

## 스페이스 프레임 구조물의 부재좌굴성능 평가방안 연구

강 중<sup>1\*</sup>

# A Study on the Evaluation of Member Buckling Performance of Space Frame Structures

Jong Kang<sup>1\*</sup>

**Abstract:** The purpose of this study was to investigate the safety and rationality of buckling strength and length coefficient by comparing with the design standards of domestic and foreign compression materials based on the buckling test results of circular steel pipe with ball joints. The types of round steel pipes selected for buckling performance evaluation were  $\phi 48.6 \times 2.8t$ ,  $\phi 60.5 \times 3.2t$  and  $\phi 76.3 \times 3.2t$ . For the design of domestic and foreign compression materials, Korea's Load Resistance and Factor Design, Japan's Limit State Design, and British Standard BS5950 standard were applied. In this study, we compared and analyzed the buckling performance between the experimental results of the previous research and the domestic and foreign design standards. The results were summarized as follows. As a result of applying the full length of the member to the buckling length in the compression materials design standards of each country, it was 64-89% of the buckling strength by the experiment. Therefore, it is deemed desirable to perform the member design according to the current design standard formula for safety. Experimental results show that the measured buckling strength was 1.02-1.43 times higher than the buckling strength of pure cylindrical steel tubes in the design standards of Korea, Japan and the United Kingdom compression materials. Consequently, it seemed that the buckling strength of individual member in the design of space frame structure should be considered buckling coefficient as the length of pure round steel pipe rather than the length of inter-node.

**Keywords:** Buckling performance, Space frame, Buckling stress, Ball joint, LVDT

## 1. 서론

대공간 구조물의 건립은 건축기술의 발전과 더불어 사회적 요구로 인하여 증가되고 있으며 다양한 연구와 실험을 통한 신기술 개발과 새로운 건축 재료의 생산으로 이를 실현시키고 있다. 이러한 대공간 구조물 구조 시스템은 사용재료의 구조적 특성과 시스템 구성방식에 따라 연속체 쉘 구조물(Shell Structures), 스페이스 프레임 구조물(Space Frame Structures), 막 구조물(Membrane Structures), 케이블 구조물(Cable Structures) 및 이들 방식이 병용된 복합 구조물(Hybrid Structures)로 구분한다.

이 중 스페이스 프레임 구조물은 일반적으로 입체적인 부재 배치 형식으로 구조물의 강성이 증대되고 이는 부재 단면의 최소화 및 경량화로 이어져 구조물에 좌굴(Buckling)이 발

생하기 쉽다. 이러한 좌굴성상은 구조물 형상, 단부 경계조건, 하중조건 및 형상 초기 부정 등 여러 가지 요인에 의한 영향을 받는다. 국내 건설현장의 스페이스 프레임 구조물에는 주로 Mero 시스템을 사용하고 있으며 이 구조물의 접합부는 볼과 슬리브 및 볼트로 구성되어 있다. 또한 부재 설계는 접합부의 구조적 특성에 의한 전체 및 개별 부재 좌굴내력에 영향을 받으며 이에 대한 합리적인 평가를 위해 다수의 연구들이 수행되어 왔다.

Kang et al.(2009)은 볼조인트 접합부의 강성 평가를 위해 접합부 실험체의 휨 강성 실험결과를 토대로 한 평가방법과 역학적 이론에 의한 평가방법을 비교 분석하였다. 스페이스 프레임 구조물의 부재 설계에 있어 경제성과 안전성을 추구할 수 있는 합리적인 방안을 모색하였다.

Park and Han(2003)은 볼트 삽입식 볼 접합부를 구성하고 있는 볼트, 슬리브, 콘 등의 구조적 거동 특성을 규명하고 휨 강성을 평가하였다. 휨 실험을 통한 휨 스프링 상수를 해석적으로 검토하였다.

Seo(2000)은 원형강관 부재의 부재좌굴을 대상으로 이론식을 제안하였고 실험 및 수치해석을 수행하였다. 단일부재에 대한 비탄성좌굴 이론식을 제안하고 단일부재좌굴 실험을

<sup>1</sup>정회원, 동명대학교 건축공학과, 교수, 교신저자

\*Corresponding author: kang108@tu.ac.kr

Department of Architectural Engineering, Tong Myong University, Busan, 48520, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2018년 2월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

통하여 세장비와 단부 지지조건에 따른 탄성 및 탄소성 영역에서의 좌굴거동 및 좌굴하중을 파악하였다. 또한 유한 요소법에 의한 비탄성 좌굴해석 프로그램 수치해석을 수행하여 탄성 및 비탄성영역에서의 좌굴하중을 평가하였다.

따라서 이 연구에서는 볼접합부를 갖는 부재의 좌굴성능의 합리적인 평가 방안을 모색하기 위해 좌굴실험의 결과와 우리나라, 일본 및 영국에서 적용하고 있는 강구조 압축재 설계규준과 비교하였으며 좌굴내력 및 좌굴길이 계수에 대해 분석하였다.

