

# 일축 압축력을 받는 콘크리트충전 각형강관 단주의 구조적 거동

유영찬  
안동대학교 건축공학과

## Axial Compression of Stub Columns for Concrete-filled Square Steel Tubes

Yeong-Chan Yoo

Department of Architectural Engineering, Andong National University

**요약** 각형강관 기둥에 콘크리트를 충전하여 사용하는 콘크리트충전 강관구조가 구조부재로 사용되면 기둥 부재의 내력과 변형 능력이 증가되어 높은 효율성을 가진 구조물 구현이 가능해진다. 콘크리트충전 강관구조에 대한 국내의 설계 기준은 대한건축학회에서 2005년에 제정한 후, 2009년과 2016년에 각각 개정되었다. 연구 목적은 콘크리트충전 각형 강관 단주를 대상으로 일축 압축실험을 실시하여 압축내력 및 변형능력에 주는 영향을 파악하고, 국내의 건축구조기준의 기준식을 검증하여 차후 수정 및 보완에 필요한 자료를 제공하는데 있다. 실험에서 강관은 냉간가공으로 제작된 각형강관을 사용하였고, 시험체는 강관의 폭두께비를 변수로 총 26개를 제작하여 중심 압축실험을 실시하였다. 실험결과 콘크리트충전 각형강관 단주의 압축내력과 변위관계 및 파괴모드를 얻었고, 실험결과를 분석하여 콘크리트의 충전효과와 폭두께비의 영향을 파악하였다. 충전된 콘크리트의 압축내력은 일축응력 상태보다 9%정도 증가하였는데, 이것은 차후 건축구조기준에 반영할 필요가 있다. 실험결과를 건축구조기준과 비교한 결과, 냉간가공된 각형강관의 경우 건축구조기준의 콤팩트단면 한계폭두께비 2.26은 다소 과대 평가하고 있기 때문에 수정이 필요하며, 보수적으로 보완한 계수 1.35로 제한하여 보다 더 안정적인 설계식을 제안하였다.

**Abstract** Concrete-filled steel tubular columns can improve the strength and deformation capacity of structures, thereby enabling the development of efficient structures. The Korean design standard (KDS41) regarding concrete-filled steel tubular structures, established by the architectural institute of Korea in 2005, was revised in 2009 and 2016. The objective was to understand the compressive strengths and deformation capacity of stub columns for concrete-filled square steel tubes under uniaxial compression and validate the KDS41's standard code for necessary corrections. Experiments were conducted on 26 specimens with parameters, such as the width-thickness ratio of cold-formed square tubes. The following values of the stub columns for concrete-filled square steel tubes were obtained: compressive strengths, relationship between the axial load and axial displacement, and failure modes. An analysis of these results enabled an understanding of the concrete-filled effect and the influence of the wide-thickness ratio. The compressive strengths of filled concrete saw a 9% increase compared to a state of uniaxial stress, which must be noted in a future edition of KDS41. After benchmarking the results regarding square steel tubes generated by cold forming to the guidelines provided by the KDS41, the KDS41's value of 2.26 for the limiting width-to-thickness ratio for the compact section was found to be inflated. With a safety concern, this paper proposes a more conservative value of 1.35.

**Keywords** : Concrete-Filled Steel Tubular Columns, KDS41, Width-To-Thickness Ratio, Uniaxial Compression, Compressive Strengths, Concrete-Filled Effect, More Conservative Value

이 논문은 안동대학교 기본연구지원사업에 의하여 연구되었음.

\*Corresponding Author : Yeong-Chan Yoo(Andong National Univ.)

email: ycwoo@anu.ac.kr

Received December 17, 2020

Revised January 14, 2021

Accepted February 5, 2021

Published February 28, 2021

## 1. 서론

건축물의 고층화와 더불어 내력과 변형 능력이 보다 더 우수한 구조 부재가 요구되고 있다. 각형강관 기둥 부재에 콘크리트를 충전하면 기둥 부재의 내력과 변형 능력이 증가되어 높은 효율성을 가진 구조물 구현이 가능해진다.

콘크리트충전 강관 구조에 대한 국내의 연구는 1990년대 초반부터 시작하여 현재까지 진행되고 있다. 최근 20여 년 간의 연구 결과로 국내의 콘크리트충전 강관구조의 설계기준이 제정되었는데, 2003년 한국강구조학회는 강구조 설계기준으로 허용응력설계법을 제정하였고, 대한건축학회는 2005년에 건축구조기준으로 강구조의 한계상태설계법을 제정한 후 2009년[1]과 2016년에 개정[2]하여 건설기준 코드체계 표준화에 의해 현행의 건축구조기준(KDS 41)에 이르고 있다.

그런데, 국내의 합성기둥의 허용응력설계기준은 미국의 허용응력설계법(AISC/ASD)을 기본으로 하고 부분적으로 유럽기준(Eurocode 4)와 일본의 SRC기준(AIJ/ASD)을 적용하여 개발되었으며, 합성기둥에 대한 한계상태설계기준은 극히 일부를 제외하고 미국의 하중저항계수설계법(AISC/LRFD)[3]을 거의 대부분 적용하여 개발되고 개정되었다.

