

고강도 강섬유보강 콘크리트의 역학적 특성 및 장기변형 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Mechanical Properties and Long-Term Deformations of High-Strength Steel Fiber Reinforced Concrete

윤의식* · 박승범**

Yoon, Eui-Sik · Park, Seung-Bum

Abstract

This study presents basic information on the mechanical properties and long-term deformations of high-strength steel fiber reinforced concrete(HSFRC). The influence of steel fiber on modulus of elasticity, compressive, splitting tensile and flexural strength, and drying shrinkage and creep of HSFRC are investigated, and flexural fracture toughness is evaluated. Test results show that the effect of steel fibers on the compressive strength is negligible, and the modulus of elasticity of HSFRC increased with the increase of fiber volume fraction. And the effect of fiber volume fraction(V_f) and aspect ratio(l_f/d_f) on tensile strength, flexural strength and toughness is extremely prominent. It is observed that the flexural deflection corresponded to ultimate load increased with the increase of V_f and l_f/d_f , and due to fiber arresting cracking, the shape of the descending branch of load-deflection tends towards gently. Also, the effect of addition of various amounts of fiber on the creep and shrinkage is obvious. Especially, the effect of adding fibers to high-strength concrete is more pronounced in reducing the drying shrinkage than the creep.

Keywords : high-strength steel fiber reinforced concrete(HSFRC), compressive strength, tensile strength, flexural strength, flexural fracture toughness, creep, drying shrinkage

요 지

본 연구에서는 고강도 강섬유보강 콘크리트(HSFRC)의 설계 및 시공을 위한 기초 자료를 제공하기 위하여 역학적 특성 및 장기변형 특성에 관한 연구를 수행하였으며, 탄성계수, 압축강도, 인장강도, 휨강도, 건조수축 및 크리프에 미치는 강섬유 혼입의 영향을 검토하고, 휨파괴인성을 평가하였다. 연구결과, HSFRC의 압축강도에 미치는 강섬유의 혼입효과는 그다지 크지 않았고, 탄성계수는 섬유혼입률이 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났으며, 인장강도, 휨강도 및 휨인성에 미치는 섬유혼입률(V_f) 및 섬유형상비(l_f/d_f)의 영향은 대단히 큰 것으로 나타났다. 이는 V_f 및 l_f/d_f 의 증가와 함께 극한하중에 상응하는 처짐량이 증가하고, 강섬유의 균열구속성능에 의해 하중-처짐곡선의 하강곡선이 완만하게 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 크리프 및 건조수축에 미치는 섬유혼입률(V_f)의 영향은 대단히 큰 것으로 나타났으며, 특히 고강도 콘크리트에 강섬유를 혼입하면 크리프 변형에 비해 건조수축 변형의 저감에 더욱 효과가 큰 것으로 나타났다.

핵심용어 : 고강도 강섬유보강 콘크리트, 압축강도, 인장강도, 휨강도, 휨파괴인성, 크리프, 건조수축

1. 서 론

최근 경제발전과 함께 구조물도 급속하게 대형화, 초고층화 및 다양화에 수반하여 사용되는 콘크리트 구조부재도 세장화됨에 따라 그동안 고강도 콘크리트가 고층건물의 기둥뿐만 아니라 장지간의 휨부재 등에 폭넓게 사용되어 왔으며, 고강도 콘크리트의 개념도 콘크리트 기술의 발달과 함께 더욱 고강도화 되는 것으로 변해 왔다(ACI 363 Committee, 1992). 그러나 고강도 콘크리트의 사용은 단면치수를 감소시켜 고정하중의 감소를 유도할 수 있으나 강성의 감소에 따

라 과도한 처짐 발생 등 사용성 측면에서 문제를 야기할 수 있으며, 압축강도 및 내구성이 우수하나 보통콘크리트와 마찬가지로 인장강도 및 휨강도가 작고 균열에 대한 저항능력이 작으며 최대응력 이후 급격한 취성파괴를 일으키는 본질적인 결함을 갖고 있으므로 구조용 재료는 고강도는 물론, 고인성고성능화가 요구되고 있다.

그러므로 외국에서는 그동안 콘크리트의 인장강도, 휨강도, 휨인성, 변형특성 및 균열에 대한 저항성 등 역학적 특성 개선에 효과적인 것으로 확인된 강섬유를 고강도 콘크리트용 보강재료로 사용한 고강도 강섬유보강 콘크리트(HSFRC,

*한국원자력안전기술원 구조부지실(E-mail: k319yes@kins.re.kr)

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

High-Strength Steel Fiber Reinforced Concrete)에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 지금까지의 연구결과 HSFRC는 고강도이면서 극한하중이후 거동이 개선되고 휨인장강도, 휨인성 및 강성이 증가하는 것으로 보고되고 있으나(Wafa 등, 1992, Wafa 등, 1993; Hsu 등, 1993; Juanming 등, 1997; Shiiba 등, 1992; Zhang 등, 191; Daniel 등, 1994; 朴成武 등, 2000; 阿部孝仁 등, 2001; Chunxiang 등, 1999). 아직까지 건조수축 및 크리프 등의 장기변형 특성 및 처짐에 관한 연구실적은 거의 없는 실정이다. 또한 국내에서는 그동안 학계 및 연구기관에 의해 강섬유보강 콘크리트에 대한 다양한 연구가 이루어져 콘크리트 표준시방서에 기준이 확립되었으나(한국콘크리트학회, 2003), HSFRC에 관한 연구는 일부 연구진에 의해 사용재료별, 배합조건별 역학적 특성에 관한 연구가 수행되었을 뿐 아직 초기단계에 불과한 실정이다. 따라서 토목·건축구조물의 설계·시공에 적용할 수 있는 기반구축을 위한 체계적인 연구가 요구되고 있다(구봉근 등, 1992; 박승범 등, 1990; 장동일 등, 2000; 류금성 등, 2005).

따라서 본 연구에서는 HSFRC의 설계 및 시공을 위한 기초 자료를 제공하기 위하여 실험을 통해 국내에서 생산되고 있는 여러 가지 형상의 강섬유를 사용한 고강도 강섬유보강 콘크리트의 강섬유의 혼입률 변화(0. 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 vol.%)에 따른 역학적 특성 및 장기변형 특성을 검토하였다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

2.1.1 시멘트

시멘트는 S사 제품의 보통 포틀랜드 시멘트(밀도 : 3.15 g/cm³, 분말도 : 3650 cm²/g)를 사용하였다.

2.1.2 골재

잔골재는 금강 상류에서 채취한 강모래를 입도조절하여 사용하였고, 굵은골재는 최대치수 13 mm의 부순돌을 사용하였으며, 각각의 물성은 Table 1과 같다.

