

## 누적손상을 고려한 강섬유보강 콘크리트의 피로파괴 특성

### Fatigue Failure Characteristics of Steel Fiber Reinforced Concrete Considering Cumulative Damage

김 동 호\* · 홍 창 우\*\* · 이 주 형\*\* · 이 봉 학\*\*\*

Kim, Dong Ho · Hong, Chang Woo · Lee, Ju Hyong · Lee, Bong Hak

#### Abstract

Concrete containing discontinuous discrete steel fiber in a normal concrete is called steel fiber reinforced concrete(SFRC). Tensile as well as flexural strengths of concrete could be substantially increased by introducing closely spaced fibers which delay the onset of tension cracks and increase the tension strength of cracks. However, many properties of SFRC have not been investigated, especially properties on repeated loadings. Thus, the purposes of this dissertation is to study the flexural fatigue characteristics of SFRC considering cumulative damage.

A series of experimental tests such as compressive strength, splitting tensile strength, flexural strength, flexural fatigue, and two steps stress level fatigue were conducted to clarify the basic properties and fatigue-related properties of SFRC. The main experimental variables were steel fiber fraction (0, 0.4, 0.7, 1, 1.5%), aspect ratio (60, 83). The principal results obtained through this study are as follows:

The results of flexural fatigue tests showed that the flexural fatigue life of SFRC is approximately 65% of ultimate strength, while that of plain is less than 58%. Especially, the behavior of flexural fatigue life shows excellent performance at 1.0% of steel-fiber volume fraction. The cumulative damage test of high-low two stress levels is within the value of 0.6~1.1, while that of low-high stress steps is within the value of 2.4~4.0.

*Keywords* : Fatigue, SFRC(Steel Fiber Reinforced Concrete)

#### I. 서 론

콘크리트는 압축강도와 내구성이 우수하고 경제적인 장점이 있으나, 인장강도 및 휨강도, 충격강도가 낮고 에너지 흡수능력이 작은 취성적 성질을 나타내고 있다. 이러한 결함을 개선하기 위하여 기존

\* 강원대학교 대학원  
\*\* 강원대학교 석재복합신소재제품연구센터  
\*\*\* 강원대학교 공과대학  
\* Corresponding author. Tel.: +82-33-250-6240  
fax: +82-33-255-6241  
E-mail address: dhkim@mail.kangwon.ac.kr

에는 철근, PC 강재 등을 보강한 구조물을 사용하여 왔으나, 이들 또한 강재부식에 의한 콘크리트 구조물의 성능저하 등의 문제가 발생하여 이를 해결하기 위한 노력과 함께 최근에는 각종 섬유를 이용한 섬유보강 콘크리트를 건설분야에 활용하려는 연구가 활발한 실정이다.

강섬유보강 콘크리트는 강섬유가 콘크리트 내에 분포함으로써 콘크리트의 취성적 성질을 보완하고 매트릭스 조직에 인장력을 부여함으로써 부재의 인성을 대폭 개선시킨 것이 가장 큰 장점이라 할 수 있다. 그러나 섬유보강 콘크리트의 개발과 이를 구조물에 적용하기 위한 설계기준이나 해석방법은 아직 정립되지 못한 실정이다.

국내의 경우 재료의 특성을 고려한 콘크리트의 역학적 특성에 관한 실험자료의 부족 및 해석방법의 미정립으로 인하여 보편적인 사용을 어렵게 하며, 대부분의 기준식은 보통강도의 콘크리트에 적용된 식이거나 외국의 자료를 그대로 인용하여 적용하고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 강섬유보강 콘크리트의 재료 역학적 특성을 분석하고, 피로실험을 수행하여 피로파괴 특성을 고찰하고 진동과 반복피로하중을 받는 구조물의 설계에 대한 기초자료로 활용되도록 하고자 한다.

## II. 실험

### 1. 실험재료

시멘트는 국내 H사 제품을 사용하였으며 보통포틀랜드 시멘트의 물리적 특성은 Table 1과 같다. 강섬유보강 콘크리트는 강섬유 혼입량이 증가함에 따라 워커빌리티가 현저히 저하되므로, 본 연구에서는 콘크리트의 유동성을 확보하기 위해 Table 2와 같은 고유동화제를 사용하였다.

