

# 비대칭 이중곡률 스테인리스 원형강관 보-기둥의 좌굴내력에 관한 실험적 연구

## An Experimental Study on the Buckling Strength of subject to Asymmetrical Double Curvature Stainless Steel Circular Hollow Section Beam-Columns

장 호 주<sup>1)</sup> · 박 재 선<sup>2)</sup> · 양 영 성<sup>3)</sup>

Jang, Ho Ju Park, Jae Seon Yang, Young Sung

요 약 : 본 연구에서는 스테인리스 강관의 구조재로서 적용성 검토를 위해 편심 축하중을 받는 스테인리스 원형강관 보-기둥에 대한 좌굴강도와 거동을 파악하고자 한다. 주요변수는 축력과 양단 비대칭 모멘트를 받는 이중곡률 보-기둥에 세장비(細長比)와 편심비( $e/k$ )로 한 스테인리스 원형강관의 최대내력 및 변형능력 등의 역학적 특성을 규명하며, 이론해석을 통한 실험결과와 비교함으로써 스테인리스 강관 구조설계를 위한 기초 자료를 구하는데 그 목적이 있다. 실험결과를 해석결과와 비교해본 결과, 세장비 70의 편심비가 0인 시험체만이 낮고, 그 외 모든 시험체는 해석을 통한 M-P 상관곡선을 상회하는 결과를 보이니, 편심비가 작을수록 해석값에 근접하고 있어, 이론해석에서 적용한 세장비를 고려한 좌굴 계수나 강도저감계수가 스테인리스 원형강관에 대해서는 별도의 값이 적용될 가능성이 있는 것으로 판단되며, 더 많은 실험에 의해 입증되어야 할 것이다.

ABSTRACT : This study is a series of experimental investigations of the buckling strengths of eccentrically compressed, cold-formed, stainless-steel, circular, hollow-section beam columns. The principal parameters that were used in this study were the slenderness ratios ( $Lk/r = 30, 50, 70$ ) and the magnitude of eccentricity  $e$ (one way: 0, 25, 50, 75, and 100mm; the other way: 0, 12.5, 25, 37.5, and 50mm) on the asymmetrical end-moment of a double curvature. The objectives of the study were to obtain the maximum loads through an experiment and to compare the experimental behaviors with the analysis results. The ultimate buckling strength of the square section members were evaluated using a numerical method, in accordance with the bending moment-axial force(M-P) interaction curves. The behavior of each specimen was displayed in the form of the strength-displacement and moment-angle(M- $\theta$ ) relationship

핵심용어 : 스테인리스 원형강관, 축력, 양단비대칭모멘트, 이중곡률, 세장비, 편심거리, 모멘트-축력 상관곡선

KEYWORDS : stainless-steel circular hollow-section, axial force, the asymmetrical end-moment, a double curvature, slenderness ratio, magnitude of eccentricity, moment-axial force(M-P) interaction curves

### 1. 서론

최근 스테인리스 강관이 구조재로서의 장점을 가지고 있다는 인식하에 세계적으로 그 사용량이 점차 증가하고 있다. 스테인리스 강관에 대한 연구는 1988년 미국의 Missouri-Rolla 대학의 Lin, Yu, Galambos에 의해 냉간 성형된 스테인리스강 구조 부재 설계에 대한 연구가 이루어졌다.

그 결과 1990년 Rasmussen과 Hancock은 Lin, Yu,

Galambos의 연구를 기초로 스테인리스 강관 구조부재의 허용응력설계법을 제안하였으며, 1993년 스테인리스 각형과 원형강관 기둥에 대한 설계방법과 각형강관 보의 설계방법을 제안하였다.

국내에서도 스테인리스강에 대한 연구가 이루어지고 있으나, 구조설계기준에 적용되지 않아 구조용 강재로 사용할 수 없는 실정이다. 이는 스테인리스강을 구조용 강재로 사용하기 위해서는 더 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 보여 진다.

1) 교신저자, 조선대학교 건축학부 강사, 공학박사  
(Tel. 062-230-7141, Fax. 062-230-7155, E-mail: caosijang@hotmail.com)

2) 조선대학교 대학원 박사과정 수료(seumeng@paran.com)

3) 조선대학교 건축학부 교수, 공학박사(ysyang@chosun.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2010년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 토의 회담을 게재하겠습니다.

이에 본 연구에서는 스테인리스 강관의 구조재로서 적용성 검토를 위해 휨과 축력을 받는 스테인리스 원형강관 보-기둥에 대한 좌굴강도와 거동을 파악하고자 한다. 주요변수는 양단 비대칭 모멘트를 받는 이중곡률 보-기둥에 세장비(細長比)와 편심비( $e/k$ )가 0인 중심압축과 편심비 증가에 따른 스테인리스 원형강관의 최대내력 및 변형능력 등의 역학적 특성을 규명하며, 전소성 이론해석을 통한 실험값과 비교함으로써 스테인리스강관 구조설계를 위한 기초 자료를 구하는데 그 목적이 있다.

## 2. 실험 계획

이 연구에서 사용하는 스테인리스 원형강관은  $\phi$ -101.6×3.0으로 KS D 3536(기계 구조용 스테인리스 강관)에 의해 제조된 오스테나이트(austenite)계 STS 304 TKC를 사용하며, 항복강도  $F_y$ 는 205N/mm로 규정되어 있다.

### 2.1 인장강도실험 및 stub-column 압축강도실험

재료의 역학적 성질을 파악하기 위해 잔류응력이 거의 제거된 인장강도 시험편을 스테인리스 원형강관의 비용접부위에서 3개를 절취하여 인장강도실험을 실시한다. 시험편은 KS B 0801(금속재료 인장 시험편)에 규정된 12B호 시험편(원형강관)에 의해 제작하고, KS B 0802(금속재료 인장시험 방법)에 의해 실험한다.

Stub-column실험은 세장비의 영향이 거의 없으며, 잔류응력을 포함한 강관의 순수 압축력에 대한 국부좌굴내력과 항복내력을 파악하기 위한 실험으로서, 시험체 길이는 세장한 영향이 미치지 않는다고 사료되는 길이, 즉 휨 좌굴의 영향을 받지 않고 파단 되도록 Stub-column실험 규정인 미국의 SSRC(Structural Stability Research Council)의 추장에 따라 강관의 지름의 3배로 강관으로부터 시험체를 3개 절취하여 실험을 실시한다.

표 1은 원형강관 Stub-column 시험체의 단면성능으로 시험체의 실측에 의한 값이다.

