

세장판요소를 갖는 스테인리스강 각형강관 압축재의 좌굴내력에 관한 실험적 연구

강현식¹ · 김태수^{2*}

¹교수, 경상국립대학교, 건축공학부, ²교수, 한양대학교 ERICA, 건축학부

Experimental Study on Buckling Strength of Cold-Formed Stainless Steel SHS Compression Members with Slender Section

Kang, HyunSik¹, Kim, TaeSoo^{2*}

¹Professor, School of Architectural Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, 52725, Korea

²Professor, School of Architecture & Architectural Engineering, Hanyang University ERICA, Ansan, 15588, Korea

Abstract - In this study, experiments of austenitic stainless steel (STS304 TKC) SHS(square hollow section) compression member under concentric axial loading were conducted to investigate buckling strength. Specimens are composed of slender section with large width-to-thickness ratio and same plate thickness. Main parameters are column length and width. Most of specimens except one with 50 mm width and 2,000 mm length and global buckling failed by local buckling. Yield strength obtained from compressive material tests of stub column got lower by 34 % than that of tensile coupon test results. The test buckling strengths were compared with those predicted by current stainless steel design specifications (American Society of Civil Engineers [ASCE] and Eurocode [EC3]) for stainless steel compressive members, American Iron and Steel Institute (AISI) code for carbon steel. It is known that design strengths with tensile material test data were close to test buckling strengths.

Keywords - Austenitic stainless steel, Square hollow section column, Slender section, Buckling, Design code

1. 서론

일반 탄소강(carbon steel)에 비해 내식성, 내구성, 심미성, 유지관리 상 용이성, 내진성능 및 생애주기비용(LCC) 측면에서 우수한 스테인리스강(stainless steel)을 건축물과 사회기반시설의 구조재로 적용하기 위한 연구가 국내외에서 다양하게 시도되어 왔다^{[1],[2]}. 이러한 장점에도 불구하고, 고가원소인 크롬(Cr)과 니켈(Ni)을 함유하고 있어 초기재료비가 탄소강보다 높기 때문에 스테인리스강은 경제적 측면에서 불리한 구조재료

로 인식되었다. 하지만, 생애주기비용(LCC) 측면에서 스테인리스강은 별도의 방청처리, 유지보수 비용이 필요하지 않기 때문에 20년 기준 탄소강보다 생애주기 비용이 50 % 절감되는 것으로 보고된다^[3]. 또한, Kim *et al.*의 연구에서 동일 냉간성형 탄소강에 비해 오스테나이트계 스테인리스강의 연신율은 88 %, 항복강도에 대한 인장강도비는 35 % 높아 재료적 측면에서도 우수한 것으로 나타났다^[4].

1966년 Johnson and Winter^[5]의 스테인리스강 기둥과 보에 관한 연구를 시작으로 다양한 연구자들에 의해 기둥, 보, 기둥-보접합부, 볼트접합부, 용접접합부 등 스테인리스강 구조부재에 대한 구조성능 및 내진성능에 대한 연구가 수행되어^{[6]-[15]} 스테인리스강 구조설계 기준 개정에 반영되었다. 이후 냉간성형 스테인리스강 기준인 미국토목학회의 SEI/ASCE-8-02^[16], SEI/ASCE-8-22^[17]와 유럽의 Eurocode 3 Part 1.4^[18]가 발표되었으며, 국내에서도 SEI/ASCE-8-02을 참조하여 2022년 냉

Note.-Discussion open until June 30, 2024. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on November 12, 2023; revised on November 20, 2023; approved on November 21, 2023.

Copyright © 2023 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-31-400-5131 Fax. +82-31-400-5959

E-mail. tskim0709@hanyang.ac.kr

간성형 스테인리스강 설계기준(KDS 41 30 40)^[19]을 규정하였다. 특히, 스테인리스강의 강관 압축재에 대한 연구로 Young and Ellobody^[20]은 오스테나이트계 및 듀플렉스계 스테인리스 원형강관 압축재를 양단 고정하여 세장단면이 아닌 강관의 좌굴강도 산정에 적용되는 초기변형계수와 한계세장비를 수정, 제안하였다. Theofanous *et al.*^[21]은 양단 핀지지의 타원형 스테인리스강관 중심압축재에 대한 좌굴곡선을 제안하였고, Buchanan *et al.*^[22]은 3종의 오스테나이트계, 듀플렉스계, 페라이트계 스테인리스 강관을 대상으로 하여 양단을 핀으로 설정하고 실험과 해석을 통해 Eurocode (이하 ‘EC3’)의 한계세장비를 수정하였다. Khathe *et al.*^[23]은 저니켈 듀플렉스계 스테인리스강 조립압축재에 대한 유한요소해석을 수행하여 현행기준식의 좌굴내력과 비교하였다. 국내에서는 Kim *et al.*^{[7],[9],[10]}은 오스테나이트계 스테인리스강 및 저니켈 듀플렉스계 스테인리스강 원형강관과 각형강관을 대상으로 압축부재에 관한 연구를 통해 좌굴내력식을 제안하였고, 가새부재에 대한 반복가력 실험을 통해 이력거동을 조사하여 스테인리스강의 우수한 에너지흡수능력을 확인하였다^[7]. 그러나, 최근까지 스테인리스강관의 구조거동에 관한 연구는 대부분 조밀단면 또는 비조밀 단면에 집중되어, 스테인리스강의 재료비용적 측면에서 폭두께비가 큰 세장판 요소를 갖는 구조부재의 압축 및 휨 좌굴거동에 대한 연구결과는 미흡한 실정이다.

이 연구에서는 국내에서 생산된 냉간성형 오스테나이트계 스테인리스 각형강관(STS304 TKC)으로 제작된 기둥에 대한 중심 압축실험을 통해 세장판 요소를 갖는 단면 및 길이 변수에 따른 압축부재의 좌굴거동을 조사, 비교한다. 실험결과로부터 얻은 좌굴내력과

현행 냉간성형 스테인리스강과 탄소강 압축재 설계강도식을 토대로 좌굴형태에 따라 산정된 좌굴내력과 비교하여 기준식 적용의 타당성을 검증하는 것을 연구 목적으로 한다.

