

알루미늄 초경량 차체의 구조강성 및 안전도향상에 관한 연구

김진국*·김상범*·김현영**·허승진***

A Study on The Structure and Safety of Aluminum Intensive Vehicle

Jin Kook Kim, Sang Bum Kim, Heon Young Kim and Seung Jin Heo

Key Words: Aluminum Intensive Vehicle(알루미늄 초경량 차체), Aluminum Space Frame(알루미늄 스페이스 프레임), Weight Reduction(경량화), Body Stiffness(차체강성), Static Crush Analysis(정적충격해석), Frontal Crash Analysis (정면충돌해석), Occupant Behavior Analysis(승객거동해석)

Abstract

Due to environmental problem for reduction in fuel consumption, vehicle emission and etc., many automotive makers are trying to reduce the weight of the vehicle. The most effective way to reduce the weight of vehicle is to use lighter materials, aluminum, plastics. Aluminum Space Frame has many advantages in weight reduction, body stiffness, ease of model change and so on. So, most of automotive manufacturers are attempting to develop Aluminum Space Frame body.

For these reasons, we have developed Aluminum Intensive Vehicle based on steel monocoque body with Hyundai Motor Company. We achieved about 30% weight reduction, the stiffness of our model was higher than that of conventional steel monocoque body. In this paper, with optimization using FEM analysis, we could get more weight reduction and body stiffness increase. In the long run, we analyzed by means of simulation using PAM-CRASH to evaluate crush and crash characteristic of Aluminum Intensive Vehicle in comparison to steel monocoque automotive.

1. 서 론

자동차 기술개발의 설계 목표인 고안전 차량, 승차감 및 편리성의 차량, 고성능 차량의 개발과제는 환경보호적 측면에서 자원의 보호요구, 리사이클링 관련법규, 배기가스 규제 등과 상반되어 급격한 차량무게의 증가를 요구하고 있다. 이

와 같이 상반되는 자동차 기술 개발 목표를 해결하기 위하여 우선적으로 전체 차량 중량의 20~30%를 차지하는 차체 중량을 최소화 시켜야 한다. 차체 중량의 경량화를 위해서는 대체 경량 재질의 선택, 새로운 가공 및 조립 기술의 개발, 초기 개발 과정에서의 차체 최적화 설계 기술의 도입 등이 고려될 수 있는데 특히 대체 경량 재질의 선택과 관련하여 알루미늄 초경량 차체(Aluminum Intensive Vehicle : AIV)의 개발을 들 수 있다.

일반적으로 알루미늄 재질을 이용한 차체 제작 시 기존 철재 차체에 비하여 동일한 차체강성(Body Stiffness)조건을 만족시킬 때 대략적으로

* 회원, 강원대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부

E-mail : khy@cc.kangwon.ac.kr

TEL : (033)250-6317 FAX : (033)242-6013

*** 회원, 국민대학교 자동차공학부

30%이상의 경량화(Weight Reduction) 목표에 도달할 수 있는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁾ 또한, 동일한 차체 강성 유지를 위하여 단면 두께를 기존 철재 차체에 비하여 약 40%이상 증대되게 함으로써 차체강도 및 내구수명적인 측면에서 매우 우수할 뿐 아니라 경량화에 따른 차체굽힘 및 회전 고유진동수의 증가는 엔진 공간 영역에서의 차체 진동 소음 성능향상을 기대할 수 있다. 나아가서 차량 경량화 및 단면 두께의 증가는 충돌에너지 흡수능력을 기존 철재 차체에 비하여 극대화시킬 수 있는 장점이 있다.⁽²⁾

따라서 알루미늄 초경량 차체의 제작 기술과 관련된 용접 및 접합기술, 3차원 굽힘기술, 하이드로포밍 기술 등이 개발되는 경우, 알루미늄 초경량 차체는 앞서 기술한 바와 같은 '차량 성능의 극대화' 와 '환경보호 범규의 만족' 이라는 상반되는 차량 엔지니어링 기술 요구사항을 동시에 해결할 수 있는 첨단 자동차 기술분야의 핵심 기술 과제로 고려될 수 있다.

