

# 브레이크 저더 저감을 위한 전달계 최적 설계

김정훈<sup>†</sup>, 유동호<sup>\*</sup>, 강연준<sup>\*\*</sup>

## The Optimal Design of Suspension Module for Brake Judder Reduction

Jung Hoon Kim<sup>†</sup>, Dong Ho Yoo<sup>\*</sup> and Yeon June Kang<sup>\*\*</sup>

**Key Words :** Brake Judder(브레이크 저더), BTV( Brake Torque Variation), DTV(Disc Thickness Variation), Multi-body Dynamics(다물체 동역학), Optimization(최적화)

### Abstract

The brake judder comes from non-uniformities in the tire/wheel assembly caused by mechanical effects such as a brake torque variation (BTV). A disc thickness variation (DTV) related with the kinematic behavior of the disc was investigated a main source of BTV. In this study, a dynamic model with brake corner assembly of full vehicle using MSC.ADAMS was correlated by experiment of judder phenomenon. Judder was generated and correlated systematically by judder experiment in chassis and brake dynamometer from variation in the thickness of the disc. Also it has been found a judder transfer path and variation of the braking pressure. Through analysis of transfer function and movement of subsystem caused by BTV generation, design parameters have been found. Based on the results obtained from parameter study of suspension module, the effective design process and developed model with brake corner assembly was suggested for vibration reduction of steering wheel caused by the judder phenomenon.

### 1. 서 론

차량 제동시 브레이크 시스템에 의해서 발생하는 진동과 소음은 승차감, 안정성, 조종성을 저하시켜 탑승자에게 불쾌감과 불안감을 느끼게 하는 요인이 된다. 저더는 고속 주행 중 제동시 디스크 두께 변화(DTV, Disc Thickness Variation)가 브레이크 토크 변화(BTV, Brake Torque Variation)를 유발하여 현가계와 조향계를 통해 전달 되어 스티어링 휠과 브레이크 페달 등에 이상 진동이 발생하는 현상이다.

브레이크 저더에 대한 연구는 브레이크 시스템만을 고려하였을 때는 BTV가 저더의 가장 큰

원인이며, BTV를 발생시키는 원인으로는 로터의 불균일한 마모로 인한 DTV를 주된 요인으로 보았다. 즉 디스크 런아웃(runout)이 DTV에 가장 큰 기여를 한다는 것을 밝혔다<sup>(1,2,3)</sup>. 그리고 BTV 주파수가 현가 시스템의 고유 주파수 부근에 있을 때 브레이크 토크나 브레이크 압력 등이 증폭되는 현상으로 설명하고, BTV 경향을 규명할 수 있는 단순한 이론 모델을 제시하고 무차원화 된 파라미터들을 도입하였으며, 실험을 통하여 결정하는 방법을 제시함으로써 단순 이론 모델의 유용성을 보였다<sup>(4,5,6)</sup>. 또한 저더를 여러 서브 시스템에 의해서 발생하는 현상으로 보고 전달 함수를 도입하여 너클의 종방향 운동이 스티어링 휠의 회전운동과 연성되어 있음을 보였고, 콜드 저더를 저감하기 위한 방안으로 이를 비연성화시키는 방법을 제시하였고<sup>(7)</sup>, 전달계인 서스펜션 시스템의 고유 주파수를 저더 발생 주파수보다 높여주면 저더를 해결할 수 있음을 보였다<sup>(8)</sup>. 제동시 발생하는 복합적인 문제를 해결하여 승차감 및

---

<sup>†</sup> 회원, 서울대학교 기계항공공학부  
E-mail : jhkintyson@naver.com  
TEL : (02)880-7152 FAX : (02)876-9493

<sup>\*</sup> 현대모비스 응용기술연구원

<sup>\*\*</sup> 서울대학교 기계항공공학부

안정성을 확보하기 위해서는 스티어링 휠로 전달되는 진동을 전달계에서 절연 시킬 수 있는 샤시 시스템의 효율적 해석 방법 및 절차 수립이 요구된다. 본 연구에서는 차량의 단품 및 실차 시험을 통하여 해석 모델을 검증하고 검증된 해석 모델로써 BCA(Brake Corner Assembly)를 포함하는 저더 현상 해석 모델을 구성하여 제동시 전달계의 진동을 분석함으로써 전달계 특성을 파악하고 승차감을 향상 시킬 수 있는 전달계 진동 저감 방법을 확립하고자 한다. 이로써 저더 현상을 예측할 수 있는 해석을 설계 단계에서 수행함으로써 개발 기간 단축과 비용 절감에 효과적 기여하고자 한다.

