중심압축력을 받는 내진 건축구조용 각형강관 CFT 부재의 구조성능평가

Structural Performance Evaluation to Centrally Compressed CFT Columns Using Seismic Rectangular Steel Tube

심 현 주¹⁾ · 최 병 정²⁾ · 이 은 택³⁾

Shim, Hyun Ju · Choi, Byong Jeong · Lee, Eun Taik

요 약 : 이 연구에서는 내진구조용 강재(SN)의 냉간롤성형된 각형강관을 사용한 CFT 부재의 중심축하중에 대한 구조성능을 평가한다. 일반적으로 냉간롤성형 및 냉간프레스형성으로 인하여 각형강관의 코너부와 평판부 모두 SN강재에 비해 재질변화가 발생하며, 항복강도와 인장강도 및 항복비의 상한치가 높아지는 경향을 나타낸다. 이러한 현상은 강관의 국부좌굴 이후의 비선형거동에 의해 영향을 주며, 이는 CFT 합성부재와 같이 비선형해석모델에 대하여 영향을 미친다. 따라서 각형강관의 가공열화도를 평가하기 위하여 각형강관의 재료시험을 수행하였고, 세장비 및 판-폭두께비를 실험변수로 하여 일축 압축력을 받는 CFT부재의 구조성능을 평가하였다.

ABSTRACT : In this study, This study investigates the axial load behavior of concrete-filled steel columns using seismic rectangular steel tube with the width-to-thickness and slenderness ratio. Due to cold-roll forming and cold-press forming of steel tube, the flat part and the corner part of the rectangular steel tubes are changed in the material properties compared to SN-steel plate. It was showed the tendency to increase yield strength, tensile strength and upper limit of yield ratio This phenomenon affects the nonlinear behavior after local buckling of the steel tube. Therefore, the coupon test was performed by the processing of rectangular steel tube, in order to assess forming performance. And a total of 6 CFT-columns were tested under monotonic loading condition. Main parameters were the width-thickness ratio and the slenderness ratio.

핵심용어 : 내지진 각형강관, CFT, 판-폭두께비, 세장비

KEYWORDS : seismic rectangular steel tube, CFT, width-thickness ratio, slenderness ratio

1. 서론

강관과 콘크리트 코어 사이의 합성작용으로 우수한 효과를 발휘하는 CFT 기둥부재는 강관에 의한 콘크리트의 3축응력 효과 및 충전콘크리트의 구속효과로 인하여 내력 및 비틀림 강성의 증진, 외부강관의 국부좌굴 억제효과가 있음을 알 수 있다. 또한 H형강이 갖는 단면의 방향성에 따른 내력의 감소를 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 강관기둥은 길이방향의 철근 역할을 함과 동시에 시공시 거푸집의 역할도 한다. 그러나 이러한 강관은 특별한 용접과정을 거쳐서 생산됨으로 강관 가격 및 강관제작비용이 증가하게 된다. 또한 최근에는 CFT

기둥에 허용하는 콘크리트의 강도를 종래 21~50MPa로 제한하던 것을 21~70MPa로 상향조정하였으며, 강관의 판-폭 두께비를 KBC 2009에서는 $\sqrt{3E/F_y}$ 에서 $2.26\sqrt{E/F_y}$ 로 완화하였다. 이러한 제한조건의 완화는 강관의 두께 적용에 있어서 얇은 판재 사용을 활성화함으로써, 강관의 국부좌굴의 영향이 증대하게 되는 요인이 된다. 따라서 사용되는 강관의 재료특성에 관한 이해가 필요하다.

CFT 기둥부재에 관한 연구는 1901년 Swell에 의해 시작되었다. Furlong(1967)은 CFT 단주의 축하중 하한치와 장주의 좌굴하중을 산정하는 식을 제안하였다. 단주의 축하중 하한치는 강관의 항복강도와 강관이 항복할 때 콘크리트에 가해진 압

1) 중앙대학교 건축학과 공학박사(iwandh@paran.com)

2) 경기대학교 건축학과 교수, 공학박사(bjchoi@kyonggi.ac.kr)

3) 교신저자, 중앙대학교 건축학과 교수, 공학박사

(Tel: 02-820-5340, Fax: 02-812-4150, E-mail: etlee@cau.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2013년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

