

실험적 MR댐퍼 모델을 사용한 1/4 차량 진동 시뮬레이션

1/4 Car Vibration Simulation Using an Empirical MR Damper Model

백운경† · 양보석* · 이종석** · 강태호** · 류성원**

Woon-Kyung Baek, Bo-Suk Yang, Jong-Seok Lee, Tae-Ho Kang
and Sung-Won Ryu

(2005년 4월 11일 접수 : 2005년 8월 23일 심사완료)

Key Words : Magneto-rheological Damper(MR댐퍼), Empirical Model(실험적 모델), 1/4 Car Simulator(1/4 차량 시뮬레이터), Semi-active(반능동), Hysteresis(히스테리시스)

ABSTRACT

This study is about a semi-active quarter car simulation method including a MR(magneto-rheological) damper. The MR damper was modeled as Spencer model that can capture nonlinear and hysteretic behavior. The parameters of the Spencer model were extracted from a random excitation test and optimum treatment of the test data. Then, a suspension control algorithm based on Sky-hook theory was applied for the quarter car simulation. Also, an experiment was done using a quarter car simulator to confirm the simulation results with the Spencer MR damper model.

1. 서 론

최근 MR댐퍼를 사용한 반능동 현가시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 시스템의 타당한 시뮬레이션을 위해서는 현실적인 MR댐퍼 모델이 필요하다. MR댐퍼의 감쇠력은 인가전류와 가진속도에 따라 변화하며 히스테리시스가 발생하므로 그 특성을 정확히 모델링하기가 어렵다.

Spencer⁽¹⁾은 Bouc-Wen 히스테리시스 모델⁽²⁾과 기계요소(스프링, 댐퍼)의 조합된 형태로 비선형성과 히스테리시스가 고려된 기계적인 MR댐퍼 모델을 구성하였다. Chang⁽³⁾은 MR댐퍼의 특성을 인공신경망을 사용하여 표현하였으며, Choi⁽⁴⁾은 실험으로부터 MR댐퍼의 히스테리시스를 모델링할 수 있는

polynomial 모델을 제안하였다. Yao⁽⁵⁾은 제작된 MR댐퍼를 Bouc-Wen 모델로 표현하고 시뮬레이션을 통해 1/4 차량 진동특성을 연구하였다. Han⁽⁶⁾은 ER댐퍼의 감쇠력 지연시간을 고려하여 1/4 차량 진동모델의 H_{∞} 제어기를 설계하고 그 영향을 연구하였다. Lee⁽⁷⁾은 MR댐퍼가 포함된 전차량 진동모델을 구성하여 반능동 조건을 고려한 최적제어알고리즘을 적용하여 차량의 진동제어 성능을 시간 영역과 주파수 영역에서 평가하였다. 현가제어 알고리즘은 기본적으로 Karnopp⁽⁸⁾이 제안한 스카이-훅 제어이론을 기초로 많은 알고리즘들이 개발되었으며 다양한 시뮬레이션과 실험이 수행되었다.^(9~11)

이 연구는 현가시스템용으로 제작된 MR댐퍼의 성능을 검증한 후 1/4차량 진동 시뮬레이션을 하기 위해 MR댐퍼를 Spencer 모델로 표현하였다. MR댐퍼의 비선형 및 히스테리시스 특성을 모델링하기 위해 랜덤 가진시험을 수행하고 최적화기법을 사용하여 Spencer 모델의 파라미터를 결정하였다. 그리고 1/4 차량모델의 진동 시뮬레이션 결과와 1/4 차량 시뮬레이터를 사용한 시험결과를 비교하였다.

