

# 댐핑력 히스테리시스를 고려한 MR 서스펜션의 진동제어

## Vibration Control of MR Suspension System Considering Damping Force Hysteresis

성민상\*·성금길\*·한영민\*\*·최승복†·이호근\*\*\*

Min-Sang Seong, Kum-Gil Sung, Young-Min Han, Seung-Bok Choi and Ho-Guen Lee

**Key Words :** Magnetorheological Fluid(자기유변유체), Vibration Control(진동 제어), MR Suspension(MR 현가장치), Preisach Model(프라이작 모델), Hysteresis(히스테리시스), Quarter-Car(1/4 차량)

### ABSTRACT

This paper presents vibration control performances of a commercial magnetorheological (MR) suspension via new control strategy considering hysteresis of the field-dependent damping force of MR damper. A commercial MR damper which is applicable to high class passenger vehicle is adopted and its field-dependent damping force is experimentally evaluated. Preisach hysteresis model for the MR damper is identified using experimental first order descending (FOD) curves. Then, a feed-forward compensation strategy for the MR damper is formulated and integrated with a linear quadratic regulation (LQR) feedback controller for the suspension system. Control performances of the proposed control strategy for the MR suspension is experimentally evaluated with quarter vehicle test facility.

## 1. 서 론

최근 들어 차량에 전자제어 개념이 도입되면서 도로의 노면 상황과 차량 주행 조건에 따라 현가장치를 제어하기 위한 다양한 연구가 수행되고 있다<sup>(1,2)</sup>. 그 중에서도 능동형 현가장치는 우수한 제어성능에도 불구하고 큰 동력, 복잡한 구조, 고비용 등의 문제로 인해 상용화에 어려움을 겪고 있다. 이에 반해 구조가 간단하고 저비용으로 구현할 수 있는 반능동 현가장치에 대한 관심이 최근 높아지고 있다. 특히, 지능재료중의 하나인 MR 유체를 이용한 반능동 현가장치는 큰 동력 없이 댐퍼의 감쇠력을 효과적으로 조절함으로써 능동형 현가장치에 가까운 성능을 발휘할 수 있다. 이러한 현실적인 잇점으로 인해 최근 10 여년 동안 활발한 연구가 수행되어 왔으며, 상용제품에도 응용되고 있다.

반능동 MR 댐퍼의 주요한 구성요소인 MR 유체는 일반적으로 두가지 비선형적인 거동을 하는 것으로 알려져 있다. 즉, MR 댐퍼는 전단속도비와 입력전류(자기장)에 따른 두가지의 다른 히스테리시스(hysteresis) 거동을 하며<sup>(3,4,5)</sup>, 이는 댐퍼의 제어성능을 저해하는 대표적인 요소이다. 특히 입력전류에 따른 히스테리시스는 제어입력에서 발생하

는 것이기 때문에 반능동 현가장치의 제어성능에 치명적인 영향을 미친다. 하지만 이에 대한 연구는 상대적으로 모델링이 용이한 전단속도비에 따른 히스테리시스 연구에 비해 매우 미미한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 MR 댐퍼의 히스테리시스 현상을 규명하고 프라이작(Preisach) 히스테리시스 보상기를 구축함으로써 MR 현가장치의 진동제어 성능을 향상시키고자 한다. 이를 위해 상용 MR 댐퍼인 Delphi 社의 Magneride™ 댐퍼를 도입하고, 자기장에 따른 댐핑력의 비선형적인 거동을 실험적으로 고찰한다. 실험으로부터 얻은 FOD (first order descending)곡선으로부터 MR 댐퍼의 프라이작 히스테리시스 모델을 구축한 후 MR 댐퍼의 히스테리시스 거동을 선형화 하기 위해 되먹임 제어기법을 이용한 히스테리시스 보상기를 설계한다. 이 보상기를 현가장치의 진동제어를 위해 구축된 LQR (linear quadratic regulation) 되먹임 제어기와 결합하고 1/4 차량 현가장치를 이용하여 제안된 제어시스템의 진동제어성능을 실험적으로 고찰한다.

