



## 강섬유보강 콘크리트보의 휨내력 예측식의 제안

김우석<sup>1)\*</sup> · 곽윤근<sup>1)</sup> · 김주범<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>금오공과대학교, <sup>2)</sup>Clarkson대학교

## Prediction of Flexural Capacities of Steel-Fiber Reinforced Concrete Beams

Woo-Suk Kim<sup>1)\*</sup>, Yoon-Keun Kwak<sup>1)</sup>, and Ju-Bum Kim<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Kumoh National Institute of Technology, Yangho-dong 1, Gumi 730-701, Korea

<sup>2)</sup>Clarkson University, Potsdam, NY 13699, USA

**ABSTRACT** The results of previous tests by many researchers have been compiled to evaluate the flexural strength of steel-fiber reinforced concrete beams. Existing prediction equations for flexural strength of such beams were examined, and a new equation, based on mechanical and empirical observations, was proposed. In other words, the constitutive models for steel fiber reinforced concrete (SFRC) were proposed, which incorporate compressive and tensile strength. A steel model might also exhibit strain-hardening characteristics. Predictions based on the model are compared with the experimental data. For the collection of tests, a variation of the Henager equations, modified to apply to fiber-reinforced concrete beams, provided reliable estimates of flexural strength. The proposed equations accounted for the influence of fiber-volume fraction, fiber aspect ratio, concrete compressive strength and flexural steel reinforcement ratio. The proposed equations gave a good estimation for 129 flexural specimens evaluated.

**Keywords** steel-fiber reinforced concrete, strain-hardening

### 1. 서 론

강섬유보강 콘크리트는 철근콘크리트의 충격강도 및 인성 등 역학적 성능을 개선시킬 수 있게 되었고, 이로 인해 건설재료로서의 사용이 점차적으로 증가되는 추세에 있다<sup>1)</sup>. 철근콘크리트보에 강섬유를 혼입하는 것은 전단강도 뿐만 아니라 휨강도 역시 증가시키고, 또한 적정량의 강섬유를 혼입하면 취성파괴를 연성적인 거동이 일어날 수 있도록 유도할 수 있다. 이러한 강도와 연성의 증가는 강섬유보강 콘크리트의 균열 후(post-cracking)에 잔류한 인장강도로부터 기인된 것이다. 또한 잔류인장강도(residual tensile strength)는 균열크기와 균열폭을 감소시키는 경향을 나타낸다.

지난 30년동안 구조물에 대한 강섬유보강 콘크리트(SFRC)의 적용과 강섬유혼입에 따른 성능개선에 대한 연구가 이루어져 왔다. Swamy·Al-Ta'an<sup>2)</sup>, Lim et al<sup>3)</sup>, Alsayed<sup>4)</sup>, Ashour·Wafa<sup>5)</sup>, Tan<sup>6)</sup> 등은 처짐과 극한휨강도에 대한 강섬유의 보강효과를 발표하였고, Henager·Doherty<sup>7)</sup>, Jindal<sup>8)</sup>, Craig<sup>9)</sup>, Imam<sup>10)</sup> 등은 SFRC보의 극한휨강도를 예측할 수 있는 이론식을 개발하였다. 이러한 강섬유보강

콘크리트의 휨강도식은 응력분포를 가정함으로써 예측되었으나, 아직까지는 철근콘크리트재료의 특성을 반영한 제안식이 많지 않은 실정이다. 특히 철근의 변형률경화(strain-hardening) 효과를 제대로 반영하지 않아 휨강도식에서 강섬유에 의한 휨모멘트가 과대평가되어 왔다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트와 철근의 재료특성에 기인한 콘크리트의 압축응력과 인장응력의 구성모델을 제안하고자 하였고 철근의 변형률-경화 효과를 고려한 기존의 Raynor의 철근모델<sup>11)</sup>을 토대로 하여 모멘트-곡률(moment-curvature) 해석을 수행하였다.

또한 본 연구에서는 이러한 연구의 일환으로 인장철근비, 강섬유혼입률, 콘크리트 압축강도를 변수로 한 총 12개의 실험체로 휨실험을 하여 강섬유의 보강효과 및 부재의 역학적 거동을 규명하였고, 국내외 강섬유보강 콘크리트보의 실험값 및 이론식을 분석하여 기존의 휨강도식보다 더 정확하고 합리적인 휨강도식을 제안하였다.

### 2. 실험

#### 2.1 실험체의 개요

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 형태의 전단보강된 강섬유보강 콘크리트보의 휨거동에 대한 역학적 특성을 규명

\*Corresponding author E-mail : wkim@kumoh.ac.kr  
Received October 10, 2005, Accepted December 30, 2005  
©2006 by Korea Concrete Institute

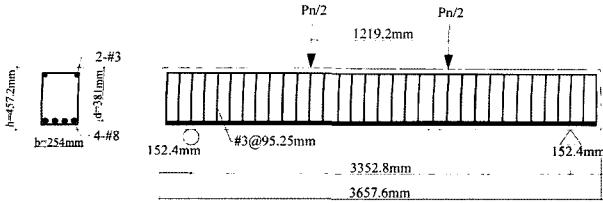


Fig. 1 Typical beam details (unit: mm)

하기 위하여 인장철근비( $\rho=1.0\%$ ,  $2.0\%$ )와 강섬유 혼입율( $V_f=0\%$ ,  $0.75\%$ ,  $1.5\%$ )을 변수로 한 고강도콘크리트보와 보통강도콘크리트보를 각각 6개씩 총 12개의 실험체를 제작하였으나, HSCV2p2 실험체는 고강도를 만들기 위한 낮은 물시멘트비와 강섬유 1.5% 혼입, 인장철근비 2%로 인한 양호한 타설이 이루어지지 못하여 제외시킴으로써 총 11개의 보로 실험을 행하였다. 실험체의 단면은  $b=254\text{mm}$ ,  $h=457.2\text{mm}$ 이고 실험체의 길이는  $3657.6\text{mm}$ 로 모두 균일하게 하였다.

사용된 철근은 ASTM A615 고강도 이형철근으로, 실험을 통한 실제 항복강도가  $510\text{MPa}$ , 극한강도가  $779\text{MPa}$ 인 #8(단면적  $507\text{mm}^2$ ) 철근을 주근으로 사용하였고, 스티럽으로는  $95.25\text{mm}$ 간격의 #3(단면적  $71\text{mm}^2$ ) 철근을 사용하였다.

강섬유는 직경  $0.75\text{mm}$ , 길이  $60\text{mm}$ , 형상비 80의 갈고리(Hook)형으로 항복강도  $1,050\text{MPa}$ 인 것을 사용하였다.

콘크리트는 보통강도콘크리트보에서는  $27.58\text{MPa}$ , 고강도콘크리트보에서는  $55.16\text{MPa}$ 의 강도를 얻도록 배합설계되었다. 실험체의 종류 및 재료특성은 Table 1과 같다. 콘크리트 압축강도 실험용 공시체는  $150 \times 300\text{mm}$  원통형 공시체를 사용하였고 휨인장강도 실험용 공시체로는

$150 \times 150 \times 530\text{mm}$ 의 콘크리트보를 사용하였다.

