



전단보강이 없는 강섬유보강 콘크리트 휨부재의 휨 및 전단강도의 평가

오영훈^{1)*} · 김정해¹⁾

¹⁾건양대학교 건축공학과

Estimation of Flexural and Shear Strength for Steel Fiber Reinforced Flexural Members without Shear Reinforcements

Young-Hun Oh^{1)*} and Jeong-Hae Kim¹⁾

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Konyang University, Nonsan 320-711, Korea

ABSTRACT Results of seventy-seven specimens tested by this study and previous research were collected and evaluated to propose the flexural strength and shear strength for flexural members with steel fiber concrete. For strength evaluation, structural parameters such as compressive strength, steel fiber content, tensile reinforcement ratio, and shear span to effective depth ratio are involved. The proposed equations for flexural and shear strength are regarded to give a good prediction for the strength of steel fiber reinforced composite and/or RC beams to compare with equations by previous researchers. Especially, the proposed shear strength equation in this study shows the lowest the mean value, the coefficient of variation and the error ratio among predictions by several equations. Therefore, equations for shear strength and flexure strength, which are proposed in this study are to be useful measure to predict the actual behavior and failure mode of steel fiber reinforced composite beams.

Keywords : steel fiber concrete, composite beam, flexure strength, shear strength, strength estimation

1. 서 론

철근콘크리트의 구조 성능을 향상시키기 위한 연구가 지난 수십 년 동안 많은 연구진에 의하여 진행되어 왔으며, 이러한 연구의 일환으로 강섬유보강 콘크리트의 거동 특성과 적용성을 파악하기 위한 많은 연구들이 수행되어 왔다. 국외에서는 Ashour 등¹⁾, Mansur 등²⁾, Narayanan 등³⁾, Sharma⁴⁾, Swamy 등⁵⁾이 강섬유보강 철근콘크리트 부재의 거동 특성을 연구하였으며, 강섬유의 혼입으로 철근콘크리트 부재의 연성과 전단강도를 향상시킬 수 있다고 보고하였다. 한편 국내에서도 강섬유를 사용한 철근콘크리트 부재의 거동을 평가하기 위한 다수의 연구⁶⁻⁹⁾가 수행되었으며, 국외의 연구 결과와 유사한 결론을 제시한 바 있다. 그러나 강섬유를 사용한 합성구조 부재에 대한 연구는 국내에서 극히 제한적인 상황이다. Khuntia¹⁰⁾는 후크형 강섬유를 혼입한 콘크리트와 앵글을 사용하는 합성보의 구축방안을 모색하기 위한 연구를 수행하였으며 만족할만한 성과를 제시하였다. 그러나 Khuntia의 연구는 실험체의 개수와 변수가 제한적이어서 강섬유보강 합성보의 거동 특성을 체계적으로 평가하는데 어려움이 있었다.

이에 본 연구에서는 강섬유보강 철근콘크리트 및 합성구조로 구성된 휨부재에 적용 가능한 휨 및 전단강도 산정식을 개발하고자 한다. 강섬유보강 휨부재의 휨 및 전단강도는 기존 설계기준식¹¹⁾과 선행 연구자에 의해 제시된 전단강도 산정식^{1-5,10)}의 적용성을 기존 실험 결과와 비교·평가하였으며, 특히 대표적인 구조 변수의 효과를 고려하면서 안전측의 범주에서 강섬유보강 휨부재의 전단강도를 평가할 수 있는 전단강도 산정식을 제시하고자 한다.

2. 강도 평가를 위한 실험체와 구조변수

강섬유보강 휨부재의 휨강도와 전단강도를 평가하기 위하여 저자의 실험 연구¹²⁾와 기존 연구자의 실험 연구^{1-3,6, 10,13)}로부터 총 77개의 실험체에 대한 실험 결과를 수집하였다. 77개의 실험체는 모두 전단철근을 배근하지 않은 단순보 실험체이다. 강섬유를 혼입하지 않은 보통의 철근콘크리트보 8개, 강섬유보강 철근콘크리트보 60개, 강섬유보강 합성보 9개로 구성되어 있으며, 강섬유보강 합성보의 실험 결과^{10,12)}가 극히 제한적이므로 강섬유로 보강된 철근콘크리트보 실험체를 포함시켜 분석한 것이다. 이러한 77개의 실험체는 최종 파괴모드가 휨 및 휨전단 파괴인 실험체가 36개이며, 전단파괴한 실험체는 41개로 구성되어 있다.

*Corresponding author E-mail: youngoh@konyang.ac.kr
Received January 28, 2007, Accepted March 24, 2008
©2008 by Korea Concrete Institute

전체 77개 실험체에 대한 주요 구조 변수는 Fig. 1과 Table 1에 나타난 바와 같이 평균 압축강도는 51 MPa, 평균 인장철근비는 2.3%, 강섬유혼입률 (V_f)은 2% 이하, 강섬유형상비 (l_f/d_f)는 60에서부터 100이고, 전단경간비 (a/d)는 0.7부터 5.24의 범위에서 분포하고 있다.

3. 휨강도의 평가

강섬유보강 합성보의 휨강도 특성은 36개의 휨과괴 실험체를 대상으로 강섬유 콘크리트의 인장강도 특성을 고려하여 검토하였다. 즉 인장축 강섬유 콘크리트의 인장력을 고려한 등가응력블록¹¹⁾을 이용하여 휨강도를 산정하였다. 한편 간편하게 휨강도를 산정할 수 있도록 휨강도 약산식을 도출하였으며, 이를 등가응력블록으로 계산한 휨강도와 비교, 평가하였다.

3.1 강섬유 콘크리트의 인장강도 영향

일반적으로 철근콘크리트 보의 휨강도 산정에서는 콘크리트의 인장강도가 크지 않기 때문에 무시하였다. 그러나 강섬유보강 콘크리트는 강섬유의 혼입으로 인해 인장균열이 발생한 이후에도 강섬유에 의한 인장력 저항기구가 작용하게 되므로 강섬유보강 콘크리트의 인장강도를 고려하여 휨강도를 산정할 필요가 있다. 이때 강섬유보강 콘크리트의 인장강도는 Khuntia¹⁰⁾에 의해 제시된 인장균열 발생 이후의 인장강도 (σ_{pc})를 다음과 같이 적용하였다.

$$\sigma_{pc} = 0.28F\sqrt{f_{ck}} \quad (MPa) \quad (1)$$

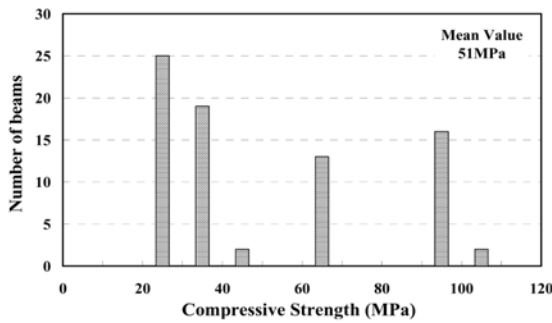
여기서 F 는 강섬유계수 (steel fiber factor)이며, $V_f l_f / d_f$ 로 계산된다. 이때 V_f , l_f , d_f 는 각각 강섬유의 혼입률 (%), 길이, 직경을 나타낸다.

Fig. 2는 최종파괴가 휨과괴인 36개의 실험체를 대상으로 콘크리트의 인장강도를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 휨강도 계산값을 실험값과 비교하여 나타낸 것이다. 콘크리트의 인장강도를 고려하지 않은 경우 실험값과 계산값의 비율은 평균 1.23, 변동계수 24.9%로 나타나고 있지만 강섬유보강 콘크리트의 인장강도를 고려했을 때는 평균 1.16, 변동계수 20.4%로 양호한 예측 결과를 보여주고 있다. 따라서 강섬유로 보강한 콘크리트 보의 휨강도는 콘크리트 인장강도를 고려하여 산정하는 것이 보다 정확한 예측이 가능할 것으로 판단된다.