2. 실험계획 및 재료시범

2.1 실험체 계획 및 실험방법

이 연구에서는 국내에서 생산되고 KS D 3536^[24]에 규정된 냉간성형 오스테나이트계 스테인리스강관(STS304 TKC)을 대상으로 양단 고정조건인 각형강관 압축재의 국부좌굴 및 전체좌굴 거동을 조사하기 위해 중심압축력을 받는 실험체를 제작하여 단순 압축실험을 수행한다.

동일한 공칭 두께를 갖는 각형강관에 대해 단면크기와 강관길이를 변수로 하여 총 6개의 실험체를 계획하였다. 실험체 양단에 평판두께 30 mm인 오스테나이트계 스테인리스강(STS304) 베이스플레이트(폭과 너비 각각 200 mm)에 각형강관 실험체를 오스테나이트계 용접봉(STS Y308)으로 온둘레 티그(TIG) 용접하였다. 실험체의 주요 변수는 단면크기(폭과 너비: 50 mm × 50 mm와 70 mm × 70 mm)와 각형강관 길이(250 mm, 1,000 mm와 2,000 mm)로 하였다.

실험체명, 실측길이, 단면치수, 단면적, 전체폭에 대한 폭두께비 및 세장비를 Table 1에 정리했다. 실험체명에서 첫 번째 문자열 ‘M’은 단순압축, 두 번째 ‘A1S’는 오스테나이트계 스테인리스강인 STS304 TKC, 세 번째 ‘50×50’은 각형강관의 폭과 너비, 네 번째 ‘1.5’는 각형강관 공칭두께를 가리키며, 마지막으로 ‘Stub’, ‘1’,

Table 1. Specimen list and measured dimension

Specimen	Actual thickness t_e (mm)	Length L (mm)	Width w_1 (mm)	Width w_2 (mm)	Area A (mm ²)	Width-thickness ratio w_m/t_e	Slenderness ratio λ_e KL/r
M-A1S-50×50×1.5×Stub	1.57	248	49.92	49.98	303.83	29.83	6.28
M-A1S-70×70×1.5×Stub	1.56	248	70.06	69.97	427.16	42.91	4.43
M-A1S-50×50×1.5×1	1.56	998	49.90	49.83	301.42	29.99	25.28
M-A1S-70×70×1.5×1	1.54	998	69.65	70.11	420.97	43.53	17.93
M-A1S-50×50×1.5×2	1.55	1,998	49.90	49.91	299.80	30.20	50.58
M-A1S-70×70×1.5×2	1.59	1,997	70.10	70.05	435.56	42.09	35.71

‘2’는 각각 강관길이 250 mm, 1,000 mm, 2,000 mm를 의미한다. 강관길이 250 mm인 실험체는 단주이며, 실험체의 압축좌굴강도뿐만 아니라 압축재료 특성을 파악하기 위해 제작되었다.

단순압축은 2,000 kN급의 만능시험기(UTM)를 사용하였으며, 가력은 변위제어방법으로 0.5 mm/min 속도로 수행하였다. 축변위 및 횡변위와 변형도를 측정하기 위하여 Fig. 1에 표시한 바와 같이 변위계(LVDT)와 스트레인 게이지(strain gauge)를 설치하였다. 변위계 L1은 수직변위를 측정하고, 변위계 L2와 L3는 각각 1번과 4번 기둥면방향에 수평변위를 다른 방향에서 측정하도록 중앙에 설치한다. 단주인 250 mm 실험체에서는 국부좌굴의 양상이 예측되어 횡변위를 측정하지 않고 수직변위만 측정한다. 스트레인 게이지(S)를 중앙부의 강관 용접부를 제외하고 3면에 1개씩(S1, S2, S3), 기둥면 상부(S4)와 하부(S5)에 1개씩, 총 5개를 설치하여 가력에 따른 변형도 변화를 조사하였다.

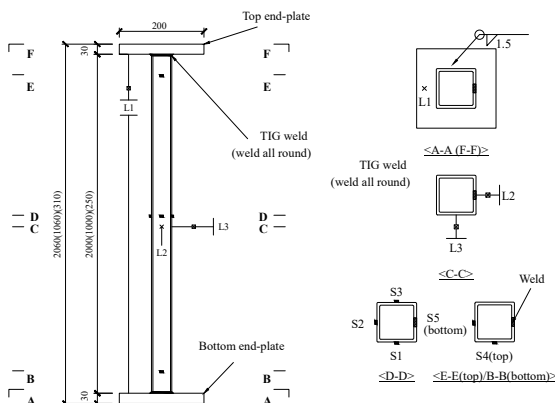


Fig. 1. Set-up of transducer(LVDT) and strain gauges

2.2 재료시험 및 결과

2.2.1 인장재료시험

오스테나이트계 스테인리스강관(STS304 TKC) 평판부의 기계적 성질을 파악하기 위해 KS B 0801에 따

라 13B호 시험편을 폭 50 mm와 70 mm의 각형강관으로부터 각 면당 1개씩 총 4개의 인장재료시험편을 채취하였고, KS B 0802에 따라 단순 인장시험을 실시하였다. 평균 실측두께 및 평균 재료적 성질을 Table 3에 정리하였고, 응력-변형도 곡선을 Fig. 2에 표시하였다. 그 결과 항복점이 뚜렷하지 않은 비선형을 확인하였다. 재료 항복강도는 0.2 % 옴셋 방법을 통해 산정하였다. KS D 3536^[24]에서 오스테나이트계 스테인리스 강관의 최저항복강도는 205 MPa, 인장강도는 520 MPa, 연신율은 40 % 이상으로 규정하고 있으며, Table 2의 결과는 이 조건을 모두 만족하는 것으로 나타났다.

