

볼접합부를 갖는 원형강관부재의 좌굴길이 평가 Evaluation on the Buckling Length of Circular Hollow Steel with Ball Joints

강종¹
Kang, Jong¹

<Abstract>

The Buckling of the member under compressive stress is likely to occur, which is an important factor determining the strength of structures. The objective of this study was to evaluate the member buckling strength of a circular hollow steel with ball joints and to compare with design specifications for load resistance factor of our country. Furthermore, we would like to suggest basic data for evaluation of buckling length of a circular hollow steel with ball joints according to comparative analysis. These results were summarized as follows:

Buckling stress according to the test results on buckling was 1.21 times greater than LSD specifications of our country estimated the entire length of circular hollow steel with ball joints as buckling length. In addition, it was 1.16 times greater than when estimating the length except the ball as buckling length and 1.14 times greater than when excluding the ball and sleeve. Therefore, when estimating buckling stress of circular hollow steel with ball joints, their buckling length may be measured by the length except ball and sleeve.

Keywords : *Ball-Bolted Joint, Limit State Design, Buckling Length, Linear Variable Differential Transformer*

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

대공간 구조물의 구조시스템으로 채택되고 있는 스페이스 프레임의 부재간의 접합 방식으로 Mero시스템을 비교적 많이 사용하고 있다¹⁾. 이것은 볼과 원형강관과의 접합에 볼트 및 슬리브를 이용하여 체결하는 방식으로 이러한 구조물의 부재설계에 있어서 접합부의 구조적 특성을 정확하게 파악하는 것은 아주 중요한 요

소가 될 것이다. 접합부의 구조적 특성으로는 접합성능 및 개별부재의 좌굴길이를 들 수 있으며 이러한 요소는 개별부재의 좌굴내력을 결정하는 중요한 부분이 된다. 볼, 원형강관, 볼트 및 슬리브를 이용하는 접합부의 특성상 부재의 좌굴길이는 여러 가지 변수를 고려하여야 한다. 따라서 이 연구에서는 실험의 결과에 의한 좌굴내력과 한계상태 설계법에 의한 좌굴내력을 비교하고 볼접합부를 갖는 원형강관의 좌굴길이를 평가하는 기초자료를 제시하고자 하는 데

¹ 정희원, 동명대학교, 건축공학과, 교수, 工博
E-mail :kang108@tu.ac.kr

¹Dept.of Architectural Engineering Tong Myong University,
Prof., Ph.D.

에 그 목적이 있다.

$$\text{단, } N_1 = 1 - \frac{x}{l}, \quad N_2 = \frac{x}{l}$$

1.2 연구 범위 및 방법

불 접합부를 가진 원형강관의 좌굴길이 평가를 하기 위하여 실험결과에 따른 좌굴내력을 측정하였다. 또한 평가되는 자료의 타당성을 확보하기 위하여 선행연구²⁾의 실험결과를 채택하여 비교하였다.

좌굴내력 평가에 적용될 원형강관의 규격은 $\varnothing 42.7 \times 2.3t$, $\varnothing 48.6 \times 2.8t$, $\varnothing 60.5 \times 3.2t$ 및 $\varnothing 76.3 \times 3.2t$ 네 종류로 하였다. 세장비는 47, 50, 60, 75 및 90으로 구성되어 있으며 단부지지조건은 양단 핀(pin)과 양단 고정(fix) 두 종류로 하였다. 유한요소해석을 통한 이론적 좌굴내력 평가와 실험결과를 비교하였고 우리나라의 한계상태설계기준에 따른 좌굴내력과도 비교·분석하였다. 또한 접합부를 구성하고 있는 각부 요소들을 고려한 좌굴길이를 세 가지로 설정하여 한계상태설계기준에 의한 좌굴내력을 실험결과와 비교하여 좌굴길이의 적합성을 모색하였다.

