

# 강섬유보강 콘크리트보의 휨강도에 관한 연구

## Flexural Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams

김 우 석\*  
Kim, Woo Suk

백 승 민\*  
Baik, Seung Min

곽 윤 근\*\*  
Kwak, Yoon Keun

### ABSTRACT

The objective of this study is to evaluate the flexure strength of steel fiber reinforced concrete beams and the effect of the adding steel fiber to flexural strength, and is to compare the proposed equation with the previous equation for predicting the flexural strength of fiber reinforced concrete beams.

Based on earlier published studies and tests, predictive equation is proposed for evaluating the flexural strength of steel fiber reinforced concrete beams.

The proposed equation gave good prediction for the flexural strength of the tested beams.

### 1. 서 론

지난 30년동안 구조물에 대한 강섬유보강 콘크리트(SFRC)의 적용과 강섬유혼입에 따른 성능개선에 대한 연구가 이루어져 왔다. Swamy · Al-Ta'an<sup>13)</sup>(1981), Lim · Paramasivam<sup>10)</sup>(1987), Alsayed<sup>3)</sup>(1993), Ashour · Wafa<sup>4)</sup>(1993), Tan<sup>14)</sup>(1994)등은 처짐과 극한휨강도에 대한 강섬유의 보강효과를 발표하였고, Henager · Doherty<sup>7)</sup>(1976), Jindal<sup>9)</sup>(1984), Craig<sup>6)</sup>(1987), Imam<sup>8)</sup>(1995)등은 SFRC보의 극한휨강도를 예측할 수 있는 이론식을 개발하였다.

본 연구에서는 국내외 강섬유보강 콘크리트보의 이론식을 분석하고 실험데이터를 이용하여 강섬유보강 효과 및 부재의 역학적 거동을 규명하고, 기존의 휨강도식보다 더 정확하고 합리적인 휨강도식을 제안하고자 한다.

### 2. 기존제안식의 고찰 및 휨강도식의 제안

#### 2.1 기존제안식의 고찰

강섬유보강 콘크리트 보의 휨파괴에 대해 영향을 미치는 요인은 콘크리트의 압축강도( $f_{ck}$ ), 인장철근비( $\rho$ ), 강섬유 혼입율( $V_f$ )등이 있다. 이외에도 강섬유의 형상비( $L_f/D_f$ )등이 영향을 미친다. 휨응력을 산정하는데는 많은 변수들이 있으므로 기존식은 명확한 이론적 해석보다는 많은 연구자들의 실험에 의한 실험식으로 제안되었다.

#### (1) Henager · Doherty의 제안식

$$M_t = A_s f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) + \sigma_t b (D - e) \left( \frac{D}{2} + \frac{e}{2} - \frac{a}{2} \right) \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_t$  : 강섬유보강콘크리트의 인장응력으로서,

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

$P_e$  : 강섬유의 유효체적비

\* 정회원, 금오공과대학교 건축공학과 박사과정

\*\* 정회원, 금오공과대학교 건축공학과 교수

$P$  : 강섬유의 체적비  
 $\sigma_f$  : 강섬유의 인장응력  
 $F_{be}$  : 강섬유의 부착유효계수

(2) Craig의 제안식

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

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

$P_f$  : 강섬유의 인발력

$n$  : 단위면적당 강섬유의 수

$\beta_1$  : 등가응력블럭의 깊이에 관한 계수

(3) Imam의 제안식

$$M_u = \frac{1}{2} \rho f_y b d^2 (2 - \eta) + 0.83 F b d^2 (0.75 - \eta)(2.15 + \eta) \quad (3)$$

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

(4) Jindal의 제안식

$$M_u = A_s f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) + b g (0.85 \sigma_{ur}) \left( D - \frac{a}{2} - \frac{g}{2} \right) \quad (4)$$

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

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

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

$nd$  : 중립축거리

$\sigma_m$  : 일반콘크리트의 휨인장응력

## 2.2. 휨강도식의 제안

기존의 발표논문을 분석한 결과 SFRC보의 휨강성에 대한 강섬유의 효과는 10%내외이다. 이 정도의 강도증진이면 철근의 항복강도  $f_y$  대신에 실제에 가까운 응력인  $f_s$ 를 가지고 휨강성을 구하는 것이 더욱 합리적인 판단이라 생각된다. 따라서, 아래와 같이  $f_s$ 를 유도하여 식에 대입하였다.

