

고인성 섬유보강 시멘트 모르타의 휨피로거동

Flexural Fatigue Behavior of High Performance Fiber Reinforced Cement Mortar

임 남 형* / 이 진 옥** / 장 선 재*** / 류 효 진****
Lim, Nam-Hyoung / Lee, Chin-Ok / Jang, Sun-Jae / Ryu, Hyo-Jin

Abstract

A laboratory investigation was conducted to characterize the flexural fatigue behavior of high performance fiber reinforced cement mortar. Five specimens for statics flexural test and fourteen specimens for the flexural fatigue test were made based on the fiber mixing ratio. Static flexural tests were firstly performed to obtain magnitudes of static failure loads and stress levels before flexural fatigue tests. The flexural fatigue behaviors were investigated based on the stress level and fiber mixing ratio. Also, the equations for the interrelation of the flexural fatigue stress levels with the number at loading cycle were proposed.

key words : Fiber reinforced cement; Flexural fatigue; Fatigue crack; Fiber mixing ratio

요 지

고인성 섬유보강 시멘트 모르타의 휨피로 거동을 규명하고자 실내실험을 실시하였다. 정적 휨실험과 휨피로 실험을 위해 섬유혼입율에 따라 5개의 시험체와 14개의 시험체를 각각 제작하였다. 휨피로 시험에 앞서서 정적 파괴하중과 응력수준을 결정하기 위하여 정적 휨시험이 실시되었다. 피로응력수준과 섬유혼입율에 따른 휨피로 거동을 분석하였으며 휨피로응력수준과 파괴시 하중반복회수와의 상관관계식을 제안하였다.

핵심용어 : 섬유보강 시멘트; 휨 피로; 피로 균열; 섬유 혼입율

1. 서 론

최근 보다 내구적이고 구조성능이 뛰어난 건설 신 재료의 개발 및 구조물에의 활용성에 관한 연구가 주목받고 있다. 산업의 발전과 더불어 사회간접자본시설의 확충과 대형고층빌딩, 장대교량 등 구조물의 대형화로 인해 콘크리트의 단점을 보완하기 위한 기술

이 새로이 연구되고 있다. 콘크리트의 재료적 보완측면에서 고강도 콘크리트를 비롯하여 섬유보강 콘크리트 등 콘크리트의 취성적인 성질과 매우 낮은 균열성장저항성을 개선할 목적으로 많은 연구가 진행되고 있다. 여러 연구 중에서도 최근 고인성 섬유보강 시멘트에 대한 연구가 많은 관심을 받고 있으며 국내에서도 활발한 연구가 이루어지고 있다(윤현도 등, 2004; 김무한 등, 2004).

* 정회원 · 충남대학교 토목공학과 교수(E-mail : nhrim@cnu.ac.kr)

** 정회원 · 충남대학교 토목공학과 교수

*** 충남대학교 토목공학과 박사과정

**** 충남대학교 토목공학과 박사과정

고인성 섬유보강 시멘트는 1970년대부터 꾸준히 연구되고 있으며 1990년대 초반 ECC (Engineered cementitious composites)로부터 최근의 다른 2종 이상의 섬유를 보강한 하이브리드 섬유 보강 시멘트까지 다양하게 연구가 진행되고 있다(Matsumoto and Li, 1999 ; Tepfers, 1979).

고인성섬유보강 시멘트모르타 (High Performance Fiber Reinforced Cement Mortar, 이하 HPFRM)는 불규칙하게 배치된 단섬유가 균열이 발생한 면에서 가교응력(Bridge Stress)을 발휘하여, 균열의 발생·진전을 억제하게 되며 이로 인해 미세균열(Multiple Crack)이 다수 형성되어 높은 에너지 흡수 능력을 갖도록 하는 신재료이다(Naaman and Reinhardt, 1996 ; Glucklich, 1962).

이러한 HPFRM의 특징인 미세균열 형성 및 변형 경화 특성은 인장 및 휨인장의 피로에 대한 높은 내피로 특성을 가질 것으로 기대된다. 그러므로 HPFRM이 진동이나 반복하중을 받는 교량 등과 같은 구조물에 적용되는 경우, 매우 우수한 보수재료의 특성을 보일 가능성이 있다. 국내의 경우에도 교량구조물에 있어서는 시방서에 피로규정이 신설되는 등 반복하중에 대한 구조물의 피로거동에 관한 관심이 증가하고 있다. 그러나, 보수재료로서의 HPFRM에 대한 내피로 특성의 연구는 매우 미진한 실정이며 실험결과에 근거한 초보적인 연구단계에 있는 실정이다(Shah and winter, 1966 ; Romualdi and Batson, 1963 ; Victo and Li, 2002 ; Fukuyama 등, 2000).

