

# 반복 축하중을 받는 스테인리스강과 탄소강 각형강관 부재의 이력거동에 관한 실험적 연구

김승겸<sup>1</sup> · 김승훈<sup>2</sup> · 김태수<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>석사과정, 한밭대학교, 건축공학과, <sup>2</sup>교수, 한밭대학교 건축공학과, <sup>3</sup>교수, 한양대학교 에리카, 건축학부

## Experimental Study on Hysteretic Behaviors of Stainless Steel and Carbon Steel Square Hollow Section Members Under Cyclic Loading

Kim, Seung Kyum<sup>1</sup>, Kim, Seung Hun<sup>2</sup>, Kim, Tae Soo<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Graduate Student (Master course), Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Korea

<sup>2</sup>Professor, Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Korea

<sup>3</sup>Professor, School of Architecture & Architectural Engineering, Hanyang University ERICA, Ansan, 15588, Korea  
(Former Professor, Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National University)

**Abstract** - In this study, a total of 6 specimens fabricated with two types of austenitic stainless steel SHS members and carbon steel SHS members were tested under axial cyclic loading to investigate the hysteretic behaviors of bracing members according to the difference in material properties of stainless steel and carbon steel as a counterpart material. For the same cross section, the energy absorption capacity and energy index of the austenitic stainless steel specimens were higher than those of the carbon steel specimens. Based on EC3, AISI, and ASCE, which are design standards for cold-formed carbon steel and stainless steel in Europe and North America, the design predicted buckling strength and experimental compression strength were compared to evaluate the applicability of the buckling strength during compression of the specimen.

**Keywords** - Stainless steel, Carbon steel, Square hollow section, Material property, Cyclic loading, Hysteretic behavior

### 1. 서론

최근 내진성능이 요구되는 부재 및 시스템에 탄소강에 비해 연성과 에너지 흡수능력이 우수한 스테인리스강을 적용하여 지진에 대한 구조적 안정성을 높일 필요성이 대두되고 있다. 스테인리스강은 탄소강에 비해 높은 연신율과 항복비(항복강도에 대한 인장강도 비)를 보유하고 있어 에너지 흡수능력 측면에서도 우수하다.

Tremblay<sup>[1]</sup>, Fell<sup>[2]</sup>, Sheehan and Chan<sup>[3]</sup>, Elchalakani *et al.*<sup>[4]</sup>은 재료와 제조공정이 연성능력 및 파단 수명에 미

치는 영향을 조사하기 위해 반복 축하중을 받는 가새부재에 대한 실험적 연구를 진행하였고, 그 결과 국부좌굴 후에 발생하는 변형으로 급격한 강도 저하가 발생되었으며 브레이스 프레임에 대한 층간 최대 횡변위에 관한 규정된 연성수준을 달성하지 못함을 확인하였다. Disarno *et al.*<sup>[5]</sup>은 스테인리스강의 우수한 변형도 경화는 축하중을 받는 부재의 국부좌굴을 지연시키는데 도움이 된다는 것을 확인하였고, 탄소강에 비해 에너지 흡수능력이 높다는 것을 확인했다. Nip *et al.*<sup>[6],[7]</sup>은 탄소강 및 스테인리스강으로 제작된 튜브형 가새부재의 반복가력 실험에서 열간압연 탄소강, 냉간성형 탄소강 및 스테인리스강 부재에 반복가력 시 구조 거동을 비교하였고, 스테인리스강 가새부재가 유사한 단면 크기와 세장비를 갖는 탄소강 가새부재에 비해 높은 인장 및 압축 저항능력과 높은 인장강성 유지능력을 나타내는 것을 확인하였다. Kumar and Sahoo<sup>[8]</sup>는 반복가력 하중을 받는 강관의 형상에 따른 파괴 연성을 비교하였고, 그 결과 폭-두께비가 증가할수록 강도, 연성 및

Note.-Discussion open until April 30, 2023. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on September 22, 2022; revised on September 30, 2022; approved on October 04, 2022.

Copyright © 2022 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

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

E-mail. [tskim0709@hanyang.ac.kr](mailto:tskim0709@hanyang.ac.kr)

소성능력이 감소한다는 것을 확인하였다. Zhou *et al.*<sup>[9]</sup>은 반복하중을 받는 스테인리스강관 실험적 연구를 통해 강관 부재의 이력 거동에 대해 조사하였고, 강관의 전체세장비, 국부세장비를 변수로 8개의 실험체를 통해 인장 및 압축좌굴 후 강도, 연성, 에너지소산능력 등을 평가하였다. Liu *et al.*<sup>[10]</sup>은 반복가력 하중 하에서 열간압연강 부재의 비선형 거동을 예측하기 위한 이력 모델을 제안하였고, 강관 부재의 이력 곡선, 최대내력 및 에너지 흡수능력을 정확하게 예측할 수 있는 것을 확인하였다.

Kim and Kim<sup>[11]</sup>은 중심 압축력을 받는 오스테나이트계 스테인리스강 및 저니켈 듀플렉스계 스테인리스강 각형강관 기둥의 좌굴거동을 조사하기 위해 실험적 연구를 수행하였고, 단주의 압축재료시험결과를 적용한 설계좌굴내력이 인장재료시험결과를 반영한 좌굴내력보다 실험결과에 근접한 값을 제시하는 것으로 확인하였다.

Kim *et al.*<sup>[12]</sup>은 국내에서 생산되는 오스테나이트계 스테인리스 각형강관과 듀플렉스계 스테인리스 각형강관의 반복 축 하중 실험으로 이력거동을 확인하였고, 듀플렉스계 스테인리스 각형강관 실험체는 오스테나이트계 스테인리스 각형강관에 비해 반복점증가력에 의한 취성적 거동을 나타냈으며, 국부좌굴에 의한 조기 파단되어, 에너지 흡수측면에서 우수하지 못함을 확인하였다.

이 연구에서는 최근 내진보강재료 및 구조시스템으로 자주 연구되고 있는 스테인리스강 각형강관과 비교대상 강종인 탄소강 각형강관의 재료성질 차이에 따른 동적 거동특성(내진성능)을 조사하기 위해 국내에서 생산된 재료적 성질이 상이한 오스테나이트계 스테인리스 각형강관(STS304 TKC과 STS316 TKC) 2종과 탄소강 일반구조용 각형강관(SRT275)을 대상으로 중심 축하중 반복실험을 수행하였다.

