Journal of the Korean Association for Spatial Structures
Vol. 8, No. 5 (통권 33호), pp.83 ~93, October, 2008

공간구조에 적용되는 일반구조용 강관의 압축내력에 관한 연구

A Study on the Compression Strength of Structural Steel Tube Applied in Spatial Sturucture

백기열*
Baek, Ki-Youl

요 약

국민소득수준의 향상에 따라 국내 건축물의 디자인 및 사용목적의 대한 다양성이 요구되고 있다. 대공간 구조물은 이러한 시대적 요구에 적합한 구조물로서 최근 대공간 구조물에 대한 설계 및 시공법에 관한 관심이 꾸준히 증가하고 있다. 트러스구조는 대공간 구조에 보편적으로 사용되는 구조시스템으로 트러스의 부재는 단면의 효율이 높은 강관을 사용하는 것이 일반적이다. 현재 국내에 유통되고 있는 강관은 생산처에 따라 다양한 제품이 생산되고 있으나 강관 소재의 출처 및 강관 자체의 실제 성능에 관한 연구는 미비한 실정이다. 이 연구는 국내에 유통되고 있는 일반구조용 각형강관, 원형강관 및 비계용 강관에 대하여 소재의 인장시험과 Stub-column 압축시험 및 기둥의 좌굴실험을 통해 강관의 소재성능 및 구조부재로서의 압축성능을 파악하는 것을 목적으로 한다. 소재시험결과, 구입처 구분 및 단면형상에 따른 강관 소재성능의 편차가 확인되었다. 기둥좌굴실험결과, 각 실험체의 압축내력은 LSD 기준곡선에 만족하는 결과를 나타내었으며, SSRC 곡선1, ECCS-a곡선에 상회하는 결과를 나타내었다.

Abstract

Space truss is a rational system which forming large span in spatial structure and the steel tube is used well as a structure member in truss system. This study includes coupon test and Stub-column compression test on the structural steel tube. The compression test of Stub-column was performed to characterize and quantify the material characteristic and strength of column. In this study, we also researched the matter of compatibility, in which we compared the experiment formula and the abstract formula by the application of the LSD standard formula, SSRC and ECCS multiple column curve.

키워드 : 일반구조용 각형강관, 일반구조용 원형강관, 좌굴실험, 복수강도곡선
Keywords : Structural Steel Square Pipe, Structural Steel Tube, Buckling Experiment, Multiple Column Curve

1. 서 론

국민소득수준의 향상에 따라 국내 건축물의 디자인 및 사용목적에 대한 다양성이 요구되고 있다. 대공간 구조물은 이러한 시대적 요구에 적합한 구조물로서 최근 많은 각광을 받고 있으며, 구조해석 및 시공법에 관한 많은 연구가 발표되고 있다. 트러스 구조는 대공간 구조를 형성하기 위한 구조시스템 중 하나로서 단순하면서도 합리적인 형태로 사용될 수 있는 장점이 있으며, 트러스의 부재로는 단면의 효율이 높은 강관을 사용하는 것이 일반적이다.

강관이 구조재로 사용되는 경우에는 압축력에 의한 좌굴내력이 부재성능을 결정하는 중요한 요소라고 할 수 있으며 항복강도, 세장비, 강재의 종류, 단면형상 및 잔류응력의 정도에 따라 크게 영향을 받는다[1-7]. 따라서 세계 각국의 시방서에서는 이론적 해석과 실험결과를 바탕으로 부재의 생산 공정 및 단면의 형상에 따른 기둥 압축강도의 차이를 고려하여 기둥에 대한 여러 내하력 곡선의 사용을 제안하고 있다[8-11].

현재 국내에 유통되고 있는 강관은 생산처에 따라 다양한 제품이 생산되고 있으나 강관소재의 출처 및

* 정회원 · CS구조엔지니어링 기술연구소, 공학박사

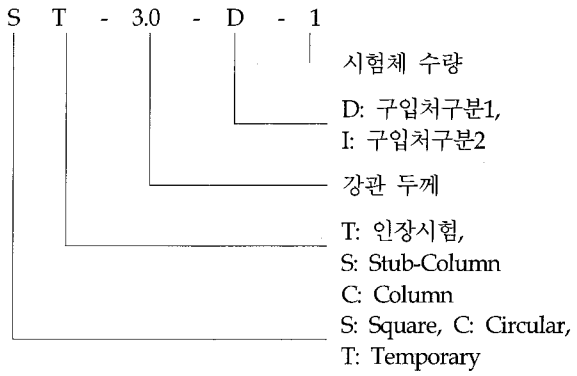
강관 자체의 실제 성능에 관해서는 연구가 미비한 실정이며, 강관의 성능검토 또한 메이커의 성능보고서에만 의존하고 있는 실정이다. 따라서 이 연구에서는 사용자 입장에서 현재 국내에 유통되고 있는 강관의 성능검토를 목적으로, 구입처 구분1(이하 D종 강관) 및 구입처 구분2(이하 I종 강관)등, 구입처 구분에 따른 강관에 대해 소재시험 및 구조성능 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 강관은 냉간성형의 각형강관, 원형강관 및 비계용 강관으로서 전기저항에 의한 발열(EWR)을 이용하여 용접·제조된 강관이다. 소재시험으로는 인장시험과 Stub-column 압축시험을 실시하여 재료 및 단면의 성능을 파악하였으며, 구조성능 실험으로서는 강관이 실제 구조부재로 사용되는 경우를 대상으로 좌굴실험을 실시하였다.

인장시험에서 얻은 항복강도와 단주압축실험의 압축항복강도의 비교를 통해서 소재 및 단면의 성능을 검토하였으며, 좌굴실험으로부터 얻은 실험값과 이론값의 직접적인 비교를 통해 구조성능을 검토하였다. 또한 실험을 통해 얻은 좌굴강도를 SSRC(Structural Stability Research Council)[12]와 ECCS(European Convention for Construction)[13]에서 제안하고 있는 내하력 곡선에 적용하여, 강관의 설계기준에 대한 구조적 요구성능의 유효성을 검토하였다.

2. 소재시험

2.1 시험계획 및 방법

이 연구에서 대상으로 하는 강관은 KS D 3568 「일반구조용 각형강관」의 규격에 따라 제조된 SPSR 400



〈그림 1〉 시험체 표기

과 KS D 3566 「일반구조용 탄소강관」의 STK 400 및 비계용 강관으로 사용되는 STK 500으로 현재 국내에 유통되는 강관 제품을 대상으로 한다. KS규격에서 규정하고 있는 강관의 항복강도는 구조용 각형강관 SPSR 400의 경우 245N/mm^{2}이며, 구조용 원형강관 STK 400은 235N/mm^2, 비계용 강관 STK 500은 355N/mm^{2}으로서, 이 연구에서는 강관의 소재시험을 통해 얻은 값과 KS규격의 값을 비교분석함으로써 강관소재의 성능을 파악하였다.

<표 1>은 소재시험에 사용된 강관의 단면규격 및 단면성능을 나타낸 것이며, 각 시험체의 표기는 <그림 1>과 같다.

