

알루미늄 스페이스 프레임 차량의 구조 최적화 설계 기법

강 혁* · 경우민

현대자동차 연료전지개발2팀/선행해석팀

Structural Design Optimization of the Aluminum Space Frame Vehicle

Hyuk Kang* · Woomin Kyoung

Hyundai Motor Company, 104 Mabuk-dong, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi 446-912, Korea

(Received 10 August 2007 / Accepted 19 October 2007)

Abstract : Due to the global environment problems and the consumer's need for higher vehicle performance, it becomes very important for the global car makers to reduce vehicle weight. To reduce vehicle weight, many car makers have tried to use lightweight materials, for example, aluminum, magnesium, and plastics, for the vehicle structures and components. Especially, the ASF(aluminum space frame) is known for the excellent concept of the vehicle to satisfy structural rigidity, safety performance and weight reduction. In this research, the design of experiments and the multi-disciplinary optimization technique were utilized to meet the weight and structural rigidity target of the ASF. For the structural performance of the ASF, the locations and the size of aluminum extruded frames, aluminum cast nodes, and the aluminum sheets were optimized. As a result, the optimization design procedure has been set up to meet both structural and weight target of the ASF, and the assembled ASF showed good structural performance and weight reduction.

Key words : Aluminum space frame(알루미늄 스페이스 프레임), Structural performance optimization(구조 최적화), Lightweight vehicles(경량화 차량)

1. 서론

차량 경량화는 환경 보존과 차량 연비에 대한 각종 강화된 규제를 만족시키면서 차량 성능을 향상하기 위한 가장 핵심적인 조건이다. 이를 위해 세계적으로 최적 설계, 부품 성능 극대화 및 경량 재료 대체 기술에 대한 많은 투자를 수행하고 있으며, 이중 경량 재료의 적용은 차량의 경량화뿐만 아니라 공정의 단순화와 부품 수 감소로 생산성을 증대시킬 수 있기 때문에 차량의 경량화를 위한 핵심으로 주목 받고 있다.

알루미늄 압출재(Aluminum extrusion)를 이용한

알루미늄 스페이스 프레임(Aluminum space frame, ASF)은 기존의 스틸 모노코크 차체에 대비하여 40% 이상의 차체 경량화와 차체 강성 및 충돌 성능 향상을 동시에 달성할 수 있는 기술로, 이미 많은 선진 업체들에 의해서 상당한 수준의 기술 개발이 이루어졌다. 특히 아우디(AUDI)에서는 알루미늄 스페이스 프레임을 적용한 차량을 개발하여 양산을 하고 있다.¹⁾

본 연구에서는 알루미늄 스페이스 프레임 개발 과정의 초기 단계에서, 스페이스 프레임 차체 목표를 설정하고 구조를 최적화하는 설계 및 해석 기법을 설정하였다. 이와 같은 설계 및 해석 과정을 현 개발 차량에 적용하여, 기존 스틸 차체에 대비하여

*Corresponding author, E-mail: asfkh@hyundai-motor.com

중량이 가볍고 강성이 향상된 알루미늄 스페이스 프레임 차체를 개발하였다. 또한, 개발된 차체를 적용하여 양산이 가능한 알루미늄 스페이스 프레임 차량을 제작하였다. 제작된 차량에 대한 실제 시험을 통해 연비 및 가속 성능이 향상되고, 스틸 차량에 대비하여 동등한 충돌 성능을 나타냄을 확인하였다. 위와 같은 알루미늄 스페이스 프레임 차량의 상세 설계 및 해석 과정을 다음 장에 기술하였다.

2. ASF 설계 개념 및 과정

자동차의 성능은 구조, 충돌, 진동, 유동 등 서로 다른 분야의 특성이 유기적으로 작용하여 결정된다. 즉, 자동차의 성능을 향상시키기 위해서 특정한 분야의 개선을 수행할 경우 다른 분야에 부정적인 영향을 미쳐 차량 전체의 성능은 오히려 나빠질 수 있기 때문에, 자동차 설계 시 전체 시스템의 성능 향상을 고려하여 차체 및 차량 전반의 설계가 수행되어야 한다. 따라서, 알루미늄 스페이스 프레임 차체 설계 시에도 강성, 진동, 충돌 등 각 특성을 향상시키기 위해서는 여러 가지 분야의 특성에 대한 해석을 종합하여 최적화 설계 및 해석을 수행하여야 한다. 또한, 차량의 상품성을 향상시키기 위해 적절한 형상과 공법의 적용에 대한 검토가 병행되어야 한다.