굵은골재는 레미콘용 쇠석 20mm 골재를 사용하였으며, 잔골재는 홍천강 유역에서 채취된 강모

Table 1 Properties of normal portland cement

Cement type	Chemical composition(%)							Blaine (cm/g)	Specific gravity
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	lg.loss		
Normal	20.8	6.3	3.2	61.2	3.3	2.3	---	3,200	3.12

Table 2 Physical properties of admixture

Admixture	Specific gravity	Type	Color	Remark
Superplasticizer	1.20±0.05	Fluid	Dark Brown	ASTM C 1017 Type 1

Table 3 Physical properties of aggregate

Type	Max. size	Specific gravity	Absorption	F.M
Fine aggregate	—	2.61	0.96%	2.82
Coarse aggregate	20mm	2.60	1.58%	6.83

Table 4 Properties of steel fibers

Fiber type	Nominal name	Aspect ratio (l/d)	Fiber aspect (mm)	Specific gravity	Tensile strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Young's modulus (kgf/cm <sup>2</sup> )
Hooked	Hooked(60)	60	(30×φ0.5)	7.85	10,646	2.9
Hooked	Hooked(83)	83	(50×φ0.6)	7.85	10,646	2.9

래와 소양강 유역에서 채취된 강모래를 소정의 입도분포를 갖도록 하기 위해 3:1의 비율로 혼합하여 사용하였다. 골재의 물리적 특성은 Table 3에 나타내었다. 또한, 강섬유는 국내 C사 제품으로 치수 30×φ0.5 mm, 50×φ0.6 mm의 양단 Hooked형을 사용하였으며 강섬유의 물리적 성질은 Table 4에 나타내었다.

### 2. 배합계획

강섬유보강 콘크리트의 제조는 예비실험을 실시하여 적정배합을 선정한 후 본 실험을 수행하였다.

콘크리트 타설은 강제식 믹서를 사용하였으며, 각 강도별 배합비 및 강섬유 혼입에 따른 배합방법은 기존연구 결과 및 시험배합에 근거하여 최적의 배합방법 및 배합비를 결정하였다. 재료의 투입순서는 굵은골재, 잔골재를 투입하고 3분간 재료를 혼합한 후 강섬유를 투입하고 시멘트와 물을 혼합하며, 혼화제를 후첨가하는 방법을 사용하였다. 본 실험에서 강섬유 혼입량은 강섬유의 뭉침현상(Fiber ball)을 억제하기 위해 콘크리트 체적에 대한 용적 백분율로서 최대 1.5%까지 결정하였다. 콘크리트의 다짐은 탁상식 진동대를 이용하였으며 타설 후 24시간이 지난 후에 탈형 하여 23±2℃의 온도에서 수중양생을 실시하였다. 실험에 수행된 배합표는 Table 5와 같다.

### 3. 시험체 제작

휨강도, 휨인성, 휨피로 시험을 위한 시험체는 100×100×350 mm로 하였으며, 압축 및 인장시험편은 시방서규정에 의해 강섬유의 길이가 40 mm를 초과하는 경우 즉, Hooked형 50 mm는  $\phi$  15×30 cm 원형몰드를 사용하고 강섬유 길이가 40 mm 이하인 경우는  $\phi$  10×20 cm 원형몰드를 사용하였다.

### 4. 실험방법

본 연구에서 Hooked(60)형 섬유의 혼입율 0.4% (S04H)에 대해서는 예비실험에서 나타난 결과를 보통 콘크리트와 비교할 때 보강효과가 미소한 것으로 나타나 본 실험에서 제외하고 실험을 수행하였다.

압축강도 및 쪼갬인장강도 시험은 KS F 2405, 2423의 규정에 의하여 수행하였으며, 콘크리트 피로실험은 ACI 544에서의 방법을 따라 수행하였다. 하중재하방식은 Fig. 1과 같이 중앙점 재하방식으로 피로실험을 실시하였다. 각 배합조건별로 재령

Table 5 Mixing design of concrete

	W/C (%)	S/a (%)	V <sub>f</sub> (%)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )						Remark
				W	C	S	G	S.F	S.P	
Plain	45	60	0	202	449	997	682	-	3.59	S.P=C×0.8%
Hooked			0.4	202	449	991	678	31.4	3.59	
			0.7	202	449	986	675	55.0	3.59	
			1.0	202	449	981	672	78.5	3.59	
			1.5	202	449	973	666	117.8	3.59	

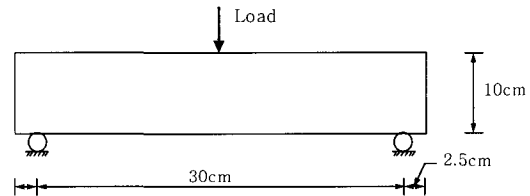


Fig. 1 Schematic view of the flexural test setup used for fatigue testing

28일에서 휨강도를 결정한 후 피로시험 수행기간에 따른 강도의 차이를 없애기 위하여 재령 60일 이상 수중양생을 한 후 시험시 까지 공기중 양생을 하였다. 피로에 대한 응력수준( $\sigma_{max}/\sigma_{ultimate}$ )은 정적극한강도에 대한 최대응력 비로 70, 80, 90%로 변화를 주었으며 응력비( $\sigma_{min}/\sigma_{max}$ )는 최대응력에 대한 최소응력의 비이며 0.1로 고정하였다. 피로주기는 20Hz로 하였으며 피로파는 sin파를 사용하였다. 실험의 종료는 200만 주기까지 피로를 주었으며 이때에도 파괴가 이루어지지 않으면 정적시험을 수행하여 파괴하였다.

