



중심압축력을 받는 기계구조용 스테인리스강 강관 기둥의 좌굴거동에 관한 실험적 연구

김성수¹ · 김진원² · 김태수^{3*}

¹석사과정, 한밭대학교, 건축공학과, ²책임연구원, 포스코 철강솔루션연구소, ³교수, 한밭대학교, 건축공학과

An Experimental Study on the Buckling Behaviors of Stainless Steel Tubular Columns Under Concentric Axial Compression

Kim, Sung Soo¹, Kim, Jin Won², Kim, Tae Soo^{3*}

¹Graduate student, Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Korea

²Sr. Researcher, POSCO Steel Solution Research Lab., Incheon, 21985, Korea

³Professor, Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Korea

Abstract - Buckling behaviors of cold-formed duplex stainless steel (STS329FLD TKC) and austenitic stainless steel (STS304 TKC) hollow tubular column subjected to concentric axial compression were investigated in this study. A total number of 8 specimens with both fixed ends has been tested. Main variable is slenderness ratio (four kinds of column length : 250 mm, 500 mm, 750 mm, 1000mm) with identical nominal diameter and plate thickness. Yield stress and tensile strength of duplex stainless steel were higher by 41% and 18%, respectively than those of austenitic stainless steel. Local buckling, global buckling and its combination were observed according to column length(slenderness ratio). Buckling strength got lower with the increase of member length (slenderness ratio). Test buckling strengths were compared with those predicted by the ASCE(American Society of Civil Engineers) specification, Eurocode 3 part 1.4 (EC3) and existing literature' suggestion. Strengths of specimens with local buckling were underestimated by current design codes and for specimens with global buckling, ASCE2002 and EC3 overestimated the buckling strengths by the range of 2% to 26% due to no enough consideration of buckling reduction factor, slenderness ratio, buckling stress and initial imperfection effect.

Keywords - Stainless steel, Circular hollow section column, Slenderness ratio, Local buckling, Global buckling, Design specification

1. 서론

현재까지 건축구조용 강재로 탄소강이 주종을 이루었지만 사회 및 경제적 요구에 따라 고강도, 고연성, 고내구성 등을 갖는 고성능 강재의 적용이 증가하고 있다. 현재 고성능 강재중 하나인 스테인리스강이 국내외에서 건축물 및 사회기반시설의 구조용 강재로 적용하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 스테인리스강은 내식성, 내구성, 내화성, 내열성 등이 탄소강보다 우수하지만 크롬

(Cr)과 니켈(Ni)을 함유하고 있기 때문에 재료비가 탄소강에 비해 3~5배 정도 고가이다. 전생애주기비용(LCC)측면에서 스테인리스강은 별도의 방청처리 등 유지보수 비용이 요구되지 않기 때문에 약 25년 경과 후에는 탄소강을 적용한 구조물의 초기비용과 유지관리 비용의 합보다 낮아지게 된다. 그러나, 건축설계 및 구조재료 선정단계에서 고가라는 선입견으로 내식성이 요구되는 구조물의 구조재료로 선정되지 못하고 있다. 최근에 니켈함유량을 줄이고 기존의 스테인리스강에 비해 구조성능(항복강도와 인장강도) 및 내응력부식균열을 향상시킨 듀플렉스계 스테인리스강이 개발되어 KS에 추가되었고^{[1],[2]}, 건축구조용 강재로 적용하기 위한 소재특성, 볼트접합부 및 용접접합부에 관한 연구가 수행되고 있다^{[3],[4]}. 국내에서는 2000년 초반에 장호주 등에 의해 오스테나이트계 스테인리스강 강관의 구조적거동에 관한 연구가 수행되었고, 중심압축력과 편심압축력을 받는 단주와 장주에 대한 실험적 연

Note.-Discussion open until February 29, 2020. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on May 07, 2019; revised June 28, 2019; approved on July 01, 2019.

Copyright © 2019 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

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

E-mail. tskim@hanbat.ac.kr

구를 통해 건축구조부재로서의 적용성을 검토하였다^[5-17].

미국, 유럽 등에서는 스테인리스강을 구조용 재료로 지정하여 이에 대한 구조설계 기준이 제정되어 지속적인 연구를 통해 개정·보완해오고 있다. 스테인리스강 구조설계 기준으로는 미국토목학회의 ASCE2002^[8], 유럽의 Eurocode 3 Part 1.4^[9], 호주 및 뉴질랜드의 AS/NZS^[10], 일본철강협회 스테인리스구조협회(SSBA)의 기준^[11] 등이 있다. Young과 Ellobody는 양단고정인 오스테나이트계 및 듀플렉스계 스테인리스강의 세장단면이 아닌 원형강관기둥에 대해 EC3의 초기변형계수와 한계세장비를 수정했고^{[12],[13]}, Theofanous 등은 양단 핀지지인 스테인리스강 타원형 강관을 대상으로 새로운 좌굴곡선을 제안했다^[14]. 최근에 Buchanan 등은 양단핀지지인 오스테나이트계, 듀플렉스계, 페라이트계 스테인리스강관에 대한 실험 및 해석 연구결과로 EC3의 한계세장비를 1/2로 감소시킨 값($=0.2$)을 제안했다^[15].

이 연구에서는 국내 스테인리스강 구조설계기준 작성을 위한 기초연구로써 KS에 규정되어 있고 건설분야에서 가장 많이 생산되고 적용하고 있는 기계구조용 오스테나이트계 스테인리스강 강관과 최근에 저니켈 함유로 스테인리스강의 가격경쟁력을 높이고 강도를 높인 듀플렉스계 스테인리스강 강관으로 제작된 중심압축력을 받는 양단고정 원형강관 기둥의 재료적 성질과 압축좌굴거동을 평가하는 것을 연구목적으로 한다.

2. 스테인리스강 실험체 계획 및 재료시험

2.1 실험체 계획 및 구성

KS D 3536의 강판을 절곡하여 용접하여 제작한 기계구조용 듀플렉스계 스테인리스강 강관(STS329FLD TKC)과 오스테나이트계 스테인리스강 강관(STS304 TKC)을 대상으로 양단이 고정인 강관 압축재의 국부좌굴 및 전체좌굴 거동을 조사하기 위해 중심압축력을 받는 단주 및 장주 실험체를 제작하여 단순 압축실험을 수행한다. 실험체의 주요변수는 4종의 부재길이(L)로 250mm, 500mm, 750mm, 1000mm로 설정한다. 스테인리스강관의 공칭치수는 $\phi 60.5 \times 2.8$ 으로 계획한다. 스테인리스강 강관 기둥의 양단에는 오스테나이트계 스테인리스강(STS304) 베이스 플레이트(PL-200 $\times$ 200 $\times$ 20)를 제작하고 기둥의 상하부에 필릿용접한다. 실험체명, 길이, 공칭치수, 단면적, 유효좌굴길이계수, EC 3에 의한 단면분류, 세장비, EC3 기준식에 의한 예측좌굴내력을 Table 1에 정리한다. 실험체명에서 ‘SD’는 듀플렉스계 스테인리스강(Duplex stainless steel), ‘SA’는 오스테나이트계 스테인리스강(Austenitic stainless steel)를 나타내고, ‘L25’는 실험체 길이인

25cm(250mm)를, ‘D1’은 이 실험에서 사용한 강관의 공칭직경 60.5을 의미한다. 기준식에 의한 압축좌굴강도를 계산하기 위한 탄성계수는 195GPa, 듀플렉스계 스테인리스강과 오스테나이트계 스테인리스강의 항복강도는 KS상의 값인 450MPa, 205MPa를 적용하여 산정하였다.

