

강섬유 콘크리트가 충전된 용접조립 각형강관 기둥의 구조성능 실험연구

김선희¹ · 염경수² · 최성모^{3*}

¹공학박사, 서울시립대학교, 건축공학부, ²소장, (주)하모니구조엔지니어링, ³교수, 서울시립대학교, 건축학부

An Experimental Study on Structural Performance of SFRC filled Built-up Square Columns

Kim, Sun Hee¹, Yom, Kong Soo², Choi, Sung Mo^{3*}

¹Ph.D, Department of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul, 130-743, Korea

²Project Manager, Harmony Structural Engineering, Seoul, Korea

³Professor, Department of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul, 130-743, Korea

Abstract - This study suggests mixing steel fibers in concrete to secure the toughness of the columns. Therefore, to evaluate the structural behavior of welded built-up square columns filled with steel fiber reinforced concrete, ten stub column specimens were fabricated for compressive loading test with variables of steel fiber mixing ratio and loading condition. It is deduced that the steel fibers continue to provide tensile strength even after the concrete cracks and thus improve the strength and behavior of the column when bending moment is applied to it. A small amount of steel fibers can improve compressive strength and bending strength and thus produce economically efficient results when employed in structural design.

Keywords - Steel-Fibers, Welded built-up square column, Reinforced index, Loading axial, Ductility

1. 서론

근래 건축구조 분야에서는 새로운 구조시스템의 개발과 함께 기존 재료를 적절히 조합하여 과거에는 얻을 수 없었던 성능을 건축구조에 부여하려고 하는 움직임이 활발하다. 이러한 구조방식 중 콘크리트충전 강관(Concrete filled steel tube, 이하 CFT)은 강관의 구속효과에 의해 충전 콘크리트의 압축내력 상승과, 충전 콘크리트에 의한 강관의 국부좌굴 보강효과에 의해 부재내력이 상승하고 뛰어난 변형성능을

발휘한다^{[1],[2]}. 하지만, 기둥단면이 커질 경우 합성효과를 발휘하기 위하여 스티드 볼트나 후 시공 앵커 볼트를 사용해야 하는 시공상의 문제점이 발생된다. 이를 극복함과 동시에 합성효과를 증대시키기 위한 방안으로 콘크리트 충전 용접조립 각형 기둥이 소개되었다^[3]. 내부 앵커형 용접조립 각형강관기둥은 Fig. 1의 과정을 통하여 제작된다. 절곡 성형한 'L' 자형 단위부재 4개를 서로 맞댐 용접하므로 각형 튜브형상은 철골부재로 별도의 보강장치나 특수용접 없이 제작할 수 있다. 강관내부의 절곡부(리브)를 통하여 동일한 단면크기의 일반 CFT에 비하여 좌굴내력을 향상시켜 콘크리트의 구속력을 증대시킬 수 있다.

콘크리트 충전형 강관기둥의 가장 큰 장점은 압축력이 작용할 때 외부의 강관이 내부의 콘크리트를 3축 응력상태로 콘크리트를 구속하여 압축내력이 상승하며, 콘크리트는 강관의 국부좌굴을 지연하므로 뛰어난 연성능력을 발휘하는 것으로 알려져 왔다. 이때 내부 앵커형 용접조립 각형기둥의

Note.-Discussion open until August 31, 2015. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on May 13, 2014; revised August 8, 2014; approved on September 17, 2014.

Copyright © 2015 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-2-6490-2759 Fax. +82-2-6490-2749

E-mail. smc@uos.ac.kr

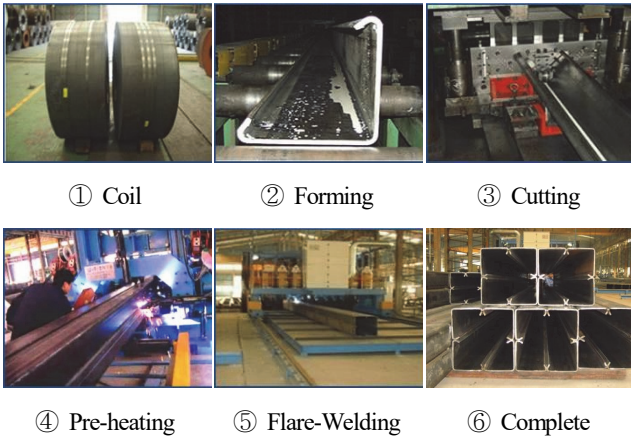


Fig. 1. Process of making welded built-up square column

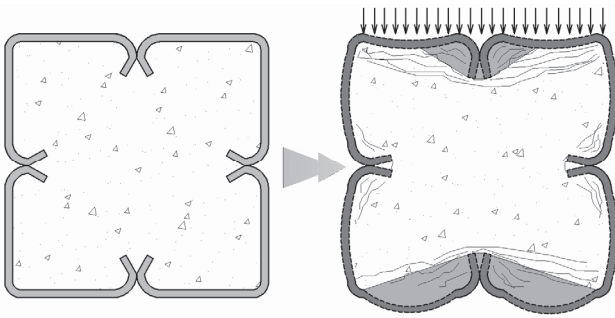


Fig. 2. Interaction between concrete and steel tube when pure pending

리브는 콘크리트 내에서의 앵커역할로 인해 일반 각형강관 기둥에 비해 경제적인 단면설계가 가능하다는 장점을 갖고 있다.

하지만, 콘크리트와 맞물려 있는 리브에서 발생하는 변형은 콘크리트 균열을 촉진시킬 가능성을 염려할 필요가 있다. Fig. 2와 같이 순수 휨 상태(또는 편심비가 큰 기둥인 경우)인 경우 콘크리트와 리브의 상호 거동에는 보완점이 필요하다. 즉, 리브의 변형에 저항 될 콘크리트의 인성력 확대 방안이 모색되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트 내에 소량의 강섬유만을 혼입하여 하중상태, 강섬유 혼입비율을 변수로 구조성능 실험을 수행하였다. 실험결과를 근거로 리브와 강섬유 콘크리트의 상호거동을 분석하고자 한다.

