

강종차이에 따른 스테인리스강 각형강관 압축재의 좌굴거동에 관한 실험적 연구

김정연¹ · 김태수^{2*}

¹석사과정, 한밭대학교, 건축공학과, ²교수, 한밭대학교, 건축공학과

An Experimental Investigation on the Buckling Behaviors of Stainless Steel Square Hollow Section Compressive Members with Different Steel Grades

Kim, Jeong Yeon¹, Kim, Tae Soo^{2*}

¹Graduate Student (Master's Course), Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Korea

²Professor, Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Korea

Abstract - An experimental study on austenitic stainless steel (STS304 TKC and STS316 TKC) and lean duplex stainless steel (STS329FLD TKC) square hollow section (SHS) columns subjected to centrally axial compression has been conducted to investigate the buckling behaviors of the compression members with both fixed ends. Main variables are steel type, column length and width-thickness ratio. Buckling modes at ultimate state were classified into local buckling and global buckling. From tensile material test results, cold-working hardening led to strength enhancement by 2.10 and 1.31 times, respectively compared to design yield stress and tensile strength. Compressive material properties of SHS members was also investigated through stub column tests. Stub columns and duplex stainless steel columns showed a local buckling mode. 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) for carbon steel and equations by other researchers. As a result, it is found that design strengths with compressive material test data of stub column than tensile material data were close to test buckling strength.

Keywords - Austenitic stainless steel, Lean duplex stainless steel, Local buckling, Global buckling, Design code, Buckling strength

1. 서론

스테인리스강은 높은 초기비용 때문에 구조용 부재료의 적용에 제약이 되고 있지만, 우수한 뛰어난 연성과 변형경화 능력으로 에너지 흡수능력이 뛰어나고 별도의 방청처리가 필요 없어 LCC(life cycle cost) 측면에서 탄소강보다 유리하다. 특히, 스테인리스강 강관이 외부에 노출되는 압축재 및 인장

재료의 사용이 증가되면서 다양한 연구가 진행되고 있다.

스테인리스강 중에서도 오스테나이트계 스테인리스강은 내식성, 가공성, 용접성이 우수하여 현재 판, 코일, 선 등의 형태로 가장 폭넓게 사용되고 있지만 니켈의 함유량이 8% 이상이어서 고가이다. 따라서, 가격경쟁력을 높이기 위해 니켈의 함유량을 1.5% 이하로 낮추고 강도를 향상시킨 저니켈 듀플렉스계 스테인리스강(STS329FLD)이 개발되어 KS에 추가되었다^{[1],[2]}. 그러나 아직 국내 스테인리스강 구조설계기준은 제정되어 있지 않은 실정이다. 미국이나 유럽에서 건축구조부재로서의 스테인리스강 활용에 대해 지속적으로 연구되어 왔고 냉간성형 스테인리스강 기준인 미국 토목학회의 ASCE 8-02^[3]와 유럽의 Eurocode 3 Part 1.4^[4]가 발행되었다. 스테인리스강의 강관 압축재에 대한 연구로 Young and Ellobody^[5]는 오스테나이트계 및 듀플렉스계 스

Note.-Discussion open until April 30, 2021. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on July 10, 2020; revised September 09, 2020; approved on September 19, 2020.

Copyright © 2020 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-42-821-1121 Fax. +82-42-821-1590

E-mail. tskim@hanbat.ac.kr

테인리스 원형강관 압축재를 양단고정하여 세장단면이 아닌 강관에 대해 좌굴강도산정에 있어서 초기변형계수와 한계세장비를 수정·제안하였다. Theofanous *et al.*^[6]은 양단 핀 지지의 타원형 스테인리스강관 중심압축재에 대한 좌굴곡선을 제안하였고 Buchanan *et al.*^[7]은 3종의 오스테나이트계, 듀플렉스계, 페라이트계 스테인리스 강관을 대상으로 하여 양단을 핀으로 설정하고 실험과 해석을 통해 EC3의 한계세장비를 수정하였다. Khate *et al.*^[8]은 저니켈 듀플렉스계 스테인리스강 조립압축재에 대한 유한요소해석을 수행하여 현행기준식의 좌굴내력과 비교하였다. 국내에서는 Kim *et al.*^{[9],[10]}이 오스테나이트계 스테인리스강 및 저니켈 듀플렉스계 스테인리스강 원형강관을 대상으로 중심압축실험과 유한요소해석을 수행하여 현행기준식에 의한 좌굴내력을 비교하였고 좌굴내력식을 제안하였다.

이 연구에서는 국내에서 생산된 2종의 냉간성형 오스테나이트계 스테인리스 각형강관(STS304 TKC, STS316 TKC)과 1종의 저니켈 듀플렉스계 스테인리스 각형강관(STS329FLD TKC)을 동일치수로 제작된 기둥에 대한 중심 압축실험을 통해 강종 및 단면변수에 따른 압축부재의 좌굴 거동을 조사하고 비교한다. 실험결과로부터 얻어진 좌굴형태와 좌굴내력과 현행기준식에 의해 산정된 좌굴내력과 비교하는 것을 연구목적으로 한다.

2. 실험계획 및 재료시험

2.1 실험체 계획 및 제작

본 연구에서는 국내생산(KS D 3536) 냉간성형 오스테나이트계 스테인리스강관(STS304 TKC, STS316 TKC)과 저니켈 듀플렉스계 스테인리스 강관(STS329FLD TKC)을 대상으로 양단고정(유효좌굴길이 계수 0.5)인 각형강관 압축재의 국부좌굴 및 전체좌굴 거동을 조사하기 위해 중심압축력을 받는 실험체를 제작하여 단순 압축실험을 수행한다. 각형강관의 단면크기와 강관길이를 기하학적 변수로 하여 총 15개의 실험체를 레이저 절단하여 양단에 평판두께 30 mm 인 오스테나이트계 스테인리스강(STS304) 베이스플레이트(폭과 너비: 200 mm)에 각형강관 실험체를 오스테나이트계 용접봉(Y308)으로 온돌레 티그(TIG) 필릿용접을 하였다. 베이스플레이트와 각형강관 접합시 주각용 스티프너는 별도로 고려하지 않았다. 실험체의 주요변수는 단면 크기(폭과 너비: 50×50 mm와 70×70 mm)와 각형강관 길이(250 mm, 1,000 mm와 2,000 mm)로 하였다. 실험체명, 길이, 단면치수, 단면적, 폭두께비 및 세장비를 Table 1에 정리했다. 실험체명에서 ‘M’은 단순압축, ‘A1S’와 ‘A2S’는 오스테나이트계 스테인리스강인 STS304 TKC와 STS316 TKC를, DS는 듀플

