중심압축력을 받는 일반구조용 강관의 구조성능에 관한 연구

A Study on the Structural Property of Structural Steel Tubes under Axial Compression

김 종 락[1] · 이 은 택[2] · 이 소 연[3] · 백 기 열[4]†
Kim, Jong Rak *Lee, Eun Taik* *Lee, So Yeon* *Baek, Ki Youl*

요 약 : 현재 국내에 유통되고 있는 강관은 국내산과 수입산이 혼용되고 있으며, 수입산 강관은 가격경쟁 면에서 그 수요가 꾸준히 증가하고 있다. 본 연구는 국내에 유통되고 있는 일반구조용 원형강관 및 비계용 강관에 대하여 소재의 인장시험과 Stub-column 압축시험 및 기둥의 좌굴실험을 통하여 일반구조용 강관의 기계적 성질과 기둥의 강도 및 거동을 파악하고자 한다. 또한 한계상태설계법의 기준식과 복수강도곡선의 적용으로 이론값과 실험값을 비교하여 기계적 요구 성능 및 적합성 여부를 조사하고, 설계기준에 대한 기초자료를 확보하고자 한다. 단주압축 실험결과 관경두께비를 만족하는 시험체의 경우에는 최대내력에 도달한 후 서서히 내력이 저하되는 결과를 나타내었다. 기둥좌굴 실험결과, 최대내력은 일정한 좌굴내력 범위를 나타내었으며 전반적으로 한계상태설계법의 기준곡선에 만족하는 결과를 나타내었다.

ABSTRACT : The use of imported structural steel tubes has been increased in domestic construction field because of its low price, but the mechanical properties of those steel tube are not verified exactly. 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 LRFD standard formula and multiple column curve.

핵 심 용 어 : 일반구조용 강관, 단주, 판폭두께비, 단면형상, 복수강도곡선
KEYWORDS : Structural Steel Tube, Stub-column, Width-thickness ratio, Section shape, Multiple column curve

1. 서 론

최근 국내에서는 초고층화, 대경간화, 다기능화 등의 수요가 점차 증가하고 있다. 이러한 요구를 충족시키기 위하여 많은 구조시스템이 채택되어져 왔고, 트러스 구조는 이러한 구조시스템들 중의 하나로 일반적으로 강관을 많이 사용하고 있다. 강관은 폐단면 형상으로 압축좌굴과 비틀림 성능이 다른 형강에 비해 우수한 구조재로서 특히, H형강에 비해 구조물 전체의 자중을 경감할 수 있고 큰 변형 능력을 가지고 있어 기둥부재로 각광받고 있다.

고층건축물 설계 시 기둥부재는 풍·진동하중의 저항성을 고려하여 연직·수평하중에 대한 에너지 흡수 능력과 구조부재로서 충분한 소성변형능력 및 부재내력을 유지해야 한다. 강관이 구조재로 사용되는 경우에는 압축력에 의한 좌굴내력이 부재성능을 결정하는 중요한 요소라고 할 수 있으며 항복강도, 세장비, 강재의 종류 및 단면형상에 의하여 크게 영향을 받는다. 특히 강관의 경우 판재의 2차 가공에 따른 용접부의 잔류응력 정도에 따라 좌굴내력이 크게 다르게 나타날 수 있다. 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.

현재 국내에 유통되고 있는 강관은 국내산과 수입산이 혼용되고 있으며, 수입산 강관은 가격경쟁 면에서 그 수요가 꾸준히 증가하고 있다. 그러나 국내규준에 대한 수입산 강관의 성

1) 정회원, 숭실대학교 건축공학과 교수, 공학박사(jrkim@ssu.ac.kr)
2) 정회원, 중앙대학교 건축학과 교수, 공학박사(etlee@cau.ac.kr)
3) 학생회원, 숭실대학교 건축공학과, 석사과정(to486from@hanmail.net)
4) 교신저자, 정회원, CS구조엔지니어링, 연구원, 공학박사
(Tel. 02-3497-7810, Fax. 02-3497-7899, E-mail : cutty9@hotmail.com)

본 논문에 대한 토의를 2008년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

능검토는 별도로 이루어 지지 않고 있으며, 국내산 강관의 성능검토 또한 생산업체의 성능보고서에만 의존하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 사용자 입장에서 현재 국내에 유통되고 있는 강관의 성능검토를 목적으로 임의로 구입한 강관에 대해 소재성능 시험 및 구조성능 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 강관은 냉간성형의 원형강관 및 비계용 강관으로, 전기저항에 의한 발열(EWR)을 이용하여 용접·제조된 강관이다. 소재성능 시험으로는 인장시험과 단주압축시험을 실시하여 소재 및 단면의 성능을 파악하였으며, 구조성능 실험으로서는 강관이 실제 구조부재로 사용되는 경우를 대상으로 좌굴실험을 실시하였다.