## 2. 차량 해석 모델 구성<sup>(9)</sup>

### 2.1 BCA 부 모델링

제동시 브레이크 저더 해석을 위하여 BCA 모델을 구성하였다. 브레이크 모델은 대상 차량의 디스크 모델을 기본으로 하였는데, 이것은 기존의 시뮬레이션 해석 모델에 BCA 모델을 추가하여 저더 해석을 수행하기 위함이다. 브레이크 모델의 구성은 캐리어, 캘리퍼 하우징, 로터, 디스크, 피스톤, 디스크 패드로 구성되어 있다. 캘리퍼 하우징과 피스톤, 디스크와 로터는 힘요소(SForce)로 연결되어 있으며, 디스크 패드와 캐리어는 부시(bush)로, 그리고 디스크와 패드는 제동시 마찰력을 고려한 힘요소(GForce)로 연결되어 있다. Hydraulic Equation을 이용하여 피스톤에 힘을 부여하여 제동력을 표현하였다.

#### 2.1.1 DTV 모델링

제동시 브레이크 저더 진동은 디스크 편마모가 원인이 되어 발생하는 BTV 에 의해 유발된다. 브레이크 DTV 모델링을 Fig. 1 과 같이 정의하였다. DTV 의 효과를 구현하기 위하여 디스크와 패드 간 Contact (Sphere to Plane)를 정의하였으며 마찰계수는 0.4 로 하였다.

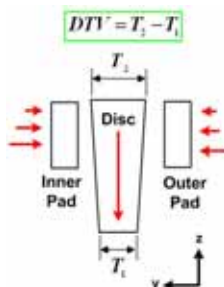


Fig. 1 Brake DTV modeling

#### 2.1.2 브레이크 유압계 모델링

브레이크 유압계는 BTV 의 정확한 모델링에

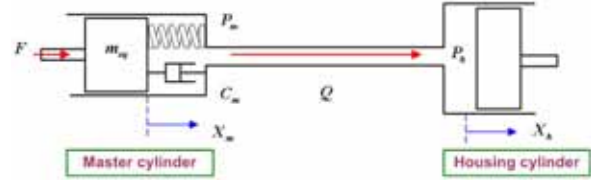


Fig. 2 Schematic of brake hydraulic part

의해 작동되므로 마스터 실린더와 하우징 실린더 간의 모델링이 필요하다. Fig. 2 는 브레이크 유압계를 나타낸다. 하우징 실린더부의 피스톤에 작용하는 압력이 제동시 사용된다. 식(1)은 마스터 실린더의 유량을 나타내고, 식(2)은 하우징 실린더의 유량 그리고 식(3)은 튜브에서의 유량을 나타낸다. 여기서,  $x_m$  은 마스터 실린더의 변위,  $P_m$  은 마스터 실린더 내의 압력,  $P_h$  는 하우징 실린더 내의 압력,  $Q$  는 유압계의 유량을 나타낸다. 각각의 수식을 MSC.ADAMS 에 Equation 으로 정의하여 입력한 수식을 식(4)에 나타내었다.

$$m_{eq}\ddot{x}_m = F - P_m A_m - k_m x_m - c_m \dot{x}_m - Q = -A_m \dot{x}_m + \frac{V_{0,m} - \Delta V_m}{\beta} \frac{dP_m}{dt} \quad (1)$$

$$Q = A_h \dot{x}_h + \frac{V_{0,h} - \Delta V_h}{\beta} \frac{dP_h}{dt} \quad (2)$$

$$Q = \text{sign}(P_m - P_h) C_d A_t \sqrt{\frac{2|P_m - P_h|}{\rho}} \quad (3)$$

$$\dot{x}_m = x_1$$

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{m_{eq}} (F - P_m A_m - k_m x_m - c_m \dot{x}_m)$$

$$\dot{P}_m = \frac{-Q + A_m \dot{x}_m}{V_{0,m} - A_m \dot{x}_m} \quad (4)$$

$$\dot{P}_h = \frac{Q - A_h \dot{x}_h}{V_{0,h} + A_h \dot{x}_h}$$

$$Q = \text{sign}(P_m - P_h) C_d A_t \sqrt{\frac{2|P_m - P_h|}{\rho}}$$

#### 2.1.3 제동압력 계산

피스톤에 제동력을 부여하기 위하여 마스터 실린더와 하우징 사이의 운동방정식을 적용하였다.