축강도를 누가하여 구할 수 있다고 가정하였다. Tomii 등(1977)은 중심축하중을 받는 기둥에 대한 실험을 수행하였다. 서로 다른 강관두께를 갖는 각기 크기가 다른 원형, 정방형, 팔각형 강관이 실험에 사용되었다. 이 실험에서 CFT 기둥의 두 가지 양상의 파괴거동이 관찰되었는데, 장주에서는 기둥 전체에 걸친 좌굴로 인한 파괴가, 단주에서는 콘크리트의 압괴에 의한 파괴가 압도적이었다. 실험을 통해 CFT 기둥의 축강도는 세장비, 강관의 두께뿐만 아니라 단면형상에 의해 상당히 큰 영향을 받는다고 판단되었다.

강관의 판-폭두께비 및 국부좌굴에 관한 연구로서 Ge 등(1992, 1994)는 큰 판-폭두께비를 갖는 콘크리트 충전 정방형 얇은 강관의 거동과 성능을 연구하였다. 중공강관의 경우 최대내력에 도달하기 전에 가운데 부분에서 국부좌굴이 발생하였고, 콘크리트 충전 강관에서는 최대내력에 도달하자마자 두 마주보는 면에서 국부좌굴이 생겼고 그 후에 나머지 두 면에서 국부좌굴이 일어났다. 좌굴은 중공강관과는 다르게 모든 면에서 모두 밖으로 튀어나온 좌굴양상을 보였다. 강관을 제거한 후 관찰한 결과, 좌굴된 부분의 콘크리트는 완전히 압괴된 반면 다른 부분에서는 아무런 손상이 없는 것으로 나타나 강관의 국부좌굴은 콘크리트 코어가 압괴된 후 그로 인해 발생하는 것을 알 수 있었다. Bridge 등(1992)은 축하중을 받는 얇은 판의 원형 CFT 기둥을 실험하였다. 콘크리트는 59.5MPa로 고강도 콘크리트를 사용하였고, 축내력 성능과 국부좌굴이 강도에 미치는 영향을 결정하기 위해 두 개의 중공강관을 실험하였다. 충전강관의 경우 최대하중에 도달하기 전에 국부좌굴이 잘 형성된다는 것이 관찰되었으나, 어느 정도의 축력 수준에서 발생하는지는 언급이 없다.

국내에서는 이명재(2008), 이성희 등(2008), 김선희 등(2009), 김병호 등(2011) 등이 CFT 기둥부재에 관한 실험적 연구를 수행한 바 있다.

현재 국내에서는 소성변형능력과 용접성을 확보한 고성능 내진 건축구조용 강재로 SN 강재(KS D 3861)와 이를 기본으로 하여 원형강관으로 제관한 STKN(KS D 3632) 및 냉간성형 각형강관(KS D 3864)에는 제조방법에 의해 냉간롤성형 각형강관(SPAR)과 냉간프레스성형 각형강관(SPAP)이 각각 개발·생산되고 있다. 이러한 냉간성형 각형강관의 경우 제관으로 인한 가공경화현상으로 인하여 각형강관의 코너부와 평판부 모두 SN강재에 비해서 재질변화가 발생한다(임성우 등, 2004). 각형강관은 제조상의 2차가공으로 인하여 부재에 발생하는 불균일 탄성 및 소성변형에 영향을 미치는 잔류응력을 발생시키게 되므로 부재 설계시 이를 고려하여야 한다. 따라서 내진 건축구조용 각형강관 적용시 강재의 소성 재료모델 개발이 중요한 필요요인이 된다.

본 연구에서는 이를 위하여 사전연구로서 각형강관의 가공 열화도를 평가하기 위한 SN 강재 및 각형강관의 소재인장시험을 수행하고 일축압축력을 받는 CFT 기둥재의 구조거동에 대한 평가를 수행하였다.

2. 내진각형강관의 재료성능

냉간롤성형(roll-bending) 각형강관의 경우, 제조 프로세스는 제관사마다 약간의 차이가 있으나 일반적으로 강관 외측 이음부를 용접한 다음 SAW로 강관의 내측을 용접하고 내측 용접이 완료되면 밀링머신으로 용접부의 외측을 가우징을 한 다음 강관의 외측을 SAW로 용접한다. 이러한 냉간롤성형 각형강관의 경우 제관으로 인한 가공경화현상으로 인하여 각형강관의 코너부와 평판부 모두 SN강재에 비해서 재질변화가 발생하며, 항복강도와 인장강도 및 항복비의 상한치가 높아지는 경향을 나타내는 것이 일반적이다. 따라서 SN400강재에 대응하는 냉간롤성형 각형강관(SPAR295)의 경우 항복강도를 최소 295MPa로 상향규제하고 하고 있다.

