알루미늄 폼이 충전된 충돌부재의 충격흡수 성능

김낙현¹ · 김지훈¹ · 이종국² · 김대용[#]

Impact Performance of a Crash Member Filled with Aluminum Foam

N. H. Kim, J. H. Kim, J. K. Lee, D. Kim

(Received September 26, 2011 / Revised November 2, 2011 / Accepted November 9, 2011)

Abstract

The energy absorbing characteristics of crash members in a car collision play an important role in controlling the amount of damage to the passenger compartment. Crash members filled with aluminum foam are expected to have reduced mass while maintaining or even improving the crashworthiness compared to the conventional hollow-beam types. Finite element simulations are carried out in the present work to assess the improvement of crashworthiness by the use of aluminum foam fillers. The numerical results agreed well with experimental measurements. Parametric studies are conducted to analyze the effect of impact velocity, weld strength, and initiator on the crash response.

Keywords : Crash Member, Aluminum Foam Filler, Crashworthiness, Impact Simulation

1. 서 론

저속충돌에서 차체손상을 줄여주고 충돌성능을 향상시키기 위해서 도입된 크래쉬 영역(crash zone)은 이제 자동차 업계에서 보편적으로 쓰이는 설계 개념이 되었다. 특히 충돌에너지를 효과적으로 흡수할 수 있는 크래쉬 박스(crash box)의 개발을 통하여 안전성을 향상시키고 차량의 피해를 최소화 하고 있다[1].

자동차 사고의 가장 흔한 형태는 시속 15km/h 이하의 저속충돌사고이다. 이 사고속도 영역에서는 충격을 흡수하는 앞 뒤 범퍼의 역할이 중요하며 그것과 체결되는 차체골격부품과의 체결구조에 따라 손상범위가 크게 다르게 나타난다는 연구결과가 보고된 바 있다. 또한 범퍼와 차체 골격을 연결하는 부품이 단순한 체결구조의 역할을 하기 보다는 충격력을 흡수하는 기능을 함께 보

유한 중간 구조체로서의 역할을 할 경우 사고 시 이와 직접 체결되는 차체골격부품의 손상 범위를 줄여 수리비를 절감할 수 있으며, 반면 충격흡수가 불충분하게 설계된 중간 구조체는 충돌사고 시 인체에 손상을 주거나 불필요하게 에어백을 전개시킨다는 연구결과도 보고된 바 있다. 특히 범퍼의 체결구조는 충돌 시 범퍼의 손상 및 충돌에너지 흡수에 영향을 미치는 중요한 인자가 되고 있다[2].

최근 다기능 재료로 각광받고 있는 발포알루미늄은 밀도가 0.2~0.4g/cm³으로 철의 1/10정도로 경량성이 우수하여 자동차 및 건설, 조선업 등 경량성 및 강성을 요구하는 구조물에 많이 이용되고 있다. 또한 다공성 구조체로 에너지 흡수 및 변형을 에너지 흡수에 우수한 성질을 나타냄과 동시에 반영구적인 흡음성을 지닌다. 발포알루미늄을 충전재로 사용할 경우 충전재가 굽힘하중 하에서 크래쉬 박스의 국부적 접합을 방지하거나 지연시

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소

2. 현대자동차 중앙연구소

교신저자: 한국기계연구원 부설 재료연구소,

E-mail: daeyong@kims.re.kr

Fig. 1 Dimensions of the crash member (units in mm)

Fig. 2 Finite element model of crash member: (a) hollow member, (b) foam-filled member, (c) hollow member with initiator, (d) foam-filled member with initiator

키는 역할을 함으로써 부재의 굽힘저항을 크게 증가시키게 된다[3~12].

충전재가 들어가지 않은 구조물의 충돌성능에 대해서는 Lee 등이 해석을 통한 연구를 수행하였다[13]. 본 연구에서는 충돌부재 내 발포알루미늄을 이용한 충전재의 양과 충돌속도에 따른 충돌성능을 분석하여 충격을 흡수하는 특성을 비교하였으며 이를 위하여 상용 유한요소 해석프로그램인 ABAQUS V6.10을 사용하였다.