2.1.3 강섬유

강섬유는 국내에서 시판중인 C사 제품의 양단후크형 강섬유(번들형), K사 제품의 파형 강섬유 및 H사 제품의 직선톱니형 강섬유를 사용하였으며, 이들 강섬유의 제원 및 물리적 특성은 Table 2와 같다.

2.1.4 실리카폼 및 충전제

실리카폼은 남아프리카 Anglo Alpha사 제품의 초미분말 실리카폼을 사용하였고, 충전제(Filler)는 평균입경 7.1 μ의 Silica Powder를 사용하였으며, 각각의 물리화학적 성질은 Table 3과 같다.

2.1.5 혼화제

고성능감수제(HWRA)는 일본 K사 제품의 나프탈렌 설폰산염 고축합물계의 Mighty-150을 사용하였고, 공기연행제는 표준형 AE제인 Vinsol Resin계의 AEA 202를 사용하였다.

2.2 배합 및 비비기

HSFRC의 배합은 물-결합재비율(W/B, water-binder ratio) 0.30, 실리카폼-시멘트비(S/C, silica fume-cement ratio)를 0.1로 하고, 강섬유는 콘크리트 중에서의 절대용적비로 각각 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0% 혼입하여 제조시 재료가 분리하지 않고 적당한 워커빌리티(VeBe 20sec)를 확보하도록 고성능 감수제를 첨가하면서 시험배합을 통하여 믹싱방법과 배합조건을 선정하였으며, 그 결과는 Table 4와 같다.

Table 1. Physical Properties of Aggregates

	Density (g/cm ³)	Absorption (%)	Fineness Modulus	Unit Weight (kg/m ³)	Abrasion(%)
Fine Aggregate	2.63	1.40%	2.70	1,554	-
Coarse Aggregate	2.79	0.75%	6.67	1,617	8.7

Table 2. Shape and Properties of Steel Fibers

Types	Cross Section		Length (mm)	Aspect Ratio	Density (g/cm ³)	Tensile Strength (MPa)	Modulus of Elasticity (GPa)
	Shape	Size(mm)					
Hooked End	Round	0.5	30	60	7.85	112.2	200.124
	Round	0.75	60	80	7.85	112.2	200.124
Crimped	Round	0.5	30	60	7.85	71.4	200.124
Indented	Rectangle	0.4×0.8	36	56	7.85	81.6	200.124

Table 3. Properties of Silica Fume and Filler Material

	Physical Properties			Chemical Compositions(%)				
	Density (g/cm ³)	Fineness (cm ² /g)	Particle Size(Aver.)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Ig. Loss
Silica Fume	2.21	263,000	1.36 μ	92.5	1.7	2.5	0.6	0.3
Silica Powder	2.60	4,480	7.1 μ (<80 μ)	98.9	0.7	0.3	-	-

Table 4. Mix Proportions of HSFRC

W/B	S/C (%)	S/a (%)	Air (%)	Fiber Content (vol.%)	Unit Weight (kg/m ³)						
					Cement	Silica Fume	Water	Fine Agg.	Filler	Coarse Agg.	Steel Fiber
0.3	0.1	0.48	3±0.5	0	520	52.0	172	725	72.5	853	0
				0.5	517	51.7	171	721	72.1	850	39.3
				1.0	515	51.5	170	718	71.8	844	78.5
				1.5	512	51.2	169	714	71.4	841	117.8
				2.0	510	51.0	168	710	71.0	836	157

[Note] HWRA = C × (1.0~1.5)%

HSFRC의 비빔은 강섬유의 균등분산과 밀실한 제조를 위하여 일본 C사 제품의 섬유분산용 Omni-Mixer(용량 30l)를 사용하였으며, 재료는 먼저 믹서에 시멘트, 실리카퓌름 및 충전재, 잔골재 및 굵은 골재를 동시에 투입하여 약 3분간 건비빔을 실시한 다음 물과 혼화제를 투입해 약 3분간 혼합하고, 마지막으로 강섬유를 일정한 속도로 투입하여 약 5분간 추가 혼합을 실시하였다.

2.3 공시체 제작 및 시험방법

2.3.1 압축강도 및 탄성계수

HSFRC의 압축강도는 KS F 2405[콘크리트의 압축강도 시험방법]에 준하여 15×30 cm 원주공시체를 제작하고 재령 28일간 20±2°C의 수중에서 표준양생을 실시한 후 측정하였으며, 탄성계수 및 포아송비는 KS F 2438[콘크리트의 정탄성계수 및 포아송비 측정방법]에 준하여 15×30 cm 원주공시체를 제작하고 재령 28일간 20±2°C의 수중에서 표준양생을 실시한 후 엑소텐소미터를 이용해 측정하였다.

2.3.2 인장강도

HSFRC의 인장강도는 KS F 2423[콘크리트의 인장강도 시험방법]에 준하여 15×30 cm 원주공시체를 제작하고 재령 28일간 20±2°C의 수중에서 표준양생을 실시한 후, 일본 S사의 B-Type Autograph를 사용하여 쪼갬인장강도를 측정하였다.

2.3.3 휨강도 및 휨인성

HSFRC의 휨강도 및 휨인성은 KS F 2566 및 JSCE-SF 4[강섬유보강 콘크리트의 휨인성 시험방법]에 준하여 15×15×55 cm의 보공시체를 제작하고 재령 28일간 20±2°C의 수

중에서 표준양생을 실시한 후, 일본 S사의 B-Type Autograph를 사용하여 변위제어방식에 의해 하중 및 수직변위를 측정해 하중-변위곡선을 구한 다음 휨강도 및 등가휨강도를 계산하여 휨인성을 평가하였다. 이때 등가휨강도는 Fig. 1과 같이 δ_{tb} (=지간/150)까지의 하중-변위곡선 아래의 면적을 구한 다음, 식 (1)에 의해 계산하였다.

$$f'_r = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \times \frac{l}{bh^2} \quad (1)$$

여기서, f'_r : 등가휨강도(MPa),

l : 지간,

δ_{tb} : 지간의 1/150의 처짐(mm)

b : 파괴단면의 폭(mm),

T_b : δ_{tb} 까지의 면적,

h : 파괴단면의 높이(mm)

2.3.4 건조수축

HSFRC의 건조수축 시험은 콘크리트의 휨인장특성 개선에 가장 효과적으로 확인된 양단후크형 강섬유(30 mm)를 사용한 경우에 대해서만 평가하였으며, 시험은 KS F 2424 및 ASTM C 512의 콤포레터법에 준하여 10×10×40 cm의 공시체를 제작하고 재령 1일에 탈형한 후, 온도 23±2°C, 습도 50±5%RH 조건의 항온항습실에 보관하면서 휘트모아 스트레인 게이지를 이용해 6주간 길이변화를 측정하였다.