부재설계 시 제관 프로세스에 의한 영향을 고려하여 변형률 경화현상, 항복고원, 탄성영역감소효과 및 바우싱어 효과를

그림 1. 인장시험편 체취 도면

(a) 시험체 셋팅

(b) 시험전경

그림 2. 인장시험 사진

표 1. SN 강관의 기계적 성질

specimens	항복강도 σ_y (MPa)	인장강도 σ_u (MPa)	항복비 σ_y/σ_u (%)	탄성계수 E_s (MPa)	연신율 (%)
P-1	277	406	68	192,943	25
P-2	292	430	68	205,938	26
P-3	274	408	67	195,137	25
mean	281	415	68	198,006	25

표 2. 냉간롤성형 각형강관의 기계적 성질

specimens	항복강도 σ_y (MPa)	인장강도 σ_u (MPa)	항복비 σ_y/σ_u (%)	탄성계수 E_s (MPa)	연신율 (%)
200-A-C1	293	421	70	222,656	44
200-B-C1	239	425	56	102,860	42
200-C-C1	353	416	85	123,479	32
200-D-C1	360	464	78	249,872	-
mean	311	432	72	174,717	39
200-A-L1	297	425	70	218,578	45
200-B-L1	291	385	76	88,871	43
200-C-L1	273	411	66	140,756	31
200-D-L1	347	470	74	251,091	-
mean	302	423	71	174,824	40
total mean	307	427	72	174,770	40

고려한 각형강관의 소성모델이 필수적이다. 이러한 각형강관의 가공열화도를 평가하기 위하여 SN 강재 및 각형강관의 소재인장시험을 수행하였다.

사용된 강재 및 강관의 인장시험편은 KS B 0801 금속재료 인장시험편에 따른다. SN400B 플레이트 및 각형강관에 대하여 그림 1과 같이 길이방향(L)과 폭방향(C)으로 구분하여 1A호 시험편, 5호 시험편을 제작하여 시험하였다. 인장시험은 그림 2와 같이 KS B 0802의 금속재료 인장시험 방법에 따라 경기대학교 소재 500kN(50tf) 유압식 만능시험기(U.T.M)를 사용하여 시험을 실시하였다.

2.1 SN 강재의 기계적 성질

강관으로 가공전의 SN 판재의 경우 인장시험에 대한 결과를 표 1 및 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서 알 수 있듯이 항복점 및 소성흐름 구간이 명확하게 발생하였다. 항복강도는 평균 281MPa으로 SN400B 강재의 기준값인 235MPa을 20%를 상회하는 것으로 나타났으며 이 때의 항복변형률은 2.402×10^{-6} 으로 관찰되었다. 인장강도는 평균 415MPa로 기준값인 400MPa을 4% 상회하는 것으로 나타났다. 부재의 소성 변형능력을 나타내는 항복비는 평균 68%로 상당히 우수한 값

그림 3. SN 강재의 응력-변형률 관계 그래프

(a) 길이방향

(b) 폭방향

그림 4. 냉간롤성형 각형강관의 응력-변형률 관계 그래프

을 나타냈고, 연신율은 평균 25%정도로 기준값인 18%보다 40% 증가된 값을 나타냈다. 탄성계수의 경우 평균 198GPa로 일반강재의 205GPa에 비해 3% 감소된 값을 나타내었다.

2.2 냉간롤성형 각형강관의 기계적 성질

냉간롤성형에 의하여 제작된 각형강관 200×200×9에서 5호 시험편을 채취하여 시험한 결과를 표 2 및 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 알 수 있듯이 명확한 항복점을 보이지 않는 전형적인 continuous yielding 현상을 보이고 있으므로 항복점의 경우 0.2% offset 방법을 사용하여 산정하였다. 시험결

과 냉간롤성형 각형강관 시험편의 항복응력은 307MPa으로 앞의 SN판재 대비 9% 증가하였으며, 인장강도는 427MPa로 3% 증가하였다. 항복비는 평균 72%로 6% 증가한 값을, 연신율의 경우 40%로 57% 증가한 값으로 측정되었다. 용접부에서 채취한 인장시험편의 경우 표점거리를 벗어난 물림부 위치에서 파단하여 연신을 측정은 불가능하였다. 탄성계수의 경우 평균 175GPa로 일반강재의 205GPa에 비해 15% 감소된 값을 나타내었다. 이러한 시험결과를 KS 표준에 의한 기준값과 비교하면, 항복강도는 4%, 인장강도 7%, 연신율 72% 증가를 나타냄으로 모두 기준값을 만족하였다.