† 책임저자 : 정희원, 부경대학교 기계공학부

E-mail : wkbaek@pknu.ac.kr

Tel : (051) 620-1615, Fax : (051) 620-1615

* 정희원, 부경대학교 기계공학부

** 부경대학교 대학원 기계공학부

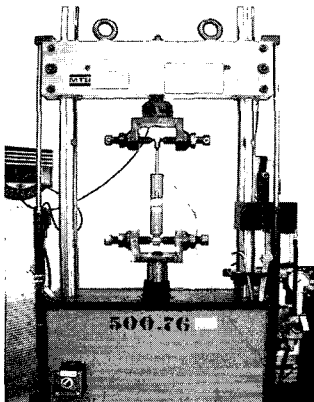
2. MR댐퍼의 실험적 모델

2.1 성능시험

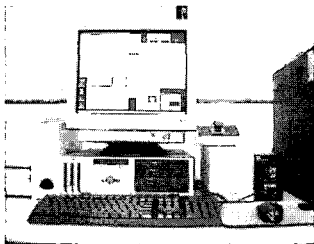
Fig. 1은 MR댐퍼의 성능시험에 사용한 댐퍼 시험기를 보여주며 Fig.2(a)는 0A일 때 속도에 따른 감쇠력의 비선형성과 히스테리시스를 보여준다. Fig. 2(b)는 0.6 m/s의 속도에서 전류의 크기에 따른 감쇠력-속도 관계를 나타내었다. Fig. 2에서와 같이 MR댐퍼의 히스테리시스 특성이 속도와 전류의 크기에 의존함을 알 수 있다.

2.2 랜덤 가진시험

랜덤 가진시험은 성능시험과 마찬가지로 Fig. 1에 보인 댐퍼 시험기를 사용하여 성능시험에서 확인한 MR댐퍼의 비선형성과 히스테리시스 특성을 모델링하기 위해 수행되었다. Fig. 3(a)와 같은 랜덤변위입력과 Fig. 3(b)의 전류입력에 대해 MR댐퍼의 감쇠력을 측정하였다. Fig. 4는 Fig. 3에 나타낸 입력조건에 대한 MR댐퍼의 감쇠력 측정결과이다.



(a)



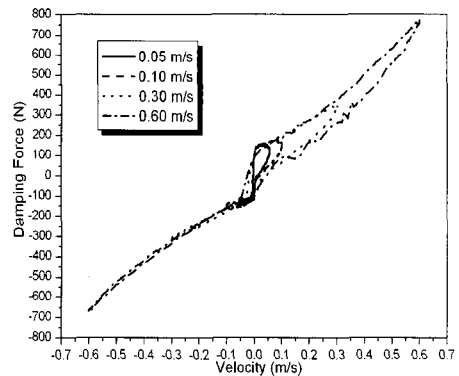
(b)

Fig. 1 Damper tester(MTS 849) : (a) hydraulic exciter ; (b) data acquisition computer

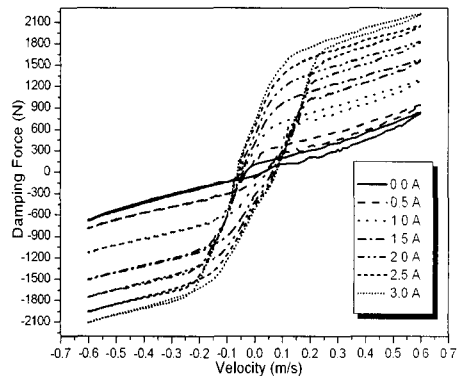
2.3 Spencer 모델과 파라미터의 결정

MR댐퍼의 모델은 현상학적으로 히스테리시스를 표현하는 Bouc-Wen 모델에 기초한 Spencer 모델⁽¹⁾을 사용하였다. 즉, 감쇠력 시험으로부터 얻은 데이터를 사용하여 Spencer 모델을 구성하는 파라미터를 추정함으로써 이 연구에서 제작된 MR댐퍼를 모델링하였다.

Spencer 모델은 Bouc-Wen 모델이 가속도와 속도가 서로 다른 부호인 경우 또는 속도가 낮을 경우 MR댐퍼의 히스테리시스를 너무 크게 표현하는 문제점을 수정한 모델이다. 실제 MR댐퍼가 가지는 비선형성과 히스테리시스를 잘 표현하는 Spencer 모델은 차량의 현가시스템을 포함하여 MR댐퍼를 응용하는 시스템의 성능을 평가하는데 유용한 모델이다. Fig. 5는 Spencer가 제안한 현상학적 MR댐퍼 모델의 개략도이며, 식 (1)에서 식 (4)까지는 Spencer 모델의 구성 방정식이다.