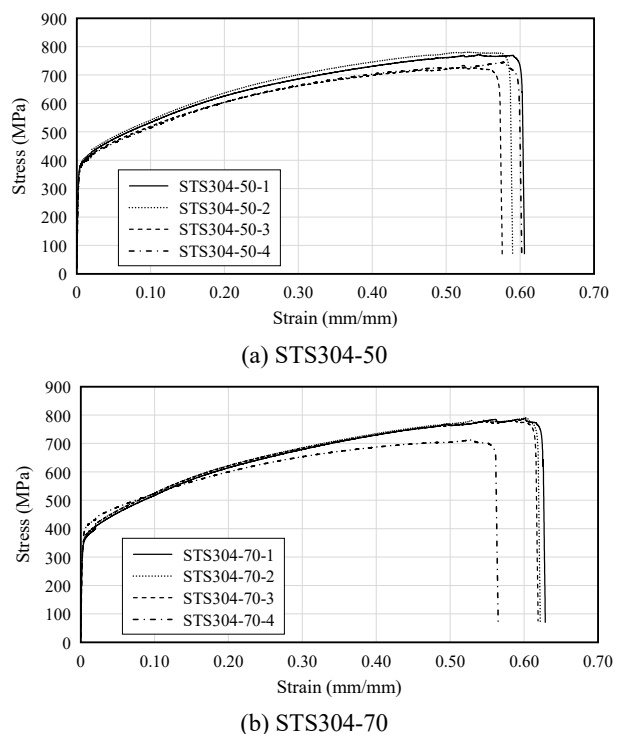


Fig. 2. Stress-strain curves by tensile coupon test

Table 2의 n 은 SEI/ASCE-8-02^[16]에서는 변형도 경화지수(Strain hardening coefficient)이며, 람베르그-오스구드 재료모델식 $n = \ln(20)/\ln(F_{0.2}/F_{0.01})$ 을 이용해 산

Table 2. Material tensile test results

Specimen	Actual plate thickness t_e (mm)	Young's modulus E (GPa)	Yield stress $F_{y0.01\%}$ (MPa)	Yield stress $F_{y0.2\%}$ (MPa)	Tensile strength F_u (MPa)	Yield ratio F_y/F_u (%)	Elongation EL (%)	n
STS304-50	1.55	160.19	354.36	373.52	757.08	49.56	59.32	11.50
STS304-70	1.53	168.09	343.69	364.47	768.78	48.16	60.81	10.16

정하였다. SEI/ASCE-8-22^[17]에서는 오스테나이트계 스테인리스강에 대해 n 값으로 7을 적용하고 있다.

2.2.2 단주(stub column) 압축시험

STS304 TKC 강관의 압축 재료특성을 파악하기 위해 Table 1에서 부재길이가 250 mm인 단주(stub column) 실험체의 중앙 집중 압축실험을 실시하였다. 축하중을 강관 단면적으로 나눈 값을 압축응력으로 하고, 변형도는 실험체에 부착된 스트레인 게이지값으로 정리하여 Fig. 3에 나타냈다. Table 3에 단주의 압축 실험결과로 얻은 강관의 압축재료성질을 정리하였다.

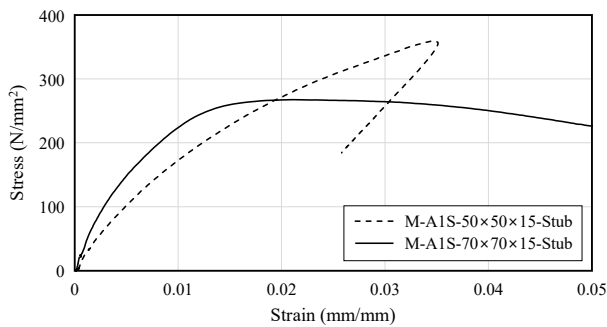


Fig. 3. Stress-strain curves by stub column test

실험 결과, M-A1S-50×50×1.5×Stub는 실험체 단부에서 국부좌굴이 발생하였고, M-A1S-70×70×1.5×Stub는 실험체 중앙부에서 국부좌굴이 발생하였다. M-A1S-50×50×1.5×Stub의 경우 폭두께비가 M-A1S-70×70×1.5×Stub보다 작아 충분한 내력상승 이후 실험체 하단에서 국부좌굴의 발생으로 급격한 내력저하가 발생하였다. 반면에 M-A1S-70×70×1.5×Stub는 초기에 압축력에 저항하다가 중앙부에서 국부좌굴이 발생, 서서히 내력이 저하되어 M-A1S-70×70×1.5×Stub와 상이한 응력-변형도 곡선이 나타난 것으로 판단된다. 이러한 국부좌굴의 발생으로 각형강관의 단주실험체의 항복강도와 인장강도는 Table 3의 인장재료시험결과에 비해 각각 평균 34 %, 59 % 낮게 나타났다.

Kim *et al.*의 폭이 동일한(50 mm와 70 mm) 오스테나이트계 스테인리스강(STS304 TKC) 강관 단주 압축실험체에서는 공칭강관두께가 3.0 mm로 폭두께비가 1/2 정도 작아서 국부좌굴 발생 전에 충분한 내력상승이 발생하여 인장재료시험결과보다 단주 압축 재료 항복강도가 평균 13 % 높게 나타났다^[25].

3. 실험결과

3.1 좌굴형태 및 내력

Table 1의 6개 실험체 중심압축 실험결과로부터 좌굴형태와 최대압축좌굴내력을 조사하기 위하여, 실험체 폭두께(t_e)와 강관 전체폭(w_m)으로 구한 폭두께비(w_m/t_e)와 세장비(λ_e)를 Table 4에 정리했다. 폭두께비는 Fig. 1과 Table 1에 제시된 w_1 와 w_2 중 큰 값으로 산정했다.

실험종료 시점에서 각 실험체의 좌굴형태를 Fig. 4에 나타냈다. 최대내력 시점에서 대부분의 실험체들은 중앙부 또는 단부에서 국부좌굴(local buckling, L mode)이 발생하였으며, 강관 공칭폭이 50 mm이고 길이가 2,000 mm인 실험체 M-A1S-50×50×1.5×2는 Fig. 4(e)에서 알 수 있듯이 중앙부에서 전체좌굴(overall buckling, O mode)이 관찰되었고 횡좌굴 정도가 커져 실험종료 시점에서는 중앙부에서 국부좌굴도 동반되었다.