그림 1에서 철근의 변형도  $\epsilon_s$ 는

$$\epsilon_s = \epsilon_{cu} \left( \frac{d-c}{c} \right) = \epsilon_{cu} \left( \frac{d}{c} - 1 \right) \quad (5)$$

윗 식에  $c = \frac{a}{\beta_1}$ 을 대입하면

$$\epsilon_s = \epsilon_{cu} \left( \beta_1 \frac{d}{a} - 1 \right) \quad (6)$$

윗 식에서 등가응력블럭의 깊이  $a$ 는  $C = T$ 에서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$a = \frac{A_s f_s + Q_1 f_{sffc} b (D - e)}{0.85 f_{ck} b} \quad (7)$$

양변을  $d$ 로 나누면 아래식과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{a}{d} &= \frac{\rho b d f_s}{0.85 f_{ck} b d} + \frac{Q_1 f_{sffc} b (D - e)}{0.85 f_{ck} b d} \\ &= \frac{1}{0.85} \rho \frac{f_s}{f_{ck}} + Q_1 f_{sffc} \frac{(D - e)}{0.85 f_{ck} d} \end{aligned} \quad (8)$$

윗 식에서 강섬유의 보강효과를 무시( $Q_1=0$ )하면 다음과 같다.

$$\frac{a}{d} \approx \frac{1}{0.85} \rho \frac{f_s}{f_{ck}} = \frac{1}{0.85} w \quad (9)$$

식(9)를 식(6)에 대입하면

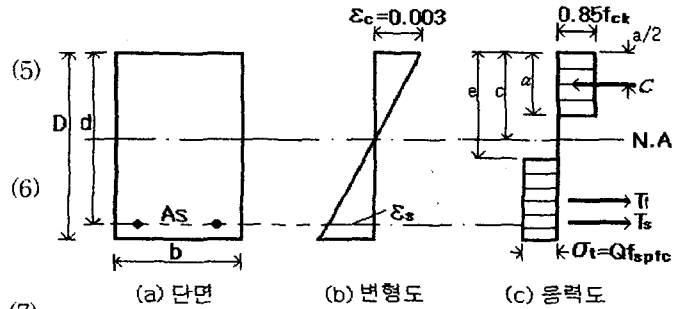


그림 1. 가정된 응력-변형도 곡선

$$\epsilon_s = \epsilon_{cu} \left( \beta_1 \frac{d}{a} - 1 \right) = \epsilon_{cu} \left( \beta_1 0.85 \frac{1}{w} - 1 \right) \quad (10)$$

윗 식에서  $\epsilon_s$ 는  $1/w$ 의 함수임을 알 수 있다.  $f_s = f(\epsilon_s)$ 이므로

$$f_s = f_y \left( 1 + Q_2 \frac{1}{w} \right) \quad (11)$$

따라서, SFRC보의 휨강성을 아래와 같이 제안하였다.

$$M_n = A_s f_s \left( d - \frac{a}{2} \right) + Q_1 f_{spfc} b (D - e) \left( \frac{D}{2} + \frac{e}{2} - \frac{a}{2} \right) \quad (12)$$

$$\text{여기서, } e = \frac{\epsilon_{sf} + 0.003}{0.003} c$$

$$\epsilon_{sf}(\text{Fiber}) = \frac{\sigma_f}{E_s(\text{Fiber})}$$

$$\sigma_f = \frac{\tau_d F_{be} \frac{1}{2} \pi d_f}{\pi \frac{d_f^2}{4}} = \frac{2\tau_d F_{be} l}{d_f}$$

상수  $Q_1, Q_2$ 는 113개 시험체의 회귀분석에 의해 구해졌는데  $Q_1=0.15, Q_2=4.0$ 의 값을 갖는다.

