

특집

자동차 소음진동

차체 경량화의 동향과 구조기인 소음설계 방법

김중희, 김효식*

(르노삼성자동차)

1. 머리말

21세기에 들어서면서 자동차 산업이 당면한 최대 과제는 환경과 관련된 문제들이다. 환경학자들이 지적하는 바와 같이 차량으로부터 배출되는 이산화탄소(CO₂)는 지구 온난화의 직접적인 원인 중의 하나라는 사실에 반론의 여지가 없다. 때문에 이산화탄소 배출량에 대한 규제를 만족하기 위한 연구 및 개발이 무엇보다도 필요한 시점이라고 할 수 있다.

차량의 연비를 개선하고 배출가스를 효과적으로 줄일 수 있는 방법은 대략 네 가지가 있다. 첫째, 이산화탄소가 없거나 줄어든 대체연료를 사용하는 무공해 자동차 또는 전기 자동차를 개발한다. 둘째, 엔진의 효율성을 증가시킨다. 셋째, 공기의 저항을 감소시킨다. 그리고 넷째, 차량의 중량을 감소시킨다. 특히 차량의 경량화는 차량의 각부위에 작용하는 힘의 감소로 유지 보수 비용의 절감, 중량 감소분에 비례한 에너지의 절감, 동일한 에너지로 속도의 향상 등의 여러 가지 효과를 거둘 수 있는 장점이 있어서 앞으로도 차량 경량화를 위한 노력은 계속될 전망이다.

차체의 중량은 차량 총 중량의 1/3의 수준이다. 또한, 차체의 무게가 감소되고 나면 샤시, 브레이크, 엔진 및 변속기와 같은 타 시스템들도 보다 작으면서 가볍게 제작될 수 있다. 결과적으로 차량

의 전체 중량은 차체의 중량 감소에 타 시스템의 중량 감소가 추가되면서 더 큰 시너지 효과를 기대할 수 있다. 이러한 점들이 기술 및 비용의 한계에 도달하여 큰 폭의 개선효과를 기대하기 어려운 대체 연료의 사용 및 엔진의 효율 향상 등보다 차체의 경량화가 주목받는 이유가 될 것이다.

자동차 개발방향의 새로운 패러다임은 NVH(소음 및 진동)을 연구 및 개발하는 엔지니어들에게 약간은 혼란스러운 미래의 전망을 만들어 낼 수도 있다. 그런데 지금은 무엇보다도 미래 기술에 대한 정확한 예측과 그에 대한 집중적인 연구 및 개발이 필요한 때이다. 과연 새로운 패러다임속에서 NVH(소음 및 진동)의 역할은 어느 정도인지를 가름해 볼 필요가 있다. 이 글에서는 차체 경량화에 대한 전반적인 동향을 알아보고 그에 따른 구조기인 소음 설계기술들을 간략히 소개해 보자 한다.

2. 차체 경량화의 동향

안전 규제에 대응하기 위해서 그리고 여러 가지 편의 시설을 갖추기 위해서 계속적으로 비대해져 온 차량이 지금은 급격한 체질 개선인 다이어트를 강요당하고 있다. 이 다이어트를 성공하기 위해서는 체계적으로 차체의 무게를 줄이는 방법이 필요하며 그에 대응되는 보완 설계 방법이 요구

* E-mail : hyosig.kim@renaultsamsungM.com / (031) 289-7956

된다. 만약 부품을 삭제한다거나 단순히 부재의 두께를 줄이는 방식으로 접근하다가는 다이어트에 실패한 거식증 환자와 같은 보다 더 큰 문제를 만들어 낼 수 있기 때문이다. 따라서 차체 경량화는 단순히 무게만을 낮추는 것이 아니고 중량의 저감을 목적함수로 하고 구조 강도 및 강성, 내구 및 충돌 변형등의 사항들을 구속조건으로 하는 다목적 최적설계문제로 접근되어야 한다. 이 최적설계는 고장력강 및 다 재료(multi-material)의 적용, 구조 최적화, 생산 공법 합리화 등의 기술들을 통해서 달성될 수 있을 것이다. 먼저 재료를 대체해서 얻을 수 있는 경량화의 효과를 알아보자.

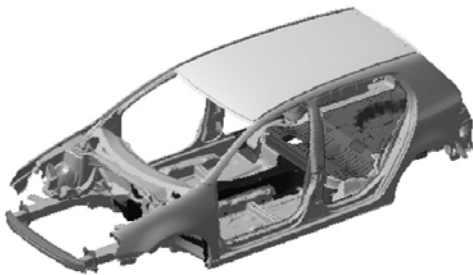
2.1 고장력강 및 다 재료의 적용

현재의 차체는 대부분이 철강 재료를 사용하고 있지만 강도와 내구성이 유지되는 수준에서 밀도가 낮은 재료로 현재 일반적으로 사용되고 있는 철강 재료를 대체하는 방법을 고려할 수 있다. 이를 위해서 알루미늄, 마그네슘 및 고장력강 등

과 강화 플라스틱들의 재료들이 사용될 수 있다. 더욱이 이러한 신소재들을 차체구조내에 어떻게 조합하느냐도 중요하다. 강도가 중요한 골격 부위는 고장력강을 점차 더 적용하겠지만, 강성이 중시되는 골격 부위 및 전방 후드와 도어 등은 알루미늄 합금을 사용하는 것이 경량화에 유리하다. 또한, 전후방 펜더는 많은 적용 사례들이 보여 주듯이 수지재(forms)를 주로 사용할 가능성이 높아지고 있다.

다 재료를 이용해서 경량화를 수행한 여러 가지 사례중에서 대표적인 사례를 알아보자. VW, Fiat, Opel, Volvo, Daimler, Porsche 및 Renault 등을 포함한 37개의 자동차 OEM 및 관련 회사들은 Golf V를 기본 모델로해서 2005년부터 2009년까지 수행한 초경량 차량 개발 프로젝트(SuperLIGHT CAR project)를 살펴보면 그림 1에서와 같이 BIW(body in white)의 중량을 281 kg에서 180 kg으로 35%까지 감소시켰다. 반면 대체 재료를 적용하면서 BIW의 비용만 112% 까지 증

Weight SLC BIW: 180kg



Materials

- Aluminium sheet
- Aluminium cast
- Aluminium extrusion
- Steel
- Hot-formed steel
- Magnesium sheet
- Magnesium diecasting
- Glasfibre thermoplastic

Percent by weight

Aluminium	96 kg (53%)
Steel	66 kg (36%)
Magnesium	11 kg (7%)
Plastics	7 kg (4%)