인장시험에서 얻은 항복강도와 단주압축시험의 압축항복강도의 비교를 통해서 소재 및 단면의 성능을 검토하였다. 또한 좌굴실험으로부터 얻은 실험값과 이론값의 직접적인 비교를 통해 강관의 구조성능을 검토하였으며, 실험을 통해 얻은 좌굴강도를 SSRC(Structural Stability Research Council)와 ECCS(European Convention for Construction)에서 제안하고 있는 내하력 곡선에 적용하여 국내·외의 설계식에 대한 적합성 여부를 검토하였다.

2. 소재성능 시험

2.1 시험계획 및 방법

본 연구에 사용되는 강관은 국내에 유통되고 있는 인장강도 400N/㎟의 구조용 원형강관 및 인장강도 500N/㎟의 비계용 강관으로 국내산 및 수입산 강관 제품을 대상으로 하였다. KS D 3566「일반구조용 탄소강관」에 의하여 제조된 STK 400과 비계용 강관으로 사용되는 STK 500 강관을 사용하며, 항복강도는 STK 400은 235N/㎟, STK 500은 355N/㎟으로 규정되어 있다. 각 시험체의 표기는 그림 1과 같으며, 표기 중 C는 구조용 원형강관, T는 비계용 강관을 의미한다.

2.1.1 인장시험

소재의 기본적인 기계적 성질을 파악하고, 단주의 압축강도와 비교하여 강관의 국부좌굴과 소성가공에 의한 영향을 분석하기 위하여 비용접부 및 용접부(seam)에서 각각 3개의 시험편을 절취하여 시험하였다. 구조용 원형강관 시험편은 용접부의 영향을 알아보기 위하여 용접부 시험편을 포함하여 총 24개로 KS B 0801「금속재료 인장시험편」에 규정된 5호 및 12호 시험편으로 제작하여 시험하였으며, 비계용 강관은 시험공시체로부터 단면 그대로 절취하여 KS F 8002「비계용 강관」에 의해 심금을 이용하여 각 3개씩 총 6개를 시험하였다.

2.1.2 Stub-column 압축시험

단주압축시험은 강관의 제작 과정에서 용접 및 소성가공으로 인한 잔류응력을 포함한 강관의 순수 압축력에 대한 국부좌굴응력과 항복응력을 파악하기 위한 시험이다.

일반구조용 원형강관 및 비계용 강관 시험체의 단면성능은 표 1과 같고, 시험체 길이는 휨 좌굴의 영향을 피하기 위하여 미국의 SSRC와 Eurocode 3의 규준에 따라 단면 폭 또는 지름의 3배(L=3D)로 규격에 따라 제작하였다.

시험체 양단구속조건은 단순지지로 편심하중의 영향을 최소화하기 위하여 시험체의 단면을 면 처리한 후 U.T.M으로 단순재하 하였으며, 축변위의 측정을 위해 변위계(L.V.D.T)를 사용하였다.

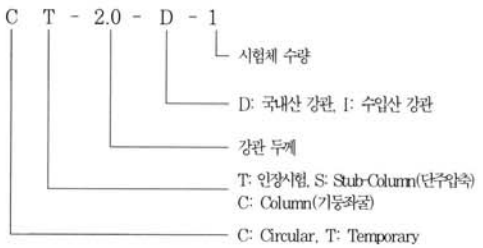


그림 1. 시험체 표기

표 1. 시험체 단면성능

단면규격		시험체명	제관구분	D (㎜)	t (㎜)	L (cm)	D/t	A (㎠)	I (㎝⁴)	r (cm)	λ	수량
일반구조용 탄소강관	Ø48.6×2.3	CS-2.0-D	국내	47.9	2.0	14.6	24.07	2.89	7.70	1.63	8.96	3
		CS-1.7-I	수입	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	국내	114.2	4.0	34.3	28.62	13.19	182.9	3.73	9.19	3
		CS-4.0-I	수입	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	국내	48.6	2.2	14.6	22.09	3.20	8.65	1.64	8.90	3
		TS-2.5-I	수입	48.5	2.5	14.6	19.4	3.60	9.35	1.61	9.07	3

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

2.2 시험결과 및 고찰

2.2.1 인장시험

인장시험 결과는 표 2와 같다. 항복강도는 응력-변형률 관계에서 항복참(yield plateau)이 뚜렷하게 나타나지 않아 그림 2와 같이 0.2% Offset법으로 구하였다.

시험결과, 대부분 시험체의 항복강도 및 인장강도 KS 규격의 기준 값을 만족하는 것으로 나타났으며, 용접부(seam)의 값이 비용접부의 값보다 높은 것으로 나타났다. 또한 구조용 원형강관 시험체에서는 생산처 구분에 따른 편차를 확인할 수 있었으며, 인장강도에서 더 큰 편차를 나타냄을 알 수 있었다. CT-1.7-I 수입산 강관 시험체의 경우, 비용접부의 인장강도는 330~345N/㎟, 용접부 인장강도는 341~359N/㎟로서 KS규격의 기준 값에 미달하는 것으로 나타났으며 연신율 또한 용접부의 경우에는 11% 정도로 취성적 거동을 나타내었다.