3. 각형강관 CFT 부재의 단조 압축실험

본 연구에서는 단조하중을 받는 기둥부재의 실험적 연구를 통하여 균등 압축력을 받는 CFT 기둥부재의 응력과 변형도의 관계를 살펴본다. 이 관계에서 특히 중요한 것은 국부좌굴 내력과 국부좌굴한계변형도이다. 이 국부좌굴성능은 소재의 역학적 특성과 단면을 구성하고 있는 판요소의 판-폭두께비에 의해 결정된다. 단주는 소재와 부재의 중간에 위치하고 있고, 국부좌굴에 지배되는 보나 기둥부재의 거동을 알기 위한 기본데이터가 단조압축실험에서 얻어진다. 실험방법은 거의 확립되어 있고, 간단하기 때문에 소재의 성능평가에 있어서도 중요한 역할을 한다. 따라서 본 장에서는 강관의 제조법에 따른 CFT 합성부재의 구조성능 및 역학적 특성을 파악하기 위하여, 냉간롤성형 각형강관을 적용한 CFT 기둥의 압축성능 평가를 위한 실험을 수행하였다.

3.1 실험 계획

3.1.1 실험체 계획

표 3. 각형강관 CFT 부재의 단조 압축실험실험체 일람

실험체	B (mm)	t (mm)	L (mm)	λ	As (mm ²)	Ac (mm ²)	P ₀ (kN)
R22CS	200	9	600	22	6,876	33,124	2,702
R33CS	300	9	900	33	10,476	79,524	4,636
R44CS	400	9	1,200	44	14,076	145,924	6,926
R22CL	200	9	3,500	22	6,876	33,124	2,702
R33CL	300	9	3,500	33	10,476	79,524	4,636
R44CL	400	9	3,500	44	14,076	145,924	6,926

실험체명 :

R □ □ C □
 □ : 세장비 (S=7.5 L=20~45)
 C : 콘크리트 충전
 □ : 강재 판-폭두께비 (22,33,44)
 R : 각형강관

본 실험에서는 냉간롤성형하여 1-seam 용접한 각형강관을 적용한 CFT 합성기둥을 사용하였다. 실험변수로는 강관의 판-폭두께비, 강관 기둥의 세장비가 사용되었다. 표 3에 실험체 일람을 나타내었다. 단조 압축실험체의 경우 압축재 길이(L)는 좌굴의 영향을 최소화하기 위하여 단면 폭(B)의 3배로 계획하였고, 장조 실험체의 경우 실제 건축물에 사용되는 높이인 3,500mm로 계획하였다. KBC 2009에 따른 충전각형강관 판-폭두께비의 기준값($2.26 \sqrt{E/F_y}$)인 59.6 이하를 만족시키면서 각형강관의 $\lambda_p = 29.5$, $\lambda_r = 36.9$ 을 기준으로 한계 판-폭두께비를 넘지 않는 콤팩트(22), 비콤팩트(33), 세장판 요소(44)의 단면이 사용되었다. 세장비의 경우 가장 세장한 부재의 세장비인 44.8은 기준값($4.71 \sqrt{E/F_y} = 124$)보다 작은 값을 나타내고 있다. 이는 실제 기둥의 거동은 비탄성영역에서의 거동이 대부분이므로 이를 대상으로 하였다.

균등한 하중이 작용하고 국부좌굴의 방지를 위하여 실험체의 양 단부에는 두께 40mm의 엔드 플레이트를 설치하였다. 엔드 플레이트의 설치에 콘크리트의 완전한 충전을 위해 하부를 용접하여 접합하고 콘크리트를 타설 후 양생을 마치고 면처리과정을 거친 후 상부를 용접하여 접합하였다. 실험체에 사용된 콘크리트의 경우 설계강도는 21MPa이며, 최대 골재직경은 25mm이다. 타설은 레미콘을 이용하여 수직 타설하였다. 표 4에 콘크리트 배합표 및 평균압축강도를 나타내었다. 공시체 12개를 제작하여 본 실험체와 동일조건에서 양생시켰으며 압축강도시험은 28일 강도 및 실험체 가력과 동시에 하였다. 콘크리트의 평균압축강도는 21.78MPa(표준편차 4.02)로 나타났다.

