



## 조립형 CFT 기둥의 리브 길이에 따른 중심 압축 성능

유별이<sup>1)</sup> · 손동희<sup>1)</sup> · 배백일<sup>2)</sup> · 엄순섭<sup>3)</sup> · 최창식<sup>4)\*</sup>

<sup>1)</sup>한양대학교 건축공학과 대학원생 <sup>2)</sup>한양사이버대학교 디지털건축도시공학과 교수  
<sup>3)</sup>한우물중공업 대표이사 <sup>4)</sup>한양대학교 건축공학부 교수

## Performance of Centrally Loaded Assembled CFT Columns with Length of Ribs

Byeol-ie You,<sup>1)</sup> Dong-hee Son,<sup>1)</sup> Baek-il Bae,<sup>2)</sup> Soon-sub Eom,<sup>3)</sup> and Chang-sik Choi<sup>4)\*</sup>

<sup>1)</sup>Graduate Student, Department of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Rep. of Korea

<sup>2)</sup>Professor, Department of Architectural and Urban Engineering, Hanyang Cyber University, Seoul 04763, Rep. of Korea

<sup>3)</sup>Chief Executive Officer, Hanwoomul Co., Ltd., Jincheon 27860, Rep. of Korea

<sup>4)</sup>Professor, Department of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Rep. of Korea

**ABSTRACT** This study was conducted to examine the central compression performance of an assembled CFT column with a sawtooth rib inside. The experimental results of the assembled CFT column and the general square cross-sectional CFT column and the code (AISC, KDS) were compared to confirm whether the code was available. In addition, the influence of the sawtooth-shaped rib and the integrated behavior of the individual steel plates of the assembled CFT column without welding were analyzed. The assembled CFT column without welding had a larger ultimate axial strength than the existing square cross-sectional CFT column and did not significantly affect the stiffness. In addition, when the effective intensity was exceeded, there was no further increase in ultimate axial strength, and there was integral behavior equal to or greater than that of the welded square cross-sectional CFT column. Finally, after calculating the compressive strength of the assembled CFT column that was not welded, it was confirmed that the design formula of the general square cross-sectional CFT column was viable.

**Keywords** : CFT column, axial load, rib, stud, shear connector

### 1. 서 론

#### 1.1 연구배경

CFT(concrete-filled tubular) 기둥은 철근콘크리트 기둥과 매입형 합성기둥에 비해서 동일 단면 대비 극한 압축강도가 크다. 이는 CFT 기둥 내부 콘크리트가 축하중을 견디고 강관의 조기 국부좌굴을 방지하는 역할을 하기 때문이다(Ekmekyapar 2016). 특히 각형 CFT 기둥은 원형 CFT 기둥에 비하여 제작이 용이할 뿐 아니라 접합부 시공이 수월하다는 장점이 있다.

그러나 콘크리트에 가해지는 구속력이 원형보다 각형이 약하고 국부좌굴 지연 능력이 비교적 낮다(Bradford et al. 2000, 2002). 또 다른 문제는 각형 CFT 기둥에서 축력을 받을 때 기

둥 모서리에 측압이 집중되어 용접부가 취약해진다는 것이다(Uy and Das 1997, 1999). 이러한 현상은 각형 CFT 기둥 모서리에 용접이 충분하지 못할 때 모서리가 가장 먼저 항복하게 만드는데, Khan et al.(2017) 연구에서도 관찰되었다.

이러한 이유로 제작 및 접합부 시공이 용이한 각형 CFT 기둥 성능을 향상시키는 연구가 다수 진행되었다. 일반적으로 용접된 일반 각형 CFT 기둥 내부에 리브 또는 전단연결재를 설치하면 기둥의 축방향 내력이 증가한다(Bradford et al. 2000). 또한 Qiao(2015)에 따르면 정사각형 단면을 갖는 CFT 기둥 내부에 전단연결재를 설치하였을 경우 내부 전단연결재의 두께가 축방향 내력에 영향을 주는 것으로 확인되었다. Petrus et al.(2010)은 탭 스티프너라고 불리는 전단연결재의 설치 간격이 콘크리트와 강관의 결합강도에 영향이 미친다고 주장하였다. Kitada(1998)은 전단연결재 유무가 콘크리트와 강재면 사이의 부착강도에 영향을 미치는 것을 규명하였다. 또한 Huang et al.(1992)의 연구에 따르면 전단연결재의 모양은 CFT 기둥의 연성과 최대 내력 증가에도 영향을 미치는 것으로 나타났다. Lu and Kennedy(1994)의 연구에 따르면

\*Corresponding author E-mail : ccs5530@hanyang.ac.kr

Received August 05, 2021, Revised September 24, 2021,

Accepted December 16, 2021

©2022 by Korea Concrete Institute

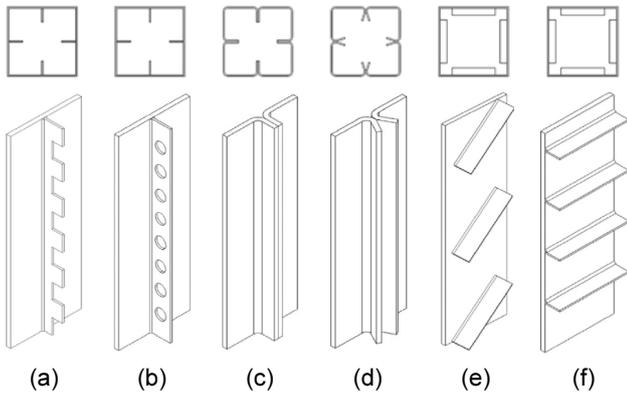


Fig. 1 Types of square CFT elements with internal plate stiffeners tested under axial compression loading

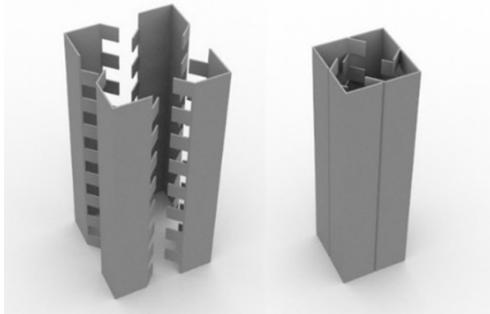


Fig. 2 3D modeling

전단연결재의 강도 및 연성 증가 효과는 충전된 콘크리트의 압축강도가 낮을수록 커지는 것으로 나타났다. 이러한 리브, 전단연결재의 효과는 Fig. 1과 같이 다양한 상세에 따라 연구가 진행되었다(Tao et al. 2008; Lee et al. 2011; Yang et al. 2013; Ling et al. 2014; Liang et al. 2017; Zhu et al. 2017).