2. 선행연구 동향

강섬유 콘크리트(Steel-fibers Reinforced Concrete,

SFRC)를 기둥부재로 사용한 선행연구는 균열을 방지하고 인성을 증대하고자 RC(Reinforced Concrete)기둥에 적용된 것이 대부분이었다. SFRC를 사용한 충전형 기둥의 선행연구는 합성기둥 대비 극 소수에 불과 했다. SFRC 기둥의 연구는 R. John Craig(1984)을 시작으로 충전형이 아닌 매입형 기둥으로 시작됐다. SFRC 충전형 기둥의 연구는 2000년부터 소개되고 있으며 Table 11(맨 마지막 페이지)과 같이 본 논문과 관련된 연구를 총 7편^{[4],[5],[6],[7],[8],[9],[10]} 조사, 정리 하였다.

각 연구에서 사용된 강섬유 형태는 양단 후크형 타입이 대부분 차지하고 있으며, 주요 변수는 강섬유 혼입율, 세장비 그리고 하중조건으로 구분할 수 있다. 이때 강섬유의 최대, 최소 혼입율은 0.6~2.0% 사이에 있다. 주목할 사항은 실험체 외부강관 형태는 각형보다는 원형기둥에 치중되어 있다. 이러한 원인은 SFRC로 인한 압축 변형률 향상에 초점이 맞춰져 있다. 원형강관에 충전된 콘크리트는 구속효과에 의하여 비 구속 콘크리트에 비해 압축 변형률을 확대시킬 수 있다. 이때 강섬유를 보강함으로써 더 큰 변형성능을 기대하기 위한 노력으로 보인다. 실험변수는 강섬유 혼입여부, 세장비, 강섬유 보강지수(Steel-fiber Reinforced Index, 이하 RI) 등으로 실험이 수행되었다. 선행연구 분석을 통해 결과를 요약하면, 강섬유 혼입에 따라 약간의 내력증가는 있지만 그 보다 연성력 확보에 매우 효과적인 결과를 가질 수 있었다. 또한 강섬유 혼입율과 내력 증가율은 정 비례적이지 않다. 그 이유는 섬유가 콘크리트와 뭉침효과(Fiber Balling)를 보이며 오히려 내력을 저하시키는 요인이 되기도 한다^[11]. 마지막으로 강관 내에 충전된 강섬유 콘크리트의 인장력은 일반 콘크리트에 비해 무시할 정도가 아니므로 이에 대한 적절한 효과를 반영하여 설계하는 것이 경제적이 다고 요약할 수 있다. 하지만, 선행연구 결과를 보면 매우 아쉬운 점이 남아 있다. 첫 번째로 소량의 혼입율을 변수로 한 분석결과가 없다는 점이다. 두 번째로 실험체 크기는 실대 크기가 아닌 모두 축소모형으로 제작되어 그 결과는 비교적 과대평가 될 우려가 있다. 세 번째로 기둥 강관두께 역시 실제 주요 구조부재에 사용되지 않는 얇은 강재를 사용하였다.

선행연구를 통해 강섬유는 양단 후크형으로 혼입율은 경제성을 감안하여 소량의 혼입을 유도하고자 한다. 또한 실대 크기의 실험체를 제작하여 강섬유의 방향성을 고려한 실험계획을 진행하였다.

3. 구조성능 평가 실험

3.1 실험개요

리브와 강섬유 콘크리트의 상호작용을 평가하기 위해 전체 좌굴발생 가능성이 없는 단주(기둥 폭의 3.5배)로 계획하였으며, 주요 변수는 강섬유 혼입량과 하중조건으로 크게 구분된다. 강섬유 혼입율(mixing ratio)과 형상비(aspect ratio)에 따라 내력 차이가 상당히 크며, 선행연구 결과에 의하면 혼입율이 전체 체적에 1%이상일 경우 비경제적이고, 강섬유 뭉침현상이 발생되어 시공성이 떨어지는 문제가 제기 되었다. 따라서 0.5%미만의 강섬유를 혼입하여 변형능력과 최대 내력 이후 거동을 분석해 보고자 한다. 실험체는 Fig. 3과 같이 SM490 ($F_y=325\text{MPa}$, $F_u=490\text{MPa}$) 6mm 강판을 사용하여 제작되었으며 강섬유와 혼입되기 전 콘크리트 압축강도는 40MPa 이다. 이때 강섬유 혼입율과 편심비를 변수를 하여 총 10개의 단주 실험을 수행하였다. 실험 편의상 편심축력을 가하여 이축응력상태를 설정하였다. 실험체는 강관과 단부 엔드플레이트가 만나는 위치의 국부좌굴 방지를 위해 길이 200mm의 스틱프너를 설치하였다. 사용된 강섬유의 형태는 양 단부가 구부러진 후크형 타입의 강섬유를 적용하였다. 강섬유 길이(L_f)는 60mm, 직경(D_f)은 0.75mm이며, 형상비는 80이다. 강섬유 혼입량은 0, 0.1, 0.25, 0.375% 총 4가지 경우를 갖고 있으며, 강섬유의 형상비(l_f/d_f)에 혼입량(V_f)을 곱한 섬유보강지수(RI)는 00, 08, 20, 30으로 표현될 수 있다. 사용된 강섬유의 형상과 재원은 Table 1과 같다.

실험체의 강재량($A_s/(A_s+A_c)$)은 모두 약 1% 범위내로 계획 되었다. 또한 현행규준에서 제시하고 있는 폭두께비 한계치는 56이며 모든 실험체 폭두께비는 범위 내 만족하고 있다. 실험체의 일람은 Table 2에 정리하고 있다.