표 1. Stub-column 시험체의 단면성능

구분	$D$ (mm)	$t$ (mm)	$A$ (mm <sup>2</sup> )	$L$ (mm)	$I$ (mm <sup>4</sup> )	$r$ (mm)	$S$ (mm <sup>3</sup> )	$Z$ (mm <sup>3</sup> )	$f$
SC	101.64	2.81	872	304	1,064,005	34.93	20,938	27,444	1.31

주)  $D$ : 지름,  $t$ : 두께,  $A$ : 단면적,  $I$ : 단면2차모멘트,  
 $r$ : 단면2차반경,  $S$ : 탄성단면계수,  $Z$ : 소성단면계수,  $f$ : 형상계수

시험체의 양단구속조건은 단순지지 상태로 하여 편심에 대한 영향을 최소화하고, 중심압축에 의한 등분포 하중을 받도록 시험체 하단에 구좌(球座, spherical block)를 설치하여 Universal Testing Machine(이하 U.T.M이라함)으로 단 순 재하 한다.

측정방법은 시험체의 변형도를 측정하기 위해 스트레인게이지(wire strain gauge, 이하 W.S.G라 함)를 시험체 중앙부에 부착하고, 전체적인 축변위를 측정하기 위해 변위계(displacement transducer, 이하 D.T라 함)를 설치한다.

### 2.2 보-기둥실험

축력과 모멘트를 동시에 받는 보-기둥은 등가인 편심 축하중이 작용한다고 생각할 수 있다. 따라서 이 연구에서는 실제 보-기둥의 응력상태를 가정한 편심압축 기둥에 대한 실험을 실시하며, 시험체는 비탄성역에서 좌굴된다고 사료되는 세장비( $L_k/r$ ) 30, 50, 70으로 하며, 각 세장비 별로 편심비( $e/k$ )가 일단은 0, 2, 4, 6, 8이고, 타단은 이에 절반값을 취하는 양단 비대칭모멘트를 받는 이중곡률 보-기둥을 총 15개를 제작한다.

시험체 계획은 표 2(시험체 실측에 의한 값)와 같고, 그림 1은 시험체의 가력도를 나타낸 것이다.

표 2. 보-기둥 시험체 계획

시험체명	$k$ (mm)	$L_k/r$	$L_0$ (mm)	$e$ (mm)		$e/k$		$L$ (mm)	$K$	$L_k$ (mm)
				일단	타단	일단	타단			
C-30-0	30	816	816	0	0	0	0	1,045	0.976	1,020
C-30-25				25	12.5	2	1			
C-30-50				50	25.0	4	2			
C-30-75				75	37.5	6	3			
C-30-100				100	50.0	8	4			
C-50-0	12.77	50	1,514	0	0	0	0	2,445	0.989	2,417
C-50-25				25	12.5	2	1			
C-50-50				50	25.0	4	2			
C-50-75				75	37.5	6	3			
C-50-100				100	50.0	8	4			
C-70-0	70	2,211	2,211	0	0	0	0	2,772	0.997	2,763
C-70-25				25	12.5	2	1			
C-70-50				50	25.0	4	2			
C-70-75				75	37.5	6	3			
C-70-100				100	50.0	8	4			

주)  $k$ : 단면핵반경,  $L_0$ : 순수 시험체 길이,  $e$ : 편심거리,  $e/k$ : 편심비  
 $L$ : 좌굴길이( $L_0 + \text{end plate}(9\text{mm}, 12\text{mm}) \times 2 + \text{knife edge}(105\text{mm}) \times 2$ ),  
 $K$ : 유효좌굴길이계수,  $L_k$ : 유효좌굴길이( $L \times K$ )

가력방법은 최대용량 1000kN의 U.T.M으로 양단 단순지

지 조건하에서 재하하며, 시험체 양단은 한 방향으로만 회전 이 가능하면서 단부구속을 최소화할 수 있는 나이프에지 (knife edge)를 사용한다. 이때 양단에 부착된 엔드플레이트와 나이프에지로 인한 강역(剛域)의 영향을 고려하여 등가좌굴길이( $L_k$ )를 구하며, 세장비는 강관 단면의 단면2차반경( $r$ )을 사용한다.

또한 시험체는 단부에 편심비가 0인 시험체는 단부모멘트의 영향을 거의 받지 않아 두께 9mm인 엔드플레이트(end plate)를 브래킷이 없이 용접하고, 편심비가 2 이상의 시험체는 단부모멘트에 의해 볼트로 연결된 강역의 변형을 최소화하기 위해 두께 12mm인 엔드플레이트와 브래킷을 4면의 중심부에 용접하여 나이프에지와 볼트를 체결하여 고정한다.

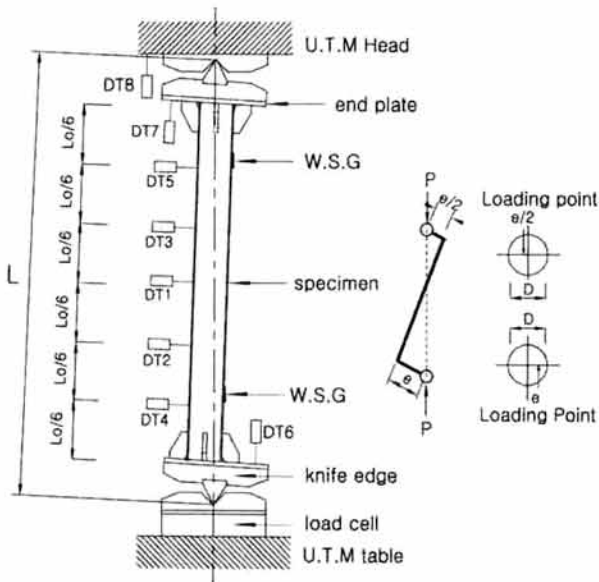


그림 1. 보-기둥 시험체 가력도

측정방법은 최대변형이 예상되는 부분에 W.S.G를 부착하고, 축변위, 횡변위, 각변위 등을 측정하기 위해 그림 1과 같이 D.T를 설치한다.

### 3. 이론해석

#### 3.1 해석가정

이론해석을 통한 내력평가방법은 강관기둥에 일정축력을 유지한 후 모멘트가 작용되면 모멘트하중의 증가에 따라 강관은 전소성응력상태에 있다고 가정하여 내력을 평가한다.