2.1.1 인장시험

인장시험은 소재의 기본적인 기계적 성질을 파악하기 위한 시험으로서, 강관의 제작에 따른 판재의 소성가공 및 용접의 영향을 분석하기 위하여 강관의 비용접부 및 용접부(SEAM)에서 각각 3개의 시험편을 절취하여 시험하였다. 시험편은 KS B 0801 「금속재료 인장시

〈표1〉 시험체 성능

단면규격		시험체명	B. D(mm)	t(mm)	L(cm)	B/t, D/t	A(cm^2)	I (cm^4)	r(cm)		수량
일반구조용 각형강관	□-100×100×3.2	SS-3.0-D	99.7	3.0	30.0	33.79	11.44	178.95	3.96	7.58	3
		SS-2.7-I	99.9	2.7	30.0	37.13	10.84	164.67	3.90	7.69	3
일반구조용 탄소강관	Ø48.6×2.3	CS-2.0-D	47.9	2.0	14.6	24.07	2.89	7.70	1.63	8.96	3
		CS-1.7-I	48.2	1.7	14.6	27.7	2.54	6.84	1.64	8.90	3
	Ø114.3×4.5	CS-4.0-D	114.2	4.0	34.3	28.62	13.19	182.9	3.73	9.19	3
		CS-4.0-I	113.9	4.0	34.3	28.48	14.38	216.32	3.87	8.86	3
비계용 강관	Ø48.6×2.3	TS-2.2-D	48.6	2.2	14.6	22.09	3.20	8.65	1.64	8.90	3
		TS-2.5-I	48.5	2.5	14.6	19.4	3.60	9.35	1.61	9.07	3

주) B: 각형강관의 폭, D: 원형강관의 지름, L: 길이, t: 두께, A: 단면적, I: 단면2차모멘트, r: 단면2차반경, : 세장비

험편」에 규정된 5호 및 12호 시험편으로 제작하였으며, 비계용 강관은 KS F 8002 「비계용 강관」에 따라 심금을 이용하여 시험 공시체로부터 단면 그대로 절취하여 시험하였다.

2.1.2 Stub-column 압축시험

Stub-column 압축시험은 제작과정에서 발생할 수 있는 잔류응력을 포함한 강관단면의 순수 압축력에 대한 국부좌굴응력과 항복응력을 파악하기 위한 시험이다.

Stub-column 압축시험시험으로부터 얻은 압축항복강도는 세장비의 영향이 없는 기둥(장주)의 압축성능을 의미하며, 3장의 기둥좌굴실험의 결과를 비교분석하기 위한 기준강도로 사용하도록 한다.

시험체의 길이는 휨 좌굴의 영향을 피하기 위하여 EC 3의 규준에 따라 L=3D로 규격에 따라 제작하였으며, 시험은 양단 단순지지로 편심하중의 영향을 최소화하기 위하여 시험체의 단면을 면 처리한 후 UTM으로 단순재하 하였다.

2.2 시험결과 및 고찰

2.2.1 인장시험

인장 시험결과는 <표 2와> 같으며, 대표적인 응력-변형률 관계를 <그림 2>와 <그림 3>에 나타내었다. 항복강도는 응력-변형률 관계에서 0.2% Offset 법을 이용하여 구하였다.

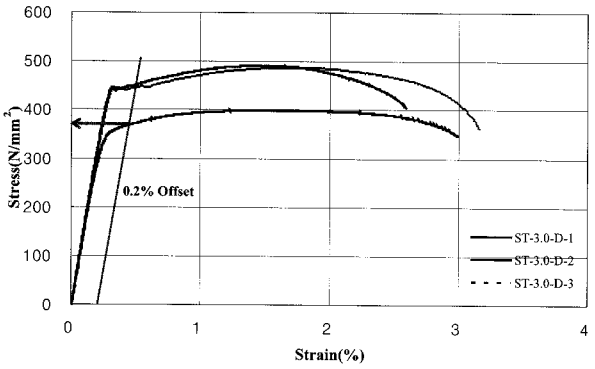
시험결과, D종 강관의 기계적 성질이 I종 강관에 비해 우수한 것을 알 수 있으며, 특히 인장강도의 경우에는 그 값의 차이가 구입처에 따라 크게 다르게 나타났다. ST-2.7-I 및 CT-1.7-I 시험체의 인장강도는 각각 비용접부에서 343~416N/mm^2 및 330~345N/mm^{2}으로서 일부 시험체의 인장강도가 KS 규격에서 규정하는 값을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. CT-1.7-I 시험체의 경우, 용접부에서의 인장강도 또한 기준값 400N/mm^{2}와 비교하여 낮은 것으로 나타났다.

항복강도는 일부 I종 강관 시험체를 제외한 대부분의 시험체 결과값이 KS 규격 값보다 높은 값으로 나타났으며, 용접부의 항복강도가 비용접부보다 높게 나타남을 알 수 있다. 연신률의 경우, I종 강관에 비하여 D종의 강관이 높은 연성능력을 나타내었으

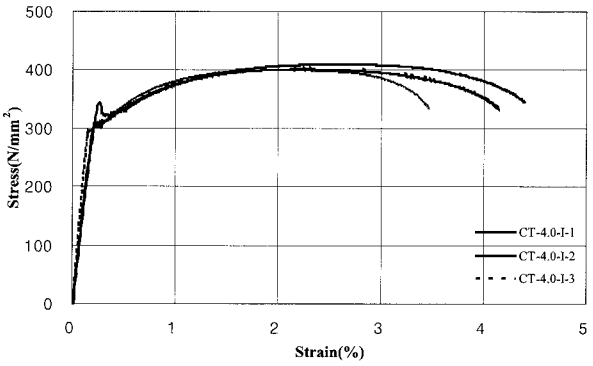
〈표 2〉 인장시험 결과

시험체명	$_t\sigma_y$ (N/mm^2)		$_t\sigma_u$ (N/mm^2)		$_t\sigma_y/_t\sigma_u$		ELO (%)	
	비용접부	용접부	비용접부	용접부	비용접부	용접부	비용접부	용접부
ST-3.0-D-1	377	445	445	492	0.85	0.90	38	30
ST-3.0-D-2	384	366	446	400	0.86	0.92	33	25
ST-3.0-D-3	-	442	410	488	-	0.91	-	33
ST-2.7-I-1	352	380	416	398	0.85	0.95	30	28
ST-2.7-I-2	265	360	343	395	0.77	0.91	30	25
ST-2.7-I-3	291	471	348	518	0.84	0.91	32	30
CT-2.0-D-1	408	-	631	631	0.65	-	32	28
CT-2.0-D-2	408	407	607	607	0.66	0.67	30	25
CT-1.7-I-1	289	321	345	359	0.84	0.89	18	12
CT-1.7-I-2	316	320	330	348	0.96	0.92	29	10
CT-1.7-I-3	317	316	338	341	0.94	0.93	19	11
CT-4.0-D-1	384	481	617	631	0.62	0.76	33	30
CT-4.0-D-2	357	410	604	631	0.59	0.76	33	28
CT-4.0-I-1	322	372	410	447	0.79	0.83	27	22
CT-4.0-I-2	325	388	402	404	0.81	0.96	31	25
CT-4.0-I-3	307	346	400	415	0.77	0.83	28	22
TT-2.2-D-1	487		596		0.82		-	
TT-2.2-D-2	525		596		0.88		-	
TT-2.2-D-3	499		599		0.83		-	
TT-2.5-I-1	413		564		0.73		-	
TT-2.5-I-2	416		570		0.73		-	

주) $_t\sigma_y$: 항복강도(N/㎟), $_t\sigma_u$: 인장강도(N/㎟), $_t\sigma_y/_t\sigma_u$: 항복비, ELO: 연신률(%)



〈그림 2〉 ST-3.0-D 응력-변형률 관계



〈그림 3〉 CT-4.0-I 응력-변형률 관계

며, CT-1.7-I의 경우 용접부의 연신률이 평균 11%로 취성적인 소재특성을 나타내었다.