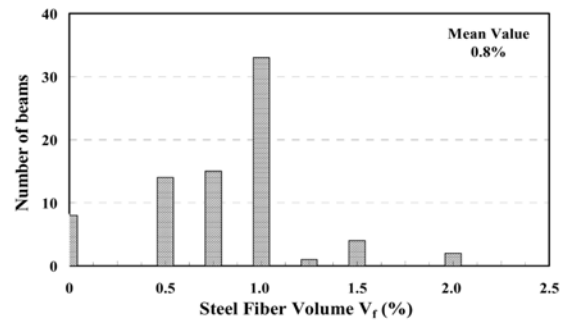
3.2 공칭휨강도 산정식의 평가

강섬유로 보강된 합성보 또는 RC보의 공칭휨강도 (M_n)는 Fig. 3과 같이 등가응력블록을 이용하여 산정할 수 있다. 강섬유보강 합성보의 공칭휨강도는 보 단면의 중립축에 대하여 강섬유보강 콘크리트에 의한 압축력과 인장보강근의 인장력, 강섬유로 인한 인장력에 의한 모멘트의 합으로 휨강도를 산정할 수 있으며 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다. 강섬유의 혼입으로 인해 향상된 콘크리트의 인장강도는 Fig. 4와 같이 인장균열발생시 인장강도의 50% ($= 0.5\sigma_{pc}$)를 고려하였다.

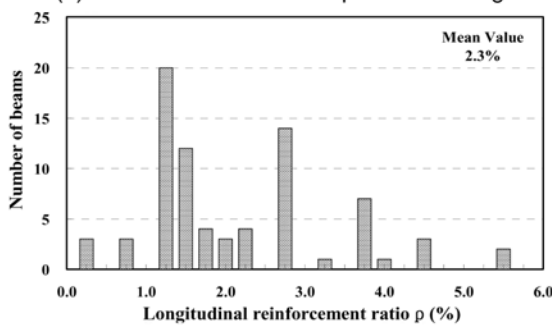
$$M_n = \alpha_1 f_{ck} \beta_1 c b \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + A_s f_y \left(d - \frac{h}{2} \right) + 0.5 \sigma_{pc} (h - c) b \frac{c}{2} \quad (2)$$



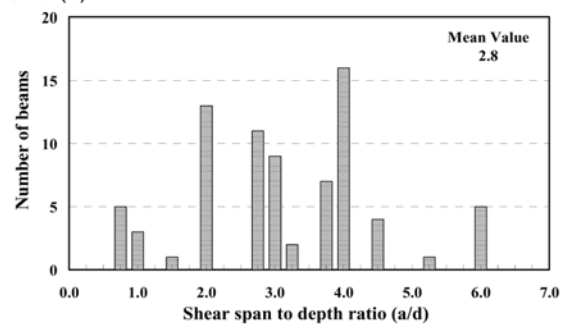
(a) Distribution of the compressive strength



(b) Distribution of the steel fiber volume ratio



(c) Distribution of the longitudinal reinforcement ratio



(d) Distribution of the shear span to depth ratio

Fig. 1 Structural parameters for seventy-seven specimens to evaluate the strength characteristics

Table 1 Inventory and details of seventy-seven beam specimens

Investigator	Specimen	Member	V_f (%)	l_f/d_f	$F = V_f l_f/d_f$	ρ (%)	d (mm)	f_{ck} (MPa)	a/d	Failure mode
Author ¹²⁾	RCB-0-4.0	RC	0	-	-	1.85	260	27.0	4.0	Shear
	RCB-1-4.0	RC	1.0	62	0.6	1.85	260	30.7	4.0	Flexure
	SCB-1-S2-4.0	Composite	1.0	62	0.6	1.92	244	37.4	4.0	Flexure
	SCB-1-S3-4.0	Composite	1.0	62	0.6	2.99	252	25.5	4.0	Flexure
	SCB-2-S3-4.0	Composite	2.0	62	1.2	3.11	242	32.7	4.0	Flexure
	SCB-1-S4-4.0	Composite	1.0	62	0.6	4.05	241	37.4	4.0	Flexure-shear
	SCB-1-S5-4.0	Composite	1.0	62	0.6	5.33	238	40.1	4.0	Flexure-shear
Khuntia ¹⁰⁾	A	Composite	1.0	60	0.6	2.90	154	37.0	3.64	Flexure
	B	Composite	1.0	60	0.6	5.40	150	37.0	3.73	Shear
	E	Composite	1.0	60	0.6	1.82	211	31.0	5.24	Flexure
	F	Composite	1.0	60	0.6	3.81	153	31.0	3.65	Shear
Mansur et al. ²⁾	B1	RC	0.5	60	0.3	1.34	197	29.1	2.0	Shear
	B2	RC	0.5	60	0.3	1.34	197	29.1	2.8	Shear
	B3	RC	0.5	60	0.3	1.34	197	29.1	3.6	Shear
	C6	RC	0.75	60	0.45	2.00	197	29.9	2.8	Shear
	E3	RC	0.75	60	0.45	2.00	197	20.6	2.8	Shear
	F3	RC	0.75	60	0.45	2.00	197	33.4	2.8	Shear
	A1	RC	0	-	-	1.34	197	24.2	2.0	Shear
	A2	RC	0	-	-	1.34	197	24.2	2.8	Shear
	A3	RC	0	-	-	1.34	197	24.2	3.6	Shear
	A4	RC	0	-	-	1.34	197	24.2	4.4	Shear
	B4	RC	0.5	60	0.3	1.34	197	29.1	4.4	Flexure
	C1	RC	0.75	60	0.45	1.34	197	29.9	2.0	Shear
	C2	RC	0.75	60	0.45	1.34	197	29.9	2.8	Shear
	C3	RC	0.75	60	0.45	1.34	197	29.9	3.6	Flexure
	C4	RC	0.75	60	0.45	1.34	197	29.9	4.4	Flexure
	C5	RC	0.75	60	0.45	0.79	200	29.9	2.8	Flexure
	D1	RC	1.0	60	0.6	1.34	197	30.0	2.0	Flexure
	D2	RC	1.0	60	0.6	1.34	197	30.0	2.8	Flexure
	D3	RC	1.0	60	0.6	1.34	197	30.0	3.6	Flexure
	D4	RC	1.0	60	0.6	1.34	197	30.0	4.4	Flexure
E1	RC	0.75	60	0.45	0.79	200	20.6	2.8	Flexure	
E2	RC	0.75	60	0.45	1.34	197	20.6	2.8	Shear	
F1	RC	0.75	60	0.45	0.79	200	33.4	2.8	Flexure	
F2	RC	0.75	60	0.45	1.34	197	33.4	2.8	Flexure	
Ashour et al. ¹⁾	B-2-1.0-L	RC	1.0	75	0.75	0.37	215	92.0	2.0	Flexure
	B-4-1.0-L	RC	1.0	75	0.75	0.37	215	93.0	4.0	Flexure
	B-6-1.0-L	RC	1.0	75	0.75	0.37	215	94.0	6.0	Flexure
	B-1-0.5-A	RC	0.5	75	0.38	2.84	215	99.0	1.0	Shear
	B-2-0.5-A	RC	0.5	75	0.38	2.84	215	99.0	2.0	Shear
	B-4-0.5-A	RC	0.5	75	0.38	2.84	215	95.0	4.0	Shear
	B-6-0.5-A	RC	0.5	75	0.38	2.84	215	96.0	6.0	Flexure
	B-1-1.0-A	RC	1.0	75	0.75	2.84	215	95.0	1.0	Shear
	B-2-1.0-A	RC	1.0	75	0.75	2.84	215	95.0	2.0	Flexure
	B-4-1.0-A	RC	1.0	75	0.75	2.84	215	98.0	4.0	Flexure
	B-6-1.0-A	RC	1.0	75	0.75	2.84	215	101.0	6.0	Flexure
	B-1-1.5-A	RC	1.5	75	1.13	2.84	215	96.0	1.0	Shear
	B-2-1.5-A	RC	1.5	75	1.13	2.84	215	96.0	2.0	Flexure
	B-4-1.5-A	RC	1.5	75	1.13	2.84	215	97.0	4.0	Shear
	B-6-1.5-A	RC	1.5	75	1.13	2.84	215	101.0	6.0	Flexure
	B-2-1.0-M	RC	1.0	75	0.75	4.58	215	94.0	2.0	Shear
	B-4-1.0-M	RC	1.0	75	0.75	4.58	215	94.0	4.0	Shear
B-6-1.0-M	RC	1.0	75	0.75	4.58	215	95.0	6.0	Flexure-shear	

