

## 편심압축하중을 받는 사각튜브의 분기세장비

### Bifurcation Criterion in Eccentrically Compressed Rectangular Tubes

김천욱\*, 한병기\*\*, 정창현\*\*\*, 김치균\*\*\*\*  
Chonwook Kim, Byoungkee Han, Changhyun Jeong, Chikyoon Kim

#### ABSTRACT

This paper describes the collapse characteristics of the rectangular tube under eccentric compressive load. Overall buckling stress and bifurcation criterion (slenderness ratio) are investigated. Modified secant formula(MSF) is proposed to decide overall buckling stress. The bifurcation criterion which can distinguish between the local and overall buckling mode shapes is suggested by equating the local and overall buckling stresses. Additionally the effect of initial imperfection on bifurcation criterion is investigated.

주요기술용어 : Local buckling(국부좌굴), Overall buckling(전체좌굴), Eccentric compressive load(편심압축하중), MSF(수정된 시컨트 공식), Bifurcation Slenderness Ratio(분기세장비)

#### 1. 서론

사각튜브는 차체부재로 오랫동안 활용되어 왔으며, 사각튜브의 압괴에 대한 연구는 충돌에너지 흡수부재 측면에서 주로 연구되었다. 사각튜브는 길이가 충분히 작아지면 튜브를 구성하고 있는 판요소들이 좌굴되는 국부좌굴거동(local buckling behavior)을 보이는데 이러한 특성은

자동차가 충돌할 때 충돌에너지를 흡수하도록 하는데 이용된다. 즉 자동차의 측면부재와 같은 에너지 흡수용 부재들은 충돌에너지를 소성변형 에너지로 최대한 흡수하기 위해서는 전체좌굴(overall buckling)보다는 국부좌굴(local buckling)이 발생하는 것이 유리하다.<sup>[1,2]</sup> 이와같이 축방향 압축하중을 받는 부재는 세장비에 따라 최대좌굴응력은 물론이고 좌굴거동의 차이가 있으므로, 사용목적에 적합한 설계를 하기 위해서는 부재의 전체좌굴과 국부좌굴을 구분하는 분기세장비(bifurcation criterion)에 대한 해석이 필요하다.

좌굴형태를 구분하는 분기세장비는 기둥의 단면형상과 함께 양단의 경계조건에 따라 달라지

---

\* 정회원, 연세대학교 기계공학과  
\*\* 정회원, 홍익대학교 기계공학과  
\*\*\* 연세대학교 기계공학과 대학원  
\*\*\*\* 남부대학교 자동차기계공학과

로 이에 대한 연구가 필요하다. 사각튜브의 경우 세장비가 상당히 작은 범위에서는 국부좌굴이 되며, 이때의 최대응력은 튜브의 후폭비( $t/b$ )의 영향을 받고 있다. 그리고 세장비가 분기세장비보다 크면 전체좌굴이 되며, 이때의 최대응력은 세장비와 단면형상, 탄성계수 등의 영향을 받고 있다.<sup>[3-4]</sup>

본 연구에서는 박판 직각튜브가 편심압축하중을 받을 때 일어나는 압축붕괴거동과 전체좌굴응력을 구하고, 붕괴 모드를 구분하는 분기세장비를 제시한다. 그리고 부재의 초기결함(initial imperfection)이 분기세장비에 미치는 효과를 고찰한다.

## 2. 이론

### 2.1 동심압축하중을 받는 기둥의 전체좌굴응력

동심 압축하중을 받고있는 기둥의 전체좌굴에 대한 좌굴하중은 기둥의 단면형상과 기둥의 길이에 의해 정의되는 세장비, 재료의 탄성계수, 경계조건에 의해 산출되며 이에 대한 이론적 해석은 Euler에 의해 최초로 이루어졌다.<sup>[3]</sup>

Euler 임계좌굴응력식

$$\sigma_{Euler} = N \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (1)$$

그러나 Euler에 의하여 제시된 기둥의 좌굴이론식은 중간주 이하의 영역에서는 이 식을 사용할 수 없음이 이미 많은 연구에 의해 지적되었고,<sup>[3,4]</sup> 이후 많은 연구자들이 중간주 이하의 세장비 영역에 해당되는 기둥의 좌굴하중을 정확히 예측하기 위하여 수정이론을 제시하는 연구들이 진행되었다. 특히 Rankine은 중간주 영역의 기둥에 대한 좌굴응력식을 제시하였으며 실험결과와 잘 부합되고 있다. 그는 기둥의 최대 좌굴응력이 항복강도를 초과하지 않는다는 가정으로부터 기둥의 좌굴 응력식을 다음과 같이 구하였다.<sup>[5]</sup>

Rankine 방정식

$$\frac{1}{\sigma_{Rankine}} = \frac{1}{\sigma_y} + \frac{1}{\sigma_{Euler}}$$

$$\text{즉, } \sigma_{Rankine} = \frac{\sigma_y}{1 + \frac{\sigma_y}{\pi^2 E} \cdot \frac{\lambda^2}{N}} \quad (2)$$

그러나 Rankine의 경우는 튜브의 최대 압괴응력이 항복응력을 초과하는 경우에는 더 이상의 의미가 없게 된다.