Fig. 1.과 같이 실험체 중앙부에 변위계(LVDT)를 2개소에 설치하여 중앙부 횡좌굴 변위를 측정하고, SDL25D1 실험체(부재 중앙부에 스트레인 게이지 SG1, SG2, SG3만 설치)를 제외한 모든 실험체에 대해 Weld 부분을 제외한 중앙부에 3개, 베이스플레이트와 접합부의 상단부와 하단부(부재길이가 250mm와 500mm 실험체는 단부에서 50mm, 부재길이가 750mm인 실험체는 75mm, 부재길이가 1000mm인 실험체는 100mm 떨어진 지점에 설치)에 각각 1개씩 총 5개의 소성 스트레인게이지를 부착하여 하중재하에 따른 변형도 변화를 조사한다. 가력방법은 변위제어로 하고 가력속도는 0.6mm/min로 설정한다.

Table 1. Specimen list, geometry and design prediction

Specimen	Length L (mm)	Nominal Diameter D (mm)	Nominal thickness t (mm)	Area A (mm ²)	Effective length factor K (Both fixed ends)	Class in EC3	Slenderness ratio λ KL/r	Design strength by EC3 P_{uR} (kN)
SDL25D1	250	60.5	2.8	507.55	0.5	1	5.70	228.40
SDL50D1	500	60.5	2.8	507.55	0.5	1	11.40	228.40
SDL75D1	750	60.5	2.8	507.55	0.5	1	17.10	228.40
SDL100D1	1000	60.5	2.8	507.55	0.5	1	22.80	225.96
SAL25D1	250	60.5	2.8	507.55	0.5	1	6.12	104.05
SAL50D1	500	60.5	2.8	507.55	0.5	1	12.24	104.05
SAL75D1	750	60.5	2.8	507.55	0.5	1	18.36	104.05
SAL100D1	1000	60.5	2.8	507.55	0.5	1	24.48	103.42

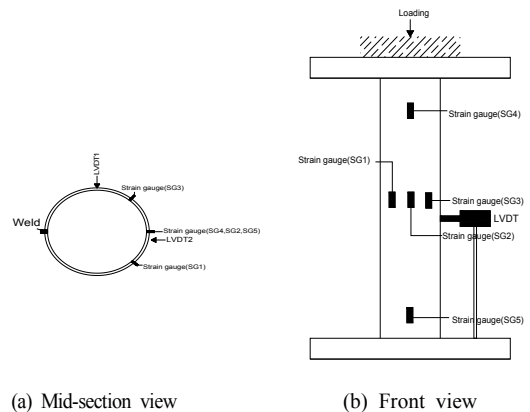


Fig. 1. Transducers(LVDTs) and strain gauge

2.2 재료시험

듀플렉스계 스테인리스강(STS329FLD TKC)과 오스트나이트계 스테인리스강(STS304 TKC)의 기계적 성질을 파악하기 위하여 KS B 0801에 따라 인장시험편을 제작하고 KS B 0802(금속재료 인장시험 방법)에 따라 단순인장시험을 수행한 결과, Fig. 2와 같은 응력-변형도 곡선을 얻었고, Table 2에 인장시험 결과를 정리하였다. KS B 0802에 의하면 재료의 항복강도는 0.2% 오프셋(offset)하여 곡선과 만나는 점을 항복강도로 산정하였다. 재료시험결과 듀플렉스계 스테인리스강관의 평균탄성계수(E)는 193.96GPa, 0.2% 오프셋 항복강도(F_y)는 616.86MPa, 인장강도(F_u)는 940.95 MPa, 연신율(EL)은 50.69%, 오스트나이트계 스테인리스강관은 항복강도(F_y) 436.53MPa, 인장강도(F_u) 799.35 연신율(EL)은 78.65%로 KS^[2]의 최저기준(STS329FLD TKC: 항복강도 450MPa, 인장강도 620MPa, STS304 TKC: 항복강도 205MPa, 인장강도 520MPa)을 모두 만족하는 것으로 나타났다. 그러나, KS의 최저기준강도와 강관의 실제 재료강도사이에 큰 차이가 발생하는 것으로 나타났으며, 다양한 재료시험을 통해 KS상의 재료강도를 조정할 필요가 있다. ASCE기준에서 좌굴강도를 평가하기 위해 재료의 비례한도(F_{pr})도 산정하였다.

Table 2에서 n 은 변형도 경화지수(Strain hardening exponent)로 램베르그-오스구드(Ramberg-Osgood)재료모델식($n = \ln(20)/\ln(\sigma_{0.2}/\sigma_{0.01})$)^[16]을 사용해 산정했다. 듀플렉스

스계 스테인리스강관과 오스테나이트계 스테인리스강관에 대해 각각 평균 7.21, 5.19로 나타났다. 유럽기준(EC3 Part 1.4)^[9]에서는 n 값을 각각 5, 6으로 규정하고 있다. 듀플렉스계 스테인리스 강관(STS329FLD TKC)과 오스테나이트계 스테인리스 강관(STS304 TKC)의 항복강도비, 인장강도비 및 연신율비는 각각 1.41, 1.18, 0.64로 나타났다. 듀플렉스계 스테인리스 강관이 항복강도와 인장강도는 41%, 18% 높았고 연신율은 36% 낮은 것으로 나타났다.