Table 1 Inventory and details of seventy-seven beam specimens (continued)

Investigator	Specimen	Member	V_f (%)	l_f/d_f	$F = V_f l_f/d_f$	ρ (%)	d (mm)	f_{ck} (MPa)	a/d	Failure mode
Li et al. ¹³⁾	1	RC	1.0	60	0.6	2.2	102	22.7	3.0	Shear
	2	RC	1.0	60	0.6	1.1	102	22.7	3.0	Shear
	3	RC	1.0	60	0.6	1.1	102	22.7	1.5	Shear
	4	RC	1.0	100	1.0	2.2	102	26.0	3.0	Shear
	5	RC	1.0	60	0.6	2.2	204	22.7	3.0	Shear
	6	RC	1.0	100	1.0	2.2	204	26.0	3.0	Shear
Kwak et al. ⁶⁾	FHB1-2	RC	0	-	-	1.5	212	62.5	2.0	Shear
	FHB2-2	RC	0.5	62.5	0.3	1.5	212	63.7	2.0	Flexure-shear
	FHB3-2	RC	0.75	62.5	0.5	1.5	212	68.5	2.0	Flexure-shear
	FHB1-3	RC	0	-	-	1.5	212	62.5	3.0	Shear
	FHB2-3	RC	0.5	62.5	0.3	1.5	212	63.7	3.0	Flexure
	FHB3-3	RC	0.75	62.5	0.5	1.5	212	68.5	3.0	Flexure
	FHB1-4	RC	0	-	-	1.5	212	62.5	4.0	Shear
	FHB2-4	RC	0.5	62.5	0.3	1.5	212	63.7	4.0	Flexure
	FHB3-4	RC	0.75	62.5	0.5	1.5	212	68.5	4.0	Flexure
	FNB2-2	RC	0.5	62.5	0.3	1.5	212	30.8	2.0	Shear
	FNB2-3	RC	0.5	62.5	0.3	1.5	212	30.8	3.0	Shear
	FNB2-4	RC	0.5	62.5	0.3	1.5	212	30.8	4.0	Flexure
Narayanan et al. ³⁾	D3	RC	0.5	100	50	3.6	350	60	0.7	Shear
	D10	RC	1.0	100	100	3.6	350	60	0.92	Shear
	D5	RC	1.0	100	100	3.6	350	67	0.7	Shear
	D11	RC	1.0	100	100	3.6	350	38	0.7	Shear
	D12	RC	1.0	100	100	3.6	350	42	0.7	Shear
	D6	RC	1.25	100	125	3.6	350	68	0.7	Shear

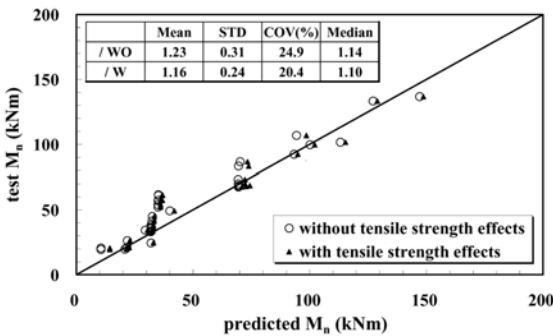


Fig. 2 Effect of steel fiber concrete's tensile strength on the flexural strength

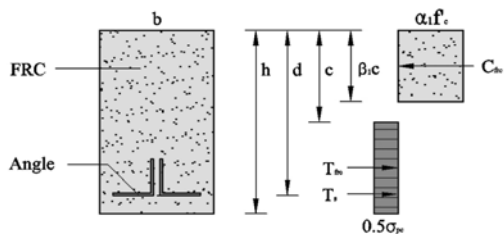


Fig. 3 Equivalent stress block for nominal flexural strength

ACI 설계기준에서 제시한 등가응력블록의 α_1 및 β_1 값은 강섬유를 혼입하지 않은 일반 콘크리트를 대상으로 한 계수이며, 콘크리트에 대한 강섬유의 혼입 효과는 연성 증가는 물론 압축강도와 인장강도를 향상시키게 되므

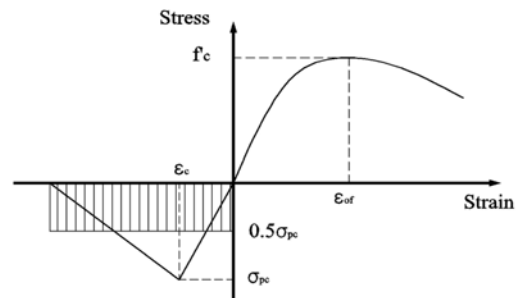


Fig. 4 Stress-strain relationship for SFRC

로 이러한 특성을 파악하기 위하여 다양한 α_1 , β_1 의 조합에 대하여 휨강도를 산정하였다. 그 결과 실험체의 휨강도를 가장 유사하게 예측하는 α_1 과 β_1 의 계수값은 모두 0.8을 사용한 경우로 나타났다.

휨강도의 평가는 36개의 휨과파 실험 데이터를 대상으로 ACI 설계기준에 의한 휨강도 산정, α_1 및 β_1 의 계수값을 0.8로 사용한 휨강도 산정과 더불어 단면 해석에 의한 해석 결과를 실험값과 비교하였으며, 그 결과는 Table 2와 Fig. 5에 나타내었다. 단면 해석에서는 실험체 각각의 재료적 특성을 반영할 수 있는 응력-변형률 특성을 고려하여 해석을 수행하였다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 ACI 기준식에 의한 휨강도의 평가는 36개의 실험체에 대하여 평균 오차 16%, 변동계수 20.4%를 나타내고 있으며, 단면해석으로 구한 휨강도는 평균오차 18%, 변동계수 23%로 나타나는 등 3가지의 다른 방법에 의한

