

강섬유보강 초속경시멘트 콘크리트의 휨인성 및 피로거동

Flexural Toughness and Fatigue Behavior of Steel Fiber Reinforced Rapid-set Cement Concrete

이 봉 학* 홍 창 우** 김 동 호***
Lee, Bong-Hak Hong, Chang-Woo Kim, Dong-Ho

Abstract

This study is conducted on the flexural toughness and flexural fatigue test to find the mechanical properties of steel fiber reinforced rapid-set cement concrete. Experimental investigation is examined according to fiber contents(0, 0.4, 0.7, 1.0, 1.5%), fiber aspect ratio(58, 60, 83), fiber type (hooked, crimped fiber), and cement type (normal portland & rapid-set cement). The principal results obtained through this study are as follows; toughness and fatigue resistance tend to considerably increase with fiber contents, fiber aspect ratio. And hooked fiber is improved better than crimped fiber. Concrete using rapid set cement is increased strength properties compared with concrete using normal portland cement, but relative strength properties behavior and fatigue resistance show a tendency to decrease a little.

키워드 : 인성, 피로, 강섬유

Keywords : *Toughness, Fatigue, Steel-fiber*

1. 서 론

최근 섬유보강 콘크리트의 역학적 특성 및 철근콘크리트 구조물의 응용분야에 대한 거동특성과 실험적 연구가 국내·외의 많은 연구자에 의해 꾸준히 진행되고 있으며, 국내에서도 이에 대한 관심과 응용분야에 대한 연구가 활발히 전개되고 있다.[1] 그렇지만, 이러한 연구가 진행되고 있음에도 불구하고 아직 국내에서는 이에 대한 인식이 부족하고, 일부의 산업현장에서만 사용되고 있을 뿐 건설분야의 대부분에는 사용되지 못하고 있는 실정이다. 이러한 이유는 섬유보강콘크리트에 있어서 섬유혼입시 콘크리트에 발생하는 섬유뭉침 현상과 경제적 측면에서의 문제점 때문이나 배합설계의 개선과 유동화제의 성능향상, 대량생산 등으로 이러한 점들은 상당부분 개선이 되었다.

대부분의 콘크리트 구조물의 하중작용 상태는 실제 정적 상태 보다는 동적 또는 반복하중 상태로 작용하는 경우가 많아 구조물의 지속적인 반복하중에 의한 피로현상이 발생하여 파괴에 이르게 된다.[10] 긴급 보수의 경우 교통통제의 한계성 때문에 조기에 강도발현이 이루어져야 하며 충분한 내구성 확보가 이루어져야 하기 때문에 초속경시멘트의 개발에 많은 노력이 전개되고 있다.

따라서 이 연구에서는 초속경시멘트 콘크리트에 대한 역학적 성질을 파악하고 휨인성 및 피로저항성 등을 구명하여 보통시멘트 콘크리트와 비교 고찰하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험개요

실험의 주요변수는 강섬유 혼입율 및 형상비, 섬유종류 그리고 시멘트 종류로 하였다. 강섬유의 섬유뭉침 현상을 고려하여 강섬유 혼입율은 0, 0.4, 0.7, 1.0,

* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사
** 강원대학교 산업기술연구소 연구원
*** 강원대학교 대학원 토목공학과 박사과정

1.5%로 하였으며, 강섬유 형상비(l/d)는 58, 60, 83으로 하였다. 여기서, 강섬유는 Hooked형 강섬유(30mm, 50mm)와 Crimped형 강섬유(35mm)를 사용하였으며, 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트와 초속경 시멘트를 사용하였다.

이러한, 실험의 주요인자에 대하여 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프, 압축강도, 할렬인장강도, 휨강도를 각 재령에 따라서 실험을 수행한 후 이에 따른 상대강도변화를 통하여 거동특성을 비교 분석하였다. 강섬유보강 콘크리트의 인성은 휨 시험을 한 후 각 시험체에 따른 하중-처짐의 관계로부터 휨인성계수를 산출하여 인성증진 효과를 분석하였다. 휨 피로시험에 의해 강섬유 혼입에 따른 응력-반복재하회수(S-N) 선도를 작성하여 피로강도를 평가하였다.

2.2 실험재료

시험에 사용된 시멘트는 국내 H사 제품의 보통포틀랜드시멘트와 T사 제품의 초속경시멘트를 사용하였으며 물리적 특성은 Table 1과 같다. 굵은골재는 춘천시 남산면 광판리산 쇄석 19mm 골재를 사용하였으며, 잔골재는 홍천강유역에서 채취된 강모래와 소양강 유역에서 채취된 강모래를 소정의 입도분포를 갖도록 하기 위해 3:1의 비율로 혼합하여 사용하였다. 골재의 물리적 특성은 Table 2와 같다.

Table 1 Properties of Normal Portland Cement and Rapid-Set Cement

Cement	Chemical Composition(%)							Blaine (cm^2/g)	Specific Gravity
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ig.loss		
Normal	20.8	6.3	3.2	61.2	3.3	2.3	---	3200	3.12
Rapid-set	15.4	9.1	2.1	58.9	0.6	9.5	2.2	5000	3.02

Table 2 Physical Properties of Aggregate

Type	Max.Size	Specific Gravity	Absorption (%)	F.M
Fine Aggregate	—	2.61	0.96	2.82
Coarse Aggregate	19mm	2.60	1.58	6.83

강섬유는 국내 C사 제품으로 Table 3에서와 같이 치수 $\phi 30 \times 0.5mm$, $50 \times 0.6mm$ 의 양단 Hooked형과 국내 I사 제품의 Crimped형의 섬유를 사용하였으며, 고유동화제는 ASTM C 1017 Type 1의 제품을 사용하였다.

Table 3 Properties of Steel fibers

Fiber Type	Fiber Aspect (mm)	Aspect Ratio (l/d)	Specific Gravity	Tensile Strength (kgf/cm^2)	Young's Modulus (kgf/cm^2)
Hooked	($\phi 30 \times 0.5$)	60	7.85	10,646	2.9×10^4
Hooked	($\phi 50 \times 0.6$)	83	7.85	10,646	2.9×10^4
Crimpiped	($\phi 35 \times 0.6$)	58	7.85	-	-

2.3 배합계획

Table 4는 실험에 사용된 콘크리트의 배합비를 나타낸 것으로, 예비실험을 수행하여 물-시멘트비 45%, 최적 잔골재율 60%로 결정하여 목표슬럼프 $22 \pm 2cm$ 정도가 되도록 하였다. 콘크리트의 배합순서는 섬유용침 현상을 막기 위해 먼저 굵은골재와 잔골재를 혼합하여 약 30초간 건비빔을 실시한 후 시멘트를 혼합하여 약 1분간 비빔을 하였다. 그리고 유동화제에 배합수의 3분의 2를 넣고 골고루 희석한 뒤 90초간 비빔을 한 후 3분의 1의 배합수를 첨가하여 120초간 비빔을 하였다. 최종적으로 강섬유의 섬유용침 방지를 위해 골고루 분산 투입한 후 약 3분간 비빔을 실시하였다.