튜브형태로 된 기둥의 좌굴문제는 기존의 기둥의 좌굴이론식을 그대로 적용하는데 문제가 있다. 이는 기둥의 좌굴이론식이 사각튜브의 후폭비에 따른 특성을 고려하지 않았기 때문이라고 알려져있다.<sup>[1,2]</sup>

사각튜브에 대한 전체좌굴 모드에서도 좀더 정확한 응력을 산출하기 위하여 한병기는 다음과 같은 식을 제안하였다.<sup>[2]</sup>

Elastic 거동시

$$\frac{1}{\sigma_{Elastic}} = \frac{1}{\sigma_{crT}} + \frac{1}{\sigma_{Euler}}$$

$$\text{즉, } \sigma_{Elastic} = \frac{\sigma_{crT}}{1 + \frac{\sigma_{crT}}{\pi^2 E} \cdot \frac{\lambda^2}{N}} \quad (3)$$

Inelastic 거동시

$$\frac{1}{\sigma_{Inelastic}} = \frac{1}{\sigma_{crT}} + \frac{1}{\sigma_{Tangent}}$$

$$\text{즉, } \sigma_{Inelastic} = \frac{\sigma_{crT}}{1 + \frac{\sigma_{crT}}{\pi^2 E_t} \cdot \frac{\lambda^2}{N}} \quad (4)$$

여기서  $\sigma_{crT} = \text{Min}(\sigma_{cr}, \sigma_{max})$ 이며,

$$\sigma_{Tangent} = N \frac{\pi^2 E_t}{\lambda^2} \quad (E_t : \text{Tangent Modulus}) \text{ 이다.}$$

그리고 튜브의 임계하중은 다음과 같이 구한다.<sup>[7]</sup>

$$\sigma_{cr} = \frac{K\Phi\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (5)$$

$$\sigma_{max} = 0.73 \left[ \frac{\Phi KE(t/b)^2}{(1-\nu^2)} \right]^{0.4} \sigma_y^{0.6} \quad (6)$$

## 2.2 편심압축하중을 받는

### 박판 직4각튜브의 전체 좌굴응력

#### 2.2.1 편심압축하중을 받는 기둥

기둥에 작용하는 하중이 축방향으로부터 편심 거리  $e$  만큼 떨어진 곳에 작용할 때, 그 크기가 작은 경우일지라도 편심에 의해서 하중  $P$ 는 기둥에 굽힘이 생기게 한다. 이때 기둥의 허용하중은 임계하중보다 작아지게 된다.

이러한 기둥을 해석하기 위해 Fig. 1과 같은 양단편연결기둥을 생각한다. 기둥의 하단으로부터 거리  $x$  만큼 떨어진 곳에서의 굽힘모멘트  $M$  과 횡방향처짐  $v$ 는 다음과 같다.<sup>[6]</sup>

$$M = P(e+v) \quad (7)$$

$$v = e \left( \tan \frac{kL}{2} \sin kx + \cos kx - 1 \right) \quad (8)$$

여기서  $k^2 = P/EI$  이다.

처짐이 최대가 되는 중앙에서 최대굽힘모멘트가 발생하며 각각 다음과 같이 표시된다.

$$\delta_{max} = v\left(\frac{L}{2}\right) = e \left( \sec \frac{kL}{2} - 1 \right) \quad (9)$$

$$M_{max} = P(e+\delta) = P e \sec \frac{kL}{2} \quad (10)$$

위의 식으로부터 편심축하중을 받는 기둥의 시컨트공식(Secant formula)을 다음과 같이 얻는다.<sup>[6]</sup>

$$\sigma_y = \frac{P}{A} \left[ 1 + \frac{ed}{r^2} \sec \left( \frac{L}{2r} \sqrt{\frac{P}{EA}} \right) \right] \quad (11)$$

