

경량화용 박육부재의 형상비가 압궤특성에 미치는 영향

Influence of dimensional ratio on collapse characteristics for the thin-walled structures of light weight

정 종 안* · 김 정 호** · 양 인 영***

Jong-An Jung · Jeong-Ho Kim · In-Young Yang

(1998년 3월 4일 접수, 1998년 8월 21일 채택)

ABSTRACT

In this study, collapse test of thin-walled structure is performed under axially quasi-static and impact load in collapse characteristic to develop the optimum structural member for a light-oriented automobile. Furthermore, the energy-absorbing capacity is observed according to the variety of configuration(circular, square), aspect ratio in aluminum specimen to obtain basic data for the improved member of vehicle.

In both quasi-static and impact collapse test, Al circular specimens collapse, in general, with axisymmetric mode in case of thin thickness while collapse with non-axisymmetric mode according to the thickness increase. For Al rectangular specimens, they collapse with axisymmetric mode in case of thin thickness, with mixed collapse mode according to the increase of thickness.

In terms of initial max. load, Al square specimen turns out the best member among specimens, and then Al square, circular and circular with large scaling ratio, respectively. In case of quasi-static compression test, the absorbed energy per unit volume and mass shows higher in Al circular specimen, and then Al square, circular with large scaling ratio, respectively, according to shape ratio the absorbed energy per unit volume and mass in case of max. impact compression load is higher than that of static load. But the absorbed energy per unit volume

* 송원대학 자동차과

** 조선대학교 대학원 기계공학과

*** 조선대학교 기계공학부

and mass shows that Al circular specimen is the best member. Especially, unlike max. compression loan, the absorbed energy per unit volume and mass in impact test turns out the low value.

1. 서론

자동차는 큰 운동에너지를 지니고 이동하는 물체로서 충돌시 에너지의 대부분이 차체구조부재의 변형에 의해 흡수된다. 따라서, 충돌시에 차체구조부재의 변형에 의한 에너지흡수를 이용하여, 충격력을 완화시키고 동시에 승객의 생존 공간을 확보해야 하므로 차실 부분은 견고하고, 적절한 변형이 되는 차체 구조면에서의 안전 대책이 필요하다¹⁾.

자동차는 충돌시 차체 부재중 사이드 레일이 충돌에너지의 60~70%를 부재의 연속적인 대변형에 의한 소성에너지에 의해 흡수하고 있으며, 자동차의 차체 구조에 주로 사용되는 모자형(hat)부재 및 박육단면부재가 충돌사고시에 높은 효율로 소성변형 되면서 운동에너지를 적절히 흡수하므로써, 객실의 변형을 억제하여 승객을 보호할 수 있게 하려는 개념이 차체 구조 설계에 이용되고 있다^{2,3)}.

자동차가 충돌할 때 구조부재의 소성변형에 의한 압溃거동을 정확히 파악하고, 차체 단면부재의 에너지흡수 특성을 파악하는 것이 기본 설계 단계에서 가장 중요한 문제이다⁴⁾. 박육단면부재의 압溃는 소성좌굴을 포함한 불안정 현상이어서 학문적으로 상당히 흥미있는 분야이며, 여러 종류의 기본적인 단면 형상의 부재에 관해서 많은 연구가 있어 왔다⁵⁻⁷⁾.

그러나, 충격 하중하에서 박육부재의 압溃현상은 기하학적 변형이 크고 소성변형을 포함하는 비선형 거동을 한다. 따라서, 이론적으로 해석하는 것은 대단히 어려워 정적 하중에서의 압溃거동을 실험적으로 고찰하는 해석이 우선적으로 행해지고 있다. 지금까지의 연구동향을 살펴보면 정적 하중에서의 압溃거동에 관해 소성변형하는 부재를 대상으로 Abramowicz⁸⁾는 평균 압溃응력에 관한 이론식을 유도했으며, Wiczbicki⁹⁾는 허니컴(honeycom)부재, Alexander는 원통 박육부재의 축대칭 모드에 관하여, Pug-

sley¹⁰⁾는 원통 박육부재의 비축대칭 모드에 관하여 각각 해석하고 있다.

정적 및 동적 압溃거동의 경우 Abramowicz와 Jones¹¹⁾의 연구결과에 의한 동적 상태의 압溃응력은 정적 압溃응력에 비해 약 30% 정도 크게 나타났으며, 石井¹²⁾은 충돌속도가 5m/s 정도에서 압溃모드는 동적인 경우와 정적인 경우에 큰 차이가 없었으며, 평균 압溃응력은 동적인 경우가 정적보다 약 10% 정도 크게 되는 것으로 보고되고 있다.

지금까지 압溃모드에 관한 연구결과들을 보면 이론적 고찰로서 축대칭모드 및 비축대칭모드를 사용하여 평균 압溃하중을 구하는 이론식이 얻어졌으나 압溃진행중의 하중과 변위의 관계, 변형모드와 평균 압溃응력과의 관계라는 관점에서의 고찰은 아직 충분하지 못하였으며, 에너지 흡수특성에 영향을 미치는 압溃모드, 재질 및 형상변화 등의 관계를 고려한 연구는 찾아보기 어렵다.

또한, 차체 박육구조부재의 에너지 흡수특성에 관한 연구로는 주로 준정적 압溃하중을 받는 박육부재에 대한 연구결과가 대부분이며, 이들 모두 평균 압溃응력을 이론적으로 해석하므로써^{13,14)} 에너지 흡수능력을 명확히 하고져 하였으나, 압溃가 진행되는 과정중의 하중-변형관계나 재료의 차에 의한 영향까지 고려한 연구결과를 찾아보기 어렵다.

특히, 최근에는 기존의 철강재 보다 약 2.9배 이상 경량화가 가능한 알루미늄부재에 관한 정량적인 강도평가나 에너지흡수 특성을 고려한 설계가 연료 절감과 환경 개선의 관점에서 대단히 중요하게 대두되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 충돌시 적절히 에너지를 흡수하여 승객의 안전을 도모할 수 있는 구조 경량화용 차체 박육부재를 개발하기 위하여, 구조 경량화용 알루미늄 박육부재의 형상의 차(원통, 사각통), 형상비의 차에 따른 압溃특성을 고찰하여, 자동차 충돌시 충격에너지 흡수특성

을 고려한 경량화용 차체 부재개발에 이용될 수 있는 설계자료를 얻고자 한다.

