

브레이크 저더에 대한 전달계 민감도 해석

Sensitivity Analysis of Transfer Mechanism to Brake Judder

심경석* · 박태원†

Kyung-Seok Sim and Tae-Won Park

Key Words : Brake Judder(브레이크 저더), Transfer Mechanism(전달계), Sensitivity Analysis(민감도 분석)

ABSTRACT

The abnormal vibration from the BTV(Brake Torque Variation) and DTV(Disc Thickness Variation) is transferred to the suspension and steering system during braking.

In this paper, judder simulation is carried out using multi-body dynamic analysis program to analyze the relation of the judder and transfer mechanism which is composed of the suspension and steering system. In order to analyze the brake judder transfer system, the full vehicle model was composed with rigid body, non-linear bushing, non-linear constraints and joints. Full vehicle model analysis was compared by actual vehicle judder test and sensitivity analysis of the suspension system is carried out.

1. 서 론

고속 주행 중 제동 시 발생하는 저더는 디스크 두께 변화(DTV, Disc Thickness Variation)가 브레이크 토크 변화(BTV, Brake Torque Variation)를 유발하여 현가계와 조향계로 전달된다. 이는 운전자에게 커다란 불쾌감을 줄 뿐 아니라 조향 시스템의 안정성에도 큰 문제를 끼칠 수 있다.

저더 개선은 크게 두 방향으로 제시되는데 브레이크 자체 저더 개선으로 DTV 를 개선하는 방법과 현가 장치 및 조향 장치의 저더 전달 경로를 절연하기 위한 개선이 있다.

CAE 기술이 발달 되면서 1990 년대 이후부터는 브레이크 자체 개선 보다는 저더 전달 경로의 해석과 개선이 활발히 이루어 지고 있다. 이를 위한 방법으로 브레이크 저더의 메커니즘을 확인하기 위해 차량의 부품간 연성효과를 비교하고 너클, 타이로드, 조향 휠 등에서의 가진 특성

을 비교하는 실험이 이루어 지고 있으며, 차량동역학 모델을 이용한 저더 전달계 영향 인자를 제시하고 있다.

신범식⁽¹⁾은 디스크 런아웃에 의한 가진이 발생하고 차량 특정 부품에서의 공진 유발 가능성 및 브레이크 설계변수와의 영향 정도를 연구하였고, 특정 설계 변수에서의 응답과 영향 정도를 파악하였다. Lijun Zhang⁽²⁾은 디스크에 발생하는 온도, 마찰, 기계적 효과를 상세 모델링하여 브레이크를 생성하고 실험과 매우 유사한 BTV 결과를 산출하였다. 이를 동역학 프로그램을 이용한 저더 전달계 진동 현상을 조향 휠에서 가속도 변화로 측정하였다. Stefan Gassmann⁽³⁾은 저더 전달계 영향 정도를 측정하기 위한 실차 테스트 방법을 제시하였고 전문 현가계에 전달된 진동 특성을 분석하여 저더 현상을 해석하였다. 이재섭⁽⁴⁾은 저더 현상에서 발생하는 저더를 조향 휠에서의 진동 현상을 분석하고 프레임에서의 고유진동수를 확인하였다. 지영춘⁽⁵⁾은 차량 모델링의 진동 모드 해석 및 강제 진동 해석을 수행하여 시스템의 진동 특성을 분석하고, 수립된 해석 모델과 시험 결과를 비교하여 저더 전달계를 분석하였다. 황인진⁽⁶⁾는 새시 시스템의 진동 절연 성능을 향상시키기 위해 새시를 포함한 전문 차량 모델을 생성하고, 시스템 모드 분석을 통한

† 교신저자; 정회원, 아주대학교 기계공학부

E-mail : park@ajou.ac.kr

Tel : (031) 219-2952, Fax (031) 219-1965

* 아주대학교 기계공학과

민감도 해석을 통해 저더 저감 개선 방안을 도출하였다. 주로 저더 원인계에서 저더를 해석적으로 접근하였으며, 저더 전달계의 고유주파수를 변경하여 저더 개선 방향을 도출하였다. 제동 시 발생하는 저더 현상을 절연시키기 위해서는 조향 휠로 전달되는 저더 전달계의 절연 인자에 대한 효율적인 해석 방법 및 저더 전달계의 상세 모델이 필요하다.

