

고강도 RC 기둥의 전단능력 증진을 위한 강섬유 보강

Steel Fiber Reinforcement for Shear Capacity Enhancement of High Strength RC Columns

장극관*

이현호**

문상덕***

Chang, Kug Kwan

Lee, Hyun Ho

Moon, Sang Duck

ABSTRACT

This study was to define the strengthening effect of steel fibers in high strength RC columns. For this, ten specimens of columns were tested under cyclic lateral load and constant axial load. The testing parameters are steel fiber volume fraction of concrete and shear reinforcement ratio of hoop bars. Finally, the optimal content of steel fibers was evaluated as 1.0 ~ 1.5 % volume fraction of concrete.

1. 서론

현대 건축물은 초고층화, 대형화, 특수화되어 가는 추세에 있으며, 이에 따라 요구되는 부재단면의 경감, 스패의 확대 및 부재용력의 증가에 대응하기 위한 사용재료의 고성능화 등이 요구되고 있다. 이에 고강도콘크리트의 실용화를 위한 재료 및 구조적 특성에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 실용적으로도 널리 사용되고 있다. 그러나 고강도콘크리트는 일반강도콘크리트(f_{ck} 240 kgf/cm² 정도)와는 매우 다른 취성적 파괴거동이 문제라 할 수 있는데, 이러한 문제점은 기존 일반강도콘크리트에 대한 연구에서와 같이 강섬유를 보강함으로써 강도와 연성능력 증진 및 취성적인 거동이 크게 개선될 것으로 예상된다. 따라서 본 연구의 목적은 고강도콘크리트 기둥에 강섬유(steel fiber)를 혼입하여 일정 축력하에서 반복 수평하중 가력실험을 통한 강섬유의 전단능력 증진의 효과를 고찰하는데 있다.

2. 전단내력 산정

철근콘크리트 기둥의 전단내력 산정에 있어서는 수많은 연구가 이루어졌으며, 이를 통하여 각국의 규준이 정립 및 사용되고 있다. 그러나 강섬유 보강된 기둥의 최대전단내력 산정에 관한 연구는 정립되어 있지 않은 실정이므로 본 절에서는 철근콘크리트 기둥의 전단내력 산정에 관한 각종 규준식 및 제안식의 적용성을 평가하고자 한다.

본 연구에 적용한 규준식으로는 (1)ACI 규준식(1999), (2)일본 AIJ 개량 B법(AIJ MB,1997)¹⁾, (3)뉴질랜드 NZS 3101 규준식(1989)이며, 제안식으로는 (4)Hirosawa 등(1990)의 제안식, (5)Priestley 등(1994)²⁾의 제안식, (6)Ohno 등의 제안식을 이용하였다.

* 정희원, 서울산업대학교 건축학부 부교수, 공박

** 정희원, 동양대학교 건축·실내디자인학부 전임강사, 공박

*** 정희원, 서울산업대학교 건축공학과 대학원

$$V_n = V_c + V_s, V_c = 0.53(1 + N_u/140A_g)\sqrt{f'_c} b_w d, V_s = (A_v f_y d)/s \quad (1)$$

$$V_u = V_t + V_a = b j_t p_w \sigma_{wy} \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) b D \nu \sigma_B / 2 \quad (2)$$

$$V_u = b j_t p_w \sigma_{wy} + (r - \alpha \beta) b D \sigma_B \quad (3)$$

$$V_n = V_c + V_s, V_c = \nu_b (1 + 3P/f'_c A_g) b_w d, V_s = (A_v f_y d)/s, \nu_b = (0.07 + 10\rho_w)\sqrt{f'_c} \quad (4)$$

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.0679 p_t^{0.23} (180 + \sigma_B)}{M/(Qd) + 0.12} + 2.7\sqrt{p_w \sigma_{wy}} + 0.1\sigma_o \right\} b j \quad (5)$$