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

2. 정적 휨 시험

2.1 HPFRM 시험편 제조

본 실험에는 모르타 제조를 위하여 결합재로서 시멘트는 비중 3.15의 1종 보통포틀랜드시멘트, 혼화재는 비중 2.12의 보령산 플라이애시를 사용하였다.

잔골재로서는 비중 2.64, 평균입경 0.2mm의 규사를 사용하였다.(Table 1) 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.(Table 2, Fig. 1)

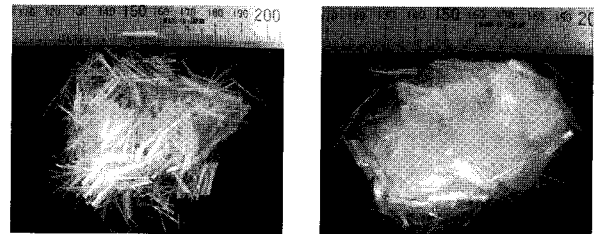
본 실험에 사용된 매트릭스의 배합은 물결합재비는 40%, 플라이애시 대체율은 20%, 모르타 용적에 대한 잔골재 용적비는 15%로 설정하였다. 비빔시 섬유의 분산성 향상을 위해 메틸셀룰로오스계 증점제를 단위수량에 대하여 중량비로 0.25% 첨가하였다.(Table 3)

Table 1. Physical nature of Cement

cement	Specific Gravity	Fineness (cm ² /g)	Coagulation		Ignition Loss Rate (%)	Compressive Strength (MPa)		
			Initial	Final		3	7	28
Normal Portland Cement	3.15	3,630	3:35	5:35	0.97	22.7	29.8	38.8

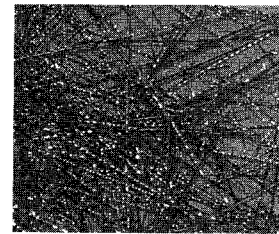
Table 2. Physical nature of Fiber

Fiber	Specific Gravity	Length (mm)	Diameter (μ m)	Tensile Strength (MPa)	Elongation Rate (%)	Characteristic
SC	7.84	32.0	200.0	2,600	-	5stranded wire
PVA	1.30	12.0	100.0	1,600	10.0	Oiling
PE	0.90	15.0	12.0	2,800	-	Plasma



(a) PVA

(b) PE



(c) SC

Fig. 1. Form of Fiber

Table 3. Cement Mixing Ratio

W/B (wt.%)	FA/B ¹⁾ (wt.%)	S/M ²⁾ (vol.%)	Unit Weight (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) 모르타 총 용적에 대한 잔골재의 용적비
- 3) MC ; Methyl Cellulose계 증점제

Table 4. Experiment Plan

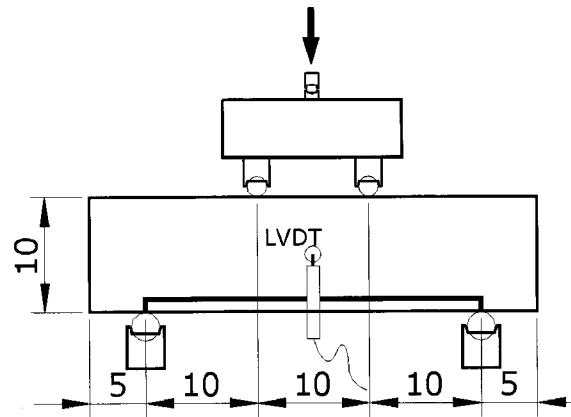
Loading Type	Test Name	$V_f^{(1)}$ (vol.%)				Fatigue stress ratio
		Macro		Micro		
		SC	PVA	PE	Total	
Static	S-Mortar	-	-	-	-	1.00
	S-PE1.0	-	-	1.00	1.00	1.00
	S-PE1.0+SC0.5	0.50	-	1.00	1.50	1.00
	S-PVA2.0	-	2.00	-	2.00	1.00
	S-PVA2.0+SC0.5	0.50	-	2.00	2.50	1.00
Fatigue	PE1.0-0.40	-	-	-	-	0.40
	PE1.0-0.59	-	-	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
	PE1.0+SC0.5-0.65	0.50	-	1.00	1.50	0.65
	PE1.0+SC0.5-0.90	-	-	-	-	0.90
	PE1.0+SC0.5-0.95	-	-	-	-	0.95
	PVA2.0-0.45	-	-	-	-	0.45
	PVA2.0-0.59	-	2.00	-	2.00	0.59
	PVA2.0-0.90	-	-	-	-	0.90
	PVA2.0+SC0.5-0.45	-	-	-	-	0.45
	PVA2.0+SC0.5-0.65	0.50	-	2.00	2.50	0.65
	PVA2.0+SC0.5-0.90	-	-	-	-	0.90

1) 모르터 총 용적에 대한 섬유 혼입의 체적 혼입율 (V_f)

Table 4는 실험체 일람을 나타낸 것이다. 시험체는 피로응력 수준을 결정하기 위한 정적 휨 시험체 5종류와 휨피로 시험체 14종류로 제작하였다. 시험체의 크기는 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 의 휨몰드를 이용하였다. 정적최대 인장응력에 대한 휨피로 응력수준의 비를 피로응력비로 하여 실험을 진행하였다.