## 2. 연구내용

### 2.1 실험체 계획

강종의 재료적 성질차이와 각형강관 형상에 따른 성능을 조사하기 위해 한국산업표준<sup>[13]</sup>에 규정되어 있고 국내에서 생산되는 2종의 기계구조용 오스테나이트계 스테인리스강 각형강관(STS304 TKC과 STS316 TKC)과 탄소강인 일반구조용 각형강관(SRT275)을 사용하여 중심 축하중 반복가력을 받은 가새부재 실험체를 제작하였다. 실험체명, 부재길이( $L$ ), 두께( $t$ )와 강관폭( $W1$ ,  $W2$ )을 포함한 실험치수, 반복가력 프로토콜을 작성하기 위해 재료시험결과를 토대로 산정한 항복변위( $\Delta_y$ ), EC3에 의한 단면분류를 Table 1에 정리하였다.

실험체명에서 첫 번째 기호 ‘C’는 반복가력을 나타내고, 두 번째 기호 ‘C’는 일반구조용 각형강관(SRT275), ‘A1S’는 18Cr-8Ni 오스테나이트계 스테인리스강관(STS304 TKC), ‘A2S’는 16Cr-10Ni-2Mo 오스테나이트계 스테인리스강관(STS316 TKC)을 나타낸다. 세 번째로 ‘50×50’는 각형강관의 공칭폭( $W1 \times W2$ ), 네 번째로 ‘3’는 각형강관의 공칭두께( $t_n$ ), 마지막으로 ‘1.5’는 실험체 길이( $L = 1.5$  m)이다. 일반구조용 각형강관과 듀플렉스계 스테인리스강관의 경우는 시장상황을 고려하여 공칭두께 3.0 mm 강관이 아닌 2.0 mm와 2.9 mm로 실험체를 제작하였다.

실험체 공칭길이( $L$ )는 1,500 mm로 통일하였고, 각형강관은 정사각형 형태이다. 단면폭은 수급가능한 단면으로 탄소강 각형강관의 경우 75 mm, 스테인리스강관의 경우 50 mm와 70 mm, 공칭두께는 탄소강관의 경우 2.0 mm와 2.9 mm, 오스테나이트계 스테인리스강관의 경우 3.0 mm로 계획하였다. Table 2의 유로코드 탄소강과 스테인리스

**Table 1.** Summary of measured geometric properties of brace specimens

Specimens	$L$ (mm)	Width (mm)		$t$ (mm)	EC3				$\Delta_y$ (mm)
		$W1$	$W2$		$c/t$	$e$	$\frac{c/t}{e}$	Class	
C-C-75×75×2-1.5	1,500	74.95	74.95	1.93	36.83	0.82	44.91	4	2.51
C-C-75×75×2.9-1.5		75.17	75.17	2.99	23.14	0.84	27.55	1	2.37
C-A1S-50×50×3-1.5		49.98	49.98	3.08	14.23	0.65	21.89	1	3.92
C-A1S-70×70×3-1.5		69.86	69.86	3.02	21.13	0.68	31.07	1	3.66
C-A2S-50×50×3-1.5		49.85	49.85	3.06	14.29	0.68	21.01	1	3.67
C-A2S-70×70×3-1.5		69.61	69.61	3.04	20.90	0.75	27.87	1	2.99

강 기준인 EN 1993-1-1<sup>[14]</sup>와 EN 1993-1-3<sup>[15]</sup>을 토대로 이 연구에서 사용된 각형강관의 단면분류(section class)를 Table 1에 정리하였다.

**Table 2.** Cross section classification according to Eurocode 3

Class	Carbon steel (EN 1993-1-1)	Stainless steel (EN 1993-1-4)
1	$\frac{c/t}{e} \leq 28$	$\frac{c/t}{e} \leq 33$
2	$\frac{c/t}{e} \leq 34$	$\frac{c/t}{e} \leq 35$
3	$\frac{c/t}{e} \leq 38$	$\frac{c/t}{e} \leq 37$
4	$\frac{c/t}{e} > 38$	$\frac{c/t}{e} > 37$

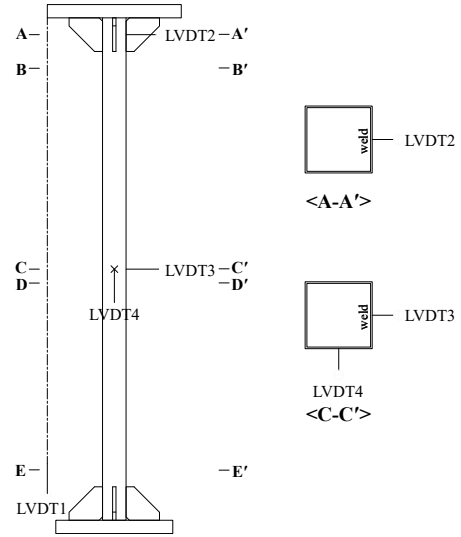
Table 2에서  $c$ 는 Table 1의 강관폭( $W_1$ 와  $W_2$ )의 평균 값( $W$ )에서 판 두께의 2배를 뺀 값( $= W - 2t$ )이고, 재료항복강도의 보정계수  $e$ 는 탄소강 기준 EN 1993-1-1<sup>[14]</sup>의 경우  $\sqrt{235/F_y}$ 로, 스테인리스강 기준 EN 1993-1-3<sup>[15]</sup>에서는  $\sqrt{\frac{235}{F_y} \frac{E}{210,000}}$ 로 정의한다. 여기서,  $F_y$ 는 강재의 항복강도,  $E$ 는 강재의 탄성계수이다.

2.2 실험방법

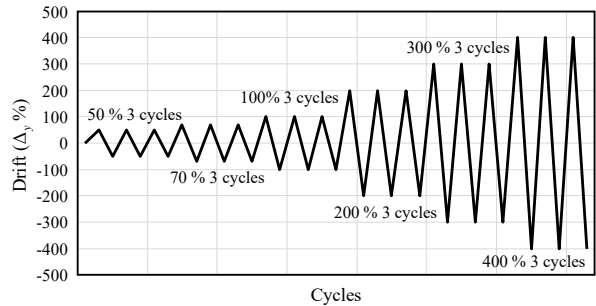
상하 베이스 플레이트를 직경 24 mm 고장력볼트로 체결하여 양단고정조건으로 하고 이론적인 압축재의 유효길이계수( $K$ )는 0.5로 가정한다. 반복 중심 축하중 실험을 위하여 가력측인 상단 축변위만 허용한다. 변위계(LVDT)는 Fig. 1과 같이 축변위 측정용 1개(LVDT1), 상단부 지그 수평변위 측정용 1개(LVDT2), 중앙부에 횡변위 측정용 2개(LVDT3와 LVDT4) 총 4개를 설치한다.

