

# 구조기인 소음을 위한 차체구조 결합부 최적설계

## Optimal Design of Vehicle Body Structural Joints for Structure-Borne Noise

김효식†, 백윤기\*

Hyo-Sig Kim, Yun-Ki Baik

### 1. 서론

“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 요즘에도 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 경량화 차체구조는 크게 고강도 철강재료 또는 여러종류의 재료를 이용한 일체형 차체구조와 알루미늄, 마그네슘 및 탄소섬유 강화 플라스틱과 같은 대체재료를 이용한 공간프레임 차체구조로 대별될 것으로 보인다. 차체는 전체 차량중량의 약 30% ~ 40%를 차지하며 차량의 경량화를 위한 효율이 높은 부품이다.

차체의 경량화에서 제일 먼저 검토되어야 할 기술은 구조의 강도 및 강성이 개선되면서 중량이 감소되도록 구조를 최적화하는 것이다. 각 골격 부재와 결합부의 구조를 최적화하면 강성 및 강도를 높이면서 경량화하는 것이 가능하다. 강철재 차체의 경량화를 위해서 일반적으로 적용되고 있는 방법은 고장력 강판의 적용을 확대하고 동시에 판넬두께를 감소하는 방법이다. 그러나 재료의 강도가 높아지는 것이 곧 구조의 강도가 높아지는 것을 의미하지는 않으므로 충돌 및 내구성능이 늘 향상될 것이라고 생각하는 것은 잘못된 판단이 될 수 있다. 또한, 판넬의 두께가 감소됨에 따라서 차체구조의 동강성이 감소되고 결과적으로 소음진동문제가 발생하게 된다. 따라서 재료의 전환에 의존하지 말고 경량화의 기본인 구조를 최적화하는 것이 필요하다.

### 2. 본론

저주파수대역에서는 골격의 진동에 수반되어 여러개의 판넬들이 진동되고 각 판넬이 발생하는

음압이 위상 차이(phase difference)를 가지고 연성되어 수음점의 합 음압(resultant sound pressure)이 발생되므로 합 음압을 저감하기 위해서는 먼저 판넬들의 진동에 영향을 주는 골격의 진동을 규명하고 골격의 동강성을 조정해야 한다. 물론 트렁크 리드 또는 해치백과 같은 특정 오픈닝 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.

2000 년대 초반까지 차체구조의 강성 설계는 차체구조 BIW(Body In White)의 결합부를 그림 1의 빔-셸-스프링(beam-shell-spring) 또는 등가의 빔요소(beam element)를 사용해서 모델링한 후, 결합부 정강성(static stiffness) 등가모델을 이용해서 차체구조 BIW의 굽힘 또는 비틀림 모드들의 주파수를 증대하는 방식으로 활발히 진행되어 왔다. 그러나 2000 년대 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 저주파수 대역의 구조기인 차실소음을 설계하기 위해서 전체 차체구조의 골격강성 목표를 설정하고 이로부터 주요 구조 결합부들의 강성을 최적으로 배분하는 방식에 적용되기 어렵다. 왜냐하면 결합부나 골격부재의 강성과 같은 주요 설계인자에 대한 연구를 수행하기 위해서는 사용되는 모델이 설계 목적에 맞도록 단순화되어야 하고 관심 주파수 대역까지의 동특성을 표현할 수 있어야 하기 때문이다.

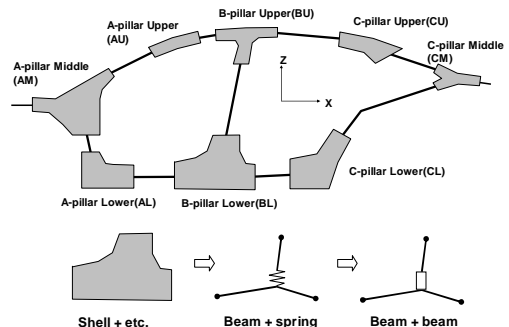


Figure 1. Schematic view of vehicle body structure with equivalent joint models for design study

최근에는 중저주파수 대역의 구조기인 소음에 대한 차체골격의 동강성(dynamic stiffness)을 최적으로 배분하기 위해서 차체구조 결합부의 동강성에 대한

† 정희원, 르노삼성자동차 소음진동팀  
E-mail : hyosig.kim@renautsamsungM.com  
Tel : 019-346-9100

\* 르노삼성자동차 차체해석팀

구조기인 실내소음의 설계 민감도 해석 방법과 최적 설계 방법을 적용해서 구조 결합부의 동강성을 배분하는 연구가 수행되었다. 세단 형태(Sedan type) 차량의 경우 총 16 개의 구조 결합부들이 차체구조의 골격 강성을 위해서 고려될 수 있다. 먼저 그림 2 에서 동강성 모델과 기존의 정강성 모델간의 차이를 입력점 리셉턴스를 이용해서 비교해 보면 기준모델일 셸모델에 대해서 동강성 모델이 정밀하게 근사하는 것을 볼 수 있다. 총 16 개의 결합부들의 동강성 밤-스프링 증가모델을 차체구조에 적용한 후, 결합부 동강성에 대한 차실내 구조기인소음의 민감도를 비교해 보면 그림 3 과 같다. 민감도 해석 결과를 바탕으로 차실소음을 개선하기 위한 최적설계문제를 계산하면 목표 성능을 만족할 수 있도록 배분된 차체구조 결합부들의 동강성이 얻어진다.