Table 2의 EC3 스테인리스강 기준인 EN 1993-1-4^[18]을 토대로 실험체에 사용된 각형강관의 단면분류(section class)는 $(c/t)/\epsilon$ 를 기준으로 Table 4에 정리하였다. Table 4에서 c 는 Table 1의 실험체 강관폭의 평균값(w_m)에서 강관두께(t_e)의 2배를 공제한 값이고, 재료항복강도의 보정계수 ϵ 는 $\sqrt{\frac{235}{F_y} \frac{E}{210,000}}$ 로 정의한다. $(c/t)/\epsilon$ 가 37을 초과하는 경우 단면분류는 세장단면인 Class 4로 정의된다. 이 실험체에 사용된 강관의 $(c/t)/\epsilon$ 값은 모

Table 3. Compressive material properties of stub column test results

Specimen	Length L (mm)	Young's modulus E (GPa)	Yield stress $F_{y0.01\%}$ (MPa)	Yield stress $F_{y0.2\%}$ (MPa)	Ultimate compressive stress F_{uc} (MPa)	n
M-A1S-50×50×1.5×Stub	248	19.03	119.73	238.69	359.20	5.58
M-A1S-70×70×1.5×Stub	248	34.53	56.16	259.16	267.60	1.96

Table 4. Results of the central compression experiment results

Specimen	w_m/t_e	EC3 (Table 3)		Ultimate strength P_{ue} (kN)	Buckling mode at ultimate state	Slenderness ratio $\lambda_e = KL/r$
		$\frac{c/t}{\epsilon}$	Section class			
M-AIS-50×50×1.5×Stub	29.83	43.07	4	109.13	L	6.28
M-AIS-70×70×1.5×Stub	42.91	59.74	4	114.31	L	4.43
M-AIS-50×50×1.5×1	29.99	43.29	4	112.50	L	25.28
M-AIS-70×70×1.5×1	43.53	60.59	4	108.82	L	17.93
M-AIS-50×50×1.5×2	30.20	43.59	4	81.54	O	50.58
M-AIS-70×70×1.5×2	42.09	58.59	4	113.13	L	35.71

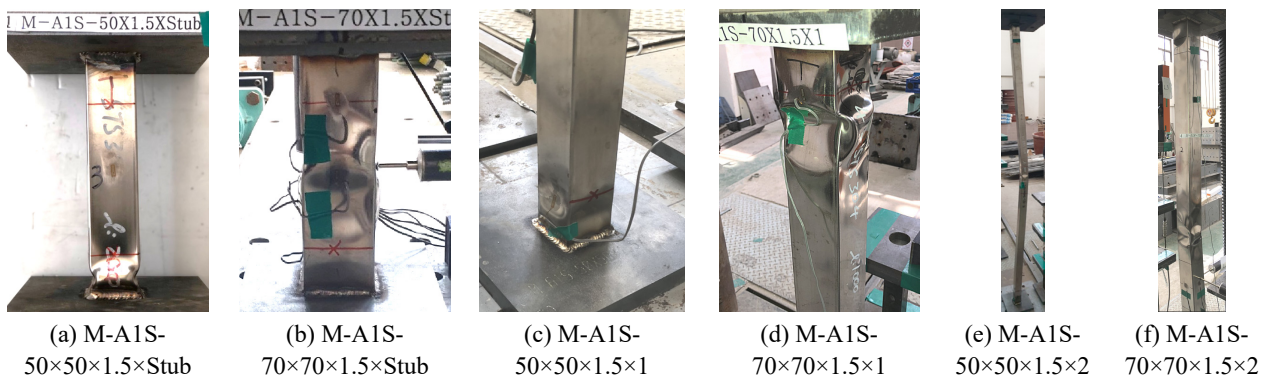


Fig. 4. Fracture shapes at end of the test

두 37을 초과하므로 EC3에 의한 단면분류는 Class 4 이다.

최대내력 시점에서 전체좌굴이 발생한 M-AIS-50×50×1.5×2를 제외하고 국부좌굴에 의해 최대내력이 결정된 실험체는 폭두께비와 세장비에 관계 없이 실험 좌굴내력에 큰 차이가 없었고, 국부좌굴내력은 전체 좌굴내력에 비해 약 37 % 높았다.

4. 현행 기준식 및 좌굴내력비교

국내에서도 서론에서 언급한 바와 같이 2022년에 냉간성형 스테인리스강 설계기준을 제정하였다. 국외의 스테인리스강 구조기준으로는 미국토목학회의 냉간성형 스테인리스강 설계기준인 SEI/ASCE-8-02^[16]와 SEI/ASCE-8-22^[17], 열간압연과 냉간성형 스테인리스강을 모두 포함하는 유럽 기준 EC3^[18]이 발표되었다. 본 장에서는 현행 기준에서 규정하고 있는 압축재의 좌굴내력 강도식을 탄소강 설계기준에 대한 식을 포함하여 정리한다.

4.1 스테인리스강 압축재 기준설계식

4.1.1 미국토목학회(ASCE) 기준

미국토목학회(American Society of Civil Engineers)에서는 2002년과 2022년 냉간성형 스테인리스강 설계기준을 개정하였다.

