

훅트강섬유보강 고강도콘크리트 보의 휨전단 거동

Flexural-Shear Behavior of Steel Fiber Reinforced High Strength Concrete Beams

한 형 섭^{*}

박 인 철^{**}

김 명 성^{**}

김 윤 일^{***}

Han, Hyung Sub

Park, In chul

Kim, Myung Sung

Kim, Yoon Il

ABSTRACT

Experimental study was conducted to investigate the flexural-shear behavior of hooked steel fiber reinforced high strength concrete(SFRHC) beams. Twenty beams with shear span-depth ratio of 1.45 were tested, of which variables were the contents of steel fiber with aspect ratio of 60, tension reinforcement ratio and concrete compressive strength of 60MPa and 80MPa.

Test results has shown that shear failure of the beams were changed into flexural-shear failure or flexural failure according to increasing steel fiber content, that SFRHC with slump of 15cm over and fiber volume ratio of 1.5% was possible in practice, and that proper volume ratio of steel fiber was 1.5%

1. 서론

건설 신소재의 하나인 강섬유보강 콘크리트(SFRC)는 일반 콘크리트에 비해 강도 증진 및 우수한 인성을 확보할 수 있어, 토목 및 건축구조물에 적용하기 위한 연구¹⁾가 활발히 이루어지고 있다.

이러한 강섬유보강 콘크리트는 내진벽, 기둥, 보접합부 등의 전단 보강에 유리하며, 강섬유보강 콘크리트보의 전단거동은 강섬유의 혼입률, 형상비, 인장철근비, 전단스팬비, 콘크리트의 압축강도 등의 영향을 받는다²⁾고 알려져 있으나, 고강도콘크리트 보에 대해서는 실험 연구가 부족하다.

이에 본 연구에서는 훅트강섬유보강 고강도콘크리트(SFRHC) 보의 섬유혼입률, 콘크리트의 압축강도, 인장철근비에 따른 거동의 변화를 조사하고, 기존 문헌에 보고된 강섬유 콘크리트의 전단강도 예측식의 정확성 등을 고찰하고자 한다.

2. 실험 개요

2.1 사용재료 및 배합

본 연구에 이용한 시멘트는 국내 H사의 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 잔골재는 양양군의 비중 2.58 조립률 2.94, 흡수율 1.82%인 하천사를, 굵은골재는 비중 3.14, 조립률 5.21, 흡수율 0.50%.

* 과학재단 인턴연구원

** 관동대학교 건축공학과 석사과정

*** 정회원, 관동대학교 건축공학과 교수

· 본 연구는 과학재단 특정기초(과제번호 : 97060201013) 연구의 일부임.

최대치수 13mm이하의 쇠석을 사용하였다. 혼화제로는 강섬유보강 콘크리트의 유동성 증진을 위해 K사의 폴리칼본산계와 J사의 나프탈렌계의 고성능 감수제를 사용하였고, 실험에 사용한 강섬유 및 인장철근의 특성은 표 1에 나타내었다.

강섬유보강 콘크리트는 요구되는 강도와 시공성을 고려하여 표 2와 같이 설계하였으며, 재료의 배합은 60l 용량의 강제식 믹서를 사용하여 아래의 그림 1과 같이 혼합하였다. 강도측정용 공시체는 $\phi 10\text{cm}$ 의 원통형 몰드에 타설하였으며, 1일후 탈형하여 $20\pm 2^\circ\text{C}$ 의 양생조에서 소정의 재령까지 수증양생을 실시하였다.

2.2 시험체 계획 및 실험방법

본 연구에서는 표 3과 같은 변수로 시험체를 계획하고, 높은 전단력을 도입시키기위해 그림 2와 같이 모든 시험체의 전단스팬비(a/d)를 1.45로 하였다. 각 시험체의 주철근에 2개의 철근계이지를 부착하여 변형을 측정하였으며, 스티럽의 변형은 재하점과 지지점 사이의 스티럽에 4개의 철근계이지를 부착하여 측정하였다. 또한 시험체의 처짐을 측정하기 위하여 시험체 중앙부에 LVDT를 설치하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구의 실험결과 및 기존 연구자들의 강섬유 콘크리트의 전단강도 예측값을 표 4에 나타내었다. 강섬유 혼입률이 증가함에 따라 콘크리트의 슬럼프는 감소하였으며, 혼입률 1.5% 이상에서는 슬럼프 감소폭이 크게 나타났다. 강섬유 혼입률에 따른 공시체의 압축강도는 혼입률에 따라 불규칙한 증감을 나타내고 있으나, 할열인장강도의 경우에는 강섬유의 혼입률이 증가함에 따라 거의 선형적인 증가를 보여주고 있으며, 섬유혼입률 1.5%와 2.0%에서는 베이스 콘크리트에 비해 약 2배 증가하였다.

