

# 서스펜션 성능 확보를 위한 고강성 차체 개발 프로세스 연구 A Study on the Development of High Stiffness Body for Suspension Performance

김기창\* · 김찬목\*\*

Ki-Chang Kim, Chan-Mook Kim

**Key Words :** High Stiffness Body (고강성 차체), Torsional Stiffness (비틀림 강성), Load Transfer Path (하중 전달경로), Body Attachment Stiffness (차체 입력점 강성), Bush Isolation (진동절연), Handling (조종성), Reverse Engineering (역공학), Gross Vehicle Weight (차량 총중량), Cornering Force (원심력과 균형을 이루는 힘).

## ABSTRACT

This paper describes the development process of high stiffness body for ride and handling performance. High stiffness and light weight vehicle is a major target in the refinement of passenger cars to meet customers' contradictable requirements between ride and handling performance and fuel economy. This paper describes the analysis approach process for high stiffness body through the data level of body stiffness. According to the frequency band, we can suggest the design guideline about 1g cornering static stiffness, torsional and lateral stiffness, body attachment stiffness. The ride and handling characteristic of a vehicle is significantly affected by vibration transferred to the body through the chassis mounting points from front and rear suspension. It is known that body attachment stiffness is an important factor of ride and handling performance improvement. And high stiffness helps to improve the flexibility of bushing rate tuning between Handling and road noise. It makes it possible to design the good handling performance vehicle at initial design stage and save vehicles to be used in tests by using mother car at initial design stage. These improvements can lead to shortening the time needed to develop better vehicles.

## 1. 서론

차량의 상품성을 결정 짓는 승차감, 충돌 안전성, NVH 및 내구 성능 향상을 위하여 고강성 차체 개발이 요구된다. 하지만 판넬 두께 증대 및 보강부재 적용에 따른 중량, 원가 상승 요인이 발생하며, 차량 연비 저감 과제와 상충되어 상호 간의 개발 목표 만족을 위한 최적화 설계가 요구된다.

세계적으로 ULSAB 차량 개발 및 HONDA 초 경량 차체 개발의 추세에 맞추어 당사에서도 개발 차종의 경쟁력 확보를 위하여 신기술 & 신구조 연구를 통하여 고강성 (High Stiffness) & 경량화 (Light Weight) 차체 개발에 노력해 왔으며, 경쟁차 대비 우수한 수준을 확보할 수 있었다.<sup>(1)</sup>

본 논문에서는 차량의 승차감 개선을 위한 주파수 대역별 차체 강성 해석 프로세스에 대해 기술하고자 한다. 기존 프로세스에서는 진동 및 소음 성능 위주로 개발되어 20 Hz 이하 저주파 영역에 대한 검토가 이루어 지지 않았지만, 본 논문에서는 Handling 대비 차체 강성 영향을 분석하기 위

해 1G Cornering Force 에 대한 정적 강성 해석을 진행하여 차별화된 성능 확보가 가능하였다.

신차 개발의 초기 단계에 설계된 차량 부품 특히 하중의 직접적인 전달 경로인 서스펜션 구조의 내구, 강도 및 NVH 평가를 효율적으로 수행하기 위하여 다음과 같은 해석 프로세스를 진행하였다.

첫째, 차량의 운행 중에 발생할 수 있는 극한 상황을 설정하여 차량이 받을 수 있는 최대의 하중을 산정한 다음 노면으로부터 차량으로 하중이 전달되는 통로인 차 바퀴에서의 하중을 구한다.

둘째, 설계된 서스펜션 시스템을 구성하여 차 바퀴에 하중이 가해졌을 때 각 서스펜션 부재 및 조인트나 부시 부위에 작용하는 하중을 구한다.

셋째, 서스펜션 부재에 대한 유한요소 모델링을 수행한 후 조인트나 부시 부위의 하중을 입력하여 부재 자체에 대한 단품 강성 평가를 수행하였다.

이후 신뢰성 있는 차체 모델과 서스펜션 시스템을 결합하여 정적 및 동적 강성 해석을 통하여 차체, 새시 및 부쉬 마운팅부에 대한 기여도 분석이 가능하다.