반복가력은 500 kN의 액추에이터로 ATC-24<sup>[16]</sup>에 따라 식 (1)의 관계식으로 산정된 항복변위( $\Delta_y$ )를 기준으로 하여 Fig. 2에서 설정한 반복가력(loading protocol)을 적용한다. 반복가력 실험 전 강종별 단순인장 재료시험결과로부터 얻은 탄성계수( $E$ )와 항복강도( $F_y$ )를 식 (1)에 대입하여 산정된 항복변위( $\Delta_y$ )를 기준으로 Table 1에서와 같이 각 실험체의 가력프로토콜을 결정하였다. 반복가력 방법은 항복변위( $\Delta_y$ )를 기준으로 50 %, 70 %, 100 %, 200 %, 300 % 까지 3 cycle씩 반복가력하고, 이후에는 파단될 때까지 항복변위( $\Delta_y$ )의 400 %로 반복가력하도록 설정하였다.

$$\Delta_y = L \frac{F_y}{E} \tag{1}$$



**Fig. 1.** Transducer(LVDT) installation



**Fig. 2.** ATC-24 loading protocol

2.3 재료인장시험

오스테나이트계 스테인리스강 각형강관(STS304 TKC와 STS316 TKC)과 탄소강 일반구조용 각형강관(SRT275)의 기계적 성질을 파악하기 위하여 KS B 0801에 규정에 따라 재료시험편을 제작하고 KS B 0802에 따라 단순인장 재료시험을 수행한다. 5호 시험편의 예인 Fig. 3와 같이 각형강관 각 평면(용접부를 기준으로 반시계 방향으로 1번부터 4번의 번호를 부여)에서 4개의 재료인장시험편을 채취한다. 단면크기가 각각 50×50, 70×70인 스테인리스강 각형강관의 평판부분에서 13B호 시험편과 5호 시험편을 제작하였고, 75×75인 탄소강 각형강관의 평판부분에서 13B호 시험편을 제작하였다. 국내에서 스테인리스 강재의 항복강도 산정에 대한 별도의 규정이 없어 미국도목학회 기준인 ASCE<sup>[17]</sup>와 유럽 EC3 Part 1.4<sup>[18]</sup>에 따라 0.2 % offset 방법으로 항복강도를 산정한다.

재료시험 결과, Table 3와 같이 오스테나이트계 스테인리스강 STS304 TKC에서 제작한 시험편에서 다른 시험편보다 인장강도가 높게 나왔으며 폭두께비가 작은 실험체의 시험편이 폭두께비가 큰 실험체의 시험편보다 항복강도가 높았다. 재료시험 결과, KS에서의 최소 강도 및 연신율 기준을 모두 만족하였다.

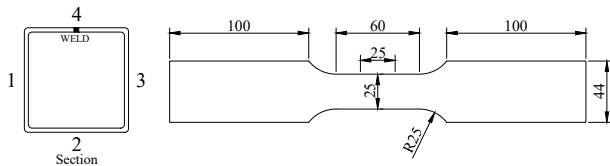


Fig. 3. Dimensions of flat coupon (Unit : mm)

Table 3. Material test results of flat coupons

Coupons	Measured thickness $t_e$ (mm)	Young's modulus $E$ (GPa)	Yield stress $F_{y0.2\%}$ (MPa)	Tensile strength $F_u$ (MPa)	Yield ratio $F_{y0.2\%}/F_u$ (%)	Elongation $EL$ (%)
C-C 75×2.0	1.92	257.2	358.0	468.3	74.5	29.8
C-C 75×2.9	2.88	219.8	319.8	433.9	73.7	36.1
C-A1S 50	3.01	202.6	529.0	785.2	67.5	49.3
C-A1S 70	2.98	156.9	452.7	709.9	63.8	55.8
C-A2S 50	3.01	198.3	485.2	646.0	75.2	42.9
C-A2S 70	2.99	207.7	413.8	623.0	66.4	51.5

Table 4. Ultimate strength and failure mode of test results

Specimens	Cycle number at initial buckling occurrence (compression)		Ultimate strength		Ultimate displacement		Cycle number and failure mode at ultimate state		Buckling mode and fracture shape at test end	
	Flexural buckling	Local buckling	$P_{uc,max}$ (kN)	$P_{ut,max}$ (kN)	$\delta_{c,max}$ (mm)	$\delta_{t,max}$ (mm)	Compression	Tension	Compression	Tension
C-C-75×75×2-1.5	-	200 % 1 cycle (10th cycle)	-164.9	211.8	-10.0	10.0	200 % 1 cycle (10th cycle)	300 % 3 cycle (15th cycle)	L	Tensile fracture in the top part
C-C-75×75×2.9-1.5	200 % 1 cycle (10th cycle)	300 % 2 cycle (14th cycle)	-274.9	290.4	-9.5	9.5	200 % 1 cycle (10th cycle)	400 % 2 cycle (17th cycle)	G+L	Tensile fracture in the middle of member
C-A1S-50×50×3-1.5	200 % 1 cycle (10th cycle)	400 % 1 cycle (16th cycle)	-286.4	383.9	-15.7	15.7	200 % 1 cycle (10th cycle)	400 % 2 cycle (17th cycle)	G+L	Tensile fracture in the middle of member
C-A1S-70×70×3-1.5	300 % 1 cycle (13th cycle)	300 % 2 cycle (14th cycle)	-415.1	457.9	-14.7	14.7	400 % 1 cycle (16th cycle)	400 % 1 cycle (16th cycle)	G+L	Tensile fracture in the middle of member
C-A2S-50×50×3-1.5	200 % 1 cycle (10th cycle)	300 % 1 cycle (13th cycle)	-252.6	334.7	-14.7	14.7	200 % 1 cycle (10th cycle)	400 % 3 cycle (18th cycle)	G+L	Tensile fracture in the middle part
C-A2S-70×70×3-1.5	300 % 1 cycle (13th cycle)	300 % 2 cycle (14th cycle)	-384.0	424.7	-12.0	12.0	300 % 1 cycle (13th cycle)	400 % 3 cycle (18th cycle)	G+L	Tensile fracture in the middle of member

### 3. 반복가력실험

#### 3.1 실험결과

Table 1의 실험체에 대해 하중 프로토콜에 따라 수행한 반복가력 실험결과를 Table 4에, 하중-변위 곡선을 Fig. 4에 나타냈다.