그래서 본 연구에서는 각형 강관의 모서리 용접부 과단의 문제점을 해결하기 위해 Fig. 2와 같이 상세를 제안하였다. Fig. 2는 4개의 조립 강관에 톱니형 리브를 두어 전단연결재 역할뿐 아니라 모서리 용접이 필요하지 않다는 것이 특징이다. 그러나 이와 같은 조립형 상세는 중심 압축을 받을 경우 4개의 조립형 강관에 동일한 하중이 전달되지 않을 뿐만 아니라 앞선 기존 연구결과에서 나타난 리브의 전단연결재로서의 효과 또한 규명이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 전단연결재에 대한 장점을 극대화하고 제안된 조립형 CFT의 현장 적용을 위해 먼저 단주의 중심 압축 실험을 수행하고 일반 각형 CFT 기둥과 중심 압축 성능을 비교하고자 한다.

## 1.2 현행설계기준

현재 CFT 기둥의 대표적인 설계 방법으로는 대표적으로 소성응력분포법과 변형률적합법 두 가지가 존재한다(이 두 가지 방법 외에 AISC(2016)에서 P-M Curve를 보정하여 설계하는 방법이 있지만, 이는 소성응력분포법에서 파생된 것으로 해당 논문에서 설명하지 않았다).

Table 1 Short rectangular CFT column strength depending upon width-to-thickness ratio

Code	Nominal strength	
KDS 14 2066 :2021, AISC 360-16	Compact section	$P_{no} = P_p$
	Noncompact section	$P_{no} = P_p - \frac{P_p - P_y}{(\lambda_r - \lambda_p)^2} (\lambda - \lambda_p)$
	Slender section	$P_p = F_{cr} A_s + 0.7 f_y' \left( A_c + A_{sr} \frac{E_s}{E_c} \right)$
EC4 2004	$N_{pl,Rd} = \frac{f_{ck} A_c}{\gamma_c} + \frac{f_{ys} A_s}{\gamma_s} + \frac{f_{ya} A_a}{\gamma_a}$	

Note:  $E_c$ : modulus of elasticity of concrete;  $E_s$ : modulus of elasticity of steel;  $N_{pl,Rd}$ : axial load capacity of CFT column

소성응력분포법은 KDS(MOLIT 2021), AISC(2016) 그리고 Eurocode 4(CEN 2004)에서 사용되고 있다. 소성응력분포법은 각 재료의 소성 강도만을 사용하여 계산하는데, 이 소성강도에 AISC(2016)는 콘크리트에 0.85의 보정계수를 사용하며, Eurocode 4(CEN 2004)에서는 1.0의 보정계수를 사용한다는 차이가 있다. 소성응력분포법은 단순히 각 재료 단면적과 강도로 계산되므로, 조립형 CFT의 내부 리브의 기능 및 스티드 설치에 대한 설계 대안을 제시하지 못하고 있다. KDS(MOLIT 2021), AISC(2016)에서 제시한 단주의 압축강도에 대한 설계식은 Table 1에 나타내었다.

변형률적합법은 ACI 318-19(2019)와 KDS(MOLIT 2021)와 AISC(2016)에서 제안하고 있다. KDS(MOLIT 2021)와 AISC(2016)에서는 소성응력분포법과 변형률적합법 둘 다 사용할 수 있는 반면, ACI는 변형률적합법만을 취하고 있다. 세 기준에서 모두 변형률 0.003으로 제안하고 있다. 다만 변형률적합법은 특정 단면에 사용하기 위해서는 별도의 실험이 필요하다.

## 2. 실험계획

### 2.1 실험체 계획

실험체는 정사각형 단면의 CFT 기둥과 용접하지 않은 조립형 CFT 기둥으로 계획하였다. 두 타입의 단면은 Fig. 3과 같다. 첫 번째 타입인 Fig. 3(a)는 용접한 각형 CFT이며, Fig. 3(b)의 C형은 용접하지 않고 4개의 강관으로 조립한 형태이다. C형의 내부 돌기는 톱니형 리브로 길이에 변수를 두었다.

용접된 일반 각형 CFT 기둥과 용접되지 않은 조립형 CFT 기둥은 세 가지로 제작하였으며, 앞서 언급한 대로 독립변인은 리브의 길이로 정하였다. 실험은 기둥의 축 강성, 최대 내력을 분석하기 위해 단주의 중심 압축실험을 계획하였으며 □-400×400×8(mm) 크기의 실물 스케일로 제작하였다. 기둥의 총 높이는 1,640 mm이고, 기둥의 상하부의 보강 부분을 제외한 기둥의 높이는 1,200 mm로 계획하였으며, 콘크리트 타설을 위해 상부 베이스플레이트에 지름 250 mm의 타설구





Fig. 6 Test set-up

### 3. 실험 결과

#### 3.1 재료시험 결과

사용된 강재 시험편은 KS B 0801(KATS 2017a)의 판 모양 정형 시험편 1A호에 따라 제작하였으며 KS B 0802(KATS 2018) 금속재료 인장시험편에 따라 수행하였다. 이때 강관은 용접 구조 압연강재 SM355, 8 mm 두께를 사용하였다. 강관 인장시험은 시험편 3개에 대하여 수행하였고, 시험 평균값은  $F_y=407.8$  MPa,  $F_u=481.8$  MPa로 측정되었다. 또한 콘크리트 공시체는 KS F 2403(KATS 2019)에 따라 지름 100 mm 높이 200 mm 원주형으로 제작하였으며, 압축강도 시험은 KS F 2405(KATS 2017b)에 따라 수행하였다. 콘크리트의 28일 압축강도는 평균 16.0 MPa로 측정되었다. 재료시험 결과 값은 Table 3과 Table 4에 나타내었다.