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

3. 구조성능실험

3.1 실험체 계획

본 연구에서 사용된 실험체는 수평하중을 받는 기둥의 실제적인 변형성상인 복곡률(Double Curvature)을 재현하도록 계획하였다. 실험체 일람은 표 1과 같이 총 10개의 실험체이고, 그림 1에 나타낸 것처럼 30×30cm의 정방형 기둥으로 높이는 90 cm이며, 인장철근비는(ρ)는 0.95%인 조건으로 계획하였다. 전단 보강근비(ρ_w)는 우리나라 내진기준(건설교통부, 1999)에 의한 배근량(ρ_w = 0.32)을 기준으로, 이의 1.125배(ρ_w = 0.36), 0.81배(ρ_w = 0.26), 0.66배(ρ_w = 0.21)로 계획하였다. 본 실험체에 사용된 강섬유는 길이와 지름의 비로 정의되는 형상비 63.6의 국산 양단후크형을 사용하였고, 또한 강섬유 혼입율(V_f)을 0.0%, 1.0%, 1.5%, 2.0 %로 달리하여 강섬유 혼입량에 따른 전단보강효과를 평가하였다.

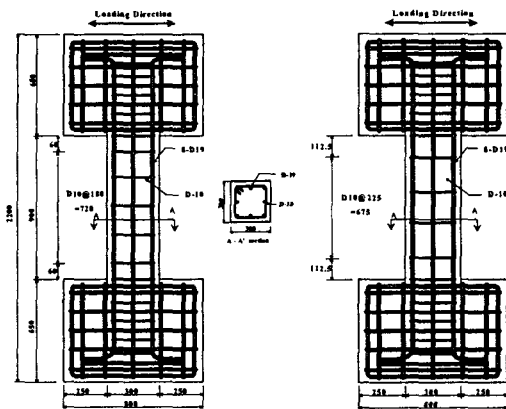


그림 1 실험체 형상

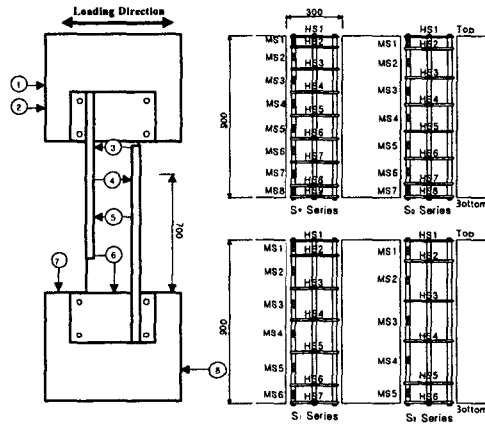


그림 2 LVDT 및 Strain Gauge 위치

3.2 가력 및 측정방법

실제 구조물의 축력에 의한 영향을 고려하기 위하여 0.1A_gf_{ck}에 해당하는 압축력을 오일잭을 이용하여 실험시작부터 종료시까지 일정하게 가력하였다. 수평하중은 100tf 용량의 Actuator로 기둥의 중앙부에 가력하였으며, 이때 실험체의 회전변형을 방지하기 위하여 기둥상부 엔드 블럭의 밑면에 강성이 큰 강봉을 설

치하였다. 가력은 부재회전각을 변위로 제어 하였으며, 가력 변위는 실험체의 미세한 뒤틀림으로 인한 실험오차를 줄이기 위해 그림 2와 같이 기둥의 상부에 두 개의 LVDT를 설치하여 그 평균값을 사용하였다. 또한 주근과 전단 보강근의 변형율을 측정하기 위하여 그림 2와 같은 위치에 Strain Gauge를 설치하였다.

표 1 실험체 일람

Series	Specimen	ρ	ρ_w	$f_{ck}(\text{kgf/cm}^2)$	V_f
S ₀ Series	S ₀ -0.0-H	0.95	0.36	444.4	0.0
	S ₀ -0.0-H		0.32		
	S ₁ -0.0-H		0.26		
	S ₂ -0.0-H		0.21		
S ₁ Series	S ₁ -0.0-H	0.95	0.26	444.4	0.0
	S ₁ -1.0-H		0.26	614.1	1.0
	S ₁ -1.5-H		0.26	609.5	1.5
	S ₁ -2.0-H		0.26	674.8	2.0
S ₂ Series	S ₂ -0.0-H	0.95	0.21	444.4	0.0
	S ₂ -1.0-H		0.21	614.1	1.0
	S ₂ -1.5-H		0.21	609.5	1.5
	S ₂ -2.0-H		0.21	674.8	2.0

