

## 알루미늄 초경량 차체의 충격 흡수부재 설계 및 충돌 안전도 평가

### Design of the Impact Energy Absorbing Members and Evaluation of the Crashworthiness for Aluminum Intensive Vehicle

김 현 영\*, 김 진 국\*\*, 허 승 진\*\*\*, 강 혁\*\*\*\*  
Heon Young Kim, Jin Kook Kim, Seung Jin Heo, Hyuk Kang

#### ABSTRACT

Due to the environmental problems of fuel consumption and vehicle emission, etc., automotive makers are trying to reduce the weight of vehicles. The most effective way to reduce a vehicle weight is to use lighter materials, such as aluminum and plastics. Aluminum Intensive Vehicle(AIV) has many advantages in the aspects of weight reduction, body stiffness and model change. So, most of automotive manufacturers are attempting to develop AIV using Aluminum Space Frame(ASF). The weight of AIV can be generally reduced to about 30% than that of conventional steel vehicle without the loss of impact energy absorbing capability. And the body stiffness of AIV is higher than that of conventional steel monocoque body. In this study, Aluminum Intensive Vehicle is developed and analyzed on the basis of steel monocoque body. The energy absorbing characteristics of aluminum extrusion components are investigated from the test and simulation results. The crush and crash characteristics of AIV based on the FMVSS 208 regulations are evaluated in comparison with steel monocoque. Using these results, the design concepts of the effective energy absorbing members and the design guide line to improve crashworthiness for AIV are suggested.

주요기술용어 : Aluminum intensive vehicle(AIV, 알루미늄 초경량 차체), Aluminum space frame(ASF, 알루미늄 공간 프레임), Weight reduction(경량화), Body stiffness(차체강성), Impact energy(충격에너지), Collapse mode(좌굴모우드), Initiator(좌굴새김), Crashworthiness(충돌 안전도)

#### 1. 서 론

자동차 기술개발의 설계 목표인 고안전, 승차감, 편리성 및 고성능의 차량 개발은 환경보호적

측면에서의 자원보호, 리사이클링 관련법규, 배기가스 규제 등과 상반되며, 급격한 차량 무게의 증가를 요구하고 있다. 상반되는 자동차 기술 개발 목표를 달성하기 위하여는 우선적으로 전체 차량 중량의 20~30%를 차지하는 차체 중량을 최소화시켜야 한다. 차체 중량의 경량화를 위해서는 대체 경량 재료의 도입, 새로운 가공 및 조립 기술의 개발, 차체 구조의 최적화 설계 기술

\* 회원, 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부  
\*\* 회원, 강원대학교 대학원 기계공학과  
\*\*\* 회원, 국민대학교 기계·자동차공학부  
\*\*\*\* 회원, 현대자동차 금속재료연구팀

도입 등이 고려될 수 있는데, 특히 알루미늄 초경량 차체(Aluminum Intensive Vehicle : AIV)의 개발이 대체 경량 재료 도입의 대표적인 예이다.<sup>1)</sup> 일반적으로 알루미늄 재료를 이용한 차체 제작은 기존 철재 차체에 비하여 동일한 차체강성(body stiffness)조건을 만족시킬 때 대략적으로 30% 이상의 경량화(weight reduction) 목표에 도달할 수 있는 것으로 알려져 있다.<sup>2)</sup> 또한, 동일한 차체강성 유지를 위하여 단면 두께를 기존 철재 차체에 비하여 약 40% 이상 증가함으로써 차체 강도 및 내구수명 측면에서 매우 우수할 뿐 아니라 경량화에 따른 차체굽힘 및 회전 고유진동수의 증가는 엔진 공간 영역에서의 차체 진동소음 성능의 향상을 기대할 수 있다. 차량 경량화 및 단면 두께의 증가는 충돌에너지 흡수능력을 기존 철재 차체에 비하여 극대화시킬 수 있는 장점이 있다.<sup>3,4)</sup> 알루미늄 초경량 차체의 제작 기술과 관련되는 용접 및 접합기술, 3차원 굽힘기술, 하이드로포밍(hydroforming) 기술 등이 개발되는 경우, 알루미늄 초경량 차체는 앞서 기술한 바와 같은 차량 성능의 극대화와 환경보호 법규의 만족이라는 상반되는 차량 엔지니어링 기술 요구사항을 동시에 해결할 수 있는 첨단 자동차 기술 분야의 핵심기술 과제로 고려될 수 있다.

알루미늄 재료의 활용 기술로서, 1970년대에 이미 몇몇 자동차 업체에서는 엔진커버, 트렁크커버, 타이어 휠, 도어 등에 대한 알루미늄 재료의 적용을 시작하였다. 이 당시 주요 설계 목표는 일부 국가에서 실시된 연비 규제의 통과였으나, 부가적인 기대효과가 미흡하였고 생산비용의 증대로 인하여 관련기술이 널리 보급되지는 못하였다. 1980년대에 들어서는 기존의 강철 판재를 이용한 일체형 차체구조의 제작 방식을 그대로 활용하여 단순히 알루미늄 재료로 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 시초였으

며, 일본 Honda사의 경우 1990년부터 Acura NSX 차종에 이러한 알루미늄 차체 제작 기술을 적용하였다. 1990년 중반부터 고전적인 차체 프레임 제작 방식과 유사하게 이른바 알루미늄 공간 프레임(Aluminum Space Frame : ASF) 제작 방식이 도입되기 시작하였다. 초기에는 전기자동차를 위한 경량차체에 주로 활용되었으나, 최근에 들어서는 대표적인 초경량 차체의 제작 기술로서 선진 자동차 업체에서 크게 주목받기 시작하였다.<sup>5,6)</sup> 가장 대표적인 사례로서 독일 Audi사의 A8 차종에서의 활용을 들 수 있다.<sup>7,8)</sup> 알루미늄 공간 프레임 제작 방식에 있어서는 알루미늄 압출재의 3차원 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. 국내의 경우, 현대 자동차에서 일체형 차체 제작방식을 통한 알루미늄 차체를 실용화시킨 바 있으며,<sup>9)</sup> 하이드로포밍 기술을 이용한 초경량 차체 개발<sup>10)</sup>과 알루미늄 공간 프레임을 이용한 알루미늄 초경량 차체 개발을 진행하고 있다.<sup>11,12)</sup> 또한, 대우 자동차는 전기 자동차용의 알루미늄 공간 프레임 제작을 위한 기술 개발이 진행되고 있다.<sup>13-15)</sup> Table 1은 국내외의 기술동향을 정리하여 나타낸 것이다.

본 연구에서는 기존 스틸 모노코크 차체(monocoque body)와 비교하여 동등 이상의 구조강성을 유지하고, 충돌특성, 진동소음특성(NVH : Noise, Vibration, Harshness), 내구기준을 만족하면서 30% 이상의 경량화에 도달할 수 있도록 알루미늄 초경량 차체에 대한 특성을 연구하여 향후 경량 차체 개발의 설계자료를 제시하고자 한다. 알루미늄 압출재에 대하여 굽힘 및 압축시험을 수행한 후 상용 비선형 유한요소해석 프로그램인 PAM-CRASH를 이용한 해석결과와 시험결과를 바탕으로 충격 흡수부재(impact absorbing members)를 설계하였다. 특히, 차량의 초기 충돌 시 효과적으로 충격에너지를 유도하기 위하여 접힘 좌굴변형이 발생하는 좌굴새김(initiator)의 설치효과에

Table 1 Technical trends of aluminum intensive vehicle

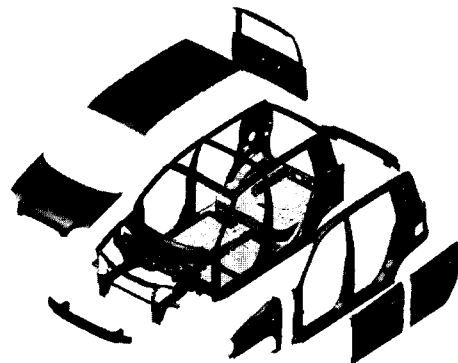
Country	Company	Car class	Mass production	Remarks
Germany	Audi	A8	'94	1st ASF
		A2	'00	Compact car
	OPEL	MAXX	'00	1000cc, 650kg
	BMW	E1	-	-
		Z8	-	ASF
		Just4/2	-	-
France	Renault	Spider	-	2000cc, 790kg
England	Lotus	Elise	Product	1800cc, 673kg
Italy	Fiat	Zic	-	Hybrid
Norway	Pivco	Coty Bee	-	Hybrid
USA	GM	EV1	Product	Hybrid
	Chrysler	Prowler	Product	ASF
Japan	Honda	Insight	'99	ASF
	Acura	NSX	'97	ASF, Sheets
Korea	Hyundai	Tiburon	'97	Monocoque
	Kia	Avante	Proto	ASF
		Sephi	Proto	Monocoque
	Daewoo	DEV	-	Hybrid, ASF

대하여 살펴보았다. 기존 스틸 모노코크 차체를 기준으로 알루미늄 초경량 차체를 제작하였고, 차체 경량화에 대비하여 구조강성에 대한 평가를 수행하였다. 또한, 충돌안전도(crashworthiness) 인증시험에 대비한 전차량의 정적 충격해석 및 동적 충돌해석과 승객안전도 해석을 수행하여 충돌안전도 측면의 설계 개선방향을 제시하였다.