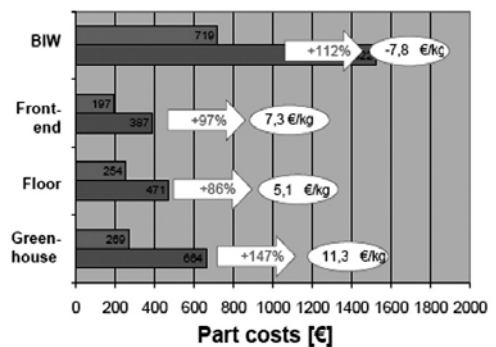
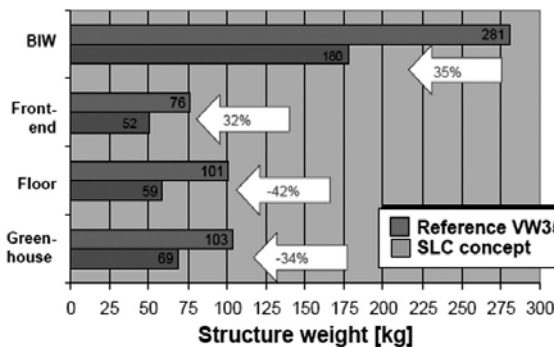
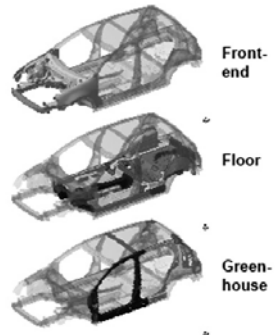


그림 1 초경량 차량 개발 프로젝트

가되는 것을 볼 수 있다. 알루미늄합금은 강철보다 상당히 가벼우며 평균 차체중량을 30% 정도 감소시킬 수 있고 티타늄과 폴리머(polymer)들은 중량을 보다 더 감소시킬 수 있다. 그러나 불행히도 이러한 경량화 재료들은 강철보다 훨씬 비싸다. 현재 알루미늄합금은 철강 재료 가격의 약 4배이며, 티타늄은 50배나 된다. 그러므로 비용이 적게 드는 차량 경량화는 단기간내에 이루어지기 어려울 것이다. 따라서 보다 체계적인 구조 설계, 고성능 강철소재와 새로운 작업공정의 사용 등을 통해 실현 가능한 경량화가 이루어질 수 있을 것으로 전망된다.

차체를 경량화하기 위해서 재료를 대체하는 방법과 병행해서 강도와 강성이 중요한 부위에 수지계 구조재료를 그림 2에서 보는 바와 같이 삽입해서 구조를 보강하는 방식이 중량 증가를 최소한으로 제한하면서 구조를 보강할 수 있는 방법으로 관심을 끌고 있다. 최근 적용 사례에서 A-pillar 하부 구조 결합부의 예를 들어 경량화 효과를 알아보면, 강판만을 이용해서 설계한 경우 판재의 무게는 3.7kg이고 보강판의 무게는 2.3kg으로 총 6.0kg이었다. 반면 수지계 구조재를 적용하면 판두께가 감소되어 판재의 무게는 2.9kg으로 줄었으며 보강판이 삭제되고 수지재료가 1.0kg 사용되어 총 무게가 2.1kg(=6kg - (2.9kg + 1.0

kg)) 가볍게 제작될 수 있었다고 한다. 결합부 하나에 2.1kg의 경량화가 가능하다면 차체를 구성하는 다른 조인트들에 확대 적용할 경우 상당한 양의 중량 저감효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 일례로 2006년 출시된 미니밴 Citroen C4 Picasso는 차체내 9개소에 유리섬유 강화 폴리아미드를 적용해서 12kg을 감소하였다.

또한, 알루미늄 및 마그네슘과 같은 재료를 이용해서 철강 재료를 대체하는 방법외에도 탄소섬유 강화 플라스틱(CFRP: carbon fiber reinforced plastic)을 이용하는 방법도 개발 및 적용이 진행 중이다. CFRP를 활용할 경우 기대할 수 있는 이점으로는 현재 재료로는 불가능한 100kg 단위의 경량화까지도 가능할 수 있다는 점이다. 특히 CFRP는 탄성계수 대 밀도의 비로 표현되는 음속이 기존의 철강 재료 또는 타 대체 재료대비 2배정도 높아서 구조에 재료만을 변경할 경우에도 구조의 동적강성(dynamic stiffness)이 효과적으로 향상되며 알루미늄에 비해 무게는 3분의 2, 강도는 5배이므로 재질 자체만 고려한다면 가장 큰 경량화 효과를 얻을 수 있다. HEV 차량인 Toyota의 1/X는 A-pillar, B-pillar 및 상판 등에 CFRP를 적용해서 중량이 Prius의 약 1/3 수준으로 경량화하였으며, 세계 최대 탄소섬유 업체중의 하나인 도레이와 자동차 제작사 다임러간의

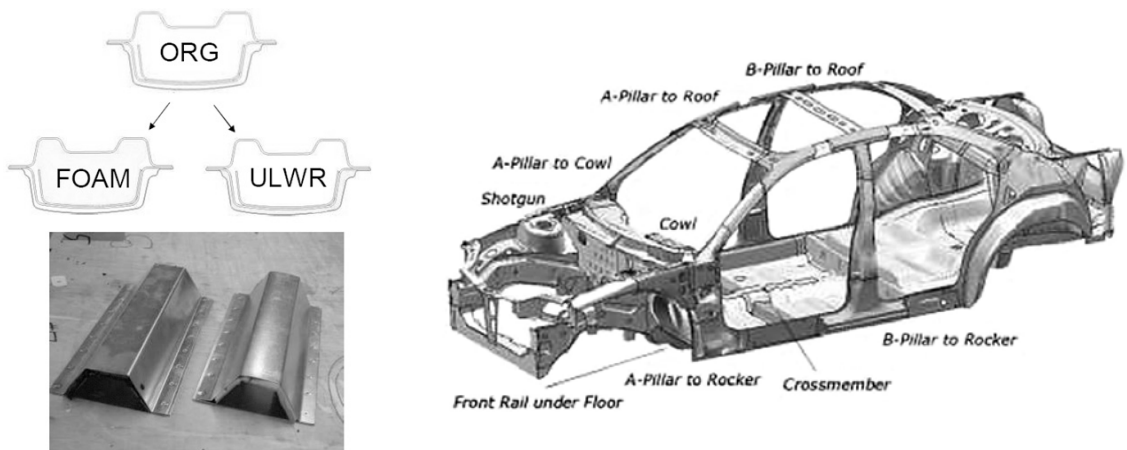


그림 2 수지계 구조재료의 적용

합작회사는 양사가 보유하고 있는 기술을 공유함으로써 CFRP 부품을 짧은 시간안에 제조할 수 있는 혁신적인 양산기술을 개발했고 이를 통해서 생산된 CFRP 양산 부품을 2012년 발표예정인 다임러 메르세데스 벤츠 승용차부터 공급할 예정이다.

