

〈논 문〉 SAE NO. 97370044

## 차체구조용 박육부재의 압괴특성에 관한 연구

### A Study on the Collapse Characteristics of Thin-walled Structural Members for Automobiles Under Axial Compression Load

김 정 호\*, 임 성 훈\*\*, 양 인 영\*\*\*  
J. H. Kim, S. H. Lim, I. Y. Yang

#### ABSTRACT

In this paper, collapse test of thin-walled structural member widely used for automobiles is carried out under static compression load to observe the effects of cross-sectional shape and material on the energy absorbing capacity in the viewpoint of crashworthiness. Specimens tested consist of two sorts(Aluminium, CFRP) and configurations(Circular, Square) with variation in thickness. Also, comparisons of Al circular and square specimens are made to find the influence of difference in shape on the energy absorbing capability according as the thickness of specimen varies.

주요기술용어 : CFRP(탄소섬유강화복합재), Thin-walled Structure(박육구조), Axial Compression Load(압축하중), Energy Absorption Capacity(에너지흡수특성)

#### 1. 서 론

자동차는 충돌시에 인체에 심각한 상해를 주지 않을 정도의 충격력을 흡수할 수 있는 성능이 요구되고 있으며, 이와 같은 개념이 자동차 차체구조 설계에 점차 이용되고 있다. 특히, 자동차의 주요 구조를 이루는 박육부재가 충돌에 의해서 소성변형할 때의 압괴거동을 정확히 파악하여 부

재의 에너지 흡수특성을 계산하는 것이 차체구조 설계시 대단히 중요한 문제이다. 그러나 박육부재의 압괴현상은 충격 하중에서는 기하학적 변형이 크고 소성변형을 포함하는 비선형 거동을 하기 때문에 이론적으로 해석하는 것은 대단히 어렵다. 따라서, 먼저 정적 하중에서의 압괴거동을 실험적으로 고찰하는 해석이 행해지고 있다.

이제까지 정적 및 동적 압괴거동에 관해서는 Abramowicz와 Jones<sup>1,2)</sup>의 실험에 의하면 동적 상태의 압괴응력은 정적 압괴응력에 비해서 약 30% 정도 크게 되며, 石井<sup>3)</sup>에 의하면 충돌속도가 5m/s 정도에서 압괴모드는 동적과 정적인 경우에 큰 차이가 없었으며, 평균압괴응력에 관해

\* 정회원, 조선대학교 대학원 기계공학과

\*\* (주)금호타이어 연구소

\*\*\* 정회원, 조선대학교 (한국과학재단 지정) 수송기 부품 공장자동화 연구센터 연구원)

서는 동적인 경우가 정적인 경우 보다 약 10% 정도 크게 되는 것으로 보고되고 있다. 그러나 압력에 의해서 소비되는 에너지의 대부분은 소성 변형에 의해 발생하므로 재료는 탄성변형 상태가 아니고 응력이 일정한 상태에서 변형이 증가하는 강완전 소성체인 것으로 가정하여 소성관절을 사용한 모델이 고려되고 있다.

또한, 최근 국내외에서는 연료절감 및 환경개선의 관점에서 구조 경량화가 요구되는 박육부재의 개발에 관한 많은 연구가 행해지고 있으나, 이제까지는 자동차용 Leaf Spring, 범퍼 등에 사용하기 위한 범용 복합재료인 CFRP 구조부재의 개발에 한정되어 있으며 비강성과 비강도가 뛰어난 탄소섬유강화 복합재(Carbon Fiber Reinforced Plastics : 이하 CFRP라고 한다)를 이용하여 적층박육 부재의 압제실험을 통한 강도평가에 관한 연구결과는 거의 찾아볼 수 없다. 따라서, 연료절감 및 환경개선의 관점에서 구조 경량화를 고려한 CFRP 적층재의 압제특성을 고찰하여 최적의 차체용 박육부재의 개발이 대단히 중요한 문제라 생각된다.

본 연구에서는 최적의 차체구조 경량화용 부재를 개발하기 위하여 자동차 등에 주로 사용되는 원통 및 사각통 박육부재가 축하중을 받을때의 살두께의 변화, 재질의 변화 및 형상의 변화에 따른 압제모드, 흡수에너지특성에 대해 고찰하고자 한다. 특히, Al 박육원통 및 사각통 부재와 최근 급속도로 개발이 진행되고 있는 CFRP 박육원통 부재의 에너지 흡수특성을 고찰하고 재질 및 형상의 차이에 따른 압제특성을 고찰하여 최적의 경량화용 차체부재 개발에 이용될 수 있는 설계 자료를 얻고자 하며 경량화의 타당성에 대해 고찰하고자 한다. 또한, 소성관절을 이용한 이론해석으로부터 고찰한 박육부재의 좌굴현상을 실험결과와 비교하고자 한다.

## 2. 박육부재의 압제거동에 관한 이론해석

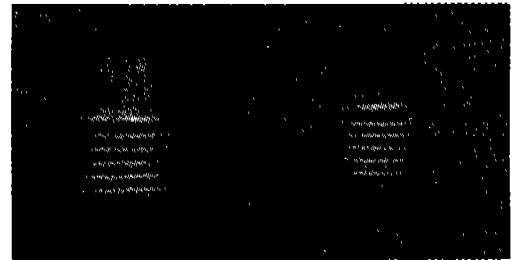
박육부재에 축하중을 가하면 원통시험편의 경우는 축대칭과 비축대칭의 2가지 압제모드가 나타나며, 사각통 시험편은 모서리 부분의 응력상

태에 따라 약간의 차이는 보이지만 대부분 한쪽 면은 외측으로 볼록한 형상(Bulge)으로 되고 옆면은 내측으로 들어가는 형태로 된다.<sup>4,5)</sup>

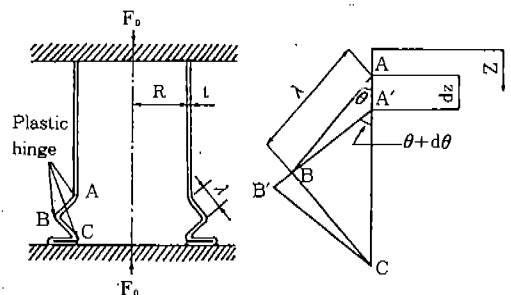
또한, CFRP 적층 박육부재는 고유의 취성때문에 대부분 파괴에 의해 압제되지만 단면의 형상, 섬유와 기지의 종류 등 여러 인자들에 의해서 압제형태와 특성이 좌우되나, 금속재료와는 달리 압제거동에 관한 명확한 결론을 도출해 내지 못하고 있는 실정이기 때문에 실험에 의한 고찰이 가장 타당한 해석 방법이라고 생각된다.