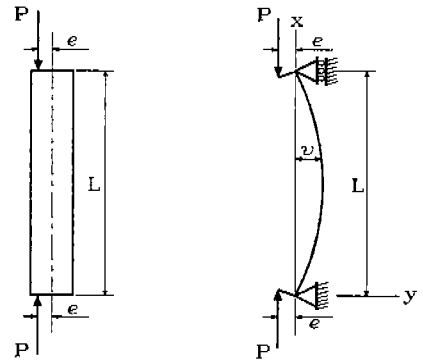


Fig. 1 Simply-supported column under eccentric load

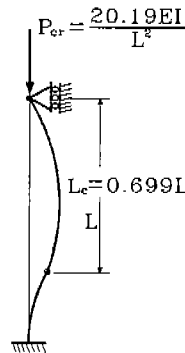


Fig. 2 Hinged-clamped column under centroidal load

시컨트공식은 기둥길이  $L$ 을 처짐곡선의 변곡점사이의 거리인 유효길이  $L_e$ 로 대치시킴으로써 다른 단부조건을 갖는 기둥에 대해서도 사용할 수 있다. 하단이 고정되고 상단이 편연결된 기둥은 Fig. 2에서처럼 그 유효길이가 약  $0.7L$ 이며, 임계하중은 양단편연결 기둥에 대해 약 2.04배의 값을 가진다.

Fig. 3은 항복응력  $\sigma_y = 27.6 \text{ kgf/mm}^2$ , 탄성계수  $E = 21000 \text{ kgf/mm}^2$ 를 갖고 하단 고정, 상단 편연결된 연장기둥에 대해 횡축을 세장비 ( $L/r$ ), 종축을 평균압축응력 ( $P/A$ )으로 하여 여러가지 편심비 ( $ed/r^2$ )에 대해서 그린 그림으로서, 편심거리  $e = 0$ 인 경우에는 Euler하중에 의한 임계응력을 사용했다.

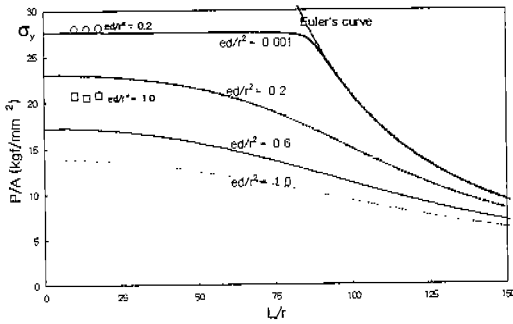


Fig. 3 Plot of secant formula for hinged-clamped column

Fig. 3은 단주영역의 정4각튜브(50×50×1.5t)에 대한 실험결과도 함께 보여 주고 있는데, 이는 시킨트공식에 의한 계산값과는 상당한 차이를 나타내고 있다. 그 이유는 시킨트공식은 Hooke법칙을 이용해서 유도하였고 최대응력을 재료의 비례한도로 가정하였기 때문이다. 따라서 이 공식은 항복응력을 넘지 않는 허용하중을 예측하는데 적합하지만, 편심하중하에 있는 실제 기둥이 버틸 수 있는 최대하중을 예측하기에는 부적합하다.

## 2.2.2 편심압축하중을 받는 박판 직4각튜브

시킨트공식은 편심압축하중을 받는 기둥에서 최대압축을 받는 부분에서의 최대 응력이 항복응력에 도달할 때 그 기둥은 더 이상 하중을 지탱하지 못하는 한계하중에 도달함을 나타내며 탄성영역에서만 유효한 식이다.

시킨트공식을 사각튜브에 적용하는데 있어서 문제점은 다음과 같다.

사각튜브가 편심하중을 받을 때 압축력을 받고 있는 판요소는 후폭비가 임계후폭비<sup>[7]</sup>보다 클 경우 항복응력보다 높은 응력까지 견딜 수 있다. 따라서 비탄성 거동을 보일 정도로 후폭비가 큰 사각튜브의 압축응력은 항복응력보다 크기 때문에 위식의 결과보다 크게 나온다. 후폭비가 임계후폭비보다 작을 경우에는 항복응력보다 작은 값에서

국부좌굴이 발생하게 되고 이로 인해 하중에 저항하는 유효한 단면적이 감소하게 되며 위 식의 결과보다 작게 나온다.

