

사각튜브의 국부좌굴과 전체좌굴에 관한 연구 (2)

한병기* · 박봉현** · 안대식***

(1997년 6월 13일 접수)

The Relationship Between Local and Overall Buckling of Rectangular Tubes (II)

B. K. Han, B. H. Park and D. S. Ahn

Key Words : Local Buckling(국부좌굴), Overall Buckling(전체좌굴), Bifurcation Slenderness Ratio(분기세장비), Thin-walled Rectangular Tube(박판사각튜브), Inelastic Modulus(비탄성계수)

Abstract

This paper presents the results of experimental investigation of the buckling behavior of thin-walled box-section column. The experiments for finding the buckling stress and bifurcation slenderness ratio are performed by the method from AISC. The sets of boundary conditions are both end simply supported, one end simply supported and the other end clamped, and both ends clamped. The types of specimens are classified by thickness to width ratio. The experiments for the thin-walled rectangular tubes are closely concurrent with the theoretical values of overall buckling load and bifurcation slenderness ratio that are suggested by the part (I) of this paper.

1. 서 론

최근 들어 자동차산업은 과학기술의 발전과 소비자의 의식이 변화함에 따라 양적, 질적으로 매우 빠른 발전을 거듭하여 왔다. 특히 자동차의 안전성 문제는 수요자는 물론이고 설계자에게도 매우 중요시되고 있는 것이 사실이다. 이를 위하여 에어백 등과 같은 안전장치 개발, 에너지 흡수부재의 개발, 그리고 에너지 흡수부재의 특성변화 등에 초점을 맞추어 다양한 연구를 진행해 왔고, 앞으로도 계속될 전망이다. 이러한 연구 분야중에 가장 기초적이면서 상당히 중요한 분야가 에너지 흡수부재의 에너지 흡수특성의 변화에 대한 연구이다. 에너지 흡수특성을 명확하게 규명하는 문제는 에너지 흡수

부재에 대한 정확한 해석이 선행되어야 한다.

에너지 흡수부재는 축방향 압축하중, 굽힘하중 등 다양한 하중조건을 가지고 있다. 이러한 하중조건들 중에서 특히, 축방향 압축조건하의 에너지 흡수부재의 거동은 차체의 에너지 흡수능력평가에 매우 중요하다. 이에 대한 연구는 고전 역학적인 방법, 유한요소법과 같은 수치해석적인 방법, 그리고 실험적인 방법 등이 이용되고 있다. 특히 고전 역학적인 방법은 그 동안의 연구자들이 이미 경험한 바대로, 상당히 복잡하면서, 때로는 불가능하기도 하기 때문에 수치해석적인 방법이나 실험적인 방법이 많이 사용되고 있다. 그러나 어떠한 해석방법도 다 나름대로의 장점 및 단점을 수반하는 것 또한 사실이다.^(1~4)

축방향 압축하의 에너지 흡수부재에 대한 실험적 그리고 고전 역학적 해석들을 살펴보면, 부재의 최대압괴하중과 평균압괴하중을 얻기 위하여 압괴 미캐니즘 등을 정확히 규명하려고 노력하고 있다. 또

*회원, 홍익대학교 기계공학과

**회원, 홍익대학교 대학원 기계공학과

***회원, 충주산업대학교 기계공학과

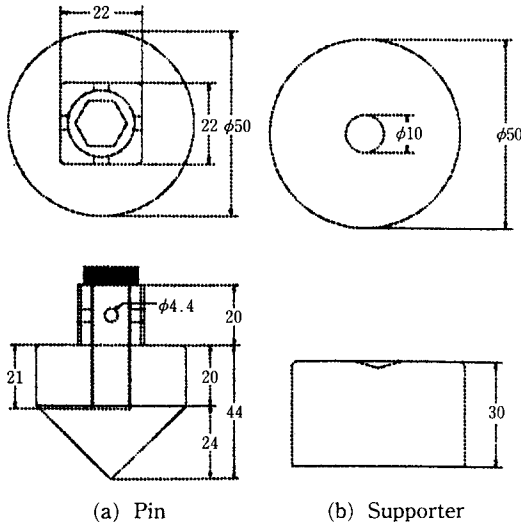


Fig. 1 Equipments for simply supported boundary condition.