### 2.1 원통 시험편의 압제모드

박육원통 부재의 형상비( $R/t$ )가 적을때 즉, 살두께가 두꺼운 경우에는 Fig.1(a)에서와 같이 축대칭 모드에 의해, 얇은 경우에는 Fig.2(a)에서와 같이 비축대칭 모드에 의해서 압제가 진행

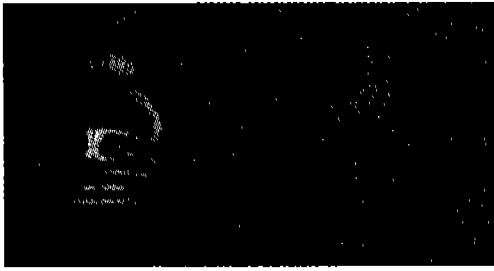


(a) Shape of Axisymmetric Mode

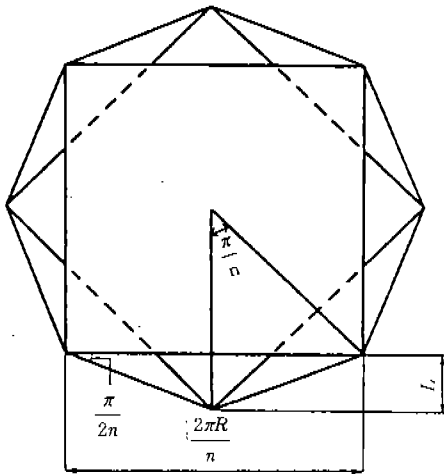


(b) Collapse Process of Circular Specimen

Fig.1 Collapse Mode of the Thin-Walled Circular Specimen (Axisymmetric Collapse Mode)



(a) Shapes of Non-Axisymmetric Mode



(b) Model of Non-Axisymmetric Mode

Fig.2 Collapse Mode of the Thin-Walled Circular Specimen (Non-Axisymmetric Collapse Mode)

되는 경향이 있었다. Al과 같은 연성재는 정적 압괴실험에서는 대부분 축대칭 모드를 일으키고, 주름은 시험편과 접촉해 있는 압축지그의 상단 및 하단중 어느 한곳에서부터 점진적으로 형성되는 순차좌굴(Progressive Buckling)에 의해 형상이 결정되어 일정한 축방향 반파장( $\lambda$ )을 갖는다. 주름형성은 재료의 소성변형에 의한 것이며, 굽힘모멘트  $m_0$ 는 Mises 항복조건을<sup>6)</sup> 수반하고, 변형강화를 무시한 강완전 소성체라는 가정하에서 이론해석을 행했다. Fig.1(b)에서는 축대칭 모드의 이론적인 압괴과정을 나타냈으며 Fig.

2(b)는 비축대칭 모드의 이론적인 압괴과정을 나타냈다.

먼저 Al 원통시험편의 압괴실험에서 주로 나타난 축대칭 모드에 의한 흡수된 에너지를 고찰하고자 한다. 첫째, Fig.1(b)에서 소성관절 점 A, C에 흡수되는 에너지를  $E_1$ 이라하면

$$E_1 = \int_0^{\pi/2} dE_1 = 2\pi^2 m_0 R = \frac{\pi^2 \sigma_s R t^2}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

이다. 여기서,  $m_0 = \frac{\sigma_s t^2}{2\sqrt{3}}$ ,  $t$  = 시험편의 살두께,  $R$  = 시험편의 반경이다.

또한, 소성관절 점 B에 흡수되는 에너지를  $E_2$ 라하면

$$E_2 = \int_0^{\pi/2} dE_2 = \int_0^{\pi/2} 4\pi m_0 (R + \lambda \sin \theta) d\theta = \frac{\pi \sigma_s (\pi R + 2\lambda) t^2}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

이다.  $\lambda$ 는 원통 시험편의 반파장 길이이다.

또한, 축대칭 부분인 AB, BC의 원주방향 변형에너지를  $E_3$ 라하면

$$E_3 = \int_0^{\pi/2} dE_3 = 2\pi \sigma_s \lambda^2 t \quad (3)$$

이다. 따라서, 축대칭 주름이 1개 형성될 때의 총 흡수된 에너지를  $E_T$ 라하면  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ 의 합으로서 다음과 같이 된다.

$$E_T = E_1 + E_2 + E_3 = \frac{2\pi \sigma_s t}{\sqrt{3}} (\pi R t + \lambda t + \sqrt{3} \lambda^2) \quad (4)$$

주름형성 과정 중에 두께를 고려한 외력에 의한 일과 총 흡수된 에너지  $E_T$ 는 서로 같으므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_T = F_m \times (2\lambda - 2t) = \sigma_m \times 2\pi R t \times (2\lambda - 2t) \quad (5)$$

결국 식 (4)와 식 (5)를 비교하여 무차원화 하면 항복응력과 평균응력과의 비는 다음과 같다.

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_y} = \frac{1}{2\sqrt{3}R} \left( \frac{\pi Rt}{\lambda-t} + \frac{\lambda t}{\lambda-t} + \frac{\sqrt{3}\lambda^2}{\lambda-t} \right) = f(\lambda) \quad (6)$$

여기서,  $\sigma_m/\sigma_y$ 는  $\lambda$ ,  $R$ ,  $t$  함수로 됨을 알 수 있고,  $\sigma_m/\sigma_y$ 를 최소로 하는  $\lambda$ 값을 구하기 위해서  $f'(\lambda)=0$ 으로 하면 축방향 반파장  $\lambda$ 는 다음과 같다.

$$\lambda = t + \frac{\sqrt{(3+\sqrt{3})t^2 + \sqrt{3}\pi Rt}}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

박육부재의 형상비( $R/t$ )와 식(7)에서 구한 축방향 반파장  $\lambda$ 와 박육부재의 반경  $R$ 과의 관계를 Fig.3에 나타냈고, 형상비( $R/t$ )와 식(6)에서 구한 항복응력과 평균응력과의 비  $\sigma_m/\sigma_y$ 를 Fig. 4에 나타냈다. 그림중의 ■ 표시는 압괴실험결과를 나타낸다.

다음은 Fig.1에 나타낸 원통시험편의 압괴과정으로부터 하중-변위선도를 구하기로 한다.

두께  $t$ 를 고려했을 경우는  $Z = (2\lambda - 2t) \times (1 - \cos\theta)$ 로 놓을 수 있으며, 앞에서 서술한  $E_r$ 는 내부로 흡수된 에너지량을 나타내는 식이며,

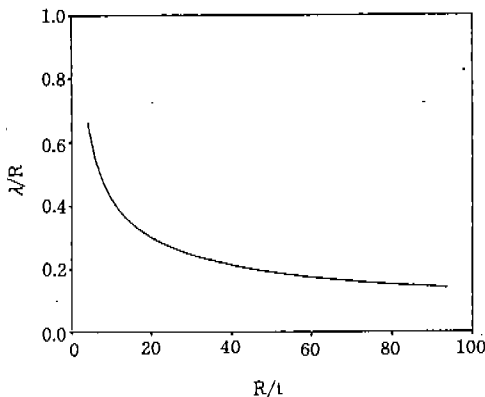


Fig.3 Ratio of Lobe Length to Radius Against R/t

이 식과 외력에 의한 일  $F_0 \times dz$ 가 동일하므로 1개의 주름이 형성될때 축방향으로  $Z$ 만큼 이동했을 때의 하중  $F_0$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_0 = \frac{4\pi\sigma_y R t^2}{\sqrt{3}\{4(\lambda-t)z - z^2\}} + \frac{\pi\sigma_y \lambda t^2}{\sqrt{3}(\lambda-t)} + \frac{\pi\sigma_y \lambda t \{2(\lambda-t) - z\}}{\sqrt{4(\lambda-t)^2 z - z^2}(\lambda-t)^2} \quad (8)$$