축력과 모멘트 작용시 그림 2의 각형강관 단면요소 전소성 응력분포를 중립축의 위치에 따라 힘의 평형조건으로부터 모멘트( $M$ )와 축력( $P$ )의 상관관계( $M-P$  interaction)를 유도하여

세장비의 변화에 따른  $P-\delta$  영향(모멘트 확대계수,  $A_f$ )을 고려하여 구한다.

원형강관 보-기둥의 최대내력 평가시 다음과 같은 사항을 가정한다.

- ① 단면 형태는 원형 중공단면으로 한다.
- ② 원형강관 보-기둥의 단면은 변형이후에도 평면을 유지한다.
- ③ 전소성응력상태시 단면내의 인장응력과 압축응력은 모두 직사각형 응력분포를 한다.
- ④ 부재의 원처짐 및 편심하중에 의한 영향은 모멘트 확대계수( $A_f$ )에 강도저감계수  $\phi=0.85$ 를 적용한다.

원형강관은 축력과( $P$ ) 편심으로 인해 편심모멘트( $M$ )가 작용해서 강관기둥의 단면이 전소성상태가 될 때 내력의 계산은 소성중립축(PNA, Plastic Neutral Axis)의 거리( $X_n$ ) 위치에 따라 세가지 영역으로 나누어진다.

- a)  $X_n < -\frac{d}{2}$ , b)  $-\frac{d}{2} \leq X_n < \frac{d}{2}$ , c)  $\frac{d}{2} \leq X_n$

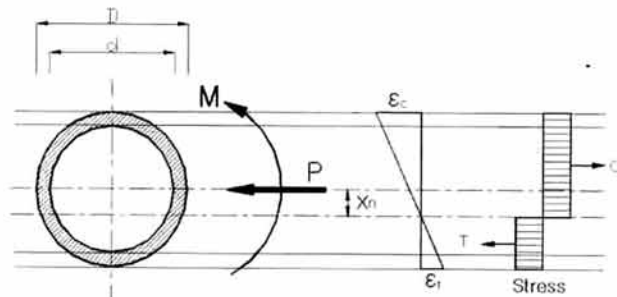


그림 2. 전소성응력분포

그림 2에서와 같이 중립축이  $-\frac{d}{2} \leq X_n < \frac{d}{2}$ 에 있다고 가정하고, 전소성상태시 단면내의 압축력( $C$ )과 인장력( $T$ )은 다음과 같다.

$$T = 2 \left[ \int_{X_n}^{\frac{d}{2}} \{A(y) - B(y)\} dy + \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{D}{2}} A(y) dy \right] \sigma_y \quad (1)$$

여기서,  $A(y) = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - y^2}$

$$B(y) = \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - y^2}$$

$$C = 2 \left[ \int_{-\frac{D}{2}}^{\frac{d}{2}} A(y) dy + \int_{\frac{d}{2}}^{X_n} \{A(y) - B(y)\} dy \right] \sigma_y \quad (2)$$

중립축을 중심으로 단면내에 분포하고 있는 각 응력에 의한 모멘트는 다음식과 같다.

$$M_T = 2 \left[ \int_{X_n}^{\frac{d}{2}} \{A(y) - B(y)\} (y - X_n) dy \right]$$

$$+ \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{D}{2}} A(y)(y - X_n) dy \Big] \sigma_y \quad (3)$$

$$M_C = 2 \left[ \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} A(y)(X_n - y) dy + \int_{\frac{d}{2}}^{X_n} \{A(y) - B(y)\}(X_n - y) dy \right] \sigma_y \quad (4)$$

단면내의 힘의 평형에 의한 축력과 휨모멘트의 관계는 다음 식과 같다.

$$P = C - T \quad (5)$$

$$M = M_T + M_C - P \cdot (X_n) \quad (6)$$

여기서,  $M_T$  : 인장축 휨모멘트

$M_C$  : 압축축 휨모멘트

세장비의 변화에 따른 세장효과를 고려한 축력( $P_{PC}$ )과 모멘트( $M_{PC}$ )는 최대내력( $P$ ,  $M$ )에 좌굴계수( $\alpha$ )와 모멘트확대계수( $A_F$ )를 고려하여 구하면 다음과 같다.

$$P_{PC} = P \times \alpha \quad (7)$$

$$M_{PC} = M \times \frac{1}{A_F} = M \times \left( 1 - \frac{P}{\phi \times P_e} \right) \quad (8)$$

여기서,  $\alpha$  : 세장비를 고려한 좌굴계수( $0.658^{\lambda_c^2}$ )

$$\lambda_c : \text{무차원세장비} \left( \frac{KL}{r\pi} \times \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \right)$$

$$P_e : \text{Euler 좌굴하중} \left( \frac{\pi^2 EI}{L_k^2} \right)$$

### 3.2 해석결과

표 3은 해석결과이고, 그림 3은 이론해석을 통해 구한 스테인리스 원형강관 부재의 축력-모멘트 상관관계( $P$ - $M$  interaction) 곡선이다.

여기서 항복축력( $P_y$ )는 stub-column의 0.1% 윅셋 내력, 전소성모멘트( $M_p$ )는 stub-column의 실측에 의해 구한 소성 단면계수( $Z$ )를 이용하여 이론식에 적용한다.

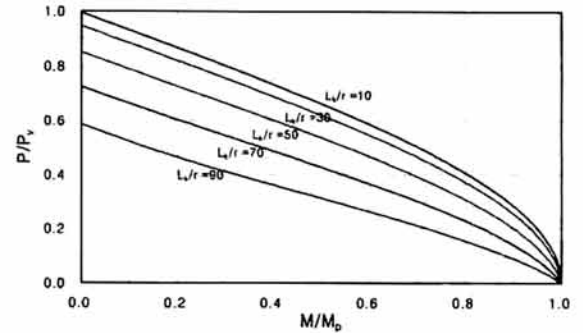


그림 3. 이론해석을 통한 P-M 상관곡선

표 3. 보-기둥 해석결과

시험체명	$e/k$	$P_u$ (kN)	$M_u$ (kN·m)	$P_u/P_y$	$M_u/M_p$
C-30-0	0	259.570	0	0.948	0
C-30-25	2	171.009	4.262	0.625	0.495
C-30-50	4	123.422	6.178	0.451	0.717
C-30-75	6	94.785	7.109	0.346	0.825
C-30-100	8	76.292	7.604	0.279	0.882
C-50-0	0	233.284	0	0.852	0
C-50-25	2	155.784	3.888	0.569	0.451
C-50-50	4	114.658	5.742	0.419	0.666
C-50-75	6	89.525	6.709	0.327	0.779
C-50-100	8	72.966	7.258	0.266	0.842
C-70-0	0	198.785	0	0.726	0
C-70-25	2	134.840	3.361	0.492	0.390
C-70-50	4	101.884	5.093	0.372	0.591
C-70-75	6	81.270	6.089	0.297	0.707
C-70-100	8	67.319	6.702	0.246	0.778