## 2.2 실험결과 및 고찰

실험체에 하중을 가하면 보의 초기 휨균열이 휨영역 중앙부에서 발생하기 시작하였으며, 하중의 증가로 휨균열이 연장되고 인장철근의 항복에 의한 전형적인 휨파괴 형태의 연성적인 파괴형태를 나타내었다. Fig. 2에서 보듯이 강섬유보강 콘크리트보는 강섬유가 보강되지 않은 보보다 균열폭 및 평균균열간격이 더 좁게 나타났고, 하중이 증가함에 따라 미세한 균열이 더욱 많이 발생하였으며, 균열 범위가 넓게 나타났다. 이는 강섬유의 균열성장억제 작용으로 인해 균열의 확산이 방지되어 새로운 미세균열이 생성되기 때문인 것으로 판단된다.

본 실험에서 얻어진 파괴하중, 추정휨모멘트, 연성은 Table 2에 나타나 있으며 SFRC보의 휨강도는 강섬유혼입률( $V_f$ ), 인장철근비( $\rho$ ), 콘크리트 압축강도( $f_{ck}$ )에 많은

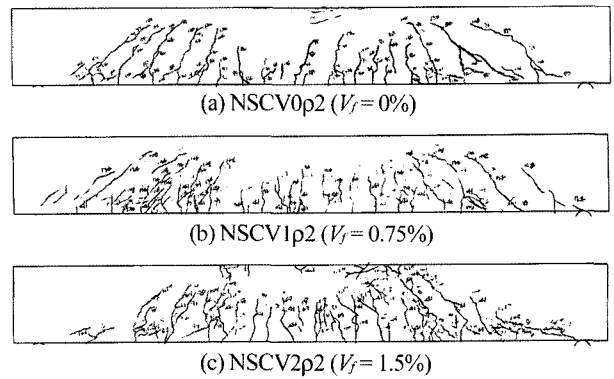
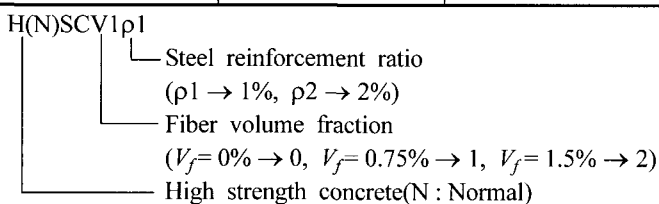


Fig. 2 Schema of crack patterns (unit : FigureX4.45kN)

Table 1 Beam details and material properties

Beam designation	Fiber volume fraction $V_f$ (%)	Tension steel		Comp. strength $f_{ck}$ (MPa)	Modulus of rupture $f_r$ (MPa)
		ratio $\rho$ (%)	steel		
NSCV0p1	0	1.0	2-#8	34.21	3.29
NSCV1p1	0.75	1.0	2-#8	35.44	5.90
NSCV2p1	1.5	1.0	2-#8	17.23	4.40
NSCV0p2	0	2.0	4-#8	32.47	3.05
NSCV1p2	0.75	2.0	4-#8	36.98	5.70
NSCV2p2	1.5	2.0	4-#8	15.44	4.57
HSCV0p1	0	1.0	2-#8	78.14	7.26
HSCV1p1	0.75	1.0	2-#8	64.59	6.26
HSCV2p1	1.5	1.0	2-#8	61.98	7.25
HSCV0p2	0	2.0	4-#8	74.42	6.57
HSCV1p2	0.75	2.0	4-#8	65.23	7.72



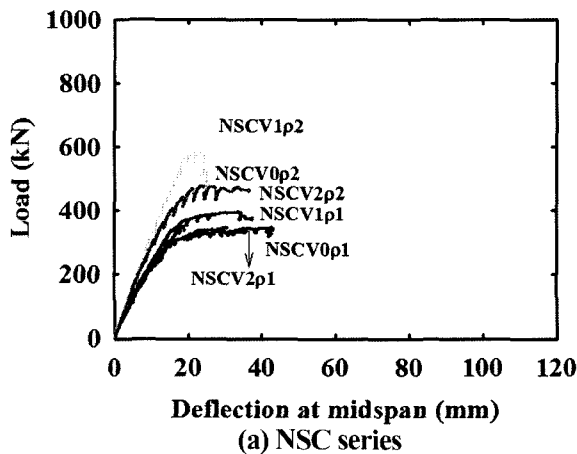
**Table 2** Summary of test results

Beam designation	$V_f$ (%)	$f_{ck}$ (MPa)	$M_u$ (kN·m)	$P_u$ (kN)	$\Delta_y$ (mm)	$\Delta_0$ (mm)	$\mu^*$
NSCV0p1	0	34.21	183.98	344.92	12.70	42.67	3.36
NSCV1p1	0.75	35.44	210.69	395.00	13.97	38.61	2.74
NSCV2p1	1.5	17.23	187.06	350.70	13.97	37.34	2.67
NSCV0p2	0	32.47	309.25	579.78	14.73	25.15	1.72
NSCV1p2	0.75	36.98	356.55	668.43	16.00	35.81	2.24
NSCV2p2	1.5	15.44	254.93	477.92	13.97	37.08	2.64
HSCV0p1	0	78.14	242.39	454.43	15.75	63.25	4.00
HSCV1p1	0.75	64.59	254.23	476.63	15.75	89.92	5.74
HSCV2p1	1.5	61.98	263.68	494.33	18.54	119.4	6.53
HSCV0p2	0	74.42	396.24	742.85	17.02	35.81	2.10
HSCV1p2	0.75	65.23	433.63	812.96	16.76	82.30	4.92

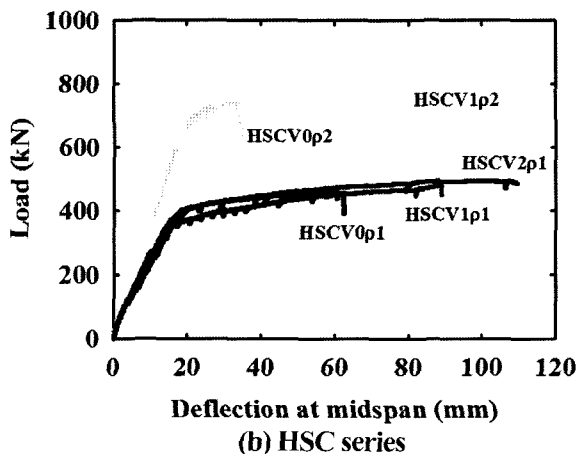
\* $\mu = \Delta_0/\Delta_y$

$\Delta_0$ : the displacement at the ultimate load

$\Delta_y$ : the displacement when the steel reinforcement is yielded



(a) NSC series

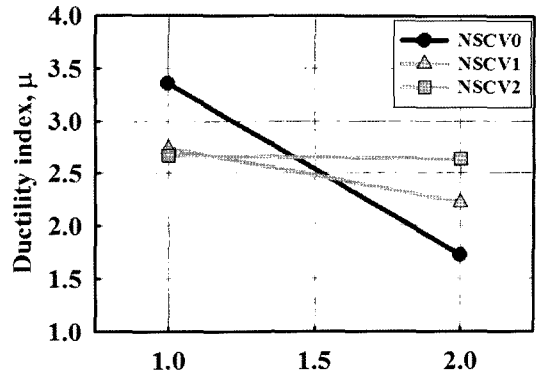


(b) HSC series

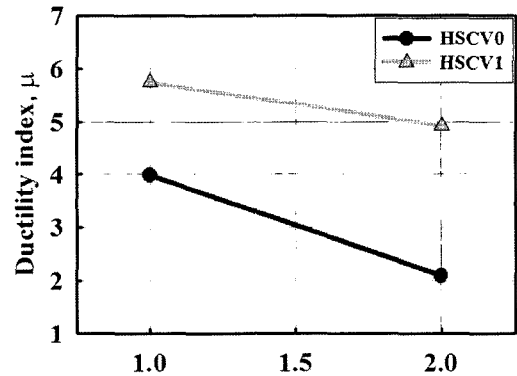
**Fig. 3** Load-deflection curves: (a) Normal strength concrete (NSC) series; (b) High strength concrete (HSC) series

영향을 받는 것으로 나타났다.