Table 4 Mix properties of Steel Fiber Reinforced Concrete

Cement Type	Fiber Type	W/C (%)	S/a (%)	V _f (%)	Unit Weight(kg/m^3)					
					W	C	S	G	S.F	S.P
A & B	Plain	45	60	0	202	449	997	682	---	3.59
				0.4	202	449	991	678	31.4	3.59
				0.7	202	449	986	675	55.0	3.59
	Hooked			1.0	202	449	981	672	78.5	3.59
				1.5	202	449	973	666	117.8	3.59
				Crimped	0.4	202	449	991	678	31.4
0.7	202	449	986		675	55.0	3.59			

주) A Type : Normal portland cement

B Type : Rapid-set cement

S.F : Steel Fiber, S.P : Super plasticizer

S.P : $C \times 0.8\%$

2.4 실험방법

휨인성 시험은 $100 \times 100 \times 350mm$ 의 빔 공시체를 제조하여 재령28일에서 3등분점 재하방식으로 하였다.

인성평가는 JCI-SF 4[6]에 따라 실시하였으며, Instron사의 50t 용량 기기를 사용하여 X-Y 레코더로 하중-처짐 곡선을 구한 다음 휨인성을 평가하였다. 이 때의 하중재하속도는 0.05~0.10mm/min로 하였다. Fig.1에 나타낸 바와 같이 시험체의 변위가 지간 길이/150으로 2mm 까지의 면적을 구하여 각 요인별로 휨인성을 평가하였다.

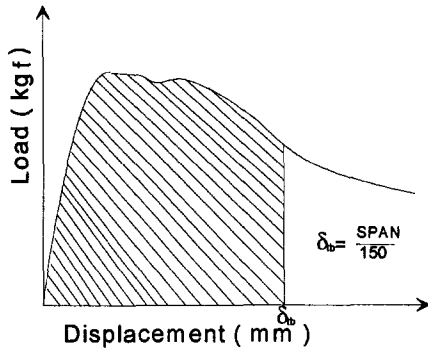


Figure 1 Measuring Method for Flexural Toughness in Terms of Load-Deflection Curves (JCI-SF4)

피로시험은 ACI 544[2]의 방법으로 수행하였으며, Fig.2와 같이 중앙점 재하방식으로 시험 하였다. 각 배합조건별로 재령 28일에서 휨강도를 결정한 후 양생기간에 따른 강도의 차이를 없애기 위하여 재령 60일 이상 수중양생을 한 후 시험시까지 공기중 양생을 하였다. 피로에 대한 응력수준($\sigma_{max}/\sigma_{ultimate}$)은 정적극한 강도에 대한 최대응력비로 60, 70, 80, 90%로 하였으며 응력비($\sigma_{min}/\sigma_{max}$)는 0.1로 고정하였다. 피로주기는 20Hz로 하였으며 피로파는 sine파를 사용하였다. 시험은 200만회까지 수행 하였으며 이때 파괴가 되지않은 시험체는 정적시험을 통해 파괴하였다.

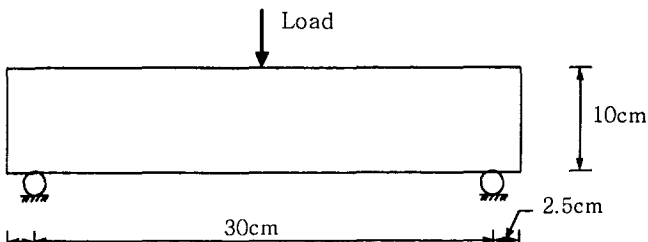


Figure 2 Schematic View of the Flexural Test Setup Used for Fatigue Testing

3. 실험결과 및 고찰

3.1 슬럼프 변화

강섬유 종류, 형상, 혼입량 및 시멘트 종류에 따른 슬럼프 시험결과는 Fig.3에 나타내었다. 초속경시멘

트 콘크리트의 슬럼프 측정은 작업가능시간이 15~30분 사이이므로 타설 후 약15분 정도에서 실시하였다.

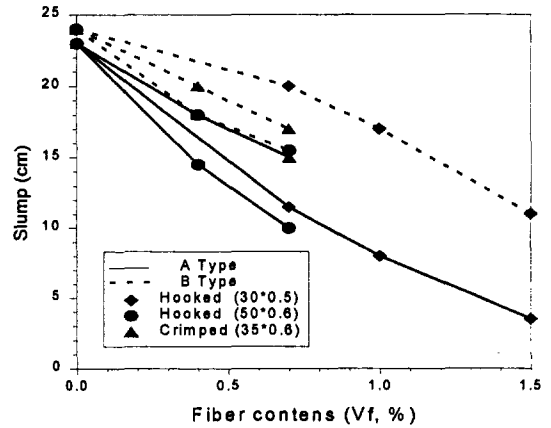


Figure 3 Slump for Fiber Contents of SFRC

강섬유 종류에 상관없이 섬유 혼입량의 증가에 따라 슬럼프는 현저히 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 강섬유의 비표면적이 골재에 비하여 상대적으로 크기 때문에 수분이 강섬유의 표면에 흡착되고 시멘트 페이스트 또한 강섬유 표면에 부착됨으로써 콘크리트의 유동성을 부여하기 위해 요구되는 시멘트 페이스트량이 감소함으로써 강섬유 자체가 매트릭스의 유동성을 억제하기 때문에 슬럼프의 급격한 저하를 가져온다고 생각된다.

또한 시멘트 종류에 따른 슬럼프의 경향을 살펴보면, 보통시멘트를 사용하였을 경우에는 무보강 콘크리트에 비하여 섬유 혼입량의 증가에 따라 두드러지게 감소하였으나 초속경 시멘트를 사용한 경우에 있어서 타설후 15분 이내에 측정된 슬럼프는 오히려 보통시멘트 보다 슬럼프 감소량이 작게 나타났다. 이것은 보통시멘트보다 소요 작업시간내에서는 초속경 시멘트를 사용한 강섬유보강콘크리트가 작업성이 양호함을 보여주는 결과이다.