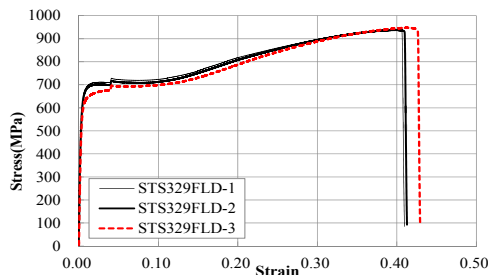
Table 2. Material test results

Coupon	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]	Proportional limit F_{pr} [MPa]	Yield ratio F_y/F_u [%]	Elongation EL [%]	n
STS329FLD TKC-1	2.45	205.82	435.93	626.68	939.00	397.52	66.74	48.92	8.25
STS329FLD TKC-2	2.41	158.46	433.26	641.73	946.00	406.99	67.84	52.93	7.63
STS329FLD TKC-3	2.48	217.60	346.09	582.17	937.84	435.85	62.08	50.21	5.76
Average	2.44	193.96	405.09	616.86	940.95	413.45	65.55	50.69	7.21
STS304 TKC-1	3.01	127.94	257.12	446.37	756.48	213.57	59.01	74.88	5.43
STS304 TKC-2	3.00	191.60	259.38	438.96	824.98	216.04	53.21	80.94	5.69
STS304 TKC-3	3.01	179.72	215.98	424.26	816.59	206.41	51.96	80.14	4.43
Average	3.00	166.42	244.16	436.53	799.35	212.01	54.72	78.65	5.19

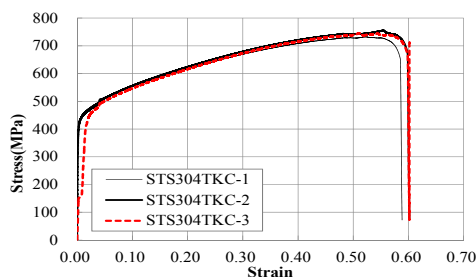
3. 중심압축실험

3.1 실험방법

Fig. 3은 실험체의 스트레인게이지 부착과 변위계(LVDT) 설치상황을 나타낸다. 용접이음부(Weld)부근을 제외한 중앙부에 SG1, SG2, SG3 스트레인게이지를 부착하고 상부에 SG4, 하부에 SG5를 부착한다. 용접이음부 부분 맞은편에 LVDT2를, 90° 회전한 위치의 실험체 중심부에 LVDT1을 중심부에 설치하여 횡좌굴 변위를 측정한다. 변위계어로 0.6mm/min으로 가력하여 실험을 진행한다. 제작된 실험체를 양단을 고정조건으로 한다. Table 1에서 제시된 공칭강관을 대상으로 제작된 실험체의 실험평균두께(t_e), 평균 강관직경(D_e), 평균 단면적을 Table 3에 정리하였다.



(a) STS329FLD TKC



(b) STS304 TKC

Fig. 2. Stress-strain curves

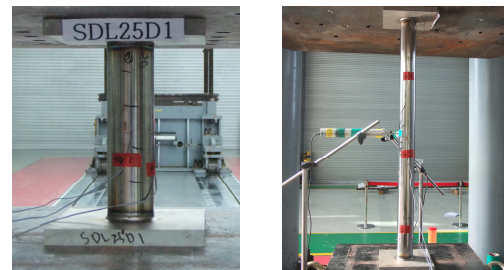


Fig. 3. Set-up for specimens

3.2 실험결과 및 분석

3.2.1 파단형태 및 최대내력

실험 종료시점에서 스테인리스강 원형강관 압축부재의 국부좌굴, 국부좌굴과 전체좌굴의 조합 및 전체좌굴형태를 Fig. 4.에, 축하중-축변위 곡선을 Fig. 5.에 나타냈다. 실험항복내력(P_{ye}), 실험 최대내력(P_{ue}), 동일 단면적에 대한 내력비교를 위해 SDL25D1 실험체의 단면적을 기준으로 보정한 최대내력(P_{uem})과 실측치 수로 산정한 세장비(λ_e)를 Table 3에 정리하였다. 좌굴형태는 부재길이(세장비)에 따라 단부 국부좌굴, 단부국부좌굴과 전체좌굴의 조합 및 중앙부 전체좌굴이 나타났다. 부재길이가 250mm인 단주 실험체 SDL25D1과 SAL25D1은 Fig. 4.(a)와 4.(e)에서와 같이 베이스플레이트와의 접촉부인 단부에 축하중이 집중되어 단부 국부좌굴(local buckling 또는 elephant foot buckling)이 발생하여 최대내력을 결정하였다.

부재길이가 500mm인 듀플렉스계 및 오스테나이트계 스테인리스강 강관 실험체 SDL50D1과 SAL50D1은 초기에 양단부에서 국부좌굴이 관찰되었고 강재변위가 증가함에 따라 중앙부에서 전체좌굴이 발생하여 좌굴강도가 결정되었다. Fig. 5.에서 보는 바와 같이 SDL50D1과 SAL50D1의 하중-축변위 곡선은 단부 국부좌굴이 관찰된 SDL25D1과 SAL25D1의 곡선과는 다른 양상을 보였다. SDL25D1과 SAL25D1의 곡선은 최대내력시점에서 내력이 급격하게 저하되었지만, SDL50D1과 SAL50D1의 곡선 상에서는 다른 중앙부 전체좌굴이 발생한 실험체와 유사한 양상(최대 좌굴내력이 결정된 후 완만한 내력저하)이 나타났다. 부재길이가 750mm, 1000mm인 실험체(SDL75D1, SDL100D1, SAL75D1, SAL100D1)는 Fig. 4.에서와 같이 중앙부에서 전체 좌굴이 발생되었다. 중앙부 전체좌굴이 발생한 실험체 모두에 대해서 Fig. 1.(a)의 용접이음부 방향으로 횡좌굴이 발생하는 것을 확인하였다.

듀플렉스계 스테인리스강 및 오스테나이트계 스테인리스강 강관 실험체 모두 부재길이(세장비)가 증가함에 따라 압축좌굴강도는 낮아지는 경향을 보였다. 두 스테인리스강의 재료시험결과인 Table 5로부터 듀플렉스계 스테인리스강(STS329FLD TKC)은 오스테나이트계 스테인리스강(STS304 TKC)보다 높은 강도와 낮은 연신율을 갖는 것으로 나타났고, 그 결과 강관기둥의 좌굴내력도 듀플렉스계 스테인리스강관 실험체(SD시리즈)의 내력이 오스테나이트계 스테인리스강관 실험체(SA시리즈)보다 1%~24% 범위로 높게 나타났다. 단부에서 국부좌굴된 오스테나이트계 스테인리스강 강관 실험체 SAL25D1의 경우, 다른 실험체는 평균 21% 정도 낮은 좌굴내력을 보였으나 듀플렉스계 스테인리스강 강관 실험체 SDL25D1의 내력과 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는

Fig. 2.와 Table 2의 두 스테인리스강의 항복이후 재료적 성질의 차이(오스테나이트계 스테인리스강의 변형도 경화에 의한 높은 강도 상승비 및 높은 연신율)에 따라 오스테나이트계 스테인리스강 강관의 국부좌굴내력이 Fig. 5.(b)에서와 같이 듀플렉스계 스테인리스강 강관보다 항복이후 내력이 상승되어 나타난 결과인 것으로 판단된다.