Table 2 Comparison between different methods for flexural strength estimation

Investigator	Specimen	M_{test} (kNm)	Exact equation of flexural strength				Approximate equation		Sectional analysis results	
			ACI method		$\alpha_1 = 0.8, \beta_1 = 0.8$		$M_{cal.}$ (kNm)	<i>test / cal.</i>	$M_{cal.}$ (kNm)	<i>test / cal.</i>
			$M_{cal.}$ (kNm)	<i>test / cal.</i>	$M_{cal.}$ (kNm)	<i>test / cal.</i>				
Author ¹²⁾	RCB-1-4.0	99.7	129.0	1.03	100.7	0.99	126.8	0.79	95.8	1.04
	SCB-1-S2-4.0	86.6	73.3	1.18	72.7	1.19	82.2	1.05	70.7	1.22
	SCB-1-S3-4.0	92.4	94.8	0.97	93.1	0.99	125.1	0.74	94.0	0.98
	SCB-2-S3-4.0	106.8	98.6	1.08	97.1	1.10	137.3	0.78	97.2	1.10
	SCB-1-S4-4.0	133.3	129.0	1.03	126.6	1.05	171.3	0.78	129.2	1.03
	SCB-1-S5-4.0	136.8	148.7	0.92	145.4	0.94	207.6	0.66	161.1	0.85
Khuntia ¹⁰⁾	A	34.3	73.3	1.18	30.1	1.14	36.6	0.94	30.0	1.14
	E	49.2	94.8	0.97	41.6	1.18	47.1	1.04	42.8	1.15
Mansur et al. ²⁾	B4	33.0	148.7	0.92	32.0	1.03	35.5	0.93	32.3	1.02
	C3	33.7	30.4	1.13	32.4	1.04	36.9	0.91	32.4	1.04
	C4	35.6	41.9	1.17	32.4	1.10	36.9	0.96	32.4	1.10
	C5	21.0	105.7	1.26	22.5	0.93	23.7	0.88	21.2	0.99
	D1	36.7	102.1	0.98	32.7	1.12	38.3	0.96	32.4	1.13
	D2	35.9	32.4	1.02	32.4	1.11	38.3	0.94	32.4	1.11
	D3	24.5	32.8	1.03	32.7	0.75	38.3	0.64	32.4	0.76
	D4	38.2	32.8	1.09	32.7	1.17	38.3	1.00	32.4	1.18
	E1	19.7	22.6	0.93	21.3	0.92	23.7	0.83	20.5	0.96
	F1	26.2	33.0	1.11	22.8	1.15	23.7	1.10	21.6	1.22
Ashour et al. ¹⁾	F2	41.4	32.8	1.09	33.0	1.25	36.9	1.12	32.8	1.26
	B-2-1.0-L	19.4	33.0	0.74	14.3	1.36	11.6	1.67	12.7	1.53
	B-4-1.0-L	20.6	33.0	1.16	14.3	1.44	11.6	1.77	12.7	1.62
	B-6-1.0-L	19.4	21.5	0.91	14.3	1.36	11.6	1.67	12.7	1.53
	B-6-0.5-A	67.6	22.9	1.15	70.5	0.96	75.0	0.90	68.8	0.98
	B-2-1.0-A	70.0	33.3	1.24	71.9	0.97	82.1	0.85	68.3	1.03
	B-4-1.0-A	73.3	14.3	1.36	71.8	1.02	82.1	0.89	68.7	1.07
	B-6-1.0-A	68.0	14.3	1.44	72.4	0.94	82.1	0.83	69.0	0.98
	B-2-1.5-A	83.3	14.3	1.35	73.4	1.13	89.2	0.93	68.7	1.21
	B-6-1.5-A	68.6	70.9	0.95	73.9	0.93	89.2	0.77	69.3	0.99
Kwak et al. ⁶⁾	B-6-1.0-M	101.6	72.3	0.97	114.1	0.89	143.2	0.71	106.6	0.95
	FHB2-2	57.1	72.2	1.01	35.9	1.59	36.4	1.57	37.2	1.53
	FHB3-2	61.1	72.8	0.93	36.7	1.67	37.9	1.61	38.2	1.60
	FHB2-3	52.1	73.9	1.13	35.9	1.45	36.4	1.43	37.2	1.40
	FHB3-3	57.3	74.3	0.92	36.7	1.56	37.9	1.51	38.2	1.50
	FHB2-4	53.9	115.3	0.88	35.9	1.50	36.4	1.48	37.2	1.45
	FHB3-4	61.6	36.1	1.58	36.7	1.68	37.9	1.63	38.2	1.61
	FNB-2-4	44.9	36.8	1.66	33.1	1.36	37.9	1.19	33.3	1.29

휨강도 예측은 모두 유사한 정확성을 갖는 것으로 나타났다.

3.3 휨강도 약산식

일반 철근콘크리트보의 휨강도 약산식은 철근의 인장력 또는 콘크리트의 압축력과 모멘트 팔길이의 곱으로 근사화하여 나타낼 수 있다. 강섬유보강 합성보도 역시 이와 유사한 형태로 근사화된 휨강도 산정식을 제시할 수 있을 것이다. 이때 강섬유 콘크리트의 인장강도를 고려하는 것이 합리적인 것으로 판단되며, 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_n = A_s f_y d (0.9 + 0.25F) \quad (3)$$

식 (3)에서 강섬유보강 콘크리트의 인장강도 특성을 적

절히 반영할 수 있는 변수로서 강섬유계수 ($F = V_f l_f / d_f$)를 적용하였으며, 계수 값은 여러 번의 반복계산에 의해 실험 결과의 휨강도를 양호하게 예측하는 값을 선택한 것이다. 이러한 휨강도 약산식의 타당성은 공칭휨강도 산정식과 실험 결과의 휨강도 값과 비교하여 판단할 수 있으며, 그 결과는 Fig. 5(c)에서 보여주는 바와 같이 실무적으로 활용 가능한 수준의 평균값과 편차를 갖는 것으로 사료된다.

4. 전단강도의 평가

4.1 기존 전단강도 산정식의 고찰

지난 20년간 수행된 많은 연구 결과를 바탕으로 강섬

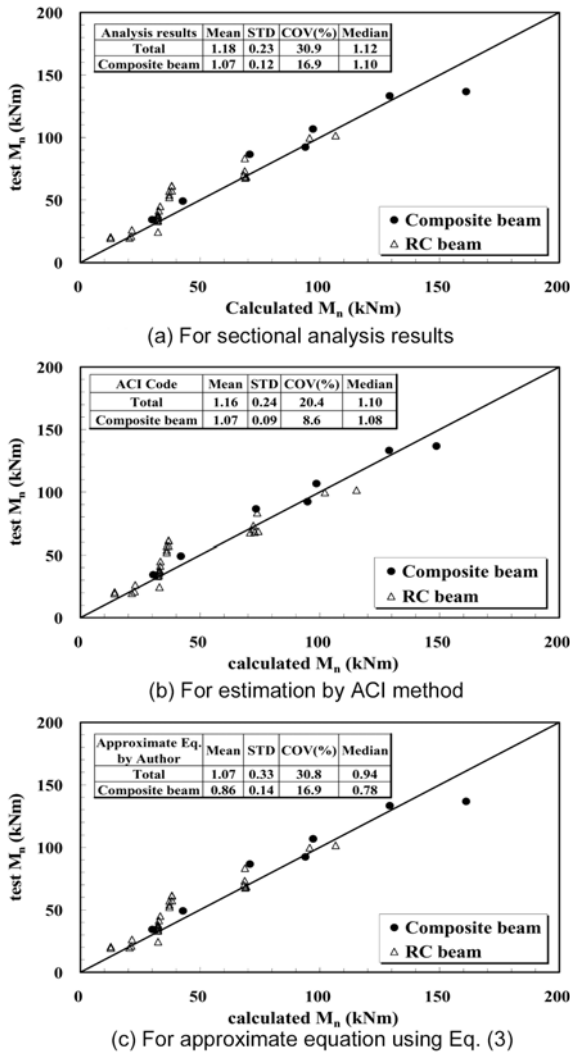


Fig. 5 Comparison of exact and approximate equation for flexural strength

Table 3 Proposed shear strength equations for steel fiber reinforced concrete beams by different investigators

Investigator	Predictive equation for ultimate shear strength (MPa)	Purpose and/or application
Khuntia. ¹⁰⁾	$v_{frc} = (0.29\alpha + 0.25F)\sqrt{f_{ck}}$ $\alpha: a/d \geq 2.5; \alpha = 1, a/d < 2.5; \alpha = 2.5d/a \leq 3.0$	Fiber reinforced composites
Ashour et al. ¹⁾	$v_{frc} = (0.7\sqrt{f_{ck}} + 7F)\frac{d}{a} + 17.2\rho\frac{d}{a}$	High-strength fiber reinforced concrete
Mansur et al. ²⁾	$v_{frc} = 0.41\left(\tau V_f \frac{l_f}{d_f}\right) + \left(0.16\sqrt{f_{ck}} + 17.2\frac{\rho V_d}{M}\right)$	Normal strength fiber reinforced concrete
Narayanan et al. ³⁾	$v_{frc} = e\left[0.24(f_{sp}) + 80\rho\frac{d}{a}\right] + 0.41\tau F$ $e = 1$ for $a/d > 2.8$; $e = 2.8d/a$ for $a/d \leq 2.8$	Normal strength fiber reinforced concrete
Sharma ⁴⁾	$v_{frc} = kf_i\left(\frac{d}{a}\right)^{0.25}$ $k = 1$ if f_t is obtained by direct tension test; $k = 2/3$ if f_t is obtained by direct tension test; $k = 4/9$ if f_t is obtained using modulus of rupture.	Normal strength fiber reinforced concrete
Swamy et al. ⁵⁾	$v_{frc} = 0.37\tau V_f \frac{l_f}{d_f} + v_c$ factor of $2d/a$ to multiply v_c for $a/d < 2$	Normal strength fiber reinforced concrete