따라서, 본 연구에서는 알루미늄 스페이스 프레임 차체를 구성하는 알루미늄 압출재, 압출재를 연결하는 결합부 및 차체 외판에 대한 민감도 해석을 통해 적용 부위 및 최적화 대상을 선정하고, 최적화 설계를 통해 알루미늄 스페이스 프레임 차체 설계안을 구성하였다. 전체적인 설계 과정은 Fig. 1에 나타낸 바와 같다. 즉, 초기 목표 설정 및 개념 설계 단계에서는 스페이스 프레임 차량의 구조적인 특성을 분석하여 성능 목표를 설정하였으며, 상세 설계 단계에서는 골격부, 결합부, 외판부로 나누어 최적화 설계 과정을 수행하였다. 각 단계의 상세한 과정은 다음 절에서부터 설명하였다.

2.1 목표 설정 및 개념 설계

현재 양산 중인 차종인 클릭(CLICK)을 기초로 하는 알루미늄 스페이스 프레임 차량 개발하였으며,

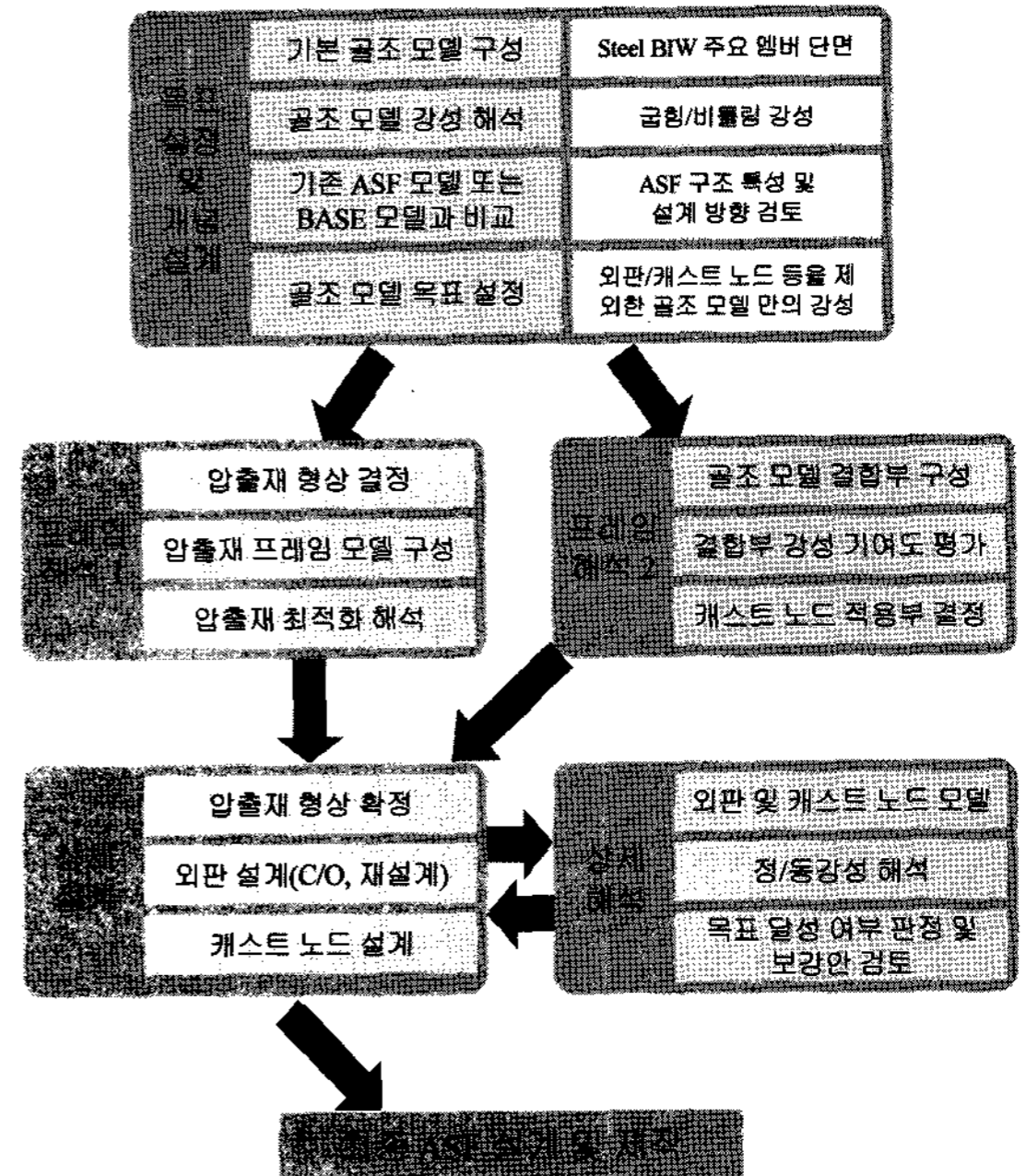


Fig. 1 ASF 차체 설계 과정

스페이스 프레임 차체의 성능 목표는 다음과 같이 설정하였다.

- 차체 중량: 스틸 차체 대비 40% 감소
- 차체 정/동강성: 스틸 차체 대비 동등 수준
- 기타 연비, 충돌 특성 향상

2.2 골조 모델 목표 설정

