

강섬유 보강 RC 기둥의 전단능력 산정

Shear Capacity Determination of Steel Fiber Reinforced RC Columns

이 현 호* 장 극 관**
Lee, Hyun Ho Chang, Kug Kwan

ABSTRACT

As composite materials, the addition of steel fiber in concrete significantly improves the engineering properties of structural members, notably shear strength and ductility. In this study, shear capacity evaluation method according to steel fiber contents was proposed from the literature surveys and member tests. For this, previously proposed five shear strength equation were examined and evaluated by maximum shear strength and shear capacity ratio. From the parametric study and regression analysis, following conclusion can be made; the maximum shear strength of steel fiber reinforced column will be estimated by relative shear capacity ratio.

1. 서 론

콘크리트 부재에 있어 강섬유 보강효과는 취성적인 콘크리트 특성을 개선하는데 있으며 이와 더불어 강도 및 변형능력 증진효과도 있다. 그러나 강섬유의 구조부재 적용에 관한 연구는 주로 보를 대상으로 하고 있으며, 구조물의 극한 안정성을 좌우하는 기둥에 대한 연구는 매우 드문 실정이다. 일반적으로 지진 등과 같은 수평하중을 받는 철근콘크리트 골조의 저층부 기둥에는 과도한 전단응력이 작용되며, 이는 기둥의 취성적인 전단파괴 및 구조물의 붕괴를 유발할 수 있다. 따라서 저층부 기둥의 취성적인 전단파괴를 방지하기 위해 배근하는 기존의 복잡한 띠철근을 대체 또는 보완할 수 있는 합성재료(composite material)의 개발 및 적용이 필요한 실정이다. 또한 강섬유 보강된 철근콘크리트 기둥의 최대전단내력 산정에 관한 연구는 강섬유 개발역사에 비하여 상당히 미약한 실정이다.

본 연구에서는 강섬유 보강된 철근콘크리트 기둥의 최대전단내력 산정방법을 제안하고자 한다. 이를 위하여 기존연구 및 본 실험에서 사용한 총 69개의 실험체를 대상으로 이론식의 최대전단내력 및 실험결과의 상대비에 의한 제특성을 파악하며, 강섬유 보강효과를 정량적으로 파악한다.

2. 전단내력식 고찰

철근콘크리트 기둥의 전단내력 산정에 있어서는 수 많은 연구가 이루어졌으며, 이를 통하여 각국의 규준이

* 정회원, 동양대학교 건축학부 전임강사

** 정회원, 서울산업대학교 건축공학과 부교수

정립 및 사용되고 있다. 최근에는 축력에 의한 전단강도 증진효과가 고려된 내력 산정식이 널리 사용되고 있다. 그러나 강섬유 보강된 철근 콘크리트 기둥의 최대전단내력 산정에 관한 연구는 정립되어 있지 않은 실정이며, 관련 설계기준 또한 제정되어 있지 않다. 본 절에서는 철근콘크리트 기둥의 전단내력 산정에 관한 각종 기준식 및 제안식을 소개하고자 한다. 여기서 모든 식들은 축력에 대한 영향을 고려한 경우이며, 기준식으로는 미국 ACI 기준식(1999), 일본 AIJ 개량 B법(AIJ MB, 1997)¹⁾, 뉴질랜드 NZS 3101 기준식(1989), 제안식으로는 Hirosawa 등(1990)의 제안식, Priestley 등(1994)의 제안식²⁾을 사용한다. 이하에서는 본 연구에 사용될 전단내력식을 소개하며, 기호의 의미는 지면관계로 생략하였으므로 참고문헌을 참고하기 바란다.