### 2.3. 제안식의 분석

식 12를 다음과 같이 다시 나타내면

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} = A_s f_s \left( d - \frac{a}{2} \right) + Q_1 f_{spfc} b (D - e) \left( \frac{D}{2} + \frac{e}{2} - \frac{a}{2} \right) \quad (13)$$

$$\text{여기서, } f_s = f_y \left( 1 + Q_2 \frac{1}{w} \right)$$

표 1, 표 2는 상수  $Q_1, Q_2$ 에 따라 제안식에 의한 값을 실험값과 비교한 것이다. 표에서  $Q_1=Q_2=0$ 인 경우는 ACI규준식을 나타내고  $Q_1=1.0, Q_2=4.0$ 인 경우는 철근의 응력으로  $f_y$ 를 사용함을 뜻한다.  $Q_1=0, Q_2=4.0$ 인 경우에는 강섬유의 효과를 무시하고 철근의 Strain-hardening에 의한 철근응력의 상승을 나타낸다. ACI규준식( $Q_1=Q_2=0$ )에 의한 경우를 제외하고 나머지 3 경우 모두 평균값과 표준편차가 각기 1.01, 1.05, 1.02와 0.15로 거의 비슷하다.

이것은 철근의 Strain-hardening을 무시한 경우에는 강섬유에 의한 모멘트값( $M_{n2}$ )이 커져서 평균값이 1.01이 나온 것으로 판단되고 강섬유의 보강효과를 무시하고 철근의 Strain-hardening만을 고려한 경우에도 평균값이 1.05가 나온 것으로 볼 때 철근의 Strain-hardening효과 및 강섬유의 보강효과를 함께 고려하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

그림 2~그림 5는  $Q_1, Q_2$ 에 따른 강섬유 혼입률( $V_f$ ), 인장철근비( $\rho$ ), 콘크리트의 압축강도( $f_{ck}$ )의 값을 비교한 것이다.

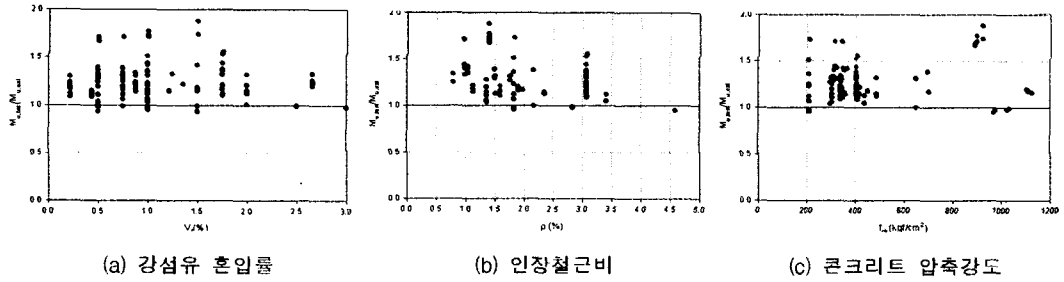
표 1. 강섬유를 혼입한 콘크리트보의 실험값과 ACI식 및 본연구에서의 제안식에 대한 비교(단위: kN·m, 17개 시험체)

