

알루미늄 경량 차체의 충돌에너지 흡수 성능 향상을 위한 설계 개선 연구

김 범 진¹⁾ · 허 승 진^{*2)}

국민대학교 자동차공학대학원¹⁾ · 국민대학교 기계 · 자동차공학부^{*2)}

Crashworthiness Design Concepts for the Improved Energy Absorbing Performance of an Aluminum Lightweight Vehicle Body

Bum-Jin Kim¹⁾ · Seung-Jin Heo^{*2)}

¹⁾Graduate School of Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

^{*2)}School of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

(Received 20 February 2003 / Accepted 7 April 2003)

Abstract : For the weight reduction of vehicle body up to 20~30% compared to the conventional monocoque steel body-in-white, most automotive manufacturers have attempted to develop the aluminum intensive body-in-white using an aluminum space frame. In this paper, the crush tests and simulations for the aluminum extrusions filled with the structural foam are performed to evaluate the collapse characteristics of that light weighted material. From these studies, the effectiveness of structural foam is evaluated in improving automotive crashworthiness. In order to improve the impact energy absorption capability of the aluminum space frame body, safety design modifications are performed and analyzed based on the suggested collapse initiator concepts and on the application of the aluminum extrusions filled with structural foam. The effectiveness of these design concepts on the frontal and side impact characteristics of the aluminum intensive vehicle structure is investigated and summarized.

Key words : Aluminum space frame(알루미늄 스페이스 프레임), Structural foam(구조용 발포재), Collapse mode(좌굴 모드), Frontal crash(정면 충돌), Side impact(측면 충돌), Collapse initiator(좌굴 새김)

1. 서론

오늘날 자동차 기술 관련 국제적인 환경 보호 법규가 매년 급격히 강화되고 있는 추세에 따라서 환경친화적인 자동차 기술 개발은 가장 중요하고 시급한 연구과제가 되고 있다.^{1,2)} 이와 관련하여 다양한 환경친화적인 구동시스템의 기술개발과 함께 중요시되고 있는 연구과제는 초경량 차체 설계 및 제작 기술 개발을 통하여 차량의 연비 성능을 획기적으로 향상시키고자 하는 것이다. 이를 위해서 기존

의 차체 대비 20~30%의 경량화 목표를 달성하기 위해 최근 수 년 전부터 활발히 개발되고 있는 대표적인 기술로서 초경량 철강차체와 알루미늄 경량 차체(aluminum space frame)를 들 수 있다. 그러나, 경량화 된 차체 구조물의 실용화를 위해서는 각종의 자동차 안전 법규와 관련되어 충돌 안전성 등을 만족시킬 수 있는 기술개발이 뒷받침되어야 한다. 자동차 안전도 성능과 관련된 설계 및 제작 기술은 주로 일체식의 철강차체 구조물에 대하여 개발되어왔으며, 새로운 차체 제작 방식인 알루미늄 경량 차체에 대한 충돌안전도 관련 연구는 전세계적으로 아직 초보적인 단계에서 관련된 결과가 발표되고

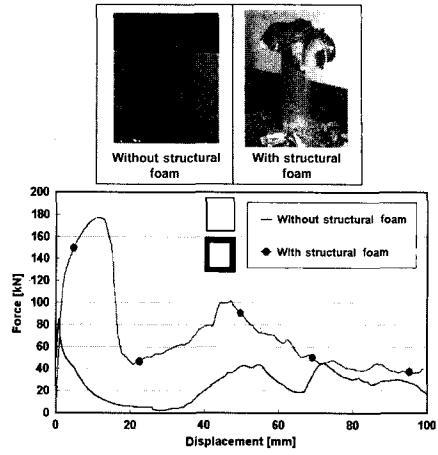
*To whom correspondence should be addressed.
sjheo@kookmin.ac.kr

있다.¹⁻⁵⁾ 본 논문에서는 알루미늄 경량 차체의 안전도 성능 향상을 위한 제작 기술 개발 및 설계 개선에 관한 연구를 수행하였다. 이를 위해서 구조용 발포재(structural foam)를 충전시킨 알루미늄 압출재의 충격 에너지 흡수 성능 평가 및 알루미늄 경량 차체에 적용 가능성이 검토되었다. 또한, 알루미늄 경량 차체의 전방 충돌에너지 흡수 성능을 향상시키기 위한 연속적 충격 하중의 배분 설계 개념 및 다양한 좌굴 새김(collapse initiator)의 설계 개념이 제시되고, 차체 충돌 안전도 측면에서 상호 비교 분석 되었다.