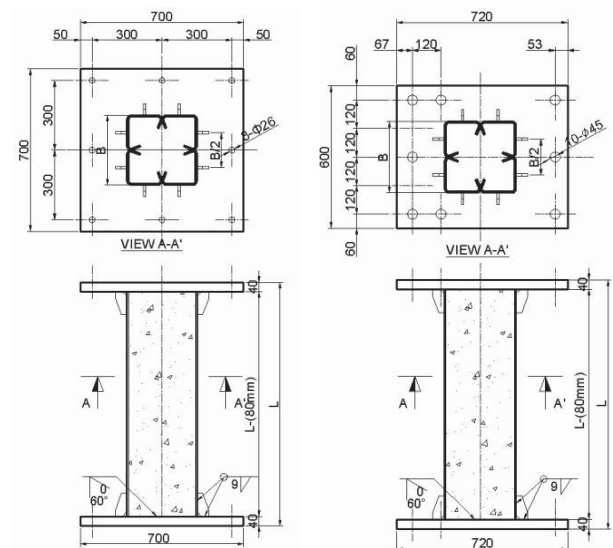
Table 1. Shape and size of steel-fiber

RC-65/60-BN	Shape	
	Length (l) 60 mm	Diameter (d) 0.75 mm
h, h' (mm)	a, a' (degree)	l, l' (mm)
≥ 0.75	$\geq 20^\circ$	1.5~5.0mm

Table 2. Specimen list

Specimen	B (mm)	t (mm)	b/t	e/B	L (mm)	A_s (mm ²)	A_c (mm ²)	RI
C0000	300	6	48	0	1050	9126	80874	00
C0008	300	6	48	0	1050	9126	80874	08
C0020	300	6	48	0	1050	9126	80874	20
C0030	300	6	48	0	1050	9126	80874	30
E2500	400	9	42	0.25	1400	17026	142973	00
E2520	300	6	48	0.25	1050	9126	80874	20
E2530	300	6	48	0.25	1050	9126	80874	30
E5000	400	9	42	0.50	1400	17026	142973	00
E5020	300	6	48	0.50	1050	9126	80874	20
E5030	300	6	48	0.50	1050	9126	80874	30

C 00 00
 : RI = $(L_f/d_f)V_f$
 : Modulus of Eccentricity (00; 0B, 25; 0.25B, 50; 0.5B)
 : Loading Method (C; concentric, E; Eccentric)



(a) Centric load (b) Eccentric load

Fig. 3. Specimen details

측정 장치는 1000ton UTM(Universal Test Machine)을 사용하였다. 0.05(mm/s)의 가력속도로 압축단조가력 하였으며, 하중-축 변위 측정은 기둥의 내력의 최대내력의 80%로 떨어질 때 까지 수행하였다. 양단단순 지지조건에서 압축 재하실험을 하는 경우에는 가력 시 편심 및 단부의 회전에 대한 구속을 최소화할 필요가 있다. 따라서 편심 실험체인 경우 한 방향을 구속하고 구속방향에 대해 직각으로만 회전이

가능한 단부구조로, 좌굴 축을 미리 결정하며 단부 구속을 최소화 할 수 있도록 Knife Edge 지그를 사용했다. 또한 Knife Edge와 시험체를 확실하게 부착시키기 위하여 시험체의 단부에 End plate를 씌워 Bolt에 250kN의 유압을 가하여 체결하였다. 편심 가력 시에는 Knife Edge를 계획된 편심거리 만큼 이동하여 가력 한다.

3.2 소재시험 개요 및 결과

3.2.1 강재 인장강도

시험체 제작에 사용된 강재의 기계적 성질을 파악하기 위하여 KS B0801의 금속재료 인장시험편 규정에 따라 기둥 실험에 사용되는 강관과 동일한 시편을 절취하여 행하였다. KS B 0801^[12]의 금속재료 인장 시험편 규정에 따라 제작한 시험편에 대하여 12 C호의 금속재료 인장편 시험 방법에 의해 실시하며, 각 시험편 양면에 W.S.G를 부착하여 이들의 평균값으로 응력-변형도 관계를 파악하였다. 각 시험편을 평균하여 항복강도(F_y), 인장강도(F_u) 항복비(F_y/F_u), 연신율(%), 탄성계수(GPa)를 Table 3에 나타내었다. 강재 두께 6mm인 경우 SM490의 설계항복강도 325MPa보다 높은 평균 414MPa의 항복강도로 평가 되었다.

3.2.2 SFRC 압축강도 시험

혼입율($V_f= 0, 0.1, 0.25, 0.375$)과 콘크리트 재령일(7, 21, 28)을 변수로 강섬유 콘크리트의 역학적 특성을 알아보기 위하여 소재시험 수행하였다. 콘크리트 현장배합 설계는 Table 4와 같다. 사용된 강섬유의 형상은 앞서 언급된 바와

Table 3. Results of coupon test

Thick.	No	F_y (MPa)	F_u (MPa)	F_y/F_u (%)	Elongation	E_s (GPa)
6mm	1	411.2	474	87	30.13	201.70
	2	431.4	495	87	28.89	202.00
	3	409.8	447	92	34.01	202.80
	4	405.0	493	82	29.20	201.50
	AVE	414.4	477	87	30.55	202.00
9mm	1	419.4	490	85	22.60	265.15
	2	435.7	507	86	20.51	303.46
	3	411.8	472	87	23.81	247.14
	4	396.9	493	80	23.94	236.80
	AVE	416.0	491	85	22.72	263.14

Table 4. SFRC mixing

Design strength (MPa)	W/C (%)	S/A (%)	Slump (cm)	Unit weight (kg/m ³)			
				C	W	S	G
40	27.9	40.1	15	585	178	563	847

Table 5. Compressive strength of SFRC (MPa)

days	Vf(%)	0	0.1	0.25	0.375
28	Case1	40.0	40.6	42.5	48.2
	Case2	41.7	43.4	42.5	46.6
	Case3	43.0	41.2	43.3	45.1
	AVE	41.6	41.7	42.8	46.6
21	Case1	31.7	-	31.7	37.2
	Case2	28.3	25.5	28.4	35.6
	Case3	31.6	31.8	32.2	32.6
	AVE	30.5	28.6	30.8	35.1
07	Case1	22.1	22.2	23.1	26.5
	Case2	22.0	23.1	23.8	26.1
	Case3	11.2	11.2	22.5	26.2
	AVE	18.5	18.8	23.1	26.3

같이 강섬유의 길이가 60mm이다. KS(한국표준원)에서는 강섬유 길이가 35mm이상인 경우 원형 공시체 크기는 $\varnothing 150 \times 300$ 으로 계획하도록 권장하고 있다. 권장 근거에 대해서는 작성되어 있지 않지만, 섬유의 방향성을 고려하여 공시체 크기를 제안하고 있는 것으로 예측된다. 섬유시험은 KS F 2403에 따라 제작하고, 시험방법은 KS F 2405(압축)^[13]에 따라 수행하였다. 가력 장비는 2000kN 압축 시험기를 사용하였다.