Fig. 3(a) 와 3(b)는 각각 보통강도 콘크리트와 고강도 콘크리트로서 강섬유혼입률이 다른 실험체의 하중-변위 곡선을 나타낸 것이다. 모든 실험체는 인장철근이 1차 항복에 이르기까지는 거의 선형적인 거동을 나타냈으나



(a) Normal strength concrete



(b) High strength concrete

**Fig. 4** Relationships between ductility index and tensile reinforcement ratio

그 이후 완전한 파괴에 이르기까지는 비선형 거동을 나타냈다.

그림에서 보듯이 강섬유를 혼입하지 않은 콘크리트보는 최대하중을 받은 후 취성적인 거동을 나타냈으나 강섬유를 혼입한 콘크리트보는 균열이 진전되면서 최대하중을 받은 후에도 상당량의 처짐을 나타냈다. 이것은 강섬유를 혼입함으로써 보의 연성능력이 크게 향상되었음을 보여주는 것이다.

Fig. 4는 연성지수에 대한 인장철근비의 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 인장철근비가 증가할 때 연성지수는 감소함을 알 수 있다. 반면 Fig. 5는 연성지수에 대한 콘크리트 압축강도와 강섬유혼입률의 영향을 나타낸 것이다. 압축강도와 강섬유혼입률이 증가할수록 연성지수는 증가함을 알 수 있다.

### 3. 강섬유보강 콘크리트의 구성모델

#### 3.1 압축응력모델

강섬유보강 콘크리트의 휨강도에 대한 새로운 압축응력모델은 휨거동에 있어 강섬유의 혼입으로 직접적인 영향을 미치는 압축강도를 계산하기 위해 Hognestad model을 기본으로 하여 다음과 같이 개발하였다.

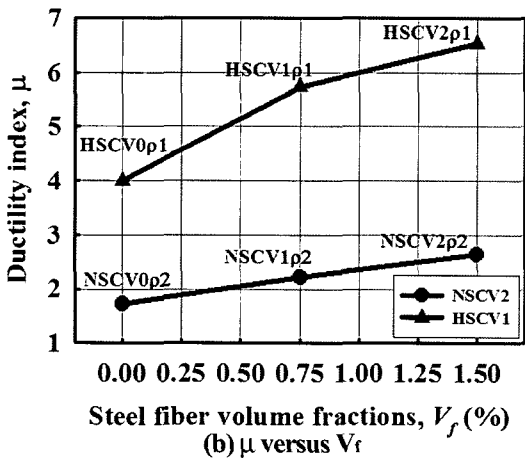
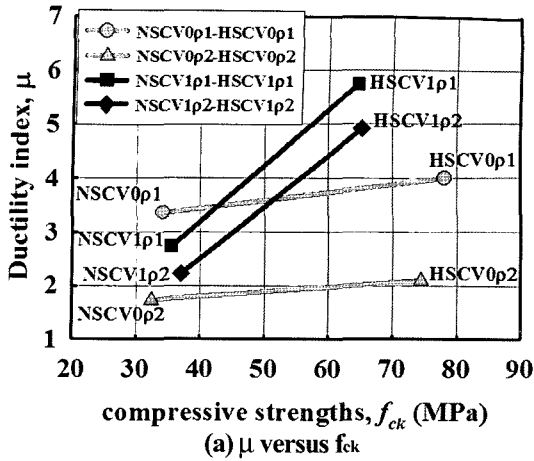


Fig. 5 Relationships between ductility index and compressive strength, steel fiber volume fractions

$$\sigma = f_c \left[ 2 \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_{co}} \right) - \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_{co}} \right)^2 \right], (\epsilon \leq \epsilon_{co}) \quad (1)$$

$$\sigma = f_{cr} \quad (\epsilon_{co} \leq \epsilon \leq \epsilon_{cu}) \quad (2)$$

여기서,  $f_{cu}$ : 콘크리트의 압축강도로서,  
 일반콘크리트에서는  $f_c = 0.85f_{ck}$   
 강섬유보강콘크리트에서는  $f_c = 0.9f_{ck}$   
 $\epsilon_{cu}$ : 콘크리트의 극한압축변형률로서,  
 일반 콘크리트에서는  $\epsilon_{cu} = 0.003$   
 강섬유보강 콘크리트에서는  $\epsilon_{cu} = 0.004$   
 $\epsilon_{co}$ : 콘크리트의 압축강도 도달시 변형률

### 3.2 인장응력모델

강섬유보강 콘크리트에서 매트릭스 균열 이후 휨 해석에 있어, 일반콘크리트는 압축강도에 비해 현저히 낮은 인장강도로 인하여 인장부 휨저항 능력이 무시되지만, 강

섬유보강 콘크리트는 강섬유에 의해 일정한 인장응력이 초기균열 발생 이후에도 파괴시점까지 지속적으로 유지된다. 따라서 균열후 강섬유보강 콘크리트의 인장응력  $f_{tu}$ 를 다음과 같이 제안하였다.

$$f_{cr} = 1.15 f_{spfc} \quad (\text{MPa}) \quad (3)$$

$$f_{tu} = \left( \frac{f_{cuf}}{20 - \sqrt{F}} \right) + 0.7 + 1.0 \sqrt{F} \quad (\text{MPa}) \quad (4)$$

$$f_{tu} = Q_1 \rho_f f_{spfc} \quad (\text{MPa}) \quad (5)$$

여기서,  $f_{cr}$ : 극한인장강도

$f_{tu}$ : 잔류인장강도

$f_{spfc}$ : 강섬유보강콘크리트의 쪼갬인장강도

$f_{cuf}$ : 강섬유보강콘크리트의 입방공시체 강도

$F$ : 강섬유계수

$\rho_f$ : 강섬유혼입율의 백분률

상수  $Q_1$ 은 잔류인장계수(residual tensile factor)로서 강섬유보강 콘크리트 129개 실험체의 회귀분석에 의해 구해졌는데 0.15의 값을 갖는다.

### 3.3 Raynor의 철근모델<sup>11)</sup>

Raynor의 철근모델<sup>11)</sup>에서 철근의 응력-변형률곡선은 초기선형구간, 철근의 항복이후 거의 일정한 평탄역, 변형률경화역에서의 식(8)에서 나타내어진 것처럼 다항식의 형태로서 다음 식들과 같이 정의된다.

$$\sigma = E \cdot \epsilon, (\epsilon < \epsilon_y) \quad (6)$$

$$\sigma = \sigma_y, (\epsilon_y < \epsilon < \epsilon_{sh}) \quad (7)$$

$$(\sigma - \sigma_u) = -(\sigma_u - \sigma_{sh}) \frac{(\epsilon_u - \epsilon)^c}{(\epsilon_u - \epsilon_{sh})^c}, (\epsilon > \epsilon_{sh}) \quad (8)$$

