

# 훅트강섬유보강철근콘크리트보의 전단거동에 관한 연구

## A Study on the Shear Behavior of Reinforced Hooked Steel Fibrous Concrete Beam

심종성<sup>1)</sup> 이차돈<sup>2)</sup> 김규선<sup>3)</sup> 오홍섭<sup>4)</sup>  
 Sim, Jongsung Lee, Cha-Don Kim, Gyu Seon Oh, Hong Seob

### ABSTRACT

Addition of hooked steel fibers into the cementitious materials enhanced shear resistance and consequently improves structural behavior and shear strength of reinforced hooked steel fibrous concrete beam(RHSFCB) under the shear forces. Experimental observations were made on the main parameters effecting structural behavior of RHSFCB in this study. The volume fractions of fibers, shear span to depth ratios, and spacings of stirrups were taken into account as the main parameters. Some equations reported in the literatures, regarding the predictions of the shear strength of RHSFCB have been evaluated statistically based on the total number of 95 test results on RHSFCB failed in shear on shear-flexural mode.

### 1. 서론

보통콘크리트에 강섬유를 혼입함으로써 전단거동 및 강도의 향상을 기대할 수 있다. 이에 따라 강섬유보강콘크리트의 구조적 효율성과 전단강도 예측식에 대한 연구가 진행되어왔다 [1, 2, 3, 4, 5].

기존의 연구에 따르면, 강섬유를 혼입함으로써 철근콘크리트보의 스티럽을 부분적으로 대체할 수 있으므로 보-기둥접합부와 같이 철근이 밀집된 부재에 효율적이라는 것이 고찰되었다[2, 4].

본 연구에서는 섬유혼입율( $V_f$ ), 전단-스팬 비, 스티럽의 간격 등이 훅트강섬유보강철근콘크리트보(Reinforced Hooked Steel Fibrous Concrete Beam : RHSFCB)의 전단거동(파괴양상과 하중처짐곡선)에 미치는 영향, 강섬유에 의한 스티럽의 대체효과 및 기존 문헌에 보고된 RHSFCB의 전단강도 예측식의 정확성 등을 고찰하였다.

### 2. 실험계획

#### 2.1 실험 재료 및 배합

본 실험에 사용된 시멘트는 국내 S사에

서 생산되는 보통 포틀랜드 시멘트로서 비중은 3.15이며, 골재는 안산에서 채취한 굵은골재 최대최수가 15mm인 강자갈을 사용하였다. 강섬유는 국내에서 유통되는 Dramix사의 상업용 훅트강섬유로써 형상비가 60인 강섬유를 사용하였으며, 비중은 7.86이다.

본 연구에서 채택한 SFRC의 배합비는 표1과 같다.

표 1 SFRC의 배합비

	W/(C+F)	S/G	(S+G)/(C+F)	SP/(C+F)
배합비	0.5	1	4.5	0.015

#### 2.2 시험체

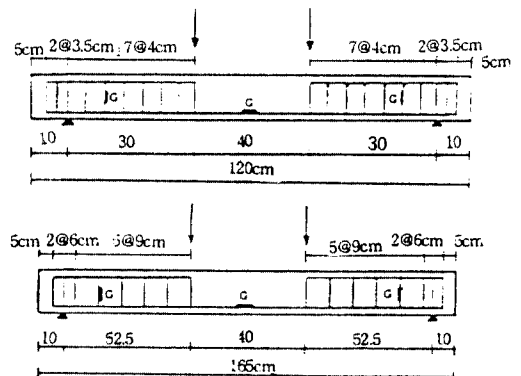


그림 1 시험체 단면과 배근도  
(G : Steel Strain Gauge)

- 1) 정희원, 한양대학교 토목·환경공학과 부교수
- 2) 정희원, 중앙대학교 건축공학과 부교수
- 3) 한양대학교 토목공학과 박사과정
- 4) 한양대학교 토목공학과 석사과정

본 연구에서 사용된 보 시험체 및 하중조건은 그림 1과 같으며, 각 시험체의 스테럽의 간격은 스테럽을 대체하는 SFRC의 전단보강효과를 고찰하기 위하여 일반철근콘크리트 보의 최소전단철근 간격에 대하여 1.0, 1.2, 1.4, 1.6 배 간격으로 배근하였다. 전단스팬비는 2.0과 3.5로 고정하였다. 본 실험에서 제작된 시험체의 변수는 표2와 같으며, 변수당 시험체는 각각 1 개씩이다.