2.3.5 크리프

HSFRC의 크리프시험은 콘크리트의 휨인장특성 개선에 가장 효과적으로 확인된 양단후크형 강섬유(30 mm)를 사용한 경우에 대해서만 평가하였으며, 시험은 ASTM C 512의 규

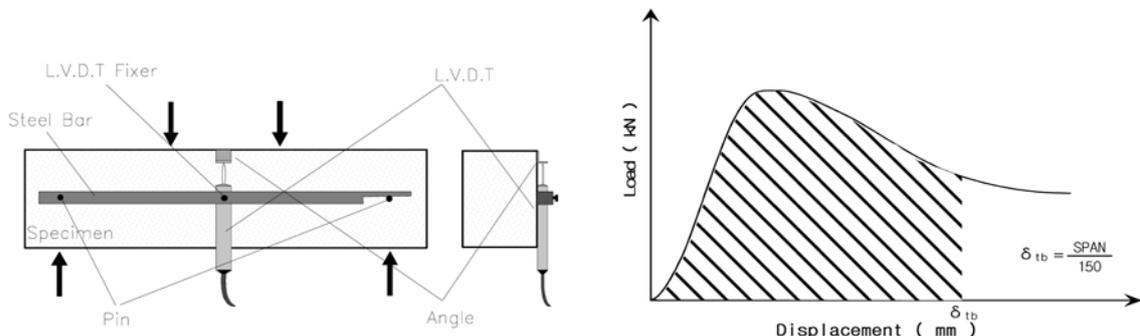


Fig. 1 Schematic of Flexural Test(KS F 2566)

정에 따라 15×30 cm 원주공시체를 제작하고 재령 28일간 20±2°C의 수중에서 표준양생을 실시한 후, 온도 23±2°C, 습도 50±5%RH 조건의 항온항습실에 보관하면서 강섬유를 혼입하지 않은 고강도 콘크리트의 파괴하중의 40%를 재하한 상태에서 1년간 휘트모아 스트레인 게이지를 이용해 총 길이변화량을 측정하였다. 또한 하중을 재하한 상태에서의 건조크리프(drying creep)는 건조수축에 비해 값이 크게 나타나지만 그 차이는 그다지 크지 않으므로 15×30 cm 원주공시체를 제작하고 공시체의 옆면을 에폭시로 도포(sealing)한 후 건조수축을 측정하여 근사적으로 건조크리프(drying creep)를 평가하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 압축강도, 탄성계수 및 포와송비

HSFRC의 재령 28일 압축강도 시험결과는 Table 5 및 Fig. 2에 나타낸 바와 같다.

이를 고찰하여 보면, HSFRC의 압축강도는 강섬유 혼입 여부에 관계없이 96.9~108.4 MPa를 나타내 ACI 363R(ACI 363 Committee, 1992)에서 정의하고 있는 고강도 콘크리트의 압축강도 기준(9000psi, 62MPa)를 크게 상회하는 것으로 나타났다. 강섬유 혼입에 의해서는 기존의 연구결과와 마찬가지로 강섬유의 종류 및 섬유형상비에 관계없이 섬유 혼입으로 인해 어느 정도(최대 9.3%) 압축강도 증진효과를 기대할 수 있으나 유의할 만한 수준은 아니며, 2.0% 혼입시에는 오히려 강섬유를 혼입하지 않은 경우에 비해 작은 강도를 나타내었다. 이는 섬유혼입률 증대에 따라 다짐시 섬유의 체

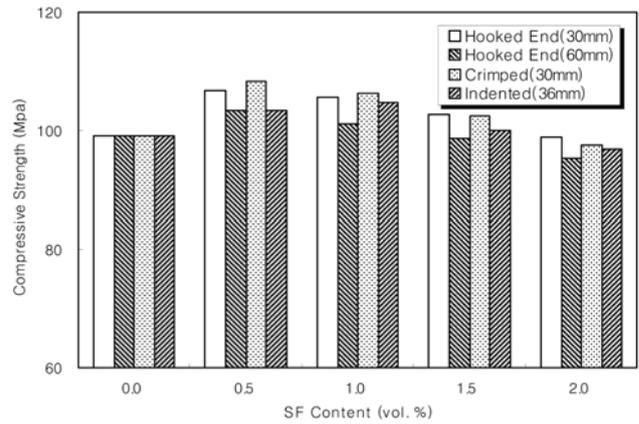


Fig. 2 Effect of Fiber Volume Fraction on Compressive Strength of HSFRC

적증대로 인한 섬유의 Fiberball 형성 및 분산성 저하로 인해 매트릭스와 섬유의 부착력 저하에 기인한 것으로 판단된다. 또한 압축강도 시험시 파괴과정을 관찰한 결과, 강섬유를 혼입하지 않은 경우에는 최대하중점 이후 큰 파괴음을 내면서 급격한 파괴를 나타내었으나, 강섬유를 혼입한 경우에는 강섬유가 가진 연성 및 변형률경화의 영향을 받아 연성적인 파괴를 나타내었다.

한편, HSFRC의 탄성계수는 Table 5에 나타낸 바와 같이 강섬유 혼입률 및 섬유형상비가 증대함에 따라 점진적으로 증가하는 경향을 나타내었으며, 이러한 경향은 일반적으로 콘크리트의 탄성계수가 구성성분의 강성(stiffness)과 체적에 의해 영향을 받는다는 것을 고려할 때, 매트릭스에 비해 강

Table 5. Mechanical Properties of HSFRC at 28days

SF Types	SF Contents		Compressive Strength (MPa)	Modulus of Elasticity (GPa)	Poisson's Ratio	Splitting Tensile Strength (MPa)	Flexural Strength (MPa)	Equivalent Flexural Strength (MPa)
	vol.%	$V_f l_f / d_f$						
Hooked End(H)	0	0	99.2	33.8	0.209	6.3	11.3	1.13
	0.5	0.3	106.7	35.6	0.204	7.8	12.5	6.26
		0.4	103.4	34.9	0.204	8.5	12.9	6.60
	1.0	0.6	105.6	36.2	0.196	9.8	15.0	8.46
		0.8	101.1	36.7	0.190	11.2	16.5	9.47
	1.5	0.9	102.8	37.9	0.180	11.6	19.1	11.13
		1.2	98.7	38.6	0.176	12.3	20.9	12.52
	2.0	1.2	98.9	38.9	0.169	12.7	22.2	13.93
		1.6	95.3	39.6	0.168	14.0	24.8	15.95
	Crimped (C)	0	0	99.2	33.8	0.209	6.3	11.3
0.5		0.3	108.4	35.0	0.203	6.9	11.8	5.83
1.0		0.6	106.2	35.9	0.196	8.8	14.0	7.74
1.5		0.9	102.5	36.9	0.176	9.8	16.1	10.25
2.0		1.2	97.6	38.0	0.164	11.2	18.2	12.62
Indented (I)	0	0	99.2	33.8	0.209	6.3	11.3	1.13
	0.5	0.28	103.3	34.3	0.202	7.7	12.6	5.79
	1.0	0.56	104.7	35.6	0.197	9.7	14.4	7.58
	1.5	0.84	100.1	36.5	0.178	11.0	17.8	10.82
	2.0	1.12	96.9	37.4	0.163	12.0	19.9	13.36