3.2 강섬유 보강에 따른 강도변화 특성

Table 5는 재령에 따른 배합조건별 강도특성과 상대압축강도비를 나타낸 것이며, Table 6은 강섬유 혼입율, 강섬유 종류, 강섬유 형상비, 시멘트 종류에 따른 할렬인장강도 발현과 무보강 콘크리트에 대한 상대할렬인장강도의 비를 나타낸 것이다.

강섬유 혼입량의 증가에 따라 압축강도는 증가하는 경향을 나타내었으며, 섬유 종류에 따라 형상비가 클수록 증가되었다. 초속경시멘트를 사용한 경우에는 초기에 강도발현을 나타내기 때문에 보통시멘트

를 사용하였을 때 보다 다소 낮은 강도를 나타내었다. 또한, 섬유 혼입량의 증가에 따라 인장강도는 증가하는 경향을 보였으며, 보통시멘트를 사용한 경우보다 초속경시멘트를 사용한 경우가 상대적으로 높게 나타났다.

Table 5 Compressive Strength for Age of SFRC by Cement and Steel Fiber Types

Type	Compressive strength (kgf/cm ²)							Relative compressive Strength Ratio	
	3hrs	6hrs	12 hrs	1day	3day	7day	28 day		
A	F0	—	—	—	76	167	207	242	1.00
	S07H	—	—	—	95	230	281	352	1.45
	S10H	—	—	—	105	265	294	383	1.58
	S15H	—	—	—	117	261	299	374	1.54
	L04H	—	—	—	111	191	268	361	1.49
	L07H	—	—	—	120	204	301	394	1.63
	P04C	—	—	—	80	171	262	349	1.44
	P07C	—	—	—	98	207	292	391	1.62
B	F0	115	121	127	185	227	302	307	1.00
	S07H	139	143	161	200	276	332	390	1.21
	S10H	152	158	173	219	319	347	405	1.26
	S15H	170	195	212	251	370	393	434	1.35
	L04H	167	179	184	239	343	390	402	1.25
	L07H	178	201	217	287	377	427	446	1.39
	P04C	134	150	171	237	346	370	382	1.19
	P07C	166	167	201	217	363	393	413	1.29

주) A : Normal cement B : Rapid-set cement F : Fiber
 S : 30×0.5mm L : 50×0.6mm P : 35×0.6mm
 H : Hooked fiber C : Crimped fiber

주) A : Normal cement B : Rapid-set cement F : Fiber
 S : 30×0.5mm L : 50×0.6mm P : 35×0.6mm
 H : Hooked fiber C : Crimped fiber

섬유혼입량 증가에 따른 휨강도 실험결과는 Table 7과 Fig.4와 같다. 초속경시멘트를 사용한 콘크리트가 보통포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트보다 높았으며, 강섬유의 혼입량이 증가함에 따라 크게 나타났다. 또한 Hooked(83)형 강섬유를 사용했을때가 Crimped형 보다 높게 나타났다. 휨강도에 영향을 미치는 주요인자는 형상비 및 섬유의 형상이므로 섬유와 매트릭스 사이의 결합과 연결효과로 인한 복합체에서 섬유로의 응력전달 때문에 형상비가 가장 큰 Hooked형(83)이 가장 높은 강도발현을 나타냈고 상대적으로 형상비가 작은 Hooked(60)형과 Crimped(58)형 섬유가 낮은 휨강도 발현 특성을 나타냈다.

Fig.5와 Fig.6은 보통콘크리트 및 초속경시멘트를 사용한 콘크리트의 각 강도에 대해 상대강도를 비교한 것이다. 보통콘크리트에서 강섬유 혼입을 0.7%까지는 각 강도별 상대강도에 차이가 거의 없으나 1.0%이상에서는 다소 차이가 나기 시작하였으며 1.5%에서는 현저한 차이를 나타냈다. 초속경시멘트를 사용한 콘크리트는 보통시멘트를 사용한 콘크리트와 유사한 경향을 나타냈으나 보통 시멘트를 사용한 콘크리트와 달리 상대압축강도에 비하여 상대 인장강도 가장 높게 나타났다. 따라서 강섬유 보강 콘크리트는 압축강도 보다는 휨, 인장강도의 증진에 있어서 더 효과적임을 알 수 있었다.

Table 6 Splitting Tensile Strength of SFRC by Cement Types

Classification	Type	A Type		B Type	
		Splitting Tensile Strength (kgf/cm ²)	Relative Tensile Strength Ratio	Splitting Tensile Strength (kgf/cm ²)	Relative Tensile Strength Ratio
	F0	30.4	1.0	31.0	1.0
	S07H	44.2	1.454	47.5	1.532
	S10H	48.6	1.598	50.2	1.619
	S15H	53.7	1.766	55.1	1.779
	L04H	34.8	1.145	39.2	1.266
	L07H	41.5	1.364	48.2	1.556
	P04C	37.0	1.218	38.0	1.226
	P07C	38.2	1.258	44.4	1.434

Table 7 Flexural Strength of SFRC by Cement Types

Series	Type	A Type		B Type	
		Flexural Strength (kgf/cm ²)	Relative Flexural Strength	Flexural Strength (kgf/cm ²)	Relative Flexural Strength
	F0	47.3	1.0	55.7	1.0
	S07H	68.4	1.447	74.7	1.342
	S10H	78.9	1.67	85.8	1.541
	S15H	89.4	1.893	98.7	1.774
	L04H	61.7	1.307	69.6	1.25
	L07H	74.9	1.585	86.5	1.554
	P04C	56.0	1.186	63.3	1.137
	P07C	65.3	1.381	74.4	1.337

주) A : Normal cement B : Rapid-set cement F : Fiber
 S : 30×0.5mm L : 50×0.6mm P : 35×0.6mm
 H : Hooked fiber C : Crimped fiber

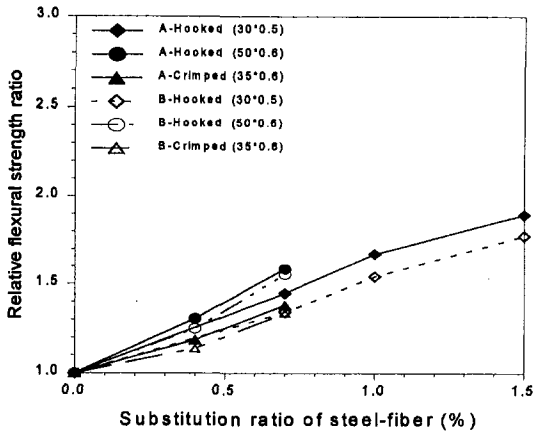


Figure 4 Relative Flexural Strength by Fiber Contents(28day)