Table 4는 압축 시 최초좌굴형태와 반복횟수(사이클 수), 압축영역(-) 및 인장영역(+)에서 최대내력 및 최대변위, 최대내력시점에서의 압축영역(-) 및 인장영역(+)에서 좌굴형태, 파단형태 및 사이클 수, 실험종료시점에서 좌굴형태 및 인장파단형태를 포함한다.

대부분의 실험체에서 압축좌굴이 발생하기 전까지 압축 및 인장영역에서 대칭형상을 보였고 국부 및 전체좌굴 발생으로 압축영역에서 내력이 급격하게 저하되었다. 압축내력이 인장내력에 비해 작게 나타나는 것을 볼 수 있으며 압축영역에 비해서 인장영역에서 최대내력 시점기준으로 더 많은 반복횟수를 나타냈다.

Fig. 4의 하중-변위 이력곡선을 단조화곡선으로 변환하여 각각의 단면폭을 기준으로 비교한 결과를 Fig. 5에 나타냈다. 실험체 C-A1S-70×70×3-1.5의 압축내력과 인장내력이 각각 -415.1 kN, 457.9 kN으로 가장 크게 나타났고, 실험체 C-C-75×75×2-1.5의 압축내력과 인장내력이 각각 -164.9 kN, 211.8 kN으로 가장 낮았다.

폭두께비가 커서 국부좌굴에 의해 최대내력이 결정된 실험체 C-C-75×75×2-1.5를 제외한 모든 실험체에서 전

체좌굴이 발생하여 최대내력이 결정된 후 추가로 국부좌굴이 관찰하였다. 인장영역에서는 전체좌굴 또는 국부좌굴이 발생한 위치를 기점으로 균열과 인장파단이 발생하여 최대내력이 결정되었다.

Fig. 6와 Fig. 7은 각각 압축 시 좌굴형상과 인장 시 파단형상을 나타낸다. C-C-75×75×2-1.5 실험체에서는 국부좌굴(local buckling, L)만 발생하였으며 나머지 실험체는 중앙부에서 전체좌굴(global buckling, G)이 발생하여 최대내력이 결정되었고 그 이후 중앙부에서 국부좌굴도 동반되었다. 반복하중에 의해 압축좌굴이 발생한 위치에서 Fig. 7와 같이 코너부를 기점으로 해서 인장 파단이 발생하였다.

압축 시 횡좌굴 방향을 조사하기 위한 축 하중과 변위계(LVDT3와 LVDT4)에서 측정된 횡변위(lateral displacement)와의 관계를 Fig. 8에 나타냈다.