Table 6. Correlation Analysis Results of Modulus of Elasticity and $V_f \cdot l_f/d_f$

Type of Steel Fiber	Correlation Coefficient	Standard Error	Coefficient Value	
			a	b
Hooked-End	0.908574	0.867985	1.005	4.367
Crimped	0.925795	0.632699	1.003	3.965
Indented	0.933120	0.550245	0.995	3.958
Complex	0.893960	0.797667	0.999	4.325

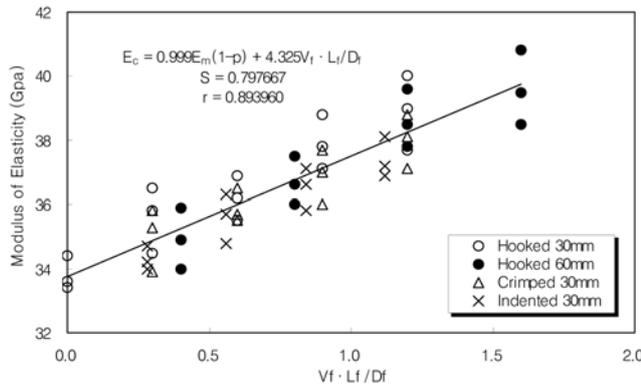


Fig. 3 Effect of $V_f \cdot l_f/d_f$ on Modulus of Elasticity of HSFRC

섬유의 탄성계수가 크고 강섬유가 균열발생을 억제해 건조 수축균열이 감소하였기 때문인 것으로 판단된다.

또한 HSFRC의 탄성계수에 미치는 강섬유 혼입효과를 분석하기 위하여 회귀분석을 실시하고 ACI 544.4R(ACI 544 Committee, 1988)에서 SFRC의 휨부재 설계시 고려되는 V_f 와 $V_f \cdot l_f/d_f$ 의 향으로 나타낸 결과, 다음 식 (2)와 같은 관계를 갖는 것으로 나타났으며, Fig. 3 및 Table 6에 나타낸 바와 같이 섬유의 형상에 관계없이 매우 높은 상관관계를 가지고 있으며, 사용한 모든 섬유에 대한 종합적인 회귀분석 결과에서도 결정계수(R)는 0.894 정도의 비교적 높은 상관관계를 나타내었다.

$$E_c = a \cdot E_m(1-p) + b \cdot V_f \cdot l_f/d_f \quad (2)$$

여기서, E_c : HSFRC의 탄성계수,
 E_m : 매트릭스(콘크리트)의 탄성계수,
 p : 강섬유혼입량,
 a, b : 상수

HSFRC의 포와송비는 Table 5에 나타낸 바와 같이 섬유 혼입률 및 섬유형상비의 증대에 따라 감소하는 경향을 나타내었으며, 이는 강섬유가 변형을 억제하는데 기여했기 때문인 것으로 판단된다. 또한 HSFRC의 포와송비와 강섬유 혼입효과 사이의 상관관계를 분석하기 위하여 회귀분석을 실시하고 V_f 와 $V_f \cdot l_f/d_f$ 의 향으로 나타낸 결과, 다음 식 (3)과 같은 관계를 갖는 것으로 나타났으며, Fig. 4 및 Table 7에 나타낸 바와 같이 섬유의 형상에 관계없이 결정계수(R)가 0.94 내외의 매우 높은 상관성을 가지고 있으며, 사용된 모든 섬유를 종합한 경우에도 R이 0.906 정도의 우수한 상관관계를 나타내었다.

Table 7. Correlation Analysis Results of Poisson's Ratio and $V_f \cdot l_f/d_f$

Type of Steel Fiber	Correlation Coefficient	Standard Error	Coefficient Value	
			a	b
Hooked-End	0.948587	0.005017	1.0140	0.0267
Crimped	0.942636	0.006294	1.0188	0.0355
Indented	0.945289	0.006082	1.0182	0.0376
Complex	0.906121	0.006854	1.0185	0.0314

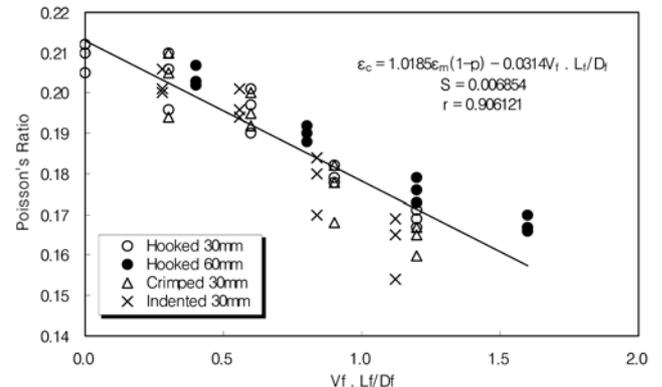


Fig. 4 Effect of $V_f \cdot l_f/d_f$ on Poisson's Ratio of HSFRC

$$\epsilon_c = a \cdot \epsilon_m(1-p) - b \cdot V_f \cdot l_f/d_f \quad (3)$$

여기서, ϵ_c : HSFRC의 포와송비,
 ϵ_m : 매트릭스(콘크리트)의 포와송비,
 p : 강섬유혼입량,
 a, b : 상수

3.2 쪼갬인장강도

HSFRC의 쪼갬인장강도는 Table 5에 나타낸 바와 같이 강섬유 혼입률 및 형상비의 증가에 따라 현저히 증가하는 경향을 나타내었으며, 이는 매트릭스 내에 랜덤 분산된 강섬유가 하중작용시 하중을 적절히 재분배하고 균열발생 억제 및 발생된 균열의 진전에 저항하기 때문인 것으로 판단된다. 강섬유의 형상에 따라서는 비슷한 섬유형상비를 가진 경우 양단 후크형 강섬유를 혼입한 경우가 파형 강섬유 및 직선 톱니형 강섬유를 혼입한 경우보다 우수한 인장강도를 나타내었으며, 이는 양단이 구부러져 있는 강섬유의 기하학적 특성상 하중작용시 매트릭스 내에서 앵커역할을 하여 pull-out에 대한 저항력이 커 파괴를 구속하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 양단후크형 강섬유를 사용한 경우 30 mm($l/d=60$) 섬유를 사용한 경우에 비해 60 mm($l/d=80$) 섬유를 사용한 경우 섬유혼입률에 따라 9.2~11.2% 정도 높은 인장강도를 나타내었다.