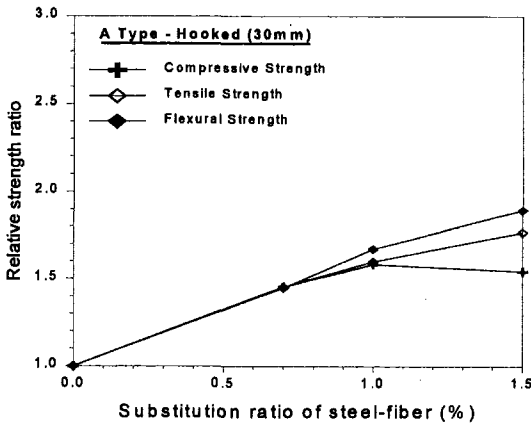


Figure 5 Comparison with Relative Strength by Fiber Contents (A Type)

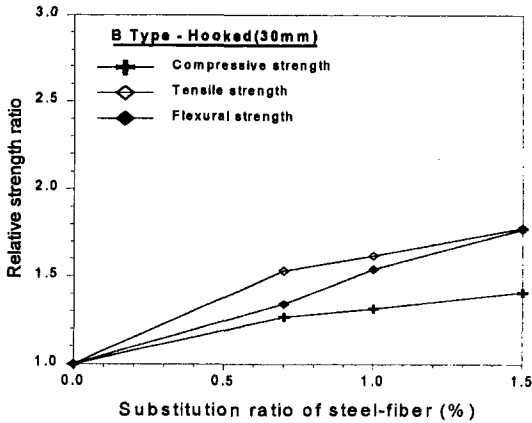


Figure 6 Comparison with Relative Strength by Fiber Contents (B Type)

3.3 침인성 특성

3.3.1 강섬유 형상에 따른 침인성 변화

Fig.7~Fig.9는 보통 시멘트를 사용한 콘크리트의 Hooked(60)형, Hooked(83)형 및 Crimped형의 하중-처짐 곡선을 나타낸 것이다. Fig. 7에서 무보강 콘크리트와 비교하였을 때 섬유 혼입에 의해 초기균열 발생 후에도 비선형 거동을 나타내면서 파괴

하중이 증가하였다. 이것은 Hooked 섬유 양단에서의 연결효과에 의한 것으로 사료된다. Fig.8에서는 섬유 혼입을 0.4%에서 초기균열 발생과 동시에 하중의 급격한 감소가 있었으나 0.7%에서는 0.4%에 비해 다소 작은 하중의 감소가 있는 후 처짐의 증가와 더불어 하중의 증가가 다소 있는 후 상당한 처짐 변형이 일어났음을 알 수 있었다. 하중-처짐 곡선의 끝 부분에서는 처짐의 지속적인 증가에도 불구하고 하중의 감소가 매우 완만함을 알 수 있다. 이것은 상대적으로 형상비가 큰 Hooked(83)형이 인발저항성이 크기 때문인 것으로 판단된다. Fig.9는 섬유 혼입을 0.4%에서 Hooked형과 유사하게 초기균열 발생과 동시에 급격한 하중의 감소를 동반하였으며 그 이후에 다소 하중의 증가가 있으나 초기균열 발생시의 하중에 못 미치는 하중까지 증가한 다음 점차 감소하는 경향을 나타냈다. 그러나 혼입을 0.7%일 때 초기균열 발생과 동시에 급격한 하중의 감소는 없었으며 상당한 하중의 증가가 있는 후 처짐의 증가와 더불어 하중이 감소 하였다.

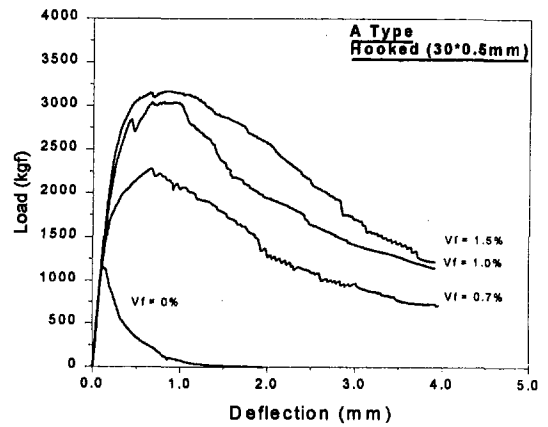


Figure 7 Load-Deflection Curves of Hooked fiber (A Type, 30×0.5mm)

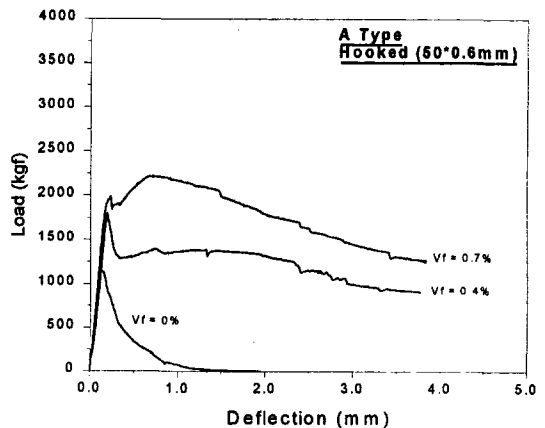


Figure 8 Load-Deflection Curves of Hooked Fiber (A Type, 50×0.6mm)

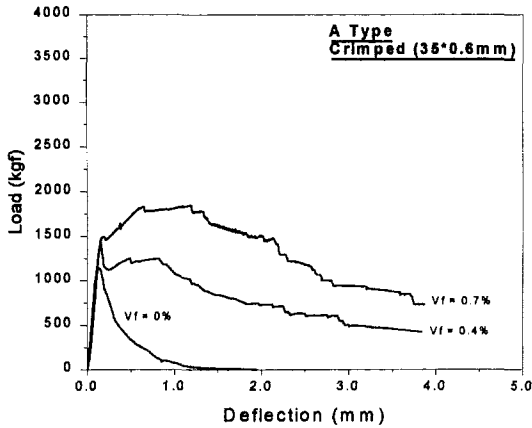


Figure 9 Load-Deflection Curves of Crimped Fiber (A Type, 35×0.6mm)