표 2. SFRC보 시험체의 실험변수( $P=0.8P_b$ )

시험체명	전단스팬비 (a/d)	섬유 혼입율 ( $V_f$ )	전단철근간격 (s : cm)	파괴양상	파괴하중 (ton)
SN0000-1	2.0	0.0	-	S	9
SN0010-1	2.0	0.0	4.0	S	11
SF0510-1	2.0	0.5	4.0	S	12
SF1010-1	2.0	1.0	4.0	FS	12.5
SF1510-1	2.0	1.5	4.0	F	12.6
SF1012-1	2.0	1.0	4.8	FS	12.6
SF1014-1	2.0	1.0	5.6	FS	11.7
SF1016-1	2.0	1.0	6.4	FS	11
SN0000-2	3.5	0.0	-	S	3.8
SN0010-2	3.5	0.0	9.0	FS	5.5
SF0510-2	3.5	0.5	9.0	F	6.0
SF1010-2	3.5	1.0	9.0	F	6.0
SF1510-2	3.5	1.5	9.0	F	6.7
SF1012-2	3.5	1.0	10.8	F	6.5
SF1014-2	3.5	1.0	12.6	F	6.2
SF1016-2	3.5	1.0	14.4	F	6.1

\* S : 전단파괴, FS : 사인장파괴,  
F : 휨파괴 ; P : 철근비 ;  $P_b$  : 평형철근비

### 3. 실험결과

#### 3.1 전단스팬비 2.0인 시험체의 파괴양상 및 하중-처짐 곡선

##### 3.1.1 섬유혼입율( $V_f$ )의 영향

전단보강이 없고, 섬유혼입율이 0%인 시험체(SN0000-1)의 경우 지점부 양단에 사인장균열이 발생한 후 균열이 급속히 증가하여 파괴되는 취성파괴를 일으켰으며, 이때 발생한 균열은 시험체를 관통하였다. 강섬유가 혼입되지 않고 스테럽만으로 전단보강된 시험체(SN0010-1)의 경우는 초기에 시험체 중앙부에 초기 휨균열이 발생하였으며, 지점부에서 사인장 균열이 발생하여 가력점으로 전진되었으나, 가력점에서 전단파괴하였다.

강섬유가 각각 1.0%, 1.5% 혼입되고 최소전단철근이 배근된 시험체(SF1010-1, SF1510-1)의 경우 강섬유의 혼입량이 작은 시험체

에 비하여 균열의 발생개소가 줄어들었으며, 초기균열하중이 증가하였다. 또한 섬유혼입율이 증가할수록 전단보강철근의 간격이 동일한 조건에서 강도 후 영역의 연성이 증가하므로써 연성파괴하는 것이 고찰되었다(그림 2). 일반철근콘크리트보(SN0010)의 파괴형태는 전단파괴를 일으켰으나 전단철근비가 일정한 경우 섬유혼입율이 증가함에 따라 사인장파괴에서 휨파괴로 파괴형태가 변화하는 것이 관찰되었다(그림2). 이러한 파괴형태의 변화는 스테럽의 간격을 변화시킬 경우에도 관찰되었다(전단파괴 : SN0010-1, 휨-전단파괴 : SF1012-1, SF1014-1, SF1016-1).

