 거동특성



(a) 피로응력비 0.4의 경우



(a) 피로응력비 0.45의 경우 (b) 피로응력비 0.65의 경우 (c) 피로응력비 0.90의 경우

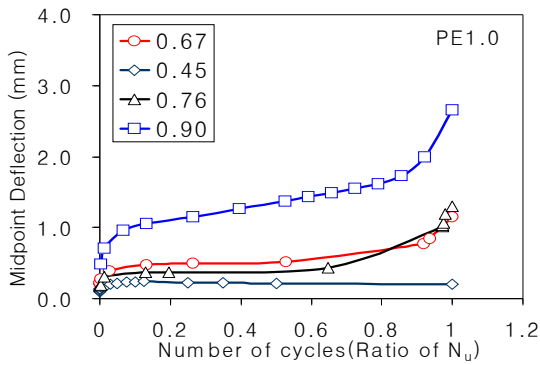
그림 6. PVA2.0+SC0.5시리즈의 도입 피로응력별 거동특성



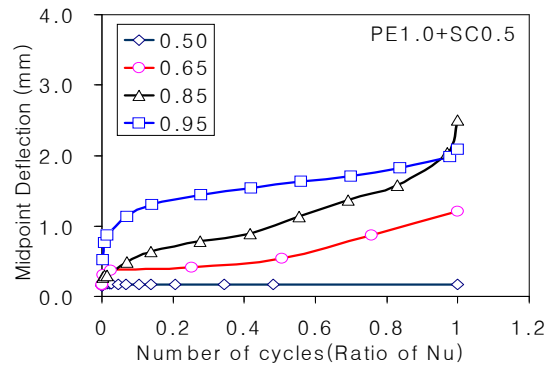
(b) 피로응력비 0.90의 경우

그림 7. 피로응력비 별 균열 분산 특성 예(PE1.0 Series)

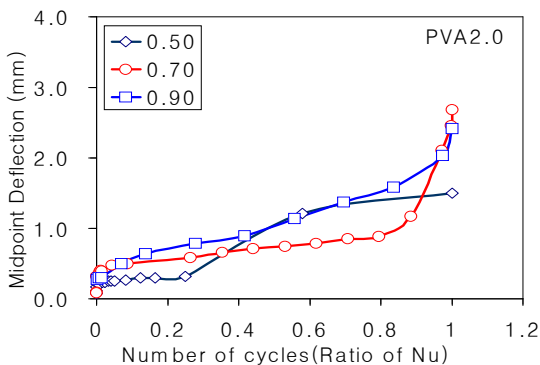
그림 8은 반복회수에 따른 중앙부 처짐 진전상황을 나타낸 것이다. 그림으로부터, 피로응력비가 0.6~0.8의 범위에서는 반복회수의 증가에 따라 처짐량도 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 사용피로하중 중 미세균열의 확산과 함께 대변형으로 진전되는 HPFRCC의 특성을 잘 보여주고 있다고 할 수 있다. 일반적인 시멘트 복합체의 경우 사용피로하중 하에서 반복하중의 증가에 따른 처짐의 증분은 일정한 것에 비추어 HPFRCC의 경우는 대변형까지 안정적인 거동을 보임을 알 수 있다.