## 2. 부재좌굴실험

### 2.1 실험 계획

볼접합부를 갖는 부재의 좌굴내력 특성을 분석하기 위해 선행 연구(kang, 2012)의 실험 결과를 적용하였다. 실험체는 원형강관  $\varnothing 48.6 \times 2.8t$ 와  $\varnothing 60.5 \times 3.2t$  및  $\varnothing 76.3 \times 3.2t$  세 종류로 하였으며 실험체 길이는 1218 mm로 동일한 것으로 하였다. 양단의 지지조건은 핀(pin)의 경우만 고려하였으며 탄성계수  $E = 2.05 \times 10^5$  (MPa), 항복응력  $\sigma_y = 247$  (MPa)로 나타났다. 실험체의 규격 Table 1에서 보는 바와 같다.

실험체의 단면 성능은 Table 2에서 보는 바와 같으며 A는 원형강관의 단면적, I는 원형강관의 단면 2차 모멘트, r은 단면 2차반경,  $\lambda$ 는 세장비를 나타낸다.

### 2.2 실험 방법

실험체의 전체 형상은 Fig. 1에서 보는 것과 같으며 주요 부재인 원형강관(Pipe)과 볼(Ball) 및 접합을 위한 볼트(Bolt), 슬리브(Sleeve)로 구성되어 있다. 양단부의 볼을 포함한 전 부재 길이를  $L$ , 볼을 제외한 부재 길이를  $L_1$ , 원형강관(콘 포함)만

의 길이를  $L_2$ 라 한다.

접합부의 상세도 및 결합 형상은 Fig. 2에서 보는 바와 같다. 원형강관과 볼의 접합방법은 볼트와 슬리브에 설치된 락핀(Rock Pin) 구멍에 락핀을 끼운 후 볼트의 나사산을 볼에 설치된 나사구멍에 끼워 토크렌치(Torque Wrench)를 이용하여 볼트와 슬리브를 회전시켜 체결한다. 토크(Torque)값은 제조회사에서 일반적으로 채택하고 있는 전단 마찰접합의  $1/10 \pm 20\%$ 인  $50(N \cdot m)$ 를 적용하였다.

Fig. 3은 실험체 설치 현황을 개략적으로 나타낸 것으로 실험체는 완전한 직선부재로 중심축을 따라서 압축력이 작용하도록 하였으며 실험 중 편심하중에 의한 오차를 줄이기 위해 수준계를 이용하여 수평을 유지하도록 하였다. 실험체의 축방향 변위량 측정을 위하여 로드 셀(Load Cell) 전면부에 부착한 고정판에 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)를 설치하였다. 실험체의 중앙부에는 상하좌우 4개의 표면에 스트레인 게이지를 부착하였다.

Photo 1은 실험체  $\varnothing 76.3 \times 3.2t$ 의 설치 현황을 보여주는 것으로 (a)는 가력 전의 모습, (b)는 가력 후의 변형된 모습을 보여준다. 부재의 중앙부에서 좌굴되어진 형상을 확인 할 수 있었다. 축방향 변위량은 실험체 우측에 설치된 LVDT로 측정하였다. 또한 Photo 2는 실험체의 각부 변위량을 측정하는 위치 및 방법을 나타내는 것으로 (a)는 실험체 중앙부의 스트레인 게이지(strain gage) 및 LVDT 설치 현황을 보여주며, (b)는

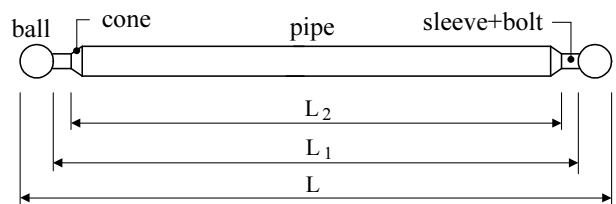


Fig. 1 Shape of specimen

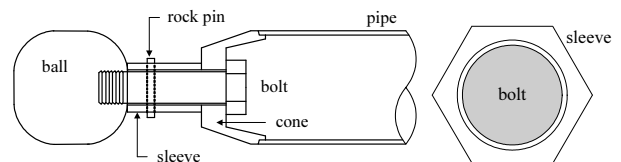


Fig. 2 Connection detail

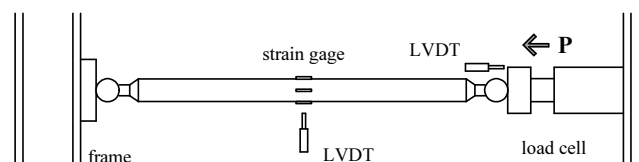


Fig. 3 Installation and measurement method of specimen

Table 1 Specimen dimension

Pipe	Ball diameter (mm)	Sleeve length (mm)	Bolt
$\varnothing 48.6 \times 2.8t$	75	35	M20
$\varnothing 60.5 \times 3.2t$	75	35	M20
$\varnothing 76.3 \times 3.2t$	75	35	M20