본 연구에서는 현재 개발되고 있는 알루미늄 초경량 차체의 경량화에 대비하여 구조강성에 대한 평가를 수행하였으며, 충돌안전도 인증시험에 대비한 전차량의 정적 및 동적 충돌해석과 승객 거동해석을 수행하여 충돌안전도 측면의 설계 개선방향을 제시하고자 한다.

2. 국내외 기술동향

알루미늄 재질의 활용 기술로서, 1970년대에 이미 몇몇 자동차 업체에서는 엔진커버, 트렁크 뚜껑, 바퀴덮개 등에 대한 알루미늄 재질의 적용을 시작하였다. 이 당시 주요 설계 목표는 일부 국가에서 실시된 연비 규제의 통과였으나, 부가적인 기대효과가 미흡하였고 생산비용의 증대로 인하여 관련기술이 널리 파급되지는 못하였다.

1980년대에 들어서는 기존의 강철판재를 이용한 일체형 차체구조의 제작방식을 그대로 활용하여 단순히 알루미늄 재질로 대체하는 알루미늄 차체 제작이 시도되었다. 이 경우, 알루미늄 차체의 강성 유지를 위하여 기존 철재 단면의 형상 및 크기를 강화한 구조설계가 시도되었다. 대표적인 사례로서 1985년도에 발표한 독일 Audi사의 시제작된 알루미늄 차체가 시초였으며, 일본 Honda사의 경우 1990년부터 Acura NSX차종에 이러한 알루미늄 차체 제작 기술을 적용하였다.

1990년 중반부터 고전적인 차체 프레임 제작 방식과 유사하게 이른바 알루미늄 스페이스 프레임(Aluminum Space Frame : ASF) 제작 방식이 도입되기 시작하였다. 초기에는 전기자동차를 위한 경량차체에 주로 활용되었으나, 최근에 들어서는 대표적인 초경량 차체의 제작 기술로서 선진 자동차업체에서 크게 주목받기 시작하였다. 가장 대표적인 사례로서 독일 Audi사의 A8 차종에서의 활용을 들 수 있다. 알루미늄 스페이스 프레임 제작 방식에 있어서는 알루미늄 압출재의 3차원적인 밴딩기술 개발과 함께 알루미늄 주조재(Cast node)의 제작을 통하여 고강성 및 고강도와 고안전도의 차체 구조 특성을 유지하면서, 동시에 초경량 차체의 최적화된 설계 가능성을 제시하고 있다.^(3,4)

국내의 경우에는 현대 자동차에서 일체형 차체 제작방식을 통한 알루미늄 차체를 실용화 시킨 바 있으며⁽⁵⁾, 대우 자동차의 경우 전기 자동차용의 알루미늄 프레임 제작을 위한 기술개발이 진행되고 있다.⁽⁶⁾

3. 알루미늄 초경량 차체의 구조

알루미늄 초경량 차체의 BIW(Body In White)는 기존 스틸 차체를 기초로 하여 제작하였다. 설계

Table 1 Material properties applied to Aluminum Intensive Vehicle

Material	Elastic Modulus (Gpa)	UTS (Mpa)	YTS (Mpa)	Density (g/cm ³)	Poisson's ratio	Parts
A6061-T6	70.5	310	275	2.7	0.33	Flame
A5032-T4	70.5	285	130	2.7	0.33	Sheet
AC4CH	70.5	275	207	2.7	0.33	Cast node
SMC	10.0	62	50	1.5	0.35	Outer panel