2. 부재의 좌굴내력 산정

2.1 유한요소법에 의한 기초식^{3),4)}

구조물을 나타내는 평면골조에서 임의의 부재 중 한 요소에서 발생하는 절점력을 F_x , F_z 및 M 이라 하고 절점변위를 u , ω 및 ω' 이라 하면 절점력은 식 (1)과 같이 절점변위는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\{\bar{P}\}^T = \{F_{x_1} \quad F_{z_1} \quad M_1 \quad F_{x_2} \quad F_{z_2} \quad M_2\} \quad (1)$$

$$\{\bar{u}\}^T = \{u_1 \quad \omega_1 \quad \omega_1' \quad u_2 \quad \omega_2 \quad \omega_2'\} \quad (2)$$

식 (3)은 부재의 임의위치에서의 축방향 변위를 나타내고 기둥의 축방향 변형률과 변위와의 관계는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$u = [N_1 \quad N_2] \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (4)$$

또한 식 (3)을 식 (4)에 적용하여 정리하면 식 (5)~식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{\epsilon_x\} = \left[-\frac{1}{l} \quad \frac{1}{l} \right] \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$\{\epsilon\} = [B] \{\bar{u}\} \quad (6)$$

$$[B] = \left[-\frac{1}{l} \quad \frac{1}{l} \right] \quad (7)$$

트러스의 강성 매트릭스는 식 (8)과 같다. 이 연구에서 적용되는 수치해석의 범위는 탄성 및 비탄성 영역까지이며 이하 기본식 전개 과정 중에 표현되는 E_t 값은 하중의 단계별로 각각의 응력도에 상응하는 재료의 접선계수를 적용하는 것으로 하였다.

$$\begin{aligned} [K] &= E_t A \int_0^l \begin{bmatrix} -\frac{1}{l} \\ \frac{1}{l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{1}{l} & \frac{1}{l} \end{bmatrix} dx \\ &= \frac{E_t A}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

따라서 절점력과 절점변위는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} F_{x_1} \\ F_{x_2} \end{Bmatrix} = \frac{E_t A}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

한편, 보 부재의 강성 매트릭스는 식 (10)과 같이 나타낼 수 있으며 초기응력 매트릭스는 식 (11)과 같이 표현된다.

$$[K] = \frac{E_t I}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ 6l & 4l^2 & -6l & 2l^2 \\ -12 & -6l & 12 & -6l \\ 6l & 2l^2 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$[K_G] = P \begin{bmatrix} \frac{6}{5l} & \frac{1}{10} & -\frac{6}{5l} & \frac{1}{10} \\ \frac{1}{10} & \frac{2l}{15} & -\frac{1}{10} & -\frac{l}{30} \\ -\frac{6}{5l} & -\frac{1}{10} & \frac{6}{5l} & -\frac{1}{10} \\ \frac{1}{10} & -\frac{l}{30} & -\frac{1}{10} & \frac{2l}{15} \end{bmatrix} \quad (11)$$

골조요소는 트러스요소와 보요소의 합성으로 이루어진다. 따라서 골조요소의 강성 매트릭스 $[K]$ 는 식 (8)과 식 (10)으로부터 산정되어지며 초기응력 매트릭스 $[K_G]$ 는 식 (8)과 식 (11)로부터 얻어질 수 있다. 또한 골조요소의 전체 강성 매트릭스는 식 (12)와 같다.

$$[K_T] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} & 0 & -\frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} \\ 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} & 0 & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} \\ -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} & 0 & \frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} \\ 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} & 0 & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} \end{bmatrix} \quad (12)$$

한편, 전체 구조물의 초기응력 매트릭스는 식 (13)과 같이 얻어질 수 있다.

$$[K_G] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6P}{5l} & \frac{P}{10} & 0 & -\frac{6P}{5l} & \frac{P}{10} \\ 0 & \frac{P}{10} & \frac{2Pl}{15} & 0 & -\frac{P}{10} & -\frac{Pl}{30} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{6P}{5l} & -\frac{P}{10} & 0 & \frac{6P}{5l} & -\frac{P}{10} \\ 0 & \frac{P}{10} & \frac{Pl}{30} & 0 & -\frac{P}{10} & -\frac{2Pl}{15} \end{bmatrix} \quad (13)$$

따라서 좌굴 방정식은 다음의 식 (14)~식 (16)과 같이 정리된다.

$$\{\bar{P}\} = [K_T - K_G] \{u\} \quad (14)$$

$$[K_T - K_G] \{u\} = 0 \quad (15)$$

$$[K_T - K_G] = 0 \quad (16)$$

2.2 하중저항계수 설계법⁵⁾

한계상태 설계법(LSD, Limit State Design)은 구조물의 강도한계상태와 사용성 한계상태에 대해 확률 통계적인 방법으로 접근하여 구조물을 안전하게 설계하고자 하는 합리적인 설계법이다. 우리나라의 현행 한계상태 설계법은 KBC 2009로 제정되었다. 이 규준에 의한 압축재 좌굴하중 산정방법을 기술하면 다음과 같다.