Table 2 Specimen section properties

Pipe	L(mm)	A(mm <sup>2</sup> )	I(mm <sup>4</sup> )	r(mm)	$\lambda$
$\varnothing 48.6 \times 2.8t$	1218	403	$1.06 \times 10^5$	16.2	75
$\varnothing 60.5 \times 3.2t$	1218	576	$2.37 \times 10^5$	20.3	60
$\varnothing 76.3 \times 3.2t$	1218	735	$4.92 \times 10^5$	25.9	47

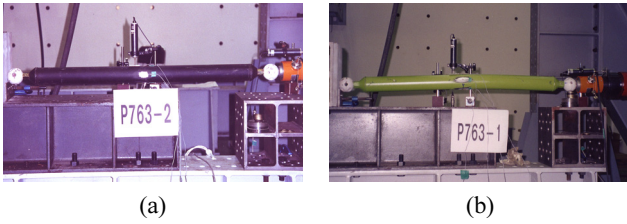


Photo 1 Installation & buckling mode of specimen

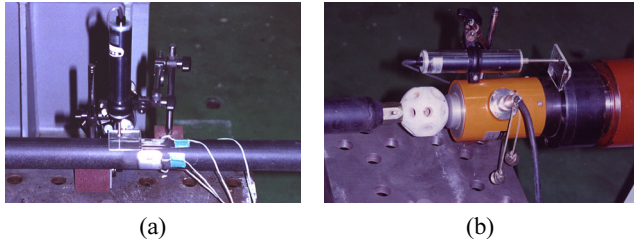


Photo 2 Installation strain gage & LVDT

Table 3 Experimental results

Pipe	Buckling load (kN)	Buckling stress (MPa)	Axial displacement (cm)
∅48.6×2.8t	83.85	208.06	5.19
∅60.5×3.2t	166.13	277.42	6.08
∅76.3×3.2t	205.00	278.91	6.59

실험체의 축방향 변위량을 측정하기 위한 LVDT 설치 현황을 보여 준다.

### 3. 부재좌굴내력 평가

#### 3.1 실험 결과

원형강관 ∅48.6×2.8t 와 ∅60.5×3.2t 및 ∅76.3×3.2t 세 종류의 실험체에 대한 좌굴 실험 결과를 정리하면 Table 3과 같다. 상기 실험체의 부재 좌굴내력과 국내의 압축재 설계 기준과 비교·분석을 통하여 적용성을 검토하였다.

#### 3.2 우리나라 기준

우리나라에서는 1997년에 강구조 한계상태 설계기준이 제정되었으며 몇 차례 개정을 거쳐 현재에는 하중저항계수 설계법(Load Resistance and Factor Design, 이하 K-LRFD라고 함)에 의한 압축재 좌굴하중을 산정한다. 산정식의 흐름도는 Fig. 4와 같다(KSSC, 2011).

여기서, Fig. 4에 적용된 기호는 다음과 같다.

$A_g$  = 부재의 총 단면적

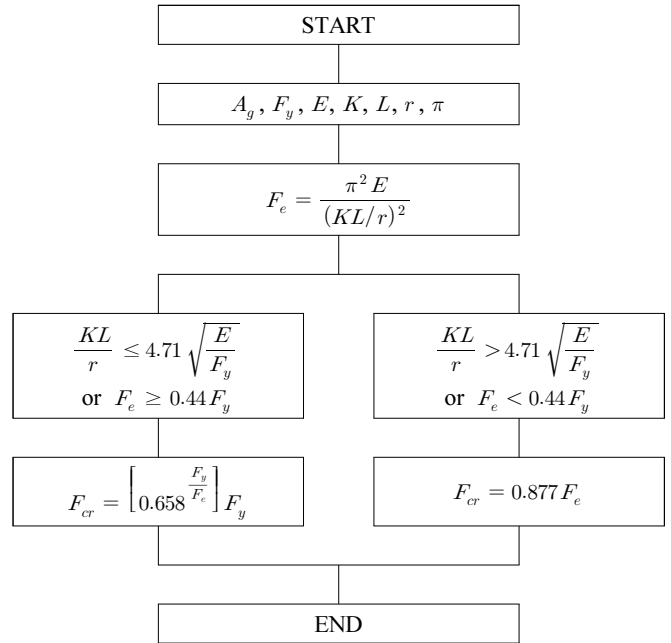


Fig. 4 Flow chart

$F_y$  = 강재의 항복강도

$E$  = 강재의 탄성계수

$K$  = 유효좌굴길이 계수

$L$  = 부재의 길이,

$r$  = 좌굴축에 대한 단면 2차반경

#### 3.3 일본 기준

2010년도에 개정된 일본의 한계상태 설계법(Limit State Design, 이하 J-LSD라고 함)에 의한 강구조 압축재의 설계 내력은 휨 좌굴 한계상태 및 국부 좌굴 한계상태에 대한 설계내력 중 작은 값으로 한다. 설계법의 좌굴 하중 산정 흐름도는 Fig. 5와 같다(A.I.J., 2010).