2.2 차체구조의 최적화

경량화에서 제일 먼저 검토되어야 할 기술은 구조 강도 및 강성이 개선되면서 중량이 감소되도록 차체의 구조를 최적화하는 것이다. 골격과 각부재의 결합방법을 최적화하면 강성 및 강도를 높이면서 경량화하는 것이 가능하다. 강철재 차체의 경량화를 위해서 일반적으로 적용되고 있는 방법은 고장력 강판의 적용을 확대하고 판넬두께를 감소하는 방법이다. 그러나 재료의 강도가 높아지는 것이 곧 구조의 강도가 높아지는 것을 의미하지는 않으므로 충돌 및 내구성능이 고장력강을 사용함으로써 늘 향상되거나 또는 유지될 것이라고 생각하는 것은 잘못된 판단이 될 수 있다. 또한, 고장력강을 사용하면서 판넬의

두께를 감소하면 구조 강성이 약화되어 차체구조의 정강성 또는 동강성이 감소되고 결과적으로 소음진동문제가 발생되게 된다. 따라서 재료의 전환에 의존하지 말고 경량화의 기본인 구조를 최적화하는 것이 필요하다.

자동차의 중량을 저감하는 첫 번째 방법이 차체의 경량화라고 한다면 그 첫 번째 대응책은 차체구조를 최적화하는 것이다. 구조를 최적화해서 경량화를 수행하면서도 소음진동을 포함한 여러가지 성능을 향상시킨 대표적인 사례를 살펴보면 ULSAB 프로젝트와 Honda의 Fit가 있다. 세계 철강 메이커 33개 회사가 모여서 철을 사용해서 자동차 차체의 경량화를 위한 최적설계를 제안하는 ULSAB(ultra light steel auto body) 프로젝트는 94년에서 98년까지 약 4년간 연구가 이루어졌으며 차체 설계는 포르쉐가 담당했다. 이를 토대로 99년부터는 ULSAB-AVC(ultra light steel auto body-advanced vehicle concept)로 프로젝트가 발전되었다. 대상 차량들은 1500 cc 클래스인 C 세그먼트 승용차와 2500 cc 클래스인 PNGV (partnership for a new generation vehicle)의 2개 차

표 1 차체구조의 성능(전산 해석 결과)

	C-Class		PNGV-Class	
	Gasoline	Diesel	Gasoline	Diesel
Affordability				
Body structure	\$916	\$916	\$972	\$972
Vehicle manufacturing cost	\$9,190	\$9,890	\$9,538	\$10,238
Mass				
Vehicle curb weight (kg)	933	966	998	1031
Body structure (kg)	202	202	218	218
Closure structures (kg)	43	43	61	61
Structural performance				
Static bending rigidity (N/mm)	17,050	17,050	17,150	17,150
Static torsion rigidity (Nm/deg)	14,350	14,350	17,400	17,400
First bending mode (Hz)	58	58	66	66
First torsion mode (Hz)	49	49	44	44
Front end lateral (Hz)	>70	>70	>70	>70

1) C-Class: 1500cc, Bench marking vehicle: Ford Focus

2) PNGV(Partnership for a New Generation Vehicle) - Class: 2500 cc, Benchmarking vehicles: Audi A6, Mercedes-benz E class

량을 초경량 차량으로 설계하였다. 이 때 사용된 벤치마크 차량들은 각각 포드 포커스와 아우디 A6 및 메르세데스 벤츠 E 클래스였다.

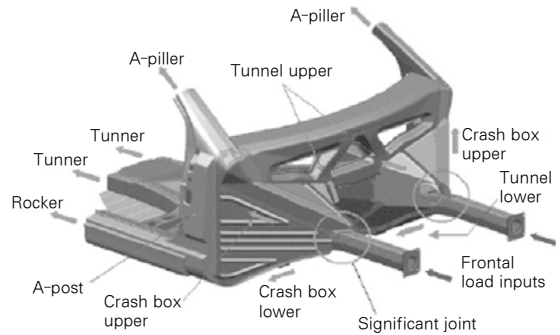
차체용 강판의 85% 이상을 고강도 강판으로 대체하는 시도를 하였으며 하이드로포밍과 테일러 용접 블랭크 등의 신 성형기법을 이용하여 부재의 강도를 확보하고 부품의 수를 최소화하는 노력을 하였다. 특히 구조를 최적화 함으로써 경량화와 양립할 수 있는 충돌성과 소음진동 성능을 함께 만족할 수 있는 안을 제작할 수 있었다. 표 1에 정리된 경량화 결과를 살펴보면 중량은 C 클래스 벤치마크 차량대비 933 kg으로 약 18% 정도 적으며 PNGV 클래스는 998 kg으로 약 32% 정도 감소되었다.

소음진동과 밀접한 관계를 갖는 BIW(body in white)의 성능을 전산해석을 통해서 예측한 결과를 표 1에서 보면 차체의 중량을 감소하면서 오히려 C 및 D 클래스 BIW의 1차 굽힘모드가 각각 58 Hz 및 66 Hz를 달성했다는 것을 알 수 있다. 현재 일반적으로 적용되고있는 차체구조의 1차 굽힘모드 설계목표 주파수가 45 Hz ~ 48 Hz 수준이라는 것을 고려해보면 정말로 대단하다고 하지 않을 수 없으며 상당한 수준으로 차체 구조가 최적화되어 있다는 것을 미루어 짐작할 수 있다. 차체구조의 특징을 전체적으로 기술하는 것은 어려우나 팔목할 만한 특징을 알아보면 그림 3과 같다.

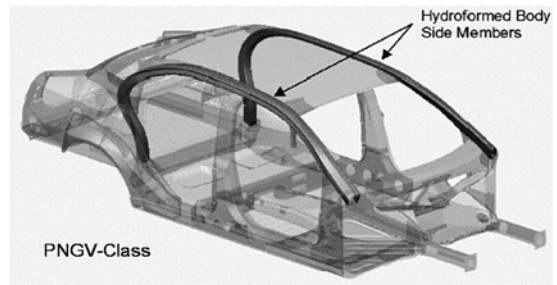
ULSAB 프로젝트는 요즈음 경량화관련 비철 금속 경량재료 또는 수지재료의 등장 등 대체 재료의 도전에 대한 철강 재료의 챔피언 벨트 방어 전이었다고 할 수 있다. 또한, 이 계임을 통해서 자동차 회사들은 대체 재료를 향하던 발걸음을 되돌려 다시금 철강 재료의 새로운 가능성과 경량화를 향한 필수 조건이 바로 구조 최적화라는 것을 확인할 수 있었다.

이외에도 고장력 강판 및 타 대체 재료에 의존하지 않고 경량화에 성공한 Honda Fit의 구조 최적화도 고려해볼 필요가 있다. 2007년 풀모델을 변경한 Honda Fit는 전장을 55 mm 확대하면서도

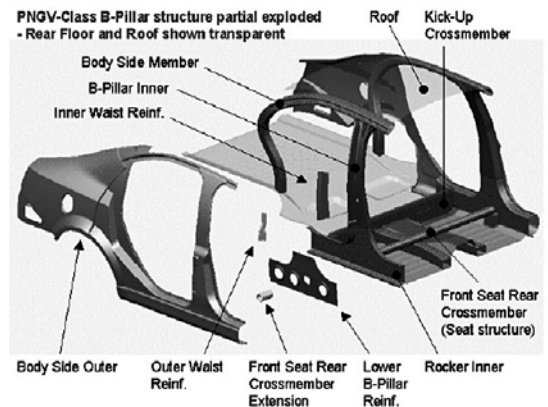
차체의 중량은 증가되지 않았다. 반면 하중 분산 구조 프레임을 적용하고 pillar의 다면을 다각화 하면서 floor cross member 형상을 U자형으로 변경하고 대각선으로 조합해서 약 11 kg의 중량감소 효과를 얻어낼 수 있었다.



