

강섬유로 보강된 RC 단주의 전단특성

Shear Characteristics of RC Short Column Strengthened with Steel Fiber

장극관* 이현호** 양승호***

Chang, Kug Kwan, Lee, Hyun Ho, Yang, Seung Ho

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the enhancement of shear capacity according to steel fiber contents in RC short columns. Lateral force resistance test was performed with the parameters of steel fiber contents in concrete volume.

From the test results, shear and ductility capacity was improved with steel fiber contents increased. In addition, an optimal steel fiber content was evaluated as a 1.5 % of concrete volume.

1. 서론

지진과 같은 수평하중 작용시 철근 콘크리트 골조 기둥의 취성적인 전단파괴는 구조물의 붕괴를 유발할 수 있다. 또한 성능을 근간으로 한 내진규준이 정착 및 개발되는 현 시점에서 기둥의 전단강도 및 변형능력 증진은 매우 중요한 요소라 할 수 있다. 현재 합성재료를 사용한 신기술들이 개발되고 있으며, 구조부재 보강재로서 높은 인장강도를 가진 섬유질 재료에 대한 관심이 매우 높은 실정이다. 이중 전단성능 및 변형능력증진에 매우 효과적인 강섬유(Steel Fiber)를 이용한 연구가 활발히 진행중이다. 우리나라에서는 강섬유 보강 보의 전단특성에 관한 연구¹⁾는 다수가 있으나, 강섬유 보강 기둥의 전단특성에 관한 연구는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 반복 수평하중 가력실험을 통하여 RC 단주의 강섬유 보강효과를 평가하고자 한다. 이를 위하여 강섬유 혼입율(V_f)을 변수로 선정하여, 혼입율에 따른 전단강도 및 변형능력 증진효과를 평가한다.

2. 실험

강섬유 보강 기둥의 전단보강효과를 파악하기 위해 총 4개의 실험체를 제작했으며, 실험체 일람표는 표 1, 실험체 상세는 그림 1에 나타내었다. 실험체 단면은 30×30 cm의 정방형 기둥으로 높이는 90cm이다. 전단스팬비(M/Vd)는 실험체의 전단에 대한 평가가 용이하도록 1.5로 계획하였다. 본 연구에 사

* 정회원, 서울산업대학교 건축공학과 부교수

** 정회원, 동양대학교 건축학부 전임강사

*** 정회원, 서울산업대학교 건축공학과 석사과정

용한 강섬유는 양단후크형이며 형상비는 63.6이다. 또한 강섬유 혼입율은 0, 1.0, 1.5, 2.0%로 달리하여 강섬유의 전단보강효과를 알아보고자 실험체를 계획하였다. 실제 구조물의 축력에 의한 구속효과를 고려하기 위해 $0.1A_{gfc}$ 에 해당하는 압축력을 오일잭을 이용하여 실험시부터 실험 종료까지 가력하였다. 수평하중은 100tf 용량의 액추에이터를 사용해 그림 2와 같이 기둥의 중앙부에 가력하였다. 가력방법은 변위제어로 각 사이클의 +, - 최대변위까지를 각각 한 스텝으로 설정하였으며, 가력 속도는 동적 효과를 배제하기 위하여 0.2 mm/sec로 하였다. 가력 수평하중은 그림 3과 같이 부재각을 기준으로 하였으며, 실험체 기둥 상단면에 LVDT를 설치해 기둥의 전체변위를 측정하였다. 또한 스트레인 게이지를 설치하여 주근 및 전단보강근의 변형율을 측정하였다.

