중심압축하중을 받는 스테인리스 강관 기둥의 좌굴내력에 관한 연구

A Study on the Buckling Strength of Centrally Compressed Stainless Steel Tubular Columns

장 호 주[1)] · 양 영 성[2)]
Jang, Ho Ju *Yang, Young Sung*

요 약 : 본 논문은 스테인리스 각형강관 및 원형강관에 대한 좌굴내력에 관한 연구로서 건축구조용 강재로서의 적용성 검토를 위해, 세장비를 주요 변수로 한 소재의 인장강도실험과 stub-column의 압축강도실험, 기둥의 중심압축실험을 실시하여 강재의 기계적 성질과 기둥의 강도 및 거동을 파악한다. 또한 이론해석과 각국 기준식(AIK-LSD, AISC-LRFD, AIJ-LSD, SIJ-ASD) 및 복수강도곡선의 적용을 통한 이론값과 실험값을 비교함으로서 건축구조용 강재로서 적용성 검토와 구조설계기준 확립을 위한 기초 자료를 구하는데 목적이 있다.

ABSTRACT : The maximum strength of the stainless steel square and the circular hollow section columns, which are cold-formed and TIG welded, is experimented on and analyzed. The paper presents centrally compressed experiments, including stub column tests and coupon tests, on stainless steel pipe columns. A total of 24 stainless steel pipe column experiments are conducted, using the slenderness ratios (L_k/r = 20, 30, 40, 50, 60, 70) as parameters. The experimental results were compared with the design standard curves, AIK-LSD and AISC-LRFD, AIJ-LSD, SIJ-ASD curves, and multiple column curves.

핵 심 용 어 : 스테인리스 각형강관, 스테인리스 원형강관, 세장비, 복수강도곡선

KEYWORDS : stainless steel square hollow section, stainless steel circular hollow section, slenderness ratio, multiple column curves

1. 서 론

강관기둥의 좌굴내력에 영향을 미치는 요인은 항복강도, 세장비, 제작방법, 강종, 단면형, 잔류응력의 분포형태와 크기, 부재의 초기휨과 하중의 불가피한 편심 등으로 매우 복잡하다. 문제는 이들 각각의 요인에 따라 최대내력에 상당한 차이가 생길뿐만 아니라 이론해석도 몇 개의 요인을 파라미터로 한 결정론적 방법으로 좌굴강도를 정할 경우 실제 강관기둥의 강도와 다르게 된다.

그러므로 많은 변수 요인을 복합적으로 포함하는 복수강도곡선을 ECCS(European Convention for Constructional Steel work)와 SSRC(Structural Stability Research Council)에서 수많은 실험을 통한 확률론적 방법에 의해 제안하였다.

강관기둥은 지금까지 많이 사용하여 왔던 H형강 기둥이 갖는 단면의 방향성에 따른 내력의 감소를 줄일 수 있고, 폐단면으로서 압축력에 대한 저항성 및 비틀림 강성이 높고, 가설재가 거의 필요 없다.

또한 기둥부재로 사용할 경우 부재의 중량을 경감할 수 있다는 이점을 갖고 있을 뿐만 아니라 변형 능력이 커서 각광을 받고 있고, 이에 대한 수많은 연구가 이루어졌다.

우리나라에서 사용되어지고 있는 강관은 일반구조용 냉간성형강관 및 용접강관이 폭 넓게 사용되어지고 있으나, 스테인리스강관은 구조용으로는 거의 사용되지 않고 있고, 이를 건축구조용 부재로 사용하기 위한 연구가 거의 미흡한 실정이다. 그러나 일본과 유럽 등지에서는 스테인리스강에 대한 연

1) 정회원, 조선대학교 대학원 건축공학과 박사과정
(Tel:062-230-7141, Fax:062-230-7155, E-mail:caosjjang@hotmail.com)
2) 정회원, 조선대학교 건축학부 교수, 공학박사(ysyang@chosun.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2005년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

구가 이미 이루어져 일부 설계기준이 확립되었고, 건축구조용 강재로서 연구가 계속 이루어지고 있다.

본 연구는 스테인리스 각형강관과 원형강관에 대해 건축구조용 강재로서 적용성 검토를 위해, 단면형상 및 규격, 세장비를 주요 변수로 한 소재의 인장강도실험과 stub-column 압축강도실험, 중심압축 기둥실험을 실시하여, 소재의 기계적 성질과 기둥의 최대내력 및 거동을 파악한다.

또한 이론해석을 통한 비교, 실험결과에 대한 복수강도곡선의 적용을 통해 스테인리스강을 건축구조용 강재로 적용하는데 필요한 기계적 요구 성능 및 적합성 여부를 조사하고, 설계기준의 기초 자료를 구하는데 연구 목적이 있다.

2. 실험 계획 및 방법

본 연구에 사용되는 강관은 KS D 3536(기계구조용 스테인리스 강관)에 의해 제조된 오스테나이트계(austenite)계 STS 304 TKC 각형강관(□-100×100×2.0, 3.0) 원형강관(○-101.6×2.0, 3.0)으로 KS 항복강도는 205N/㎟로 규정되어 있다.

시험편 및 시험체의 명칭은 다음과 같다.

S T - 2.0 - 20

- 세장비(기둥시험체)
- 강관 두께
- T : 인장시험편, S : Stub-column, C : Column
- S : Square, C : Circular

2.1. 인장강도실험 및 stub-column 압축강도실험

재료실험은 인장강도 실험과 stub-column 압축강도실험을 실시한다.

인장강도시험편은 평판부 및 비용접부에서 강관의 규격별로 3개씩 총 12개를 KS B 0801(금속재료 인장시험편)에 규정된 5호(각형강관) 및 12B호(원형강관)에 의해 제작하여 KS B 0802(금소재료 인장시험 방법)에 의해 실험한다.

Stub-column의 압축강도실험의 시험체는 미국의 SSRC 추장에 따라 단면 폭 또는 지름의 3배로 규격에 따라 3개씩 총 12개를 제작한다.

표 1은 시험체 단면 성능을 나타낸 것으로 시험체를 실측한 값을 기준으로 폭(지름)-두께비, 단면적, 단면2차 반경 등을 나타낸 것이다.

시험체 양단구속조건은 단순지지로서 편심하중에 대한 영향을 최소화하기 위해 시험체 단면을 면처리한 후 단면내 등분포 하중을 받도록 시험체 하단에 구좌(球座, spherical block)를 설치하여 U.T.M으로 단순 재하한다.

측정방법은 시험체 변형률을 측정하기 위해 변형 게이지(Wire Strain Gague, 이하 W.S.G라 함)를 시험체 중앙부에 부착하며, 또한 전체적인 축변위를 측정하기 위하여 변위계(Displacement Transducer, 이하 D.T라 함)를 설치한다.

2.2 기둥실험

스테인리스 강관기둥의 역학적 특성을 파악하기 위해 중심축하중을 받는 시험체는 비탄성역에서 좌굴된다고 생각되는 세장비 20~70 범위로 시험체를 계획한다. 기둥 시험체의 파라미터는 세장비 20, 30, 40, 50, 60, 70으로 시험체를 각 규격별로 1개씩 총 24개를 제작한다.