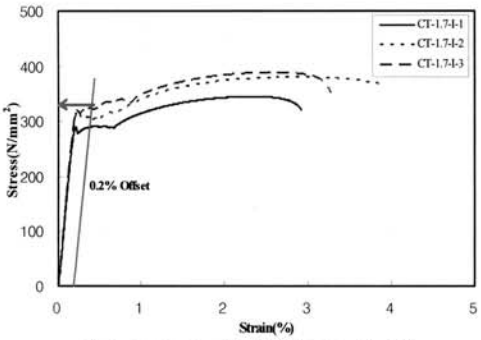


그림 2. CT-1.7-I 인장 시험체 응력-변위 관계

2.2.2 Stub-column 압축시험

표 3은 단주압축 시험결과를 나타낸 것으로 압축항복응력은 항복지점이 뚜렷하게 나타나지 않아 0.2% Offset법을 이용하여 구하였다. 다만, 항복응력 및 최대압축응력의 구분이 어려운 구조용 원형강관 CS-2.0-D 및 CS-4.0-D의 일부 시험체에 대하여 0.1% Offset법을 적용하였다. 압축항복응력을 구하기 위한 변형률은 시험체의 단부변위를 시험체 길이로 나눈 값으로부터 구하였다.

단주압축 시험결과 구조용 원형강관의 경우 최대압축강도는 CS-4.0-D 시험체가 가장 높은 평균 395.58N/㎟, CS-2.0-D 시험체가 평균 379.90N/㎟로 가장 작은 값을 나타내며, 전체적으로 일정한 내력범위를 확인할 수 있었다. 항복내력에서는 CS-4.0-D 시험체가 평균 388.99N/㎟로 가장 높은 값을 나타내었으며, CS-4.0-I 시험체가 평균 294.23N/㎟로 가장 낮은 값을 나타내었다. 비계용 강관의 최대압축강도의 경우 TS-2.2-D는 평균 539.78N/㎟, TS-2.5-I 시험체는 평균 454.39N/㎟로 생산처에 따른 큰 편차를 나타내었다. 또한, 압축항복강도의 경우 TS-2.2-D 국내산 강관 시험체는 우수한 성능을 발휘한 반면, TS-2.5-I 수입산 강관 시험체는 평균 338.25N/㎟으로 3개의 시험체 모두 설계기준강도인 355N/㎟ 이하의 성능을 나타내어 실제 사용에 있어 주의가 필요할 것으로 사료된다.

표 3의 이론좌굴강도(σ_{cr})는 단주압축항복강도($_s\sigma_y$)를 사용하여 구한 한계상태설계법(LSD)의 좌굴강도이며, 모든 시험체의 압축항복강도 및 최대압축강도 결과값이 이론값을 상회하고 있음을 알 수 있다.

또한 단주압축시험을 통하여 얻은 압축항복강도($_s\sigma_y$)와 인

표 2. 인장시험 결과

시험체명	σ_y (N/㎟)		σ_u (N/㎟)		σ_y/σ_u		ELO (%)	
	비용접부	용접부	비용접부	용접부	비용접부	용접부	비용접부	용접부
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	480	604	631	0.59	0.76	33	28
CT-4.0-I-1	298	372	388	447	0.77	0.83	27	22
CT-4.0-I-2	308	388	402	404	0.77	0.96	31	25
CT-4.0-I-3	342	346	411	415	0.83	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) σ_y: 항복강도(N/㎟), σ_u: 인장강도(N/㎟), σ_y/σ_u: 항복비, ELO: 연신률(%)

표 3. Stub-column 시험결과

시험체명	$_s\sigma_u$ (N/㎟)	$_s\sigma_y$ (N/㎟)	$_t\sigma_y$ (N/㎟)	σ_{cr} (N/㎟)	$_s\sigma_u/\sigma_{cr}$	$_s\sigma_y/\sigma_{cr}$	$_s\sigma_y/_t\sigma_y$
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, $_s\sigma_y$: 단주압축항복강도, $_t\sigma_y$: 인장시험 항복강도(비용접부), σ_{cr} : 이론좌굴강도

장시험 비용접부 항복강도($_t\sigma_y$)를 비교한 결과, 구조용 원형강관의 경우 CS-2.0-D의 시험체는 평균 0.84로서 수입산 강관 CS-1.7-I의 결과 1.03에 비하여 낮게 나타났다. 반면 시험체 CS-4.0의 경우 국내산 강관이 평균 1.03으로 수입산 강관에 비하여 소재성능 및 단면성능의 우수함을 확인할 수 있었다. 비계용 강관의 경우 TS-2.2-D 시험체는 평균 0.84, TS-2.5-I는 평균 0.82로 일정한 값을 보였다.