2.2 시험방법 및 정적 휨 피로거동

정적 휨시험 및 휨피로시험은 Fig. 2 와 같은 4점 휨시험 방법(Four point bending test)을 이용하였으며 200kN 용량의 피로시험기를 사용하였다. 도입할 피로응력을 결정하기 위한 정적시험의 경우는 재하속도가 $2\text{mm}/\text{min}$ 로써 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 6Hz 로 하였다. 측정은 동적변형측정기를 이용하여 하중, 변위, 그리고 변형특성을 240Hz 의 속도로 3초간 수집한 후 측정결과를 정리하였다. 시험상황은 Fig. 3과 같다.



LVDT : Midpoint Deflection
Fig. 2. Measuring Instrument

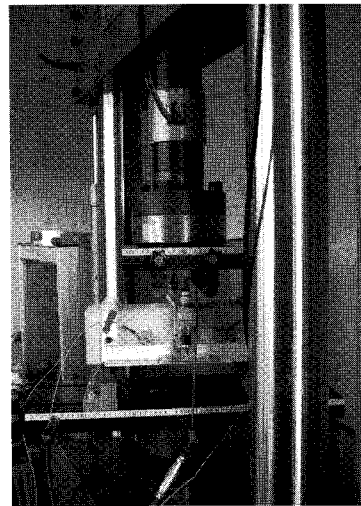


Fig. 3. Test Equipment

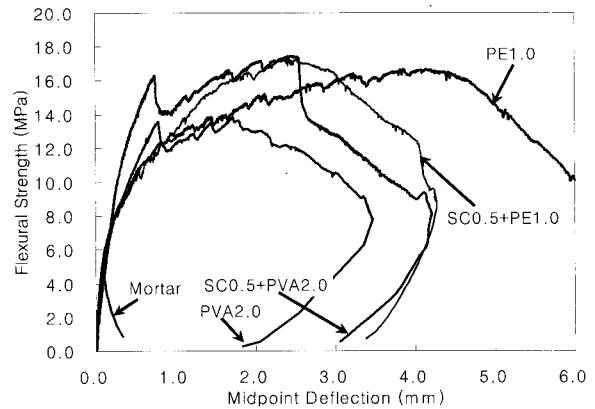


Fig. 4. Comparison of HPFRCM in Flexural Test

Table 5 및 Fig. 4는 섬유 종류에 따른 시험결과를 나타내는데 최대 휨강도의 경우 단섬유로 보강한 HPFRCM의 최대인장응력은 $13.84 \sim 17.37\text{MPa}$ 로 일반 몰탈 최대인장응력 4.96MPa 에 비하여 2.79 ~ 3.50배 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 최대 휨강도시 중앙부 처짐에 있어서도 일반 몰탈 0.089mm 에

비하여 HPFRCM의 경우 1.72~4.21mm로써 매우 큰 변형성능을 보이고 있다. 모든 HPFRCM은 초기균열 이후에도 약 2배 이상의 휨응력에도 견디며 다수의 균열을 발생시키는 변형경화현상을 나타내었다. 섬유 종류별 휨강도 비교에서는 S-PVA2.0+SC0.5 시험체가 가장 크게 나타났으며 S-PVA2.0이 가장 작게 평가되었다. 한편 최대 휨응력시 처짐 특성은 PE1.0 시험체가 4.21mm로써 가장 큰 변형특성을 보였다.

Table 5. Static Flexural Test

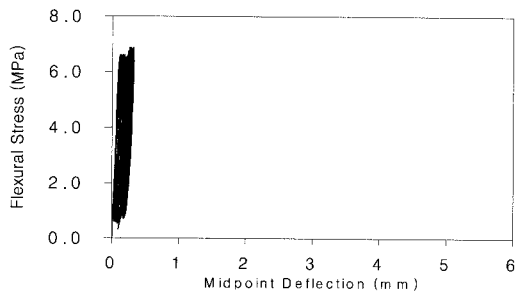
Test	Measurement				Ms/Is ¹⁾
	Initial crack stress (MPa)	Initial crack strain (mm)	max flexural stress (MPa)	max deflection (mm)	
S-Mortar	4.96	0.089	4.96	0.089	1.00
S-PE1.0	8.56	0.307	16.71	4.21	1.95
S-PE1.0+SC0.5	8.05	0.265	17.02	2.58	2.11
S-PVA2.0	5.96	0.115	13.84	1.72	2.32
S-PVA2.0+SC0.5	8.11	0.213	17.37	2.53	2.14