주)  $P_u$  : 해석에 의한 최대하중,  $M_u$  : 해석에 의한 최대모멘트

표 4. 인장강도 및 Stub-column 실험결과

구 분	$\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\epsilon_u$	0.1% 윅셋				0.2% 윅셋				$s$ (%)	$\epsilon$ (%)	
			$\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_y/\sigma_u$	$\epsilon_y$	$s\sigma_y/\sigma_y$	$\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_y/\sigma_u$	$\epsilon_y$	$s\sigma_y/\sigma_y$			
Coupon	1	841	0.5133	340	0.4047	0.0031	/	390	0.4643	0.0044	/	45.15	53.00
	2	858	0.4860	402	0.4678	0.0032		439	0.5112	0.0044		43.82	52.70
	3	850	0.4846	350	0.4119	0.0030		390	0.4590	0.0043		43.37	52.20
	평균	850	0.4946	364	0.4183	0.0031		406	0.4781	0.0044		44.11	52.63
Stub-column	1	448	0.0177	307	0.6849	0.0024	0.9029	353	0.7864	0.0036	0.9051	/	/
	2	452	0.0169	314	0.6948	0.0023	0.7810	352	0.7796	0.0034	0.8018		
	3	448	0.0155	322	0.7182	0.0022	0.9200	363	0.8094	0.0034	0.9308		
	평균	450	0.0167	314	0.6993	0.0023	0.8680	356	0.7918	0.0035	0.8792		

주)  $\sigma_u$  : 최대(인장)내력,  $\epsilon_u$  : 최대내력시 변형도,  $\sigma_y$  : 항복내력,  $\sigma_y/\sigma_u$  : 항복비,  $\epsilon_y$  : 항복내력시 변형도,  $s\sigma_y$  : Stub-column의 항복내력,  $\sigma_y$  : 인장강도 시험편의 항복내력,  $s$  : 단면수축율,  $\epsilon$  : 연신율

#### 4. 실험결과분석

##### 4.1 인장강도실험 및 stub-column압축강도실험

인장강도 및 stub-column 실험결과는 최대내력( $\sigma_u$ ), 항복내력( $\sigma_y$ ), 항복비( $\sigma_y/\sigma_u$ ), 연신율( $\epsilon$ ) 등은 표 4와 같이 나타났고, 응력-변형도 곡선은 그림 4에 나타냈다. 인장강도 실험결과 시험편에 항복흐름(yield flow)이 나타나지 않았고, 스테인리스 강관은 항복이후에도 점차 내력이 증가하여 인장내력이 평균 850N/mm로 매우 높은 값과 최대내력시 변형도는  $0.5(\times 10^6)$  strain, 이하 단위생략)정도의 값을 보였다.

스테인리스 강관의 각각 산정된 항복내력을 KS에 규정된 스테인리스 강관 항복기준강도와 비교해 보면, 0.1% 윗셋 내력으로 산정된 스테인리스 강관의 항복내력의 평균은 364N/mm로 기준내력보다 각각 1.78배 높은 값을 보였으며, 0.2% 윗셋 내력으로 산정된 항복내력은 406N/mm로 기준내력보다 2배 정도의 값으로 높게 나타났다. 연신율 또한 52.63%로 매우 높은 연신능력을 보였다.

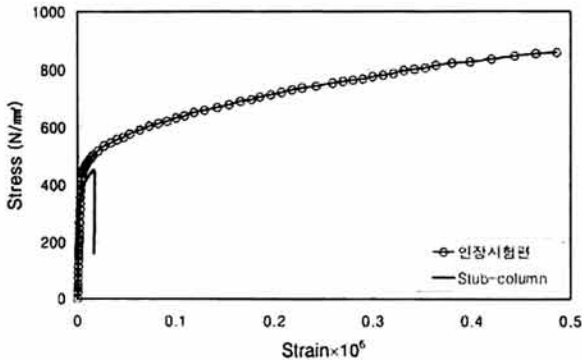


그림 4. 응력-변형도 곡선

Stub-column 실험에 의한 평균최대내력은 450N/mm이고, 최대내력시 변형도는 0.0167로 나타났다. 0.1% 윗셋 평균항복내력은 314N/mm, 항복비 0.70이고, 0.2% 윗셋 항복내력은 356N/mm, 항복비 0.87로 나타났다. Stub-column의 항복내력을 인장강도실험에 의한 항복내력으로 나누어 비교한 결과, 각각 0.87과 0.88로 나타났는데, 이는 소성가공 및 용접에 의한 잔류응력 등의 영향으로 판단된다.

그림 4는 인장강도 시험편과 stub-column의 응력-변형도 곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 인장강도 시험편의 곡선은 항복내력 이후 최대내력까지 꾸준한 내력증가와 아주 우수한 변형 능력을 보여주고 있으나, stub-column 곡선은 항복내력을 지나 소성변형을 보이다 최대내력에 이후 국부좌굴에 의한 내력저하 보이며 파단에 이르렀다. 이와 같이

인장시험편과 stub-column의 강도와 변형능력이 크게 차이를 보이는 것은 스테인리스 원형강관의 소성가공과 지름-두께비의 영향으로 판단되어 진다.

##### 4.2 보-기둥 실험결과

보-기둥의 좌굴내력은 실험에 의해 얻어진 기둥의 좌굴하중에 의해서 결정되는 것으로 한다. 각 시험체의 최대내력과 국부좌굴내력, 편심과 좌굴하중에 의해 구해지는 모멘트, 최대내력에 대한 비 등을 표 5에 나타냈다.

###### 4.2.1 최대좌굴내력 및 좌굴모멘트

최대좌굴내력은 실험에서 얻어진 보-기둥이 견딜 수 있는 최대하중에 의해 산정되고, 모든 시험체는 부재좌굴에 의해 결정되었다.

실험결과, 보-기둥의 최대좌굴내력은 세장비 30에 편심비가 0인 C-30-0 시험체가 344N/mm로 가장 높은 값을 보였고, 세장비가 50에 편심비가 6인 C-50-100 시험체가 가장 낮은 90N/mm의 결과 값을 보였다. 위의 결과 값에서 보-기둥의 최대좌굴내력은 세장비와 편심비가 증가할수록 내력저하현상이 뚜렷하게 나타났다.