한 현실적으로 볼때 에너지 흡수부재는 동적 거동을 고려해야 하므로, 이에 대한 연구들이 진행되어 오고 있다.⁽¹⁰⁾

정적 최대압괴해석의 종류는 국부좌굴에 대한 연구와 전체좌굴에 관한 연구가 있다.^(6,8,11) 국부좌굴이란 박판상형부재와 같이 중공단면부재가 축력에 의하여 압괴되는 현상으로 부재를 구성하고 있는 판요소 또는 셸요소가 파형을 형성하는 좌굴모드이다. 전체좌굴이란 기둥의 길이가 어느 정도 이상 길어서 기둥전체가 활처럼 휘는 좌굴모드이다. 기술대대로 튜브형 부재의 경우는 부재의 길이에 따라 좌굴모드가 변화된다. 즉, 부재의 길이가 일정 길이 이하에서는 국부좌굴이 그 이상에서는 전체좌굴이 발생한다.^(12,13)

본 연구에서는 부재의 정적 최대압괴하중을 산정하기 위하여 분기세장비와 전체좌굴에 대한 준-이론적 해석을 수행한 (1)편의 결과를 토대로 실험적인 검증은 하였다. 경험식의 전개과정에 대해서는 (1)편에 서술하였으며, 본 연구에서는 실험방법 및 실험결과를 경험식과 비교검토한다.

2. 실험

2.1 실험장치 및 경계조건

전체좌굴은 이론적 해석에서도 분명히 나타나듯이 경계조건에 따라 좌굴하중이 크게 차이가 있는

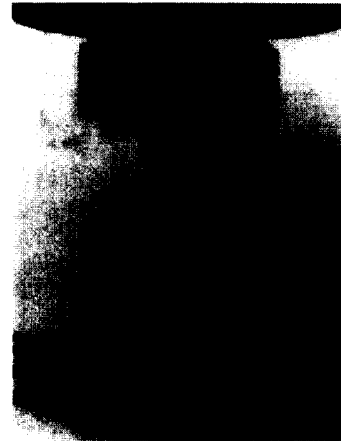


Fig. 2 A photograph of setup of both ends simply supported boundary condition.

므로, 이 효과는 반드시 고려되어야 한다. 또한 기존의 실험들에서의 결과가 이론적 해석과 차이가 있으므로 경계조건의 변화는 상당히 중요하다. 또한 실제의 구조부재는 이론 해석에서 사용한 경계조건이 아니고, 탄성구속경계조건인 경우가 대부분이다. 이러한 탄성구속조건을 완전하게 만족시키도록 하는 것은 현실적으로 매우 어려운 문제이다. 하지만 탄성구속조건은 이론적으로 고정경계조건과 단순지지경계조건의 사이에 위치하므로, 본 연구에서는 양단단순지지, 양단고정경계조건 및 일단 고정-일단단순지지조건에 대하여 실험을 진행하며 이론 해석결과와 비교검토한다.

경계조건을 만족하는 장치는 기둥의 좌굴실험에 있어 상당히 중요하다. 이는 같은 세장비를 갖는 시편이라도 경계조건이 조금만 달라져도 결과에 상당한 영향을 미치기 때문이다. 기존의 실험적 연구에서도 여러 가지 방법들이 제시되어 있다. AISC (American Institute of Steel Construction)는 단순지지에 대하여 6가지의 방법을 제안하고 있다.⁽⁶⁾ 본 연구에서는 이들 중 본 연구에 가장 합리적이라 생각되는 방법을 채택하여 장치를 제작하였다. 제작한 단순지지장치는 Fig.1에서 보여준다. 그림에서 보여주는 바와 같이 핀을 제작하여 시편과 결합하였으며, 핀이 자유롭게 회전할 수 있도록 하면서도 한점에 고정될 수 있도록 지지대를 제작하였다. 이 장치들의 재료는 모두 경강재질로 제작하여 열처리하여 실험에 사용하였다. Fig.2는 양단단순지지경계조건을 만족하도록 한 실험장치를 보여주고 있다.

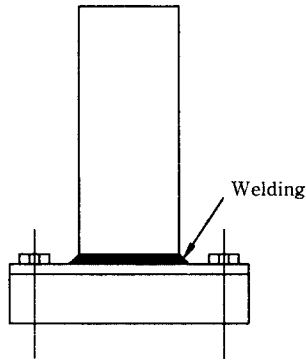


Fig. 3 Equipments for clamped boundary condition.

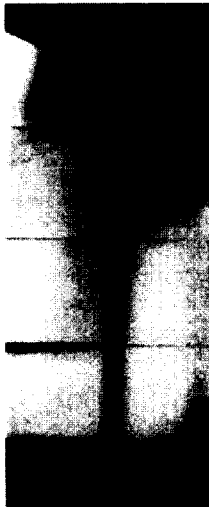


Fig. 4 A photograph of setup of both ends clamped boundary condition.

고정단에 대한 경계조건 장치는 Fig. 3에서와 같이 튜브의 양단을 두꺼운 기초판위에 용접한 후이 기초판과 바닥을 볼트로 연결하는 방법을 취하였다. Fig. 4는 양단고정경계조건으로 시험편이 정렬된 상태를 보여주는 사진이다. 일단단순지지-일단고정의 경계조건에 대한 실험은 기술한 바와 같은 두 가지의 실험 경계조건을 조합하였으며, Fig. 5에서 보여주고 있다.