알루미늄 스페이스 프레임 차량의 강성 목표를 명확하게 설정하고, 최적화 과정을 효과적으로 수행하기 위해, 개발 목표를 골조 모델 강성 및 BIW 강성으로 분리하여 설정하였다. 이를 위해 스페이스 프레임의 기본 골조 모델(Frame model)을 클릭 차종의 스틸 차체의 주요 단면을 기준으로 하여 다음 그림과 같이 설정하였다.

기본 골조의 단면 특성치는 스틸 차체의 단면을 적용하였다. 스틸 차체의 기본적인 단면 특성을 갖는 보요소(Beam element)를 적용하여 Fig. 2와 같은 초기 모델을 구성한 후, 초기 골조 모델을 이용하여 굽힘 및 비틀림 강성 해석을 수행하였다. 골조 모델에 대한 최적화 과정을 수행하기 위한 정강성 목표치는, 당사에서 기존에 제작하였던 아토스(ATOZ) 베이스의 알루미늄 스페이스 프레임 차량의 골조

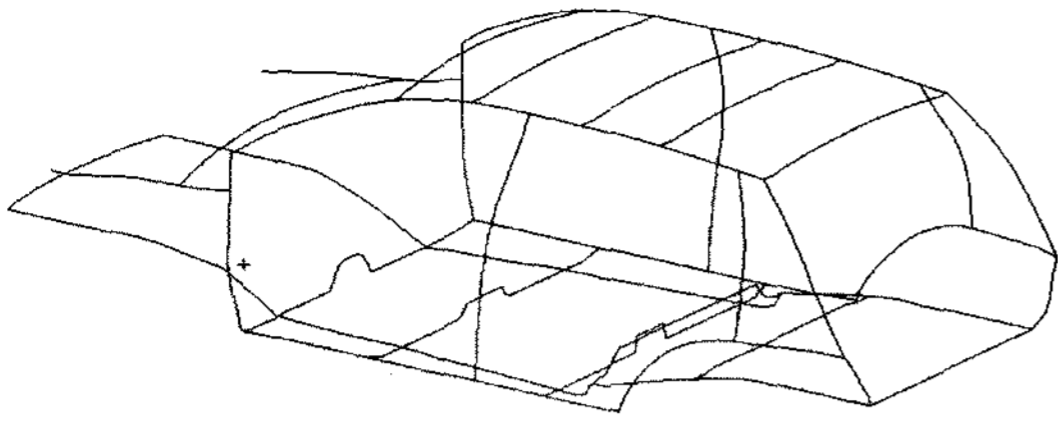


Fig. 2 알루미늄 스페이스 프레임 기본 골조

Table 1 골격부 강성 목표 설정 과정

차종		아토스 (기 제작ASF)	클릭 (현 개발ASF)
STEEL BIW	굽힘 강성	65.0%	100.0%
	비틀림 강성	96.0%	100.0%
	중량	111.0%	100.0%
ASF 상세 모델	굽힘 강성	68.0	100%
	비틀림 강성	49.6	100%
	중량	73.7%	65%
ASF 골조 모델	굽힘 강성	50.0%	76.9%
	비틀림 강성	35.0%	36.5%
	중량	32.9%	29.6%

및 실차 강성 시험 결과를 이용하여 다음과 같이 설정하였다.