또한 쪼갬인장강도 시험과정 및 파단면을 관찰한 결과, 강섬유를 혼입하지 않은 경우에는 극한상태에 도달하면 균열 발생후 급격하게 파괴되고 파단면도 고르게 나타난 반면, 강섬유를 혼입한 경우에는 섬유 형상에 관계없이 처음에는 미세균열이 발생하지만 극한상태 도달 이후에도 계속적으로 큰 변형을 일으키고 함께 매트릭스 내에 완전히 균열이 발생해도 완전 파괴될 때 까지 강섬유가 뽑히지 않고 파단되며 저

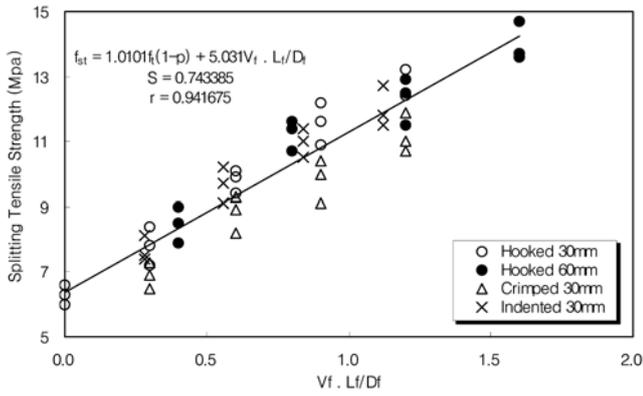


Fig. 5 Effect of $V_f \cdot l_f/d_f$ on Splitting Tensile Strength of HSFRC

Table 8. Correlation Analysis Results of Tensile Strength and $V_f \cdot l_f/d_f$

Type of Steel Fiber	Correlation Coefficient	Standard Error	Coefficient Value	
			a	b
Hooked-End	0.971016	0.604400	1.050	5.054
Crimped	0.964487	0.529731	0.962	4.345
Indented	0.977368	0.483338	1.013	5.364
Complex	0.941675	0.743385	1.010	5.031

향하는 것으로 확인되었다.

한편, HSFRC의 좌굴인장강도와 섬유혼입률 및 형상비와의 상관관계를 확인하기 위하여 회귀분석을 실시한 결과, 인장강도는 다음 식 (4)와 같이 강섬유의 $V_f \cdot l_f/d_f$ 항과 선형관계가 있는 것으로 나타났다.

$$f_{st} = a \cdot f_i(1-p) + b \cdot V_f \cdot l_f/d_f \quad (4)$$

여기서, f_{st} : HSFRC의 탄성계수,
 f_i : 매트릭스(콘크리트)의 탄성계수,
 p : 강섬유혼입률,
 a, b : 상수

3.3 휨강도 및 휨인성

HSFRC의 휨강도는 Table 5에 나타난 바와 같이 강섬유 혼입률 및 섬유형상비의 증가에 따라 현저히 증가하는 경향을 나타내었으며, 이는 매트릭스에 균열이 발생한 이후에 매트릭스와 강섬유 사이의 계면부착에 의해 강섬유가 하중을 적절히 재분배하고 균열의 진전에 저항하기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 경향은 섬유혼입률이 증가할수록 섬유의 간격이 좁아져 균열단면에서의 저항력이 증대되므로 휨강도는 더욱 증가하는 것으로 나타났다.

또한 강섬유의 형상에 따라서는 인장강도와 마찬가지로 양단 후크형 강섬유, 직선톱니형 강섬유 및 파형 강섬유를 혼입한 경우의 순으로 우수한 휨강도를 나타내었으며, 양단 후크형 강섬유를 사용한 경우 30 mm($l/d=60$) 섬유를 사용한 경우에 비해 60 mm($l/d=80$) 섬유를 사용한 경우 섬유혼입률에 따라 6.6~11.2% 정도 높은 휨강도를 나타내었다.

또한 HSFRC의 휨강도에 미치는 강섬유 혼입효과를 분석하기 위하여 회귀분석을 실시하고 ACI 544.4R(ACI 544

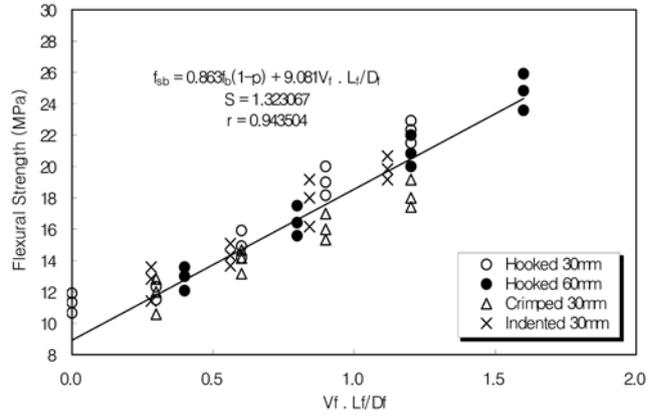


Fig. 6 Effect of $V_f \cdot l_f/d_f$ on Flexural Strength of HSFRC

Table 9. Correlation Analysis Results of Flexural Strength and $V_f \cdot l_f/d_f$

Type of Steel Fiber	Correlation Coefficient	Standard Error	Coefficient Value	
			a	b
Hooked-End	0.971981	1.110282	0.889	9.408
Crimped	0.950364	0.900185	0.944	6.211
Indented	0.960404	0.987148	0.952	8.192
Complex	0.943504	1.323067	0.863	9.081

Committee, 1988)에서 SFRC의 휨부재 설계시 고려되는 V_f 와 $V_f \cdot l_f/d_f$ 의 항으로 나타난 결과, 다음 식 (5)와 같은 선형관계를 갖는 것으로 나타났으며, Fig. 6 및 Table 9에 나타난 바와 같이 섬유의 형상에 관계없이 매우 높은 상관관계를 가지고 있으며, 사용한 모든 섬유에 대한 종합적인 회귀분석결과에서도 결정계수(R)는 0.9435 정도의 우수한 상관관계를 나타내었다.

$$f_{sb} = a \cdot f_b(1-p) + b \cdot V_f \cdot l_f/d_f \quad (5)$$

여기서, f_{sb} : HSFRC의 휨강도,
 f_b : 매트릭스(콘크리트)의 휨강도,
 p : 강섬유혼입률,
 a, b : 상수

한편, HSFRC의 하중-처짐곡선 및 휨인성을 평가하기 위한 등가휨강도 산정결과는 Fig. 7~9 및 Table 5, Fig. 10에 나타난 바와 같다. HSFRC의 휨거동을 고찰하여 보면, 섬유를 혼입하지 않은 경우에는 초기 균열이 발생하기 전까지는 선형적 거동을 나타내지만 균열이 발생한 이후에는 하나의 균열이 진전되어 최대하중에 도달한 후에 급격히 파괴되었다. 반면, 강섬유를 혼입한 경우에는 매트릭스와 강섬유의 부착력이 감소하면서 서서히 다수의 미세균열이 발생하고, 균열이 발생한 이후에도 파괴시까지의 휨저항이 상당히 커 비선형 거동을 나타내었으며, 최대하중 이후에도 강섬유의 Bridging 작용에 의해 지속적으로 하중을 지지해 연성적인 거동을 하면서 강섬유의 뿔힘이 발생함과 함께 매트릭스와 강섬유 계면의 전단응력이 극한부착강도에 도달했을 때 불안정한 균열이 진전되어 파괴가 일어났다.