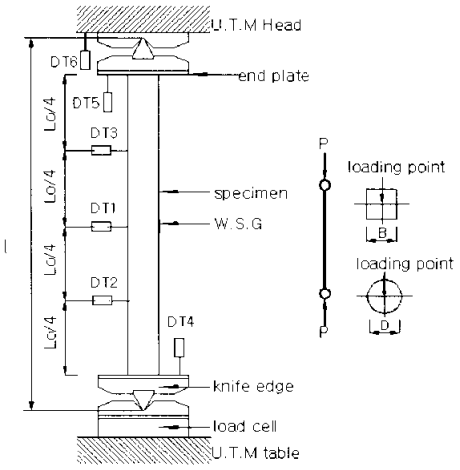


그림 1. 기둥시험체 가력도

표 1. 시험체 단면성능

시험체명	단면규격	B, D (㎝)	t (㎜)	L (㎝)	b/t, D/t	A (㎠)	I (㎝⁴)	r (㎝)	S (㎤)	Z (㎤)	f	갯수
SS-2.0	□-100×100×2.0	10.05	1.79	30.06	54.17	7.07	114.95	4.03	22.87	26.34	1.15	3
SS-3.0	□-100×100×3.0	10.14	2.82	29.98	33.95	11.13	180.53	4.03	35.60	41.55	1.17	3
CS-2.0	○-101.6×2.0	10.11	1.82	30.48	55.62	5.67	69.85	3.51	13.81	17.94	1.30	3
CS-3.0	○-101.6×3.0	10.16	2.81	30.36	36.17	8.72	106.40	3.49	20.94	27.44	1.31	3

주) B,D : 폭,지름, t : 두께, A : 단면적, I : 단면2차모멘트, r : 단면2차반경, S : 탄성단면계수, Z : 소성단면계수, f : 형상계수

시험체의 계획은 표 2와 같고, 그림 1은 시험체의 가력도를 나타낸 것이다. 가력방법은 최대용량 1000kN의 U.T.M으로 양단 단순지지 조건하에서 재하하며, 시험체 양단은 한 방향으로 만 회전이 가능하면서 단부구속을 최소화할 수 있는 나이프에지(knife edge)를 사용한다.

표 2. 기둥시험체 계획

시험체명	A(㎠)	L_k/r	L_0(㎝)	L(㎝) 계획	L(㎝) 실측	k	L_k(㎝)	갯수
SC-2.0-20	7.07	20	57.10	80.00	79.90	0.958	76.58	1
SC-2.0-30		30	97.18	120.10	119.98	0.982	117.79	1
SC-2.0-40		40	137.10	160.10	159.90	0.990	158.27	1
SC-2.0-50		50	177.08	200.10	199.88	0.993	198.58	1
SC-2.0-60		60	217.25	240.10	240.05	0.995	238.96	1
SC-2.0-70		70	257.08	280.10	279.88	0.997	278.95	1
SC-3.0-20	10.74	20	56.80	79.20	79.60	0.958	76.26	1
SC-3.0-30		30	95.80	118.90	118.60	0.982	116.39	1
SC-3.0-40		40	135.58	158.50	158.38	0.990	156.73	1
SC-3.0-50		50	175.30	198.10	198.10	0.993	186.78	1
SC-3.0-60		60	214.70	237.70	237.50	0.995	236.40	1
SC-3.0-70		70	254.40	277.30	277.20	0.997	276.26	1
CC-2.0-20	5.67	20	47.50	70.40	70.30	0.946	66.50	1
CC-2.0-30		30	82.75	105.60	105.55	0.976	103.06	1
CC-2.0-40		40	118.00	140.80	140.80	0.987	138.94	1
CC-2.0-50		50	152.95	176.00	175.75	0.992	174.26	1
CC-2.0-60		60	188.40	211.20	211.20	0.994	209.97	1
CC-2.0-70		70	223.60	246.40	246.40	0.996	245.34	1
CC-3.0-20	8.72	20	46.78	69.70	69.58	0.945	65.74	1
CC-3.0-30		30	81.72	104.60	104.52	0.976	102.00	1
CC-3.0-40		40	116.35	139.40	139.15	0.986	137.27	1
CC-3.0-50		50	151.30	174.30	174.10	0.991	172.60	1
CC-3.0-60		60	186.05	209.10	208.85	0.994	207.60	1
CC-3.0-70		70	221.05	244.00	243.85	0.996	242.78	1

주) A : 단면적, L_k/r : 세장비, L_0 : 순수시험체 길이,
L : 좌굴길이(L_0+end plate(0.9㎝)×2+knife edge(10.5㎝)×2),
k : 강역부를 고려한 등가좌굴길이계수, L_k : 유효좌굴길이

이때 양단에 부착된 엔드플레이트(end plate)와 나이프에지로 인한 강역의 영향을 고려하여 등가좌굴길이(L_k)를 구하며, 세장비는 강관 단면의 단면2차반경(r)을 사용한다. 또한 나이프에지와 시험체는 시험체 단부에 두께 9㎜인 엔드플레이트를 용접하여 볼트를 체결한다.

측정방법은 그림 1과 같이 최대변형이 예상되는 부분에 W.S.G를 부착하고, 축변위, 횡변위, 각변위 등을 측정하기 위해 D.T를 설치한다.

3. 실험결과

3.1 인장강도실험 및 stub-column압축강도실험 결과

인장강도실험 및 stub-column압축강도실험 결과는 최대내력(σ_u), 항복내력(σ_y), 항복비(σ_y/σ_u), 연신율(ε) 등은 표 3과 같이 나타났고, 응력도-변형도 곡선은 그림 2에 나타냈다.

인장강도 실험결과 시험편에 항복참(yield plateau)이 나타나지 않았고, 스테인리스 강관은 항복이후에도 점차 내력이 증가하여 인장내력이 831N/㎟~929N/㎟로 매우 높은 값으로 나타났으며, 인장내력시 변형도 또한 0.5정도로 매우 우수한 변형 능력을 보였다.

스테인리스 강관의 각각 산정된 항복내력을 KS에 규정된 스테인리스 강관 항복기준강도와 비교해 보면, 0.1% 옵셋 내력으로 산정된 스테인리스 강관의 항복내력의 평균은 366N/㎟~393N/㎟로 기준내력보다 각각 1.74~1.87배 높은 값을 보였으며, 0.2% 옵셋 내력으로 산정된 항복내력은 412N/㎟~427N/㎟로 기준내력보다 2배 정도의 값으로 높게 나타났고, 항복내력시 변형도는 각 시험편이 거의 같은 값을 보였다.