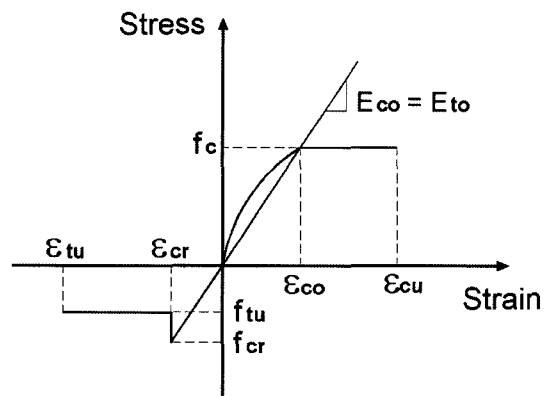


Fig. 6 Constitutive stress-strain relationship for SFRC

Table 3 Steel model parameters (stress unit : MPa)

Bar size	Yield stress $\sigma_y$	Yield strain $\epsilon_y$	Strain hardening stress $\sigma_{sh}$	Strain hardening strain $\epsilon_{sh}$	Maximum stress $\sigma_u$	Ultimate strain $\epsilon_u$
#8	510	0.00263	510	0.008	779	0.2

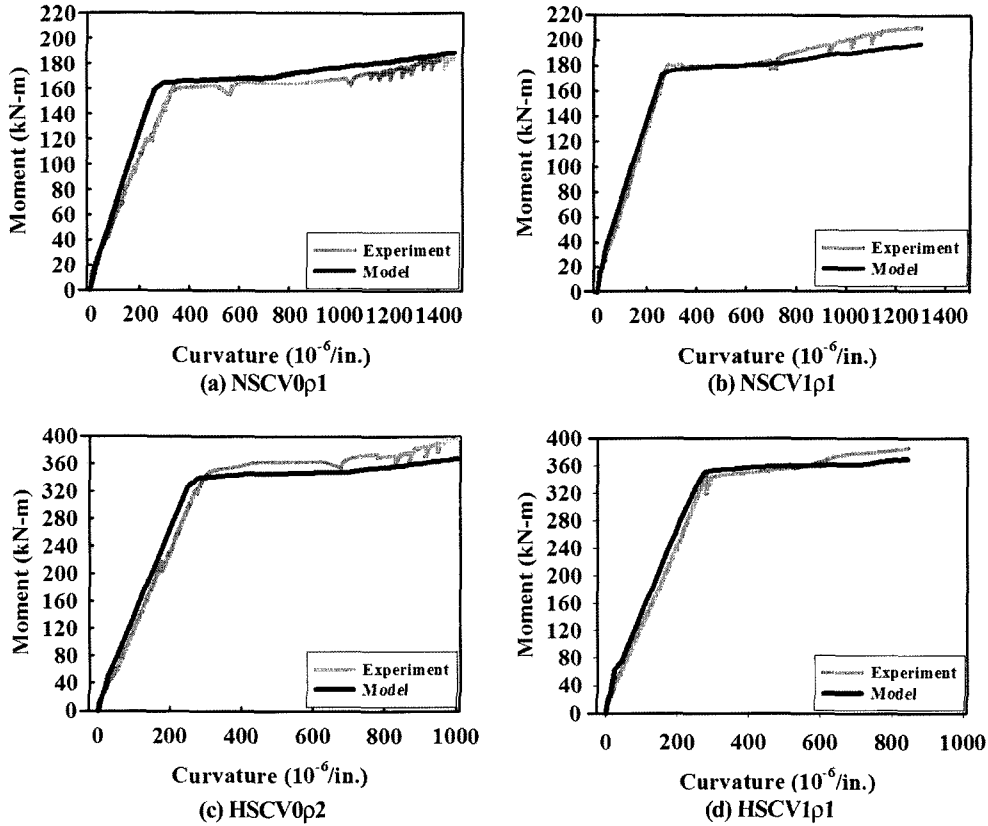


Fig. 7 Moment-curvature relationship between experimental and predicted results of SFRC under flexure

Table 3에는 본 연구에서 주근으로 사용된 #8철근의 인장실험결과를 토대로 한 철근모델의 주요변수들을 나타내었다.

### 3.4 모멘트-곡률 해석

본 연구에서 제안한 콘크리트 압축-인장응력모델과 Raynor의 철근모델<sup>11)</sup>로 다음 Fig. 7과 같이 본 연구의 실험값과 비교를 위한 모멘트-곡률 해석을 수행하였다.

Fig. 7에서 보듯이, 구성모델의 이론값이 실험값과 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 실험값과 이론값에서 변형을 경화에 의한 모멘트상승을 볼 수 있다. 이러한 실험결과에 따라 본 연구에서는 콘크리트의 압축, 인장과 변형을 경화를 적절히 고려한 구성모델을 기본으로 하여 휨강도식을 다음 장에서 제안하였다.

## 4. 기존제안식의 고찰 및 휨강도식의 제안

### 4.1 기존제안식의 고찰

실험결과에서 보듯이, 강섬유보강 콘크리트보의 휨과피에 대해 영향을 미치는 요인은 콘크리트의 압축강도( $f_{ck}$ ), 인장철근비( $\rho$ ), 강섬유 혼입율( $V_f$ )등이 있다. 이는 기존의 실험결과에서도 확인된 바 있으며 이외에도 강섬유의 형상비( $L_f/D_f$ ) 등이 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 휨응력을 산정하는데는 많은 변수들이 있으므로 기존식은 명확한 이

론적 해석보다는 많은 연구자들의 실험에 의한 실험식으로 제안되었으며 다음은 그 중 몇가지를 나타낸 것이다.

#### 4.1.1 Henager·Doherty의 제안식<sup>7)</sup>

$$M_t = A_s f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) + \sigma_t b (D - e) \left( \frac{D}{2} + \frac{e}{2} - \frac{a}{2} \right) \quad (9)$$

여기서,  $\sigma_t$ : 강섬유보강콘크리트의 인장응력,

$$\sigma_t = P_e \cdot \sigma_f = 1.12 \frac{l}{d_f} P F_{be}$$

$P_e$ : 강섬유의 유효체적비

$P$ : 강섬유의 체적비

$\sigma_f$ : 강섬유의 인장응력

$F_{be}$ : 강섬유의 부착유효계수

#### 4.1.2 Craig의 제안식<sup>9)</sup>

$$M_n = A_s f_y \left( d - \frac{\alpha}{2} \right) + f_t b \left( h - \frac{a}{\beta_1} \right) \left( \frac{h}{2} + \frac{a}{2\beta_1} - \frac{\alpha}{2} \right) \quad (10)$$

여기서,  $f_t$ : 강섬유의 인장응력,  $f_t = 0.7P_f \cdot n$

$P_f$ : 강섬유의 인발력

$n$ : 단위면적당 강섬유의 수

$\beta_1$ : 등가응력블럭의 깊이에 관한 계수

#### 4.1.3 Imam의 제안식<sup>10)</sup>

$$M_{fl} = \frac{1}{2} \rho f_y b d^2 (2 - \eta) + 0.83 F b d^2 (0.75 - \eta) (2.15 + \eta) \quad (11)$$

여기서,  $\eta = a/d = (\rho f_y + 2.32F)/(0.85f_{ck} + 3.08F)$

#### 4.1.4 Jindal의 제안식<sup>8)</sup>

$$M_u = A_s f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) + b g (0.85 \sigma_{ur}) \left( D - \frac{a}{2} - \frac{g}{2} \right) \quad (12)$$

여기서,  $\sigma_{ur}$ : 강섬유보강콘크리트의 극한휨인장응력,

$$\sigma_{ur} = 0.97 \sigma_m (1 - \nu_f) + 495 \nu_f \left( \frac{L_f}{D} \right) \quad (\text{psi})$$

g: 강섬유보강콘크리트보의 인장응력블럭의 깊이,  $g = 0.85(D - nd)$

nd: 중립축거리

$\sigma_m$ : 일반 콘크리트의 휨인장응력

위의 식들은 앞에서 언급한 휨강도에 영향을 미치는 중요변수들의 효과를 반영하고 있다. 구체적인 식의 형태는 다르지만 역학적으로는 동일한 가정에서 출발하였다.