이러한 경향은 강섬유혼입률 증대에 따라 현저히 나타나 강

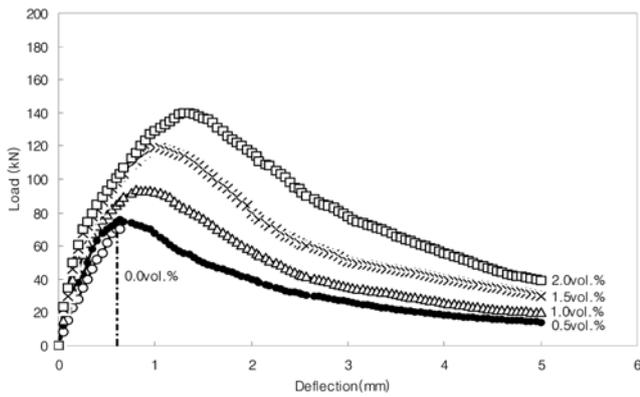


Fig. 7 Flexural Load-Deflection Curves of HSFRC using Hooked-End Fiber(30 mm)

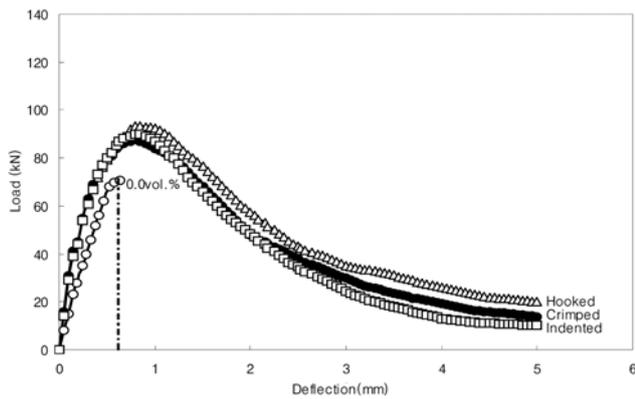


Fig. 8 Flexural Load-Deflection Curves of HSFRC with Fiber Volume Fraction 1%

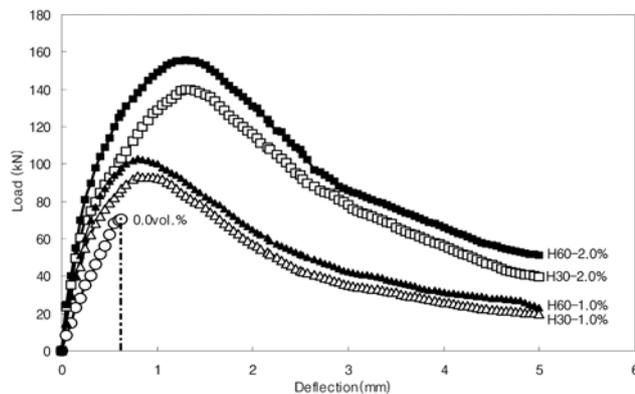


Fig. 9 Flexural Load-Deflection Curves of HSFRC using Hooked-end Fiber

섬유혼입률이 0%에서 2%로 증가함에 따라 강섬유의 종류별로 1.13 MPa에서 15.95 MPa로 증가하는 경향을 나타내었다. 강섬유의 종류에 따라서는 양단 후크형 강섬유를 혼입한 경우가 가장 우수한 휨인성을 나타내었으며, 직선톱니형 강섬유를 혼입한 경우와 파형강섬유를 혼입한 경우와 휨강도 및 휨인성은 거의 차이가 없는 것으로 휨인성은 작게 나타났다.

3.4 건조수축

공시체의 탈형(재령 1일) 직후부터 측정된 양단후크형 강섬유(30 mm)를 사용한 HSFRC의 건조수축 시험결과는 Fig. 11에 나타낸 바와 같다. 이를 고찰하여 보면, Young 및 Chern의 연구결과(Young 등, 1990)와 마찬가지로 강섬유의

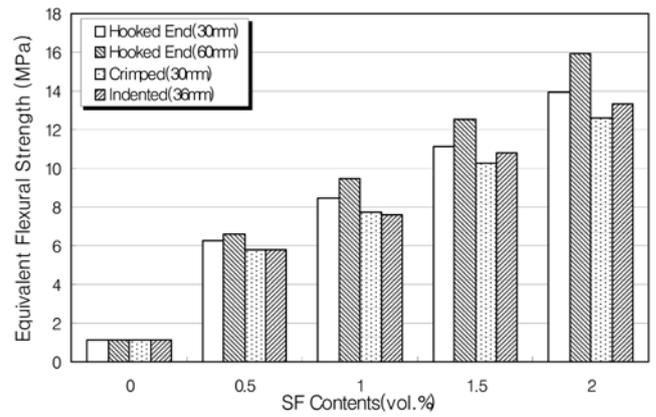


Fig. 10 Effect of Fiber Volume Fraction on Equivalent Flexural Strength of HSFRC

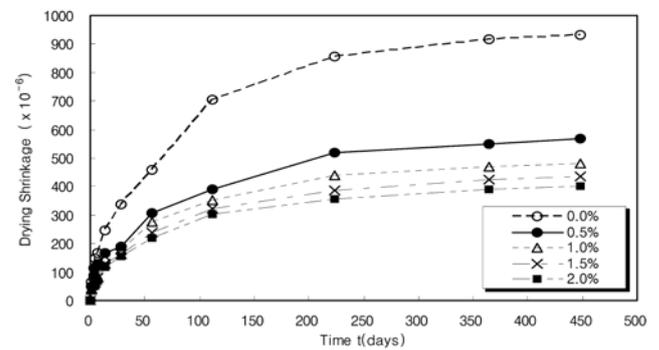


Fig. 11 Effect on V_f on the Drying Shrinkage Strains of HSFRC

혼입률 증가에 따라 HSFRC의 건조수축은 현저히 저감되어 강섬유를 혼입하지 않은 경우에 비해 강섬유혼입률이 0.5%, 1.0%, 1.5% 및 2.0%로 증가함에 따라 재령 1년에서 길이 변화량은 각각 39.9%, 49.0%, 53.9%, 57.6% 저감되는 것으로 나타났다. 이는 강섬유가 콘크리트 매트릭스와의 부착력에 의해 매트릭스를 구속하여 변형을 억제하였기 때문인 것으로 판단되며, 적정량의 강섬유 혼입은 건조수축 저감에 대단히 효과적인 것으로 판단된다.