휨탄성계수는 평균 201.4GPa로 일반구조용 강관의 탄성

표 3. 인장강도실험 및 stub-column압축강도실험 결과

구 분	시험체명	σ_u (N/㎟)	ε_u	0.1% offset σ_y(N/㎟)	0.1% offset σ_y/σ_u	0.1% offset ε_y	0.1% offset $\sigma_y/{}_t\sigma_y$	0.2% offset σ_y(N/㎟)	0.2% offset σ_y/σ_u	0.2% offset ε_y	0.2% offset $\sigma_y/{}_t\sigma_y$	E_s (Gpa)	ε (%)
인장강도실험	ST-2.0	893	0.4846	366	0.41	0.0025		412	0.51	0.0037		205.1	49.43
	ST-3.0	831	0.5044	386	0.46	0.0026		420	0.46	0.0037		218.3	51.00
	CT-2.0	929	0.5079	393	0.42	0.0030		427	0.46	0.0042		203.5	50.40
	CT-3.0	867	0.5013	370	0.43	0.0031		414	0.48	0.0043		178.6	52.63
Stub-column실험	SS-2.0	276	0.0081	239	0.87	0.0023	0.65	254	0.92	0.0034	0.62		
	SS-3.0	406	0.0052	327	0.81	0.0027	0.85	389	0.96	0.0040	0.93		
	CS-2.0	408	0.0084	322	0.79	0.0026	0.82	360	0.88	0.0037	0.84		
	CS-3.0	461	0.0167	321	0.69	0.0023	0.87	363	0.79	0.0035	0.88		

주) σ_u : 인장내력(최대내력), ε_u : 인장내력시 변형률, σ_y : 항복내력, σ_y/σ_u : 항복비, ε_y : 항복내력시 변형률,
${}_t\sigma_y$: 인장시험편의 항복내력, E_s : 휨탄성계수, ε : 연신율

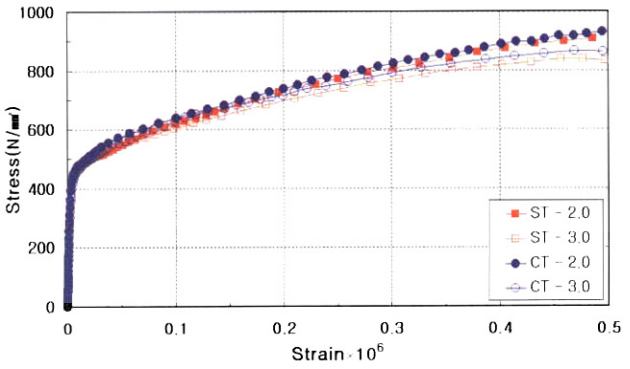
계수 210GPa보다는 다소 낮은 값으로 나타났으나, 연신율은 평균 50.87%로 매우 높은 연신 능력을 보였다.

Stub-column압축강도실험에 의한 최대내력은 각형강관 SS-2.0이 가장 낮은 276N/㎟, 원형강관 CS-3.0이 가장 높은 461N/㎟로 나타나, 강관의 폭(지름)-두께비와 단면형상에 각기 다른 결과를 보이고 있는데, 판의 국부좌굴에 의해 최대내력이 결정되는 각형강관보다는 원형강관이 다소 높은 값으로 나타났고, 최대내력시 변형도 또한 원형강관이 크게 나타났다.

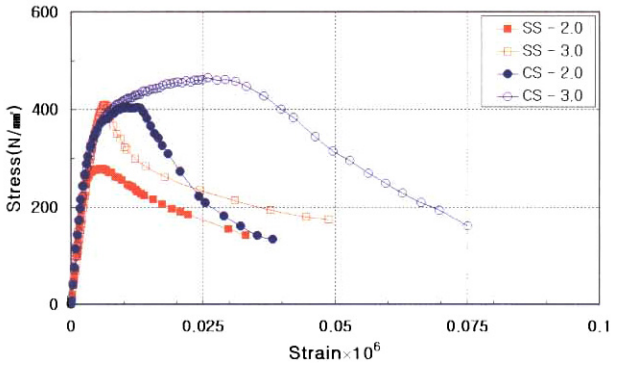
항복내력은 SS-2.0시험체가 가장 낮은 결과를 보였고, 그 외 시험체는 거의 비슷한 결과를 보이고 있는데 0.1% 항복내력은 239N/㎟~327N/㎟, 항복비 0.69~0.87이고, 0.2% 옵셋 항복내력은 254N/㎟~389N/㎟, 항복비 0.79~0.96으로 각형강관의 항복비가 0.9이상으로 높게 나타났다.

Stub-column의 항복내력을 인장강도실험에 의한 항복내력으로 나누어 비교한 결과, 각형강관은 0.65~0.93으로 편차가 크게 나타났지만, 원형강관은 0.82~0.88로 상당히 안정적으로 나타났다.

이는 각형강관이 판의 국부좌굴이나 원형강관에서 2차 가공에 의한 잔류응력 등의 영향으로 사료된다.



(a) 인장시험편



(b) Stub-column

그림 2. 응력도-변형도 곡선

그림 2는 인장강도 시험편과 stub-column의 응력도-변형도 곡선을 나타낸 것이다. 인장강도 시험편의 모든 응력도-변형도 곡선은 항복내력 이후 최대내력까지 꾸준한 내력증가와 아주 우수한 변형 능력을 보여주고 있다.

그러나 stub-column의 응력도-변형도 곡선은 각형강관인 SS-3.0시험체는 최대내력이후 판의 국부좌굴에 의해 급격한 내력저하를 보이고 있고 원형강관인 CS-3.0은 항복내력이후에 꾸준한 내력증가와 소성변형능력을 보이고 있고, 최대내력 이후에도 완만한 내력저하를 보이고 있다.

3.2 기둥실험결과

3.2.1 최대내력

기둥의 최대내력은 실험에 의해 얻어진 기둥이 견딜 수 있는 최대하중에 의해서 결정되는 것으로 한다. 각 시험체의 최대내력과 국부좌굴내력, 변위, 최대내력에 대한 비 등을 표 4에 나타냈다.

표 4. 기둥실험결과

시험체명	λ_c	σ_u (N/㎟)	Δ_u (cm)	δ_u (cm)	σ_{loc} (N/㎟)	$\sigma_u / {}_s\sigma_u$	σ_{loc} / σ_u
SC-2.0-20	0.21	265	2.50	0.29	265	0.96	1
SC-2.0-30	0.32	268	3.19	1.31	268	0.97	1
SC-2.0-40	0.43	266	3.83	0.52	266	0.96	1
SC-2.0-50	0.54	263	4.31	1.04	263	0.95	1
SC-2.0-60	0.64	264	5.01	1.10	264	0.96	1
SC-2.0-70	0.75	220	5.01	10.59	220	0.80	1
SC-3.0-20	0.25	380	3.31	0.85	367	0.94	0.98
SC-3.0-30	0.38	393	5.44	3.01	385	0.97	0.91
SC-3.0-40	0.50	349	5.39	7.51	341	0.86	0.97
SC-3.0-50	0.63	347	6.14	6.52	318	0.85	0.84
SC-3.0-60	0.75	281	8.16	11.73	236	0.69	0.80
SC-3.0-70	0.88	217	5.12	19.49	175	0.53	0.76
CC-2.0-20	0.25	384	2.50	0.29	355	0.94	0.92
CC-2.0-30	0.37	326	3.69	1.74	274	0.80	0.84
CC-2.0-40	0.50	293	3.93	3.18	207	0.72	0.71
CC-2.0-50	0.62	273	4.07	5.40	167	0.67	0.61
CC-2.0-60	0.75	250	3.96	8.51	-	0.61	-
CC-2.0-70	0.87	213	4.43	9.34	-	0.52	-
CC-3.0-20	0.25	400	3.79	13.12	335	0.87	0.84
CC-3.0-30	0.37	351	3.75	2.98	207	0.76	0.59
CC-3.0-40	0.50	350	3.79	3.40	-	0.76	-
CC-3.0-50	0.62	303	4.63	4.16	-	0.66	-
CC-3.0-60	0.75	257	4.34	4.47	-	0.56	-
CC-3.0-70	0.87	229	4.17	11.04	-	0.50	-