Table 1. Specimen list and measured dimension

Specimen	Actual thickness t_e (mm)	Length L (mm)	Width $W1$ (mm)	Width $W2$ (mm)	Area A (mm ²)	Width-thickness ratio W/t_e	Slenderness ratio λ_e KL/r	Buckling strength by EC3 (kN)
M-A1S-50×50×3×Stub	2.97	248	49.36	50.24	555.5	14.94	6.52	113.88
M-A1S-70×70×3×Stub	2.99	248	69.34	69.91	797.6	21.36	4.57	163.50
M-A2S-50×50×3×Stub	2.98	248	49.42	49.92	555.7	14.78	6.52	113.91
M-A2S-70×70×3×Stub	2.92	248	69.30	69.44	775.8	21.79	4.56	159.04
M-DS-70×70×1.7×Stub	1.59	248	69.96	70.72	435.9	42.62	4.43	120.67
M-A1S-50×50×3×1	3.03	985	49.36	50.21	566.2	14.58	25.93	116.07
M-A1S-70×70×3×1	3.02	985	69.26	69.46	800.1	21.04	18.19	164.01
M-A2S-50×50×3×1	3.05	976	49.33	50.04	568.7	14.41	25.73	116.58
M-A2S-70×70×3×1	3.01	992	69.47	70.04	803.9	21.26	18.25	164.81
M-DS-70×70×1.7×1	1.63	982	70.01	70.69	448.7	41.30	17.58	127.44
M-A1S-50×50×3×2	3.02	199	49.27	50.25	564.3	14.64	52.69	106.02
M-A1S-70×70×3×2	3.14	2,001	69.25	69.88	833.3	20.28	36.98	170.82
M-A2S-50×50×3×2	3.08	2,001	49.20	49.99	573.0	14.23	52.90	107.49
M-A2S-70×70×3×2	3.06	2,000	69.13	69.62	812.0	20.74	37.01	166.45
M-DS-70×70×1.7×2	1.81	2,002	70.08	70.53	496.9	36.89	35.87	149.91

렉스계 스테인리스강 STS329FLD TKC를 나타낸다. 세 번째로 ‘50×50’은 각형강관의 폭과 너비, 네 번째인 ‘3’ 또는 ‘1.7’은 각형강관 두께, 마지막으로 ‘Stub’, ‘1’ 또는 ‘2’는 각각 강관길이 250 mm, 1,000 mm, 2,000 mm를 의미한다. KS^[2]의 최저항복강도와 EC3 기준식(탄성계수 포함)^[4]에 의한 Table 1의 설계좌굴내력을 나타냈고 내력비는 동일강종에 대해 면적비에 비례하고 세장비에 반비례하였다. 단순압축은 만능시험기(UTM)를 사용하였으며, 가력은 변위제어로서 0.5 mm/min 속도로 수행하였다. 축변위 및 횡변위와 변형도를 측정하기 위하여 Fig. 1과 같이 변위계(LVDT)와 스트레인 게이지(strain gauge)를 설치하였다. 변위계 L1은 수직변위를 측정하고 변위계 L2와 L3는 각각 1번과 4번 기동면방향에 수평변위를 다른 방향에서 측정하도록 중앙에 설치한다. 단주인 250 mm 실험체에서는 국부좌굴의 양상을 보일 것으로 예측되어 수평변위를 측정하지 않고 수직변위만 측정한다. 스트레인 게이지를 기동의 1번 기동면 상부와 하부에 1개씩, 중앙부 각 면에 1개씩 부착하여 기동 당 6개의 스트레인 게이지(SG1 - SG6)를 설치하여 가력에 따른 변형도 변화를 조사하였다.

2.2 각형강관의 초기변형 형태 및 크기

각형강관의 가공 및 제작시 발생하는 초기변형 및 형태(오목 또는 볼록)를 각형강관의 4면을 대상으로 3차원 스캐너로 측정하여 각 면의 오목 및 볼록형태와 초기변형값을 측정하였다. 측정한 기동의 면번호는 Fig. 1의 D-D' 단면의 스트레인 게이지 번호와 동일하고, 대부분의 각형강관 실험체에서 주로 1면과 3면이 오목한 모양을, 2면과 4면이 평평

하거나 볼록한 모양을 나타냈다. M-DS-70×70×1.7×1 실험체는 1면과 4면이 평평하고 2면과 3면이 오목한 형태로 나타났다. 평평한 면을 제외하고 측정된 초기변형은 0.09 mm - 0.34 mm의 범위로 측정되었다.

2.3 재료시험

2.3.1 인장재료시험

각형강관 평판부의 기계적 성질을 파악하기 위해 시험편은 KS B 0801에 규정된 13B호 시험편 총 5개의 강관에 대해 각 면당 1개씩 4개의 재료시험편을 채취하여 KS B 0802(금속재료인장시험 방법)에 따라 단순 인장시험을 수행하였다. 재료시험 결과, Fig. 2와 같은 응력도-변형도 곡선을 얻었다. 재료시험은 사용한 5개의 강관에 대해 총 20개의 재료시험을 통해 평균 실측두께 및 평균 재료적 성질을 Table 2에 정리하였다. Fig. 2에서 시험편 4번의 경우는 Fig. 1에서 용접부(weld)에서 채취하였고 강관의 다른 위치에서 절취한 시험편보다 강도는 유사했지만 용접부의 영향으로 연신율은 특히, STS329-70-4가 다른 시험편보다 낮게 나타났다. 오스테나이트계 스테인리스강관(STS304 TKC, STS316 TKC)에 비해 듀플렉스계 스테인리스강관(STS329FLD TKC)의 항복강도 및 항복비는 높게 나타났고 연신율은 낮게 나타났다. STS316 TKC는 다른 강종보다 인장강도가 낮게 나타났고 동일 강종에 대해서는 코너부 사이가 작은 강관폭 50 mm 강관의 재료강도가 가공의 영향으로 상승된 것을 알 수 있다. KS D 3536에서 오스테나이트계 스테인리스강관의 경우 최저항복강도는 205 MPa, 인장강도는 520 MPa, 듀플렉스계 스테인리스강관의 경우 항복강도는 450 MPa, 인장강도