3.1.2 재하 및 측정방법

실험은 안산에 위치한 한양대학교 초대형 구조실험동의 최대용량 9,800kN의 U.T.M을 이용하여 수행하였다. 실험체의 양단 구속조건은 단순지지로 편심하중에 대한 영향을 최소화하기 위하여 실험체 상하에 구좌를 설치하여 단조가력을 하

그림 5. 단조실험체 계측기 계획

표 4. 콘크리트 배합표 및 압축강도

설계 강도 MPa	W/C (%)	S/A (%)	단위용적중량(kgf/m ³)					Slump (mm)	공기량 (%)	평균 압축강도 (MPa)
			C	W	S	25G	AD1			
21	49.4	48.4	311	127	843	906	2.2	120	4.5	21.78

였다. 실험체 가력 속도는 변위제어방식으로 0.001mm/sec의 속도로 실험을 수행하였다.

실험체의 변형률 계측을 위한 변형게이지를 부착하여 실험체의 하중재하에 따른 응력변화 분포를 확인하였다. 단주 실험

(a) R22CS

(d) R22CL

(b) R33CS

(e) R33CL

(c) R44CS

(f) R44CL

그림 6. 실험체별 최종파괴 양상

(a) 단주 실험체

(b) 장주 실험체

그림 7. 실험체별 하중-변위 관계 그래프

(a) 단주 실험체

(b) 장주 실험체

그림 8. 실험체별 하중-변형률 관계 그래프

표 5. 각형강관 CFT 부재의 단조 압축실험 결과 일람

	항복하중			국부좌굴발생			최대하중			초기 강성	파괴모드
	하중 [kN]	변위 [mm]	변형률 [$\times 10^{-6}$]	하중 [kN]	변위 [mm]	변형률 [$\times 10^{-6}$]	하중 [kN]	변위 [mm]	변형률 [$\times 10^{-6}$]		
R22CS	2,695	3.928	2,303	4,002	7.94	7,848	4,215	15.81	59,703	513	LB
R33CS	4,321	4.658	2,071	6,077	9.63	7,171	6,217	10.8	31,545	906	LB
R44CS	5,290	5.065	1,704	7,007	8.95	4,374	7,007	8.95	24,628	1,169	LB
R22CL	2,684	7.595	1,681	-	-	6,115	3,672	15.68	22,690	360	GL
R33CL	3,887	8.565	1,705	-	-	8,168	5,936	25.9	15,818	530	GL+LB
R44CL	5,302	8.003	1,425	-	-	4,230	6,678	16.69	8,139	734	LB+GL

체의 축방향 변위량은 실험체 사면에 각각 200mm의 변위계(LVDT)를 한 개씩 총 4개를 설치하여 측정하였고, 장주 실험체의 경우 횡방향 변위도 측정하기 위하여 기둥 중앙부 2개의 면에 변위계를 설치하여 총 6개의 변위계가 설치되었다.

3.2 실험 결과

3.2.1 실험체 거동

그림 6에서 각 실험체별 최종 파괴양상을 보여주는 사진을, 그림 7은 각 실험체 별 하중-변위 관계 그래프, 그림 8에서는 각 실험체별 하중-변형률 관계 그래프를 나타내었다.