주) λ_c : 무차원세장비 $\left(\lambda_c = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{L_k}{r} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}\right)$, Δ_u : 축변위

δ_u : 횡변위, σ_u : 최대내력, σ_{loc} : 국부좌굴내력,

${}_s\sigma_u$: stub-column 최대내력

SC-2.0의 세장비 20~60 시험체는 최대내력이 거의 같은 263N/㎟~268N/㎟의 값으로서 세장비에 관계없이 국부좌굴에 의해 결정되었으며, 그 외 모든 시험체는 213N/㎟~384N/㎟로 세장비가 증가함에 따라 내력이 저하되는 부재좌굴에 의해 결정되었다.

국부좌굴내력의 산정은 실험결과 응력-변위곡선에서 최대내력이후 급격한 내력저하가 시작되는 점을 찾아 산정하였으므로 다소 불확실한 점이 있을 것으로 판단된다. SS-2.0 시험체의 경우 실험과정에서는 육안으로 판의 국부좌굴은 보이나, 내력-변위곡선에서는 뚜렷한 내력의 저하점을 찾을 수 없이 최대내력이후 일정한 내력저하를 보이고 있어 최대내력을 국부좌굴점으로 하였다. 그러나 일부 세장비가 큰 원형강관 시험체는 변위 측정 장비의 측정한계 초과로 국부좌굴점을 산정할 수 없었다.

또한 최대내력을 단주의 최대내력으로 나누어 비교하였을 때, 부재좌굴에 의해 기둥의 내력이 결정된 시험체는 0.94~0.50으로 세장비가 증가할수록 내력저하가 더 크게 나타났으나, 국부좌굴에 의해 최대내력이 결정된 SS-2.0시험체는 0.95~0.97로 거의 값은 값으로 나타났다.

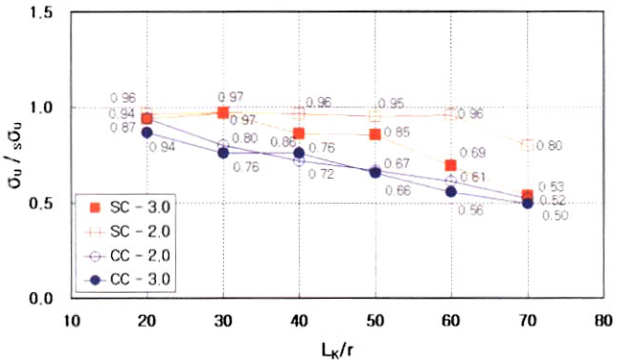


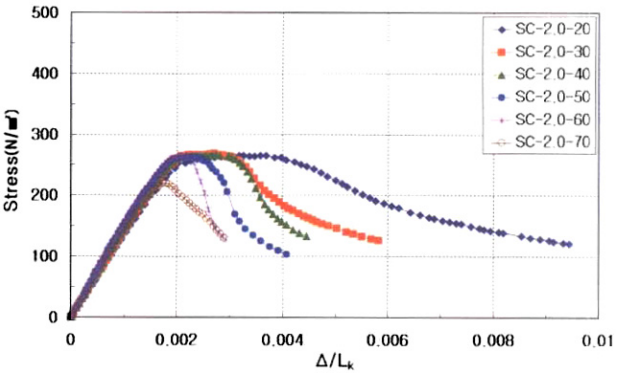
그림 3. 세장비별 최대내력 무차원곡선

그림 3은 기둥 시험체의 최대내력을 단주의 최대내력으로 나누어 무차원하여 세장비별로 나타낸 곡선이다. 국부좌굴에 의해 최대내력이 결정된 기둥 시험체 SS-2.0은 내력의 변화없이 일정한 값을 보이고, 세장비 70은 부재좌굴에 대한 내력저하현상을 보이고 있다.

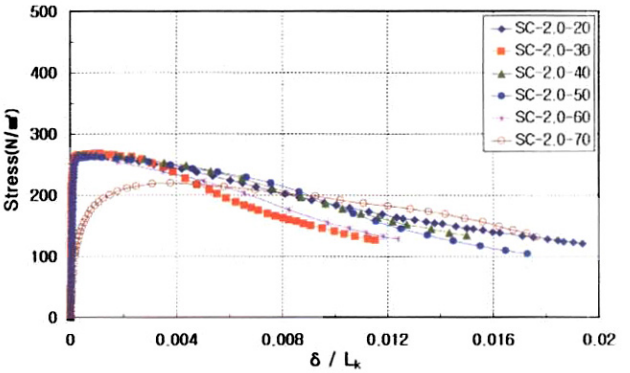
그 외 모든 시험체는 각형강관이 원형강관보다 다소 높게 나타나고 있으나 세장비가 증가하면서 내력이 저하하는 현상을 보이고 있다. 또한 원형강관은 강관의 두께에 관계없이 거의 같은 값으로서 내력저하를 보이고 있으나, 각형강관은 실험결과의 편차가 크게 나타나고 있는데 이는 강관 두께에 따라 판의 국부좌굴이나 소성가공에 의한 영향을 상당히 크게 받기 때문으로 사료된다.

3.2.2 내력-변위 관계

기둥 시험체의 내력-변위 곡선은 스테인리스 각형강관은 그림 4와 그림5, 원형강관은 그림 6과 그림 7에 나타냈다. 종축은 내력, 횡축은 축변위(Δ)와 횡변위(δ)를 기둥의 유효좌굴길이(L_k)로 무차원화 하였다.