따라서, 외국의 설계법들을 근간으로 제정[4]되고 개정된 국내의 합성기둥에 대한 기준식들은 국내의 상황에서 검증차원의 타당성 연구가 요구되고 있다.

본 연구는 국내에서 냉간가공으로 제작된 기성 각형강관을 사용한 콘크리트충전 각형강관 단주를 대상으로 축방향 일축 압축실험을 실시하여 좌굴내력과 변형특성을 파악한 후, 국내의 건축구조기준의 한계상태 기준식을 검증해 보고 향후 국내의 콘크리트충전 강관구조 기준의 수정 및 보완에 이용할 기초 자료를 제시하는데 그 목적이 있다.

## 2. 재료 시험

### 2.1 강재 인장강도 시험

실험에 사용된 국내의 냉간가공 기성품인 각형강관 소재에 대한 역학적 특성을 파악하기 위하여 KS B 0801기준에 따라 강재의 인장강도 시험을 실시하였다.

강재의 재질은 각형강관 SRT 275이며, 시험편은 각형강관의 용접면을 제외한 3면의 평판부에서 각각 1개씩

3개의 인장 시험편을 절취한다. 변형도 측정은 각 시험편의 양면에 부착한 2개의 와이어 스트레인 게이지(W.S.G.)로 측정하며 이들의 평균값을 적용하여 응력도-변형도 관계를 구한다. 3개 시험편으로부터 얻은 시험결과를 평균하여 각형강관 강재의 응력도-변형도 관계를 각각 구하고 각형강관 □-75×75에 대한 응력도-변형도 곡선을 Fig. 1에 나타내었으며, 항복강도( $\sigma_y$ ), 인장강도( $\sigma_u$ )와 항복비( $\sigma_y/\sigma_u$ )를 Table 1에 나타내었다.

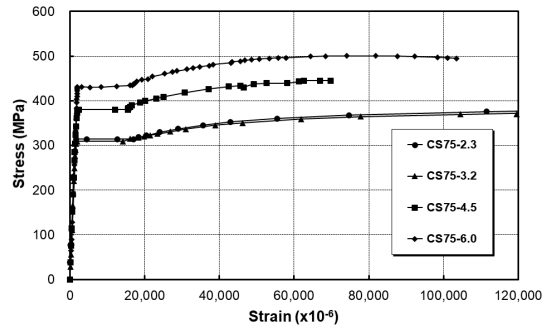


Fig. 1. Stress-strain curves for steel coupons

Table 1. Result of the tensile tests for steel tubes

Coupons	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)	$\sigma_y/\sigma_u$	$\epsilon_y$ ( $\times 10^{-6}$ )	$\epsilon_{st}$ (%)	$E_{st}$ (MPa)
CS 75-2.3	314	380	0.83	1,524	1.70	562
CS 75-3.2	309	375	0.82	1,500	1.42	537
CS 75-4.5	381	427	0.86	1,848	1.22	1,106
CS 75-6.0	431	494	0.87	2,092	1.68	701
CS100-2.3	371	430	0.86	1,800	2.40	868
CS100-3.2	350	398	0.88	1,700	2.14	1,873
CS100-4.5	355	441	0.80	1,724	0.83	1,305
CS100-6.0	489	534	0.91	2,371	1.01	1,047
CS125-3.2	352	383	0.92	1,710	3.97	438
CS125-4.5	337	370	0.91	1,638	3.11	545
CS125-6.0	419	465	0.90	2,033	0.69	666
CS150-4.5	327	440	0.74	1,586	-	790
CS150-6.0	422	446	0.95	2,048	1.15	2,745

CS100-2.3 (E=210GPa, Steel Grade: SRT275)

| | Thickness of the steel tubes

| Width of the steel tubes

| Coupon of Steel

$\sigma_y$ : Yield stress,  $\sigma_u$ : Tensile strength,

$\sigma_y/\sigma_u$ : Yielding ratio,  $\epsilon_y$ : Yield strain

$\epsilon_{st}$ : Strain of strain hardening,

$E_{st}$ : Elastic modulus of strain hardening

냉간가공된 각형강관의 강제 인장강도 시험결과, Fig. 1의 강제 응력도-변형도 곡선에서 보는 바와 같이 각 시험편의 항복점이 비교적 명확히 측정되었으며, CS150-4.5 시험편의 경우 항복점이 명확하게 나타나지 않아 0.2%의 영구변형도를 가지는 점(0.2% off-set 방법)으로 항복강

도를 결정하였다.

강관의 항복강도는 309MPa~489MPa로 나타났으며, 항복비( $\sigma_y/\sigma_w$ )는 0.74부터 95까지로 비교적 높게 나타났다. 이는 SRT275의 공칭 항복강도인 275MPa보다 높은 강도인데, 제작 과정에서 용접과 냉간가공시 소성변형 및 잔류응력의 영향으로 생각된다. 강구조설계기준이 기존의 허용응력도 설계형에서 한계상태 설계형으로 옮겨 가고 있는 추세를 고려해 볼 때, 냉간가공 각형강관의 경우 제작 과정에서 용접과 냉간가공으로 인해 소성변형 및 잔류응력의 영향에 기인하여 항복강도 및 항복비가 높아지는 문제는 차후 개선해야 할 사항으로 지적할 수 있다.