3.2.2 축하중-변형도 및 축하중-횡변위 관계

SDL25D1 실험체(SG1, SG2, SG3 부착)를 제외한 모든 실험체에 대해 Fig. 1.과 같이 중앙부에 3개(SG1, SG2, SG3)의 스트레인 게이지를 부착하고 상부와 하부에 스트레인게이지 2개(SG4, SG5)를 부착하여 강재변위가 증가함에 따라 강관 표면상의 스트레인 변화를 관찰하였다.

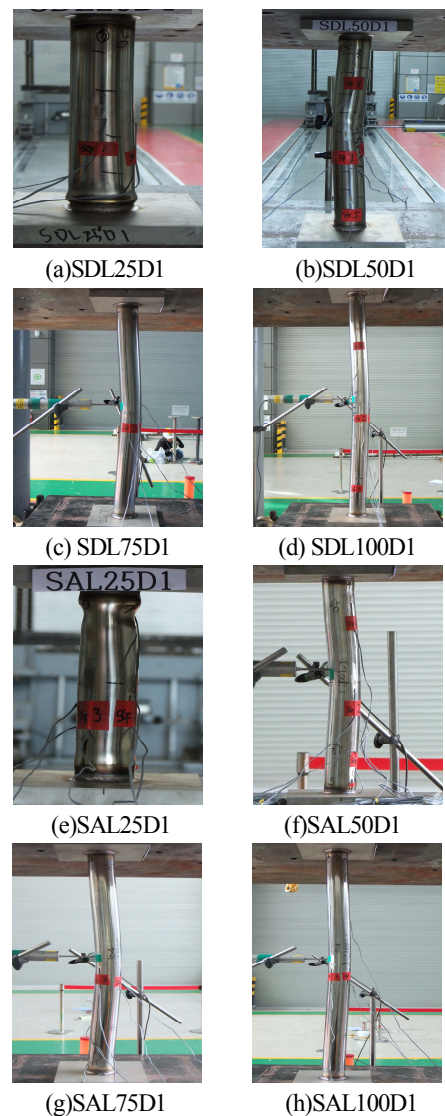


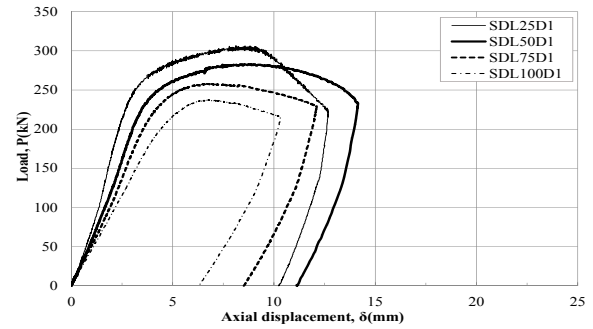
Fig. 4. Fracture shapes at test end

세장비가 가장 작은 실험체인 SDL25D1과 SAL25D1은 스트레인 게이지 불량으로 측정되지 않은 SDL25D1의 SG2를 제외하고는 Fig. 6.(a)와 6.(e)에서 알 수 있듯이 축하중이 증가함에 따라 중앙부와 단부에서 측정된 변형도는 (-)값(압축변형도)으로 절댓값이 증가하는 것으로 나타났다. 부재길이가 500mm 이상인 실험체는 중앙부에서 Fig. 1.(a)의 용접(weld)부방향으로 전체좌굴이 발생하였고 기둥부재의 변곡점부분에서 상하단부의 베이스플레이트까지 구간의 좌굴형태가 중앙부와 반대양상을 보이는 것으로 나타났다. 축하중 초기단계에서는 전 부재에 걸쳐 압축상태가 유지되어 압축변형도가 증가하다가 중앙부의 전체좌굴의 발생과 진전으로 압축변형도 크기가 감소하는 것으로 전환되었다. 실험체 SAL75D1과 SAL100D1의 SG1과 SG2에서 측정된 변형도는 각각 Fig. 6.(g)와 6.(h)에서와 같이 최대내력 이후에 압축변형도(-)가 인장변형도(+)로 전이되는 현상이 관찰되었다.

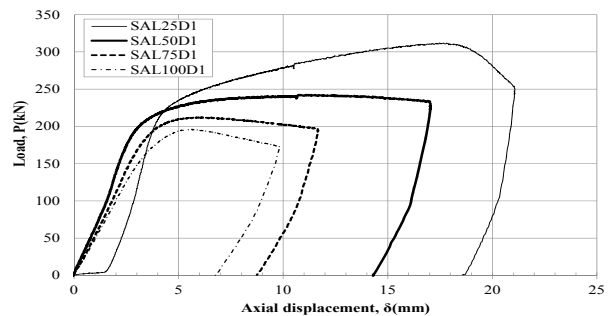
Fig. 1.의 실험체 중앙부에 설치된 변위계 LVDT1과 LVDT2에서 측정된 횡변위와 하중과의 관계를 Fig. 7.에 정리하였다. 부재길이가 가장 작은 SDL25D1과 SAL25D1은 전체좌굴은 발생되지 않을 것으로 예상되어 수평형좌굴을 측정하기 위한 변위계를 설치하지 않았다. 듀플렉스계 스테인리스강 실험체(SD시리즈)는 용접이음부(weld) 반대면에 설치된 LVDT2에서 측정된 횡변위가 LVDT1에서 측정된 횡변위보다 크게 나타났고, 오스테나이트계 스테인리스강 실험체(SA시리즈)는 변위계 LVDT1이 설치된 방향으로 횡좌굴이 더 크게 발생된 것을 알 수 있다. 축하중-횡변위 관계 곡선으로부터 전체 횡좌굴이 발생하기 시작하는 시점 이후 더 이상 좌굴내력은 상승하지 않고 축하중이 서서히 감소하면서 횡변위가 급격하게 증가하는 것으로 나타났다.

Table 3. Test results

Specimen	Actual thickness t_e [mm]	Measured Diameter D_e [mm]	D/t_e	Area A_e [mm ²]	Yield load P_{ye} [kN]	Ultimate load P_{ue} [kN]	Modified load P_{uem} [kN]	Buckling mode at ultimate state	Slenderness ratio λ_e KL/r
SDL25D1	2.55	64.04	25.11	491.98	273.09	306.38	306.38	Local buckling	4.36
SDL50D1	2.65	63.79	24.07	509.03	260.14	282.95	273.47	Local + global buckling	8.93
SDL75D1	2.61	64.00	24.52	502.76	240.42	257.68	252.15	Global buckling	13.24
SDL100D1	2.53	64.24	25.39	491.11	228.09	237.34	237.76		17.35
SAL25D1	3.03	60.97	20.10	552.11	247.20	312.07	303.54	Local buckling	5.48
SAL50D1	2.96	60.91	20.58	538.84	218.23	241.15	233.64	Local + global buckling	10.86
SAL75D1	3.04	60.93	20.04	552.83	199.73	212.12	207.59	Global buckling	16.48
SAL100D1	3.04	61.41	20.18	558.04	184.94	193.74	192.00		21.66