유보강 콘크리트를 사용한 부재의 전단강도를 평가하기 위한 전단강도 산정식이 제시되었다. Mansur 등²⁾, Sharma⁴⁾, Narayanan 등³⁾, Swamy 등⁵⁾은 보통강도의 콘크리트를 대상으로 강섬유보강 철근콘크리트 보에 대한 전단강도 평가식을 제안하였으며, Ashour 등¹⁾은 고강도 영역까지 포함한 강섬유보강 철근콘크리트보의 전단강도 산정식을 제안한 바 있다. 한편 강섬유보강 합성보의 전단강도는 Khuntia¹⁰⁾에 의해 제안된 것이 처음인 것으로 조사되었다. Table 3에서는 이러한 기존 연구자들의 강섬유보강 합성보 또는 RC보의 전단강도 산정식을 정리하여 보여주고 있다.

본 연구에서는 저자와 Khuntia¹⁰⁾에 의한 강섬유보강 합성보 실험체와 여러 연구자에 의해 수행된 강섬유보강 RC보 실험체를 포함하여 총 41개의 전단파괴 실험체를 대상으로 기존의 강섬유보강 RC 또는 합성보의 전단강도 산정식을 평가하고, 필요시 보다 합리적인 강섬유보강 콘크리트 휨부재의 전단강도 산정식을 제안하고자 한다.

4.1.1 기존 제안식의 비교

전단파괴한 41개 실험체의 실험값은 Khuntia, Ashour 등, Mansur 등, Narayanan 등, Sharma, Swamy 등이 제안한 전단강도 산정식으로 구한 계산값과 비교, 평가하였다. 그 결과, Table 4와 Fig. 6에서는 실험에서 얻어진 전단강도와 기존 연구자들의 전단강도 산정식으로 계산한 값과의 비를 정리하여 보여주고 있다. 실제 실험값과 예측강도는 각각의 제안식에서 고려하고 있는 구조변수의 차이에 따라 다양한 분포를 보여주고 있다. Khuntia에 의해 제안된 전단강도 예측식은 강섬유보강 합성보를 대상으로 제안된 것으로서 변동계수는 23.2%이지만, 전체 평균은 1.67로 다소 오차가 크게 나타나고 있다. 이

Table 4 Comparison of experimental and predicted shear stress

Investigator	Specimen	v_{test} (MPa)	Calculated v_n (MPa)					
			Khuntia's Eq.	Ashour's Eq.	Mansur's Eq.	Narayanan's Eq.	Sharma's Eq.	Swamy's Eq.
Author ¹²⁾	RCB-0-4.0	1.41	0.87	0.99	0.95	0.86	1.94	0.87
Khuntia ¹⁰⁾	B	4.02	2.68	2.24	2.52	2.99	2.31	2.15
	F	2.46	2.45	2.11	2.37	2.60	2.12	2.07
Li et al. ¹³⁾	1	3.16	1.51	2.29	2.18	1.96	1.91	1.93
	2	2.43	1.51	2.22	2.12	1.67	1.91	1.93
	3	5.64	2.04	4.45	2.18	3.00	2.27	2.20
	4	3.05	2.13	3.07	3.08	2.56	2.04	2.75
	5	3.05	1.51	2.29	2.18	1.96	1.91	1.93
	6	3.55	2.13	3.07	3.08	2.56	2.04	2.75
Mansur et al. ²⁾	B1	2.54	1.53	2.79	1.65	2.03	2.39	1.47
	B2	1.78	1.31	1.99	1.61	1.41	2.20	1.47
	B3	1.52	1.31	1.55	1.59	1.32	2.06	1.47
	C6	2.20	1.53	2.33	1.98	1.82	2.23	1.77
	E3	2.03	1.27	2.10	1.83	1.71	1.85	1.61
	F3	2.91	1.62	2.41	2.03	1.87	2.35	1.82
	A1	2.03	1.03	1.84	0.94	1.39	2.18	0.82
	A2	1.52	0.82	1.31	0.90	0.84	2.00	0.82
	A3	1.30	0.82	1.02	0.89	0.76	1.88	0.82
	A4	1.14	0.82	0.84	0.87	0.70	1.79	0.82
	C1	2.88	1.76	3.21	1.97	2.27	2.42	1.77
	C2	2.03	1.53	2.29	1.94	1.63	2.23	1.77
	E2	1.52	1.27	2.06	1.78	1.52	1.85	1.61
Ashour et al. ¹⁾	B-1-0.5-A	9.09	5.09	9.42	2.94	11.08	5.24	4.03
	B-2-0.5-A	4.82	3.01	4.71	2.69	4.19	4.41	2.37
	B-4-0.5-A	2.27	2.55	2.32	2.54	2.52	3.64	2.34
	B-1-1.0-A	12.74	5.91	11.26	3.69	11.62	5.14	4.68
	B-1-1.5-A	13.95	6.86	13.27	4.49	12.28	5.17	5.41
	B-4-1.5-A	3.51	4.42	3.32	4.13	3.61	3.67	3.78
	B-2-1.0-M	6.73	3.85	5.77	3.59	5.66	4.31	3.04
	B-4-4.0-M	3.88	3.43	2.88	3.39	3.39	3.61	3.04
Narayanan et al. ³⁾	D3	9.42	4.94	12.51	3.24	21.21	4.54	4.71
	D10	9.97	5.81	12.26	4.06	14.10	4.16	4.70
	D5	11.48	6.20	16.63	4.35	22.43	4.76	5.83
	D11	8.52	4.62	14.52	4.00	20.90	3.54	4.83
	D12	9.65	4.88	14.88	4.06	21.13	3.74	5.00
	D6	11.39	6.66	18.43	4.86	22.80	4.71	6.27
Kwak et al. ⁹⁾	FHB1-2	3.01	1.65	2.90	1.45	2.13	3.50	1.32
	FHB1-3	2.53	1.32	1.93	1.41	1.32	3.17	1.32
	FHB1-4	1.98	1.32	1.45	1.39	1.22	2.95	1.32
	FNB2-2	4.03	1.59	2.89	1.71	1.66	2.46	1.52
	FNB2-3	2.55	1.36	1.93	1.67	1.46	2.22	1.52

는 Khuntia의 제안식이 인장보강비 (ρ)를 고려하지 않는 비교적 간단한 형태로 구성되었기 때문이라고 생각한다.

