

## 우등버스용 MR 댐퍼의 실험적 모델링

손정현<sup>\*†</sup> · 전철웅<sup>\*\*</sup>

\* 부경대학교 기계자동차공학과, \*\* 부경대학교 대학원 메카트로닉스공학과

### Experimental Modeling of MR Damper for Cruise Bus

Jeong Hyun Sohn<sup>\*†</sup> and Chul Woong Jun<sup>\*\*</sup>

\* Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Pukyong Nat'l Univ.,

\*\* Graduate school of Mechatronics Engineering, Pukyong Nat'l Univ.

(Received November 16, 2010 ; Revised June 8, 2011 ; Accepted June 8, 2011)

**Key Words:** MR Damper(엠알 댐퍼), Cruise Bus(우등버스), Vehicle Dynamics(차량동역학), Computer Simulation(컴퓨터 시뮬레이션)

**초록:** 본 논문에서는 우등버스용 MR 댐퍼의 특성 시험 결과를 분석하고, 비선형 히스테리시스 특성을 모델링할 수 있는 실험적 모델링이 제시된다. MR 댐퍼의 인가전류에 따른 실험적 모델을 구성하고, 매트랩의 최적설계 툴 박스를 이용하여 계수를 규명한다. 우등버스의 전차량 시뮬레이션을 통하여 차량동역학 해석용 MR 댐퍼의 실험적 모델의 유용성을 검증한다.

**Abstract:** In this paper, we analyze the characteristic test results of an MR damper for a cruise bus, and we model the nonlinear hysteretic characteristics of the damper using arctangent and polynomial functions. We establish an experimental model of the MR damper according to the input current, and we set the model parameters using the MATLAB Optimization Toolbox. The model is verified via a computer simulation of a full-car model.

### 1. 서론

현가장치는 차량의 무게를 지지하고, 노면으로부터의 진동을 차단하며 타이어나 노면과의 접지력 유지등의 역할을 수행하는 장치이다. 현가장치는 주로 수동, 능동, 반능동 현가장치로 구분된다. 반능동형은 오리피스(orifice)의 조절에 따른 감쇠력의 증감으로 제어력을 발생시키는 현가장치이며, 능동형은 피스톤의 양쪽으로 유압을 공급하여 제어력을 발생시킨다. 능동현가장치는 에너지 소모가 크고 고가의 부품을 필요로 하므로 유사한 성능을 보이는 반능동 현가장치에 대한 연구가 활발히 이루어져 왔다.

반능동 제어시스템에서는 MR 유체가 중요한 역할을 담당한다. 자동차 반능동 현가시스템에 사용되는 MR 댐퍼의 경우 전류의 제어에 따라 시스템 특성이 달라진다. 반능동 현가시스템의 진동제어를 위한 많은 제어 알고리즘들이 개발되어 왔다. 그 중 대표적인 제어알고리즘인 스카이-훅 제어알고리즘은 기본

적으로 스프링상부 질량의 진동제어를 위해 개발되었다. 이 알고리즘은 1/4 차량에서 스프링 상부질량에 적용하여 스프링 상부질량의 진동을 제어하는데 효과적인 방법으로 알려져 있다.

대형버스는 생산 및 수요량이 많지 않고 개인소유가 아닌 공용차량이라는 점 때문에 승차감 향상을 위한 연구의 필요성이 크지 않았다. 하지만 사람들의 생활수준의 향상과 함께 버스의 승차감이나 안정성에 대한 수요가 꾸준히 증가하여 동역학 해석을 이용한 조종안정성 평가에 대한 관심도 커지고 있다. 서권희 등<sup>(1)</sup>은 전후륜 4 링크식 공기스프링 현가장치를 갖는 대형버스를 DADS 로 모델링하였고, 차선변경 시뮬레이션 결과를 시험결과와 비교하여 모델을 검증하였다. 승차감 및 조종안정성 향상을 위해 승용차에서 사용되고 있는 MR 댐퍼를 버스용으로 제작할 필요성이 있다. MR 댐퍼의 특성은 인가 전류와 속도에 따라 응답특성이 달라지게 된다. MR 유체의 특성을 모델링하기 위해서 선형모델, Bingham(빙햄모델), Biviscous(바이비스커스), Hysteretic Biviscous(히스테리틱바이비스커스) 모델 등 다양한 모델이 개발되어 왔다. Spencer<sup>(2)</sup>는 Bouc-Wen 모델을 이용하여 MR 댐퍼의 특성을 모델링