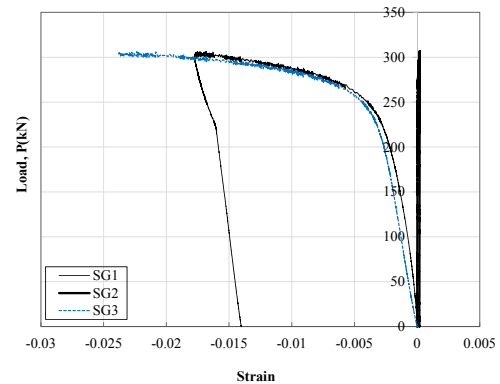


(a) SDL series

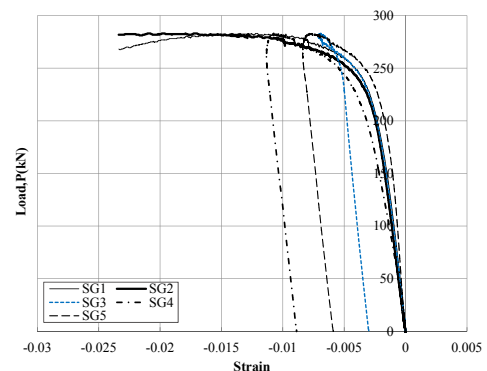


(b) SAL series

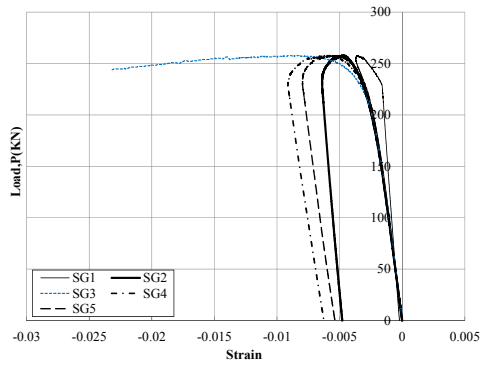
Fig. 5. Load-axial displacement relationships



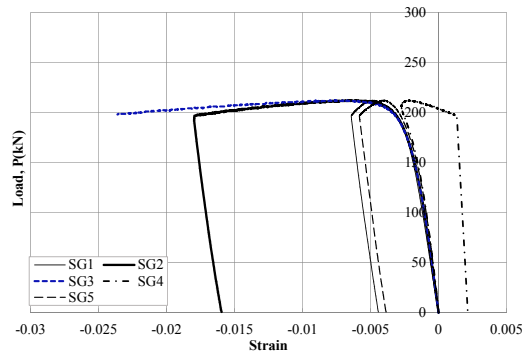
(a) SDL25D1



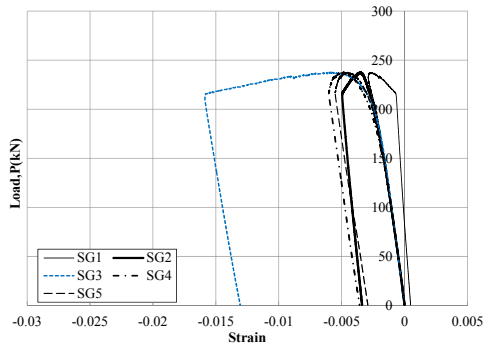
(b) SDL50D1



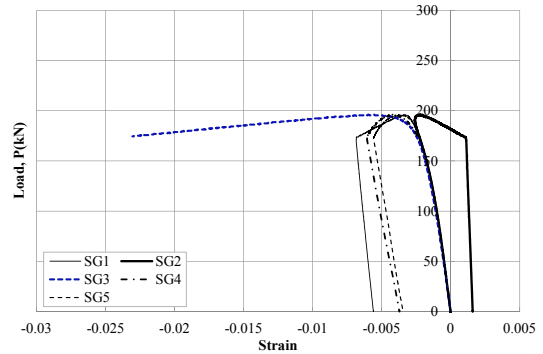
(c)SDL75DL



(g)SAL75D1

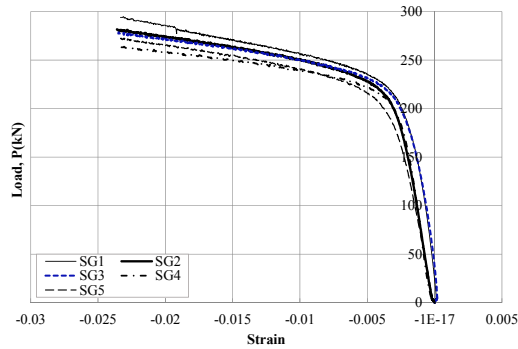


(d)SDL100DL

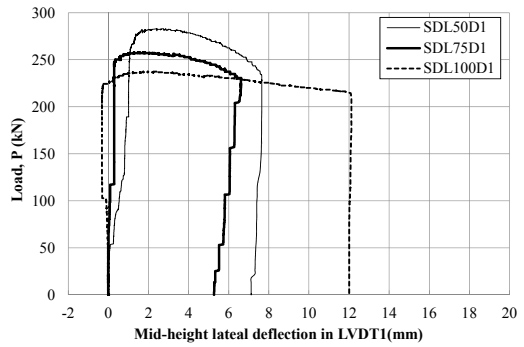


(h) SAL100D1

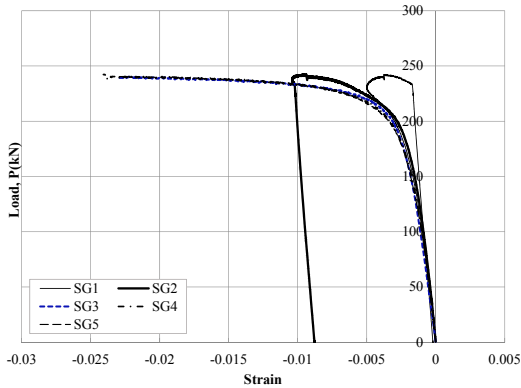
Fig. 6. Load-strain curves



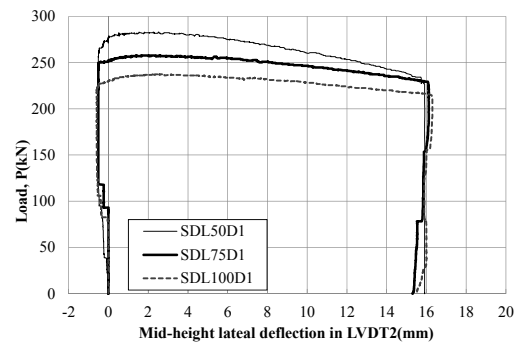
(e)SAL25D1



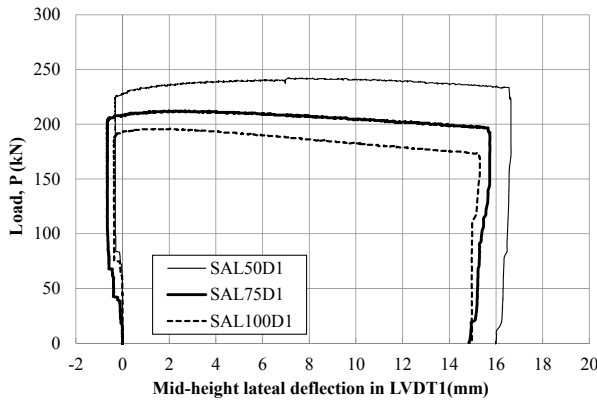
(a) Lateral deflection measured in LVDT1 of SD series