Table 3 Results of coupon test

Test No.	$F_y$ (MPa)	$F_u$ (MPa)	$\epsilon_y$ (mm/mm)
1	411.4	490.8	0.0020
2	403.1	502.8	0.0019
3	408.9	451.7	0.0019
AVE.	407.8	481.8	0.0019

Note:  $F_y$ : yield stress of steel;  $F_u$ : ultimate stress of steel plate;  $\epsilon_y$ : yield strain

Table 4 Results of concrete compressive strength test

Test No.	$f_{cm}$ (MPa)	$E_c$ (MPa)	$\epsilon_0$ (mm/mm)
1	16.6	28,962	0.002095
2	16.0	16,283	0.002175
3	15.5	16,192	0.002135
AVE.	16.0	20,479	0.002135

Note:  $f_{cm}$ : compressive strength of concrete at 28 days;  $E_c$ : elastic modulus of concrete;  $\epsilon_0$ : concrete strain at maximum stress

#### 3.2 파괴양상

각 실험체 별 파괴 양상은 Fig. 7에 나타내었다. S400 실험체는 최대 강도 발현 이후 상부에서 국부좌굴이 관찰되었으며, 중앙부와 하단부에는 국부좌굴이 일어나지 않았다. C400-40H60L 실험체는 국부좌굴이 중앙부에서 먼저 관찰되었고, 이후 상부와 중앙부에 산발적으로 관찰되었다. C400-40H80L는 국부좌굴이 중앙부에서만 관찰되었다. 이때 국부좌굴이 S400과는 다르게 타원의 긴 축 수평으로 발생하지 않고, 기울어진 타원형 모양으로 발생하였다. C400-40H100L 실험체는 상부에 먼저 국부좌굴이 관찰되었으며, 그다음 중앙부와 상부에 산발적으로 발생하였다. 이때 S400과 C400-40H80L은 국부좌굴 폭이 모두 기둥의 폭과 동일한 400 mm였으나, C400-40H60L와 C400-40H100L 실험체에서는 국부좌굴 폭의 지름이 400 mm와 200 mm 두 가지 모양으로 나타났다. 두 실험체도 C400-40H80L과 같이 국부좌굴 모양이 기울어진 타원형 모양으로 발생하였다. 또한 리브가 있는 C형 실험체에서는 모서리 터짐 현상이 관찰되지 않았다.

S400 실험체는 최대 강도 발현 이후 좌굴과 함께 용접부의 파단으로 최종 파괴하였으며, C형 실험체 3가지 모두 하중이 가해지면서 조립부가 벌어지기 시작했고, 최대 내력에 도달한 이후 국부좌굴이 발생하는 곳에서는 리브가 더 이상 콘크리트를 잡아주지 못하고 부분적으로 찢어지게 되었다.

#### 3.3 하중-변위 관계

각형 CFT 기둥의 중심압축실험에 대한 결과는 Figs. 8, 9와 Table 5에서 확인할 수 있다. 기둥의 압축력에 대한 설계 및 검토는 KDS 14 20 66(MOLIT 2021)에 따라 산정하였다. 이때 리브의 효과를 검토하기 위하여 축강도 산정에 사용한 강관의 면적은 최 외단에 위치한 강관의 면적만을 고려하여 공칭축강도를 산정하였다. 이때의 공칭축강도는  $P_{n,s}$ 로 표기하였다. 강관에 리브의 면적을 추가하여 산정한 공칭축강도는  $P_{n,Ribs}$ 로 표기하였다.

S400과 조립식 CFT 기둥을 비교하였을 때, 조립식 CFT 기둥의 중심 압축 실험에서 전체적인 내력 증가가 관찰되었다. KDS 14 20 66(MOLIT 2021)이 제안한 식에 따라 산정한 축강도와 실험 결과를 비교하였을 때 조립형 CFT 기둥 모두 S400보다 높은 것으로 나타났다. 리브가 있는 조립형 CFT 기둥 실험체 세 가지 중 가장 낮은 값을 보인 실험체는 C400-40H60L으로 최대 내력이 7,296 kN이다. 해당 값은 S400과는 900 kN 차이로 11.4%의 강도 상승을 보였다. 가장 높은 값을 보인 C400-40H100L는 8,020 kN으로 S400과 비교하였을 때 25.4% 강도가 상승되었다.

실험체 S400은 최대 내력 도달 이후 기둥 상부 모서리의 용접부가 터져나가는 시점에 따라서 내력이 급격히 감소하였다. 파단 되는 시점은 각각 변위가 16, 21, 22, 28 mm인 지점이었다. 또한 C400-40H60L 실험체는 최대 내력 이후 다른 실험체에 비해 가장 먼저 내력이 감소하였고, 축 하중이 5,200

