

충돌성능 향상을 위한 Al 박육부재의 에너지흡수 제어특성

양 용 준¹⁾ · 김 선 규²⁾ · 양 인 영³⁾ · 심 재 기^{*4)}

조선대학교 대학원¹⁾ · 익산대학교 자동차공학과²⁾ · 조선대학교 기계설계공학과³⁾ · 조선대학교 메카트로닉스공학과⁴⁾

The Energy Absorption Control Characteristics of Al Thin-walled Tubes for Crashworthiness Enhancement

Yongjun Yang¹⁾ · Sunkyu Kim²⁾ · Inyoung Yang³⁾ · Jaeki Sim^{*4)}

¹⁾Department of Advanced Parts and Materials Engineering Graduate School, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

²⁾Department of Automobile Engineering Iksan National College, Jeonbuk 570-752, Korea

³⁾Department of Mechanical Design Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

⁴⁾Department of Mechatronics Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

(Received 11 October 2007 / Accepted 4 March 5)

Abstract : In this study, concerns the crashworthiness of the widely used vehicle structure, square thin-walled tubes, which are excellent on the point of the energy absorbing capacity. An experimental investigation was carried out to study the energy absorption characteristics of thin-walled square tubes subjected to dynamic crushing by axial loading to develop the optimum structural members. The impact velocity was tested in the rage 4.698 ~ 8.2m/s. To efficiently review the collapse characteristics of these sections, the simulation have been carried out using explicit FEM package, LS-DYNA. The solutions compared with results the impact collapse experiment. Here, the controller are introduced to improve and control the absorbed energy of thin-walled square tubes in this paper. To predict and control the energy absorption, we designed it in consideration to the it's influence, height, thickness, wide ratio in this study. When the controller used, the experimental results of crushing of square tubes controlled by the controller's elements showed a good candidate for a controllable energy absorption capability in impact axial crushing.

Key words : Impact load(충격하중), Al thin-walled tubes(알루미늄 박육부재), Energy absorption capacity(에너지 흡수 능력), Control characteristics of energy absorption(에너지흡수 제어특성), Controller of energy absorption(에너지흡수 제어기)

1. 서 론

차량충돌사고 발생시 충돌에너지를 고스란히 받을 경우 승객의 안전은 매우 위험하게 된다. 이에 대한 안전대책으로서 충돌 시 발생하는 충돌에너지를 차체구조부재의 변형에 의한 에너지흡수로 완화시키고 동시에 승객의 생존공간을 확보하기위해 차체 구조부재는 연속적인 대변형에 의한 소성에너지로

흡수하고 있으며 차체 구조에 주로 사용되는 모자형 부재 및 박육단면부재가 충돌사고 시에 적절하게 소성변형 되면서, 객실의 변형을 억제하여 승객을 보호할 수 있도록 설계되고 있다.¹⁻³⁾

지금까지의 구조부재의 에너지흡수에 관한 연구를 살펴보면 정적 하중 하에서의 압궤거동에 관해 평균압궤응력에 관한 이론식과 소성 변형하는 부재를 대상으로 소성 한지의 이동에 따른 흡수 에너지를 고려하여 평균압궤강도에 관한 이론식을

*Corresponding author, E-mail: jgsim@chosun.ac.kr

유도하고 실험과 비교하였으며,^{4,5)} 아코디언 모양의 압케 주름에 대해 기하학적 모델을 제시하여 주름길이를 계산하고 에너지 평형조건에 의해 정적 평균압케하중을 구하였다. 이상과 같은 대부분의 연구는 주로 균일 단면부재를 대상으로 하였으며 이들 모두 평균압케응력을 이론적으로 해석함으로써 에너지 흡수능력을 명확히 하고자 하였다.^{6,7)}

그러나 기존의 연구는 형상과 재질을 변화시키면서 흡수에너지의 향상을 꾀하고 있고,⁸⁾ 형상과 재질의 변화없이 압케가 진행되는 과정 중의 하중과 변형관계를 이용하여 에너지흡수능력을 향상시키려는 시도는 찾아보기 어렵다.