Table 1. Properties of steel fiber and reinforcements

type		strength(Mpa)		specific gravity	aspect ratio
		yield	tensile		
steel fiber	hooked end (0.6×36mm)	-	1078.7	7.85	60
reinforce-ment	D6	480.5	617.8	-	-
	D13	402.1	647.2	-	-
	D16	451.1	647.2	-	-
	D19	343.2	500.1	-	-

Table 2. Mix proportion of base concrete

target compressive strength (MPa)	G_{max} (mm)	W/C (%)	S/a (%)	unit material content (N/m ³)				admix-ture SP (%)
				W	C	S	G	
60	13	33	50	2157	6541	7580	9629	1.0 ¹⁾
80		28	63	2118	7560	8727	5168	1.5 ²⁾

*1) naphthalene, *2) polycarboxylic acid

Table 3. variables of specimens

variable	parameter
steel fiber content (%)	• 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0
compressive strength (MPa)	• 60 (612kg/cm ²) • 80 (816kg/cm ²)
tension bar ratio	• $\rho = 0.24 \rho_b$ (2-D13) • $\rho = 0.38 \rho_b$ (2-D16) • $\rho = 0.48 \rho_b$ (2-D19)
stirrups	• with stirrups $\phi 6, s = 10.29\text{cm}$ $A_s / b \cdot s = 0.0046$ • without stirrups

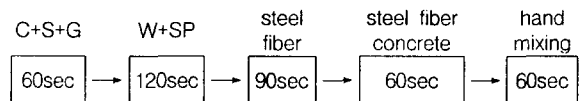


Fig 1. Flow chart of steel fiber concrete mixing

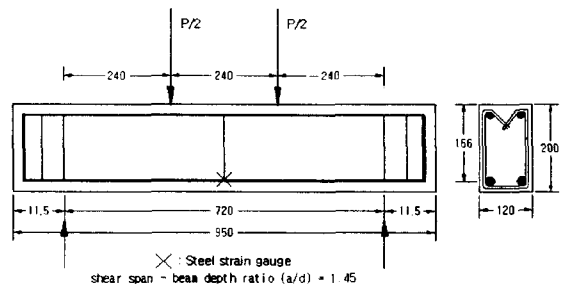


Fig 2. Details of test beams (unit : mm) with a/d=1.45

Table 4. Specimen details, Experimental and predicted load (P/2, kN)

Beam	slump (cm)	fiber content V_f (%)	strength(MPa)		reinforce-ment	Experim-ental ultimate Load	predicted ultimate shear load (predicted/observed)				Failure Mode
			compre-ssive	splitting tensile			Modified Zsutty eq.(1)	Modified ACI eq.(2)	Narayanan eq.(3)	Sharma eq.(4)	
F60-0.0-13	22.5	0.0	63.25	5.44	2-D13 (0.24 ρ_b) without stirrups	65.1	60.9 (0.935)	81.1 (1.246)	78.9 (1.211)	66.7 (1.023)	S* ¹
F60-0.5-13	15.5	0.5	57.76	7.29		95.2	78.7 (0.827)	99.8 (1.048)	104.0 (1.092)	89.2 (0.937)	FS* ²
F60-1.0-13	14.5	1.0	61.49	9.10		103.0	99.6 (0.967)	124.2 (1.206)	128.8 (1.251)	111.5 (1.082)	FS
F60-1.5-13	3.0	1.5	60.61	10.63		102.8	118.9	145.8	150.9	130.2	F* ³
F60-2.0-13	2.6	2.0	62.37	10.66		114.9	139.1	168.9	158.9	130.6	F
F60-0.0-13S	22.5	0.0	63.25	5.44		2-D13 (0.24 ρ_b) stirrup (ϕ 6mm, s=10.29cm)	101.4	105.2	125.4	123.2	110.9
F60-0.5-13S	15.5	0.5	57.76	7.29	97.3		142.6	144.0	148.3	133.5	F
F60-1.0-13S	14.5	1.0	61.49	9.10	97.3		143.9	168.5	173.1	155.7	F
F60-1.5-13S	3.0	1.5	60.61	10.63	96.2		163.2	190.1	195.2	174.5	F
F60-2.0-13S	2.6	2.0	62.37	10.66	109.0		183.4	213.2	203.2	174.8	F
F80-0.0-16	25.5	0.0	74.14	6.28	2-D16 (0.38 ρ_b) without stirrups		146.1	73.6 (0.501)	87.8 (0.601)	100.5 (0.688)	76.0 (0.520)
F80-0.5-16	23.6	0.5	82.38	8.14		157.9	97.1 (0.614)	113.8 (0.721)	125.5 (0.794)	98.6 (0.624)	S
F80-1.0-16	23.2	1.0	81.10	9.90		162.8	117.7 (0.723)	134.8 (0.830)	149.1 (0.919)	119.6 (0.737)	FS
F80-1.5-16	21.4	1.5	86.20	11.57		158.4	140.2	159.4	172.6	140.2	F
F80-2.0-16	16.5	2.0	82.18	12.36		179.5	160.3	179.0	187.3	149.1	F
F80-0.0-19	26.5	0.0	85.22	6.08	2-D19 (0.48 ρ_b) without stirrups	108.4	86.8 (0.801)	96.1 (0.884)	117.7 (1.086)	73.6 (0.680)	S
F80-0.5-19	25.3	0.5	86.10	8.43		153.5	109.8 (0.717)	118.2 (0.769)	147.1 (0.960)	102.0 (0.666)	S
F80-1.0-19	24.5	1.0	89.44	9.90		170.6	133.9 (0.783)	141.2 (0.828)	168.7 (0.987)	120.1 (0.702)	FS
F80-1.5-19	21.5	1.5	82.67	10.89		170.2	154.5	159.9	185.4	131.9	F
F80-2.0-19	18.2	2.0	89.93	11.67		176.0	179.5	184.9	200.1	141.2	F