식(8)에 살두개의 변화를 대입하여 구한  $F_0$ 를 그래프로 나타내면 Fig.5와 같이 된다. 그래프에 나타난 곡선은 주름형성 과정이 연속적으로 이루어지지 않고 각각 독립적으로 형성되기 때문에 상승곡선의 기울기가 수직적으로 나타났다. 최대 하중은 항복응력에 원통 단면적을 곱해서 구하고, 하중은 그 값을 넘지 않는 것으로 한다. 두께가 두꺼워짐에 따라서 최대하중이 커지게 되고 축방향 파장이 길어지게 되기 때문에 형성되는 주름수 즉, 하중-변위 선도에서의 피크값의 수가 적어지고 있는 것을 알 수 있다. 이 경향은 3항에서의 실험결과와 잘 근사하고 있다.

## 2.2 사각통 시험편의 압괴모드

본 항에서는 지금까지 발표된 연구결과를<sup>7-9)</sup> 토대로 사각통 부재의 압괴과정을 이론적으로 해석한 후 실제 실험결과와 비교하고자 한다. Fig. 6은 사각통 부재의 이론적인 압괴형태를<sup>10)</sup> 나타

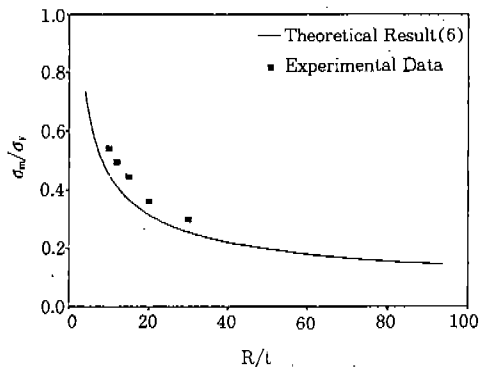


Fig.4 Ratio of Mean Stress to Yield Stress Against R/t

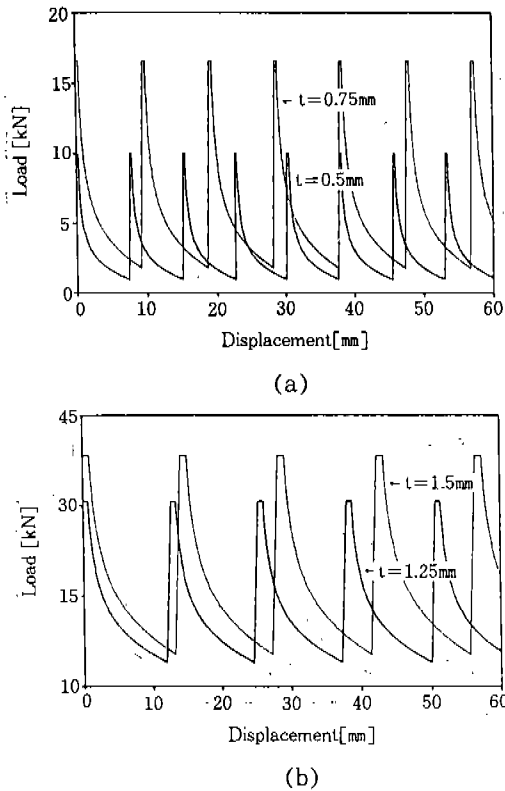


Fig.5 Relationship Between Load and Displacement

낸 것으로 Fig.6의 메카니즘을 바탕으로하여 사각통 단면의 압괴모드를 크게 두가지로 구별할 수 있다. 첫째는 직선적인 힌지(Hinge)선을 갖는 형태로 변형하는 모드로서 힌지선 이동의 유무에 따라서 축대칭 모드와 비축대칭 모드로 구별할 수 있는 비확장모드(Inextensional Mode)이다. 이 중에서 축대칭 모드는 Type I 모드만으로 압괴가 이루어지는 것으로 하나의 층(Layer)에 형성되는 4개의 돌출부(Hobe)중 마주보는 두개는 안쪽으로 또다른 마주보는 두개는 밖으로 변형하거나, 3개의 돌출부는 안쪽으로 나머지는 밖으로 변형하는 형태로 압괴된다. 한편, 비축대칭 모드는 Type I 과 Type II 의 혼합형 모드로서 하나의 층에 형성된 4개의 돌출부 중에서 3개의 돌출부는 각각 밖으로 이동하고 나머지 하나는 안쪽으로 변형하는 경우와, 인접한 두개의 돌출부중 한쌍은 밖으로 다른 한쌍은 안쪽으로

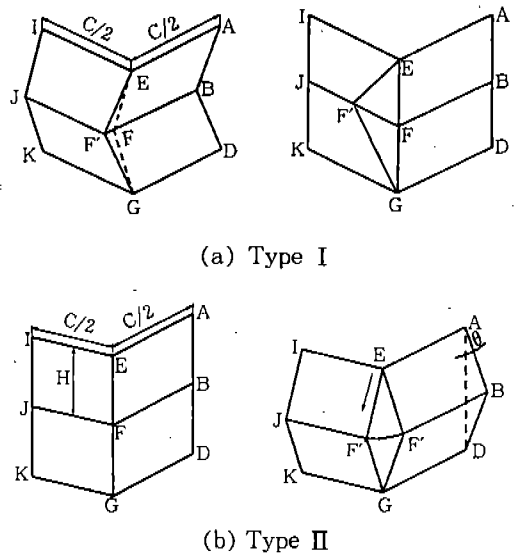


Fig.6 Basic Collapse Elements of the Square Specimen

이동하는 형태로 압괴한다. 둘째는 사각통 부재의 직선적인 변형에 비해서는 아주 작은 면적이지만 에너지 흡수면에서 크게 영향을 미치는 모드로서 사각통의 모서리가 4개의 Type II 모드로 밖으로 신장되면서 압괴가 이루어진 확장모드(Extensional Mode)이다.

위에서 나타난 압괴모드를 이용하여 지금까지의 많은 연구자들은<sup>11,12)</sup> 직사각형 및 정사각형의 대칭적인 압괴모드를 해석하여 왔는데, 이 해석의 관심은 확장모드에서 모서리 부분의 신장과 굽힘이 에너지흡수에 어느정도 영향을 미칠 수 있는가를 확인하는 것이었다.

그 결과 확장모드에 의한 에너지흡수는 전체량의 1/3정도 차지하는 것으로 밝혀졌는데 이것은 변형량은 상대적으로 미소하지만 모서리 부분의 확장으로 인한 에너지흡수가 상당히 크다는 것을 보여주고 있다. 그리고 나머지 2/3는 비확장모드에 의한 에너지흡수인 것으로 나타났다.