1) Ms/Is =max flexural stress/Initial crack stress

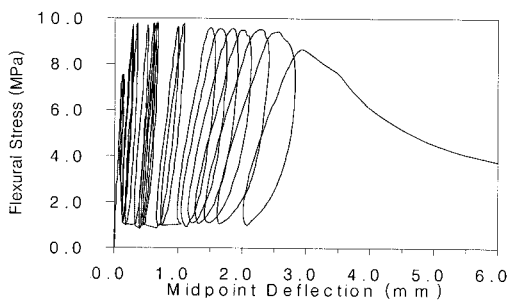
3. 휨 피로 특성

3.1 휨피로시 균열 및 파괴 특성

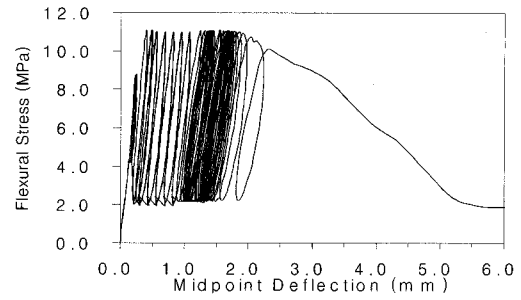
Table 6 및 Fig. 5~8은 각각 도입된 휨피로 응력 수준에 대한 휨응력과 중앙부 처짐과의 관계를 나타낸 것이다.



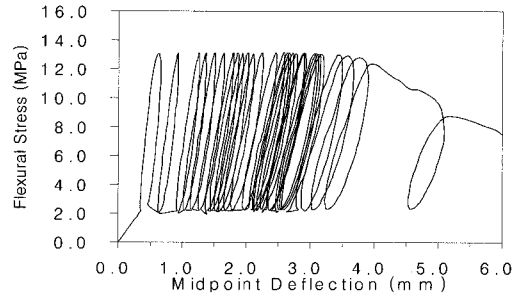
a) Fatigue Stress Ratio 0.4



b) Fatigue Stress Ratio 0.59

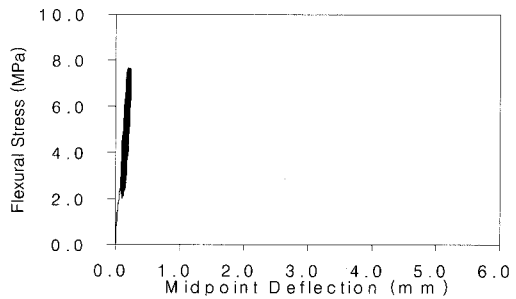


c) Fatigue Stress Ratio 0.65

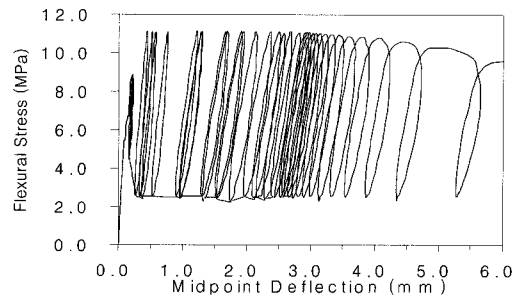


d) Fatigue Stress Ratio 0.90

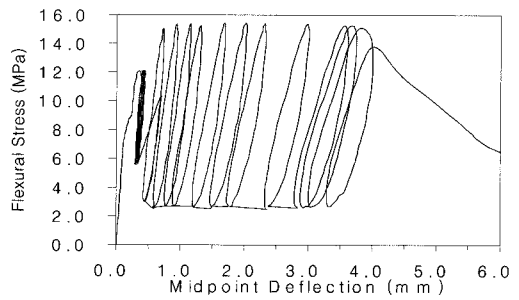
Fig. 5. Fatigue Behavior of PE 1.0 series



