

박판사각튜브의 압괴 특성

이종선, 손 권*(대진대학교), 이정윤(삼척산업대학교)

Crush Characteristics of Thin-walled Rectangular Tube

Jong-Sun Lee, Kwon Sohn*, Jeong-Youn Lee

Abstract

In this study, crush characteristics of thin-walled rectangular tube is investigated.

The stiffness of the element is obtained from analytical moment-rotation relationship and approximated load-deflection relationship of thin-walled rectangular tube.

A computer program is developed for the large deformation analysis of frame. An incremental displacement method is used in the program and at each incremental stage, the stiffness matrix of the total structure is checked with the state each element for bending and compression.

Keywords : Thin-walled Rectangular Tube(박판사각튜브), Bending Collapse(굽힘붕괴), Axial Collapse(압축붕괴), Large Deformation Analysis(대변형해석)

1. 서 론

자동차는 차체설계, 시작차 제작 및 시험, 생산계획의 순으로 개발이 이루어진다. 여기서 가장 중요시하는 것이 개발기간의 단축이다. 개발 초기 단계에는 차체의 외형 그리고 승차정원과 중량 등 기본적인 사항 외에 확정된 자료가 없어 완벽한 차체설계가 불가능하므로 그동안 스틱 모델에 대한 연구가 많이 이루어져왔다. 자동차 사고시 승객의 안전을 확보하기 위한 내충돌성 연구들은 외부의 정적 하중에 의한 차체구조의 붕괴 하중을 결정하는 연구였다. 자동차의 충돌시 충돌에너지의 대부분이 부재 자체의 변형으로 흡수되어야 하는 문제에서는 붕괴 거동이 주요 관심사가 된다. 즉 에너지흡수에 관한 연구로 구조물이 붕괴되는 과

정의 힘과 변위선도를 정확히 예측할 필요가 있다.

본 논문에서는 압괴시 규칙적인 주름이 형성되는 박판사각튜브의 압괴 거동과 압괴 거리를 관찰하여 에너지 흡수능력과의 상관관계에 대하여 연구하였다. 박판사각튜브와 같은 종부재들은 각종 차체에 응용되어 종방향 하중을 지지하는데 이용되어진다. 차체에 응용되어질 때는 자동차의 안전과 직결되어 있다. 차량 정면충돌시 충돌에너지는 굽힘에 의한 변형보다 압괴에 의한 변형으로 많은 에너지를 흡수한다. 차량충돌시 이들 부재들이 흡수해야 할 에너지는 소성변형으로 흡수되어 지는데 이때, 이들 부재를 이루는 박판사각튜브에 대한 압괴 특성에 대한 고찰이 필요하다. 박판사각튜브의 압괴과정에서 주름이 형성되어 가는 과정을 해석

하고 수치해석 프로그래밍에 의한 결과값과 실험값을 비교하여 압괴 특성을 해석한다.

2. 이 론

2.1 박판사각튜브 압괴과정

박판사각튜브가 축방향의 압축하중을 받아 압괴될 때 Fig. 1과 같은 압괴거동을 나타낸다. 압축하중을 받는 사각튜브가 좌굴응력을 넘어서면 좌굴판에서 판의 처짐이 일어나기 시작하면서 대변형에 의한 좌굴거동이 나타난다. 이어서 압축하중이 더 이상 증가하지 않는 최대압괴하중 상태에 도달하며 패널부의 중심부에서 소성힌지가 생긴다. 이때 소성힌지는 패널부의 중립면을 중심으로 외측 방향과 내측 방향으로 2개가 발생한다. 최대압괴하중 상태를 지나면 소성힌지가 패널부의 중심부에서 모서리쪽 방향으로 발전하면서 모서리부와 패널부가 소성힌지를 중심으로 접히면서 주름을 형성한다. 이때 하중은 감소하고 변위는 증가하게 된다. 계속해서 하중이 감소하다 구속판의 모서리부가 서로 접촉하게 되면 압축하중에 대한 저항이 증가하므로 하중은 다시 증가하게 된다. 모서리부의 접촉이 패널부의 접촉으로 발전하면서 하중과 변위는 증가하게 된다. 하중이 증가하면 변형하지 않고 있는 패널부에서 국부좌굴이 일어나고 더 이상 하중은 증가하지 않는다. 이때의 하중이 1차 최대압괴하중으로 좌굴판의 외측에 1차 주름이 완성된다. 이어서 좌굴판에서는 패널부의 외측으로 구속판에서는 내측으로 소성힌지가 발생하고 발전하면서 하중은 감소하며 좌굴판에 2차 주름이 생긴다.