2. 충돌부재의 모델 및 검증

2.1 충돌부재의 모델

충돌해석에 사용된 부재는 인장강도 440MPa의 강판을 사용하였으며 모델의 전체적인 크기는 145mm×350mm×65mm로 속이 빈 부재의 제작에는 두께 1.93mm의 강판을 사용하였고 충전재가 삽입되는 부재에는 두께 1.0mm의 강판이 사용되었다(Fig. 1). 부재는 강판을 모자형으로 점용접하여 제작되었으며 용접부는 속이 빈 부재의 경우 한쪽에 25개씩, 충전재가 가득차거나 수직으로 50% 채워진 부재의 경우 한쪽에 13개씩이다. 전체적인 유한요소모델은 Fig. 2에 나타내었다. 충돌 실험을 위하여 부재의 앞, 뒷면에는 면적 185mm×185mm, 두께 5.0mm의 판재가 부착되었다. 충돌 부재가 쉽게 접힘이 발생하도록 개시부(initiator)를

주어 그 접합에 따라서 충격흡수의 영향도 알아보았다. 또한 용접부가 완전 접착된 경우와 일정한 전단력(230kg/cm^2)을 받으면 파괴되는 경우에 대해서도 해석해보았다. 충전재로 사용된 발포알루미늄 Al6101-T6의 상대밀도는 12%이며, 해석에 사용된 임팩터의 질량은 290kg 이다. 부재의 접합을 원활하게 도와주는 개시부가 들어간 모델을 Fig. 2(c)와 Fig. 2(d)에 각각 나타내었다.

2.2 실험 및 해석모델 검증

충돌해석에 사용된 모델을 검증하기 위해서 Fig. 3의 고속충돌시험기[1]를 사용하여 비교실험을 수행하였다.

고속충돌시험기로 낼 수 있는 대차의 최대 속도는 76km/h 이며 최대 충돌 에너지는 $78,000\text{J}$ 이다. 실험에 사용되는 충돌부재는 레일의 끝부분에 장착을 하였으며 충돌에 사용되는 대차는 고압가스에 의해서 가속되어 충돌실험을 진행 하였으며, 고속카메라를 설치하여 시편이 변형되는 형상을 기록하였다(Fig. 4).

실제실험과 해석결과를 비교하기 위해 실제 충돌의 속도를 해석모델에 입력하여 그 결과를 비교하였다. Fig. 5는 실제 실험과 해석으로 구한 충돌후의 형상을 보여준다. 속이 빈 부재의 경우 약간의 차이는 났으나 평균힘과 최종변위의 에러율이 3% 미만이기 때문에 거의 일치 하다고 판단이 된다(Fig. 6(a)). 폼이 충전된 경우도 결과가 거의 일치하였으며 얇은 두께로 인하여 충격을 주는 상부영역이 하부영역에 가까워져서 해석과 실험 모두 끝부분의 하중이 증가되었다(Fig. 6(b)).

최종변위와 평균힘의 오차를 Table 1에 나타내었다. 실험과 비교했을때 해석의 평균 오차는 평균힘의 경우 2.8%이며 최종변위는 4.5%로, 실험과 해석모델의 결과가 거의 일치하는 것으로 나타났다.

Fig. 3 High speed impact tester[1]

(a)

(b)

(c)

(d)

Fig. 4 Crash test images taken at every 13 ms using the high speed camera

Fig. 5 Comparison of deformed shapes from experiments and simulations: (a) hollow member, (b) foam-filled member

3. 충돌해석결과 및 고찰

3.1 충돌속도의 영향

대차의 속도가 충돌성능에 미치는 영향을 해석을 통해서 알아보았다. 해석결과 속이 빈 부재는

Fig. 6 Comparison of measured and calculated load-displacement curves: (a) hollow member, (b) foam-filled member

Table 1 Errors

Case	Impact velocity (m/s)	Error - Force (%)	Error - Disp (%)
1.93t Hollow	10.1	2.7 %	1.7 %
1.0t Foam-Filled 100%	9.7	2.9 %	7.2 %
Average (%)		2.8 %	4.5 %

속도에 따라서 평균힘은 크게 변하지 않은 것을 볼 수 있다(Fig. 7). 반면 부재의 최종변위는 속도에 많은 영향을 받는것을 알 수 있다. 속도에 따라서 전체의 충돌에너지가 증가되고 변위는 흡수된 에너지에 비례하여 증가한다.