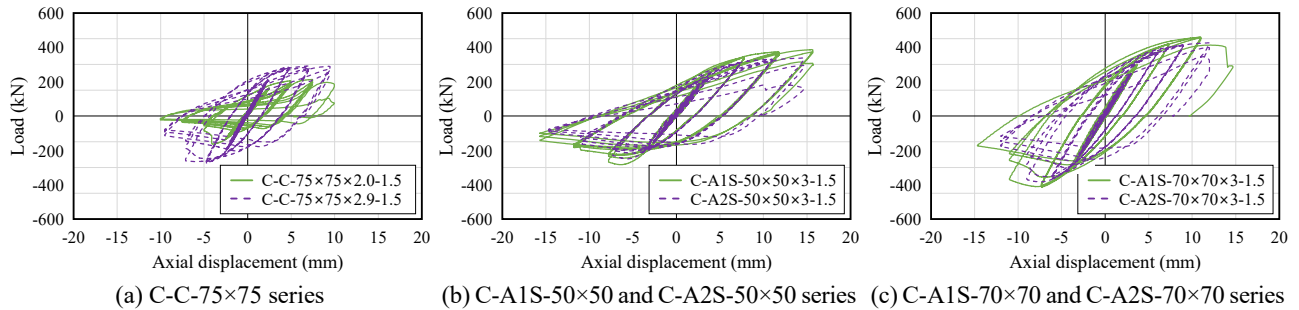


Fig. 4. Load-displacement hysteretic curves

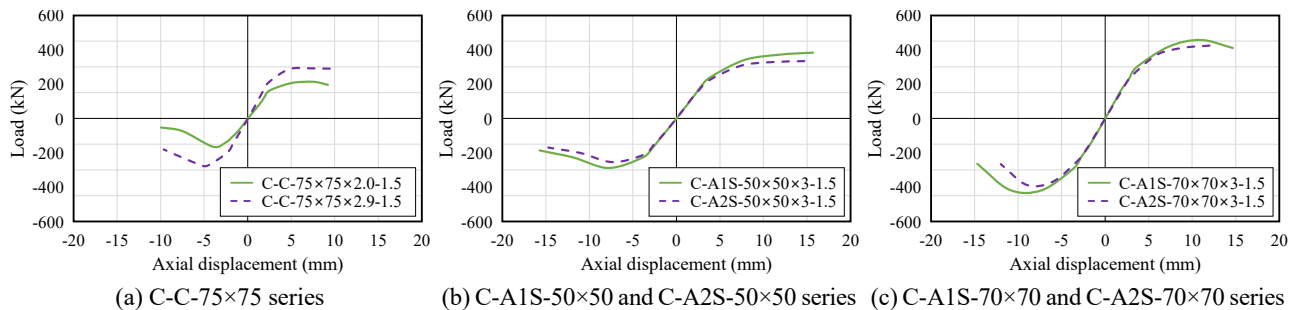


Fig. 5. Load-displacement skeleton curves

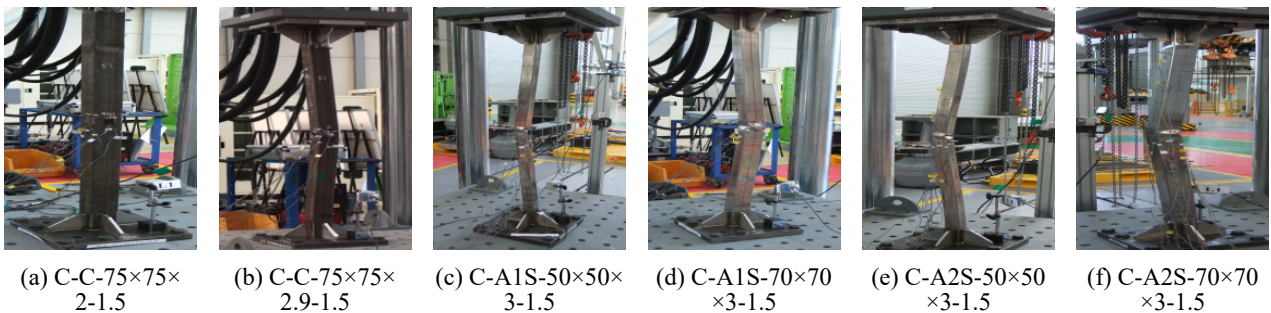


Fig. 6. Buckling shapes in compression

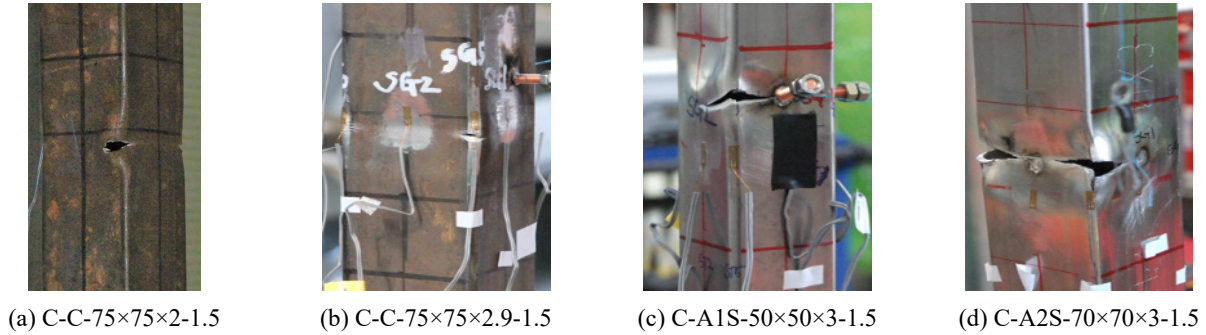


Fig. 7. Tensile fractures in tension

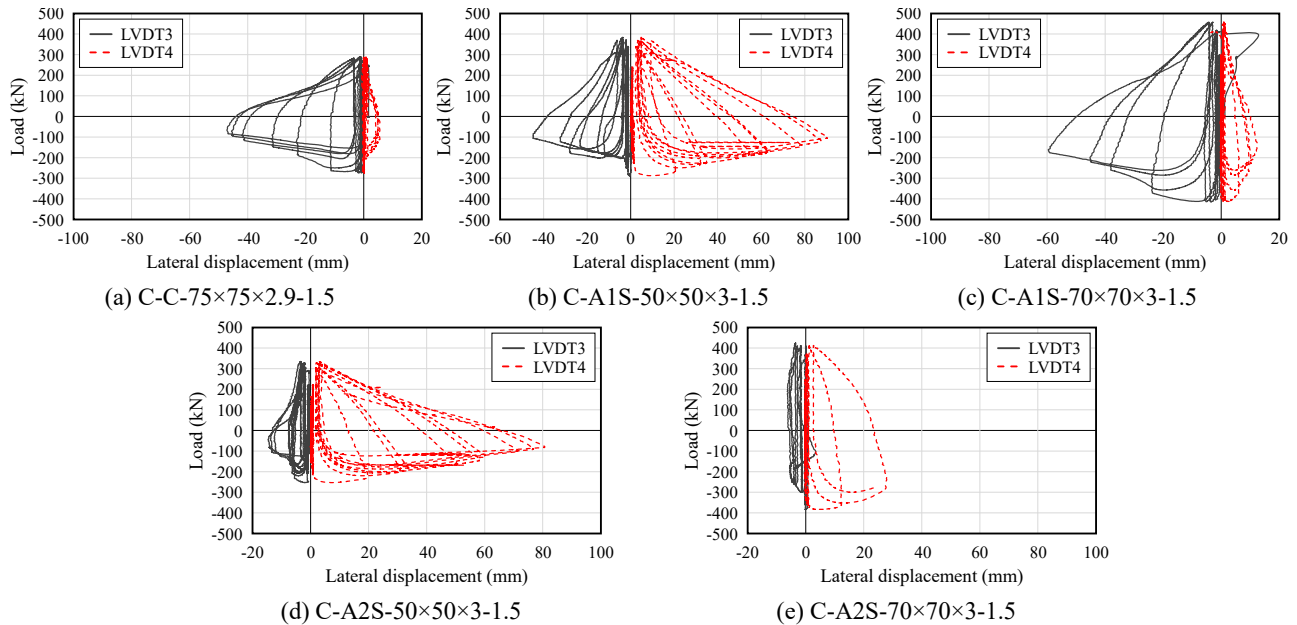


Fig. 8. Load-lateral displacement curves from buckling and fracture parts

C-C-75x75x2.9-1.5 실험체의 경우 LVDT4 방향의 횡변위는 거의 발생하지 않았으나, LVDT3 방향으로 횡변위가 크게 일어난 것으로 확인하였다.

C-A1S series 실험체의 경우 압축 시 50x50 실험체와 70x70 실험체 공통으로 LVDT3 방향과 LVDT4 방향으로 횡변위가 증가하는 것으로 나타났으나, 50x50 실험체의 경우 Fig. 8(c)에서 보는 바와 같이 LVDT4 방향으로 횡변위가 크게 증가하였고, 70x70 실험체의 경우 Fig. 8(d)와 같이 LVDT3 방향으로 횡변위가 크게 증가하였다. C-A2S series는 C-A1S series와 동일하게 Fig. 8(e)와 Fig. 8(f)에서 보는 바와 같이 50x50 실험체는 LVDT4 방향으로, 70x70 실험체는 LVDT3 방향으로 횡변위가 크게 증가하는 것으로 관찰되었다. C-C-75x75x2.1.5의 경우 전체좌굴이 발생하지 않고 국부좌굴만 발생했기 때문에 횡변위의 변화가 거의 없어 제외하였다.

## 4. 에너지흡수능력

### 4.1 에너지흡수능력 및 에너지 지수

중심 축하중 반복실험으로 얻은 Fig. 4의 이력곡선으로부터 에너지 흡수능력을 비교하기 위하여 이력곡선 면적의 합계인 총에너지흡수능력(energy absorption capacity,  $E_t$ )과 식 (2)와 식 (3)을 기준으로 총에너지흡수능력을 탄성구간의 면적으로 나누어 무차원값으로 구하는 에너지지수(energy index,  $EI$ )를 산정하였다. 총에너지 흡수면적과 에너지 지수를 탄소강 각형강관(C-C-75x75x2.9-1.5)을 기준으로 비교하여 Table 5에 정리하였다.