## 2. 알루미늄 초경량 차체의 구조

알루미늄 초경량 차체의 BIW(Body In White)는 기존 스틸 모노코크 차체를 기초로 하여 제작하였다. 설계상의 문제와 비용의 문제로 기존 차량의 엔진, 트랜스미션, 사시부품 및 기타 의장부품을 최대한 활용하기 위하여 기존의 레이아웃(layout)에 간섭되지 않는 구조로 압출재(extrusions)를 설계하였고, 구조해석을 통해 압출부재의 단

면 형상을 결정하였다. 부위별로 총 25종의 압출재를 사용하였으며, 재료는 A6061-T6를 사용하였다. 압출재 간의 접합부는 접합을 용이하게 하고 강성을 확보하기 위하여 알루미늄 주조재(cast node)로 연결되어 있다. 또한, B 필라(pillar)와 속업소버 하우징(shock absorber housing)에도 일체형 주조재로 설계하여 제작하였고, 주조품의 재료는 AC4CH를 사용하였다. 루프패널(roof panel)과 쿼터패널(quarter panel) 등의 외판은 플라스틱 SMC소재를 사용하였으며, 플로어(floor) 등과 같은 알루미늄 판재는 A5032-T4를 사용하였다. 알루미늄 초경량 차체의 조립에 사용된 접합의 종류는 크게 3종류로 알루미늄 압출재간, 알루미늄 압출재와 알루미늄 주조재 간의 접합은



Legend:  
 ■ Castings  
 ■ Extrusions  
 ■ Plastic panel  
 ■ Aluminum

(a) Components of aluminum space frame



(b) Aluminum space frame

Fig. 1 ASF structure of the aluminum intensive vehicle

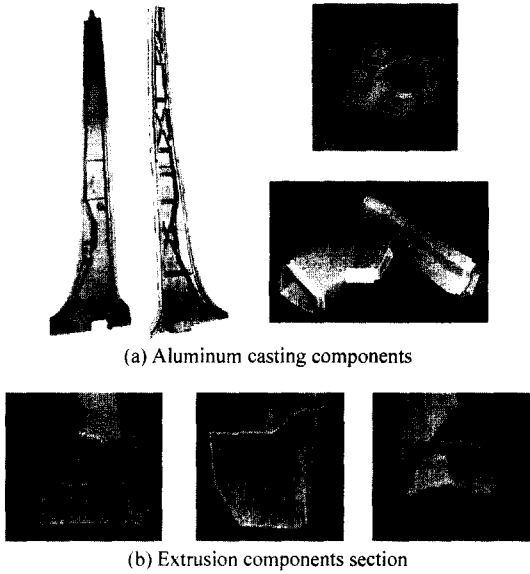


Fig. 2 Casting and extrusion components of aluminum intensive vehicle

TIG용접을 적용하였으며, 알루미늄 압출재, 알루미늄 판재와 플라스틱 외관의 접합은 액상분드와 리벳을 이용한 리벳본딩(rivet-bonding), 알루미늄 판재와 판재간의 접합은 리벳 또는 점용접을 사용하였다. 기존에 사용하던 스틸 재료를 알루미늄 합금과 플라스틱 소재로 대체함으로써 기존 스틸 차체보다 약 30% 이상 경량화에도 달성할 수 있었다.<sup>11,12,16)</sup> Fig. 1은 알루미늄 초경량 차체의 알루미늄 공간 프레임 구조를 나타내며, Fig. 2는 알루미늄 초경량 차체에 적용된 주조재와 압출재를 나타낸다.

### 3. 알루미늄 사각부재의 압괴특성

알루미늄 초경량 차체 개발시 먼저 고려되어야 할 사항은 알루미늄 공간 프레임의 압출재 단면에 대한 단품 강도와 특성 평가가 이루어져야 한다. 단면이 일반적인 박스 형태를 갖는 경우에 스틸 부재와 알루미늄 압출재가 동등 강성을 갖기 위하여 여러가지 단면 형상들에 대한 특성도 검토되어야 한다. 또한, 보강재를 사용하는 경우에는 어떤 형태의 보강재가 가장 효과적인지에

관한 연구도 필요하다.<sup>17,18)</sup> 본 연구에서는 스틸에서 알루미늄 합금으로 소재 대체시 단면형상과 두께를 파악하고자 하며, 알루미늄 압출재에 대한 시험 및 해석을 통하여 얻어진 결과를 바탕으로 경량 차체의 충격에너지 흡수부재를 설계하고자 한다.

### 3.1 축방향 정적 압괴특성 및 좌굴새김 설계

스틸에서 알루미늄 합금으로 소재 대체시 동등한 굽힘강성(EI)을 가질 때 단면크기와 두께를 결정하여 충격에너지 흡수 능력을 비교하였다. 동일한 단면을 갖는 스틸 및 알루미늄 사각부재(47.5×47.5×1.0)에 대한 굽힘강성을 비교하였으며, 스틸 사각부재와 동등한 강성을 갖는 알루미늄 사각부재(60×60×1.5)에 대한 축방향 압괴 해석을 수행하였다. 경량화 효과와 단위 무게당 에너지 흡수능력을 비교한 결과 Table 2와 같이 동등 강성을 유지할 때 기존 스틸 재료에 비하여

Table 2 Comparison of weight reduction and energy absorption per unit weight

Box Beam	Steel (47.5×47.5×1.0)	Aluminum (47.5×47.5×1.0)	Aluminum (60×60×1.5)
Bending Stiffness(Nm <sup>2</sup> )	14082.76	4694.25	14023.33
Weight Reduction(%)	-	65.90	34.90
Energy Absorption(%)	100.00	202.60	260.10

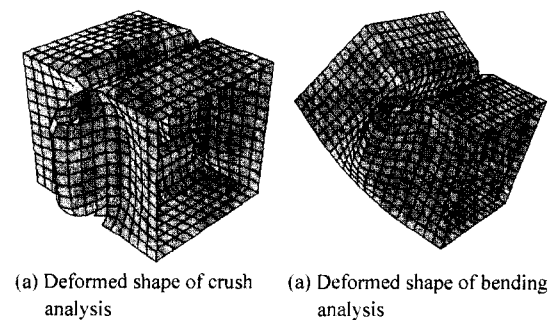


Fig. 3 Deformed shapes of crush and bending analysis

약 35% 정도의 경량화와 단위 무게당 160% 이상의 에너지 흡수율을 나타냈다. Fig. 3(a)는 알루미늄 사각부재의 정적 압괴해석 시 변형양상을 나타낸다.

동일한 굽힘강성 조건하에서 단면형상 변화에 따른 단위 무게당 충격 에너지 흡수 능력을 축방향 정적 압괴해석을 이용하여 비교·분석하였다. Fig. 4는 단면 형상에 따른 단위 무게당 에너지 흡수 능력을 나타낸 것이다. 사각단면 형상의 부재를 기준으로 사다리꼴 등의 형태로 왜곡되는 경우 단위 무게당 에너지 흡수 능력이 저하되는 반면 플랜지나 보강판이 설치되는 경우에는 단위 무게당 에너지 흡수 능력이 향상됨을 알 수 있다. 특히 원형단면 형상의 에너지 흡수 부재는 약 40% 이상의 에너지 흡수 능력을 나타냈다. 기존 스틸 부재와 등가의 에너지 흡수성과 강성을 확보하기 위한 알루미늄 재질의 압출재 두께는 약 20~50%의 두께 증가가 필요하며, 알루미늄으로의 소재 대체시 기존 스틸 차체보다 약 30~50% 정도의 경량화가 가능하다. 알루미늄 압출재의 충격에너지 흡수특성을 실험적으로 확인하기 위하여 7가지의 서로 다른 단면과 두께를 가진 압출부재에 대하여 축방향 압괴시험을 수행하였다. 압괴시험의 결과로부터 알루미늄 압출부재의 좌굴모우드(collapse mode)는 Fig. 5와 같이 규칙적인 접힘좌굴모우드(folding collapse

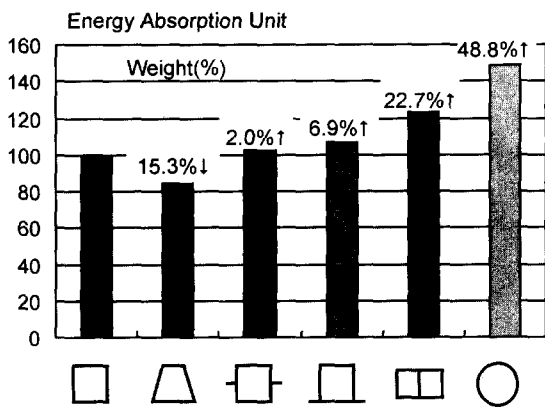
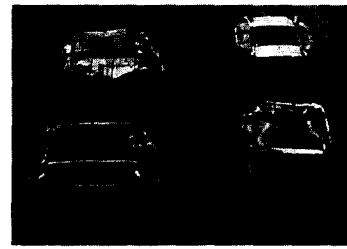


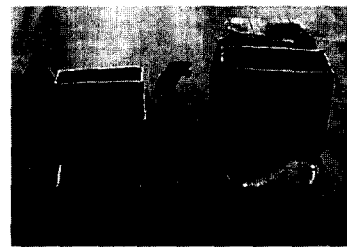
Fig. 4 Comparison of energy absorption unit weight according to section shapes