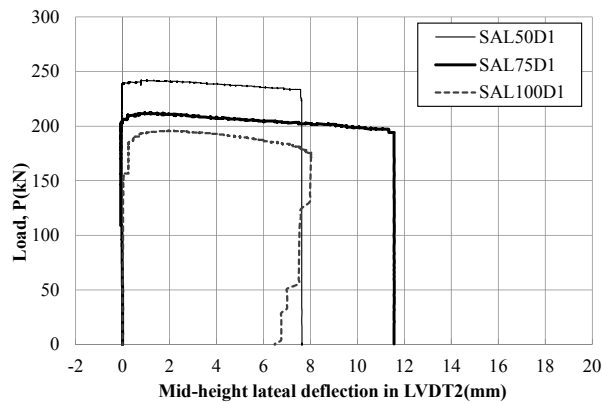
(f)SAS50D1



(b) Lateral deflection measured in LVDT2 of SD series



(c) Lateral deflection measured in LVDT1 of SA series



(d) Lateral deflection measured in LVDT2 of SA series

Fig. 7. Load-mid height lateral deflection curves

4. 압축재 좌굴강도 설계식 및 내력비교

국내 스테인리스강 구조설계기준은 제정되어 있지 않은 실정이고 국외의 스테인리스강 구조기준으로 미국토목학회(ASCE)의 냉간성형 스테인리스강 설계기준인 ASCE2002^[8], 열간압연과 냉간성형 스테인리스강을 모두 포함하는 유럽기준 EC3 Part1.4^[9]과 최근 Buchanan et al.^[15]에 의해 제시된 설계식을 정리한다.

4.1 스테인리스강 구조설계 설계식

4.1.1 미국토목학회 ASCE2002^[8]

휨모멘트가 작용하지 않고 중심압축력을 받는 스테인리스강 강관 압축재의 좌굴강도(P_{ut})는 식 (1)과 같이 유효단면적(A_e)과 좌굴응력(F_n)의 곱으로 규정하고 있다.

$$P_{ut} = A_e F_n \quad (1)$$

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

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

다음 식 (3)에 의해 산정된 접선탄성계수를 식 (2)의 관계식을 만족하도록 여러번 반복계산한다. 즉, σ 가 F_n 에 근접하도록 σ 를 변경하면서 해당값을 구한다.

$$E_t = \frac{E_0 F_y}{F_y + 0.002nE_0 \left(\frac{\sigma}{F_y}\right)^{n-1}} \quad (3)$$

$$A_e = \left[1 - \left(1 - \frac{E_t}{E_0} \right)^2 \left(1 - \frac{A_0}{A} \right) \right] A \quad (4)$$

$$A_0 = K_c A \leq A \quad \text{for } \frac{D}{t} < \frac{0.881E_0}{F_y} \quad (5)$$

$$K_c = \frac{(1-C)(E_0/F_y)}{(8.93 - \lambda_c)(D/t)} + \frac{5.882C}{8.93 - \lambda_c} \quad (6)$$

여기서, A_e 는 좌굴응력 F_n 에서 계산된 유효면적, F_n 는 식 (2)에 의한 휨-비틀림 좌굴응력, E_0 는 재료 초기탄성계수, E_t 는 식 (3)에 의한 좌굴응력에 대한 압축부분 접선탄성계수, F_y 는 재료항복강도, K 는 유효좌굴길이계수, L 은 부재길이, r 은 단면 2차반경, σ 는 재료 공칭압축강도, K_c 는 국부좌굴에 대한 감소계수, C 는 항복강도에 대한 비례한도강도비(F_{pr}/F_y), $\lambda_c = 3.048C$ ($\leq (E_0/F_y)/(D/t)$)이다. 또한, n 은 재료정수이고 2.2절을 참조한다.

4.1.2 유럽기준 Eurocode3^[9]

중심압축력을 받는 압축부재의 내력(P_{ut})은 직경-두께비(D/t)에 따른 단면분류(Class)에 의해 다음식에 의해 산정한다.

- Class 1, 2, 3 단면에 대해

$$P_{ut} = \chi A_g F_y \quad (7)$$

여기서, χ 는 좌굴을 고려한 감소계수, A_g 는 전단면적이다. Table 3으로부터 본 강관 실험체의 직경두께비(D/t)와 판별식에 따라 Class 2로 분류되므로 유효단면적을 전단면적(A_g)으로 적용한다.

압축좌굴을 고려한 감소계수(χ)는 식 (8)로 산정한다.

$$\chi = \frac{1}{\phi + [\phi^2 - \bar{\lambda}^2]^{0.5}} \leq 1 \quad (8)$$

여기서, ϕ 는 $0.5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \lambda_0) + \bar{\lambda}^2)$, α 는 원형강관에 대해서 초기변형계수이고 휨좌굴 형태를 갖는 강관의 경우 0.49, $\bar{\lambda}_0$

는 한계세장비로 0.40이다. Class 2에 대해 $\bar{\lambda}$ 는 $\sqrt{AF_y/N_{cr}}$ 이다.

N_{cr} 세장비에 따른 임계좌굴하중이고 식 (9)에 의해 구한다.

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} \quad (9)$$

여기서, 유효좌굴길이 L_{cr} 은 KL 이다.

4.1.3 Buchanan et al.^[15]

2018년 Buchanan 등은 양단 핀지지인 오스테나이트계, 듀플렉스계, 페라이트계 스테인리스강관 기둥에 대한 실험 및 해석 연구 결과로 초기변형계수(α)는 EC3와 동일한 0.49, 한계세장비($\bar{\lambda}_0$)는 EC3의 0.40을 1/2로 감소시킨 0.20을 제안하였다.

4.2 기준식과 내력비교 및 고찰

4.1절에서 제시된 ASCE2002^[8], EC3^[9]와 Buchanan 등의 제안식^[15]에 의해 산정된 설계기준내력(P_{ut})과 실험내력(P_{ue})의 비교를 Table 4에 정리하였다. Fig. 8.(a)에서 실험내력(P_{ue})-세장비($\lambda = KL/r$)의 관계를 두 기준식의 좌굴곡선과 비교하였고, Fig. 8.(b)는 EC3에 의해서 실험내력과 무차원화한 세장비($\bar{\lambda} = \lambda/\lambda_1$, λ_1 은 항복내력과 좌굴내력이 동일한 시점에서 세장비)과의 관계를 나타낸다.