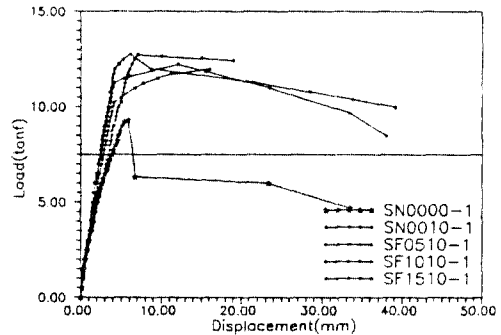


그림 2. 하중-처짐 곡선  
(전단철근간격이 일정한 경우)

##### 3.1.2 전단철근 배근간격의 영향

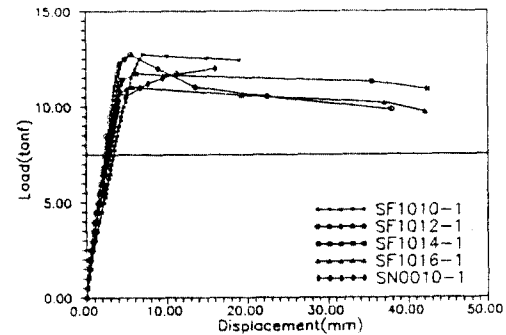


그림 3. 하중-처짐 곡선  
(전단철근간격이 변화되는 경우)

섬유혼입율이 일정( $V_f=1.0\%$ )하고 전단철근의 배근간격(간격비 : 1.0, 1.2, 1.4, 1.6)을 증가시키면 최소전단철근으로 배근한 시험체(SF1010-1)에 비하여 전단철근의 배근간격이 넓어질수록 균열의 발생개소가 증가하였으며, 지점부에서 발생한 사인장균열이 시험체 중앙

부에서 발생한 휨균열과 결합하여 파괴되는 형태를 나타내었다(그림 3). 전단철근의 간격이 가장 넓은 시험체(SF1016-1)의 경우 SN0010-1 시험체와 유사하게 가력점에서 압축 파괴되었다.

그림 3에 나타난 것과 같이 스테럽의 간격을 증가됨에 따라 전단강도는 약간 감소하나, 강도 후 영역에서의 거동은 큰 차이를 나타내지 않으며, 강도전 영역의 강성도 거의 차이가 없는 것으로 관찰되었다(그림 3).

또한 최소전단철근배근간격의 1.4배로 배근된 시험체(SF1014-1)의 경우 SN0010-1과 거의 동일한 전단강도를 나타낼뿐 아니라 파괴양상도 전단파괴에서 휨-전단파괴로 변화되어 연성의 증가확보됨으로써 강섬유에 의한 전단철근의 긍정적인 대체 효과를 고찰할 수 있었다.

### 3.2 전단스팬비 3.5인 시험체의 파괴양상 및 하중-처짐 곡선

#### 3.2.1 섬유혼입율( $V_f$ )의 영향

전단철근만으로 보강된 시험체(SN0010-2)의 경우 초기 휨균열이 발생, 진전하여, 지점부에서 발전된 사인장 균열과 결합하여 파괴되었다. 최소전단철근으로 배근된 RSFCB 시험체(SF0510-2, SF1010-2, SF1510-2)의 경우 휨 파괴 형태를 나타내었다.

#### 3.2.2 전단철근 배근간격의 영향

전단철근의 배근간격을 변수로 조절한 경우 배근간격이 넓어질수록 균열의 발생개소가 증가하였으며, 균열의 폭도 넓어졌다. 이때에도 파괴형상은 휨파괴형태를 나타내었다.

### 3.3 강섬유보강 철근콘크리트보의 전단거동에 대한 주요변수의 영향

#### 3.3.1 전단-스팬비에 의한 상대전단강도의 영향

그림 4는 전단-스팬비가 2.0인 경우 SN0010-1의 전단강도에 대한 동일조건인 RHSFCB의 상대전단강도비와 전단-스팬비가 3.5인 경우 SN0010-2의 전단강도에 대한 RHSFCB의 상대강도비를 나타낸다. 전단스팬비가 2.0인 보의 경우는 전단파괴 또는 휨-전단파괴를 한 반면 전단스팬비가 3.5인 경우 대부분의 보가 휨

대한 보강효과는 휨강도보다는 전단강도 증진에 더 효과적임을 볼 수가 있는데 이는 특히 섬유혼입을  $V_f=1.0\%$ 인 경우에 두드러짐을 살펴볼 수 있다. 따라서 SFRC의 사용은 전단응력이 휨응력보다 더 지배적인 곳에 사용함이 더 효율적이라고 사료된다.