여기서, Fig. 5에 적용된 기호는 다음과 같다.

$N_c$  = 휨좌굴 한계내력

$\lambda_c$  = 휨좌굴 세장비

$p \lambda_c$  = 소성한계 세장비(1.5)

$e \lambda_c$  = 탄성한계 세장비( $1 / \sqrt{6}$ )

$N_y$  = 항복한계내력

$N_e$  = 탄성 휨좌굴내력

$I$  = 좌굴축에 대한 단면2차 모멘트

$k l_c$  = 압축재의 휨좌굴 길이

(휨 좌굴 한계내력)

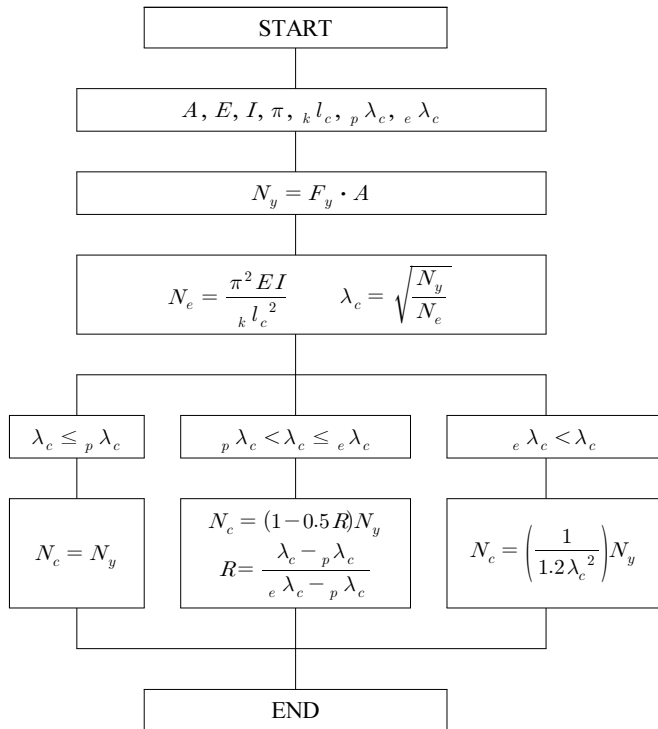


Fig. 5 Flow chart

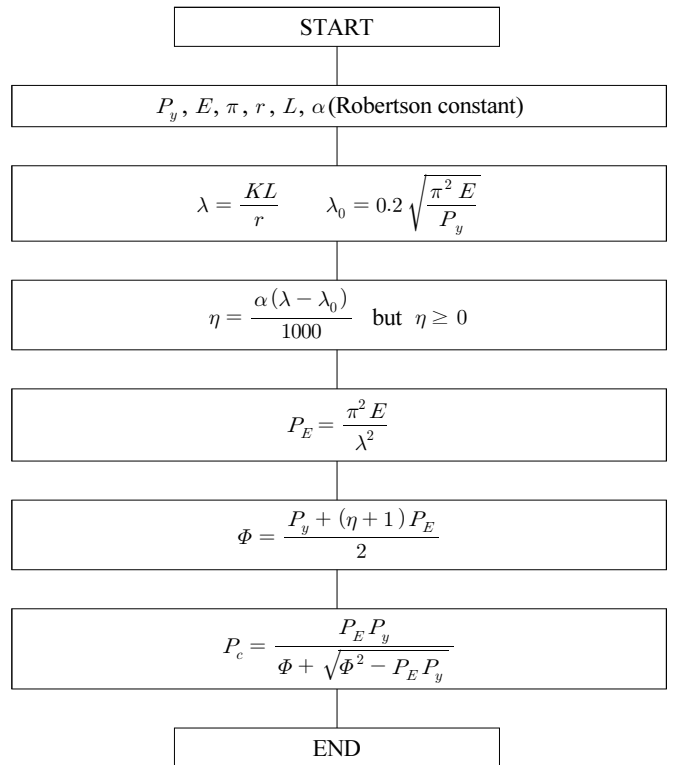


Fig. 6 Flow chart

(국부좌굴 한계내력)

A. 폭 두께비 구분: P-I, P-II

$$N_c = N_y$$

(1)