실험 좌굴내력과 ASCE와 EC3에 의한 예측내력과 비교한 결과, 평균내력비(P_{ut}/P_{ue})는 각각 1.07, 1.09로 약간 과대평가하는 것으로 나타났고, Buchanan 등의 제안식은 평균내력비 측면에서 가장 근접한 좌굴내력을 제공하는 것으로 나타났다. ASCE와 EC3 기준식에 의해 듀플렉스계 스테인리스강 강관기둥(SD시리즈)의 단주 SDL25D1 실험체는 기준식에 의해 좌굴강도가 과소평가되었고, 부재길이 500mm이상의 실험체는 8%~27% 범위와 과대평가하는 경향을 보였다. 오스테나이트계 스테인리스 강관기둥(SA시리즈)의 경우는, 부재길이가 작은 SAL25D1과 SAL50D1 실험체는 현행기준식에 의해 2%~23% 과소평가되었고, SAL75D1과 SAL100D1 실험체는 14%~26%범위로 과대평가되었다. Buchanan 등의 제안식은 SA시리즈에 대해서는 안전측으로 평가하였으나 SD시리즈에 대해서는 국부좌굴이 발생한 단주를 제외하고 과대평가하는 경향을 보였다. 실험에서는 Table 3에서처럼 세장비(λ_e)가 8.93, 10.86이상에서 전체좌굴이 발생하여 부재길이 또는 세장비가 커짐에 따라 실험내력이 저하되었지만, Table 4의 현행기준식에 의한 예측좌굴내력은 세장비(λ)가 증가함에도 불구하고 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. Fig. 8.(a)에서도 SD시

리즈와 SA시리즈의 세장비(λ)가 24.12, 21.83까지는 비탄성영역으로 분류되어 세장비가 증가함에도 불구하고 좌굴내력을 증가하지 않고 있다는 것을 알 수 있다. 이로부터 중심압축력을 받는 양단 고정인 스테인리스강 강관 기둥에 대해 비탄성좌굴과 탄성좌굴한계의 경계를 의미하는 한계세장비가 적절하게 평가되지 않은 것으로 판단된다. 또한, ASCE2002에서 식 (2)의 좌굴응력(F_n)이 본 실험체에서 동일한 값으로 평가된 점과 EC3에서 식 (9)의 압축좌굴을 고려한 감소계수(χ)가 적절하게 평가되지 않아 전체좌굴이 발생하는 실험체에 대해 좌굴내력이 과대평가된 것으로 판단된다.

Table 4. Test results

Specimen	Test ultimate strength P_{ue} [kN]	Design strength P_{ut} [kN]			Strength ratio P_{ut}/P_{ue}		
		ASCE	EC3	Buchanan et al.	ASCE	EC3	Buchanan et al.
SDL25D1	306.38	286.74	303.41	306.38	0.94	0.99	0.99
SDL50D1	282.95	304.24	313.98	282.95	1.08	1.11	1.11
SDL75D1	257.68	296.02	309.35	257.68	1.15	1.20	1.13
SDL100D1	237.34	284.37	300.60	237.34	1.20	1.27	1.14
SAL25D1	312.07	241.01	241.01	241.01	0.77	0.77	0.77
SAL50D1	241.15	235.22	235.22	235.22	0.98	0.98	0.98
SAL75D1	212.12	241.33	241.33	229.26	1.14	1.14	1.08
SAL100D1	193.74	243.60	243.60	219.30	1.26	1.26	1.13
Average					1.07	1.09	1.04
COV					0.150	0.155	0.121

5. 결론

국내에서 생산된 기계구조용 듀플렉스계 스테인리스강과 오스테나이트계 스테인리스강 강관(공칭직경 60.5mm, 공칭두께 2.8mm)으로 제작된 중심축력을 받는 압축부재의 좌굴거동을 조사하고자 단순압축실험을 수행하였다. 국외 설계기준의 적용성을 검토하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 부재길이가 250mm인 단주의 경우는 두 강종 모두 양단부에서 국부좌굴이 발생하여 최대내력을 결정하였고, 500mm인 기둥에서는 초기에는 양단부에서 국부좌굴이 발생하였으나 강제변위가 증가함에 따라 중앙부에서 전체좌굴이 발생하여 최대내력에 도달하였다. 그 외 750mm와 1000mm인 기둥실험체에서는 모두 중앙부 전체좌굴이 발생하였다. 전체좌굴의 형태는 양단부가 고정지지로 되어 있기 때문에 상하단에서 약 1/4지점에서 변곡점이 형성되어 전체적인 좌굴 형태가 나타나는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 2018년도 한국연구재단 연구비(과제번호:NRF-2018R1D1A1B07046021)지원과 한국철강협회 스테인리스 스틸 클럽의 연구과제지원에 의한 결과의 일부임.

참고문헌(References)

- [1] 한국기술표준원(2015) 냉간 압연 스테인리스 강판 및 강대 (KS D 3698).
Korean Agency for Technology and Standards (2015) *Cold Rolled Stainless Steel Plates, Sheets and Strip (KS D 3698)*, Korea (in Korean).
- [2] 한국기술표준원(2015) 기계 구조용 스테인리스강 강관(KS D 3536).
Korean Agency for Technology and Standards (2015) *Stainless Steel Pipes for Machine and Structural Purposes (KS D 3536)*, Korea (in Korean).
- [3] 강현식, 김태수(2019) 듀플렉스계 스테인리스강 2행 2열 볼트접합부의 구조거동에 관한 실험적 연구, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제31권, 제1호, pp.13-22.
Kang, H.S., and Kim, T.S. (2019) Experimental Study on Structural Behaviors of Duplex Stainless Steel(STS329 FLD) Bolted Connections with Four Bolts, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.31, No. 1, pp.13-22 (in Korean).
- [4] Hwang, B., Kim, J., Kim, T., and Yuk, S.C. (2018) Mechanical Strength of Cold-Formed Duplex Stainless Steel (STS329FLD) Fillet-Welded Connections with Weld Metal Fracture, *Proceedings of International Symposium on Precision Engineering and Sustainable Manufacturing*, Korean Society for Precision Engineering, Japan.
- [5] 장호주, 양영성(2003) 스테인리스 강관 기둥의 내력에 관한 연구, 대한건축학회논문집 - 구조계, 대한건축학회, 제19권, 제6호, pp.93-102.
Jang, H.-J., and Yang, Y.-S. (2003) A Study on the Strength of Stainless Steel Pipe Columns, *Journal of the Architectural Institute of Korea - Structure & Construction*, Architectural Institute of Korea, Vol.19, No.6, pp.93-102 (in Korean).
- [6] 장호주, 유재희, 양영성(2003) 스테인리스강관과 일반구조용 강관 단주내력 비교에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제15권, 제5호, pp.561-570.
Jang, H.J., Yu, J.H., and Yang, Y.S. (2003) A Comparison