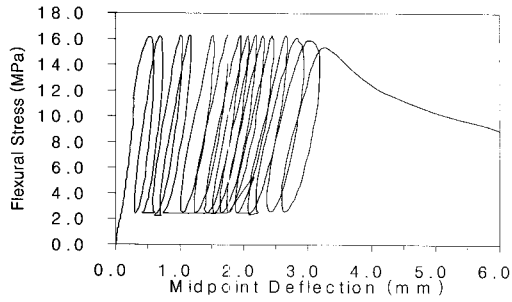
a) Fatigue Stress Ratio 0.45



b) Fatigue Stress Ratio 0.65

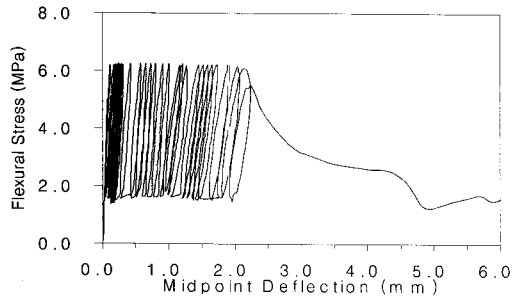


c) Fatigue Stress Ratio 0.90

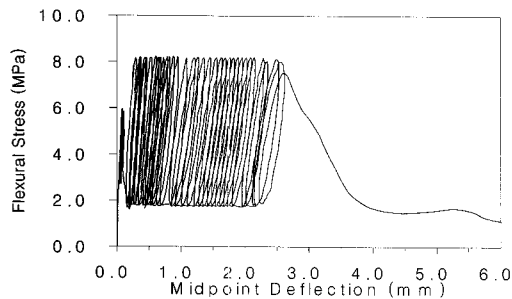


d) Fatigue Stress Ratio 0.95

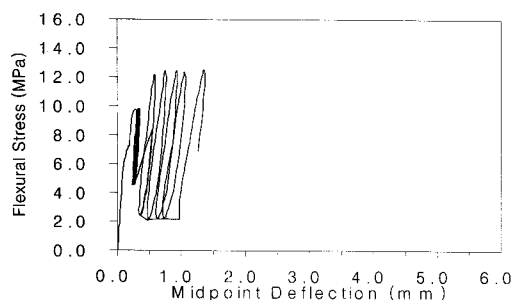
Fig. 6 Fatigue Behavior of PE1.0+SC0.5 series



a) Fatigue Stress Ratio 0.45

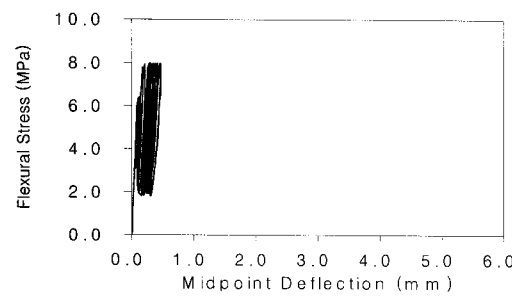


b) Fatigue Stress Ratio 0.59

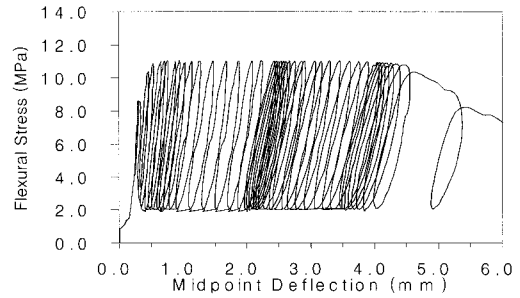


c) Fatigue Stress Ratio 0.90

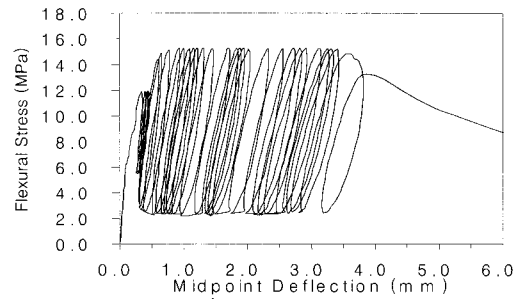
Fig. 7. Fatigue Behavior of PVA 2.0 series



a) Fatigue Stress Ratio 0.45



b) Fatigue Stress Ratio 0.65



c) Fatigue Stress Ratio 0.90

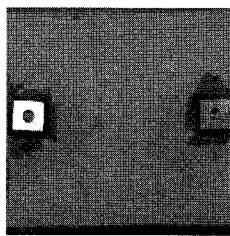
Fig. 8. Fatigue Behavior of PVA 2.0+SC 0.5 series

Table 6. Flexural fatigue Test

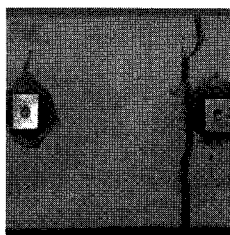
Test Model	Fatigue stress MPa	Log Number of Loading Cycle at Midpoint Deflection						Number of Loading Cycle at Fracture
		10	100	1000	10000	100000	1000000	
		1	2	3	4	5	6	
PE1.0-0.40	6.68	0.138	0.161	0.185	0.209	0.282	0.311	-
PE1.0-0.59	9.86	0.290	0.357	0.527	0.649	-	-	37954
PE1.0-0.65	10.86	0.375	0.408	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	15.32	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	-
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