그림 3~그림 5는 구조용 원형강관 및 비계용 강관의 Stub-column 압축시험에 대한 응력-변위 관계이다.

응력-변위 관계에서 확인할 수 있듯이 구조용 원형강관 및 비계용 강관 시험체 모두 전반적으로 항복내력 이후에도 꾸준한 내력증가를 보이다 초기 항복이 일어난 후에도 응력이 지속적으로 상승한 후, 내력의 최대 점에서부터 서서히 저하되는 것을 확인할 수 있다. 이로부터 강관은 국부좌굴에 의한 내력저하 없이 소성변형능력이 우수하다는 것을 알 수 있다.

그림 3와 그림 4의 CS-2.0-D 및 CS-4.0-I의 일부 시험체의 경우 최대내력 이후 직선적인 거동을 나타내는 것을 볼 수 있다. 이는 국부좌굴이 시험체의 단부 면에 발생하여 직선적인 거동 이후에 다시 내력이 저하되므로 최대응력 산정에는 크게 영향이 없을 것이라 사료된다. 또한 그림 4에서 CS-4.0-D의 시험체는 항복강도와 최대압축강도의 차이가 크게 나지 않는 거동을 나타내고 있어 초기강성이 매우 큰 것으로 판단된다.

그림 5는 비계용 강관에 대한 거동을 나타내는 곡선으로 TS-2.5-I 수입산 강관의 경우 3개 시험체 모두, 압축항복강도가 설계항복강도(355N/㎟)이하의 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

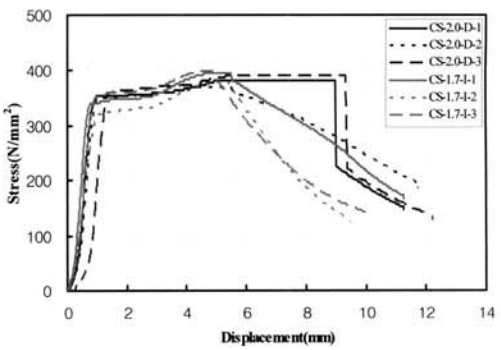


그림 3. 원형강관(ϕ48.6) Stub-column의 응력-변위 관계

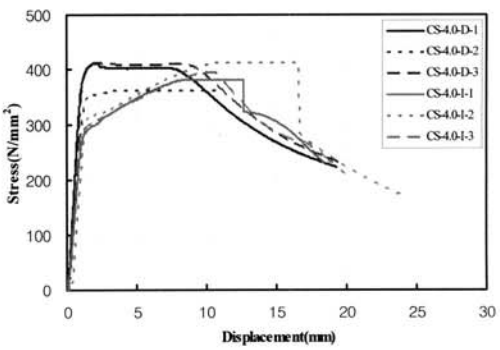


그림 4. 원형강관(ϕ114.3) Stub-column의 응력-변위 관계

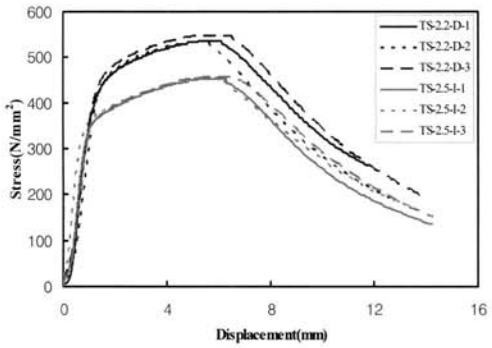


그림 5. 무차원화한 좌굴하중-판폭두께비

그림 6은 LSD를 사용한 좌굴응력-관경두께비 관계를 나타낸 것으로 무차원화한 좌굴하중이 1.0을 초과하면 시험으로부터 구한 값이 이론값보다 크다는 것을 의미한다. 종축의 굵은 점선은 CS-2.0의 한계상태설계법(=0.11E/Fy)에 의한 관경두께비 제한치로, 관경두께비 검토 시 항복강도는 인장시험 비용접부 항복강도를 사용하여 구하였다. 이는 CS-4.0 및 TS-2.2의 관경두께비 제한치가 CS-2.0의 관경두께비 제한치보다 큰 값으로, 모든 데이터는 CS-2.0 제한치내에 있기 때문에 대표적인 값을 표현하였다.

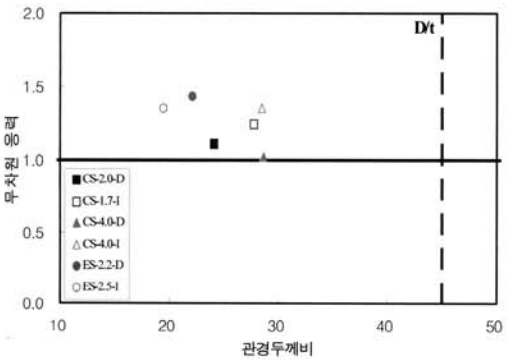
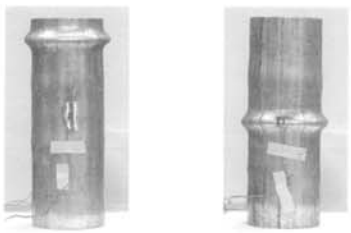


그림 6. 무차원화한 좌굴하중-판폭두께비



CS-4.0-1

사진 1. Stub-column 파괴형상

구조용 원형강관의 CS-2.0 시험체의 관경두께비는 평균 25.89, CS-4.0의 시험체는 평균 28.55로 관경두께비 제한치 내에서 좌굴내력이 50% 정도, 비계용 강관의 경우 60% 정도의 여유를 확인할 수 있다.