아토스 알루미늄 스페이스 프레임 차체의 굽힘/비틀림 강성 시험 결과와 골조부의 굽힘/비틀림 강성 시험 결과에서 추정된 골조부의 강성 기여도가 클릭(CLICK) 베이스의 스페이스 프레임(현 개발 차종)에서 동일하게 나타난다고 가정하였다.²⁾ 따라서, 스틸 BIW 강성에 대비하여 설정된 알루미늄 스페이스 프레임 차체의 강성 목표(2.1절 참조)에서, 동일 기여도를 지니도록 골조부 강성을 추정하였다. 이와 같이 설정된 골조 모델의 강성 및 중량 목표는 Table 1에 나타낸 바와 같다.

2.3 결합부 강성 기여도 해석

압출재를 결합하는 캐스트 노드의 적용 부위를 선정하여 강성을 최적화하도록 하였다. 결합부의 결합 강성을 변수로 하는 실험계획법을 이용하여, 결합부의 강성 기여도를 평가하였으며, 의미 있는 기여도를 나타내는 결합부를 결정하였다. 이를 위해 아토스 베이스 스페이스 프레임에 적용된 캐스트 노드의 단품 강성 해석 결과를 기준으로 하여, 결합부를 동가의 스프링 요소로 치환하였다. 결합부

스프링 요소의 강성을 상한값과 하한값(-50%~50%)으로 변경하면서, 각각 2차례의 선별 실험계획법(Screening DOE)을 수행하여 굽힘 및 비틀림 강성에 기여도가 높은 결합부를 선택하였다. 이와 같이 선택된 결합부에 대해 캐스트 노드 생산성 등을 고려하여 캐스트 노드 적용부를 결정하였으며, 나머지 결합부는 압출재의 직접 용접으로 구성하기로 하였다.

2.4 압출재 상세 단면 최적화

기본적인 골격 구조와 캐스트 노드 적용부가 설정된 알루미늄 스페이스 프레임 모델에 대해 압출재의 상세 단면을 설정하는 해석을 수행하였다.

압출재의 기본 단면은 다음의 Fig. 3과 같이 스틸 차체의 레이아웃을 고려하여, 기본 프레임 형상을 내부에서 유지하도록 설정하였다. 골조 모델 강성 해석에서 얻어진 각 부재의 기여도 및 이전 차종의 압출재 단면을 검토하여, 국부적인 강도 및 강성이 요구되는 부재에는 리브를 적용하도록 하였다.

또한, 프론트 사이드 멤버의 경우 정면 충돌에 가장 중요한 부재이므로, 별도의 연구를 통해 에너지 흡수 능력을 최적화하여 결정된 형상 및 두께를 적용하였다.³⁾

그 외의 주요 부재에 대해서는, Fig. 3과 같이 기본적인 단면 형상을 결정한 후, 압출재에 대해 단면 두께를 변수로 하고, 중량을 제약 조건으로 설정하는