총에너지흡수능력은 재료시험 결과 인장강도가 가장 높았던 C-A1S-50x50x3-1.5가 41.18 kJ로 가장 높게 나타났다. 실험체 C-C-75x75x2.9-1.5에 비해 오스트나이트계 스

테인리스 각형강관 실험체의 에너지흡수능력이 1.37~1.59 배 높게 나타났다. 에너지지수의 경우는 탄소강에 비해 스테인리스강 실험체가 1.39~3.51배 높은 것으로 나타나 반복하중하에 동일단면 기준으로 스테인리스강 부재가 내진성능이 월등히 우수한 것을 알 수 있다.

각각의 강관부재의 에너지흡수능력은 실험체의 재료 특성 및 폭두께비가 다르기 때문에 동일기준으로 평가하기 위하여 단면의 항복강도와 항복변위로 구성되는 면적으로 총에너지흡수능력을 나눈 값으로 정의되는 에너지지수를 적용하였다.

에너지지수는 단면폭 50 mm로 작은 오스테나이트계 스테인리스강 실험체(C-A1S-50×50×3-1.5와 C-A2S-50×50×3-1.5)가 단면폭 70 mm인 실험체(C-A1S-70×70×3-1.5와 C-A2S-70×70×3-1.5)보다 높았다. 이는 큰 폭두께비의 실험체가 작은 폭두께비의 실험체보다 항복비가 작아 낮은 최대내력과 총에너지흡수능력을 보이는 것으로 나타났다.

$$EI = \frac{\sum E_i}{(\delta_y P_y)/2} \tag{2}$$

$$P_y = F_{yf} A \tag{3}$$

## 5. 기존 설계기준식 비교

### 5.1 기존 설계기준식

현행 탄소강과 스테인리스강 설계기준으로 각각 유럽의 Eurocode 3 EN 1993-1-3<sup>[15]</sup>과 EN 1993-1-4<sup>[18]</sup>, 미국토목학

회의 냉간성형 스테인리스강 구조기준인 ASCE 8-02<sup>[17]</sup>와 미국철강협회의 냉간성형 탄소강 구조기준 AISI 2016<sup>[20]</sup>을 적용하여 설계좌굴강도를 산정하고 압축영역에서 얻은 실험 좌굴내력과 비교해서 현행기준식 및 기존 연구자 제안식의 적용성을 조사한다.

Eurocode 3의 스테인리스강 및 탄소강 압축부재의 좌굴강도( $P_{ul}$ )는 다음 식에 의해 산정한다.

$$P_{ul} = \chi A F_y \tag{4}$$

$$P_{ul} = \chi A_{eff} F_y \tag{5}$$

여기서,  $\chi$ : 좌굴을 고려한 감소계수,  $A$ : 전체단면적,  $A_{eff}$ : 유효폭( $\rho W$ )으로 산정한 유효단면적.

Table 1으로부터 본 각형강관 실험체의 폭-두께비( $W/t$ )와 판별식에 따라 단면의 class를 분류한다.  $\chi$ 은 스테인리스강 각형강관 재료시험에 따른 Table 3의 항복강도(0.2 % proof stress)이다.

$$\chi = \frac{1}{\phi + (\phi^2 - \lambda_c^2)^{0.5}} \leq 1.0 \tag{6}$$

여기서,  $\alpha$ : 각형강관의 초기변형계수 = 0.49,  $\lambda_0$ : 한계세장비(휨 좌굴 형상이 강관에서 0.4),  $\phi = 0.5 \times (1 + \alpha(\lambda_c - \lambda_0) + \lambda_c^2)$ ,  $\rho$ : 폭 감수 계수,  $\lambda_p$ : 요소세장비,  $\epsilon$ : 재료상수(스테인리스강  $\epsilon = \left(\frac{235}{F_y} \frac{E}{210,000}\right)^{0.5}$ , 탄소강  $\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$ ),  $k_\sigma$ : EN 1993-1-5<sup>[19]</sup>에 의한 판 좌굴 상수(= 4.0).

**Table 5.** Energy absorption capacity and energy index

Specimens	Number of cycle		$E_i = \sum E_i$ (KJ)	$E_i/E_i(C-C-75 \times 75 \times 2.9 \times 1.5)$	EI	$EI/EI(C-C-75 \times 75 \times 2.9 \times 1.5)$
	Compression	Tension				
C-C-75×75×2-1.5	400 % 1 cycle (16th cycle)	400 % 1 cycle (16th cycle)	10.57	0.41	42.54	1.16
C-C-75×75×2.9-1.5	400 % 2 cycle (17th cycle)	400 % 2 cycle (17th cycle)	25.92	1.00	36.61	1.00
C-A1S-50×50×3-1.5	400 % 2 cycle (17th cycle)	400 % 2 cycle (17th cycle)	41.18	1.59	128.54	3.51
C-A1S-70×70×3-1.5	400 % 2 cycle (17th cycle)	400 % 2 cycle (17th cycle)	38.70	1.49	51.07	1.39
C-A2S-50×50×3-1.5	400 % 2 cycle (17th cycle)	400 % 2 cycle (17th cycle)	35.63	1.37	121.04	3.31
C-A2S-70×70×3-1.5	400 % 2 cycle (17th cycle)	400 % 2 cycle (17th cycle)	38.82	1.50	54.62	1.49

$$\lambda_c = \sqrt{F_y A / N_{cr}} \quad (7)$$

$$\lambda_c = \sqrt{F_y A_{eff} / N_{cr}} \quad (8)$$

여기서,  $N_{cr}$ : 탄성임계좌굴하중(=  $\frac{\pi^2 EI}{(KL)^2}$ ),  $L$ : 실험체 길이,  $K$ : 유효길이계수(양단 고정조건  $K = 0.5$ ).