사진 1은 단주압축 시험 후의 파괴형상으로 구조용 원형강관 일부 시험체를 제외하고 모두 단부에서 좌굴이 발생하였으며, 대부분의 시험체는 축에 대하여 대칭(axisymmetric)을 이루는 국부좌굴 형태를 나타내었다.

3. 기둥 좌굴실험

3.1 실험계획 및 방법

강관이 압축부재로 사용될 경우의 좌굴성능 및 거동을 파악하기 위해 기둥 좌굴실험을 실시하였다. 기둥 좌굴실험은 소재성능 및 단면성능을 포함한 구조부재로서의 성능 파악을 위한 실험으로서 본 연구에서는 기둥의 비탄성 영역에서의 좌굴을 대상으로 하였다. 기둥 시험체는 각 단면에 대해 세장비 70으로 길이를 산정하여 3개씩 제작하였으며, 시험체의 표기는 2장의 그림 1에 따른다.

가력방법은 최대용량 500kN, 최대변위 ±300㎜의 액츄에이터를 이용하여 단조가력(Monotonic loading)하였으며, 시험체 양단부의 체결장치는 그림 7과 같은 지그를 제작하여 사용하였다. 이 경우 시험체의 유효좌굴길이(L_k)는 양 지그에

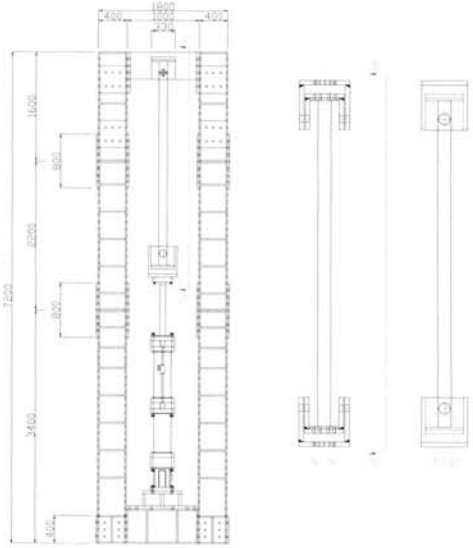


그림 7. 기둥 시험체 설치방법

있는 핀과 핀의 중심간 거리가 된다. 시험체는 강관의 양단부에 엔드 플레이트를 모살 용접하여 제작하였으며 용접부 부근에서 강관의 변형을 방지하기 위해 윙 플레이트로 보강하였다. 계측방법으로는 축방향 변위 및 중앙부의 처짐을 계측하기 위하여 줄 변위계를 설치하였다.

3.2 실험결과 및 고찰

강관이 기둥부재로 사용할 경우의 좌굴강도($_c\sigma_u$)는 실험에 의해 얻어진 최대하중을 실측한 단면적으로 나눈 값이며, 좌굴실험의 결과를 무차원 세장비, 좌굴강도, 이론좌굴강도 등으로 표 4에 나타내었다. 표에 있어 이론좌굴강도(σ_{cr})는 한계상태설계법(LSD)에 따른 좌굴강도이다.

각 시험체의 소재성능이 좌굴성능에 미치는 영향을 파악하기 위해 이론좌굴강도(σ_{cr}) 산정에 필요한 항복강도를 설계기준강도($_n\sigma_y$), 인장시험 비용접부 항복강도($_t\sigma_y$) 및 단주압축항복강도($_s\sigma_y$) 로 적용하여 구한 값과 실험값을 비교하였다. 이론좌굴강도의 산정에 있어서 강도저감계수 및 안전율은 제외 하였다.

실험결과 구조용 원형강관 CC-2.0-D 및 CC-1.7-I의 시험체는 큰 차이를 보이지 않으며 비슷한 좌굴성능을 나타내었으며, 비계용 강관의 좌굴내력의 경우 TC-2.2-D 국내산 강관 시험체는 평균 209.68N/㎟, TC-2.5-I 수입산 강관 시험체는 평균 156.62N/㎟으로 생산처에 따른 좌굴성능의 편차가 큰 것을 확인할 수 있었다.

