

# 부싱의 동특성을 고려한 전달계 민감도 해석

## Sensitivity Analysis of Transfer Mechanism Considering Dynamic Characteristics of a Bushing

\*이진희<sup>1</sup>, #박태원<sup>2</sup>, 정성필<sup>1</sup>

\*J. H. Lee<sup>1</sup>, #T. W. Park(park@ajou.ac.kr)<sup>2</sup>, S. P. Jung<sup>1</sup>

<sup>1</sup>아주대학교 기계공학과, <sup>2</sup>아주대학교 기계공학부

Key words : Sensitivity Analysis, Transfer Mechanism, Bushing, Brake Judder

### 1. 서론

차량의 주행 시 잦은 제동 또는 급격한 제동은 저더(Judder) 등의 진동, 소음 문제를 발생시킬 수 있다. 특히, 브레이크 저더 현상에 의해 발생한 진동은 현가계, 조향계 등의 전달매체를 경유하여 스티어링 휠의 회전 방향진동(nibble)과 진후 방향진동(shake) 및 브레이크 페달의 맥동(pulsation)이 수반되는 진동을 발생시킨다 [1]. 브레이크 시스템에서 발생하는 이러한 이상 진동은 운전자에게 커다란 불쾌감을 줄 뿐만 아니라 공진의 발생 시 차량의 현가 및 조향장치에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 따라서 브레이크 저더는 차량 개발에 있어서 반드시 평가, 개선되어야 하는 사항이다.

제동 시 발생하는 저더를 개선하는 방법은 디스크의 가공 정밀도 향상, 패드 마찰계 개선 등 모듈 자체의 성능 개선하는 방법이 있으며, 또한 현가계 및 조향계의 고유 진동수가 저더의 발생 주파수와 다른 영역을 갖도록 전달계의 동특성을 설정하는 방법이 있다.

본 논문에서는 차량에서 발생한 진동이 절연부를 통하여 전달되는 전달력을 파악하기 위하여 수치 모델을 개발하고 특성분석을 목표로 전달력이 차체 진동에 미치는 영향을 분석한다. 특히 부싱 강성의 변화에 따른 민감도 해석을 수행함으로써 그 영향력을 분석하였다 [2]. 이와 같은 성능평가와 그에 기인한 설계 개선이 가상환경에서 수행되어지고 이를 초기 설계에 이용할 수 있다면 승차감과 진동 수준 향상에 기여할 것으로 기대된다.

### 2. 전달계 모델링

브레이크 저더의 전달력 해석을 위하여 현가 및 조향장치에 대한 모델링이 수행되었다. 모델링은 다물체 동역학 해석 프로그램을 이용하여 수행되었으며 각 파트는 강체로 가정하였다. 차량의 전륜 현가계는 맥퍼슨 스트럿 타입이며 각 파트는 실차와 동일한 조건으로서 조인트로 구속되거나, 스프링, 댐퍼, 부싱 등의 힘 요소로 연결되었다. 시스템 전체 모델은 27개의 파트로 구성되어 있으며 각 부분에 대한 치수 및 물성치는 설계단계에서 확보한 실제 수치들이 적용되었다. 각 파트에 관한 브레이크 저더 전달계의 해석은 저더에 직접적인 영향을 받는 전륜 현가장치를 대상으로 수행하였다. 해석 모델은 Fig. 1과 같다.