본 논문은 설계 초기 단계에 MOTHER CAR(이전 개발 차종)를 이용하여 차량의 승차감 개선을 위한 서스펜션 시스템과 차체 강성의 설계 규정 및 해석 프로세스에 대해 기술하고자 한다. 또한 Handling 대비 정적 강성 확보를 위한 해석 프로세스에 대해 주로 다루고자 한다.

\* 현대자동차 선형개발센터 선형해석팀  
E-mail : 9362579@hyundai-motor.com  
Tel : (031) 368-5427, Fax : (031) 368-5818

\*\* 국민대학교 자동차공학전문대학원

## 2. 본 론

본 논문에서는 Table 1 과 같이 자동차의 승차감 개선을 위한 주파수 대역에 따른 차체 강성의 설계 규정을 하였다. 또한 기존 프로세스에서 검토하지 못했던 20 Hz 이하 저주파 영역의 핸들링 대비 차체 강성 확보를 위한 정적 강성 해석 프로세스에 대해 기술하고자 한다. (3)

**Table 1** Body Structure Specifications

Mode	Frequency Range (Hz)	Support	Specification
1G Cornering Static Stiffness	0~20	Handling	Benchmarking Target
Torsional Stiffness	20~50	Vibration	Separation from Engine idle RPM and Suspension tramp, hop mode
Bending Stiffness			
Body Attachment Stiffness	100~800	Noise	1000 kgt/mm ↑

20 Hz 이하의 저주파 영역의 핸들링 성능 대비 차체와 서브 프레임 장착 상태에서 부쉬 마운팅부에 1G Cornering 하중을 입력하여 정적인 강성 수준을 분석한다.

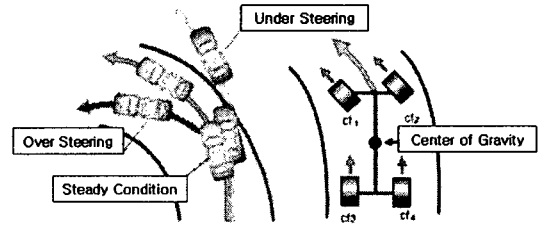
20~50 Hz 영역의 차체의 비틀림, 종굽힘 강성은 엔진 IDLE RPM 과 서스펜션 모드와 공진 회피를 하면서 가능한 높게 설정하고 있다. (1)

100~800 Hz 영역의 고주파 대역은 서스펜션 마운팅부의 국부 강성으로 서스펜션 또는 노면 등의 가진원으로부터의 진동, 소음이 차체로 전달되는 경로에서의 강성인 차체 입력점 강성 증대를 위한 구조 최적화 과정에 대해 정리하였다. 입력점 강성 증대 시 Handling 과 Road Noise 대비 Bush Tuning 이 가능하여 설계 자유도가 커진다. (2)

### 2.1 코너링 포스 (Cornering Force)

자동차의 핸들링 상품성은 안락한 운전 및 커브 길에서의 사고 방지를 위해 중요하며, 차량의 커브길 주행 시 선회특성을 살펴 보면 다음과 같다. 직진 주행 중 선회를 하기 위해 자동차의 조향 핸들을 조작하게 되면 자동차의 무게 중심에 원심력이 작용하여 자동차는 바깥쪽으로 움직이려 한다. 자동차가 안정적으로 선회하기 위해서는 원심력과 균형을 이루는 힘이 필요하며, 이를 코너링 포스 (Cornering Force)라고 한다.