표 2 고강도 콘크리트기둥 실험결과 일람

Series	Specimen	Main bar yielding		Hoop yielding		Maximum Load	
		V_{my}	δ_{my}	V_{sy}	δ_{sy}	V_{max}	δ_{max}
S ₀	S ₀ -0.0-H	-	-	35.57	11.56	36.48	13.43
	S ₀ -0.0-H	-	-	26.82	8.13	33.90	13.40
	S ₁ -0.0-H	24.13	10.73	32.87	13.34	32.92	13.40
	S ₂ -0.0-H	22.67	8.02	29.13	10.03	30.28	10.48
S ₁	S ₁ -0.0-H	24.13	10.73	32.87	13.34	32.92	13.40
	S ₁ -1.0-H	34.40	10.54	39.87	13.25	41.93	15.26
	S ₁ -1.5-H	40.12	16.68	44.23	20.26	44.38	19.99
	S ₁ -2.0-H	33.58	16.69	43.23	19.96	45.00	27.30
S ₂	S ₂ -0.0-H	22.67	8.02	29.13	10.03	30.28	10.48
	S ₂ -1.0-H	36.62	14.71	37.50	13.66	42.73	17.95
	S ₂ -1.5-H	30.83	20.42	31.38	20.96	40.30	22.69
	S ₂ -2.0-H	36.68	14.86	37.25	15.23	41.02	17.95

- did not yield.

4. 실험결과 및 평가

4.1 실험결과

반복 수평하중을 받는 고강도 콘크리트 기둥의 실험결과는 표 2와 같다. 표 2에 나타난 바와 같이 강섬유 혼입량이 없는 S₀ Series는 전단보강근량이 감소함에 따라 전단 보강근 항복에서 주근의 항복으로 바뀌었으며, 이에 대한 원인은 현재 검토중이다. S₁ Series는 강섬유 혼입률이 증가할수록 주근 항복이후 전단 보강근이 항복하는 것으로 나타나 취성적인 전단파괴에서 안정적인 휨파괴로 파괴양상이 변환된 것을 확인할수 있었다. 전단보강근량을 가장 적게 배근한 S₂ Series는 주근과 전단보강근이 거의 동시에 항복하는 것으로 평가되었다. 강섬유 혼입율에 따른 실험체의 최대 전단강도는 S₁ Series의 경우 V_f 양이 증가함에 따라 최대 전단강도가 증가하였다. S₂ Series는 V_f 1.0%까지는 전단강도가 증가하였으나, 그 이후 보강량이 증가하여도 전단강도의 증진은 없는 것으로 평가되었다.

4.2 균열 및 파괴 상황

각 실험체별 최종 파괴시의 균열도를 그림 3에 나타내었다. 일반적으로 수평하중을 받는 콘크리트 기둥의 파괴 양상은 휨파괴, 전단파괴, 부착파괴등으로 구분할 수 있으나, 각각의 독립된 형태로 파괴 양상이 구분되어지기 보다는 복합적인 파괴양상을 나타내었다. 본 실험의 전반적인 파괴 양상을 살펴보면 초기의 휨균열에서 휨전단균열로 진전된후 전단균열이 확대되면서 파괴되는 양상을 보였다. 이러한 파괴 양상은 강섬유 혼입율과 전단보강근비가 적을수록 인장철근과 콘크리트 사이의 부착력 감소에 따라 부착균열이 발생되면서, 최종적으로 휨균열 및 전단균열에 의하여 최종적으로 파괴되는 경향을 나타내었다. 따라서, 전단보강근비 및 강섬유 혼입율이 균열 및 파괴양상에 있어 많은 영향을 주는 것으로 판단된다.