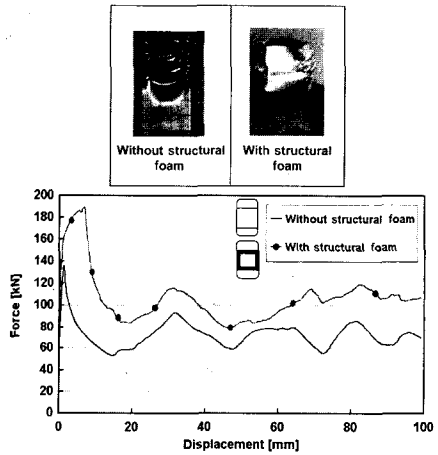
2. 구조용 발포재 충전 알루미늄 압출재의 정적 시험

2.1 축방향 압괴 시험 및 해석

구조용 발포재가 충전된 알루미늄 압출재의 충격 에너지 흡수 특성을 시험적으로 파악하기 위하여 우선적으로 축 방향 압축 붕괴(axial collapse) 시험을 수행하였다. 본 시험에 적용된 구조용 발포재는 epoxy polymer계의 재료로써 고강성, 저밀도의 재질 특성을 갖는다. Fig. 1에서는 압출재의 동일 단면 형상에 대하여 구조용 발포재가 충전되지 않은 압출재와 충전된 압출재의 축 방향 압축 붕괴 시험 결과를 변형 양상 및 힘-변위 선도로 나타내었다. 시험 결과, Fig. 1(a)와 같은 단순한 사각 단면 알루미늄 압출재의 경우, 접힘(folding) 현상이 전혀 발생하지 않고 균열(fracture)만이 지속적으로 일어나며, 충전된 발포재가 파손되어 압출재의 외부로 나오는 불안정한 좌굴모우드를 나타내었다. 반면 Fig. 1(b)와 같이 단면 굽힘 강성이 보강된 알루미늄 압출재에 구조용 발포재를 충전시키는 경우에는 접힘과 균열 현상이 동시에 발생하는 좌굴 모우드(collapse mode)를 나타내었으며, 구조용 발포재가 충전되어 있는 알루미늄 압출재의 부위에서의 균열에 의하여 파손된 발포재가 앞의 경우와 마찬가지로 압출재 외부로 나오는 현상을 나타내었다. Fig. 1의 힘-변위 선도를 살펴보면 충돌 에너지 흡수율은 구조용 발포재를 알루미늄 압출재에 충전시킴으로써 다소 상승하는 결과를 확인할 수 있다. 구조용 발포재 충전 알루미늄 압출재에 대한 축방향 압괴 시험 결과를 에너지 흡수 도표로 나타내보면 Fig. 2와 같다.



(a) Aluminum extrusion with rectangular cross-section



(b) Aluminum extrusion with reinforced rectangular cross-section

Fig. 1 Typical axial collapse modes and force-displacement diagrams of aluminum extrusions without and with structural foam

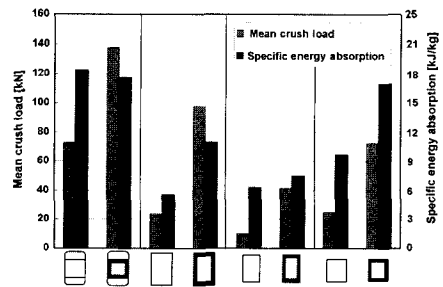


Fig. 2 Comparison of energy absorption between aluminum extrusions without and with structural foam

Fig. 2에서 볼 때, 구조용 발포재가 충전 되는 경우, 단위무게당 충격에너지 흡수능력이 최대 약

80% 향상되나 이는 Fig. 1에서 보인 구조용 발포재 충전시, 접힘에 의한 안정적인 에너지 흡수 구조가 아닌 균열을 동반하는 즉, 불안정한 압괴 모우드를 통한 에너지 흡수 구조를 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서, Fig. 1과 Fig. 2의 결과를 종합적으로 고려해볼 때, 구조용 발포재는 측방향 압괴 모우드가 주로 발생하는 전방 충돌 안전도 관련 차체 구조요소로서 부적절하다.