(a) Type I : folding collapse mode



(b) Type II : folding and fracture mixed collapse mode



(c) Type III : fracture collapse mode

Fig. 5 Typical axial collapse modes of rectangular aluminum extrusion components

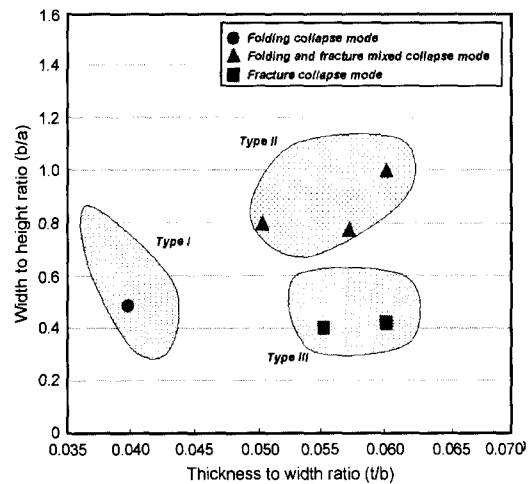


Fig. 6 Relationship of collapse modes with respect to the aspect ratios

mode), 접힘과 균열의 혼합좌굴모우드(folding and fracture mixed collapse mode), 그리고 균열좌굴모우드(fracture collapse mode)의 3가지 유형으로 나타났다. 알루미늄 압출재에 대한 시험결과로부터 확인된 3가지 유형의 압괴 좌굴모우드를 해당 단면의 후폭비( $t/b$ ) 및 형상비( $b/a$ )에 대한 관계를 나타내 보면 Fig. 6과 같다. 압출부재의 후폭비가 약 0.05보다 큰 경우 압괴시 균열 발생이 나타날 수 있다. 그러나, 후폭비가 크더라도 형상비가 약 0.8 이상인 경우에는 동시에 접힘좌굴의 발생도 일어날 수 있다. 따라서, 알루미늄 압출부재를 이

용한 차체 설계시 충돌에너지 흡수능력이 가장 우수한 접힘좌굴모우드를 유도하기 위하여는 압출재의 후폭비 및 형상비가 중요한 설계변수가 된다.

차량의 충돌 발생시 축방향 압괴모우드는 효율적인 에너지 흡수가 가능하나, 굽힘붕괴모우드는 외부로부터의 충격에너지를 충분히 흡수하지 못하고 대변형의 굽힘 형태로 전환된다. 이에 대한 구체적인 대책으로써 일반적으로 축방향 접힘유도를 위한 좌굴새김(initiator)을 고려할 수 있다. 본 연구에서는 3가지 붕괴 모우드에 대하여 실험형태의 좌굴새김 위치 및 크기를 반과장길이 계산식을 바탕으로 결정하여 설치한 후, 축방향 압괴시험을 수행하였다. 균열좌굴 모드가 발생하는 단면의 경우에는 좌굴새김의 설치로 인하여 부분적인 접힘 좌굴 모우드를 유도함으로써, Fig. 7에서와 같이 충돌에너지 흡수능력이 크게 향상될 수 있음을 알 수 있다.

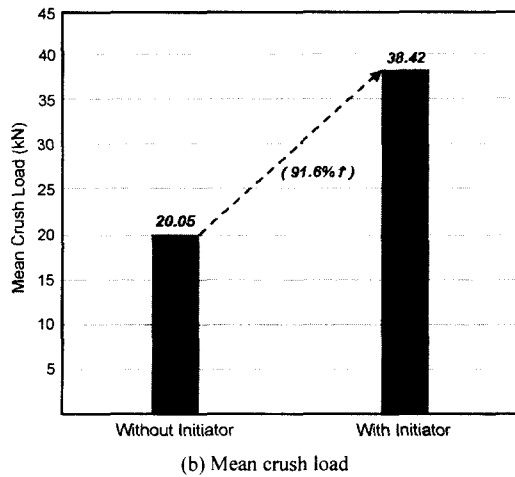
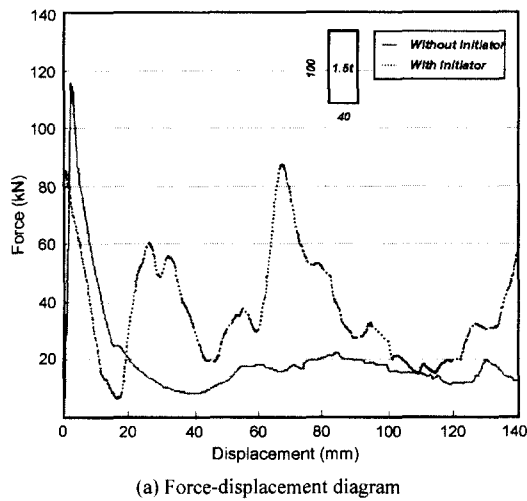


Fig. 7 Effect of initiator on the axial collapse of front side member frame

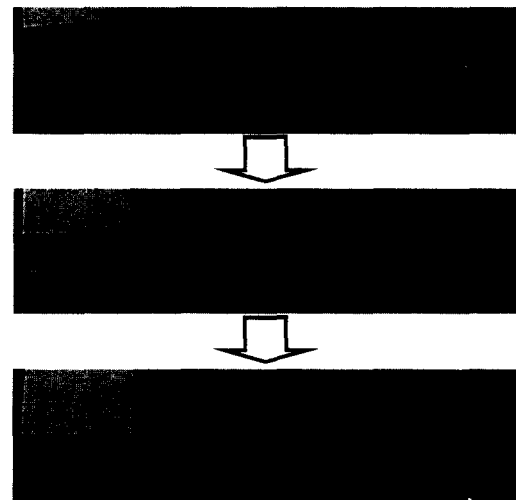
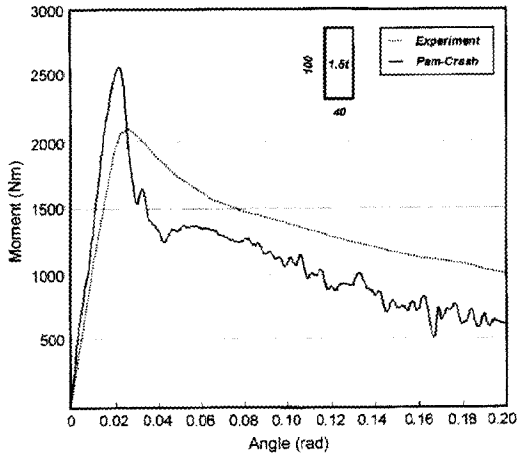


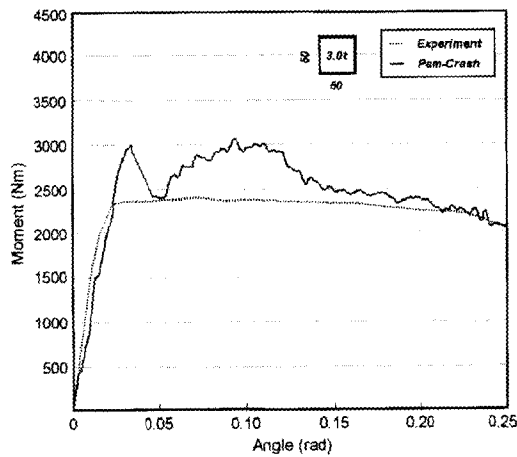
Fig. 8 Bending collapse test

### 3.2 굽힘 붕괴특성

Fig. 8과 같이 알루미늄 사각 압출재에 대한 굽힘 붕괴시험(bending collapse test)을 수행하여 상용 유한요소해석 프로그램인 PAM-CRASH를 이용한 해석결과와 비교하였다. Fig. 9는 대표부재



(a) Folding collapse mode



(b) Fracture collapse mode

Fig. 9 Moment-rotation curves of bending collapse test

의 시험 및 해석 결과로서 굽힘모멘트-굽힘각 선도를 접힘좌굴모우드 발생과 균열좌굴모우드 발생의 경우에 대하여 각각 나타내고 있다. 두 경우의 사각부재에서 시험 및 해석결과 사이의 초기 최대 굽힘 모멘트값이 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며, Fig. 9(a)와는 달리 Fig. 9(b)와 같이 단면 크기에 비하여 두께가 상대적으로 큰 경우 굽힘붕괴 시 모서리 부분에서의 접촉(contact)과 부재 자체의 두께에 의한 접촉에 의하여 모멘트 값의 급격한 떨어짐이 없이 완만하게 진행됨을 알 수 있다. Fig. 3(b)는 굽힘 붕괴해석시 변형양상을 나타낸다.