본 연구에서의 사각통 시험편의 정적 압괴 실험에서는 대부분이 비축대칭 모드로 압괴가 되었으며 확장모드에 의한 압괴형상은 거의 찾아볼 수 없었다. 그러므로 본 항에서는 정적 압괴 실험에서 나타난 비확장모드에 관한 에너지흡수의

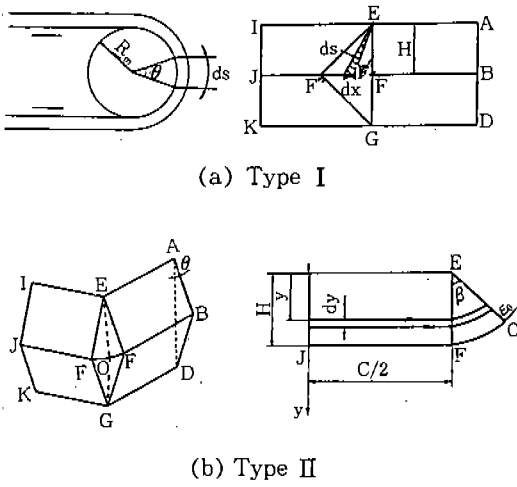


Fig.7 Folding Modes of Square Specimen

이론식과 압제실험에서 얻어진 실험결과와의 비인  $\sigma_m/\sigma_y$ 의 관계를 비교하기로 한다.

Type I 모드에 의해 흡수된 에너지량은 Fig.6 (a)에서 소성관절 AEI 및 DGK와 BFJ가 굽혀지는데 필요한 에너지  $E_1$ , 소성관절 EF의 이동에 필요한 에너지  $E_2$ , Fig.7(a)와 같이 평평한 부분이 곡률반경  $R_0$ 으로 굽혀지고 다시 펴지는 것으로 나타낼 수 있는 F에서 소성관절이 되접어짐에 따라 흡수된 에너지  $E_3$ 의 합 즉, Type I 모드에 의해 흡수된 총 에너지  $E_T$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_T = m_0 \left( 2\pi C + \frac{4H^2}{R_1} + 4\pi H \right) \quad (9)$$

식(9)에서 압제거리를 H로 하면 평균압제하중  $F_m$ 은 다음과 같으며

$$\frac{F_m}{m_0} = \frac{4\pi C}{H} + \frac{4H}{R_1} + 4\pi \quad (10)$$

정사각형 단면에서  $F_m$ 을 최소로 하는 H를 구하여  $\sigma_m/\sigma_y$ 의 관계를 이끌어 내면 다음과 같다.

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_y} = \frac{2.6\pi}{\frac{C}{t} - 8} \quad (11)$$

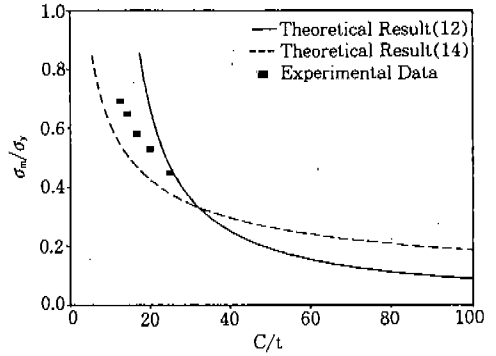


Fig.8 Ratio of Mean Stress to Yield Stress Versus C/t

또한, Type II 모드에 대해서 Abramowicz 등이 제시한 이론해를 살펴보면, Fig.7(b)에 나타난 평면 E, F, I, J와 원추면 EOF로 구성된 부분에서 흡수된 에너지  $E_1$ , 평면과 원추면이 접해있는 소성관절 EF의 굽힘에 필요한 에너지  $E_2$ , 소성관절 EI 및 FJ의 굽힘에 필요한 에너지  $E_3$ 의 합인 Type II 모드에 의한 총 흡수된 에너지는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E_T &= 4(E_1 + E_2 + E_3) \\ &= m_0 \left( 2\pi \frac{H^2}{t} + 2\pi C + \pi H \right) \end{aligned} \quad (12)$$

윗식에서  $E_T$ 를 최소로 하는 H값을 구하여 평균압제하중  $F_m$ 과  $\sigma_m/\sigma_y$ 와의 관계를 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{F_m}{m_0} = 8\pi \sqrt{\frac{C}{t}} + 2\pi \quad (13)$$

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_y} = \frac{\pi}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{C/t} \left( 4\sqrt{\frac{C}{t}} + 1 \right)$$

위에서 제안된 응력비  $\sigma_m/\sigma_y$ 에 관한 이론해와 실제 실험에서 나타난 결과를 형상비(C/t)에 따라서 비교하여 Fig.8에 나타냈다. Fig.8로부터

알 수 있는 바와 같이 축대칭 모드에 관한 이론 해보다는 비축대칭 모드의 이론해와 실제 실험에서 얻은 결과치가 잘 근사하고 있음을 확인할 수 있었다.

### 3. 박육부재의 정적 압축실험

#### 3.1 시험편

본 연구에서는 자동차 등에 많이 사용되는 구조부재의 기본요소로 형상에 의해 파괴형태가 좌우되지 않는 축대칭 박육원통 및 사각통을 시험편으로 하였다. 재질은 변형속도에 민감한 Al-6063 인발관과 CFRP(0°) 원통을 제작하여 사용하였다. Al 박육원통 시험편의 제작은 내경 29mm, 외경 35mm, 길이 4m의 이음매가 없는 Al 원통관을 길이 100mm로 절단한 후 내경이 30mm, 두께가 각각 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5mm가 되도록 선반가공 하였으며, 사각통은 한변이 25mm인 정사각형관을 두께가 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2mm로 가공하였다. CFRP 박육원통 시험편은 탄소섬유 프리프레그 8매를 원통맨드릴에 배향 각이 0°가 되도록 적층하여 오토크라브 방법으로 제작한 후 다이아몬드 커터(Powermet 2000 Abrasive Cutter)를 이용하여 100mm로 절단하였다. Table 1에는 본 실험에 이용한 Al 박육원통 시험편 및 CFRP 박육원통 시험편의 사양을 나타냈고, Table 2는 Al 박육사각통 시험편의 사양을 나타냈다.

특히, 박육부재의 압쇄하중, 평균압쇄응력 등 압쇄특성을 평가할 때 항복응력  $\sigma_y$ 를 기준으로 하

Table 1 Dimension of the Circular Specimens

Specimen No.	Inner Radius R[mm]	Thickness t[mm]	Aspect Ratio [R/t]	Material
AC050	15	0.50	30	Al
AC075	15	0.75	20	Al
AC100	15	1.00	15	Al
AC125	15	1.25	12	Al
AC150	15	1.50	10	Al
CFRP(0°)	15	1.25	12	CF/Epoxy

기 위하여, 인장시험을 실시하여 재료의 항복강도를 구하였다. Table 3과 4는 Al-6063 및 CFRP 시험편의 기계적 성질을 나타냈다.