설계기준강도($_n\sigma_y$)를 적용한 이론좌굴강도(σ_{cr1})와 실험값을 비교하면 구조용 원형강관은 전반적으로 80% 정도의 성능을 만족하였지만, 국내산 비계용 강관 TC-2.2-D 시험체는 90% 이상의 우수한 성능을 나타낸 반면, TC-2.5-I 수입산 강관의 경우에는 60% 정도로 낮은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

인장시험 항복강도($_t\sigma_y$)와 단주압축시험 항복강도($_s\sigma_y$)를 사용하여 구한 이론좌굴강도(σ_{cr2}, σ_{cr3})를 비교하면, CC-2.0-D 국내산 강관 및 CC-1.7-I 수입산 강관 시험체 모두 $_t\sigma_y$를 사용한 σ_{cr2}에 대한 좌굴강도가 $_s\sigma_y$를 사용한 σ_{cr3}에 대한 좌굴강도보다 작은 값을 보이고 있다.

그림 8과 그림 9에 기둥 시험체의 응력-변위 관계를 나타내었다.

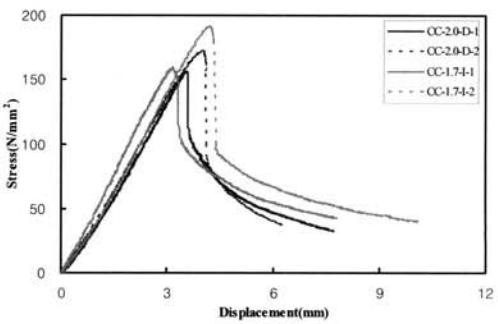


그림 8. 원형강관 좌굴실험 응력-변위 관계

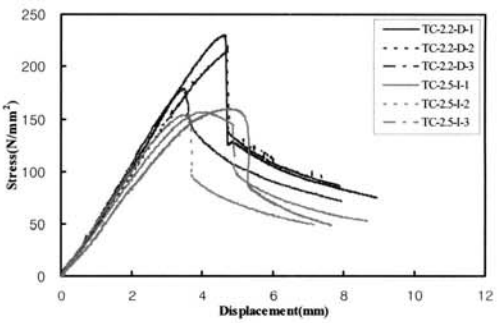


그림 9. 비계용 강관 좌굴실험 응력-변위 관계

표 4. 좌굴실험 결과

시험체명	λ	λ_{c1}	λ_{c2}	λ_{c3}	σ_u	이론좌굴강도(σ_{cr})			σ_u/σ_{cr1}	σ_u/σ_{cr2}	σ_u/σ_{cr3}	$\sigma_u/{}_s\sigma_u$
						σ_{cr1}	σ_{cr2}	σ_{cr3}				
CC-2.0-D-1	71.96	0.77	1.02	0.94	156.33	182.93	264.12	238.29	0.85	0.59	0.66	0.41
CC-2.0-D-2					172.26				0.94	0.65	0.72	0.45
CC-1.7-I-1	70.95	0.76	0.89	0.89	159.35	184.20	229.20	227.93	0.87	0.70	0.70	0.41
CC-1.7-I-2					191.37				1.04	0.83	0.84	0.49
TC-2.2-D-1	71.34	0.94	1.12	1.03	230.00	244.73	296.95	270.96	0.94	0.77	0.85	0.38
TC-2.2-D-2					220.19				0.90	0.74	0.81	0.37
TC-2.2-D-3					178.85				0.97	0.60	0.66	0.30
TC-2.5-I-1	72.67	0.96	1.04	0.94	159.52	241.33	263.95	234.17	0.66	0.60	0.65	0.35
TC-2.5-I-2					153.53				0.64	0.60	0.68	0.34
TC-2.5-I-3					156.80				0.65	0.59	0.67	0.35

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

그림 10~그림 12은 일반구조용 강관기둥의 내력평가를 위하여 LRFD의 설계기준과 SSRC 및 ECCS 복수강도곡선을 적용하여 나타내었다. SSRC 및 ECCS 복수강도곡선의 적용은 단일강도곡선에서 단면형상, 좌굴 축 방향, 잔류응력 분포 등의 변수가 고려된 설계기준이다.