단주실험체인 기둥의 길이가 3B인 실험체들의 파괴는 일반적으로 콘크리트의 압괴에 따른 강관의 국부좌굴에 의해 발생하였다. 각 실험체에 대한 파괴거동은 다음과 같다. 판-폭두께비가 작은 R22CS 실험체의 경우 초기 하중재하 시 탄성적인 거동을 하며 하중이 증가하다가 하중이 4,020kN을 넘어서는 단계(변위 7.94mm)에서 기둥하부에서 약 150mm 떨어진 지점에 국부좌굴이 관찰되기 시작하였다. 이후 하중의 증가는 상당히 완만하게 진행되었고, 최대하중인 4,215kN(변위 15.81 mm)에 도달한 후 내력저하가 발생하며 국부좌굴의 범위가 점진적으로 확대되어 실험체가 파괴되었다. R33CS 실험체는 하중이 최대하중인 6,217kN(변위 10.80mm)에 다다르자 실험체 상부에서 약 220mm 떨어진 지점에서 국부좌굴이 관찰되기 시작하였다. 국부좌굴이 발생한 후 실험체의 내력저하가 발생하고 국부좌굴의 범위가 점차 확대되어 실험체가 파괴되었다. 판-폭두께비가 가장 큰 R44CS 실험체의 경우 R33CS 실험체와 같이 최대하중에 도달하기 전에는 실험체에 아무런 변화가 발생하지 않았다. 실험체는 최대하중인 7,007kN(변위 8.95mm)에 도달한 이후 실험체의 중앙부에 국부좌굴이 관찰되기 시작하였고, 그 이후 바로 내력저하가 발생하기 시작하였다. 앞선 단주 실험체와 같이 R44CS 실험체는 축변위가 증가함에 따라 국부좌굴이 발생한 부위가 부풀어 오르며 최종 파괴

되었다.

장주실험체인 기둥의 길이가 3,500mm로 동일하고 판-폭두께비가 다른 계열 실험체의 파괴는 강관의 국부좌굴보다는 기둥 전체의 좌굴에 의해 발생하였다. 각 실험체에 대한 파괴거동은 다음과 같다. 세장비가 가장 큰 R22CL 실험체는 단주 실험체와는 달리 축하중이 증가함에 따라 국부좌굴은 발생하지 않고 기둥 전체의 좌굴이 발생하며 파괴되었다. 실험체는 최대하중인 3,672kN(변위 15.68mm)에 도달하기 전에 미세하게 기둥의 좌굴이 관찰되었고, 최대하중 이후 축변위가 증가함에 따라 기둥 전체의 좌굴이 점진적으로 진행되며 실험체가 파괴되었다. R33CL 실험체의 경우 초기 좌굴은 최대하중 5,936 kN(25.90mm)단계까지 기둥 전체의 좌굴양상을 나타내었으나, 최대하중 이후 축변위량이 34mm에 다다르자 기둥 전체의 좌굴과 더불어 기둥의 하부에서 약 1,200mm 지점에서 1차 국부좌굴이 발생하기 시작하였다. 축변위가 더 증가하자 기둥 하부에서 약 200mm 떨어진 지점에서 2차 국부좌굴이 발생하였고, 1차 국부좌굴이 발생한 지점을 기준으로 기둥 전체적인 좌굴이 크게 발생하며 실험체가 파괴되었다. R44CL 실험체는 최대하중 6,678kN(16.69mm)에 도달하자 기둥 전체의 좌굴의 발생 이전에 기둥 하부에서 약 1,300mm 떨어진 지점에서 1차 국부좌굴이 관찰되기 시작하였다. 이후 실험체의 거동은 1차 국부좌굴이 발생한 지점을 기준으로 기둥 전체적인 좌굴이 발생하고 국부좌굴의 범위도 점차 확대되었다. R33CL 실험체와 같이 R44CL 실험체도 축변위량이 증가함에 따라 기둥 하부에서 약 300mm 떨어진 지점에서 2차 국부좌굴이 발생하였고, 기둥 전체의 좌굴이 점진적으로 진행되며 실험체가 파괴되었다.

그림 8에서와 같이 변형률을 살펴보면 컴팩트 단면의 경우 소성경화 현상이 두드러지게 나타나는데 비해 판-폭두께비의 증가에 따라 소성연화 경향이 나타남을 알 수 있다. 판-폭두께비가 증가함에 따라 소성변형률이 52%, 41% 정도 초기에 나타나며, 세장비 증가에 따라 각각 38, 50, 33% 초기에 나타났다.

표 5에 냉간롤성형 각형강관을 적용한 CFT부재의 중심축 하중에 대한 실험결과를 정리하였다. 실험에 의한 항복하중은 초기강성 기울기를 갖는 직선과 초기강성 기울기의 1/3이 되는 직선을 그리고, 평행 이동시켜 만나는 두 직선의 교점을 항복변위로 정의하여 항복하중(P_y) 및 항복변위(δ_y)를 산정하는 방법을 사용하였다.