### 2.2 콘크리트 압축강도 시험

시험체의 충전에 사용된 콘크리트는 설계기준강도 21MPa로 계획하고, 굵은 골재 최대치수는 25mm와 19mm, 슬럼프는 15cm로 배합된 기성 레미콘을 사용하였으며, 콘크리트 압축강도 시험용 공시체는 15개를 제작하였다.

레미콘에 적용한 콘크리트 배합비는 Table 2에 나타내었고, 콘크리트 공시체에 대한 압축강도 시험결과는 총 15개의 공시체에 대하여 측정된 시험결과를 평균하여 Table 3과 Fig. 2에 각각 나타내었다.

콘크리트 공시체의 압축강도 시험결과, 설계기준강도 21MPa보다 다소 낮은 17MPa로 나타났으며, 콘크리트의 탄성계수( $E_c$ )는 14GPa로 나타났다.

Table 2. Designed mix ratio of concrete

Compressive Strength (MPa)	Max dimension of coarse aggregate (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	S/A (%)
21	25	15	58.2	47.5
Unit mass (kg/m <sup>3</sup> )				
Water	Cement	Sand	Gravel	Admixture
147	325	893	957	2.76

W/C : Water-cement ratio, S/A : Fine aggregate rate

Table 3. Result of the compressive tests for concrete

Age (days)	$f'_c$ (MPa)	$E_c$ (GPa)	Slump (cm)
28	17	14	15

$f'_c$ : Compressive strength  
 $E_c$ : Secant modulus of elasticity

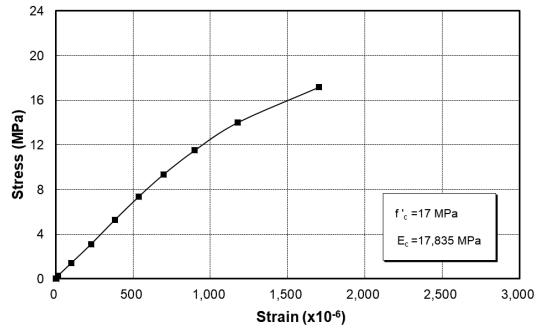


Fig. 2. Stress-strain curve of concrete cylinders

## 3. 단주 실험

### 3.1 시험체 계획

단주의 압축 실험은 냉간가공으로 기성 제작된 각형강관의 용접과 소성가공으로 인한 잔류응력의 영향을 알아보고, 일축 압축력에 대한 구조적인 거동과 폭두께비의 영향을 파악하기 위해서 실시한다.

콘크리트충전 강관 단주의 시험체 길이는 압축 실험시 부재 좌굴이 발생하지 않고 국부좌굴에 의해서만 파괴되도록 각형강관 단면폭의 2.5배로 계획한다. 각형강관의 폭은 75, 100, 125, 150mm각을 선정하여 강관의 폭두께비를 변수로 콘크리트의 압축강도 17MPa를 충전 및 비충전 시험체로 구분하여 각각 2개씩 총 26개의 시험체를 제작한다.

기성제품 강관은 정사각형 강관을 사용하며 폭두께비는 기성제품을 대상으로 일면의 폭이 75mm 강관 4종류, 100mm 강관 4종류, 125mm 강관 3종류, 150mm 강관 2종류로 총 13종류의 각형강관으로 계획하였고, 시험체의 개형 및 치수는 다음의 Fig. 3과 Table 4에 각각 나타내었다.

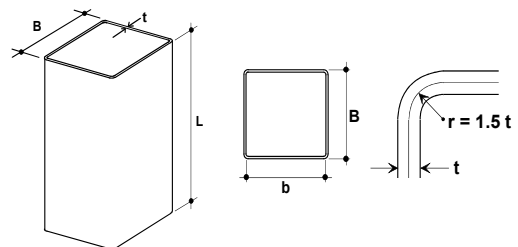


Fig. 3. Shape of specimen

Table 4. Dimensions of specimens

Specimens	B	t	b	b/t	L
SH 75-2.3	75	2.3	65.8	28.6	187.5
SH 75-3.2	75	3.2	62.2	19.4	187.5
SH 75-4.5	75	4.5	57.0	12.7	187.5
SH 75-6.0	75	6.0	51.0	8.5	187.5
SF 75-2.3	75	2.3	65.8	28.6	187.5
SF 75-3.2	75	3.2	62.2	19.4	187.5
SF 75-4.5	75	4.5	57.0	12.7	187.5
SF 75-6.0	75	6.0	51.0	8.5	187.5
SH100-2.3	100	2.3	90.8	39.5	250.0
SH100-3.2	100	3.2	87.2	27.3	250.0
SH100-4.5	100	4.5	82.0	18.2	250.0
SH100-6.0	100	6.0	76.0	12.7	250.0
SF100-2.3	100	2.3	90.8	39.5	250.0
SF100-3.2	100	3.2	87.2	27.3	250.0
SF100-4.5	100	4.5	82.0	18.2	250.0
SF100-6.0	100	6.0	76.0	12.7	250.0
SH125-3.2	125	3.2	112.2	35.1	312.5
SH125-4.5	125	4.5	107.0	23.8	312.5
SH125-6.0	125	6.0	101.0	16.8	312.5
SF125-3.2	125	3.2	112.2	35.1	312.5
SF125-4.5	125	4.5	107.0	23.8	312.5
SF125-6.0	125	6.0	101.0	16.8	312.5
SH150-4.5	150	4.5	132.0	29.3	375.0
SH150-6.0	150	6.0	126.0	21.0	375.0
SF150-4.5	150	4.5	132.0	29.3	375.0
SF150-6.0	150	6.0	126.0	21.0	375.0