#### 4. 알루미늄 초경량 차체의 정적 충격성능 평가

##### 4.1 차체 정적 충격해석

완성차의 충돌시험은 충돌시간이 매우 짧고 엔진룸 내부의 여러 부품이 함께 변형하기 때문에 고속카메라의 분석으로도 프레임의 변형모드를 제대로 파악하기 어렵다. 차체의 정적 충격 시험은 BIW 후반부를 고정시키고 하중을 서서히 가해 변형시키는 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. 기존의 스틸 모노코크 차체와 AIV 시작차 및 해석 결과를 바탕으로 차체 구조를 변경한 AIV 개선 모델에 대하여 각각 정적 충격해석을 수행하였다. 여기서 수행한 차체의 정적 충격해석(static crush analysis)은 MGA 연구센터에서 수행하고 있는 정적 충격시험을 바탕으로 PAM-CRASH를 사용하여 해석하였다. 해석시 사용된 경계조건은 Fig. 10과 같이 B 필라 후반부를 강체로 구속하고, 강체벽의 속도는 실제 충돌 시의 오차를 줄이기 위하여 10m/sec로 500mm까지 압괴하여 에너지 흡수경로와 변형양상을 분석하였다. 각 부재들에 미치는 충격에너지 분포율을 분석하여 향후 최적설계를 위한 차체 구조변경 시 기초 자료로 제시하고자 한다.<sup>19,20)</sup>

충격 해석결과 프론트 사이드 멤버(front side mem-

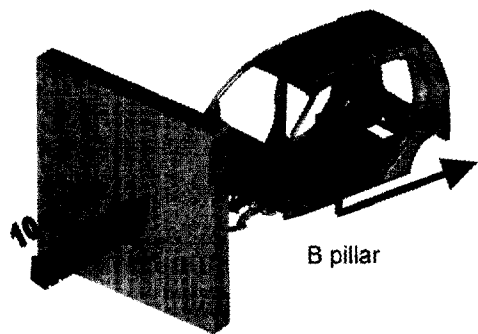


Fig. 10 Boundary condition of frontal static crush analysis

ber)와 서브 프레임(sub frame)의 변형양상을 Fig. 11에 나타내었다. 스틸 모노코크 차체의 해석결과 초기 범퍼의 압괴(①)후 약 90mm에서 프론트 사이드 멤버의 변형이 시작(②)되었고, 130mm에서 서브 프레임의 변형(③)이 일어났다. AIV 시작차 모델과 AIV 개선 모델의 전체적인 변형양상은 거의 비슷한 결과를 나타냈다. 약 42mm에서 범퍼가 압괴(I)되었으며, 148mm에서 프론트 사이드 멤버와 서브 프레임이 거의 동시에 변형이 발생하기 시작(II)하였다. 초기 압괴되는 양상을 살펴보면 프론트 사이드 멤버의 변형시 스틸 차체의 경우 앞부분에서 좌굴이 일어난 후 중간부분에서 굽힘이 발생하였지만, AIV 시작차 모델의 경우 약간의 좌굴이 일어난 후 속 업소버 하우징과 연결되는 부위에서 급격한 굽힘 변형이 발생하였다. 이처럼 앞부분에서 좌굴 변형이 적게 일어난 것은 프론트 사이드 멤버와 서브 프레임이 연결되는 구조재의 영향 때문에 앞부분에서의 좌굴 변형을 유도하기 어려운 것으로 판단된다. 이를 보완하기 위해 AIV 개선모델에서는 프론트 사이드 멤버와 연결되는 조인트 부위

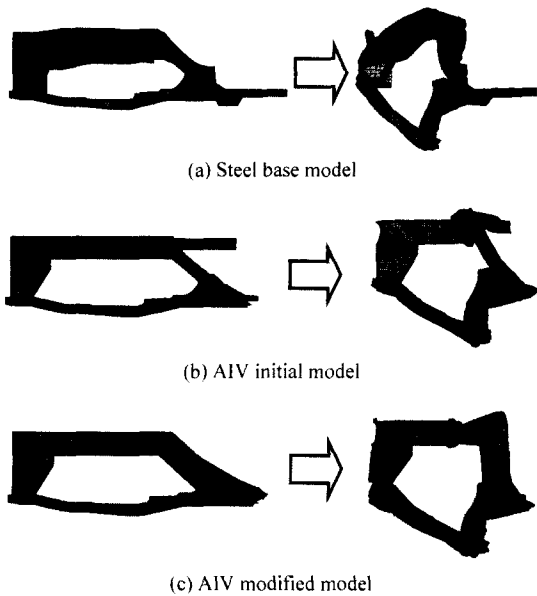


Fig. 11 Comparison of deformed shapes at 500mm deformation of front side member and sub frame

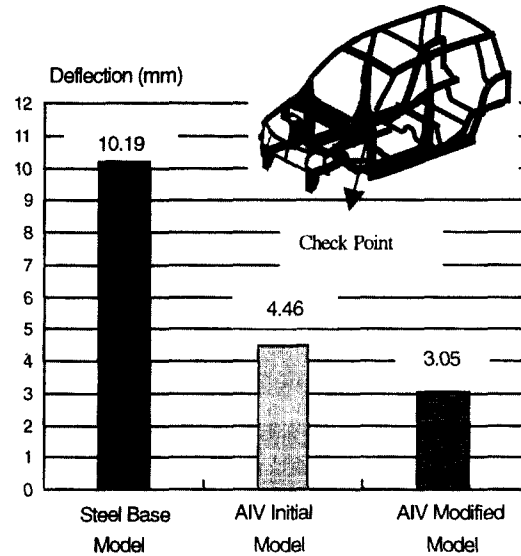


Fig. 12 Comparison of deflection for Appliar post

에 속 업소버 하우징의 플랜지를 연장하였으며, Fig. 11(c)와 같이 좌굴과 굽힘이 동시에 일어나는 양상을 보였다.

Fig. 12는 정적 충격해석시 A 필라 포스트 처짐량을 비교한 것이다. AIV 시작차 모델과 AIV 개선 모델이 스틸 차체에 비해 상당히 적게 나타났다. 또한, AIV 개선 모델의 경우 A 필라 포스트와 프레임이 연결되는 알루미늄 구조재의 보강으로 처짐을 방지할 수 있었다.

### 4.3 충격 에너지 흡수

Fig. 13은 충격 해석 시 강체벽의 반력을 나타낸다. 강체벽의 평균반력을 비교해 보면 스틸 모노코크 차체의 경우 95.60kN, AIV 시작차 모델 95.32kN, AIV 개선 모델 94.77kN으로 거의 동등수준을 나타냈다. Fig. 14는 충격 흡수에너지를 나타낸 것이다. 충격 흡수에너지도 500mm 변형에서 약 47,000kNmm로 거의 비슷한 경향을 보였다. 그러나, AIV모델의 강체벽의 최대반력은 스틸 차체보다 약 50kN 높게 나타났으며, 범퍼의 강성은 AIV 모델이 더 강한 것으로 나타났다.

차체 충격해석 시 프레임의 충격에너지 전달량과 각 단면에 걸리는 힘을 측정하였다. Fig. 15



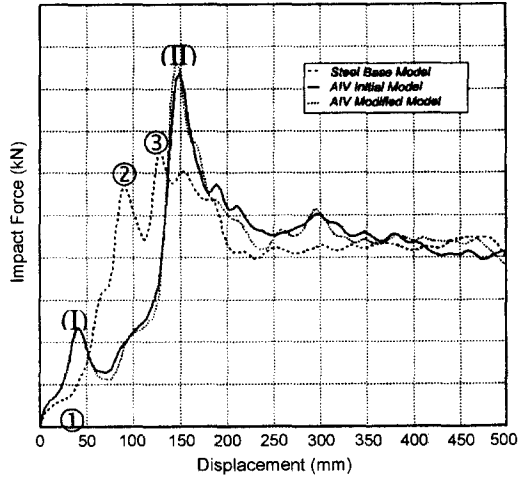


Fig. 13 Comparison of impact force in frontal static crush

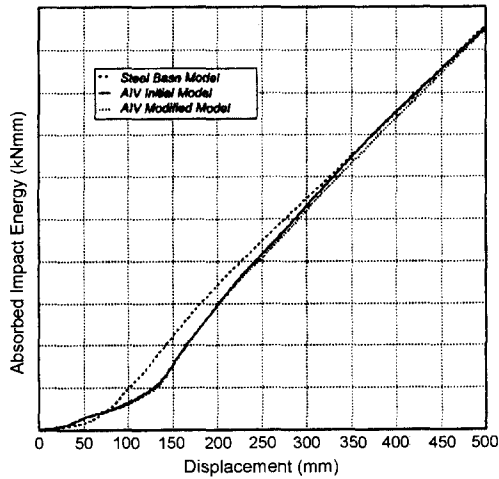
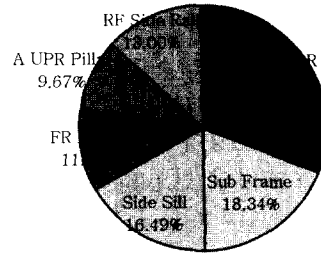
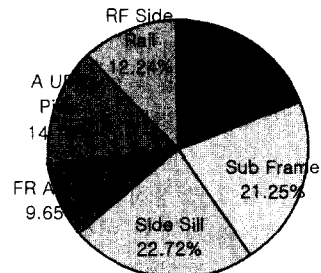


Fig. 14 Comparison of absorbed impact energy in frontal static crush

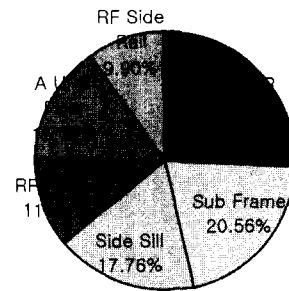
는 각 단면에 미치는 충격에너지를 비교·분석한 결과이다. 스틸 모노코크 차체의 경우 프론트 사이드 멤버(31.23%), 서브 프레임(18.34%), 사이드 실(16.49%)로 대부분 프론트 사이드 멤버에서 충격에너지를 흡수하는 경향을 나타냈다. 그러나, AIV 시작차 모델에서는 프론트 사이드 멤버(19.40%), 서브 프레임(21.25%), 사이드 실(22.72%)로 프론트 사이드 멤버에서의 에너지 흡수가 적어 사이드 실(side sill)에 충격에너지가 많이 전달되는 경향을 보이고 있다. 이를 보완하