2. 시험편

본 연구에서는 자동차 등에 많이 사용되는 구조부재의 기본요소로 형상에 의해 파괴형태가 좌우되지 않는 축대칭 원통 및 사각통을 시험편으로 하였다. 시험편의 재질은 변형속도에 민감한 Al 6063 (Al-Mg-Si, 6000계) 인발관을 구입하여 기계가공하였다.

시험편의 제작은 내경 29mm, 외경 35mm, 길이 3m의 이음매가 없는 인발관을 길이 100mm로 절단한 후 내경 30mm로 하여, 두께가 각각 0.7, 0.95, 1.2, 1.45mm가 되도록 선반가공 하였다. 또한, 상사비를 알아보기 위하여 내경 40mm, 외경 50mm, 길이 3m의 이음매가 없는 알루미늄 인발관을 길이 150mm로 절단한 후 내경을 45mm로 하여 내경 30mm인 원통시험편과 같은 두께로 각각 가공하였다. 사각통은 내측의 한변이 25mm인 정사각형 인발관을 두께가 0.7, 0.95, 1.2, 1.45mm로 가공하였다.

시험편의 길이는 오일러 좌굴을 일으키지 않고 실험시 압력이 수 주기 반복하여 나타나는데 충분한 길이인 100mm로 결정하였다. 또한, 상사비의 차에 의한 압축특성을 고찰하기 위하여 내경 30mm, 길이 100mm인 시험편과 내경 45mm, 길이 150mm인 알루미늄 박육원통 시험편을 제작하였다. Fig. 1에 압축실험에 사용한 시험편의 형상을, Table 1에는 압축된 시험편의 기호에 관해서 나타냈다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 준정적 압축실험

본 실험에는 만능재료시험기(Servopulser, Shimadzu사)를 이용하였으며, 시험기의 로드셀과 액츄레이터 사이에 두개의 압축지그를 평행이 되도록 설치하고, 시험편과 지그 사이에는 윤활하여 시험편 끝단의 구속을 원활하게 하였다. 그리고, 변형속도의 영향이 나타나지 않도록 10mm/min 속도로 균일한 압축하중을 가하였다.

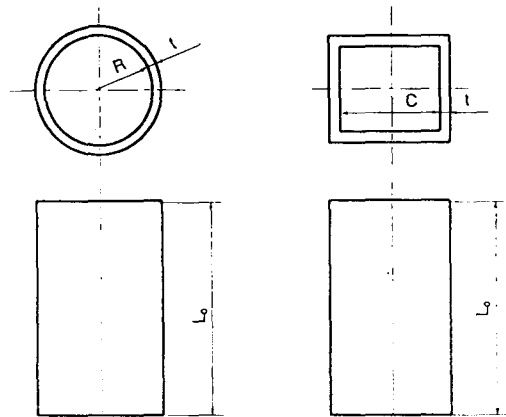


Fig. 1 Configuration of the thin-walled specimens

Table 1 Definition of the specimen number

A	C(L, S)	000	S(I)	00	
					A : Aluminum
					C : Circular ϕ 30mm
					L : Circular ϕ 45mm
					S : Square
					Thickness
					070 : 0.7mm
					095 : 0.95mm
					120 : 1.20mm
					145 : 1.45mm
					S : Statics
					I : Impact
					Specimen number

실험시 압축모드를 좌우시킬 만큼의 편심하중이 작용되지 않도록 지그의 중앙에 얇은 단을 만들어 하중이 가해질 때 시험편의 미끄럼을 방지했으며, 여러번의 예비실험을 실시하여 실험 결과의 재현성이 좋도록 하였다. 또한, 실험결과에 단부효과(end effects)가 나타나지 않고, 순차적인 압력이 주기적으로 발생하도록 길이가 100mm인 시험편은 전체의 축방향 길이가 40mm가 될 때까지 즉, 변형량이 60mm가 되도록 압축시켰으며, 직경 45mm인 시험편과 직경 30mm인 시험편의 압축시 상사비의 영향을 고찰하기 위하여, 150mm인 시험편은 변형량이 90mm가 되

도록 압제시켰다. 시험중의 하중-변위선도는 변위를 제어하면서 연속적으로 측정하였다.

시험편에 흡수된 에너지 흡수량의 계산은 압제실험에서 얻은 하중-변위선도의 사선면적이 시험편에 흡수되는 에너지라고 생각하여, 하중-변위선도를 적분하여 부재내에 흡수된 에너지 특성을 평가하였다.

3.2 충격 압제실험

본 연구에서는 공기압식 가속장치를 사용하여, 크로스헤드를 수직하향으로 낙하시키면서 속도를 증가시켜 부재에 충격을 가하는 방식으로 가속식 충격실험기를 설계·제작하였다.

본 연구에서 설계·제작한 시험장치의 설계도를 Fig. 2에 나타냈다. 시험기는 가속장치, 크로스헤드, 로드셀, 베이스 플레이트, 방진고무, 에어실린더, 가이드바, 프레임으로 구성되었다. 가속장치에 의해 수직하향으로 가속된 크로스헤드가 4개의 가이드바로 안내되어 로드셀 위의 시험편에 충돌하여 압제하는 방식으로 설계·제작하였다. 가이드바를 4개로 하고 크로스헤드를 2층 구조로 하여, 크로스헤드가 시험편에 편심되어 충격이 가해지는 것을 방지하고 보다 재현성 높은 실험을 할 수 있도록 하였다.

가속장치는 비교적 안전하고 또한 취급이 용이한 공기압식 가속장치를 고안하여 설계한 후 제작하였다. 공기압축기에 의해 압축된 공기는 챔버내에 충전되어 피스톤이 잡아 당겨짐으로서 실린더 내로 압축공기가 유입되어, 실린더내의 탄환을 가속시키도록 하였다. 탄환은 가벼워야 하며 실린더 내부와의 마찰을 가능한 한 적게하기 위하여, 직경 75mm, 길이 700mm의 폴리에틸렌수지로 만든 원주형으로 제작하여, 볼트로 크로스헤드에 고정하였다. 크로스헤드는 충돌에 의해 시험편을 압제하는 부분이며 질량은 23.5kg으로 하였다.

로드셀에 작용하는 충격력은 충격봉의 선단에서의 하중이기 때문에 봉의 중앙에 부착된 스트레인게이지로부터 출력된 변형률에 봉의 단면적과 영률을 곱하고, 파동전파이론을 이용하여 봉선단에서의 하중을 검출하였다.