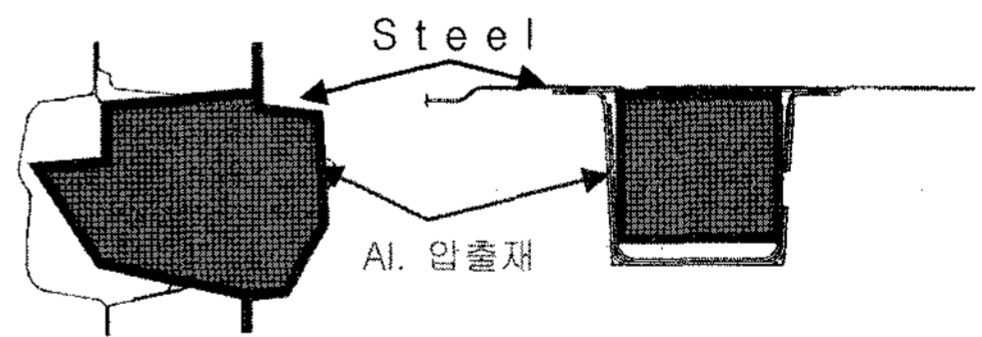


Fig. 3 ASF 기본 골격 구성

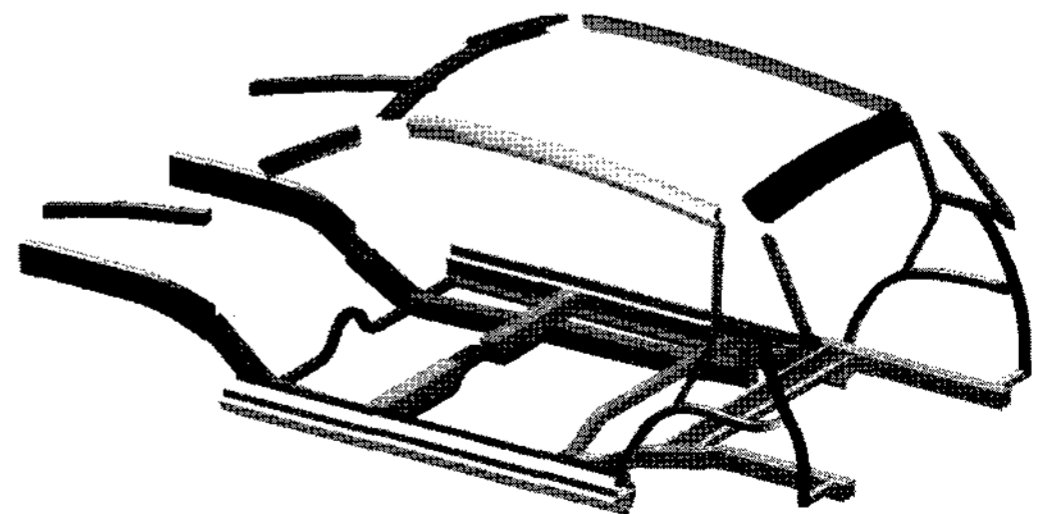


Fig. 4 압출재 프레임 최적화 부재 형상

Table 2 ASF 골조부 최적화 성능 평가 결과

평가항목	목표(Steel BIW대비)	최적화 결과 (ASF골조모델)
중량	29.6%	29.3%
굽힘 강성	76.9%	86.9%
비틀림 강성	36.5%	32.9%

정/동강성 최적화 해석 및 실제 양산성에 대한 추가 검토 과정을 통해 단면 특성을 결정하였다. 최적화된 압출재를 적용한 스페이스 프레임의 형상 및 성능 평가 결과는 Fig. 4와 Table 2에 나타낸 바와 같다.

2.5 알루미늄 외판 최적화

압출재 및 캐스트 노드를 최적화하여 설계된 스페이스 프레임에 알루미늄 외판을 적용하여 최종적으로 알루미늄 스페이스 프레임 차체를 설계하였다. 알루미늄 내/외판은 스틸 차체의 판재를 기본으로 하여 알루미늄 판재로 치환하였으며, A필라 내측 하단부와 B필라 내측 및 보강재는 구조강화 폼(Structural foam)을 적용하였다. 이와 같이 설정

된 스페이스 프레임 차량에 대해 정/동강성 해석을 수행하여 초기 구조적인 특성을 분석하였다. 정강성의 경우 굽힘 강성 및 비틀림 강성을 Fig. 5와 같은 조건에 따라 평가하였고, 동강성의 경우 차체에 대한 고유 진동 해석을 수행하여 스틸 차체와 동일한 모드의 고유 진동수를 비교하였다. 이와 같이 구성된 알루미늄 스페이스 프레임 차체에 대해 압출재 단면 설계 과정과 마찬가지로 알루미늄 외판의 두께를 설계 변수로 하는 최적화 해석을 수행하였으며, 최종적인 최적화 결과는 Fig. 6 및 Table 3과 같다.

위의 최적화 결과에서 보는 바와 같이, 알루미늄 스페이스 프레임차체의 경우 중량 목표는 만족하였으나, 정강성의 경우 다소 목표에 미치지 못한 것으로 나타났으며, 특히, 비틀림 강성이 목표에 크게 미달되었다. 이는 이전 제작 차량에 근거하여 추정된 외판 및 캐스트 노드의 강성 기여도가 다소 과도하게 평가되어, 스페이스 프레임 모델에서 충분히 강성을 확보하지 못한 것이 가장 큰 원인으로 추정된