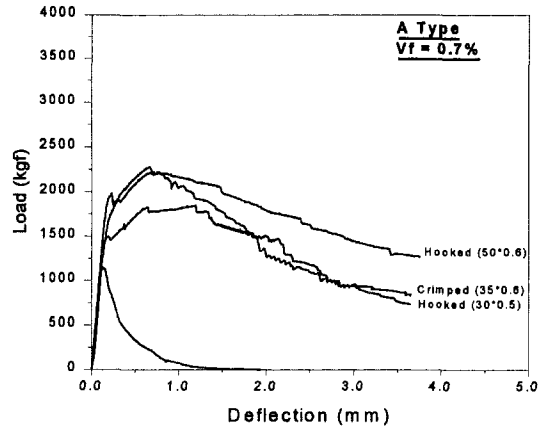


Figure 10 Load-Deflection Curves for Various Fiber Types (A Type, $V_f=0.7\%$)

3.3.2 강섬유 형상비에 따른 휨인성 변화

Fig.10~Fig.11은 섬유혼입률이 0.7%일때 형상비에 따른 하중-처짐 곡선을 나타낸 것이다. 휨인성은 형상비가 큰 Hooked (50×0.6)형이 가장 크게 나타났으며 Crimped(35×0.6)형 강섬유가 가장 적게 나타났다. 이러한 결과는 균열단면에서의 하중은 섬유와 매트릭스간의 부착력에 의해 섬유로 전달되어 섬유의 길이가 길면 섬유와 매트릭스간의 부착력이 증가하여 인발저항성이 커지기 때문이다. 또한 휨강도와 마찬가지로 섬유와 매트릭스 사이의 연결효과가 강섬유의 형상비(l/d)와 섬유의 형상에 따라 큰 차이가 있기 때문에 상대적으로 형상비가 작은 Crimped형 섬유가 다소 낮은 휨인성을 나타냈다고 판단된다. 또한 Hooked(60)형 섬유에서만 초기균열이후 하중의 감소량이 전혀 발생하지 않고 지속적인 하중의 증가로 비선형거동을 나타내었다. 이것은 Hooked(60)형 섬유가 상대적으로 형상이 작아서 단위체적당 혼입되는 본수가 많기 때문에 균열단면에서의 섬유의 분포가 조밀하여 섬유가 더 큰 하중을 전달할 수 있고 균열 발생시 균열의 진전을 억제하는 구속효과가 월등하여 잔류내력이 커지기 때문이라고 판단된다. Fig.11에서 초속경시멘트를 사용한 콘크리트는 형상비가 가장 큰 Hooked(83)이 최대 휨용력과 현저한 처짐 변형특성의 개선을 나타냈으며 Crimped(58)형은 이에 비해 매우 낮은 휨용력과 저조한 처짐변형을 나타냈다.

3.3.3 강섬유 혼입률에 따른 휨인성 변화

강섬유 형상별 섬유혼입률에 따른 휨인성계수의 결과는 Table 8과 Fig.12와 같다. 보통 시멘트를 사용한 콘크리트에 비해 초속경시멘트를 사용한 콘크리트의 휨인성 계수가 크게 나타났다. 동일한 섬유혼

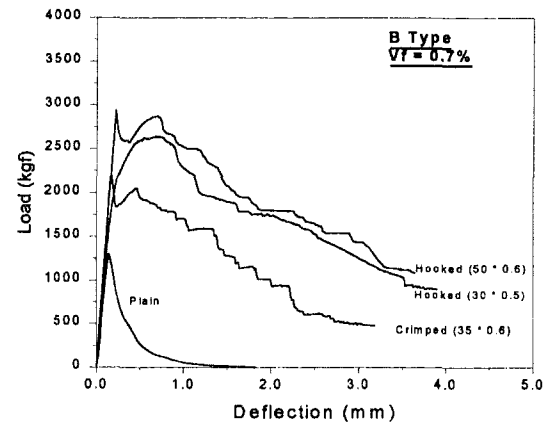


Figure 11 Load-Deflection Curves for Various Fiber Types (B Type, $V_f=0.7\%$)

입률 0.7%일 때 휨인성계수 결과를 살펴보면, 보통 시멘트를 사용한 콘크리트는 Crimped형에 비해 Hooked(60), Hooked(83)가 각각 13.3, 21.9%씩 증가하였고, 초속경시멘트를 사용한 콘크리트는 Crimped형(58)에 비해 34.6, 50.5% 증가하였다. 즉, Hooked형이 Crimped형에 비해서 보다 우수한 인성증진효과를 나타냈다.

Table 8 Flexural Toughness Parameters for Fiber Contents

V_f (%)	Toughness Parameters (kgf/cm^2)					
	A Type			B Type		
	Hooked (30×0.5)	Hooked (50×0.6)	Crimped (35×0.6)	Hooked (30×0.5)	Hooked (50×0.6)	Crimped (35×0.6)
0	1.1	1.1	1.1	1.5	1.5	1.5
0.4	—	39.5	29.7	—	43.0	29.8
0.7	54.4	58.5	48.0	61.8	69.1	45.9
1.0	71.3	—	—	86.6	—	—
1.5	82.4	—	—	98.6	—	—

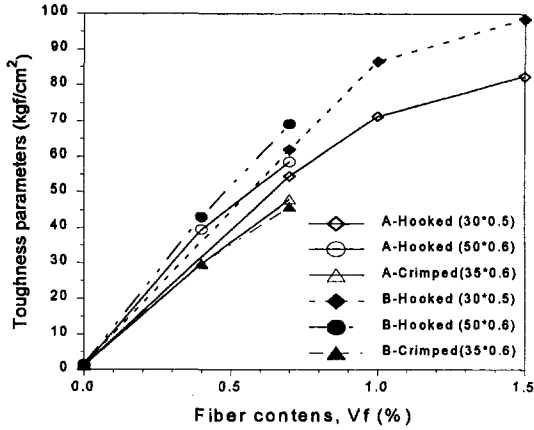


Figure 12 Flexural Toughness Parameters for and Fiber Contents

3.3.4 시멘트 종류에 따른 휨인성 변화

Fig.13~Fig.15는 초속경시멘트를 사용한 콘크리트의 Hooked(60)형, Hooked(50×0.6)형 및 Crimped형에 대한 하중-처짐곡선을 나타낸 것이다. Fig.7~Fig.9에서의 보통 시멘트를 사용한 콘크리트와 비교하여 보면 Fig.13에서는 초기균열이후에도 비선형적인 거동을 하면서 극한강도까지 증가한 후 처짐의 증가와 더불어 감소하는 유사한 거동을 보였다. 이것은 극한강도이후에 곡선의 꺾이는 부분은 섬유와 매트릭스 사이의 경계면에서 발생하는 인발력 감소에 의한 것으로 판단된다. Fig.14에서도 보통 시멘트를 사용한 콘크리트와 마찬가지로 초기균열의 발생과 동시에 급격히 하중이 감소하고 그 이후 약간의 하중 증가가 있는 후 점차 감소하는 경향을 나타내었으며, Fig.15에서는 처짐변형 특성이 다소 차이를 나타냈다. 초기균열의 발생과 동시에 급격한 하중의 감소는 보통 시멘트를 사용한 콘크리트와 유사하나 섬유혼입을 0.4%에서는 무보강 콘크리트와 유사한 거동을 나타냈으며 0.7%에서도 보통 시멘트를 사용한 콘크리트와 상이한 거동을 나타냈다.