따라서, 본 연구에서는 AI 박육부재가 충격하중을 받을 때 적절한 변형과 에너지흡수능력을 증가시킬 수 있도록 고안한 제어기를 이용하여 AI 박육부재의 제어기 사용에 따른 효과 및 에너지흡수능력을 비교·고찰하여 실제 구조부재로 사용될 것을 상정하여 가장 효율적인 에너지흡수특성을 갖는 차체구조부재의 설계를 위한 자료를 얻고자 하였다.

2. 충격압케 실험

2.1 시험편 제작

본 연구에서는 차량등 구조부재에 주로 사용되고 있는 AI 사각박육부재를 기계가공하여 제작하였다.

AI 박육부재의 재질에는 Al6063(Al-Mg-Si)을 사용하여 4변의 길이가 각각 34mm, 44mm, 54mm이고, 두께는 각각 0.8mm, 1.0mm가 되도록 밀링가공하여 제작하였다. 가공할 때는 관의 내측에 사각기둥의 멘드릴을 넣어 절삭과정에서 발생하는 관의 변형을 억제하였다.

AI 박육부재의 길이는 오일러 좌굴을 일으키지 않으면서 실험 시 압케가 수주기 반복하여 나타나는데 적합한 길이인 200mm로 사용하여 순차적으로 발생하는 압케를 통하여 제어기의 영향을 일정하게 평가하려 하였으며, 이를 위해 45° 절삭가공을 하여 초기 트리거를 주었다. 실험에 사용된 시험편의 치수와 기호에 관하여 Table 1과 2에 정리하였다.

Table 1 Dimensions of the specimen for square tubes

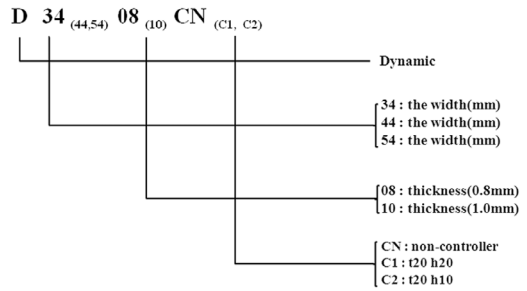


Table 2 Definition of the specimen number

Specimen ID	Axial length L (mm)	Inner width W (mm)	Thickness t (mm)	Width ratio t/W
D3408	200	34	0.8	0.024
D3410	200	34	1.0	0.029
D4408	200	44	0.8	0.018
D4410	200	44	1.0	0.023
D5408	200	54	0.8	0.015
D5410	200	54	1.0	0.019

2.2 제어기 제작

제어기는 Table 2에 나타낸 시험편의 한 변의 길이, 시험편과 제어기 사이의 틈새(0.2mm)를 고려하여 각각 제작하였고, 이론적 접촉길이와⁶⁾ 예비실험 결과 얻어진 접촉길이인 약 20mm를 기준으로 하여 제어기의 영향을 고찰하기 위하여, 제어기의 높이는 10mm, 20mm로 제어기의 두께는 20mm로 각각 Fig. 2와 같이 제작하였다.

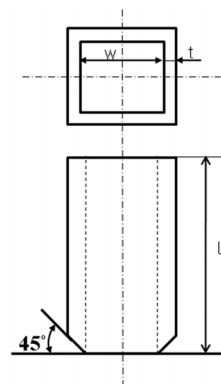


Fig. 1 Configuration of the thin-walled square specimen

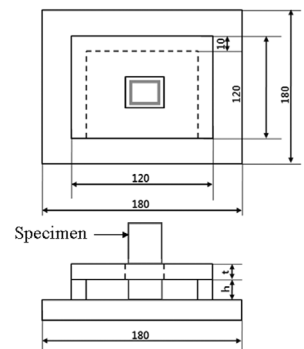


Fig. 2 The controller of energy absorption

에너지흡수능력을 조절하기 위해 제작된 제어기를 이용하여 제어기의 유무, 제어기의 높이(h)에 따른 에너지흡수에 미치는 영향에 관하여 고찰하였다.

2.3 실험장치 및 실험방법

photo. 1과 같은 공기압 수직식 가속장치를 이용하여 충격압괴과정에서의 하중 및 변형을 측정하고 그에 따른 흡수에너지를 정량적으로 고찰하고자 하였다.