(1) SEI/ASCE 8-02^[16]

실험 최대내력 및 실험종료 시점에서의 좌굴형태로 국부좌굴, 전체좌굴 또는 두 좌굴의 조합 형태가 관찰되었다. 휨모멘트가 작용하지 않고 중심압축력을 받는 스테인리스강 각형강관 압축재의 좌굴강도(P_{ut})는 식 (1)과 같이 유효단면적($A_e = \rho wt$)과 공칭좌굴응력(F_n)의 곱으로 산정한다. 국내 냉간성형 스테인리스강 설계기준(KDS 41 30 40)^[19]도 동일한 식을 적용한다.

$$P_{ut} = F_n A_e \tag{1}$$

휨-비틀림 좌굴응력(F_n)은 접선탄성계수(E_t)와 세장비(KL/r)의 곱인 식 (2)로 정의된다.

$$F_n = \frac{\pi^2 E_t}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \leq F_y \quad (2)$$

다음의 식 (3)에 의해 산정된 접선탄성계수가 식 (2)의 관계식을 만족하도록 F 가 F_n 에 최대한 근접하도록 입력 F 값을 변경하면서 찾는다.

$$E_t = \frac{EF_y}{F_y + 0.002nE \left(\frac{F}{F_y}\right)^{n-1}} \quad (3)$$

여기서, A_e : 좌굴응력 F_n 에서 계산된 유효면적, F_n : 식 (2)에 의한 휨-비틀림 좌굴응력, E_0 : 재료 초기탄성계수, E_t : 식 (3)에 의한 좌굴응력에 대한 압축부분 접선탄성계수, F_y : 0.2 % 윽셋 재료항복강도, K : 윽좌굴길이계수, L : 부재길이, r : 단면 2차 반경, F : 재료 공칭압축강도, n : 재료의 소성화계수.

(2) SEI/ASCE 8-22^[17]

미국토목학회의 냉간성형 스테인리스강 구조기준은 미국국가표준협회(ANSI)의 인증을 받아 2023년 새롭게 제정되었다. 압축력을 받는 각형강관 부재의 공칭압축강도(P_{ul})는 항복 및 전체좌굴(P_{ul1})과 국부좌굴(P_{ul2})을 고려하여 산정된다.

- 항복 및 전체좌굴강도(P_{ul1})

$$P_{ul1} = F_n A_g \quad (4)$$

여기서, F_n 은 압축응력, A_g 는 전체단면적이다. F_n 은 다음 조건으로 구한다.

- ① $\lambda_c \leq \beta_0$ 인 경우:

$$F_n = F_y + \left(1 - \frac{\lambda_c}{\beta_0}\right) (F_u - F_y) \quad (5)$$

- ② $\beta_0 < \lambda_c \leq 1.8$ 인 경우:

$$F_n = 1.2 \left(\beta_1^{\lambda_c}\right) F_y \quad (6)$$

- ③ $\lambda_c > 1.8$ 인 경우:

$$F_n = \beta_2 F_e \quad (7)$$

여기서, $\lambda_c = \sqrt{F_y/F_e}$ 이고, 비틀림 또는 휨-비틀림좌굴을 받지 않는 단면에 대해서 탄성전체좌굴응력, $F_e = \pi^2 E/(KL/r)^2$ 이다. 오스테나이트계 스테인리스강에 대해서는 $\beta_0 = 0.24$, $\alpha = 1.13$, $\beta_1 = 0.41$, $\beta_2 = 0.69$ 를 제시한다.

- 국부좌굴강도(P_{ul2})

$$P_{ul2} = F_n A_e \leq P_{ul1} \quad (8)$$

여기서, A_e : 윽효폭($b = \rho w$)으로 산정한 윽효단면적이다. ρ 는 국부감소계수, w 는 강관폭이다.

- ① $\lambda \leq 0.654$ 일 때: $\rho = 1.0$

- ② $\lambda > 0.654$ 일 때:

$$\rho = 0.772(1 - 0.10/\lambda)/\lambda \quad (9)$$

여기서, $\lambda = \sqrt{F_y/F_{cr1}}$ 이고, 각형강관부재에서는 냉간성형에 의한 강도상승을 고려하기 위해 F_y 는 재료인장시험 또는 단주압축시험으로 얻은 항복강도로 산정한다.

국부좌굴응력인 F_{cr1} 은 다음 식으로 산정한다.

$$F_{cr1} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{w}\right)^2 \quad (10)$$

여기서, k : 판좌굴계수(길이방향 모서리의 웨브에 의해 지지되는 구속판요소) = 4.0, ν : 강재의 푸아송비(0.3), w : 요소의 평판 폭이다.

- 국부좌굴압축강도(P_{ul2})

직접강도법(DSM)으로 구멍이 없는 압축부재에 대해 국부좌굴압축강도 P_{ul2} 는 다음에 따라 산정한다.

- ① $\lambda_l \leq 0.550$ 인 경우:

$$P_{ul2} = P_{ul1} \quad (11)$$

- ② $\lambda_l > 0.550$ 인 경우:

$$P_{ul2} = \left[0.95 - 0.22 \left(\frac{P_{cr1}}{P_{ul1}}\right)^{0.5}\right] \left(\frac{P_{cr1}}{P_{ul1}}\right)^{0.5} P_{ul1} \quad (12)$$

여기서, $\lambda_l = \sqrt{\frac{P_{ul1}}{P_{cr1}}}$, P_{ul1} : 식 (4)의 전체좌굴압축

강도, P_{cr1} : 탄성임계국부좌굴강도.

압축부재의 국부좌굴강도 P_{cr1} 는 다음과 같이 산정한다.

$$P_{cr1} = A_g F_{cr1} \quad (13)$$

4.1.2 유럽기준 Eurocode 3^[18]

중심압축력을 받는 압축부재의 내력(P_{ul})은 폭두께비(b/t)에 따른 단면분류(class)에 따라 다음 식에 의해 산정한다.

$$P_{ut} = \chi A_{eff} F_y \tag{14}$$

여기서, χ : 좌굴을 고려한 감소계수, A_{eff} : 유효폭(ρw)으로 산정한 유효단면적.

압축좌굴을 고려한 감소계수(χ)는 식 (15)로 산정한다.

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} \leq 1 \tag{15}$$

여기서, $\phi = 0.5 \times \{1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2\}$, α : 각형강관에 대해서 초기변형계수로 휨좌굴 형태를 갖는 각형강관의 경우 0.49, $\bar{\lambda}_0$ 는 한계세장비로 0.40이다. Class 1, 2, 3에 대해 $\bar{\lambda} = \sqrt{A_g F_y / N_{cr}}$ 이며 Class 4는 $\bar{\lambda} = \sqrt{A_{eff} F_y / N_{cr}}$ 이고, A_{eff} 는 유효단면적으로 ρA_g 이다. N_{cr} 은 세장비에 따른 임계좌굴하중이고 식 (16)에 의해 구한다.