코너링 포스는 노면의 옆방향의 구배가 없는 경우 대부분 타이어의 사이드 슬립으로 발생하며,



$Cf1+cf2+cf3+cf4 = \text{Centrifugal Force, } cf = \text{Cornering Force}$

**Fig.1** Driving Condition of Curve Load

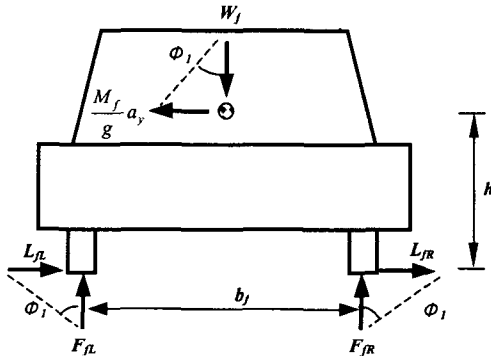
이는 원심력에 의해 차체가 바깥쪽으로 밀리지만 타이어는 마찰에 의해 접촉면이 이동하지 않아 차체의 진행 방향과 타이어의 회전방향이 서로 다르게 작용하기 때문이다. 코너링 포스는 타이어의 슬립각도와 하중 등에 영향을 받는다. 자동차가 일정 속도로 일정한 회전반경을 그리면서 선회를 한다면 차량의 바퀴에 작용하는 코너링 포스의 총합이 원심력과 균형을 이루고 있는 것을 의미한다. 앞바퀴에 작용하는 코너링 포스는 자동차의 중심점을 중심으로 하여 좌회전 시키려는 모멘트를 발생시키고, 뒷바퀴는 우회전 모멘트를 발생시킨다. 따라서 앞바퀴와 뒷바퀴의 코너링 포스에 의한 모멘트가 균형을 이룰 때 일정한 회전반경으로 회전할 수 있다. 만약 뒷바퀴에 발생하는 코너링 포스에 의한 모멘트가 앞쪽보다 커지는 경우는 조향각도를 일정하게 하더라도 자동차가 바깥쪽으로 밀리면서 선회반경이 커지게 되며, 이러한 현상을 언더 스티어링 (Under Steering) 현상이라 한다. 이와 반대로 앞바퀴에 발생하는 코너링 포스에 의한 모멘트가 어떤 이유로 커지게 되면 조향각을 일정하게 하더라도 자동차의 앞부분이 안쪽으로 말려드는 현상이 발생하여 선회 반경이 작아져 중앙선을 침범하여 상대편 차량과 접촉 사고나 차량이 돌아 버려 주행 코스를 이탈하게 되는 오버 스티어링 (Over Steering) 현상이 발생한다.

### 2.2 정적 강성 (1G Cornering Static Stiffness)

Tire patch 나 wheel center 에서 하중이 구해지면 차종별로 suspension system 을 구성하여 각 suspension part 에 작용하는 하중을 구해야 한다. Suspension system 에 따라 기본 template 을 구성한 후 차종에 따라 hard point 의 위치만 변경 시킴으로써 간단히 새로운 suspension system 을 재구성할 수 있도록 ADAMS/CAR 를 사용하였다. 따라서 ADAMS/CAR 를 사용하여 각 suspension part

에 작용하는 하중을 구할 때에는 joint 나 bush 에서의 하중으로 구하여 정리하였다.

Suspension System 의 Joint 나 Bush 에서의 하중을 구했으면 다음 단계는 Suspension Parts 에 대한 유한 요소 모델링과 해석을 수행하여 각 부품에 작용하는 응력의 크기를 구한다. Joint 나 Bush 에서 큰 하중이 작용한다고 하더라도 힘이 각각 X, Y, Z 방향으로 복합적으로 작용하고 있기 때문에 Suspension Parts 의 거동에 어떠한 영향을 끼치는가는 유한 요소 해석 없이 설명하기가 매우 어렵다. 따라서 유한 요소 해석을 수행하여 Suspension Parts 의 최대 응력과 취약 부위에 대해 정리하여 응력이 가장 크게 작용하는 설계 강도 SPEC 을 선별하여야 한다.



- $W_f$  : Gross Vehicle Weight front
- $U_f$  : unsprung weight front
- $M_f$  : sprung weight front (=  $W_f - U_f$ )
- C.G. : center of gravity
- $b_f$  : wheel tread front
- $h$  : C.G. height

Fig.2 Schematic Diagram of 1G Cornering Force

본 논문에서는 1G Cornering 하중에 대하여 1G 에 해당하는 Z 방향의 무게로 인한 힘은 G.V.W. 를 사용하여 구하고, 가속력에 의한 힘은 Sprung G.V.W. 를 써서 계산하여 무게로 인한 힘과 중첩하는 방식을 사용하고 있다.