1) 공칭압축강도 산정

$$P_n = A_g \cdot F_{cr} \quad (17)$$

2) 휨좌굴 강도 산정

$$\frac{KL}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad \text{또는} \quad F_e \geq 0.44 F_y \quad \text{인 경우}$$

$$F_{cr} = \left[0.658 \frac{F_y}{F_e} \right] F_y \quad (18)$$

$$\frac{KL}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ 또는 } F_c < 0.44 F_y \text{ 인 경우}$$

$$F_{cr} = 0.877 F_c \quad (19)$$

여기서, F_c : 탄성 휨 좌굴강도

$$= \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \text{ (mm}^2\text{)}$$

A_g : 부재의 총 단면적 (mm²)

F_y : 강재의 항복강도 (N/mm²)

E : 강재의 탄성계수 (N/mm²)

K : 유효 좌굴길이 계수

L : 부재의 길이 (mm)

r : 좌굴축에 대한 단면2차반경 (mm)

3. 부재의 좌굴실험

3.1 좌굴실험체

부재의 좌굴실험을 수행하기 위해 Table 1에서 보는 바와 같이 불접합부를 포함한 전체 길이를 121.8cm로 하고 원형강관의 단면은 $\varnothing 48.6 \times 2.8t$, $\varnothing 60.5 \times 3.2t$ 및 $\varnothing 76.3 \times 3.2t$ 세 종류를 선정하였다. 또한 단부 지지조건은 양단 핀(pin) 조건을 채택하였으며 실험체를 구성하고 있는 각부 규격은 Table 1과 같다.

Table 1. Specimen size

실험체 규격	원형강관		볼직경 (cm)	슬리브 길이 (cm)	볼트 규격
	단면적 (cm ²)	단면 2차반경 (cm)			
$\varnothing 48.6$ $\times 2.8t$	4.03	1.62	7.5	3.5	M20
$\varnothing 60.5$ $\times 3.2t$	5.76	2.03	7.5	3.5	M20
$\varnothing 76.3$ $\times 3.2t$	7.35	2.59	7.5	3.5	M20

실험체의 규격에 따른 세부 제원은 Table 2에서 보는 바와 같다. 세 종류의 실험체 모두 부재길이는 121.8(cm)로 동일한 것으로 채택하였다. 세장비는 부재 길이를 원형강관의 단면2차반경으로 나눈 값으로 하였다. 실험체 명에서 첫 글자는 단부지지조건의 핀(pin)을 의미하

고 3단위 숫자는 원형강관의 규격, s는 세장비(slenderness), 마지막 2단위의 숫자는 실험체 길이에 따른 세장비 값을 나타낸다.

Table 2. Specimen dimension

실험체명	실험체 규격	실험체 길이 (cm)	세장비	단부 지지조건
p486s75	$\varnothing 48.6$ $\times 2.8t$	121.8	75	핀
p605s60	$\varnothing 60.5$ $\times 3.2t$	121.8	60	핀
p763s47	$\varnothing 76.3$ $\times 3.2t$	121.8	47	핀

3.2 실험개요

실험체의 각부 구성 및 전체적인 형상은 Fig. 1에서 보는 바와 같으며 원형강관, 볼, 콘, 슬리브 및 볼트로 구성되어 있다. Fig. 2는 실험체의 설치 현황을 나타낸 것으로 압축력을 실험체의 중심축을 따라 작용시켜 좌굴실험을 수행하였다. 하중은 유압유니트를 사용하였으며 유압실린더의 끝에 로드셀을 부착하여 압축력의 크기를 측정하였다.