본 연구에서는 디스크 브레이크 시스템을 장착한 차량을 대상으로 맥퍼슨 타입(McPherson Strut Type)의 전륜 현가계, CTBA(Coupled Torsion Beam Axle)의 후륜 현가계를 다물체 동역학 프로그램으로 모델링 하였으며, 저더 전달계를 분석하기 위하여 현가 장치의 부시 및 댐퍼 모델, 조향 장치의 기어 박스 등 중요 부품을 상세 모델링 하였다. 저더 전달 경로를 해석하기 위한 주행 제동 해석을 통해 부품에서 발생하는 이상 진동을 확인하였다. 시험결과와 비교하여 수립된 해석 모델이 저더 전달계를 분석하는데 활용될 수 있음을 증명하였고, 현가계 주요 연결인자를 선정하여 저더 전달계 민감도 분석을 하였다.

2. 동역학 해석 모델

2.1 전체 차량 모델링

브레이크에서 전달되는 진동 경로를 모사하기 위하여 차량 동역학 수치해석 모델을 개발하였다. 전, 후륜 현가계 및 조향계의 설계 데이터 정보를 바탕으로 다물체 동역학 해석 프로그램에서 수치 모델을 개발하였다. 부품간 구속조건은 실제 차량에 적용되는 구속 관계를 기본으로 하였으며, 부품간 연결 요소는 상용 프로그램에서 기본 제공되는 조인트 요소와 부시 상세 모델로 적용하였다. Fig. 1 은 모델링 된 전체 차량 모델로써 전륜 현가장치는 McPherson Strut Type)으로 모델링 하였으며 후륜 현가장치는 CTBA(Coupled Torsion Beam Axle)로 모델링 하였다.

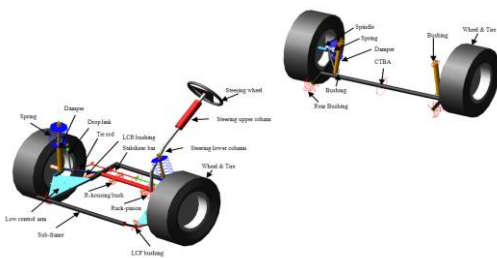


Fig. 1 Full car dynamic analysis model

Table 1 Degree of Freedom of the model

| Item | D.O.F |
|-----------------------------------|-------|
| Moving Part(not including ground) | 36 |
| Revolute Joints | 10 |
| Spherical Joints | 6 |
| Translational Joints | 6 |
| Fixed Joints | 5 |
| Hooke Joints | 6 |
| Couplers | 3 |
| Total Degree of Freedom | 61 |

조향 시스템을 연결하여 차량 주행제동 시 발생하는 진동 경로를 조향 휠까지 전달 될 수 있도록 저더 전달 경로의 부품간 요소를 모델링 하였다.

Full Car 동역학 수치해석 모델에 대한 전체 자유도는 Table 1 에 나타내었다.

2.2 부시 모델링

대부분의 차량의 현가장치에서는 승차감 향상을 위하여 부시를 사용한다. 고무 부시는 감쇠 효과과 제조상의 오차를 보정하기 위하여 현가장치에 적용된다. 따라서 부시 요소의 정규화와 설계 기준이 차량 현가 장치의 성능 특성 관점에서 고려되어야 한다.