2.2 굽힘 붕괴 시험

구조용 발포재가 충전된 알루미늄 압출재의 굽힘 붕괴(bending collapse) 특성을 시험적으로 파악하기 위하여 3점 굽힘 붕괴 시험을 수행하였다. Fig. 3에는 굽힘 붕괴 시험의 결과로서 굽힘 붕괴 모우드와 힘-변위 선도를 나타내고 있다. 구조용 발포재가 충전되지 않은 압출재의 경우는 한번의 접힘 후, 균열 발생이 없는 굽힘 붕괴 변형 양상을 나타내고 있는 반면에 구조용 발포재가 충전된 알루미늄 압출재의 경우에는 변형 길이 약 16mm 시, 인장 변형 영역의 구조용 발포재에서 균열이 발생하는 동시에 알루미늄 압출재의 균열이 지속적으로 진전됨을 볼 수 있다. Fig. 3의 힘-변위 선도를 살펴보면 구조용 발포재가 충전된 압출재의 경우는 소성영역으로 전이되기 직전의 최대 굽힘 하중이 구조용 발포재가 충전되지 않은 압출재 보다 약 3배 가량 높음을 알 수 있다. Fig. 4에서는 다양한 알루미늄 압출재에 대한 굽

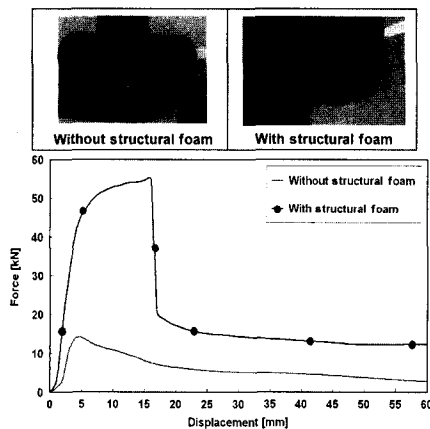


Fig. 3 Typical bending collapse modes and force-displacement diagrams of aluminum extrusions without and with structural foam

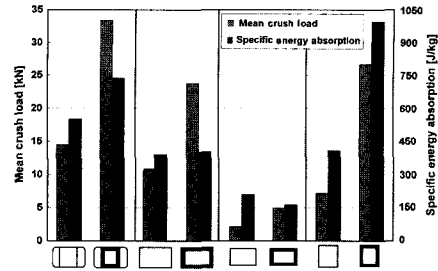


Fig. 4 Comparison of energy absorption between aluminum extrusions without and with structural foam

힘 붕괴 시험 결과로서 평균 굽힘 붕괴 하중 및 단위 무게당 충격에너지 흡수 성능을 비교하여 보여주고 있다. Fig. 3 및 Fig. 4의 굽힘 붕괴 시험 결과를 종합적으로 분석하여 볼 때, 구조용 발포재가 충전된 알루미늄 압출재는 앞 절의 전방 충돌 시와는 달리 굽힘 붕괴 모우드 발생이 지배적인 차량의 측면 충돌 상황에서의 안전도 성능을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

3. 알루미늄 초경량 차체의 충돌안전도 설계 개선

3.1 전방 충돌 설계 분석

알루미늄 초경량 차체의 충격 에너지 흡수 부재를 포함한 전방 구조물에 대하여 정면 충돌 특성 및 충격 에너지 흡수 구조를 분석하기 위하여 충돌해석을 수행하였다. 충돌해석을 위하여 사용된 알루미늄 초경량 차체는 알루미늄 압출재(extrusion), 알루미늄 주조재(casting), 그리고 알루미늄 판재(panel)로 구성되어 있으며, 사용된 알루미늄 합금의 주요 재질 특성을 요약하여 보면 Table 1과 같다. 정면 충돌해석을 위한 경계조건은 Fig. 5에서 나타낸