압축 소재실험 결과를 요약하면 Table 5와 같이 SFRC에 의한 압축강도 증가율은 일정한 경향을 갖고 있지 않지만, 혼입율이 증가함에 따라 강도증진 추세를 볼 수 있다. 강섬유 0.375% 보강될 때 미 혼입된 압축강도에 비해 약10% 압축 강도가 증가되는 것으로 평가되었다. 이는 콘크리트의 미세균열 제어작용에 의해 강도증진에 영향을 준 결과로 보인다.

3.3 구조성능 실험결과

전체 실험체의 초기강성, 최대내력은 Table 6과 같으며, 실험체의 하중-축 변위 관계를 Fig. 4에 나타냈다.

이때 항복강도(P_y , ○), 최대내력(P_u , △) 그리고 최대내

Table 6. Initial stiffness and maximum load capacity

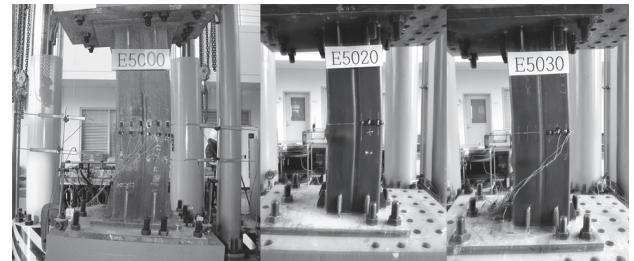
Specimens	Initial Stiffness (kN/mm)	Yield Load P_y (kN)	Maximum Load P_u (kN)	$0.8P_u$ (kN)
C0000	922	5675	7089	6026
C0008	737	5699	7204	6123
C0020	819	6403	7460	6341
C0030	875	6873	7682	6529
E2500	445	4346	5429	4615
E2520	519	3195	4405	3744
E2530	538	3220	4491	3818
E5000	303	3145	4085	3473
E5020	304	2068	2920	2520
E5030	241	1970	3060	2605

력 이후 80%까지 떨어진 내력($0.8P_{max}$, ◇)을 표기하였다. 항복강도 산정은 하중-변위관계에서 초기기울기의 직선과 초기강성의 1/3기울기 직선교점에 해당하는 점을 항복하중으로 정의하였다. 편심축력 실험체는 초기 강성이 낮아 항복강도가 비교적 낮게 평가되는 경향을 보이고 있다. 중심축력 시험체의 최대내력은 편심 시험체보다 크게 증진되고, 초기강성 또한 우수한 것으로 나타났다. 하지만 최대내력 이후의 내력 양상을 살펴보면 급격하게 내력이 감소되는 것을 알 수 있다.

편심실험체의 경우 완만한 내력 감소를 보이며 매우 연성적으로 발휘된 것을 알 수 있다. 또한 편심비가 커질수록 연



(a) centric loading



(b) Eccentric loading

Fig. 5. Failure mode

성적인 효과는 더 증대 된 것으로 나타나고 있다. 이는 편심 거리가 증가함에 따라 휨 거동의 영향이 커지므로 최대내력 이후의 내력감소율이 저감되는 것으로 평가된다. 한편 강성 유 혼입율에 따른 내력을 비교할 때, 중심 축력과 편심축력 모두 혼입율 증가에 따라 내력상승 변화를 갖고 있는 것으로 평가되었다. 실험종료 후 강관 좌굴모드 양상은 Fig. 5에 나열하였다.