실험 준비작업중 가장 중요한 것은 기둥의 수직을 맞추는 것인데 시험편이 짧은 경우는 직각자를, 시험편이 긴 경우는 연추(plumb)를 이용하였으며, 편심이 없고, 수직이 되도록 주의하여 실험을 하였다. 압축실험은 준정적 하중상태를 유지하기 위하여, 10 mm/min의 속도로 압축력을 가했다.



Fig. 5 A photograph of setup of simply supported-clamped boundary condition.

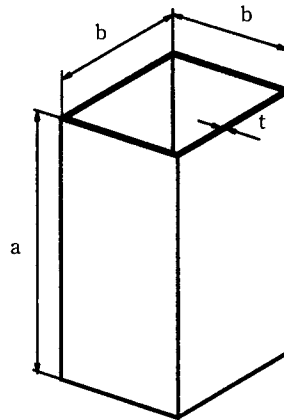


Fig. 6 Geometry of tested specimen.

2.2 시편

본 연구에서 사용한 시편은 시중에서 장사각형 단면형상의 일반제품을 구입한 것이다. 시편의 형상은 Fig. 6과 같다. 사용한 시편은 후폭비의 영향을 고찰하기 위하여, 그 단면형상을 네 종류로 하였다. 이는 중실 기둥과 달리 튜브의 좌굴은 세장비가 작아 국부좌굴이 발생하는 경우에 후폭비의 영향을 받고 있기 때문이다. 시편의 규격 및 측정 평균 치수들은 Table 1에 정리하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인장실험

본 연구에서는 재료의 항복응력, 탄성계수, 그리고 비탄성계수 등이 중요하게 사용된다. 이러한 물성치들은 인장실험을 통하여 얻을 수 있다. 때문에

Table 1 Geometry of specimens

Specimen group	t(mm)	b(mm)	t/b
A	1.18	15.2	0.0776
B	1.43	19.1	0.0749
C	1.45	25.13	0.0577
D	1.50	30.5	0.0492

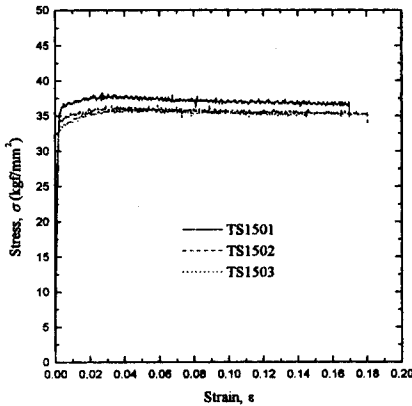
좌굴실험에 사용된 시편으로부터 인장시편을 채취하여 실험하였다. Fig. 7은 인장실험으로부터 얻은 응력-변형률선도이다. 이들 선도로부터 항복응력, 탄성계수를 찾아내고, 재료의 비탄성계수인 n , m_1 값을 찾기 위하여 각각의 축을 다음의 식 (1)에 의하여 Fig. 8과 같이 무차원화하여 표시한 후 이들 값을 찾는다.⁽⁵⁾ 각각의 시편에 대한 인장실험결과와 이들로부터 찾은 비탄성계수 n , m_1 은 Table 2에 정리하였다.

$$e = \frac{E \cdot \epsilon}{\sigma_y}, \quad s = \frac{\sigma}{\sigma_y} \quad (1)$$

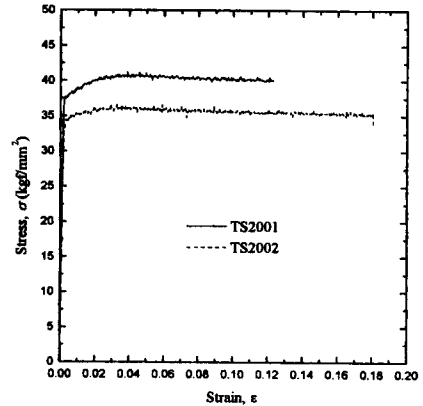
여기서, e 는 무차원화된 변형률을, s 는 무차원화된 응력을 의미한다.