표 5. 보-기둥 실험결과

시험체명	$P_u$ (kN)	$P_{loc}$ (kN)	$\sigma_u$ (N/mm²)	$\sigma_{loc}$ (N/mm²)	$M_1$ (kN·m)	$M_2$ (kN·m)	$\sigma_u / \sigma_s$
C-30-0	300	209	344	239	0	0	0.76
C-30-25	233	192	267	220	2.91	5.83	0.59
C-30-50	174	164	200	188	4.35	8.71	0.44
C-30-75	145	141	166	162	5.42	10.85	0.37
C-30-100	110	106	126	122	5.48	10.97	0.28
C-50-0	259	-	297	-	0	0	0.66
C-50-25	181	-	208	-	2.27	4.53	0.46
C-50-50	158	-	181	-	3.95	7.90	0.40
C-50-75	110	81	126	93	4.12	8.23	0.28
C-50-100	79	71	90	82	3.92	7.85	0.20
C-70-0	196	-	224	-	0	0	0.50
C-70-25	153	-	176	-	1.91	3.83	0.39
C-70-50	116	-	133	-	2.89	5.79	0.30
C-70-75	108	-	123	-	4.04	8.07	0.27
C-70-100	81	-	93	-	4.07	8.13	0.21

주)  $P_u$  : 최대좌굴하중,  $P_{loc}$  : 국부좌굴하중.

$\sigma_u$  : 최대내력,  $\sigma_{loc}$  : 국부좌굴내력.

$M_1$  : 편심거리와 좌굴내력에 의해 구해진 작은 쪽 모멘트.

$M_2$  : 편심거리와 좌굴내력에 의해 구해진 큰 쪽 모멘트.

$\sigma_{sc}$  : stub-column 최대내력

(-) : 국부좌굴없음

그림 5는 세장비별로 편심비 변화에 따른 최대좌굴내력을 나타내는 것으로 각 세장비의 시험체 모두 편심비가 증가할수록 거의 일정한 내력저하를 보이고 있다.

세장비30 시험체에 비해 세장비50 시험체는 71.54~90.71%의 내력값을 보이고, 세장비70 시험체는 65.17~74.39%의 내력값으로 편심비가 증가할수록 점차 저하비율이 감소했다.

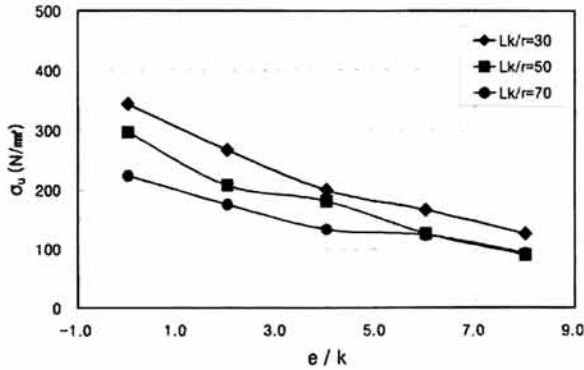


그림 5. 편심비 변화에 따른 최대좌굴내력

그림 6은 세장비의 변화에 따라 각 편심비의 최대좌굴내력을 비교한 곡선으로서 각 편심비 모두 세장비가 증가할수록 내력저하현상을 보이고 있을 뿐만 아니라, 편심비가 커질수록 최대좌굴내력은 작게 나타나나 세장비 증가에 따른 내력저하는 점점 완만해짐을 알 수 있다.

이는 편심비의 증가에 따른 기둥의 최대좌굴내력이 압축력 보다는 휨의 영향이 상대적으로 커지기 때문으로 판단된다.

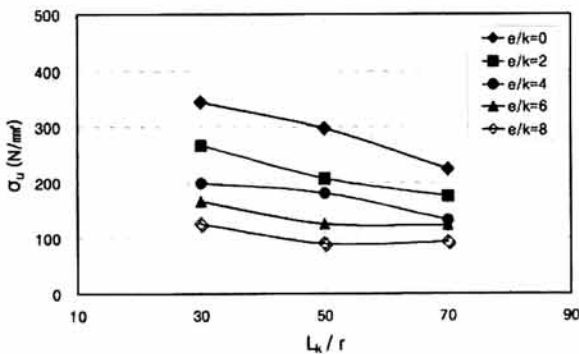


그림 6. 세장비 변화에 따른 최대좌굴내력

그림 7은 편심비의 변화에 따른 단부모멘트를 나타낸 것으로 각 세장비의 시험체 모두 편심비의 증가에 따라 편심비 6까지는 모멘트의 증가를 보이고 있으나 편심비 6이상은 거의 모멘트가 일정한 것으로 나타났다. 세장비30 시험체에 비해 세장비50 시험체는 71.54~90.71%의 모멘트의 값을 보였으며, 세장비70 시험체는 65.69~74.39%로 세장비가 증가할

수록 모멘트는 저하되는 것으로 나타났다.

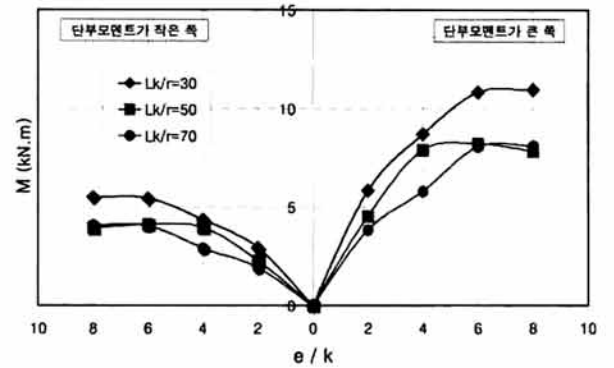


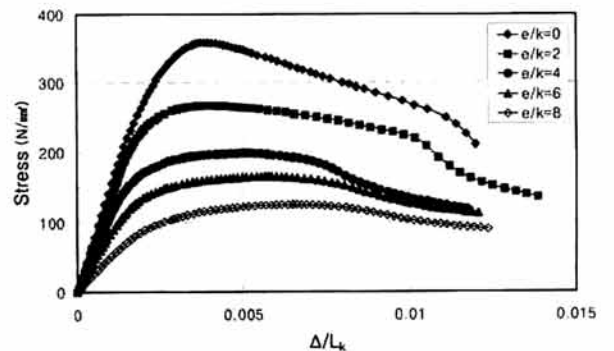
그림 7. 편심비의 변화에 따른 단부모멘트

국부좌굴내력의 산정은 실험결과 응력-변위 곡선에서 최대내력 이후 급격한 내력저하가 시작되는 점을 찾아 산정하였으나, 세장비30 시험체와 편심비가 큰 세장비 50 일부 시험체는 부재좌굴이후 국부좌굴이 발생하였으나 편심비가 작은 세장비50 일부 시험체와 세장비70 시험체는 부재좌굴에 의한 변위의 증가가 있을 뿐 국부좌굴이 발생하지 않았다.