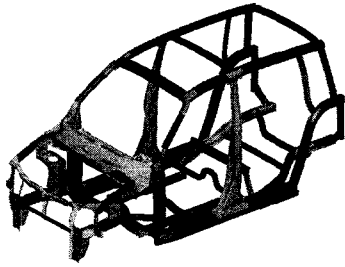


Fig. 1 Aluminum Space Frame

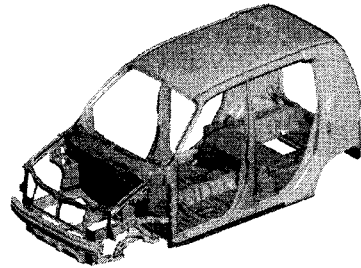


Fig. 2 AIV BIW model for static crush analysis

상의 문제와 비용의 문제로 기존차량의 엔진, 트랜스미션, 샤시부품 및 기타 의장부품을 최대한 공용하기 위하여 기존의 레이아웃(lay out)에 간섭되지 않는 구조로 압출재(frame)를 설계하였고, 구조해석을 통해 압출부재의 단면 형상을 결정하였다. 부위별로 총 25종의 압출재를 사용하였으며, 재질은 A6061-T6를 사용하였다. 압출재 간의 접합부는 접합을 용이하게 하고 강성을 확보하기 위하여 알루미늄 주조재로 연결되어 있다. 또한, B 필라(pillar)와 속 업소버 하우징(shock absorber housing)에도 일체형 주조재로 설계하여 제작하였다. 주조품의 재질은 AC4CH를 사용하였다. 루프패널(roof panel)과 쿼터패널(quarter panel) 등의 외판은 플라스틱 SMC소재를 사용하였으며, 플로어(floor) 등과 같은 판재는 A5032-T4를 사용하였다. 알루미늄 초경량 차체에 적용된 재료와 기계적 성질은 Table 1에 나타내었다. 알루미늄 초경량 차체의 조립에 사용된 접합의 종류는 크게 3종류로 알루미늄 압출재간, 알루미늄 압출재와 알루미늄 주조재 간의 접합은 TIG용접을 적용하였고, 알루미늄 압출재 또는 판재와 플라스틱 외판의 접합은 액상본드와 리벳을 이용한 리벳본딩(rivet-bonding)을 적용하였다. 또한, 알루미늄 판재와 판재는 리벳 또는 점용접을 사용하였다. 기존에 사용하던 스틸재료를 알루미늄 합금과 플라스틱 소재로 대체함으로써 기존 스틸 차체보다 약 30%이상 경량화에 도달할 수 있었다.⁽⁷⁾ Fig. 1은 알루미늄 초경량 차체에 적용된 알루미늄 스페이스 프레임 구조를 나타낸 것이다.

4. 알루미늄 초경량 차체의 구조강성평가

기존 스틸차체를 기초로 하여 알루미늄 초경량 차체를 설계한 결과 66.38kg의 경량화에 도달할 수 있었다. 또한, 구조강성도 기존 스틸 모노코크 차체보다 높게 나타났다. AIV 시작차 모델의 경량화에 역점을 두어 ASF구조를 최적화하기 위하여 유한요소해석(Finite Element Analysis)을 수행하였다. 그 결과 31% 경량화 목표에 도달할 수 있었으며, 굽힘강성 29%, 비틀림 강성 5.1% 향상시킬 수 있었다. Table 2는 기존 스틸 모노코크 차체와 AIV 시작차 모델, 최적 설계된 모델에 대해 차체 중량과 강성을 비교한 것이다.⁽⁸⁾

Table 2 Comparison of body weight and stiffness

	Steel Base Model	AIV Initial Model	Optimized Model
Weight (kg)	262.38	196.00	180.30
Bending Stiffness(%)	100	130	129
Torsion Stiffness(%)	100	106.3	105.1

5. 알루미늄 초경량 차체의 정적충격해석

5.1 정적충격해석

완성차의 충돌시험은 충돌시간이 매우 짧고 엔진룸 내부의 여러 부품이 함께 변형하기 때문에 고속카메라의 분석으로도 프레임의 변형 모드를 제대로 파악하기 어렵다. 정적충격시험은 BIW후반부를 고정시키고 하중을 서서히 가해 변형시키

는 시험방법으로 차체가 변형되는 과정을 쉽게 파악할 수 있다. 또한, 충격에너지가 각 부위에 미치는 영향을 분석할 수 있어 각 부품의 변형모드와 충격 흡수에너지를 비교·평가하는 데에 많이 이용되고 있는 방법이다. 여기서 수행한 정적 충격해석(Static Crush Analysis)은 MGA 연구센터에서 수행하고 있는 정적충격시험을 바탕으로 수행하였다.^(9,10) 해석 시 사용된 경계조건은 B 필라 후반부를 강체로 구속하고, 강체벽의 속도는 실제 충돌 시의 오차를 줄이기 위하여 10m/sec로 하였으며 해석 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