Ashour 등의 강섬유보강 콘크리트보의 전단강도 제안식은 합성보와 RC보를 모두 고려한 전체 평균에서는 1.08, 변동계수 23.6%로 다른 연구자의 제안식에 비해 오차가 가장 적지만, 이 제안식은 강섬유보강 콘크리트보를 대상으로 하기 때문에 합성보만을 고려한 경우 평균 1.48, 변동계수 21.4%로 오차가 다소 크게 나타나고 있다. 또한 Narayanan 등의 제안식은 전체평균, 1.25 변동

계수 35.1%로 합성보와 RC보 각각의 경우 오차가 적게 나타나고 있으나 전단경간비가 작은 보에 대해서는 지나치게 과대평가하여 예측하는 것으로 나타났다. Mansur 등의 제안식은 전단강도에 영향을 주는 콘크리트 압축강도, 강섬유계수, 인장보강근, 전단경간비의 영향을 모두 고려하였으나, 합성보뿐만 아니라 RC보를 대상으로 한 경우 평균치에서 큰 오차를 보이고 있다. Sharma의 전단강도 제안식은 콘크리트의 인장강도와 전단경간비를 이용하여 간단하게 제안되었으나 평균치와 변동계수에서

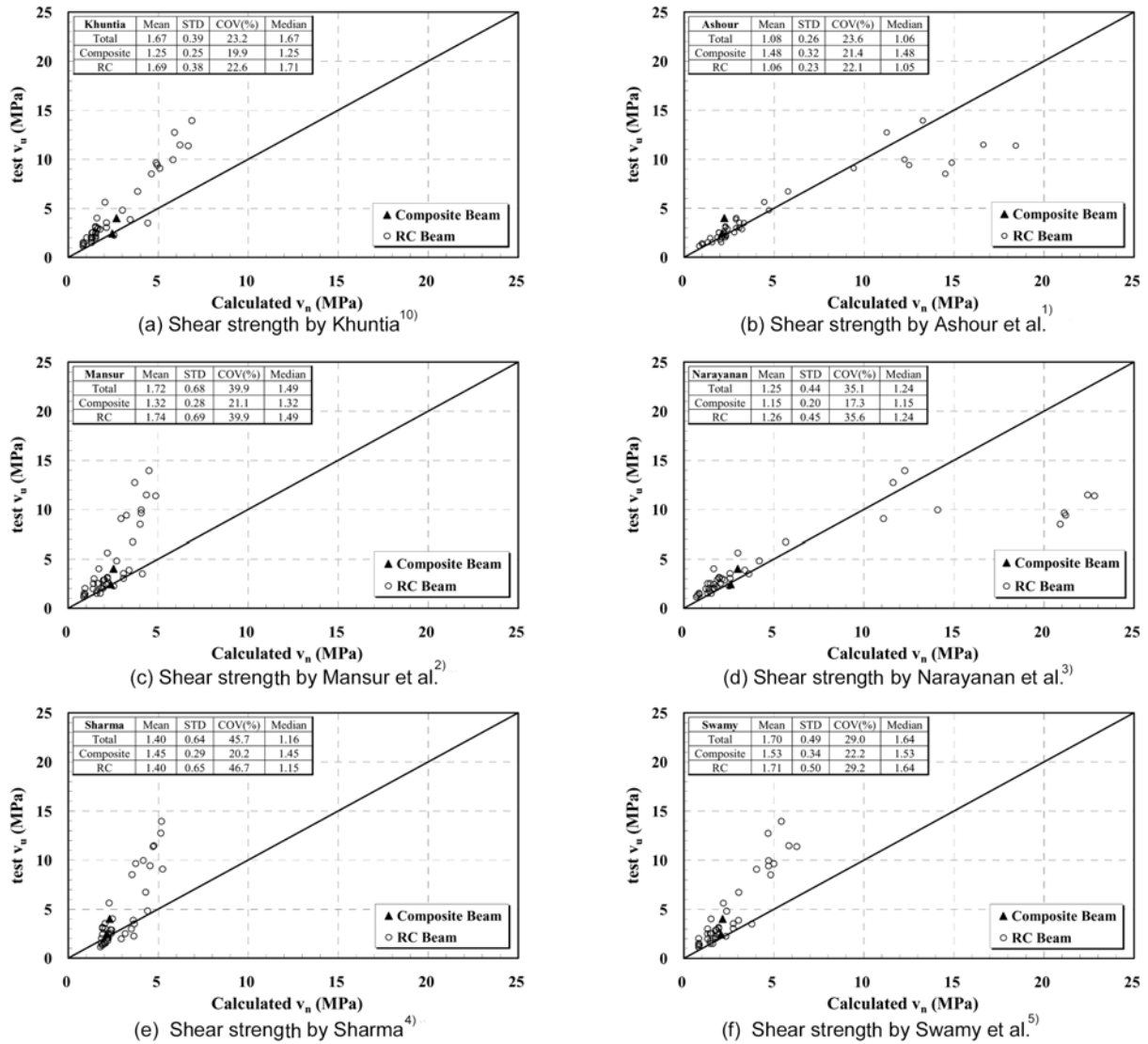


Fig. 6 Comparison of test strength and predicted shear strength by different investigators

40% 이상의 오차를 보이며 실제 강도에 비하여 과소평가하는 경향을 보여주고 있다. Swamy 등의 제안식은 기존의 철근콘크리트 보의 전단강도에 강섬유에 의한 전단강도의 기여도를 더한 형태로서 평균치에서 70%의 다소 큰 오차를 보여주고 있다.

4.1.2 오차율의 비교

기존 전단강도 제안식의 정확성을 안전성의 측면에서 평가하기 위하여 전단파괴한 41개의 실험체를 대상으로 오차율을 평가하였다. 오차(error)율의 산정은 식 (4)에 의하여 구하였고, 각각의 전단강도 예측에 대한 오차율과 평균값을 정리하여 Fig. 7에 나타내었다.

$$Error = \frac{V_{predicted} - V_{test}}{V_{test}} \times 100 (\%) \quad (4)$$

Fig. 7에 나타난 바와 같이 Khuntia, Mansur 등, Swamy 등의 제안식은 안전측에 집중하여 분포되어 있지만, 오차율이 40% 정도로 다소 크게 나타나고 있다. 반면 Narayanan 등, Sharma의 제안식도 역시 오차율 35% 내외로 다소

큰 오차를 보이면서 특히 불안정한 영역에서는 큰 오차율의 예측결과를 보여주고 있다. 또한 Ashour 등은 다른 제안식에 비해 오차율이 작지만 불안정한 영역에 데이터들이 많이 분포하는 것으로 나타났다. 따라서 기존 연구자들의 전단강도 산정식은 예측 결과의 정확성과 안전성을 동시에 확보하기는 곤란한 문제를 안고 있는 것으로 사료된다. 그러므로 이러한 문제점을 해결할 수 있는 개선된 전단강도 산정식을 개발할 필요가 있다고 판단된다.

4.2 전단강도 산정식의 제안

강섬유보강 콘크리트에 대한 전단강도의 산정식의 정확성과 안전성을 평가한 결과, 기존 연구자들이 제안한 전단강도 산정식은 실제 강도를 과소평가하여 평균값 및 변동계수에서 큰 편차를 보여주고 있으며, 특히 불안정한 영역에서도 예측값들이 분포하는 것으로 나타났다. 따라서 강섬유보강 휨부재의 전단강도를 보다 정확하게 예측하기 위하여 강섬유보강 휨부재의 전단강도에 영향을 주는 주요 구조 변수를 적절히 고려하면서 오차율을 최