3.5 크리프

Fig. 12는 재령 28일에 압축하중을 콘크리트 매트릭스의 40%(39.7 MPa)로 재하한 상태에서 1년간 측정된 30 mm 섬유를 사용한 HSFRC의 크리프변형 측정결과를 나타낸 것이다. Fig. 12(a)는 크리프와 건조수축이 합쳐진 총크리프 변형 측정결과이고, Fig. 12(b)는 하중을 재하하지 않은 상태에서 측정된 건조수축 변형(근사적인 건조크리프)을 비교해 나타내었으며, Fig. 12(c)는 총크리프 변형에서 건조수축 변형을 빼고 구한 크리프 변형을 나타낸 것이다.

이를 고찰하여 보면, HSFRC의 크리프 및 건조수축 변형은 모두 강섬유를 혼입하지 않은 경우에 비하여 섬유혼입률 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 크리프 변형량의 감소 정도는 강섬유를 혼입하지 않은 경우에 비해 강섬유혼입률이 0.5%, 1.0%, 1.5% 및 2.0%로 증가함에 따라 재령 1년에서 크리프는 각각 5.6%, 7.8%, 13.4%, 17.5% 저감되는 것으로 나타난 반면, 건조수축은 각각 33.0%, 42.7%, 49.0%, 53.5% 정도 저감되는 것으로 나타났다.

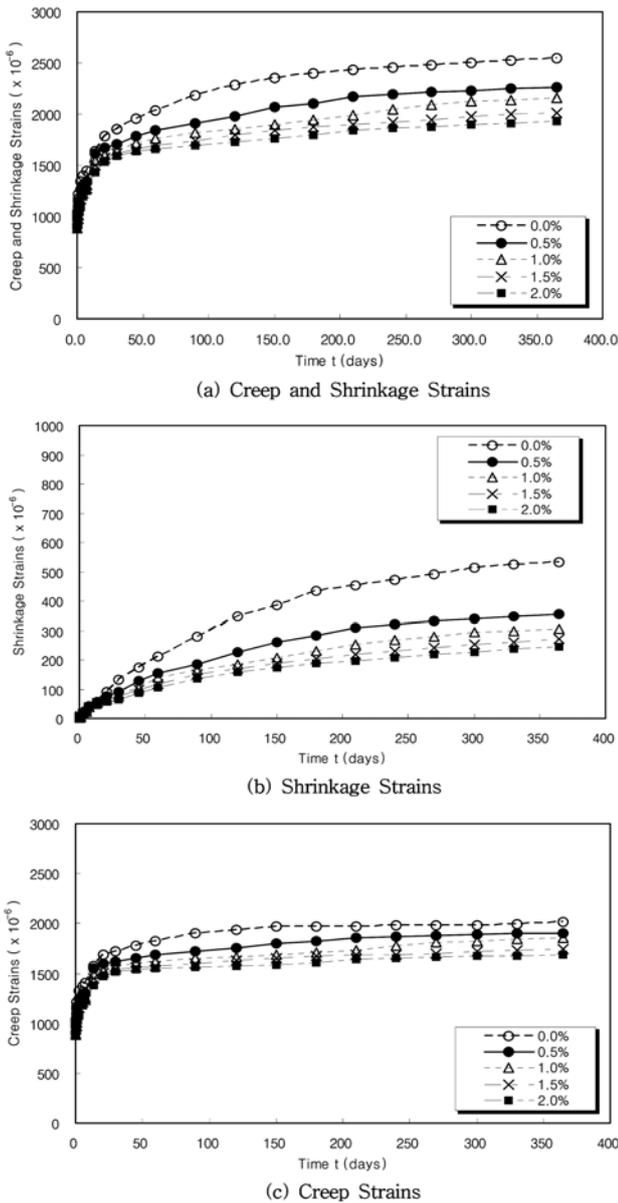


Fig. 12 Effect on V_f on the Creep Strains of HSFRC

이로부터 HSFRC의 크리프변형은 하중 및 건조수축에 의해 크게 영향을 받으며, 특히 고강도 콘크리트에 강섬유를 혼입하면 크리프 변형에 비해 건조수축 저감에 더욱 효과가 있을 것으로 예측되므로 HSFRC를 휨부재에 적용하면 건조수축 및 크리프에 의한 장기처짐을 제어하는데 효과가 클 것으로 판단된다.

또한 Table 10에 나타난 바와 같이 섬유혼입률이 0%에서

0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%로 증가함에 따라 비크리프(specific creep) 및 크리프계수는 각각 5.6~16.6% 및 4.8~13.4% 정도의 감소경향을 나타내었다.

4. 결 론

고강도 강섬유보강 콘크리트의 역학적 특성을 파악하기 위한 실험결과, 다음과 같은 결론이 도출되었다.

- HSFRC의 압축강도는 강섬유혼입률 증대에 따라 다소 증가하거나 감소한 반면, HSFRC의 탄성계수는 강섬유의 형상에 관계없이 강섬유를 혼입하지 않은 경우 33.8 GPa에서 섬유혼입률 증대에 따라 최대 39.6 GPa로 증가하였고, 포외송비는 강섬유를 혼입하지 않은 경우 0.209에서 섬유혼입률 증대에 따라 최소 0.160까지 감소하는 것으로 나타났다. 탄성계수 및 포외송비의 증가 및 감소경향은 모두 강섬유의 $V_f \cdot l_f/d_f$ 에 의존하는 선형함수임이 확인되었다.
- HSFRC의 쪼갬인장강도 및 휨강도는 강섬유의 형상에 관계없이 각각 강섬유를 혼입하지 않은 경우 6.3 MPa 및 11.3 MPa에서 섬유혼입률 증대에 따라 최대 12.6 MPa 및 22.3 MPa로 증가하였으며, 인장강도 및 휨강도의 증가경향은 모두 강섬유의 $V_f \cdot l_f/d_f$ 에 의존하는 선형함수임이 확인되었다. 또한 HSFRC의 휨거동에 미치는 강섬유의 혼입률(V_f) 및 섬유형상비(l_f/d_f)의 영향은 대단히 큰 것으로 나타나, 강섬유의 형상에 관계없이 등가휨강도는 강섬유를 혼입하지 않은 경우 1.13 MPa에서 섬유혼입률 증대 따라 최대 15.95 MPa로 현저히 개선되는 것으로 나타났다. 이는 매트릭스 내에 혼입된 강섬유가 하중작용시 하중을 재분배하고 극한하중 이후에도 강섬유의 Bridging 작용에 의해 지속적으로 하중을 지지해 연성적인 거동을 하면서 균열발생 억제 및 균열진전에 저항함과 함께 강섬유의 뿔힘과 함께 파괴가 발생할 때까지의 파괴에너지가 증가하기 때문인 것으로 판단된다.
- 강섬유의 형상에 따라서는 양단후크형 > 직선톱니형 > 파형 강섬유를 사용한 순으로 우수한 인장강도, 휨강도 및 휨인성을 나타내었으며, 섬유형상비에 따라서는 60 mm($l/d=80$)의 섬유가 30 mm($l/d=60$) 섬유를 사용한 경우에 비해 인장강도 및 휨강도는 모두 약 10~20% 우수하게 나타났다.
- HSFRC의 건조수축은 섬유혼입률 증대에 따라 현저히 감소하는 것으로 나타나, 강섬유를 혼입하지 않은 경우에 비해 강섬유를 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0% 혼입한 경우 건