차량속도는 150 km/h, 감속조건은 0.4 G, 디스크와 패드간 마찰계수는 0.4 로 적용하여 식(5)의 제동력 F 를 실린더에 가하였다. 제동력을 스택함수 형상으로 구성하였으며, 여기서,  $P_i$  는 마스터 피스톤의 입력압력,  $A_m$  은 마스터 피스톤의 면적이다.

$$F = P_i \times A_m \times \text{step}(\text{time}, 0.1, 0, 0.3, 1) \quad (5)$$

## 2.2 BCA 부를 고려한 전차량 모델링

제동부를 현가장치와 연결하기 위하여 더미너클을 모델링 하여 BCA 부의 너클부와 고정(Fixed) 연결하였고, 휠(wheel) 과 디스크는 RSDA 를 사용하여 연결하였고 강성을 크게 주어 강건하게 모델링하였다. BCA 부의 디스크 DTV 에 의한 BTV 가 가진원이 되며, 가진은 전륜 BCA 부에만 적용이 되어 진동을 유발하게 된다.

조향/현가 시스템 및 BCA 부를 포함하는 대상 차량을 모델링 하였다. Fig. 3 은 구성된 차량의 형상을 나타낸다. 전륜 현가 장치는 맥퍼슨 현가장치이며, 후륜 현가 장치는 멀티 링크 현가장치로 구성되어 있으며, 해석을 위한 노면으로는 2 차원 평면노면(flat road)를 사용하였고, 타이어는 랜덤(random) 노면 가진에 적합한 F-Tire 를 사용하였다. BCA 부는 시험과의 비교를 위하여 전륜 부분만 구성하였으며, 속도는 150km/h 에서 50km/h 까지 0.3g 로 제동하는 모델이다. 실제 시험과 같이 제동을 하게 되면 디스크의 회전에 따라 바퀴의 회전이 종속되어 있으며, 후륜은 고정된 노면을 사용하여 해석을 수행하였다.

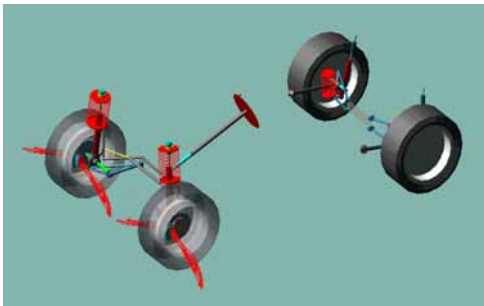


Fig. 3 Vehicle model with BCA part (MSC.ADAMS)

## 3. 저더 현상 분석을 위한 실차 시험

저더 재현 시험은 150~50 km/h 의 속도에서 0.3 G 로 제동하였으며, 브레이크 유압은 20bar, 디스크 온도는 80~200℃ 의 조건에서 시험을 수행하였다. 결과데이터로는 가속도 데이터, 차량 속도,



Fig. 4 Test setup on the brake dynamometer

ODS(operating deflection shape) 등을 측정하였다. 시험 장비는 샤시 다이내모를 사용하였으며, 1 차 order (130A) 의 가공된 디스크를 사용하여 저더 재현을 수행하였다. Fig. 4 는 브레이크 다이내모에 설치된 대상차량의 모습이다. 시험 차량은 후륜은 고정된 상태로 전륜만 롤러에 의해서 가진 되게 된다.

### 3.1 DTV 측정

DTV 측정 시스템은 Fig. 5 와 같이 디스크를 두 센서 사이에 끼워두고 디스크를 회전시키면서 측정하게 된다. 측정은 불균형 질량 등으로 인한 DTV 의 발생을 고려하여 가공하였다. 가공된 디스크 중에서 1 차는 Fig. 6 과 같이 약 30 μm 의 DTV 를 가진 디스크를 사용하였다.