시킨트공식의 유도과정에서의 Hooke's law나 기하학적 가정에 어긋남이 없으면서 편심압축하중을 받는 직4각튜브에서 올바르게 적용하기 위해서 한계응력을 최대압괴강도(maximum crippling strength)로 대체하는 방법을 제안한다. 이는 직4각튜브의 후폭비가 임계후폭비보다 작을 때 압축응력이 항복응력을 넘지 못함을 의미하며, 후폭비가 임계후폭비보다 클 때는 압축응력이 항복응력을 초과할 수 있음을 의미한다. 최대압축응력은 축하중(axial load)과 모멘트에 의한 응력의 합으로써 항복응력을 초과할 수 있지만 그 각각의 응력이 항복응력을 초과함을 의미하지는 않는다. 따라서 다음과 같은 식을 제안할 수 있다.

Modified Secant Formula (MSF)

$$\sigma_{\max} = \frac{P}{A} \left[ 1 + \frac{ed}{r^2} \sec \left( \frac{L_e}{2r} \sqrt{\frac{P}{EA}} \right) \right] \quad (12)$$

여기서  $L_e$ 는 경계조건에 따른 유효길이,  $\sigma_{\max}$ 는 최대압괴강도<sup>[8]</sup>를 의미하며 다음과 같이 설명할 수 있다. 4각튜브의 네 패널이 동일한 하중조건에 있지 않고 편심하중으로 인하여 불균일한 응력상태에 있을 때는 압괴강도만을 기준으로 붕괴여부를 결정하는 것이 불충분하며 플랜지 압괴하중( $P_f$ )와 웨브의 압괴하중( $P_w$ )을 비교하여 작은 쪽이 먼저 붕괴가 일어난다고 볼 수 있다. 따라서  $\sigma_{\max}$ 는  $P_f$ 와  $P_w$ 중 작은 쪽의 압괴강도이다.

식(12)로부터 구해지는  $P/A = P_{\text{overall}}/A$ 를 전체좌굴응력으로 한다.

MSF는 직4각튜브의 후폭비 및 단면종횡비로 인한 한계응력의 특성을 고려하여 시킨트 공식의 제한점을 해결한 방법이다. MSF를 이용함으로써 편심압축하중을 받는 직4각튜브에 대하여 보다 정밀하고 적합한 전체좌굴응력을 구할 수 있다.

### 2.3 분기세장비

분기세장비란 사각튜브와 같이 국부좌굴거동이 가능한 부재의 전체좌굴과 국부좌굴을 구분할 수 있는 세장비이다. 이론적으로 축방향 압축 하에 있는 사각튜브가 견딜 수 있는 좌굴강도는 앞에서 살펴본 바와같이 부재의 길이, 즉 세장비에 따라 정해진다. 또한 부재의 길이가 짧은 경우에는 부재의 국부좌굴강도에 의하여 구해진다. 그러나 실제의 국부좌굴강도는 초기결함, 재료의 비선형성 등으로 인하여 이론적 국부좌굴강도보다 작은 값을 가지게 된다. 이러한 거동은 기하학적 모양에 의하여 그 영향이 지배하는 정도가 차이가 있다. 두께가 상당히 얇은 판으로 이루어진, 즉 후폭비( $t/b$ )가 작은 부재의 국부좌굴에는 초기결함의 영향이 지배적이고, 후폭비가 어느정도 이상 되어서 국부좌굴강도나 압괴강도가 항복응력을 넘어서면 재료의 비선형성에 의한 영향이 지배적이다. 본 연구에서는 전체좌굴이 일어나는 전 영역에서 좌굴응력을 대변할 수 있는 좌굴응력식과 국부좌굴이 일어날 수 있는 분기세장비를 제시한다.

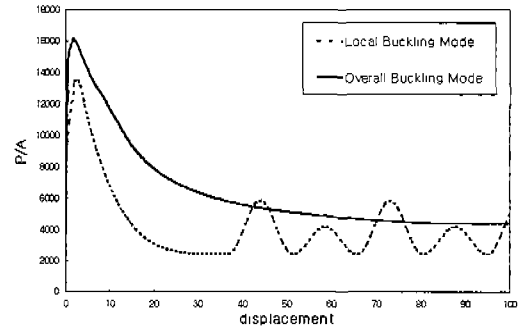
분기세장비를 구하는 방법은 다음과 같이 두 가지로 설명되어질 수 있다.

i) 하중조건(편심 및 지지조건)에 따른 최대 압괴강도( $\sigma_{max}$ )와 최대압괴하중( $P_{max}$ )<sup>[8]</sup>을 구한다. 다음 같은 조건으로 식(12)를 사용하여 전체좌굴응력( $P_{overall}/A$ )을 구하여 응력-세장비 선도로 나타낸다. (Fig. 5와 Fig. 7) 전체좌굴응력은 세장비의 함수지만, 국부좌굴응력( $P_{max}/A$ )<sup>[8]</sup>은 이론적으로 세장비의 함수가 아니기 때문에 이를 응력-세장비 선도에 표시하면 수평성분으로 나타내진다. 선도에서 전체좌굴응력과 국부좌굴응력이 같은 점의 수평좌표점이 분기세장비를 의미한다.