Fig. 8에서 보듯이, 보의 휨강도는 크게 철근의 인장강도( $T_s$ )에 의한 휨강도( $M_{n1}$ )와 강섬유혼입 콘크리트의 인장강도( $T_f$ )에 의한 휨강도( $M_{n2}$ )의 합으로 나타낼 수 있다.

이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} = T_s \times \text{moment arm} + T_f \times \text{moment arm} \quad (13)$$

그런데 기존의 식들은 철근에 의한 인장강도( $T_s$ )산정시 철근의 변형률경화 효과를 고려하지 않고, 항복강도( $f_y$ )만을 쓰고 있다. 과소철근보의 경우, 철근은 항복강도 이상의 응력을 받는다. 따라서 실제보다 과소평가된 철근의 강도가 강섬유에 의한 강도증가에 포함되는 결과를 빚을 수 있다. 본 실험결과에 의하면 강섬유에 의한 휨강도 증가는 10%내외였고, 기존의 실험결과도 유사한 결과를 보여주었다. 반면 실험결과를 기존식에 대입하면 강섬유향( $M_{n2}$ )이 전체강도의 20~30%를 차지한 것으로 분석되었다.

#### 4.2 휨강도식의 제안

기존의 식들과는 달리 철근의 항복강도( $f_u$ ) 대신 실제 철근이 받는 응력( $f_s$ )을 사용하는 것이 보다 정확한 철근에 의한 인장강도 산정에 필요한 것으로 생각된다. 이를 위해서는 힘의 평형조건( $C = T$ )을 이용하여 중립축을 찾

아내어 철근의 변형률( $\epsilon_s$ )을 구하고, 철근의 응력-변형률 관계로부터 철근의 응력을 찾아내야 한다. 이 과정은 반복에 의해서만이 가능하므로, 본 논문에서는 반복이 필요없는 약산식을 유도하고자 하였다.

Fig. 8(c)에서 철근의 변형률  $\epsilon_s$ 는

$$\epsilon_s = \epsilon_{cu} \left( \frac{d-c}{c} \right) = \epsilon_{cu} \left( \frac{d}{c} - 1 \right) \quad (14)$$

윗 식에  $c = \left( \frac{a}{\beta_1} \right)$  을 대입하면

$$\epsilon_s = \epsilon_{cu} \left( \beta_1 \frac{d}{a} - 1 \right) \quad (15)$$

윗 식에서 등가응력블럭의 깊이 a는 Fig. 8(b)에서의 힘의 평형  $C = T$ 에서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$a = \frac{T_s + T_f}{0.9 f_{ck} b} \quad (16)$$

이때  $T_s = A_s f_s = \rho b d f_s$ ,  $T_f = f_m b (D - e)$  이다.

앞 절에서 보았듯이 강섬유에 의한 강도증가는 10%내외였으므로 윗 식에서 둘째항을 무시하고 양변을 d로 나누면 아래식과 같다.

$$\frac{a}{d} = \frac{A_s f_s}{0.9 f_{ck} b d} = \frac{\rho b d f_s}{0.9 f_{ck} b d} = \frac{1}{0.9} \rho \frac{f_s}{f_{ck}} \quad (17)$$

과소철근보의 경우  $f_s$ 는  $f_y$ 보다 큰 값을 갖는다. 즉 윗 식은

$$\frac{a}{d} = \frac{1}{0.9} \rho \frac{f_s}{f_{ck}} = \frac{1}{0.9} \rho \frac{c_1 f_y}{f_{ck}} = c_2 \frac{\rho f_y}{f_{ck}} = c_2 w \quad (18)$$

이때  $c_1$ 과  $c_2$ 는 임의의 계수이며, w는 역학적 철근비(mechanical reinforcement ratio)이다. 또한 윗 식은  $\frac{a}{d}$ 가 w에 비례함을 보여준다.

식(18)을 식(15)에 대입하면

$$\epsilon_s = \epsilon_{cu} \left( \beta_1 \frac{d}{a} - 1 \right) = \epsilon_{cu} \left( \frac{\beta_1}{c_2 w} - 1 \right) \quad (19)$$

위 식으로부터  $\epsilon_s$ 는  $\frac{1}{w}$ 의 비례식임을 알 수 있다. 따라서 철근의 변형률경화에 의한 강도 증가는 다음의 약산식으로 나타낼 수 있다.

$$f_s = f_y \left( 1 + Q_2 \frac{1}{w} \right) \quad (20)$$

이때  $Q_2$ 는 실험결과를 회귀분석하여 찾을 수 있는 보정계수이다. 본 연구의 HSCV1p2 실험체를 예를 들면 이 실험체는 철근비가 2%이고,  $\frac{f_y}{f_{ck}} = 7.8$ 에  $Q_2 = 2.0$ 를 대입하면

$$f_s = f_y \left( 1 + Q_2 \frac{1}{w} \right) = f_y \left( 1 + \frac{2}{2 \times 7.8} \right) = 1.13 f_y$$

가 된다. 따라서 ACI규준식과 Henager·Doherty의 제안식<sup>7)</sup> 및 Narayanan의 제안식<sup>11)</sup>과 본 연구에서 제안한 콘

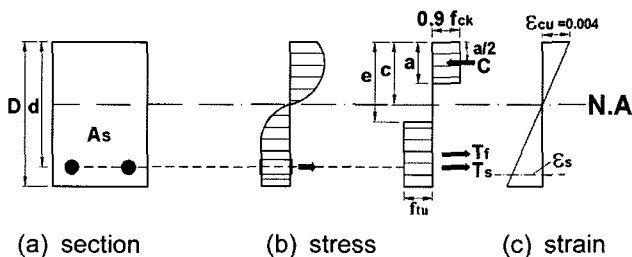


Fig. 8 Stress and strain diagrams

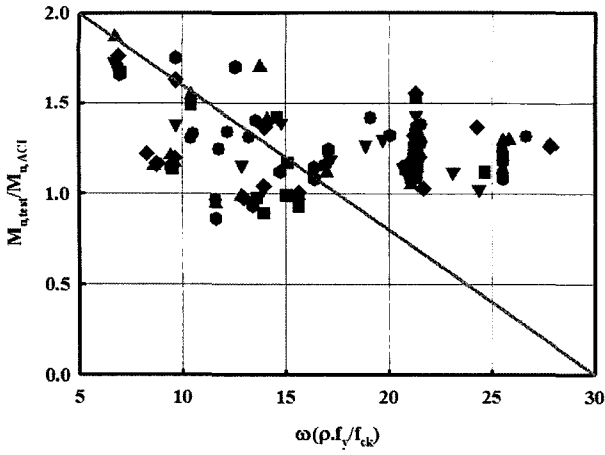


Fig. 9 Comparison of tested  $M_u$  with ACI code for  $\omega$

크리트 압축-인장모델과 Raynor의 철근모델식<sup>11)</sup>에 근거하여 아래와 같은 SFRC보의 휨강도식을 제안하였다.

$$\begin{aligned}
 M_n &= M_{n1} + M_{n2} = T_s \left( d - \frac{a}{2} \right) + T_f \left( \frac{D}{2} + \frac{e}{2} - \frac{a}{2} \right) \\
 &= A_s f_s \left( d - \frac{a}{2} \right) + f_{tu} b (D - e) \left( \frac{D}{2} + \frac{e}{2} - \frac{a}{2} \right) \quad (21) \\
 &= A_s f_s \left( 1 + Q_2 \frac{1}{\omega} \right) \left( d - \frac{a}{2} \right) + Q_1 \rho_f f_{spf} c b (D - e) \left( \frac{D}{2} + \frac{e}{2} - \frac{a}{2} \right)
 \end{aligned}$$

여기서,  $e = \frac{\varepsilon_{sf} + 0.004}{0.004} c$

상수  $Q_1, Q_2$ 는 129개 실험체의 회귀분석에 의해 구해졌는데  $Q_1=0.15, Q_2=2.0$ 의 값을 갖는다.