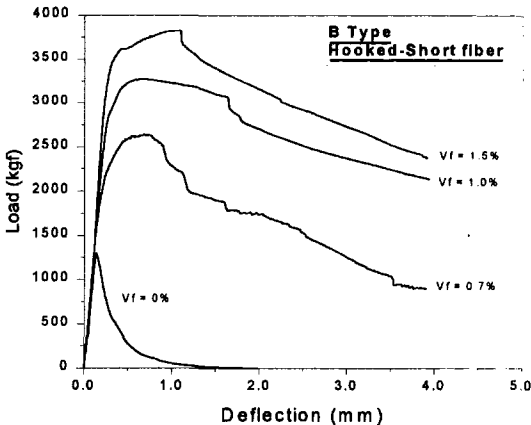


Figure 13 Load-Deflection Curves of Hooked Fiber (B Type, 30×0.5mm)

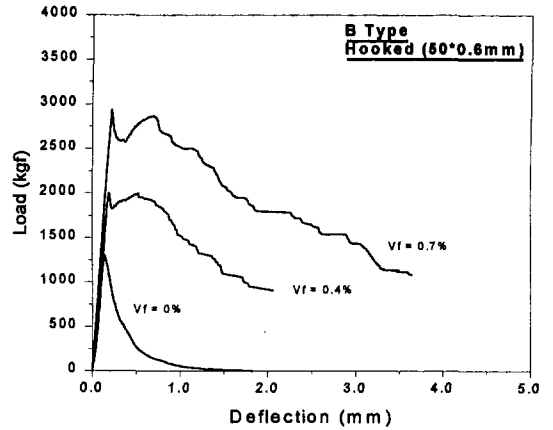


Figure 14 Load-Deflection Curves of Hooked Fiber (B Type, 50×0.6mm)

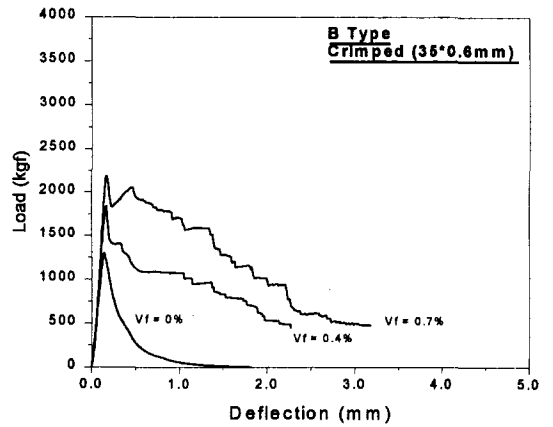


Figure 15 Load-Deflection Curves of Crimped Fiber (B Type, 35×0.6mm)

3.4 휨피로 저항특성

3.4.1 시멘트 종류가 휨피로 저항특성에 미치는 영향

보통 시멘트를 사용한 콘크리트와 초속경시멘트를 사용한 콘크리트의 각 배합조건별 응력수준에 따른 응력-피로횟수 곡선은 Fig.16 및 Fig.17과 같다.

시멘트 종류에 따른 피로저항성은 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트와 초속경 시멘트를 사용한 콘크리트 모두 비슷한 경향을 나타냈으나 초속경 시멘트를 사용한 콘크리트 보다 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트가 더 우수한 피로저항성을 나타냈다. 이것은 초속경 시멘트를 사용한 콘크리트가 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트보다 우수한 강도특성을 갖고 있으나 오히려 취성적인 성질을 더 갖고있으므로 피로 한계에서 급작스런 파괴가 일어났기 때문인 것으로 사료된다. 이와 같은 초속경 콘크리트의 피로내성의 저하 원인은 보통 콘크리트에 비해 상대적으로 높은 강도를 갖기 때문에 취성적 성질에 기인하는 것으로 피로하중하에서 균열집

중현상이 나타나기 때문에 상대적으로 보통시멘트를 사용한 콘크리트에 비하여 낮은 피로 강도를 갖는 것으로 사료된다.

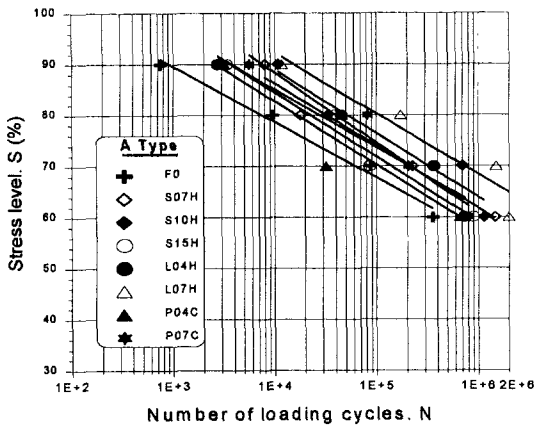


Figure 16 S-N Curves for SFRC by Various Fiber Types and Fiber Contents (A Type)

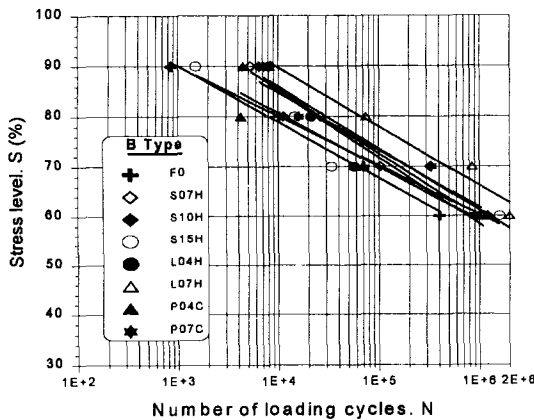


Figure 17 S-N Curves for SFRC by Various Fiber Types and Fiber Contents (B Type)