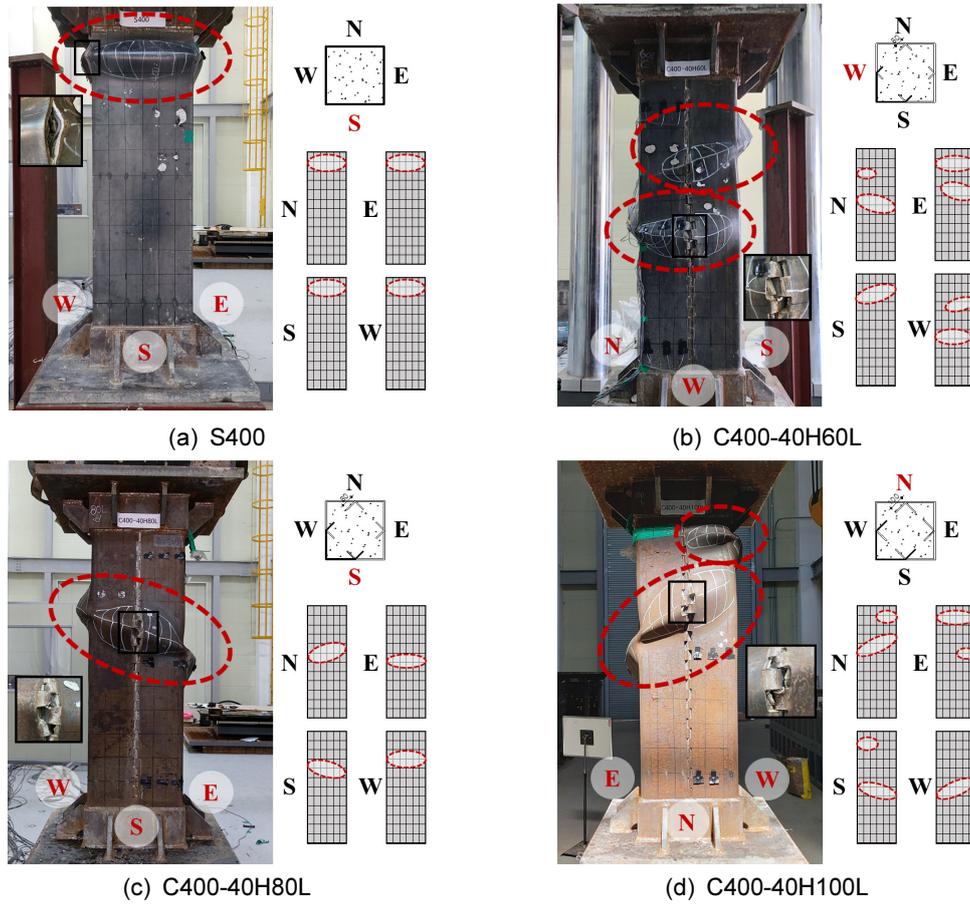


Fig. 7 Failure appearances of test specimens

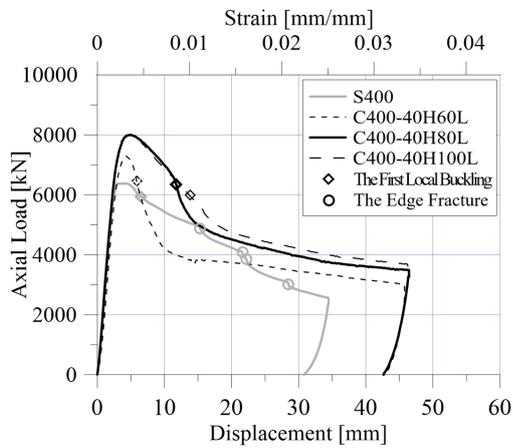


Fig. 8 Axial force-displacement curves

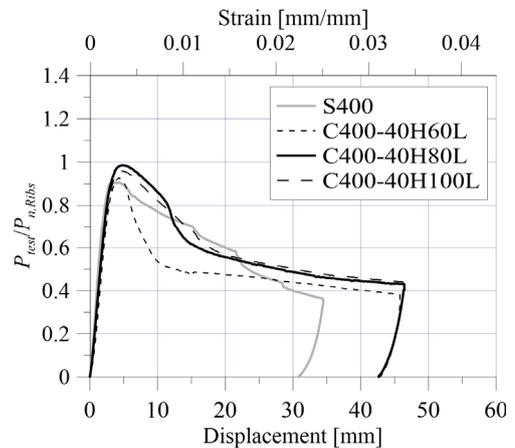


Fig. 9 Nominalized axial force-displacement curves

Table 5 Comparison between ultimate strength values from experiments

ID	$P_{n,s}$ (kN)	$P_{n,Ribs}$ (kN)	$P_{max}$ (kN)	$\frac{P_{max}}{P_{n,s}}$	$\frac{P_{max}}{P_{n,Ribs}}$	$\Delta_{max}$ (mm)	$\epsilon_{s,max}$
S400	7,051	7,051	6,385	0.900	0.900	4.035	0.00269
C400-40H60L		7,845	7,293	1.028	0.930	4.325	0.00288
C400-40H80L		8,095	8,002	1.128	0.989	4.980	0.00332
C400-40H100L		8,344	8,018	1.130	0.961	4.860	0.00324

Note:  $P_{n,s}$ : maximum nominal capacity;  $P_{n,Ribs}$ : maximum nominal capacity calculated by including ribs in cross-sectional area;  $P_{max}$ : maximum axial load;  $\Delta_{max}$ : column displacement at maximum axial load;  $\epsilon_{s,max}$ : column stain at maximum axial load

kN에 도달하였을 때 내력이 완만히 감소하는 형상으로 바뀌었다. C400-40H80L은 최대 내력 도달 후 변형률 0.0085인 지점(변위 11 mm)에서 첫 번째 국부좌굴이 관찰됨과 함께 내력이 급격히 감소하였다. 반면 C400-40H100L인 실험체에서는 C400-40H80L에 비하여 값이 13 kN 차이로 0.16%의 내력 차이로 유사한 값을 보였으나, 최대 내력이 발현된 이후에도 완만한 내력감소를 보였다. 모든 실험체에서 국부좌굴이 발생하여 더 이상 콘크리트를 구속하지 못하고 내력이 급감하였다. 이때 실험체 C400-40H60L은 변위 4.33 mm에서 최대 내력을 발휘하였고 C400-40H80L, C400-40H100L은 각각 4.98 mm, 4.86 mm로 비슷한 변위에서 최대강도를 나타내었다. 이는 실험체 S400 변위 3.22 mm와 다소 차이가 있다. 또한 낮은 값을 보인 실험체 C400-40H60L는  $P_{max}/P_{n,Ribs}$  값이 0.928로 나타났고 C400-40H80L에서는 0.989으로 가장 높은 값을 나타내어 단순한 강도와 비교하였을 때 리브 길이와 기둥의 내력이 비례하지 않는 것으로 나타났다. 또한 실험체의 변형률은 0.00269~0.00324로 콘크리트 공시체의 변형률인 0.002135와 비슷한 값을 보였으나 이는 Tao et al.(2005)과 Lai and Varma (2018) 등에서도 관찰되고 있다.