(a) 내력-축변위 곡선

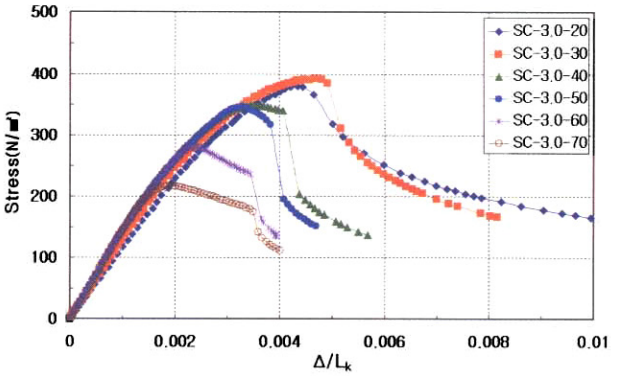


(b) 내력-횡변위 곡선

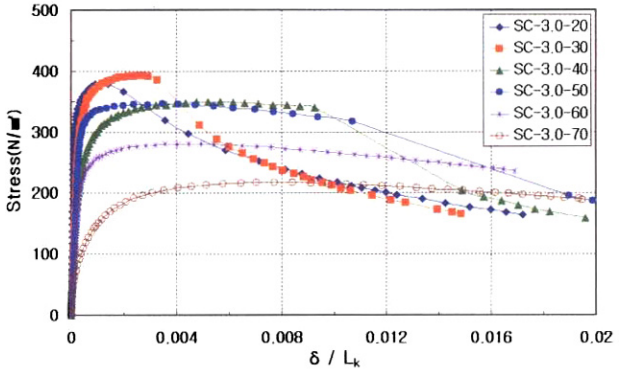
그림 4. 스테인리스 각형강관(2.0T) 내력-변위 곡선

그림 4(a)의 내력-축변위 곡선에서는 세장비 60이하의 시험체는 국부좌굴에 의해 최대내력이 결정되었으므로 내력의 세장비가 증가함에 따라 내력의 증감없이 축변위의 감소만 보이고 있고, 그림 4(b)의 내력-횡변위 곡선 또한 최대내력이 거의 같고 횡변위도 거의 같은 양상을 보이고 있으나 부재좌굴이 발생한 SC-2.0-70 시험체는 횡변위의 증가에 따라 최대내력에 이르러 국부좌굴이 발생하였다.

그림 5(a) 내력-축변위 곡선에서는 최대내력이후 국부좌굴에 의한 급격한 내력저하가 발생하는 것으로 나타났으나, 세장비가 증가하면서 세장효과에 의한 부재좌굴로 축변위의 증가를 보이며 국부좌굴에 이르렀다.



(a) 내력-축변위 곡선

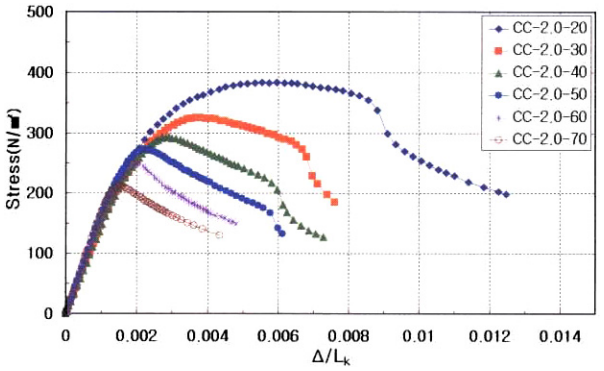


(b) 내력-횡변위 곡선

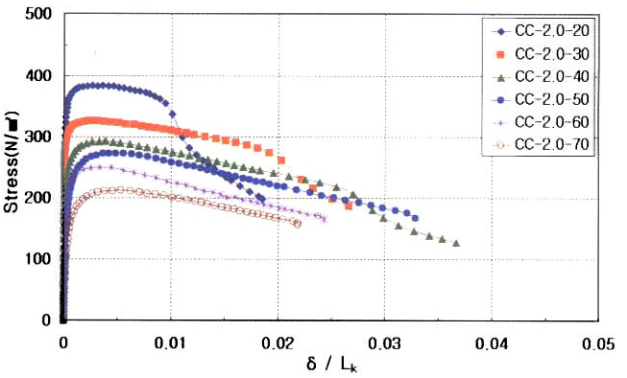
그림 5. 스테인리스 각형강관(3.0T) 내력-변위 곡선

그림 5(b)의 내력-횡변위 곡선에서도 같은 양상을 보이나, 축변위와는 달리 세장비가 증가하면서 횡변위에서는 국부좌굴에 의한 뚜렷한 내력저하현상은 보이지는 않았다.

그림 6과 그림 7의 스테인리스 원형강관은 각형강관과는 달리 최대내력이후 완만한 내력저하와 함께 변위의 증가를 보이고 있고, 국부좌굴에 의한 급격한 내력저하는 세장비가 증가할수록 변위 측정장비의 측정범위를 초과하는 결과를 보여 측정할 수 없었다.

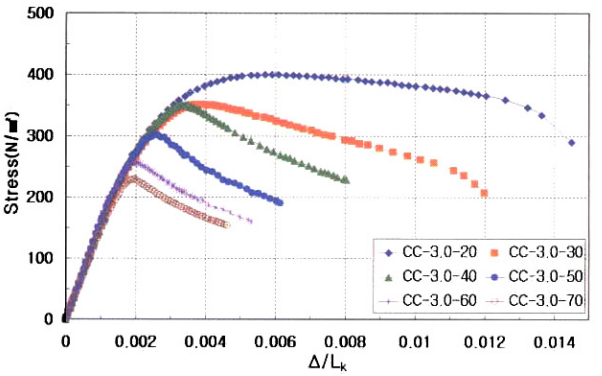


(a) 내력-축변위 곡선

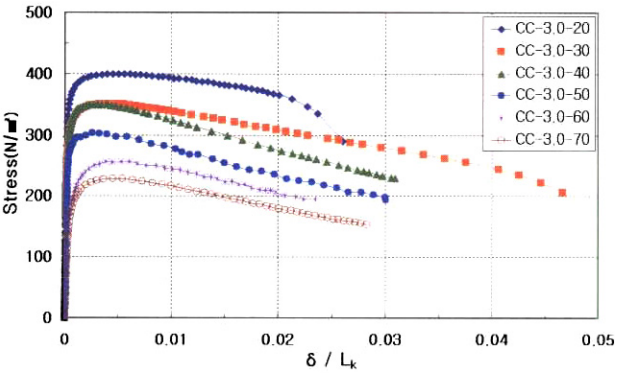


(b) 내력-횡변위 곡선

그림 6. 스테인리스 원형강관(2.0T) 내력-변위 곡선



(a) 내력-축변위 곡선



(b) 내력-횡변위 곡선

그림 7. 스테인리스 원형강관(3.0T) 내력-변위 곡선

그림 7(a)의 내력-축변위 곡선은 세장비가 증가할수록 최대내력이후 내력저하가 더욱 급격히 저하하는 결과를 보이고 있고 축변위의 감소를 보이나, 그림 7(b) 내력-횡변위 곡선은 최대내력이후 세장비에 관계없이 거의 같은 기울기의 내력저하를 보이고 있다. 또한 강관의 두께가 큰 시험체가 국부좌굴발생시까지 변위가 큰 것으로 나타났다.

그림 8과 그림 9는 기둥시험체의 최대내력시 횡변위와 축

변위를 세장비별로 나타낸 곡선으로서 변위가 상당히 작은 값이어서 상수 100을 곱하여 나타냈다.