3.2 국부좌굴, 전체좌굴 및 분기세장비

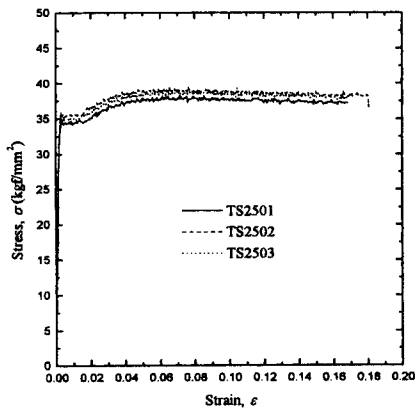
기술한 바와 같이 사각튜브는 부재의 치수 및 길



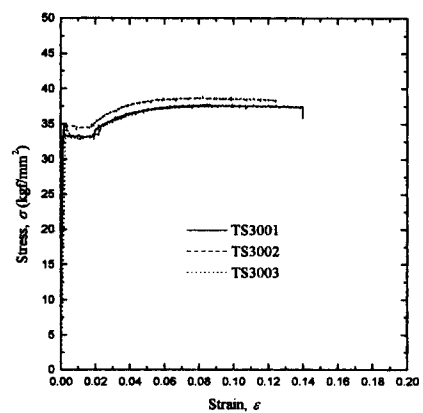
(a) A type specimen



(b) B type specimen

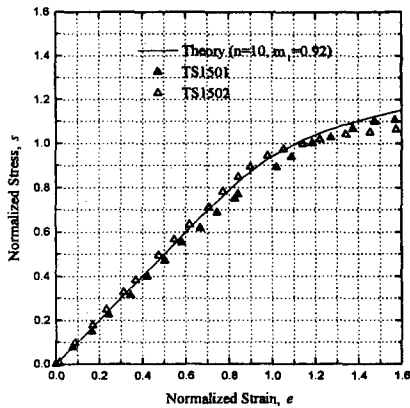


(c) C type specimen

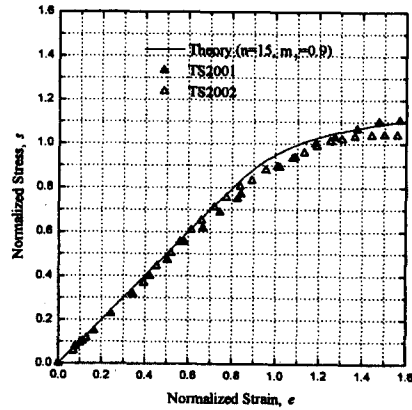


(d) D type specimen

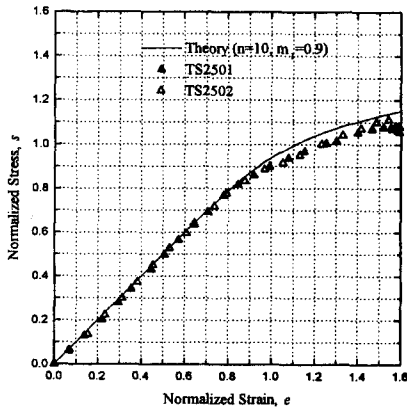
Fig. 7 Experimental stress-strain curves.



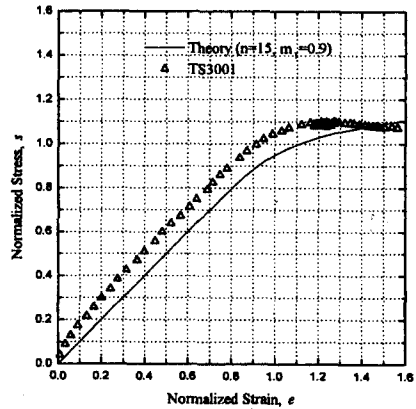
(a) A type specimen



(b) B type specimen



(c) C type specimen



(d) D type specimen

Fig. 8 Experimental and computed stress-strain curves.

이에 따라 국부좌굴과 전체좌굴이 구분되며, 이 분기점은 중요한 의미가 있다. 이 분기세장비를 찾기 위하여 네 개의 서로 다른 후폭비를 가진 사각튜브의 길이를 여러 가지로 변화시키며 각 경계조건에 대하여 실험하였다. 본 연구의 목적중 하나인 분기세장비를 찾기 위해서는 국부좌굴시 최대압괴하중(국부좌굴응력) 또한 중요하다.^(12,13) 때문에 이에 대한 실험도 병행하였다.

국부좌굴응력은 각 종류의 시편에 대하여 임계세장비를 계산한 후에 이보다 작은 세장비의 시편을 사용하여 압괴실험을 하여 얻어진다. 국부좌굴에 대한 실험결과는 Table 3에 정리하였다. 국부좌굴 실험결과는 이론치와 약간의 차이가 보인다. 이는 부재의 두께가 비교적 두꺼운 편이라 초기결함의 영향뿐 아니라 재료의 비선형성에 대한 영향도 있기 때문이라 사료된다.^(7,9,14) 그러므로 후폭비가 매

우 큰 시편편의 경우에는 상당한 오차를 보일 것으로 예측되며, 이에 대한 영향은 다시 고찰하기로 하고 여기서는 제외한다.