### 4.3 제안식의 분석

Tables 4, 5는 상수  $Q_1, Q_2$ 에 따라 제안식에 의한 값을 실험값과 비교한 예이다. 표에서  $Q_1=Q_2=0$ 인 경우는 ACI규준식을 나타내고,  $Q_1=1.0, Q_2=0$ 인 경우는 철근의 응력으로 항복강도( $f_y$ )를 사용함을 뜻한다.  $Q_1=0, Q_2=2.0$ 인 경우에는 강섬유의 효과를 무시하고 철근의 변형률경화에 의한 철근응력의 상승을 나타낸다.

ACI규준식( $Q_1=Q_2=0$ )에 의한 경우를 제외하고 나머지 세 경우 모두 평균값과 표준편차가 각각 0.84, 1.08, 1.01과 0.14, 0.15, 0.14로 큰 차이가 없다. 이것은 철근의 변형률경화를 무시한 경우( $Q_1=1.0, Q_2=0$ )에는 강섬유에 의한 모멘트값( $M_{n2}$ )이 상대적으로 커져서 평균값이 0.84가 나온 것으로 판단되고, 강섬유의 보강효과를 무시하고 철근의 변형률경화만을 고려한 경우( $Q_1=0, Q_2=2.0$ )에도 평균값이 1.08이 나온 것으로 볼 때, 철근의 변형률경화효과 및 강섬유의 보강효과를 함께 고려하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

Figs. 10, 11은  $Q_1, Q_2$ 에 따른 실험값과 계산값의 비( $M_{u, test} / M_{u, cal}$ )의 값을 주요변수인 강섬유 혼입률( $V_f$ ), 인장철근비( $\rho$ ), 콘크리트의 압축강도 ( $f_{ck}$ )에 대해 나타내었다. 즉, Fig. 10은  $Q_1=0, Q_2=0$  (ACI규준식)인 경우, Fig. 11은  $Q_1=0.15, Q_2=2$  (제안식)인 경우의 실험값과 이론값의 비를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 강섬유보강효과와 변형률 경화효과를 고려한 제안식에 의한 값의 비가 1.0부근에서 모여 있고, 따라서 더 정확히 실험결과와 일치하는 것을 알 수 있다.

Table 4 Comparison of flexural strength (unit : kN-m, 10 beams)

Investigator	Specimen	a/d	$M_{u, test}$	ACI code			Eq. without strain-hardening				Eq. without steel fiber				Proposed Eq.				
				$Q_1=Q_2=0$			$Q_1=1.0, Q_2=0$				$Q_1=0, Q_2=2.0$				$Q_1=0.15, Q_2=2.0$				
				$M_{n1}$	$M_{n2}$	$M_n$	$M_{u, test} / M_{u, cal}$	$M_{n1}$	$M_{n2}$	$M_n$	$M_{u, test} / M_{u, cal}$	$M_{n1}$	$M_{n2}$	$M_n$	$M_{u, test} / M_{u, cal}$	$M_{n1}$	$M_{n2}$	$M_n$	$M_{u, test} / M_{u, cal}$
This investigation	NSCV1r1	2.8	211	180	0	180	1.17	178	16.6	195	1.09	204	0	204	1.03	204	2.8	207	1.02
	HSCV1r1	2.8	229	187	0	187	1.22	185	31.6	217	1.06	233	0	233	0.98	233	5.3	238	0.96
	HSCV2r1	2.8	216	187	0	187	1.15	184	31.9	216	1.00	231	0	231	0.93	230	5.4	235	0.91
	HSCV1r2	2.8	386	356	0	356	1.08	353	35.9	389	0.99	402	0	402	0.96	401	6.6	408	0.95
Swamy <sup>2)</sup> et al.	DR11	6.39	23.3	16.7	0	16.7	1.40	16.1	6.4	22.5	1.04	19.1	0	19.1	1.22	18.9	1.1	20.0	1.16
	DR12	6.39	23.8	16.7	0	16.7	1.43	16.1	6.9	23.0	1.03	19.1	0	19.1	1.25	19.0	1.2	20.2	1.18
	DR21	6.47	33.7	26.6	0	26.6	1.27	25.7	7.5	33.2	1.02	28.9	0	28.9	1.17	28.6	1.4	30.0	1.12
	DR22	6.47	35.1	27.0	0	27.0	1.30	25.9	8.8	34.7	1.01	29.4	0	29.4	1.19	29.1	1.6	30.7	1.14
	DR31	6.39	28.6	21.7	0	21.7	1.32	21.0	5.7	26.7	1.07	24.0	0	24.0	1.19	23.8	1.0	24.8	1.15
	DR32	6.39	30.8	21.8	0	21.8	1.41	21.1	6.4	27.5	1.12	24.2	0	24.2	1.27	24.1	1.1	25.2	1.22

$M_{n1}$  : moment by steel,  $M_{n2}$  : moment by steel fiber

Table 5 Statistical evaluation of test specimens (total of 129 beams)

	$M_{u, test} / M_{u, cal}$			
	ACI code	Eq. without strain-hardening	Eq. without steel fiber	Proposed Eq.
	$Q_1=0, Q_2=0$	$Q_1=1.0, Q_2=0$	$Q_1=0, Q_2=2.0$	$Q_1=0.15, Q_2=2.0$
Mean	1.22	0.84	1.08	1.01
Standard deviation	0.20	0.14	0.15	0.14

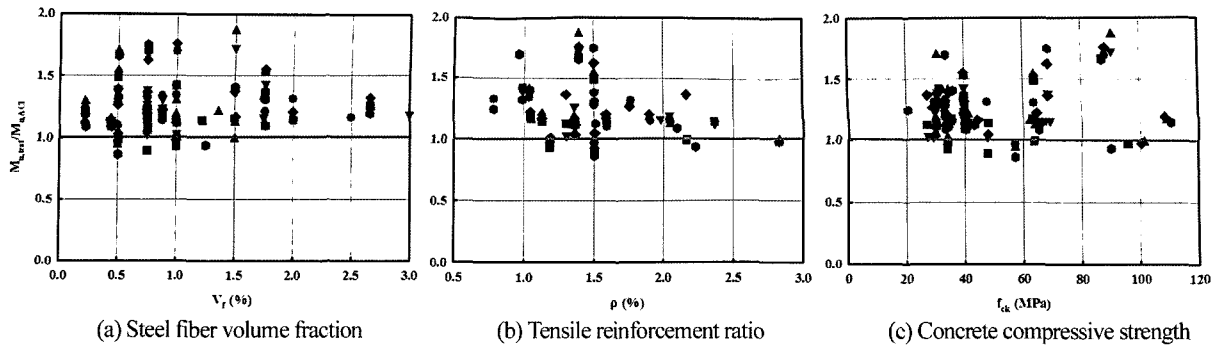


Fig. 10 Evaluation of ACI equation ( $Q_1=Q_2=0$ )