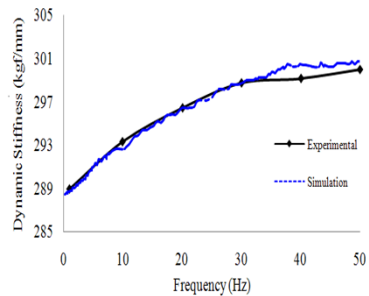


Fig. 2 Frequency dependant dynamic stiffness

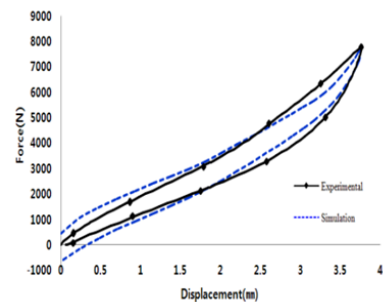


Fig. 3 Hysteresis characteristic

부시 동특성은 크게 3가지로 분류된다. 강성이 변위에 따라 변하는 비선형 특성(Non-linear static stiffness), 강성이 가진 주파수에 변하는 특성(Frequency dependant dynamic stiffness)과 이력 특성(Hysteresis characteristics)으로 분류된다.

실제 차량에 장착되는 부시의 동특성을 모델링 상에 구현하기 위하여 부시 시험 데이터가 적용되었다. 부시 시험은 부시의 축 방향과 반경 방향의 두 방향을 일정 힘으로 누름으로 부시의 비선형 특성을 구하였고, 일정 주파수로 가진한 주파수 가변 동특성을 구하였다. 부시 특성을 구한 결과를 이용하여 동역학 수치모델에 적용하였다.

정강성을 구하여 중간 점을 잇는 부분을 Spline curve 형태로 구현하였다.

2.3 댐퍼 모델링

댐퍼는 스프링과 함께 스프링 상부질량을 지지하는 요소로서 노면에서 전달되는 충격을 감쇠 절연하여주는 역할을 한다. 댐퍼는 피스톤과 실린더로 구성되어 있고 내부에는 유체가 봉입되어 있어 피스톤과 실린더의 상대운동 시 그 움직임을 감쇠시키는 역할을 한다. Shock absorber에 적용시킨 댐퍼는 속도와 힘의 함수로 표현되며, 실험값에 의한 DATA를 적용하였다. 댐퍼에 작용하는 힘의 전형적인 특성은 인장력과 압축력으로 구분된다. 인장력에 대한 속도와 압축력에 대한 속도는 식(1)과 같다.

$$V_E = \frac{dL}{dT} \quad , \quad V_C = -\frac{dL}{dT} \quad (1)$$

여기서 V_E 는 Damper extension velocity이고, V_C 는 Compression velocity이다. 댐퍼 모델은 Piston과 Base shell의 이동 거리(Total Distance)에 시간(time)에 대한 수치 모델로 적용하였다.

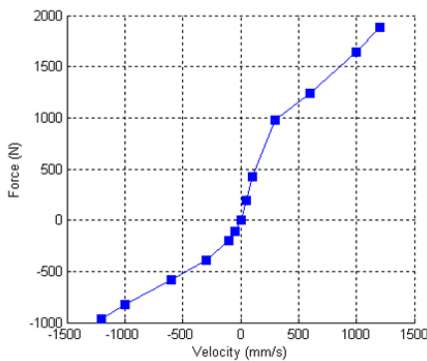


Fig. 4 Input spline curve data

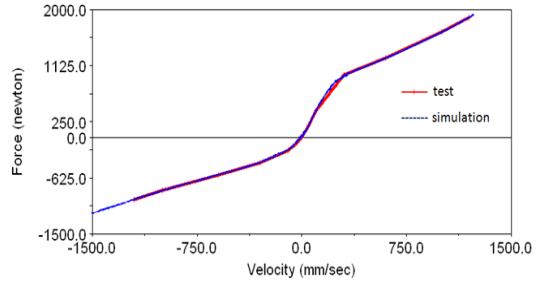


Fig. 5 Comparison of the damper test and simulation

Fig. 4와 같이 속도에 대한 힘의 요소로 입력하였고 스플라인 커브로 표현하였다.

해석 모델 데이터를 검증하기 위하여 댐퍼 단일 모델을 구현하여 실험 데이터와 비교하였다. Fig. 5는 댐퍼 해석 모델의 감쇠 특성을 보여준다. 시뮬레이션 결과 그래프를 통하여 댐퍼의 동특성 입력 속도와 현재의 상태가 압축 상태, 인장 상태에 따라 변화하는 것을 확인할 수 있다.