Table 1 Material properties of applied aluminum alloys

Aluminum alloys	Elastic modulus [GPa]	U.T.S [MPa]	Y.T.S [MPa]	Density [kg/m ³]	Poisson's ratio
A6061-T6 (Extrusions)	70.5	310	275	2700	0.33
A356.0-T6 (Castings)	72	275	207	2700	0.33
A5032-T4 (Panels)	70.5	285	130	2700	0.33

바와 같이 B-Pillar 후반부를 강체로 구속한 상태에서 강체벽에 50km/h의 속도로 충돌시켰다.

Fig. 5의 충돌 경계 조건에 따른 기존 알루미늄 초경량 차체 모델의 충돌 해석 결과로서 충돌 하중 특성곡선은 Fig. 6과 같다. 여기에서 볼 때, 약 0.01sec에서 최대 충돌 하중값에 도달된 이후, 전방사이드 멤버와 기타 주요 구조요소와의 연결부위에 대한 굽힘강성 취약으로 인하여 접힘좌굴(folding collapse) 보다는 굽힘붕괴(bending collapse)에 의한 충돌하중의 특성변화를 보이고 있다. 또한, Fig. 7에서는 기존 알루미늄 초경량 차체 전방 구조요소의 충돌 변형 형태로서, 전방 사이드 멤버의 충격에너지 흡수 부재로서의 기능을 저하시키는 대표적인 굽힘 붕괴 모드(bending collapse mode)를 보여주고 있다. 따라서, 이에 대한 대책으로써 전방 사이드 멤버에 장착되는 좌굴 새김(collapse initiator)등에 의한

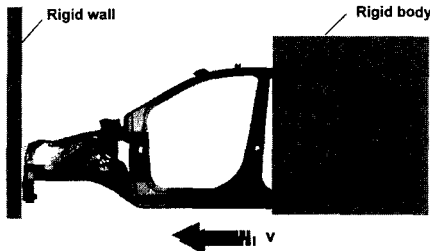


Fig. 5 Boundary condition for the frontal crash analysis

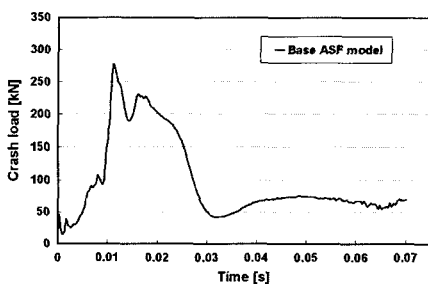


Fig. 6 Crash load characteristic curve of base ASF model

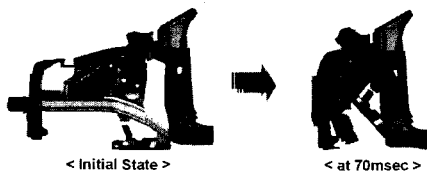


Fig. 7 Typical deformed shape of front side member of aluminum space frame model at 70msec

설계변경이 요구됨을 알 수 있다.

3.2 축방향 압괴 모드 제어용 좌굴 새김 설계

일반적으로 차체의 충돌 안전도 설계시에 외부 충격에너지의 전체적인(global) 배분개념과 함께 좌굴모드의 제어를 통한 국부적인(local) 배분개념이 동시에 고려되어야 한다. 이와 관련하여 앞 절에서도 살펴보았듯이, 차체 전방사이드 멤버의 굽힘 붕괴 모드 발생은 충격에너지 흡수 능력의 저하를 초래하며, 이를 방지하기 위하여 좌굴 새김(collapse initiator)설계 등을 통한 축 방향의 압괴 좌굴 모드(axial collapse)를 최대한 유도하여야 한다.