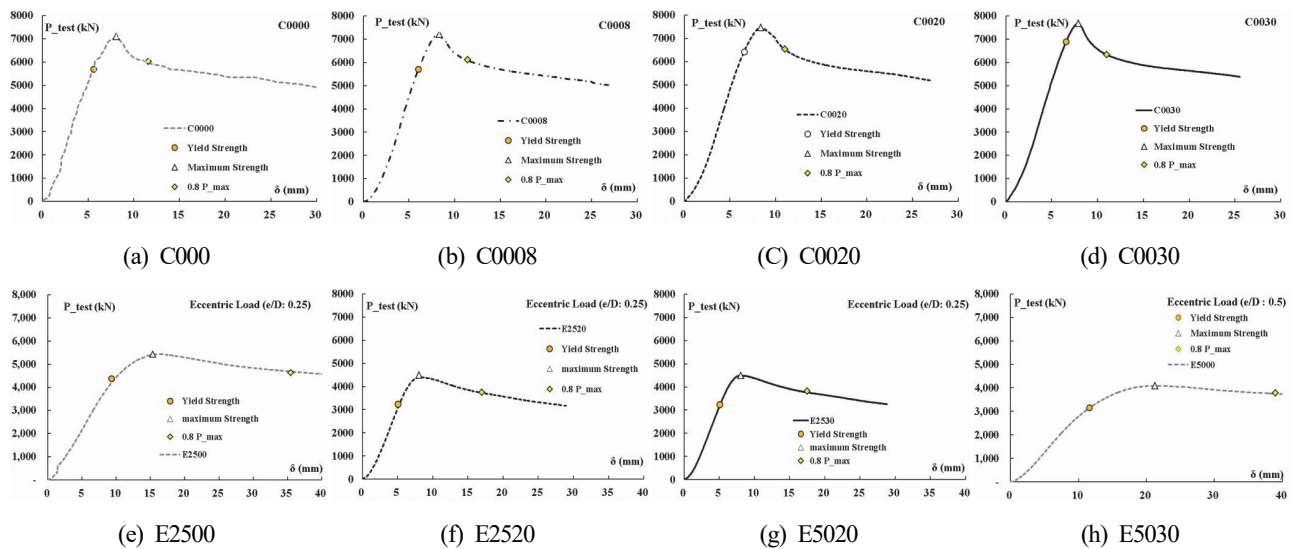


Fig. 4. Load- Axial displacement curve each specimen

4. 분석 및 고찰

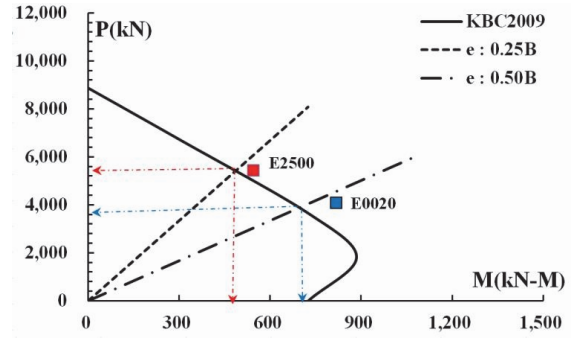
4.1 현행 설계식과의 비교 검토

현행 설계식(KBC2009)^{[14],[15]}과 실험결과를 비교하여 설계식 적용에 대한 적합성을 비교해 보고자 한다. 현행규준에 의해 작도된 P-M상관관계에 각 편심기울기를 통해 편심축력 상태의 축력과 모멘트 강도를 예측할 수 있다. 이때 콘크리트 압축강도와 강재 항복강도는 모두 소재시험을 통해 얻은 결과를 반영하였다. 전체 실험결과와 규준식을 통해 얻은 설계값을 Table 7에 정리하였다. 설계식에 의해 예측된 내력을 각 실험값으로 나누어 무차원 한 결과 전반적으로 실험결과가 상회한 것으로 나타나고 있다. Fig. 6은 각 P-M 상관관계를 나타내고 있다.

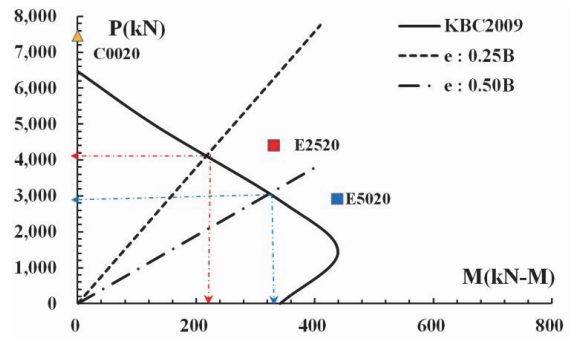
실험결과와 비교했을 때 설계강도 값은 대체로 보수적인 관계에 있다. 순수 축력상태의 경우 약 1.12~1.15배 차이를 갖는다. 편심을 받는 부재의 경우 축 강도는 미비한 차이를 갖는 반면, 휨 강도의 경우 약 1.3~1.4배 이상 설계 강도보다 상회한 결과를 나타내고 있다. 콘크리트의 취성적인 거동을 강섬유로 인해 보완되고 인성적인 거동이 전체 내력과 거동에 향상되었음을 알 수 있다. 정리하면, 일반적으로 모멘트는 강재에서 저항 되었지만, SFRC가 충전됨에 따라 일정 모멘트를 콘크리트에서도 분담한 것으로 보인다. 즉, 강섬유 보강으로 인해 기둥자체의 인성과 변형성능이 개선된 결과로 판단된다.

Table 7. Compared with design values(KBC 2009)

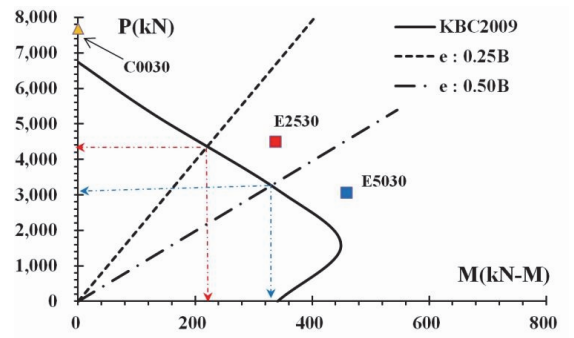
Specimen	P_u (kN)	P_{KBC} (kN)	P_u/P_{KBC}	M_n (kN·M)	M_{KBC} (kN·M)	M_n/M_{KBC}
C0000	7,089	6,335	1.12	-	-	-
C0008	7,204	6,402	1.13	-	-	-
C0020	7,460	6,470	1.15	-	-	-
C0030	7,682	6,739	1.14	-	-	-
E2500	5,430	5,500	0.99	543	550	0.99
E2520	4,405	4,000	1.10	330	230	1.44
E2530	4,491	4,400	1.02	337	230	1.46
E5000	4,086	3,980	1.03	817	810	1.01
E5020	2,920	2,900	1.01	438	340	1.29
E5030	3,060	3,000	1.02	459	350	1.31



(a) Diameter: 400mm Thick.: 9mm (Vf: 0%)



(b) Diameter: 300mm Thick.: 6mm (Vf: 0.25%)



(c) Diameter: 300mm Thick.: 6mm (Vf: 0.375%)

Fig. 6. P-M Relationship

4.2 강섬유 혼입율에 따른 내력 증가율

연구 주요변수 중 하나는 강섬유 혼입율이다. 경제적 측면을 고려한다면 최적의 강섬유 혼입율 파악하는 것은 매우 중요하다. 따라서 강섬유 혼입율에 의해 압축 및 휨 내력에 미치는 영향을 파악하고자 한다. 중심축력의 경우 혼입율이 0%일 때를 기준으로 비교 하였고, 편심축력의 경우 혼입율 0.25%(RI:20)을 기준으로 하였다. 혼입율에 따른 부재의 내력 증가율을 Table 8에 나타냈다. 비교대상의 실험체는 동일한 단면적과 길이를 갖고 있다. 중심축력의 경우 0.375% 강섬유 혼입될 경우 약 8%의 내력 향상되었다. 편심축력의

경우 0.25% 혼입에서 0.375%로 증가될 때 축력과 휨 모멘트가 약 1.02~1.05배 증가되는 것을 알 수 있다. 섬유보강 지수(RI)에 따른 내력 증가율을 강섬유 배합 질량과 비교해보면, 실험체 당 콘크리트는 195kg의 질량을 갖고 있다. 이때 강섬유 0.375%(RI:30) 혼입될 경우 약 0.73kg의 섬유가 추가 배합된다. 비교적 적은 강섬유 혼입으로도 내력과 거동이 향상될 수 있다는 결과를 말하고 있다. 위와 같은 분석결과는 매우 합리적인 단면설계를 기대할 수 있으며 휨모멘트가 집중되는 기둥부재의 경우 경제적인 구조설계를 기대할 수 있다. 따라서 강섬유와 콘크리트와의 합성작용에 대한 내력향상을 설계에 적극적으로 반영할 필요가 있다.