5.2 해석결과

5.2.1 변형양상

충격해석결과로서 강체벽의 반력을 Fig. 3에서와 같이 나타내고 있다. 스틸 차체의 해석결과 초기 범퍼의 압괴(①)후 약 90mm에서 프론트 사이드 멤버의 변형이 시작(②)되었으며, 130mm에서 서브 프레임의 변형(③)이 일어났다. AIV 시작차 모델과 최적설계된 모델의 변형양상은 거의 비슷한 결과를 보였다. 압괴 후 약 42mm에서 범퍼가 압괴(I)되었으며, 148mm에서 프론트 사이드 멤버와 서브 프레임이 거의 동시에 변형이 시작(II)되었다. 스틸 차체의 경우 3차 변형모드를 나타내었으며 AIV모델은 2차 변형모드를 나타내었다. 충격해석 시 A 필라 포스트의 처짐량을 비교한 결과 AIV모델이 스틸 차체에 비해 상당히

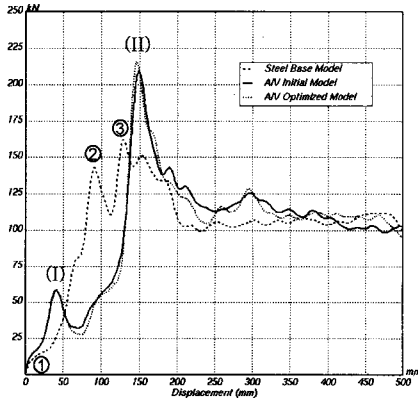


Fig. 3 Comparison of rigid wall force

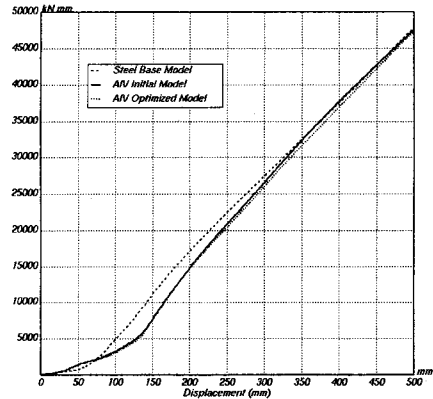
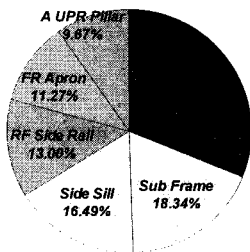
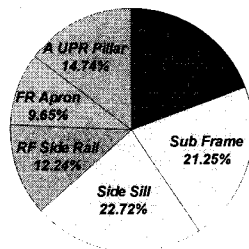


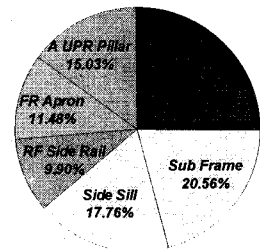
Fig. 4 Comparison of internal energy



(a) Steel Base Model



(b) AIV Initial Model



(c) AIV Optimized Model

Fig. 5 Distribution ratio of absorbed impact energy for the BIW members

적게 나타났다. 또한, AIV 최적설계된 모델의 경우 A 필라 포스트와 프레임이 연결되는 알루미늄 구조재의 보강으로 처짐을 방지할 수 있었다.

5.2.2 강체벽의 반력과 충격흡수에너지

강체벽의 평균반력을 비교해 보면 스틸 차체의 경우 95.6kN, AIV 시작차 모델 95.32 kN, AIV 최적모델 94.77kN으로 거의 동등수준을 나타냈다. Fig. 4는 충격 흡수에너지를 나타낸 것이다. 충격 흡수에너지도 500mm 변형에서 약 47000kNmm로 거의 비슷한 경향을 보였다. 그러나, AIV모델의 강체벽의 최대반력은 스틸 차체보다 약 50kN 높게 나타났으며, 범퍼의 강성은 AIV모델이 더 강한 것으로 나타났다.