알루미늄 폼이 가득찬 부재의 경우 힘-변위 그래프를 Fig. 8에 나타내었다. 알루미늄 폼이 가득찬 부재의 경우 낮은 속도에서는 좌굴이 발생하지 않았으나 11m/s의 속도에서는 부재의 접합 보다는 폼으로 충전된 부재에서 좌굴이 발생하다가 충격을 주는 상부영역이 밀로로 처지는 현상이

Fig. 7 Effect of the impactor velocity for hollow members with 1.93t sheet

Fig. 8 Effect of the impactor velocity for foam-filled members with 1.0t sheet

Fig. 9 Effect of the impactor for hollow and foam-filled members

발생하였다. 그 이유는 발포알루미늄과 판재의 상호작용에 따라 접합이 제대로 이루어지지 않았기 때문으로 판단된다.

Fig.10 Comparison of the deformed shapes (a) without and (b) with the initiator

3.2 개시부의 영향

충돌부재의 안정적인 접합을 도와주는 개시부(initiator)의 영향을 알아보기 위해 부재의 윗면과 옆면에 개시부를 도입해서 해석해보았다(Fig. 9). 윗면에 적용한 개시부의 크기는 $100\text{mm} \times 50\text{mm}$ 이며 반경의 크기는 5mm이다. 옆면 부분에 적용한 개시부의 크기는 $50\text{mm} \times 10\text{mm}$ 이며 반경은 윗부분과 같은 5mm이다(Fig. 1).

개시부가 들어간 부재의 경우 작은 접합이 개시부에서 바로 발생하여(Fig. 10) 충돌 초기 힘의 최대치를 낮아 졌으며, 개시부가 없는 부재의 경우 부재가 큰 접합이 발생하여 충돌 초기 힘의 최대치가 크게 나타났다. 두 경우 충격에너지 흡수량은 차이가 없었다.

3.3 용접강도의 영향

충돌부재를 만들때 적용한 점용접부의 강도의 영향을 확인하기 위해서 용접부위의 전단강도를 다르게 하여 해석을 수행하였다(Fig. 11).부재의 판재의 접합에 의해서 충격에너지 흡수가 이루어지는데 용접 강도가 낮은 충돌부재는 판재가 충격에 견디지 못하고 서로 분리되어 안정된 접합과 에너지 흡수가 이루어지지 않았다.

3.4 동일 무게 조건 비교

알루미늄 폼 충전재를 이용한 차량 경량화 가능성을 알아보기 위해 같은 무게의 속이빈 부재와 100% 충전된 부재, 50% 충전된 부재의 충돌성능을 비교하였다. 동일한 조건하에서 비교하기위해 세 경우 모두 한쪽에 13개의 용접점과 동일한 판재 물성을 사용하였다. 충돌 속도는 11m/s이다. 비교한 세가지 경우의 각 부분별 무게를 Table 2에 정리하였다.

Fig.11 Effect of the weld strength for hollow and foam-filled members

Table 2 Cases for same-weight comparison

Case	Sheet Thickness / Weight	Foam Fraction / Weight	Total Weight
Hollow	1.93mm / 2213g	0% / 0g	2213g
Foam-Filled 100%	1.3mm / 1490g	100% / 774g	2264g
Foam-Filled 50%	1.6mm / 1834g	50% / 376g	2221g

Fig.12 Comparison of the hollow and foam-filled members with same weights

충돌에너지를 전부 흡수하기까지 시편이 변형된 변위를 기준으로 볼 때 속이 빈 부재의 경우 충전된 부재보다 상대적으로 작은 변위로 충격에너지를 흡수하였다(Fig. 12). 알루미늄 폼 충전재가 압축되면서 흡수하는 에너지의 양보다 판재가 접히면서 흡수하는 에너지의 양이 더 큰 것으로 유추된다.

4. 결 론

본 연구에서는 차량용 충돌부재의 유한요소해석과 부재에 삽입된 알루미늄 폼을 이용해 충격에너지의 흡수 및 부재의 접힘과 굽힘 거동을 분석 하기 위해 해석을 진행하였다. 그 결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 충돌해석 결과와 실험결과를 비교해 본 결과 속이 빈 경우와 폼이 충전된 경우 모두 충돌해석모델이 실제 충돌현상을 잘 모사하고 있는 것을 검증하였다.