전체좌굴응력과 이론식과의 비교와 분기세장비를 찾기 위한 실험은 시편 종류별로 세장비와 경계조건을 변화해 가면서 하였다. Fig. 9는 양단단순지지의 경우에 대하여 각각의 시편에 대한 실험결과를 여러 가지 이론식들과 비교한 그림이다. 이론값의 산정에는 사용자의 편을 위하여 탄성계수를 21000 kgf/mm²로 계산하였다. 그림에서 수직실선은 저자의 경험식에 의한 분기세장비를 표시한 것이고, 수직 이점쇄선은 실험에 의해 측정된 분기세장비를 나타낸 것이다. 튜브의 압괴강도는 최소 실험값으로 기호 '■' 나타내었으며, 이 값과 실선이 교차하는 점, 즉 그림들에서 수직 이점쇄선이 (1)편에서 제시한 임계 분기세장비의 식으로부터 계산된 결과

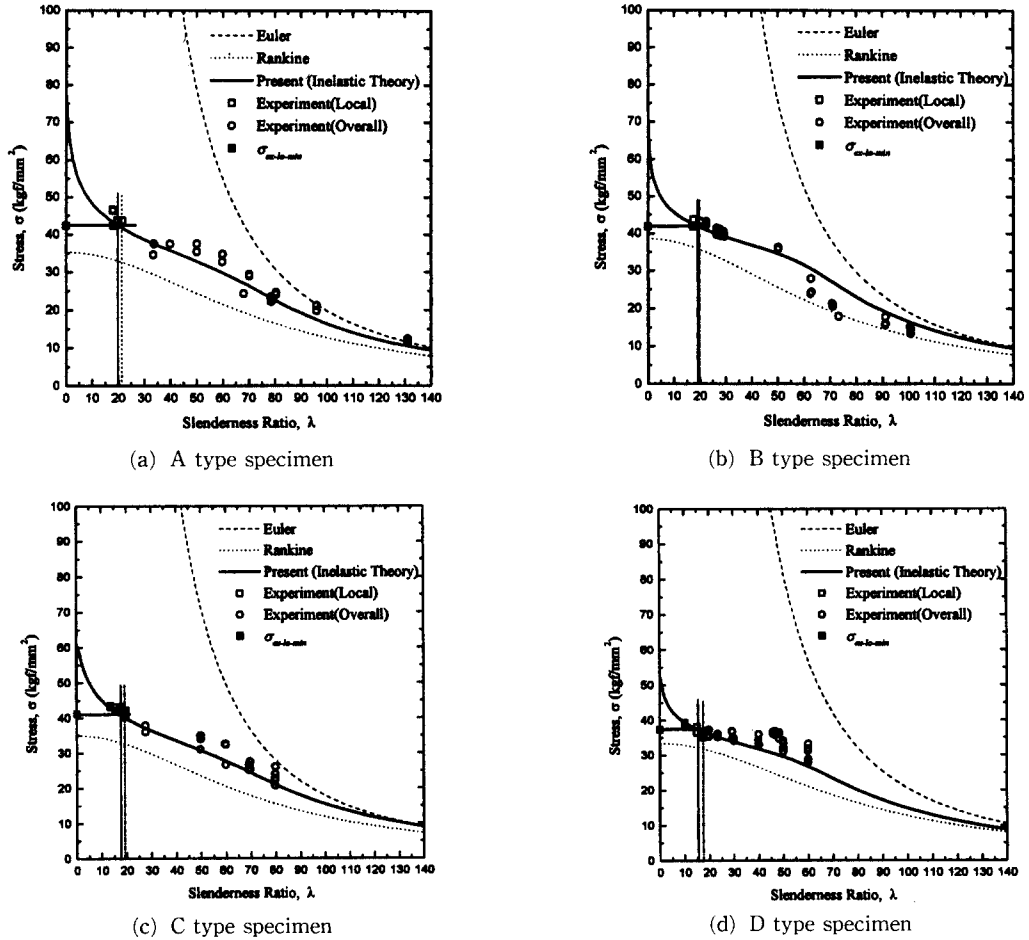


Fig. 9 The critical stress to slenderness ratio with simply supported boundary condition.

Table 2 Material properties.

Specimen group	Yield strength (kgf/mm ²)	Youngs modulus (kgf/mm ²)	Inelastic coefficients	
			n	m ₁
A	35.2	20,040	100.92	
B	38.5	19,205	150.9	
C	35.0	18,085	100.9	
D	33.4	20,838	150.9	

들이다. 실험결과에서 ‘o’ 기호는 전체좌굴이 일어난 실험결과 값을 나타내며, ‘□’ 기호는 국부좌굴 실험값을 나타낸다. 이 결과를 관찰해 보면, 이론적인 분기세장비와 실험적인 분기세장비가 잘 맞고 있음을 알 수 있다. 즉, 시편의 길이가 이론적인

Table 3 Experimental results of local buckling tests.