2.4 랙-피니언 모델링

저더 전달계 진동을 고려하기 위하여 Backlash 효과를 구현하였다. Rack의 이동 거리와 Pinion의 회전 각도를 고려하여 실제 Rack-Pinion 구속 관계를 고려하여 저더에 의한 조향휠 전달 경로를 효과적으로 표현하였다.

Impact 함수의 정의는 Action Part와 Reaction Part 거리에 대한 힘 요소의 표현식이다. 기본적으로 Impact는 충돌에 의한 식으로 표현된다. Rack 기어와 Pinion 기어의 상대 운동에 대한 거동으로 동일 접촉점에서 연속 효과를 유지하여 기어 박스의 Rack-Pinion 모델을 구현 할 수 있다.

CGR(Constant gear ratio)를 적용하여 Rack 기어의 직선 거동과 Pinion 기어의 회전 거동을 Fig. 6과 같이 표현하였다.

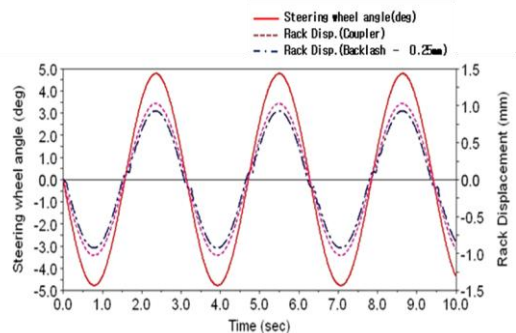


Fig. 6 Rack displacement versus steering wheel angle

3. 시뮬레이션

3.1 Modal Analysis

모델링 한 전체 차량을 정적 모드 해석을 수행하였다. 차량에 대한 Pitch, Roll, Yaw 등의 모드는 1~2Hz 내에서 해석되었으며, 전륜계 모드에 대한 주요 모드 해석 결과는 Fig. 7으로 나타내었다.

제동에 의해 브레이크에서 발생하는 진동은 차량 전륜 모드와 중첩되면서 현가계, 조향계를 거쳐 운전자에게 전달된다. 저더는 브레이크 토크 변화에 의해 발생하며 모드 해석 경로가 전륜계 모드 결과와 브레이크 저더 주파수 10~20Hz가 유사한 범위에서 일치함을 확인 할 수 있다.

3.2 저더 시뮬레이션

실차 실험을 통한 동역학 모델 시뮬레이션 저더 현상을 비교하였다. 실차 실험은 최대 속도 180km/h까지 속도 상승 후 70 km/h까지 제동력을 가하였다. 그 때 발생하는 브레이크 저더에 의해 현가장치와 조향장치의 부품들이 저더 전달 경로를 통해 진동이 전달된다. 실차 차속 실험 조건과 실험 결과는 Fig. 8 으로 나타내었다.

실차 실험을 통한 동역학 모델 시뮬레이션 저더 현상을 실험에서 가속도를 측정하여 진동 현상을 확인 하였다. 저더 전달 경로의 대표적인 위치로 타이로드, 랙 하우징, 조향 휠 등에서 측정하였고 측정 위치에 가속도 센서를 부착하여 횡가속도를 측정하였다. 감속 조건은 0.2g로 감속하였다. Full Car 모델에 브레이크 진동 현상을 적용하여 제동 시 가진원을 가정하였다. 그 때 발생하는 브레이크 저더에 의해 조향휠 가속도 측정결과를 Fig. 9 에 나타내었다.