#### 3.2 실험장치 및 방법

압쇄실험은 Shimadzu Servopulser 시험기를 이용하여, 로드셀과 액츄에이터 사이에 두개의 압축지그를 평행이 되도록 설치하고, 시험편과 지그 사이에는 윤활하여 시험편 끝단의 구속을 원활하게 하였으며 변형속도의 영향이 나타나지 않도록 하였다.

또한, 실험결과에 단부효과(End Effects)가 나타나지 않고, 순차적인 압쇄가 주기적으로 발생하도록 시험편 전체의 축방향 길이가 40mm가 될 때까지 즉, 변형량이 60mm가 되도록 압쇄시켰다.

에너지 흡수량의 계산은 압쇄실험에서 얻은 하

Table 2 Dimension of the Square Specimens

Specimen No.	Inner Width C[mm]	Thickness t[mm]	Aspect Ratio [C/t]	Material
AS100	25	1.0	25	Al
AS125	25	1.25	20	Al
AS150	25	1.50	16.66	Al
AS175	25	1.75	14.29	Al
AS200	25	2.0	12.50	Al

Table 3 Material Constants of Al 6063

Poisson's ratio $[\nu]$	Young's modulus [E]	Yield stress $[\sigma_y]$	Tensile stress $[\sigma_t]$
0.31	66[GPa]	180[MPa]	210[MPa]

Table 4 Material Constants of CFRP

Material Constant	Carbon fiber	Matrix
Density $[\text{kg}/\text{m}^3]$	1750	1200
Strength [MPa]	3240	80
Modulus [GPa]	230	3.2
Wt. [%]	56~58	33~34
Curing temp. $[\text{°C}]$	135°C × 1hr	135°C × 1hr

중-변위선도의 면적이 시험편에 흡수되는 에너지라고 생각하여 하중-변위선도를 식 (14)와 같이 적분하여 부재내에 흡수된 에너지 특성을 평가하였다.

$$E_a = \int_{l_0}^l P \, dl \quad (14)$$

여기서,  $E_a$ 는 박육부재에 흡수된 에너지이며,  $P$ 는 하중을 나타낸다. 또한, 단위체적당 흡수에너지량  $E_v$ 와 단위질량당 흡수에너지량  $E_p$ 의 계산식은 다음과 같다.

$$E_v = \frac{E_a}{V}, \quad E_p = \frac{E_a}{V_p} \quad (15)$$

여기서,  $V$ 는 압케된 체적,  $V_p$ 는 압케된 질량이다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

흡수에너지의 계산은 압케실험에서 얻은 하중-변위선도를 적분하여 구하였고, 그것을 압케길이 60mm로 나눔으로서 평균하중을 구했으며, 평균하중을 실험전 박육부재의 단면적으로 나누어 평균응력을 구했다. 또한, 평균응력과 항복응력비를 구할 때는 Table 3의 항복응력값을 이용했다. 소성관절을 이용한 이론해석 결과와 실험결과를 재질과 형상의 차에 따라 최대하중, 평균하중, 하중-변위관계를 비교하여 에너지 흡수특성에 미치는 재질 및 형상의 영향에 대하여 검토했다.

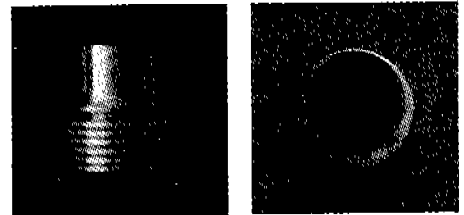
##### 4.1 박육원통 압케특성

일반적으로 최대하중은 박육원통 시험편을 압케할때 초기에 생기는 피크점에서 나타났으며 압케실험에 의한 Al 박육원통 부재의 압케형태는 크게 두가지로 구분할 수 있었다. 하나는 박육원통 부재가 축방향 압축하중을 받을때 원주방향으로 점진적이면서 동일한 변형을 갖는 축대칭 모드(Fig.1) 및 이와는 달리 원주방향으로 돌출부(Lobes)를 형성해서 불균일한 파장을 형성해 가

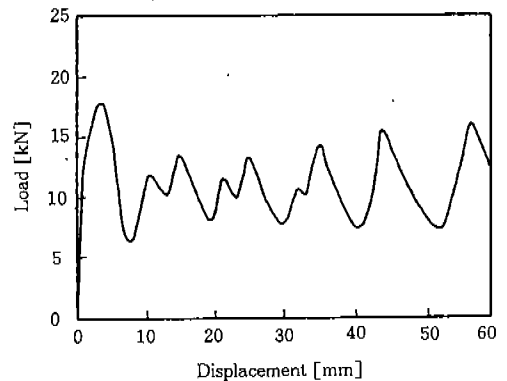
는 비축대칭 모드(Fig.2)였다.

Fig.1, 2에서와 같이 압케실험후 시험편 형상으로부터 알 수 있듯이 대부분의 Al 박육원통 시험편은 초기에는 축대칭 모드로 압케하다가 재료 자체의 불안정성 등과 같은 외부적인 요인에 의해서 비축대칭 모드로 변해가는 과정을 겪으면서 압케하는 경우가 있었다. 특히, 비축대칭 모드의 경우는 주름살 지름의 측정결과 압케시 주름살이 바깥쪽으로 이동하지 않고 시험편 내부로 삼각형, 오각형 등 다양한 형상을 만들며 압케되었으며, 두께가 두꺼울수록 이러한 비축대칭 압케과정은 감소했다.

Fig.9는 살두께가 1.25mm인 Al 박육원통의 하중-변위선도와 압케형상을 나타내고 있다. 여기서 하중 변화 과정을 살펴보면 실제 변형에서는 완만하게 진행해 가지지만, Fig.5의 이론 해석에서는 하중의 상승곡선은 압케된 주름이 하나하나



(a) Cross-Sectional Shape of Circular Seciment( $t=1.25\text{mm}$ )



(b) Relationship Between Load and Displacement

Fig.9

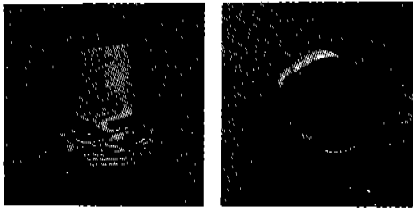


독립적인 것이며 이것들이 계속 반복해서 형성된다고 생각되기 때문에 곡선이 예리하여 실제 실험과는 일치하지 않았다. 그러나 하강곡선은 실험과 같이 완만한 곡선을 보였다. Fig.10은 두께 0.5mm인 Al 박육원통의 하중-변위선도와 압괴형상을, Fig.11은 두께 1.25mm인 CFRP 박육부재의 하중-변위 선도와 압괴형상을 나타낸다.