(a) Load path distribution in front body structure



(b) Hydroformed body side member



(c) Ring structure of B-pillar

그림 3 ULSAB-AVC 프로젝트 차체의 구조적 특징

2.3 공법의 다양화 및 합리화

앞에서 설명한 수지재 재료를 구조 결합부내에 삽입해서 결과적으로 구조의 경량화를 도모하는 방법을 포함해서 레이저 용접 또는 하이드로 포밍들의 기술들을 적용해서 현재 일반적으로 사용되고 있는 용접 기술의 개선 및 용접 타수의 저감해야 하고 die-*quench* 공법과 roll 성형도 적용성을 고려해서 경량화를 위한 제작 공정을 결정해야 한다.

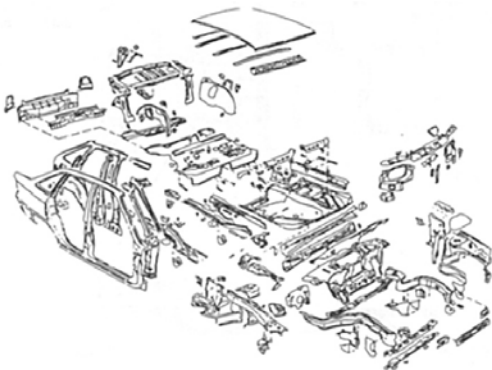
재료, 구조 그리고 공법과 관련된 기술들은 개발될 차체의 개념에 따라서 서로 밀접한 상호 관계를 갖으며 상당히 다른 사양으로 적용될 수 있다. 무엇보다도 재료의 종류, 즉 고강도 강 또는 비철 재료, 알루미늄, 마그네슘 및 강화 플라스틱 등에 따라서 차체의 골격 구조의 설계 개념에 달라지게되며 생산 공정 또한, 큰 폭으로 변경되게 된다. 따라서 차체의 경량화는 이들 3가지의 기술들에 대한 QCDP(quality, cost, delivery, cost)를 기반으로 한 통합된 관점에서 설계 초기단계에서부터 체계적으로 접근되어야 한다.

3. 차체구조의 동향

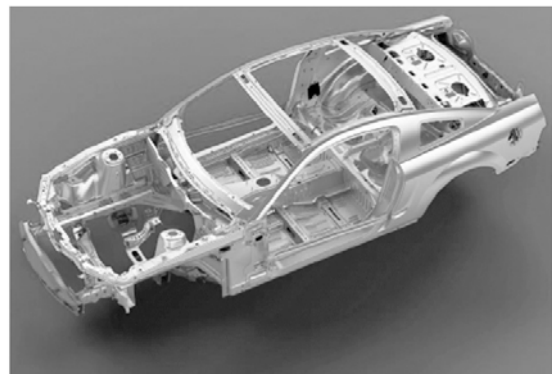
차량의 차체는 여러 가지 종류의 개념을 가지고 개발되어 왔다. 현재 대량 생산체제에 가장 일반적으로 적용되고 있는 차체구조는 일체형 차

체구조(monocoque body or uni-body)이다. 이 차체 구조는 현재 SUV 차량에서나 볼 수 있는 프레임에 장착된 차체구조(body on frame: BOF)의 대안으로서 당시에는 중량을 저감하고 차량의 무게 중심을 낮추며 실내공간이 넓고 차체로 전달되는 진동을 보다 효과적으로 절연할 수 있는 구조로 평가되었다. 이 차체구조는 그림 4에서 보는 바와 같이 매우 많은 종류의 판재들이 용접으로 연결되어 구조를 이루기 때문에 매우 복잡하다. 따라서 제작 공정이 매우 복잡하고 제작 라인을 설치하는 데 장시간의 준비가 요구된다. 반면, 일단 제작 라인이 준비되면 매우 빠르고 효과적으로 차량들을 생산해 낼 수 있기 때문에 대량생산에 적합한 차체구조이다.

그러나 판재들이 차체구조의 일부를 구성하기 때문에 차체구조의 중량을 저감하는 것은 어려우며 골격부재들의 단면 변경 또는 보강이 어려우므로 구조변경을 통한 중량저감도 효과적이지 않다. 또한, 구매 수요가 생산 대수에 비해서 낮은 경우, 판매 이익이 하락되는 것을 피할 수 없기 때문에 자동차 제작사들은 투자비용이 많은 대량 생산보다는 투자비용을 절감하고 적정량을 생산해서 판매하는 전략을 고려하게 되었다. 투자비용과 생산량을 유연하게 조정하고자 하는 필요는 현재의 일체형 차체구조에서 그림 5에서 보는 바와 같이 공간 프레임형(space frame type) 차체

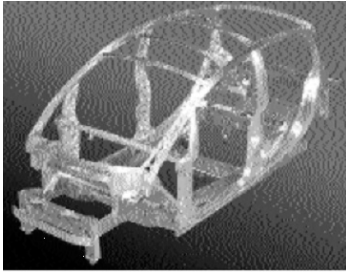


(a) 모노코크 차체의 분해도

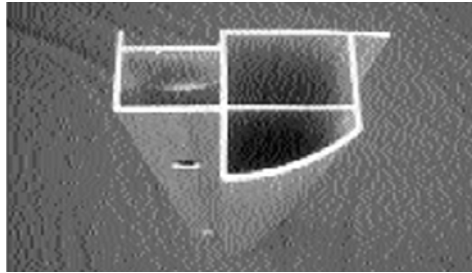


(b) 포드 무스탕(Ford Motor, 2005)

그림 4 모노코크 차체구조



(a) 미쯔비시 i의 공간 프레임 차체



(b) Cross-sectional view of dash member



(c) Front pillar

그림 5 공간 프레임 차체구조

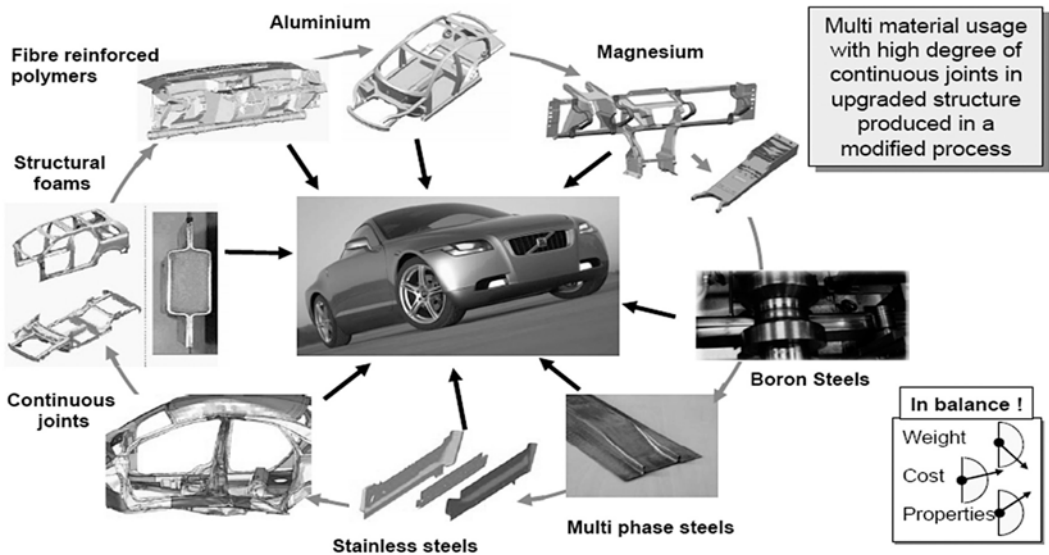


그림 6 다 재료 차체구조

구조로 차체구조를 다변화하게 되는 중요한 원인이 될 수 있다.