Fig. 5 DTV measurement system

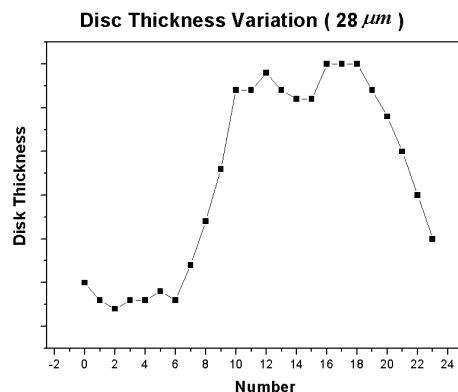


Fig. 6 DTV measurement of grinded disc

### 3.2 실차 시험 및 분석

연구 대상 차량은 시미 현상을 구현한 SUV 차량이다. Fig. 7은 시험차의 가속도 측정 지점을 도시하였다. 핸들에서의 진동 분석을 위해서 29 채널 즉, 28 채널은 가속도를 측정하였고, 1 채널은 Tachometer 에서 rpm 을 측정하였다. 가속도계 ④, ⑥, ⑩, ⑫는 1 축 가속도계를 사용하였고, ①, ②, ③, ⑤, ⑦, ⑧, ⑨, ⑪ 은 3 축 가속도계를 사용하였다. Fig. 8은 RWT (Rotating Wheel Torquemeter)가 타이어에 장착된 모습을 나타내며, 이것은 휠에 토크를 측정하게 된다.

1 차 DTV 에 의한 차량의 왼쪽 BCA 부의 BTV 를 시간영역에 대하여 진폭을 측정하였다. 제동초기에 비하여 제동말기로 갈수록 브레이크 토크가 증가하지만 진폭은 작아지는 경향이 나타남을 확인할 수 있다.

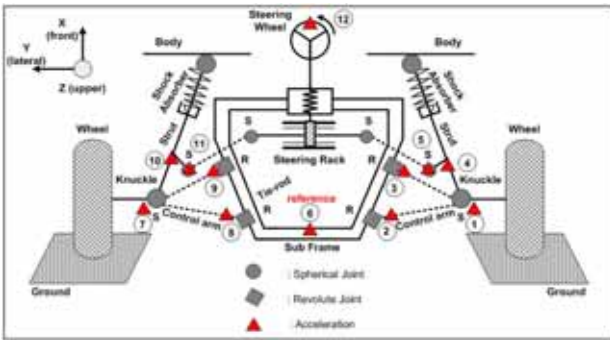


Fig. 7 Acceleration measuring points



Fig. 8 Rotating Wheel Torquemeter (RWT)

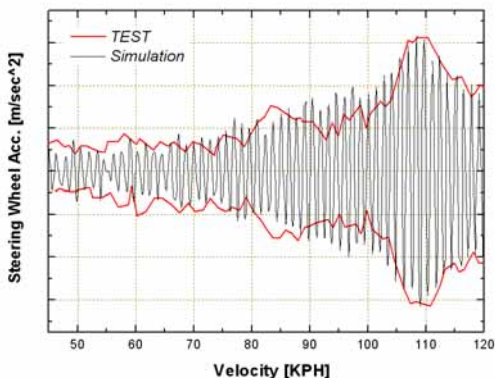


Fig. 9 Steering wheel acceleration using 1<sup>st</sup> order DTV

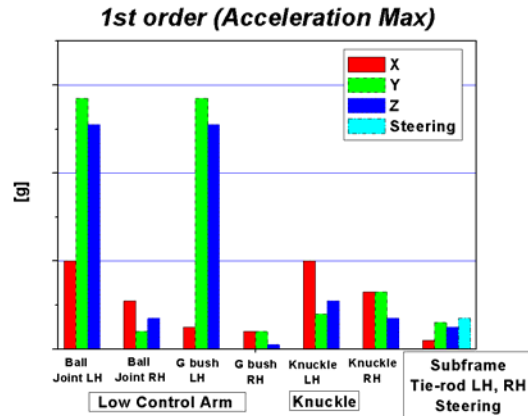


Fig. 10 Comparison of transfer function using 1<sup>st</sup> order DTV

Fig. 9는 스티어링 휠에서의 시간영역의 결과이다. 110 km/h 에서 저더현상으로 인한 피크치가 최대로 발생하는 것을 확인할 수 있다. 발생 주파수 영역이 대략 13~15 Hz 근처에서 존재하였다.