(a) Steel base model



(b) AIV initial model



(c) AIV modified

Fig. 15 Absorbed impact energy distribution

기 위하여 Fig. 16과 같이 승객실 하단부의 센터 플로어 사이드 멤버(center floor side member)와 연결되는 부재들의 연결 구조를 일치시켜 사이드 실로 전달되는 충격력을 완화시키면서 효과적으로 충격에너지를 전달할 수 있도록 수정하였다. 따라서, AIV 시작차 모델과 개선 모델의 가장 큰 차이점은 Fig. 17과 같이 언더 프레임(under frame)의 구조를 엇갈림 없이 연속적으로 설계한 데 있다. 다음으로 프론트 사이드 멤버의 급격한 굽힘변형으로 속 업소버 하우징과 연결되는 조인트 부위의 플랜지를 연장하여 좌굴변형을 발생시킴으로써 보다 효과적인 에너지 흡수를 유도하였다. 또한, 필라부와 연결되는 조인트부를

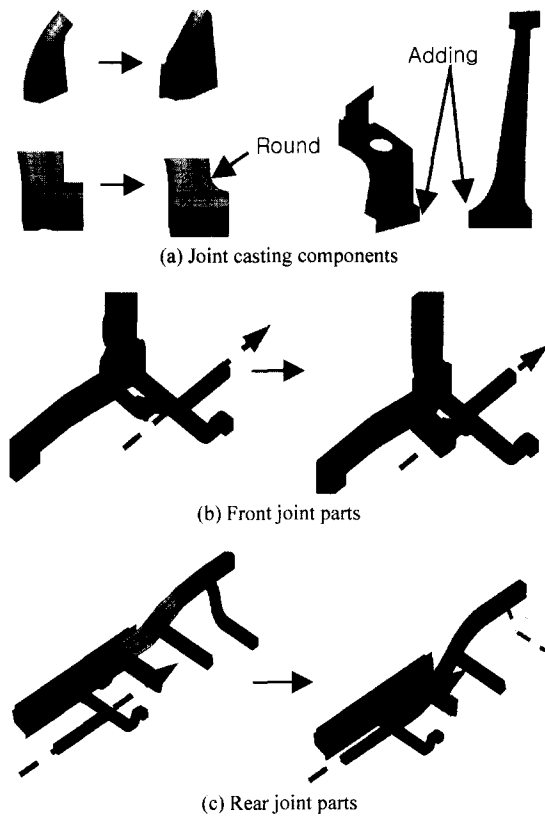


Fig. 16 Design changes of AIV modified model

보강하여 구조적으로 강성을 향상시켰다. 그 밖에 변경된 부위는 경량화에 역점을 두어 과대 설계(over design)된 압출재의 단면형상을 변경하였고, 주조재의 두께를 줄여 차체 중량을 감소시켰다. 그 결과 AIV 개선 모델에서는 프론트 사이드 멤버(25.27%), 서브 프레임(20.56%), 사이드 실(17.76%)로 프론트 사이드 멤버의 에너지 흡수를 높이고 충격력을 분산시켜 사이드 실로 전달되는 충격에너지를 줄일 수 있었다. 따라서, 차량 충돌 시 발생하는 승객의 상해 정도를 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.<sup>21-23)</sup>

### 5. 알루미늄 초경량 차체의 구조강성 평가

차체의 강성은 골격구조 결정의 기본이 되는 것으로 강성을 만족시키면 진동, 강도, 승차감, 조정 안정성 등의 성능도 어느 정도 만족하게 된

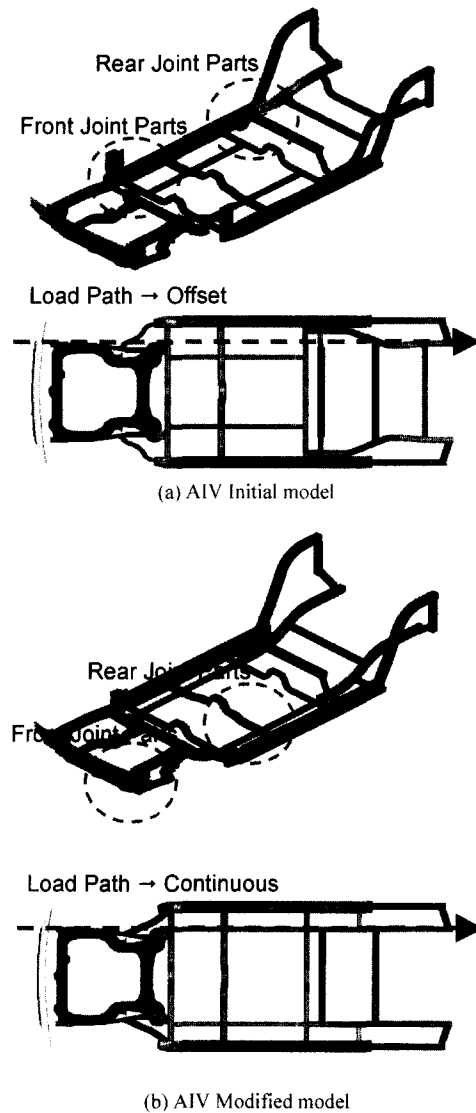


Fig. 17 Comparison of under frame structure

다. 따라서 설계시 강성이 골조 부재의 단면특성 결정의 첫 번째 조건이다. 차체의 강성이란 일반적으로 차체를 휘거나 비틀었을 때 변형을 평가하는 것으로, 차체와 서스펜션(suspension)의 결합부 4곳을 고정하고 차의 중심 부근에 하중을 가하여 객실 부분의 처짐을 평가하는 굽힘 강성(bending stiffness) 평가와 뒤쪽 차체와 서스펜션의 결합부를 고정하고 앞쪽의 차체와 서스펜션의 결합부에는 서로 반대방향의 하중을 가하여

차체의 비틀림 변형을 평가하는 비틀림 강성(torsion stiffness) 평가가 있다. 강성이 약할 경우, 차체에 균열이 발생하거나 소음과 진동이 발생하며, 조정 안정 성능에도 크게 영향을 미친다. 본 연구에서는 차체의 구조설계 시 첫번 째로 고려되어야 할 차체의 구조강성을 비교·평가하고 유한요소해석(finite element analysis)을 통하여 차체 구조를 최적화하였다. 기존 스틸 모노코크 차체를 기초로 하여 알루미늄 초경량 차체를 설계한 결과 25% 정도의 경량화에 도달할 수 있었다. 또한, 구조강성도 Fig. 18의 정강성 시험을 통해 비교한 결과 기존 스틸 모노코크 차체보다 높게 나타났다. AIV 시작차 모델의 경량화에 역점을 두어 ASF구조를 최적화하기 위하여 유한

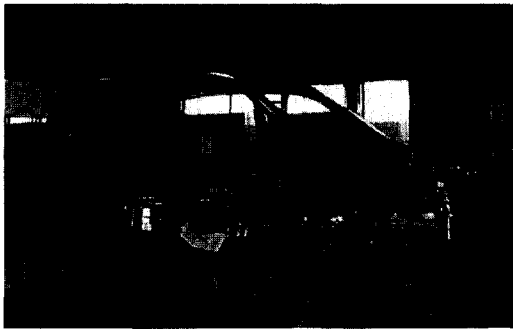


Fig. 18 Static body stiffness test

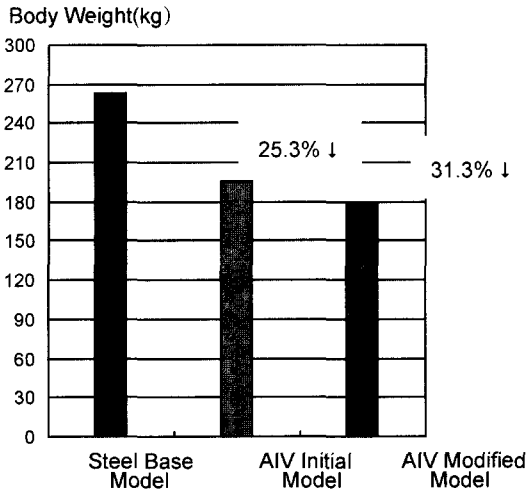


Fig. 19 Comparison of body weight

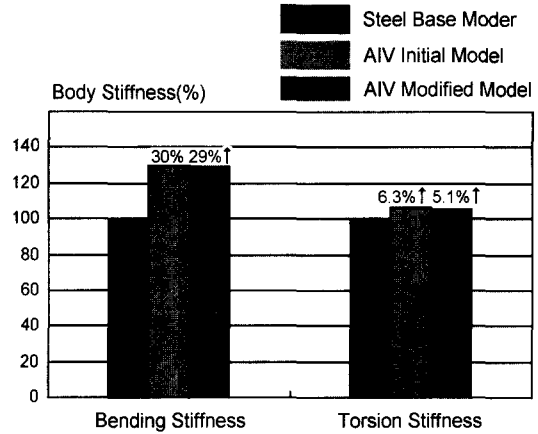


Fig. 20 Comparison of body stiffness

요소해석을 수행하였으며, 스틸 모노코크 차체 대비 30% 이상의 경량화 목표에 도달할 수 있었고 굽힘강성 29%, 비틀림 강성 5.1% 정도 향상시킬 수 있었다. Fig. 19와 Fig. 20은 스틸 모노코크 차체와 AIV 시작차, AIV 개선모델에 대해 차체 중량과 차체강성을 비교한 것이다.<sup>16)</sup>

## 6. 알루미늄 초경량 차체의 충돌 안전도 평가

### 6.1 정면 충돌 관련 법규 및 평가 내용

자동차의 정면충돌(frontal crash)시 엔진이 장착되어 있는 전방 구조물이 대부분 충돌에너지를 흡수하여 승객을 보호하게 된다. 8km/h 이하 경충돌의 경우 범퍼에서 모든 에너지를 흡수하여 차체의 손상이 없도록 하고 있다. 또한, 15km/h 정도의 속도에서는 범퍼와 후드, 측면 부재가 붕괴하면서 충돌에너지를 흡수하도록 하고 있어 차량의 주요 부품에 손상이 없도록 하는데 목적을 두고 있다.