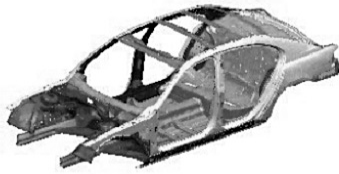
공간 프레임은 압출에 의해 제작된 구조적 프레임으로 정의되며 차체 판넬들은 이들 프레임에 부착되거나 매달리는 형태로 장착된다. 이 구조는 매우 유연하게 조립 라인과 재료의 종류에 따라서 차체를 제작할 수 있다는 특징을 갖는다. 프레임이 압출에 의해서 제작되기 때문에 규모가 크고 복잡한 프레스 공정이 필요하지 않으며 보다 유연하게 차체를 제작할 수 있어서 다음과 같은 장점들을 갖는다.

- > 가공 비용의 저감
- > 강화된 연비를 만족할 수 있는 차체 무게의 감소
- > 유연 생산 체제를 이용한 모델변경 비용의 저감
- > 생산의 유연성 증대

4. 미래형 경량 차체의 전망

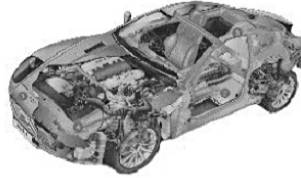
경량 재료들은 현재 양산중인 일체형 차체의 중량을 절감하기 위해서 이미 많은 부품들에 적

Steel unibody (BMW 7-series)



- DC06 (120 Mpa)
- DC04140
- ZStE180
- ZStE220
- ZStE260
- ZStE300
- ZStE380
- ZStE420
- CP800

Multi-Material-Design (Aston Martin V12 Vanquish)



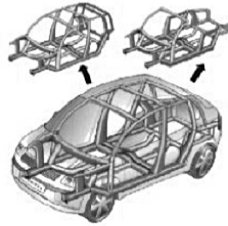
- outer skin: hot worked aluminium sheet
- body platform: bonded aluminium sections
- centre tunnel, A-pillar: carbon fibre reinforced plastic
- side sections, luggage compartment floor, crash structures: fibreglass reinforced plastic

Aluminium-Space-Frame (Audi A8)



- cast parts
- extruded profiles
- sheets

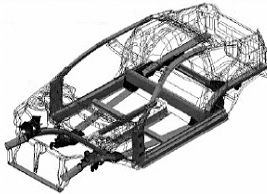
Steel-Space-Frame (TKS)



Magnesium-Space-Frame (VW)



Aluminum hybrid body(Honda Insight)



Hypercar

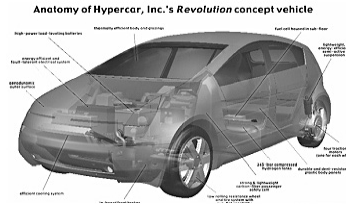


그림 7 미래형 경량화 차체

용되고 있으나 보다 더 중량을 저감하기 위해서 확대 적용될 예정이다. 대체 재료의 적용에 따라서 차체의 경량화는 현재의 철강 재료를 사용한 일체형 차체구조는 복합재 또는 알루미늄 및 마그네슘과 같은 대체 재료를 사용하는 차체구조도 등장하다가 그림 6과 같이 차체 부위별로 여러 종류의 재료들이 다양하게 사용된 다 재료 차체구조로 발전할 것이 예상된다. 특히, 일체형 차체외에도 공간 프레임형 차체가 시장에 등장하면서 보다 활발하게 경량화 재료들이 적용될 수 있을 것으로 예상되고 공간 프레임 차체구조와 일체형 차체구조의 혼합형 구조도 볼 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 앞으로 다양한 종류의 차체구조가 시장에 등장할 것이며 대표적인 종류들을 정리해보면 그림 7과 같다.

5. 경량화 차체구조의 구조기인소음 설계

향후 경량화 차체구조는 크게 고강도 철강 재료 또는 다 재료를 이용한 일체형 차체구조 (monocoque structure with high strength steel or multi-materials)와 알루미늄, 마그네슘 및 탄소섬유 강화플라스틱과 같은 대체 재료(alternative materials)를 이용한 공간 프레임 차체구조(space frame structure)로 대별될 것으로 보인다. 고강도의 철강 재료로 기존의 재료를 대체하는 경우, 차체구조를 구성하는 판넬들의 두께를 줄이는 방법이 일반적으로 적용되고 있다. 그런데 이 방법은 기존의 차체구조를 유지한 채 적용하면 기존 차체의 구조 강도와 유사한 수준으로 구조 강도를 조절할 수 있는 반면, 차체의 구조 강성은 감소

되기 때문에 결과적으로 차체구조의 진동이 증대되어 소음 및 진동의 문제가 발생하게 된다. 차체는 전체 차량중량의 약 35%를 차지하며 경량화가 가능하다. 그러나 중량은 강도뿐만이 아니라 강성도 확보된 상태에서 감소시켜야 하는데, 그렇지 않으면 충돌 및 내구를 만족한다 할지라도 NVH(소음 및 진동)와 관련된 여러 가지 문제가 발생하게 된다.

200 Hz 까지의 구조기인 소음의 주요 원인들을 보면 대략 50 Hz미만의 소음은 주로 오프닝 부품과 차체의 골격모드에 의해서 지배되며 약 50 Hz 이상의 소음은 주로 판넬들의 진동에 의해서 지배된다. 따라서 재질의 변경 또는 기존의 구조를 개선하거나 새로운 구조의 차체를 개발할 때, 골격설계가 주로 수행되는 설계의 초기단계에서 50 Hz 미만 저주파수 대역의 구조 동강성 설계를 수행한 후, 설계 중후반 단계에서 50 Hz ~ 200 Hz의 중주파수 대역에 대한 판넬 동강성 설계가 수행되어야 하며 무엇보다도 차체구조를 소음진동의 목표성능에 맞도록 최적화해야 한다.

이 글에서는 차실내에 발생하는 구조기인 소음 저감을 위한 방법중에서 경량화에 따른 재질 및 구조의 변경에 대한 50 Hz미만 저주파수 대역의 골격 구조 설계 방법을 간략히 소개하고자 한다.