2.2.2 Stub-column 압축시험

Stub-column 압축시험 결과는 <표 3>과 같으며, 압축항복강도는 인장시험과 동일하게 0.2% Offset법을 사용하여 구하였다. 다만, 압축거동에 있어서 압축항복강도 및 최대압축강도의 구분이 어려운 일부 시험체의 경우, 0.1% Offset법을 적용하여 항복강도을 구하였으며 <표 3>에 있어 (※)로 표기하였다. Stub-column 시험결과, 구조용 원형강관 CS-2.0과 CS-4.0 시험체의 최대압축강도는 구입처의 구분과 관계없이 동일한 압축강도값을 가지는 값으로 나타났다. 구조용 각형강관 SS-3.0-D 시험체는 평균 419.51N/mm^2, SS-2.7-I 시험체는 평균 283.96N/mm^{2}로서 D종 강관의 성능이 우수한 것으로 나타났다.

비계용 TS-2.2-D 시험체는 평균 539.79N/mm^2, TS-2.5-I 시험체는 평균 454.39N/mm^{2}로 구입처 구

〈표 3〉 Stub-column 압축시험 결과

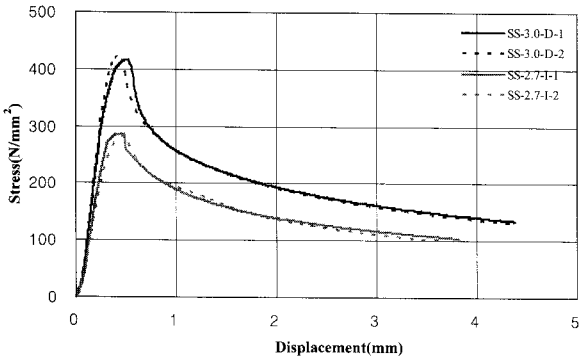
시험체명	${}_s\sigma_u$(N/mm^2)	${}_s\sigma_y$(N/mm^2)	${}_t\sigma_y$(N/mm^2)	σ_{cr}(N/mm^2)	${}_s\sigma_u/\sigma_{cr}$	${}_s\sigma_y/\sigma_{cr}$	${}_s\sigma_y/{}_t\sigma_y$
SS-3.0-D-1	415.50	382.00※	354	380.07	1.09	1.01	1.08
SS-3.0-D-2	424.02	417.15※		415.04	1.02	1.01	1.18
SS-3.0-D-3	-	-		-	-	-	-
SS-2.7-I-1	285.92	275.00	303	274.07	1.04	1.00	0.91
SS-2.7-I-2	282.00	273.20		272.28	1.04	1.00	0.90
SS-2.7-I-3	-	-		-	-	-	-
CS-2.0-D-1	379.79	329.00	408	327.13	1.16	1.01	0.81
CS-2.0-D-2	369.62	342.50		340.55	1.09	1.01	0.84
CS-2.0-D-3	390.30	359.17※		357.13	1.09	1.01	0.88
CS-1.7-I-1	393.62	339.45	307	337.67	1.17	1.01	1.11
CS-1.7-I-2	378.26	277.87		276.45	1.37	1.01	0.91
CS-1.7-I-3	397.56	331.81		330.12	1.20	1.01	1.08
CS-4.0-D-1	408.70	407.96※	375	405.20	1.01	1.01	1.09
CS-4.0-D-2	360.74	353.30		350.91	1.03	1.01	0.94
CS-4.0-D-3	411.69	405.73※		402.98	1.02	1.01	1.08
CS-4.0-I-1	380.78	369.19	316	367.44	1.04	1.00	1.17
CS-4.0-I-2	411.33	314.40		312.91	1.31	1.00	0.99
CS-4.0-I-3	394.64	299.12		297.71	1.33	1.00	0.95
TS-2.2-D-1	535.72	419.35	503	416.48	1.29	1.01	0.83
TS-2.2-D-2	535.66	410.12		407.31	1.32	1.01	0.82
TS-2.2-D-3	547.98	434.58		431.60	1.27	1.01	0.86
TS-2.5-I-1	451.66	334.56	414	332.65	1.36	1.01	0.81
TS-2.5-I-2	454.43	350.97		348.97	1.30	1.01	0.85
TS-2.5-I-3	457.07	329.23		327.35	1.40	1.01	0.80

주) ${}_s\sigma_u$: 최대압축강도, ${}_s\sigma_y$: 압축항복강도, ${}_t\sigma_y$: 인장시험 비용접부 항복강도, σ_{cr}: 이론좌굴강도

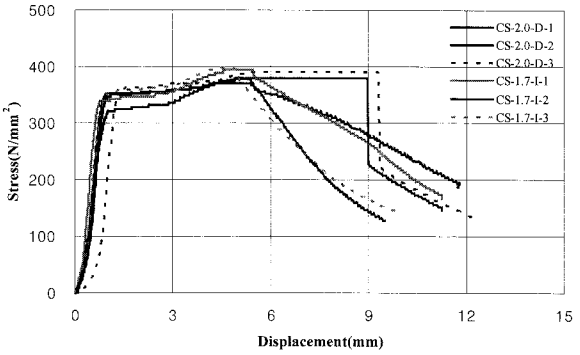
분에 따른 편차를 나타내었다. 압축항복강도의 경우 구조용 각형강관 및 비계용 강관 모두에서 D종 강관이 I종 강관에 비하여 우수한 성능을 발휘하는 것으로 나타났다. <표 3>의 이론좌굴강도(σ_{cr})은 한계상태설계법(LSD)에 의한 좌굴강도로서 압축좌굴강도($_s\sigma_u$)와 압축항복강도($_s\sigma_y$)의 결과값과 비교한 결과 1.0 이상의 값을 나타내어 이론값에 상회하는 충분한 압축성능을 확보한 것으로 나타났다. 또한, 압축항복강도($_s\sigma_y$)와 인장시험 비용접부 항복강도($_t\sigma_y$)를 비교한 결과 구조용 D종의 경우 평균 1.13, I종은 평균 0.91로 D종이 I종에 비해 우수한 소재 및 단면성능을 보인 반면 구조용 원형강관 CS-2.0-D 시험체는 평균 0.84로 CS-1.7-I 시험체에 비하여 다소 낮게 나타났다.