Specimen group	σ_{max} (kgf/mm ²)					
	σ_{max} (kgf/mm ²)				Theory	
	1 st	2 nd	3 rd	Average	$\sigma_{max_{lo}}$	$\sigma_{cr_{lo}}$
A	42.29	43.57	43.69	43.18	77.51	457.54
B	41.76	43.12	43.67	42.85	79.45	452.56
C	41.13	42.26	43.46	42.28	60.92	252.75
D	37.35	39.27	38.09	38.24	52.78	183.62

분기세장비 이하의 영역에서는 국부좌굴이 되며, 이상의 영역에서는 전체좌굴과 국부좌굴이 일어나는 천이 구간이 있지만 전체좌굴이 된다. 분기세장

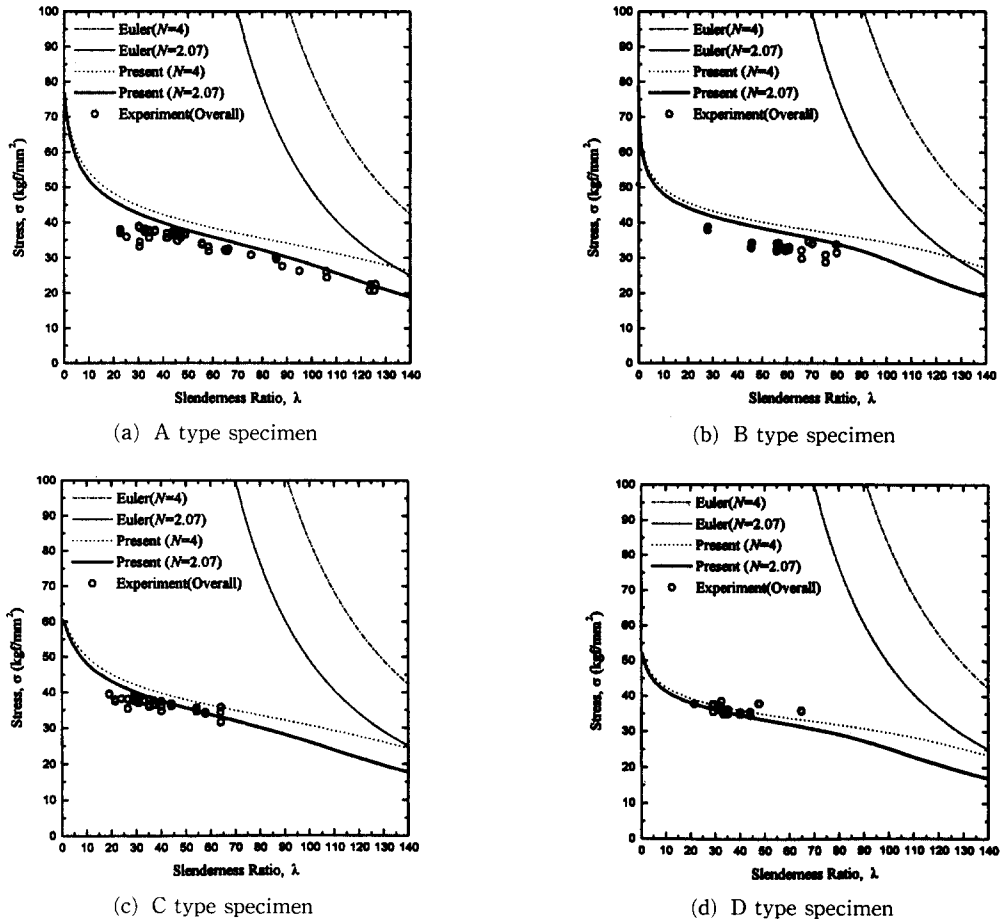


Fig. 10 The critical stress to slenderness ratio with both clamped boundary condition.

비는 이론적으로는 한 개의 점으로 표현되지만, 실험적으로는 시험편의 국부적인 결함량과 전체적인 결함량의 차이와 재료의 비선형으로 인하여 분기세장비 또는 일정한 오차의 폭을 갖게 된다. Fig. 12는 분기세장비가 한 점이 아니고 일정한 폭을 가질 수 있음을 나타낸다. 실험결과와 해석결과는 Table 4에 표시하였다. 양단단순지지의 경계조건과 다른 경계조건들에 대한 이론적인 분기세장비를 Table 5에 표시하였다. 본 연구에서는 분기세장비의 산출에 있어 국부좌굴하중값에 실험결과를 이용하였는데, 이는 사용된 시험편의 후폭비가 상당히 크므로, 기존의 이론으로는 국부좌굴하중을 정확히 산정하기 어렵기 때문이다. 이는 기존의 이론이 상당히 얇은판을 기준으로 유도되었고, 이미 여러 연구자들이 판의 두께가 두꺼워지면, 여러 가지의 다른 영향을, 예를 들면, 수직전단응력(transverse shear

stress)과 재료의 비선형 등을 고려해야 함을 언급한 바 있다.^(1~4) 본 연구진도 향후 이 문제를 좀더 이론적으로 접근할 계획이다.