3.4.2 강섬유 형상에 따른 피로저항성 변화

Fig.18과 Fig.19는 보통콘크리트 및 초속경시멘트를 사용한 콘크리트의 섬유 혼입율 0.7%일 때 섬유 형상에 따른 S-N 곡선을 나타낸 것이다. 형상비가 크고 Hooked형 섬유를 사용한 경우가 Crimped형 섬유를 사용한 경우보다 높은 피로저항성을 보였다. 강섬유보강 콘크리트의 200만회에서 정적극한강도에 대한 휨피로 수명은 무보강 콘크리트의 경우 약 53%정도를 나타내었으며, 강섬유보강 콘크리트는 약 54~65% 정도를 나타냈다. 시멘트의 종류에 따라 Hooked(60)형 강섬유를 사용하였을 경우 이에 대한 경향을 살펴보면, 보통 시멘트를 사용한 콘크리트에서 55.4~60.1%, 초속경 시멘트를 사용한 콘크리트에서 55.9 ~58.4%의 피로수명을 나타냈다.

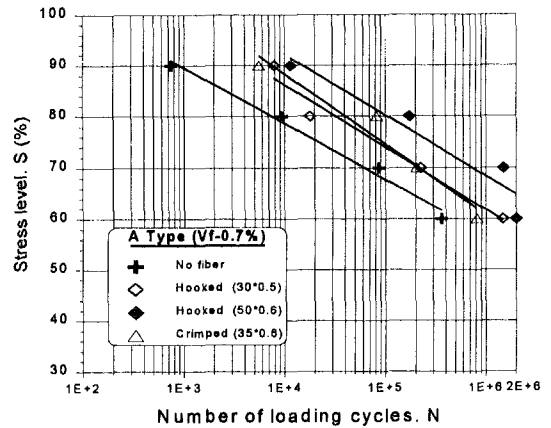


Figure 18 S-N Curves by Various Fiber Types (A Type, V_f 0.7%)

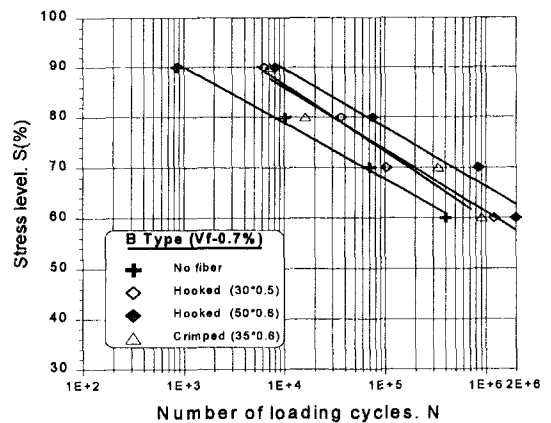


Figure 19 S-N Curves by Various Fiber Types (B Type, V_f 0.7%)

3.4.3 강섬유 혼입률에 따른 피로저항성 변화

강섬유의 혼입률에 따른 피로저항 특성은 Fig.20과 Fig.21에 나타내었다. 보통콘크리트 및 초속경시멘트를 사용한 콘크리트 모두에 있어서 강섬유 혼입량의 증가에 따라 피로저항성이 증가함을 볼 수 있다. Fig.20과 21에서 나타낸 바와 같이 Hooked(60)형 일 때 섬유 혼입량 1.0%까지는 무보강 콘크리트보다 피로저항성이 현저히 개선됨을 알 수 있으나, 섬유혼입률이 1.5%로 증가되면서 오히려 0.7%보다 낮은 피로저항성을 나타내었다. 피로 저항성은 섬유혼입률이 1.0%일 때가 가장 양호한 특성을 보이는 것으로 나타났으며, 섬유혼입율 1.5%를 사용시는 피로저항에 취약한 것으로 판단된다. 섬유혼입율 0.7%일 때 휨피로 수명은 보통 시멘트를 사용한 콘크리트는 56.7~64.8%를 초속경시멘트를 사용한 콘크리트는 57.5~62.7%를 각각 나타냈으며, 예상 피로수명은 극한강도의 60%수준의 범위가 됨을 알 수 있었다.

S_{max} 의 변화에 따른 피로시험 결과는 Table 9와 10에 나타 내었다.

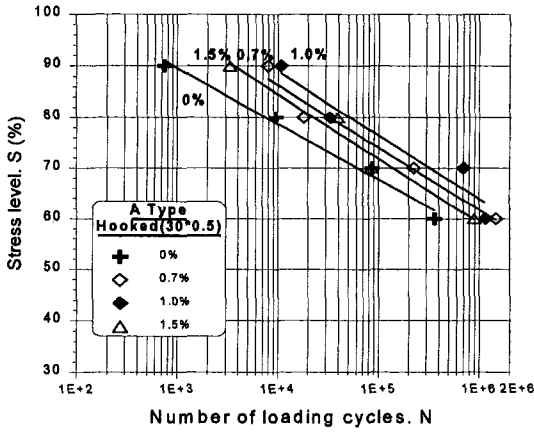


Figure 20 S-N Curves of Hooked Fiber (A Type, 30×0.5mm)

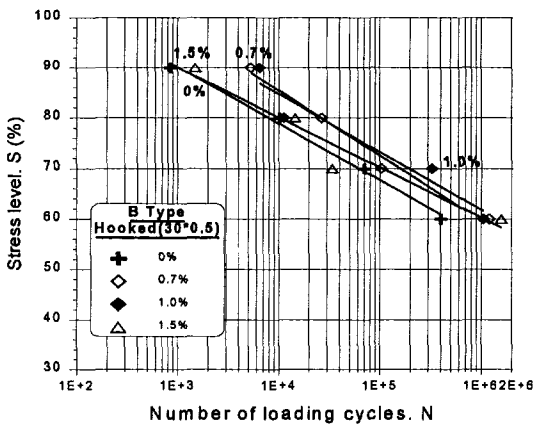


Figure 21 S-N Curves of Hooked Fiber (B Type, 30×0.5mm)

4. 결론

본 연구에서는 강섬유보강 초속경시멘트 콘크리트의 휨인성 및 피로특성함을 강섬유 형상, 종류, 혼입율, 시멘트 종류를 변수로 하여 수행하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 보통포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트가 초속경시멘트를 사용한 콘크리트에 비하여 강섬유 혼입으로 인한 압축강도 발현비율이 높게 나타났으며, 초속경시멘트를 사용한 콘크리트는 강섬유 혼입에 따른 영향이 작은 것으로 나타났다.
2. Hookde형 섬유로 보강된 콘크리트가 Crimped형 섬유를 사용한 콘크리트에 비하여 휨인성계수가 크게 나타나 더 높은 에너지 흡수능력을 보였으며, 형상비가 증가할수록 휨에 대한 저항성이 높은 것으로 나타났다.
3. 강섬유의 혼입에 따른 휨피로저항성 평가결과 보통포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트가 초속경시멘트를 사용한 콘크리트에 비해 피로저항성이 큰 것으로 나타났다. 이것은 초속경 시멘트를 사용한

콘크리트가 보통시멘트를 사용한 콘크리트에 비하여 취성적이기 때문인 것으로 판단된다.