(a)

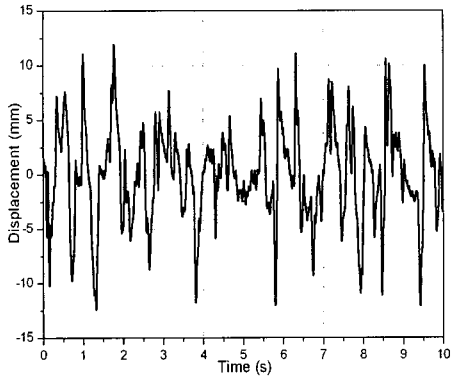


(b)

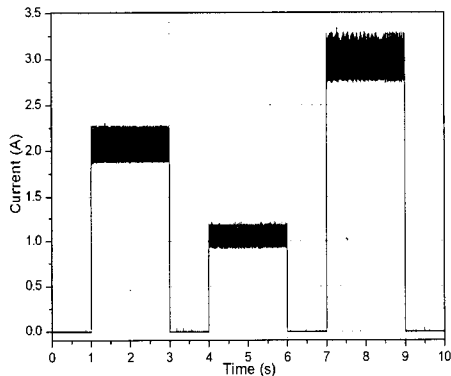
Fig. 2 Characteristics of prototype MR damper: (a) F-v diagram without current ; (b) F-v diagram with current

MATLAB/Simulink를 사용하여 Spencer 모델을 구현하고 Fig. 3과 Fig. 4의 시험결과를 입력받아 감쇠력을 계산하였다. 실제 측정된 감쇠력과 비교하여 식 (5)과 같은 평가함수를 최소화하도록 최적화 프로

그램인 VisualDOC⁽¹²⁾를 사용하여 Spencer 모델의 파라미터를 결정하였다.



(a)



(b)

Fig. 3 Input conditions : (a) random displacement : (b) current

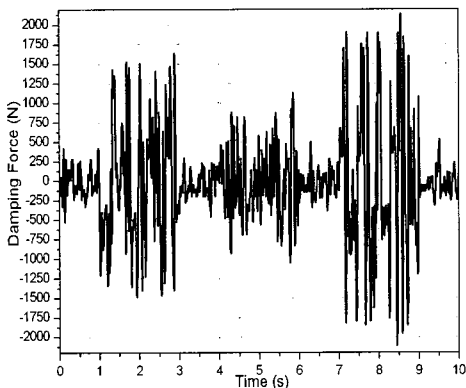


Fig. 4 Damping force for random displacement with current

$$\dot{y} = \frac{1}{(c_0 + c_1)} \alpha z + c_0 \dot{x} + k_0(x - y) \quad (1)$$

$$\dot{z} = -\gamma \dot{x} - \dot{y} |z| |z|^{n-1} - \beta (\dot{x} - \dot{y}) |z|^n + A(\dot{x} - \dot{y}) \quad (2)$$

$$F = \alpha z + c_0(\dot{x} - \dot{y}) + k_0(x - y) + k_1(x - x_0) \quad (3)$$

$$\alpha(I) = \alpha_a + \alpha_b I, \quad c_1(I) = c_{1a} + c_{1b} I, \quad (4)$$

$$c_1(I) = c_{1a} + c_{1b} I, \quad \dot{I} = -\eta(I - v)$$

$$J = \sum_{i=1}^N (F_{ci} - F_{pi})^2 \quad (5)$$

여기서, F_{ci} 와 F_{pi} 는 각각 측정된 감쇠력과 식 (4)에 의해 추정된 감쇠력이며 N 은 실험데이터의 수이다. Table 1에 결정된 파라미터를 나타내었으며 Fig. 6은 Spencer 모델을 사용하여 시뮬레이션한 결과와 실제 댐퍼의 시험결과를 감쇠력-속도와 감쇠력-변위 선도로서 나타내었다.