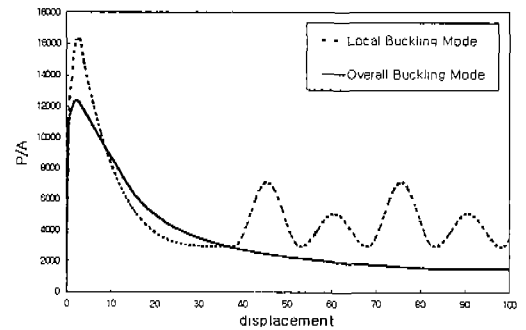
ii) 다른 한 방법은 식(12)에서 전체좌굴응력에 해당하는  $P/A$ 에 국부좌굴응력  $P_{max}/A$ 를 등가하여 구할 수 있다.

$$\sigma_{max} = \frac{P_{max}}{A} \left[ 1 + \frac{ed}{r^2} \sec \left( \frac{L_e}{2r} \sqrt{\frac{P_{max}}{EA}} \right) \right] \quad (13)$$

시편과 하중조건에 따른 최대압괴하중( $P_{max}$ )과 최대 압괴강도( $\sigma_{max}$ )<sup>[8]</sup>를 구하고 위 식에 대입하여 세장비를 구한다. 이 식은 초월식이므로 시행착오로 풀 수 있다.



(a)  $P_{max} < P_{overall}$  ( local buckling )



(b)  $P_{max} > P_{overall}$  ( overall buckling )

Fig. 4 Local and overall buckling behavior of tube column

Fig. 4는 최대압괴하중과 전체좌굴하중을 비교하여 붕괴모드를 판단함을 보여준다. (a)의 경우에는 편심압축하중이 최대압괴하중( $P_{max}$ )에 도달하여 축붕괴 모드로 붕괴가 일어나지만, (b)의 경우에는 편심압축하중이 최대압괴하중에 미치지 전에 전체좌굴하중( $P_{overall}$ )에 도달하여 전체좌굴 모드로 붕괴가 일어난다.

### 3. 수치결과 및 검토

지금까지의 결과를 이용하면 박판 직4각튜브가 편심압축하중을 받을 때의 국부좌굴응력과 전체좌굴응력 그리고 분기세장비를 구할 수 있다. 4각튜브가 같은 물성치를 갖지만 단면형상(후폭비)의 차이로 압축하중 시 정규모드(compact mode)와 비정규모드(noncompact mode)로 국부좌굴이 일어나는 두가지 경우를 생각해 보자.

#### i) Noncompact mode type specimen

우선 후폭비가 작은 튜브를 고려해 보자. 단면 치수는 60\*60, 0.8t 이고 재료의 물성치는  $\sigma_y = 26.4$ ,  $\sigma_u = 36.75$ 이다. Fig. 5 (a)와 (b)는 초기결함량에 따라, 각 하중조건(편심량)에 따른 최대압괴하중과 전체좌굴응력을 나타낸다. 이 그림에서 두 응력이 만나는 점의 수평좌표값은 분기세장비( $\lambda_b$ )를 가리킨다. 이 그림으로부터 분기세장비는 편심량이 증가함에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 초기 결함량의 영향으로 전체좌굴로 전환되는 임계편심량( $e_b$ )이 달라짐을 알 수 있다. Fig. 6은 이러한 효과들을 극명하게 보여주고 있다. 이 그림으로부터 두 가지 사실을 예측할 수 있는데 첫째로는 일정한 세장비의 시편에 대해 초기결함의 증가는 국부좌굴을 일으킬 수 있는 임계편심량( $e_b$ )이 증가한다는 사실이다. 다음으로 일정한 편심량의 압축하중이 가해질 때 초기결함량이 커질수록 분기세장비( $\lambda_b$ )가 증가한다는 점이다.

#### ii) Compact mode type specimen

후폭비가 비교적 커서 정규모드로 압괴가 일어나는 경우를 생각해 보자. 단면 치수는 60\*60, 2t 이고 재료의 물성치는 위와 동일한 경우에 대한 결과를 초기결함량에 따라 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 분기세장비( $\lambda_b$ )는 i)의 경우와 마찬가지로 편심량이 증가함에 따라 감소

하는 것을 알 수 있다. 하지만 초기결함량의 영향은 i)의 경우와 반대의 경향을 보여주고 있다. 이를 Fig. 8에서 살펴보면 우선 일정한 세장비의 시편에 대해 초기결함의 증가는 임계편심량( $e_b$ )이 감소하며, 일정한 편심량의 압축하중이 가해질 때 초기결함량이 커질수록 분기세장비( $\lambda_b$ )는 감소한다. 그리고 Fig. 6과 Fig. 8을 비교하면 해석상의 편심량 구간이 Fig. 8에서는 상당히 작은 영역에 있음을 알 수 있다.