<그림 4~그림 7>은 Stub-column 압축시험 응력-변위 관계이다. 응력-변위 관계에서도 확인할 수 있듯이 <그림 4>의 구조용 각형강관 및 <그림 7>의 비계용 강관의 D종 시험체는 I종 시험체보다 우수한 성능을 발휘하고 있으며, 최대압축강도에 도달한 후 내력이 서서히 저하되는 것으로 보아 국부좌굴에 의한 내력 저하없이 소성변형능력이 우수함을 알 수 있다. 또한 <그림 7>의 비계용 강관 TS-2.5-I의 모든 시험체는 압축항복강도 이하의 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

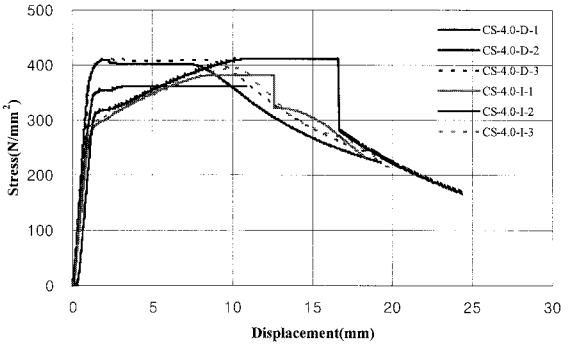
<그림 5>와 <그림 6>의 CS-2.0-D 및 CS-4.0-I 일부 시험체의 경우 최대내력 이후 직선적인 거동을 나타내는데 이는 국부좌굴이 시험체 단부 면에 발생하여 직선적인 거동 이후 다시 내력이 저하되므로 최대압축강도 산정에는 큰 영향이 없을 것이라 사료된다.



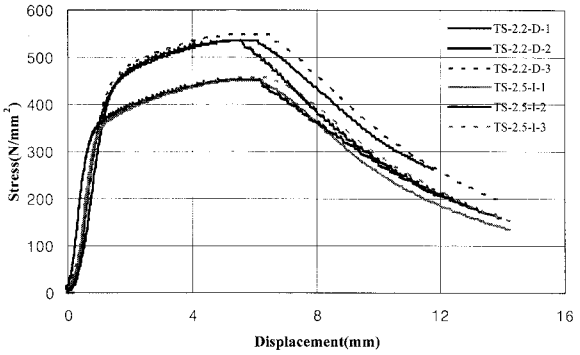
〈그림 4〉 각형강관 Stub-column 응력-변위 관계



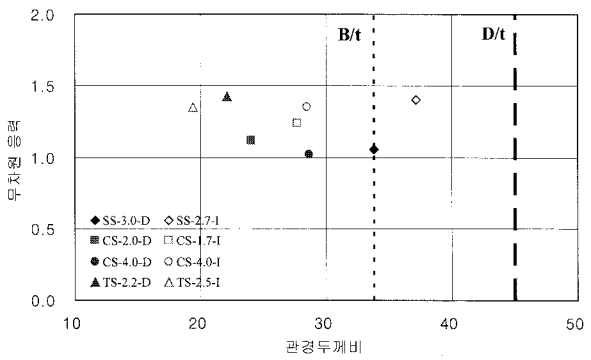
〈그림 5〉 원형강관(ϕ48.6×2.3) 응력-변위 관계



〈그림 6〉 원형강관(ϕ114.3×4.5) 응력-변위 관계



〈그림 7〉 비계용 강관 응력-변위 관계



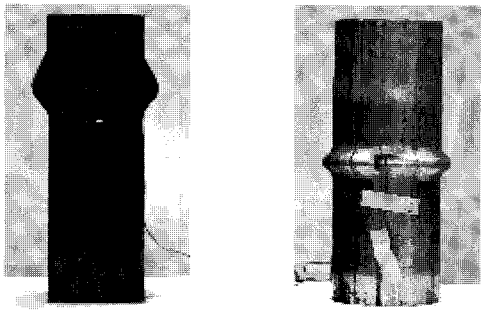
〈그림 8〉 무차원 응력-관경두께비 관계

<그림 8>은 한계상태설계법(LSD)을 사용한 무차원 좌굴응력-관경두께비 관계를 나타낸 것으로 무차원 좌굴응력이 1.0을 초과하면 시험의 결과값보다 이론값이 크다는 것을 의미한다. 종축의 굵은 점선은 구조용 각형강관 및 구조용 원형강관의 관경두께비 제한치로, 관경두께비 검토 시 항복강도는 인장시험 비용접부 항복강도($_t\sigma_y$)를 사용하여 구하였다.

구조용 각형강관의 관경두께비($B/t=1.40\sqrt{E/F_y}$)는 SS-3.0 시험체에 대한 설계기준값이며, 구조용 원형강관의 관경두께비($D/t=0.11E/F_y$)는 CS-2.0 시험체에 대한 기준값이다. 또한 원형강관 CS-4.0과 TS-2.2 시험체의 관경두께비의 값이 CS-2.0 관경두께비 제한값보다 큰 값으로 나타나게 되므로 <그림 8>에서의 굵은 점선으로 표기한 CS-2.0 관경두께비 값을 기준으로 각 시험체의 응력에 대한 판폭두께비 관계를 나타내었다.

측정결과, D종의 각형강관 SC-3.0-D 시험체의 판폭두께비는 33.79, I종 SC-2.7-I의 값은 37.13으로 판폭두께비를 만족하지 못하는 세장판 요소단면의 값을 나타내었다. 반면 구조용 원형강관 CS-2.0 시험체의 관경두께비는 평균 25.89로, CS-4.0 시험체는 평균 28.55로서 구입처 구분과 관계없이 제한범위 내에서 이론좌굴강도보다 40% 이상의 여유강도를 확보하고 있음을 알 수 있다. 비계용 강관 TS-2.2의 경우 또한 구입처 구분과 관계없이 모든 시험체가 판폭두께비를 만족하고 있음을 알 수 있다.

사진 1은 Stub-column 압축시험 후의 종국상태 형상이다. 구조용 각형강관은 모두 국부좌굴이 발생하면서 국부좌굴에 의한 판의 종국상태를 나타내었으며, 구조용 원형강관의 경우 일부 시험체를 제외하고 모두 단부에서 좌굴이 발생하였으며 대부분의 시험체는 선대칭 국부좌굴형태를 나타내었다.



SS-3.0-D　　CS-4.0-D

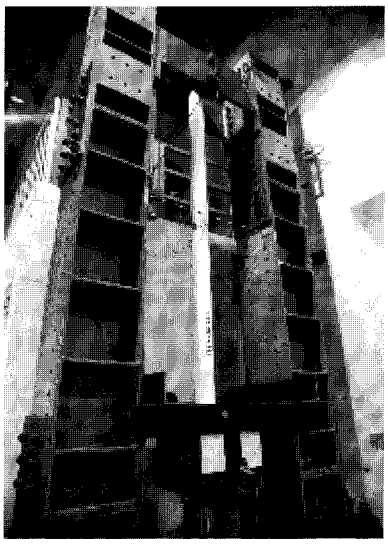
〈사진 1〉 Stub-column 파괴형상

3. 기둥좌굴실험

3.1 실험계획 및 방법

기둥좌굴실험은 소재성능 및 단면의 특성을 포함한 구조부재로서의 성능 실험으로써 강관이 기둥부재로 사용 될 경우를 대상으로 비탄성역에서의 좌굴 및 역학적 특성을 파악하기 위하여 실시하였다.