1 차 DTV 를 사용하였을 때 140~50 km/h 의 속도대역에서 가장 큰 값을 g 로 나타내었다. 이 결과를 이용하여 Fig. 10 에 도시하였다. 볼 조인트 왼쪽과 오른쪽을 비교해 보면 가진이 되고 있는 부분인 왼쪽의 BCA 부의 전달함수 값이 상대적으로 크게 나타나며, y 축 방향의 값이 크게 나타났다. 이는 G bush 에서도 y 축 방향의 거동을 크게 하였으며, 너클에서는 x 축 방향의 움직임을 크게 하여 스티어링 휠의 진동에 큰 영향을 주었다. 즉, 스티어링으로 가는 진동의 전달함수를 보면 G bush 를 기준점으로 하는 회전운동으로 인한 진동의 전달과정임을 명확히 확인할 수 있다.

## 4. 수치 해석 시뮬레이션

### 4.1 차량 시미 모델 최적화

사시 다이내모를 이용하여 시미 재현 시험을 수행하여 115 km/h 속도에서 15 Hz의 시미 현상이 발생함을 Fig. 11 (a)와 같이 확인<sup>(11)</sup>할 수 있었다. Fig. 11 (b)는 MSC.ADAMS/Linear 를 이용하여 주행모드를 도출한 결과 14.72 Hz 에서 좌우측 차륜이 반대 방향으로 움직이면서 종방향 운동을 하는 모드가 시미의 주된 요인임을 확인함으로써 시험과 해석의 결과가 잘 일치함을 확인하였다.

시미 차량 모델에서 BCA 부분을 추가하여 저더 차량 모델을 구성하였다. 그러므로 시미 차량 모델의 최적화를 수행하여 구하여진 설계 파라미터들의 민감도를 저더 차량 모델에 이용하기 위하여 MSC.ADAMS 의 최적화 방법(optimization)을 이용



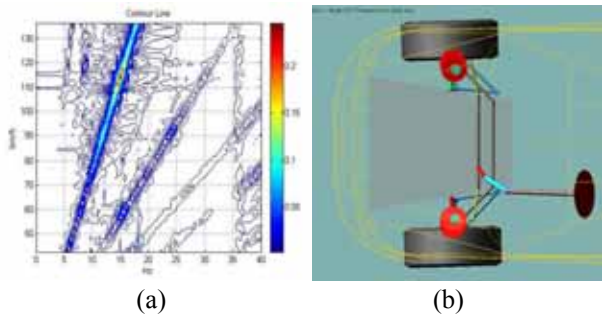


Fig. 11 Correlation of shimmy phenomenon: (a) test, (b) MSC.ADAMS simulation

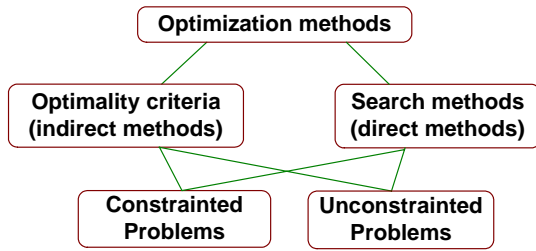


Fig. 12 MSC.ADAMS optimization method

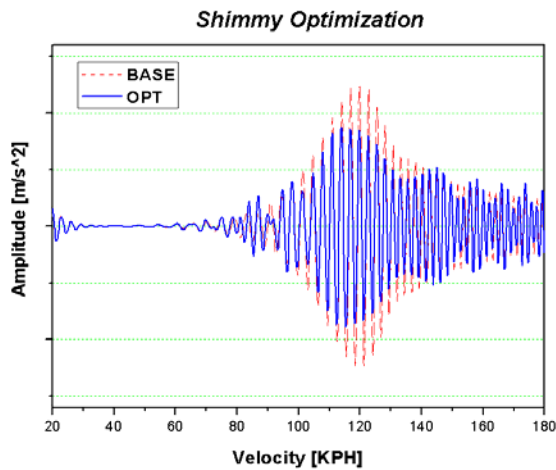


Fig. 13 Optimization results of the steering wheel

하여 해석하였다. 기존에 시미 모델에서 다루었던 다구찌 방법도 유용<sup>(10,11)</sup>하였으나 실제 스티어링 진동의 개선이 효과적이지 못하였으며, 실제에 적용하여 사용하기에도 쉽지 않다. MSC.ADAMS<sup>(12)</sup>를 이용한 최적화 방법은 작업의 효율성, 多설계 변수이면서 적은 시뮬레이션을 할 수 있는 방법이라 하겠다. Fig. 11은 MSC.ADAMS 최적화 방법을 도시하였다. 최적화 방법은 간접적인 방법인 최적성 기준과 직접적인 방법인 탐색 방법이 있다. 이런 두 방법은 제약문제와 비제약문제로 구분할 수 있다.