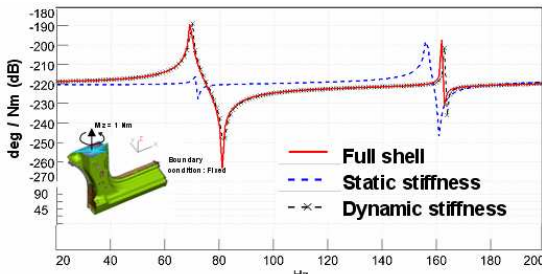


Figure 2. Difference of receptance in joint modeling with static and dynamic stiffnesses

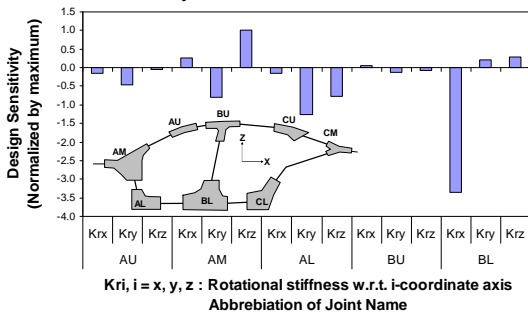


Figure 3. Design sensitivity of joint dynamic stiffness with respect to interior noise at driver's ear and 30Hz

그런데 주요 결합부들의 최적으로 배분된 동강성을 얻을 수 있다고 할 지라도 개선안을 제작하는 것은 또 다른 어려움을 만나게 된다. 왜냐하면 일체형 차체구조의 경우, 결합부는 그림 4 에서 보는 바와 같이 외판과 내판 그리고 보강용 중간판이 결합된 형태로 제작된다. 이 때, 결합부의 강성을 변경하기 위해서 결합부의 구조 자체를 변경할 수 있는 경우라면 좀더 용이하게 목표 강성을 달성할 수 있지만 결합부의 형태가 변경되므로 차체의 외부 또는 내부 형태도 변경되어야 하는 보다 큰 문제가 발생된다. 따라서 일반적으로 보강용 중간판의 형태를 변경(A → B 또는 A → C)하는 방식을 주로 고려할 수 있는데, 이 경우는 결합부 강성의 상승폭이 최대 20%를 넘지 못하는 한계에 부딪힌다. 그런데 만일 결합부의 동강성을 현재 대비 100% 이상 증대해야 하는 경우라면 어떻게 하겠는가?

2000 년대 초반 결합부 설계를 담당했던 엔지니어들은 대부분 이 질문에 대한 효과적인 답변을 하기 어려웠다. 그러나 최근에는 이 문제에 대한 해결안으로서 점차 적용 범위를 넓혀가고 있는 수지재 재료와 플라스틱을 이용한 복합체(composite body)를 사용하는 방법을 적용해 볼 수 있다.

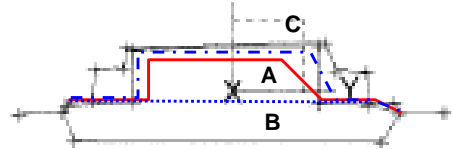
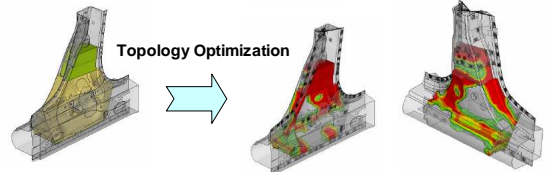
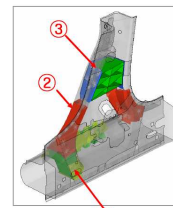


Figure 4. Conventional section of structural joints in Monocoque structure

그림 3 의 민감도 해석과 최적설계를 이용해서 B-Pillar 하부 결합부 강성 (BL Krx)의 설계목표가 정해지면 결합부 내부에 설계가 가능한 공동(cavity)을 정의한 후, 그림 5. a 에서와 같이 수지재 재료를 솔리드 유한요소로 모델링해서 공동을 채우고 위상 최적설계를 수행해서 주어진 경계조건 및 목표 강성을 만족하는 부위를 구한다. 끝으로 해당부위에 대해서 격자 형태 또는 샌드위치 형태로 삽입 및 장착되는 플라스틱과 열팽창되는 수지재 재료로 구성되는 복합체를 설계한다. 그림 5.b 는 관련 연구결과중 일례로써, 1.4Kg 의 복합체를 삽입해서 결합부 강성(BL Krx)를 기본 설계 사양대비 대략 250%이상 증대시킬 수 있는 안이다.



(a) Identification of sensitivity zone



(b) Reinforcement with 3 composite bodies

Figure 5. Structural reinforcement of B-pillar lower joint with 3 composite bodies

### 3. 결론

자동차의 중량을 저감하는 첫번째 방법이 차체의 경량화라고 한다면 그 첫번째 대응책은 차체구조를 최적화하는 것이다. 이를 위해서 차체구조의 결합부의 동강성을 최적으로 배분하는 설계 프로세스는 저주파수 대역의 진동 및 소음을 제어하기 위해서 중요하다. 제안된 방법은 복합체를 삽입하면서 보강용 중간판을 삭제할 수 있으므로 차체 경량화를 도모하면서도 구조 강성 목표를 달성할 수 있는 효과적인 수단이 될 수 있다.