SS100-2.3 (Steel Grade: SRT275), (Unit: mm)  
 || Thickness of the steel tubes  
 || Width of the steel tubes  
 — Filled or not (S: Hollow, F: Filled)  
 — Stub Column

3.2 가력 및 측정방법

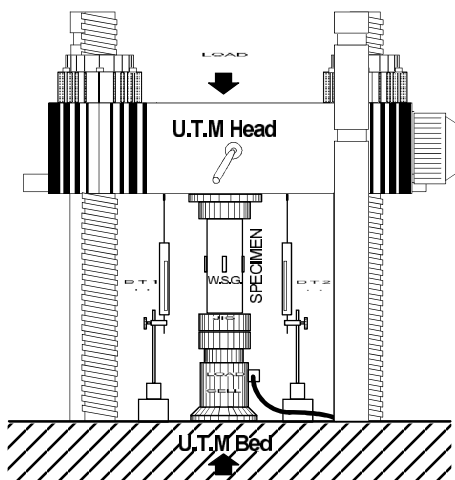


Fig. 4. Load and measurement

압축 실험의 가력 장치는 유압으로 작동되는 가력 시험기를 이용하여 Fig. 4와 같이 축방향으로 일축 압축력

을 제하여 실험을 수행한다.

또한, 편심하중의 영향을 최소화하고 등분포하중 제한이 될 수 있도록 구좌를 설치한다. 변형도는 강관의 4면 중앙부에 W.S.G.를 부착하여 측정하고, 축변위는 시험기의 가력 헤드에 수직방향으로 2개의 변위계(D.T.)를 좌우 대칭으로 설치하여 측정한다.

3.3 실험 결과

3.3.1 축력과 축변위 관계

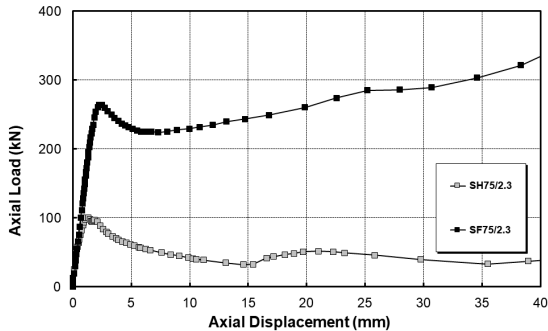
Table 5. Result of the experiment

Specimens	b/t	P <sub>u</sub> (kN)	sP <sub>y</sub> (kN)	cP <sub>u</sub> (kN)	eP <sub>y</sub> (kN)	P <sub>u</sub> /sP <sub>y</sub>	P <sub>u</sub> /eP <sub>y</sub>
SH 75-2.3	28.6	100	206	-	-	0.49	-
SH 75-3.2	19.4	232	276	-	-	0.84	-
SH 75-4.5	12.7	499	464	-	-	1.08	-
SH 75-6.0	8.5	875	737	-	-	1.19	-
SF 75-2.3	28.6	264	206	86	292	1.28	0.91
SF 75-3.2	19.4	360	276	80	356	1.30	1.01
SF 75-4.5	12.7	591	464	75	540	1.27	1.10
SF 75-6.0	8.5	999	737	68	805	1.36	1.24
SH100-2.3	39.5	175	332	-	-	0.53	-
SH100-3.2	27.3	355	426	-	-	0.83	-
SH100-4.5	18.3	612	574	-	-	1.06	-
SH100-6.0	12.7	1,164	1,059	-	-	1.10	-
SF100-2.3	39.5	447	332	158	490	1.35	0.91
SF100-3.2	27.3	547	426	152	578	1.29	0.95
SF100-4.5	18.2	751	574	144	718	1.31	1.05
SF100-6.0	12.7	1,321	1,059	134	1,193	1.25	1.11
SH125-3.2	35.1	460	540	-	-	0.85	-
SH125-4.5	23.8	810	714	-	-	1.13	-
SH125-6.0	16.8	1,392	1,160	-	-	1.11	-
SF125-3.2	35.1	691	540	244	784	1.28	0.88
SF125-4.5	23.8	1,050	714	233	951	1.47	1.10
SF125-6.0	16.8	1,569	1,160	221	1,381	1.35	1.14
SH150-4.5	29.3	908	856	-	-	1.06	-
SH150-6.0	21.0	1,380	1,419	-	-	0.97	-
SF150-4.5	29.3	1,332	856	345	1,201	1.69	1.21
SF150-6.0	21.0	1,801	1,419	330	1,749	1.31	1.06