Force & Moment Diagram 의 힘평형 방정식 (1), (2)로부터 다음의 결과식을 얻을 수 있다

$$F_{FL} + F_{FR} = W_f \quad (1)$$

$$F_{FL} b_f - W_f \frac{b_f}{2} - \frac{M_f}{g} a_y h = 0 \quad (2)$$

$$F_{FL} = \frac{1}{2} W_f + \frac{M_f}{g} a_y \frac{h}{b_f} \quad (3)$$

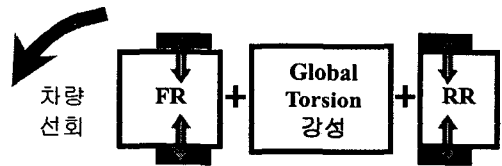
$$F_{FR} = \frac{1}{2} W_f - \frac{M_f}{g} a_y \frac{h}{b_f} \quad (4)$$

$$L_{FL} = F_{FL} \tan \phi_1, \quad L_{FR} = F_{FR} \tan \phi_1$$

$$\tan \phi_1 = \frac{\frac{M_f}{g} a_y}{W_f} \quad (5)$$

Ride & Handling 성능에 영향을 주는 20Hz 이하의 정적 강성 검토를 위하여 설계 초기 단계에 BIW + Subframe 모델과 Multi Body Dynamics 으로부터 계산된 SUSP. 입력 하중 고려시 Ride & Handling 성능에 영향을 주는 차체 비틀림 강성 평가의 평가가 요구되어 지고 있다.

본 논문에서는 Handling 대비 1G Cornering 하중에 대한 차량의 비틀림 거동에 대하여 하중 전달 경로를 지정하고, 각 System 별로 변형을 분석하였다. Fig.3 은 1G Cornering 하중에 대한 차량의 하중 전달 경로를 도시한 것이다.



0. 횡 가속도 작용 → 1. FR ROLL 작용 →
2. FR & RR 응답지연 → 3. RR ROLL 작용

Fig.3 Schematic Diagram of Load Transfer

하중 전달 경로를 정의하고 각 system 별 강성을 평가하여 차량의 거동을 분석하기 위해 차량을 앞 부분, 뒷 부분 그리고 전체로 나누어 검토하였다.

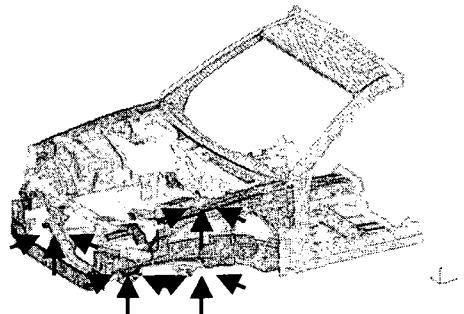
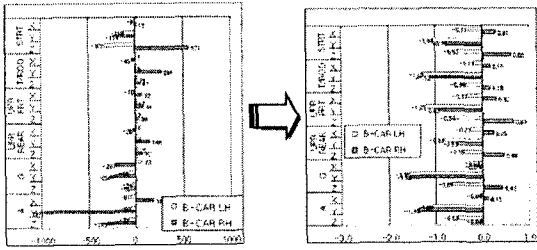


Fig.4 Application of Cornering Force at Front

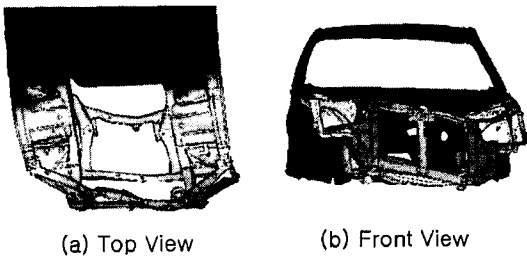
차량의 앞 부분을 절단하여 절단면에 대해서 6 자유도를 구속하고, Front Suspension 에 걸리는 Cornering 하중을 부여하여 Fr Torsion 강성 평가를 수행한다. 같은 원리로 차량의 뒷 부분에 대하여 Rear Torsion 강성평가를 수행하고, BIW 에 대한 비틀림 정강성 평가를 수행하여 각 System 별 강성 분석을 한다.