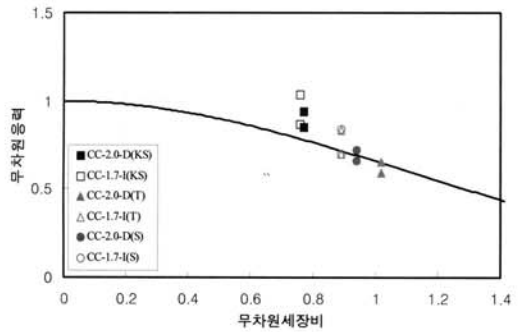


그림 10. 원형강관 LRFD 좌굴곡선

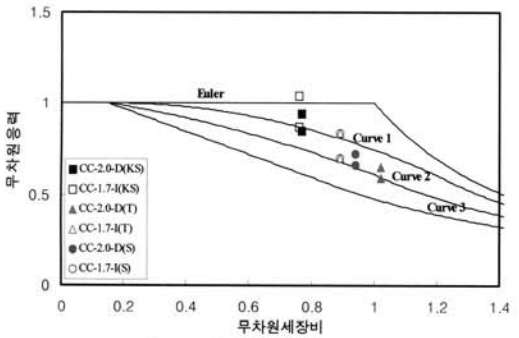


그림 11. 원형강관 SSRC 좌굴곡선

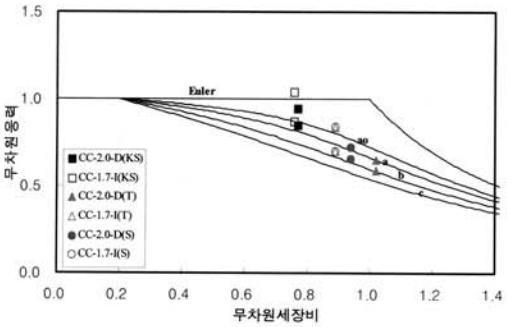


그림 12. 원형강관 ECCS 좌굴곡선

무차원응력-무차원세장비 관계에서 기준식에 적용되는 항복강도는 단주압축시험에서와 동일한 방법으로 설계기준강도($_n\sigma_y$), 인장시험 0.2% Offset 항복강도($_t\sigma_y$ 0.2% Offset항복강도($_s\sigma_y$) 세 가지로 구분하여)와 압축시험 비교하였다.

그림 10는 구조용 원형강관의 설계기준곡선으로 인장시험 항복강도($_t\sigma_y$) 및 압축시험 항복강도($_s\sigma_y$) 적용 시 국내산 강관 CC-2.0-D 및 수입산 강관 CC-1.7-I 시험체 모두 일부 시험체가 설계기준에 만족하지 못하였지만, 설계기준강도($_n\sigma_y$) 적용 시 현행 설계기준을 만족하는 것을 확인할 수 있었다.

그림 11은 실험결과를 SSRC 복수강도곡선에 나타낸 것으로 설계기준강도를 SSRC 기준식에 적용하였을 경우 세장비 0.8 이내에서 곡선1에 상회하였고, 인장시험 항복강도 및 압축시험 항복강도를 사용한 경우 전반적으로 곡선2에 근접하였다. 또한, 그림 12의 ECCS 복수강도곡선에서는 설계기준강도의 경우 a곡선, 인장시험 항복강도를 적용 시 b곡선에 근접하며, 압축시험 항복강도는 무차원세장비 0.9정도에서 b곡선에 해당함을 알 수 있지만, 인장시험 항복강도를 적용한 경우 국내산 강관 시험체는 SSRC 곡선2, ECCS 곡선b보다 낮은 값을 나타내었다. 따라서 $_t\sigma_y$를 적용한 경우보다 $_s\sigma_y$를 적용한 경우 SSRC 및 ECCS 복수강도곡선에서 보다 안전 측의 결과를 나타냄을 알 수 있다.

그림 13은 비계용 강관의 설계기준곡선으로 국내산 강관 시험체는 기준곡선에 모두 만족하였지만, 수입산 강관 시험체에서는 기준곡선보다 낮은 값을 나타내었다.

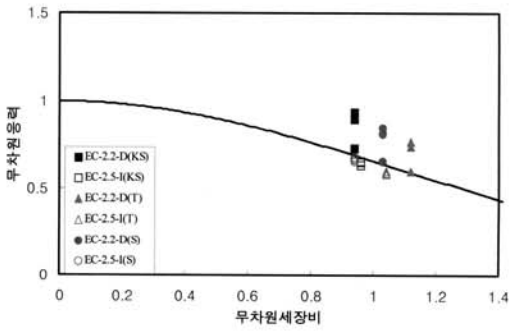


그림 13. 비계용 강관 LRFD 좌굴곡선

그림 14은 SSRC 무차원화 좌굴곡선으로 설계기준에 따른 실험결과를 비교할 수 있다. 설계기준강도, 인장시험 항복강도 및 압축시험 항복강도의 세 가지 경우를 적용한 결과 국내산 강관 시험체는 SSRC 복수강도 곡선2를 모두 만족하였지만, 수입산 강관 시험체의 경우 부적합한 값을 나타내었다. 또한, 그림 15의 ECCS 복수강도곡선의 경우 국내산 강관의 결과 값은 곡선 a, 수입산 강관의 결과 값은 곡선b를 상회하는 결

과를 보여 생산처 구분에 따른 편차를 나타내었다.