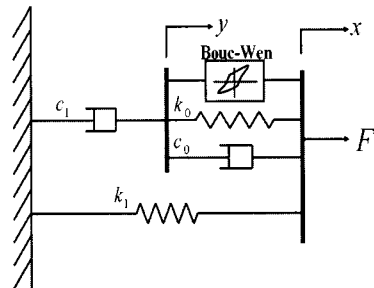


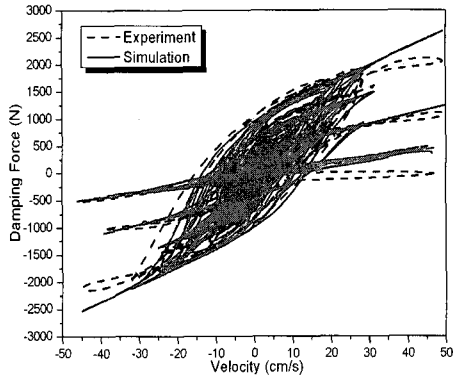
Fig. 5 Spencer model

Table 1 Parameters of the spencer model

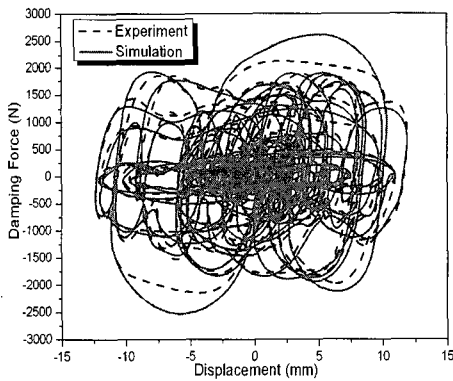
Parameters	Values	Parameters	Values
c_{0a}	10.27 N·s/cm	α_a	77.14 N/cm
c_{0b}	11.53 N·s/cm·A	α_b	469.48 N/cm·A
k_0	39.89 N/cm	γ	1.68 cm ⁻²
c_{1a}	58.57 N·s/cm	β	19.94 cm ⁻²
c_{1b}	19.86 N·s/cm·A	A	20.72
k_1	3.42 N/cm	n	1.6
x_0	11.76 cm	η	138.40 s ⁻¹

3. 1/4 차량 진동 시뮬레이션

1/4 차량 현가시스템 모델은 Fig. 7과 같이 2자유도 진동계로 구성되며 차체에 해당하는 스프링 상부 질량(sprung mass) m_s 와 바퀴 및 차축부의 스프링 하부 질량(unsprung mass) m_u 사이에 현가 스프링



(a)



(b)

Fig. 6 Comparison of simulation responses with corresponding experimental responses : (a) force vs. velocity : (b) force vs. displacement

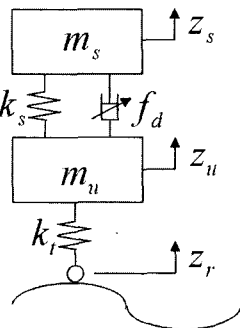


Fig. 7 Quarter car simulation model of semi-active suspension

과 가변댐퍼로 연결되어있다. 현가 스프링은 선형으로 가정하고 가변댐퍼 f_d 는 식 (4)의 Spencer 모델을 사용하였다. 타이어는 감쇠계수를 무시한 선형 스프링 요소로 모델링하였다. 또한, 타이어는 항상 노면과 접촉하며 스프링 상부 질량과 스프링 하부 질량의 변위 z_s 와 z_u 는 정적 평형상태로부터 측정된다고 가정하였다.

Fig. 7로부터 반능동 현가시스템에 대한 1/4 차량 운동방정식은 식 (6)과 같이 구할 수 있다. 현가 시스템의 제어는 스카이-훅 제어 알고리즘을 적용하였다.

$$m_s \ddot{z}_s + f_d + k_s(z_s - z_u) = 0$$

$$m_u \ddot{z}_u - f_d - k_s(z_s - z_u) + k_t(z_u - z_r) = 0 \quad (6)$$

4. 1/4 차량 진동 실험

3절의 시뮬레이션 결과를 검증하기 위해 1/4 차량 시뮬레이터를 사용하여 실험을 수행하였다. 시뮬레이션과 동일한 조건으로 시험 장비를 구성하고 스카이-훅 이론을 적용하였다. Fig. 8에 1/4 차량 시뮬레이터와 센서부착 위치를 나타내었다.