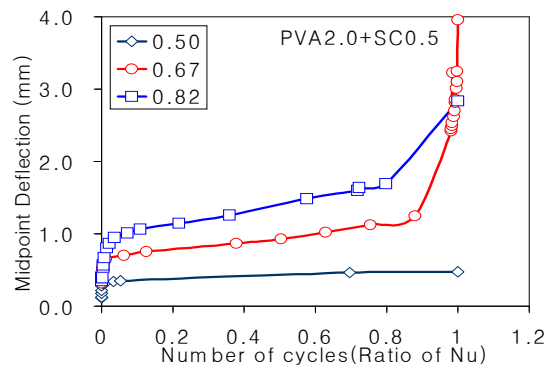
(a) PE1.0 Series



(b) PE1.0+SC0.5 Series

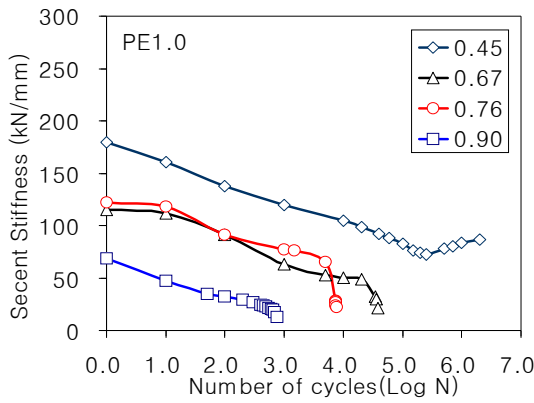


(c) PVA2.0 Series

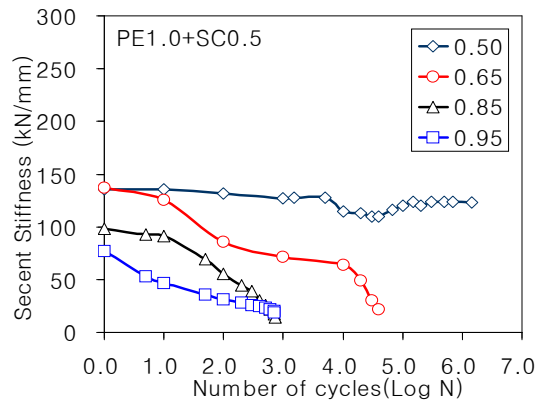


(d) PVA2.0+SC0.5 Series

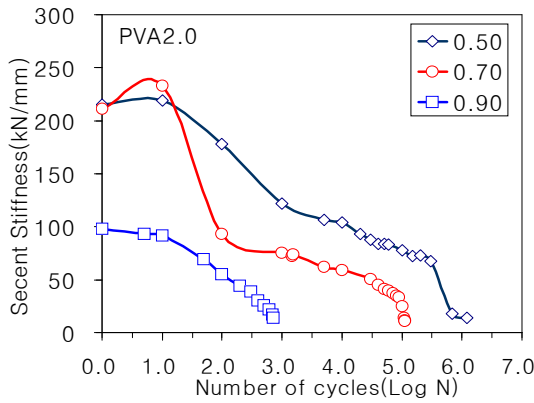
그림 8. 반복회수에 따른 중앙부 처짐 진전 상황



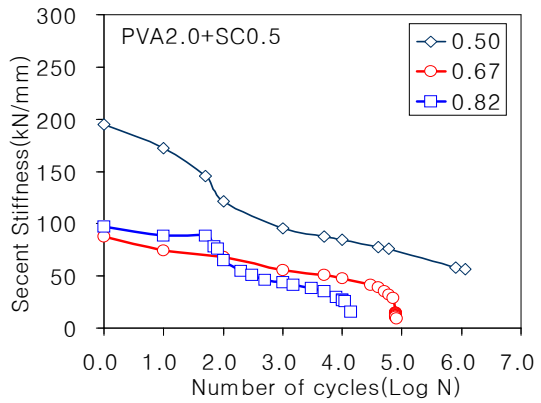
(a) PE1.0 Series



(b) PE1.0+SC0.5 Series



(c) PVA2.0 Series



(d) PVA2.0+SC0.5 Series

그림 9. 반복회수에 따른 시켄트 강성 변동상황

그림 9는 반복회수에 따른 시험체의 시켄트 강성(Seccent Stiffness)의 변동추이를 나타낸것이다. 일반적으로 시멘트 복합체는 반복회수 1000에서 100번까지는 동적강성의 변화가 미세한 것으로 알려져 있다. 이는 최대모멘트가 작용하는 부분에 있어 사용하중 범위에서는 실질적으로 강성이 더 이상 감소되지 않기 때문이다. 반면, 본 연구에서 대상으로 하는 HPFRCC의 경우에는 강성이 계속 감소하는 것을 알 수 있는데 이는 지속적인 균열발전이 원인으로 판단되었다. 이를 통하여 HPFRCC의 휨피로하중에 대한 거동은 마치 금속재와 같은 거동 특성을 보이고 있음을 알 수 있다.