5.2.3 충격흡수에너지 분포율

정적충격해석 시 프레임의 충격에너지 전달량과 각 단면에 걸리는 힘을 측정하였다. Fig. 5은 각 단면에 미치는 충격에너지를 비교·분석한 결과를 나타낸 것이다. 스틸 차체의 경우 프론트 사이드 멤버(31.23%), 서브프레임(18.34%), 사이드 실(16.49%)로 대부분 프론트 사이드멤버에서 충격에너지를 흡수하는 경향을 나타냈다. 그러나, AIV 시작차 모델에서는 프론트 사이드 멤버(19.40%), 서브프레임(21.25%), 사이드 실(22.72%)로 프론트 사이드멤버에서의 에너지 흡수가 적어 사이드 실에 충격에너지가 많이 전달되는 경향을 보이고 있다. 이를 보완하기 위하여 AIV 최적설계된 모델에서는 속 업소버 하우징의 연장, 프론트

트 사이드멤버 레인프(reinforcement)의 보강, 언더프레임의 구조를 연속적으로 설계하여 효과적으로 충격에너지를 전달할 수 있도록 수정하였다. 그 결과 충격력을 분산시켜 사이드 실로 전달되는 충격에너지를 줄일 수 있었다.

6. 알루미늄 초경량 차체의 정면충돌해석

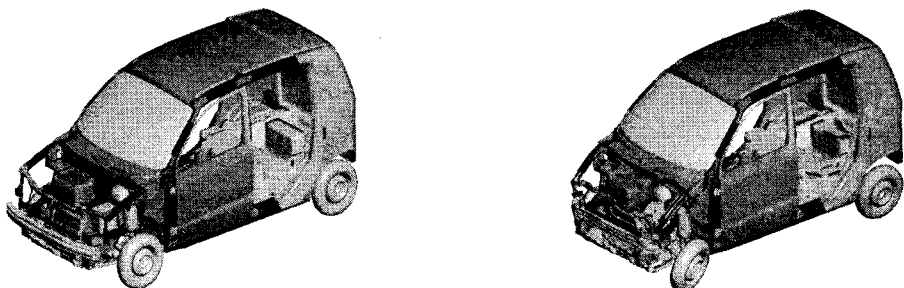
6.1 차체 충돌해석

정면충돌(Frontal Crash)특성을 향상시키기 위한 중요한 설계개념중의 하나는 변형가능한 영역에서의 에너지 흡수를 최대가 되도록 설계하는 것이며 동시에 승객실의 변형과 승객의 감가속을 최소화하는 것이다. AIV에 대한 충돌특성을 분석하기 위하여 지금까지 설계·변경된 모델을 바탕으로 정면 충돌해석을 수행하였다. 충돌해석 시 사용된 조건은 북미 FMVSS 208 Occupant Crash Protection 규정에 근거하여 변형되지 않는 강체벽에 30mph(48km/h)의 속도로 충돌하였다.

6.2 해석결과

6.2.1 변형양상

정면충돌해석 결과 80msec에서의 변형양상을 Fig. 6에 나타내었다. 충돌 초기에 범퍼가 압괴되기 시작하여 12msec부터 프론트 사이드 멤버와 서브 프레임의 변형이 일어나기 시작하였다. 그 후 라디에이터와 엔진의 접촉이 발생하기 시작하였고 엔진이 뒤로 밀리면서 프론트 사이드 멤버