4. 정적 극한강도에 대한 휨 피로수명은 무보강 콘크리트가 53%정도로 나타났으며 강섬유 보강콘크리트는 54~65%정도로 나타났다.
5. 향후연구과제로서는 실제구조물의 적용에 따른 문제점을 보완하기 위해 장기재령에 따른 특성분석이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

Table 9 Test Results of Flexural Fatigue Test (A Type)

Classification	Ultimate Flexural Load (kgf)	Stress Level (%)	Stress Ratio	P _{max} (kgf)	P _{min} (kgf)	Number of Cycles (N)
A-F0	1050	90	0.1	945	95	742
		80		840	84	9,471
		70		735	74	86,722
		60		630	63	361,068
A-S07H	1523	90		1,371	137	7,912
		80		1,218	122	18,067
		70		1,066	107	225,546
		60		914	91	1,464,761
A-S10H	1754	90		1,579	158	10,697
		80		1,403	140	33,106
		70		1,228	123	701,200
		60		1,052	105	1,154,220
A-S15H	1988	90	1,789	179	3,312	
		80	1,590	159	39,017	
		70	1,392	139	85,693	
		60	1,193	119	896,388	
A-L04H	1372	90	1,235	123	2,706	
		80	1,098	110	45,459	
		70	960	96	367,689	
		60	823	82	746,379	
A-L07H	1664	90	1,498	150	11,534	
		80	1,331	133	173,638	
		70	1,165	116	1,493,609	
		60	998	100	2,000,000	
A-P04C	1245	90	1,121	112	3,112	
		80	996	100	45,678	
		70	872	87	32,006	
		60	747	75	672,588	
A-P07C	1450	90	1,305	131	5,541	
		80	1,160	116	82,138	
		70	1,015	102	206,845	
		60	870	87	811,039	

주) A : Normal cement F : Fiber S : 30×0.5mm
 L : 50×0.6mm P : 35×0.6mm H : Hooked fiber
 C : Crimped fiber

Table 10 Test Results of Flexural Fatigue Test (B Type)

Classification	Ultimate Flexural Load (kgf)	Stress Level (%)	Stress Ratio	P _{max} (kgf)	P _{min} (kgf)	Number of Cycles (N)
B-F0	1,237	90	0.1	1,113	111	852
		80		990	99	10,192
		70		866	87	70,346
		60		742	74	402,865
B-S07H	1,660	90		1,494	149	5,332
		80		1,328	133	26,691
		70		1,162	116	103,141
		60		996	100	1,210,321
B-S10H	1,906	90		1,715	172	6,456
		80		1,525	152	11,304
		70		1,334	133	328,655
		60		1,144	114	1,056,152
B-S15H	2,194	90		1,975	197	1,508
		80		1,755	176	14,552
		70		1,536	154	33,888
		60		1,316	132	1,593,855
B-L04H	1,546	90	1,391	139	8,195	
		80	1,237	124	21,444	
		70	1,082	108	56,941	
		60	928	93	1,105,422	
B-L07H	1,922	90	1,730	173	8,112	
		80	1,538	154	74,949	
		70	1,345	135	847,509	
		60	1,153	115	2,000,000	
B-P04C	1,407	90	1,266	127	4,459	
		80	1,126	113	4,249	
		70	985	98	69,384	
		60	844	84	981,217	
B-P07C	1,654	90	1,489	149	7,130	
		80	1,323	132	16,163	
		70	1,158	116	337,343	
		60	992	99	907,653	

주) B : Rapid-set cement F : Fiber S : 30×0.5mm
 L : 50×0.6mm P : 35×0.6mm H : Hooked fiber
 C : Crimped fiber

감사의 글

“ 본 연구는 강원대학교 석재복합 신소재 제품연구 센터의 연구비 지원에 의하여 수행되었음. ”

참고 문헌

[1] 장동일, 채원규, 손영현, “강섬유보강콘크리트의 휨 피로 거동에 관한 연구,” 한국콘크리트학회 논문집, 제4권,

제1호, pp.81~87, 1992

[2] ACI Committee 544, “Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete,” *ACI Materials Journal*, Vol.85, No.6, pp.583~593. 1988

[3] ASTM C 1018 - 84, “Standard Test Method for Flexural Toughness and First - Crack Strength of Fiber - Reinforced Concrete (using Beam with Third Point Loading),” *ASTM C 1018-84*, pp. 656~661, 1984

[4] Batson, G., “Flexural Fatigue Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams,” *ACI Journal*, Proceedings, Vol. 69, No. 11, pp. 673~677, 1972

[5] Committee on Cement-Concrete Road, “Study on the Flexural Fatigue Strength of Concrete”, *The Cement Association of Japan* pp.1~65, 1985

[6] JCI-SF 4, “纖維補強コンクリートの曲げタフネス 試験方法 - 纖維補強 콘クリートの 試験方法に関する規準,” *日本コンクリート 工學協會*, pp. 11~17, 1987

[7] Johnston, C.D. and Zemp, R.W., “Flexural Fatigue Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete-Influence of Fiber Content, Aspect Ratio, and Type” *ACI Material Journal*, Vol. 88, No.4, pp.374~383, 1991

[8] O'Neill, E.F., “Ultimate Strength of Fiber Reinforced Concrete under Cyclic Flexural Loading,” *Paper C-78-5*, U.S. Army Waterways Experiment Station, Vicksburg, pp. 15, 1978

[9] P. Balaguru, Ramesh Narahari, and Mahendra Patel, “Flexural Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete,” *ACI Material Journal*, Vol. 89, No. 6, pp. 541~546, 1992

[10] Zhang Jun and Henrik Stang., “Fatigue Performance in Flexure of Fiber Reinforced Concrete,” *ACI Material Journal*, Vol. 95, No. 1, pp. 58~66, 1998