변위를 측정하기 위해 크로스헤드의 앞부분에 변위를 측정하기 위한 이동표적을 설치하였으며, 속도를 측정하기 위하여 크로스헤드의 뒷부분에 베리어를 부착하였다.

변위의 측정은 크로스헤드에 부착된 표적의 이동을 광학식변위계(ZIMMER OHG사, 100F)를 사용하여 측정하였다. 광학식변위계는 광학렌즈를 이용하여 렌즈 측정범위 내에 있는 표적의 백색부와 흑색부의 경계선의 변위량을 전압변화로 측정하였다.

시험편에 작용하는 충격하중은 로드셀에 부착된 스트레인게이지의 변형률 변화를 하중으로 환산하였다. 충격하중은 로드셀에 부착된 스트레인게이지

의 충격으로부터 구한 변형률에 스트레인게이지가 부착된 로드셀의 검출부 단면적과 영률을 곱하여 구하였다.

충격속도는 크로스헤드가 시험편에 충돌하기 직전의 속도를 측정하였으며, 각 공기압 상태에서 수차례 실험을 통한 평균값을 사용하여 다음의 수식 $y = 5.4238x + 4.8268$ 과 같이 공기압과 속도와의 관계가 선형적임을 보였다.

2.4 압괴실험

알루미늄 박육사각부재의 충격압괴실험에 의해 하중 및 변형을 측정하였다. 압괴선도(하중-변위선도)는 Fig. 3(a)는 하중이력을, (b)는 변위이력을 측정 후 시간-변위선도에서 시간축을 소거함으로써 (c)를 구함으로써 압괴선도의 면적이 시험편에 흡수된 에너지값인 하중-변위선도를 식 (1)과 같이 적분하여 부재내에 흡수된 에너지량을 구하였다.

그리고, 흡수에너지 E_a 를 압괴길이를 나누어 평균압괴하중 F_{mean} 을 구하였다.

$$E_a = \int_{\ell_0}^{\ell} F d \ell \quad (1)$$

여기서, E_a 는 박육부재에 흡수된 에너지이며, F 는 압괴하중을 나타낸다. 또한, 전흡수에너지 E_T , 최대압괴하중 F_{max} 및 시험편의 변형된 길이 S 를 구하여 각 부재의 에너지 흡수특성에 관하여 고찰하였다.

특히, 충격압괴 하에서는 동일한 충격에너지를 가했을 때 모든 시험편의 압괴길이가 동일하지 않기 때문에 흡수에너지를 정량적으로 고찰하기 위하여 모든 시험편이 전체길이인 200mm가 압괴되었다고 가정하여, 그 값을 전체흡수에너지 E_T 이라고 하였으며, E_T 은 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$E_T = E_a \bar{J} \quad (2)$$

여기서, $\bar{J} (= L/S)$ 는 역 스트로크 효율, S 는 변형된 시험편의 길이, L 은 변형 전 시험편의 길이이다.

충격에너지 E_I 는 식 (3)과 같이 크로스헤드의 운동에너지로 하였다.

$$E_I = \frac{1}{2} m v^2 \quad (3)$$

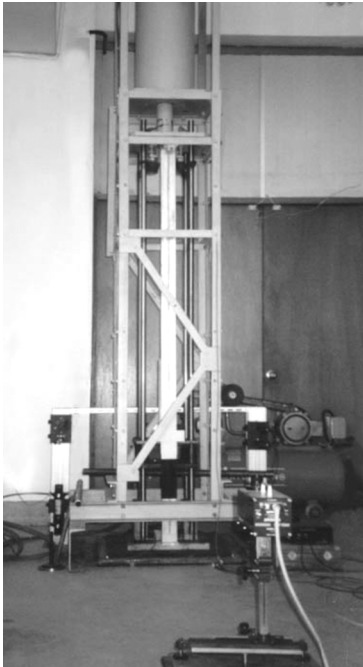


photo. 1 Impact testing setup for crushing

여기서, m 은 크로스헤드의 질량이며, v 는 충격 압계속도이다.