연구자	시험체명	실험값 $M_{u, test}$	ACI				철근의 S-H효과무시				강섬유의 효과무시				제안식			
			$Q_1=Q_2=0$				$Q_1=1.0, Q_2=0$				$Q_1=0, Q_2=4.0$				$Q_1=0.15, Q_2=4.0$			
			$M_{n1}$	$M_{n2}$	$M_n$	$M_{test}/M_{cal}$	$M_{n1}$	$M_{n2}$	$M_n$	$M_{test}/M_{cal}$	$M_{n1}$	$M_{n2}$	$M_n$	$M_{test}/M_{cal}$	$M_{n1}$	$M_{n2}$	$M_n$	$M_{test}/M_{cal}$
Swamy et al.	DR11	2.37	1.70	0	1.70	1.39	1.64	0.55	2.19	1.08	2.11	0	2.11	1.12	2.09	0.11	2.20	1.08
	DR12	2.43	1.71	0	1.71	1.42	1.64	0.60	2.24	1.09	2.12	0	2.12	1.15	2.10	0.11	2.21	1.10
	DR21	3.43	2.72	0	2.72	1.26	2.67	0.25	2.92	1.18	3.02	0	3.02	1.14	3.00	0.07	3.07	1.12
	DR22	3.58	2.76	0	2.76	1.30	2.70	0.33	3.03	1.18	3.09	0	3.09	1.16	3.07	0.09	3.16	1.13
	DR31	2.92	2.21	0	2.21	1.32	2.14	0.44	2.58	1.13	2.58	0	2.58	1.13	2.56	0.09	2.65	1.10
	DR32	3.14	2.22	0	2.22	1.42	2.15	0.50	2.65	1.18	2.61	0	2.61	1.20	2.59	0.11	2.70	1.17
Mansur et al.	B4	3.36	3.26	0	3.26	1.03	3.16	0.61	3.77	0.89	3.76	0	3.76	0.89	3.73	0.12	3.85	0.87
	C3	3.44	3.28	0	3.28	1.05	3.17	0.65	3.82	0.90	3.79	0	3.79	0.91	3.76	0.13	3.89	0.88
	C4	3.62	3.28	0	3.28	1.11	3.17	0.65	3.82	0.95	3.79	0	3.79	0.96	3.76	0.13	3.89	0.93
	C5	2.48	2.00	0	2.00	1.24	1.92	0.85	2.77	0.90	2.61	0	2.61	0.95	2.59	0.15	2.74	0.91
	D1	3.73	3.28	0	3.28	1.14	3.17	0.67	3.84	0.97	3.80	0	3.80	0.98	3.77	0.13	3.90	0.96
	D2	3.66	3.28	0	3.28	1.12	3.17	0.67	3.84	0.95	3.80	0	3.80	0.96	3.77	0.13	3.90	0.94
	D3	3.65	3.28	0	3.28	1.11	3.17	0.67	3.84	0.95	3.80	0	3.80	0.96	3.77	0.13	3.90	0.94
	D4	3.89	3.28	0	3.28	1.19	3.17	0.67	3.84	1.01	3.80	0	3.80	1.02	3.77	0.13	3.90	1.00
	E1	2.40	1.93	0	1.93	1.24	1.85	0.58	2.43	0.98	2.32	0	2.32	1.03	2.30	0.11	2.41	0.99
	F1	2.67	2.01	0	2.01	1.33	1.93	0.94	2.87	0.93	2.71	0	2.71	0.99	2.69	0.16	2.85	0.94
	F2	4.22	3.32	0	3.32	1.27	3.21	0.76	3.97	1.06	3.92	0	3.92	1.08	3.89	0.14	4.03	1.05

※  $M_{n1}$ : 인장철근에 의한 저항모멘트,  $M_{n2}$ : 강섬유보강에 의한 저항모멘트

표2. 제안식에 의한 회귀분석결과(113개 시험체)

연구자	평균값 $M_{u, test} / M_{u, cal}$ (표준편차)			
	ACI $Q_1=0, Q_2=0$	철근의 S-H효과무시 $Q_1=1.0, Q_2=0$	강섬유의 보강효과무시 $Q_1=0, Q_2=4.0$	제안식 $Q_1=0.15, Q_2=4.0$
평균값	1.26	1.01	1.05	1.02
표준편차	0.20	0.15	0.15	0.15