B. 폭 두께비 구분: P-III

$$N_c = F_{cr} \cdot A$$

(2)

a. H형 단면 ( $t_w$ : 웨브 두께,  $t_f$ : 플렌지 두께)

$$f F_{cr} = \left( 670 - 453 \frac{b}{t_f} \sqrt{\frac{F_y}{E}} \right) 410 \frac{F_y}{E},$$

$$0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} < \frac{b}{t_f} \leq 0.82 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

$$w F_{cr} = \left( 1720 - 453 \frac{d}{t_w} \sqrt{\frac{F_y}{E}} \right) 201 \frac{F_y}{E},$$

$$1.55 \sqrt{\frac{E}{F_y}} < \frac{d}{t_w} \leq 2.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

(3)

b. 열간성형 및 용접정방향형 중공단면재

$$F_{cr} = \left( 1670 - 453 \frac{B}{t} \sqrt{\frac{F_y}{E}} \right) 218 \frac{F_y}{E},$$

$$1.61 \sqrt{\frac{E}{F_y}} < \frac{B}{t} \leq 2.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

(4)

(5)

Table 4 Robertson constant

Type of section	Thickness (mm)	Axis of buckling	
		x-x	y-y
Hot finished hollow section		(a)	(a)
Cold formed hollow section		(c)	(c)
I section	< 40 mm	(a)	(b)
	> 40 mm	(b)	(c)
H section	< 40 mm	(b)	(c)
	> 40 mm	(d)	(d)
Welded I or H section	< 40 mm	(b)	(c)
	> 40 mm	(b)	(d)
Angles channels T-section		(c)	
(a) : $\alpha=2.0$ (b) : $\alpha=3.5$ (c) : $\alpha=5.5$ (d) : $\alpha=8.0$			

c. 냉간성형 정방향 중공단면재( $B/t \leq 36$ ) 및 냉간성형 원형 중공단면재( $D/t \leq 90$ )

$$F_{cr} = F_y \tag{6}$$

### 3.4 영국 기준

영국의 구조설계기준(British Standard BS5950-1:2000, 이하 BS라고 함)에 의한 좌굴하중 산정 흐름도는 Fig. 6과 같으며 Table 4는 Robertson Constant 적용규준을 나타낸다.

## 4. 부재좌굴내력 분석·평가

### 4.1 부재좌굴내력 비교·검토

원형강관  $\varnothing 48.6 \times 2.8t$  와  $\varnothing 60.5 \times 3.2t$  및  $\varnothing 76.3 \times 3.2t$  세 종류의 실험을 통한 좌굴내력과 우리나라, 일본 및 영국의 압축재 좌굴 기준식에 의한 좌굴내력을 Tables 6~8에 정리하였다. Table에서 Experimental Result는 실험 결과 얻어진 좌굴내력을 의미한다. 맨 오른쪽 항목은 실험 결과에서 얻어진 좌굴내력을 기준으로 하였을 때 각국의 압축재 설계 기준식으로 산출한 내력과의 비를 나타낸다. 또한 K-LRFD, J-LSD 및 BS는 각각 우리나라의 하중저항계수 설계법, 일본의 한계상태 설계법 및 영국의 구조설계 기준에 의해 산정된 좌굴내력을 나타낸다. 각국 기준식에 의한 좌굴내력의 크기는 우리나라, 일본, 영국의 순으로 나타났으며 그 차이는 4%~8%로 크지 않았다. 원형강관  $\varnothing 76.3 \times 3.2t$ 에서는 일본 기준식에 의한 좌굴내력이 영국 기준식에 의한 것과 거의 동일하였다. 실험 결과의 좌굴내력이 접합부의 구성요소를 고려한 좌굴 길이를 적용한 것보다 전체적으로 조금 큰 것으로 나타났다.

각국 기준에 의한 좌굴내력은 좌굴길이의 적용성을 검토하기 위하여 세 가지로 구분하여 실험 결과와 비교·분석하였다. Table 6~Table 8에서  $\sigma_p$ 는 부재의 좌굴길이를 원형강관(큰 포함, Fig. 2에서  $L_2$ )만을 고려했을 때의 좌굴내력,  $\sigma_{ps}$

는 부재의 좌굴길이를 원형강관+슬리브(Fig. 2에서  $L_1$ )를 고려했을 때의 좌굴내력,  $\sigma_{psb}$ 는 볼을 포함한 부재의 전체길이(Fig. 2에서  $L$ )를 고려했을 때의 좌굴내력을 나타낸다. 이를 고려한 좌굴길이와 세장비를 정리하면 Table 5와 같다.

Table 6은 원형강관  $\varnothing 48.6 \times 2.8t$ 의 실험결과와 각국 기준에 의한 좌굴내력을 정리한 것이며 Fig. 7은 양단부 볼을 포함한 부재 길이 전체를 좌굴 길이로 고려한 각국 기준식에 의한 좌굴내력과 실험에 의한 것을 비교한 것이다. 양단부 볼을 포함한 부재 길이 전체를 좌굴 길이로 고려한 각국 기준식에 의한 좌굴내력보다 실험에 의한 값이 1.12배~1.32배 정도로 측정되었다.