Table 10. Creep Strains of HSFRC at 365days after Loading

V_f (%)	Applied Stress (MPa)	% of f_c'	Total Strains ($\times 10^{-6}$)	Drying Shrinkage ($\times 10^{-6}$)	Elastic Strains ($\times 10^{-6}$)	Basic Creep ($\times 10^{-6}$)	Specific Creep ($\times 10^{-6}/\text{MPa}$)	Creep Coefficient ϕ
0	39.7	40.0	2545	531	908	2014	50.73	2.218
0.5		37.2	2258	356	901	1902	47.91	2.111
1.0		37.6	2159	304	889	1855	46.73	2.087
1.5		38.6	2015	271	883	1745	43.95	1.976
2.0		40.1	1929	247	876	1682	42.37	1.920

조수축은 각각 39.9%, 49.0%, 53.9%, 57.6% 저감되는 것으로 나타났다. 이는 강섬유가 콘크리트 매트릭스와의 부착력에 의해 매트릭스를 구속하여 변형을 억제하였기 때문인 것으로 판단된다.

5. HSFRC의 크리프 및 건조수축은 모두 섬유혼입물 증대에 따라 감소하여 재하재령 1년에서 강섬유혼입률이 증가함에 따라 크리프에 비해 건조수축이 크게 저감되는 것으로 나타났다. 이로부터 HSFRC의 크리프는 하중 및 건조수축에 의해 크게 영향을 받으며, 특히 고강도 콘크리트에 강섬유를 혼입하면 크리프에 비해 건조수축 저감에 더욱 효과가 있을 것으로 예측되므로 HSFRC를 휨부재에 적용하면 건조수축 및 크리프에 의한 장기처짐을 제어하는데 효과가 클 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 SISTeC(R11-2002-101-01005-0)의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

장동일, 손영현, 채원규(2000) 강섬유보강 고강도 콘크리트의 응력-변형률 곡선 및 탄성계수 추정식 평가, **한국콘크리트학회지**, 한국콘크리트학회, 제12권 제2호, pp. 13-20.
 한국콘크리트학회(2003) **콘크리트표준시방서**.
 朴成武, 伊藤利治(2000) 超高强度纖維補强 콘크리트에關する基礎的研究, **콘크리트工學年次論文集**, Vol. 22, No. 2, pp. 331-336.
 阿部孝仁, 金子佳生, 三橋博三(2001) 短鋼纖維混入によるセメント系複合材料の高強度高靱性化とその基礎的特性, **콘크리트工學年次論文集**, Vol. 23, No. 2, pp. 205-210.
 ACI 363 Committee (1992) State-of-the-Art Report on the High-Strength Concrete(ACI 363R-92).
 ACI 544 Committee (1988) Design Considerations for Strl Fiber Reinforced Concrete (ACI 544.4 R-88; Reapproved 1994).
 Ashour, S.A., Mahmood, K. and Wafa, F.F. (1997) Influence of Steel Fibers and Compression Reinforcement on Deflection of High-Strength Concrete Beams, *ACI Structural Journal*, pp. 611-624.

Chunxiang, Q., Indubhushan, P. (1999) Properties of High-Strength Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams in Bending, *Journal of Cement and Concrete Research*, Vol. 21, pp. 73-81.
 Daniel, J.A., Shah, S.P. (1994) Fiber Reinforced Concrete Developments and Innovations(ACI SP -142).
 Hsu, L.S. and Hsu, T. (1993) Stress Strain Behavior of Steel-Fiber High-Strength Concrete under Compression, *ACI Structural Journal*, Vol. 91, No. 4, pp. 448-457.
 Jianming G., Wei, S., and Keiji, M. (1997) Mechanical Properties of Steel Fiber-Reinforced, High -Strength, Lightweight Concrete, *Journal of Cement and Concrete Research*, Vol. 19, pp. 307-313.
 Koo, B.K., Jung, K.S., and Kim, T.B. (1992) The Effects of Reinforcing of Steel Fiber on the Strength Properties of High-Strength Concrete, *Journal of KCI*, Vol. 4, No. 2, pp. 93-101.
 Park, S.B. and et. al. (1997) An Exprimental Study on the Durability and Drying Shrinkage of Steel Fiber Reinforced Concrete, *Proceeding of KCI*, Vol. 7, No. 2, pp. 80-83.
 Park, S.B., Yoon, E.S. (1990) An Experimental Study on the Development and Application of High-Strength Composites utilizing Waste Products, *Journal of KSCM*, Vol. 3, No. 1, pp. 23-35.
 Ryu, G.S., Park, J.J., and et. al. (2005) A Study on the Flexural Behavior of Ultra-Strength Steel Fiber Reinforced Concrete, *Proceeding of KCI*, Vol. 17, No. 1, pp. 334-336.
 Seo, J.M., Lee, J.H., and Yoon, Y.S. (2005) An Experimental Study on the Relationship between SFRC and HSC at Long-term Response, *Proceeding of KCI*, Vol. 17, No. 1, pp. 317-320.
 Shiiba, H., Honda, S., and Araki, A. (1992) Effect of Various Factors on the Strength of High-Strength Lightweight Concrete, *Proceeding of JCI*, Vol. 14, No. 1, pp. 291-306.
 Wafa, F.F. and Ashour, A.A. (1992) Mechanical Properties of High-Strength Fiber Reinforced Concrete, *ACI Material Journal*, Vol. 89, No. 5, pp. 449-455.
 Wafa, F.F. and Ashour, A.A. (1993) Flexural Behavior of High-Strength Fiber Reinforced Concrete Beams, *ACI Structural Journal*, Vol. 90, No. 3, pp. 279-287.
 Young, C.H. and Chern, J.C. (1990) Study of Factors Influencing Drying Shrinkage of Steel Fiber Reinforced Concrete, *ACI Structural Journal*, pp. 123-129.
 Zhang, M.H., Gjorv, O.E. (1991) Mechanical Properties of High-Strength Lightweight Concrete, *ACI Material Journal*, Vol. 88, NO. 3, pp. 240-247.

(접수일:2005.10.6/심사일:2005.11.17/심사완료일:2006.1.9)