3.2.2 내력

그림 9(a)의 막대그래프는 각 실험체별 항복강도 및 최대강

표 6. 각 실험체별 강도상승률

실험체명	세장비 ¹⁾	단면분류	P_{max} (kN)	강도상승률			
				$\frac{P_{max}^{2)}}{P_0}$	$\frac{P_{max}^{3)}}{P_0}$	$\frac{P_{max}^{2)}}{P_n}$	$\frac{P_{max}^{3)}}{P_n}$
R22CS	3	CS	4,215	1.560	1.852	1.57	1.62
R33CS	3	NCS	6,127	1.322	1.537	1.35	1.38
R44CS	3	SS	7,007	1.012	1.158	1.02	1.04
R22CL	17.50	CS	3,672	1.359	1.613	1.57	1.62
R33CL	11.67	NCS	5,936	1.280	1.489	1.37	1.41
R44CL	8.75	SS	6,678	0.964	1.103	1.01	1.03

- 1) 세장비는 기둥의 유효길이(L_k)와 단면폭(B)로 구성된 유효세장비(L_k/B)를 기준으로 한다.
- 2) P 산정시 강재의 항복강도를 재료시험에 의한 실제항복응력 적용
- 3) P 산정시 강재의 항복강도를 공칭항복강도를 적용

(a) 실험체별 항복강도 및 최대강도

(b) 실험체별 최대강도와 공칭강도비

그림 9. 실험체별 강도 및 공칭강도비

도를 나타내고 있으며 그림 9(b) 막대그래프는 각 실험체별 최대강도에 대하여 KBC 2009에서 제시하는 축하중을 받는 충전형 합성기둥의 설계압축강도와 비교하였다. 표 6에서 각 실험체별 강도상승율을 나타내었다. 여기에서 P_o 는 세장효과를 고려하지 않는 공칭압축강도이며, P_n 은 휨좌굴한계상태로부터 구해지는 공칭압축강도로서 각각 인장시험을 통한 각형강관의 항복강도를 적용하였다.

축하중을 받는 충전형 합성기둥의 설계 압축강도 ϕP_n 은 휨좌굴한계상태로부터 다음과 같이 구한다(AISC, 2001; 2005).

$$P_e \geq 0.44P_o \text{ 인 경우, } P_n = P_o \left[0.658 \left(\frac{P_o}{P_e} \right) \right]$$

$$\text{여기에서, } P_e = \pi^2 (EI_{eff}) / (KL)^2$$

$$P_o = A_s F_y + A_{sr} F_{yr} + C_2 A_c f'_c$$

$$C_2 = 0.85 \text{ (각형강관의 경우)}$$

$$EI_{eff} = E_s I_s + E_s I_{sr} + C_3 E_c I_c$$

$$C_3 = 0.6 + 2 \left(\frac{A_s}{A_c + A_s} \right) \leq 0.9$$

항복강도는 P_o 대비 77%~100% 시점에서 나타나고 있으며, P_o 대비 평균 88%, P_n 대비 평균 93%에서 항복하는 것으로 나타났다. 최대강도는 P_o 대비 96%~156% 시점에서 나타나고 있으며, P_o 대비 평균 25%, P_n 대비 평균 31%에서 증가하는 것으로 나타났다. CFT 합성기둥의 강도상승율을 살펴보면 판-폭두께비가 각각 22, 33, 44로 증가함에 따라 14%, 35% 감소하였다. 반면 세장비의 변화에 따른 영향은 미비하였다. 그러나 R44CL 실험체의 경우 강도상승률이 재료강도에 대하여 0.96으로 1.0미만인 것으로 나타났다.

3.2.3 연성

실험체의 변형성능을 평가하기 위해 항복변위(δ_y), 종국변위(δ_u)를 산정하였다. 종국변위(δ_u)는 최대내력 이후 내력이 10% 저감되었을 때의 변위로 정의하였다. 연성능력($\bar{\mu}$)은 연성율로 사용되는 μ 에서 탄성변형분을 제한 다음의 식으로 정의한다.

$$\bar{\mu} = \mu - 1 = \frac{\delta_u}{\delta_y} - 1 = \frac{\delta_u - \delta_y}{\delta_y}$$

단주 실험체의 경우 변형성능은 판-폭두께비가 증가할수록 낮은 값을 나타내었다.