방법 1: 구조기인 소음을 저감하기 위한 차체 골격강성 최적 설계 1

저주파수대역에서는 골격의 진동에 수반되어 여러개의 판넬들이 진동되므로 이 판넬들의 진동을 저감하기 위해서는 먼저 판넬들의 진동에 영향을 주는 골격의 진동을 규명하고 차실소음을 줄이기 위해서 골격의 동강성을 조정해야 한다. 물론 트렁크 리드 또는 해치백과 같은 특정 오프닝 부품이 주요한 영향을 끼치는 경우라면 이 부품들의 공진주파수, 변형 형태 또는 변위를 제어해서 소음을 감소할 수 있으나, 다수의 판넬들이 연성되어 소음에 영향을 주는 일반적인 경우에는 골격의 진동을 조절할 수 있는 설계가 선행되어야 한다.

2000년대 초반까지 차체구조의 강성 설계는 차체구조 BIW의 조인트부위를 빔-셸-스프링(beam-shell-spring) 또는 등가의 빔요소(beam element)를 사용해서 모델링한 후, 조인트 정적강성(static stiffness) 등가모델을 이용해서 차체구조 BIW의 굽힘 또는 비틀림 모드들의 주파수를 증대하는 방식으로 제한적이지만 활발히 진행되어 왔다. 그러나 2000년대 중반부터는 주로 셸요소로 구성된 차체 BIW 또는 차량모델을 대상으로 판넬두께에 대한 최적설계, 위상 최적화(topology optimization) 또는 반복적인 계산을 통해서 구조를 변경하는 방법들이 주로 사용되고 있다. 이 방법들은 중저주파수 대역의 구조기인 차실소음 설계프로세스, 즉 전체 차체구조의 골격강성 목표를 정하고 이로부터 주요 구조 조인트들의 강성을 최적으로 배분하는 방식에 적용되기 어렵다. 왜냐하면 조인트나 골격부재의 강성과 같은 주요 설계인자에 대한 연구를 수행하기 위해서는 사용되는 모델이 연구목적에 맞도록 단순화되어야 하고 관심주파수 대역까지의 동특성을 정밀하게 표현할 수 있어야 하기 때문이다.

최근에는 설계 초기단계에서 중저주파수대역의 구조기인소음에 대한 차체골격의 동적강성을 최적으로 배분하기 위해서 구조조인트의 동적강성에 대한 구조기인 실내소음의 설계 민감도 해석 방법과 최적설계를 적용해서 구조조인트의 동강성을 배분하는 연구가 수행되었다.

새단 형태(sadan type)의 차량의 경우 총 16개의 구조 조인트들이 차체구조의 골격 강성을 위해서 고려될 수 있으며 이들 조인트들의 동강성 빔-스프링 등가모델을 차체구조에 적용한 후, 조인트 동강성에 대한 차실내 구조기인소음의 민감도를 비교해 보면 그림 8과 같다. 이 민감도 해석 결과를 바탕으로 차실소음을 개선하기 위한 최적설계문제를 계산하면 목표 성능을 만족할 수 있는 차체구조 조인트들의 강성배분이 얻어지게 된다.

그런데 주요 조인트들의 최적화된 강성배분을 얻을 수 있다고 할 지라도 개선안을 제작하는 것

은 또 다른 어려움을 만나게 된다. 왜냐하면 일체형 차체구조의 경우, 차체 조인트는 그림 9에서 보는 바와 같이 외판과 내판 그리고 보강용 중간판의 결합된 형태로 제작된다. 이 때, 조인트의 강성을 변경하기 위해서 조인트의 구조 자체를 변경할 수 있는 경우라면 좀더 용이하게 목표 강성을 달성할 수 있지만 조인트의 형태가 변경되므로 차체의 외부 또는 내부 형태도 변경되어야 하

는 보다 큰 문제가 발생된다. 따라서 일반적으로 내판의 형태를 변경(A → B 또는 A → C)하는 방식을 주로 고려할 수 있는데, 이 경우는 조인트 강성의 상승폭이 최대 15%를 넘지 못하는 한계에 부딪힌다. 그런데 만일 문제 조인트의 동강성을 현재 대비 100% 이상 증대해야 하는 최적화 결과를 얻은 경우라면 어떻게 하겠는가?

2000년대 초반 조인트 최적설계를 담당하는 엔지니어들은 대부분 이 질문에 대한 효과적인 답변과 해결안을 만들기 어려웠다. 그러나 최근에는 이 문제에 대한 해결안으로서 점차 적용 범위를 넓혀가고 있는 수지재 재료와 플라스틱을 이용한 복합체(composite body)를 사용하는 방법을 고려해 볼 수 있다. 이 방법은 골격의 형상을 그대로 유지하고, 골격내 공동에 폴리우레탄(polyurethane) 또는 에폭시(epoxy) 재료를 삽입하고 경량화해서 골격강성 및 강도를 증대하는 방법이다.

이 방법의 적용례로써 B-pillar 하부 조인트의 설계목표 강성값이 정해지면 조인트 내부에 설계가 가능한 공동을 정의한 후, 그림 8의 민감도 해석과 최적설계를 이용해서 B-pillar 하부 결합부 강성(BL Krx)의 설계목표가 정해지면 결합부 내부에 설계가 가능한 공동을 정의한 후, 그림 10(a)에서와 같이 수지재 재료를 솔리드 유한요소로 모델링해서 공동을 채우고 위상 최적설계를 수행해서 주어진 경계조건 및 목표 강성을 만

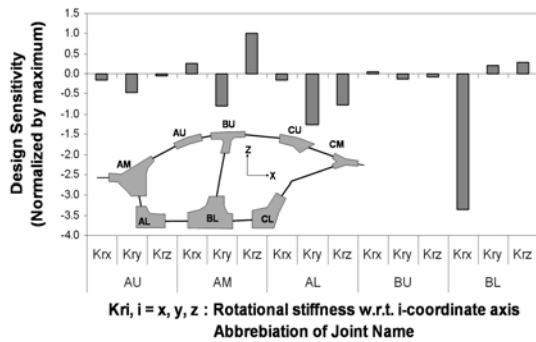


그림 8 운전자 귀 위치의 음압레벨에 대한 조인트 등가 동강성의 설계 민감도 해석 사례

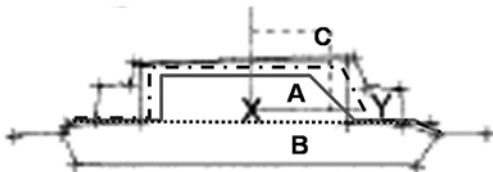
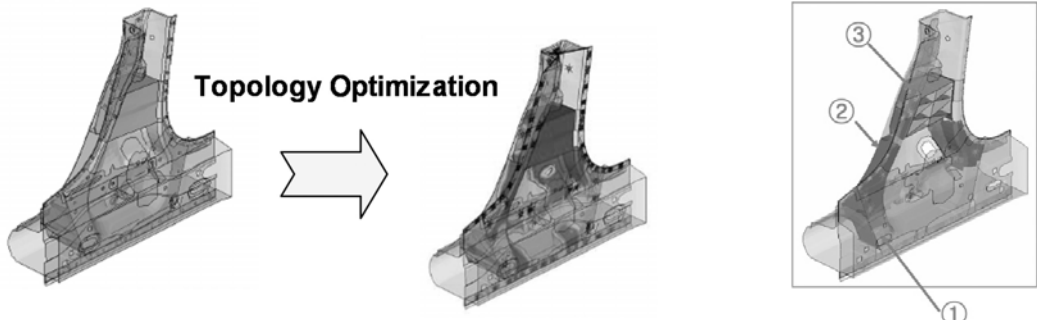