S*¹ : Shear Failure. FS*² : Flexural-Shear Failure. F*³ : Flexural Failure

3.1 강섬유 혼입률에 따른 파괴양상

강섬유 혼입률이 0%이고 스티럽 보강이 없는 시험체는 지점부와 가력점을 잇는 사인장 균열이 크게 벌어지면서 전단파괴되었다.(그림 3-(1)) 강섬유 혼입률이 증가함에 따라 사인장균열이 약화되면서 중앙부 휨균열이 발달하여 휨-전단파괴의 형태로 변화 되었으며, 강섬유 1.5%와 2.0% 보강된 시험체는 사인장균열의 개소와 크기가 더욱 감소하고, 중앙부의 균열이 크게 발생하는 휨파괴의 형태를 보였다.(그림 3-(4),(5)) 한편, 스티럽으로 전단 보강된 시험체는 섬유혼입률이 증가함에 따라 사인장균

열이 억제되어 균열수가 감소하며, 모든 시험체가 휨 파괴되었다.

그림 3은 F80 시리즈 시험체 중 콘크리트 압축강도가 85 MPa이고 인장철근이 2-D19($\rho = 0.48 \rho_b$)인 시험체들에서 흑트강섬유 혼입량에 따라 파괴양상의 변화를 보여주고 있다. 강섬유 혼입률이 0.0%와 0.5%에서는 사인장균열에 의한 확실한 전단파괴가 나타났으나, 강섬유가 1.0% 혼입된 시험체에서는 인장철근이 항복하면서 사인장균열이 상당히 발달된 휨-전단파괴를 보이고 있으며, 강섬유가 1.5%, 2.0% 혼입된 시험체에서는 휨파괴가 상당히 진행된 뒤에 사인장균열이 다소 발달되는 양상을 보이고 있다.

3.2 하중-처짐곡선

그림 4는 F60 시리즈 시험체들의 하중-처짐곡선이다. 먼저 스테럽을 사용하지 않은 시리즈의 경우 강섬유가 혼입되지 않은 F60-0.0-13 시험체는 낮은 하중에서 취성적인 전단파괴하여 강도가 급격히 떨어지고 처짐이 매우 작게 나타났다. 그러나, 강섬유의 혼입률이 증가할수록 강도와 강성이 증가하고, 최대강도 이후 SFRHC의 인성이 증가하여 연성파괴를 보이고 있다.

스테럽으로 전단보강된 시리즈의 하중-처짐곡선에서는 강섬유 혼입률이 증가할수록 강도의 증가보다는 강성의 증가가 크게 나타났다. 특히 강섬유가 2.0% 혼입된 시험체에서 강성과 강도, 연성능력이 우수함을 보이고 있다.