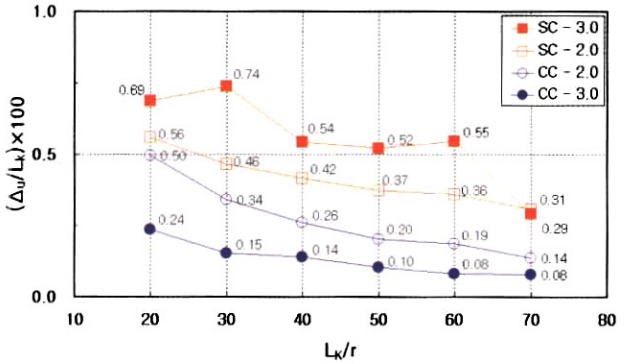


그림 8. 세장비별 축변위 관계

그림 8의 축변위는 각형강관 SC-3.0, 2.0, 원형강관 CC-2.0, 3.0 순으로 작은 축변위의 결과를 보이고 있는데, 각형강관은 강관의 두께가 작고, 원형강관은 강관의 두께가 큰 시험체가 더 작은 축변위를 나타냈다. 또한 모든 시험체는 세장비가 증가할수록 점차 축변위가 감소하는 것으로 나타났다.

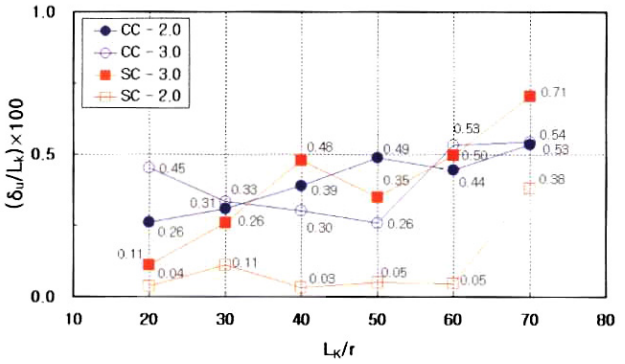


그림 9. 세장비별 횡변위 관계

그림 9의 기둥시험체의 세장비별 횡변위 관계에서는 최대내력이 부재좌굴에 의해 결정된 시험체는 각 세장비별로 편차는 크게 보이고 있으나, 세장비가 증가할수록 횡변위 또한 증가하는 것으로 나타나고 있다. 하지만 국부좌굴에 의해 최대내력이 결정된 SC-2.0의 세장비 20~60 시험체는 거의 같은 횡변위를 보이고 있으나, 세장비 70 시험체는 횡변위의 증가를 보였다.

4. 기둥내력평가

4.1 기준곡선 비교

현재 국내에서는 스테인리스 강관 기둥에 대한 기준을 강관 구조 설계기준에서 별도로 제시하고 있지 않으므로 AIK-LSD, AISC-LRFD, AIJ-LSD, SIJ-ASD(일본 스테인리스 설계·시공기준, Stainless steel Institute of Japan-Allowable Stress Design)에서 제안하고 있는 기준식과 실험값을 비교한다.

본 연구에서 기준식에 적용되는 항복강도(F_y)는 stub-column의 압축실험에서 구한 0.1% 항복내력을 이용하여 비교하였으며, 강도저감계수(ϕ)나 안전율을 제외하고 적용하였다. 기둥의 내력은 강관의 소성내력에 세장효과를 고려하였으며, 그 결과는 표 5와 같다.

기둥시험체의 실험 결과값을 해석값으로 나누어 비교하였을 때, 각형강관은 실험값이 해석값에 비해 1.11~1.38배 높은 것으로 세장비에 대한 영향은 크게 받지 않는 것으로 나타났으나, SC-3.0-70 시험체는 실험값이 해석값에 비해 0.99배로 낮은 것으로 나타났다. 그러나 원형강관은 세장비가 증가하면서 해석값에 비해 낮아지는 결과를 보이는데, CC-2.0의 세장비가 20~50시험체는 1.00~1.27배로 높은 결과를 보였으나 세장비 60 이상은 0.98, 0.91배로 점점 낮아지는 결과를 보였고, CC-3.0-70 시험체도 실험값이 해석값에 비해 0.98배로 낮은 것으로 나타났다.

각국 기준식에 대해 실험값을 비교하였을 때, AIK-LSD와 AISC-LRFD의 기준식은 이론해석의 결과와 거의 비슷한 결과를 보이고 있으며, AIJ-LSD의 기준식은 각형강관 SC-3.0-70 시험체와 CC-2.0-60, 70 및 CC-3.0-70 시험체는 기준식보다 0.93, 0.99, 0.92, 0.99로 낮은 결과를 보이고 있으나 일본 스테인리스 설계·시공 기준인 SIJ-ASD보다는 1.11~1.77배로 상당히 높은 안전측에 있는 것으로 나타났다.