기둥 실험체는 각 단면에 대하여 세장비 60으로 길이를 산정하여 3개씩 제작하였다. 실험체의 구속조건은 양단 핀으로서 유효좌굴길이(L_k)는 각형강관의 경우 770mm, 일반구조용 강관 및 비계용 강관은 1020mm이다. 가력은 최대용량 500kN, 최대변위 ±300mm의 엑츄에이터를 이용하여 1㎜/min으로 변위제어로 단조가력하였으며, 계측방법으로는 축변위 및 중앙부의 처짐을 측정하기 위하여 수직변위계(L.V.D.T) 및 줄 변위계를 설치하였다. 사진 2는 기둥좌굴실험체의 설치전경을 나타낸 것이다.



〈사진 2〉 좌굴실험체 설치전경

3.2 실험결과 및 고찰

<표 4>는 기둥 좌굴실험 결과 값으로 무차원 세장비, 좌굴강도, 이론좌굴강도 등을 나타내었다. 좌굴강

도(σ_{exp})는 최대하중을 실측한 단면적으로 나눈 값이며, 이론좌굴강도(σ_{cr})는 한계상태설계법(LSD)에 따른 좌굴강도이다.

실험결과, 일반구조용 각형강관 및 원형강관의 좌굴강도는 구입처 구분에 관계없이 모두 동일한 좌굴성능을 나타내는 것으로 나타났으나, 비계용 강관의 경우 I종 강관의 좌굴성능이 D종 강관의 성능보다 떨어지는 것으로 나타났다. 구조용 각형강관 SC-3.0-D 실험체의 평균좌굴강도는 평균 282.79N/mm^2, SC-2.7-I 강관의 평균은 264.74 N/mm^{2}으로 나타났다. 구조용 원형강관 CC-2.0-D 실험체의 좌굴강도는 평균 310.94N/mm^{2}로, CC-1.7-I 실험체는 평균 299.61N/mm^{2}로 I종 강관에 비해 D종 강관이 우수한 좌굴성능을 나타내었다. 비계용 강관의 경우 TC-2.2-D의 좌굴강도는 평균 313.77N/mm^2, TC-2.5-I는 평균 317.98N/mm^{2}를 나타내어 비슷한 좌굴성능을 나타내고 있다.

<표 4>에 있어서 무차원세장비(λ_c) 및 이론좌굴강도(σ_{cr})산정하기 위하여 필요한 항복강도는 설계기준강도($_n\sigma_y$), 인장시험 비용접부 항복강도($_t\sigma_y$) 및 압축항복강도($_s\sigma_y$) 세 가지로 분류하여 적용하였다.

설계기준강도($_n\sigma_y$)를 적용한 이론좌굴강도(σ_{cr1})과 실험값을 비교하면 구조용 각형강관 SC-3.0-D의 평균값은 1.40으로, SC-2.7-I는 평균 1.32로 나타났다. 구조용 원형강관 CC-2.0-D는 평균 1.64로, CC-1.7-I는 평균 1.54로 나타났으며, 비계용 강관 TS-2.2-D의 경우1.17, TS-2.5-I는 1.19의 평균값을 나타내어 모든 실험체가 이론좌굴강도를 상회하는 좌굴성능을 나타내었다.

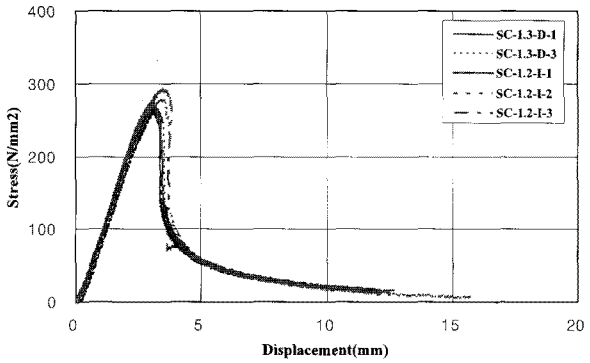
인장시험 비용접부 항복강도($_t\sigma_y$)를 적용한 이론좌굴강도(σ_{cr2}) 및 압축항복강도($_s\sigma_y$)를 적용한 이론좌굴강도(σ_{cr3})를 실험값과 비교하면, D종 강관 실험체에 비하여 I종 강관의 값이 다소 높은 것으로 나타났으나, 이러한 결과는 D종 및 I종 강관의 좌굴성능(σ_{exp})은 유사한 반면, 이론좌굴강도(σ_{cr2}, σ_{cr3})의 값이 I종 강관에 비하여 D종 강관의 값이 상대적으로 높기 때문인 것으로 사료된다.

또한 Stub-column의 최대압축강도($_s\sigma_u$)와 좌굴강도값을 비교하면 구조용 각형강관의 경우 D종 강관은 67%, I종 강관은 93%로 큰 성능차이를 보이는데, 이것은 구입처 구분에 따른 강관 소재의 성능편차가 상대적으로 크게 나타나기 때문이다.

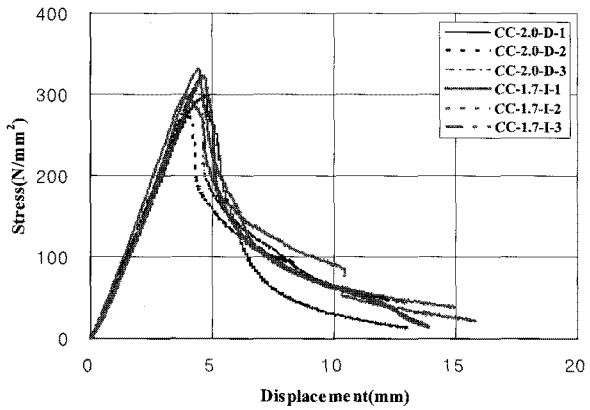
〈표 4〉 기둥실험체 결과

실험체명	λ	무차원 세장비(λ_c)			σ_{exp}	이론좌굴강도(σ_{cr})			$\sigma_{exp}/\sigma_{cr1}$	$\sigma_{exp}/\sigma_{cr2}$	$\sigma_{exp}/\sigma_{cr3}$	$\sigma_{exp}/_s\sigma_u$
		λ_{c1}	λ_{c2}	λ_{c3}		σ_{cr1}	σ_{cr2}	σ_{cr3}				
SC-1.3-D-1	62.00	0.68	0.82	0.87	274.49	201.82	267.52	291.26	1.36	1.03	0.94	0.65
SC-1.3-D-2					279.60				1.39	1.05	0.96	0.67
SC-1.3-D-3					294.29				1.46	1.10	1.01	0.70
SC-1.2-I-1	62.96	0.69	0.77	0.73	265.31	200.60	236.62	219.10	1.32	1.12	1.21	0.93
SC-1.2-I-2					262.45				1.31	1.11	1.20	0.92
SC-1.2-I-3					266.45				1.33	1.13	1.22	0.94
CC-2.0-D-1	62.58	0.67	0.89	0.81	323.16	194.44	293.64	260.54	1.66	1.10	1.24	0.85
CC-2.0-D-2					298.71				1.54	1.02	1.15	0.79
CC-2.0-D-3					333.28				1.71	1.13	1.28	0.88
CC-1.7-I-1	62.20	0.67	0.76	0.78	299.81	194.89	240.42	245.91	1.54	1.25	1.22	0.77
CC-1.7-I-2					280.79				1.44	1.17	1.14	0.72
CC-1.7-I-3					318.24				1.63	1.32	1.29	0.82
TC-2.2-D-1	62.20	0.82	0.98	0.90	320.33	267.58	336.98	301.25	1.20	0.95	1.06	0.59
TC-2.2-D-2					280.14				1.05	0.83	0.93	0.52
TC-2.2-D-3					340.85				1.27	1.01	1.13	0.63
TC-2.5-I-1	62.20	0.82	0.89	0.80	363.77	267.58	297.73	258.38	1.36	1.22	1.41	0.80
TC-2.5-I-2					327.28				1.22	1.10	1.27	0.72
TC-2.5-I-3					262.90				0.98	0.88	1.02	0.58