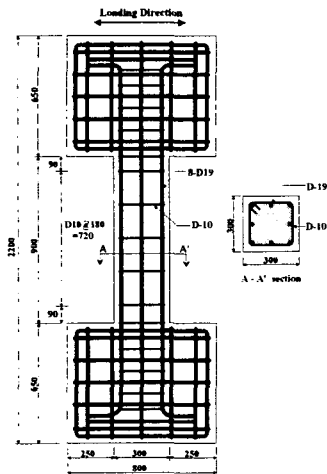


그림 1 실험체 및 단면 형상

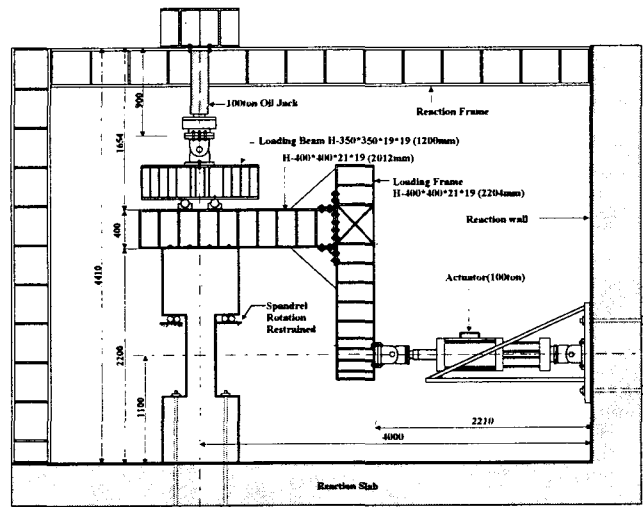


그림 2 실험체 가력도

표 1 실험체 일람표

실험체명	압축강도 (kgf/cm^2)	전단 보강근비	인장 철근비	강섬유 혼입율(%)
S ₁ -0.0-N	268.8	0.26	0.955	0.0
S ₁ -1.0-N	266.0			1.0
S ₁ -1.5-N	279.5			1.5
S ₁ -2.0-N	254.0			2.0

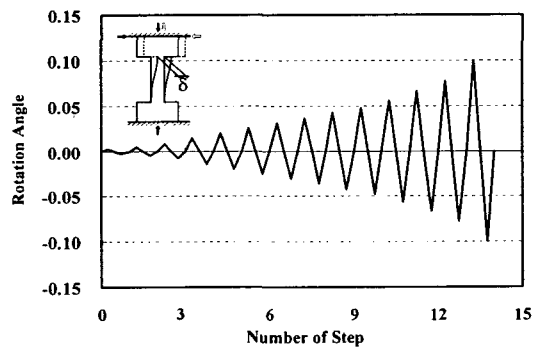


그림 3 Loading History

3. 실험결과 및 분석

3.1 강도 및 연성능력

본 실험결과를 표 2에, 하중-변위 곡선은 그림 4에 나타내었으며, 그림 4의 하중-변위곡선을 통해 최대 강도 및 연성비를 산정하였다. 표 2에 의하면 비보강 실험체는 전단보강근이 주근보다 먼저 항복하였으나, 강섬유 보강량이 많아질수록 주근이 먼저 항복하는 것으로 나타나, 강섬유 보강에 의한 항복 능력 증진효과를 확인할 수 있었다. 실험체마다 압축강도가 달라 이에 정량적인 평가를 위해 전단능력비(SCR, Shear Capacity Ratio = $V_u / (bd\sqrt{f_{ck}})$)¹⁾로 강도능력을 평가하여 그림 5에 나타내었다. 그림 5에 의하면 보강량 1.0%의 전단강도 증진은 별로 없는 것으로 나타났으며 보강량 1.5%, 2.0%로 증가함에 따른 전단강도 증진 효과를 확인할 수 있었다. 변위연성비(μ)는 최대하중시의 80% 떨어지는 시점에서의 변위(δ_u)에 대한 항복시의 변위(δ_y)로 정의하였다. 항복점을 파악하기 위해 Priestley(1987)²⁾가 제안한 식을 이용하였다. 그 결과를 그림 5에 전단능력비와 같이 나타내었다. 이에 의하면 강섬유 보강량 1.5%의 연성능력 증진이 2.0% 연성비와 유사한 것으로 나타났다. 여기서 강섬유 2.0%의 연성능력의 증진이 미흡한 것은 2.0% 보강된 실험체 제작시 섬유뭉침(fiber ball)현상이 많이 나타나 효율적인 균열제어를 못한 것에 기인한 것으로 판단된다. 이상의 결과로부터 전단저항 및 변형능력 증진을 위한 적정 강섬유 보강량은 1.5%로 추정할 수 있는 것으로 판단된다.