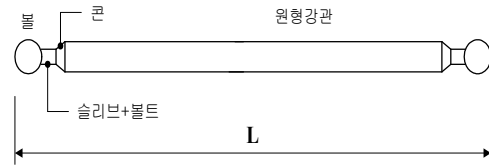


Fig. 1. Shape of specimen.

즉, Fig. 2는 실험체의 설치 현황 및 계측 방법을 볼 수 있다. Fig. 2에서 보는 것처럼 실험체의 변위량 계측을 위하여 2개소에 변위센서(LVDT, Linear Variable Differential Transformer)를 설치하였다. 로드셀이 부착된 곳에 설치된 LVDT는 축방향 변위량을 측정하였고 실험체의 중앙부에 설치된 LVDT는 실험체의 수직 및 수평방향 변위량을 측정하였다. 그리고 부재 중앙부 상하좌우 4개소에 스트레인 게이지를 부착하여 변형도를 측정하였다.

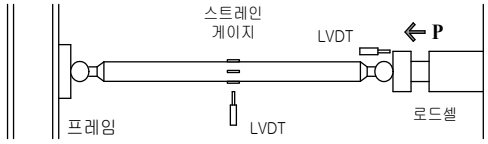


Fig. 2. Installation and measurement method of specimen.

Fig. 3과 Fig. 4는 각각 실험 전과 후의 현황을 보여주는 그림이다. 실험체의 설치에 수준계를 이용하였으며 편심하중으로 인한 오류가 발생하지 않도록 실험 중에도 실험체가 수평을 유지하도록 하였다.

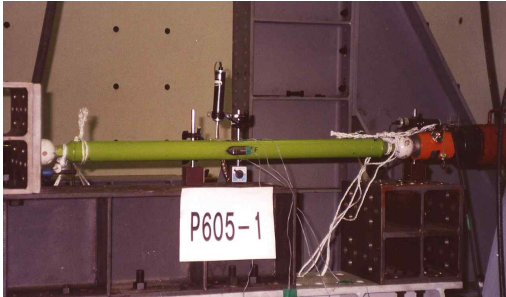


Fig. 3. Installation of specimen.

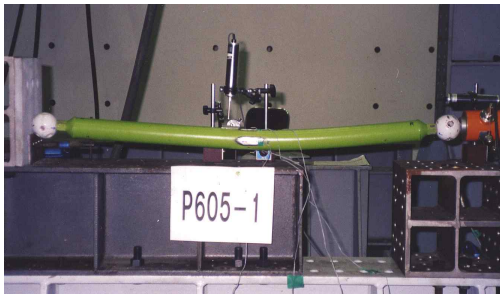


Fig. 4. Buckling mode of specimen.

또한 상기 실험 자료의 타당성을 확보하기 위하여 선행 연구²⁾에서 수행되었던 실험 모델에 대한 결과와도 비교하였다. 선행 연구에 채택되었던 실험체의 규격 및 제원은 각각 Table 3 및 Table 4와 같다.

Table 3. Specimen size of advanced research

실험체 규격	원형강관		볼직경 (cm)	슬리브 길이 (cm)	볼트 규격
	단면적 (cm ²)	단면 2차반경 (cm)			
∅42.7 ×2.3t	2.92	1.43	6.8	2.8	M12
∅48.6 ×2.8t	4.03	1.62	6.8	3.4	M16

Table 4. Specimen dimension of advanced research

실험체 규격	실험체 길이 (cm)	세장비	실험체명	
			양단 핀	양단 고정
∅42.7 ×2.3t	71.5	50	MB427s50p	MB427s50f
	128.7	90	MB427s90p	MB427s90f
∅48.6 ×2.8t	81.0	50	MB486s50p	MB486s50f
	145.8	90	MB486s90p	MB486s90f

4. 좌굴내력분석

4.1 좌굴실험결과에 의한 내력

Fig. 5에서 보는 것처럼 p486s75시리즈의 좌굴응력은 각각 178.83MPa 및 178.08MPa를 나타냈으며 이에 대응되는 축방향 변위는 각각 3.32cm 및 3.30cm로 측정되었다.