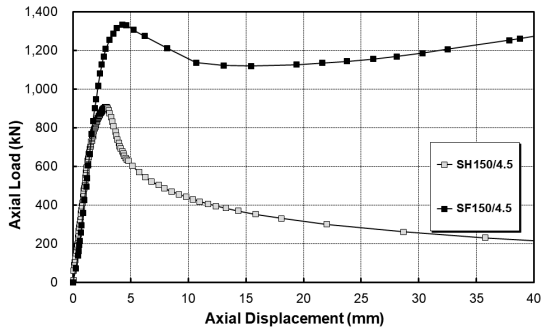
b/t : Width-thickness ratio  
 P<sub>u</sub> : Ultimate load  
 sP<sub>y</sub> : A<sub>s</sub>σ<sub>y</sub>  
 cP<sub>u</sub> : A<sub>c</sub>f<sub>c</sub>'  
 eP<sub>y</sub> : sP<sub>y</sub> + cP<sub>u</sub>  
 A<sub>s</sub> : Area of the steel tubes  
 A<sub>c</sub> : Area of the concrete  
 σ<sub>y</sub> : Yield stress of the steel tubes  
 f<sub>c</sub>' : Compressive strength of the concrete

콘크리트충전 강관 단주의 총 26개 시험체를 대상으로 실시한 일축 압축 실험에 대한 실험 결과를 정리하여 Table 5에 나타내었고, 그 중 2개 시험체의 축하중과 축변위 관계를 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5의 하중과 축변위 관계에서 알 수 있듯이, 콘크리트충전에 기인하여 최대내력의 현저한 증가와 최대내력 이후 내력의 감소 현상도 완만하게 감소하는 것을 알 수 있다. 변형특성으로 콘크리트충전 강관은 비충전 강관 시험체보다 변형 능력이 현저하게 증가된 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 내력의 상승 효과와 변형 능력의 증가 효과는 폭두께비가 클수록 크게 나타나고 있는 것을 알 수 있다.



(a) Square steel tubes □-75×75×3.2



(b) Square steel tubes □-150×150×4.5

Fig. 5. Axial load - axial displacement curves

이것은 콘크리트충전 강관에 압축력이 작용하는 경우, 압축 변형시 강관과 콘크리트의 상호 보완 작용이 발휘되어 구조 성능이 개선된 결과로 볼 수 있다. 즉, 강관은 콘크리트를 압축 방향에 대한 수직 방향으로 압축 변형을 구속하여 콘크리트는 3축응력 상태가 되어 콘크리트의 압축 내력이 증가하게 되고, 콘크리트는 강관을 구속하는 작용으로 국부 좌굴을 방지하여 강관의 내력과 변형 능력을 향상시킨 것을 의미한다.

### 3.3.2 파괴 형상

일축 압축 실험시 비충전 및 충전 강관 시험체 모두

가력 초기에는 선형탄성적 거동을 보이다가 압축력이 증가함에 따라 강관의 국부좌굴이 발생하는 것이 관찰되었으며, 강관의 국부좌굴에 의하여 최대 내력이 결정되었다. 비충전 시험체와 충전 시험체의 국부 좌굴 형상을 Fig. 6와 7에 각각 나타내었다.



Fig. 6. Local buckling of a hollow steel tube



Fig. 7. Local buckling of a concrete-filled steel tube

Fig. 6와 7에서 보는 바와 같이, 비충전 강관과 충전 강관의 국부좌굴의 형상은 콘크리트충전 효과에 의해 서로 상이하게 나타났다. 비충전 강관의 경우는 사각단면에서 2쌍의 대면이 요철형태로 강관의 내측과 외측 방향으로 좌굴 파형이 형성된 반면, 충전 강관의 경우는 콘크리트 충전으로 인해 강관 내측 방향의 국부좌굴은 구속되어 2쌍의 대면이 모두 강관 외측 방향으로 좌굴 파형이 형성되어 원형에 가까운 좌굴 파형이 형성되었다.

이러한 비충전 강관과 충전 강관의 좌굴 파형의 상이한 형상으로 인하여, 충전 콘크리트의 추가 내력 이외에도 충전 강관의 최대내력이 비충전 강관의 최대내력보다 더 높게 나타난 것으로 볼 수 있다.

## 4. 분석 및 고찰

### 4.1 콘크리트 충전효과

콘크리트충전 각형강관 구조에서 강관의 경우는 비충전 강관과 충전 강관의 상이한 좌굴파형과 구속 조건에 의하여 내력이 상승하고, 충전된 콘크리트의 경우는 강관의 구속에 의한 3축 응력 효과로 내력이 상승하게 되는데, 강관과 콘크리트 각각의 내력 상승 효과를 정량적으로 파악하는 것은 단면의 형태, 좌굴파형, 프와송 비 등 여러 가지 요인들을 고려해야 할 것으로 생각된다.