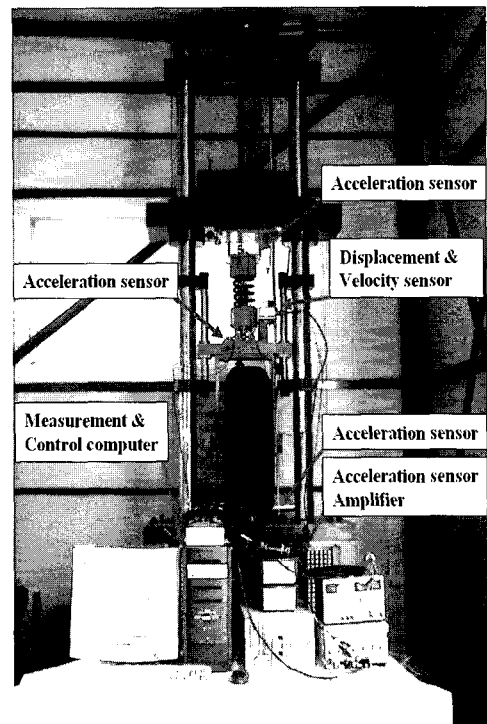


Fig. 8 Quarter car simulator

5. 시뮬레이션과 실험결과와의 비교

실험과 시뮬레이션은 동일한 변위 입력으로 0.5~

18 Hz로 주파수가 증가하는 사인 스위프(sine sweep) 함수를 사용하였다. Fig. 9는 실험과 시뮬레이션에서 얻은 상부질량의 가속도 시계열 데이터를 FFT(fast fourier transform)을 사용하여 주파수 영역으로 나타

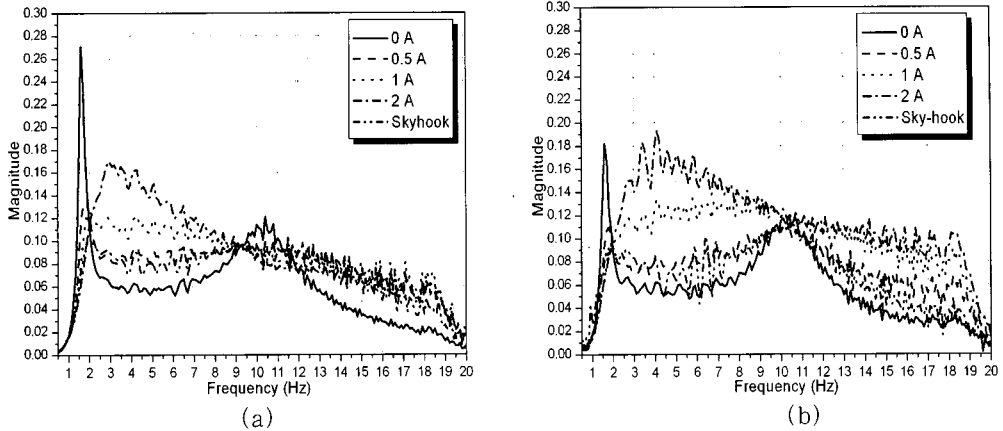


Fig. 9 Comparison of simulation results and experiment results : (a) simulation results: (b) experiment results