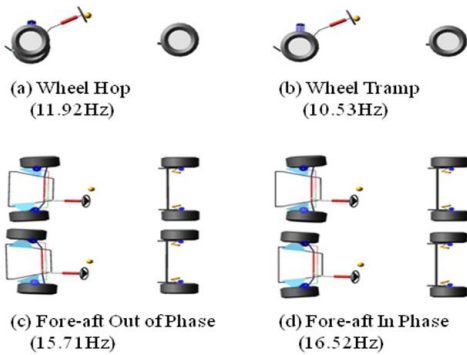


Fig. 7 Modal analysis results of the front suspension

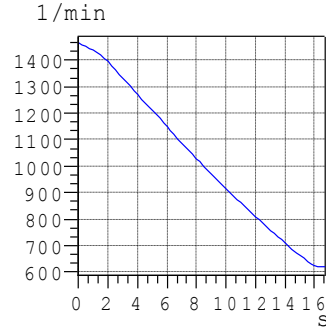


Fig. 8 Vehicle speed test condition

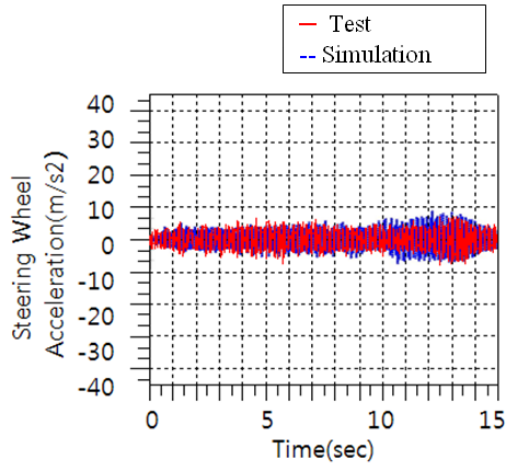


Fig. 9 steering wheel acc. test and simulation result

4. 민감도 분석

3.1 민감도 분석

저더 전달 경로에서 전륜 Lower Arm 의 G부시 강성, G부시 장착 각도, 랙 하우징 마운팅 강성을 대상으로 구체적인 부시 모델링을 구현하고 그 외 A부시와 댐퍼, 스프링을 대상으로 총 6개의 설계 인자를 선택하였다.

실험 계획법으로는 Plackett-Burman design table을 적용하여 실험을 진행하였다. 목적 함수로는 브레이크에서 전달된 진동 특성을 조향 휠에서 횡방향 가속도 RMS를 선정하였다. 차량의 현가장치 좌, 우 대칭이라는 점을 고려하여 설계 인자에 해당하는 값들을 동일하게 적용하였다.

해석 대상이 되는 요인의 수준은 2수준으로 채택하고 설계 변수에 대한 수준의 최소, 최대값은 실제 적용된 부품의 실험을 통해 얻어낸 측정값을 적용하였다. 이 점에 대하여 모델링 상에서는 강성의 비선형성을 고려하였다. Table 2 는 설계 변수 및 수준

을 나타낸다.

Plattkett-Burman design table을 이용하여 실험 계획과 각 실험에 따른 결과 값으로 **Table 3** 과 같다. 각 설계 변수는 DV(Design Variable)로 명명하였으며, 각 설계변수에 해당하는 민감도 분석 결과를 표기하였다. 표에서 각 설계 변수의 값 중 '+1'은 설계 변수 내에서 최대값을 의미하며, '-1'은 최소값을 의미한다. 6개의 설계 변수에 대하여 실험은 총 8번을 수행하였다. 비교 대상이 된 실험의 결과 값은 시뮬레이션 상에서 측정된 조향-휠의 횡방향 가속도 RMS이다.

실험 결과를 통하여 2수준 실험 결과로부터 예측할 수 있는 다항식 형태의 반응 함수의 계수를 추정하였다.

추정된 반응 함수를 토대로 현가계 진동 전달에 미치는 정도를 확인하였고 부품별 민감도 정도를 확인하였다.

민감도 해석 결과 브레이크 모듈에서 발생한 저주파수의 진동에 대하여 전륜 Lower Arm G부시의 경도와 랙 하우징 마운팅 부시 경도, A부시 경도, 댐퍼의 민감도가 상당히 높으며 비교적 G부시 장착 각도, 스프링은 진동 민감도가 작다.