MSC.ADAMS에서 사용할 수 있는 알고리즘 종류는 5 가지이며, 대상차량의 최적화에 사용한 방법은 OPTDES-SQP이다. 이 방법은 순차적 이차

계획법(SQP)으로 기존에 많이 알려져 있는 바와 같이 SLP는 설계변수는 탐색방향과 이동거리로 분할하고 목적함수와 제약조건은 선형테일러 급수로 전개하여 수렴 속도가 매우 늦으며, 수렴의 강건성이 보장되지 않는다. 반면에 SQP는 선형 근사화를 2차 근사화까지 확장하여 수렴속도를 증가시킨 방법이라 할 수 있겠다. 대상차량의 최적화에서 설계 변수와 수준을 6개의 강성과 2개의 Hard-points로 결정하였다. Fig. 12에 이들 설계변수에 대해 조향계에서 약 28% 개선이 가능함을 보여주고 있다.

### 5. 저더 저감을 위한 설계 변경 방안

저더현상에 의한 진동저감을 위해 Table 1과 같이 파라미터 해석을 수행하였다. 시미현상 해석시 사용하였던 다구찌 방법을 이용한 최적조합의 결과, MSC.ADAMS를 이용한 최적화 결과와 6개의 Hardpoints를 결정하고 설계변수로 설정하였다.

Table 1 Parameter study for judder vibration reduction (⊙ = strong, O = normal, x = none)

#	Design Variables	LIARM A bush			LIARM G bush			Strut bush			Tire SPP	LIARM A pt X	LIARM G pt X	STRUT G pt Y	G bush Axial	Tie rod pt X	LCA Middle Bush	Effect	
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z									
1	시미 설계 조건	↑	↑	--	↑	↑	--	--	--	↓					Z → Y			○	
2	MSC ADAMS 설계 조건											Back	Front						X
3	#2 = LIARM Middle Bush											Back	Front						X
4	#2 = LIARM Middle Bush + G bush Move											Back	Back					Add	X
5	#2 = LIARM Middle Bush + G bush Move + Tie rod pt move (back)											Back	Back			Back	Add	○	
6	#2 = LIARM Middle Bush + G bush Move + Tie rod pt move (front)											Back	Back			Front	Add	⊙	
7	#2 = Tie rod pt move (back)											Back	Front			Back		○	
8	#2 = G bush Move + Tie rod pt move (front)											Back	Back			Front		⊙	

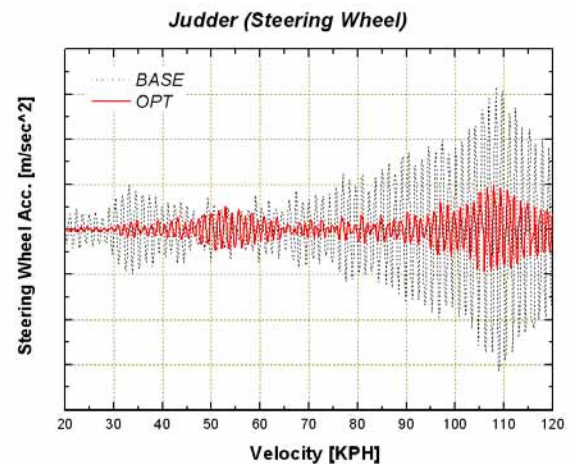


Fig. 14 Steering wheel acceleration of judder analysis

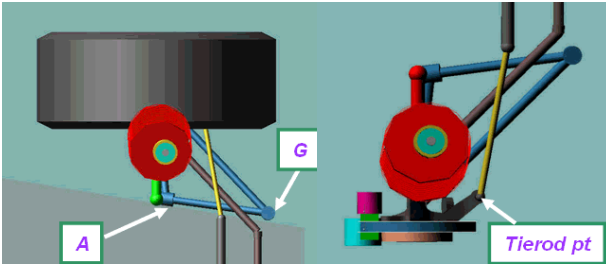


Fig. 15 Suspension modification part for judder analysis

먼저 대상 차량의 모델링을 이용하여 저더 해석을 수행하여 Fig. 14의 BASE 결과를 얻었다. 이 결과는 Fig. 9에서 시험결과와 동일한 진폭 값과 속도 대역을 보였다. 파라미터 해석을 수행한 결과 Fig. 14와 같이 관심속도 대역에서의 진동가속도를 상당히 감소시킬 수 있었으며, 전체적으로도 좋은 결과를 도출할 수 있을 것이라 예측할 수 있었다. 또 주파수 영역에서는 10dB 정도의 진폭 저감효과를 볼 수 있을 것으로 사료된다.