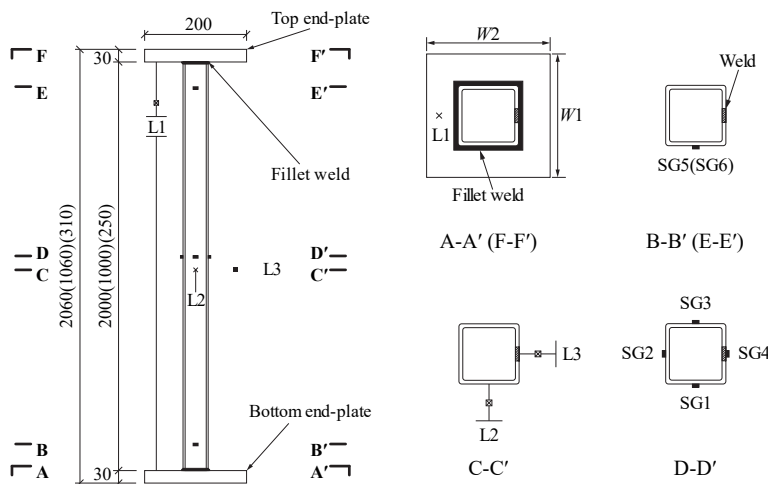


Fig. 1. Set-up of transducer(LVDT) and strain gauge

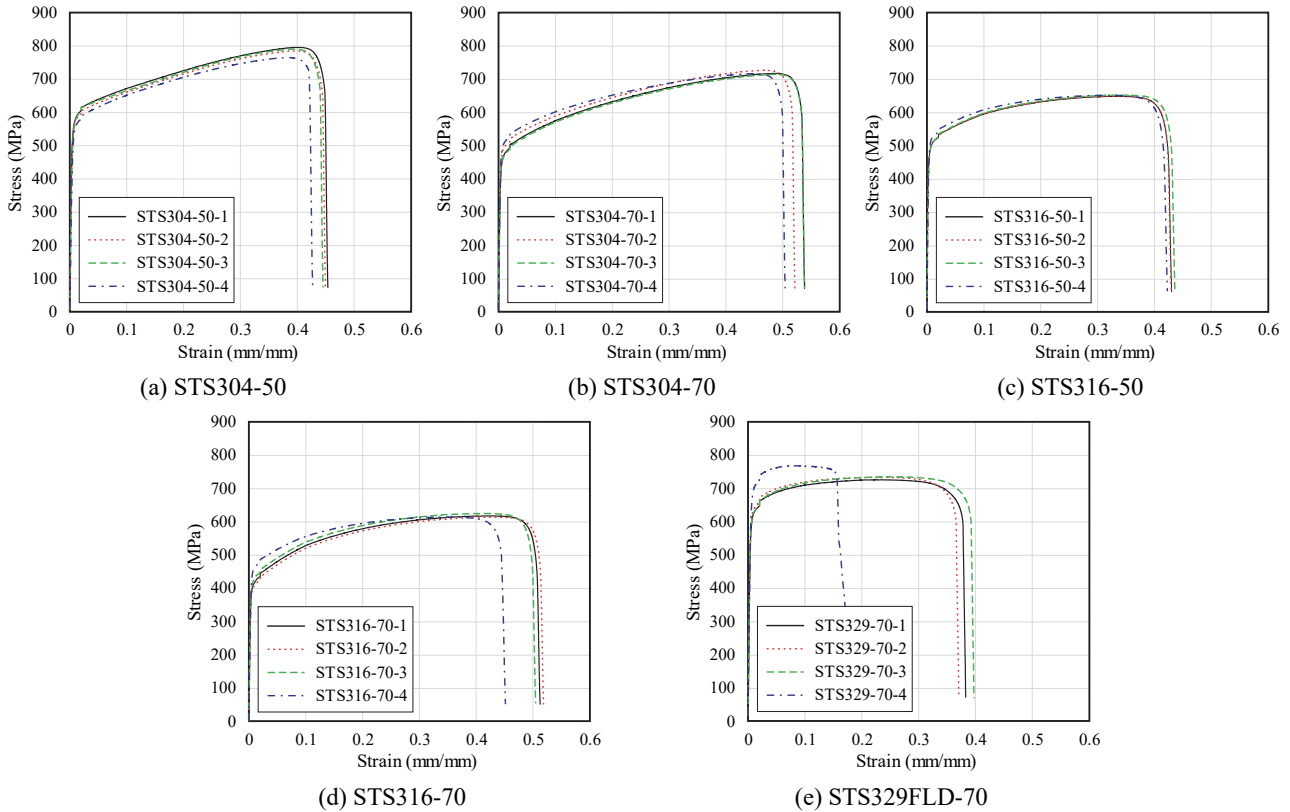


Fig. 2. Stress-strain curves by tensile coupon test

Table 2. Material tensile test results

Coupon	Actual plate thickness t_e (mm)	Young's modulus E (GPa)	Yield stress σ_y 0.01 % (MPa)	Yield stress σ_y 0.2 % (MPa)	Tensile strength σ_u (MPa)	Yield ratio σ_y/σ_u (%)	Elongation EL (%)	n
STS304-50	3.01	161.82	315.73	519.42	784.82	66.19	44.38	6.12
STS304-70	2.98	157.43	299.26	468.47	719.53	65.11	52.56	6.80
STS316-50	3.02	174.19	375.69	480.88	650.55	73.92	42.97	12.83
STS316-70	2.98	131.22	269.41	410.04	626.05	65.51	49.68	7.41
STS329-70	1.61	165.82	424.85	603.35	741.05	81.40	33.20	8.75

는 620 MPa로 규정하고 있고 재료시험결과 모두 이 값을 만족하는 것으로 나타났다. Table 2에서 n 은 변형도 경화지수 (strain hardening exponent)로 램베르그-오스구드(Ramberg-Osgood) 재료모델식($n = \ln(20)/\ln(\sigma_{0.2}/\sigma_{0.01})$)을 사용해 산정하였다^{[11],[12]}.

2.3.2 단주 압축재료시험

각형강관의 압축 재료특성을 파악하기 위해 Table 1의 단주 실험체(stub column)의 압축시험 결과로부터, 축하중을 단면적으로 나눈 값을 압축응력으로 하고, Fig. 1의 D-D' 단면

에 표시한 것과 같이 단주 중앙부의 1면에 설치된 스트레인 게이지(SG1)로부터 측정된 압축변형도와와의 관계를 Fig. 3에 나타냈다. Table 3에 단주의 압축시험결과로 얻어진 각 강종의 재료적 성질을 정리하였다. 듀플렉스계 스테인리스강 각형강관 단주 실험체 M-DS-70×70×1.7×Stub는 Fig. 6(m)과 같이 스트레인 게이지가 부착된 중앙부에서 국부좌굴이 발생하여 다른 강종과는 달리 조기에 최대내력이 결정되었다. M-DS-70×70×1.7×Stub의 0.2% 윽셋 항복강도(σ_y)와 변형도 경화지수(n)는 스트레인 게이지가 부착된 중앙부에서 국부좌굴이 발생하였고 변형도 0.2% 이전에서 최대내력

이 결정되어 산정이 불가능했다. 오스테나이트계 스테인리스강 각형강관(STS304 TKC와 STS316 TKC)의 경우 압축 항복강도는 인장 항복강도보다 13% - 17% 높게 나타났다. 압축 최대강도는 단면크기가 50×50인 단주에서 인장강도와 거의 동일했으나 단면크기가 70×70인 단주인 경우에는 폭두께비의 상승으로 상하부에 국부좌굴이 쉽게 발생하여 STS304 TKC와 STS316 TKC강종에 대해 압축 최대강도가 인장강도보다 각각 17%, 9% 저하되었다. 듀플렉스계 스테인리스강의 경우에는 중앙부 조기국부좌굴 발생으로 압축 최대강도가 단순인장 재료시험결과인 Table 2의 인장강도 741.05 MPa에 비해 57% 낮은 423.12 MPa으로 나타났다.

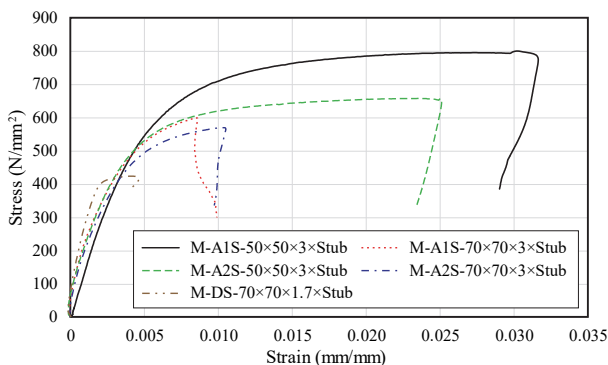


Fig. 3. Stress-strain curves by stub column test

3. 중심압축시험 결과

3.1 좌굴형태 및 최대 좌굴내력

15개의 실험체별 최대압축내력과 기둥의 형상에 의한 좌굴모드의 메커니즘을 분석하기 위하여, 실측데이터로 구한 세장비와 폭두께비를 Table 4에 정리했다. 폭두께비는 Fig. 1과 Table 1에 제시된 W1와 W2 중 큰 값으로 산정했다. 실험 결과, 실험 종료시점에서의 스테인리스강 각형강관 압축부재