일반적으로 널리 알려진 미국 연방도로교통안전국(National Highway Traffic Safety Administration : NHTSA)의 정면 충돌 법규인 FMVSS(Federal Motor Vehicle Safety Standard) 208 규정에 의한 고속 충돌의 경우에는 30mph(48km/h)의 속도로 충돌 시험을 하여 차체의 보호보다는 승객의 보호에 초점을 맞추고 있다. 미국 소비자 보호원

의 지원을 받는 US NACP(New Car Assessment Program)은 FMVSS 208 규정이 기준을 만족시키는데 초점을 두고 있는 것과는 달리, 각 자동차에 대해서 충돌 시험 결과를 등급별로 평가하여 공개함으로써 소비자들의 차량 구입에 기준이 되고 있다. NCAP의 평가기준은 에어백을 장착한 차량에 안전벨트를 착용한 상태에서 FMVSS 208 규정보다 5mph 더 높은 35mph(56km/h)의 속도로 충돌 시험을 하도록 하고 있다.

Euro NCAP/IIHS(Insurance Institute of Highway Safety) 규정에서는 북미 FMVSS 208 규정과 NCAP 규정에서 강제 고정벽에 차량을 충돌시키는 방법과는 달리 40mph(64km/h)의 속도로 알루미늄 허니콤(honeycomb) 형태로 만들어진 변형 가능한 벽(deformable barrier)에 차량의 40% 부분만이 충돌하도록 하는 정면 부분충돌(offset crash)이 사용되고 있다. 정면 부분충돌의 특징은 차량의 일부분만이 변형되기 때문에 엔진룸의 변형량이 북미 FMVSS 208과 NCAP 규정보다 많고 차실이 붕괴될 위험성이 상대적으로 높다.

본 연구에서는 FMVSS 208 규정에 근거하여 정면 충돌해석을 수행하고, 충돌시 발생하는 B 필라 하단부의 감가속도 파형(crash pulse)을 이용하여 승객거동해석(Occupant Behavior Analysis)을 수행한 후 승객의 상해 정도를 평가하고자 한다.

### 6.2 차체 정면 충돌해석

정면 충돌특성을 향상시키기 위한 중요한 설계개념 중의 하나는 변형 가능한 영역에서의 에너지 흡수를 최대가 되도록 설계하는 것이며 동시에 승객실의 변형과 승객의 감가속도를 최소화하는 것이다. 알루미늄 초경량 차체에 대한 충돌특성을 분석하기 위하여 지금까지 설계·변경된 모델을 바탕으로 AIV 개선 모델에 대한 정면 충돌해석을 수행하였다. 승객의 모델인 더미(dummy)와 시트(seat), 에어백(airbag)은 포함하지 않았고, 실제 충돌시 승객과 시트, 각종 부품의 무게를 고려하여 질량을 추가적으로 부가하였다.

충돌해석시 사용된 조건은 북미 FMVSS 208 법규 규정에 근거하여 변형되지 않는 강제벽에 30mph(48km/h)의 속도로 충돌하도록 하였다. 정면 충돌해석시 사용된 모델의 셀요소와 빔요소는 각각 90,918개, 1,435개이며, 질점수는 91,361개이다. Fig. 21은 시제작된 AIV 전차체를 나타내며, Fig. 22은 정면 충돌해석시 사용된 유한요소 모델을 나타낸다.<sup>21-23)</sup>

해석 결과 전체적인 변형양상과 엔진룸 내부 부품에 대한 변형양상을 Fig. 23과 Fig. 24에 나타내었다. 충돌 초기에 범퍼가 압괴되기 시작하여 12msec부터 프론트 사이드 멤버와 서브 프레임의 변형이 일어나기 시작하였다. 그 후 라디에이터(radiator)와 엔진의 접촉이 발생하기 시작하였고 엔진이 뒤로 밀리면서 프론트 사이드 멤버와 서브 프레임이 계속적으로 변형하였다. 이와 동시에 속업소버 하우징도 변형하면서 충돌 에너지를 흡수하게 되었다. 약 24msec에서 프론트 에이프론(front apron)의 굽힘이 발생하여 A 필



Fig. 21 Real model of aluminum intensive vehicle

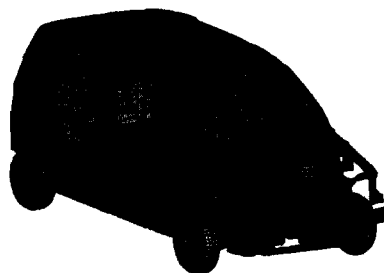
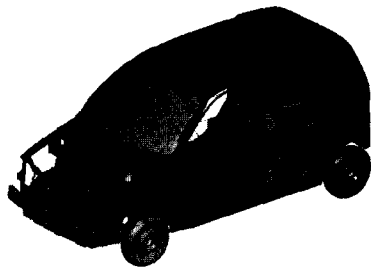
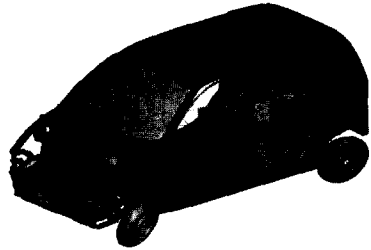


Fig. 22 Finite element model of aluminum intensive vehicle for frontal crash

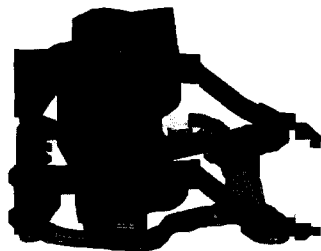


(a) Initial state



(b) Deformed shape at 80msec

Fig. 23 Deformed shapes in frontal crash(FMVSS 208)



(a) Initial state



(b) Deformed shape at 80msec

Fig. 24 Deformed shapes of engine room components in frontal crash

라와 루프 레일(roof rail)에 하중이 전달되기 시작하였다. 약 40msec부터 엔진이 승객실과 연결되는 데쉬 패널(dash panel)과 접촉되면서 데쉬 패널의 미소한 변형만 발생하였을 뿐 승객실 내

부의 큰 변형은 발생하지 않았다. 이후 약 45msec에서 더 이상의 변형은 발생하지 않고 차체가 튀어나오면서 전방 구조물의 변형이 완료되었다. 이상의 변형 양상을 분석한 결과 승객실 내부의 과도한 변형이 발생하지 않고 유지되었던 것은 BIW 설계시 언더 프레임의 연결구조를 엇갈림 없이 연속적으로 설계하여 충돌에너지를 효과적으로 전달할 수 있었던 것으로 판단된다.

Fig. 25는 충돌시 B 필라 하단부의 변위를 나타낸다. 약 45msec까지 변형이 지속되다가 이후에는 더 이상 변형이 발생하지 않고 차체가 튀어나오는 것을 알 수 있다. 또한, 차체 충돌시 발생한 전방 구조물의 최대 변형량은 약 357mm로 나타났다. 여기서 나타낸 차체 전체의 변형량은 승객실의 변형량과 직접적인 관계는 없다. 엔진룸의 변형량과 승객실의 변형량 모두를 나타낸 것이며 국부적인 변형량을 나타내는 것은 아니다. 단지 평균적이고 개략적인 차체 변형량을 평가할 수 있다.

Fig. 26은 B 필라 하단부의 가속도 파형을 나타내며 차체 충돌시 가장 중요한 데이터로 승객의 거동에 가장 큰 영향을 미치는 데이터이다. 차체 충돌시 27msec에서 최대가속도가 발생하였다. 가속도값이 상대적으로 일반 차체보다 높게 나

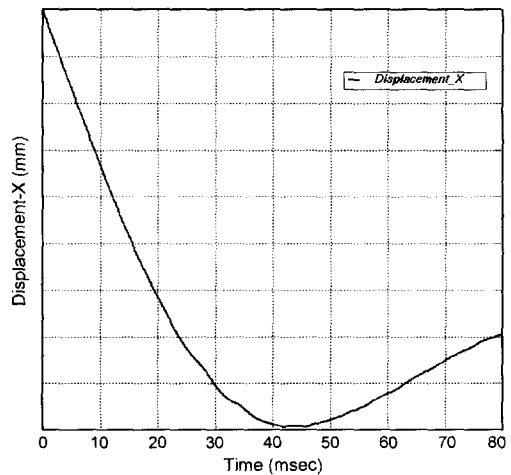


Fig. 25 Displacement curve of B pillar lower part in frontal crash

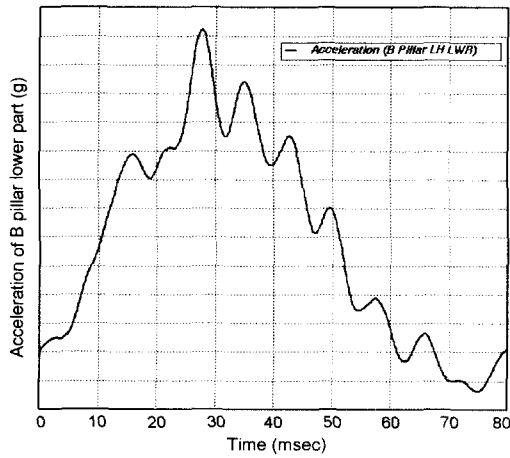


Fig. 26 Acceleration curve of B pillar lower part in frontal crash

타났으며, 그 이유는 차체 충돌시 초기에 높은 에너지 흡수율을 보이지만 전방 구조물이 매우 높은 변형강성을 나타내고 있어 충돌력 전달이 빠르게 진행이 되어 충돌에너지가 흡수되는 지속 시간이 짧아졌기 때문이다. 따라서 향후 충돌력 전달이 서서히 진행되어 35g 정도의 가속도값이 나올 수 있는 메커니즘(mechanism) 설계가 필요하다.