PE섬유를 1.0% 혼입한 PE1.0 시리즈의 경우 피로 응력비 0.4에서는 백만번의 반복회수까지도 파괴가 발생하지 않았으며, 이를 고려하여 피로응력비를 0.45로 증가시킨 PE1.0+SC0.5 및 PVA2.0, 그리고 PVA2.0+SC0.5시험체의 경우도 반복회수 백만번이상까지 파괴되지 않음을 알 수 있었다. 그러나 피로응력비가 증가할수록 파괴시 반복회수는 급격히 감소하였다. 초기균열은 섬유의 종류 및 피로응력비에 관계없이 모든 시험체의 하단 중앙부에서 발생하였으며 피로반복회수가 증가하면서 상부로 진전되었다. 그러나 일반 몰탈 시험체와는 다르게 초기 균열 이후에 시험체는 급격히 파괴되지 않았으며 상부로 균열이 진전되는 동시에 균열이 분산되는 특성을 관찰할 수 있었다. 최종파괴는 분산된 미세 균열 중 하나의 균열 폭이 급작스럽게 증가하면서 파괴되었다. Fig. 9는 피로응력비 별 균열 분산특성을 예시한 것이다. 정적 휨거동 특성과 마찬가지로 본 연구에서 대상으로 하는 HPFRCM은 피로하중 하에서 휨균열 이후 상부로의 진전과 함께 분산된 미세균열(Multiple Crack)이 발생하였으며, 피로 응력비가 높아질수록 균열수도 증가함을 알 수 있었다. 한편, 피로응력비가 낮은 경우 상대적으로 분산된 균열의 수가 감소하는 것을 알 수 있었으나 이는 매트릭스내에 작용하는 응력레벨이 작기 때문으로 판단되었다.

Fig. 10-13은 반복회수에 따른 중앙부 처짐 진전 상황을 나타낸 것으로 피로응력비가 0.6-0.8의 범위에서는 반복회수의 증가에 따라 처짐량도 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 사용피로하중 중 미세균열의 확



(a) Fatigue Stress Ratio0.4



(b) Fatigue Stress Ratio0.9

Fig. 9. Crack of Fatigue Stress Ratio(PE 1.0)

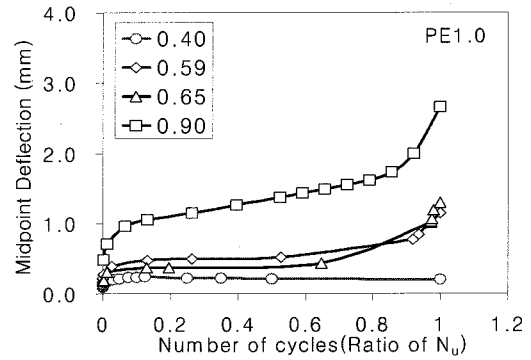


Fig. 10. Midpoint Deflection .VS. Log Number of Cycle(P.E1.0)

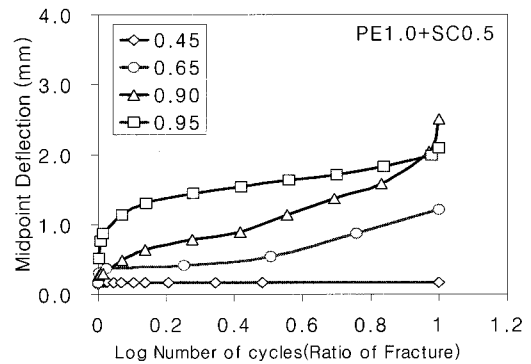


Fig. 11. Midpoint Deflection .VS. Log Number of Cycle(PE1.0+SC0.5)

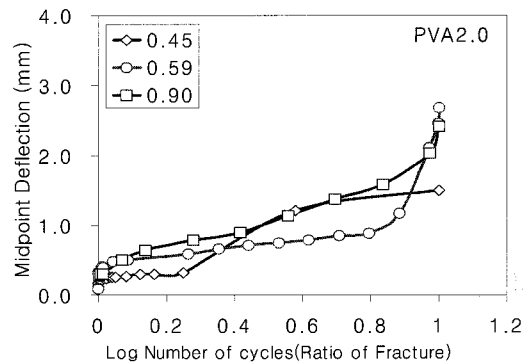


Fig. 12. Midpoint Deflection .VS. Log Number of Cycle(PVA2.0)

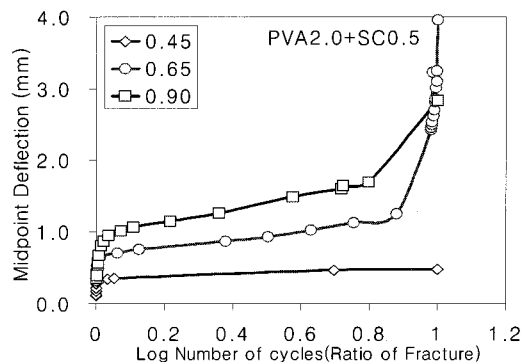


Fig. 13. Midpoint Deflection .VS. Log Number of Cycle(PVA2.0+SC0.5)

산과 함께 대변형으로 진전되는 HPFRCM의 특성을 잘 보여주고 있다고 할 수 있다. 일반적인 시멘트 복합체의 경우에는 사용피로하중 하에서 반복하중의 증가에 따라 처짐이 계속적으로 증가하는 경향을 보이지만 HPFRCM은 파괴가 발생되기 직전까지 일정한 처짐을 유지하면서 대변형까지 안정적인 거동을 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 14-17은 반복회수에 따른 시험체의 시켄트 강성(Seccent Stiffness)의 변동추이를 나타낸것이다. 일반적으로 시멘트 복합체는 반복회수 1000에서 100만번까지는 동적강성의 변화가 미세한 것으로 알려져