반복 피로하중을 받는 HPFRCC에 대한 균열 및 거동특성을 분석한 결과, 정적 휨거동과 마찬가지로, 반복 휨피로 하에서도 HPFRCC은 매우 연성적인 거동을 보이고 있음을 알 수 있었다(표 7, 그림 3~5). 또한 이러한 연성적인 거동은 초기 균열이후 균열의 진전과 함께 발생하는 분산 미세 균열과, 균열 사이의 섬유가 발현하는 가교작용에 의한 것으로 판단되었다.

4.2 피로수명

그림 10에 도입된 피로강도에 대한 파괴시 반복회수의 관계를 나타내었으며, 파괴시까지의 휨피로 반복회수(N_u)에 대한 도입된 피로응력 비(S)의 관계(S-N)를 그림 11에 나타내었다. 그림으로부터 섬유의 종류에 상관없이 HPFRCC의 경우 휨피로 수명이 매우 큰 것을 알 수 있다. 또한 휨피로응력 레벨 S와 파괴시 반복회수(N_u)의 상관관계는 다음과 같이 회귀되었다.

PE1.0 시리즈

$$S = 1.273 - 0.131 \text{Log}(N_u) \quad 2 \leq N_u \leq 10^6 \quad (1)$$

PE1.0+ SC0.5 시리즈

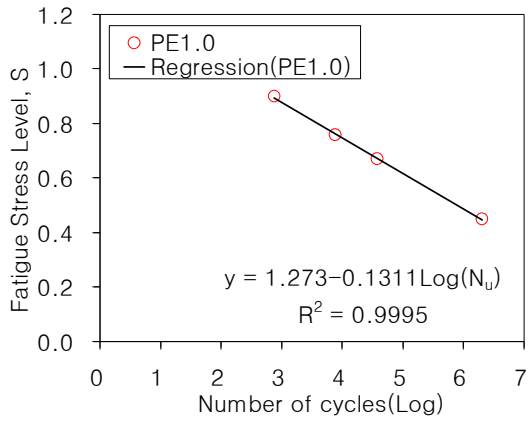
$$S = 1.137 - 0.108 \text{Log}(N_u) \quad 2 \leq N_u \leq 10^6 \quad (2)$$

PVA2.0 시리즈

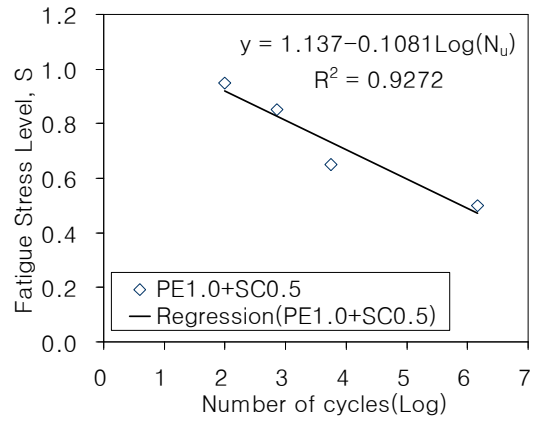
$$S = 1.176 - 0.105 \text{Log}(N_u) \quad 2 \leq N_u \leq 10^6 \quad (3)$$

PVA2.0+ SC0.5 시리즈

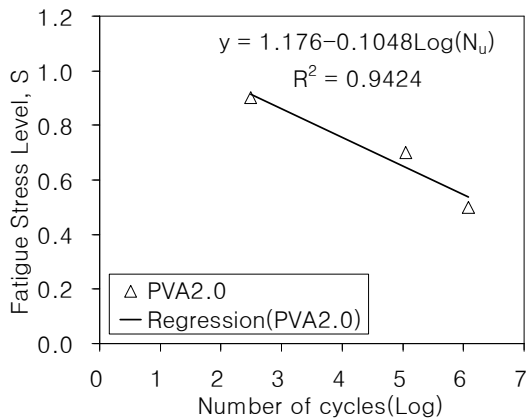
$$S = 1.495 - 0.165 \text{Log}(N_u) \quad 3 \leq N_u \leq 10^6 \quad (4)$$