시험편의 압제 시간변화 즉, 변위의 측정은

크로스헤드에 부착한 표적의 이동을 광학식 변위계(ZIMMER 100F, OHG사)를 사용하여 측정하였다. 광학식 변위계는 광학 렌즈를 이용하여 렌즈 내에 있는 표적의 백색부와 흑색부의 경계선의 변위량을 전압변화로 환산하는 것이며, 렌즈를 교환하여 측정 가능한 변위량을 변화시킬 수 있다.

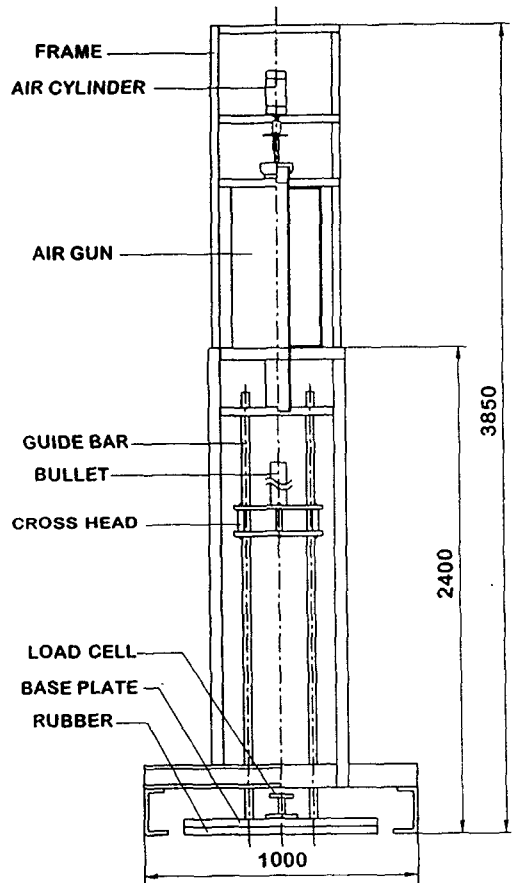


Fig. 2 Impact testing setup for crushing

본 실험에서는 초점거리가 1080mm에서 100mm의 이동거리까지 측정이 가능한 100-10형 렌즈를 사용하여 측정했다. 크로스헤드가 시험편에 충돌하기 직전의 충돌속도는 광학식 변위계로부터 측정된 충돌직전의 변위를 시간미분함으로써 구하였다. Fig. 3은 본 연구에서 이용한 충격시스템의 구성도를 나타냈다.

변위계와 로드셀의 출력은 제작한 브리지함

스, 동적변형계 및 파형기억장치를 지나 컴퓨터에 기록되도록 하였다. 또, 측정된 변형 및 하중에서 시간축을 소거함으로써 충격압계가 진행하고 있는 과정에서의 하중-변형선도 즉, 압계선도를 구할 수 있다. 압계선도에서 둘러싸인 부분의 면적을 구함으로써 시험편이 흡수한 에너지를 구했다. 충격속도는 5~9m/s로 하였으며, 시험편이 얇은 경우는 5m/s 정도, 두꺼운 경우는 8~9m/s 정도로 충돌시켰다.

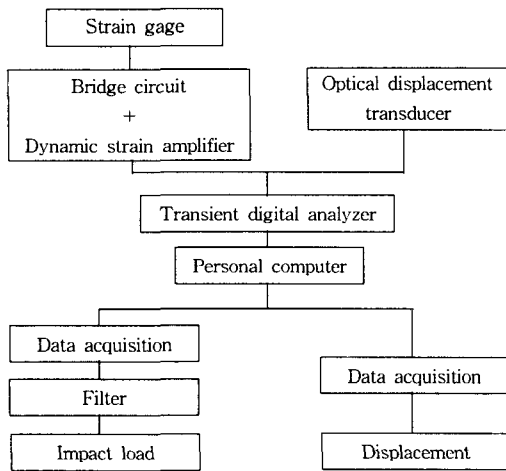


Fig. 3 Diagram of measurement system

4. 실험결과 및 고찰

4.1 준정적 압계실험

알루미늄 원통, 사각통 박육부재에 대하여 압계실험을 실시하였으며, 실험결과를 흡수에너지 E_a , 최대 압계하중 F_{max} , 평균 압계하중 F_m , 평균응력과 압계모드에 대하여 정리하였다. 흡수 에너지는 압계실험에서 얻은 하중-변위선도를 적분하여 구하고, 그 값을 압계길이 60mm로 나눔으로써 평균 압계하중을 구했으며, 평균응력은 평균 압계하중을 실험전 박육부재의 단면적으로 나누어 구하였다. Fig. 4에 내경 30mm 두께가 0.7mm인 알루미늄 원통 박육부재의 준정적 실험결과 얻어진 하중-변위 선도를 나타냈으며, Fig. 5(a)에 압계후의 형상을 나타냈다.

Fig. 5(b), (c), (d)에는 형상비의 차가 압계특

성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 내경 45mm이고 두께가 각각 0.7, 1.45mm인 알루미늄 원통 박육부재의 준정적 실험결과와 압계형상을 나타냈다. Fig. 6(a), (b), (c), (d)에는 단면형상의 차가 압계특성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 한번의 길이가 25mm이고 두께가 각각 0.7, 0.95, 1.2, 1.45mm인 알루미늄 각등 박육부재의 준정적 실험결과와 압계형상을 나타냈다.

일반적으로 최대 압계하중은 원통 박육시험편을 압계할때 초기에 생기는 피크점에서 나타났으며, 압계실험에 의한 알루미늄 원통 박육시험편의 압계형태는 크게 두가지로 구분할 수 있었다.

하나는 원통 박육부재가 축방향 압축하중을 받을때 원주방향으로 점진적이면서 동일한 변형을 갖는 축대칭 모드와 이와는 다르게 원주방향으로 돌출부(lobes)를 형성하면서 불균일한 과장을 형성해 가는 비축대칭 모드였다.

압계실험후 시험편 형상으로부터 알 수 있듯이 대부분의 알루미늄 원통 박육시험편은 초기에는 축대칭 모드로 압계하다가 재료 자체의 불안정성 등 외부적인 요인에 의해서 비축대칭 모드로 변해가는 과정을 겪으면서 압계하는 경우가 있었다. 특히, 비축대칭 모드의 경우는 주름살 지름의 측정결과 압계시 주름살이 바깥쪽으로 이동하지 않고 시험편 내부로 삼각형, 육각형 등 다양한 형상을 만들며 압계되었다. 그러나, 두꺼울수록 이러한 비축대칭 압계과정은 감소했으며 특히, 두께가 1.2, 1.45mm인 시험편은 완전한 축대칭형 모드로 압계하는 경우가 많았다.