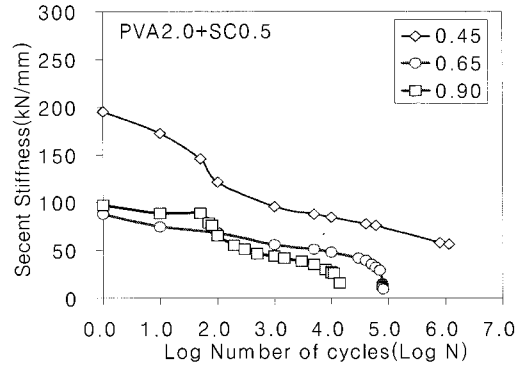


Fig. 17. Seccent Stiffness (PVA2.0+SC0.5)

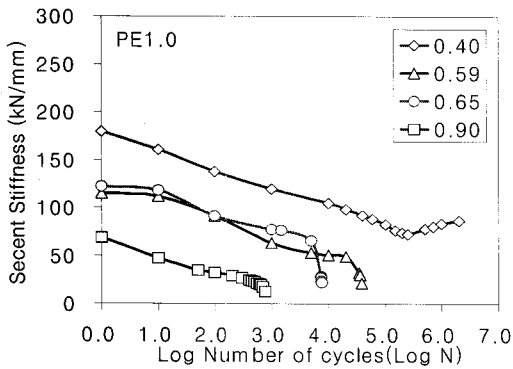


Fig. 14. Seccent Stiffness (PE 1.0)

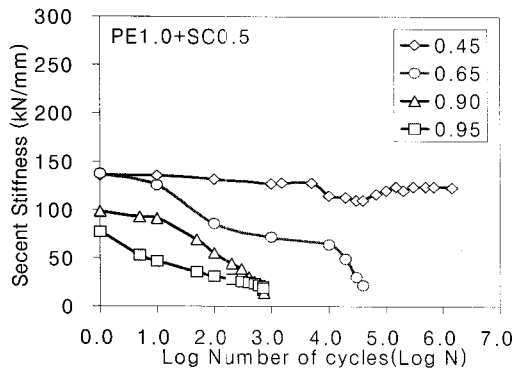


Fig. 15. Seccent Stiffness (PE1.0+SC0.5)

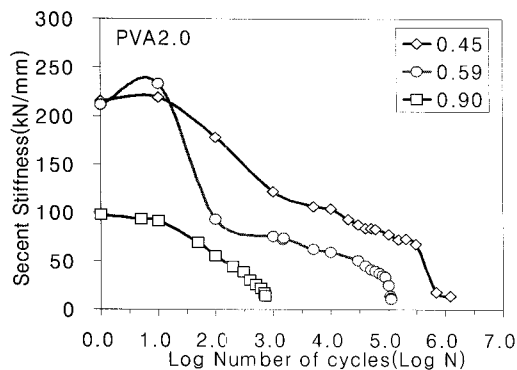


Fig. 16. Seccent Stiffness (PVA 2.0)

있다. 이는 최대모멘트가 작용하는 부분에 있어 사용하중 범위에서는 실질적으로 강성이 더 이상 감소되지 않기 때문이다. 반면, 본 연구에서 대상으로 하는 HPFRCM의 경우에는 강성이 계속 감소하는 것을 알 수 있는데 이는 지속적인 균열발진이 원인으로 판단되었다. 이를 통하여 HPFRCM의 휨피로하중에 대한 거동은 마치 금속재와 같은 거동 특성을 보이고 있음을 알 수 있다.

반복 피로하중을 받는 HPFRCM에 대한 균열 및 거동특성을 분석한 결과 매우 연성적인 거동을 보이고 있음을 알 수 있었다(Table 6). 또한 이러한 연성적인 거동은 초기 균열이후 균열의 진전과 함께 발생하는 분산 미세 균열과, 균열 사이의 섬유가 발현하는 가교작용에 의한 것으로 판단되었다.

3.2 피로수명

Fig. 18은 도입된 피로강도에 대한 파괴시 반복회수의 관계를 나타낸 것으로 섬유의 종류에 상관없이 HPFRCM의 경우 휨피로 수명이 매우 큰 것을 알 수 있다. 또한 휨피로응력 레벨 S와 파괴시 반복회수 (Nu)의 상관관계는 다음과 같이 회귀되었다.