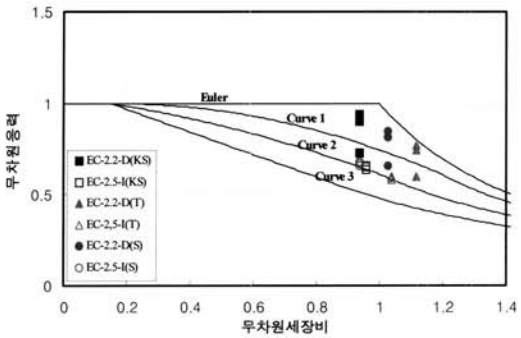


그림 14. 비계용 강관 SSRC 좌굴곡선

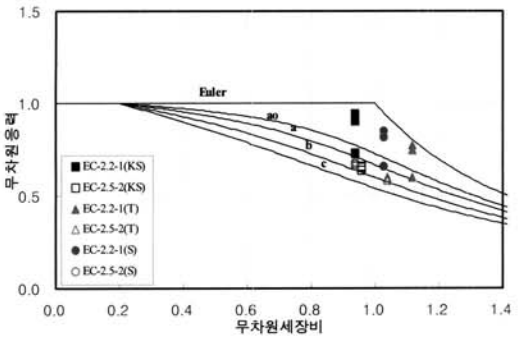


그림 15. 비계용 강관 ECCS 좌굴곡선

4. 결 론

본 연구는 현재 국내에 유통되고 있는 국내산 및 수입산 일반구조용 강관의 성능검토를 목적으로 인장시험, 단주압축시험 및 좌굴실험을 실시하여 강관의 소재성능 및 구조성능을 파악하였다. 실험 및 분석을 통한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 구조용 원형강관 및 비계용 강관의 인장시험결과, 항복강도와 인장강도는 전반적으로 비용접부보다 용접부에서 높은 값을 나타내었으며, 수입산 강관(CT-1.7-I)의 경우 인장강도가 국내의 설계기준강도보다 낮게 나타났다. 또한 용접부의 연신율은 11%로 연성이 부족한 것으로 확인되므로 사용상 주의가 필요할 것으로 사료된다.

(2) Stub-column 압축시험결과, 비계용 수입산 강관 (TS-2.5-I)의 경우 모든 시험체의 압축항복강도가 설계기준강도에 만족하지 못하였다. 또한, 구조용 원형강관에서는 각 시험체별 항복강도의 큰 편차를 나타내어 품질의 안정성을 확보하지 못한 결과를 나타내었다.

(3) 중심압축 좌굴 실험결과 비계용 강관의 경우 국내산 강관(TC-2.2-D)과 수입산 강관(TC-2.5-I) 시험체의 큰 편차가 확인 되었다. 또한, 인장시험 항복강도($_t\sigma_y$) 및 압축시험 항복강도($_s\sigma_y$)를 적용하여 얻은 이론좌굴강도와 실험좌굴강도와 비교한 결과 구조용 원형강관 모두 일부 시험체가 설계기준에 만족하지 못하였으며, 비계용 수입산 강관(TC-1.7-I)의 실험값은 상기의 두 가지 항복강도에 대한 설계좌굴강도를 만족하지 못하였다.

이상으로부터 소재 자체의 성능은 국내산 강관이 수입산 강관에 비하여 월등히 우수한 것을 확인하였으며, 일부 수입산 강관은, 품질이 안정적이지 못함을 확인하였다. 구조성능 평가에서는 국내산 강관이 수입산 강관에 비하여 전반적으로 우수한 성능을 보였지만, 국내산 강관의 경우도 소재의 우수성이 확인되었음에도 불구하고 일부 시험체의 중심압축 좌굴 성능이 설계기준보다 낮은 점은 차후 고려되어야 할 사항이라 판단된다.

참 고 문 헌

대한건축학회(1998) 강구조 한계상태 설계기준 및 해설
대한건축학회(1998) 강관구조 설계기준 및 해설
대한건축학회(1999) 냉간성형강 구조설계기준 및 해설
서성연 · 김필중 · 양양성 · 김규석(1993), 냉간성형 원형강관 및 각형강관부재의 인성에 관한 실험적 연구, **대한건축학회논문집**, 13권 2호.
장인화 · 임성우(2003), 스테인리스 304 강재의 국부좌굴에 관한 연구, **한국강구조학회논문집**, 15권 1호.
장호주, 양영성(2006), 스테인리스 강관 기둥의 내력에 관한 연구, **대한건축학회논문집 구조계**, 19권 6호.
장호주 외 3명(2003), 스테인리스강관과 일반구조용강관 단주내력 비교에 관한 연구, **한국강구조학회논문집**.
임성우 · 김요숙 · 장인화(2005), SM570TMC 강재의 압축재 특성에 관한 연구, **한국강구조학회논문집**, 17권 3호.
장호주 · 양영성(2005), 중심압축하중을 받는 스테인리스 강관 기둥의 좌굴내력에 관한 연구, **한국강구조학회논문집**.
AISC(2001) Manual of Steel Construction-Load and Resistance Factor Design, Third Edition
EUROCODE No.3(1992) Design of Steel Structures
SSRC, Guide to Stability Design Critiria for Metal Structures, Fifthth Edition, Theodore V. Galambos

(접수일자 : 2008. 3. 14 / 심사일 2008. 4. 4 / 게재확정일 2008. 6. 10)