## III. 실험결과 및 고찰

### 1. 강도발현 특성

강섬유보강 콘크리트의 강도발현 특성은 압축강도, 쪼갬인장강도, 휨강도 시험을 수행하여 Table 6에 나타내었다. 압축강도는 재령 1, 3, 7, 28일에 대하여 실험을 수행하였으며, 쪼갬인장강도 및 휨

Table 6 Compressive strength for age of SFRC containing various types

Type	V <sub>f</sub> (%)	Slump (cm)	Compressive strength (kgf/cm <sup>2</sup> )				Relative compressive strength ratio	Tensile strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Relative tensile strength ratio	Flexural strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Relative flexural strength ratio
			f <sub>c1</sub>	f <sub>c3</sub>	f <sub>c7</sub>	f <sub>c28</sub>					
F0	0	23.0	76.4	167.3	206.8	242.0	1.000	30.4	1.0	46.7	1.00
S07H	0.7	11.5	78.5	183.8	224.5	281.6	1.164	42.2	1.388	61.2	1.311
S10H	1.0	8.0	84.1	211.6	235.4	306.4	1.266	48.6	1.598	71.0	1.521
S15H	1.5	3.5	93.9	208.9	239.0	298.9	1.235	53.7	1.766	77.4	1.656
L04H	0.4	14.5	88.8	152.9	214.2	289.0	1.194	34.8	1.145	56.5	1.210
L07H	0.7	10.0	95.7	162.9	240.8	315.4	1.303	44.5	1.464	75.5	1.617
L10H	1.0	5.0	106.2	189.2	261.7	348.6	1.440	56.7	1.865	88.3	1.892
L15H	1.5	2.0	111.3	191.8	276.3	356.1	1.471	67.4	2.217	99.1	2.123

\* F : Fiber, S : 30×ø0.5mm, L : 50×ø0.6mm, H : Hooked fiber

강도는 재령 28일에 대하여 실시하였다. 각각의 경우에 대해 공시체 3개의 평균값에 대한 실험결과를 바탕으로 배합조건별, 재령별에 따른 강도발현과 상대압축강도비를 나타내었다.

강섬유의 형상비에 따라 압축강도는 Hooked (60)과 Hooked(83)의 경우 섬유 혼입량 1.0% 까지는 증가하는 경향을 나타내었으나 1.0% 이후에서 큰 강도발현 특성은 보이지 않고 있다. 또한, 혼입률이 0.7, 1.0, 1.5% 증가함에 따라서 압축강도는 Hooked(60)은 약 1.16~1.27배의 강도증진을 보였으며, Hooked(83)은 약 1.3~1.5배의 강도증진효과를 나타냈다. 또한 형상비가 상대적으로 큰 Hooked(83)형 섬유의 강도발현은 Hooked(60)형 섬유보다 큰 압축강도발현 특성을 나타냈다. 따라서, 섬유의 길이가 상대적으로 긴 즉, 형상비가 큰 경우가 압축강도 발현율이 크게 나타났다.

쪼갠장강도는 섬유 혼입량의 증가에 따라 현저히 증가하는 경향을 보였으며, 압축강도와는 달리 섬유혼입량 1.0% 이후에도 현저한 강도발현특성을 나타냈다. 특히 섬유 혼입량 1.5%에서 Hooked (60)형 섬유가 보통 콘크리트에 대해 약 1.8배의 상대강도 진전을 보였고 Hooked(83)형 섬유는 약 2.2배의 탁월한 상대강도발현특성을 나타냈다. 이

러한 결과는 Pull-out 저항성능이 계면구간의 표면적에 비례하기 때문에 섬유의 형상비가 큰 Hooked(83)형 섬유가 큰 Pull-out 저항성능을 나타내었기 때문인 것으로 판단된다.

휨강도의 발현은 보통콘크리트에 비해 강섬유의 혼입량의 증가로 인한 영향을 많이 받는 것을 알 수 있다. 또한 섬유형상비가 클수록 상대적으로 휨강도발현이 우수하게 나타났다. 이러한 결과는 휨강도에 영향을 미치는 주요인자가 형상비와 섬유의 형상이므로 섬유와 매트릭스 사이의 결합과 교량역할(bridge effect)효과로 인하여 복합체에서 섬유로의 응력전달 때문에 형상비가 상대적으로 큰 Hooked(83)형이 Hooked(60)형 보다 휨강도의 발현이 크게 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 2~3은 강섬유 혼입량에 따른 압축강도, 쪼갠장강도 및 휨강도를 Hooked(60)형 섬유와 Hooked(83)형 섬유별로 상대비교를 나타낸 것이다. 두 경우에 모두 강섬유 혼입률이 증가할수록 강도특성은 증가하였다. 그러나 압축강도는 쪼갠장강도와 휨강도에 비해 상대적으로 증가율이 현저히 낮게 나타났으며, 이로부터 강섬유보강시 압축보다는 인장 및 휨강도에 보다 큰 보강효과가 있다는 것을 알 수 있다. 또한, 섬유형상비가 클수록