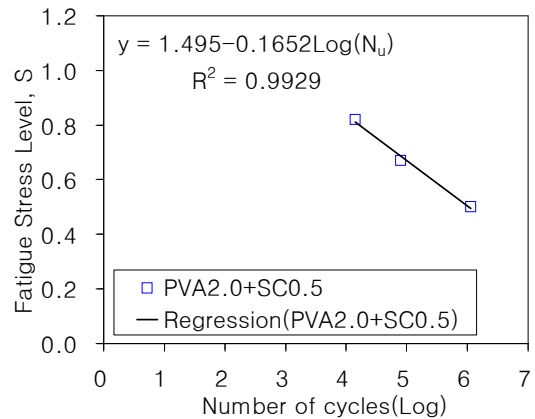
(a) PE1.0 Series



(b) PE1.0+SC0.5 Series



(c) PVA2.0 Series



(d) PVA2.0+SC0.5 Series

그림 10. 섬유 종류별 피로강도비-파괴시 반복회수의 상관관계

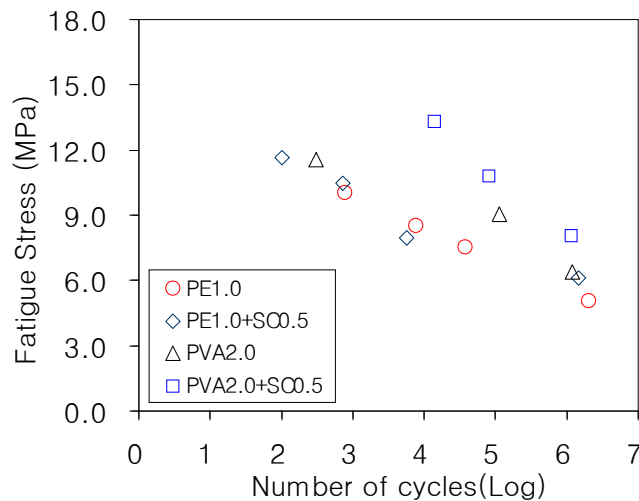


그림 11. 섬유 종류별 피로강도-파괴시 반복회수의 상관관계

5. 결 론

HPFRCC에 사용되는 섬유 종류에 따른 휨피로 특성을 실험·실증적으로 비교·분석하고자 한 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 본 연구의 범위인 섬유 혼입율 PE 1.0% 및 PVA 2.0%와 PE1.0%+SC0.5% 및 PVA2.0%+SC0.5%를 하이브리드한 조건에서는 휨피로 응력비 0.4 이하에서 피로파괴가 발생하지 않았다.

(2) 정적 휨거동과 마찬가지로, 반복 휨 피로하중 하에서도 HPFRCC은 매우 연성적인 거동 특성을 보이고 있음을 알 수 있었다.

(3) 구조부재에 HPFRCC을 적용하는 경우 내피로 성능을 검토하기 위해서는 휨 피로하중을 받는 HPFRCC에 대한, 파괴 메카니즘 및 파괴특성에 관한 해석 모델의 정립이 필요하며 이를 위한 보다 심도 있는 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) 윤현도, 양일승, 한병찬, 福山洋, 전에스더, 문연준(2004), "복합섬유 보강 고인성 시멘트 복합체의 인장 거동," 대한건축학회 춘계학술발표대회논문집, pp.55-58
- 2) 김무한 외, "섬유종류 및 잔골재용적비에 따른 HPFRCC의 공학적 특성에 관한 실험적 연구", 대한건축학회 봄 학술발표대회 논문집, Vol.24, No.1, pp.315~318, 2004.04
- 3) Li, V. C., " From Micromechanics to Structural Engineering-The Design of Cementitious Composites for Civil Engineering Application", Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, Vol. 10, No. 2, pp37-48, 1993
- 4) Matsumoto, T., and Li, V. C., "Fatigue Life Analysis of Fiber Reinforced Concrete with a Fracture Mechanics Based Model", Journal of Cement and Concrete Composites, Vol.21, No 4, pp 24