이를 위해서 본 논문에서는 전체적인 굽힘 강성이 취약한 전방사이드 멤버와 기타 주요 구조요소와의 연결부위에 대한 보강을 위하여 주조 연결부재(casting node)를 설계 보완하였으며, 동시에 Fig. 8에서 보이고 있는 바와 같이 3가지 종류의 축방향 압괴 모드 유도를 위한 좌굴 새김의 설계 개념을 제시하였다. Fig. 9에서는 제시된 좌굴 새김 개념에 따른 알루미늄 차체 전방 구조물의 충돌변형 형태를 보여주고 있는데, 좌굴 새김을 장착한 전방사이드 멤버의 접힘 변형에 의한 축방향 압괴 모드가 유도됨으로써 급격하게 발생하는 굽힘 붕괴 모드를 최대한 지연 또는 억제시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

이와 같은 해석결과는 Fig. 10에서의 충돌하중 곡선을 통하여 다시 확인할 수 있는바, 제시된 좌굴 새김의 설계 개념이 고려되는 경우 기존의 알루미늄 차체에 비하여 급격한 충돌 하중의 저하 없이 일정 충돌 시간동안 충돌하중 크기가 지속적으로 유지됨으로써 궁극적으로 충돌에너지 흡수성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구에서 제시되고 있는 좌굴 새김 설계 개념에 대한 충돌 안전도 측면에서의 종합적인 평가를 위하여 등가 충돌에너지 흡수에 요구되는 전방사이드 멤버의 변형길이를 비교하여 나타내보면 Fig. 11과 같다. 여기에서 볼 때, 차체 전방사이드 멤버의 충돌 시, 좌굴모드의 개선을 위하여 원형홀 형태의 좌굴 새김이 고려된 설계변경을 하는 경우 가장 효과적으로 충돌에너지가 흡수될 수 있을 것으로 예상된다.

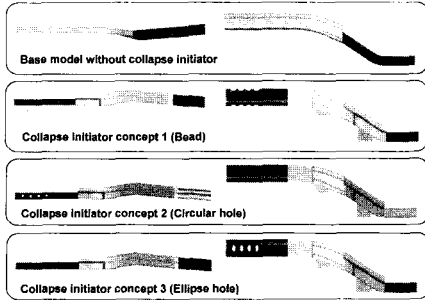


Fig. 8 Collapse initiator design concepts of front side member

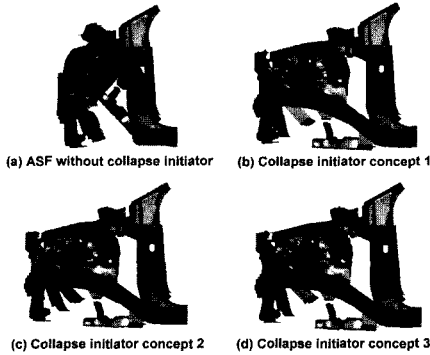


Fig. 9 Comparison of typical deformed shapes according to the collapse initiator concepts

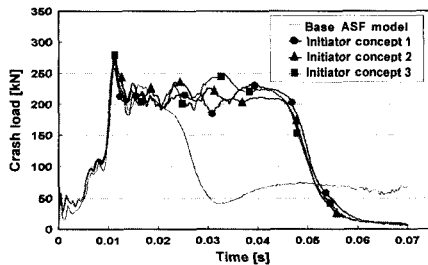


Fig. 10 Comparison of crash load characteristics according to the collapse initiator concepts

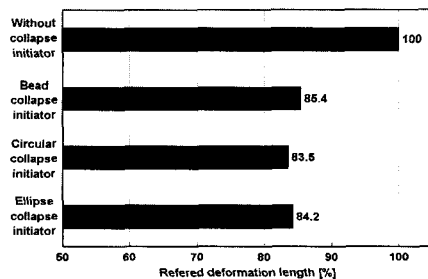


Fig. 11 Referred deformation length of side member for equivalent energy absorption according to the collapse initiator concepts