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} \tag{16}$$

여기서, L_{cr} 은 KL 이다.

ρ 는 감소계수로 상세한 사항은 EC3 기준을 참고한다^[18].

4.2 미국철강협회(AISI) 냉간성형 탄소강 설계기준

미국철강협회의 탄소강 구조설계기준인 AISI S100-16^[26]에서는 중심압축을 받는 스테인리스강관 압축부재의 좌굴내력(P_{ut})을 부재의 총단면적(A_e)과 공칭압축응력(F_n)의 곱으로 규정하고 있다. 휨모멘트가 작용하지 않고 중심압축력을 받는 냉간성형 탄소강 각형강

관 압축재의 전체좌굴강도(P_{ut})는 전체좌굴강도(P_{ut1})와 국부좌굴강도(P_{ut2}) 중 작은 값으로 한다.

- $\lambda_c \leq 1.5$ 일 때:

$$F_n = (0.658^{\lambda_c^2}) F_y \tag{17}$$

- $\lambda_c > 1.5$ 일 때:

$$F_n = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right) F_y \tag{18}$$

여기서, F_n : 공칭좌굴응력, F_e : 임계좌굴응력.

직접강도법(DSM)으로 구멍이 없는 압축부재에 대해 국부좌굴축강도 P_{ut2} 는 다음에 따라 산정한다.

- $\lambda_l \leq 0.776$ 일 때:

$$P_{ut2} = P_{ut1} \tag{19}$$

- $\lambda_l > 0.776$ 일 때:

$$P_{ut2} = \left[1 - 0.15 \left(\frac{P_{cr1}}{P_{ut1}} \right)^{0.4} \right] \left(\frac{P_{cr1}}{P_{ut1}} \right)^{0.4} P_{ut1} \tag{20}$$

4.3 설계내력과 실험내력 비교

4.1절과 4.2절의 현행 냉간성형 스테인리스강과 냉간성형 탄소강 설계기준의 압축재 좌굴강도식으로 산정된 기준좌굴내력(P_{ut})과 3장의 실험좌굴내력(P_{ue})을 비교하여 Table 5에 정리하였다.

EC3에서는 세장비($\bar{\lambda}$)와 폭두께비를 기준으로 단면을 분류하고 있고, 이 연구 실험체의 강관은 Class 4로 분류되어 국부압축좌굴과 유효단면을 고려하여 좌굴강도를 산정하였다. EC3에 의한 예측좌굴내력은 인장

Table 5. Buckling strength comparison between design predictions and experiment results

Specimen	Test strength P_{ue} (kN)	Test buckling mode	Buckling strength ratio P_{ut}/P_{ue}					
			EC3 (Table 2)	EC3 (Table 3)	SEI/ASCE-8-02	SEI/ASCE-8-22	DSM in SEI/ASCE-8-22	AISI S100-16
M-AIS-50×50×1.5×Stub	109.13	L	0.83	0.56	1.06	1.45	1.20	0.96
M-AIS-70×70×1.5×Stub	114.31	L	0.85	0.69	0.90	1.61	1.33	1.05
M-AIS-50×50×1.5×1	112.50	L	0.80	0.54	1.01	0.76	0.77	0.72
M-AIS-70×70×1.5×1	108.82	L	0.87	0.71	0.91	0.90	0.94	0.96
M-AIS-50×50×1.5×2	81.54	O	0.88	0.66	1.39	0.84	0.80	0.72
M-AIS-70×70×1.5×2	113.13	L	0.87	0.72	0.96	0.72	0.82	0.84
Average	-	-	0.85	0.64	1.04	1.05	0.98	0.87
COV	-	-	0.037	0.122	0.175	0.364	0.242	0.157

재료시험과 압축재료시험결과를 각각 반영하여 비교하였다. 2.2.2절에서 언급한 바와 같이 Kim and Kim의 기존 연구에서 이 연구의 실험체보다 2배의 강관 두께를 적용하여 압축재료시험의 항복강도가 인장재료시험 항복강도보다 높게 나타났고, 부재의 압축특성을 반영한 압축재료 항복강도를 적용하였을 경우 실험의 좌굴내력 평가 정도가 높은 것으로 나타났으나 이 연구의 실험체에서는 폭두께비가 2배 증가되어 가력 초기 단계에 국부좌굴이 발생, 인장재료시험의 항복강도보다 압축재료시험 항복강도가 낮게 나타나 Table 5의 실험좌굴내력에 대한 기준좌굴내력의 내력비(P_{ul}/P_{ue})도 큰 차이가 발생하였다.

SEI/ASCE-8-02에서는 항복 이후 점선탄성계수, 유효폭, 소성화계수 등을 고려하여 좌굴강도를 산정하였고, SEI/ASCE-8-22에서는 λ_c 와 λ 를 기준으로 압축부재의 전체좌굴 및 국부좌굴 여부를 구분하고 오스테나이트계 스테인리스강의 재료적 특성에 의해 제시된 각종의 계수를 반영하여 좌굴강도를 산정하였다. 추가로, 국부좌굴강도의 경우 직접강도법(DSM)을 적용하여 산정한 좌굴내력을 비교하였다. 재료적 성질이 다르지만 참고기준으로 탄소강 냉간성형 설계기준 AISI S100-16에 의해 세장비를 토대로 전체좌굴 및 국부좌굴내력도 실험내력과 비교하였다. 비교 결과, 재료인장시험 항복강도와 압축시험 항복강도를 각각 반영한 EC3에 의한 평균내력비(P_{ul}/P_{ue})는 각각 0.85, 0.65로 나타났다. 이는 실험체에 사용된 강관의 폭두께비가 커서 단주 압축실험체에서 조기에 국부좌굴이 발생하여 압축항복강도가 낮았기 때문으로 판단된다.