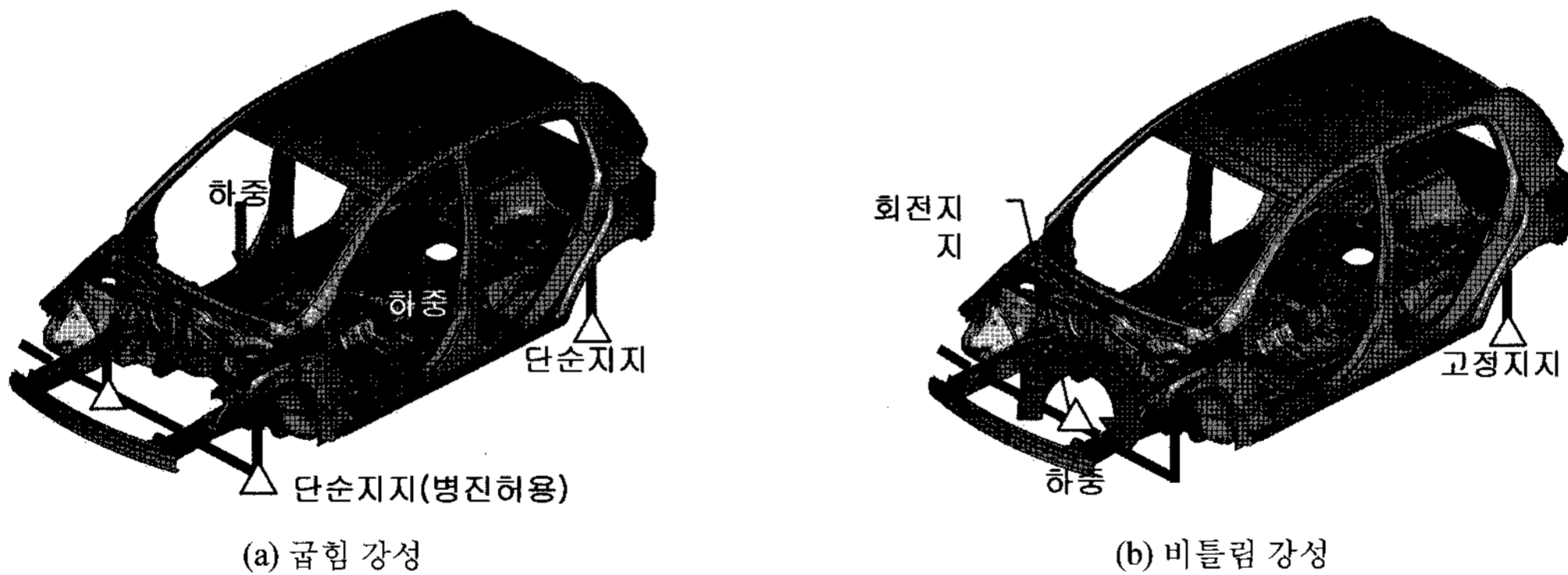


Fig. 5 ASP 굽힘 강성 해석 조건

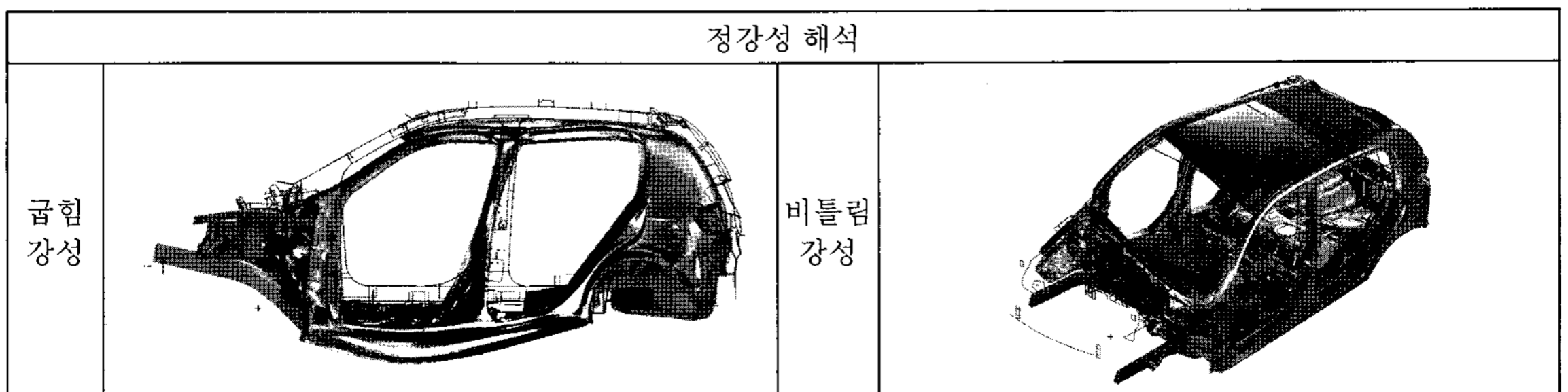


Fig. 6 알루미늄 스페이스 프레임 차체 정강성 해석 시 차체 변형 형상

Table 3 ASF 차체 최적화 결과

		스페이스프레임	
		목표	결과
중량		60.0%	54.5%
정강성	굽힘 강성	100.0%	84.2%
	비틀림 강성	100.0%	78.7%
동강성	1차 비틀림	100.0%	109.4%
	1차 굽힘	100.0%	124.2%

다. 그러나, 중량이 스틸 차체에 비해 약 45% 절감된 효과로 인해 동강성은 높게 나타났다.