2.1 ACI 318-99

ACI 318-99 기준에서의 전단강도에 관한 설계식은 식 (1)과 같이 콘크리트 및 철근의 전단저항요소인 V_c , V_s 의 합으로 표현된다.

$$V_n = V_c + V_s, V_c = 2(1 + N_u/2000A_g)\sqrt{f'_c} b_w d, V_s = (A_v f_y d)/s \quad (1)$$

2.2 AIJ MB

AIJ 전단강도 설계식은 부재의 트러스 기구에 의한 전단저항요소와 콘크리트가 부담하는 전단력 중에서 아치기구에 의해 전달되는 전단강도만을 더하여 부재의 전단강도로 산정하며, A법, B법, 개량 B법이 있다. 여기서 A법의 경우 트러스 기구의 압축 스트러트 강도에 대한 $\cot \theta$ 를 1 ~ 2의 범위로 산정하여 트러스 기구에 의한 전단내력을 높게 평가하며, B법은 $\cot \theta$ 를 1로 고정하여 아치 기구에 의한 전단내력을 높게 평가하고 있다. 이 두가지 방법 모두 축력에 대한 고려를 하고 있지 않은 반면, 개량 B법은 축력을 고려하고 있다. 또한 개량 B법은 아치 기구와 트러스 기구에 의한 전단효과를 모두 고려한 전단 및 부착에 대한 강도산정식을 제안하고 있다. 본 연구에서는 AIJ 전단강도식중 축력이 고려된 식 (2)의 개량 B법(AIJ MB)을 이용한다.

$$V_u = b j_t p_w \sigma_{wy} + (r - \alpha \beta) b D \sigma_B \quad (2)$$

$$\textcircled{1} n \leq 0.5 - 2\phi$$

$$r = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{4(n+2\phi)(1-n-2\phi) + \left(\frac{2M}{VD}\right)^2} - \frac{2M}{VD} \right\}$$

$$\textcircled{2} n > 0.5 - 2\phi$$

$$r = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{2M}{VD}\right)^2} - \frac{2M}{VD} \right\}$$

2.3 NZS 3101

식 (3)은 뉴질랜드 기준으로 ACI 318-99에서와 마찬가지로 V_c , V_s 의 합으로 전단내력을 산정하고 있으며, 소성힌지 영역을 고려하고 있다.

$$V_n = V_c + V_s, V_c = \nu_b(1 + 3P/f'_c A_g) b_w d, V_s = (A_v f_y d)/s, \nu_b = (0.07 + 10\rho_w)\sqrt{f'_c} \quad (3)$$

2.4 Hirosawa

식 (4)의 Hirosawa식은 축력의 영향을 고려한 실험식으로, 일본에서 널리 사용되고 있는 제안식이다.

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.0679 p_t^{0.23} (180 + \sigma_B)}{M/(Qd) + 0.12} + 2.7 \sqrt{p_w \sigma_{wy}} + 0.1 \sigma_o \right\} b j \quad (4)$$

2.5 Priestley

Priestley 등은 연성도에 영향을 받는 콘크리트 요소 및 전단스팬비에 영향을 받는 축력요소, 전단보강근량에 영향을 받는 트러스 요소를 모두 고려한 기둥의 전단강도 예측식을 식 (5)와 같이 제안하였다.

$$V_n = V_c + V_s + V_p, \quad V_c = k\sqrt{f'_c} A_e, \quad V_p = P \tan \alpha, \quad V_s = (A_v f_{yh} D \cot 30^\circ) / s \quad (5)$$