Table 6. Concrete-filled effects

Specimens	b/t	$P_u$ (kN)	$hP_u$ (kN)	$cP_u$ (kN)	$sP_u$ (kN)	$P_u/sP_u$
SF 75-2.3	28.6	264	100	86	186	1.42
SF 75-3.2	19.4	360	232	80	312	1.15
SF 75-4.5	12.7	591	499	75	574	1.03
SF 75-6.0	8.5	999	875	68	943	1.06
SF100-2.3	39.5	447	175	158	333	1.34
SF100-3.2	27.3	547	355	152	507	1.08
SF100-4.5	18.2	751	612	144	756	0.99
SF100-6.0	12.7	1,321	1,164	134	1,298	1.02
SF125-3.2	35.1	691	460	244	704	0.98
SF125-4.5	23.8	1,050	810	233	1,043	1.01
SF125-6.0	16.8	1,569	1,392	221	1,613	0.97
SF150-4.5	29.3	1,332	908	345	1,253	1.06
SF150-6.0	21.0	1,801	1,380	330	1,710	1.05

b/t : Width-thickness ratio  
 $P_u$  : Ultimate load of the filled steel tubes  
 $hP_u$  : Ultimate load of the hollow steel tubes  
 $cP_u$  :  $A_c \cdot f_c'$   
 $sP_u$  :  $hP_u + cP_u$   
 $f_c'$  : Compressive strength of the concrete

본 연구에서는 콘크리트 충전효과를 파악하기 위하여 실험에서 구한 비충전 강관의 최대내력과 충전 콘크리트만의 최대 압축내력을 단순 누가한 후, 충전 강관의 최대내력을 무차원화하여 폭두께비 별로 Table 6과 Fig. 8에 각각 나타내었다.

Table 6과 Fig. 8에서 알 수 있듯이 각형강관의 콘크리트 충전효과는 폭두께비에 대하여 전반적으로 크게 상승하지는 않았지만 폭두께비가 증가할수록 상승하는 것으로 나타났고, 콘크리트 충전에 기인하여 평균적으로 9%정도의 내력 상승 효과가 있는 것으로 나타났다. 이러한 충전효과는 보다 더 경제적인 콘크리트충전 강관구조 설계를 위하여 건축구조기준에 반영할 필요가 있는 것으로 생각된다.

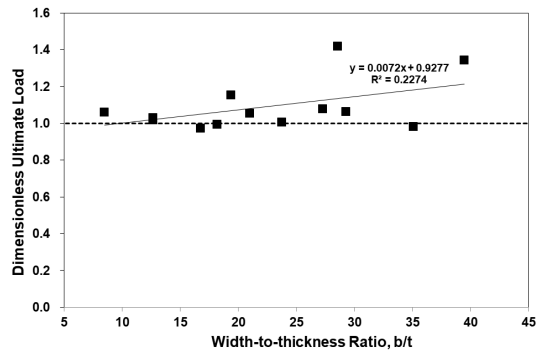


Fig. 8. Comparison of ultimate loads for stub columns

### 4.2 건축구조기준(KDS 41 31 00)

2016년 대한건축학회에서 개정된 현행의 국내 건축구조기준 한계상태설계법(KDS 41 31 00/LSD)[2]에서 충전형 합성기둥의 폭두께비 제한값은 Table 7에서 제시하고 있는 강관의 폭두께비 제한값보다 더 큰 값을 사용하도록 규정하고 있다.

Table 7. Limiting Width-to-Thickness Ratios for Compression Steel Elements in Filled Composite Members Subject to Axial Compression[3]

Elements	Width-to-Thickness Ratios	$\lambda_p$ Compact/Noncompact	$\lambda_r$ Noncompact/Slender	$\lambda_{max}$ Maximum Permitted
Rectangular Sections	$b/t$	$2.26 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$3.00 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.00 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$
Round Sections	$D/t$	$\frac{0.15E}{F_y}$	$\frac{0.19E}{F_y}$	$\frac{0.31E}{F_y}$

b : Clear width of the rectangular steel tubes  
 D : Diameter of the round steel tubes  
 t : Thickness of the steel tubes  
 E : Elastic modulus of the steel tubes  
 $F_y$  : Specified yield stress of the steel tubes

서론에서도 언급한 바와 같이, 국내의 합성기둥에 대한 한계상태설계기준의 근간은 미국의 하중저항계수설계법(AISC/LRFD)[3]에 두고 있어 미국의 기준과 별로 다를 바가 실정이다. 콘크리트충전 강관구조에 있어서 콤팩트 단면의 폭두께비에 대한 기준은 각형강관의 경우 원형강관과는 달리 콘크리트 충전효과에 기인한 내력 및 변형 능력의 증가 효과를 고려하지 않고 각각의 내력을 단순 누가하여 다음의 Eq. (1)과 같이 압축강도[5]를 평가하고 있다.

$$P_p = F_y A_s + 0.85 f_{ck} A_c \quad (1)$$

Where,  $F_y$  denotes specified minimum yield stress,  $A_s$  denotes area of the steel section,  $f_{ck}$  denotes specified compressive strength,  $A_c$  denotes sarea of concrete

### 4.3 건축구조기준과 실험결과 비교

콘크리트충전 각형강관 단주의 폭두께비에 따른 압축 내력의 변화를 알아보기 위해서 실험에서 구한 단주 시험체의 최대 압축 내력을 콘크리트충전 각형강관의 소성 내력인 Eq. (1)로 무차원화하여 폭두께비 별로 Table 8 과 Fig. 9에 각각 나타내었으며, Fig. 8에는 충전 및 비충전 시험체의 압축 내력에 대한 직선회귀 결과를 실선 및 점선으로 각각 표시하였다.