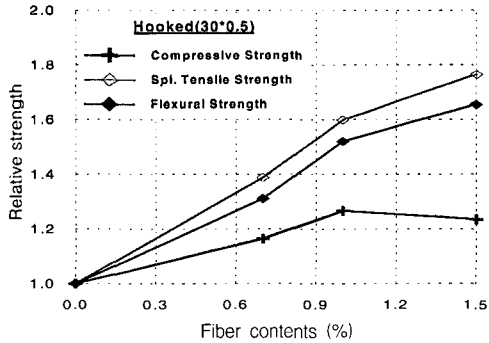


Fig. 2 Compare with relative strength by fiber contents(30×0.5mm)

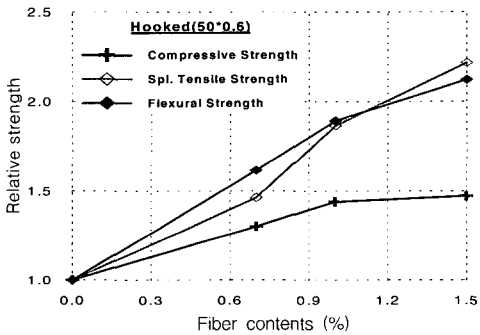


Fig. 3 Compare with relative strength by fiber contents(50×0.6mm)

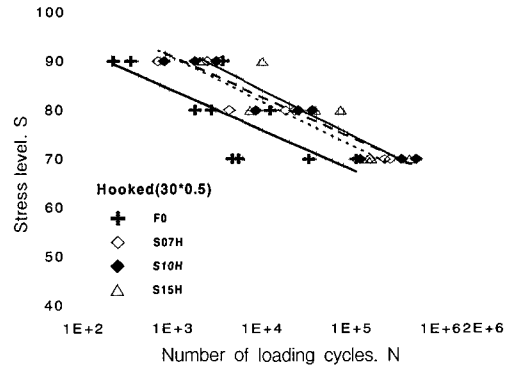


Fig. 4 S-N curves for SFRC by fiber contents(30×0.5 mm)

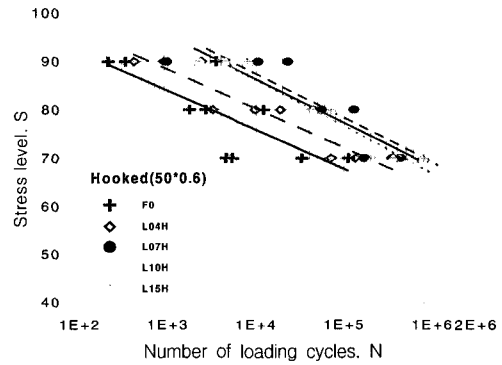


Fig. 5 S-N curves for SFRC by various fiber contents(50×0.6mm)

pull-out 저항 특성 및 섬유와의 교량역할에 의해 강도 증진을 나타낸 것으로 판단된다.

## 2. 피로실험결과 및 고찰

### 가. 응력수준과 피로수명의 관계

적용된 최대응력( $S_{max}$ )의 변화에 따른 각 유형별 피로시험 결과를 Table 7과 강섬유보강 콘크리트의 응력수준에 따른 S-N 곡선으로 Fig. 4와 5에 나타내었다.

강섬유혼입량의 증가에 따라 피로특성이 현저히 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 4에서 보통 콘크리트에 비해 Hooked(60)형 섬유에서는 혼입량 0.7~1.5%까지 미소하지만 피로특성의 향상을 나타냈다. Fig. 5는 Hooked(83)형 섬유의 S-N 곡

선을 나타낸 것으로 Hooked(60)형 섬유와 달리 섬유혼입량의 증가에 따라 현저한 피로특성의 향상을 나타내고 있다. 보통 콘크리트에 비해 섬유혼입률 0.4%는 약간의 피로강도의 증진을 보이고 있으며, 0.7% 이후에서는 피로강도의 향상이 현저한 것으로 나타났다. 그러나 섬유 혼입률 1.5%에서는 0.7%보다 오히려 피로강도가 저하되는 것으로 나타나 강섬유보강콘크리트의 피로강도특성을 향상시키는 데 적절한 혼입량은 약 1.0%임을 알 수 있었다.