Table 7은 원형강관  $\varnothing 60.5 \times 3.2t$ 의 실험결과와 각국 기준에 의한 좌굴내력을 정리한 것이며 Fig. 8은 양단부 볼을 포함한 부재 길이 전체를 좌굴 길이로 고려한 각국 기준식에 의한 좌굴내력과 실험에 의한 것을 비교한 것이다. 양단부 볼을 포함한 부재 길이 전체를 좌굴 길이로 고려한 각국 기준식에 의한 좌굴내력보다 실험에 의한 값이 1.41배~1.56배 정도로 측정되었다.

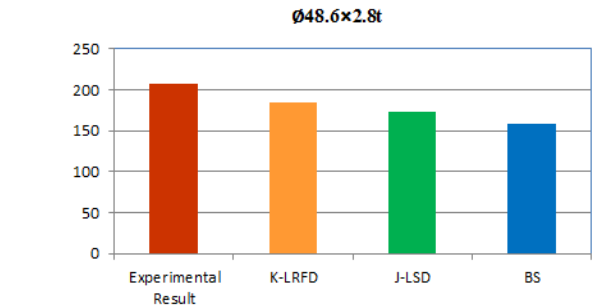
Table 8은 원형강관  $\varnothing 76.3 \times 3.2t$ 의 실험결과와 각국 기준에 의한 좌굴내력을 정리한 것이며 Fig. 9는 양단부 볼을 포함한

**Table 5** Buckling length concerned with connection component

Pipe	Application $\sigma_p$		Application $\sigma_{ps}$		Application $\sigma_{psb}$	
	$L$ (mm)	$\lambda$	$L_1$ (mm)	$\lambda$	$L_2$ (mm)	$\lambda$
$\varnothing 48.6 \times 2.8t$	1218	75	1068	66	998	62
$\varnothing 60.5 \times 3.2t$	1218	60	1068	53	998	49
$\varnothing 76.3 \times 3.2t$	1218	47	1068	41	998	39

**Table 6** Buckling stress comparison of  $\varnothing 48.6 \times 2.8t$

Kind of buckling stress	Buckling stress (MPa)	Buckling stress ratio for experimental result
Experimental result	208.06	1.00
K-LRFD	$\sigma_p$	202.95
	$\sigma_{ps}$	197.71
	$\sigma_{psb}$	185.30
J-LSD	$\sigma_p$	189.59
	$\sigma_{ps}$	184.43
	$\sigma_{psb}$	173.36
BS	$\sigma_p$	180.61
	$\sigma_{ps}$	173.82
	$\sigma_{psb}$	158.41



**Fig. 7** Comparison of buckling stress in  $\varnothing 48.6 \times 2.8t$

**Table 7** Buckling stress comparison of  $\varnothing 60.5 \times 3.2t$

Kind of buckling stress	Buckling stress (MPa)	Buckling stress ratio for experimental result
Experimental result	288.42	1.00
K-LRFD	$\sigma_p$	218.48
	$\sigma_{ps}$	213.97
	$\sigma_{psb}$	205.50
J-LSD	$\sigma_p$	204.36
	$\sigma_{ps}$	200.23
	$\sigma_{psb}$	191.38
BS	$\sigma_p$	201.88
	$\sigma_{ps}$	195.50
	$\sigma_{psb}$	183.97

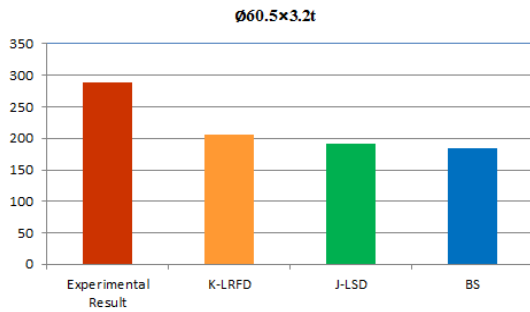


Fig. 8 Comparison of buckling stress in Ø60.5x3.2t

Table 8 Buckling stress comparison of Ø76.3x3.2t

Kind of buckling stress	Buckling stress (MPa)	Buckling stress ratio for experimental result
Experimental result	278.91	1.00
K-LRFD	$\sigma_p$	0.82
	$\sigma_{ps}$	0.81
	$\sigma_{psb}$	0.79
J-LSD	$\sigma_p$	0.78
	$\sigma_{ps}$	0.77
	$\sigma_{psb}$	0.74
BS	$\sigma_p$	0.78
	$\sigma_{ps}$	0.77
	$\sigma_{psb}$	0.74