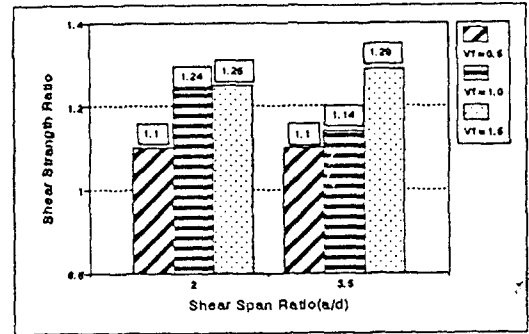


그림 4. 전단-스팬비에 따르는 상대강도비

#### 3.3.2 스테럽간격이 미치는 상대전단강도의 영향

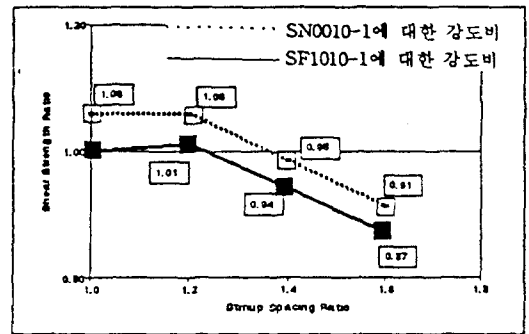


그림 5. 스테럽 간격에 따르는 상대강도비 ( $a/d=2.0$ ,  $V_f=1.0\%$ )

스테럽간격에 따르는 전단강도의 영향은 일반철근콘크리트보의 최소전단보강철근간격( $a/d=2.0$ , 4cm인 경우)을 기준으로 각 시험체의 전단철근간격을 1.2, 1.4, 1.6배로 하였을 때 전단-스팬비가 2.0인 경우 스테럽의 간격이 넓어짐에 따라 대체적으로 전단강도는 감소함을 볼 수 있다(그림 5). 그러나 전단철근의 간격을 1.4배로 배근한 시험체(SF1014-1)와 최소전단철근간격으로 배근한 시험체(SF1010-1)의 강도와 비교하여 약 94% 정도의 전단강도를 나타내며 또한 최소전단철근간격으로 배근한

98%정도의 강도를 나타내고 있어 강섬유보강에 의한 전단철근의 대체효과를 고찰할 수 있었다.

### 3.3.3 섬유혼입율의 영향

전단철근의 간격이 동일한 시험체의 경우 섬유혼입율이 증가할수록 전단강도는 증가하였으나 전단-스팬비가 2.0인 경우에는 섬유혼입율이 1.5% 혼입된 시험체(SF1510-1)의 경우 강도의 증가 정도가 강섬유가 1.0% 혼입된 시험체(SF1010-1)의 경우와 거의 동일하게 나타났다(그림 6).

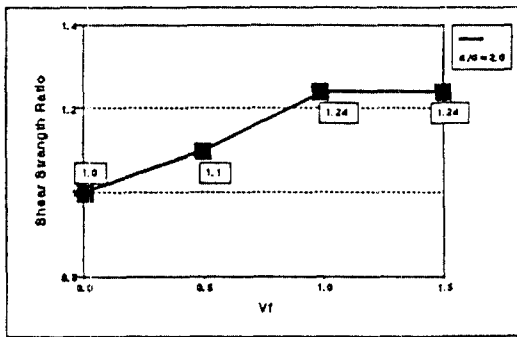


그림 6. 섬유혼입율에 따르는 상대강도비 (a/d=2.0, s=4cm)