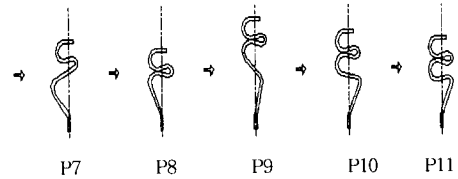
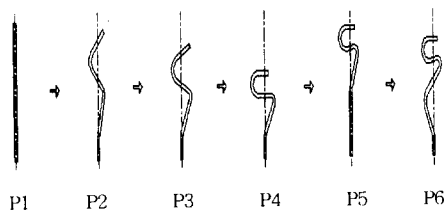


Fig. 1 Crushing process in section of buckling plate

하중이 감소하다 모서리부에서 다시 접촉이 일어나면 하중은 증가하고 패널부의 접촉으로 이어진다. 패널부에서 국부좌굴이 일어나면 구속판에서 외측으로 1차 주름이 완성되고 이때의 하중이 2차 최대압괴하중이 된다. 이때 2차 최대압괴하중은 1차 최대압괴하중에 비하여 작은 값을 가지게 되는데 외측과 내측의 횡방향 처짐의 차이에 의해 발생한다. 그리고 소성힌지가 좌굴판에서는 패널부의 내측으로 구속판에서는 외측으로 발생하며 구속판에 2차 주름이 생기기 시작한다. 소성힌지가 발전하면서 하중이 감소하며 2차 주름은 발전한다. 모서리부에 접촉이 일어나면 하중은 증가하고 패널부의 접촉으로 이어져 좌굴판에서 2차 주름이 완성된다. 이때의 하중은 제1최대압괴하중과 같은 값으로 이후의 거동은 구속판의 1차 주름과 좌굴판의 2차 주름이 형성될 때의 압괴 거동이 반복된다.

박판사각튜브의 압괴시 기본적으로 변형의 기하학적 연속조건을 만족시키려면 Fig. 2와 같은 요소로 구성되어야 하며 1은 사다리꼴 요소, 2는 수평 원통면 요소, 3은 경사 원추면 요소, 4는 이중 구면 요소를 나타낸다.

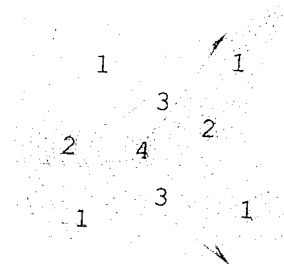


Fig. 2 Crush mechanism of thin-walled rectangular tube

2.2 압괴하중

사각튜브의 최대압괴강도는 사각튜브의 좌굴 응력에 좌굴거동을 고려하여 실험적으로 다음과 같이 구하였다.

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

여기서 K는 사각튜브의 탄성좌굴계수로 단면종횡비(c/d)의 영향을 받는데, 두께가 일정한 경우에는 Fig. 3과 같다.