4.3 편심비에 따른 내력영향

기둥의 거동에 영향을 미치는 중요한 요인으로서 편심의 영향을 알아보기 위해 다음 중심 축력과 0.25B, 0.5B 편심 축력 실험 결과를 비교해 볼 때, 다음 Table 9와 같다. 전체

Table 8. Influence of mixing ratio

Specimens	RI	P_u (kN)	P_u/P_u (*)	M_u (kN-m)	M_u/M_u (*)
C0000(*)	0	7,089.0	1.00	0	0
C0008	08	7,203.9	1.02	0	0
C0020	20	7,459.7	1.05	0	0
C0030	30	7,681.7	1.08	0	0
E2520(*)	20	4,405.2	1.00	330.4	1.000
E2530	30	4,491.5	1.02	336.9	1.020
E5020(*)	20	2,919.5	1.00	437.9	1.000
E5030	30	3,060.1	1.05	459.0	1.048

Table 9. Influence of eccentricity ratio

Specimens	RI	$P_{centric}$ (kN)	$P_{eccentric}$ (kN)	P_{cen}/P_{Exc}
Po (400×9)	0	10,780	-	1.00
E2500	(fck: 30MPa)		5,430	0.50
E5000			4,086	0.38
C0020	20	7460	-	1.00
E2520	(fck: 42MPa)		4405	0.59
E5020			2920	0.39
C0030	30	7682	-	1.00
E2530	(fck: 46MPa)		4491	0.58
E5030			3060	0.40

적으로 모든 실험체의 편심율에 따른 축력 저감비율은 유사성을 갖고 있다. 중심 축력 실험체를 기준(100%)으로 각 편심비에 따른 축력을 무차원한 결과, 편심비 0.25일 때 축력은 약50~58% 수준이며, 0.5편심비인 경우 약 38~40% 축력이 저항되었음을 알 수 있다.

4.4 연성도 평가

일반적으로 변위 연성도는 극한 변위(δ_u) 대비 항복 변위(δ_y)로 나타낸다. 변위 연성도를 이용하여 각 시험체의 연성도를 분석하고자 한다. 항복과 최대강도와 그 시점의 변위에 대한 수치를 실험체 별로 정리하여 Table 10에 나타냈다. 모든 강도와 변위는 앞서 3.2절(Table 3)에 정리된 하중-변위 관계에서 도출됐다. 변위 연성비($\delta_{0.8Pmax}/\delta_y$)를 비교했을 때, 중심축력의 경우 평균 1.78로 약 2배 가까운 연성비를 보이고 있다. 하지만, 강섬유 혼입율과는 크게 영향을 미치고 있지 않는 것으로 평가되었다. 반면에 0.25B편심 부재의 경우 평균 약 3.53, 0.5B편심은 4.00으로 매우 높은 연성도를 갖는 것으로 평가 되었다. 또한 강섬유 혼입량이 증가할 수록 그 추세도 우세하는 것으로 나타났다. 즉, 강섬유 콘크리트는 인장응력을 받을 경우 향상범위가 극대화 되는 것으로 판단된다.

앞서 선행연구 분석에서는 강섬유 보강 콘크리트 충전강관기둥의 실험적 연구를 소개하였다. 그 중 Zhong Tao(2007) 연구에는 본 실험과 사용된 강섬유의 형상과 강재 및 콘크리트의 재료강도가 가장 유사하여 실험결과를 비교해 보고자 한다. 비교대상((UCFT: 일반 각형 강관 + 일반 콘크리트), (UFRC: 일반 각형 강관 + 강섬유 보강 콘크리트))들은 중심

Table 10. Ductility index

	δ_y (mm)	δ_u (mm)	$\delta_{0.8Pmax}$ (mm)	δ_u/δ_y	$\delta_{0.8max}/\delta_y$
C0000	6.25	8.1	11.6	1.44	1.85
C0008	6.04	8.3	11.4	1.37	1.89
C0020	6.50	8.5	11.2	1.29	1.69
C0030	6.57	7.9	11.0	1.20	1.67
E2500	9.37	15.3	32.0	1.64	3.41
E2520	5.05	8.2	18.0	1.63	3.56
E2530	5.09	8.1	18.5	1.58	3.63
E5000	11.62	21.3	39.0	1.83	3.36
E5020	6.23	10.6	26.5	1.71	4.25
E5030	5.92	10.8	26.0	1.83	4.39

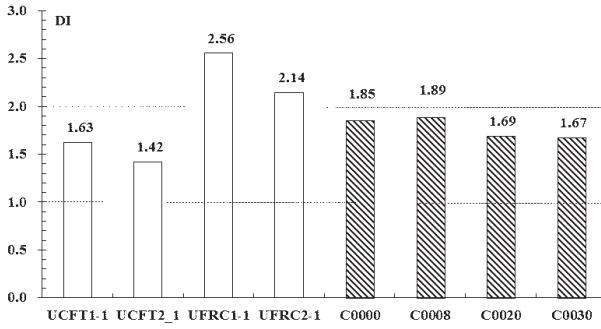


Fig. 7. Comparison of ductility index

가력 실험으로 하중-변위관계를 통한 축강도와 연성도를 비교하고자 한다. Fig. 7은 항복시점의 변위를 최대내력이후 80%까지 떨어진 파괴까지의 변위로 나누어 무차원 하였다. 강섬유가 2% 혼입된 UFRC 실험체는 2배 이상의 연성비를 나타내고 있어 비교 대상 중 확연하게 차이를 보여주고 있다. 그럼에도 본 실험체의 경우 강섬유 혼입량이 0.01~0.375%의 소량임을 감안했을 때 1.67~1.89배의 연성비 확보는 매우 경쟁력있는 부재로 보여진다. 이런 결과는 강섬유 혼입만에 의한 평가가 아닌, 강관 형상 자체인 내부 앵커와 강섬유 보강 콘크리트가 서로 상호작용 하에 합성작용에 의한 결과로 분석된다.