† Corresponding Author, jhsohn@pknu.ac.kr  
© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

하였다. 하지만 계수 추정이 어렵고 제어기에 사용하기에는 너무 복잡한 모델이다.

본 연구에서는 대형 버스용 MR 댐퍼의 실험적 특성을 분석하여 비선형 hysteretic hyperbolic tangent 함수와 polynomial 함수를 이용하여 MR 댐퍼의 특성을 모델링하였다. 우등버스용 MR 댐퍼의 특성시험을 2 장에 서술하였고, 모델링을 3 장에 설명하였다. 4 장에 시뮬레이션 결과를 나타내었고, 결론을 5 장에 기술하였다.

## 2. 우등버스용 MR 댐퍼 특성시험

### 2.1 시험 set up

우등버스의 현가장치 크기와 스케일에 맞게 MR 댐퍼를 개발하였다. 개발된 MR 댐퍼를 Fig. 1에 나타내었다. 특성 시험장치로 MTS 특성 시험기를 사용하였다. 특성시험기의 스펙을 Table 1에 정리하였다.

**Table 1** Specifications of MTS tester for MR damper

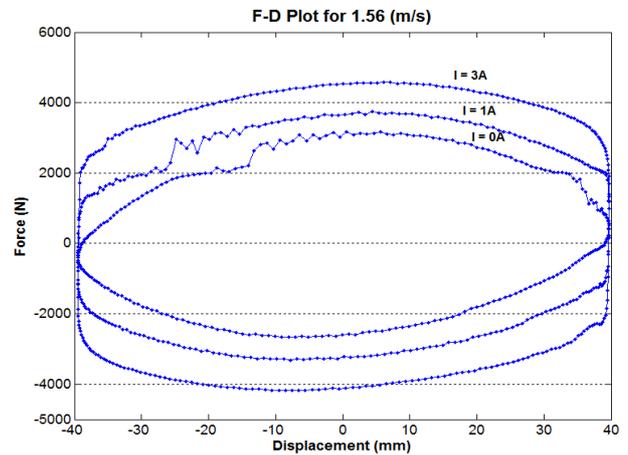
Actuator Rod Diameter	80 mm (3.15in.)
Test Space, Actuator Face to Load Cell	
850.25	max. 1560 mm
	min. 160 mm
850.50	max. 1540 mm
	min. 132 mm
Frame Dynamic Load Rating	88 m
Hydrostatic Bearing	Yes
Actuator Stroke	250 mm (10 in.)
Heavy Duty Anti-Rotate	Yes
Safety Low Flow	Yes
Accumulator	19 Liter
	Pressure and Return



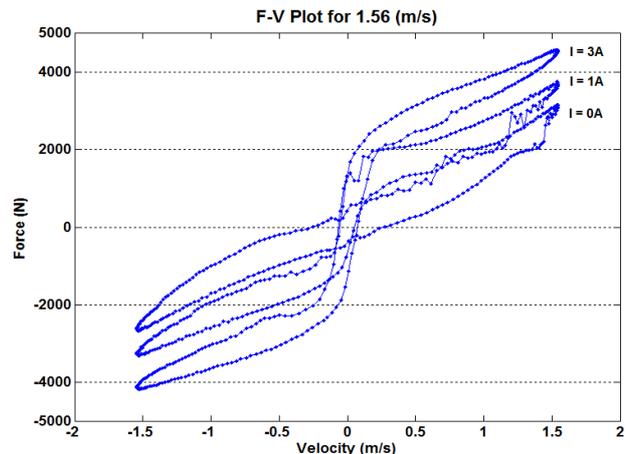
**Fig. 1** Characteristics test of MR damper