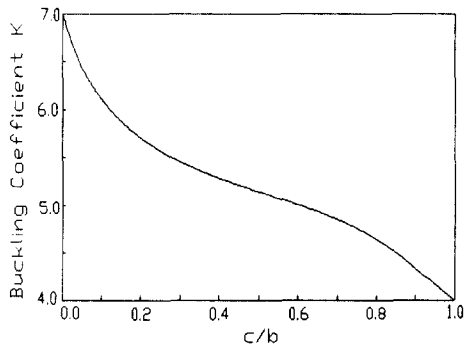


Fig. 3 Buckling coefficient K as a function of section aspect ratio (c/b)

그러나 식 (1)은 횡방향처짐 등의 초기결함으로 인해 최대압괴강도는 감소한다. 이러한 초기결함을 고려하여 최대압괴강도를 나타내면 다음과 같다.

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

여기서 ϕ 는 초기결함 수정계수로 초기 횡방향 처짐량 f_0 와 두께 t 로 다음과 같이 정의한다

$$\phi = e^{-\sqrt{f_0}/t} \quad (3)$$

초기 횡방향 처짐량 f_0 이 증가할수록 최대압괴강도는 감소함을 알 수 있다.

최대압괴하중은 최대압괴강도에 단면적을 곱함으로써 구할 수 있다.

$$P_{\max} = 2\sigma_{\max} t (b + c) \quad (4)$$

2.3 압괴거리

압괴시 한 주기는 각각의 판을 기준으로 소성 한지가 발생하여 주름이 형성될 때부터 주름이 완성될 때까지를 나타내며 이것은 내측 소성힌지로부터 외측 소성힌지까지 거리의 1/2에 해당한다. 압축하중을 받는 사각튜브는 압괴거리에 따라 고유한 하중과 거동을 갖는다. 이때 압괴거리는 주름 형성부의 변형 전 길이와 압괴잔류량의 차로써 구할 수 있다. Fig. 4는 압괴거동 전후의 좌굴판의 중앙에서의 단면을 보여주며, 압괴거리와 압괴 잔류량을 나타낸다.

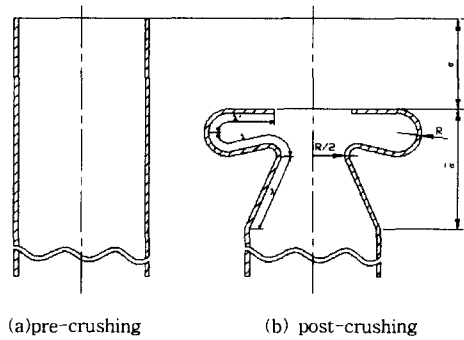


Fig. 4 Section of buckling plate

박판사각튜브의 하중-변위관계는 그 주름형성과정에 따라 몇 개의 구간으로 나눌 수 있는데 각 구간에서의 하중-변위 관계는 그 구간에서의 최대-최소 압괴하중과 최대-최소압괴거리로부터 근사적으로 결정한다.

Fig. 5는 하중 P 를 받아 δ 의 변위로 압괴될 때의 하중-변위선도를 나타낸다

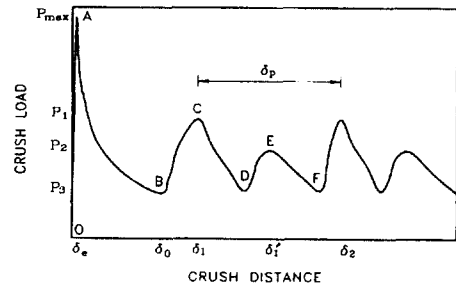


Fig. 5 Curve of crush distance vs. crush load of thin-walled rectangular tube

그림에서 압괴모드를 갖는 박판사각튜브의 하중-변위 관계는 부재가 선형적인 거동을 하는 탄성구간과 비선형 거동을 하는 후좌굴 구간을 거쳐 1차 주름이 형성되기 시작하는 최대압괴 하중상태에 이르는 구간(OA구간), 최대압괴 하중상태 이후 변위의 증가에 따라 하중이 감소하면서 처음으로 주름이 형성되기 시작하는 구간(AB구간), 그리고 변위의 증가에 따라 하중이 그 구간내 최대-최소압괴하중 사이에서 증가-감소를 반복하면서 주름이 규칙적으로 접히는 구간(BCD구간과 DEF구간)으로 편의상 크게 4가지의 구간으로 나눌 수 있다. 각 구간에서의 하중-변위 관계를 근사적으로 나타내면 다음과 같다.