최적의 파라미터 해석 결과를 분석해 보면 저더 현상에 영향을 미치는 전달계의 요소는 여러 가지가 존재하지만 그 중에서도 Fig. 15의 A 부시와 G 부시의 위치는 후방으로 조절하고, 직접적으로 스티어링 랙(steering rack)을 가진하는 부분인 타이로드와 너클의 결합부는 전방으로의 적절한 조절이 진동저감에 상당히 중요한 인자이며 전달계의 설계시 중요하게 고려되어야 한다는 것을 알 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 시뮬레이션 모델을 시험과 검증한 후 BCA 부를 전문 평가 장치에 추가 하여 다물체 동역학 프로그램을 이용하여 저더 해석을 수행하였다. 또한 디스크에 다양한 두께 변화를 주어 샤시 다이내모를 사용하여 저더 현상을 체계적으로 발생시킬 수 있었고, 전달 경로를 시험을 통하여 확인하였다. 저더 현상시 제동압력변화를 예측하였고, 실험 결과에 근접한 값을 확인하였다. BTV 생성에 의한 서브시스템의 거동 및 전달함수 분석을 통하여 설계인자를 도출하였고, 전달계의 파라미터 해석을 통하여 개발된 모델이 저더에 의한 조향 휠의 진동 개선에 효과적임을 보였다. 차후 해석모델의 신뢰성 보완이 필요하다.

## 후 기

본 연구는 현대모비스(주)가 지원한 산학과의

연구비 지원에 의해 수행된 연구의 일부로 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참고문헌

- (1) De Vries, A. and Wag, M., 1992, "The Brake Judder Phenomenon," *SAE 920554(SP-914)*, SAE International Congress and Exposition, Detroit, pp 25-33.
- (2) Haigh, M. J., Smales, H. and Abe, M., 1993, "Vehicle Judder under Dynamic Braking Caused by Disc Thickness Variation, Braking of Road Vehicles," *IMEchE Conference*, C444/022/93, pp.247-258.
- (3) M. G. Kim, H. I. Jeong and W. S. Yoo, 1996, "Sensitivity Analysis of Chassis System to Improve Shimmy and Brake Judder Vibration on Steering Wheel," *SAE 960734*, pp.59-70.
- (4) Jacobsson, H., 1996, "High Speed Disc Brake Judder - The Influence of Passing through Critical Speed," *Proceedings of EUROMECH, 2<sup>nd</sup> European Nonlinear Oscillations Conference*, pp. 75-78.
- (5) Jacobsson, H., 1997, "Wheel Suspension Related Disc Brake Judder," *Proceedings of the 1997 Design Engineering Technical Conference*, DETC97/VIB-4165.
- (6) Jacobsson, H., 1999, "Analysis of Brake Judder by Use of Amplitude Functions," *Proceedings of the 1999 SAE Noise and Vibration Conference*, 1999-01-1779, pp. 989-1002.
- (7) Gassmann, S. and Engel, H. G., 1993, "Excitation and Transfer Mechanism of Brake Judder," *7<sup>th</sup> Int. Pacific Conference and Exposition on Automotive Engineering*, Phoenix AR, *SAE 931880*, November, pp. 1-11.
- (8) Engel, H. G., Hassiotis, V. and Tiemann, R., 1994, "System Approach to Brake Judder," *SAE 945041*.
- (9) Kyongtae Kye, Seungryul Choi, Youngjun Kim, Soonjo Park, 2006, "Brake Judder Analysis," *KSAE 2006 Spring Conference*, pp. 965-970.
- (10) Madhav S. Phadke, 1989, "Quality Engineering using Robust Design," *Prentice Hall*.
- (11) Junghoon Kim, Howon Lee, Jangmoo Lee, Dongho Yoo, 2005, "Vibration Analysis of Steering System for Shimmy Reduction," *KSAE 2005 Spring Conference*, pp. 1108-1116.
- (12) ADAMS User' Manual, Mechanical Dynamics Inc., May, 1994.