Fig. 9에서 보는 바와 같이, 충전 및 비충전 시험체 모두 폭두께비가 증가함에 따라 압축 내력이 감소하고 있고, 폭두께가 증가함에 따라 동일한 폭두께비의 시험체라 할지라도 무차원화 내력이 충전 시험체의 경우가 상승폭이 증가하는 것을 알 수 있다.

비충전 시험체인 SH100-3.2의 경우 무차원화 내력이 0.84로 이미 강관의 국부 좌굴이 발생한 반면, 충전 시험체인 SF100-3.2의 경우 무차원화 내력이 0.99로 강관의 국부 좌굴 발생의 경계치에 폭두께비가 위치하고 있는 것으로 볼 수 있으며, 이것은 콘크리트 충전에 의하여 각형강관의 구속되어 국부 좌굴 발생이 지연된 결과로 해석할 수 있다.

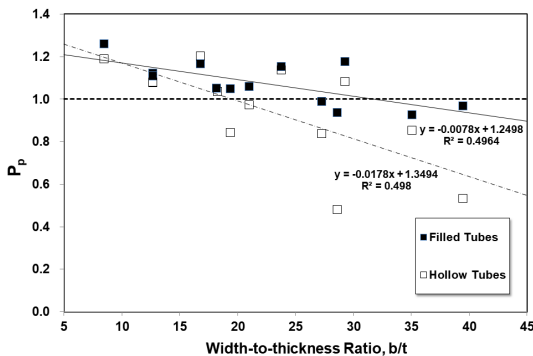


Fig. 9. Comparisons of KDS 41 31 00 codes in normalization

강재 인장강도 시험결과 강관의 항복강도가 강관별로 다소 편차를 보이고 있어 콘크리트충전 각형강관 시험체의 건축구조기준 폭두께비를 단일한 수치로 고정할 수는

없지만, 강관의 평균 항복강도 374MPa를  $F_y$ 로 적용한 후 콤팩트단면의 한계폭두께비를 53.55로 산정하고, 폭두께비의 제곱에 반비례하는 평판의 좌굴 응력식을 고려해 볼 때 안전측에서 보수적으로 회귀한 직선회귀와 비교해 고찰해 보았다.

Table 8. Result of the experiment

Specimens	b/t	$P_u$ (kN)	$P_p$ (kN)	$P_u/eP_p$
SH 75-2.3	28.6	100	209	0.48
SH 75-3.2	19.4	232	276	0.84
SH 75-4.5	12.7	499	464	1.08
SH 75-6.0	8.5	875	736	1.19
SF 75-2.3	28.6	264	282	0.94
SF 75-3.2	19.4	360	344	1.05
SF 75-4.5	12.7	591	527	1.12
SF 75-6.0	8.5	999	794	1.26
SH100-2.3	39.5	175	328	0.53
SH100-3.2	27.3	355	425	0.84
SH100-4.5	18.3	612	592	1.03
SH100-6.0	12.7	1,164	1,077	1.08
SF100-2.3	39.5	447	463	0.97
SF100-3.2	27.3	547	554	0.99
SF100-4.5	18.2	751	714	1.05
SF100-6.0	12.7	1,321	1,191	1.11
SH125-3.2	35.1	460	540	0.85
SH125-4.5	23.8	810	713	1.14
SH125-6.0	16.8	1,392	1,158	1.20
SF125-3.2	35.1	691	747	0.93
SF125-4.5	23.8	1,050	911	1.15
SF125-6.0	16.8	1,569	1,346	1.17
SH150-4.5	29.3	908	839	1.08
SH150-6.0	21.0	1,380	1,419	0.97
SF150-4.5	29.3	1,332	1,133	1.18
SF150-6.0	21.0	1,801	1,700	1.06

b/t : Width-thickness ratio  
 $P_u$  : Ultimate load  
 $P_p$  :  $F_y A_s + 0.85 f_{ck} A_c$

직선회귀식을 적용해 고찰한 경우 연구 대상으로 선택한 냉간가공한 각형강관에서 국부 좌굴이 발생하지 않는 콤팩트단면의 한계폭두께비는 32.03로 산정되었으며, 이는 현행의 건축구조기준(KDS 41 31 00)[2]이 다소 과대 평가하고 있는 것으로 볼 수 있어 좀 더 보수적인 방향으로 한계폭두께비에 대한 수정이 필요한 것으로 생각된다. 따라서, 산정된 한계폭두께비를 적용하여 한계폭두께비 기준식을 수정하여 다음의 Eq. (2)과 같은 식을 얻었다.

$$1.35 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2)$$

Where,  $E$  denotes modulus of elasticity of steel,  $F_y$  denotes specified minimum yield stress