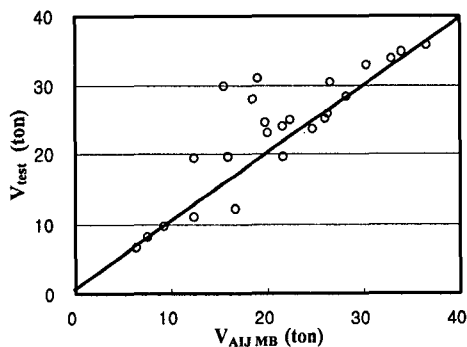
3. 전단내력식의 적용성 평가

강섬유 보강 보에 대한 기존 연구결과는 상당히 많은데 비하여, 강섬유 보강 기둥에 대한 연구결과는 상당히 제한적으로 이루어지고 있는 실정이다. 그리고 이러한 연구들은 일본에만 국한되어 있는 지역적 특성을 나타내는 경향이 있다. 본 연구에서는 Masuta 등(1997), Nagasaka 등(1990), Yashiro 등(1989), Makitani 등(1985) 및 Sakai 등(1979)의 49개 실험체에 대한 기존 연구결과 및 20개 실험체에 대한 본 연구결과를 평가대상으로 하였다.

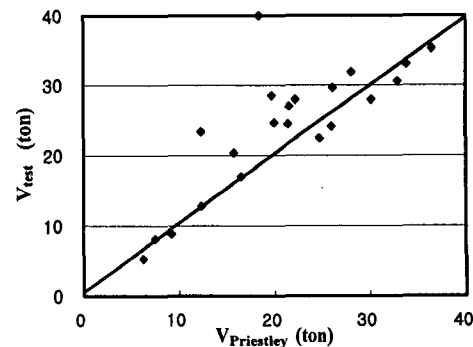
기존 전단내력식의 적용성을 평가하기 위하여 강섬유가 보강되지 않은 총 25개 비보강 실험체의 최대전단강도(V_{test})를 2절의 내력식으로 산정된 전단내력($V_{cal.}$)으로 나눈 결과의 평균값 및 표준편차를 표 1에 정리하였다. 이에 의하면 일본건축학회의 AIJ MB에 의한 결과 및 Priestley의 내력식을 적용한 상대비가 평균 0.89, 0.83 및 표준편차 0.22, 0.26으로 나타나 비보강 실험체의 전단내력을 다른 이론식에 비하여 적절히 평가하는 것으로 판단된다. 극한강도설계법에 사용되는 부재의 설계강도(ϕV_n) 및 소요강도(V_u)에 사용되는 강도저감계수(ψ) 0.85를 고려할 때, Priestley의 제안식을 적용한 결과가 AIJ MB에 의한 기준식보다 안전측이 것으로 판단된다. 또한 이러한 결과는 그림 1에 나타난 AIJ MB 및 Priestley 내력식을 적용한 결과중 일부 값이 튀는 것을 제외하고는 Priestley 제안식에 의한 전단내력값이 실험값에 근접하는 것으로도 확인할 수 있었다.

표 1 비보강 실험체의 전단내력식 적용 결과

	$V_{test} / V_{calculation}$				
	ACI 318-99	AIJ MB	NZS 3101	Hirosawa	Priestley
Mean	1.32	0.89	1.14	2.13	0.83
Standard Deviation	0.65	0.22	0.40	0.60	0.26