의 최대내력시점에서 좌굴형태는 국부좌굴(local buckling, L)과 전체좌굴(flexural buckling, F)이 관찰되었다(Table 4와 Fig. 6). 국부좌굴의 양상은 마주보는 면끼리 볼록하고 다른 마주보는 면끼리는 오목하게 나타났다. 기둥의 길이가 250 mm인 단주 실험체는 모두 국부좌굴이 일어났지만 좌굴이 발생한 위치가 M-A1S 실험체는 하부에(Figs. 6(a), 6(d)), M-A2S 실험체는 상부(Figs. 6(g), 6(j)), M-DS 실험체는 중앙부에 국부좌굴이 발생하였다(Fig. 6(m)). M-DS(Figs. 6(n), 6(o))를 제외한 1,000 mm와 2,000 mm 실험체는 대부분 전체좌굴이 발생하였고 그 이후에 국부좌굴이 관찰되었다. 부재길이가 길어질수록 오스테나이트계 스테인리스강 실험체(M-A1S series, M-A2S series)는 항복내력과 최대압축내력이 감소하는 경향을 보였다. 폭이 70×70인 실험체의 경우, Fig. 4에서 확인할 수 있듯이 내력이 실험체들 중 상대적으로 우수하게 나타났지만 최대내력 이후 내력이 다른 실험체보다 급감하는 모습을 보였다.

실험체 M-A1S-50×50×3×2는 실험체 M-A1S-70×70×3×2에 비해 세장비가 커서 전체좌굴에 의한 내력저하가 상대적으로 큰 영향도 있지만, 실험체 M-A2S-50×50×3×2보다 최대내력이 작았다. 이는 실험체 M-A1S-50×50×3×2의 경우 실험 중에 상부 세팅지그의 볼트체결 문제로 Fig. 6(c)에서와 같이 상부 지그의 회전이 발생하여 양단 고정조건을 확보하지 못해 내력저하가 크게 나타났다. 다른 실험체는 세팅조건을 변경하여 양단 고정조건을 확보하였다. 실험체 M-A2S-50×50×3×2는 전체좌굴에 의한 최대내력 이후 전체 횡좌굴의 크기가 커져 기둥 상부 베이스 플레이트와 접합된 용접부의 인장측에서 Fig. 6(i)와 같이 균열이 발생하였다. Fig. 4의 하중변위 곡선에서 폭두께비가 작은 50×50 시리즈는 완만하게 내력이 감소되었고, 이와 달리 70×70 시리즈는 폭두께비가 크기 때문에 전체좌굴 후 국부좌굴이 발생하여 급격하게 내력이 저하되었다. M-DS 시리즈의 경우 폭은 M-A1S와 M-A2S

Table 3. Compressive material properties of stub column test results

Specimen	Length L (mm)	Young's modulus E (GPa)	Yield stress σ_y 0.01 % (MPa)	Yield stress σ_y 0.2 % (MPa)	Ultimate compressive stress σ_u (MPa)	n
M-A1S-50×50×3×Stub	248.5	150.28	252.50	591.46	799.67	3.62
M-A1S-70×70×3×Stub	248.0	173.34	348.50	528.03	598.32	5.58
M-A2S-50×50×3×Stub	248.0	156.20	358.16	547.93	656.92	7.26
M-A2S-70×70×3×Stub	248.0	177.89	285.74	481.28	569.33	4.89
M-DS-70×70×1.7×Stub	248.0	193.11	390.00	-	423.12	-

Table 4. Test results

Specimen	Actual plate thickness t_e (mm)	Width W_{max} (mm)	W/t_e	Ultimate strength P_{ue} (kN)	Buckling mode at ultimate state	Slenderness ratio λ_e KL/r	Strength ratio P_{ue}/P_{ueStub}
M-A1S-50×50×3×Stub	2.97	50.24	14.94	444.14	L	6.52	-
M-A1S-70×70×3×Stub	2.99	69.91	21.36	477.16	L	4.57	-
M-A2S-50×50×3×Stub	2.98	49.92	14.78	365.05	L	6.52	-
M-A2S-70×70×3×Stub	2.92	69.44	21.79	441.69	L	4.56	-
M-DS-70×70×1.7×Stub	1.59	70.72	42.62	184.44	L	4.43	-
M-A1S-50×50×3×1	3.03	50.21	14.58	321.05	F	25.93	0.72
M-A1S-70×70×3×1	3.02	69.46	21.04	449.43	F	18.19	0.94
M-A2S-50×50×3×1	3.05	50.04	14.41	295.18	F	25.73	0.81
M-A2S-70×70×3×1	3.01	70.04	21.26	405.92	F	18.25	0.92
M-DS-70×70×1.7×1	1.63	70.69	41.30	181.69	L	17.58	0.99
M-A1S-50×50×3×2	3.02	50.25	14.64	135.44	F with rotation of top end	52.69	0.30
M-A1S-70×70×3×2	3.14	69.88	20.28	353.19	F	36.98	0.74
M-A2S-50×50×3×2	3.08	49.99	14.23	179.93	F	52.90	0.49
M-A2S-70×70×3×2	3.06	69.62	20.74	325.36	F	37.01	0.74
M-DS-70×70×1.7×2	1.81	70.53	36.89	180.03	L	35.87	0.98

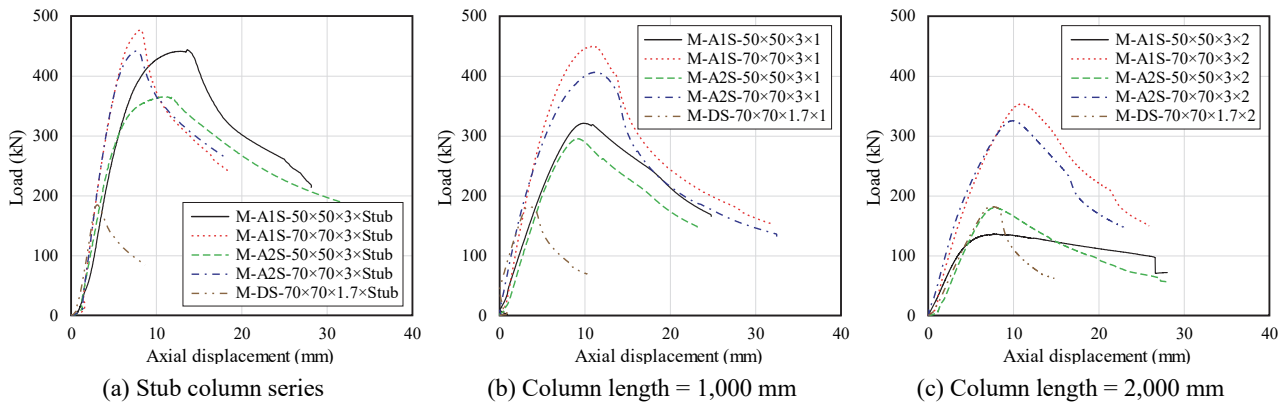


Fig. 4. Load-displacement curves

가 동일하게 설정되었지만 수급가능한 최대두께가 1.7 mm 이었기 때문에 동일 폭의 다른 강종의 강관보다 폭두께비가 매우 커서 모든 M-DS 시리즈에서는 Figs. 6(m)-6(o)에서 보여지는 바와 같이 국부좌굴이 발생하여 급격한 내력저하가 관찰되었다. Table 3의 stub column의 각 강종별 탄성계수는 M-DS가 가장 높았지만 초기에 국부좌굴이 발생되어 부재의 강도가 충분히 발휘되지 못해 Table 4에서와 같이 다른 시리즈보다 내력이 매우 낮았고 Table 1에서와 같이 폭 두께비(W/t_e)가 40을 초과한 세장판요소로 부재길이(세장비)에 상관없이 국부좌굴에 의해 최대압축좌굴내력이 유사하게 나타났다.