### 2.2 특성시험 결과

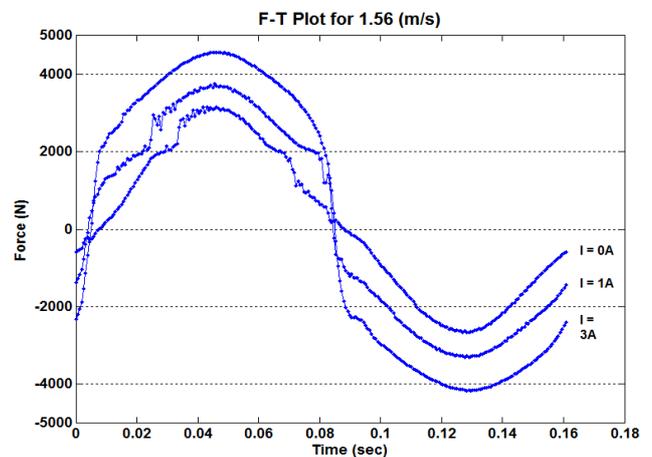
특성시험은 일정속도로 인가전류를 바꾸어가며 시험하였다. 전류를 0A~3A 까지 0.5A 씩 증가시켜



**Fig. 2** Force vs Displacement at 1.56m/s



**Fig. 3** Force vs Velocity at 1.56m/s



**Fig. 4** Force vs Time at 1.56m/s

가며 시험하였다. Fig. 2 는 변위대 댐핑력을 도시한 것이며, Fig. 3 은 속도 대 댐핑력을 나타낸 것이다. Fig. 4 에 시간에 따른 댐핑력을 나타내었다.

전류가 클수록 자기장이 크게 형성되어 댐핑력이 크게 나타난다. 댐핑력은 일반 승용차에 사용되는 MR 댐퍼 보다 큼을 알 수 있다.

### 3. 비선형 댐퍼 모델

#### 3.1 MR 댐퍼 특성 모델

Fig. 3 에서 볼 수 있듯이 force-velocity 그래프가 S 자 모양을 나타내는 것을 관찰했다. 이 S 자 모양 부분은 수학적으로 arctangent 함수와 유사하다. 본 연구에서는 속도에 따른 댐핑력을 모델링하기 위해 arctangent 함수와 고차 다항식을 함께 사용하여 댐퍼모형을 식 (1)과 같이 구성하였다.

$$f(t) = \alpha \tan^{-1}(\beta \cdot v) + \sum_{i=1}^n C_i \cdot v^{n-i} \quad n : 6 \quad (1)$$

$\alpha$  = Magnification factor  
 $\beta$  = Rotation factor  
 $C_i$  = Polynomial coefficient  
 $v$  = Velocity

다항 함수로 표현된 항은 arctangent 함수 영역을 벗어난 부분의 직선 및 곡선을 표현하기 위한 것이고 arctangent 항의 두 계수는 결과값에 많은 영향을 준다. 계수  $\alpha$  는 확장계수(Magnification factor)로 이 변수는 계산 되는 힘의 크기에 영향을 주는 것으로 값을 바꾸게 되면 비례적으로 힘의 절대값의 크기가 변한다. 계수  $\beta$  는 회전팩터(Rotation factor)로 이 변수는 그래프의 두 변곡점 사이의 기울기 크기에 영향을 미치는 요소로 이 factor 는 계산되는 힘의 크기에는 크게 영향을 주지 않는다.