충격압계실험에서의 사각단면부재의 압계속도는 4.698m/sec (441.42J), 6.54m/sec (855.43J), 7.02 m/sec (985.61J), 7.57m/sec (1146.10J), 8.2m/sec (1344.80J)로 하였다. 이는 후폭비에 따라 충격압계 시 단면부재의 에너지흡수능력 때문에 선택한 속도이며, 더 높은 속도에서는 에너지흡수능력의 한계 때문에 실험을 할 수 없었다.

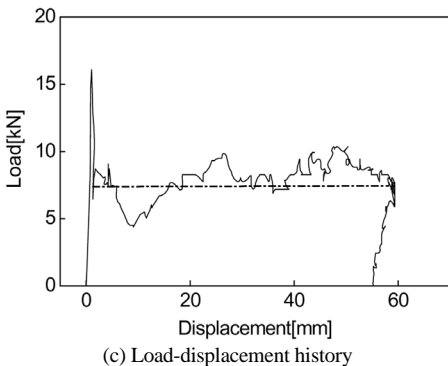
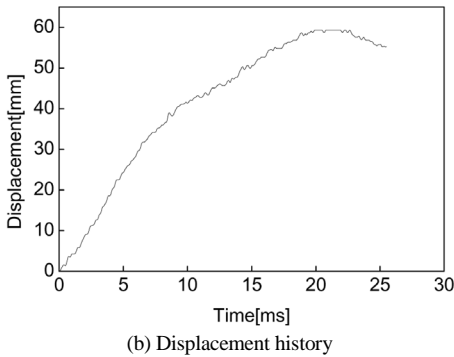
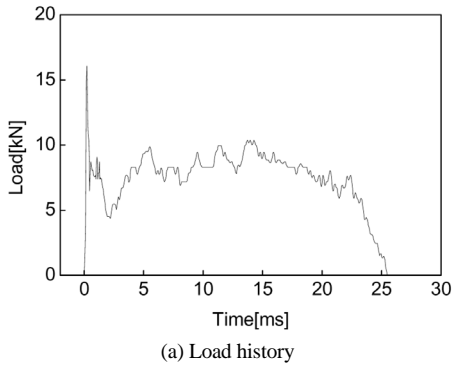


Fig. 3 Relationship between load and displacement, D3408C2, $v=4.698\text{m/s}$

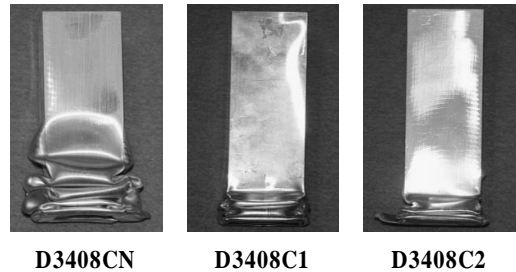
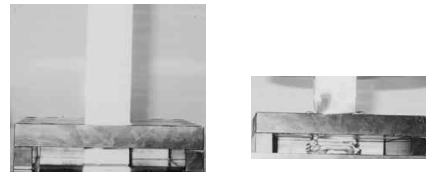
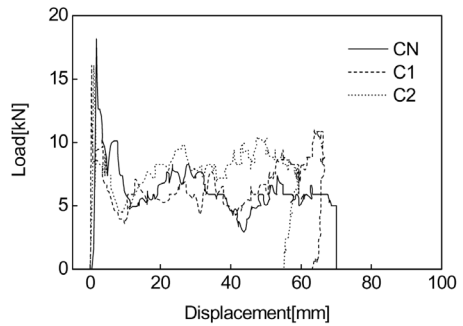


Fig. 4 Relationship between load and displacement and shape of collapsed specimens, D3408, $v=4.698\text{m/s}$

충격압계결과 변위-선도와 시험편의 압계형상을 Fig. 4에 나타내었다.

3. 압계시뮬레이션

본 연구에서는 충격실험과 동일한 속도 하에서 충격압계특성을 살펴보고자 범용유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA(Livermore Software Technology Co.)를 사용하여, 사각박육부재에 대한 충격압계 시뮬레이션을 행하여 압계특성을 평가하였다.