본 연구에서 실험한 강섬유보강 콘크리트의 200만회에서의 정적극한강도에 대한 휨피로수명을 살펴보면, 보통 콘크리트는 약 57.3% 정도로 나타났으며 강섬유 보강 콘크리트는 두가지 형상비에서

Table 7 Test results of flexural fatigue test

Type	P <sub>ult</sub> (kgf)	Stress ratio R=P <sub>min</sub> /P <sub>max</sub>	Stress level (%)	P <sub>max</sub> (kgf)	P <sub>min</sub> (kgf)	Amplitude (kgf)	Mean level (kgf)	Cycles to failure(cycles)		
								1	2	3
F0	1,038	0.1	90	934	93	420	514	210	329	3,527
			80	830	83	374	457	2,677	12,149	1,753
			70	727	73	327	400	111,188	32,862	5,364
S07H	1,361		90	1,225	122	551	674	662	2,355	3,352
			80	1,089	109	490	599	22,892	4,220	18,067
			70	953	95	429	524	112,324	232,023	158,891
S10H	1,578		90	1,420	142	639	781	775	2,979	1,718
			80	1,262	126	568	694	24,970	35,895	8,358
			70	1,105	110	497	608	123,561	523,023	358,154
S15H	1,719		90	1,547	155	696	851	2,096	1,915	9,736
			80	1,375	138	619	756	74,520	7,220	38,665
			70	1,203	120	541	662	163,801	149,158	438,854
L04H	1,256		90	1,130	113	509	622	43	412	213
			80	1,005	100	452	553	3,212	9,783	18,796
			70	879	88	396	484	70,692	134,551	178,625
L07H	1,678	90	1,510	151	680	831	965	22,875	10,534	
		80	1,342	134	604	738	128,762	43,683	55,124	
		70	1,175	117	529	646	170,465	348,817	436,762	
L10H	1,963	90	1,767	177	795	972	8,707	2,747	10,455	
		80	1,570	157	707	864	31,271	73,699	121,115	
		70	1,374	137	618	756	1,000,372	414,904	657,852	
L15H	2,203	90	1,983	198	892	1,090	8,982	52,413	31,124	
		80	1,762	176	793	969	152,312	89,895	43,815	
		70	1,542	154	694	848	200,167	1086,457	356,479	

약 61~67%의 범위를 보였다. 구체적으로 살펴보면 Hooked(60)형 섬유의 피로수명은 61.2~63.7%이며, Hooked(83)형 섬유는 61.6~66.4%로 나타났다. 따라서, 본 연구의 실험조건인 형상비 60과 83인 강섬유를 혼입할 경우 정적극한강도에

대한 예상 피로수명은 65% 정도로 판단된다.

피로 실험 결과 S-N 선도로부터 피로강도(Y)와 피로수명(N)의 관계를 다음과 같은 회귀식으로 나타냈으며, 섬유를 혼입하지 않은 콘크리트는  $Y = 108.101 - 3.501 \ln N$  으로 나타났다.

	Steel fiber reinforced concrete using Hooked(60)	Steel fiber reinforced concrete using Hooked(83)
V <sub>f</sub> =0.4%	-	$Y = 112.668 - 3.522 \ln N$
V <sub>f</sub> =0.7%	$Y = 117.292 - 3.867 \ln N$	$Y = 122.586 - 3.938 \ln N$
V <sub>f</sub> =1.0%	$Y = 115.461 - 3.569 \ln N$	$Y = 123.971 - 3.965 \ln N$
V <sub>f</sub> =1.5%	$Y = 120.728 - 3.986 \ln N$	$Y = 124.628 - 4.177 \ln N$

※ 위식에서 Y=피로강도, N=피로수명

Table 8 Inelastic strain energy at static load(N=1 cycle) for stress level

		Inelastic strain energy at static load(N=1cycle) (kgf · mm)						
		Plain		Hooked(60)		Hooked(83)		
Fiber type		0	0.7	1.0	1.5	0.7	1.0	1.5
V <sub>f</sub> (%)		0	0.7	1.0	1.5	0.7	1.0	1.5
Stress level	0.9	13.74	36.91	135.7	96.7	123.9	171.6	134.1
	0.8	-	-	31.21	36.79	37.55	112.9	-
	0.7	7.36	14.65	47.57	33.87	27.19	68.53	32.86

나. 반복회수에 대한 비탄성변형에너지

반복회수에 대한 강섬유보강콘크리트의 영구변형에 따른 손실되는 에너지의 변화를 분석하기 위하여 시험체 중앙하부에 변위계(Extensometer)를 설치하고 하중과 처짐을 측정하여 이에 대한 관계로부터 변형에너지를 계산하여 비교하였다. Fig. 6~12는 강섬유 혼입률, 강섬유 형상비 및 각 응력수준에 따른 비탄성변형에너지의 변화를 나타낸 것이며, Table 8은 각 배합조건별 응력수준에 따라서 정적하중재하시(N=1 cycle) 비탄성변형에너지 계산결과를 나타낸 것이다.