5. 결론

내부 앵커형 용접조립 각형 합성기둥 강섬유 보강 콘크리트를 충전하여 구조 거동을 고찰하였다. 강섬유 혼입량과 가력조건을 변수로 하여 총 10개의 단주를 제작하여 압축재하 실험을 수행하였다. 각 변수에 따른 분석을 통해 아래와 같은 결과를 도출할 수 있었다.

- (1) 강섬유 콘크리트의 소재시험 결과 혼입율이 증가함에 따라 강도증진 추세를 볼 수 있으며, 강섬유 0.375% 보강될 때 미 혼입된 압축강도에 비해 약10% 압축 강도가 증가되었다. 이는 콘크리트의 미세균열 제어작용에 의해 강도증진에 영향을 준 결과로 보이며, 콘크리트가 삼축 응력을 받는 충전형 기둥의 경우에는 구속효과와 강섬유의 합성효과까지 더해져 콘크리트 압축강도가 극대화될 것으로 평가된다.
- (2) 현행규준 설계식(KBC2009)과 실험결과를 비교한 결과, 규준식은 매우 보수적으로 평가하고 있었다. 순수

축력의 경우 약 1.12~1.15배, 편심 부재의 경우 설계 휨 강도보다 평균 1.5배 이상 내력차를 갖고 있었다. 따라서 강섬유 보강 합성기둥 설계 시 국내 건축구조 규준을 그대로 적용하기에는 비효율적인 설계가 될 우려가 있다.

- (3) 강섬유 혼입율에 따른 내력증가율을 분석한 결과 중심축력의 경우 일반 콘크리트 대비 강섬유 0.375% 보강 시 약 8% 내력 향상되며, 편심축력의 경우 0.25% 혼입에서 0.375%로 증가될 때 휨모멘트가 약 1.02~1.05배 증가되었다. 미소 분량의 강섬유 혼입으로 축력과 휨 내력이 향상 가능한 것은 매우 합리적인 단면설계가 가능하며 이를 적극적으로 설계에 반영될 필요가 있다.
- (4) 하중-변위 관계를 통해 연성비를 분석한 결과, 편심실험체의 경우에는 강섬유 혼입량과 비례적인 관계에 있으며 0.375% 강섬유 혼입된 실험체는 3.5~4.0으로 매우 높은 연성비를 갖는 것으로 평가 되었다. 한편, 중심축력을 받은 경우 강섬유 혼입율과는 크게 영향을 미치고 있지 않는 것으로 평가되었다.
- (5) 선행연구 결과와 연성비를 비교 했을 때 상대적으로 수치는 낮게 평가되었지만, 강섬유 혼입량이 1/4수준임을 감안했을 때 매우 효과적인 결과로 추정된다. 이러한 결과는 강섬유 콘크리트와 강관 리브 상호작용에 의해 합성효과가 더해진 결과로 분석된다.

참고문헌(References)

- [1] 이철호, 강기용, 김성용, 구철희(2013) 각형 콘크리트 충전 강관 기둥 부재의 구조설계 기준 비교연구, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제4호, pp.389-398. Lee, C.H., Kang, K.Y., Kim, S.Y., and Koo, C.H. (2013) Review of Structural Design Provisions Rectangular Concrete Filled Tubular Columns, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.4, pp.389-398.
- [2] 최인락, 정경수, 김진호, 홍건호(2012) 이중강종을 사용한 고강도 CFT 합성부재의 구조성능, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제6호, pp.711-723. Choi, I.R., Chung, K.S., Kim, J.H., and Hong, K.H. (2012) Structural Performance of High-Strength Concrete-Filled Steel Tube Steel Columns Using Different Strength Steels, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No.6, pp.711-723.
- [3] 김선희, 염경수, 최성모(2013) 내부앵커형 콘크리트 충전 기둥의 내력 및 변형 능력에 관한 연구, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제4호, pp.347-357.

Kim, S.H., Yom, K.S., and Choi, S.M. (2013) A Study on the Load Carrying Capacity and Deformation Capacity of the Internal Anchors Welded Cold Formed Concrete Filled Columns, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.4, pp.347-357 (in Korean).

[4] Hatzigeorgiou, G.D., and Beskos, D.E. (2005) Minimum Cost Design of Fiber-Reinforced Concrete-Filled Steel Tubular Columns, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.61, No.2, pp.167-182.

[5] Craig, R.J., McConnell, J., Germann, H., Dib, N., and Kashani, F. (1984) Behavior of Reinforced Fibrous Concrete Columns, *Fiber Reinforced Concrete - International Symposium (SP-81)*, American Concrete Institute, USA, pp.69-105.

[6] Campione, G., Mindess, S., Scibilia, N., and Zingone, G. (2000) Strength of Hollow Circular Steel Sections Filled with Fiber Reinforced Concrete, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Canadian Science Publishing (NRC Research Press), Vol.27, No.2, pp.364-372.

[7] Tokgöz, S., and Dundar, C. (2010) Experimental Study on Steel Tubular Column In-Filled with Plain Steel Fiber Reinforced Concrete, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, Vol.48, No.6, pp.414-422.

[8] Gopal, S.R., and Manoharan, P.D. (2006) Experimental Behavior of Eccentrically Loaded Slender Circular Hollow Steel Columns In-Filled with Fibre Reinforced Concrete, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.62, No.5, pp.513-520.

[9] Yiyan, L., Shan, L., and Juan, C. (2011), Research on Behaviors of Steel Fiber Reinforced Concrete Filled Steel tube Columns Under Axial Load, *Advanced Materials Research*, 163, pp.596-599.

[10] Tao, Z., Han, L.-H., and Wang, D.-Y. (2007) Experimental Behavior of Concrete-Filled Stiffened Thin-Walled Steel Tubular Columns, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, Vol.45, No.5, pp.517-527.