그림 9 차체 결합부의 단면 형상의 일례



(a) 위상 최적설계를 이용한 중요 부위 규명

(b) 복합체 설계안의 형상

그림 10 복합체를 이용한 B-pillar 하부 조인트의 보강

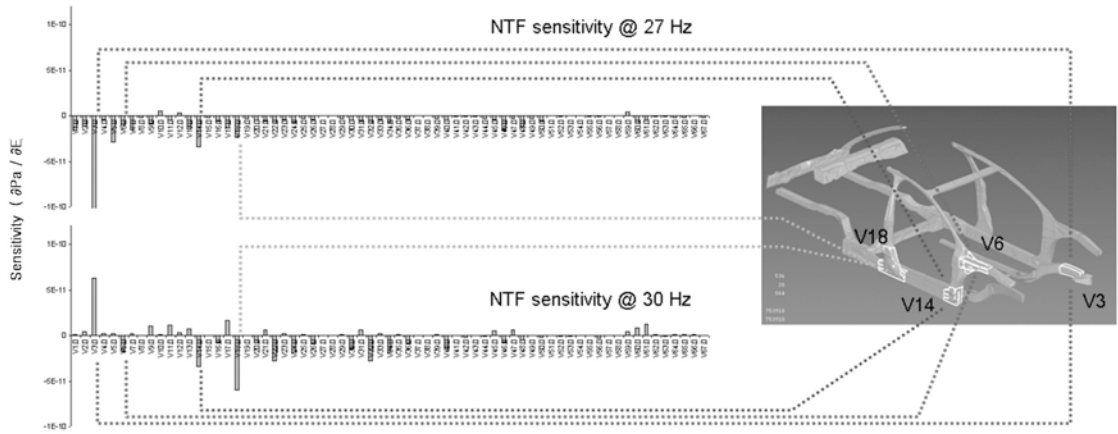


그림 11 차체 골격 공동내 충전된 수지재 재료의 탄성계수에 대한 차실 소음의 설계 민감도 해석(Pa: 음압 레벨, E: 복합체의 탄성계수)

축하는 부위를 구한다. 끝으로 해당부위에 대해서 격자 형태 또는 샌드위치 형태로 삽입 및 장착되는 플라스틱과 열팽창되는 수지재 재료로 구성되는 복합체를 설계한다. 그림 10(b)는 관련 연구결과중 일례로써, 복합체를 삽입해서 결합부 강성(BL Krx)를 기본 설계 사양대비 대략 250% 이상 증대시킬 수 있는 안이다.

방법 2: 구조기인 소음을 저감하기 위한 차체 골격강성 최적설계 2

이 절에서는 차체 골격의 공동내에 복합체(composite body)를 삽입해서 구조기인 소음을 저감하는 설계사례를 소개하고자 한다. 이 사례는 먼저 설계과정중에 예측된 주요 전달경로에 대한 소음전달함수의 크기(amplitude)를 대상으로 최적설계를 수행해서 복합체의 적용 위치 및 목표 강성값을 정하는 단계와 이어서 다투찌법을 적용해서 목표 강성값을 만족하는 복합체의 조합을 작성하는 단계, 그리고 끝으로 위상최적설계를 수행해서 복합체의 구체적 형상을 제작하는 단계로 구성된다.

먼저 차체 골격의 공동내에 64개의 부분 영역을 갖는 수지재 재료를 삽입해서 제작된 차량모델에 대해서 문제의 소음전달함수의 크기에 대한 수지재 재료의 탄성계수의 설계민감도를 검

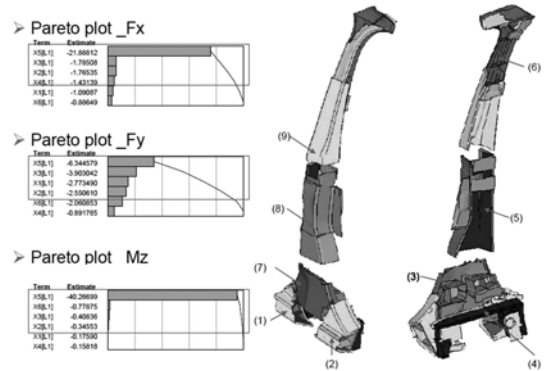


그림 12 B-필라 복합체 설계 사례

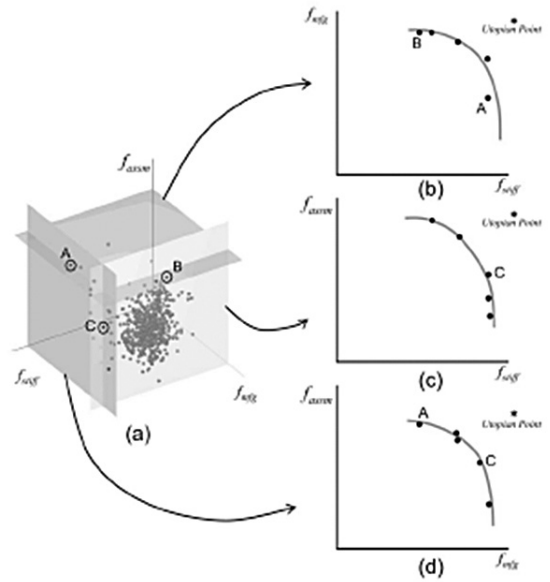
토해 보면 그림 11과 같다. 64개의 부분 영역의 수지재 재료의 탄성계수를 설계변수로 하고 관심 주파수대의 소음전달함수의 최대값을 설계구속 조건으로해서 최적설계를 수행하면 수지재 재료의 목표 탄성계수값이 도출되며 이로부터 보강이 필요한 부위와 그 부위의 목표 강성값을 구하면 단계 1이 정리된다. 이어서 단계 2에서는 위상최적설계를 이용해서 단계 1에서 구한 문제 부위에 대한 강성 목표값을 만족하면서 수지재 재료를 대체할 수 있는 복합체의 적용 부위를 구한 후, 다투찌법을 이용해서 각각의 복합체의 기여도를 비교해서 최종 방안을 선정한다. 그림 12는 실제 수행된 연구 결과중 일례로써, 차실소음이 기여

도가 큰 B-pillar의 구조강성을 기본 설계 사양대비 200% 이상 증대시킬 수 있는 복합체의 설계안이다.