#### 3.2 변수 규명

식 (1)의 각 변수는 MATLAB Optimization Toolbox 를 사용하여 구하였다. 각 변수는 히스테리시스를 고려하여 0A, 1A, 3A 세 경우에 대해 가속도가 증가할 때와 감소할 때의 경우를 구별하여 각각의 변수를 도출하였고,  $\alpha$  의 값이 전류가 증가함에 따라 커지는 것을 알 수 있는데 이는 MR 댐퍼의 대표적인 특성을 나타내는 결과라고 볼 수 있다. Fig. 5 에 실험과 모델의 결과를 비교하였고, Table 2~4 에 각 경우별 계수 값을 나타내었다.

**Table 2** Parameters in case of 0Ampere

$\dot{v}$ condition	$\dot{v} > 0$	$\dot{v} < 0$
$\alpha$	28.9286	45.2435
$\beta$	22643.0	251.8113
$C_1$	45.3033	11.9553
$C_2$	103.0692	-139.0387
$C_3$	162.0750	211.7642
$C_4$	-27.8150	267.1359
$C_5$	1186.40	1234.5
$C_6$	-357.8048	410.8735

**Table 3** Parameters in case of 1Ampere

$\dot{v}$ condition	$\dot{v} > 0$	$\dot{v} < 0$
$\alpha$	1111.9	1240.6
$\beta$	9.4827	11.3939
$C_1$	-73.1354	-132.2525
$C_2$	106.7985	32.1852
$C_3$	617.1566	831.7171
$C_4$	-28.2312	-189.5718
$C_5$	115.7200	-211.4202
$C_6$	-365.0900	548.2753

**Table 4** Parameters in case of 3Ampere

$\dot{v}$ condition	$\dot{v} > 0$	$\dot{v} < 0$
A	1887.9	1948.0
$\beta$	8.0756	8.8866
$C_1$	-37.7448	-85.1583
$C_2$	-94.6525	64.8999
$C_3$	314.8245	524.6519
$C_4$	517.5485	-280.4135
$C_5$	443.3161	133.0349
$C_6$	-591.0597	595.8569

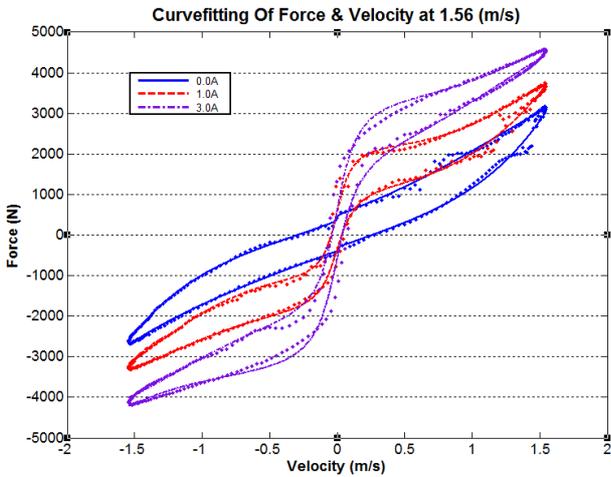


Fig. 5 Curvefitting of force vs Velocity at 1.56 (m/s)

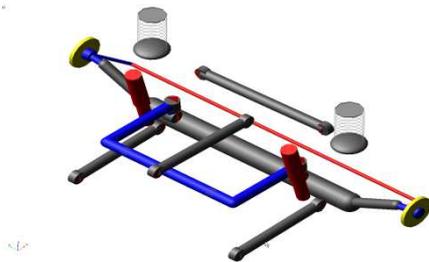


Fig. 6 Front suspension

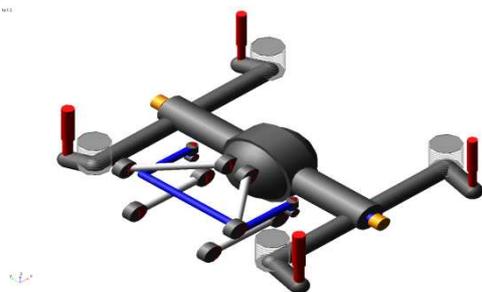


Fig. 7 Rear suspension

Fig. 5 에서 속도에 대한 댐핑력 데이터를 커브 피팅한 모습을 나타내고 있다. 점으로 표시한 부분이 실험 데이터로서 최적화를 수행한 직선과의 관계가 비교적 일치하는 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 전차량 시뮬레이션