OA구간 :

$$P = \frac{AE}{L} \delta \quad (5)$$

AB구간 :

$$P = \frac{P_{\max} - P_3}{\delta_0^4} (\delta - \delta_0)^4 + P_3 \quad (6)$$

BCD구간

$P =$

$$\begin{aligned} & \frac{P_1 - P_3}{2} \cos \left[\frac{4\pi}{\delta_p} [\delta - \{\delta_1 + (l-1) \delta_p\}] \right] \\ & + \frac{P_1 + P_3}{2} \end{aligned} \quad (7)$$

DEF구간

$P =$

$$\begin{aligned} & \frac{P'_1 - P_3}{2} \cos \left[\frac{4\pi}{\delta_p} [\delta - \{\delta_1 + (l-1) \delta_p\}] \right] \\ & + \frac{P'_1 + P_3}{2} \end{aligned} \quad (8)$$

3. 실험장치

본 논문에서 이용된 실험장치는 컴퓨터로 제어되는 20톤 용량의 만능 재료시험기로 내장된 소프트웨어에 의해서 정밀한 데이터를 얻을 수 있도록 구성되어 있다. 시편의 길이변화에 따

른 신호 및 하중의 데이터는 하중조건과 실험 시간에 따라 제어 소프트웨어에 의해 얻어졌다. Fig. 6은 실험장치를 나타낸다.

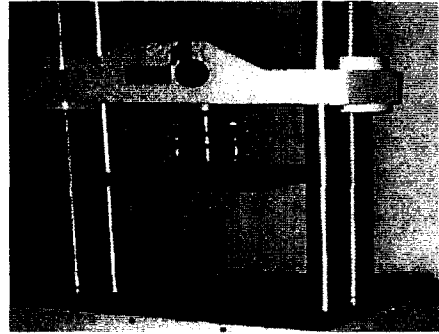


Fig. 6 Experimental setup of crush test

4. 실험 및 결과

4.1 시편

실험에 사용된 시편의 재질은 알루미늄으로써 기계적 성질은 Table 1과 같다.

알루미늄(6063)으로 된 직사각형 튜브를 후폭비(t/b)의 변화에 따라 압괴실험을 하였으며 시편의 주요치수는 Table 2와 같다.

Table 1 Material properties of Al 6063

Young's Modulus (E)	7000 kgf/mm ²
Poisson's Ratio (ν)	0.3
Yielding Strength (σ _y)	19.5 kgf/mm ²
Ultimate Strength (σ _u)	22.5 kgf/mm ²



Fig. 7 Thin-walled rectangular tube

Table 2 Dimensions of specimen

Specimen	Width b(mm)	Height c(mm)	Thickness t(mm)	t/b
1	40	20	1	0.025
2	50	30	1	0.2

Fig. 8은 압괴실험시 나타나는 박판사각튜브의 압괴거동을 나타내었다.