3.2 축하중-횡변위 관계

실험체의 축하중과 좌굴방향을 확인하기 위해 설치된 Fig. 1의 변위계 L2 또는 L3에서 측정된 축하중-횡변위의 관계를 Fig. 5에 나타내었다. Stub column의 경우는 국부좌굴발생으로 횡변위를 측정하지 않았고, 듀플렉스 스테인리스강 실험체인 M-DS 시리즈는 모두 국부좌굴이 발생하여 횡변위가 거의 측정되지 않았다. Fig. 5에서 횡변위의 양(+)값은 변위계가 설치된 반대방향으로 횡변위가 발생한 것이고 음(-)값은 변위계가 설치된 방향으로 횡변위가 발생한 것을 나타낸다.

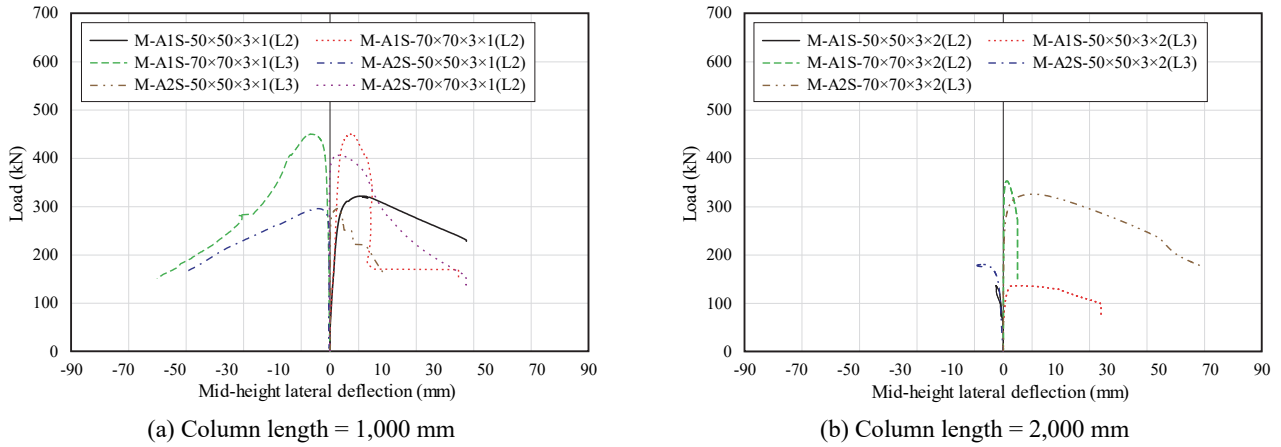


Fig. 5. Load-mid height lateral deflection curves

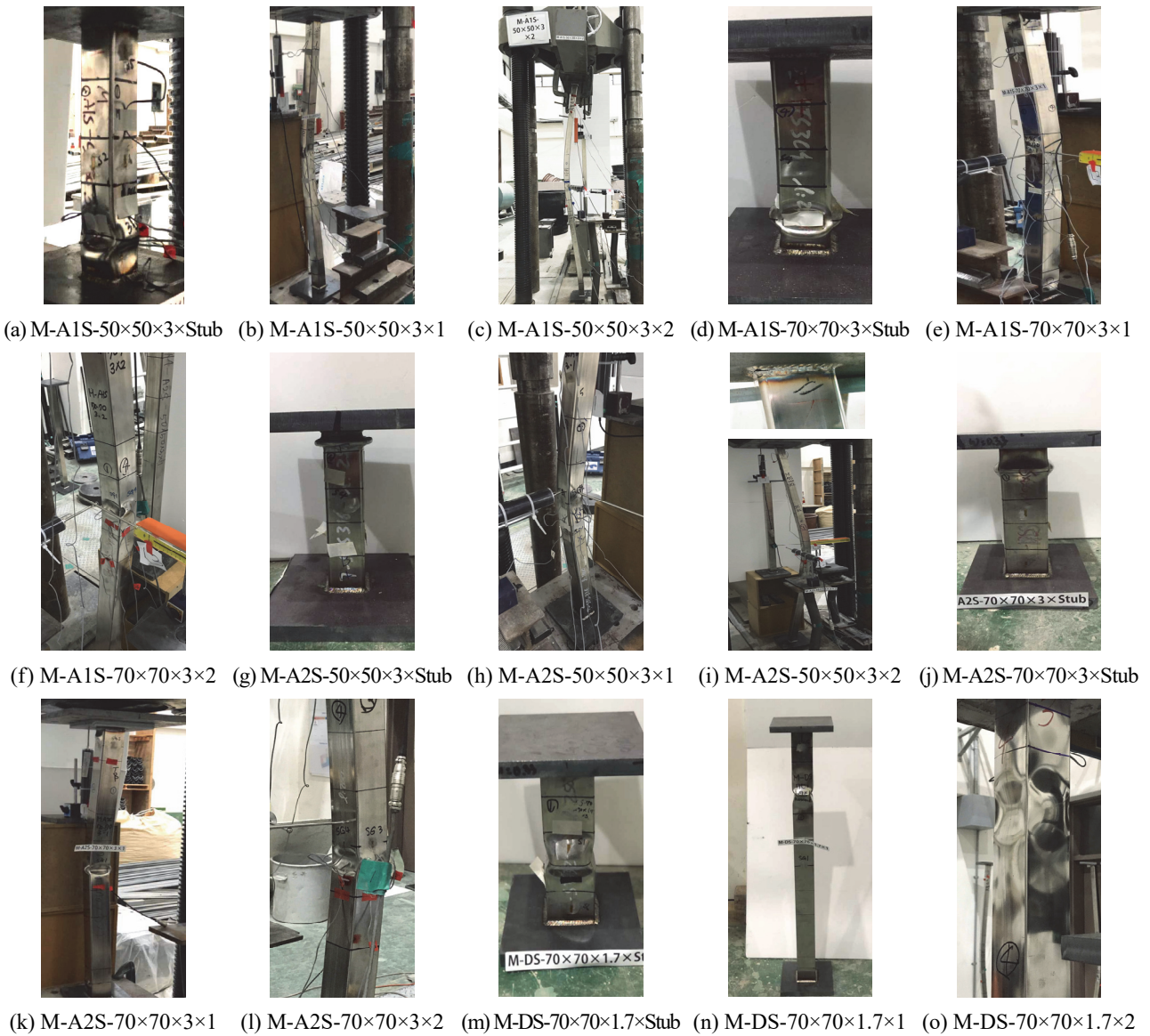


Fig. 6. Fracture shapes at test end

4. 압축재 좌굴강도 설계식 및 내력비교

4.1 스테인리스강 압축재 기준식

미국토목학회 ASCE 8-02^[3]에서는 휨모멘트가 작용하지 않고 중심압축력을 받는 스테인리스강 각형강관 압축재의 좌굴강도(P_{ul})는 식 (1)과 같이 규정하고 있다.

$$P_{ul} = \sigma_n A_e \quad (1)$$

휨-비틀림 좌굴응력(σ_n)은 식 (2)로 정의된다.