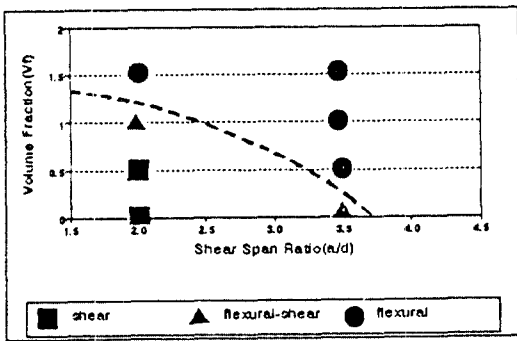


그림 7. 섬유혼입율과 전단스팬비에 의한 파괴양상(P=0.8P<sub>b</sub>, S=4cm)

그림 7은 전단스팬비에 따라 섬유혼입율의 값의 차이에 따른 보의 파괴양상을 나타낸다. 이 그림에 의하면 비교적 작은 전단스팬비인 a/d=2.0에 대해서도 V<sub>f</sub>=1.5%의 SFRC를 사용하였을 경우 휨파괴한 것을 살펴볼 수 있다. 또한 전단스팬비가 작아질수록 휨파괴를 위한 강섬유혼입율이 증가함을 알 수 있다.

## 4. 실험 결과와 기존 제안식에 대한 비교, 분석

### 4.1 기존 연구결과 고찰

일반적으로 강섬유보강철근콘크리트보의 전단거동은 강섬유의 혼입률(V<sub>f</sub>), 전단-스팬비(a/d), 인장철근비(p), 콘크리트의 압축강도(σ<sub>ck</sub>), 강섬유의 형상비(l<sub>f</sub>/d<sub>f</sub>), 강섬유의 부착강도(τ) 등의 영향을 받는다.

각 문헌들에 나타난 이론식들은 기본적으로 콘크리트 또는 강섬유보강철근콘크리트의 전단강도(V<sub>cd</sub>) 및 강섬유 자체의 전단저항력(V<sub>fu</sub>)에 대한 약간의 다른 예측식의 형태로 구분된다.

각 문헌에서 제안한 SFRC의 전단모델들에 대하여 간략히 정리하면 다음과 같다.

M. A. Mansur의 2인[1] :

$$V_c = (0.16\sqrt{f'_c} + 17.2 \frac{eV_d}{M} (0.29\sqrt{f'_c}))bd \quad (1)$$

$$V_{cd} = \sigma_{tu} \cdot bd$$

σ<sub>tu</sub> = pull-out의 잔류강도

A. K. Sharma[2] :

$$V_{cd} = \frac{2}{3} f'_t \left(\frac{d}{a}\right)^{0.5} \cdot b \cdot d \quad (2)$$

f'<sub>t</sub> = tensile strength of concrete

R. L. Jindal[3] :

$$V_{cd} = (0.41\sigma_{tu})bjd \quad (3)$$

$$\sigma_{tu} = 0.97\sigma_m(1 - V_f) + 3.41V_f(l/d) \quad (4)$$

σ<sub>m</sub> = 콘크리트의 휨인장강도

R. Narayanan의 1인[4]

$$V_{cd} = e[ A'f_{spc} + B'\rho\frac{d}{a} ] \cdot b \cdot d \quad (5)$$

$$V_{fy} = v_s b \cdot d \quad (6)$$

T. Y. Lim의 2인[5] :

(1) Plasticity model

$$V_{cd} = [ \sigma_m \cdot \cot \beta + \frac{1}{2} v_s \cdot \sigma_m (1 - \cos \beta) \frac{1}{\sin \beta} ] \cdot b \cdot h \quad (7a)$$

$$V_i = A_v \cdot f_y \cdot \cot \beta \cdot h/s \quad (7b)$$

σ<sub>cu</sub> = 콘크리트의 압축강도

β = 사인장 균열각도

s = striup간격

(2) Truss model

$$V_d = 2A_v \cdot f_y \cdot h/s + 2b \cdot h \cdot \sigma_u \quad (8)$$

(3) Moment Capacity

$$M_u = F_y + \sigma_u \frac{b}{2} (h^2 - \frac{x^2}{4}) \quad (9)$$

$$V_d = \frac{M_u}{a' \cdot b \cdot h} \quad (10)$$

x=중립축까지의 거리

#### 4.2 전단모델의 비교 및 고찰

다음의 표 3은 각 예측식의 결과와 실험치와의 비교에 대한 평균과 표준편차를 나타낸다.