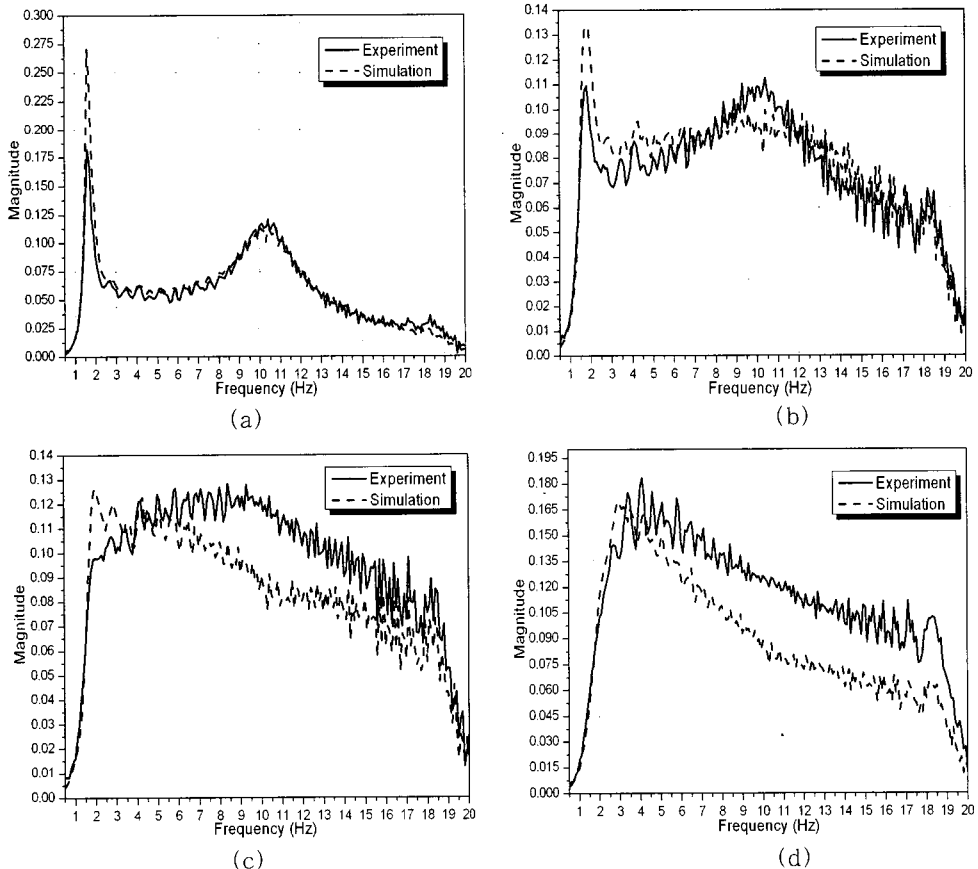


Fig. 10 Acceleration response of sprung mass : (a) 0 A: (b) 0.5 A: (c) 1 A: (d) 2 A

내었다. 실험과 시뮬레이션이 전체적으로 유사하지만, 0 A의 최대치와 하부 질량 공진 주파수보다 높은 영역에서 차이가 많이 나는 것을 알 수 있다.

5.1 일정전류 조건에서의 비교

Fig. 9에 나타낸 결과를 상세히 비교하기 위해서 시뮬레이션 결과와 실험결과를 나타내었다. Fig. 9와 동일한 방법으로, Fig. 10은 스프링 상부질량의 가속도의 FFT 결과를 나타내었다. 0 A의 경우에 주파수 응답이 전체적으로 일치하지만 상부 질량 공진 주파수에서 시뮬레이션 결과가 높게 평가되었다. 0.5 A의 경우는 상부 질량 공진 주파수의 차이는 다소 줄었지만 하부 질량 공진 주파수 영역에서 시뮬레이션 결과가 다소 낮게 평가되었고 상부 질량 공진 주파수와 다른 영역에서는 높이 평가되었다. 1 A와 2 A의 경우에는 시뮬레이션결과가 주파수 영역에서 차이를 보이며 현재 시뮬레이션 모델에서 Spencer 모델의 파라미터가 실제 댐퍼를 나타내는 데에 높은 전류에서는 오차가 많은 것을 알 수 있다.

5.2 스카이-훅 제어조건에서의 비교

MR댐퍼를 스카이-훅 제어이론에 따라 제어할 때의 시뮬레이션 결과와 실험결과를 나타내었다. Fig. 11은 스카이-훅 제어를 적용하였을 때 스프링 상부 질량의 가속도의 FFT 결과를 나타내었다. 스카이-훅 제어를 수행한 경우는 상부 질량 공진 주파수와 하부 질량 공진 주파수 영역 차이는 작지만 4~8 Hz에서 시뮬레이션 결과가 다소 낮게 평가되었고 하부 질량 공진 주파수보다 높은 영역에서는 높이 평가되었다.