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

여기서, A_e 는 좌굴응력 σ_n 에서 계산된 유효면적, σ_n 는 휨-비틀림 좌굴응력, E_t 는 좌굴응력에 대한 압축부분 접선탄성 계수, σ_y 는 재료항복강도, K 는 유효좌굴길이계수, L 은 부재길이, r 은 단면2차반경이다.

유럽기준 Eurocode 3^[4]에서는 중심압축력을 받는 압축 부재의 내력(P_{ul})은 폭두께비(b/t)에 따른 단면분류(class)를 기준으로 다음식에 의해 산정한다.

$$P_{ul} = \chi A_{eff} \sigma_y \quad (3)$$

여기서, χ 는 좌굴을 고려한 감소계수, A_{eff} 는 유효단면적으로 ρA 이다. ρ 는 감소계수이고 A 는 전단면적이다. 압축좌굴을 고려한 감소계수(χ)는 식 (4)로 산정한다.

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} \leq 1 \quad (4)$$

여기서, ϕ 는 $0.5 \times (1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2)$, α 는 각형강관에 대해서 초기변형계수이고 휨좌굴 형태를 갖는 각형강관의 경우 0.49, $\bar{\lambda}_0$ 는 한계세장비로 0.40이다.

4.2 탄소강 기준식 및 기존 연구자 제안식

Buchanan *et al.*^[7]은 스테인리스강 원형강관 기둥에 대하여 양단 핀지지로 하고 stub column의 압축재료시험결과를 고려한 실험 및 해석 결과를 통해 기존 EC3의 초기변형계수 (α)를 0.49로 동일하게 사용하였고 한계세장비($\bar{\lambda}_0$)는 0.20으로 EC3의 0.40을 1/2로 감소시켜 제안하였다. Young and Ellobody^[5]는 스테인리스 원형강관에 대해 EC3의 초기변형계수(α)를 0.49에서 0.4로 한계세장비($\bar{\lambda}_0$)는 0.4에서 0.3

으로 수정되어 제안하였다. 또한, Theofanous *et al.*^[6]은 stub column의 압축재료시험결과를 고려해서 EC3 기준에 한계세장비($\bar{\lambda}_0$)를 0.4에서 0.05로 대폭 감소시켜 제안하였다.

AISI 2016 직접설계법(direct strength method, DSM)^[13]에서는 냉간성형 탄소강 압축좌굴강도식을 식 (5)-(8)과 같이 규정하고 있다. 즉, 전체좌굴강도(P_{ne})와 국부좌굴강도(P_{nl})중 작은 값으로 하고 있다.

- 전체좌굴강도 (P_{ne})

$$P_{ne} = \begin{cases} (0.658^{\lambda_c^2}) P_y & \text{for } \lambda_c \leq 1.5 \\ (0.877/\lambda_c^2) P_y & \text{for } \lambda_c > 1.5 \end{cases} \quad (5)$$

- 국부좌굴강도 (P_{nl})

$$P_{nl} = P_{ne} \quad \text{for } \lambda_l \leq 0.776 \quad (6)$$

$$P_{nl} = [1 - 0.15(P_{crl}/P_{ne})^{0.4}](P_{crl}/P_{ne})^{0.4} P_{ne} \quad (7)$$

for $\lambda_l > 0.776$

$$P_{crl} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} * A_g \quad (8)$$

여기서, P_{ne} 는 전체좌굴강도, P_{nl} 은 국부좌굴강도, P_{crl} 은 위험 탄성국부좌굴강도, λ_c 는 전체좌굴에 대한 세장비, λ_l 는 국부좌굴에 대한 세장비이다.

Huang and Young^[14]은 듀플렉스계 스테인리스강 각형 강관 압축재의 압축좌굴에 대하여 AISI 2016 DSM의 고정계수를 변경한 수정 직접설계법(modified direct strength method, MDSM)을 제안하였다. 식 (6)의 계수에서 0.658을 0.87로, 전체좌굴에 대한 세장비(λ_c) 한계치를 1.0로 수정하였다. 국부좌굴에 대해서는 식 (5)에서 계수 0.15를 0.20으로, 국부좌굴에 대한 세장비(λ_l)를 0.769로 수정제안하였다. 또한, EC3 기준을 기반으로 초기변형계수(α)를 0.29로 한계세장비($\bar{\lambda}_0$)를 0.43으로 수정하였다.

4.3 설계내력과 실험내력 비교

4.1절의 ASCE와 EC3의 기준식에 의해 산정된 설계 기준내력(P_{ul})과 실험 좌굴내력(P_{ue})의 비교를 위해 Table 2의 인장재료시험결과와 Table 3의 stub column의 압축재료시험결과를 적용하여 각각 Table 5와 Table 6에 정리하였다. 실험 최대좌굴내력(P_{ue})과 기준식에 의한 좌굴내력(P_{ul})을 비교한 결과, 부재길이가 250 mm인 stub column에 대해서는 인장 및 압축재료시험 결과를 반영한 기준좌굴 내력은

Table 5. Buckling strength comparison between design prediction and experiment result based on material tensile test

Specimen	Test ultimate strength P_{ue} (kN)	Class in EC3	Design strength P_{ur} (kN)		Strength ratio P_{ur}/P_{ue}	
			ASCE ^[3]	EC3 ^[4]	ASCE ^[3]	EC3 ^[4]
M-A1S-50×50×3×Stub	444.14	Class1	288.54	288.54	0.65	0.65
M-A1S-70×70×3×Stub	477.16	Class4	373.64	346.16	0.78	0.73
M-A2S-50×50×3×Stub	365.05	Class1	267.21	267.21	0.73	0.73
M-A2S-70×70×3×Stub	441.69	Class4	318.10	286.33	0.72	0.65
M-DS-70×70×1.7×Stub	184.44	Class4	162.85	132.11	0.88	0.72
M-A1S-50×50×3×1	321.05	Class1	294.08	282.26	0.92	0.88
M-A1S-70×70×3×1	449.43	Class4	374.81	350.66	0.83	0.78
M-A2S-50×50×3×1	295.18	Class1	273.48	268.60	0.93	0.91
M-A2S-70×70×3×1	405.92	Class4	329.64	301.55	0.81	0.74
M-DS-70×70×1.7×1	181.69	Class4	171.91	139.71	0.95	0.77
M-A1S-50×50×3×2	135.44	Class1	203.93	181.77	1.51	1.34
M-A1S-70×70×3×2	353.19	Class4	333.94	319.71	0.95	0.91
M-A2S-50×50×3×2	179.93	Class1	218.60	183.99	1.21	1.02
M-A2S-70×70×3×2	325.36	Class4	283.99	263.32	0.87	0.81
M-DS-70×70×1.7×2	180.03	Class4	178.77	158.02	0.99	0.88
Average	-	-	-	-	0.91 (0.87)*	0.83 (0.80)*

*Average value except M-A1S-50×50×3×2

Table 6. Buckling strength comparison between stainless steel design and experiment based on stub column compressive test