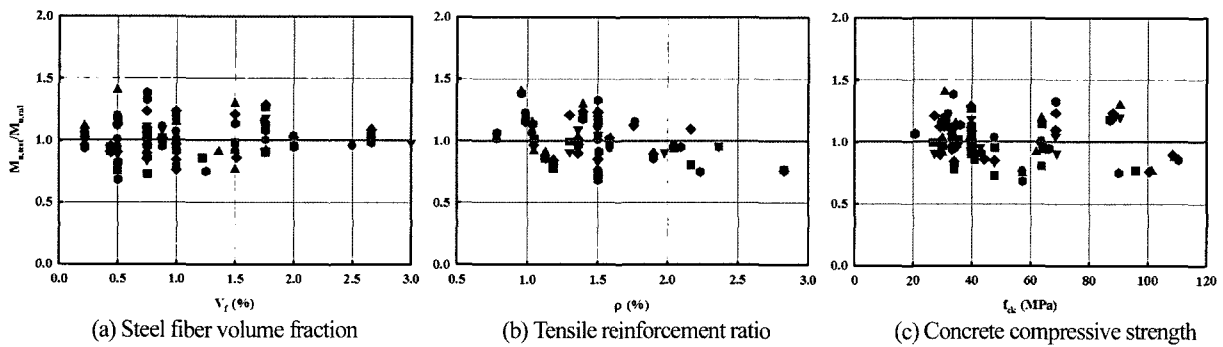


Fig. 11 Evaluation of Proposed equation ( $Q_1=0.15, Q_2=2$ )

#### 4.4 기존제안식 및 본 연구에서의 제안식과의 비교

Tables 6, 7은 강섬유가 혼입된 콘크리트 보의 실험값을 Henager·Doherty<sup>7)</sup>, Craig<sup>9)</sup>, Imam<sup>10)</sup>, Jindal<sup>8)</sup>의 제안식 및 본 연구에서의 제안식에 의한 계산값을 비교한 것이다. Tables 6,7과 Fig. 12에서 보듯이 본 연구에서의 제안식에 의한 계산값이 실험결과를 잘 반영함을 알 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 강섬유보강 콘크리트보의 휨성능을 규명하기 위해 인장철근비( $\rho$ )와 강섬유 혼입률( $v_f$ ), 그리고

콘크리트 압축강도( $f_{ck}$ )를 변수로 하여 휨실험을 하였다. 또한 기존의 휨강도 제안식보다 실험결과를 더욱 잘 반영할 수 있는 새로운 휨강도식을 제안하였다. 제안된 휨강도식은 129개의 실험값과 기존의 Henager·Doherty<sup>7)</sup>, Craig<sup>9)</sup>, Imam<sup>10)</sup>, Jindal<sup>8)</sup>의 제안식과 비교 검토하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 강섬유의 혼입으로 콘크리트보의 휨강성, 연성 등 구조성능이 크게 개선되었다. 특히 인장철근 항복 이후의 휨거동에 더욱 효과적임을 알 수 있다.
- 2) 본 연구에서의 제안식은 강섬유보강 콘크리트보의 휨강도에 대한 주요변수인 강섬유혼입율, 인장철근비,

Table 6 Comparison of test moments and calculated moments (unit : kN-m, 10beams)

Investigator	Specimen	$M_{u,test}$	Existing equations ( $M_{u,cal}$ )					Proposed Eq(21)	$M_{u,t}/M_{u,Heg}$	$M_{u,t}/M_{u,cra}$	$M_{u,t}/M_{u,Imam}$	$M_{u,t}/M_{u,Jindal}$	$M_{u,t}/M_{u,ip}$
			Henager Eq(9)	Craig Eq(10)	Imam Eq(11)	Jindal Eq(12)	Proposed Eq(21)						
This Investigation	NSCV1p1	211	181	180	195	208	207	1.16	1.17	1.08	1.01	1.02	
	HSCV1p1	229	190	190	206	223	238	1.21	1.21	1.11	1.03	0.96	
	HSCV2p1	216	192	191	223	229	235	1.12	1.13	0.97	0.94	0.91	
	HSCV1p2	386	357	356	371	380	408	1.08	1.08	1.04	1.01	0.95	
Swamy <sup>2)</sup> et al.	DR11	23.3	17.4	17.5	18.1	23.2	20.0	1.34	1.33	1.28	1.00	1.16	
	DR12	23.8	18.1	18.1	19.5	25.1	20.14	1.31	1.32	1.22	0.95	1.18	
	DR21	33.7	27.1	26.7	27.6	31.1	29.96	1.24	1.26	1.22	1.08	1.12	
	DR22	35.1	27.9	27.2	29.0	33.0	30.72	1.25	1.29	1.21	1.06	1.14	
	DR31	28.6	22.2	22.1	22.9	27.6	22.24	1.29	1.30	1.25	1.04	1.15	
	DR32	30.8	23.0	22.6	24.2	28.9	22.98	1.34	1.36	1.27	1.07	1.22	

※  $M_{u,t}$ : ultimate moment by test,  $M_{u,ip}$ : ultimate moment by proposed eq.