(a) Initial State

(b) Deformed Shape at 80msec

Fig. 6 Deformed shape in frontal crash to FMVSS 208 at 30mph

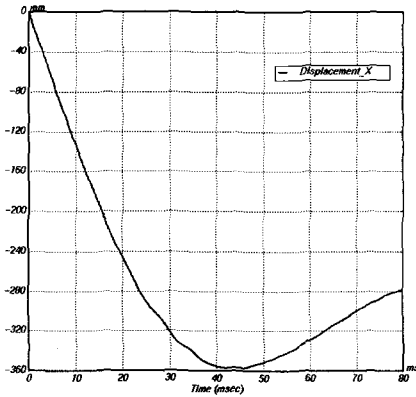


Fig. 7 Displacement curve at B-pillar

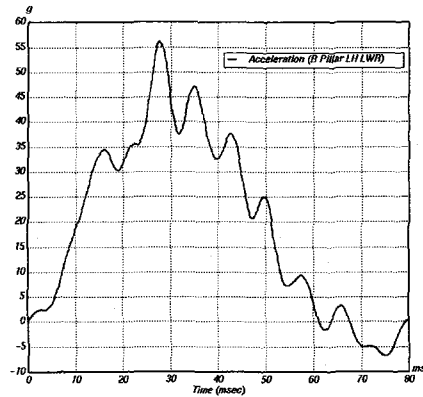


Fig. 8 Acceleration curve at B-pillar

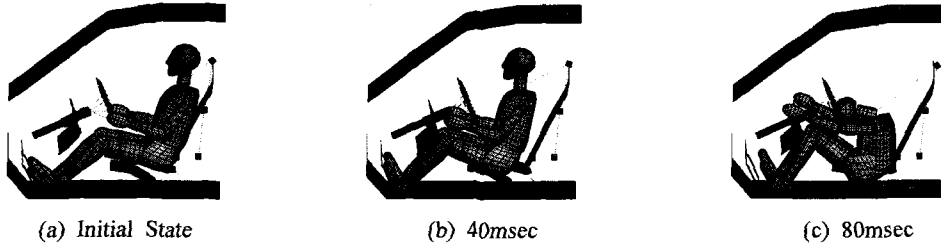


Fig. 9 Occupant behavior analysis in sled test

와 서브 프레임이 계속적으로 변형하였다. 약 24msec에서 프론트 에이프론의 굽힘이 발생하여 A 필라와 루프레일에 하중이 전달되기 시작하였다. 또한, 엔진이 승객실과 연결되는 데쉬 패널 (Dash Panel)과 접촉되면서 데쉬 패널의 미소한 변형만 발생하였을 뿐 승객실 내부의 큰 변형은 발생하지 않았다. 이후 약 45msec에서 차체가 튀어 나오면서 전방 구조물의 변형이 완료되었다.

6.2.2 B 필라의 변위와 감가속도

Fig. 7은 충돌 시 B 필라 하단부의 변위를 나타낸다. 약 45msec까지 변형이 지속되다가 이후에는 더 이상 변형이 발생하지 않고 차체가 튀어나오는 것을 알 수 있다. 또한, 충돌 시 발생한 전방 구조물의 최대변형량은 약 357mm로 나타났다. Fig. 8은 B 필라 하단부의 가속도 파형을 나타내며 차체 충돌 시 가장 중요한 데이터로 승객의 거동에 가장 큰 영향을 미치는 인자이다. 차

체 충돌 시 27msec에서 약 56의 최대가속도가 발생하였다.

6.3 승객거동해석

충돌 시 승객에 미치는 상해 정도를 평가하기 위하여 슬레드를 이용한 승객거동해석(Occupant Behavior Analysis)을 수행하였다. 사용된 승객 모델은 Hybrid III 50% 남성 터미를 사용하였다. 머리 상해치(HIC)와 가슴 감가속도(CA)는 FMVSS 208규정 기준치정도로 나타났으며, 에어백을 장착하여 해석 시 승객에 미치는 상해치를 더 줄일 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 9는 정면충돌 시 승객거동의 양상을 나타내고 있다.

7. 결론

기존 스틸 차체를 기초로 하여 알루미늄 초경량 차체를 개발하였다. 본 연구에서는 현재 개발

된 알루미늄 초경량 차체의 경량화에 대비하여 구조강성에 대한 평가를 수행하였으며, 충돌안전도 인증시험에 대비한 전차량의 정적 및 동적 충돌해석과 승객거동해석을 수행하였다. 수행한 연구결과를 정리하여 보면 다음과 같다.