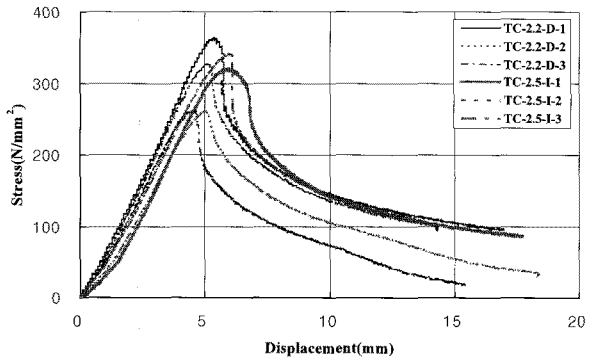
주) σ_{exp}: 좌굴강도, λ_c: 무차원세장비(λ/λ_{cr}), λ_{cr}: 임계세장비($=\sqrt{\pi^2 E/\sigma_y}$), σ_{cr}: 이론좌굴강도($=(0.658^{\lambda_c^2})\sigma_y$),
$_s\sigma_u$: 최대압도, σ_{cr1}: 이론좌굴강도($_n\sigma_y$), σ_{cr2}: 이론좌굴강도($_t\sigma_y$), σ_{cr3}: 이론좌굴강도($_s\sigma_y$)



〈그림 9〉 각형강관 좌굴실험 응력-변위 관계



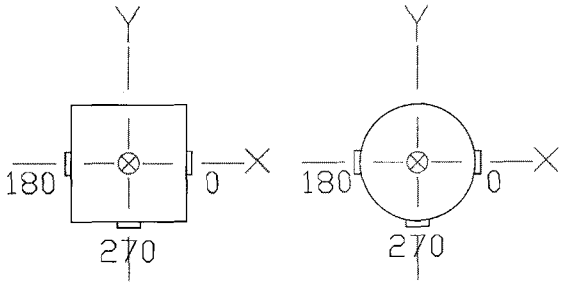
〈그림 10〉 원형강관 좌굴실험 응력-변위 관계



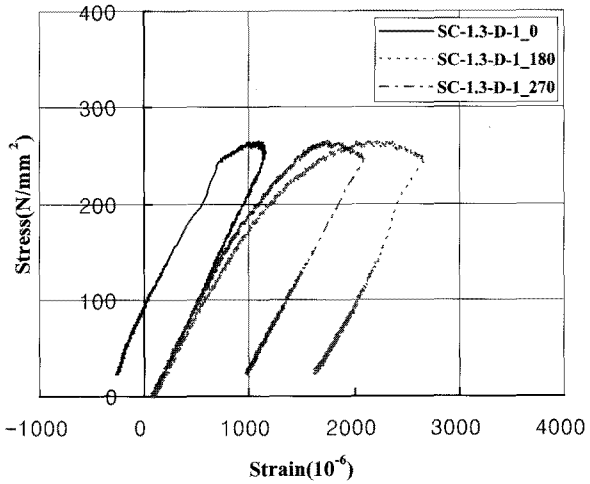
〈그림 11〉 비계용 강관 좌굴실험 응력-변위 관계

<그림 9~그림 11>은 기둥좌굴 실험체의 응력-변위 관계를 나타낸 것이다.

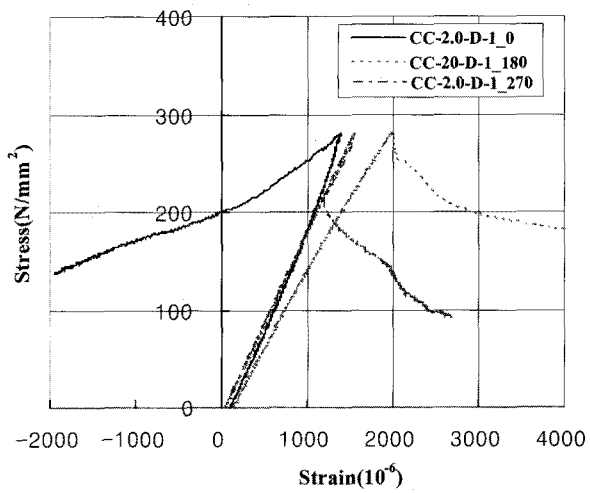
<그림 13~그림 15>는 실험체의 중앙좌굴지점의 응력-변형률 관계를 대표적으로 나타낸 것이며, 스트레인 게이지를 <그림 12>와 같이 실험체 중앙부 단면 0°, 180° 및 270° 위치에 부착하였다. <그림 12>에 표기한 바와 같이 Y-Z 평면에서 발생하는 면



〈그림 12〉 게이지 부착위치



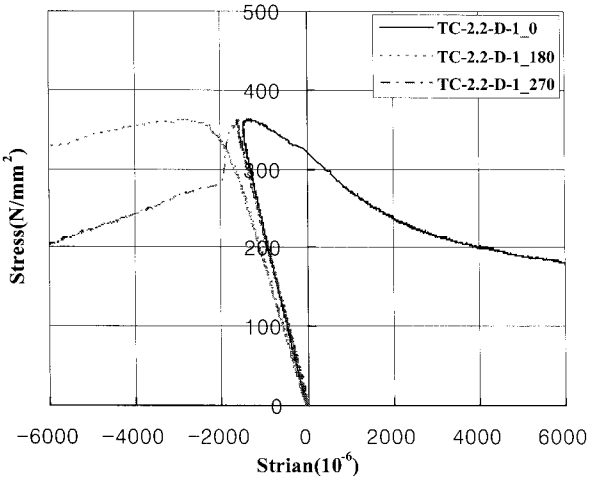
〈그림 13〉 각형강관 좌굴실험 응력-변형률 관계



〈그림 14〉 원형강관 좌굴실험 응력-변형률 관계

내좌굴에 의한 변형과 X-Z 평면에서 발생하는 국부좌굴에 의한 변형을 계측하였다.