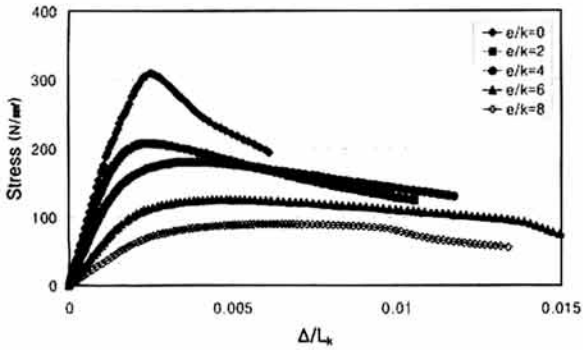
그러나 모든 시험체는 최대내력 이후 국부좌굴이 발생할 것이고, 세장비30 시험체의 국부좌굴점은 239N/mm²~112N/mm²의 결과 값을 보였다. 이 결과 값은 최대좌굴내력의 70%~98% 정도로 편심비가 증가할수록 최대내력에 점점 근접하는 값을 보였다. 또한 보-기둥의 최대좌굴내력을 stub-column의 최대내력으로 나누어 비교하였을 때, 0.76~0.21로 세장비와 편심비가 증가할수록 더 큰 내력저하현상을 보였다.

#### 4.2.2 내력-변위 관계

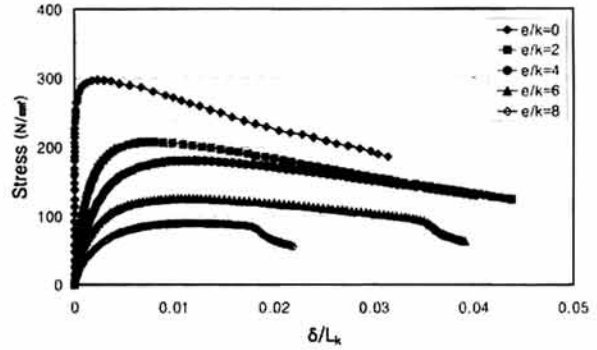
보-기둥 시험체의 내력-변위 곡선은 세장비 대해 각각의 편심비에 따라 그림 8, 9에 나타냈으며, 종축은 좌굴내력, 횡축은 축변위( $\Delta$ )와 횡변위( $\delta$ )를 기둥의 유효좌굴길이( $L_k$ )로 무차원화 하였다.



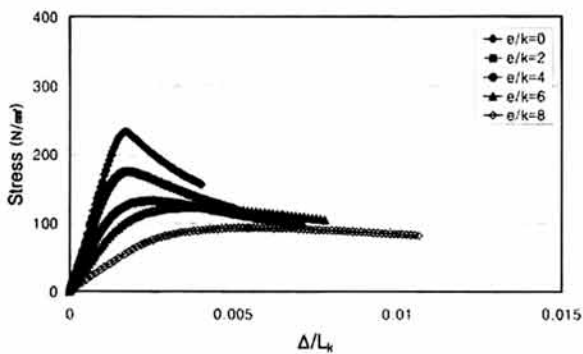
(a) 세장비 30시험체



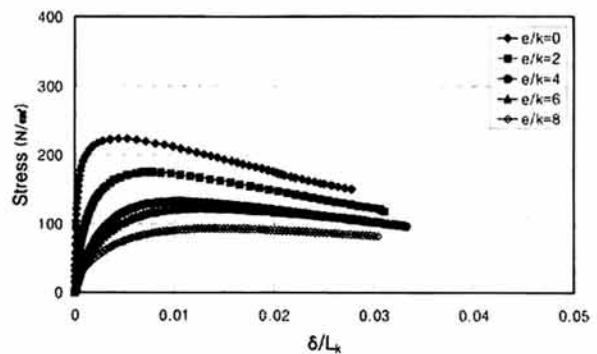
(b) 세장비 50시험체



(b) 세장비 50시험체



(c) 세장비 70시험체



(c) 세장비 70시험체

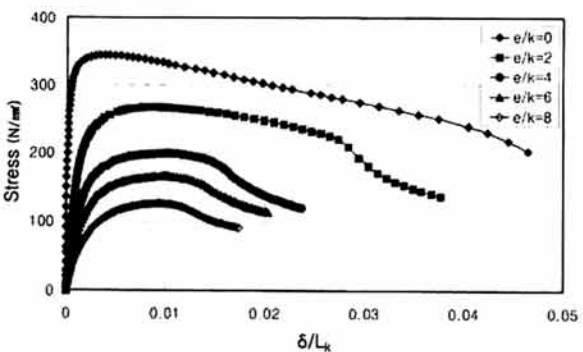
그림 8. 내력-축변위 곡선

그림 9. 내력-횡변위 곡선

그림 8과 같이 각각의 세장비에 대해 편심비가 증가할수록 좌굴내력은 감소하고, 축변위는 편심비 0에 비해 세장비30은 1.06~1.79배, 세장비50은 1~2.50배, 세장비70은 1.04~3.20배로 편심비가 증가할수록 증가함을 알 수 있다. 또한 세장비의 증가에 따라 축변위는 점차 감소하고 있으며, 최대 좌굴내력시 축변위의 감소폭은 세장비30 시험체를 기준으로 세장비50 시험체는 60.30~94.73%, 세장비70 시험체는 44.77~82.01%로 감소하였다.

그림 9의 횡변위는 최대좌굴내력시 각 세장비별로 편심비가 증가할수록 횡변위가 크게 증가하는 결과를 보였으며, 편심비 0에 비해 각각의 편심비는 세장비30은 2.43~2.98배, 세장비50은 2.98~5.05배, 세장70은 1.32~2.62배 편심비가 증가할수록 큰 값을 보였다. 또한 세장비의 증가에 따라서는 세장비30에 비해 세장비50 시험체는 6~25%, 세장비70은 5~55% 정도 증가폭을 보였다.