##### 4.1 우등버스의 전차량 모델링

전륜현가장치는 링크타입 서스펜션으로 좌우양륜을 하나의 차축으로 연결한 서스펜션이다. 스프링과 속업소버는 위치결정의 기능없이 완충작용만



Fig. 8 Steering system

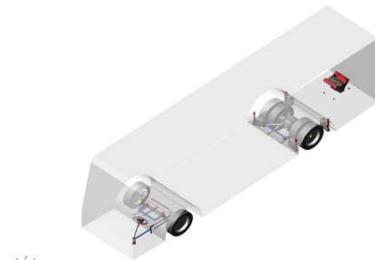


Fig. 9 Full vehicle system

담당한다. 후륜현가장치는 너클이 없으며 액슬의 자세를 정하는 2 자유도와 좌우 허브의 회전을 나타내는 2 자유도를 갖는 구조이다. Fig. 6 과 Fig. 7 에 각각 전륜 및 후륜 현가장치를 나타내었다.

조향 시스템은 2 개의 4-bar 링크가 묶여져 있는 형태로 크랭크암(crank arm)의 각도를 조절하여 휠의 각도를 조절한다. 조향휠과 조향각 사이의 조향비는 20.2:1 로서 승용차에 비해 매우 큰 값을 가진다. Fig. 8 에 조향시스템을 Fig. 9 에 전차량을 각각 나타내었다.

##### 4.2 전차량 시뮬레이션

본 연구에서는 ADAMS/Car<sup>(3)</sup>의 user template 를 이용하여 각 부분 시스템의 template 를 작성하고, 서브 어셈블리 과정을 거쳐 전차량 모델을 구성하였다. 파워트레인은 엔진맵을 사용한 토크 발생장치로서 모델링하였으며 기구적 모델링은 배제하였다. 본 연구에서는 제안한 우등버스용 MR 댐퍼 모델의 유용성을 검증하기 위해 J-turn 시뮬레이션을 수행하였다. 차량속도는 40km/h 이고, 조향입력은 120degree 이다. 조향입력이 가해진후 전륜을 인가하여 댐핑력이 변하도록 하였다. Fig. 10 은 차체의 횡 가속도, Fig. 11 은 차체의 롤 속도, Fig. 12 는 차체의 요 속도를 각각 도시한 것이다.

Fig. 10~12 에서 보여지듯이 0A 와 1A 그리고 2A 사이에는 비교적 시각적으로 안정화되는 과정의 차이를 확인할 수 있으며 2A 와 3A 사이에는