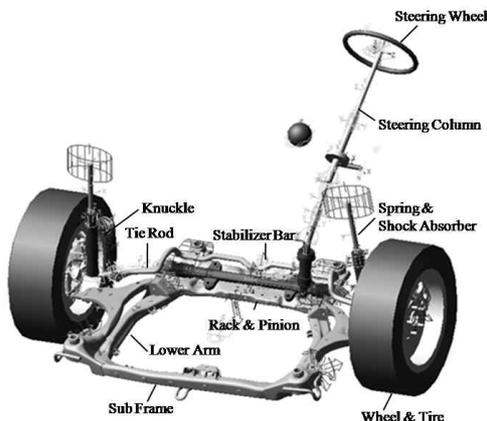


Fig. 1 Vehicle Multibody Dynamic Model

### 3. 부싱 동특성 모델링

해석 모델 상에서 현가 및 조향장치의 각 파트를 연결하는 조인트는 이상적인 조인트로 가정할 수 있다. 하지만 실제 차량의 각 단품은 볼 베어링, 부싱 등 비선형 특성을 포함하고 있는 요소들로 구속되어 있다. 특히, 부싱은 고무, 우레탄 등의 물질로 구성되어 있어 점탄성 거동을 보이게 된다. 이러한 부싱은 차체를 지지하거나 각 단품간의 상대운동을 구속하는 역할을 하기 때문에 차량의 승차감, 주행 안정성 등에 결정적인 영향을 미치게 된다. 따라서 진동의 전달계로서 차량을 보다 정확하게 해석하기 위해서는 부싱 요소의 세부적인 모델링이 수반되어야 한다. 특히 부싱은 저더와 같은 저주파 진동에 영향을 주기 때문에 이러한 동특성을 고려할 수 있는 모델이 필요하다. 본 논문에서는 부싱의 변위에 대한 강성의 비선형 특성과 주파수 가변 특성을 고려하였다. 강성의 비선형성은 부싱 시험 데이터에서 추출한 변위 대 강성의 곡선을 다물체 동역학 해석 프로그램에서 적용하여 구현하였다. 주파수 가변 동특성의 경우는 적용되었던 정적인 특성 곡선에서 변위 변수  $x$ 를 적절한 주파수 함수로 필터링하여 구현하는 방법을 이용하였다. 즉, 부싱의 주파수 가변 특성을 표현하기 위하여 일반화된 Maxwell model에 근거한 전달함수 표현식을 사용하였다. 정적인 부싱의 힘에 대한 계산식을 주파수 가변 특성을 고려하기 위한 수식으로 변환하면 다음 식(1)과 같다.

$$F_{bush} = G(a_0 + x_f) \quad (1)$$

여기서,  $x_f = \frac{c+ds}{a+bs}x$ 로 표현될 수 있으며,  $a_0$ 는 초기 변위,

$a, b, c, d$ 는 1차 전달함수의 계수를 나타낸다. 정적인 변위 변수  $x$ 를 주파수 함수로 바꾸어 사용하기 위해서는 시험결과를 사용하여 적절한 피팅 과정이 필요하다. 이 과정은 부싱 해석 모델에 실제 단품 시험 시 입력하였던 조건을 동일하게 적용하여 두 결과를 비교하는 과정으로, 해석 모델에서 전달함수의 각 계수를 조절하여 실제 단품의 동특성과 유사한 특성을 가지는 모델을 얻어낼 수 있다. 입력 가지는 브레이크 저더의 대역이 저 주파수인 것을 고려하여 1~50 Hz까지 sweep된 사인함수를 입력하였다. 부싱의 비선형 특성은 현가계의 전체 부싱에 대하여 구현하였으며, 주파수 가변 특성은 장착된 전체 부싱 중 로워암 부싱에 만 구현하였다. Fig. 2는 부싱 단품 시험을 통하여 얻어낸 비선형 곡선이며, Fig. 3은 전달함수 계수 조절을 통하여 구현한 부싱 강성의 주파수 가변 특성이다.

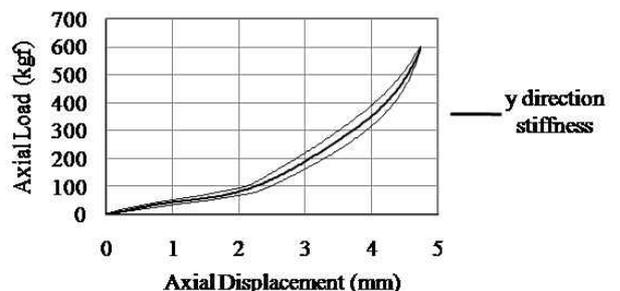


Fig. 2 Experimental Non-Linear Static Stiffness

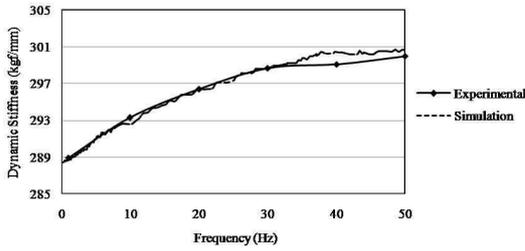


Fig. 3 Experimental Frequency Dependent Dynamic Stiffness

Table 1 Design Variable

Name	Design Variables		Stiffness(kgf/mm)	
			Min(-1)	Max(+1)
DV1	Lower arm mounting	x	38.4	64.6
DV2		y	140.6	282.0
DV3	FR bush	z	25.2	44.4
DV4	Lower arm mounting	x/y	150.0	296.2
DV5	RR bush	z	24.0	48.6

#### 4. 민감도 해석

민감도 해석의 대상이 된 부싱은 전문 현가장치의 총 12개의 부싱 중 진동의 전달력에 영향을 크게 미칠 것으로 판단되는 4개의 부싱을 대상으로 수행하였다. 선정된 부싱은 서브프레임과 로워암을 연결하는 두 개의 부싱을 대상으로 하였으며, 각 부싱에 대하여 x, y, z방향의 강성 총 5개의 설계 변수에 대하여 민감도 해석을 수행하였다. 현가장치는 좌, 우 구조가 대칭이므로 부싱의 강성은 좌, 우 동일한 값을 적용하였다. 표 1은 민감도 해석을 수행한 부싱의 설계 변수와 수준을 나타낸다. 설계변수마다 적용된 수치는 실제 시험결과이며, 비선형 곡선 중 초기 변위 시의 강성이다.