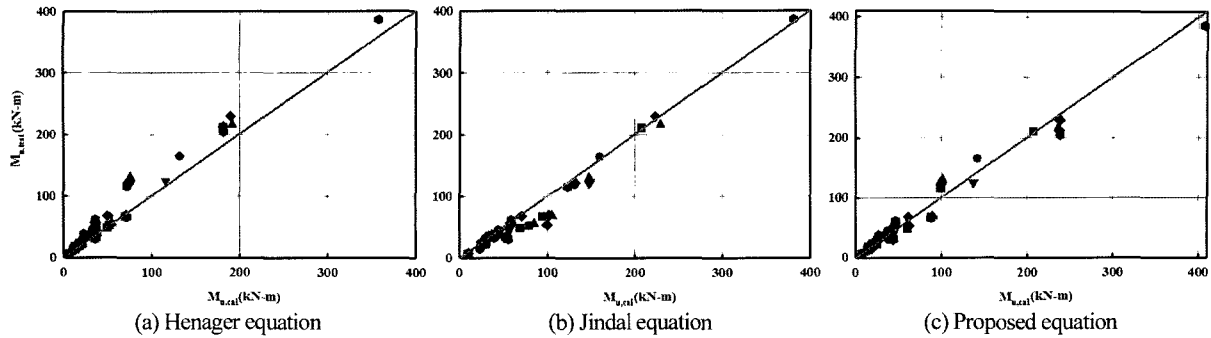


Fig. 12 Comparison of observed flexural strength with predicted strength

Table 7 Statistical evaluation of expressions for flexural strength

Test series	No. of beams	Mean value of $M_{u, test}/M_{u, cal}$ (Standard deviation)				
		Henager	Craig	Imam	Jindal	Proposed
		Eq (9)	Eq (10)	Eq (11)	Eq (12)	Eq (21)
This investigator	4	1.14 (0.05)	1.15 (0.05)	1.05 (0.06)	1.00 (0.04)	0.96 (0.04)
Swamy <sup>2)</sup>	6	1.30 (0.04)	1.31 (0.04)	1.24 (0.03)	1.03 (0.05)	1.17 (0.03)
Lim <sup>3)</sup>	5	0.95 (0.03)	-	0.92 (0.04)	-	0.82 (0.02)
Alsayed <sup>4)</sup>	4	1.29 (0.04)	1.21 (0.06)	1.25 (0.05)	-	1.12 (0.04)
Ashour <sup>5)</sup>	9	1.41 (0.34)	1.38 (0.31)	1.35 (0.31)	0.83 (0.12)	1.06 (0.23)
Tan <sup>6)</sup>	4	1.10 (0.02)	1.10 (0.04)	1.08 (0.01)	0.74 (0.01)	0.98 (0.03)
Henager <sup>7)</sup>	3	1.00 (0.01)	0.95 (0.03)	0.94 (0.03)	0.61 (0.05)	0.87 (0.02)
Craig <sup>9)</sup>	2	1.16 (0.12)	1.19 (0.17)	1.09 (0.12)	0.94 (0.13)	1.03 (0.17)
Imam <sup>10)</sup>	3	1.14 (0.02)	-	1.12 (0.02)	-	0.88 (0.02)
Batson <sup>12)</sup>	47	1.17 (0.10)	-	1.15 (0.10)	-	1.02 (0.10)
Casanova <sup>13)</sup>	1	0.91 (0.00)	0.88 (0.00)	0.89 (0.00)	-	0.81 (0.00)
Kwak <sup>14,19)</sup>	19	1.26 (0.28)	1.23 (0.27)	1.23 (0.27)	0.83 (0.17)	1.04 (0.23)
Mansur <sup>15)</sup>	11	1.13 (0.08)	1.10 (0.06)	1.09 (0.07)	0.87 (0.05)	1.00 (0.06)
Murty <sup>16)</sup>	3	1.13 (0.17)	-	1.11 (0.18)	-	1.04 (0.16)
Narayanan <sup>17)</sup>	4	1.08 (0.01)	1.11 (0.05)	1.00 (0.01)	-	0.96 (0.02)
Oh <sup>18)</sup>	4	1.11 (0.06)	1.07 (0.04)	1.11 (0.06)	0.74 (0.07)	0.96 (0.05)
All tests	129	1.18 (0.19)	1.19 (0.21)	1.15 (0.18)	0.85 (0.15)	1.01 (0.14)

콘크리트 압축강도 등에 관해 잘 나타냄을 알 수 있다.

- 3) 강섬유의 혼입은 강섬유의 보강효과 뿐만 아니라 철근의 변형률경화효과도 함께 고려하는 것이 적절함을 알 수 있다.
- 4) 본 연구에서 제안한 휨강도식은 실험값과 좋은 일치를 보여주고 있다.

### 감사의 글

이 연구는 한국과학재단의 해외 Post-doc. 연수지원에 의하여 연구되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. ACI Committee 544, "State-of-the Art Report on Fiber

Reinforced Concrete," American Concrete Institute, Detroit, ACI 544. 1R-96, 1997, pp.1-60.

2. Swamy, R. N. and Al-Ta'an, S. A., "Deformation and Ultimate Strength in Flexure of Reinforced Concrete Beams made with Steel Fiber Concrete," *ACI Structural Journal*, Vol.78, No.5, Sep.-Oct. 1981, pp.395-405.
3. Lim, T. Y., Paramasivam, P., and Lee, S. L., "Behavior of Reinforced Steel Fiber Concrete Beams in Flexure", *Journal of Structural Eng., ASCE*, Vol.113, No.12, Dec. 1987, pp.2439-2458.
4. Alsayed, S. H., "Flexural Deflection of Reinforced Fibrous Concrete Beams", *ACI Journal*, Vol.90, No.1, Jan-Feb. 1993. pp.72-76.
5. Ashour, S. A. and Wafa, F. F., "Flexural Behavior of High-Strength Fiber Reinforced Concrete Beams", *ACI Structural Journal*, Vol.90, No.3, May-June. 1993, pp.279-287.
6. Tan, K. H., Paramasivam, P., and Tan, K. C., "Instantaneous

- and Long Term Deflections of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams”, *ACI Structural Journal*, Vol.91, No.4, July-Aug. 1994, pp.384~393.
7. Henager, C. H., and Doherty, T.J., “Analysis of Reinforced Concrete Beams”, *ASCE*, Vol.102, No.ST1, Jan. 1976, pp. 177~188.
  8. Jindal, R. L., *Shear and Moment Capacities of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams*, SP 81-1, 1984, pp.1~16.
  9. Craig, R. J., *Flexural Behavior and Design of Reinforced Fibrous Concrete Members*, Fiber Reinforced Concrete Properties and Application, SP 105-28, *American Concrete Institute*, Detroit, 1987, pp.517~563.
  10. Imam, M., Vandewalle, L., and Mortelmans, F., “Shear-Moment Analysis of Reinforced High Strength Concrete Beams Containing Steel Fibres”, *Canadian Journal of Civil.*, Vol.19, No.9, 1995, pp.462~469.
  11. Raynor, D. J., Lehman, D. E., and Stanton, J. F., “Bond-Slip Response of Reinforcing Bars Grouted in Ducts”, *ACI Structural Journal*, Vol.99, No.5, Sep.-Oct. 2002, pp.568~576.
  12. Batson, G. B. and Jenkins, E., and Spatney, R., “Steel Fibers as Shear Reinforcement in Beams”, *ACI Journal, Proceedings*, Vol.69, No.10, Oct. 1972, pp.640~644.
  13. Casanova, P., and Rossi, P., “*High-Strength Concrete Beams Submitted to Shear: Steel Fibers Versus Stirrups*”, *Structural Applications of Fiber Reinforced Concrete*, SP-182, ACI, 1999, pp.53~67.
  14. Kwak, Y., Eberhard, M. O., Kim, W., and Kim, J., “Shear Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams without Stirrups”, *ACI Structural Journal*, Vol. 99, No. 4, July-Aug. 2002, pp.530~538.
  15. Mansur, M. A. and Paramasivam, P., “Fiber Reinforced Concrete Beams in Torsion, Bending, and Shear”, *ACI Structural Journal*, Vol.82, No.1, Jan.- Feb. 1985, pp.33~39.
  16. Murty, D.S.R. and Venkatacharyulu, T., “Fiber Reinforced Concrete Beams subjected to Shear Force”, *Proceedings International Symposium on Fiber Reinforced Concrete*, Dec. 1987, *Madras, India*, pp.1125~1132.
  17. Narayanan, R., and Darwish, I. Y. S., “Use of Steel Fibers as Shear Reinforcement,” *ACI Structural Journal*, Vol.84, No.3, May-June, 1987, pp.216-227.
  18. Oh, B. H., “Flexural Analysis of Reinforced concrete Beams containing steel Fibers”, *Journal of structural Eng., ASCE*, Vol.118, No.10, Oct. 1992, pp.2812~2863.
  19. 김우석, 백승민, 이정석, 권진환, 박윤근, “크리트보의 휨 내력에 관한 연구”, *대한건축학회 논문집*, Vol.18, No.9, 2002, pp.3~11.

---

**요 약** 본 연구에서는 국내외 강섬유보강 콘크리트보의 실험값 및 이론식을 분석하여 강섬유의 보강효과 및 부재의 역학적 거동을 규명하였고, 기존의 휨강도식보다 더 정확하고 합리적인 휨강도식을 제안하였다. 제안된 휨강도식은 실험값과 좋은 일치를 보여주었고, 강섬유보강 콘크리트보의 휨강도식은 강섬유보강효과뿐만 아니라 철근의 변형을 경화효과도 함께 고려하는 것이 적절함을 알 수 있었다.

**핵심용어** 강섬유보강 콘크리트, 변형을 경화