<그림 13>과 <그림 14>는 일반구조용 각형강관 및 원형강관의 게이지 부착위치에 따른 변형률로 X



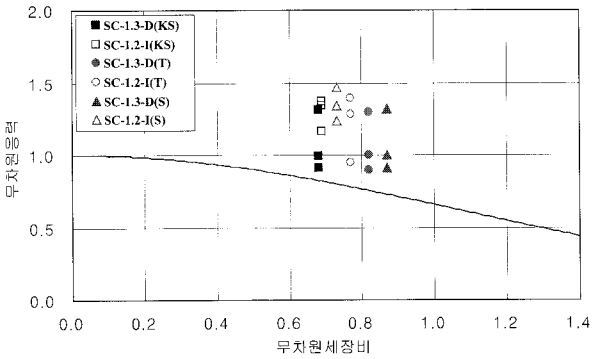
〈그림 15〉 비계용 강관 좌굴실험 응력-변형률 관계

축에 대하여 Y-Z 평면 내에서 0°의 값은 압축 측, 180°의 값은 인장 측의 값으로 면내좌굴이 발생한 것을 의미하며, 270°에서의 변형률은 국부좌굴에 의한 단면의 변형을 나타낸 것이다.

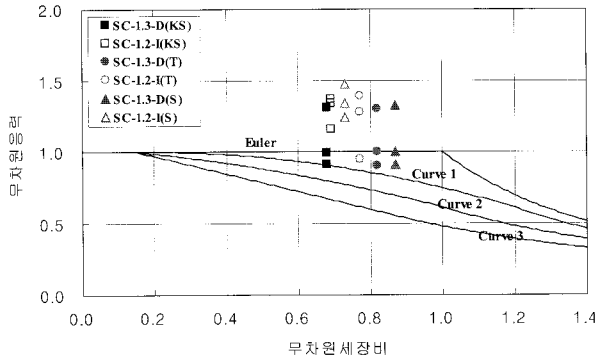
구조용 각형강관의 경우, 좌굴강도(σ_{exp})에서의 변형률은 압축측 0.21%, 인장측 0.53%로 나타났으며, 구조용 원형강관은 압축측 0.27%, 인장측 0.40%를 나타내어 탄소성역에서 좌굴이 발생한 것을 알 수 있다. 또한 좌굴 후 단면의 변형이 소성영역으로 급속히 진전되는 것을 알 수 있다. <그림 15>는 비계용 강관 응력-변형률 관계를 나타낸 것이다.

<그림 16~그림 24>은 무차원응력-무차원세장비 관계로 구조용 강관 및 비계용 강관의 내력평가를 위하여 LSD 설계기준과 SSRC 및 ECCS 복수강도곡선을 적용하였다. 복수강도곡선은 단면내의 잔류응력 분포형태, 단면형상 및 강종 등의 변수를 고려한 설계기준이다. 기준식의 적용에 사용된 항복강도로는 설계기준강도($_n\sigma_y$), 인장시험 비용접부 항복강도($_t\sigma_y$) 및 압축항복강도($_s\sigma_y$) 3가지를 구분하여 적용하였다. 그림에 있어 X축은 <표 4>의 무차원세장비이며, Y축의 값은 이론좌굴강도와 실험값의 무차원응력이다.

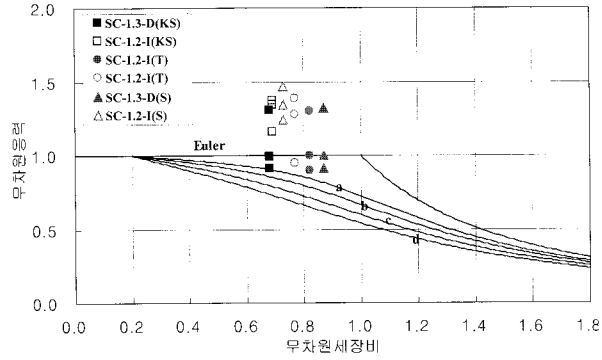
<그림 16>은 구조용 각형강관의 LSD설계기준에 대한 기준곡선을 나타낸 것으로 모든 실험체의 값이 현행 설계기준을 만족하는 것으로 나타났다. <그림 17>과 <그림 18>은SSRC 및 ECCS 복수강도곡선에 대한 결과로서, 구입처 구분에 관계없이 모든 실험체의 값이 무차원 세장비 1.0에서 SSRC 곡선 1, ECCS a곡선에 상회하는 것을 알 수 있다.