강섬유를 사용한 응력수준 90%일 때에 강섬유 혼입량에 따른 반복회수에 대한 비탄성변형에너지 변화는 각각 13.74, 36.91, 135.7, 96.7 kgf · mm로 나타나, 보통 콘크리트는 강섬유를 혼입한 콘크리트에 비해 영구변형을 일으키는데 손실된 에너지가 매우 작은 것으로 나타났다. 특히 섬유 혼입량 1.0%일 때 가장 큰 비탄성변형에너지를 나타냈으며, 콘크리트에 강섬유를 혼입함으로써 영구변형에 손실되는 에너지가 크게 증가함을 알 수 있었다.

또한, 반복회수가 증가함에 따라 비탄성변형에너지는 급격히 감소하였다. 반복회수 1,000회 일 때 정적하중 재하시에 비하여 섬유혼입량에 따라 각각 17.39, 54.02, 25.74, 22.61%로 크게 감소하였다. 이러한 결과에서 반복회수가 증가함에 따라 영구변형에 손실되는 에너지는 크게 감소하고, 시험체가 파괴에 근접할수록 비탄성변형에너지가 크게 증가

하는 경향을 나타내었다.

Fig. 6~9에서 나타낸 바와 같이 섬유 혼입량의

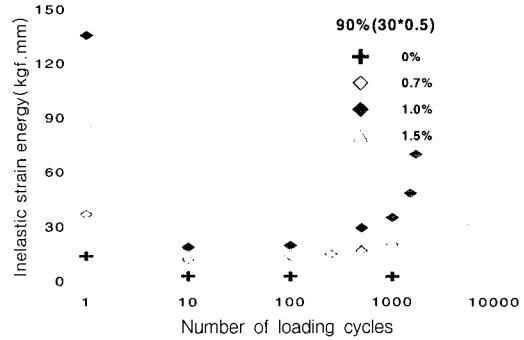


Fig. 6 Comparison of inelastic strain energy by fiber volumes as loading cycles increase (Hooked (60)-Stress level 90%)

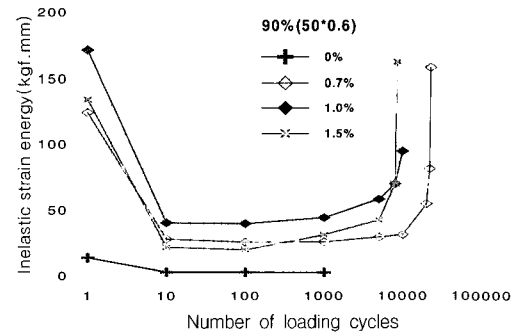


Fig. 7 Comparison of inelastic strain energy by fiber volumes as loading cycles increase (Hooked (83)-Stress level 90%)

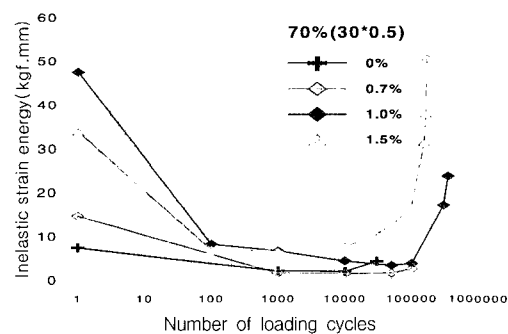


Fig. 8 Comparison of inelastic strain energy by fiber volumes as loading cycles increase (Hooked (60)-Stress level 70%)

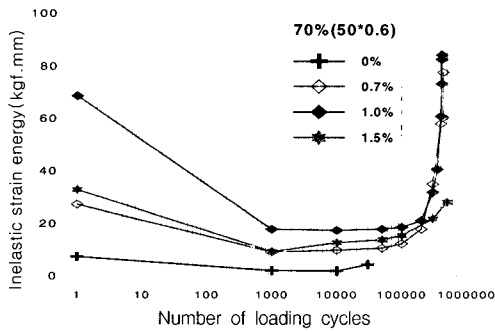


Fig. 9 Comparison of inelastic strain energy by fiber volumes as loading cycles increase (Hooked (83)-Stress level 70%)

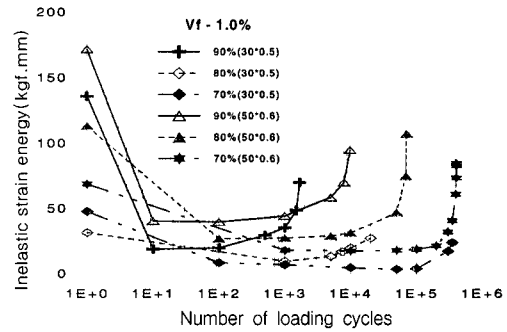


Fig. 11 Comparison of inelastic strain energy by fiber aspect ratio at 1.0% fiber volume