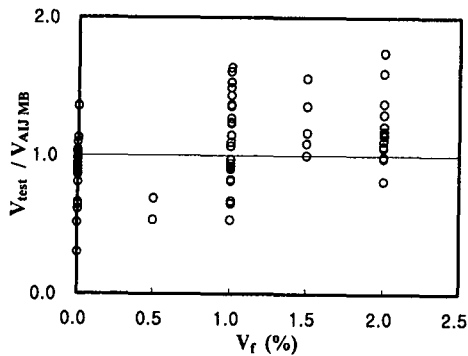


(a) AIJ MB

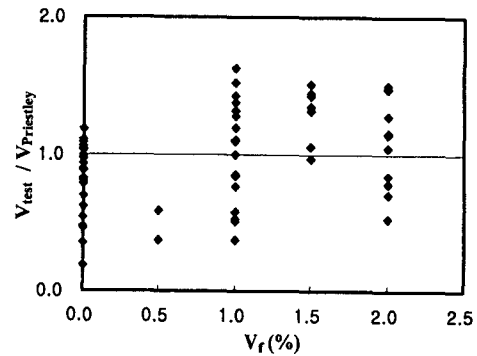


(b) Priestley

그림 1 비보강 실험체의 전단내력식 적용



(a) AIJ MB



(b) Priestley

그림 2 강섬유 보강량에 따른 전단내력식 적용

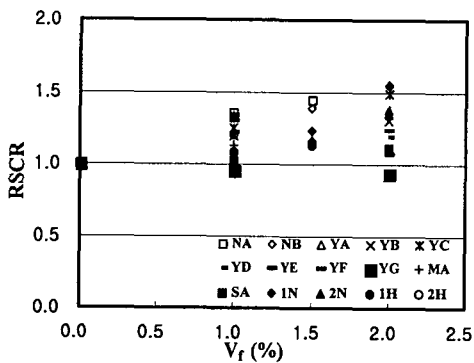


그림 3 상대 전단능력비

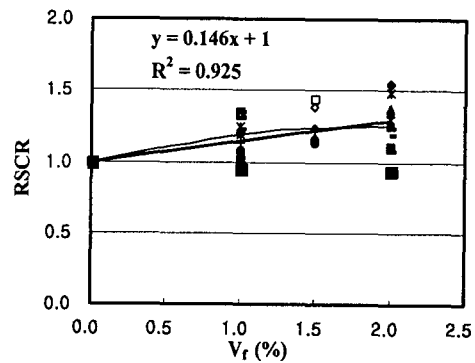


그림 4 상대전단능력비 회귀분석

이상의 비보강 실험체에 대한 기존 전단내력식의 적용결과 적합한 것으로 판명된 AIJ MB 규준식 및 Priestley의 제안식을 강섬유 보강량(V_f) 0.0%, 1.0%, 1.5% 및 2.0%에 대하여 적용한 결과를 V_{test}/V_{cal} 의 상대비로 정리하여 그림 2에 나타내었다. 그림 2에 의하면 강섬유 보강량 증가에 따른 V_{test}/V_{cal} 상대비도 어느 정도 선형적으로 증가하는 것으로 평가할 수 있으며, 회귀분석에 의하면 전단내력의 증진에 기여하는 정량적인 강섬유 보강효과를 산정할 수 있는 것으로 판단된다.

4. 전단능력비에 의한 강섬유 보강효과 평가

철근콘크리트 부재에 있어 전단능력의 평가는 실험체마다 다른 압축강도의 차를 일반화시키기 위하여 실험에 의한 최대전단강도(V_{max})를 압축강도 및 부재 단면적으로 나누어 무차원화 시킨 전단능력비 $V_{max}/\sqrt{f_c}bd$ (Shear Capacity Ratio, SCR)로 평가할 필요가 있다. 본 연구에서는 강섬유를 보강하지 않은 비보강 실험체의 전단능력비를 기준으로, 동일 조건 보강 실험체의 강섬유 보강효과를 평가한 상대 전단능력비(RSCR)를 사용하여 강섬유 보강에 의한 전단능력의 증진효과를 정량적으로 평가하였다. 표 2에 각 연구자별 동일 조건 그룹별로 묶은 총 50개 실험체의 상대 전단능력비를 나타내었으며, 이를 그림 3에 나타내었다. 표 2 및 그림 3에 의하면 강섬유 보강량 0.0%를 기준으로 보강량이

증가할수록 상대 전단능력비는 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 또한 강섬유 보강량 1.0%, 1.5%, 2.0%에 대한 각 실험체별 상대 전단능력비 평균은 1.19, 1.24, 1.26로, 표준편차는 0.13, 0.12, 0.19로 나타나 높은 신뢰도를 나타내는 것으로 평가되었다. 여기서 보강량 2.0%의 표준편차가 0.19로 다소 크게 나타난 것은, 기존 연구³⁾에서 평가되었듯이 보강량 2.0%에 있어 강섬유 보강효과는 적은 보강량에 비하여 미미한 것으로 평가된 것에 기인한 것으로 판단된다. 따라서 그림 4에 나타낸 바와 같이 상대전단능력비 평균에 대한 회귀분석을 수행한 결과, 신뢰도를 나타내는 R² 값이 0.925로 산정된 높은 신뢰도를 가진 정량적인 강섬유 보강효과(0.146V_t)를 도출하였다.