### 6.3 승객거동해석

차체 충돌시 승객에 미치는 상해 정도를 평가하기 위하여 슬레드(sled)를 이용한 승객거동해석을 수행하였다. 사용된 승객 모델은 Hybrid III 50% 남성 더미(male dummy)를 사용하였다. 여기서 얻어지는 결과들은 승객의 상해와 직접적으로 관련되는 데이터들이다. 승객의 상해를 나타내는 기준은 FMVSS 208 법규에 규정되어 있으며 그 기준은 다음과 같다.

- 차체 충돌시 더미가 승객실 내부에 있어야 함
- 머리상해 기준 (HIC : Head Injury Criteria) ≤ 1000

$$HIC = \left[ \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} A dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \leq 1000$$

단, A : Head C.G Point에서 측정된 합성 가속도

- 가슴 충격 가속도 (CA : Chest Acceleration) ≤ 60g
- 대퇴부 하중 (FL : Femur Load) ≤ 10kN
- 가슴 최대압축은 에어백 시스템에서는 등뼈를 중심으로 상대적으로 3inch, 좌석벨트에서는 2inch를 초과해서는 안됨

Fig. 27은 승객거동해석을 통해 구해진 변형양상을 나타내며, Fig. 28은 머리 상해치를 나타낸다. Fig. 29와 Fig. 30은 각각 가슴의 가속도 파형과 대퇴부의 하중을 나타낸다. 머리 상해치(HIC)는 728로 FMVSS 기준치인 1000보다 작은 값을 나타냈으며 가슴 감가속도(CA)는 64.5g로 범규를 조금 넘고 있다. 또한, 대퇴부의 최대 하중(FL)

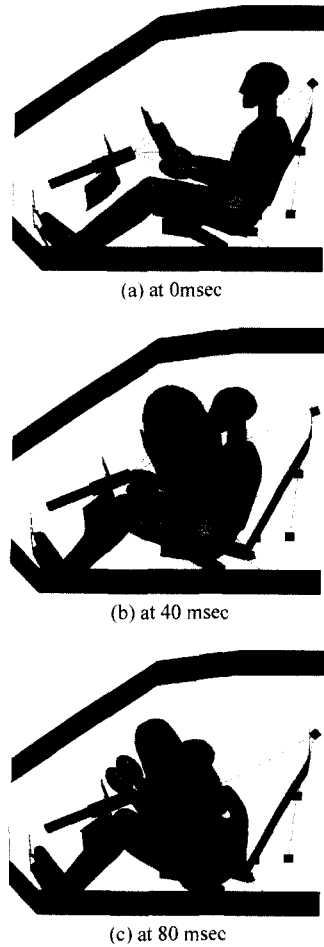


Fig. 27 Occupant behavior in sled simulation with airbag and seat belt

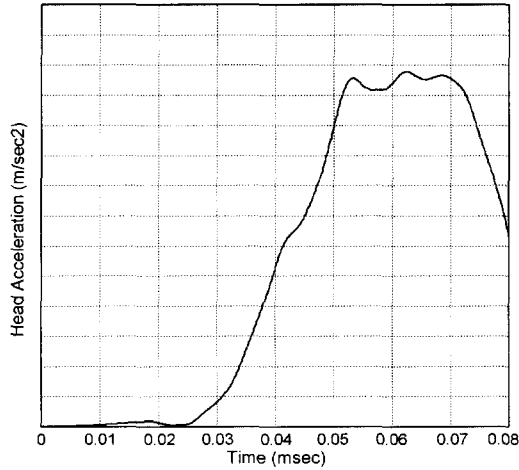


Fig. 28 Head acceleration curve of sled simulation

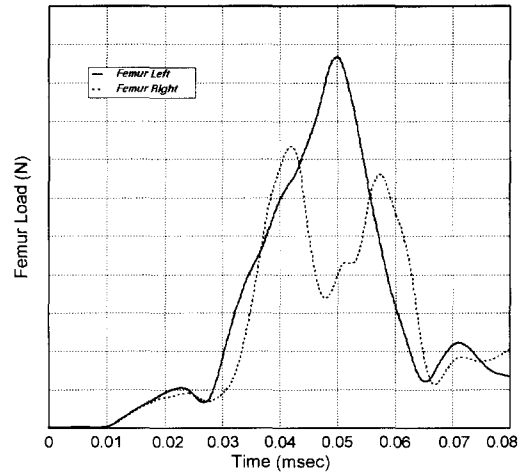


Fig. 30 Femur load curve of sled simulation

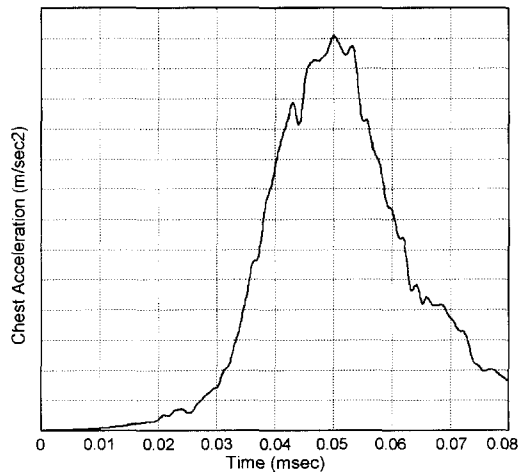


Fig. 29 Chest acceleration curve of sled simulation

Fig. 27의 변형양상을 살펴보면, 16msec에서 발바닥이 차체에 닿기 시작하고 36msec에서 무릎이 카울 패드(cowl pad)와 접촉을 시작하여 대퇴부의 하중이 급격히 증가하게 된다. 그 이후에 45msec 정도에서 팽창된 에어백과 가슴이 접촉하여 가슴의 감가속도가 급격히 증가하는 한편, 무릎은 더 이상 앞으로 진행하지 않고 카울 패드와 떨어지게 되며, 대퇴부에는 더 이상 하중을 받지 않게 된다. 52msec에서는 머리와 에어백이 충돌하여 머리의 감가속도가 증가하게 된다. 이때 머리의 감가속도는 가슴이 충격력을 많이 흡수

한 상태에서 뒤늦게 충분히 부풀린 후에 가스가 빠져나가고 있는 에어백과 충돌하기 때문에 상대적으로 적은 감가속도를 받게 된다. 차체 충돌에서는 차체의 변형 속도뿐만 아니라 승객이 접촉하게 되는 제한장치(restraint system)들의 위치나 에어백이 승객과 접촉하는 시간과 에어백의 특성값이 서로 밀접한 연관성을 가지며 승객의 상해에 영향을 미치게 된다. 따라서, 향후 가슴의 충격 감가속도를 줄이기 위하여 에어백의 특성 연구와 제한장치에 대한 설계변경이 필요하다.

## 7. 결론

본 연구에서는 기존 스틸 모노코크 차체를 기준으로 알루미늄 초경량 차체를 제작하였다. 알루미늄 초경량 차체에 알루미늄 공간 프레임 적용 시 알루미늄 압출재 단품에 대한 압괴·굽힘 특성을 분석하였으며, 차체 경량화에 대비하여 구조강성에 대한 평가를 수행하였다. 또한, 충돌 안전도 인증시험에 대비하여 전차량의 정적 충격해석 및 동적 충돌해석과 승객거동해석을 수행하였다.

1) 압출재 단품이 스틸에서 알루미늄 합금으로 소재 대체 시 단면형상과 두께를 파악하기 위하여 축방향 압괴해석을 수행한 결과 동등 강성

을 유지할 때 스틸 재료에 비하여 약 35% 경량화와 단위 무게당 160% 이상의 에너지 흡수율을 나타냈다. 단면 형상에 따른 에너지 흡수 능력은 플랜지나 보강판이 설치되는 경우와 원형 단면에 가까울수록 단위 무게당 에너지 흡수 능력이 향상됨을 알 수 있었다. 알루미늄 압출재의 압괴 시험 결과 좌굴모우드는 접힘, 접힘과 균열 혼합, 균열 발생모우드의 3가지 유형의 좌굴모우드가 나타났다. 알루미늄 압출재의 좌굴모우드의 형태는 압출재 단면의 형상비 및 후폭비와 일정한 관계를 보이고 있음을 알 수 있었다. 알루미늄 압출재에 좌굴새김을 적용하여 시험한 결과, 접힘붕괴모우드가 일어나지 않고 균열모우드만 나타나는 부재가 좌굴새김 효과에 의하여 좌굴모우드가 접힘형태로 바뀌면서 충돌에너지 흡수성능도 크게 향상됨을 확인할 수 있었다. 알루미늄 압출재의 단면 크기에 비하여 두께가 상대적으로 큰 경우 굽힘붕괴 시 모서리 부분에서의 접촉과 부재 자체의 두께에 의한 접촉에 의하여 모멘트값의 급격한 떨어짐이 없이 완만하게 진행된다.