보-기둥의 내력과 변위를 비교한 결과, 세장비가 증가할수록 압축력보다는 휨의 영향을 더 크게 받아 원형강관의 부재 좌굴로 인한 좌굴내력과 축변위가 감소하고, 세장효과와 편심비의 증가에 의한 단부의 모멘트, 그리고 항복강도 이후 인장강도까지 꾸준한 내력증가에 따른 소성변형능력이 횡변위를 증가시키는 것으로 사료된다.



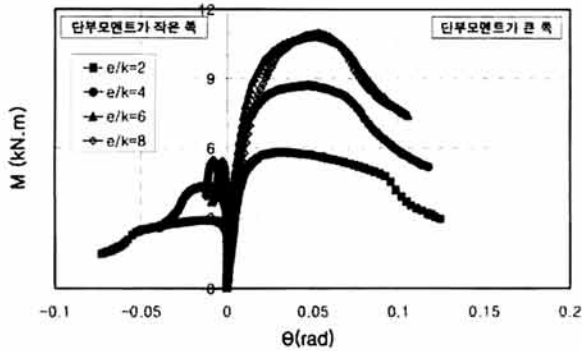
(a) 세장비 30시험체

#### 4.2.3 모멘트-회전각 관계

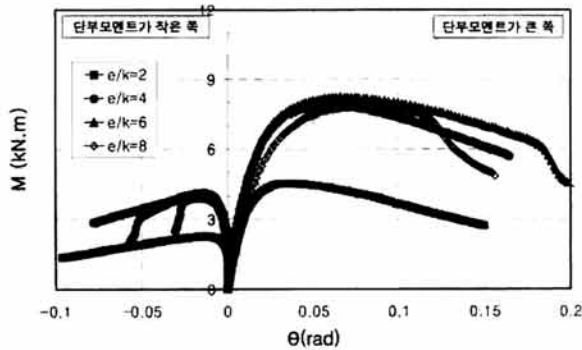
세장비에 따른 편심기둥 시험체의 모멘트와 변형을 알아보기 위해 편심비에 따라 전소성모멘트로 무차원화한 모멘트를 시험체 단부 회전각( $\theta$ )과의 관계로 그림 10에 나타냈다.

그림 10과 같이 각 세장비에 대한 시험체 모두 편심비의 증가에 따른 모멘트와 회전각은 증가하는 것으로 나타났으며, 최대좌굴모멘트시 회전각은 편심비0인 시험체에 비해 세장비

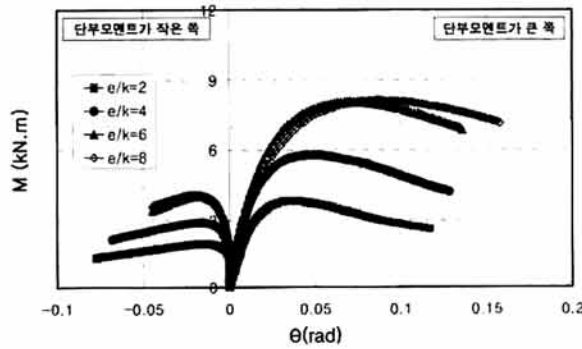
30은 1.50~1.72배, 세장비50은 1.85~2.30, 세장비70은 1.39~2.41배로 편심비 증가에 따라 증가함을 보였다.



(a) 세장비 30시험체



(b) 세장비 50시험체



(c) 세장비 70시험체

그림 10. 모멘트-회전각 곡선

또한 세장비의 증가함에 따라서도 최대좌굴모멘트시 세장비 30을 기준으로 세장비50은 1.08~1.45배, 세장비70은 1.05~1.60배 증가함을 보이나, 세장비가 증가할수록 증가폭은 감소하는 것으로 나타났다.

보-기둥은 편심비와 세장비가 증가할수록 모멘트와 회전각은 증가되지만, 그 증가폭은 점차 감소하는 것으로 나타났다. 이는 세장효과와 편심에 의한 단부모멘트의 증가로 축력보다는 휨의 영향이 상대적으로 증대됨에 따라 보-기둥의 좌굴에 영향을 주는 것으로 판단된다.

### 4.3 실험결과와 해석결과의 비교

보-기둥은 모멘트와 축방향 압축력을 동시에 받는 부재로서 이때의 모멘트는 부재의 단부에 작용하는 편심에 의해 발생하고 또는 부재에 직접 작용하는 횡하중에 의해 생길 수 있다. 이런 경우에는 편심기둥에서 축방향 압축력보다는 모멘트가 주요 좌굴요인으로 작용하게 된다.

이에 이론해석을 통한 해석값과 실험결과값을 비교한 결과는 표 6에 나타냈으며, 실험값을 이론값으로 나누어 편심비에 따라 그림 11에 나타냈다.

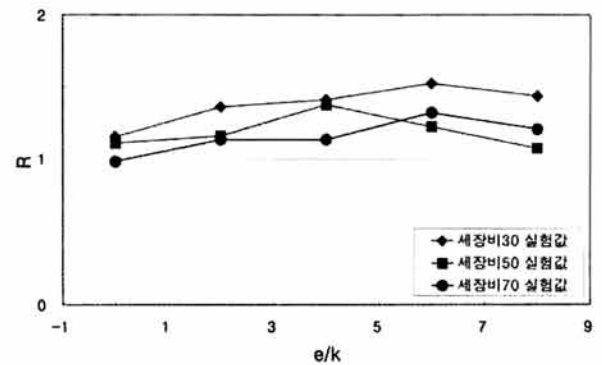


그림 11. 실험결과와 해석결과 비교

표 6. 보-기둥 실험결과와 해석결과

시험체명	실험값(A)		해석값(B)		A/B		
	$P_u$ (kN)	$M_u$ (kN·m)	$P_u$ (kN)	$M_u$ (kN·m)	$P_u$ (kN)	$M_u$ (kN·m)	R
C-30-0	300	0	260	0	1.16	0	1.16
C-30-25	233	5.83	171	4.26	1.36	1.37	1.36
C-30-50	174	8.71	123	6.18	1.41	1.41	1.41
C-30-75	145	10.85	95	7.11	1.53	1.53	1.53
C-30-100	110	10.97	76	7.60	1.44	1.44	1.44
C-50-0	259	0	233	0	1.11	0	1.11
C-50-25	181	4.53	156	3.89	1.16	1.16	1.16
C-50-50	158	7.90	115	5.74	1.38	1.38	1.38
C-50-75	110	8.23	90	6.71	1.23	1.23	1.23
C-50-100	79	7.85	73	7.26	1.08	1.08	1.08
C-70-0	196	0	199	0	0.98	0	0.98
C-70-25	153	3.83	135	3.36	1.14	1.14	1.14
C-70-50	116	5.79	102	5.09	1.14	1.14	1.14
C-70-75	108	8.07	81	6.09	1.32	1.33	1.32
C-70-100	81	8.13	67	6.70	1.21	1.21	1.21

주)  $R = \sqrt{P_u^2 + M_u^2}$

실험결과값이 해석값에 비해 모멘트와 축력은 세장비70의 편심비0인 시험체만이 2%정도 낮은 값을 보이나, 그 외 시험



체는 8~53% 내외의 높은 결과값을 보였다.