3.3 구조용 발포재 충전 알루미늄 압출재의 적용설계

2절에서 시험적으로 살펴본 바와 같이, 구조용 발포재의 굽힘 붕괴와 관련된 충돌에너지 흡수 특성이 우수함을 확인할 수 있었다. 따라서, 이와 같은 시험결과를 바탕으로 Fig. 12에서와 같이 실제 알루미늄 차체의 A-필라(pillar) 및 B-필라(pillar)에 구조용 발포재를 적용함으로써 알루미늄 차체의 측면 충돌안전도를 향상시키고자 하였다. 구조용 발포재가 충전된 A-필라 및 B-필라 부재 장착의 알루미늄 차체모델에 대한 측면 충돌해석을 수행한 결과로서 Fig. 13에서는 알루미늄 차체의 B-필라에 작용되는 충격하중을 변형량에 대하여 나타내고 있다. 구조용 발포재가 충전된 B-필라 적용에 의하여 알루미늄 차체의 단위무게당 측면 충돌에너지 흡수성능을 약 50% 향상시킬 수 있었다.

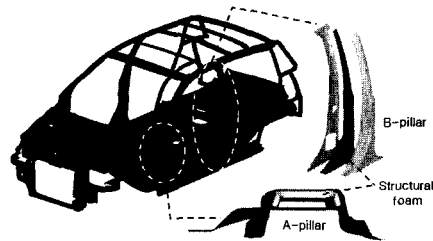


Fig. 12 A- and B-pillar filled with structural foam of the aluminum space frame

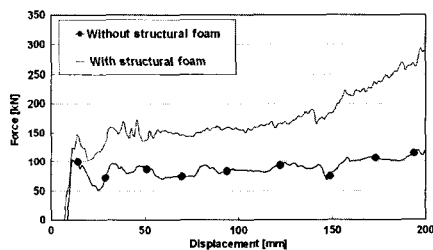


Fig. 13 Comparison of force-displacement diagram between B-pillar without and with the structural foam

4. 결론

본 논문에서는 알루미늄 초경량 차체의 충돌안전도 성능을 향상시키기 위한 다양한 설계개념을 제시하고 있으며, 시험 및 해석을 통하여 그 타당성을 평가하였다.

1) 굽힘 붕괴 시험을 통하여 구조용 발포재의 굽

힘 붕괴와 관련된 충돌에너지 흡수 특성을 최대 약 2.3배 향상시킬 수 있었으며 이와 같은 우수한 시험 결과를 바탕으로 실제 알루미늄 차체의 A-필라 및 B-필라에 구조용 발포재를 충전시킴으로써 알루미늄 초경량 차체의 측면 충돌에너지 흡수 성능을 약 50% 향상시킬 수 있었다.

2) 알루미늄 차체의 전방 충돌안전도 성능을 향상시키기 위하여 연속적인 충격하중의 배분 설계 및 다양한 형태의 좌굴 새김 설계가 적용되었으며 이를 통하여 충격하중의 급격한 변화를 억제할 수 있는 동시에, 궁극적으로 전체적인 충돌에너지 흡수 능력을 약 20% 향상시킬 수 있었다.

후 기

본 연구는 현대자동차에서 주관하는 G7 차세대 자동차 기술개발 사업 위탁연구과제의 연구지원금으로 수행되었습니다.

References

- 1) R. Gitter, "Designing with Extruded Aluminum Sections (in German)", Tagungsband DVM-Tag Berlin, 1990.
- 2) H. Y. Kim, J. K. Kim, S. J. Heo, H. Kang, "Design of the Impact Energy Absorbing Members and Evaluation of the Crashworthiness for Aluminum Intensive Vehicle," Transactions of KSAE, Vol.10, No.1, 2002.
- 3) K. Tanabe, K. Hashimoto, M. Tanaka, "Development of the All-Aluminum Light Body Structure for the Hybrid Electric Vehicle," FISITA World Automotive Congress, F2000G371, Seoul, 2000.
- 4) R. W. Logan, S. A. Perfect, "Energy Absorption in Aluminum Extrusions for a Space Frame Chassis," SAE 951079, 1995.
- 5) V. Lakshminarayan, H. Wang, W. J. Williams, Y. Harajli, "Application of CAE Nonlinear Crash Analysis to Aluminum Automotive Crashworthiness Design," SAE 951080, 1995.