표 7. 각 실험체별 변형성능

실험체	P_y (kN)	δ_y (mm)	P_u (kN)	δ_u (mm)	$\bar{\mu}$
R22CS	2,695	3.928	3,788	21.01	4.35
R33CS	4,321	4.658	5,501	14.52	2.12
R44CS	5,290	5.065	6,297	12.38	1.44
R22CL	2,684	7.595	3,305	24.33	2.20
R33CL	3,887	8.565	5,363	36.33	3.24
R44CL	5,302	8.003	6,011	21.77	1.72

4. 결 론

본 연구에서는 내지진 각형강관을 적용한 CFT 합성부재의 구조거동을 평가하기 위하여 강관의 판-폭두께비, 강관기둥의 세장비를 주요 실험변수로 하여 압축실험을 수행하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 내진 각형강관을 적용한 CFT 합성기둥은 단주의 경우 강관의 국부좌굴 발생에 따른 파괴형태를 나타내었으며, 장주의 경우 기둥 전체의 좌굴에 따른 파괴가 이루어졌다. 또한, 장주의 경우 판-폭두께비가 큰 실험체의 경우 기둥 전체의 좌굴과 더불어 국부좌굴도 발생하는 것으로 나타났다.
- (2) 컴팩트 단면의 경우 소성경화 현상이 두드러지게 나타나는데 비해 판-폭두께비의 증가에 따라 소성연화 경향이 나타났다. 판-폭두께비가 증가함에 따라 소성변형률이 52%, 41% 정도 초기에 나타나며, 세장비 증가에 따라 각각 38.50, 33% 초기에 나타났다.
- (3) 강도상승률의 경우 판-폭두께비와 세장비가 증가할수록 감소하였으며, 판-폭두께비가 각각 22, 33, 44로 증가함에 따라 14%, 35% 감소하였다.
- (4) 실험결과 판-폭두께비와 세장비에 따라 강도상승률의 차이는 있지만 강재의 설계기준강도를 적용한 누가강도(P_0)는 모두 만족하는 것으로 나타났다. 그러나 강재의 인장시험을 통해 얻은 항복강도를 적용할 경우 R44CL 실험체는 1.0 미만의 강도상승률을 갖는다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(No. 314-2008-1-D00452)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

참 고 문 헌

- 김병호, 심현주, 최병정, 이은택(2011) 축력과 반복수평력을 받는 콘크리트 충전 내진 각형강관 기둥의 휨거동 특성, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제23권, 제3호, pp.317-326.
- 김선희, 최영환, 최성모(2009) 폭두께비가 큰 각형CFT 단주의 설계식, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제21권, 제5호, pp.537-544.
- 대한건축학회(2009) 건축구조기준.
- 이명재(2008) SM570TMC강을 이용한 콘크리트충전강관 합성기둥의 설계기준 항복강도, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제20권, 제1호, pp.205-213.
- 이성희, 최영환, 엄경수, 김진호, 최성모(2008) 용접조립 각형 CFT 단주의 구조특성에 관한 실험적 연구, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제20권, 제5호, pp.645-653.
- 임성우, 최광, 장인화(2004) 건축구조용 냉간성형 강관의 가공성능 평가, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제16권, 제1호, pp.33-42.
- AISC (2001) Manual of Steel Construction - Load & Resistance Factored Design, *American Institute of Steel Construction*.
- AISC (2005) Steel Construction Manual, *American Institute of Steel Construction*.
- Bridge, R.Q. and Webb, J. (1992) Thin-walled circular concrete filled steel tubular columns. In pp. W.S. Easterling and W.M.K. Roddis, Editors, *Compos. construct. steel and conc. II, Engineering Foundation*, ASCE, NY, pp.634-649.
- Furlong, R.W. (1967) Strength of steel-encased concrete beam columns, *ASCE, Journal of Structural Division*, Vol. 93, No. 5, pp.113-124.
- Ge, H.B. and Usami, T. (1992) Strength of concrete-filled thin-walled steel box columns: experiment. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 11, pp.3006-3054.
- Ge, H.B. and Usami, T. (1994) Strength analysis of concrete filled thin-walled steel box columns. *Journal of Constructional Steel Research* 30 pp.259-281.
- Tomii, M., Yoshimura, K., and Morishita, Y. (1977) Experimental Studies on Concrete-Filled Steel Tubular Stub Columns under Concentric Loading, *Proc. Stability of Structures Under Static and Dynamic Loads*, pp.718-741.

(접수일자 : 2012. 3. 16 / 심사일 2012. 4. 12 /
심사완료일 2012. 8. 3)