작용 하중에 대한 실험 결과 값은 Fig. 9에 나타내었다. y축의  $P_n$ 은 KDS 14 20 66에 기반하여 산출하였고, 각 실험체의 공칭 강도에 대하여  $P_{test}/P_{n,Ribs}$ 로 무차원화 하였다.  $P_{test}/P_{n,Ribs}$ 에 대한 값은 Table 5에 나타내었다. 리브가 있는 조립형 CFT 기둥 모두  $P_{test}/P_{n,Ribs}$  값이 0.928~0.959로 일반 각형 CFT 기둥 0.907보다 높았다. 톱니모양 리브의 단면적을  $P_{n,Ribs}$  산정에 포함한 것을 감안하였을 때, 단순히 강재량 때문이 아닌 리브의 성능이 있는 것을 확인할 수 있었다.

## 4. 압축성능 평가

### 4.1 축강성 분석

현재 KDS(MOLIT 2021)와 AISC(2016)에서는 식 (1)과 같이 축강성을 제안하고 있다.

$$EA = 0.8(E_s A_s + E_c A_c) \quad (1)$$

또한 Wang et al.(2017)은 식 (2)와 같이 축강성을 제안하고 있다. 각 기준 및 기존연구에서 제시한 축강성 비교를 Table 6에 나타내었다.

**Table 6** Comparison of column axial stiffness

ID	Column axial stiffness EA (N)		
	Test result	AISC, KDS	Wang et al. (2017)
S400	$4.298 \times 10^9$	$4.831 \times 10^9$	$5.935 \times 10^9$
C400-40H60L	$4.350 \times 10^9$	$5.118 \times 10^9$	$6.295 \times 10^9$
C400-40H80L	$4.366 \times 10^9$	$5.213 \times 10^9$	$6.416 \times 10^9$
C400-40H100L	$4.530 \times 10^9$	$5.309 \times 10^9$	$6.536 \times 10^9$

$$EA = E_s A_s + \kappa_c E_c A_c \quad (2)$$

$$\kappa_c = \left( \frac{D'}{t} \right)^{0.003} + \left( \frac{t f_y}{D' f_c} \right)^{2.3} \left[ 103.12 - 102.26 \left( \frac{D'}{t} \right)^{0.003} \right] \leq 1$$

### 4.2 콘크리트-강관 일체성 평가

리브의 전단연결재의 효과를 확인하기 위해서는 콘크리트와 강관의 일체성에 대한 평가가 필요하다. 이에 따라 콘크리트와 강관의 축 방향 변형률을 비교하였다. 이때 콘크리트 내부 변형률은 기둥 내부에 매입한 아크릴 바를 이용하였다. 아크릴 바에 부착한 스트레인 게이지의 위치는 기둥 하부에서부터 700 mm인 지점에서 측정하였다. 또한 강재의 축 방향 변형률도 기둥 하부에서부터 655 mm, 775 mm 지점에 스트레인 게이지를 부착하여 Fig. 10에 나타내었다.

4개의 실험체는 동일한 하중에서의 변형률을 비교하여 Fig. 10에 그래프로 나타내었다. 앞서 분석한 축강성의 차이가 0.05%에 불과했다. 따라서 변형률 차이가 두드러지는 임의의 지점을 선정하여, 동일하중에서 비교하고자 하였다. 임의의 지점은 4,000 kN로 하였다. S400은 4,000 kN일 때 강관의 변형률이 0.0010~0.0011 범위였다. 반면에 C400-40H60L, C400-40H80L, C400-40H100L인 실험체는 순서대로 각각 0.0005~0.0006, 0.0008~0.0009, 0.0010으로써 리브의 길이가 길어질수록 S400과 유사한 변형률을 나타내었다. 또한 강관이 콘크리트에 비하여 힘을 더 많이 가져갈수록 콘크리트의 변형률은 낮게 나타났으며, 리브의 길이가 짧을수록 강관과 콘크리트의 변형률이 비슷하게 나타났다. 이는 리브의 길이가 길어질수록 조립된 강관을 구성하는 강관들의 일체성이 증가하는 것으로 판단된다.

리브의 길이가 길어질수록 강관과 콘크리트의 변형률 차이가 크게 나타났다. 하지만 Johansson(2000)의 연구결과인 강재와 콘크리트에 동시에 압축력이 작용할 때 최대압축응력이 가장 크게 발현된다는 주장과 Fig. 8의 결과에 따라 추가적인 분석이 필요하다.

### 4.3 조립형 강관의 상호일체성 평가

조립형 CFT 기둥의 각 강관의 상호 일체성을 평가하기 위해 단성 영역에서 강관들의 응력-변형률 차이를 비교하였다.  $P_{max}/2$  지점에서 동서남북방향으로 LVDT를 설치하였으며 4방향의 변형률과 평균변형률을 비교하여 최소변형률과 최대변형률의 차이를 확인하고자 하였다. 이때 4방향은 각 강관의 변형률을 측정하기 위하여 측면에서 100 mm 떨어진 곳에 설치하였으며, 기둥의 높이 중앙에 300 mm 길이의 지점을 두어 측정하였다. 측정 위치에 따른 변형률의 크기와 축 방향 하중 사이의 관계를 Fig. 11에 나타내었다.