미국토목학회의 스테인리스강 구조설계기준인 ASCE 8-02<sup>[17]</sup>에서는 중심압축을 받는 스테인리스강관 압축부재의 좌굴내력( $P_{ul}$ )을 식 (9)와 같이 유효단면적( $A_e$ )과 좌굴응력( $F_n$ )의 곱으로 규정하고 있다.

$$P_{ul} = A_e F_n \quad (9)$$

$$F_n = \frac{\pi^2 E_t}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \leq F_y \quad (10)$$

다음 식 (11)에 의해 산정된 접선탄성계수( $E_t$ )를 식 (10)의 판별식을 만족하도록 여러 번 반복계산한다. 즉  $F$ 가  $F_n$ 에 근접하도록  $F_n$ 을 변경하면서 구한다.

$$E_t = \frac{E F_y}{F_y + 0.002nE \left(\frac{F}{F_y}\right)^{n-1}} \quad (11)$$

여기서,  $A_e$ : 좌굴응력( $F_n$ )에서 계산된 유효면적,  $F_n$ : 휨-비틀림 좌굴응력,  $E$ : 재료 초기탄성계수,  $E_t$ : 식 (11)에 의한 좌굴응력에 대한 접선탄성계수,  $F_y$ : 재료항복강도,  $F$ : 재료 공칭압축강도,  $n$ : 스테인리스강에 대한 Ramberg-Osgood 재료정수,  $R_{p0.01}$ : 0.01 % 오프셋 항복 응력.

미국철강협회의 탄소강 구조설계기준(AISI<sup>[20]</sup>)에서는 중심압축을 받는 스테인리스강관 압축부재의 좌굴내력( $P_{ul}$ )을 부재의 총단면적( $A_g$ )과 공칭압축응력( $F_n$ )의 곱으로 규정하고 있다. 휨모멘트가 작용하지 않고 중심압축력을 받는 냉간성형 탄소강 각형강관 압축부재의 전체좌굴강도( $P_{ul}$ )는 전체좌굴강도( $P_{ul1}$ )와 국부좌굴강도( $P_{ul2}$ ) 중 작은 값으로 한다.

$$P_{ul1} = A_g F_n \quad (12)$$

공칭압축응력( $F_n$ )은 세장비( $\lambda_c$ )에 따라 다음 두 식으로 산정한다.

- $\lambda_c \leq 1.5$ 일 때

$$F_n = (0.658 \lambda_c^2) F_y \quad (13)$$

- $\lambda_c > 1.5$ 일 때

$$F_n = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2}\right) F_y \quad (14)$$

여기서, 세장비( $\lambda_c$ )는 다음의 식 (15)로 정의한다.

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_e}} \quad (15)$$

직접강도법으로 구멍이 없는 압축부재에 대해 국부좌굴강도  $P_{ul2}$ 는 다음에 따라 산정한다.

- $\lambda_l \leq 0.776$ 일 때

$$P_{ul2} = P_{ul1} \quad (16)$$

- $\lambda_l > 0.776$ 일 때

$$P_{ul2} = \left[1 - 0.15 \left(\frac{P_{crl}}{P_{ul1}}\right)^{0.4}\right] \left(\frac{P_{crl}}{P_{ul1}}\right)^{0.4} P_{ul1} \quad (17)$$

여기서,  $\lambda_l = \sqrt{\frac{P_{ul1}}{P_{crl}}}$ ,  $P_{ul1}$ : 식 (12)의 전체좌굴압축강도,  $P_{crl}$ : 탄성임계국부좌굴강도.

압축부재의 국부좌굴강도  $P_{crl}$ 은 다음과 같이 산정한다.

$$P_{crl} = A_g F_{crl} \quad (18)$$

여기서,  $F_{crl}$ : 국부좌굴응력.

$$F_{crl} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{w}\right)^2 \quad (19)$$

여기서,  $k$ : 판좌굴계수(길이방향 모서리의 웨브에 의해 지지되는 구속판요소) = 4.0,  $\nu$ : 강재의 푸아송비(0.3),  $w$ : 요소의 평판 폭.

## 5.2 설계기준식 비교

Table 6에 반복가력실험결과로 얻어진 Fig. 5의 압축영역의 압축좌굴강도( $P_{c,max}$ ), 현행 스테인리스강 구조설계기준(EC3<sup>[18]</sup>와 ASCE<sup>[17]</sup>)과 탄소강 구조설계기준(EC3<sup>[14],[15]</sup>와 AISI<sup>[20]</sup>)에 의한 산정좌굴강도( $P_{ul}$ )와 최대좌굴강도비( $P_{ul}/P_{c,max}$ )를 정리하였다. EC3 기준은 탄소강 실험체와 폭 두께비가 작은 실험체에 대하여 2 % - 18 % 정도로 과대평가하였고 나머지 실험체에 대해서 12 % - 13 % 정도로 과소평가한 것으로 나타났다. 미국철강협회 구조설계기준의(AISI 2016) 경우 탄소강 실험체에 대하여 -7 % - 18 %



**Table 6.** Buckling strength comparison of design prediction and test result in compression

Specimens	Average measured plate thickness (mm)	$\lambda_c$		C	Test ultimate strength in compression $ P_{c,max} $ (kN)	Design strength $P_{ut}$ (kN)		Strength comparison $P_{ut}/P_{c,max}$	
		EC3	ASCE			EC3	AISI/ASCE	EC3	AISI/ASCE
C-C-75×75×2-1.5	1.93	0.44	-	-	164.9	194.1	194.5	1.18	1.18
C-C-75×75×2.9-1.5	2.88	0.66	-	-	274.9	280.7	256.3	1.02	0.93
C-AIS-50×50×3-1.5	3.01	0.32	0.65	-	286.4	305.5	305.5	1.07	1.07
C-AIS-70×70×3-1.5	2.98	0.38	0.69	-	415.1	364.9	360.7	0.88	0.87
C-A2S-50×50×3-1.5	3.01	0.55	0.71	-	252.6	277.6	277.6	1.10	1.10
C-A2S-70×70×3-1.5	2.99	0.65	0.69	-	384.0	335.2	335.2	0.87	0.87
Average	-	-	-	-	-	-	-	1.02	1.00
COV	-	-	-	-	-	-	-	0.121	0.131

정도로 평가하는 것을 알 수 있었으며, 미국토목학회 구조 설계기준(ASCE)의 경우 실험체에 대하여 폭두께비가 큰 실험체는 13 % 정도로 과소평가하는 것을 확인할 수 있다.