표 2 강섬유 보강효과 평가를 위한 상대 전단능력비(RSCR) 산정

Investigator	Group	V _t (%)	f _{ck} (kg/cm ²)	ρ _w (%)	Section Size (cm ²)	Vmax (tonf)	SCR	RSCR	
Nagasaka	NA	0.0	300	0.00	20*20	9.2	1.33	1.00	
		1.0	300	0.00	20*20	12.4	1.79	1.35	
		1.5	300	0.00	20*20	13.2	1.91	1.44	
	NB	0.0	300	0.23	20*20	12.4	1.79	1.00	
		1.0	300	0.23	20*20	16.4	2.37	1.52	
		1.5	300	0.23	20*20	17.2	2.48	1.39	
Yashiro	YA	0.0	289	0.56	25*25	15.8	1.49	1.00	
		1.0	327	0.56	25*25	22.4	1.98	1.33	
		2.0	267	0.56	25*25	20.9	2.05	1.38	
	YB	0.0	380	0.85	25*25	19.8	1.63	1.00	
		1.0	313	0.85	25*25	21.4	1.94	1.19	
		2.0	275	0.85	25*25	22.0	2.12	1.30	
	YC	0.0	314	1.28	25*25	18.5	1.67	1.00	
		1.0	311	1.28	25*25	22.9	2.08	1.25	
		2.0	333	1.28	25*25	28.3	2.48	1.49	
	YD	0.0	402	0.56	25*25	24.7	1.97	1.00	
		1.0	298	0.56	25*25	26.0	2.41	1.22	
		2.0	290	0.56	25*25	25.0	2.35	1.19	
	YE	0.0	402	0.56	25*25	26.0	2.07	1.00	
		1.0	225	0.56	25*25	25.3	2.7	1.30	
		2.0	289	0.56	25*25	27.2	2.56	1.24	
	YF	0.0	402	0.85	25*25	28.2	2.25	1.00	
		1.0	190	0.85	25*25	26.0	3.02	1.34	
		2.0	307	0.85	25*25	26.5	2.42	1.08	
	YG	0.0	324	1.28	25*25	26.5	2.36	1.00	
		1.0	261	1.28	25*25	22.7	2.25	0.95	
		2.0	274	1.28	25*25	22.9	2.21	0.94	
	Makitani	MA	0.0	366	0.20	15*15	6.3	1.46	1.00
			1.0	451	0.20	15*15	7.9	1.65	1.13
			1.5	335	0.20	15*15	6.9	1.68	1.15
Sakai	SA	0.0	253	0.28	20*20	7.5	1.18	1.00	
		1.0	278	0.28	20*20	8.0	1.2	1.02	
		2.0	270	0.28	20*20	8.6	1.31	1.11	
This Study	1N	0.0	265	0.26	30*30	21.6	1.46	1.00	
		1.0	266	0.26	30*30	22.8	1.55	1.06	
		1.5	278	0.26	30*30	27.0	1.80	1.23	
	2N	0.0	254	0.26	30*30	32.2	2.25	1.54	
		1.0	265	0.21	30*30	20.0	1.36	1.00	
		1.5	266	0.21	30*30	21.8	1.42	1.04	
This Study	1H	0.0	278	0.21	30*30	23.9	1.59	1.17	
		1.0	254	0.21	30*30	26.2	1.83	1.35	
		1.5	444	0.26	30*30	32.9	1.74	1.00	
	2H	0.0	614	0.26	30*30	41.9	1.88	1.08	
		1.0	610	0.26	30*30	44.4	2.00	1.15	
		1.5	675	0.26	30*30	45.0	1.92	1.10	
This Study	1H	0.0	444	0.21	30*30	30.3	1.60	1.00	
		1.0	614	0.21	30*30	42.7	1.92	1.20	
		1.5	610	0.21	30*30	40.3	1.81	1.13	
	2H	0.0	675	0.21	30*30	41.0	1.75	1.09	