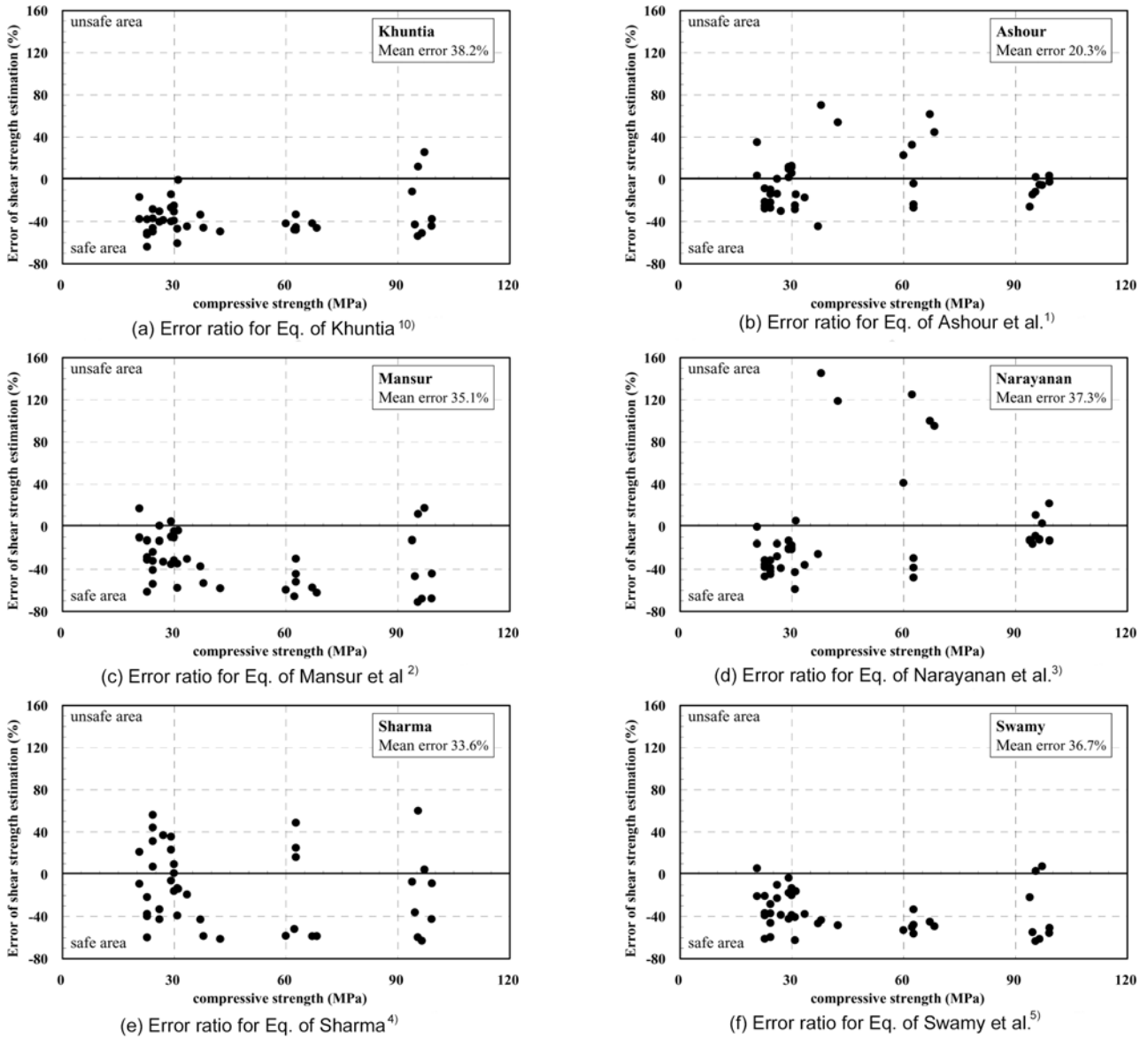


Fig. 7 Comparison of the error ratio for shear strength estimation by different investigator

소화할 수 있도록 2단계의 통계적 분석 과정을 거쳐 다음과 같은 전단강도 산정식을 도출하였다.

$$v_{frc} = (0.2e + 0.25F)\sqrt{f_{ck}} + 75\rho\frac{d}{a} \quad (\text{MPa}) \quad (5)$$

여기서 $e = 1$ for $a/d > 2.5$
 $= 2.5 d/a \leq 3.0$ for $a/d \leq 2.5$

$$F(\text{강섬유계수}) = V_f l_f / d_f$$

$\rho =$ 인장보강근비, $d =$ 보의 깊이, $a =$ 전단경간

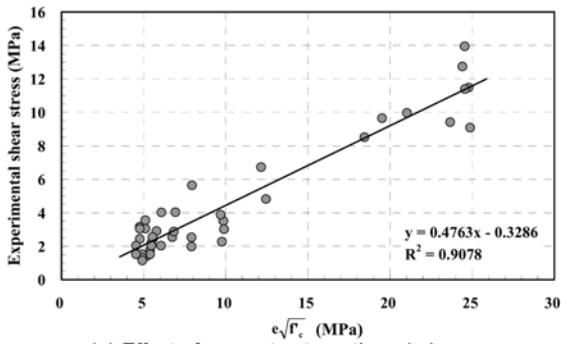
전단강도 산정식을 제안하기 위하여 1단계 통계적 분석과정에서는 41개의 전단파괴 실험체의 데이터를 대상으로 콘크리트의 압축강도 (f_{ck}), 강섬유의 혼입률 (V_f), 형상비 (l_f/d_f), 전단경간비 (a/d), 인장보강근비 (ρ)에 따른 전단강도의 영향을 분석하였다. 각각의 구조 변수는 상호 연계되어 전단강도에 영향을 주기 때문에 Fig. 8과 같이 실제 전단강도와 각각의 구조 변수와의 상관성을 평가하였으며, 상관관계식의 기울기를 구하였다.

다음으로 2단계의 통계적 분석 과정에서는 1단계 분석에서 얻은 상관성으로부터 보다 정확한 구조 변수의 상관관계를 구하기 위하여 Matlab을 이용한 다변수 회귀분석을 수행함으로써 식 (5)에 나타난 구조변수와 계수값을 도출하였다.

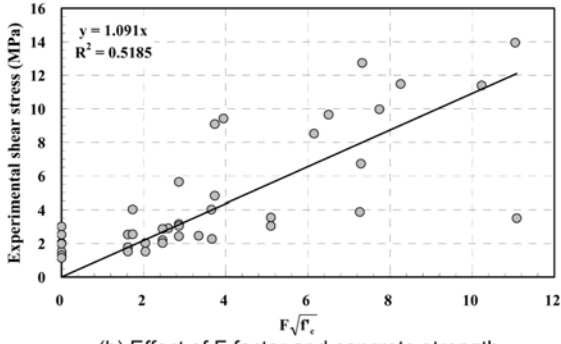
본 연구의 전단강도 제안식을 사용하여 41개 실험체의 계산 강도와 실제 강도를 비교한 결과, Table 5와 Fig. 9에 나타난 바와 같이 전체평균 1.12, 변동계수 21.7%로 다른 연구자의 제안식에 비해 가장 정확성이 높은 예측 결과를 보여주고 있다.

그리고 식 (4)를 이용하여 오차율을 검토한 결과, Fig. 10과 같이 오차율은 16%로서 다른 제안식에 비해 적은 값을 보여주고 있으며, 실험값에 예측값이 가장 근접하면서 안전측의 영역에서 분포되어 있음을 보여주고 있다.

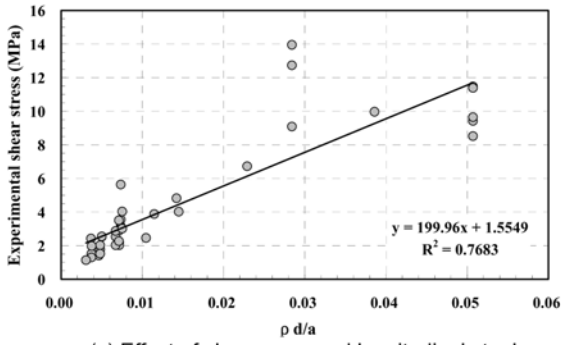
따라서 식 (5)의 전단강도 산정식은 강섬유를 사용한 휨부재의 전단강도를 정확성과 안전성의 측면에서 모두 적절한 수준으로 예측 가능하다고 판단된다.