Specimen	Test ultimate strength P_{ue} (kN)	Class in EC3	Design strength P_{ur} (kN)		Strength ratio P_{ur}/P_{ue}	
			ASCE ^[3]	EC3 ^[4]	ASCE ^[3]	EC3 ^[4]
M-A1S-50×50×3×Stub	444.14	Class3	328.56	328.56	0.74	0.74
M-A1S-70×70×3×Stub	477.16	Class4	421.14	387.23	0.88	0.81
M-A2S-50×50×3×Stub	365.05	Class2	304.47	304.47	0.83	0.83
M-A2S-70×70×3×Stub	441.69	Class4	373.37	352.06	0.85	0.80
M-DS-70×70×1.7×Stub	184.44	-	-	-	-	-
M-A1S-50×50×3×1	321.05	Class3	334.87	310.97	1.04	0.97
M-A1S-70×70×3×1	449.43	Class4	422.46	392.30	0.94	0.87
M-A2S-50×50×3×1	295.18	Class1	301.78	295.73	1.02	1.00
M-A2S-70×70×3×1	405.92	Class4	386.91	370.45	0.95	0.91
M-DS-70×70×1.7×1	181.69	-	-	-	-	-
M-A1S-50×50×3×2	135.44	Class3	202.01	183.62	1.49	1.36
M-A1S-70×70×3×2	353.19	Class4	375.76	356.28	1.06	1.01
M-A2S-50×50×3×2	179.93	Class1	219.44	184.32	1.22	1.02
M-A2S-70×70×3×2	325.36	Class4	339.07	331.23	1.04	1.02
M-DS-70×70×1.7×2	180.03	-	-	-	-	-
Average	-	-	-	-	1.01 (0.97)*	0.95 (0.91)*

*Average value except M-A1S-50×50×3×2

Table 7. Buckling strength comparison between carbon steel design previous literature and experiment based on tensile coupon material test

Specimen	Strength ratio (P_{ut}/P_{ue})					
	Buchanan <i>et al.</i> ^[7]	Young and Ellobody ^[5]	Theofanous <i>et al.</i> ^[6]	Huang and Young ^[16]	DSM ^[15]	Modified DSM ^[16]
M-A1S-50×50×3×Stub	0.65	0.65	0.63	0.65	1.16	1.17
M-A1S-70×70×3×Stub	0.73	0.73	0.72	0.73	0.98	0.98
M-A2S-50×50×3×Stub	0.73	0.73	0.71	0.73	1.31	1.32
M-A2S-70×70×3×Stub	0.65	0.65	0.64	0.65	0.93	0.93
M-DS-70×70×1.7×Stub	0.72	0.72	0.71	0.72	3.26	3.27
M-A1S-50×50×3×1	0.79	0.83	0.73	0.90	1.48	1.57
M-A1S-70×70×3×1	0.74	0.78	0.69	0.78	1.00	1.03
M-A2S-50×50×3×1	0.82	0.86	0.76	0.93	1.51	1.59
M-A2S-70×70×3×1	0.70	0.74	0.65	0.74	0.97	1.00
M-DS-70×70×1.7×1	0.75	0.77	0.70	0.77	3.17	3.27
M-A1S-50×50×3×2	1.23	1.28	1.16	1.53	2.63	3.38
M-A1S-70×70×3×2	0.81	0.86	0.76	0.97	1.12	1.25
M-A2S-50×50×3×2	0.93	0.97	0.88	1.16	1.93	2.40
M-A2S-70×70×3×2	0.73	0.77	0.68	0.87	1.05	1.19
M-DS-70×70×1.7×2	0.79	0.83	0.73	0.91	2.75	3.14
Average	0.78 (0.75)*	0.81 (0.78)*	0.74 (0.71)*	0.87 (0.82)*	1.68 (1.61)*	1.83 (1.72)*

*Average value except M-A1S-50×50×3×2

Table 8. Buckling strength comparison between carbon steel design previous literature and experiment based on stub column test

Specimen	Strength ratio (P_{ut}/P_{ue})					
	Buchanan <i>et al.</i> ^[7]	Young and Ellobody ^[5]	Theofanous <i>et al.</i> ^[6]	Huang and Young ^[16]	DSM ^[15]	Modified DSM ^[16]
M-A1S-50×50×3×Stub	0.74	0.74	0.71	0.74	1.32	1.33
M-A1S-70×70×3×Stub	0.81	0.81	0.80	0.81	1.10	1.11
M-A2S-50×50×3×Stub	0.83	0.83	0.80	0.83	1.49	1.50
M-A2S-70×70×3×Stub	0.80	0.80	0.79	0.80	1.09	1.09
M-DS-70×70×1.7×Stub	-	-	-	-	-	-
M-A1S-50×50×3×1	0.87	0.92	0.81	1.01	1.65	1.77
M-A1S-70×70×3×1	0.82	0.87	0.77	0.87	1.13	1.16
M-A2S-50×50×3×1	0.90	0.95	0.84	1.03	1.68	1.80
M-A2S-70×70×3×1	0.87	0.91	0.81	0.91	1.14	1.17
M-DS-70×70×1.7×1	-	-	-	-	-	-
M-A1S-50×50×3×2	1.26	1.30	1.20	1.55	2.75	3.46
M-A1S-70×70×3×2	0.91	0.95	0.85	1.08	1.25	1.41
M-A2S-50×50×3×2	0.94	0.98	0.90	1.17	2.01	2.65
M-A2S-70×70×3×2	0.91	0.96	0.85	1.08	1.26	1.40
M-DS-70×70×1.7×2	-	-	-	-	-	-
Average	0.89 (0.86)*	0.92 (0.88)*	0.84 (0.81)*	0.99 (0.94)*	1.49 (1.38)*	1.65 (1.49)*

*Average value except M-A1S-50×50×3×2

12% - 35% 범위로 과소평가하는 것으로 나타났다. 실험내력에 대한 인장재료시험결과를 반영한 ASCE와 EC3의 기준내력에 대한 평균내력비(P_{ult}/P_{ue})는 각각 0.91과 0.83으로 나타났고 압축재료시험결과를 반영한 평균내력비(P_{ult}/P_{ue})는 1.01과 0.95로 나타났다. 듀플렉스계 스테인리스강관(M-DS 시리즈)의 경우, 변형도가 설치된 stub column의 중앙부에서 국부좌굴 발생으로 0.2% 오프셋 항복강도 산정이 불가능해 Table 6의 기준좌굴내력산정에서 제외하였다. 상단부 지그가 회전된 실험체 M-A1S-50×50×3×2를 제외한 평균내력비는 Tables 5-6에 별도로 표시했다. 이 실험체를 제외한 최대내력비는 인장재료시험결과를 적용한 경우에는 ASCE 기준이 실험 좌굴내력에 근접하는 것으로 나타났고, 압축재료시험결과를 적용한 경우에는 EC3기준이 실험 좌굴내력을 안전적으로 평가했다.