(2) 충돌과정에서 대차가 받는 평균힘은 대차의 속도와 비교적 무관하며, 최종변위는 부재에 흡수된 에너지와 비례한다. 이는 판재의 접힘 또는 폼의 압축이 순차적으로 일어난다는 것을 보여준다.

(3) 개시부가 있는 충돌 부재는 접힘이 안정적으로 발생하며 접힘은 충격에 가장 약한 상부영역부터 발생하는 것으로 예측되었다.

(4) 용접강도가 약할 경우 부재에 먼저 파단이 일어나서 접힘이 안정적으로 발생하지 못한다.

(5) 같은 무게 조건일 경우 속이빈 부재가 충전된 부재보다 적은 변형량으로 충돌에너지를 흡수하였다.

참 고 문 헌

- [1] J. S. Yoo, S. B. Kim, M. Y. Lee, H. Huh, 2008, Development of Al Crash Box for High Crashworthiness Enhancement, Trans. Mater. Process, Vol. 17, No 3, pp. 182~188.
- [2] J. W. Kim, I. S. Park, C. S. Lee, 2010, A Study on the Improvement of a Damageability and Repairability by Improving Mounting Structure of a Bumper for Passenger Cars, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng, Vol. 34, No. 1, pp. 1~9.
- [3] A. K. Kim, H. J. Lee, S. S. Cho, 2003, Proc. Kor. Soc. Mech. Eng. Conf.(ed. K.Y. Lee), Pusan, Korea, p. 19.
- [4] S. Santos, T. Wierzbicki, M. Langseth, 2000, Experimental and Numerical Studies of Foam-Filled Sections, Int. J. Impact Eng., Vol. 24, No. 5, pp. 509~533.
- [5] B. D. Yoon, S. J. Heo, B. J. Kim, H. Y. Kim, J. K. Kim, H. Kang, J. M. Kim, 2000, Proc. Kor. Soc. Automot. Eng. Conf.(ed. B.S. Shim), Daegu, Korea,

- p. 951.
- [6] H. Y. Kim, J. K. Kim, S. J. Heo, H. Kang, 2002, Design of the Impact Energy Absorbing Members and Evaluation of the Crashworthiness for Aluminum Intensive Vehicle, Trans. Kor. Soc. Automot. Eng., Vol. 10, No. 1, pp. 216~233.
 - [7] S. M. Oak, Y. H. Moon, 2001, Physical Modeling of Process Parameters for Aluminum-Foam Generation, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng., Vol. 10, No 7, pp. 558~564.
 - [8] W. Chen, 2001, Experimental and Numerical Study on Bending Collapse of Aluminum Foam-filled Hat Profiles, Int. J. Solid Struct., Vol. 38, No. 44-45, pp. 7919~7944.
 - [9] H. W. Song, Z. J. Fan, G. Yu, Q. C. Wang, A. Tobota, 2005, Partition Energy Absorption of Axially Crushed Aluminum Foam-filled Hat Sections, Int. J. Solid Struct., Vol. 42, No. 9-10, pp. 2575~2600.
 - [10] H. R. Zarei, M. Kroger, 2008, Optimization of the Foam-filled Aluminum Tubes for Crush Box Application, Thin Walled Struct., Vol. 46, No. 2, pp. 214~221.
 - [11] A. K. Toksoy, M. Guden, 2011, Partial Al Foam Filling of Commercial 1050H14 Al Crash Boxes: The Effect of Box Column Thickness and Foam Relative Density on Energy Absorption, Thin Walled Struct., Vol. 48, No. 7, pp. 482~294.
 - [12] J. Huh, J. H. Yoon, J. H. Lim, S. H. Park, H. Huh, 2008, Proc. Kor. Soc. Technol. Plast. Conf.(ed. J.S. Lee), Kor. Soc. Technol. Plast., Jeju, Korea, p. 259.
 - [13] M. G. Lee, H. Ryou, C. Kim, S. J. Kim, K. Chung, 2008, Parametric Study on Crashworthiness of Automotive Sheet Alloy, Metals Mater. Int., Vol. 14, No. 1, pp. 21~31.