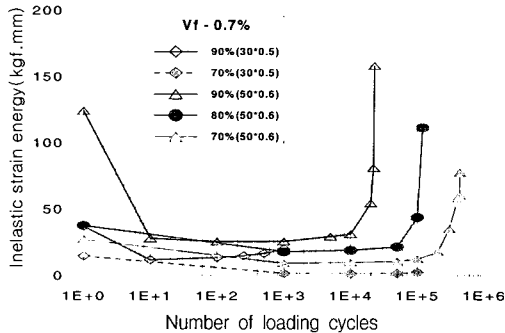


Fig. 10 Comparison of inelastic strain energy by fiber aspect ratio at 0.7% fiber volume

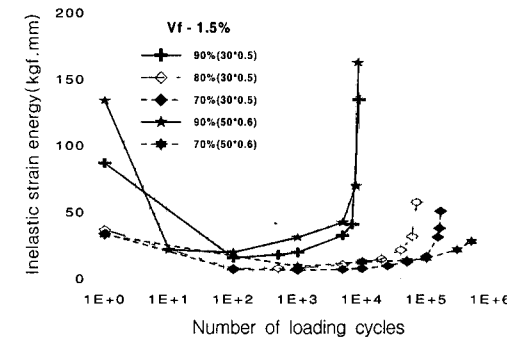


Fig. 12 Comparison of inelastic strain energy by fiber aspect ratio at 1.5% fiber volume

증가에 따라서 비탄성변형에너지가 크게 증가하였으며 특히 섬유 혼입량 1.0%일때가 1.5%일 때보다 영구변형에 손실된 에너지가 큰 것으로 나타났다.

Fig. 10~11은 강섬유혼입량과 형상비에 대한 비탄성변형에너지의 변화를 응력수준에 따라 나타낸 것이다. Fig. 10의 경우 동일한 섬유 혼입량에서 응력수준이 70~90%일 때 Hooked(60)형 섬유인 경우 70과 90%에서 각각 14.65, 36.91 kgf·mm의 비탄성변형에너지를 나타냈으며, Hooked(83)형 섬유인 경우 70, 80, 90%에서 각각 27.19, 37.55, 123.9 kgf·mm의 비탄성변형에너지를 나타내었다. 따라서, 동일한 섬유가 혼입된 콘크리트에서 응력수준이 클수록 비탄성변형에너지가 크게 나타났으며, 강섬유 형상비가 클수록 동일한 응력수준에서 큰 비탄성변형에너지를 나타냈다. 또

한, 반복회수 1,000회 일 때 정적하중 재하시에 비해 Hooked(83)형 섬유인 경우 응력수준 90, 80, 70%에서 각각 20.76, 47.83, 33.66%로 크게 감소하였다.

#### 다. 누적손상관계

강섬유보강 콘크리트의 누적손상관계를 분석하기 위하여 응력수준에 대한 반복비를  $n1/N1=0.2$ 로 고정하였다. 그 이후에는 응력수준을 저응력에서 고응력 또는 고응력에서 저응력으로 변경하여 시험체가 파괴될 때까지의 반복회수를 측정하였으며, 이 때 각 배합조건별, 응력수준에 따라 3개의 시험체를 사용하여 평균값을 산출하였다. 실험 결과는 Table 9와 10에 나타내었다.

Table에서 알 수 있듯이 1단계에서 저응력 ( $S_{min}=0.7$ ), 2단계에서 고응력 ( $S_{max}=0.9$ )을 받음



Table 9 Result of cumulative damage subjected to low-high stress steps

Type	Cycles at N <sub>1</sub>			Cycles at N <sub>2</sub>		Average	$\Sigma \frac{n}{N}$
	n <sub>1</sub> /N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	n <sub>1</sub>	n <sub>2</sub>	n <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	n <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	
F0	0.2	53,234	10,647	414	2.35	2.65	2.85
				126	0.72		
				858	4.88		
S07H	0.2	204,697	40,939	2,248	1.94	3.44	3.64
				1,497	1.29		
				8,236	7.09		
S10H	0.2	340,609	68,122	897	0.72	3.75	3.95
				5,423	4.32		
				7,784	6.21		
S15H	0.2	336,908	67,382	1,887	0.85	2.56	2.76
				6,698	3.00		
				8,547	3.83		
L04H	0.2	182,255	36,451	2,599	4.17	2.23	2.43
				881	1.41		
				690	1.11		
L07H	0.2	630,708	126,142	3,998	1.02	2.78	2.98
				18,907	4.82		
				9,854	2.51		
L10H	0.2	815,630	163,126	15,664	2.98	2.21	2.41
				1,723	0.33		
				17,457	3.32		
L15H	0.2	479,190	95,838	6,784	1.70	2.49	2.69
				8,467	2.12		
				14,536	3.64		

경우에는 2단계응력에 의한 파괴기준  $\Sigma n/N$ 은 약 2.4~4.0 정도를 나타냈으며 이와는 반대로 1단계에서 고응력(0.9), 2단계에서 저응력(0.7)을 받는 경우에는  $\Sigma n/N$ 이 약 0.6~1.1 정도를 나타냈다.