Fig. 10과 Fig. 11은 이외의 경계조건에 대하여 전체좌굴에 대한 실험결과와 이론식들을 비교한 그림이다. 그림들에서 양단단순지지 이외의 경계조건에 대하여는 국부좌굴 실험결과를 나타내지 않았는데, 이는 전체좌굴에 대한 실험결과와 이론식이 잘 맞으면, 분기세장비는 단말제수에 의하여 계산할 수 있기 때문이다. 결과를 관측해 보면 알 수 있듯이, 판재로 구성된 사각튜브의 경우는 부재의 최대 압괴하중(국부좌굴하중)을 고려해야만 한다. 이는 기술한 바와 같이 속이 빈 형태의 부재의 전체좌굴 응력은 속이 차 있는 부재와는 달리 재료의 항복응력을 초과할 수 없다는 기존의 이론과는 달리, 그 한계는 국부좌굴하중으로 보는 것이 타당함을 입증

하는 것이다.

전체좌굴응력은 경계조건의 영향이 크며 각 경계 조건마다 단말계수가 존재하게 된다. 그러나 실험

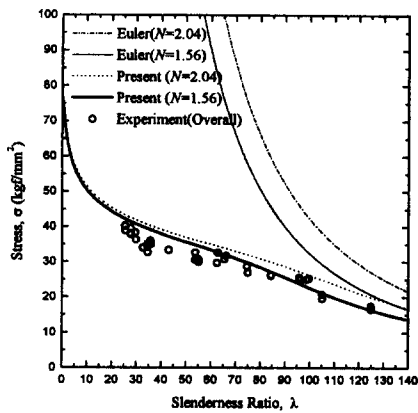
결과를 관찰해 보면 이러한 이론적인 단말계수를

Table 5 N value for each boundary condition of the overall buckling.

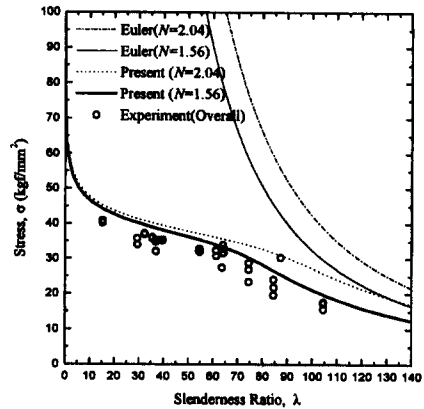
Table 4 Theoretical and experimental bifurcation slenderness ratio of each sections for simply-supported boundary condition.

Specimen group	Bifurcation slenderness ratio (present)	Bifurcation slenderness ratio (experimental)
A	20.06	21.5
B	19.14	20.2
C	16.87	19.5
D	15.39	17.5

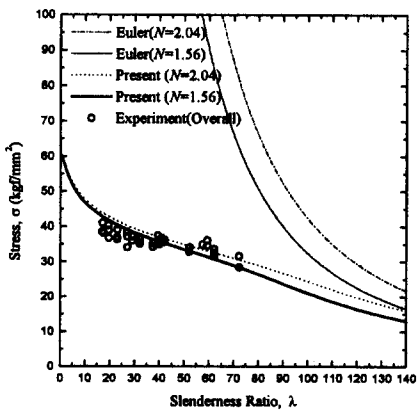
Boundary condition		Simply-simple (S-S)	Simple-clamp (S-C)	Clamp-clamp (C-C)
Buckled shape				
N	Theory	1	2.04	4
	AISC	1	1.56	2.38



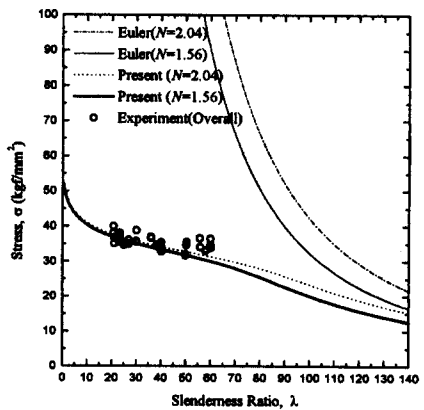
(a) A type specimen



(b) B type specimen



(c) C type specimen



(d) D type specimen

Fig. 11 The critical stress to slenderness ratio with clamped and simply supported boundary condition.