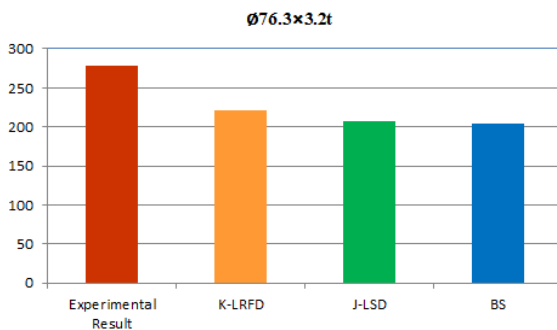


Fig. 9 Comparison of buckling stress in Ø76.3x3.2t

부재 길이 전체를 좌굴 길이로 고려한 각국 규준식에 의한 좌굴내력과 실험에 의한 것을 비교한 것이다. 양단부 볼을 포함한 부재 길이 전체를 좌굴 길이로 고려한 각국 규준식에 의한 좌굴내력보다 실험에 의한 값이 1.27배~1.35배 정도로 크게 측정되었다.

#### 4.2 분석 평가

볼접합부를 갖는 원형강관의 좌굴내력은 각국의 좌굴 규준식에 의한 값보다 실험에 의한 값이 큰 것으로 나타났다. 원형

강관 Ø48.6x2.8t의 경우 실험에 의한 좌굴 내력이 부재 길이를 콘을 포함한 순수 원형강관만을 적용한 각국 좌굴 규준식에 의한 값보다 1.02배~1.15배 큰 것으로 측정되었으며 볼을 포함한 전체길이를 적용한 각국 좌굴 규준식에 의한 값보다 1.12배~1.32배 큰 것으로 측정되었다. 원형강관 Ø60.5x3.2t의 경우 실험에 의한 좌굴 내력이 부재 길이를 콘을 포함한 순수 원형강관만을 적용한 각국 좌굴 규준식에 의한 값보다 1.32배~1.43배 큰 것으로 측정되었으며 볼을 포함한 전체길이를 적용한 각국 좌굴 규준식에 의한 값보다 1.41배~1.56배 큰 것으로 측정되었다.

또한 원형강관 Ø76.3x3.2t의 경우 실험에 의한 좌굴 내력이 부재 길이를 콘을 포함한 순수 원형강관만을 적용한 각국 좌굴 규준식에 의한 값보다 1.22배~1.28배 큰 것으로 측정되었으며 볼을 포함한 전체길이를 적용한 각국 좌굴 규준식에 의한 값보다 1.27배~1.35배 큰 것으로 측정되었다. 세 종류의 원형강관 중 Ø60.5x3.2t는 다른 원형강관에 비해 실험에 의한 좌굴 내력 값과 각국의 좌굴 규준식에 의한 값이 다소 큰 것으로 나타났다. 이는 실험 후 변형된 형상으로 보아 볼트의 체결이 다른 종류 실험체에 비해 강하게 되어 나타난 현상으로 보여진다.

실험에 의한 좌굴내력 값이 부재 길이를 콘을 포함한 순수 원형강관만을 적용한 각국의 좌굴 규준식에 의한 값보다 원형강관의 크기에 상관없이 큰 것으로 측정되었다. 이는 각국의 좌굴 설계규준식이 안전성을 지닌 것으로 판단되며 접합부를 갖는 스페이스 프레임 구조물의 부재 설계에 있어서 좌굴 길이 적용에 다양성을 부여할 필요가 있을 것으로 보인다.

## 5. 결론

스페이스 프레임 구조물은 입체적인 부재 배치로 인한 강성 증대 및 경량화에 따른 좌굴 발생이 용이하다. 부재 간 결합 방식으로 국내에서 많이 채택하고 있는 볼, 볼트 및 슬리브를 이용한 볼조인트 접합 방식은 접합부 구성요소가 부재의 좌굴길이 및 좌굴내력에 다소 영향을 미친다. 따라서 볼접합부를 갖는 원형강관의 좌굴실험 결과를 토대로 하여 국내외 압축재 설계규준과 비교한 결과 부재의 좌굴내력 및 좌굴길이 평가에 대해 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 실험에 의한 좌굴내력은 각국의 압축재 설계규준에서 부재의 전체 길이를 좌굴 길이로 적용한 결과에 비해 1.12배~1.56배 높은 것으로 나타났으며, 순수 원형강관의 길이를 좌굴 길이로 적용한 결과에 비해 1.02배~1.56배 높은 것으로 측정되었다. 원형강관의 규격별 다소 값의 편차가 있는 것은 접합부 구성요소의 결합정밀도 및 구성 요소간 강

성 차에 의한 것으로 사료된다. 또한 실험 결과에 의한 좌굴 내력값이 조굴 내력 기준식에 의한 값보다 큰 것은 현재 설계 기준식에 준하여 부재 설계를 수행하는 것이 안전성 측면에서 바람직한 것으로 판단된다.