또한 편심비가 작을수록 해석값에 근접하고 있는데 이는 전소성이론해석에서 적용한 세장비를 고려한 좌굴계수가 일반구조용강에 관한 것으로 스테인리스 원형강관에 대해서는 별도의 좌굴계수가 적용될 가능성이 있는 것으로 사료된다.

그림 12는 stub-column의 0.1% 율셋 내력을 이용하여 세장 효과를 고려한 편심기둥의 모멘트와 축력의 상관관계와 각 시험체의 실험결과를 나타낸 곡선으로서 stub-column의 항복내력과 시험체의 전소성모멘트로 무차원화 한 것이다.

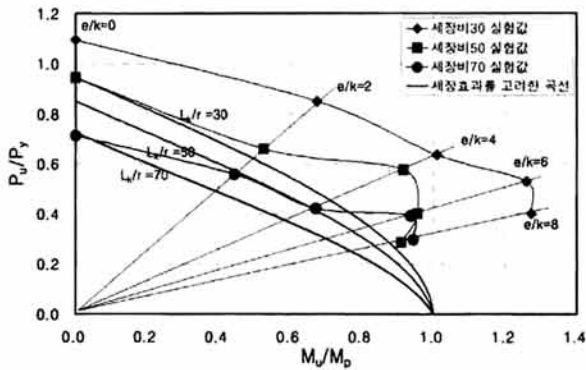


그림 12. M-P 상관곡선

이론해석결과에 의한 세장비 30, 50, 70의 M-P 상관곡선과 각 보-기둥시험체의 실험결과를 세장비(30, 50, 70)에 따라 그림 12에 나타냈는데, 세장비 70의 편심비가 0인 시험체만이 낮고, 그 외 모든 시험체는 해석을 통한 M-P 상관곡선을 상회하는 결과를 보이고 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 스테인리스 강관의 구조재로서 적용성 검토를 위해 스테인리스 원형강관 보-기둥에 대한 좌굴강도와 거동을 세장비(細長比)와 편심비( $e/k$ ) 변수로 한 실험과 이론해석을 비교함으로써 스테인리스강관 구조설계를 위한 기초 자료를 구하는데 그 목적이 있다. 실험결과를 해석결과와 비교, 분석하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 인장강도와 Stub-column 실험결과, 항복내력이 KS 규격항복강도보다 훨씬 높게 나타남으로 스테인리스 강재를 건축구조용으로 사용시 별도의 항복강도 규정이 필요할 것으로 사료된다.
- (2) 보-기둥의 최대내력은 세장비와 편심비가 증가할수록 내력저하현상이 뚜렷하게 나타났으며, 좌굴모멘트는 세장비가 증가함에 따라 감소하고, 편심비의 증가에 따라 편심비 6까지는 모멘트의 증가를 보이고 있으나 편심비

6이상은 거의 모멘트가 일정한 것으로 나타났다. 이는 세장비 증가에 따른 세장효과로 휨의 영향이 상대적으로 커지기 때문으로 판단된다.

- (3) 내력과 변위를 비교한 결과, 세장비가 증가할수록 압축력보다는 휨의 영향을 더 크게 받아 원형강관의 부재좌굴로 인한 좌굴내력과 최대내력시 축변위가 감소하고, 세장효과와 편심비의 증가에 의한 단부의 모멘트로 휨변위가 증가하는 것으로 판단된다.
- (4) 모멘트-회전각 관계에서 편심비와 세장비가 증가할수록 모멘트와 회전각은 증가되지만, 그 증가폭은 점차 감소하는 것으로 나타났다. 이는 세장효과와 편심에 의한 단부모멘트의 증가로 축력보다는 휨의 영향이 상대적으로 증대됨에 따라 보-기둥의 좌굴에 영향을 주는 것으로 판단된다.
- (5) 실험결과를 해석결과와 비교해본 결과, 세장비 70의 편심비가 0인 시험체만이 낮고, 그 외 모든 시험체는 해석을 통한 M-P 상관곡선을 상회하는 결과를 보이나, 편심비가 작을수록 해석값에 근접하고 있어, 이론해석에서 적용한 세장비를 고려한 좌굴계수가 스테인리스 원형강관에 대해서는 별도의 값이 적용될 가능성이 있는 것으로 판단되며, 더 많은 실험에 의해 입증되어야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 지역혁신사업의 연구비 지원(과제번호#08지역기술혁신 B01-02)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

대한건축학회(2005) 강구조 한계상태 설계기준 및 해설  
 대한건축학회(1998) 강관구조 설계기준 및 해설  
 대한건축학회(1999) 냉간성형강 구조설계기준 및 해설  
 일본스테인리스구조건축협회(1995) 스테인리스건축구조 설계시공기준·동해설  
 장인화, 임성우(2003) 스테인리스 304 강재의 국부좌굴에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 제15권1호, pp.51~57  
 이명재, 김희동(2005) 스테인리스 각형강관기둥의 최대내력, 한국강구조학회논문집, 제17권1호, pp.73~82  
 장호주, 서성연, 양영성(2005) 축력과 양단대칭모멘트를 받는 스테인리스 원형강관 기둥의 좌굴내력에 관한 실험적 연구, 대한건축학회논문집 구조계, 제21권3호, pp.69~76  
 장호주, 서성연, 양영성(2005) 편심압축력을 받는 스테인리스

원형강관 기둥의 곡률형상에 따른 좌굴내력에 관한 실험적 연구, 대한건축학회논문집 구조계, 제21권3호, pp.77~84

W.F.Chen and T.Atсутa (1976) Theory of Beam-Columns, Mc Graw-Hill Inc.

Roik K., Bergmann R. (1977) Steel Column Design, Stability of Steel Structures-Preliminary report, pp.339~348

(접수일자 : 2009. 3. 28 / 심사일 2009. 4. 20 / 게재확정일 2009. 6. 8)