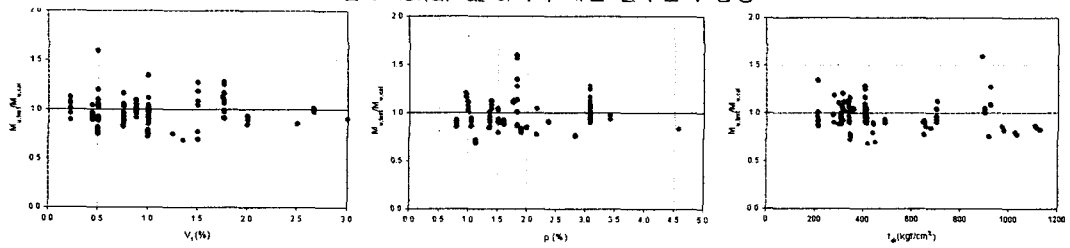


(a) 강섬유 혼입률

(b) 인장철근비

(c) 콘크리트 압축강도

그림2. ACI( $Q_1=Q_2=0$ )식에 대한 변수들의 영향

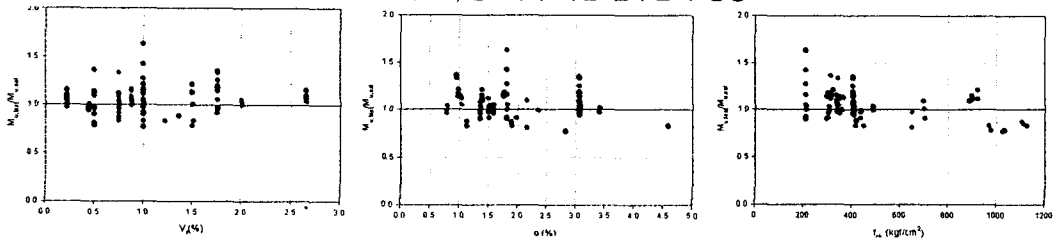


(a) 강섬유 혼입률

(b) 인장철근비

(c) 콘크리트 압축강도

그림3.  $Q_1=1.0, Q_2=0$ 식에 대한 변수들의 영향

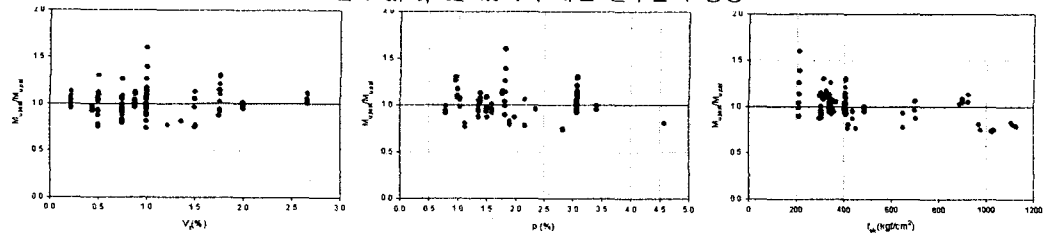


(a) 강섬유 혼입률

(b) 인장철근비

(c) 콘크리트 압축강도

그림4.  $Q_1=0, Q_2=4.0$ 식에 대한 변수들의 영향



(a) 강섬유 혼입률

(b) 인장철근비

(c) 콘크리트 압축강도

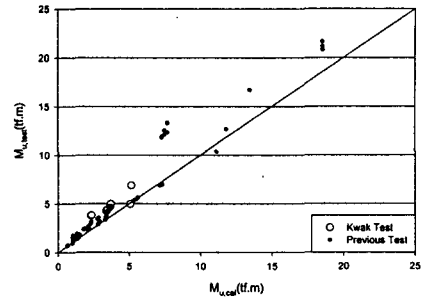
그림5. 제안식 ( $Q_1=0.15, Q_2=4.0$ )에 대한 변수들의 영향