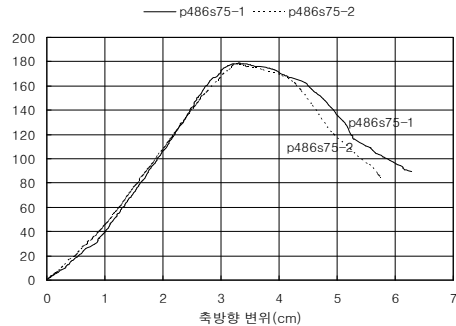


Fig. 5. Stress-strain curve of p486s75.

또한 Fig. 6에서 보는 바와 같이 p605s60시리즈의 좌굴응력은 각각 277.58MPa 및 299.26 MPa를 나타냈으며 이에 대응되는 축 방향 변위는 각각 5.32cm 및 6.08cm로 측정되었다.

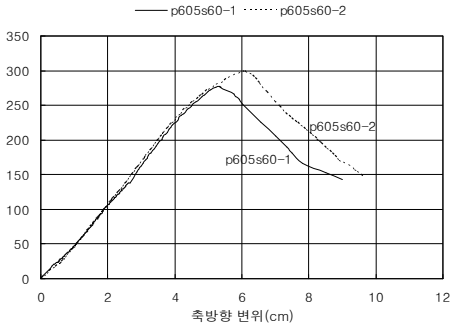


Fig. 6. Stress-strain curve of p605s60.

그리고 p763s47시리즈의 좌굴응력은 Fig. 7에서 보는 바와 같이 각각 276.12MPa 및 281.62MPa를 나타냈으며 이에 대응되는 축방향 변위는 각각 5.98cm 및 7.18cm로 측정되었다.

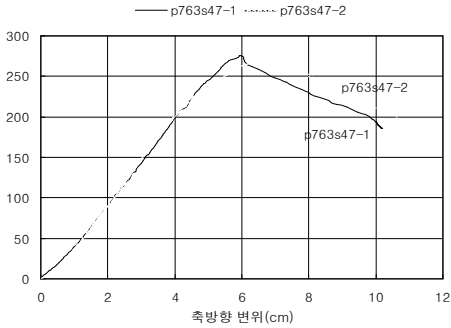


Fig. 7. Stress-strain curve of p763s47.

4.2 분석 및 평가

Table 5는 선행연구²⁾에서 수행한 실험 및 유한요소 해석결과 좌굴응력을 나타낸 것이다. 여기서 유한요소해석은 2장에 소개한 기본식에 의하여 작성된 프로그램 수행결과를 정리한 것이다. Table 5에서 I_b 는 유한요소해석 수행시 접합부의 단면강성으로서 단면2차 모멘트를 입력할 때 볼트만으로 고려한 경우이다. 또한 I_{theo} 는 볼트와 슬리브일부를 고려한 경우이며 I_{pipe} 는 부재의 전 구간을 접합부 없이 원형강관으로 이루어진 경우를 고려한 것이다.

Table 5에서 알 수 있듯이 실험에 의한 좌굴응력 값은 유한요소해석의 I_b 나 I_{pipe} 에 의한 값

보다 I_{theo} 에 의한 값에 근접되는 것으로 나타났다. 이는 스페이스 프레임 구조설계에 있어서 접합부의 강성은 볼트와 슬리브의 기하학적 형상을 반영하는 것이 합리적이라는 것을 알 수 있었다.

Table 5. Buckling stress according to joint rigidity and test results

실험체명	단부 지지 조건	좌굴응력-유한요소법 (MPa)			좌굴응력-실험 (MPa)
		I_b	I_{theo}	I_{pipe}	
MB427s50	핀	201.91	237.52	253.99	231.41
	고정	249.95	264.40	268.10	263.31
MB427s90	핀	180.75	184.78	185.79	224.43
	고정	205.61	246.93	274.81	233.64
MB486s50	핀	229.53	245.84	254.11	238.77
	고정	254.84	270.91	267.99	262.12
MB486s90	핀	183.77	185.72	185.72	203.85
	고정	228.55	270.42	275.53	242.09

Table 6은 실험에 의한 좌굴응력과 LSD규준에 의한 좌굴응력을 비교한 것이다.