얻어진 결과들로부터 편심압축하중을 받는 박판 4각튜브의 좌굴특성은 다음과 같이 요약할 수 있다.

우선 박판 4각튜브의 국부좌굴과 전체좌굴을 해석하기 위해서는 튜브의 후폭비에 따라 정규모드와 비정규모드로 구분하여 각기 다른 성질들을 충분히 이해하고 있어야 한다. 후폭비가 큰 튜브의 경우, 편심이 없이 압축하중이 가해질 때는 국부좌굴이 발생하므로 높은 최대압괴하중과 에너지 흡수량을 기대할 수 있지만 작은 편심압축하중에도 에너지흡수량이 적은 전체좌굴이 쉽게 일어날 수 있다. 더욱이 초기결함이 어느 정도 있는 부재라면 국부좌굴은 기대하기 어렵다. 반면 후폭비가 작은 튜브에서는 편심량에 상대적으로 덜 민감하며 어느 정도의 초기결함량은 오히려 국부좌굴을 유도하는 효과를 가져온다고 볼 수 있다.

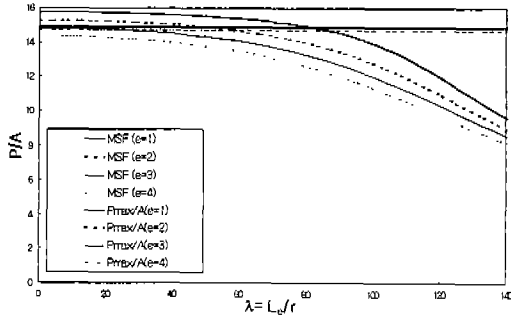
초기결함량에 따른 분기세장비의 변화가 정규모드와 비정규모드에서 다른 경향을 보이는 이유를 생각해 보자. 이것은 편심량( $e$ )에 따른  $P_{overall}/A$ 와  $\sigma_{max}$ 의 변화를 초기결함량을 변화시켜 관찰함으로써 얻은 다음 식으로부터 설명될 수 있다.

$$\left| \frac{\Delta \sigma_{max}}{\Delta f_0} \right| < \left| \frac{\Delta(P_{overall}/A)}{\Delta f_0} \right| \quad (14.a)$$

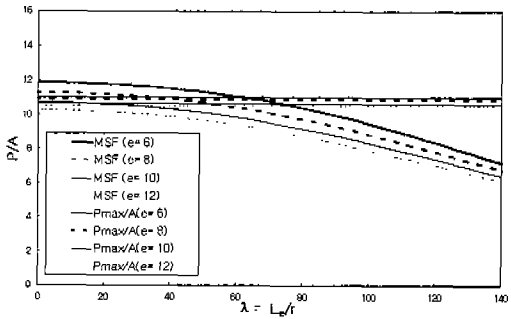
~ for compact mode

$$\left| \frac{\Delta \sigma_{max}}{\Delta f_0} \right| > \left| \frac{\Delta(P_{overall}/A)}{\Delta f_0} \right| \quad (14.b)$$

~ for noncompact mode



(a)  $f_0 = 0$



(b)  $f_0 = 0.1$

Fig. 5 Modified secant curve and  $P_{max}/A$  for non-compact mode type specimen

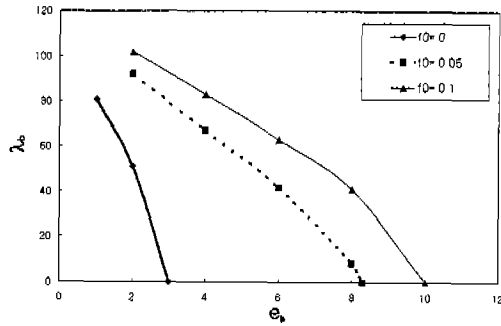
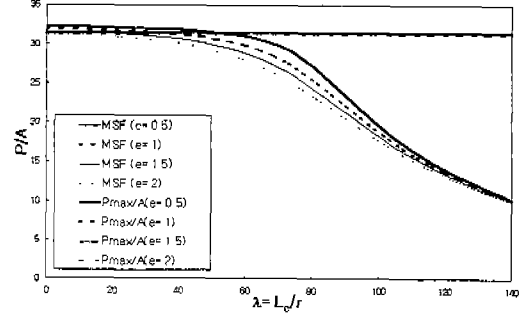