실용에 적용하는 것은 부적합함을 알 수 있다. 이는 이미 기존의 연구에서 언급된 것이다.⁽⁶⁾ 때문에 본 연구에서는 AISC에서 제안하고 있는 단말계수를 이용하였으며, 얻어진 이론값이 실험치에 상당히 접근되고 있음을 보이고 있다. 각 경계조건에 대한 단말계수값들은 Table 5에 정리되어 있다. 재차 언급하지만, 양단단순지지 이외에는 이론적인 경계조건을 만족하기가 어렵다.

4. 결 론

본 연구는 이 논문의 이론적인 해석부분인 (1)편에서의 이론적인 연구를 입증하기 위하여 실험적으로찰을 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 사각튜브의 전체좌굴응력은 부재의 길이와 재료의 물성치뿐만 아니라 후폭비까지 고려하는 것

이 타당함을 알 수 있다.

(2) 사각튜브의 좌굴모드를 구분하는 분기세장비에 호폭비와 재료의 물성치가 영향을 미침을 알 수 있다.

(3) (1)편에서 제시한 이론적 해석들이 실험결과와 잘 부합함을 관찰할 수 있다.

(4) 실험결과 경계조건에 따른 단말계수는 이론적인 값보다 AISC에서 권장하는 계수를 사용하는 것이 타당함을 알 수 있다.

참고문헌

- (1) Timoshenko, S. P. and Gere, M., 1988, *Theory of Elastic Stability*, McGraw-Hill, New York.
- (2) Allen, H. G. and Bulson, P. S., 1980, *Background to Buckling*, McGraw-Hill, New York.
- (3) Bleich, F., 1952, *Buckling Strength of Metal Structures*, McGraw-Hill, New York.
- (4) Gerard, G., 1962, *Introduction to Structural Stability*, McGraw-Hill, New York.
- (5) Ramberg, W. and Osgood, W. R., 1943, "Description of Stress-strain Curves by Three Parameters," *NACA, TN902*.
- (6) Galambos, T. V., 1968, *Structural Members & Frame*, Prentice-Hall, Inc, New York.
- (7) Hui, D., 1986, "Design of Beneficial Geometric Imperfections for Elastic Collapse of Thin-walled Box Columns," *Int. J. Mech. Science*, Vol. 28, No. 3, pp. 163~172.
- (8) Ever, B. and Tomblin, J., 1994, "Phenomenological Design Equation for FRP Columns with Interaction Between Local and Overall Buckling," *Thin-walled Structures*, Vol. 18, No. 2, pp. 117~131.
- (9) Kim, C. W., Han, B. K. and Lim, C. H., 1994, "Effect of Initial Imperfection on the Collapse Mode of Rectangular Tube," *Proceeding of the KSME Solid mechanics Division*, pp. 7~11.
- (10) 한병기, 안대식, 박봉현, 1996, "정사각튜브의 동적 평균 압괴하중 연구," 한국자동차공학회 논문집, 제4권, 제5호, pp. 157~167.
- (11) Ulsami, T. and Fukumoto, Y., 1982, "Local and Overall Buckling of Welded Box Columns," *Journal of Structural Division, ASCE*, Vol. 108,

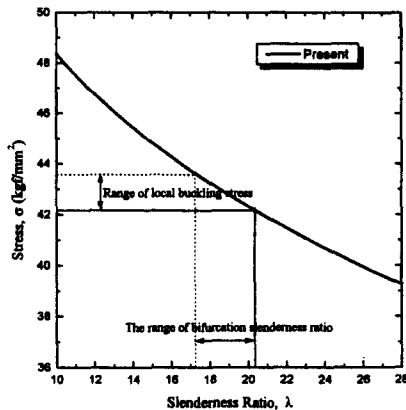


Fig. 12 Critical stress vs. slenderness ratio to know the band width slenderness ratio for specimen group A for simply supported boundary condition.

Table 6 Theoretical bifurcation slenderness ratio of each specimen group for various boundary conditions.

Specimen group	Bifurcation slenderness ratio		
	S-S	S-C	C-C
A	20.06	25.07	30.86
B	19.17	23.96	29.49
C	16.87	21.08	25.95
D	15.39	19.23	23.67

No. ST3.

- (12) 한병기, 안대식, 박봉현, 이진혁, 1996, “사각튜브의 국부좌굴과 전체좌굴,” 대한기계학회 춘계학술대회논문집(A), pp. 242~247.
- (13) 한병기, 안대식, 박봉현, 1996, “정사각튜브의 국부좌굴과 전체좌굴에 관한 연구,” 대한기계학회 춘계학술대회논문집(A), pp. 429~434.
- (14) 한병기, 박봉현, 정태은, 홍승준, 1997, “재료의 비선형을 고려한 후육 정사각튜브의 좌굴에 관한 연구,” 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집, Vol. II, pp. 150~156.