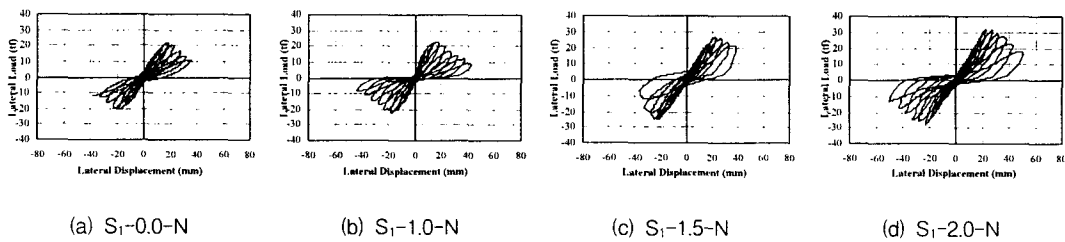


그림 4 하중-변위 곡선

표 2 실험결과

실험체명	주근 항복		전단보강근 항복		최대강도	
	V_{my} (tf)	δ_{my} (mm)	V_{sy} (tf)	δ_{sy} (mm)	V_{max} (tf)	δ_{max} (mm)
S ₁ -0.0-N	-	-	21.50	32.94	21.59	18.00
S ₁ -1.0-N	16.72	23.32	8.24	28.14	22.78	17.16
S ₁ -1.5-N	20.00	26.88	-	-	27.03	22.30
S ₁ -2.0-N	20.90	43.22	-	-	32.21	22.54

- did not yield.

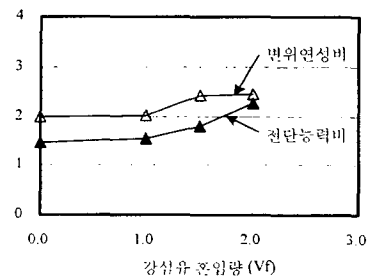


그림 5 전단능력비 및 연성비 비교

3.2 강성 및 에너지소산능력

하중-변위 곡선으로부터 얻은 강성저하 특성을 강성저감율(K_i/K_y)로 정의하여 그림 6에 나타내었으며, 여기서 K_i 는 초기 루프의 강성을, K_y 는 하중의 진전에 따른 순차적인 강성을 의미한다. 초기 강성

이후 7.5mm까지는 강섬유 혼입을 1.0%의 강성저하가 완만하게 나타났으며 7.5mm 이후부터 22.5mm까지는 강섬유 혼입을 1.5, 2.0%의 강성저하가 다른 실험체에 비해 완만하게 나타나 혼입을 1.5, 2.0%가 비보강 실험체에 비하여 안정된 거동을 보이는 것으로 나타났다. (+) 사이클 및 (-) 사이클 합친 전체 이력루프에 대한 에너지소산능력을 그림 7에 나타내었다. 강섬유 보강량에 따른 에너지 소산능력은 최대 14% 까지 증진되는 것으로 평가할 수 있으나, 강도 및 연성능력 증진에 비하면 다소 미흡한 것으로 평가되었다.

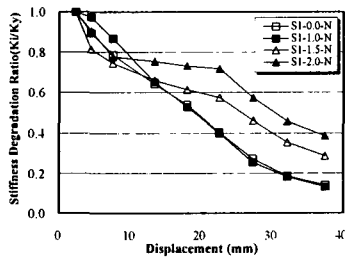


그림 6 강성저하

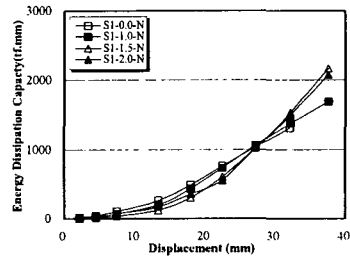


그림 7 에너지소산능력

3.3 파괴상황

각 실험체의 최종파괴상황은 그림 8에 나타내었다. 전반적인 파괴모드를 보면 강섬유를 보강한 실험체는 수평변위 4-5mm에서 초기 휨균열이 발생되어 최대내력 이후 스텝까지 안정적인 휨거동을 보인 반면 강섬유를 보강하지 않은 S₁-0.0-N 실험체는 급작스런 전단파괴를 보이며 파괴되었다.