Fig. 4와 Fig. 5(a)로부터 알 수 있는 바와 같이 하나의 주름에 대해서 주름이 형성되는 초기에 작은 피크부가 생기고 주름이 완성될 때 큰 피크부가 생겼다. 이러한 경향은 두께가 두꺼울수록 뚜렷하게 나타나며 압계 전반부에서 잘 나타나고 점차적으로 사라지면서 비대칭모드가 나타났다.

비대칭 모드에서 나타난 특징중 하나인 주름 외곽의 돌출부(lobe)는 두께가 두꺼울수록 감소하고, 얇아짐에 따라서 증가하는 경향을 보였는데, 평균적으로 축대칭에서 비축대칭 모드로 진행

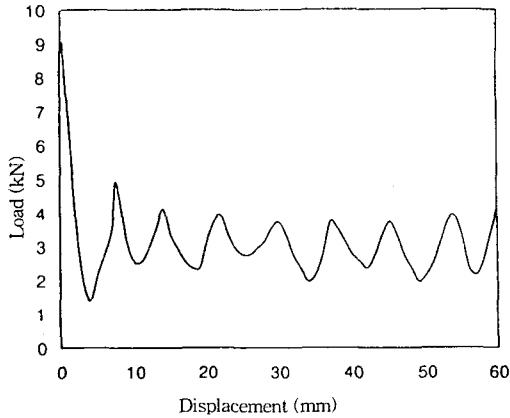


Fig. 4 Relationship between load and displacement (AC070S)

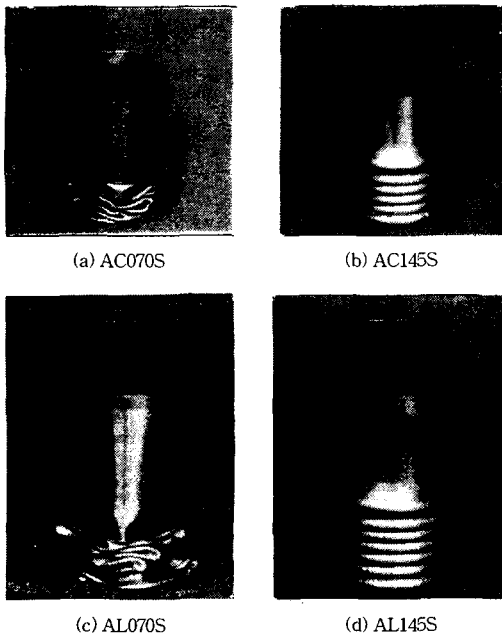


Fig. 5 Shape of circular specimen by static collapse

되는 시험편은 두께에 따라 3~4개, 처음부터 비대칭 모드로 압력된 시험편은 두께에 따라서 4~5개가 형성되었다. 그리고 몇몇 시험편은 재료상의 결함 때문에 전체좌굴로 완전히 찌그러지는 불규칙한 형상을 나타냈는데, 이들 시험편은 돌출부가 가장 적은 것은 2개가 나타났다.

따라서, 주름살 외곽의 돌출부 갯수가 비대칭

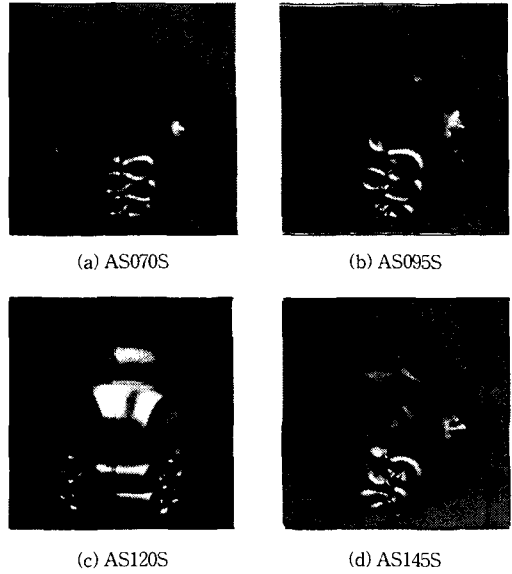


Fig. 6 Shape of square specimen by static collapse

모드의 압력에 영향을 미치는 것으로 예측할 수 있다. 특히, 두께가 얇은 시험편 일수록 비대칭 모드의 발생이 많았다. 그리고, 평균압력하중의 계산은 압력실험 결과로부터 하중-변위선도를 적분하여 압력길이 δ_{max} 로 나뉘어서 다음과 같이 구했다.

$$F_m = \frac{1}{\delta_{max}} \int_0^{\delta_{max}} F_0 d\delta \dots\dots\dots (1)$$

위에서 구해진 평균 압력하중을 압력전의 시험편 단면적으로 나누어 평균응력 σ_m 을 구했다.

사각통 박육부재에 대해서는 알루미늄 원통 박육부재와 같이 실제 압력에서는 전·후의 주름이 상호 영향을 받으므로 압력시작때 나타난 피크까지 달하지 못하고 상승곡선이 완만하게 진행되었으며, 첫번째 주름에서 나타난 최소 압력하중은 다른 주름의 값에 비해 항상 낮은 값을 나타냈다.

또한, 알루미늄 원통 박육부재의 상사비가 압력특성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 내경 30mm이고 길이 100mm인 부재와 내경 45mm이고 길이 150mm인 부재를 각각 0.7, 0.95, 1.2, 1.45mm가 되도록 선반가공하여 압력실험을 행했다. 내경 30mm인 알루미늄 원통 박육부재와

내경 45mm인 알루미늄 원통 박육부재 및 알루미늄 사각통 부재의 준정적 압력 실험결과의 평균값을 정리하여 Table 2, 3에 나타냈다.