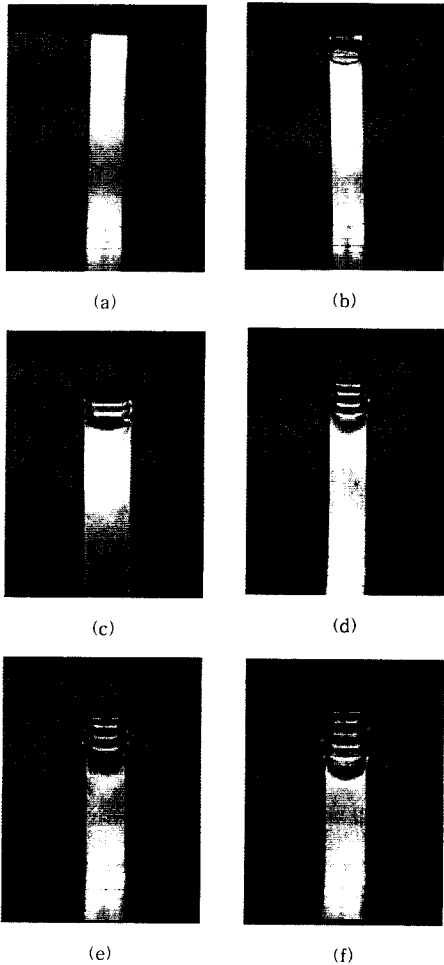
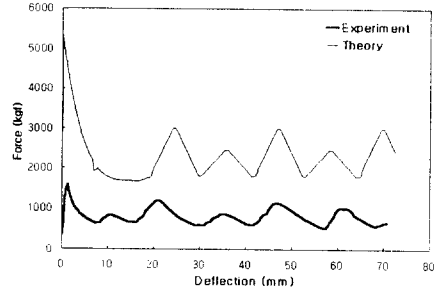


Fig. 8 The features of crush behavior

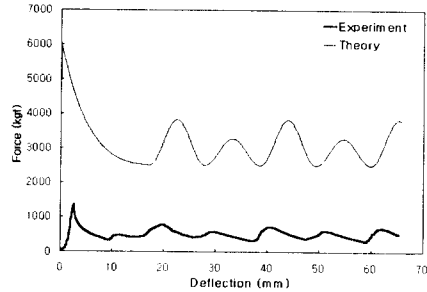
시편 1, 2에 대한 하중-변위곡선에서의 값들을 정리하여 수치해석 프로그램에 의한 결과값과 비교하여 나타내면 Fig. 9와 같으며 이는 박판사각튜브의 축방향 압축하중을 받아 압괴될 때, 하중-변위선도를 나타낸 것이다.

이론값과 실험값은 후폭비에 따라 선형적으로

증가되고 제시된 이론값은 실험값과 유사한 형태를 나타낸다. 즉, 압괴거리와 한 주기당 이론 압괴거리가 부합되며 압괴하중 또한 비슷함을 알 수 있다.



(a) specimen 1



(b) specimen 2

Fig. 9 Force-deflection curve of thin-walled rectangular tube

5. 결론

본 논문에서는 압괴시 규칙적인 주름이 형성되는 박판사각튜브의 압괴특성을 연구하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 외측 및 내측 횡방향 접힘 길이의 차이로 제 1정점과 제 2정점이 교차 반복된다.
- (2) 압괴하중의 특성값을 실험적으로 구했으며 박판사각튜브에서 제1최대압괴하중과 제2최대압괴하중은 일정한 비를 갖는다.
- (3) 박판사각튜브의 반과장 압괴 주름길이는 단면 중횡비와 후폭비의 함수로 주어진다.

참고문헌

- 1) Choon T. Chon, Homa Mohammadtrab and Mohamed El-Essawi, "Generic Stick Model of a Vehicle Structure", Vehicle Structural Wechanics Conference and Exposition, Detroit, Michigan, April 22-24, SAE 860825.
- 2) Majid, K. I., Theory of Structures with Matrix Notation, Newness-Butter-worth, 1978.
- 3) McIvor, I. K, Wienman, A. S. and Wang, H. C., "Plastic Collapse of General Frames", int. J. of Solid Structures, Vol. 13, pp. 197~210, 1977.
- 4) Chang, D, C., "Effect of Flexible Connection on Body Structure Reponse", SAE 740041.
- 5) Kecman, D., "Bending Collapse of Rectangular and Square Section Tubes", Int. J. Mech. Sci, Vol. 25, No. 9-10, pp. 623~636, 1983.
- 6) Mahmood, H, F., Paluszny, A. and Tang, X., "Crash Analysis of Thin Walled Beam-Type Structures", SAE 880894.
- 7) Livesley. R. K., Matrix Method of Structure Analysis, 2nd Ed., Pergamon Press, 1975.