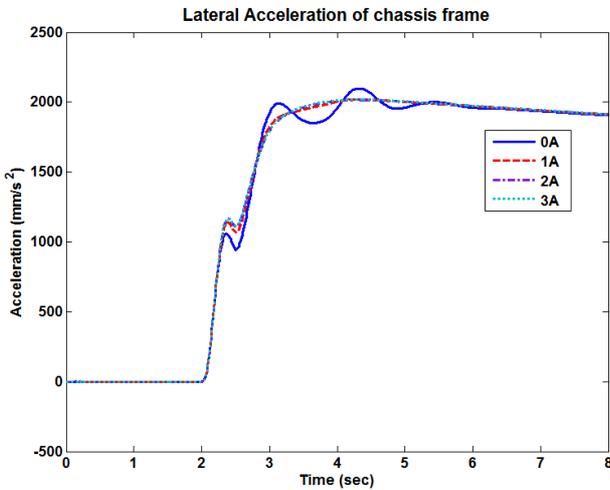


Fig. 10 Lateral acceleration of chassis frame

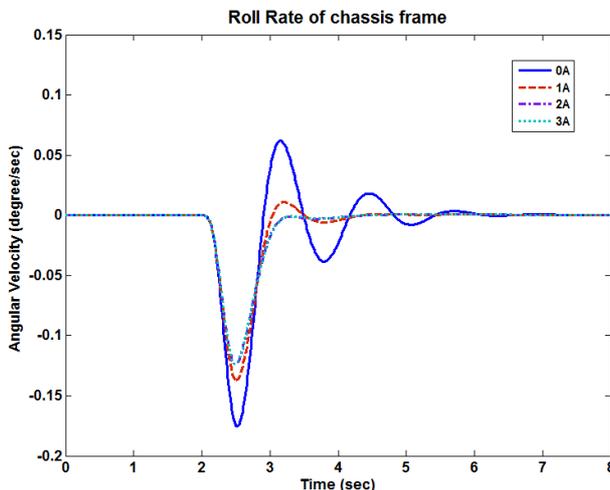


Fig. 11 Roll rate of chassis frame

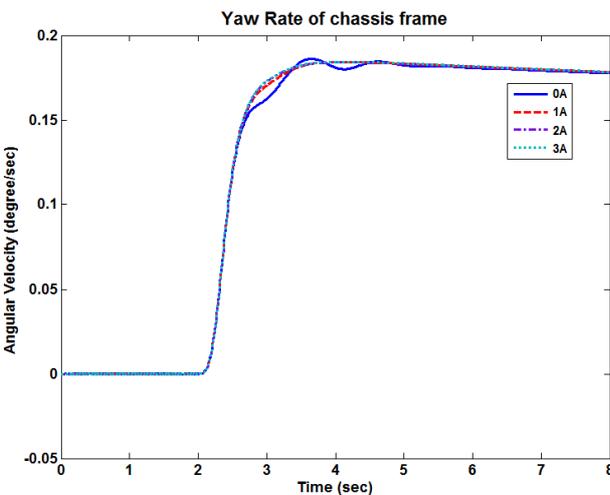


Fig. 12 Yaw rate of chassis frame

또렷한 변화 없이 비슷한 성향을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 이는 차량속도가 40km/h 이고 조향입력이 120degree 일 때는 2A의 전류를 가해주면 충분하다는 걸 보여준다. 또한 차량이 더 심각한 속도와 조향입력각을 지닌다면 2A보다 더 높은 전류가 필요하다는 것을 짐작할 수 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 우등버스용 MR 댐퍼의 특성이 시험된다. 특성 시험 결과를 분석하여 차량 동역학 해석을 위한 MR 댐퍼의 실험적 모델을 개발하였다. Arctangent function 과 다항함수를 이용하여 식을 구성하였고, 실험과 시뮬레이션과의 오차를 최소화하도록 계수를 규명하였다. 인가 전류별 계수를 구성하여 전류와 상대속도에 따른 MR 댐퍼의 정확한 댐핑력이 계산되도록 구성하였다. 전차량 모델에 대입하여 제안한 실험적 모델의 유용성을 검증하였다.

본 연구 수행결과, MR 댐퍼의 실험적 모델은 차량동역학 해석에 유용하게 사용될 수 있으며, 히스테리시스 효과를 반영할 수 있다. 향후 대형버스의 다물체동역학 해석 등에 활용될 수 있다.

### 후 기

이 논문은 2010년도 지식경제부 지역선도산업기술개발과제(70004182-2008-01)의 지원으로 연구되었음.

### 참고문헌

- (1) Suh, K. H., Kuk, J. Y. and Chyun, I.B., 2001, "A Study on the Handling Performances of a Large-Sized Bus with the Change of Rear Suspension Geometry," In *Proceedings of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 9, No. 5, pp. 176~183.
- (2) Spencer Jr., B.F., Dyke, S.J., Sain, M.K. and Carlson, J.D., 1997, "Phenomenological Model of a Magneto Rheological Damper," *J. Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 123, No. 3, pp. 230~238.
- (3) *MSC/ADAMS User's Guide*, 2008, MSC software Corporation, USA.