5. 강섬유 보강기둥의 전단내력 산정식 제안

기존 전단내력식중 실험결과를 근사적으로 예측할 수 있으며, 강섬유 보강효과를 적절히 반영할 수 있는 것으로 평가된 Priestley의 제안식(1994)에 다음 식 (6)과 같이 강섬유 보강효과를 반영한 수정

전단내력식(Modified Priestley)을 본 연구결과로 제안한다. 여기서 식 (6)은 강섬유보강에 의한 증진효과, 콘크리트의 전단능력, 전단보강근에 의한 전단능력 및 축력효과를 고려한 항목으로 구성된다.

$$V_n = V_c + V_s + V_p + V_{sf}, V_c = k\sqrt{f'_c} A_e, V_p = P \tan \alpha, V_s = (A_v f_{yh} D \cot 30^\circ) / s, V_{sf} = 0.146 V_f \quad (6)$$

여기서 V_{sf} : 강섬유 보강에 의한 전단내력 증분 (ton), V_f : 강섬유 보강량 (%)

그림 5에 식 (6)의 제안 전단내력식에 의한 상대 전단능력비를 반영한 결과를 강섬유 보강량에 대하여 나타내었다. 이에 의하면 제안된 상대 전단능력비의 표준편차는 0.02로 평가되어, 동일 조건의 비보강 실험체를 기준으로 강섬유 보강 실험체의 전단능력 증진을 적절히 산정할 수 있는 것으로 판단된다.

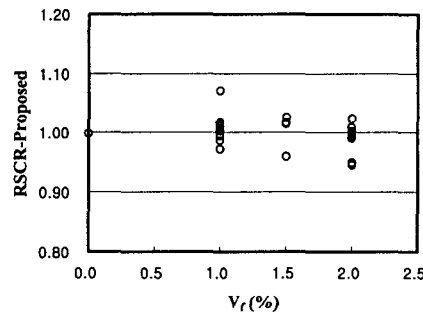


그림 5 제안 상대 전단능력비 비교

6. 결 론

본 연구에서는 강섬유 보강 기둥의 전단내력을 산정하고자 기존 전단내력식의 적용성 평가 및 강섬유 보강효과를 고려한 전단내력식을 제안하였으며, 주요한 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 비보강 실험체를 대상으로 한 기존 전단내력식의 적용성을 평가한 결과 Priestley의 제안식이 적합한 것으로 판단된다.
- 2) 상대 전단능력비를 이용하여 강섬유 보강효과를 정량적으로 도출하였으며, 이를 Priestley의 제안식에 적용·수정한 제안식을 제안하였다.
- 3) 향후 강섬유 보강 콘크리트의 합렬인장강도 및 인발응력에 대한 연구를 보완하여 강섬유의 전단보강 효과를 정량적으로 판단할 수 있는 전단내력식을 제안할 필요가 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터(STRESS)의 연구지원에 의한 것임.

참 고 문 헌

1. 日本建築學會, “鐵筋콘크리트造建物の靱性保證型耐震設計指針(案)·同解説,” 1997.
2. Priestley, M.J.N., et al., “Seismic Shear Strength of Reinforced Concrete Columns,” ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol. 120, No. 8, 1994, pp 2310-2329.
3. 이현호, 장극관, 양승호, “강섬유 보강 기둥의 보강효과 고찰,” 대한건축학회 춘계학술발표대회 논문집, 제21권, 1호, 2001, pp.7-10.