Table 2 Mean value of circular specimens from experimental data

Specimen No.	Aspect Ratio [R/t]	Maximum Load F_{max} [KN]	Mean Load F_m [KN]	Absorbed Energy E_T [J]	Mean Stress σ_m [MPa]	Energy per Unit Mass [KJ/Kg]	Energy per Unit Volume [MJ/m ³]	Collapse Mode
AC070S	21.42	9.54	3.75	237.72	67.20	15.73	40.99	N
AC095S	15.78	13.52	6.99	426.10	84.38	19.34	51.27	S→N
AC120S	12.50	19.47	11.11	677.70	103.94	23.68	62.09	S→N
AC145S	10.34	25.74	16.60	1012.54	123.83	28.08	75.09	S
AL070S	32.14	8.17	2.99	272.64	41.97	8.75	25.39	N
AL095S	23.68	15.42	7.19	654.71	56.84	12.92	34.27	S→N
AL120S	18.75	21.10	10.59	963.99	59.07	13.87	35.86	S→N
AL145S	15.51	27.31	15.68	1426.68	70.62	16.57	43.03	N

S : Axisymmetric, N : Non-axisymmetric

Table 3 Mean value of square specimen from experimental data

Specimen No.	Aspect Ratio [C/t]	Maximum Load F_{max} [KN]	Mean Load F_m [KN]	Absorbed Energy E_T [J]	Mean Stress σ_m [MPa]	Energy per Unit Mass [KJ/Kg]	Energy per Unit Volume [MJ/m ³]	Collapse Mode
AS070S	35.71	12.28	4.51	275.12	59.52	13.57	36.35	S
AS095S	26.31	18.36	7.01	427.61	69.21	16.71	42.28	S→N
AS120S	20.83	26.72	11.66	711.09	88.65	20.43	54.14	S→N
AS145S	17.24	34.04	16.23	990.06	101.85	23.32	62.21	S→N

S : Symmetric, N : Non-symmetric

두께가 다른 직경 30mm인 원통부재, 직경 45mm인 원통부재 및 한변의 길이가 25mm인 사각통 부재의 실험결과인 Fig. 7로부터 최대압력하중은 두께가 두꺼울수록 증가하였으며 같은 단면적을 갖는 시험편의 경우 사각통 부재가 원통부재보다 최대 압력하중이 컸다. 특히, 두께가 두꺼울수록 최대 압력하중은 증가하였다. Fig. 7에서 직경 45mm인 시험편중 두께가 0.7mm인 경우는 두께가 얇기 때문에 두꺼운 시험편보다 불안정 소성좌굴이 빨리 발생하고, 직경 30mm인 시험편보다 최대 압력하중이 낮게 나타난 것으로 생각된다.

Fig. 8은 형상 및 두께가 서로 다른 알루미늄 시험편의 단위질량당 흡수에너지의 비교관계를 나타낸 것으로서 직경 45mm인 원통 박육시험편, 사각통 박육시험편 순으로 흡수에너지가 높았다. Fig. 9는 형상 및 두께가 서로 다른 알루미늄

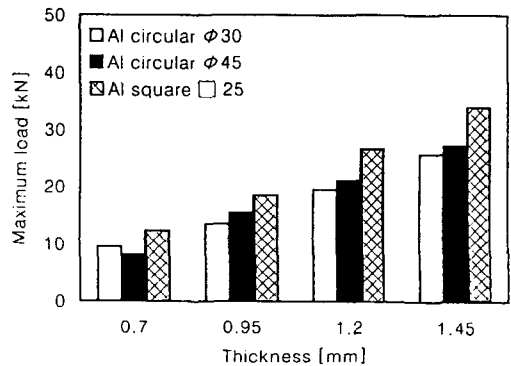


Fig. 7 Maximum load for aluminum specimens

시험편의 단위체적당의 흡수에너지 비교결과를 나타낸 것으로서, Fig. 8의 단위질량당 흡수에너지의 비교결과와 유사한 경향을 보였다. 이상의 실험결과로부터 최대 압력하중은 사각통 박육부재 시험편이 원통 박육부재 시험편보다

크나, 단위체적당, 단위질량당 흡수에너지는 반대로 원통 박육부재 시험편이 사각통 박육부재 시험편보다 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 원통 박육부재 시험편은 축대칭이므로 압괴현상이 안정적이거나, 사각통 박육부재 시험편은 불안정 압괴가 발생하여 압괴속도가 빠르기 때문이라 생각된다.

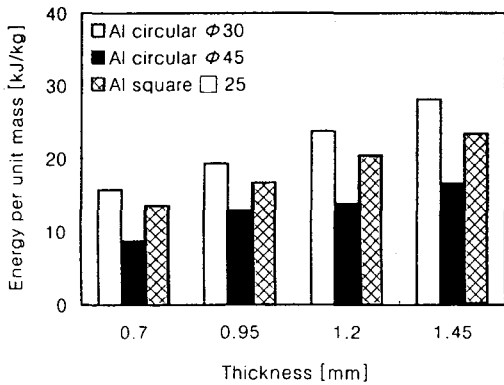


Fig. 8 Absorbed energy per unit mass by static collapse test

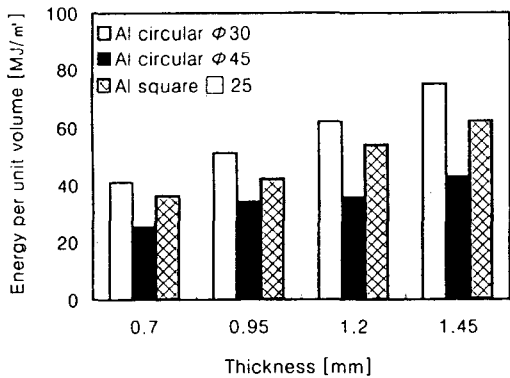
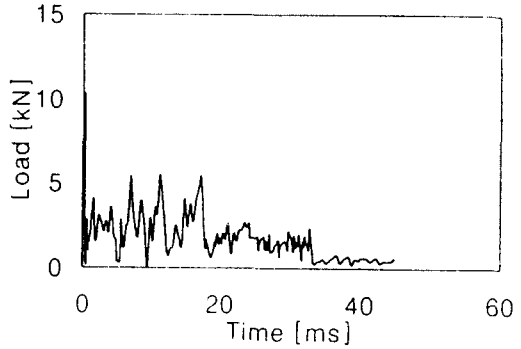


Fig. 9 Absorbed energy per unit volume by static collapse test

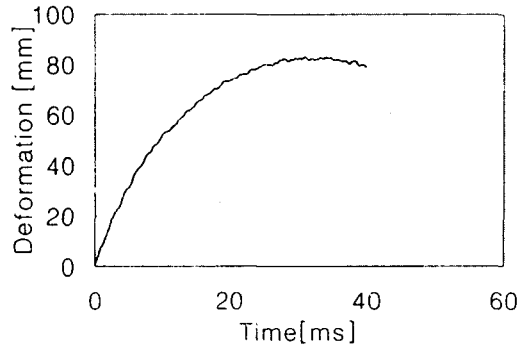
4.2 충격 압괴실험

Fig. 10에 내경이 30mm인 알루미늄 원통 박육부재의 두께가 0.7mm이고, 5.19m/s로 충격압괴될 때의 압괴선도를 나타냈으며, Fig. 11(a)에 압괴후의 형상을 나타냈다. 또한, Fig. 11(b), (c), (d)에는 형상비의 차가 압괴특성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 내경 45mm이고 두께가 각