그림 5는 F80 시리즈 시험체의 하중-처짐곡선이다. 2-D16($\rho = 0.38 \rho_b$) 인장철근을 사용한 시험체는 강섬유 혼입률 0.5%에서는 연성능력 없이 취성적인 파괴가 나타났으나, 1.0% 이상의 시험체에서는 우수한 연성능력을 보이고 있다.

2-D19($\rho = 0.48 \rho_b$)의 인장철근을 사용한 F80 시리즈 중에서 강섬유가 혼입되지 않은 시험체는 낮은 하중에서 전단파괴 되었다. 0.5% 혼입된 시험체는 연성능력 없이 취성적인 전단파괴를 하였으나, 강도 증가가 40%정도 크게 나타났다. 그리고, 혼입률 1.0% 이상의 시험체에서는 강도가 약 10%정도 증가되고 연성능력을 보이고 있으며, 특히 강섬유 혼입률이 1.5%인 시험체에서는 매우 우수한 연성능력을 보이고 있다.



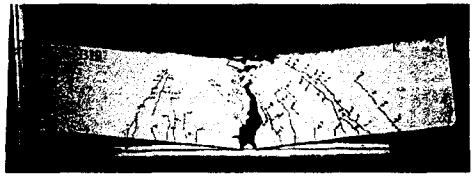
(1) F80-0.0-19



(2) F80-0.5-19



(3) F80-1.0-19

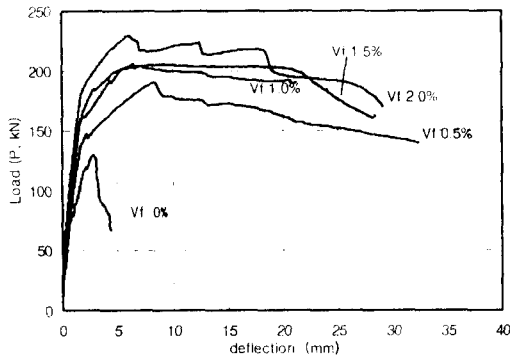


(4) F80-1.5-19

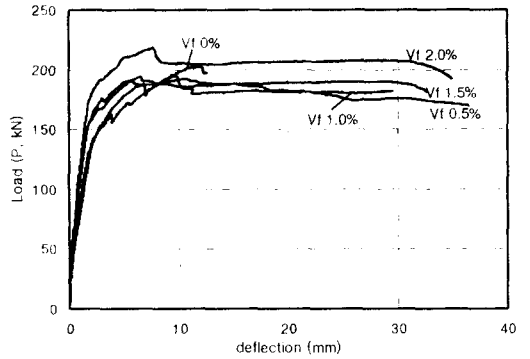


(5) F80-2.0-19

Fig 3. Failure Mode of SFRHC Beam

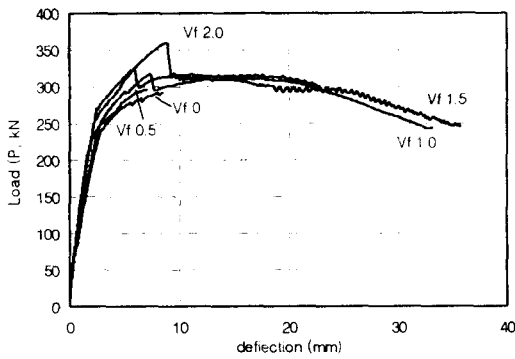


(1) F60-without stirrups series

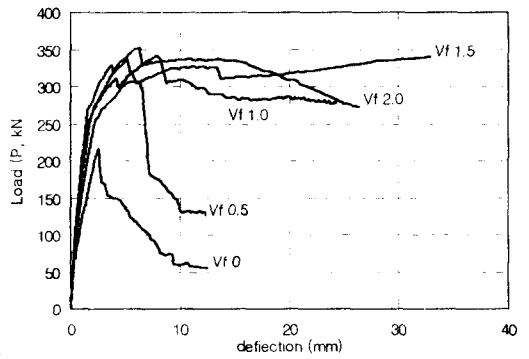


(2) F60-with stirrups series

Fig 4. Load - midspan deflection for F60 series beams



(1) F800-16 series



(2) F800-19 series

Fig 5. Load - midspan deflection for F80 series beams

3.3 기존 제안식의 고찰

강섬유보강 철근콘크리트 부재의 전단 응력에 대한 실험식이 몇몇 연구자들^{3),4),5)}에 의해 제안되었는데, 이들은 다음 식과 같다.