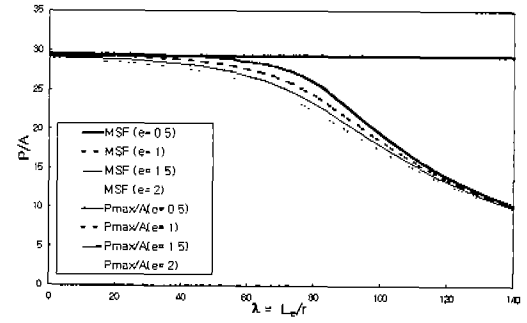
Fig. 6 Bifurcation slenderness ratio as function of eccentricity  $e$  and initial imperfection  $f_0$  for noncompact mode type specimen

이들 해석결과를 검증하기 위한 실험에서 시편 제작법과 실험방법은 참고문헌<sup>[9],[10]</sup>을 참조바라며 여기서는 결과만을 보여준다.

Fig. 9는 국부좌굴된 시편과 전체좌굴된 시편



(a)  $f_0 = 0$



(b)  $f_0 = 0.1$

Fig. 7 Modified secant curve and  $P_{max}/A$  for compact mode type specimen

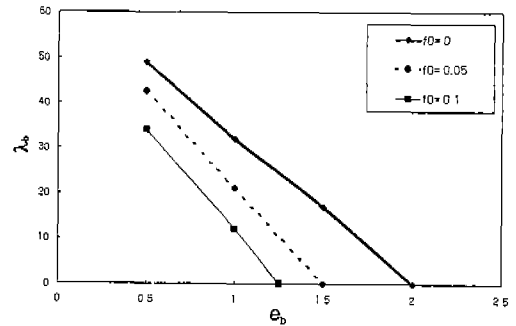
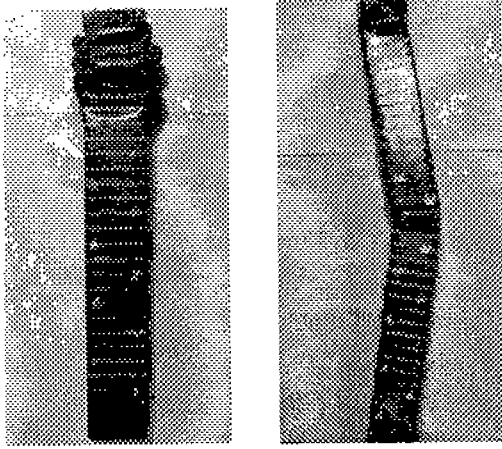


Fig. 8 Bifurcation slenderness ratio as function of eccentricity  $e$  and initial imperfection  $f_0$  for compact mode type specimen

의 사진을 보여주고 있다.

Fig. 10은 40\*40\*1.45t의 정규모드 유형의 시편에 대한 실험값과 해석결과를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 편심률이 변화하는 전구간



(a) Local buckling mode (b) Overall buckling mode

Fig. 9 Photographs of collapsed specimen

에서 국부좌굴하중보다 전체좌굴하중이 낮아 붕괴모드 및 최대부하하중은 전체좌굴이 좌우하게 된다. 실험값은 해석 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 11은 70\*70\*0.8t의 비정규모드 유형의 시편에 대한 실험값과 해석결과를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 국부좌굴하중과 전체좌굴하중 곡선이 교차하는 임계편심량( $e_b$ )을 기준으로 좌측에서는 국부좌굴이, 우측에서는 전체좌굴이 일어남을 예상할 수 있다. 주의해서 볼 점은 초기결함량( $f_0/t$ )이 증가함에 따라 최대하중은 감소하고, 임계편심량( $e_b$ )은 증가한다는 점이다. 실험값을 살펴보면 전체좌굴이 일어난 시편들의 최대하중이 초기결함을 영으로 보고 해석한 전체좌굴하중과 잘 일치하고 있다. 그리고 초기결함으로 인해 최대하중값이 떨어진 시편들에서는 국부좌굴에 의한 축붕괴(axial collapse)를 보이고 있다.