폭두께비 제한치로 Matsui[6]의 연구에서는 Eq. (2)의 계수 1.35 대신 1.5를 제안하고 있고, Choi[7]의 연구에서는 2.95를 제시하고 있으나, 선행의 연구들은 조립 각형강관을 대상으로 하고 있기 때문에 소성가공에 의한 잔류응력의 영향이 적은 경우이고, 충전강관에 있어서 판의 좌굴응력은 강관강도와 탄성계수 뿐 만 아니라 잔류응력, 판의 경계조건이나 좌굴길이에 영향을 주는 콘크리트 강도, 합성 재료의 단면적비 등이 고려되어야 하며, 또한 강관 내부에 스티프너가 보강된 경우[8], 강관 외부 보강형[9] 등 다양한 변수들을 감안해 볼 때, 냉간가공의 경우 제한치를 다소 보수적으로 접근할 필요가 있는 것으로 생각된다.

현행의 건축구조기준[2]에서 충전 강관의 폭두께비 한계치는 잔류 응력, 초기 결함, 판 요소의 구속 상태, 응력의 분포 등 불완전성이 반영되어 제정되었지만, 본 연구에서는 강관으로 냉간가공한 기성 제품을 대상으로 한바 냉간가공에서 상당한 잔류 응력이 존재한 결과로 생각되며, 차후 추가적인 연구로 보완할 필요가 있다.

### 3. 결론

본 연구는 콘크리트충전 각형강관 단주를 대상으로 콘크리트 충전효과와 냉간가공 각형강관의 냉간가공에 기인한 잔류응력의 영향을 알아보고, 단주의 압축력에 대한 구조적 특성과 폭두께비의 영향을 파악하기 위하여 일축 압축 시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

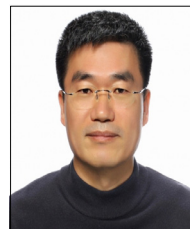
- (1) 콘크리트충전 각형강관 단주의 압축내력, 변형능력, 파괴모드를 얻었고 실험 결과를 분석하여 충전 효과 및 폭두께비의 영향을 파악하였으며, 현행의 국내 건축구조기준을 검증한 후 기준의 수정 및 보완에 이용할 기초 자료를 제공하였다.
- (2) 각형강관의 콘크리트 충전효과는 폭두께비가 증가할수록 상승하였고, 콘크리트의 내력은 일축응력 상태보다 9%정도 증가하였다. 이러한 충전효과는 차후 건축구조기준에 반영할 필요가 있다.
- (3) 냉간가공된 각형강관의 경우, 건축구조기준(KDS 41 31 00)의 콤팩트단면 한계폭두께비 2.26은 다소 과대 평가하고 있기 때문에 수정이 필요한 것으로 생각하며, 보수적으로 보완한 계수 1.35로 제안하고자 한다.

### References

- [1] AIK, Korean Building Codes and Commentary, p.1039, Architectural Institute of Korea, September 5 2011, pp.0709 105-0709 126.
- [2] Architectural Institute of Korea, Korean Building Codes and Commentary, p.1224, Kimoondang, August 18 2016, pp.780-834.
- [3] AISC, Steel Construction Manual, 14th Edition, p.2192, American Institute of Steel Construction, June 1 2011, pp.16.1-83-88, 16.1-348-349.
- [4] C. H. Lee, K. Y. Kang, S. Y. Kim, C. H. Koo, "Review of Structural Design Provisions of Rectangular Concrete Filled Tubular Columns" *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol.25, No.4, pp.389-398, August 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.7781/kioss.2013.25.4.389>
- [5] Korean Society of Steel Construction, Design of Steel Structures in KS, p.368, Goomibook, February 12 2018, pp.257-259.
- [6] C. Matsui, "Structural Performance and Design of Concrete Filled Steel Tubular Structures", *Journal of steel construction engineering /JSSC*, Vol.1, No.2, pp.11-24, June 1994. DOI: <https://doi.org/10.11273/jssc1994.1.2.11>
- [7] Y. H. Choi, "Limitations on the Width-to-Thickness Ratio of Rectangular Concrete-Filled Tubular (CFT) Columns", *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vo24, No.4, pp. 451-458, August 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.7781/kioss.2012.24.4.451>
- [8] H. J. Lee, H. G. Park, I. R. Choi, "Axial Load Test on Rectangular CFT Columns using High-Strength Steel and Slender Section", *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vo27, No.2, pp. 219-229, April 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.7781/kioss.2015.27.2.219>
- [9] J. W. Park, J. H. Yoo, "Axial Loading Behaviors of Square Concrete-Filled Tubular Columns with Large Width-to-Thickness Ratio Retrofitted using Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets(CFRP Sheets)", *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vo26, No.3, pp.169-176, June 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.7781/kioss.2014.26.3.169>

유 영 찬(Yeong-Chan Yoo)

[정회원]



<관심분야>  
건축구조, 건축재료

- 1993년 8월 : 한양대학교 한양대 학원 건축공학과 (공학석사)
- 1997년 8월 : 한양대학교 한양대 학원 건축공학과 (공학박사)
- 1998년 3월 ~ 현재 : 안동대학교 건축공학과 교수