3. 차량 제작 및 시험

위와 같은 최적 설계안을 바탕으로 하여 Photo. 1 과 같이 알루미늄 스페이스 프레임 차체를 제작하였다. 기본적인 BIW 구성은 골조부 최적화 결과를 적용하였으며, 판재는 최적화 대상으로 제시된 파트에 대해 해석 결과를 적용하였다. 또한, 속업쇼바 하우징 및 B-필라의 경우 강성 및 강도 보강 측면에서 주조재를 적용하였다.

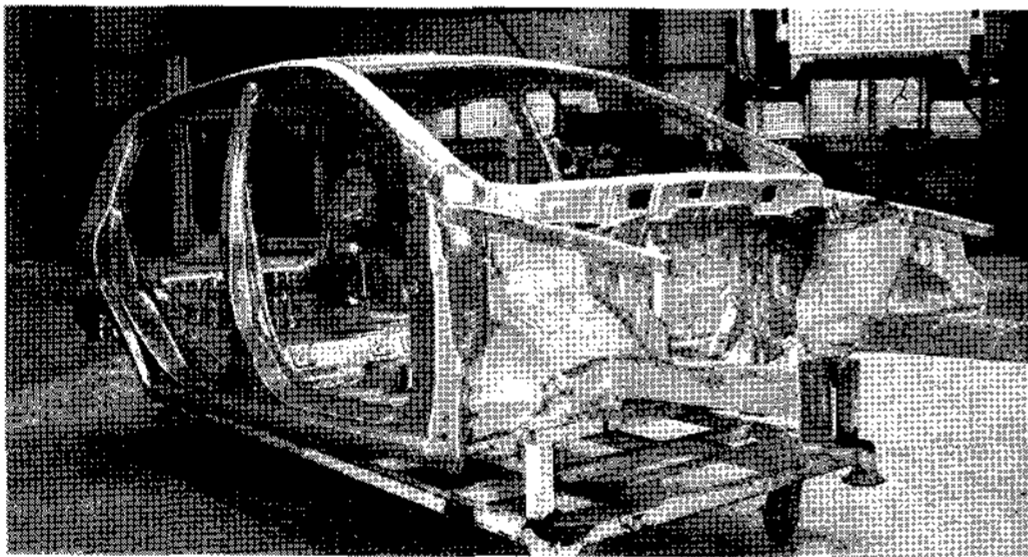


Photo. 1 알루미늄 스페이스 프레임 차량(BIW)

이와 같이 제작된 차체의 중량은 목표 대비 약 62%로 목표 대비 약 3%초과 되었다.

이는, 해석에서 평가되지 않은 일부 판넬의 두께 및 주조재 영향으로 발생하였다. 차량의 성능을 평가하기 위해 강성 시험을 수행하였으며, 시험 결과는 Table 4와 같다. 최적화 설계안의 경우 비틀림 강성이 다소 부족한 것으로 나타났지만, 실제 시험에서는 목표를 충분히 만족하는 것으로 나타났다. 이는 속업쇼바 하우징부의 주조재 적용 및 테일게이트 개구부를 구성하는 판넬류의 보강으로 인한 것으로 추정된다. 또한, 굽힘 강성의 경우 목표를 만족하지 못하였으나, 최적화 설계안 해석과 유사하게 나타났다.

알루미늄 스페이스 프레임 차체를 이용한 차량을 Photo 2와 같이 제작하였으며, 실차 시험을 통해 알루미늄 스페이스 프레임 차량은 모드 연비 6%, 가속 성능 11% 향상 및 경량화 38%를 달성하였음을 확인하였다.