그래프의 St는 기둥의 평균 변형률을 LVDT를 이용하여 측정한 값이다. 각 위치에서 하중-변형률을 분석하면, S400은 3,200 kN에서 가장 작은 변형률이 0.0003로 측정되었고 큰 변형률이 0.0013으로 측정되었다. 기둥의 전체 변형률은

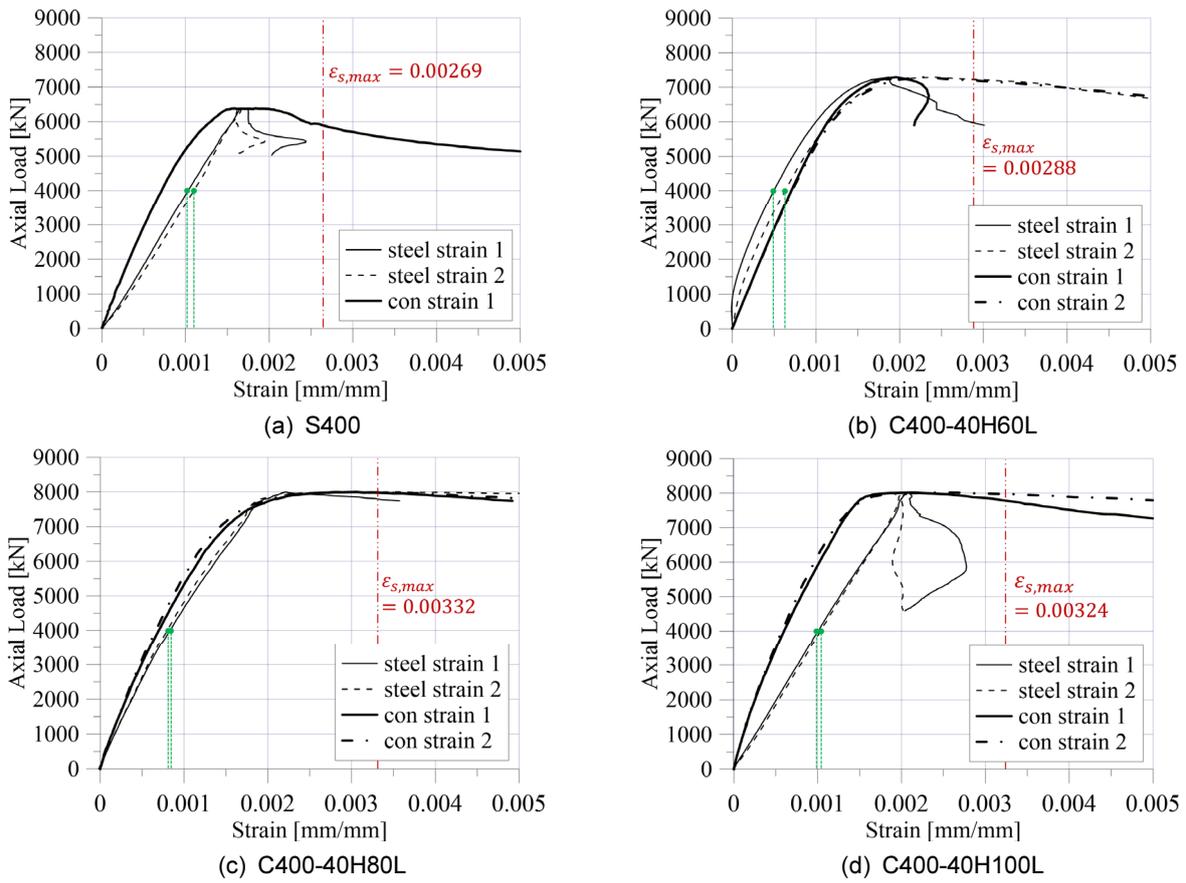


Fig. 10 Axial load-strain curves of concrete and steel plate

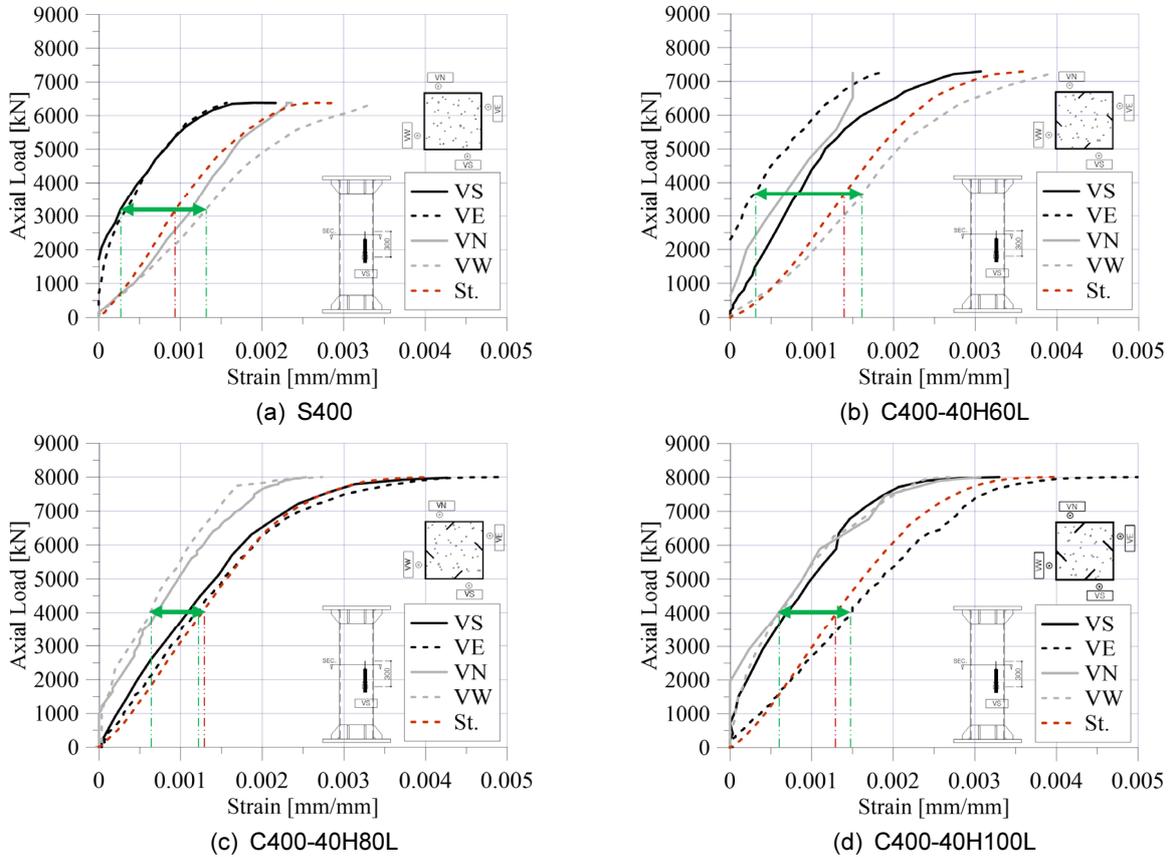


Fig. 11 Axial load-strain curves of column side

St.로 변형률이 0.0009로 나타났다.  $P_{max}/2$  지점에서 발생한 측정 위치별 변형률의 차이는 C400-40H60L이 0.0003에서 0.0016으로 가장 크게 나타났고, C400-40H80L이 0.0007에서 0.0012로 가장 작은 편차가 나타났다. C400-40H100L은 강관의 변형률 편차에서 작은 값을 보였다. 또한 리브의 길이가 80, 100 mm인 C형 실험군이 S400과 C400-40H60L에 비해 일체로 거동하였고, 이로 보았을 때 리브의 길이가 80 mm 이상인 경우 강관들이 하나의 강관이 0.0009로 C400-40H60L과 C400-40H80L 사이의 값으로 측정되었다. C400-40H60L은 각형 CFT 기둥에 비하여 기둥의 변형률 오차가 컸지만 C400-40H80L 실험체와 C400-40H100L 실험체는 S400과 유사하게 거동하는 것으로 나타났다. 다만 C400-40H80L에서 강관들의 변형률 차이가 가장 적게 나타났는데, 이는 C400-40H60L과 C400-40H100L은 국부좌굴이 산발적으로 발생하였으나, C400-40H80L 실험체의 모든 국부좌굴이 중앙부에서 발생하였기 때문으로 보인다.

## 5. 결 론

본 연구는 조립형 CFT 기둥의 중심 압축 성능을 평가하고 자 톱니형 리브의 길이를 변수로 하여 중심 압축 실험을 수행하였다. 이에 대한 결론은 아래와 같다.

- 1) 일반 각형 CFT 기둥에서는 국부좌굴의 폭이 기둥 폭과 동일하게 발생하였으나, 조립형 CFT에서는 국부좌굴의 폭과 크기가 각기 다르게 발생하였다. 이는 톱니형 리브가 콘크리트와 충분히 부착되는 것으로 판단된다.
- 2) 리브의 길이가 각각 60 mm, 80 mm, 100 mm인 실험체를 비교하였을 때 리브의 길이와 강도는 선형비례하지 않았다. 60 mm에서 80 mm로 리브의 길이가 길어졌을 때 강도가 8.88 % 증가하였지만, 80 mm과 100 mm는 강도 차이가 0.16 %에 그쳤다. 리브의 길이가 80 mm가 넘어가면 강도 증가폭이 감소하는 것으로 판단된다.
- 3) 일반 각형 CFT 기둥 S400과 톱니형 리브를 가진 조립형 CFT 기둥 C400-40H80L의 값을 비교한 결과 C400-40H80L 강도가 11 % 더 높았다. 이는 톱니형 리브가 전 단연결재로써 충분한 역할을 하여 콘크리트와 강관의 부착력이 증가한 것으로 판단된다.
- 4) 일반 각형 CFT 기둥과 조립형 CFT 기둥 모두, 축강성의 차이가 5 % 이내로 나타났으며, 실험체의 리브를 단면적에 산정하여 계산하였을 때 리브의 유무가 실험체의 강성에 큰 영향을 끼치지 않았다.
- 5) 리브의 길이가 길어질수록 조립형 강관들의 강성과 콘크리트의 강성 차이가 증가하였다. 리브의 길이가 조립형 강관들을 하나의 강관으로 거동하게 하는데 도움을 주어 강관의 강성이 증가하는 것으로 판단된다.
- 6) 강관의 조립된 강관들의 축 방향 변형률을 분석하였을 때 리브 길이 80 mm, 100 mm인 실험체는 S400보다 탄성 구간에서 변형률 차이가 작았다. 용접하지 않은 조립형 CFT 기둥에서도 일반 각형강관 기둥 이상으로 일

체화하여 거동하는 것으로 판단된다.