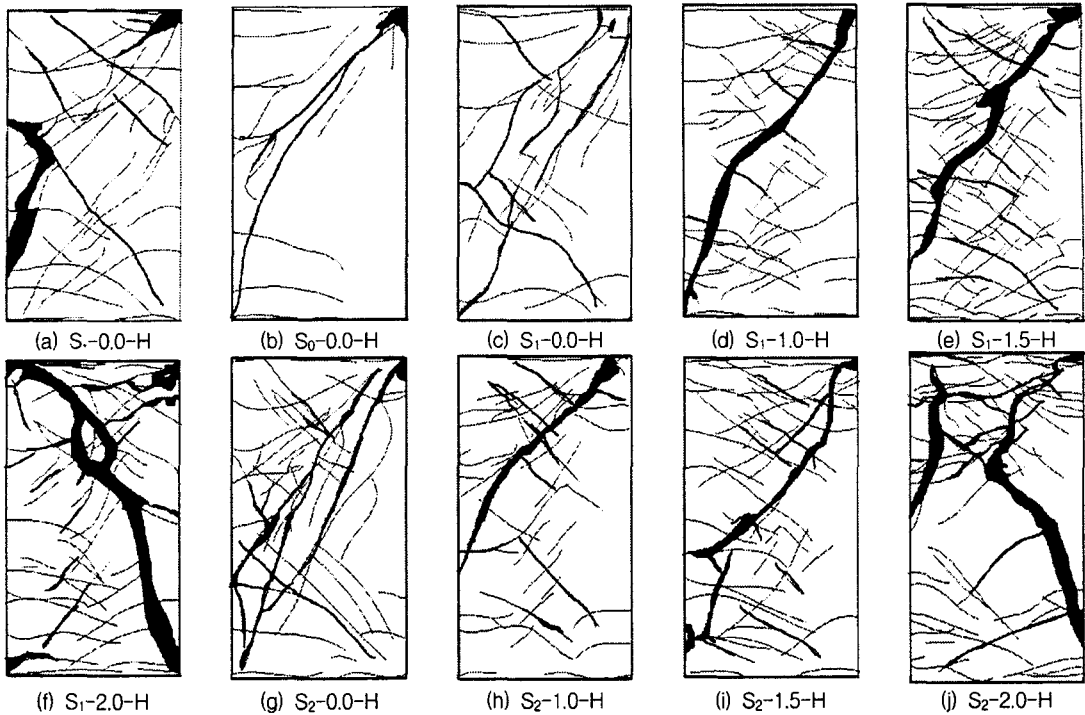


그림 3 실험체 균열도

5. 강섬유 보강 RC기둥의 전단능력 평가

표 3 실험결과에 의한 전단능력비 및 연성비

5.1 강도능력 평가

전단 보강근량에 의한 S_0 Series의 강도와 강섬유 혼입율에 의한 S_1 Series, S_2 Series의 강도를 표 3에 나타내었다. 표 3에서의 SCR은 실험체마다 압축강도가 다르므로 최대강도를 단면적 및 압축강도로 무차원화 시킨 전단능력비(Shear Capacity Ratio)³⁾를 나타내며 식 (7)과 같이 정의된다.

$$SCR = \frac{V_{exp}}{\sqrt{f_{ck}bd}} \quad (7)$$

Series		SCR	Ductility Ratio	Relative Ductility Ratio
S_0	$S_0-0.0-H$	1.92	1.43	1.20
	$S_0-0.0-H$	1.79	1.39	1.17
	$S_1-0.0-H$	1.74	1.32	1.11
	$S_2-0.0-H$	1.60	1.19	1.00
S_1	$S_1-0.0-H$	1.74	1.32	1.00
	$S_1-1.0-H$	1.88	1.38	1.05
	$S_1-1.5-H$	2.00	1.46	1.11
	$S_1-2.0-H$	1.92	1.63	1.23
S_2	$S_2-0.0-H$	1.60	1.19	1.00
	$S_2-1.0-H$	1.92	1.24	1.04
	$S_2-1.5-H$	1.81	1.28	1.08
	$S_2-2.0-H$	1.75	1.35	1.13

각 실험체의 SCR을 그림 4에 나타내었으며, 그림 4(a)의전단 보강근에 의한 SCR의 값은 $S_0-0.0-H$ 를 중심으로 전단보강근량의 증가에 따라 선형적으로 증가하는 결과를 보였다.