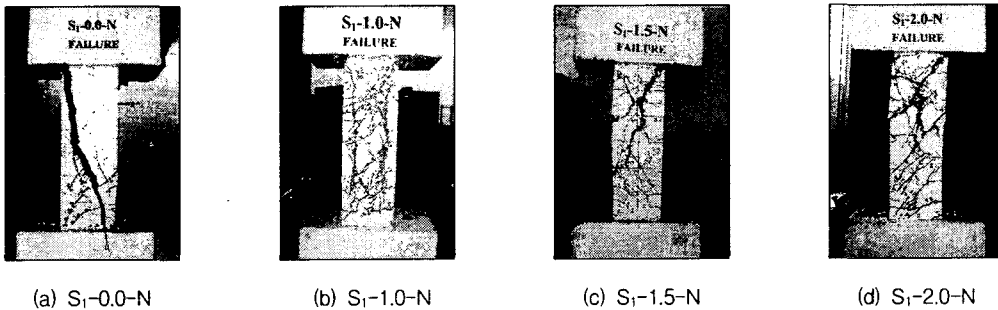


그림 8 실험체별 균열상황

4. 전단내력 평가

철근콘크리트 기둥부재의 전단강도 평가에 있어서는 수 많은 연구가 이루어 졌으며 이를 통하여 각국의 규준이 정립되어 사용되고 있다. 그러나, 강섬유를 보강한 콘크리트 기둥의 경우에는 아직까지 전단내력평가에 관한 규준식이 정립되어 있지 않은 실정이다. 그러므로, 본 절에서는 기존의 철근콘크리트 규준식 및 제안식을 이용해 강섬유보강 콘크리트 기둥의 전단강도 평가가 가능한지 검토하고자 한다. 규준식으로는 ACI 규준식³⁾, AIJ 내진설계지침(A법, 개량 B법)^{4,5)}, 뉴질랜드 규준식⁶⁾, 제안식으로는 Hirosawa 등의 제안식⁴⁾, Priestley 등의 제안식⁷⁾을 이용하였다.

4.1 전단내력 산정식

ACI 318-99 규준에서의 전단강도에 관한 설계식은 식 (1)과 같이 콘크리트 및 철근의 전단저항요소인 V_c , V_s 의 합으로 표현되며, AIJ 전단강도 설계식은 부재의 트러스 기구에 의한 전단저항요소와 콘크리트가 부담하는 전단력 중에서 아치기구에 의해 전달되는 전단강도만을 더하여 부재의 전단강도로 산정한다. 그리고, 설계법으로는 A법, B법, 개량 B법등이 있으며 이 세가지 근본적인 차이점은 A법의 경우 트러스 기구의 압축 스트러트 강도에 대한 $\cot \theta$ 를 1-2의 범위로 하여 트러스 기구에 의한 내력을 크게 하였으며 B법은 $\cot \theta$ 를 1로 고정하고 있어 아치기구에 의한 내력을 크게 보고 있는 것이다. 이 두가지 방법 모두 축력에 대한 고려를 하고 있지 않지만 개량 B법은 축력을 고려했으며 보 전단기구중의 아치 기구와 트러스 기구의 전단효과를 모두 고려하여 전단강도를 산정하고 있다. 본 연구에서는 AIJ 전단강도식 중 식 (2)의 A법과, 축력이 고려된 식 (3)의 개량 B법을 이용하였다. 식 (4)는 뉴질랜드 규준인 NZS 3101으로 ACI 318-99에서와 마찬가지로 V_c , V_s 의 합으로 전단내력을 산정하고 있으며, 소성힌지 영역을 고려하고 있다. 식 (5)의 Hirosawa 식은 축력의 영향을 고려한 실험식이다. Priestley 등은 연성도에 영향을 받는 콘크리트 요소 및 전단스팬비에 영향을 받는 축력요소, 전단보강근량에 영향을 받는 트러스 요소를 이용해 기둥의 전단강도를 다음 식 (6)과 같이 제안하였다.