SEI/ASCE-8-02와 SEI/ASCE-8-22, SEI/ASCE-8-22의 직접설계법(DSM)에 의해서는 평균 내력비가 각각 1.04, 1.05, 0.98로 평균적으로는 실험내력과 근사한 값을 보였으나, 전체좌굴이 발생한 실험체나 단주실험체에 있어 기준내력이 실험내력을 과대평가하여 변동계수(COV)가 다른 기준보다 높았다. SEI/ASCE-8-22 DSM에 의해서는 압축재의 길이가 짧아 탄성좌굴응력(F_e)이 상대적으로 커진 단주실험체인 경우를 제외하고는 안전측으로 평가하였다. 냉간성형 탄소강 설계기준인 AISI S100-16에 의한 평균내력비는 0.87로 안전적 예측을 제공하였고, 실험에서 국부좌굴에 의해 최대내력이 결정된 실험체 M-A1S-50×50×1.5×1에 대해 전체좌굴이 발생하는 것으로 예측하였다.

현행기준내력과 실험내력을 비교한 결과, 세장판 요소로 구성된 오스테나이트계 스테인리스강 각형강관 중심압축재(양단고정 조건)의 좌굴내력은 Fig. 5에 나타난 바와 같이 인장재료시험을 반영한 EC3 기준이 모든 실험체에 대해 안전한 좌굴내력을 제시하는 것으로 확인되었다.

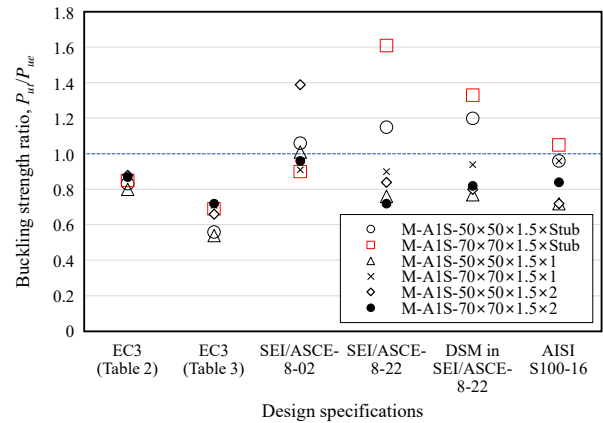


Fig. 5. Buckling strength ratio between test and design strengths

5. 결론

세장판 단면요소를 갖는 냉간성형 오스테나이트계 스테인리스 각형강관(STS304 TKC)을 대상으로 양단 고정인 중심축 압축력을 받는 압축부재의 실험을 수행하였고, 현행기준식(EC3, ASCE, AISI, KDS)에 의한 압축좌굴내력과 실험내력을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 압축부재의 재료적 특성을 조사하기 위해 각형강관의 평판부 인장재료시험과 단주실험체(길이 250 mm)의 압축실험을 통해 각형강관의 재료적 성질을 확인하였다. 인장재료시험결과는 KS에 규정된 재료적 성질을 만족하였으나, 세장판 요소로 구성된 각형강관의 압축재료강도는 충분한 압축내력에 도달하지 못하고 국부좌굴이 발생하여 항복강도와 인장강도는 인장재료시험결과에 비해 각각 평균 34%, 59% 낮게 나타났다.
- (2) 단주실험체(stub)는 하단부 또는 중앙부에서 국부좌굴이 발생하였다. 폭이 50 mm이고 길이가 2,000 mm인 실험체 M-A1S-50×50×1.5×2는 중

양부에서 전체좌굴이 발생하였고, 그 외 실험체는 모두 단주실험체와 유사하게 국부좌굴에 의해 최대내력이 결정되었다. 국부좌굴이 발생한 실험체는 폭·길이와 관계없이 유사한 좌굴내력을 보였으며, 전체좌굴이 발생한 실험체 M-AIS-50×50×1.5×2보다 좌굴내력이 37% 높았다.

- (3) 인장재료시험결과를 반영한 EC3 기준식에 의한 압축재 좌굴내력에 대한 평균 실험내력비는 큰 편차 없이 0.85로 나타났으나, 조기 국부좌굴에 의해 압축재로 항복강도가 인장재로 항복강도보다 낮아 EC3 기준에 의한 좌굴내력은 평균 36% 과소평가되었다. SEI/ASCE-8-02와 SEI/ASCE-8-22에 의한 평균 내력비는 각각 1.04, 1.05로 실험내력에 근사한 값을 보였으나, SEI/ASCE-8-02는 전체좌굴이 발생한 실험체에 대해, SEI/ASCE-8-22는 단주실험체에 대해 좌굴내력을 39%~61% 범위로 과대평가하였다. SEI/ASCE-8-22의 직접설계법(DSM)에 의해서는 단주실험체에서 좌굴내력을 과대평가하는 경향이 보였으나 다른 실험체에 대해서는 안전측의 평가를 나타냈다. AISI S100-16의 경우 실험에서 국부좌굴에 의해 최대내력이 결정된 실험체에 대해 전체좌굴이 발생하는 것으로 분류되었고, 탄소강과의 재료적 특성 차이가 반영되지 못하였다.

현행기준식에서 대상으로 하는 스테인리스강관의 항복강도, 항복비, 탄성계수 등의 재료적 성질이 본 연구가 대상으로 하는 강관의 재료적 성질의 차이에서 발생한 것으로 판단되며, 추후 이를 고려한 내력식을 고찰해 볼 필요가 있다.