Table 2 Design variable for sensitivity analysis

| Design Variable | Factor | Level | |
|-----------------|--------------------|---------|---------|
| | | Min(-1) | Max(+1) |
| DV1 | G부시 경도 | 60 | 70 |
| DV2 | G부시 장착각도 (deg) | 20 | 40 |
| DV3 | 랙 하우징 마운팅 경도 | 70 | 90 |
| DV4 | A부시 경도 | 70 | 90 |
| DV5 | Spring 강성 (kgf/mm) | 2.25 | 2.75 |
| DV6 | Damper (Ns/mm) | -10% | +10% |

Table 3 Plattkett-Burman design table and result

| Row | DV1 | DV2 | DV3 | DV4 | DV5 | DV6 | Result (mm/s^2) |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------------------|
| 1 | +1 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | 3234 |
| 2 | -1 | +1 | +1 | +1 | -1 | +1 | 3042 |
| 3 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | -1 | 3176 |
| 4 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | 2992 |
| 5 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | 3694 |
| 6 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | 3093 |
| 7 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | 3249 |
| 8 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 3694 |

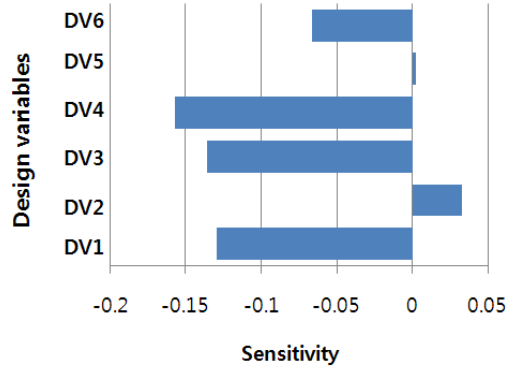


Fig. 9 Sensitivity analysis of the suspension system

주로 진동 전달에 있어 감쇠항목이 포함된 모델링의 효과와 진동 저감 효과를 구현할 수 있을 것으로 보이며 최적화 수행으로 설계인자별 최적 값을 찾기 위한 과정에서 민감도 해석 및 전달계 특성을 파악하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 다물체 동역학 해석 프로그램을 이용한 Full car 수치모델을 개발하였다. 또한 개발된 모델을 이용하여 가상시뮬레이션 상에서 브레이크 저더 현상에 대한 해석을 수행하였다. 실차 저더 테스트와 비교하여 개발된 수치모델 타당성을 검증하였으며 저더 현상이 전달되는 저더 전달계 진동 특성을 확인하였다.

저더 전달계에서 전륜계의 주요 연결 요소인 부시, 댐퍼, 스프링을 주요 설계 변수로 선정하여 민감도 분석을 수행하였다. 그 결과 부시, 댐퍼에서 저더에 민감한 요소로 확인 되었고 스프링과 부시 장착 각도는 부시, 댐퍼보다 민감성이 덜 한 것으로 확인되었다.

동역학 해석을 통한 브레이크 저더 전달계 연구 결과 브레이크 저더 진동을 저감할 수 있는 지배요인을 찾을 수 있었다.

후 기

본 연구는 자동차 부품 연구원 주관의 부품. 소재 신뢰성 기반기술 확산사업의 일환으로 시행된 제동 성능 예측을 위한 신뢰성 확보 과제를 기반으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사의 말씀을 전합니다.

참 고 문 헌

(1) Shin, B. S. and Choi, Y. S., 2006, Brake Judder due to Disc Run-out, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 223~228.

(2) Zhang, L. Ning G. and Yu Z., 2007, Brake Judder Induced Steering Wheel Vibration: Experiment, Simulation and Analysis, SAE, 2007-01-3966.

(3) Gassmann, S. and Engel, H. G., Excitation and Transfer Mechanism of Brake Judder, SAE 931880.

(4) Lee, K. S. Suh, K. H. Kuk, J. Y. and Chyun, I. B., 2001, Analytical Study in Brake Judder Reduction of Medium Bus, Transactions of the KSAE. Vol. 9, No.4, pp. 148~156.

(5) Ji, Y. C. Chung, I. S. Jeon, N. I. Yoon, K. H. Shim, J. S. and Choi, S. R., 2002, Vehicle Dynamic Modeling and Validation for Brake Judder Analysis, Proceedings of the KSAE Annual Autumn Conference, 483~488.

(6) Hwang, I. J. and Park, G. J., 2005, System Mode and Sensitivity Analysis for Brake Judder Reduction, Transactions of KSAE. Vol. 13, No. 6, pp. 142~153.