(1) Modified Zsutty³⁾ (MPa)

$$v_u = (2.11 \sqrt[3]{f_c} + 7F) \left(\rho \frac{d}{a} \right)^{0.333} \dots \dots \dots a/d > 2.5$$

$$v_u = [(2.11 \sqrt[3]{f_c} + 7F) \left(\rho \frac{d}{a} \right)^{0.333}] \frac{2.5}{a/d} + v_b(2.5 - \frac{a}{d}) \dots \dots \dots a/d < 2.5$$

eq. (1)

where, $v_b = 1.7F$

$F =$ fiber factor $= (L_f/D_f) V_f d_f$,

$L_f =$ fiber length, mm, $D_f =$ fiber diameter, mm, $V_f =$ fiber volume fraction

$d_f =$ factor equal 0.50 for round, 0.75 for crimped, and 1.00 for indented

(2) Modified ACI³⁾ (MPa)

$$v_u = (0.7\sqrt{f_c} + 7F) \frac{d}{a} + 17.2 \rho \frac{d}{a}$$

eq. (2)

(3) Narayanan and Darwish⁴⁾ (MPa)

$$v_{uf} = e[0.24 f'_{sfc} + 80\rho \frac{d}{a}] + v_b \quad \text{eq. (3)}$$

where, $e = 1.0$ when $a/d > 2.8$, $e = 2.8 \frac{d}{a}$ when $a/d < 2.8$

$$v_b = 0.41 \tau F$$

τ = average fiber matrix interfacial bond stress, = 4.15 MPa

(4) Sharma⁵⁾ (MPa)

$$v_{uf} = k f_t (d/a)^{0.25} \quad \text{eq. (4)}$$

where, f_t = the tensile strength of concrete

$k = 1.0$ if f_t is obtained by direct tension

2/3 if f_t is obtained by indirect tension test

4/9 if f_t is obtained using the modulus of rupture of 100 - mm beams

F60 시리즈에서는 각 연구자들의 극한전단강도 예측값에 대한 실측값의 비는 비슷하게 나타났으며, F80 시리즈에서는 Narayanan의 식이 실측값에 가장 근접한 값을 나타내고 있지만 다른 연구자들의 실측값들^{3),6)}을 비교 분석한 결과, 일관된 예측값을 얻을 수 없으므로 앞으로 더 많은 연구가 필요하다고 판단된다.

4. 결론

고강도 강섬유보강 콘크리트 보의 섬유혼입률에 따른 거동을 측정하고, 기존 문헌에 보고된 전단강도 예측식을 실험결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 강섬유 혼입률 1.5%, 압축강도 80MPa, 슬럼프 15cm 이상의 강섬유보강 고강도콘크리트의 제작 및 시공성을 확인하였으나, 실제 구조물에 적용하기 위해서는 단위시멘트량의 조절이 필요하다.

(2) 강섬유의 혼입은 고강도 콘크리트의 인장 및 전단강도를 크게 증가시키며, 보 시험체의 파괴형태를 전단파괴에서 휨파괴로 변화시킴으로 강섬유의 보강은 전단파괴 억제에 매우 효과적이며, 적정 혼입률은 1.5%로 판단된다.

(3) 기존의 강섬유 보강 철근콘크리트 보의 전단강도 예측식들은 실험값과 차이가 있어, 이에 대한 더 많은 연구가 필요하다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. 심종성, 이차돈, "강섬유보강 콘크리트의 기계적 성질 및 구조체 적용을 위한 연구동향", 콘크리트학회지, 제8권, 4호, 1996, pp. 25~38.
2. 오정근, 이광수, 신성우, "전단보강이 없는 강섬유보강 고강도 철근 콘크리트보의 전단 거동에 관한 연구", 콘크리트학회논문집, 제3권, 3호, 1991, pp. 141~148.
3. Samir A. Ashour, Ghazi S. Hasanain, and Faisal F. Wafa, "Shear Behavior of High-Strength Fiber Reinforced Concrete Beams", ACI Structural Journal/March-April 1992, pp. 176~184.
4. R. Narayanan, R., and Darwish I.Y.S., "Use of Steel Fibers as Shear Reinforcement", ACI Structural Journal, V.84, No.3, May-Jun 1987, pp.216-227.
5. A. K. sharma, "Shear Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams", ACI Structural Journal, July-August, 1986, pp.624-627.
6. M. Imam, L. Vandewalle, and F. Mortelmans, "Shear Capacity of Steel Fiber High-Strength Concrete Beams", ACI SP-149, pp. 227-241.