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

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

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

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

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

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

표 3 실험결과와 각 제안식의 추정값 비교

실험체명	V_{Exp}	ACI 318-99		AIJ (A법)		AIJ (개량B법)		NZS 3101		Hirosawa		Priestley	
		V_{CAL}	V_{Exp}/V_{CAL}	V_{CAL}	V_{Exp}/V_{CAL}	V_{CAL}	V_{Exp}/V_{CAL}	V_{CAL}	V_{Exp}/V_{CAL}	V_{CAL}	V_{Exp}/V_{CAL}	V_{CAL}	V_{Exp}/V_{CAL}
S ₁ -0.0-N	21.6	14.4	1.5	19.8	1.09	24.0	0.90	17.1	1.26	10.9	1.99	28.5	0.76
S ₁ -1.0-N	22.8	14.4	1.58	19.8	1.15	24.1	0.95	17.1	1.33	10.9	2.09	28.5	0.80
S ₁ -1.5-N	27.0	14.5	1.86	20.2	1.34	24.8	1.09	17.2	1.57	11.0	2.46	25.3	1.07
S ₁ -2.0-N	32.2	14.3	2.26	19.4	1.66	23.3	1.38	17.0	1.89	10.8	2.99	25.0	1.29

4.2 기존 내력식의 적용성 평가

본 실험결과를 4.1절에 기술한 각국 규준식 및 제안식에 적용한 결과를 표 3에 나타내었다. 실험값/이론값의 비로 정리된 표 3의 결과로부터, ACI 규준식의 경우 1.5-2.26의 범위로 실험값과 이론값이 80%의 차이를 나타내었다. AIJ 내진설계치침 A법은 1.09 ~ 1.66의 범위로 평균 1.31로 나타나, 실험값과 이론값의 차이는 31%로 평가되었다. AIJ 개량 B법은 0.90 ~ 1.38의 범위로 평균 1.08로 나타나, 강섬유를 보강한 경우와 보강하지 않은 경우의 전단내력을 다른식 대비 상대적으로 잘 예측하는 것으

로 평가되었다. 뉴질랜드 기준식은 실험값과 이론값의 차가 51%로 나타났으며, Hirosawa 등의 제안식의 경우 실험값과 이론값 비는 93%로 매우 큰 차이를 나타내었다. Priestley 등의 제안식은 이론식에 의한 값이 큰 것으로 나타났으며, 비보강 및 보강량 1.0% 실험체 내력을 과소평가하는 것으로 평가되었다. 이러한 결과로부터 AIJ 전단강도식 중 개량B법이 강섬유 보강 및 비보강 콘크리트 기둥의 최대 전단내력을 평가할 수 있는 것으로 평가되었으나, 이는 보다 많은 실험자료를 근거로 그 타당성을 검증 또는 보완될 필요가 있는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 강섬유로 보강된 RC단주의 전단특성을 평가하였으며, 주요한 결과는 다음과 같다

- 1) 강섬유 보강은 최대강도 및 연성능력 증진에 효과적이지만 에너지 소산능력은 다소 미흡한 것으로 평가된다.
- 2) 강섬유 보강에 의해 취성적인 전단파괴에서 안정적인 휨 파괴로 변환되었으며 전단강도 및 연성능력 증진을 위한 적정 강섬유 보강량은 1.5% 정도인 것으로 평가된다.
- 3) 전단에 대한 기준식 및 제안식에 의한 내력을 평가한 결과, AIJ 전단강도식 중 개량 B법이 강섬유보강 콘크리트 기둥의 최대전단내력을 추정할 수 있는 것으로 평가되었으나, 이는 보다 많은 기존연구결과 및 실험결과 분석을 통하여 검증·보완될 필요가 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터(STRESS)의 연구지원에 의한 것이며, 실험체 제작에 도움을 준 현대건설 의정부 우편집중국 신축공사 현장 김윤식 소장 및 건축사업본부 김형일 부장님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 장극관, 이현호, 양승호, “강섬유콘크리트의 전단보강 효과에 대한 고찰,” 한국구조물진단학회 봄학술발표회, 제4권, 1호, 2000, pp 323-330.
- 2) Priestley, M.J.N. and Park, R., “Strength and Ductility of Concrete Bridge Columns under Seismic Loading,” ACI, Structural Journal, Vol. 84, No. 1, 1987, pp 69-76.
- 3) ACI, “Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-99),” ACI Committee 318, American Concrete Institute, 1999.
- 4) 日本建築學會, “鐵筋コン크리트造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説,” 1990.
- 5) 日本建築學會, “鐵筋コン크리트造建物の韌性保證型耐震設計指針(案)・同解説,” 1997.
- 6) New Zealand Standard NZS 3101, “Code of Practice for the Design of Concrete Structures,” S 3101, 1989.
- 7) 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.