3. 기존제안식 및 본연구에서의 제안식과의 비교

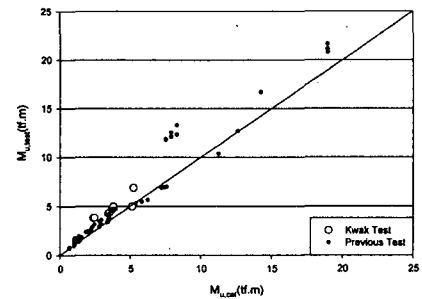
표 3은 강섬유가 혼입된 콘크리트 보의 실험값을, Henager · Doherty, Craig, Imam, Jindal의 제안식 및 본연구에서의 제안식에 의한 계산값을 비교한 것이다. 표 3과 그림 6에서 보듯이 본연구에서의 제안식에 의한 계산값이 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

표3. 휨강도에 대한 제안식에서의 통계평가

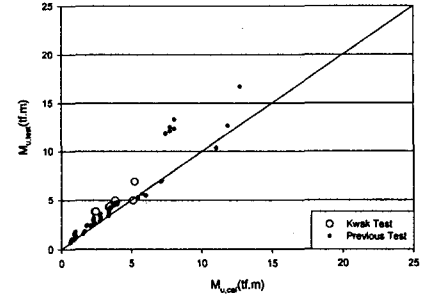
연구자	시험 채수	평균값 $M_{u, test} / M_{u, cal}$ (표준편차)				
		Henager	Craig	Imam	Jindal	제안식
		Eq(1)	Eq(2)	Eq(3)	Eq(4)	Eq(12)
본연구	8	1.34 (0.21)	1.32 (0.20)	1.31 (0.20)	0.90 (0.20)	1.06 (0.17)
Swamy	6	1.30 (0.04)	1.31 (0.04)	1.24 (0.03)	1.03 (0.05)	1.12 (0.03)
Henager	3	1.00 (0.01)	0.95 (0.04)	1.07 (0.07)	0.61 (0.07)	0.78 (0.02)
Craig	2	1.16 (0.12)	1.19 (0.17)	0.99 (0.04)	0.94 (0.13)	1.01 (0.20)
Alsayed	4	1.29 (0.04)	1.21 (0.06)	1.25 (0.05)	-	1.04 (0.04)
Jindal	9	1.28 (0.29)	1.40 (0.29)	1.27 (0.29)	1.18 (0.27)	1.21 (0.28)
Ashour	10	1.37 (0.01)	1.34 (0.32)	1.08 (0.03)	0.83 (0.12)	0.94 (0.16)
Tan	4	1.10 (0.02)	1.10 (0.04)	1.06 (0.03)	0.74 (0.01)	0.96 (0.03)
Oh, B.H.	6	1.10 (0.05)	1.08 (0.04)	1.08 (0.04)	0.78 (0.08)	0.95 (0.05)
Baston	47	1.17 (0.10)	-	1.15 (0.10)	-	1.03 (0.10)
Mansur	11	1.13 (0.08)	1.10 (0.06)	1.09 (0.07)	0.87 (0.05)	0.95 (0.05)
Imam	3	1.14 (0.02)	-	1.16 (0.00)	-	0.81 (0.02)
All Tests	113	1.20 (0.18)	1.23 (0.22)	1.18 (0.17)	0.90 (0.20)	1.02 (0.15)



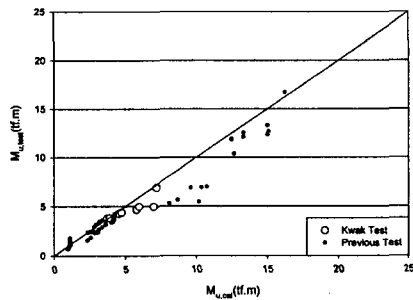
(a) Henager의 제안식



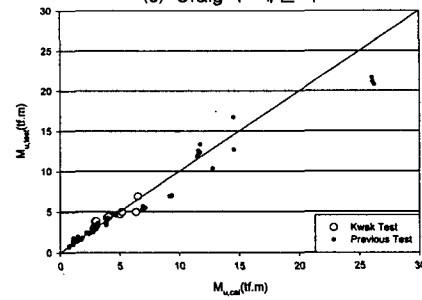
(b) Imam의 제안식



(c) Craig의 제안식



(d) Jindal의 제안식



(e) 본연구에서의 제안식

그림6. 휨강도에 대한 실험값과 제안식에 의한 이론값의 비교

#### 4. 결론

본 연구에서 제안한 휨강도식과 기존의 Henager · Doherty의 제안식, R. Craig의 제안식, Imam의 제안식, Jindal의 제안식을 비교 검토하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 강섬유보강 콘크리트보의 휨강도식은 철근의 Strain-hardening효과 및 강섬유보강효과를 함께 고려하는 것이 적절함을 알 수 있다.