이러한 결과 조립형 CFT 기둥이 일반 각형 CFT 기둥에 비하여 동등 이상의 중심 압축 성능을 가진 것으로 확인된다. 추후 실험체 크기, 재료강도 변화 그리고 장주 제작 시 리브의 연마 및 조립의 견고성에 대한 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 2021년도 정부(과학기술정보통신부, 한국연구재단)의 연구비 지원(NRF-2020R1A4A1019074) 및 한우물중공업의 지원을 받아 수행된 연구임.

## References

- ACI Committee 318 (2019) *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary*. Farmington Hills, MI; American Concrete Institute (ACI).
- AISC (2016) *Specification for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 360-16)*. Chicago; American Institute of Steel Construction (AISC).
- Bradford, M. A., Loh, H. Y., and Uy, B. (2000) Local Buckling of Concrete-Filled Circular Steel Tubes. In: *Composite Construction in Steel and Concrete IV*. Banff (Alberta, Canada): ASCE, 563-572.
- Bradford, M. A., Loh, H. Y., and Uy, B. (2002) Slenderness Limits for Filled Circular Steel Tubes. *Journal of Constructional Steel Research* 58(2), 243-252.
- CEN (2004) *Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. London, UK; European Committee for Standardization (CEN), British Standards Institute (BSI).
- Ekmekyapar, T. (2016) *Experimental Performance of Concrete Filled Welded Steel Tube Columns*. *Journal of Constructional Steel Research* 117, 175-184.
- Huang, C. S., Yeh, Y.-K., Liu, G.-Y., and Hu, H.-T. (2002) Axial Load Behavior of Stiffened Concrete-Filled Steel Columns. *Journal of Structural Engineering* 128(9), 1222-1230.
- Johansson, M. (2002) The Efficiency of Passive Confinement in CFT Columns. *Steel and Composite Structures* 2(5), 379-396.
- KATS (2017a) *Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials (KS B 0801)*. Seoul, Korea: Korea Agency for Technology and Standards (KATS), Korea Standard Association (KSA). 1-14. (In Korean)
- KATS (2017b) *Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete (KS F 2405)*. Seoul, Korea: Korea Agency for Technology and Standards (KATS), Korea Standard Association (KSA). (In Korean)
- KATS (2018) *Method of Tensile Test for Metallic Materials (KS B 0802)*. Seoul, Korea: Korea Agency for Technology and