방법 3: 공간 프레임 차체를 위한 최적 설계 프로세스 : 조인트 데이터베이스를 이용한 분해기반 조립 합성

새로운 차체구조를 설계해서 제작할 때, 공통적으로 만나게 되는 주요한 문제점들은 외부 스타일 및 내부 공간 확보, 구조 강성 및 강도의 부족 및 제작성과 조립성이다. 향후 차량의 개발기간을 단축하면서 보다 효율적으로 차량을 개발하기 위해서는 거시적인 개념이 결정되는 설계 초기단계에서부터 QCDP(quality, cost, delivery and productivity)를 검토하여 연구개발과 생산공정을 동시에 최적화할 수 있는 프로세스가 필요하다. 물론 현재에도 자동차 제작사들은 QCDP 프로세스 또는 유사한 자사의 고유 프로세스를 사용해서 차량을 제작하고 있지만 주로 단계마다 직렬형으로 진행되고 있으므로 전체 제작과정을 병렬형으로 통합할 수 있는 QCDP 최적화 프로세스가 필요한 실정이다.

그런데 차체측면에서 QCDP 최적화 프로세스를 현재 차체구조의 주류인 일체형 차체구조에 적용하는 것은 매우 어렵다. 왜냐하면 일체형 차체구조는 그림 4에서 보는 바와 같이 매우 많은 판재들이 다수의 용접들로 연결되어 제작되기 때문에 설계 및 제작 전과정을 포괄할 수 있는 수학적 모델을 만들어 내기가 쉽지 않기 때문이다. 그래서 주로 설계자들의 경험을 바탕으로 해서 이전에 제작된 차체구조를 바탕으로 새로운 차체구조의 사양이 결정되는 경우가 일반적인 방법이다. 그러나 앞으로 보다 경제적이면서도 성능이 효율적인 차체를 보다 짧은 기간내에 개발하기 위해서는 차체구조를 모듈단위로 분해하고 각각의 모듈과 전체 차체구조와의 관계 그리고 QCDP의 계산이 가능한 방법이 필요하다. 이는 성능위주로 진행되었던 기존의 다목적 또는 다학제간 최적설계 범주내에 제작 및 설비와



- (a) Pareto solutions at generation = 100
- (b) Pareto solution near $f_{assem} = -57.5$
- (c) Pareto solution near $f_{mfg} = -380.0$
- (d) Pareto solution near $f_{stiff} = -2.4 \times 10^{-3}$

그림 13 파레토 분석

관련된 목적함수도 포함되어야 함을 의미한다.

공간 프레임 차체는 일체형 차체대비 제작 비용 측면에서 고가이지만 단순화된 모듈화 제작이 가능하므로 부품을 공용할 수 있으며 새로운 형태의 유연 생산 전략을 위한 토대를 제공할 수 있는 기술이다. 최근에 수행되고 있는 연구들을 살펴보면 조인트 데이터베이스를 이용하여 공간 프레임 차체구조를 모듈단위로 분해한 후, 구조 강성과 조립성 및 제작성을 함께 고려해서 차체구조를 최적화하고 있다. 제안된 최적설계 방법은 위상 그래프와 조인트 목록을 작성하는 단계와 유전 알고리즘을 이용해서 최적의 조건을 찾아내는 단계로 구성되며 최종적으로 차체구조의 강성(stiffness), 제작성(manufacturability) 및 조립성(assemble-ability)들에 대한 파레토 결과를 바탕으로 설계안들을 비교해서 최적안을 도출한다. 최적설계 결과는 그림 13의 (a)와 같으며 (b)~(d)에서 검은 점으로 표기한 지점이 다목적 최적설

계 문제의 해(solution)가 되는 파레토(pareto) 해 집단을 의미한다. 이를 통하여 다목적 최적설계의 해를 검토할 수 있으며 설계안에 대한 목적함수의 효과를 비교하여 차체구조의 강성, 제작성 및 조립성 측면에서 좀 더 균형적인 결과를 갖는 안을 검토할 수 있다.

따라서 차체구조의 강성, 제작성 및 조립성들은 상호간에 상충관계(trade-off relation)를 갖는 것을 볼 수 있으므로 설계 초기 단계에서부터 그 상충관계를 이해하고 설계안 및 제작 방법을 고안한다면 보다 경제적으로 차량을 제작할 수 있다는 점에서 향후 보다 실질적이 연구가 필요한 분야이다.

5. 맺음말

“Fat men cannot run as fast as thin men, but we build most of our vehicles as though deadweight fat increased speed... I cannot imagine where the delusion that weight means strength came from...”

-Henry Ford

헨리 포드는 일찌기 중량은 강도와 비례하지 않는다는 말을 했다. 그의 말은 요즈음에도 여러 분야의 연구자들을 일깨우는 교훈과도 같다. 차체와 관련되어 그의 말을 음미해보면 차체의 중량이 가벼우면서도 상대적으로 향상된 구조의 강도를 갖을 수 있다는 말로 이해될 수 있다.

향후 차체구조는 일체형 차체구조와 공간 프레임형 차체구조가 공존하면서 두 가지 차체구조의 혼합형 구조도 제작될 것으로 예측된다. 또한, 알루미늄, 마그네슘 또는 탄소 섬유 강화 플라스틱과 같은 대체재료를 적용하면서 수지재 재료

를 이용한 구조 보강안이 병행되어 사용될 것으로 예상되며 철강업계는 새로운 개념의 고장력 강과 TWB, 하이드로포밍 등 신 생산기술을 적용해서 자동차를 경량화할 수 있는 방안들을 제공할 것이다.

자동차의 소음 및 진동은 이와 같은 변화에 직접적으로 영향을 받는 성능이다. 따라서 목표 성능을 확보하기 위해서는 새로운 개념의 차체 또는 새로운 재료를 적용하기 위한 합리적인 설계 프로세스가 필요하다. 이 글에서는 구조기인 소음을 위해서 새로운 설계 개념에 적용할 수 있는 설계 방법을 간략히 알아보았다. 물론 기존의 판넬 두께 변경에 따른 최적설계 또는 판넬 기여도 분석을 통한 설계 등과 같은 방법들도 기존의 차체를 개선하거나 새로운 차체의 개발을 위해서 꾸준히 사용될 수 있다. 또한, 설계 초기단계부터 차량의 여러 성능을 동시에 최적화하려는 다목적 최적설계가 일반적으로 시도될 것이다.

그런데 주지해야할 점은 차량을 경량화하게 되면 적용되는 요소기술에 따라서 차량의 조립성 및 제조 공정이 바뀌게 되고 차체구조의 개념에 따라서 제작대수가 대량 생산체체와 중소량 생산체체로 분류될 수 있으며 차체구조 자체가 모듈화될 수 있다는 점들을 고려할 때, 자동차의 성능 및 제작 공정과 제작 대수에 따른 경제성 및 기타 여러 가지 항목들을 아우르는 거시적이고 통합된 설계 프로세스가 필요할 것이다. 따라서 자동차 완성차 업체는 부품업체, 대학 및 연구소 등과 긴밀하게 상호 협조하여 기술개발 체계를 효율화해야하며 세계 자동차 분야에서 경쟁력을 갖추기 위해서 지속적인 연구 및 개발이 필요하다. **KSNVE**