(a) Dynamic Load (b) Displacement

Fig.5 Load and Displacement at Cornering Force

Fig.5(a)로부터 Front Suspension 의 각 ARM 마운팅부에 걸리는 하중을 분석하여 하중이 들어오는 주하중 방향 및 하중의 크기를 알 수 있다. 이에 대한 (b)의 변위량을 분석하여 상대적인 강성 취약부를 판별하고, 구조 개선에 대한 설계 가이드를 제시하는 프로세스로 진행된다.



(a) Top View (b) Front View

Fig.6 Deform Shape of Engine Room

Fig.6 은 Front Torsion 하중이 주어졌을 때, 차량 전방부의 변형 양상을 분석한 결과이다. 전체 차량의 변형 거동 및 스트레인 에너지 분석을 통하여 Fig.5 의 결과와 함께 강성 취약부 분석 및 개선 해석을 위한 근거 DATA로 활용하고 있다.

이러한 해석 프로세스를 통하여 새시, 차체, 부쉬 마운팅부의 기여도 분석 및 실차 상태 핸들링 성능 대비 차체 강성 확보를 위한 설계 초기 단계 설계 가이드가 가능하였다.

### 2.3 동적 강성 해석

IDLE 진동 대비 50 Hz 이하 영역의 중첩힘 강성은 서스펜션의 Hop 모드와 공진 회피 범위에 있으며, 비틀림 모드와 횡굽힘 모드는 서스펜션의 Tramp 모드와 공진 회피 범위에서 개발되며, 엔진 IDLE RPM 및 스티어링 굽힘 모드와 모드 중첩되지 않게 설계 초기 단계에 모드 맵 (Vibration Mode Map)을 통하여 관리되고 있다. (1)

주행중 노면 가진력 대비 서스펜션 마운팅부 진동 절연을 위하여 차체 입력점 강성 해석을 수행하고 있으며, 강성 확보 시 핸들링과 ROAD NOISE 대비 Bush Tuning 을 위한 설계 자유도가 커진다.

본 논문에서는 기존의 강성 해석 프로세스와 차별화된 정적 강성에 대해 주로 기술하였으며, 동적 강성에 대한 해석 프로세스는 기존의 참고 문헌을 인용하여 간단하게만 언급하고자 한다. (2)

### 3. 결론

본 논문에서는 자동차의 승차감 개선을 위한 주과수 대역에 따른 차체 강성의 설계 규정 및 해석 프로세스에 대해 연구 방향을 제시 하였으며, 본 논문의 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 선행 단계에 MOTHER CAR 를 이용하여 설계 가이드를 제시하였으며, 핸들링 대비 20 Hz 이하 저주파 영역의 차체 강성 영향을 분석하기 위하여 1G Cornering 하중에 대한 정적 강성 해석 프로세스를 개발하여 안정적인 성능 확보를 하였다.

(2) 승차감 개선을 위해 1G Cornering Force 대비 정적 강성을 확보 하면서, 서스펜션 마운팅부로부터 차체로 입력되는 진동을 절연하기 위해 동적 강성을 동시에 고려하여야 한다.

### 참고 문헌

- (1) 김기창, 김찬목, "NVH 성능 및 연비 향상을 위한 고강성 차체 개발 연구", 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집, pp.1189-1194, 2004
- (2) Kichang KIM, Hyundai Motor Co. "Design Optimization Analysis of Body Attachment For NVH Performance improvements", SAE 2003-01-1604, 2003.
- (3) Michael W. Neal and Mary A. Dona, General Motors Corp. "Ride and Handling Development of the 1997 Chevrolet Corvette", SAE 970098, pp.77-85, 1997
- (4) Yoshitaka Isomura, Toshiya Ogawa, "New Simulation Method Using Experimental Modal Analysis for Prediction of Body Deformation during Operation" SAE 2001-01-0494, 2001
- (5) R. Wade Allen "Estimation of Passenger Vehicle Inertial Properties and Their Effect on Stability and Handling" SAE 2003-01-0966, 2003