또한 실차의 충돌 성능 평가를 위해 정면충돌시험(EURO N-CAP 64kph 40% offset)과 측면충돌시험

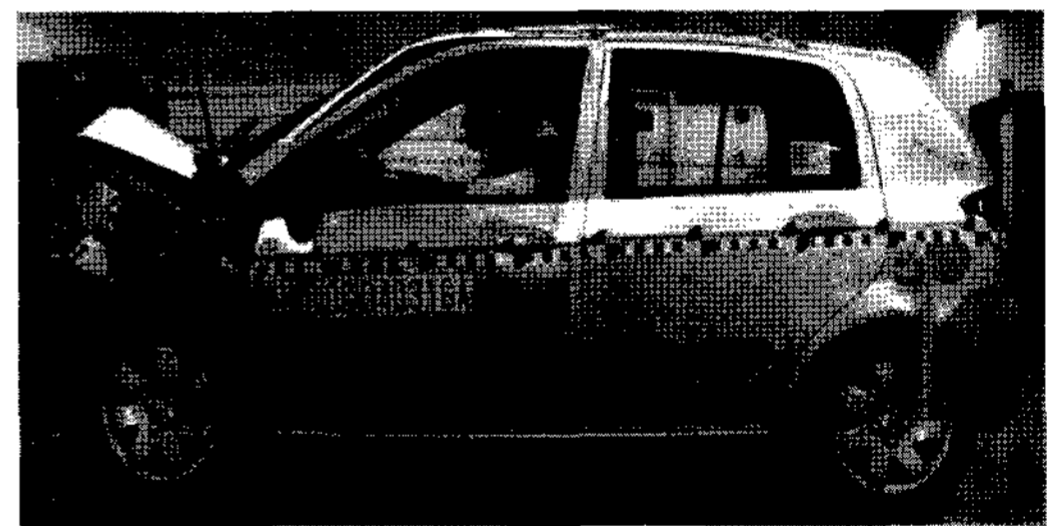


Photo. 3 정면 충돌 시험 결과



Photo. 2 알루미늄 스페이스 프레임 차량(실차)



Photo. 4 측면 충돌 시험 결과

(EURO N-CAP 50kph)을 실시하였다(Photo. 3, 4). 기존 스틸 차체 대비 정면 충돌은 대쉬 패널의 밀림량이 15mm 감소, 측면 충돌은 B-필러의 변형량이 84mm 감소하여 알루미늄 스페이스 프레임의 충돌 성능도 향상 되었음을 확인하였다. 특히, 측면 충돌 성능은 구조품을 B-필러로 적용하여 강성이 향상된 것에 기인하였다.

4. 결 론

스틸 차체를 기본으로 하는 알루미늄 스페이스 프레임 차체를 제작하기 위해 목표 설정에서부터 정/동강성을 최적화하는 설계 및 해석 기법을 수립하였고, 실제 개발 차량에 대한 알루미늄 스페이스 프레임 설계를 수행하여 중량 감소 및 정/동강성이 향상된 차체 구조를 확보할 수 있었다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 알루미늄 스페이스 프레임 차체는 프레임 및 패널 구조로 구성된 차체로, 프레임 및 차체를 분리하여 최적화 설계 과정을 수행할 수 있었다.
- 2) 프레임 및 차체 패널은 각각의 설계 과정에서 최적화 해석 기법을 적용하여, 정강성 및 동강성 목표를 동시에 만족할 수 있도록 설계하였다.
- 3) 캐스트 노드는 실험계획법을 이용하여 각각의 기여도를 평가하였으며, 이에 따라 적용 부위를 결정하여 설계하였다.

- 4) 최적화 설계안을 바탕으로 실제 차체를 제작하였으며, 중량 목표 및 비틀림 강성 목표는 달성하였으나, 굽힘 강성은 다소 미흡하게 나타났다.

References

- 1) W. Leitemann and J. Christlein, "The 2nd Generation Audi Space Frame of the A2 : A Trendsetting All-Aluminum Car Body Concept in a Compact Class Car," FISITA, F2000G360, 2000.
- 2) H. Kang and J. S. Kim, "The Development of Lightweight Vehicle using Aluminum Space Frame," Proceedings of the 7th Next Generation Vehicles Technology, pp.367-373, 1999.
- 3) H. Y. Kim, J. K. Kim, S. J. Heo and 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, pp.216-233, 2002.
- 4) Y. D. Chung, H. Kang and W. S. Cho, "The Development of Lightweight Vehicle Using Aluminum Space Frame," FISITA, F2000G361, 2000.
- 5) W. M. Kyoung, K. H. Park and H. Kang, Structural Design Optimization of the Aluminum Space Frame Vehicle, CJK-OSM2, BUSAN, TS10-4, 2002.