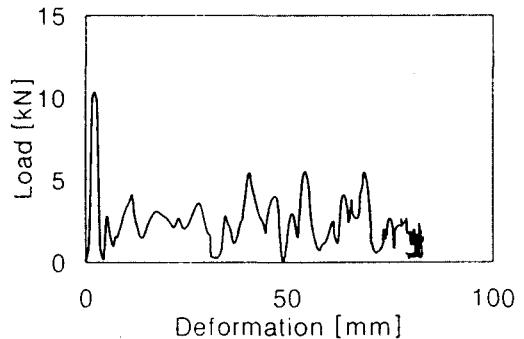
각 0.7, 1.45mm인 알루미늄 원통 박육부재의 충격압괴 실험 후의 압괴형상을 나타냈다.



(a) Load history



(b) Deformation history



(c) Load deformation curve

Fig. 10 Impact crushing characteristics of circular specimen (AC07015, t=0.7mm, v=5.19m/s)

충격시험후의 시험편의 변형상태를 보면 알루미늄 원통 박육부재 전체가 변형하고 있는 부분과 변형하지 않는 부분으로 나누어진다. 그리

고, 변형모드는 준정적 압괴 경우와 비교해 큰 차이는 없고, 축대칭 모드와 비축대칭 모드의 2 종류 모드로 나눌 수 있다. 충격압괴에서는 축대칭 모드가 지배적이고 살두께가 얇으면 변형의 후반에서 축대칭 모드에서 비축대칭 모드로 변화되는 것이 관찰되었다. 이 때 비축대칭모드의 주방향 파형수 n 은 3~4이었다. 또, 대부분의 시험편은 크로스헤드와 충돌한 쪽에서 변형이 시작됐다.

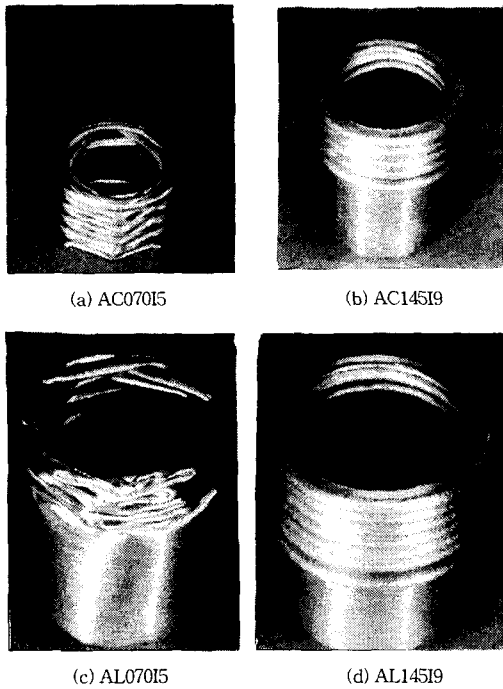


Fig. 11 Shape of circular specimen by impact collapse

Fig. 12(a), (b), (c), (d)에는 단면형상의 차가 압괴특성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 한 변의 길이가 25mm인 두께가 각각 0.7, 0.95, 1.2, 1.45mm인 알루미늄 사각통 박육부재의 충격압괴 실험 후의 압괴형상을 나타냈다.

충격실험후의 시험편의 변형상태를 보면 두께가 두꺼운 알루미늄 사각통 박육부재의 경우는 축면이 전체적으로 물결치는 것과 같은 변형이 보여지지만 대개의 시험편은 준정적압괴와 마찬가지로 차레로 압괴했다.

압괴모드는 준정적압괴와 같이 주방향으로 늘

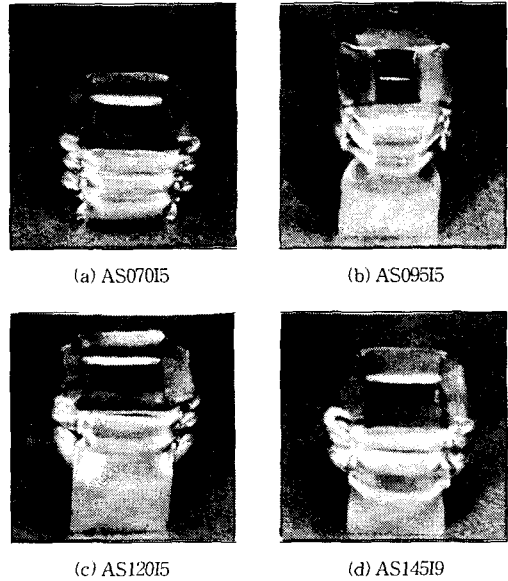


Fig. 12 Shape of square specimen by impact collapse

어남이 발생하지 않고 모서리부분이 집어지는 모드가 발생했다. 안쪽에서는 1번째 주름에서 각부가 외측으로 돌출되는 모드가 관찰된다. 이 경우 4개의 각 전체가 이 모드로 변형하는 것은 아니고, 서로 이웃한 2개의 모서리부가 이러한 모드로 변형하고 있다. 2번째 주름에서는 주방향으로 늘어나고 외측으로 돌출되는 변형 모드는 보여지지 않았다. 실험에서 대부분의 시험편은 상부 즉 충격이 가해지는 쪽에서 압괴가 시작되고 있다.

최대 압괴하중은 원통 박육부재를 충격 압괴 할때 초기에 생기는 피크점에서 나타났으며, 충격 압괴실험에 의한 알루미늄 원통 박육부재의 압괴형태도 준정적 압괴실험에서와 같이 크게 두가지로 구분할 수 있었다.

하나의 원통 박육부재가 축방향 압축하중을 받을때 원주방향으로 점진적이면서 동일한 변형을 갖는 축대칭 모드와 이와는 달리 원주방향으로 돌출부를 형성하면서 불균일한 과장을 형성해 가는 비축대칭 모드였다. 비축대칭 모드에서 나타난 특징중 하나인 주름 외곽의 돌출부는 두께가 두꺼울수록 감소하고, 얇아짐에 따라서 증가하는 경향을 보였다.