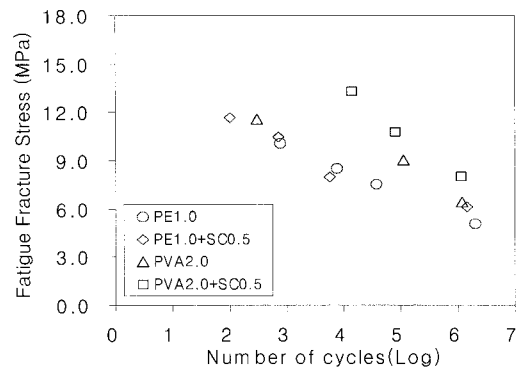


Fig. 18. Fatigue Fracture Stress .VS. Log Number of cycles

PE1.0Series

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

PE1.0 + SC0.5Series

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

PVA2.0Series

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

PVA2.0 + SC0.5Series

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

4. 결론

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

일반 모르타에 비해 섬유로 보강한 HPFRCM의 최대 휨강도가 2.79-3.50배 높게 나타나며 HPFRCM은 초기균열 이후에도 응력이 증가하고 다수의 균열을 발생시키는 변형경화 현상을 보인다. 최대 휨강도시 HPFRCM이 처짐 변위는 1.72mm-4.21mm로 일반 모르타의 처짐 변위 0.089mm에 비해 매우 큰 변형성을 보인다. 최대 휨모멘트 시 처짐특성은 PE 1.0 시험체가 4.21mm 로써 가장 큰 변형특성을 보였다. 섬유 혼입율 PE 1.0%, PVA 2.0%, PE 1.0%+SC 0.5% 및 PVA2.0%+SC0.5%를 하이브리드한 조건에서는 휨피로 응력비 0.4 이하에서 피로파괴가 발생하지 않았다.

반복회수에 따른 피로응력비 0.9에서 4종류 시험체의 처짐을 비교해 보았을 때 PE 1.0+SC 0.5와 PVA 2.0 시험체에서 처짐이 적게 일어났으며 PVA 2.0 + SC 0.5 시험체에서 처짐이 가장 많이 발생하였다. 또한 섬유혼입량 2.0% 근처에서의 시험체가 단일 섬유나 하이브리드 섬유 혼입시 가장 우수한 성능을 보임을 알 수 있었다. 구조부재에 HPFRCM을 적용하는 경우 내피로 성능을 검토하기 위해서는 휨 피로하중을 받는 HPFRCM에 대한 파괴 메카니즘 및 파괴특성에 관한 해석 모델의 정립이 필요하며 이를 위한 보다 심도 있는 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

참고 문헌

김무한 외 (2004) 섬유종류 및 잔골재용적비에 따른 HPFRCC의 공학적 특성에 관한 실험적 연구. 대한 건축학회 봄 학술발표대회 논문집, Vol. 24, No. 1, pp. 315-318.

윤현도, 양일승, 한병찬, 福山洋, 전에스더, 문연 준 (2004) 복합섬유 보강 고인성 시멘트 복합체의 인장거동. 대한건축학회 춘계학술발표대회논문집, pp. 55-58

Fukuyama, H., Matsuzaki, Y., Sato, Y., Iso, M. and Suwada, H. (2000) Structural performance of engineered cementitious composite elements, composite and hybrid structures. *Proceedings of 6th ASCCS conference*, ASCCS-6 Secre tariat, March, pp. 969-976.

Glucklich, Goseph (1962) *On The Compression Failure of Plain Concrete*. T & A.M. Report, No. 215, University of Illinois, Urbana, Mar.

Matsumoto, T., and Li, V. C. (1999) Fatigue Life Analysis of Fiber Reinforced Concrete with a Fracture Mechanics Based Model. *Journal of Cement and Concrete Composites*, Vol. 21, No. 4, pp. 249-261.

Naaman, A. F. and Reinhardt, H. W. (1996) *Characterization of High Performance Fiber Reinforced Cement Compositcs, HPFRCC, High performance Fiber Reinforced Cement Compositcs 2 (HPFRCC2)*. pp. 1-3.

Romualdi, J, P. and Batson, G. B. (1963a) Behavior of Reinforced Concrete Beams with Closely Spaced Reinforcement, *Journal of ACI*, Proceeding, Vol. 60, pp. 775-790.

Romuldi, J, P. and Batson, G. B. (1963b) *Mechanics of Crack Arrest in Concrete*, ASCE, EM3, pp. 147-168.

Shah, S.P. and Winter, G. (1966) Inelastic Behavior and Fracture of Concrete, *Journal of ACI*, Proceeding, Vol. 63, No. 9, pp. 925-930.

Tepfers, R. (1979) Tensile Fatigue Strength of Plain Concrete. *Journal of ACI*, Proceeding, Vol. 76, pp. 919-933.

Victo C. Li. (2002) Large Volume, High -Performance Applications of Fibers in Civil Engineering, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 83, pp. 660-686.

© 논문접수일 : 2007년 08월 28일

© 심사의뢰일 : 2007년 08월 29일

© 심사완료일 : 2007년 09월 18일