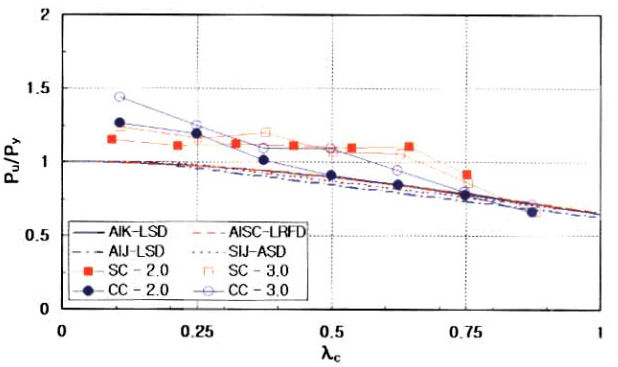


그림 10. Stub-column 0.1% 항복내력 적용시 기준식과 실험값 비교

표 5. 기둥 실험결과와 기준식 비교

시험체명	${}_{exp}F_u$	${}_{anl}F_u$	${}_{exp}F_u$ / ${}_{anl}F_u$	${}_{AIK}F_u$	${}_{AISC}F_u$	${}_{AIJ}F_u$	${}_{SIJ}F_u$	${}_{exp}F_u$ / ${}_{AIK}F_u$	${}_{exp}F_u$ / ${}_{AISC}F_u$	${}_{exp}F_u$ / ${}_{AIJ}F_u$	${}_{exp}F_u$ / ${}_{SIJ}F_u$
SS-2.0	276	242	1.14	238	238	239	239	1.16	1.16	1.15	1.15
SC-2.0-20	265	238	1.11	234	234	232	238	1.13	1.13	1.14	1.11
SC-2.0-30	268	233	1.15	228	229	221	227	1.17	1.17	1.21	1.18
SC-2.0-40	266	225	1.18	221	221	210	216	1.21	1.20	1.27	1.23
SC-2.0-50	263	215	1.22	211	212	198	205	1.24	1.24	1.32	1.28
SC-2.0-60	264	204	1.29	200	201	187	194	1.32	1.32	1.41	1.36
SC-2.0-70	220	192	1.15	187	188	176	183	1.17	1.17	1.25	1.20
SS-3.0	406	301	1.35	326	326	327	327	1.25	1.25	1.24	1.24
SC-3.0-20	380	295	1.29	319	319	313	235	1.19	1.19	1.22	1.62
SC-3.0-30	393	285	1.38	308	309	295	222	1.28	1.27	1.33	1.77
SC-3.0-40	349	273	1.28	294	295	277	209	1.19	1.19	1.26	1.67
SC-3.0-50	347	257	1.35	276	278	259	196	1.25	1.25	1.34	1.77
SC-3.0-60	281	239	1.18	256	258	241	183	1.10	1.09	1.17	1.54
SC-3.0-70	217	219	0.99	235	237	223	170	0.93	0.92	0.97	1.28
CS-2.0	408	321	1.27	320	320	322	322	1.27	1.27	1.27	1.27
CC-2.0-20	384	314	1.22	314	314	308	235	1.23	1.22	1.25	1.64
CC-2.0-30	326	304	1.07	303	304	290	222	1.07	1.07	1.12	1.47
CC-2.0-40	293	290	1.01	289	290	273	209	1.01	1.01	1.08	1.40
CC-2.0-50	273	274	1.00	272	274	255	196	1.00	1.00	1.07	1.39
CC-2.0-60	250	255	0.98	253	255	238	183	0.99	0.98	1.05	1.37
CC-2.0-70	213	234	0.91	232	234	220	171	0.92	0.91	0.97	1.25
CS-3.0	461	319	1.45	319	319	321	321	1.45	1.45	1.44	1.44
CC-3.0-20	400	312	1.28	312	312	307	235	1.28	1.28	1.31	1.70
CC-3.0-30	351	302	1.16	302	302	289	222	1.16	1.16	1.21	1.58
CC-3.0-40	350	289	1.21	288	289	272	209	1.22	1.21	1.29	1.67
CC-3.0-50	303	272	1.11	271	273	254	196	1.12	1.11	1.19	1.54
CC-3.0-60	257	254	1.01	252	254	237	184	1.02	1.01	1.08	1.40
CC-3.0-70	229	233	0.98	231	233	219	171	0.99	0.98	1.04	1.34

주) ${}_{anl}F_u$: 이론해석값, ${}_{exp}F_u$: 실험값, ${}_{AIK}F_u$: AIK-LSD 공칭한계강도, ${}_{AISC}F_u$: AISC-LRFD 공칭한계강도, ${}_{AIJ}F_u$: AIJ-LSD 공칭한계강도, ${}_{SIJ}F_u$: SIJ-ASD 공칭허용강도, 단, 단위는 N/㎟

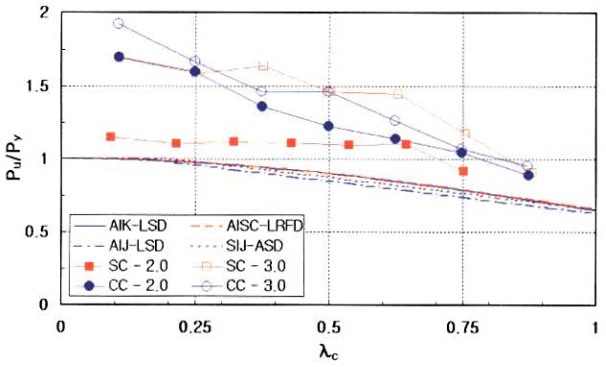


그림 11. 공칭강도 적용시 기준식과 실험값 비교

그림 10은 이들의 결과를 종축은 stub-column의 0.1% 옵셋 내력으로 나누어 무차원화 하였고, 횡축은 무차원세장비로 나타냈다.

그림과 같이 시험체는 세장비가 증가할수록 기준식곡선보다 낮은 실험결과를 보이고 있으며, 특히 CC-2.0시험체가 가장 낮은 결과를 보였다.

그러나 그림 10의 경우는 설계기준강도를 stub-column의 항복내력으로 적용한 경우이고, 설계기준강도를 일반구조용 강관의 항복강도인 235N/㎟을 기준식에 적용하여 실험값과 비교한 경우는 그림 11과 같이 기준곡선을 모두 만족할 수 있는 결과를 보였다.

국부좌굴에 의해 기둥의 최대내력이 결정된 SC-2.0-20~60 시험체는 가장 낮은 결과를 보였으나, 그 외 모든 시험체는 비슷한 비율로서 세장비가 증가하면서 기준곡선에 근접하게 나타나고 있으나, 모두 기준을 상회하는 결과를 보이고 있다.

4.2 복수강도곡선(複數强度曲線) 비교

비탄성좌굴에 대한 기둥좌굴은 CRC(Column Research Council, 현재 SSRC)의 단일강도곡선으로 나타낼 수 있으나, 실제 이상적으로 완전히 직선인 기둥은 없기 때문에 부재의 원처짐을 갖는 기둥의 내력과 좌굴에 대한 실험 및 이론적인 연구가 행해졌다. 연구결과, 실제 기둥내력은 단면내의 잔류응력 분포형태, 단면형상 및 좌굴축에 따라 평균설계곡선으로부터 약 20% 이상의 최대내력값의 흩어짐을 보임으로서 이 같은 변수 등을 만족시킬 수 있는 설계방법으로 복수강도곡선(Multiple Column Curves)의 적용을 필요로 한다.

그림 12와 그림 13은 ECCS 복수강도곡선과 SSRC 복수강도곡선을 나타낸 것으로 항복강도를 stub-column 압축실험에 의한 0.1% 옵셋 내력을 적용하여 비교한 것으로서 종축은 각 세장비에 따른 강관기둥의 최대내력에 각 항복하중으로 무차원화 하였고, 횡축은 무차원세장비로 하여 스테인리스 강관기둥의 실험값과 같이 나타냈다.

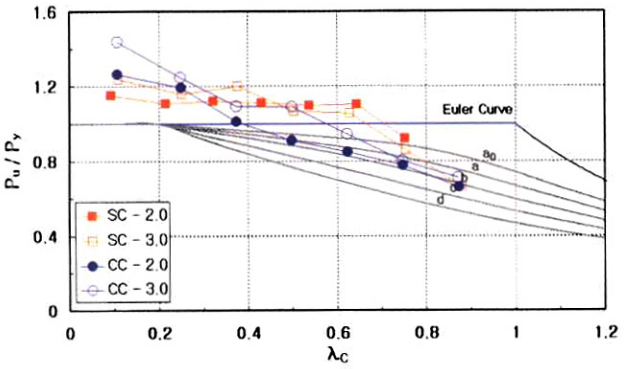


그림 12. ECCS 복수강도곡선과 실험값 비교

그림 12는 ECCS 복수강도곡선과 스테인리스 강관기둥 실험값의 비교로서 각형강관의 경우, SC-2.0 시험체는 무차원세장비 0.8이하에서는 ao곡선을 만족하고 있고, SC-3.0시험체는 무차원세장비 0.7이하에서는 ao곡선을 만족하고 있으나 그 이상의 세장비에서는 급격한 실험값의 저하에 의해 곡선c에 근접하는 값을 보이고 있다.

원형강관의 경우, CC-2.0 시험체는 곡선b를 만족시키는 것으로 나타났으나 무차원세장비 0.8을 지나면서 곡선b 이하의 값으로 나타났으며, CC-3.0시험체는 세장비가 증가할수록 실험값이 저하하고 있으나 곡선b를 만족하는 것으로 나타났다.