Fig. 5는 충격압계 시뮬레이션에 사용한 유한요소모델이며, 부재모델의 단면치수는 충격실험에서 사용하였던 것과 동일하며, 요소 $h1 \times h2$ 인 4절점의 Belytschko-tsay shell요소로서 약 3mm로 분할하였

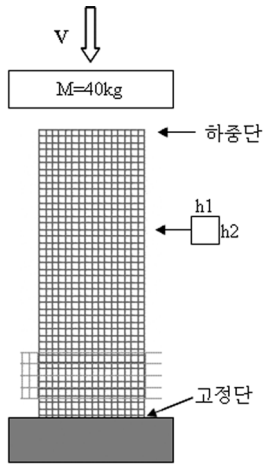


Fig. 5 Boundary condition of impact collapse

다. 본 연구에서는 계산의 효율성을 고려하여 Belytschko-tsay shell요소를 선택하였다. 부재모델의 한 단은 고정단으로 하여 모든 자유도를 구속하고, 다른 단은 하중을 받는 단으로 하여 회전경계조건을 모두 자유롭게 하였다. 하중단에서 일정거리 만큼 떨어진 지점에 가상의 강체(RIGID WALL)를 정의하여, 질량 40kg, 속도 V 로서 부재모델의 하중단에 충격을 가하도록 하였다. 충격속도는 충격실험 조건과 동일시하였다.

셀요소에서 변형을 한 점에서 평가하면 계산시간을 단축할 수 있지만 그로 인해 셀요소가 어떤 형상으로 변형됨에 따라 필요한 에너지가 0이 되는 변형모드가 발생한다. 이때 발생하는 에너지를 HOURGLASS ENERGY라 하며 유한요소모델에 의한 해석에 있어서 가장 큰 영향을 미치므로, 본 연구에서

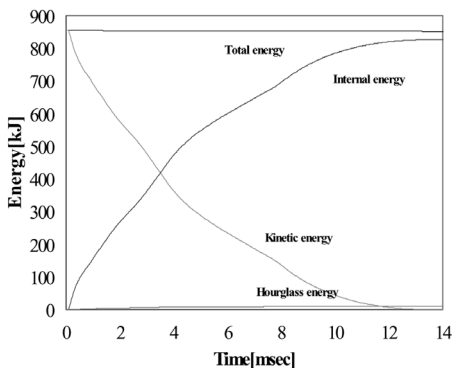


Fig. 6 Relationship between time and energy, D3410C1

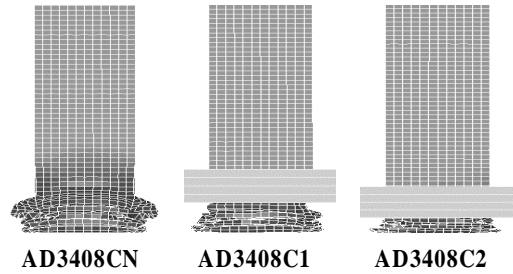
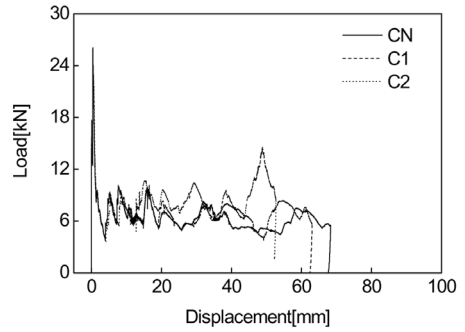


Fig. 7 Relationship between load and displacement and Shape of collapsed specimen, D3408, $v=4.698\text{m/s}$

는 Fig. 6은 에너지선도에서 HOURGLASS ENERGY를 최소화하기 위하여 반복 simulation을 통하여 HOURGLASS ENERGY가 어느 정도인가를 확인한 결과, HOURGLASS ENERGY가 Internal energy에 비해 1%내외 이므로 HOURGLASS 모드가 변형에너지에 큰 향을 주지 않는 것을 확인하였다.

4. 결과 및 고찰

에너지흡수제어기를 이용하여 정사각단면 부재를 충돌압계실험을 하였고 그 결과를 유한요소모델을 이용한 충격압계 시뮬레이션을 행하여 비교함으로써 시뮬레이션의 타당성을 확보하였다.