따라서 실험결과와 해석결과의 비교는 다음과 같은 결론을 시사한다. 정규모드 유형의 시편은 초기결함이 존재할 시에 붕괴모드를 전체좌굴로 유도하고 최대하중값을 떨어뜨리는 성질이 있는 반면에, 비정규모드 유형의 시편에서는 초기결함

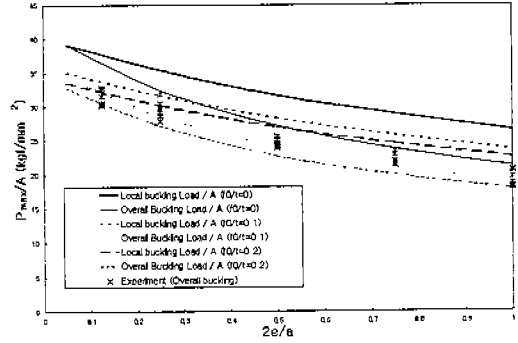


Fig. 10 Maximum load for compact mode type specimen

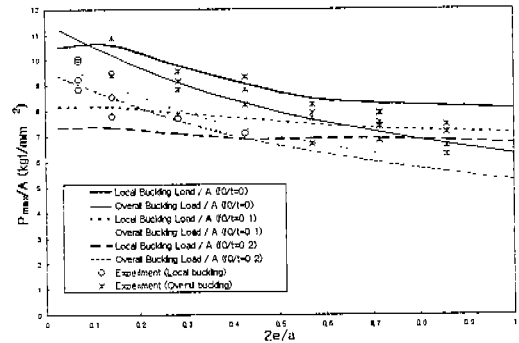


Fig. 11 Maximum load for noncompact mode type specimen

이 붕괴모드를 국부좌굴로 유도하고 최대하중값을 떨어뜨리는 성질이 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 세장비를 고려한 전체좌굴응력을 구하고, 좌굴형태를 구분하는 분기세장비를 제시하여 편심압축하중을 받는 박판 직4각튜브의 좌굴거동을 살펴보았다. 편심량의 변화에 따른 분기세장비의 변화를 고찰하고, 초기결함이 좌굴 모드에 미치는 효과를 해석적으로 보였다. 실험결과와 비교를 통해 해석결과의 타당성을 검증하였으며, 그 결과는 실제의 구조설계 시 매우 유용한 정보를 제공한다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.



1. 편심압축하중을 받는 박판 직4각튜브의 전체 좌굴응력을 구하는 Modified secant formula (MSF)를 제안했다.
2. 편심압축하중을 받는 박판 직4각튜브는 전체 좌굴응력이 국부좌굴응력보다 작을 때 전체 좌굴이 일어난다.
3. 편심압축하중을 받는 박판 직4각튜브의 국부 좌굴과 전체좌굴의 분기세장비를 제시하였다.
4. 편심량이 증가함에 따라 박판 직4각튜브의 분기세장비는 감소한다.
5. 초기결함은 정규모드에서는 국부좌굴이 일어나는 임계편심량 혹은 분기세장비를 감소시키는 효과를 갖지만 비정규모드에서는 이를 증가시키는 효과를 갖는다.

### 참고 문헌

1. 한병기, 박봉현, 안대식, “사각튜브의 국부좌굴과 전체좌굴에 관한 연구(1)”, 대한기계학회논문집 A권 제22권 제4호, pp. 887~894, 1998.2.
2. 한병기, 박봉현, 안대식, “사각튜브의 국부좌굴과 전체좌굴에 관한 연구(2)”, 대한기계학회논문집 A권 제22권 제4호, pp. 895~904, 1998.
3. Timoshenko, S. P. and Gere, M., Theory

of Elastic Stability, McGraw-Hill, N. Y. 1988.

4. Bleich, F., Buckling Strength of Metal Structures, McGraw-Hill, N. Y. 1952.
5. H. G. Allen, P. S. Bulson, Background to Buckling, McGraw-Hill, N. Y. 1980.
6. Gere, J. M. & Timoshenko, S. P., Mechanics of Materials, 3rd edition, PWS-KENT Publishing Co., Boston. 1990.
7. 김천옥, 한병기, 임채홍, “초기결함이 압괴모드에 미치는 영향”, 대한기계학회논문집, 제19권 제11호 pp. 2750~2756, 1995.
8. 김천옥, 한병기, 김지홍, 정창현, “편심압축하중을 받는 사각튜브의 최대압괴하중”, 한국자동차공학회 논문집, 1999 게재예정.
9. 김천옥, 한병기, 김지홍, “편심압축하중을 받는 박판4각튜브의 붕괴거동 연구”, 대한기계학회 96년도 추계 학술대회논문집 A, pp. 421~428, 1996.
10. 최규실, “편심압축하중을 받는 박판 4각튜브의 붕괴거동 연구“, 연세대학교 대학원 석사학위논문, 1996.