이와 같은 실험결과로부터 응력수준과 재하순서에 의해 누가손상에 미치는 영향이 매우 크다는 것을 알 수 있었으며 저응력에서 고응력으로 2단계 응력을 변화시켜서 피로를 받게 되면  $\Sigma n/N$ 은 1.0 보다 크게 나타났으며 또한 고응력에서 저응력으로 피로를 받게되면  $\Sigma n/N$ 은 1.0보다 작게 나타나는 결과를 보였다. 즉, 고응력에서 저응력으로 피로를 받는 경우보다 저응력에서 고응력으로 피로를 받는 경우가 피로수명이 훨씬 크게 나타남을 알 수 있었다.

Table 10 Result of cumulative damage subjected to high-low stress steps

Type	Cycles at N <sub>1</sub>			Cycles at N <sub>2</sub>		Average	$\Sigma \frac{n}{N}$
	n <sub>1</sub> /N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	n <sub>1</sub>	n <sub>2</sub>	n <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	n <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	
F0	0.2	176	35	10,544	0.20	0.42	0.62
				9,660	0.18		
				46,752	0.88		
S07H	0.2	1,161	232	51,480	0.25	0.46	0.66
				156,023	0.76		
				74,865	0.37		
S10H	0.2	1,254	251	49,568	0.15	0.50	0.70
				328,514	0.96		
				128,948	0.38		
S15H	0.2	2,230	446	159,115	0.47	0.85	1.05
				475,284	1.41		
				226,254	0.67		
L04H	0.2	623	125	141,607	0.78	0.42	0.62
				57,758	0.32		
				30,079	0.17		
L07H	0.2	3,926	785	170,321	0.27	0.51	0.71
				335,240	0.53		
				455,729	0.72		
L10H	0.2	5,259	1,052	262,663	0.32	0.58	0.78
				172,913	0.21		
				974,519	1.19		
L15H	0.2	3,988	798	154,235	0.32	0.63	0.83
				268,984	0.56		
				489,567	1.02		

#### IV. 결 론

본 연구에서는 Hooked형 강섬유의 형상비 60,80에 대하여 혼입률에 따른 피로실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 강섬유보강 콘크리트의 강도발현특성은 쪼갬 인장강도에서 강섬유혼입률에 따라 1.4~2.2배, 휨 강도에서는 1.2~2.1배의 강도증진을 나타냈다.
- 2) 보통 콘크리트의 휨피로 수명은 약 57.5%로 나타났으며, 강섬유보강 콘크리트는 강섬유의 형상비 60, 80에 대해 섬유 혼입률에 따라 약 61~67%를 나타내어 휨피로 수명이 극한강도의 약 65%정도 수준으로 나타났다.
- 3) 강섬유 혼입률 1.5%보다 1.0%에서 가장 우

수한 휨피로 특성을 나타내었다. 이는 섬유혼입률이 어느 한계에 이르게 되면 조적이 치밀하게 되지 못하여 매트릭스 구속력이 저하되어 강섬유 양단이 보다 쉽게 뽑히기 때문인 것으로 사료된다.

4) 반복회수에 대한 비탄성변형에너지 변화는 동일한 섬유가 혼입된 콘크리트에서는 응력수준이 클수록 비탄성변형에너지가 크게 나타났으며, 동일한 응력수준에서는 강섬유형상비가 클수록 비탄성변형에너지가 크게 나타났다.

5) 2단계 반복하중을 받는 누가손상 실험결과 고응력에서 저응력을 받는 경우, 총 누적손상은 약 0.6~1.1로 나타났고, 저응력에서 고응력을 받는 경우엔 약 2.4~4.0으로 나타났다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단지정 "강원대학교 부설 석재복합신소재제품연구센터"의 연구비 지원에 의하여 수행된 것으로 이에 감사 드립니다.

### References

1. Mangat, P. S. 1976. Tensile strength of steel fiber reinforced concrete. *Cement and Concrete Research* 6(2).
2. Ramakrishnan, V. 1987. Flexural fatigue strength of fiber reinforced concretes, endurance limit and impact strength. *Transportation Research Record* 1110: 129-137.
3. Shah, S. P. et al. 1978. Complete stress-strain curves for steel fibre reinforced concrete in uniaxial tension and compression. *Rilem Symposium, Testing and Test Methods of Fibre Cement Composites*, 399-408.
4. Son, Y. H. et al. 1992. Flexural Fatigue Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Structures. *Journal of the Korea Concrete Institute* 4(1): 81-87. (in Korean)
5. Williamson, G. R. 1974. The effect of steel fiber on the compressive strength of concrete. *Fiber Reinforced Concrete, ACI Journal SP(44)*: 195-208.
6. Zhang J., and H. Stang. 1998. Fatigue performance in flexure of fiber reinforced concrete. *ACI Material Journal* 95(1): 58-66.