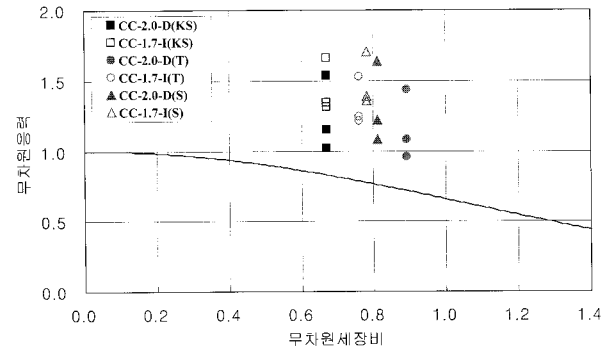
〈그림 16〉 각형강관 LSD 좌굴곡선



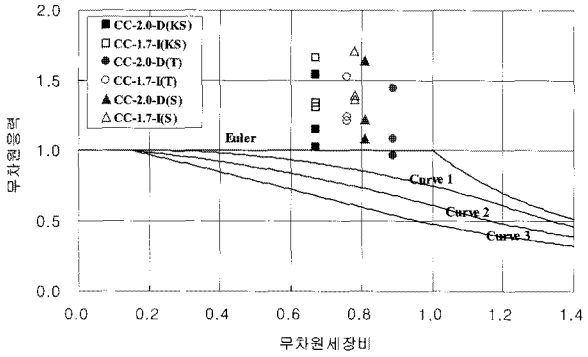
〈그림 17〉 각형강관 SSRC 좌굴곡선



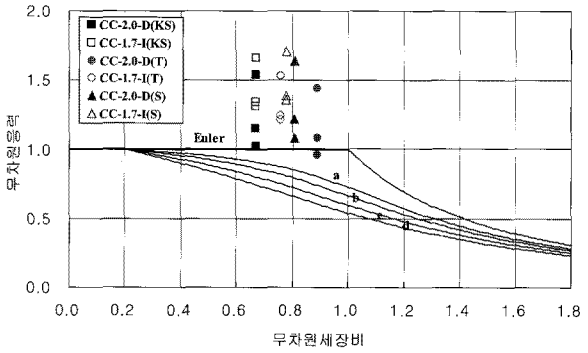
〈그림 18〉 각형강관 ECCS 좌굴곡선



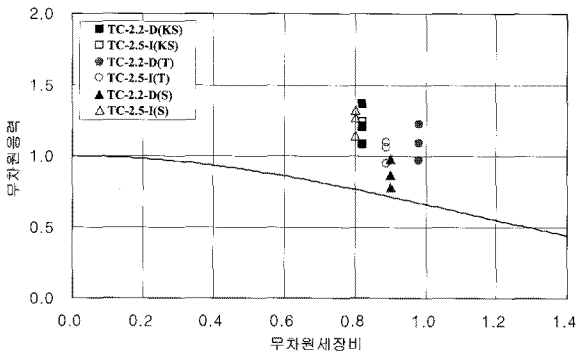
〈그림 19〉 원형강관 LSD 좌굴곡선



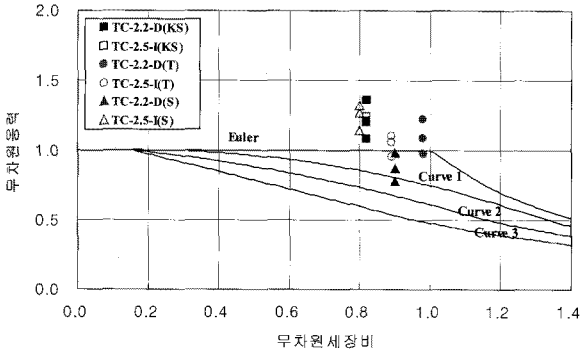
〈그림 20〉 원형강관 SSRC 좌굴곡선



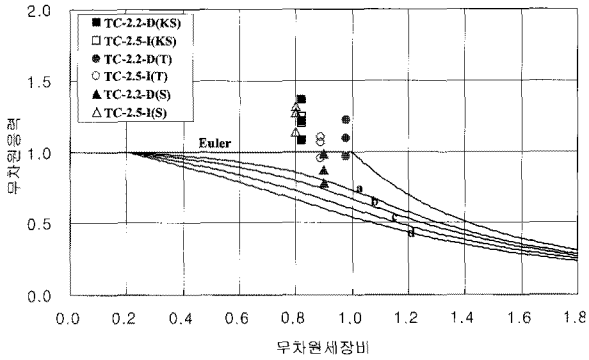
〈그림 21〉 원형강관 ECCS 좌굴곡선



〈그림 22〉 비계용 강관 LSD 좌굴곡선



〈그림 23〉 비계용 강관 SSRC 좌굴곡선



〈그림 24〉 비계용 강관 ECCS 좌굴곡선

<그림 19~그림 21>은 구조용 원형강관에 대한 무차원응력-무차원세장비 관계로 구입처 구분에 관계없이 모든 실험체의 값이 설계기준곡선에 만족하는 것으로 나타났다. 그림으로부터 알 수 있듯이 원형강관 압축내력 또한 각형강관과 같이 무차원세장비 1.0 이내에서 SSRC 곡선 1, ECCS a곡선에 해당하는 성능을 보유하고 있는 것을 알 수 있다.

<그림 22>는 비계용 강관의 LSD의 설계기준곡선 결과로서 D종 강관과 I종 강관 모두의 압축내력이 설계기준곡선에 만족하는 것으로 나타났다.

<그림 23~그림 24>는 비계용 강관에 대한 SSRC 및 ECCS 복수강도곡선으로 설계기준강도($_n\sigma_y$) 및 인장시험 비용접부 항복강도($_t\sigma_y$)를 적용한 모든 실험체의 결과값은 무차원세장비 0.8 근처에서 SSRC 곡선1, ECCS a곡선에 상회하는 결과를 나타내었다. 압축항복강도($_s\sigma_y$) 적용한 경우 I종 강관의 압축내력은 무차원세장비 0.8에서 SSRC 곡선 1, ECCS a곡선을 만족하였으나 D종 강관의 일부 실험체의 결과값은 세장비 0.9에서 SSRC 곡선 2, ECCS b곡선에 근접하는 결과를 나타내고 있다.

4. 결 론

이 연구는 현재 공간구조물의 건설에 사용되고 있는 일반구조용 각형강관, 원형강관 및 비계용 강관의 소재성능 및 구조성능의 파악을 목적으로 소재시험 및 기둥좌굴실험을 실시하였다. 본문에서 구입처 구분1의 D종으로 표기한 강관은 국내산 소재를 사용하여 국내에서 제작한 강관이며 구입처 구

분2의 I종으로 표기한 강관은 수입산 강관으로서, 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 일반구조용 각형강관 및 원형강관의 인장시험결과, D종 강관 시험체의 인장강도는 KS규격에서 규정하고 있는 값을 상회하는 결과를 나타냈으나 I종 강관 ST-2.7-I 및 CT-1.7-I 시험체의 경우, 인장강도가 규격보다 낮은 강도를 나타내었다. 모든 강관의 항복강도는 설계기준강도를 상회하는 값으로 나타났으나, 결론적으로 D종강관의 기계적 성질이 I종 강관에 비해 우수한 것으로 나타났다. 또한 구입처 구분에 따른 항복강도 및 인장강도, 연신율의 편차가 크게 나타나므로 공간구조물의 구조부재로 강관을 사용할 경우, 접합부 설계에 강관의 실제적인 소재성능을 고려할 필요가 있을 것으로 사료된다.

(2) Stub-column 시험결과, 모든 시험체의 결과값이 이론값을 만족하는 것으로 나타났으나, 구조용 각형강관의 압축항복강도는 구입처의 구분에 따른 강도차이가 큰 것으로 나타나 품질의 안정성을 확보하지 못한 결과를 나타내었다.

(3) 모든 강관의 좌굴강도는 설계기준강도($_n\sigma_y$), 인장시험 비용접부 항복강도($_t\sigma_y$) 및 압축항복강도($_s\sigma_y$)를 적용하여 얻은 이론좌굴강도를 상회하며, LSD, SSRC 및 ECCS의 설계강도곡선을 만족하는 것으로 나타났다. 이로부터 실제 국내에 유통되는 강관의 구조부재로서의 성능은 유효한 것으로 판단되지만, 이것은 구입처 구분에 따른 소재성능의 편차가 구조성능에 정량적으로 반영되지 않았음을 의미하므로 이 부분에 대한 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Y.Liu B.Young(2003), Buckling of stainless steel square hollow section compression member, Journal of Constructional Steel Research Vol. 59, pp. 165-177
2. B.Young, W-M.Lui(2006), Test of cold-formed high strength stainless steel compression members, Thin-Walled Structures Vol. 44, pp. 224-234
3. 이명재(1989), Stainless Steel의 기계적 성질 및 좌굴내력에 관한 연구, 대한건축학회논문집, 5권 6호, pp. 73-82
4. 서성연·김필중·양양성·김규석(1993), 냉간성형 원형강관 및 각형강관부재의 인성에 관한 실험적 연구, 대한건축학회논문집, 13권 2호, pp. 153-162
5. 장호주·임성우(2003), 스테인리스 304 강재의 국부좌굴에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 15권 1호, pp. 51-57
6. 임성우·김요숙·장인화(2005), SM570TMC 강재의 압축재 특성에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 17권 3호, pp. 357-363
7. 김종락 외 3명(2008), 중심압축력을 받는 일반구조용 강관의 구조성능에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 20권 3호, pp. 437-444
8. 대한건축학회(1988), 강구조 한계상태 설계기준 및 해설
9. 대한건축학회(1998), 강관구조 설계기준 및 해설
10. 대한건축학회(1999), 냉간성형강 구조설계기준 및 해설
11. AISC(2001) Manual of Steel Construction-Load and Resistance Factor Design, Third Edition
12. SSRC, Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures, Fifth Edition, Theodore V. Galambos
13. EUROCODE No.3(1992), Design of Steel Structures

접수일자 : 2008년 8월 23일
심사완료일자 : 2008년 10월 9일
게재확정일자 : 2008년 10월 10일