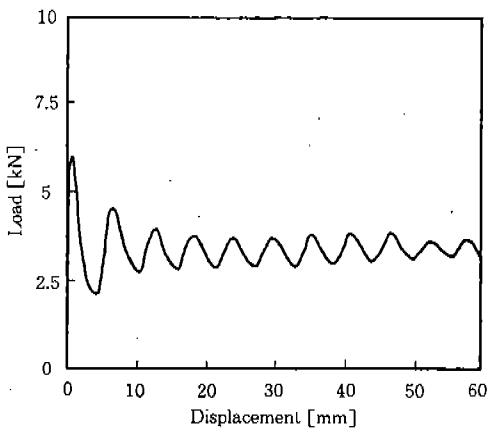
Fig.9로부터 압괴과정을 주의 깊게 관찰해 보면 순차압괴의 최초 주름이 형성될 때에 하부쪽이 상부보다 짧기 때문에 주름의 상하부가 동시에 이미 압괴되어 있는 주름 부분에 접촉하는 것이 아니라 아래쪽이 먼저 접촉하면서 하나의 피크가 나타나고, 상부의 주름이 접촉했을때 다시 또 한번의 피크가 나타났다. 따라서 실제 실험에서는 하나의 주름에 대해서 주름이 형성되는 초

기에 작은 피크부가 생기고 주름이 완성될때 큰 피크부가 생겼다. 이러한 경향은 두께가 두꺼울수록 뚜렷하게 나타났으며 압괴 전반부에서 잘 나타나고 점차적으로 사라졌다. Fig.10은 앞의 시험편들과 달리 비대칭 모드가 발생한 경우의 압괴형상을 나타낸다.

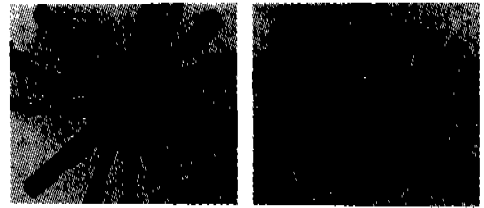
비대칭 모드에서 나타난 특징중 하나인 주름 외곽의 돌출부(Lobe)는 두께가 두꺼울수록 감소하고 얇아짐에 따라서 증가하는 경향을 보였는데, 일반적으로 축대칭에서 비축대칭 모드로 진행해 가는 시험편은 두께에 따라 3~4개, 처음부터 비대칭 모드로 압괴된 시험편은 두께에 따라서 4~5개가 형성되었다. 즉, 주름살 외곽의 돌출부 갯수가 비대칭 모드의 압괴에 영향을 미치는 것으로 예측할 수 있다. 평균하중( $F_m$ )의 계산은 압괴실험 결과로부터 얻은 하중-변위선



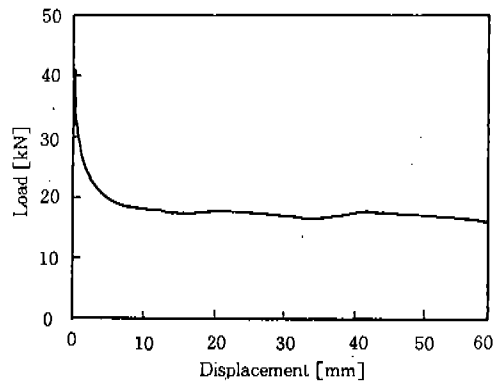
(a) Cross-Sectional Shape of Circular Seciment( $t=0.50\text{mm}$ )



(b) Relationship Between Load and Displacement



(a) Cross-Sectional Shape of CFRP( $0^\circ$ ) Specimen



(b) Relationship Between Load and Displacement

Fig.10

Fig.11

도를 적분하여 압케길이  $\delta_{max}$ 로 나눠서 다음과 같이 구하였다.

$$F_m = \frac{1}{\delta_{max}} \int_0^{\delta_{max}} F_{od} d\delta \quad (17)$$

위에서 구해진 평균하중을 압케전의 시험편 단면적으로 나누어 평균응력  $\sigma_m$ 을 구했다. 또한, 구조 경량화용 CFRP 박육원통 부재의 압케특성 실험결과를 살펴보면 Fig.11에서 알 수 있듯이 압케초기에 최대하중이 발생한 후 급격한 파괴가 발생하였으며 압케 완료시까지 똑같은 경향이 나타났다. CFRP 박육원통 부재의 압케후의 형상은 섬유가 파단하지 않고 원통벽의 단면 중앙에 생긴 원환상의 썩기형 크랙이 진전하여 원통벽의 내측과 외측으로 확장하는 압케모드(Splaying Mode) 즉, 원환상 크랙이 생겼다. 이는 적층이 분리하는 모드였다.

Al 박육원통 부재의 압케특성과 CFRP 박육원통 부재의 압케특성을 비교하기 위해서 살두께 1.25mm인 Al 박육원통 부재의 압케 실험결과인 Fig.9와 살두께 1.25mm인 CFRP 박육원통 부재의 압케 실험결과인 Fig.11을 비교한 결과 Al의 경우는 최대하중이 약 18.03[kN]이었으나, CFRP의 경우는 최대하중이 약 40.14[kN]으로 CFRP가 Al의 경우보다 약 2.3배 정도 최대하중이 크게 나타났다. 또한, 단위질량당의 에너지 흡수특성을 비교해보면 CFRP의 경우는 66.11[kJ/kg], Al의 경우는 20.79[kJ/kg]로서 CFRP 박

육원통 부재가 Al 박육원통 부재의 경우보다 약 3.2배 정도 높았다. 단위체적당의 에너지 흡수특성에서는 CFRP의 경우는 86.15[MJ/m<sup>3</sup>], Al의 경우는 53.60[MJ/m<sup>3</sup>]으로 CFRP 박육원통 부재가 Al 박육원통 부재보다 약 1.6배 정도 높았다. 박육원통 부재의 압케특성 결과의 평균값을 Table 5에 나타냈다.

## 4.2 박육사각통의 압케특성

박육원통 부재의 압케특성과 박육사각통의 압케특성을 비교하기 위하여 Al 박육원통과 재질이 동일한 Al 박육사각통을 두께가 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0mm로 가공한후 압케실험 하였다. Fig. 12는 Al 박육원통과 체적이 같은 두께가 1.25mm로 박육사각통 부재의 하중-변위선도와 박육사각통의 압케형상을 나타냈다.

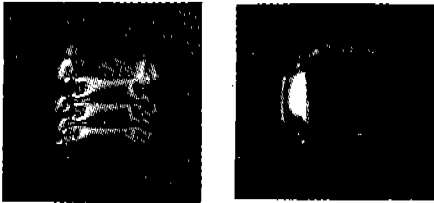
Al 박육원통 부재와 같이 실제 압케에서는 압케시에 생긴 전·후의 주름이 상호 영향을 받으므로 압케시작때 나타난 피크까지 달하지 못하고 상승곡선이 완만하게 진행되었다. 이론 해석에서는 주름이 각각 독립적으로 형성되므로 하중의 상승곡선은 날카롭고 하강곡선은 실제 변형과 같이 완만하게 감소함을 보였다. 또한, 원통 시험편과 같이 뚜렷한 하중곡선을 나타내지 못하고 있어 주름형성 과정시 주름과 주름사이 간섭이 심하였음을 보여주었고 두께가 두꺼울수록 그 정도는 더욱 컸다.