충격압괴실험후 시험편 형상으로부터 대부분

의 알루미늄 원통 박육부재는 초기에는 축대칭 모드로 압케하다가 재료 자체의 불안정성 등과 같은 외부적인 요인에 의해서 비축대칭 모드로 변하는 경우가 있었다. 특히, 비축대칭 모드의 경우는 주름살 지름의 측정결과 압케시 주름살이 바깥쪽으로 이동하지 않고 시험편 내부로 삼각형, 육각형 등 다양한 형상을 만들며 압케되었다. 그러나, 두께가 두꺼울수록 이러한 비축대

칭 압케과정은 감소했다. 이 역시 준정적 압케 실험결과와 유사했다.

충격압케실험에 의하여 구한 내경 30mm인 알루미늄 원통 박육부재, 내경 45mm인 알루미늄 원통 박육부재 및 알루미늄 사각통 박육부재 실험결과와 평균값을 정리하여 Table 4, 5에 나타냈다. 충격실험 데이터는 약 5~9m/s로 충격을 가했을 때의 값이다.

Table 4 Mean value of circular specimens from experimental data

Specimen No.	Aspect Ratio [R/t]	Maximum Load F_{max} [KN]	Mean Load F_m [KN]	Absorbed Energy E_T [J]	Mean Stress σ_m [MPa]	Energy per Unit Mass [KJ/Kg]	Energy per Unit Volume [MJ/m ³]	Collapse Mode
AC07015	21.23	10.38	2.49	205.61	42.87	13.47	35.45	S
AC09515	15.65	18.48	5.36	393.50	101.02	17.86	47.35	S
AC09519	15.65	20.15	4.16	378.07	50.29	17.16	45.49	S→N
AC12015	12.39	21.65	6.39	228.60	59.74	7.988	21.28	S→N
AC12019	12.39	23.65	5.79	417.70	54.20	417.70	14.60	S→N
AC14515	10.26	26.40	11.48	323.75	85.64	8.98	24.01	S
AC14519	10.26	29.10	7.18	471.79	53.56	13.09	34.99	S→N
AL07015	34.78	14.90	4.99	611.03	69.88	19.61	56.91	S
AL09515	23.86	18.10	6.04	393.60	47.69	7.77	20.60	S→N
AL09519	23.86	42.10	8.39	942.35	66.30	18.60	49.33	S→N
AL12015	17.61	23.00	9.50	294.40	52.96	4.24	10.95	S→N
AL12019	17.61	32.10	7.71	735.50	42.99	10.58	27.36	S→N
AL14515	14.45	27.00	10.56	278.70	47.55	3.24	8.41	S
AL14519	14.45	40.10	11.82	664.40	53.25	7.72	20.04	S

S : Axisymmetric, N : Non-axisymmetric

Table 5 Mean value of square specimen from experimental data

Specimen No.	Aspect Ratio [C/t]	Maximum Load F_{max} [KN]	Mean Load F_m [KN]	Absorbed Energy E_T [J]	Mean Stress σ_m [MPa]	Energy per Unit Mass [KJ/Kg]	Energy per Unit Volume [MJ/m ³]	Collapse Mode
AS07015	33.54	14.00	3.11	258.30	41.02	12.72	34.13	S
AS09515	25.30	20.20	6.14	369.40	6.14	14.43	36.57	S
AS09519	25.30	27.00	6.80	642.40	67.10	25.10	63.59	S→N
AS12015	19.74	23.00	10.36	208.30	40.77	5.98	15.86	S→N
AS12019	19.74	20.35	6.47	498.80	49.20	14.33	37.98	S→N
AS14515	16.44	37.25	15.86	398.15	99.54	9.38	25.02	S→N
AS14519	16.44	33.90	11.16	754.60	70.04	17.77	47.42	S→N

S : Symmetric, N : Non-symmetric

이상의 실험결과로부터 두께가 다른 직경 30mm인 원통부재, 직경 45mm인 원통부재 및 한변

의 길이가 25mm인 사각통 부재의 실험결과인 Fig. 13으로부터 최대 압케하중은 두께가 두꺼울

Table 6 Comparison of the static and impact collapse characteristics

Specimen	Static collapse				Impact collapse			
	Maximum Load	Absorbed Energy	Energy per Unit Mass	Energy per Unit Volume	Maximum Load	Absorbed Energy	Energy per Unit Mass	Energy per Unit Volume
	F_{max} [KN]	E_T [J]	[KJ/Kg]	[MJ/m ³]	F_{max} [KN]	E_T [J]	[KJ/Kg]	[MJ/m ³]
Al circular ϕ 30	13.52	426.10	19.34	51.27	18.48	393.50	17.86	47.35
Al circular ϕ 45	15.42	654.71	12.92	34.27	18.10	393.60	7.77	20.60
Al square \square 25	18.36	427.61	16.71	42.28	20.20	369.40	14.43	36.57

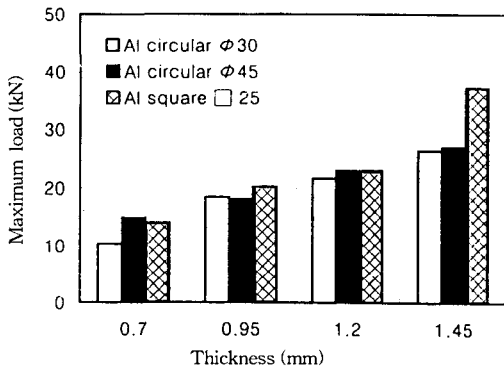


Fig. 13 Maximum load for aluminum specimens

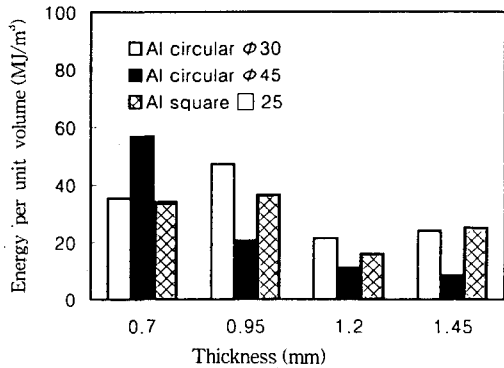


Fig. 14 Absorbed energy per unit volume by impact collapse test

수축 증가하였으며, 같은 단면적을 갖는 시험편의 경우 사각통 부재가 원통 부재보다 최대 압괴하중이 컸다. 특히, 두께가 두꺼울수록 최대 압괴하중은 증가하였다.