대부분의 시험편은 트리거(45°절삭)가 있는 쪽에서 초기변형이 시작되었고, 그 후 순차적으로 압계되었다. 일부 시험편에서는 제어기쪽 단부에서 압계가 일어난 후 좌굴이 일어나는 특이한 경우가 있었고, 제어기가 없음에도 불구하고 양쪽 단부에서 압계가 일어나는 경우도 있었다. 변형모드는 축대칭모드와 혼합모드의 경향을 보였다.

정사각단면 부재의 두께에 따른 경향을 살펴보면 두께가 얇은 경우가 같은 흡수에너지 및 같은 변형

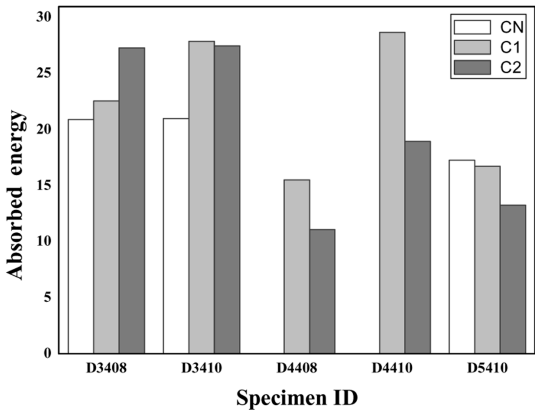


Fig. 8 Relationship between height of controller and Absorbed Energy (Impact experiment)

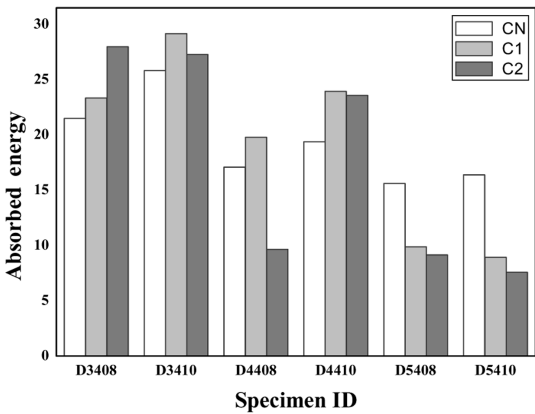


Fig. 9 Relationship between height of controller and Absorbed Energy (Simulation)

량에서도 보다 많은 소성관절을 형성하고 있기 때문에 변형에 요하는 시간이 길게 된다. 또한 두께가 두꺼운 경우가 평균하중이 크고, 작은 변형량에서 보다 큰 에너지를 흡수한다. 단위체적당 에너지흡수량에 미치는 영향은 두께가 두꺼울수록 크게 된다. 이것은 흡수에너지가 두께가 증가함에 따라서 소성관절을 발생시키는데 필요한 하중이 크게 증가하기 때문이라고 생각된다.

충격압괴 시물레이션에 의해 얻어진 정사각단면 부재의 하중-변위선도는 실험결과와 대체적으로 일치하고 있으며 충격압괴 시물레이션의 최대충격하중이 충격압괴실험 결과의 값보다 높고, 발생하는 시간도 실험에 비해서 약간 빨리 발생하고 있다. 이는 시물레이션의 경우는 균질한 시험편이라 고려

하여 계산하고 있으나, 실제 실험에서는 사용된 시험편에 결함 등이 존재할 수 있고 또한 가공에 따른 오차 및 충격속도가 빠를수록 계측기 응답성이 실제보다 늦어지는 점 등을 고려한다면 실험과 시물레이션 사이에는 잘 근사하고 있다고 사료된다.

Fig. 8과 Fig. 9에서는 제어기의 높이에 따른 시험편의 흡수에너지를 나타냈다. 후폭비가 적은 경우 제어기를 이용한 압괴시 안정적으로 압괴가 되지 않음으로써 오히려 에너지 흡수가 저하되는 경우가 발생하였다. 그러나 압괴 과정 중 접힘이 제어기의 영향을 받는 경우는 제어기 설치의 영향으로 흡수 에너지가 증가하였으며, 제어기가 설치된 시험편중 C1의 경우가 즉, 제어기의 높이가 높은 경우가 크게 나타난 것을 알 수가 있다. 하지만 일부 시험편의 경우 압괴시 시험편이 찢어지거나 제어기가 설치되지 않은 위쪽에서 압괴가 발생하여 제어기의 영향을 충분히 받지 못한 것으로 보여 진다. 시험편 D3408의 경우, C1이 C2 보다 더 작게 나타난 이유는 후폭비에 비례하여 시험편에 작용된 제어기의 영향이 미비하여 에너지 흡수 제어가 부족한 것으로 보여 진다.