(a) Effect of concrete strength and shear span



(b) Effect of F factor and concrete strength



(c) Effect of shear span and longitudinal steel

Fig. 8 Relationship between structural parameters and test shear strength

5. 결 론

본 연구에서는 강섬유보강 콘크리트 휨 부재의 휨 및 전단강도에 대한 설계 기준식과 선행 연구자에 의해 제시된 강도 산정식의 유효성을 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

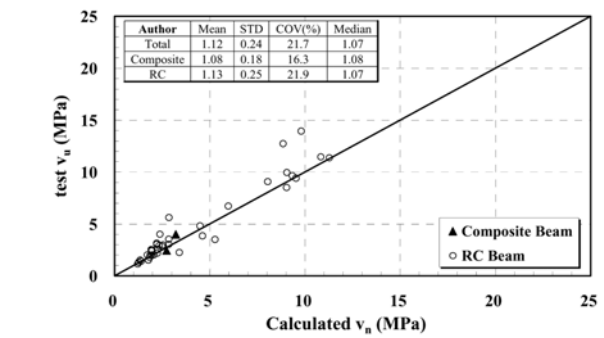


Fig. 9 Effectiveness of shear strength estimation using Eq. (5)

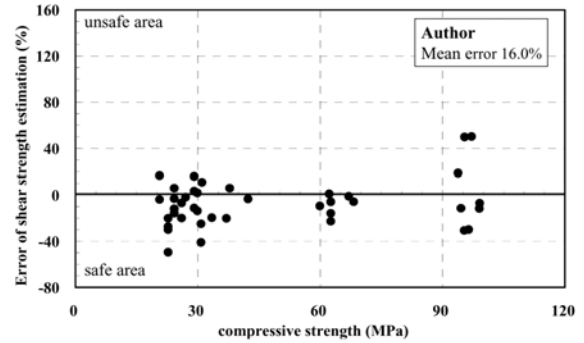


Fig. 10 Error ratio of shear strength estimation using Eq. (5)

- 1) 강섬유보강 콘크리트 휨부재에 대한 휨강도 산정식은 기존의 철근콘크리트보에서 무시하고 있는 콘크리트의 인장강도를 고려함으로써 평균 8%의 오차를 줄일 수 있으므로 콘크리트의 인장강도를 고려하는 것이 타당하다고 판단된다.
- 2) 36개의 실험체에 대하여 ACI 설계기준에 의한 방법과 단면해석으로 구한 휨강도의 평가 결과는 평균 16~18%의 오차와 20.4~23%의 변동계수를 갖는 양호한 예측 결과를 보여주고 있다. 한편 본 연구에서 제안한 휨강도 약산식은 설계기준에 의한 공칭휨강도 산정식을 대체하여 실무적으로 적용 가능한 수준의 예측 결과를 보여주었다.
- 3) 다음의 식과 같이 제안된 강섬유보강 콘크리트 휨부재의 전단강도 산정식은 평균 1.12, 변동계수

Table 5 Comparison of the accuracy of shear strength estimation using different equations

Investigator	Mean (test/cal.)			Standard deviation			COV (%)			Median		
	Total	Com.	RC	Total	Com.	RC	Total	Com.	RC	Total	Com.	RC
This study	1.12	1.08	1.13	0.24	0.18	0.25	21.7	16.3	21.9	1.07	1.08	1.07
Khuntia ¹⁰⁾	1.67	1.25	1.69	0.39	0.25	0.38	23.2	19.9	22.6	1.67	1.25	1.71
Ashour et al. ¹⁾	1.08	1.48	1.06	0.26	0.35	0.23	23.6	21.4	22.1	1.06	1.48	1.05
Mansur et al. ²⁾	1.72	1.32	1.74	0.68	0.28	0.69	39.9	21.1	39.9	1.49	1.32	1.49
Narayanan et al. ³⁾	1.25	1.15	1.26	0.44	0.20	0.45	35.1	17.3	35.6	1.24	1.15	1.24
Sharma ⁴⁾	1.40	1.45	1.40	0.64	0.29	0.65	45.7	20.2	46.7	1.16	1.45	1.15
Swamy et al. ⁵⁾	1.70	1.53	1.71	0.49	0.34	0.50	29.0	22.2	29.2	1.64	1.53	1.64

* Total : for composite and RC beams, Com. : only for composite beams, RC : only for RC beams

21.7%, 오차율 16%의 범위에서 전단강도를 예측할 수 있었으며, 기존 연구자에 의한 전단강도 산정식에 비하여 정확성과 안전성 측면에서 모두 양호한 강도예측이 가능한 것으로 판단된다.

$$v_{frc} = (0.2e + 0.25F)\sqrt{f'_c} + 75\rho\frac{d}{a} \text{ (MPa)}$$

감사의 글

본 논문은 2006년도 한국학술진흥재단의 지역대학우수과학자지원사업의 연구비 지원 (KRF-2004-202-D00697)에 의한 것이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Ashour, S. A., Hasanain, G. S., and Wafa, F. F., "Shear Behavior of High-Strength Fiber Reinforced Concrete Beams", *ACI Structural Journal*, Vol.89, No.2, 1992, pp.176~184.
2. Mansur, M. A., Ong, K. C. G., and Paramasivam, P., "Shear Strength of Fibrous Concrete Beams without Stirrups", *Journal of Structural Engr., ASCE.*, Vol.112, No.9, 1986, pp.2066~2079.
3. Narayanan, R. and Darwish, I. Y. S., "Use of Steel Fibers as Shear Reinforcement", *ACI Structural Journal*, Vol.84, No.3, 1987, pp.216~227.
4. Sharma, A. K., "Shear Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams", *ACI Journal, Proceedings*, Vol.83, No.4, 1986, pp.624~628.
5. Swamy, R. N., Jones, R., and Chiam, A. T. P., "Influence of Steel Fibers on the Shear Resistance of Lightweight Concrete I-beams", *ACI Structural Journal*, Vol.90, No.1, 1993, pp.103~114.
6. Kwak, Y. K., Eberhard, M., Kim, W. S., and Kim, J., "Shear Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams without Stirrups", *ACI Structural Journal*, Vol.99, No.4, 2002, pp.530~538.
7. 김우석, 백승민, 이정석, 권진환, 박윤근, "강섬유보강 콘크리트보의 휨내력에 관한 연구", 대한건축학회 논문집, 18권, 9호, 2002, pp.3~11.
8. 김우석, 박윤근, 김주범, "강섬유보강 콘크리트보의 휨내력 예측식의 제안", 콘크리트학회 논문집, 18권, 3호, 2006, pp.361~370.
9. 오병환, 이형준, 백신원, 임동환, "강섬유 보강 콘크리트의 강도 및 역학적 특성 연구", 한국콘크리트학회, 가을 학술발표논문집, 2권, 2호, 1990, pp.175~178.
10. Khuntia, M., *Behavior of Fiber Reinforced Concrete-encased Composite Members under Monotonic and Reversed Cyclic Loading*, Ph.D. Thesis, Univ. of Michigan, 1998, 210pp.
11. ACI, *Building Code Requirements for Reinforced Concrete*, ACI Committee 318, 2002, 113pp.
12. 오영훈, 남영길, 김정해, "전단보강근이 없는 강섬유보강 합성보의 강도 및 연성능력", 콘크리트학회 논문집, 19권, 1호, 2007, pp.103~111.
13. Li, V., Ward, R., and Hamza, A. M., "Steel and Synthetic Fibers as Shear Reinforcement", *ACI Materials Journal*, Vol.89, No.5, 1993, pp.499~508.

요 약 본 연구에서는 강섬유보강 콘크리트 휨부재에 적용할 수 있는 휨강도 산정식과 전단강도 제안식을 분석하였으며, 보다 정확성과 안전성이 향상된 전단강도 산정식이 필요한 것으로 판단되어 새로운 전단강도 제안식을 도출하였다. 휨강도 산정식은 휨과괴한 36개의 실험체를 대상으로 검토해본 결과 기존의 콘크리트보에서 무시되는 콘크리트의 인장강도를 고려하는 것이 타당한 것으로 나타났으며, 제안된 휨강도 약산식은 실험 결과와 공칭휨강도 산정식과 비교할 때 양호한 수준의 강도 예측이 가능하다고 사료된다. 또한 본 연구에서 제안한 전단강도 산정식과 기존 연구자의 전단강도 제안식을 전단과괴한 실험체의 최대강도와 비교, 검토한 결과에 의하면, 본 연구의 제안식이 정확성과 안전성을 모두 확보하면서 전단강도를 예측하는 것으로 평가되었다.

핵심용어 : 강섬유 콘크리트, 압성보, 휨강도, 전단강도, 강도 평가