실험결과에 의하면 원통 시험편과 같이 모든 시험편에 대해서 하중의 피크점이 최대하중이며,

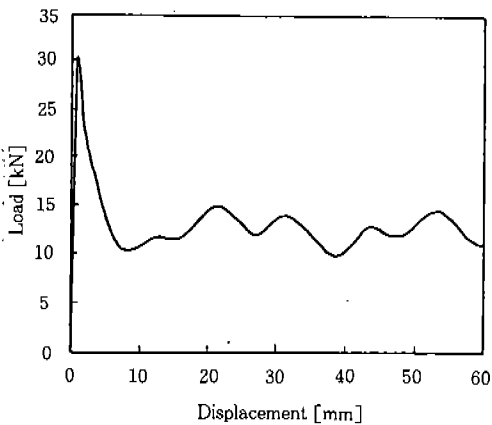
Table 5 Mean Values of Circular Specimens from Experimental Data

Specimen No.	Aspect Ratio [R/t]	Absorbed Energy E[J]	Maximum Load F <sub>max</sub> [kN]	Mean Load F <sub>m</sub> [kN]	Mean Stress $\sigma_m$ [MPa]	Stress Ratio $\sigma_m/\sigma_y$	Energy per Unit Mass [kJ/kg]	Energy per Unit Volume [MJ/m <sup>3</sup> ]	Collapse Mode
AC-150	10	870.88	22.30	14.51	97.75	0.543	22.70	58.66	S
AC-125	12	657.75	18.07	10.96	89.31	0.496	20.79	53.60	S
AC-100	15	469.54	13.97	7.820	80.30	0.446	18.63	48.21	S
AC-075	20	283.17	9.73	4.720	65.14	0.362	14.83	39.08	S
AC-050	30	154.26	5.90	2.570	53.64	0.298	12.16	32.19	N
CFRP(0°)	12	1057.2	40.14	17.62	143.6	0.044	66.11	86.15	Splaying

박육사각통 부재의 압괴응력 상태를 파악하기 위해서  $\sigma_m/\sigma_c$ 비를 시험편 두께에 따라서 Table 6에 나타냈다.  $t=1.0\text{mm}$ 일 때는  $\sigma_m/\sigma_c$  값이 0.5 이하이며,  $t=1.0\text{mm}$  이상일 때는 0.5 이상으로



(a) Cross-Sectional Shape of Square Specimen ( $t=1.25\text{mm}$ )



(b) Relationship Between Load and Displacement

Fig.12

나타났다. 두께가 얇은 시험편중에서 초기 불안정성 때문에  $\sigma_m/\sigma_c$ 값이 0.3 이하에서 압괴된 것도 있었으나, 대부분의 시험편은  $\sigma_m/\sigma_c$ 값이 0.5 이상에서 재료의 압괴가 이루어졌다. 흡수에너지는 박육원통 부재에서와 같이 하중-변위선도의 폐곡선 내부면적으로부터 구했으며 평균하중은 부재의 흡수에너지를 변위량으로 나누어 계산했고, 평균응력은 평균하중을 시험편의 단면적으로 나누어 계산했다.

변형모드는 살두께가 얇은 것은 축대칭 모드로 압괴하고 두께가 두꺼워짐에 따라서 혼합형 모드인 비축대칭 모드로 압괴되었는데 압괴과정은 1 주기의 주름이 생성된 후 다음 주름이 생성되는 순차압괴로 이루어졌다. 실험에서 나타난 Al 박육사각통 부재의 단위질량 및 체적당의 평균 에너지 흡수량의 평균값을 Table 6에 나타냈다. 특히, Al 박육원통, CFRP 박육원통 및 Al 박육사각통 부재의 압괴특성을 비교 하기 위하여 살두께가 서로 같은 1.25mm이고 체적이 서로 같은 3종류의 박육부재의 압괴특성을 비교하여 Table 7에 나타냈다.

체적이 서로 같고 재질 및 형상이 다른 경량화용 박육부재의 압괴특성을 비교하기 위해 Table 7에 나타난 결과로부터 최대하중의 비교치를 Fig.13에 나타냈으며, 흡수에너지의 비교치는 Fig.14에, 단위질량당 흡수에너지의 비교치는 Fig.15에, 단위체적당 흡수에너지의 비교치는 Fig.16에 각각 나타냈다.

Fig.13~16으로부터 같은 체적의 경우 CFRP

Table 6 Mean Values of the Experimental Data for Square Specimen

S=Symmetric, N=Non-symmetric

Specimen No.	Aspect Ratio [C/t]	Absorbed Energy $E_a$ [J]	Maximum Load $F_{max}$ [kN]	Mean Load $F_m$ [kN]	Mean Stress $\sigma_m$ [MPa]	Stress Ratio $\sigma_m/\sigma_c$	Energy per Unit Mass [kJ/kg]	Energy per Unit Volume [MJ/m <sup>3</sup> ]	Collapse Mode
AS-100	25.0	504.55	22.20	8.40	80.769	0.448	17.08	48.51	S
AS-125	20.0	749.70	29.99	12.50	95.238	0.529	20.73	57.12	S
AS-150	16.6	998.20	36.65	16.60	104.40	0.580	23.12	62.78	S
AS-175	14.3	1310.1	45.47	21.84	116.64	0.648	26.02	69.96	S→N
AS-200	12.5	1620.4	56.84	27.00	125.00	0.694	27.75	75.02	S→N

Table 7 Comparison of the Collapse Characteristics for Three Members Tested with Equal Thickness( $t=1.25\text{mm}$ ) and Cross-section Area

Material	Cross-section Shape	Maximum Load $F_{max}$ [kN]	Absorbed Energy[J]	Energy per Unit Mass [kJ/kg]	Energy per Unit Volume [MJ/m <sup>3</sup> ]
Al	Circular	18.07	657.75	20.79	53.60
	Square	29.99	749.70	20.73	57.12
CFRP	Circular	40.14	1057.2	66.11	86.15

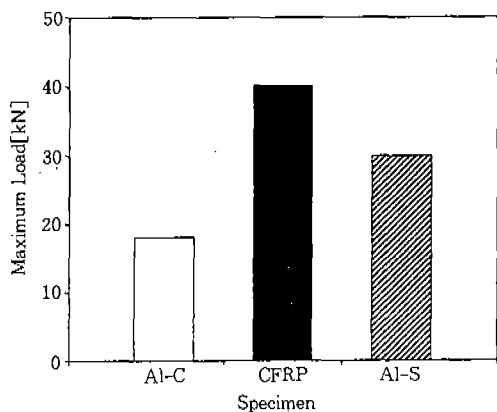


Fig.13 Comparison of Maximum Load for Two Specimens( $t=1.25\text{mm}$ )