감사의 글

이 연구는 2023년도 경상국립대학교 대학회계연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌(References)

- [1] Rossi, B. (2014) Discussion on the Use of Stainless Steel in Constructions in View of Sustainability, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, Vol.83, pp.182-189.
- [2] Gardner, L. (2019) Stability and Design of Stainless Steel Structures - Review and Outlook, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, Vol.141, pp.208-216.
- [3] The Steel Construction Institute (2017) *Design Manual for Structural Stainless Steel* (4th Ed.), SCI, UK.
- [4] Kim, S.S., Kim, J.Y., and Kim, T.S. (2020) Finite Element Analysis on Buckling Strength of Stainless Steel Circular Hollow Section Columns Under Concentric Axial Compression, *International Journal of Steel Structures*, KSSC, Vol.20, No.6, pp.1831-1848.
- [5] Johnson, A.L., and Winter, G. (1966) Behavior of Stainless Steel Columns and Beams, *Journal of the Structural Division*, American Society of Civil Engineers, Vol.92, No.5, pp.97-118.
- [6] Hwang, B.K., Kim, T.S., Kim, Y.J., and Kim, J.W. (2022) A Comparative Study on Hysteretic Characteristics of Austenitic Stainless Steel and Carbon Steel Slit Dampers Under Cyclic Loading, *Journal of Building Engineering*, Elsevier, Vol.45, 103553.
- [7] Kim, R.H., Kim, T.S., Im, S.H., and Xi, Y. (2021) Hysteretic Behavior Comparison of Austenitic and Lean Duplex Stainless Steel Square Hollow Section Members Under Cyclic Axial Loading, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.237, 112227.
- [8] Kim, T.S., and Kuwamura, H. (2007) Finite Element Modeling of Bolted Connections in Thin-Walled Stainless Steel Plates Under Static Shear, *Thin-Walled Structures*. Elsevier, Vol.45, No.4, pp.407-421.
- [9] Kim, S.S., Kim, J.W., and Kim, T.S. (2019) An Experimental Study on the Buckling Behaviors of Stainless Steel Tubular Columns Under Concentric Axial Compression, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.31, No.4, pp.273-282 (in Korean).
- [10] Kim, J.Y., and Kim, T.S. (2020) An Experimental Investigation on the Buckling Behaviors of Stainless Steel Square Hollow Section Compressive Members with Different Steel Grades, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KCCS, Vol.32, No.5, pp. 309-320.
- [11] Nip, K.H., Gardner, L., and Elghazouli, A.Y. (2010) Cyclic Testing and Numerical Modelling of Carbon Steel and Stainless Steel Tubular Bracing Members, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.32, No.2, pp. 424-441.
- [12] Liu, Y., and Young, B. (2003) Buckling of Stainless

- Steel Square Hollow Section Compression Members, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.59, No.2, pp.165-177.
- [13] Kim, T.S., Kim, M.S., and Cho, T.J. (2015) Strength of Channel Bolted Connection with Austenitic Stainless Steel (304 Type), *International Journal of Steel Structures*, Vol.15, No.3, pp.719-731.
- [14] Huang, Y., and Young, B. (2018) Design of Cold-Formed Stainless Steel Circular Hollow Section Columns Using Direct Strength Method, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.163, pp.177-183.
- [15] Chang, X., Yang, L., Zong, L., Zhao, M.H., and Yin, F. (2019) Study on Cyclic Constitutive Model and Ultra Low Cycle Fracture Prediction Model of Duplex Stainless Steel, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.152, pp.105-116.
- [16] American Society of Civil Engineers (2002) *Specification for the Design of Cold-Formed Stainless Steel Structural Members* (SEI/ASCE-8-02), USA.
- [17] American Society of Civil Engineers (2023) *Specification for the Design of Cold-Formed Stainless Steel Structural Members* (SEI/ASCE-8-22), USA.
- [18] European Committee for Standardization (2006) *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1.4: General Rules - Supplementary Rules for Stainless Steel* (EN 1993-1-4: 2006), Belgium.
- [19] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2022) *Design Specification of Cold-formed Stainless Steel Structures* (KDS 41 30 40: 2022), Korea (in Korean).
- [20] Young, B., and Ellobody, E. (2006) Column Design of Cold-Formed Stainless Steel Slender Circular Hollow Sections, *Steel and Composite Structures*, Techno-Press, Vol.6, No.4, pp.285-302.
- [21] Theofanous, M., Chan, T.M., and Gardner, L. (2009) Structural Response of Stainless Steel Oval Hollow Section Compression Members, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.31, No.4, pp.922-934.
- [22] Buchanan, C., Real, E., and Gardner, L. (2018) Testing, Simulation and Design of Cold-Formed Stainless Steel CHS Columns, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, Vol.130, pp.297-312.
- [23] Khate, K., Patton, M.L., and Marthong, C. (2018) Structural Behaviour of Stainless Steel Stub Column Under Axial Compression: A FE Study, *International Journal of Steel Structures*, KSSC, Vol.18, No.5, pp.1723-1740.
- [24] Korean Agency for Technology and Standards (2015) *Stainless Steel Pipes for Machine and Structural Purposes* (KS D 3536: 2015), Korea (in Korean).
- [25] Kim, S.K., Kim, S.H., and Kim, T.S. (2022) Experimental Study on Hysteretic Behaviors of Stainless Steel and Carbon Steel Square Hollow Section Members Under Cyclic Loading, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.34, No.5, pp.279-288 (in Korean).
- [26] American Iron and Steel Institute (2016) *North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members* (AISI S100-16), USA.

요약: 이 연구에서는 오스테나이트계 스테인리스강 각형강관(STS304 TKC) 압축재의 좌굴내력을 조사하기 위해 중심압축력 실험을 수행하였다. 2종의 각형강관의 폭두께가 큰 세장판 요소 단면으로 구성되며 실험체의 주요 변수는 각형강관의 폭과 길이이다. 최대내력 시점에서 전체좌굴이 발생한 폭이 50 mm이고 길이가 2,000 mm인 실험체를 제외하고는 모두 국부좌굴이 발생하였다. 세장판 요소로 구성된 각형강관 압축재로 단주 실험체에서 조기에 국부좌굴이 발생하여 압축재료항복강도가 인장 재료항복강도보다 34 % 낮아 기준좌굴내력이 과소평가되었다, 냉간성형 스테인리스강에 대한 유럽기준(EC3), 미국토목학회기준(SEI/ASCE 8-02, SEI/ASCE 8-22)와 냉간성형 탄소강에 대한 미국철강협회 기준(AISI S100)에 의한 좌굴내력과 실험내력을 비교하였다. 인장재료시험을 반영한 EC3식에 의한 좌굴내력이 실험내력에 안전측면에서 가장 근접한 것으로 확인되었다.

핵심용어: 오스테나이트계 스테인리스강, 각형강관, 세장판요소, 압축좌굴, 설계기준