- Standards (KATS), Korea Standard Association (KSA). 1-7. (In Korean)
- KATS (2019) *Standard Test Method for Making and Curing Concrete Specimens (KS F 2403)*. Seoul, Korea: Korea Agency for Technology and Standards (KATS), Korea Standard Association (KSA). (In Korean)
- Khan, M., Uy, B., Tao, Z., and Mashiri, F. (2017) Behaviour and Design of Short High-Strength Steel Welded Box and Concrete-Filled Tube (CFT) Sections. *Engineering Structures* 147, 458-472.
- Kitada, T. (1998) Ultimate Strength and Ductility of State-of-the-Art Concrete Filled Steel Bridge Piers In Japan. *Engineering Structures* 20 (4-6), 347-354.
- Lai, Z., and Varma, A. H. (2018) High-Strength Rectangular CFT Members: Database, Modeling, and Design of Short Columns. *Journal of Structural Engineering* 144(5). 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002026.
- Lee, S. H., Kim, S. H., Bang, J. S., Won, Y. A., and Choi, S. M. (2011) Structural Characteristics of Welded Built-Up Square Concrete Filled Tubular Stub Columns Associated with Concrete Strength. *Procedia Engineering* 14, 1140-1148.
- Liang, W., Dong, J. F., Yuan, S. C., and Wang, Q. Y. (2017) Behavior of Self-Compacting Concrete-Filled Steel Tube Columns with Inclined Stiffener Ribs Under Axial Compression. *Strength of Materials* 49(1), 125-132.
- Ling, Y., Feng, W., Zhao, J., and Li, Y. (2014) Study on the Ultimate Bearing Capacity of Concrete Filled Steel Square Tubular Short Column with PBL. *Advanced Materials Research* 941, 770-775.
- Lu, Y. Q., and Kennedy, D. L. (1994) The Flexural Behaviour of Concrete-Filled Hollow Structural Sections. *Canadian Journal of Civil Engineering* 21(1), 111-130.
- MOLIT (2017) *Design of Steel Structures (LRFD) (KDS 14 31 10: 2017)*. Sejong, Korea: Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (In Korean)
- MOLIT (2021) *Design of Composite Steel and Concrete Structures (KDS 14 20 66: 2021)*. Sejong, Korea: Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (In Korean)
- Nakamura, H., and Higai, T. (1999) Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete. *JCI-C51E 2*, 259-272.
- Petrus, C., Hamid, H. A., Ibrahim, A., and Parke, G. (2010) Experimental Behaviour of Concrete Filled Thin Walled Steel Tubes with Tab Stiffeners. *Journal of Constructional Steel Research* 66(7), 915-922.
- Qiao, Q., Zhang, X., and Hu, J. (2015) A Study on Shear Connectors of Square Concrete Filled Steel Tubes. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*, 4(3), 254-258.
- Tao, Z., Han, L. H., and Wang, Z. B. (2005) Experimental Behaviour of Stiffened Concrete-Filled Thin-Walled Hollow Steel Structural (HSS) Stub Columns. *Journal of Constructional Steel Research* 61(7), 962-983.
- Tao, Z., Han, L. H., and Wang, Z. B. (2008) Strength and Ductility of Stiffened Thin-Walled Hollow Steel Structural Stub Columns Filled with Concrete. *Thin-Walled Structures* 46(10), 1113-1128.
- Uy, B., and Das, S. (1997) Wet Concrete Loading of Thin-Walled Steel Box Columns during the Construction of a Tall Building. *Journal of Constructional Steel Research* 42(2), 95-119.
- Uy, B., and Das, S. (1999) Bracing of Thin Walled Steel Box Columns during Pumping of Wet Concrete in Tall Buildings. *Thin-Walled Structure* 33(2), 127-154.
- Wang, Z. B., Tao, Z., Han, L. H., Uy, B., Lam, D., and Kang, W. H. (2017) Strength, Stiffness and Ductility of Concrete-Filled Steel Columns under Axial Compression. *Engineering Structures* 135, 209-221.
- Yang, Y. L., Zhang, J. S., and Wang, Y. Y. (2013) Experimental Research on Static Behavior of Stiffened Square Concrete-Filled Steel Tubular Columns Subjected to Axial Load. *Applied Mechanics and Materials* 275, 1049-1057.
- Zhu, A., Zhang, X., Zhu, H., Zhu, J., and Lu, Y. (2017) Experimental Study of Concrete Filled Cold-Formed Steel Tubular Stub Columns. *Journal of Constructional Steel Research* 134, 17-27.

**요약** 이 연구에서는 내부에 톱니모양리브가 있는 조립형 CFT의 중심 압축 성능에 관하여 연구를 수행하였다. 조립형 CFT 기둥과 일반 각형단면 CFT 기둥의 실험결과와 AISC, KDS와 비교하여 기준식 사용가능 여부를 확인하였다. 또한 내부 톱니모양 리브의 영향과 용접하지 않은 조립형 CFT 기둥의 각 강판의 일체화 거동에 대하여 분석하였다. 용접하지 않은 조립형 CFT 기둥은 기존 각형 CFT 기둥보다 큰 극한압축강도를 나타냈으며, 강성에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 또한 유효물힘깊이를 초과하였을 때 더 이상 극한압축강도 증가가 없으며, 용접한 각형CFT와 동등 이상의 일체성거동을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 최종적으로 용접하지 않은 조립형 CFT 기둥도 압축강도를 산정할 때 일반 각형 CFT 기둥의 설계식이 가능함을 확인하였다.

**핵심용어** : CFT 기둥, 축력, 리브, 스티드, 전단연결재