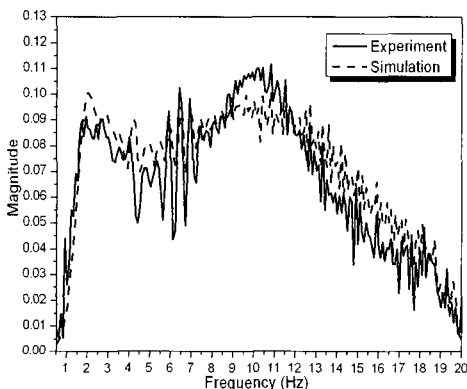


Fig. 11 Acceleration response of sprung mass

6. 결 론

이 연구에서는 제작된 MR댐퍼에 대해 히스테리시스 특성이 포함된 Spencer 모델의 파라미터를 최적화 소프트웨어(VisualDOC)를 통해 결정하고, 이를 포함하는 1/4차량 진동 시뮬레이션 모델을 구성한 후 반능동 제어알고리즘인 스카이-훅 제어를 적용하여 진동 특성을 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과의 검증에 위해 1/4차량 시뮬레이터를 사용하여 시험을 수행하였다. 스카이-훅 제어를 적용한 반능동 현가시스템의 스프링 상부질량 진동특성이 개선되는 것을 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다. 그 결과 전류치가 낮을 때는 시뮬레이션 결과와 실험결과의 차이는 작지만, 전류치가 높은 경우에 차이가 다소 큰 것은 Spencer 모델의 파라미터 선정 시의 오차로 인한 것으로 판단된다. Spencer 모델은 MR댐퍼가 포함된 1/4 차량의 반능동 현가 제어알고리즘 개발을 위한 연구에서 타당한 모델로서 활용되어 질 수 있다.

후 기

이 논문은 한국과학재단 지정 부경대학교 친환경 첨단에너지기계연구센터의 지원(과제번호:R12-2003-001-03002-0) 및 2005년도 두뇌한국 지원사업의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Spencer, B. F., Dyke, S. J., Sain, M. K. and Carlson, J. D., 1997, "Phenomenological Model for Magnetorheological Dampers", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 123, No. 3, pp. 230~238.
- (2) Sain, P. M., Sain, M. K., Spencer, B. F. and Sain, J. D., 1998, "The Bouc Hysteresis Model: An Initial Study of Qualitative Characteristics", *Proceedings of the American Control Conference*, Philadelphia, Pennsylvania, pp. 2559~2563.
- (3) Chang, C. C. and Roschke, P., 1998, "Neural Network Modeling of a Magnetorheological Damper", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 9, pp. 755~764.

- (4) Choi, S. B. and Lee, S. K., 2001, "A Hysteresis Model For The Field-dependent Damping Force of A Magnetorheological Damper", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 245, No. 2, pp. 375~383.
- (5) Yao, G. Z., Yap, F. F., Chen, G., Li, W. H. and Yeo, S. H., 2002, "MR Damper and its Application for Semi-active Control of Vehicle Suspension System", *Mechatronics*, 12, pp. 963~973.
- (6) Han, S. S. and Choi, S. B. 2002, Control Performance of an Electrorheological Suspension System Considering Actuator Time Constant", *Int. Journal of Vehicle Design*, Vol. 29, No. 3, pp. 226~242.
- (7) Lee, H. S. Choi, S. B. and Lee, S. K., 2000, "Vibration Control of a Passenger Vehicle Featuring MR Suspension Units", *Transactions of Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 11, No. 1, pp. 41~48.
- (8) Karnopp, D., Crosby, M. J. and Harwood, R. A., 1973, "Vibration Control Using Semi-active Force Generators", *Journal of Engineering for Industry*, ASME No. 73-DET-122, pp. 619~626.
- (9) Christopher, A. P., 1998, "Experimental Evaluation of Semiactive Magneto-Rheological Suspensions for Passenger Vehicles", M. S. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- (10) Charalambous, C., Brunning, A. and Crawford, I. L., 1989, "The Design and Advanced Development of a Semi-active Suspension", *IMEchE*.
- (11) Junich Emur, Shinobu Kakizaki, Fumiyuki Yamaoka, and Michiya Nakamura, 1994, "Development of the Semi-active Suspension System Based on the Sky-hook Damper Theory", SAE940863.
- (12) Vanderplaats R&D, *VisualDOC Getting Started Manual*, 2004, Vanderplaats Research & Development.