S_1 Series의 경우 V_f 가 1.5%까지는 전단능력비가 증가하는 것으로 나타났으며, V_f 2.0% 보강한 $S_1-2.0-H$ 의 SCR은 V_f 1.5%을 혼입한 실험체보다 감소하는 것으로 나타났다. 또한 V_f 1.0%인 $S_1-1.0-H$ 의 SCR은 우리나라 내진기준에 의한 실험체인 $S_0-0.0-H$ 실험체의 결과를 만족시키는 것으로 평가되었다. 그림 4(c)에 나타낸 S_2 Series의 SCR은 V_f 1.0%까지는 증가하였지만 V_f 1.5%에서는 그 증가량이 미미한 것

으로 나타났다. 여기서 S₁ Series와 S₂ Series의 V_f 2.0%의 전단강도 증진이 미흡한 것은 강섬유의 뭉침현상(fiber ball)에 의한 것으로 판단되므로, 시공성을 고려할 때 콘크리트 체적의 2% 강섬유 보강은 부적절한 것으로 판단된다.

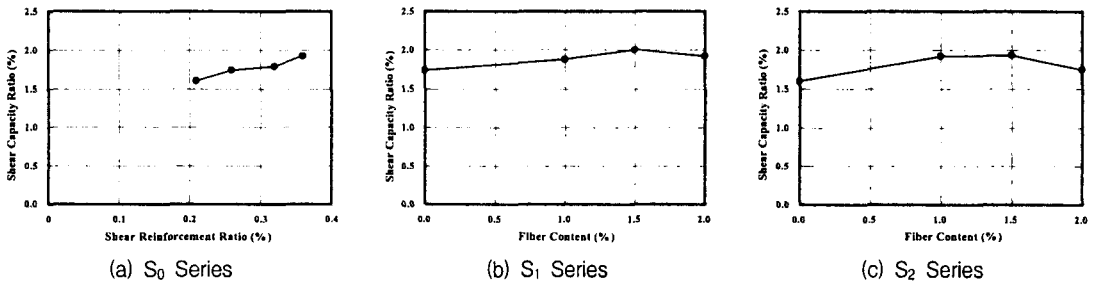


그림 4. 전단능력비(SCR) 비교

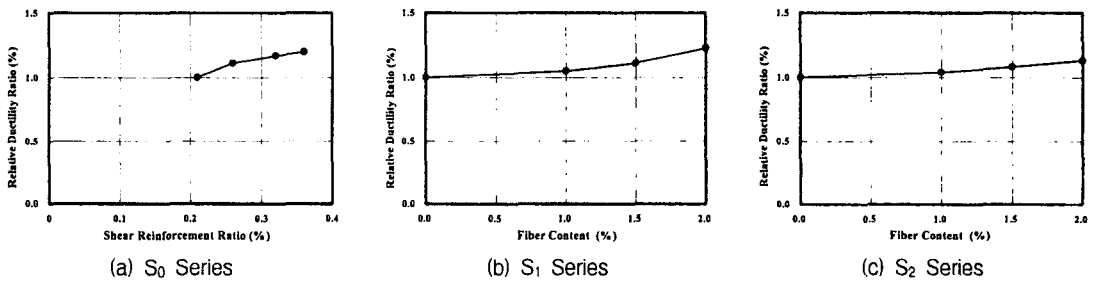


그림 5 연성비 비교

5.2 연성능력 평가

연성능력의 정량적인 평가를 위하여 각 Series의 기준 실험체로 선정된 S₂-0.0-H, S₁-0.0-H, S₂-0.0-H를 기준으로 한 상대연성비(Relative Ductility Ratio)를 표 3과 그림 5에 나타내었다. 각 실험체 모두 전단 보강근 및 강섬유 혼입량이 증가함에 따라 연성능력의 증가를 나타냈으며, V_f 1.0%인 S₁-1.0-H 실험체의 연성비가 우리나라 내진기준에 의한 실험체인 S₀-0.0-H의 연성비와 유사한 연성비를 나타내어 우리나라 내진기준의 성능에 비교적 만족하는 것으로 평가되었다.