4.2절의 탄소강 기준식(직접설계법, DSM)과 기존 연구자들의 제안식으로 설계 좌굴내력(P_{ult})을 산정하여 실험내력(P_{ue})과 비교한 결과를 Tables 7-8에 정리하였다. 인장과 압축재료시험결과를 반영한 AISI 직접설계법(DSM)에 의해 각각 평균 68%(61%), 49%(38%) 과대평가하였고, 수정 직접설계법(MDSM) 또한 각각 83%(72%), 65%(49%)로 매우 과대평가하였다. 그러나, 스테인리스강 기준식인 EC3의 초기변형계수와 한계세장비를 수정한 기존연구자의 제안식의 경우에는 인장재료시험 결과를 반영한 설계좌굴내력은 평균 13% - 26%(18% - 29%), 압축재료시험결과를 반영한 설계좌굴내력은 평균 1% - 16%(6% - 19%)로 실험내력을 과소평가하였다. 여기서, 괄호 안의 값은 상단부 지그가 회전된 실험체 M-A1S-50×50×3×2를 제외한 값이다. 냉간성형 탄소강 설계식인 직접강도설계법(DSM)과 수정직접강도설계법(MDSM)의 경우는 스테인리스 각형강관의 가공경화에 따른 높은 강도상승비와 재질차이에 따른 좌굴특성을 충분히 반영하지 못해 전체적으로 과대평가하였고, EC3의 초기변형계수와 한계세장비를 수정 제안한 기존연구자의 식은 실험체 M-A1S-50×50×3×2를 제외했을 때, stub column의 압축재료시험결과를 반영한 좌굴내력이 실험좌굴내력에 근접한 것으로 나타났다.

5. 결론

국내에서 생산된 냉간성형 오스테나이트계 스테인리스강관 2종(STS304 TKC와 STS316 TKC)과 저니켈 듀플렉스

스계 스테인리스강관 1종(STS329FLD TKC)을 대상으로 양단고정인 중심축압축력을 받는 압축부재의 실험을 수행하여 현행기준식 및 기존연구자 제안식에 의한 좌굴내력과 실험내력을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 압축부재의 좌굴거동 특성을 반영하기 위해 각형강관의 평판에서 채취한 인장재료시험편과 압축재료시험용 stub column(길이 250 mm)을 통해 재료의 인장 및 압축재료시험을 수행하였다. 중앙부에 국부좌굴이 발생한 듀플렉스계 스테인리스강관을 제외하고 항복강도는 stub column의 압축재료시험결과로 얻어진 값이 인장재료시험결과보다 평균 14% 높게 나타났다. 냉간성형에 따른 가공경화에 의해 설계항복강도 및 인장강도보다 평균 2.10배, 1.31배 높게 나타났다.
- (2) 실험결과, 단주인 stub column은 모두 단부 또는 중앙부 국부좌굴이 발생하였고 길이가 1,000 mm와 2,000 mm인 실험체는 듀플렉스계 스테인리스강관인 M-DS를 제외하고 전체좌굴에 의해 최대내력이 결정되었다. M-DS 시리즈 강관 실험체는 폭두께비가 다른 실험체에 비해 약 2배 이상 커서 세장비에 관계없이 초기에 국부좌굴이 발생하여 가장 작은 좌굴내력을 보였다.
- (3) 스테인리스강 현행기준식인 ASCE와 EC3에 의한 설계내력은 세장단면인 듀플렉스계 스테인리스강관 실험체(M-DS 시리즈)는 중앙부 초기 국부좌굴로 34% - 51% 과대평가하였고 나머지 실험체에 대해서는 강관과 강종에 따른 초기변형계수와 한계세장비를 제안하고 있는 EC3가 stub column의 압축재료시험결과를 반영한 경우 실험좌굴내력을 보다 안전적으로 평가하는 것으로 나타났다.
- (4) 냉간성형 탄소강 기준인 AISI의 직접강도설계법(DSM) 및 수정직접강도설계법(MDSM)에 의해서는 듀플렉스계 스테인리스 각형강관인 M-DS 시리즈와 고정단이 회전이 발생한 M-A1S-50×50×3×21를 제외하고 평균 최소 38%, 최대 72% 과대평가했고, EC3의 초기변형계수와 한계세장비를 수정한 기존연구자의 제안식의 경우에는 인장재료시험 결과를 반영한 설계좌굴내력보다 압축재료시험결과를 반영한 설계좌굴내력이 실험내력에 근접한 것으로 나타났다. 6% - 19% 범위로 실험내력을 과소평가하였다.

추후, 유한요소 변수해석을 통해 강종의 차이와 각형강관의 기하학적 특성을 고려한 중심압축력을 받는 냉간성형 스테인리스각형강관 압축재의 좌굴내력을 제안해 볼 필요가 있다.

감사의 글

이 연구는 2018년도 한국연구재단 연구비 지원에 의한 결과의 일부임(NRF-2018R1D1A1B07046021).

참고문헌(References)

- [1] Korean Agency for Technology and Standards (2015) *Cold Rolled Stainless Steel Plates, Sheets and Strip* (KS D 3698: 2015), Korea (in Korean).
- [2] Korean Agency for Technology and Standards (2015) *Stainless Steel Pipes for Machine and Structural Purposes* (KS D 3536: 2015), Korea (in Korean).
- [3] American Society of Civil Engineers (2002) *Specification for the Design of Cold-Formed Stainless Steel Structural Members* (SEI/ASCE-8-02), USA.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [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, 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, Online published (DOI: 10.1007/s13296-020-00366-w).
- [11] Ramberg, W., and Osgood, W.R. (1943) *Description of Stress Strain Curves by Three Parameters*, Technical Note No. 902, National Advisory Committee for Aeronautics, USA.
- [12] Rasmussen, K.J.R (2003) Full-Range Stress-Strain Curves for Stainless Steel Alloys, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.59, No.1, pp.47-61.
- [13] American Iron and Steel Institute (2016) *North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members* (AISI S100-16), USA.
- [14] Huang, Y., and Young, B. (2014) Structural Performance of Cold-Formed Lean Duplex Stainless Steel Columns, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, Vol.83, pp. 59-69.

요약: 이 연구에서는 중심 압축력을 받는 오스테나이트계 스테인리스강(STS304 TKC와 STS316 TKC) 및 저니켈 듀플렉스계 스테인리스강(STS329FLD TKC) 각형강관 기둥의 좌굴거동을 조사하기 위해 실험적 연구가 수행되었다. 주요 변수는 강종, 기둥의 길이와 폭두께비로 하였다. 최대내력 시점에서 실험체의 좌굴형상은 국부좌굴과 전체좌굴이 관찰되었다. 재료인장시험결과, 냉간가공경화에 의해 설계항복 및 인장강도보다 2.10배, 1.31배 재료강도가 높게 나타났다. 또한, 단주압축시험을 통해 각형강관 부재의 압축재료 성질을 조사하였다. 단주와 폭두께비가 큰 듀플렉스계 스테인리스 각형강관 실험체에서는 국부좌굴이 발생했다. 실험 좌굴내력은 미국토목학회(ASCE 2002)와 유럽(EC3)의 현행 스테인리스강 기준식, 미국철강협회(AISI)의 탄소강 구조설계기준과 기존연구자의 제안식에 의한 설계좌굴내력을 비교하였다. 그 결과, 단주의 압축재료시험결과를 적용한 설계좌굴내력이 인장재료시험결과를 반영한 좌굴내력보다 실험결과에 근접한 값을 제시하는 것으로 나타났다.

핵심용어: 오스테나이트계 스테인리스강, 저니켈 듀플렉스계 스테인리스강, 국부좌굴, 전체좌굴, 설계기준, 좌굴강도