(2) 본 연구에서의 제안식이 강섬유혼입율( $V_f$ ), 인장철근비( $\rho$ ), 콘크리트압축강도( $f_{ck}$ )등에 관해 잘 나타냄을 알 수 있다.

(3) 본 연구에서 제안한 휨강도식은 실험값과 좋은 일치를 보여주고 있다.

#### 참 고 문 헌

1. ACI Committee 544, "Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete(ACI 544. 4R)", ACI Structural Journal, V. 85, No. 5, Sep-Oct. 1988, pp. 563-580.
2. ACI Committee 544, "State-of-the Art Report on Fiber Reinforced Concrete," American Concrete Institute, Detroit, ACI 544. 1R-96, 1997, pp. 1-60.
3. Alsayed, S. H., "Flexural Deflection of Reinforced Fibrous Concrete Beams", ACI Journal, V. 90, No. 1, Jan-Feb. 1993. pp. 72-76.
4. Ashour, S. A. and Wafa, F. F., "Flexural Behavior of High-Strength Fiber Reinforced Concrete Beams," ACI Structural Journal, V. 90, No. 3, May-June. 1993, pp. 279-287.
5. Batson, G. B., and Jenkins, E., and Spatney, R., "Steel Fibers as Shear Reinforcement in Beams," ACI Journal, Proceedings, V. 69, No. 10, Oct. 1972, pp. 640-644.
6. 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.
7. Henager, C. H., and Doherty, T.J., "Analysis of Reinforced Concrete Beams", ASCE, V. 102, No. ST1, Jan. 1976, pp. 177-188.
8. Imam, M., Vandewalle, L., and Mortelmans, F., "Shear-Moment Analysis of Reinforced High Strength Concrete Beams Containing Steel Fibres," Can. J. Civ. Eng., 1995, pp. 462-469.
9. Jindal, R. L., "Shear and Moment Capacities of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams," SP 81-1, 1984, pp. 1-16.
10. Lim, T.Y., Paramasivam, P., and Lee, S.L., " Behavior of Reinforced Steel Fiber Concrete Beams in Flexure," Journal of Structural Eng., ASCE, V. 113, No. 12, Dec. 1987, pp. 2439-2458.
11. Mansur, M. A. and Paramasivam, P., "Fiber Reinforced Concrete Beams in Torsion, Bending, and Shear ,"ACI Structural Journal, V. 82, No. 1, Jan.-Feb. 1985, pp. 33-39.
12. Oh, B. H., "Flexural Analysis of Reinforced concrete Beams containing steel Fibers," Journal of structural Eng., ASCE, V. 118, No. 10, Oct. 1992, pp. 2812-2863.
13. Swamy, R. N., and Al-Ta'an, S. A., "Deformation and Ultimate Strength in Flexural of Reinforced Concrete Beams made with Steel Fiber Concrete," ACI Structural Journal, V. 78, No. 5, Sep.-Oct. 1981, pp. 395-405.
14. Tan, K. H., Paramasivam, P., and Tan, K. C., "Instaneous and Long Term Deflections of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams," ACI Structural Journal, V. 91, No. 4, July-Aug. 1994, pp. 384-393.
15. 김우석, 이정석, 백승민, 박윤근, "전단보강된 강섬유보강 콘크리트보의 휨거동에 관한 연구", 대한 건축학회 춘계학술발표대회 논문집, 제 21권 제1호, 2001. 4.