표 3. 전단모델식에 대한 실험치 비의 통계값

참고 문헌	식번호	평균	표준편차	변동계수
1	1	1.33	0.482	0.362
2	2	1.2	0.386	0.321
3	3, 4	1.7522	1.319	0.752
4	5, 6	1.3166	0.6535	0.466
5	7, 8, 10	1.255	0.610	0.4861

표 3에 나타난 것과 같이 제안식 1과 2의 결과가 실제실험결과에 가장 근접한 결과를 나타내었다.

#### 5. 결론

- 본 연구에서 수행된 전단시험에서 전단보강철근의 간격이 일정한 경우 전단-스팬비가 2.0인 경우에 강섬유의 혼입량이 증가함에 따라 전단파괴, 휨-전단파괴, 휨파괴 양상으로 파괴모드가 변화하였으며, 이는 강섬유 보강에 의하여 단면의 전단저항능력이 향상되었음에 기인한다.
- 강섬유의 혼입량이 일정하고 전단철근의 배근간격을 최소전단철근간격의 1.0, 1.2, 1.4 그리고 1.6배로 배근한 경우 전단스팬비가 2.0인 경우에는 전단철근간격이 1.2배일 때 까지는 전단강도의 변화가 없는 것으로 나타났다. 또한 전단철근간격이 1.4인 시험체(SF1014-1)의 경우는 SN0010시험체의 98% 정도의 전단강도를 발휘함으로써 강섬유 혼

입에 의한 전단철근의 대체효과가 가능한 것으로 기대된다. 또한 SN0010-1시험체의 파괴형태가 전단파괴한 반면 SF1014시험체의 경우에는 휨-전단파괴되어 파괴형태 또한 바람직하게 변화된 것을 볼 수 있다.

- 전단-스팬비가 2.0인 시험체의 경우는 전단파괴 또는 휨-전단파괴를 한 반면 전단스팬비가 3.5인 경우는 대부분의 보가 휨파괴한 것을 고려할 때 강섬유의 보에 대한 보강효과는 휨강도의 증가보다는 전단강도 증진에 더 효과적임을 볼 수 있는데 이는 특히 섬유혼입율  $V_f=1.0\%$ 인 경우에 두드러짐을 살펴볼 수 있다. 따라서 SFRC의 사용은 전단응력이 휨응력보다 지배적인 곳에 사용함이 더 효율적이라고 사료된다.
- 각 문헌에 나타난 제안식을 실험결과와 비교한 결과 참고문헌 1의 제안식(식(1))과 참고문헌2의 제안식(식(2))이 가장 정확한 것으로 나타났으나 이들 예측식들은 비교적 큰 오차를 보임으로써 추후 RHSFCB의 전단강도 예측식 개발의 필요성이 시급하다고 사료된다.

#### 감사의 글

이 논문은 1994년도 학술진흥재단의 공모과제(01 E 1044)연구비에 의하여 연구되었음을 알려드립니다.

#### 5. 참고문헌

- "Shear Strength of Fibrous Concrete Beams without Stirrups", M. A. Mansur, K. C. G. Ong, P. Paramasivan, ASCE, Vol. 112, No. 9, July, 1986
- "Shear Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams", A. K. Sharma, ACI, July, 1986
- "Fiber Reinforced Concrete Beams", Roop L. Jindal, ACI SP-81,
- "Use of Steel Fibers as Shear Reinforcement", R. Narayanan, Y. S. Darwish, ACI Structural Journal, 84-S23,
- "Shear and Moment Capacity of Reinforced Steel-Fibre-Concrete Beams", T. Y. Lim, P. Paramasivan, S. L. Lee, Magazine of Concrete Research, Vol. 39, No. 140, 1987