Fig. 14는 흡수에너지를 두께별, 형상별로 비교

한 결과로서 같은 형상의 시험편의 경우 체적이 큰 시험편이 흡수에너지가 컸고, 형상이 서로 다른 시험편의 경우는 거의 비슷함을 알 수 있었다. Fig. 15는 형상 및 두께가 서로 다른 알루미늄 원통 박육부재의 단위질량당 흡수에너지의 비교관계를 나타낸 것으로서 두께가 얇은 경우는 직경 45mm인 원통 박육시험편, 사각통 박육 시험편 순으로 흡수에너지가 높았으나 두께가 두꺼워질수록 사각통 박육부재가 점차 크게 나타났다. Fig. 14는 형상 및 두께가 서로 다른 알루미늄 시험편의 단위체적당의 흡수에너지 비교결과를 나타낸 것으로서, Fig. 15의 단위질량당 흡수에너지의 비교결과와 유사한 경향을 보였다.

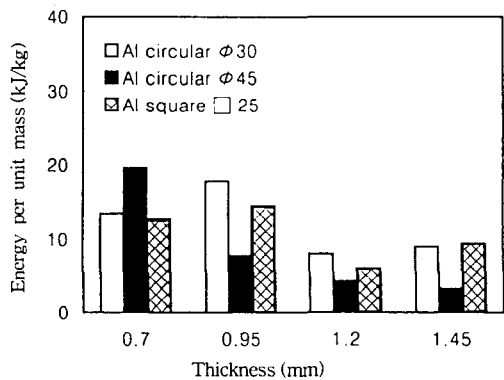


Fig. 15 Absorbed energy per unit mass by impact collapse test

형상비의 차에 따른 알루미늄 부재의 압괴특성결과를 비교해보면 본 연구의 범위에서 최대 압괴하중은 충격인 경우가 정적인 경우보다 적

경 30mm인 원통부재, 직경 45mm인 원통부재 및 한변의 길이가 25mm인 사각통 부재에서 각각 약 36.64%, 17.39%, 8.94%정도 높게 나타났다. 그러나, 단위질량당 및 단위체적당 흡수에너지는 직경 30mm인 원통부재가 우수하게 나타났다. 특히, 단위질량당 및 단위체적당 흡수에너지는 최대 압쇄하중과는 달리 충격인 경우가 직경 30mm인 원통부재, 직경 45mm인 원통부재 및 한변의 길이가 25mm인 사각통 부재에서 각각 약 7.64%, 39.88%, 13.50% 정도 낮게 나타났다.

이상의 실험결과로부터 최대 압쇄하중은 사각통 박육부재 시험편이 원통 박육부재 시험편보다 크나, 단위체적당 및 단위질량당 흡수에너지는 반대로 원통 박육부재 시험편이 사각통 박육부재 시험편보다 높게 나타남을 알 수 있다.

5. 결 론

경량화용 알루미늄 원통, 사각통 박육부재의 준정적 및 충격 압쇄실험을 행한 후, 박육부재의 흡수에너지 특성을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 준정적, 충격 압쇄실험의 경우 알루미늄 원통부재는 얇은 경우 비축대칭 모드로 압쇄되었으며, 두께가 두꺼워질 수록 축대칭 모드로 압쇄되었다. 알루미늄 사각통 부재는 두께가 얇은 경우 축대칭 모드로, 두꺼워질 수록 혼합형 모드로 압쇄되었다.
- 2) 초기 최대 압쇄하중은 알루미늄 사각통 부재가 가장 높았으며 그 다음으로 알루미늄 원통 부재, 상사비가 큰 원통 부재 순으로 낮게 나타났다.
- 3) 준정적인 압쇄의 경우 단위체적 및 단위질량당 흡수에너지는 알루미늄 원통 부재가 가장 높았으며, 다음으로 알루미늄 사각통 부재, 상사비가 큰 원통 부재 순으로 낮게 나타났다.
- 4) 형상비의 차에 따른 알루미늄 부재의 압쇄특성결과를 비교해보면 본 연구의 범위에서 최대압쇄하중은 충격인 경우가 정적인 경우보다 높게 나타났다. 그러나, 단위질량당 및 단

위체적당 흡수에너지는 알루미늄 원통부재가 가장 우수하게 나타났다. 특히, 단위질량당 및 단위 체적당 흡수에너지는 최대 압쇄하중과는 달리 충격인 경우가 낮게 나타났다.

이 논문은 1997년도 한국학술진흥재단의 자유공모 과제 연구비지원(과제번호: 1997-004-E00039)에 의하여 연구 되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) John Fenton, "Handbook of vehicle design analysis", Society of automotive engineers, Inc. pp.9~12, 1996.
- 2) 山屋 雅敏, 谷 正紀, "薄板箱形部材の塑性變形によるエネルギー-吸収", 三菱重工技報, Vol. 8, No. 1, pp. 124~130, 1971.
- 3) N. Jones and T. Wierzbicki, Eds, "Structural Crashworthiness", Butterworths, London, 1983
- 4) W. Johnson, "Impact Strength of Materials", E. Arnold, London, and Crane Russak, New York, 1972.
- 5) Marc A. Meyers, "Dynamic Behavior of materials", John Willey & Sons, Inc., U.S.A., 1994.
- 6) 김정호, 임성훈, 양인영, "차체구조용 박육부재의 압쇄특성에 관한 연구", 자동차공학회 논문집, Vol. 5, No. 3, pp. 1~14, 1997
- 7) 김정호, "경량화용 차체구조부재의 충격 압쇄특성에 관한 연구", 조선대학교 박사학위 논문, 1997.
- 8) W. Abramowicz, "Simplified crushing analysis of thin-walled columns and beams", Engineering Transactions, Vol. 29, No. 1, pp. 5~26, 1981.
- 9) T. Wierzbicki, "Crushing analysis of metal honeycombs", Int. J. Impact Engineering, Vol. 1, No. 2, pp. 157~174, 1986.
- 10) A.G. Mamalis, D.E. Manolakas, "On the inextensional axial collapse of thin PVC

- conica shells”, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 28, No. 5, pp. 323~335, 1986.
- 11) N. Jones, “Dynamic elastic and inelastic buckling of shells”, *Developments in Thin-Walled Structures*, Vol. 2, Chap. 2, pp. 49~91. Elsevier Applied Science, London, 1984.
- 12) 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.
- 13) W. Abramowicz, “The effective crushing distance in axially compressed thin-walled metal columns”, *Int. J. Impact Engineering*, Vol. 1, No. 3, pp. 309~317, 1983.
- 14) Lawrence E. Nielsen, Robert F. Landel, “Mechanical properties of polymers and composites”, Marcel Dekker, Inc. pp. 488~491, 1994.
-