시뮬레이션은 저더가 발생하여 전달계를 거쳐 조향휠까지 전달되는 과정을 모사하였다. 즉, 브레이크 모델에 저더와 유사한 저주파수의 진동을 입력하고 이 진동이 현가 및 조향계로 전달되어 조향휠의 반경방향 움직임에 미치는 영향을 파악하였다. 민감도를 판단하는 기준으로는 조향휠의 반경방향 가속도의 최대값을 선정하였다. 민감도 해석을 위하여 Plackett-Burman Design Table을 적용하였고 각 설계 변수를 바탕으로 생성된 모델을 이용하여 총 8회의 시뮬레이션을 수행하였다 [3]. Fig. 4는 세 번째 시뮬레이션의 결과 그래프이다.

실험 결과를 통하여 2수준 실험 결과로부터 예측할 수 있는 다항식 형태의 반응 함수의 계수를 구하였다. 반응함수는 식(2)와 같다. 전달계에 대한 부싱과 강성별 민감도는 아래 Fig. 5와 같다. 로워암 FR 부싱의 x, y방향의 강성과 RR부싱의 반경방향 부싱의 민감도가 다소 큰 것으로 확인되었다.

Table 2 Experiment Table and Result

Row	DV1	DV2	DV3	DV4	DV5	Result
1	+1	+1	+1	-1	+1	0.342
2	-1	+1	+1	+1	-1	0.213
3	-1	-1	+1	+1	+1	0.345
4	+1	-1	-1	+1	+1	0.130
5	-1	+1	-1	-1	+1	0.256
6	+1	-1	+1	-1	-1	0.286
7	+1	+1	-1	+1	-1	0.146
8	-1	-1	-1	-1	-1	0.288

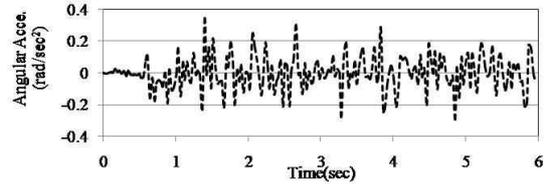


Fig. 4 Steering Wheel Angular Acceleration - Simulation 3

$$y = 0.2508 + 0.0247DV_1 - 0.0565DV_2 + 0.01558DV_3 - 0.0255DV_4 - 0.0108DV_5 \quad (2)$$

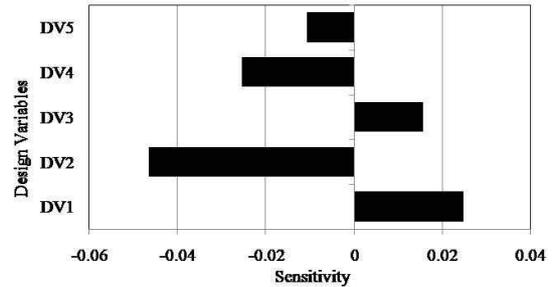


Fig. 5 Bush Sensitivity Analysis

#### 5. 결론

본 연구에서는 다물체 동역학 프로그램을 이용하여 가상환경에서의 저더의 전달력을 파악하는 방법을 제안하였다. 맥퍼슨 타입 현가장치의 해석 모델을 생성하고 저더의 전달 경로로서의 차량 성능을 평가하였다. 특히, 진동의 절연부로서 중요한 역할을 하는 고무 부싱을 보다 세부적으로 모델링하였다. 실제 시험을 통해 측정된 데이터를 적용하여 부싱의 변위에 따른 비선형성과 주파수 가변 특성을 모델링하였다. 가상 모델 상에서 브레이크 모델에서 발생하는 진동은 브레이크 저더와 유사한 저주파 진동을 생성하여 가진하였다. 전달계 모델에 유사 저더 진동의 입력을 통하여 조향휠에서의 반경방향 각 가속도를 도출해냈다.

부싱의 강성이 전달계에 미치는 영향을 파악하기 위하여 로워암 마운팅 부싱의 각 방향 강성에 대한 민감도 해석을 수행하였다. 민감도 해석은 Plackett-Burman Design Table을 이용하였고, 총 8회의 시뮬레이션 수행을 통하여, 부싱의 각 방향 강성에 대한 민감도를 파악할 수 있었다.

본 연구 결과의 신뢰성을 확보하기 위해서는 본 시뮬레이션과 동일한 환경에서의 시험이 수반되어야 할 것이다. 나아가 현가 및 조향계에 대한 보다 세부적인 모델링과 부싱의 강성 외에 현가장치의 기하학적 형상 등에 대한 민감도 해석을 수행한다면 전달계에 대한 보다 정확한 파악이 가능할 것이다. 마지막으로 이 결과를 바탕으로 현가장치와 부싱의 최적설계가 이루어진다면 차량 승차감 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

1. A.de. Vries and M. Wagner, "The Brake Judder Phenomenon," SAE 930803, 1993.
2. I. J. Hwang, "System Mode and Sensitivity Analysis for Brake Judder Reduction," Transactions of KSAE, vol.13, No.6, 142-153, 2005.
3. Plackett, R., Burman, J., "The Design of Optimum Multifactorial Experiments," Biometrika, vol. 33, 305-325, 1946.