Table 6. Buckling stress Comparison of buckling stress between test results and LSD codes

실험체명	단부 지지 조건	좌굴응력			
		실험	LSD규준		
			l_p	l_{p+s}	l_{all}
p486s75	핀	178.46	195.66	190.50	178.71
p605s60	핀	288.42	209.19	205.70	197.52
p763s47	핀	278.87	218.97	216.69	211.36
MB427s50	핀	231.41	220.52	217.30	208.39
	고정	263.31	231.56	230.71	228.31
MB427s90	핀	224.43	176.91	171.69	158.66
	고정	233.64	219.14	217.52	213.26
MB486s50	핀	238.77	219.86	216.34	208.39
	고정	262.12	231.39	230.45	228.31
MB486s90	핀	203.85	175.80	170.19	158.66
	고정	242.09	218.81	217.04	213.26

Table 6에서 l_p 는 부재의 전체길이에서 좌굴 길이를 볼과 슬리브를 제외한 순수 원형강관만을 고려한 경우이다. 또한 l_{p+s} 는 볼만을 제외한 경우이며 l_{all} 은 Fig. 1에서 보는 것처럼 부재의 전체 길이를 의미한다.

Table 6에서 알 수 있듯이 실험결과에 의한 좌굴내력에 대한 l_p 의 경우는 0.88배로 나타났다. 또한 l_{p+s} 의 경우는 0.86배, l_{all} 의 경우에는 0.83배로 측정되었다. 기준식에 의한 값보다 실험에 의한 값이 더 높으므로 실제 부재 설계에는 안전측의 여유를 준다고 할 수 있다.

5. 결 론

스페이스프레임 구조물은 구조적 특성으로 인하여 좌굴이 발생되기 용이하며 이러한 현상은 구조물의 내력을 결정하는 중요한 인자 중 하나가 된다. 좌굴내력 결정에는 단부의 지지조건이나 좌굴길이로 주된 변수가 된다. 스페이스프레임 구조물의 부재간 접합방식은 주로 볼, 볼트 및 슬리브를 이용하는 방식으로 이 연구에서는 부재의 좌굴길이를 평가하는 자료를 제시하고자 하였다. 이를 위해 부재좌굴실험과 선행연구 결과를 토대로 하여 분석·평가하였다. 그 결과를 요약해 보면 다음과 같다.

1) 좌굴실험결과에 의한 좌굴응력이 불접합부를 갖는 원형강관 전체를 좌굴길이로 하여 산정된 우리나라 LRFD 기준에 의한 값보다 1.21배 더 큰 것으로 나타났다. 또한 좌굴길이를 볼을 제외한 길이로 하였을 때 보다 1.16배, 볼과 슬리브를 제외한 길이로 하였을 때 보다 1.14배 더 큰 것으로 나타났다. 따라서 불접합부를 갖는 원형강관의 좌굴내력 산정시 좌굴길이는 볼과 슬리브 길이를 제외한 길이로 하여도 무방할 것으로 사료된다.

2) 실험결과에 따른 좌굴내력과 유한요소해석에 의한 이론값이 비교적 근접되어 있는 것으로 나타났으며 특히 유한요소해석시 접합부의 강성을 볼트 및 슬리브의 단면 형상을 반영한 값으로 한 경우가 실험결과와 잘 근접된 것으로 나타났다. 스페이스 프레임 구조설계에 있어서 이를 고려하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

3) 선행연구의 실험결과와 이 연구를 위한 실험결과가 다소 차이가 발생된 것은 구성부재의 물성 및 규격의 차이로 인한 것으로 판단된다.

보다 정확한 판단과 신뢰성 있는 데이터 구축을 위해서는 향후 다양한 규격의 원형강관과 세장비에 대한 추가적인 실험이 수반되어야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 1) 대한건축학회, 구조계획, 기문당, pp.237-266, (1997)
- 2) 강중, 불접합부를 갖는 스페이스 프레임의 구조성능에 관한 연구, 박사학위논문, 계명대학교, (2011)
- 3) T. Y. Yang, Finite Element Structural Analysis, 2nd ed. (New Jersey: Prentice-Hall, pp.72-73, (1986)
- 4) 川井忠彦, 座屈問題解析 (東京: 株式會社培風館, 52-104, (1974).
- 5) 한국 강구조 학회, 강구조 설계, 구미서관, pp.34-131, (2011)

(접수:2011.11.07. 수정:2012.02.09. 게재확정:2012.02.24)