5. 결론

본 연구에서는 충돌시 승객의 안전을 도모할 수 있도록 최적의 구조부재를 개발하기 위해 제어기를 이용한 AI 사각박욕부재의 충격압괴실험 및 시물레이션을 행하였다.

제어기를 이용한 실험결과 두께가 두꺼운 시험편에서는 축대칭모드가 얇은 시험편에서는 비축대칭모드가 지배적이었다. 또한 사각박욕부재는 압괴가 진행될 때 후폭비에 따라 접힘이 제어기의 영향을 받는 경우, 에너지흡수량 및 평균압괴하중이 제어기를 사용하지 않은 경우보다 15~20% 정도 증가함을 알 수 있었다.

흡수에너지의 증가는 제어기의 높이가 높은 쪽에서 그리고 제어기의 두께가 두꺼운 쪽에서 증가하는 경향을 확인할 수 있었고, 흡수에너지의 증가는 후폭비에 의존하는 경향이 나타났다. 하지만 일부 시험편의 경우 압괴 과정에서 제어기를 설치하지 않은 시험편의 위쪽에서부터 압괴가 시작되거나,

시험편의 후폭비에 비례하여 상대적으로 두께가 얇은 시험편의 경우 시험편의 찢어짐이 발생하여 시험편에 설치한 제어기의 영향을 충분히 받지 못하였다. 그 결과 제어기를 사용함에도 불구하고 일부 시험편에서는 흡수에너지가 감소하는 경향이 나타났다.

동일한 단면적을 갖는 시험편의 경우라도 두꺼운 시험편의 경우가 단위질량당 흡수에너지가 크게 나타났으며, 시뮬레이션 결과와 충격압력실험 결과를 비교한 결과 전체흡수에너지는 시뮬레이션 결과가 4.95%로 높게 나타났다.

이 결과 사각박육부재의 압괴가 진행되는 과정에 에너지흡수제어기를 사용함으로써 단위면적당 에너지효율을 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2007년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었습니다.

References

- 1) J. Fenton, Handbook of Vehicle Design Analysis, Society of Automotive Engineers, Inc. pp.9-12, 1996.
- 2) M. D. White and N. Jones, "Experimental Quasi- static Axial Crushing of Top-hat and Double- hat Thin-walled Sections," International Journal of Mechanical Science, Vol.41, pp.179-208, 1999.
- 3) M. D. White, N. Jones and W. Abramowicz, A., "Theoretical Analysis for the Quasi-static Axial Crushing of Top-hat and Double Hat Thin-walled Sections," International Journal of Mechanical Science, Vol.41, pp.209-233, 1999.
- 4) W. Abramowicz, "Simplified Crushing Analysis of Thin-Walled Columns and Beams," Engineering Transactions, Vol.29, No.1, pp.5-26, 1981.
- 5) W. Abramowicz and T. Wierzbicki, "On the Crushing Mechanics of Thin-Walled Structures," J. Appl. Mech., Vol.50, pp.157-174, 1986.
- 6) H. F. Mahood and A. Paluzny, "Design of Thin Walled Columns for Crash Energy Management-Their Strength and Model of Collapse," Proc. 4rd Instructural Conference on Vehicle Structural Mechanics, Detroit, pp.7-18, 1981.
- 7) G. H. Chol, "A Study on the Lightweight Design of a Seat Frame in Automotive Vehicles," Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol.8, No.5, pp.83-89, 1999.
- 8) K. S. Lee, C. S. Cha and I. Y. Yang, "A Study on the Axial Crushing Behavior of Aluminum CFRP Circular Members for Light-weight," Transactions of KSAE, Vol.13, No.5, pp.50-56, 2005.