2) 차체 각 부품의 변형모드와 충격 흡수에너지를 비교·평가하기 위하여 기존의 스틸 모노코크 차체와 AIV 시작차 및 AIV 개선 모델에 대하여 각각 정적 충격해석을 수행하였다. 정적 충격해석 결과 모노코크 방식의 스틸 차체의 경우 3차의 변형모드(범퍼 압괴 → 프론트 사이드 멤버 변형 → 서브 프레임 변형)를 나타낸 반면, 프레임 방식의 AIV 차체는 2차의 변형모드(범퍼 압괴 → 프론트 사이드 멤버, 서브 프레임 동시 변형)를 나타냈다. 프론트 사이드 멤버의 초기 압괴되는 양상은 스틸 차체의 경우 좌굴이 일어난 후 굽힘이 발생하였지만, AIV 시작차 모델은 속 업소버 하우징과 연결되는 부위에서 급격한 굽힘 변형이 발생하였다. 이를 보완하기 위하여 AIV 개선 모델에서는 승객실 하단부의 센터 플로어 사이드 멤버와 연결되는 부재들의 연결 구조를 일치시켜 사이드 실로 전달되는 충격력을 완화시키면서 효과적으로 충격에너지를 전달할 수 있도록 수정하였다. 프론트 사이드 멤버의 급

격한 굽힘변형을 방지하기 위하여 압출재와 연결되는 속 업소버 하우징의 플랜지를 연장하여 좌굴 변형을 발생시킴으로써 보다 효과적인 에너지 흡수를 유도하였다. AIV의 충격강성과 충격 흡수에너지를 비교한 결과 스틸 차체와 거의 동등수준으로 나타났다. 충격에너지는 대부분 하부 부재로 전달이 되며 카울 상부 부재로 전달되는 충격에너지는 상당히 적게 나타났다.

3) AIV 언더 프레임의 연속적인 구조 설계변경과 알루미늄 주조재의 보강설계에 의하여 충격에너지를 효과적으로 분산시켜 승객실 하단부의 사이드 실로 전달되는 충격력을 완화시킬 수 있었으며, 승객실과 연결되는 A 필라 포스트의 처짐도 방지할 수 있었다. 차체 경량화에 있어서 현재 사용되고 있는 스틸 재료의 서브 프레임은 알루미늄 재료를 사용한 하이드로포밍 공법을 적용한다면 경량화와 강성향상 목표에 도달할 수 있을 것으로 판단된다.

4) 기존 스틸 모노코크 차체를 기준으로 AIV 모델을 설계한 결과 스틸 모노코크 차체 대비 AIV 시작차 25.3%, AIV 개선 모델 30.3% 경량화에도 도달할 수 있었다. 차체의 구조 설계시 첫 번째로 고려되어야 할 차체의 구조강성을 정강성 시험을 통해 비교한 결과 기존 스틸 차체보다 높게 나타났다. AIV 모델의 경량화에 역점을 두어 ASF 구조를 최적화하기 위하여 유한요소해석을 수행하였으며, 스틸 모노코크 차체 대비 경량화 30%, 굽힘강성 29%, 비틀림 강성 5.1% 정도 향상시킬 수 있었다.

5) 정적 충격해석 결과를 바탕으로 설계 변경된 AIV 개선 모델에 대한 충돌특성을 분석하기 위하여 FMVSS 208 규정에 근거한 정면 충돌해석을 수행하였다. 충돌해석 결과 승객실 내부의 변형은 거의 없었으나, B 필라 하단부의 감가속도값이 상대적으로 일반 차종에 비해 높게 나타났다. 그 이유는 차체 충돌시 초기에 높은 에너지 흡수율을 보이지만 전방 구조물이 매우 높은 변형강성을 나타내고 있어 충돌력 전달이 빠르게 진행되고 충돌에너지가 흡수되는 지속시간이



짧아졌기 때문이다. 따라서, 향후 충돌력 전달이 서서히 진행되어 35g 정도의 가속도값이 나올 수 있는 메커니즘이 필요하다.

6) 차체 충돌 시 승객에 미치는 상해 정도를 평가하기 위하여 슬레드를 이용한 승객거동해석을 수행하였다. 머리 상해치와 대퇴부의 최대 하중은 법규를 만족하고 있는 반면, 가슴 감가속도는 법규보다 크게 나타났다. 차체 충돌에서는 차체의 변형 속도뿐만 아니라 승객이 접촉하게 되는 제한장치들의 위치나 에어백이 승객과 접촉하는 시간과 에어백의 특성값이 서로 밀접한 연관성을 가지며 승객의 상해에 영향을 미치게 된다. 따라서, 향후 승객 안전도 측면에서 가슴의 충격 감가속도를 줄이기 위해서는 에어백의 특성 연구와 제한장치에 대한 설계변경이 필요하다.

## 후 기

본 연구는 현대자동차에서 주관하는 G7 차세대 자동차 기술개발 사업 중 “알루미늄 초경량 차체의 충격에너지 흡수부재 설계 및 해석” 위탁과제(1998.11.1~2000.10.31)의 연구지원금으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 1) W. H. Overbagn, "Use of Aluminum in Automotive Space Frames," SAE 950721, 1995.
- 2) V. Lakshminrayan, H. Wang, W. J. Williams, Y. Harajli, "Application of CAE Nonlinear Crash Analysis to Aluminum Automotive Crashworthiness Design," SAE 951080, 1995.
- 3) M. Langsety, O. S. Hopperstad, "Local Buckling of Square Thin-Walled Aluminum Extrusions," Thin-Walled Structures Vol.27, No.1., pp. 117-126, 1997.
- 4) R. W. Logan, S. A. Perfect, "Energy Absorption in Aluminum Extrusions for a Spaceframe Chassis," SAE 951079, 1995.
- 5) K. Tanabe, K. Hashimoto, M. Tanaka, "Development of the All-Aluminum Light Body Structure for the Hybrid Electric Vehicle," Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress, F2000G371, 2000.
- 6) D. Maurer, G. M. Thompson, R. Muller, M. Graffe, A. Weyersberg, A. Opel AG, "Safety Concepts For Very Small Vehicles, Example : Opel Maxx," Technical Development Center, Germany 96-S4-O-13, 1996.
- 7) W. Leitermann, J. Christlein, "The 2nd-Generation Audi Space frame of the A2 : A Trendsetting All-Aluminium Car Body Concept (I) a Compact Class Car," Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress, F2000G360, 2000.
- 8) F.-J. Paefgen Dr.-Ing., Ingolstadt, Dipl.-Ing. W. Leigermann, Neckarsulm, "Audi Space Frame-ASF Ein neues PKW-Rohbaukonzept in Aluminium," BERICHT NR. 1134, 1994.
- 9) 임태원, 조원석, "경량 차체 개발동향," 한국자동차공학회 구조강도부문 학술강연논문집, pp.128-137, 1999.
- 10) 박관흠, 조홍수, 박동호, 이주엽, 권희상, "Hydroforming Intensive 고안전 초경량 철강 차체 개발," 제8회 G7차세대 자동차 기술 논문집, pp.395-402, 2000.
- 11) 강혁, 김준수, "Aluminum Space Frame 적용 초경량 차체 개발," 제7회 G7차세대 자동차 기술 논문집, pp.367-373, 1999.
- 12) 강혁, 김종명, "Aluminum Space Frame 적용 초경량 차체 개발(II)," 제8회 G7차세대 자동차 기술 논문집, pp.279-283, 2000.
- 13) 이경돈, 정경훈, 이석규, "Hydroforming을 적용한 알루미늄 차체 및 전용 suspension 개발," 제8회 G7차세대 자동차 기술 논문집, pp.344-349, 2000.
- 14) 정태은, 변준형, "알루미늄 스페이스 프레임 구조의 경량차체 설계," 한국자동차공학회 구조강도부문 학술강연논문집, pp.112-119, 1999.
- 15) 조영호, 이재용, 안상균, 하종배, 이석규, "전기자동차 차량 및 시스템 기술개발," 제8회 G7차세대 자동차 기술 논문집, pp.511-516, 2000.
- 16) Yoo-Dong Chung, Hyuk Kang, Won-Suk Cho, "The Development of Lightweight using Aluminum Space Frame Body," Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress, F2000G361, 2000.

- 17) 허승진, 조성도성, “충격에너지 흡수 구조 요소의 경량화 설계 연구,” 대한기계학회 추계 학술대회논문집 A, pp.506-511, 1997.
- 18) R. Landolfo, F. M. Mazzolani, “Different Approaches in the Design of Slender Aluminium Alloy Sections,” *Thin-Walled Structures* Vol.27, No.1., pp.85-102, 1997.
- 19) 김현영, 허승진, “알루미늄 초경량 차체의 충격에너지 흡수부재 설계 및 해석,” 제7회 G7 차체대 자동차 기술 논문집, pp.387-393, 1999.
- 20) 김현영, 김상범, 김진국, 허승진, 양승국, “알루미늄 초경량 차체 부재의 충격해석 및 설계,” 한국자동차공학회 추계학술대회논문집 Vol.II, pp.357-362, 1999.
- 21) 허승진, 윤병동, 김현영, 김진국, “알루미늄 초경량 차체의 충격에너지 흡수부재 설계 및 해석(II),” 제8회 G7 차체대 자동차 기술 논문집, pp.295-302, 2000.
- 22) 윤병동, 허승진, 김범진, 김현영, 김진국, 강혁, 김종명, “알루미늄 초경량 차체의 충격에너지 흡수부재 설계 및 해석,” 한국자동차공학회 추계학술대회논문집, pp.951-957, 2000.
- 23) 김진국, 김상범, 김현영, 허승진, “알루미늄 초경량 차체의 구조강성 및 안전도향상에 관한 연구,” 대한기계학회 추계학술대회논문집 A, pp.363-369, 2000.