우리나라 내진기준에 의한 전단보강근 요구량보다 35% 적게 배근된 S₂ Series의 상대변위연성비는 V_f가 증가함에 따라 비례적으로 증가하는 나타났으며, V_f 2.0%인 S₂-2.0-H 실험체일 때 S₀-0.0-H의 연성비에 근접하는 것으로 평가되었다. 이는 전단보강근량을 일정량 이상으로 줄이게 되면 강섬유의 혼입만으로는 연성능력을 확보하기가 어려운 것으로 판단된다. 즉 강섬유의 보강효과는 전단 보강근량과 밀접한 관계가 있는 것으로 평가할 수 있으며, 향후 이에 대한 보완연구가 필요한 것으로 판단된다.

5.3 기존 전단내력식의 적용성 평가

강섬유가 보강된 S₁ Series와 S₂ Series의 실험결과를 2절에 기술한 각국 기준식 및 제안식에 적용한 결과를 실험값/이론값의 비로 정리하여 표 4에 나타내었다. S₁ Series와 S₂ Series의 평균값을 살펴보면, ACI 기준식은 이론값이 89~94% 정도 과소 평가하는 것으로 나타났고, AIJ MB법과 Ohno의 제안식은 각각 4~9% 정도 실험값과 거의 유사한 것으로 평가되었다. 뉴질랜드 기준식은 ACI 기준식과

유사하게 86~91%정도 과소 평가하였으며, Hirosawa의 제안식은 161~164%정도로 과소 평가하는 것으로 나타났다. 그리고 Priestley 등의 제안식은 실험값에 비해 약 34~39%정도 과소 평가하는 것으로 나타났다.

각 제안식의 실험값/이론값의 표준편차를 평가한 결과, AIJ MB법과 Ohno의 제안식의 표준편차가 제일 적은 것으로 나타나 본 실험결과를 적절히 평가하였다. 이상의 결과로 AIJ MB법과 Ohno의 제안식이 강섬유 보강 고강도 콘크리트기둥의 최대전단내력을 적절히 평가할수 있는 것으로 평가되나, 보다 많은 실험자료를 근거로 검증 또는 보완되어야 할 것이다. 또한 이상의 내력식은 강섬유의 보강효과가 고려된 것이 아니므로 강섬유의 보강효과를 적절히 고려된 내력 산정식이 필요한 것으로 판단된다.

표 4 실험결과와 제안식의 비교

Series		$V_{test} / V_{calculation}$					
		ACI	AIJ MB	NZS 3101	Hirosawa	Priestley	Ohno
S ₁ Series	mean	1.89	1.09	1.86	2.64	1.34	1.04
	standard deviation	0.14	0.07	0.17	0.19	0.15	0.10
S ₂ Series	mean	1.94	1.06	1.91	2.61	1.39	1.09
	standard deviation	0.64	0.36	0.63	0.87	0.45	0.35

6. 결론

본 연구에서는 강섬유로 보강된 고강도 콘크리트 기둥의 전단 특성 및 기존 전단내력식의 적용성 평가를 하였으며, 주요한 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 최대 전단강도를 콘크리트 압축강도로 일반화 시킨 전단능력비(SCR) 평가 결과 강섬유 혼입량이 1.0%~1.5%일 때 보강효과가 우수한 것으로 나타났다.
- 2) 강성 및 연성능력의 증진은 V_f 1.5%까지 효과적이었으나, 그 이상이 되면 혼입량에 비해 보강효과가 미미한 것으로 평가되었다.
- 3) 본 실험결과를 축력이 작용하는 전단에 대한 표준식 및 제안식에 적용한 결과 AIJ MB법과 Ohno 등의 제안식이 기둥의 최대전단내력을 적절히 평가할 수 있는 것으로 나타났으며, 향후 강섬유 보강효과가 고려된 전단내력식에 대한 보완연구가 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 한양대학교 초대형 구조시스템(STRESS)의 연구지원에 의한 것이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

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, p.p. 2310~2329, 1994.
3. 장극관, 이현호, 양승호, “강섬유 보강 기둥의 강도 및 변형 특성,” 한국콘크리트학회 논문집, 제14권, 1호, 2002. 2, pp 49~57.