## 6. 결론

일반구조용 냉간성형 탄소강 각형강관(SRT275)과 기계 구조용 스테인리스강 각형강관(STS304 TKC와 STS316 TKC)으로 제작된 6개의 실험체에 반복하중을 받는 부재의 좌굴 거동과 최대내력을 조사하고자 반복가력 실험을 수행하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실험체 C-AIS-70×70×3-1.5의 압축내력과 인장내력이 각각 -415.1 kN, 457.9 kN으로 가장 크게 나타났다. 실험체 C-C-75×75×2-1.5의 압축내력과 인장내력이 각각 -164.9 kN, 211.8 kN으로 가장 낮았다. 이는 탄소강 실험체에 비하여 스테인리스강 실험체에서 더 많은 사이클 후 좌굴이 발생하였고 이는 탄소강보다 스테인리스강이 재료시험 결과 높은 연신율과 강도를 보유하고 있어 에너지 흡수능력이 더 우수한 것으로 확인되었다. 폭두께비가 커서 국부좌굴에 의해 최대내력이 결정된 실험체 C-C-75×75×2-1.5를 제외한 모든 실험체에서 전체좌굴이 발생하여 최대내력이 결정된 후 추가로 국부좌굴이 관찰되었다. 인장영역에서는 전체좌굴 또는 국부좌굴이 발생한 위치를 기점으로 균열과 인장파단이 발생하여 최대내력이 결정되었다.
- (2) 실험체의 에너지지수는 오스테나이트계 스테인리

스강 실험체인 C-AIS-50×50×3-1.5가 128.54로 가장 높았으며 탄소강 실험체 C-C-75×75×2.9-1.5가 36.61로 가장 작은 것으로 나타났다. 전반적으로 오스테나이트계 스테인리스 각형강관이 에너지지수가 높은 것을 알 수 있었다.

- (3) 현행기준인 AISI와 AISC, EC3에 의해 좌굴내력을 산정하였고, 실험좌굴내력과 비교하였다. EC3 기준은 탄소강 실험체에 대하여 좌굴내력을 과대평가하였다. 스테인리스강 각형강관 실험체에 대해서 폭두께비가 큰 실험체에 대하여 과소평가한 것으로 나타났다. 미국철강협회 기준(AISI 2016)의 경우 탄소강 실험체에 대하여 폭두께비가 작은 실험체는 과대평가하였고, 미국토목학회의 기준(ASCE) 또한 폭두께비가 작은 실험체에 대하여 과대평가하였다.

## 감사의 글

본 연구는 2018년도 한국연구재단(과제번호: NRF-2018 R1D1A1B07046021)의 연구비 지원으로 수행되었음.

## 참고문헌(References)

- [1] Tremblay, R. (2002) Inelastic Seismic Response of Steel Bracing Members, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.58, pp.665-701.
- [2] Fell, B.V. (2008) *Large-Scale Testing and Simulation of Earthquake-Induced Ultra Low Cycle Fatigue in Bracing Members Subjected to Cyclic Inelastic Buck-*

- ling, Ph.D. Dissertation, University of California, Davis, USA.
- [3] Sheehan, T., and Chan, T.-M. (2014) Cyclic Response of Hollow and Concrete-Filled Circular Hollow Section Braces, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, ICE Publishing, Vol.167, No.3, pp.140-152.
- [4] Elchalakani, M., Zhao, X.-L., and Grzebieta, R. (2003) Tests of Cold-Formed Circular Tubular Braces Under Cyclic Axial Loading, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.129, No.4, pp.507-514.
- [5] DiSarno, L., Elnashai, A.S., and Nethercot, D.A. (2008) Seismic Response of Stainless Steel Braced Frames, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.64, pp.914-925.
- [6] Nip, K.H., Gardner, L., Davies, C.M., and Elghazouli, A.Y. (2010) Extremely Low Cycle Fatigue Tests on Structural Carbon Steel and Stainless Steel, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.66, No.1, pp.96-110.
- [7] 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.
- [8] Kumar, P.C.A., and Sahoo, D.P. (2018) Fracture Ductility of Hollow Circular and Square Steel Braces Under Cyclic Loading, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, Vol.130, pp.347-361.
- [9] Zhou, F., Fang, C., and Chen, Y. (2018) Experimental and Numerical Studies on Stainless Steel Tubular Members Under Axial Cyclic loading, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.171, pp.72-85.
- [10] Liu, J., Tian, L., Ma, R., and Qu, B. (2022) Development of a Hysteretic Model for Steel Members Under Cyclic Axial Loading, *Journal of Building Engineering*, Elsevier, Vol.46, 103798.
- [11] Kim, J.H., 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*, KSSC, Vol.32, No.5, pp.309-320 (In Korean).
- [12] 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.
- [13] Korean Agency for Technology and Standards (2015) *Stainless Steel Pipes for Machine and Structural Purposes* (KS D 3536: 2015), Korea (in Korean).
- [14] European Committee for Standardization (2005) *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings* (EN 1993-1-1: 2005), Belgium.
- [15] European Committee for Standardization (2006) *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-3: General Rules – Supplementary Rules for Cold-Formed Members and Sheeting* (EN 1993-1-3: 2006), Belgium.
- [16] Krawinkler, H. (1992) *Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures*, ATC-24 Report, Applied Technology Council, USA.
- [17] American Society of Civil Engineers (2002) *Specification for the Design of Cold-Formed Stainless Steel Structural Members* (SEI/ASCE 8-02), USA.
- [18] European Committee for Standardization (2015) *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1.4: General Rules – Supplementary Rules for Stainless Steel* (EN 1993-1-4: 2006+A1: 2015), Belgium.
- [19] European Committee for Standardization (2006) *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-5: Plated Structural Elements* (EN 1993-1-5: 2006), Belgium.
- [20] 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 스테인리스강 각형강관과 비교대상 강종인 탄소강 각형강관 가새부재의 재료성질 차이에 따른 동적 거동특성을 조사하기 위해 오스테나이트계 스테인리스강 각형강관의 2종과 탄소강 일반구조용 각형강관 1종을 포함한 총 6개의 실험체를 대상으로 축 하중 반복실험을 수행하였다. 동일단면에 대해 탄소강 실험체보다 오스테나이트계 스테인리스강 실험체의 에너지 흡수능력과 에너지 지수가 높은 것으로 나타났다. 유럽 및 북미의 냉간성형 탄소강 및 스테인리스강 구조기준인 EC3, AISI 및 ASCE를 토대로 실험체의 압축 시 좌굴내력의 적용성을 평가하기 위해 설계예측 좌굴내력과 실험압축내력을 비교하였다.

**핵심용어**: 스테인리스강, 탄소강, 각형강관, 재료특성, 반복가력, 이력거동