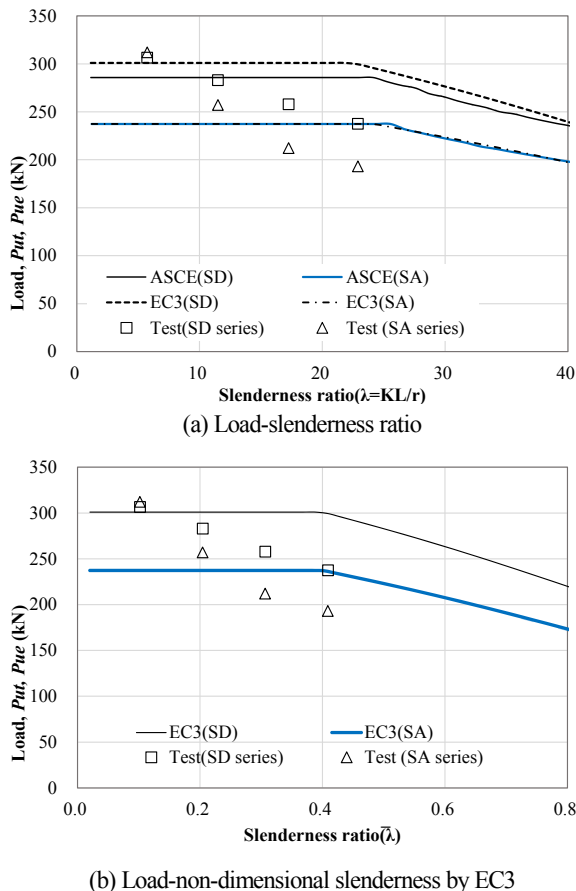


Fig. 8. Comparison of test results with buckling curves by current design codes

- (2) 부재길이(세장비)가 증가함에 따라 국부좌굴에서 전체좌굴로 좌굴형태가 전이되었고 최대좌굴강도는 작아지는 경향을 보였다. 전체좌굴의 경우 강관의 용접이음부보다는 반대쪽에 강성이 작아 좌굴형상이 결정되었다.
- (3) 국외 스테인리스강 구조설계기준인 ASCE2002와 EC3에 의해 좌굴내력을 산정하였고 실험좌굴내력과 비교하였다. 단주에서 과소평가하는 경향이 나타났고 부재길이 500mm 이상인 듀플렉스계 스테인리스강 강관에 대해서는 2%~23%, 부재길이 750mm 이상인 오스테나이트계 스테인리스강 강관기둥의 경우는 14%~26% 범위로 과대평가되었다. 이는 설계식에서 좌굴응력과 강종 및 형상에 따른 압축좌굴의 감소계수, 세장비, 초기변형계수 등이 적절하게 평가되지 않아 (즉, 한계세장비와 좌굴내력의 부정합성) 실험내력과 기준좌굴내력에 차이가 발생한 것으로 판단된다. 추후, 유한요소해석 모델을 구축하여 하중증가에 따른 좌굴거동을 조사하여 본 연구에서 제시된 재료성질을 반영한 내력평가식을 고찰할 필요가 있다.

- Study on Strength of Stainless Steel Tube and Steel Tube Stub-Columns, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.15, No.5, pp.561-570 (in Korean).
- [7] 장호주, 양영성(2005) 중심압축하중을 받는 스테인리스 강관 기둥의 좌굴내력에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제17권, 제2호, pp.207-216.
- Jang, H.J., and Yang, Y.S. (2005) A Study on the Buckling Strength of Centrally Compressed Stainless Steel Tubular Columns, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.17, No.2, pp.207-216 (in Korean).
- [8] American Society of Civil Engineers (2002) *Specification for the Design of Cold-Formed Stainless Steel Structural Members (SEI/ASCE-8-02)*, USA.
- [9] 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)*, Belgium.
- [10] Standards Australia/Standards New Zealand (2001) *Cold-formed Stainless Steel Structures (AS/NZS 4673)*, Australia/New Zealand.
- [11] 薄板構造設計基準作成委員会編(2005) 軽量ステンレス構造デザインマニュアル, ステンレス構造建築協会, 日本.
- Stainless Steel Building Association of Japan (2005) *Design Manual of Light-Weight Stainless Steel Structures*, SSBA, Japan (in Japanese).
- [12] 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.
- [13] Ellobody, E., and Young, B. (2007) Investigation of Cold-formed Stainless Steel Non-Slender Circular Hollow Section Columns, *Steel and Composite Structure*, Techno-Press, Vol.7, No.4, pp.321-337.
- [14] Theofanous, M., Chan, T.M., and Gardner, L. (2009) Structural Response of Stainless Steel Oval Hollow Section Compression Members, *Engineering Structure*, Elsevier, Vol.31, No.4, pp.922-934.
- [15] Buchanan, C., Real, E., and Gardner, L. (2018) Testing, Simulation and Design of Cold-formed Stainless Steel CHS Columns, *Thin-Walled Structures*, Queensland University of Technology, Vol.130, pp.297-312.
- [16] 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.

요약: 이 연구에서 중심축력을 받는 냉간성형 듀플렉스계 스테인리스강과 오스테나이트계 스테인리스강 강관 기둥의 좌굴 거동이 조사되었다. 양단 고정지지의 8개의 기둥 실험체의 압축실험이 수행되었다. 동일한 강관직경과 두께의 원형강관기둥에 대해서 주요변수는 4개의 부재길이를 갖는 기둥의 세장비로 설정하였다. 듀플렉스계 스테인리스강 강관의 재료 항복강도와 인장강도는 오스테나이트계 스테인리스강 강관의 강도보다 각각 14%, 18% 높게 나타났다. 변수에 따라 국부좌굴, 전체좌굴 및 조합좌굴 형태가 관찰되었다. 실험 좌굴내력은 스테인리스강 현행 기준식인 미국토목학회 ASCE와 유럽기준 EC3의 좌굴강도식에 의한 예측내력과 비교하였다. 국부좌굴이 발생한 강관기둥은 현행기준식에 의해 내력이 과소평가되었지만 전체좌굴이 발생한 기둥에 대해서는 좌굴감소계수, 좌굴응력, 세장비 및 초기변형계수를 충분히 고려하지 못해 2%에서 26%범위로 기둥좌굴내력을 과대평가하였다.

핵심용어: 스테인리스강, 원형강관기둥, 세장비, 국부좌굴, 전체좌굴, 설계기준