- 2) 실험결과 측정된 좌굴 내력은 우리나라, 일본 및 영국의 압축재 설계기준에서 좌굴 길이를 순수 원형강관만으로 고려한 좌굴내력 값에 비해 1.02배~1.43배 높은 것으로 나타났다. 따라서 스페이스 프레임 구조물 설계에 있어 개별 부재 좌굴내력은 절점간 길이가 아닌 순수 원형강관의 길이로 좌굴계수를 고려할 필요가 있을 것으로 보여 진다. 이 경우 일반적인 부재 설계에 있어서 부재 길이를 적용하는 절점간 거리에 대한 순수 원형강관의 길이의 좌굴계수 값은 0.87 정도로 제시되어 진다. 그러나 접합부를 구성하고 있는 볼, 볼트 및 슬리브의 규격에 따른 강성 차이에 의한 좌굴 내력의 변화를 고려하여야 할 것으로 보여 진다.

볼접합부를 갖는 스페이스 프레임 구조물의 좌굴내력 및 좌굴길이 계수는 접합부의 구성요소가 다양하고 볼트의 결합 강도에 영향을 받으므로 보다 정확하고 신뢰성 있는 설계지침 마련을 위해 향후 다양한 규격의 원형강관 및 세장비를 적용한 추가적인 실험연구가 필요할 것으로 보여 진다.

## References

- Architectural Institute of Japan (2010), Recommendation for Limit State Design of Steel Structures, Architectural Institute of Japan, 20-21.
- British Standards Institution (2008), BS5950-1:2000 Structural use of Steelwork in Building Part 1, BSI, 35-173.
- Kang, J. (2010), A Study on the Flexural Rigidity and Member Buckling of Space Frame with Ball Joints, D. Eng., Keimyung University, 29-61.
- Kang, J. (2012), Evaluation on the Buckling Length of Circular Hollow Steel with Ball Joints, *Journal of The Korean Society of Industrial Application, The Korean Society of Industrial Application*, 15(1), 5-11.
- Kang, J., Kim, S. E., and Choi, H. S. (2009), A Study on the Evaluation of Rigidity of Ball Joint, *Journal of Regional Association of Architectural Institute of Korea, The Regional Association of Architectural Institute of Korea*, 11(1), 133-142.
- Korean Society of Steel Construction (2011), Design of Steel Structures, Goomi Book, Seoul, 128-135.
- Park, C. H., and Han, S. E. (2003), An Experimental Study on the Bending Stiffness of the Bolt Inserted Ball Joint, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, The Architectural Institute of Korea*, 19(11), 65-72.
- Seo, D. J. (2000), A Study on the Inelastic Member Buckling of Space Frame, M. Eng., Keimyung University, 31-44.
- Yang, T. Y. (1986), Finite Element Structural Analysis, 2nd ed., Prentice-Hall, New Jersey, 56-135.

Received : 11/28/2017

Revised : 12/04/2017

Accepted : 12/06/2017

---

**요 지 :** 본 연구의 목적은 볼접합부를 갖는 원형강관의 좌굴실험 결과를 토대로 하여 국내외 압축재 설계기준과 비교 평가함으로써 부재의 좌굴내력 및 좌굴길이 계수의 안전성과 합리성을 조사하는 것이다. 좌굴성능 평가를 위해 선정된 원형강관은  $\varnothing 48.6 \times 2.8t$ 와  $\varnothing 60.5 \times 3.2t$  및  $\varnothing 76.3 \times 3.2t$ 이다. 국내외 압축재 설계를 위해 우리나라의 하중저항계수 설계법(LRFD), 일본의 한계상태 설계법(LSD) 및 영국의 BS5950 기준을 적용하였다. 본 연구에서는 선행연구의 실험결과와 국내외 설계기준과의 좌굴성능을 비교 분석하였다. 그 결과를 요약해 보면 다음과 같다. 각국의 압축재 설계기준에서 부재의 전체길이를 좌굴길이로 적용한 결과 실험에 의한 좌굴내력의 64%~89% 정도로 나타났다. 따라서 안전을 위해 현재 설계 기준식에 준하여 부재설계를 수행하는 것이 바람직하다고 판단되었다. 실험결과 측정된 좌굴내력은 우리나라, 일본 및 영국의 압축재 설계기준에서 좌굴길이를 순수 원형강관만으로 고려한 좌굴내력 값에 비해 1.02배~1.43배 높은 것으로 나타났다. 따라서 스페이스 프레임 구조물 설계에 있어 개별부재 좌굴내력은 절점 간 길이가 아닌 순수 원형강관의 길이로 좌굴계수를 고려할 필요가 있을 것으로 보여 진다.

**핵심용어 :** 좌굴성능, 스페이스 프레임, 좌굴응력, 볼 접합부, 변위센스

---