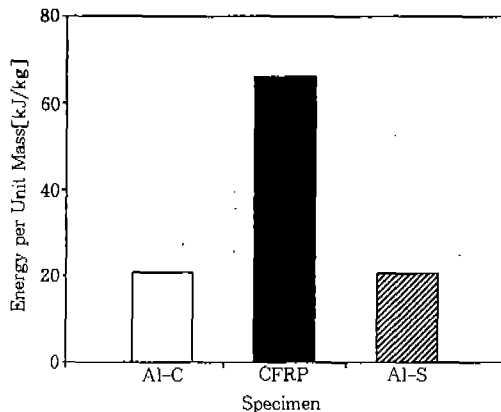


Fig.15 Absorbed Energy Per Unit Mass by Static Collapse Test( $t=1.25\text{mm}$ )

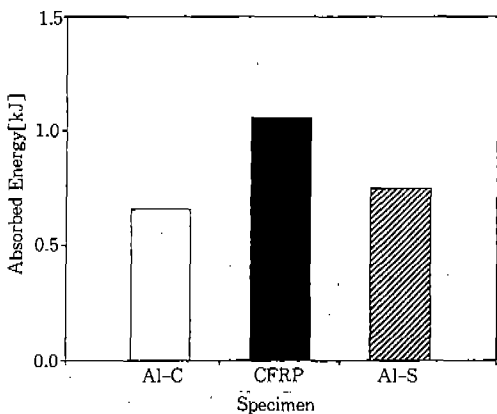


Fig.14 Comparison of Absorbed Energy for Two Specimens( $t=1.25\text{mm}$ )

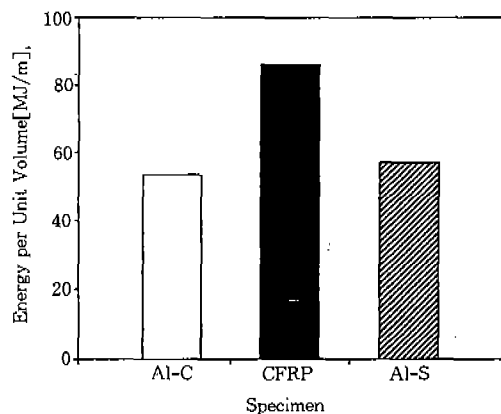


Fig.16 Absorbed Energy Per Unit Volume by Static Collapse Test( $t=1.25\text{mm}$ )

박육부재의 압괴특성이 Al 박육원통 및 사각통 부재의 압괴특성보다 훨씬 우수함을 알 수 있었다. 특히, 단위질량당의 에너지흡수특성이 아주 우수하였으며, CFRP 박육부재의 구조경량화의 타당성이 정량적으로 입증되었다.

사각통 부재가  $57.12[\text{MJ}/\text{m}^3]$ 로 원통의  $53.6[\text{MJ}/\text{m}^3]$  보다 약간 컸다.

## 참 고 문 헌

### 5. 결 론

차체 구조용 부재에 많이 이용되는 박육부재의 압괴특성 실험을 행하여 경량화용 박육부재의 흡수에너지 특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Al 박육원통 부재는 살두께가 두꺼울수록 축대칭 모드로 압괴되었고, 살두께가 얇을수록 비축대칭 모드로 압괴하였다.
- 2) CFRP 박육원통 부재의 압괴모드는 섬유가 파단하지 않고 단면중앙에 생긴 원환상의 썩기형 크랙이 진전하여 원통벽의 내외측으로 확장하는 Splaying 모드로 압괴하였다.
- 3) 같은 살두께를 갖는 박육원통 부재의 경우에는 CFRP 박육부재의 최대하중이  $40.14[\text{kN}]$ 으로 Al 박육부재의 최대하중  $18.07[\text{kN}]$ 보다 약 2.3배 정도 컸으며, 단위질량당 흡수에너지는 CFRP 부재가  $66.11[\text{kJ}/\text{kg}]$ 으로 Al부재의  $20.79[\text{kJ}/\text{kg}]$ 보다 약 3.2배 정도 컸다. 또한 단위체 적당 흡수에너지는 CFRP 부재가  $86.15[\text{MJ}/\text{m}^3]$ 으로 Al 부재의  $53.60[\text{MJ}/\text{m}^3]$ 보다 약 1.6배 정도 컸다. 즉, Al 박육부재보다 CFRP 박육부재가 압괴특성이 훨씬 우수했다.
- 4) Al 사각통 부재의 최대하중은  $29.99[\text{kN}]$ 으로 원통의  $18.07[\text{kN}]$ 보다 약 1.7배 정도 컸으며, 사각통의 경우 초기 최대하중이 작용한 후 소정의 압괴길이(60mm)까지의 소요시간은 약 2sec로서 원통의 약 7sec보다 3.5배 정도 압괴속도가 빨랐다.
- 5) 단면적, 살두께가 같은 Al 박육원통과 사각통 부재의 경우 단위질량당 흡수에너지는 사각통 부재의  $20.79[\text{kJ}/\text{kg}]$ 과 거의 비슷하였으며, 단위체적당 흡수에너지는

1. N. Jones and Dynamic elastic and inelastic buckling of shells. Developments in Thin-Walled Structures, Vol. 2, Chap.2, pp.49~91. Elsevier Applied Science, London, 1984.
2. N. Jones and H. L. M. dos Reis, "On the dynamic buckling of a simple elastic-plastic model". Int. J. Solids Struct. 16, pp. 969~989, 1980.
3. 石井 義唯, "衝突による薄肉圓筒の塑性座屈に関する實驗的解析", 東京工業大學 修士論文, 1991.
4. Alexander, J. M., "An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading", Quart. J. Mech. Appl. MATH., XII, pt. 1, 10, 1960 : AMR 14, Rev. p.2408, 1961.
5. Batterman, S. C. "plastic buckling of axially compressed cylindrical shells", A1AA Journal, 3, p.316, 1965.
6. Von Mises, r., Mechanik der festen Korper im plastisch deformation Zustand, Nachr. Ges. Wiss. Gottingen, p.582, 1913.
7. Al-Hassani, S. T. S., Johnson. W., and Lowe, W. T., "Characteristics of Inversion Tubes under Axial Loading", J. Mechanical Engineering Science, Vol. 14, pp.370~381, 1972.
8. Aya, N., and Takahashi, K., "Energy Absorption Characteristics of Vehicle Body Structure", Transaction of the Society of Automotive Engineering of Japan, No.7, May, 1974.
9. Mahmood, H. F., and Paluzny, A., "Design of thin walled Columns for Crash Energy Management-Their Strength and

- Model of Collapse", Proc. 4rd Instructional Conference on Vehicle Structural Mechanics, Nov. 18~20, Detroit, pp.7~18, 1981.
10. W. Abramowicz, T. Wierzbicki, "A kinematic approach to crushing of shell structures." Proc. 3rd Int. conf. on Vehicle Structural Mechanics, SAE, pp.211~223, 1979.
  11. W.Abramowicz "Simplified Crushing Analysis of Thin-walled Columns and Beams" Engineering Transactions Vol. 29, No. 1, pp.5~26, 1981.
  12. Q. Meng, S. T. S. Al-Hassani and P. D. Soden, "Axial crushing of square Tubes." Int. J. Mech. Sci., Special issue for Structural Crassworthiness Conf., Vol. 25, pp.747~773, 1983.