그림 13은 SSRC 복수강도곡선과 스테인리스 강관기둥 실험값을 나타낸 곡선으로서 각형강관의 경우, SC-2.0 시험체는 무차원세장비 0.8이하에서는 곡선1을 만족하고 있고, SC-3.0 시험체는 무차원세장비 0.6이하의 시험체의 실험값은 곡선1을 만족하고 있으나 세장비 60, 70시험체는 실험값이 급격하게 저하하여 세장비 70시험체는 곡선2보다 낮은 값을 보이고 있다.

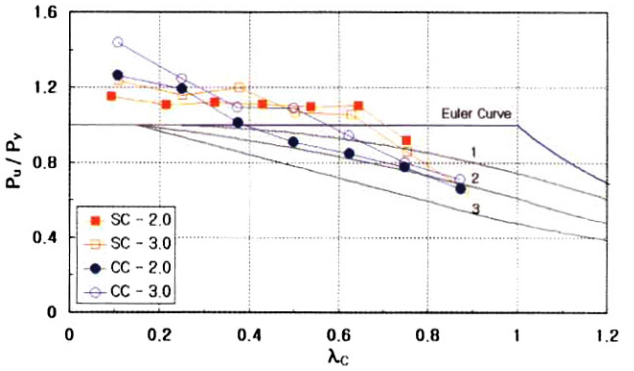


그림 13. SSRC 복수강도곡선과 실험값 비교

원형강관의 경우, CC-2.0 시험체는 세장비 30이하의 시험체의 실험값은 곡선1을 만족시키고 있으나 세장비가 증가할수록 실험값이 점점 감소하여 곡선2에 근접하는 것으로 나타났으며, CC-3.0 시험체는 세장비 50이하의 실험값은 곡선1을 만족하고 있으나 세장비가 증가할수록 곡선2에 근접하는 결과를 보였다.

스테인리스 강관의 실험값을 복수강도곡선에 비교한 결과, 무차원세장비가 0.9이하의 범위 내에서 세장비가 증가할수록 실험값의 저하로 인해 가장 안전한 곡선인 ECCS 복수강도곡선의 곡선b와 SSRC 복수강도곡선의 곡선2을 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결 론

(1) 인장강도 실험결과, 인장내력이 831N/㎟~929N/㎟로 매우 높은 값으로 나타났으며, 연신율이 50.87%로 매우 우수한 변형 능력을 보였다. 항복내력은 KS 규격강도보다 0.1% 옵셋 내력은 1.74~1.87배, 0.2% 옵셋 내력은 2배 정도의 값으로 높게 나타났다. 횡탄성계수는 평균 201.4GPa로 나타났다.

(2) Stub-column의 항복내력은 인장시험편의 항복내력보다 각형강관은 0.65~0.93으로 편차가 크게 나타났지만, 원형강관은 0.82~0.88로 상당히 안정적으로 나타났다. 이는 각형강관이 판의 국부좌굴이나 원형강관에서 2차 가공에 의한 잔류응력 등의 영향으로 사료된다.

(3) 기둥 시험체의 최대내력은 국부좌굴에 의해 최대내력이 결정된 기둥 시험체 SS-2.0은 내력의 변화 없이 일정

한 값을 보이고, 그 외 모든 시험체는 각형강관이 원형강관보다 다소 높게 나타나고 있으나, 세장비가 증가하면서 내력이 저하하는 현상을 보이고 있다.

(4) 기둥 시험체의 축변위는 각형강관의 경우, 강관의 두께가 작고, 원형강관은 강관의 두께가 큰 시험체가 더 작은 축변위를 나타냈으며, 세장비가 증가할수록 점차 축변위가 감소하는 것으로 나타났다. 횡변위는 세장비가 증가할수록 증가하는 것으로 나타나고 있다.

(5) 각국 기준식에 대해 실험값을 비교하였을 때, AIK-LSD와 AISC-LRFD, AIJ-LSD의 기준식은 세장비가 증가할수록 실험값이 기준식보다 다소 낮은 결과를 보였으나, SIJ-ASD 보다는 1.11~1.77배로 상당히 높은 안전측에 있는 것으로 나타났다. 하지만, 설계기준강도를 강관구조설계기준강도인 235N/㎟에 대해 기준식에 적용시 기준곡선을 모두 만족하는 결과를 보였다.

(6) 스테인리스 강관기둥의 실험값을 복수강도곡선에 비교한 결과, 무차원세장비가 0.9이하의 범위 내에서 세장비가 증가할수록 실험값의 저하로 인해 가장 안전한 곡선인 ECCS의 곡선b와 SSRC 곡선2을 적용할 수 있을 것으로 사료되나, 이에 대한 많은 실험 및 연구가 요구된다.

참 고 문 헌

대한건축학회(1998) 강구조 한계상태 설계기준 및 해설

대한건축학회(1998) 강관구조 설계기준 및 해설

대한건축학회(1999) 냉간성형강 구조설계기준 및 해설

이명재(1989. 12) Stainless Steel의 기계적 성질 및 좌굴내력에 관한 연구, **대한건축학회논문집**, 5권 6호, pp. 319-326.

서성연, 김필중, 양영성, 김규석(1993. 10) 냉간성형 원형 및 각형강관부재의 인성에 관한 실험적 연구, **대한건축학회학술발표논문집**, 제13권 제2호, pp.505-510.

서성연, 양영성, 김규석(1998. 10) 냉간성형 원형강관기둥의 좌굴내력에 관한 연구, **대한건축학회논문집**, 14권 10호, pp.35-42.

장인화(1999. 11) 스테인리스강 구조재의 요구특성 및 설계기준, 제5회 철강기술 심포지움 스테인리스강의 제조 및 이용기술, 대한건축학회 철강분과위원회, pp.239-248

장인화, 임성우(2003. 2) 스테인리스 304 강재의 국부좌굴에 관한 연구, **한국강구조학회논문집**, 제15권 1호, pp. 51-57

장호주, 양영성(2003. 6) 스테인리스 강관 기둥의 내력에 관한 연구, 대한건축학회논문집 구조계, 19권 6호, pp. 93-102

장호주, 유재희, 양영성(2003. 10) 스테인리스 강관과 일반구조용 강관 단주내력 비교에 관한 연구, **한국강구조학회논문집**, 15권 5호, pp.561-570

AISC(2001) Manual of Steel Construction - Load and Resistance Factor Design, Third Edition

LRFD(1991) Cold-Formed Steel Design, AISC

EUROCODE No.3(1992) Design of Steel Structures, Commission of the European Communities

日本建築學會(1996) 鋼構造座屈設計指針

日本建築學會(1990) 鋼管構造設計施工指針・同解說

日本ステンレス構造建築協會(1995) ステンレス建築構造 設計施工基準・同解說

日本ステンレス協會,ステンレス建築協會(1995) 新ステンレス鋼利用技術指針, 建設省建築研究所.

(접수일자 : 2004. 12. 15 / 심사일 2004. 12. 23 / 심사완료일 2005. 3. 21)