(1) 기존 스틸 차체를 기초로 하여 AIV를 설계한 결과 약 30% 경량화에 도달할 수 있었다. 또한, 구조강성도 기존 스틸 모노코크 차체보다 높게 나타났다. 현재 AIV에 적용된 외판을 플라스틱 복합소재에서 알루미늄 소재로 변경한다면 40% 경량화에 도달할 수 있을 것으로 판단된다.

(2) AIV에 대한 정적충격해석결과 모노코크 방식의 스틸모델의 경우 3차 변형모드를 나타낸 반면, 프레임 방식의 AIV 모델은 2차 변형모드를 나타냈다.

(3) AIV의 충격강도와 충격흡수에너지를 비교한 결과 스틸차체와 거의 동등수준으로 나타났다.

(4) AIV 언더프레임의 구조설계변경과 알루미늄 주조재의 보강설계에 의하여 충격에너지를 효과적으로 분산시킬 수 있었으며, 승객실과 연결되는 A 필라 포스트의 처짐도 방지할 수 있었다.

(5) 정적 충격해석 결과를 바탕으로 설계 변경된 AIV모델에 대한 충돌특성을 분석하기 위하여 정면충돌해석을 수행하였다. 충돌해석 결과 승객실 내부의 변형은 거의 없었으며, 승객의 상해치도 범규 기준치를 만족하였다.

이상의 연구결과 알루미늄 초경량 차체의 설계시 가장 중요한 설계 방안은 충격에너지를 효과적으로 전달하기 위하여 언더프레임의 연결구조를 엇갈림 없이 연속적으로 설계해야 한다. 또한, 전방 충격흡수부재에 대한 최적설계가 필요하다. 이를 위하여 압출재와 연결되는 주조재의 플렌지 연결이 효과적인 방법이라고 판단된다.

후기

본 연구는 현대자동차에서 주관하는 G7 차세대 자동차 기술개발 사업 중 “알루미늄 초경량 차체의 충격에너지 흡수부재 설계 및 해석” 위탁 과제(1998.11.1 ~ 2000.10.31)의 연구지원금으로

수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) V. Lakshminarayan, H. Wang, W. J. Williams, Y. Harajli, 1995, “Application of CAE Nonlinear Crash Analysis to Aluminum Automotive Crashworthiness Design”, SAE 951080
- (2) Roger W. Logan, Scott A. Perfect, 1995, “Energy Absorption in Aluminum Extrusions for a Spaceframe Chassis”, SAE 951079
- (3) Wulf Leitermann, Jens Christlein, 2000, “The 2nd-generation Audi Space Frame of the A2:A trendsetting all-aluminium car body concept in a compact class car”, Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress, F2000G360
- (4) Kenji Tanabe, Kousaku Hashimoto, Masatoshi Tanaka, 2000, “Development of the All-Aluminum Light Body Structure for the Hybrid Electric Vehicle”, Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress, F2000G371
- (5) 임태원, 조원석, 1999, “경량 차체 개발동향”, 한국자동차공학회 구조강도부문 학술강연논문집, pp. 128-137
- (6) 정태은, 변준형, 1999, “알루미늄 스페이스 프레임 구조의 경량 차체 설계”, 한국자동차공학회 구조강도부문 학술강연논문집, pp. 112-119
- (7) 강혁, 김준수, 1999, “Aluminum Space Frame 적용 초경량 차체 개발”, 제7회 G7차세대 자동차기술 Workshop, 자동차부품연구원, pp. 367-373
- (8) Yoo-Dong Chung, Hyuk Kang, Won-Suk Cho, 2000, “The Development of Lightweight Vehicle using Aluminum Space Frame Body”, Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress, F2000G361
- (9) 김현영, 허승진, 1999, “알루미늄 초경량 차체의 충격에너지 흡수부재 설계 및 해석”, 제7회 G7 차세대 자동차기술 Workshop, 자동차부품연구원, pp. 387-393
- (10) 김현영, 김상범, 김진국, 허승진, 양승국, 1999, “알루미늄 초경량차체 부재의 충격해석 및 설계”, 한국자동차공학회 추계학술대회논문집, Vol. II, pp. 357-362