[11] JSCE Concrete Committee (1984) Method of Tests for Flexural Strength and Flexural Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete (JSCE-SF4), *Concrete Library International*, Japan Society of Civil Engineers, Vol.3, pp.58-61.

[12] 국가기술표준원(2007) 금속재료 인장시험편(KS B 0801: 2007). Korean Agency for Technology and Standards (2007) *Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials* (KS B 0801: 2007), Korea (in Korean).

[13] 국가기술표준원(2003) 금속 재료 인장 시험 방법(KS B 0802: 2003). Korean Agency for Technology and Standards (2003) *Method of Tensile Test for Metallic Materials* (KS B 0802: 2003), Korea (in Korean).

[14] 대한건축학회(2009) 건축구조기준 (KBC 2009), 대한건축학회. Architectural Institute of Korea (2009) *Korean Building Code - Structural* (KBC 2009), AIK, Korea (in Korean).

[15] 한국강구조학회(2005) 강구조의 설계, 구미서관. KSSC (2005) *Design of Steel Structures*, Goomiseogwan, Korea (in Korean).

색 인(Symbols)

- A_s : 강재의 단면적(mm²)
- A_c : 콘크리트의 단면적(mm²)
- A_{ss} : 리브의 단면적(mm²)
- DI : 연성지수(Ductility index)
- F_y : 강재의 항복강도(MPa)
- F_u : 인장강도(MPa)
- RI : 강섬유보강지수(Reinforced index) $(l_f/d_f) V_f$
- l_f : 강섬유 길이(mm)
- d_f : 강섬유 직경(mm)
- V_f : 콘크리트 1m³당 콘크리트 혼입율
- f_{ck} : 콘크리트 압축강도(MPa)
- δ_y : 항복시점에 발생한 축변위(mm)
- δ_u : 최대내력에 도달된 시점에 발생한 변위(mm)
- $\delta_{0.8max}$: Pu에서 약 80% 내력이 떨어진 시점의 변위(mm)

요 약 : 본 연구에서는 콘크리트 내에 강섬유를 혼입하여 기둥자체의 인성력을 확대시키는 방안을 구조실험을 통해 분석하고자 한다. 내부 앵커형 용접조립 각형 기둥에 강섬유 보강 콘크리트를 충전하여 구조 거동을 고찰하였다. 강섬유 혼입량과 가력조건을 변수로 하여 총 10개의 단주를 제작하여 단조재하 실험을 수행하였다. 그 결과 휨 모멘트력이 발생될 때 강섬유 콘크리트는 특유의 성질인 균열 후 인장 강도가 발현되어 내력 및 거동에 유리하게 작용되는 것으로 보인다. 미소 분량의 강섬유 혼입으로 축력과 휨내력이 향상 가능한 것은 매우 합리적인 단면설계가 가능하며 이를 적극적으로 설계에 반영될 필요가 있다.

핵심용어 : 강섬유, 용접조립 각형 강관, 보강지수, 재하 축, 연성도

Table 11. Studies on SFRC filled columns

No	Author (Year)	Main parameter and note.	Specimen	Column length <i>L</i> (mm)	Slenderness ratio <i>(L/D)</i>	Buckling length. <i>l</i> (mm)	Column strength. <i>Pu</i> (kN)	Ductility factor	
1	Giuseppe Campione (2000)	Mixing ratio (0, 2%) Fiber Type (End hooked, Crimped, Polyolefin)	Plain	1000	8.33	-	889	-	
			hooked SF				976		
			Polyolefin F				980		
			Crimped SF				1055		
2	G.D Hatzigeorgiou (2005)	Plain concrete Vs SFRC	-	-	-	-	-		
3	S. Ramana Gopal (2006)	Plain concrete Vs SFRC Slenderness (13~28)	C1-P	988	13	1128	206	15.0	
			C2-F				196	16.7	
			C4-P	1216	16	1356	184	15.7	
			C5-F				176	16.0	
			C7-P	1444	19	1584	170	14.4	
			C8-F				168	16.0	
			C10-P	1672	22	1812	150	16.0	
			C11-F				156	16.7	
			C13-P	1900	25	2040	135	14.2	
			C14-F				148	15.0	
C16-P	2128	28	2268	125	18.2				
C17-F				140	20.2				
4	Zhong Tao (2007,2009)	Square steel tube shape Plain concrete Vs SFRC Compressive Strength of Concrete	UFRC1-1	1190	20.6	1190	2275	2.556	
			SCFT1-1				2640	1.845	
			UFRC1-2				1740	3.022	
			SCFT1-2				1770	2.473	
			UFRC1-3	2340	40.5	2340	1189	3.326	
			SCFT1-3				1220	2.510	
			UFRC2-1				2285	2.510	
			SCFT2-1				2455	1.818	
			UFRC2-2				1555	3.483	
			SCFT2-2				1660	3.325	
UFRC2-3	2340	40.5	2340	1150	2.969				
SCFT2-3				1200	2.939				
5	Yiyan Lu (2010)	Mixing ratio (0, 0.6 0.9, 1.2%)	SS-0	393	3.0	393	1320.3	2.45	
			SS-1				1389.6	3.85	
			SS-2				1430.0	5.76	
			SS-3				1452.0	6.98	
6	Serkan Tokgoz (2010)	Plain concrete Vs SFRC Width of thickness ratio(10,12,18,23)	CFSTC- I	1250	20.83	1250	128	-	
							17.85	168	-
							15.62	173	-
							12.50	245	-
			CFTC- I - SF				20.83	124	-
							17.85	174	-
							15.62	175	-
							12.50	248	-
			CFSTC- II				20.83	97	-
							17.85	142	-
							15.62	147	-
							12.50	218	-
			CFSTC- II - SF				20.83	104	-
							17.85	148	-
15.62	156	-							
12.50	222	-							
7	P.Gajalakshmi (2012)	Mixing ratio (0,0.75,1,1.25%) Width of thickness ratio 57,38		CFT	1000	8.77	1000	350	1.98
				S1CFT				400	3.15
			S2CFT	490				3.96	
			S3CFT	382				2.56	
			CFT	430				2.45	
			S1CFT	480				4.05	
			S2CFT	560				5.16	
S3CFT	460	3.78							