## 2. MR 댐퍼의 성능 및 히스테리시스

본 연구에서는 실험을 통하여 자기장 증가에 따른 MR 댐퍼의 댐핑력 변화를 분석하였다. Fig. 1의 댐핑력 측정결과에서 나타낸 바와 같이 속도가 증가함에 따라 댐핑력도 점점 증가하다가, 항복응력 이후에는 속도에 큰 영향 없이 일정한 힘을 내고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 2는 MR 댐퍼의 댐핑력 응답특성을 도시한 것이다. Fig. 2(a)는 댐핑력의 시간 응답 곡선이며, MR 댐퍼에 2A의 자기장

† 교신저자; 정회원, 인하대학교 기계공학부

E-mail : seungbok@inha.ac.kr

Tel : (032) 860-7319, Fax : (032) 868-1716

\* 정회원, 인하대학교 대학원 기계공학과

\*\* 정회원, 인하대학교 기계공학부

\*\*\* 정회원, 대덕대학 자동차학부

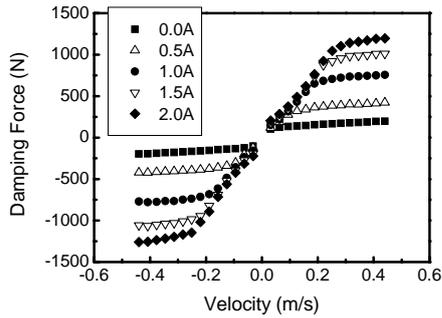
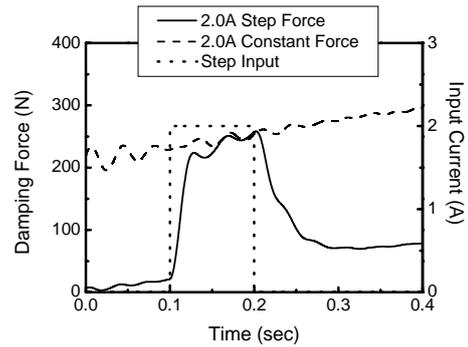


Fig. 1 Field-dependent damping force of the MR damper

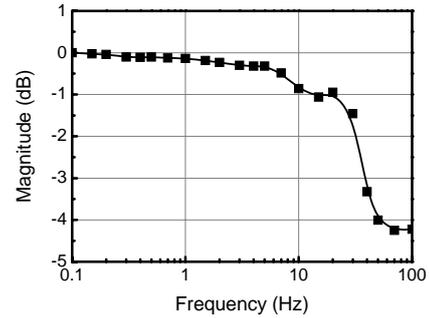
을 0.1 초간 부하한 실험결과로부터 댐핑력의 응답 속도는 약 20msec 로 측정되었다. 이를 통해 빠른 속도로 댐핑력 제어가 가능함을 확인할 수 있다. 또한 MR 댐퍼의 응답특성을 주파수 영역에서 도 시하면 Fig. 2(b)에 나타난 것과 같다. 측정결과 MR 댐퍼의 대역폭은 약 38Hz 로 나타났다. 따라서 본 연구에 사용된 MR 댐퍼는 차량의 1 차 및 2 차 공진 영역에서 충분한 제어성능을 발휘할 수 있을 것으로 예측된다.

MR 유체는 전류에 의해 발생하는 자기장 세기 에 따라 연속적으로 변화되는 항복응력을 갖게 되 며, 이러한 거동은 일반적으로 빙햄(Bingham) 모 델로 표현된다<sup>(6)</sup>. 하지만 Fig. 3 에 나타난 바와 같 이 MR 유체는 전류에 따른 히스테리시스 거동 특성을 가지고 있기 때문에 기존의 빙햄모델 만으 로는 MR 유체의 실제 거동을 기술하기 어렵다. 특히, 전류는 MR 댐퍼의 제어입력으로 작용하기 때문에 이러한 히스테리시스에 의한 제어성능의 저하는 필연적이라 할 수 있다. 따라서 MR 댐퍼 의 제어성능 향상을 위해서는 제어입력인 전류에 따른 MR 댐퍼의 히스테리시스 거동이 고려 되어 야 함을 알 수 있다.

본 연구에서는 전류에 따른 MR 댐퍼의 히스테 리시스 거동을 모델링 하기 위해 프라이어작 히스테 리시스 모델을 도입하였다. 프라이어작 모델은 전통 적으로 자성재료의 히스테리시스 모델링을 위해 개발되어왔으며, 최근 각종 지능재료의 히스테리 시스 거동도 효과적으로 표현할 수 있음이 입증되 고 있다<sup>(7)</sup>. 또한, 프라이어작 모델을 적용하기 위해 서 확인되어야 할 두 가지 특성인 마이너루프 (minor loop) 특성과 와이핑 아웃(wiping out) 특성 을 MR 유체가 만족하고 있음이 Choi 등에 의해 이미 밝혀져 프라이어작 모델의 적용 가능성이 확인 되었다<sup>(8)</sup>. 이 연구에서는 이러한 결과를 바탕으로 프라이어작 모델을 이용한 MR 댐퍼의 히스테리시스 모델을 구축하였다. 프라이어작 모델을 구축하기 위 해 먼저 증가전류  $\alpha_k$  와 감소전류  $\beta_k$  에 따른 히



(a) step response



(b) dynamic bandwidth

Fig. 2 Damping force response of the MR damper

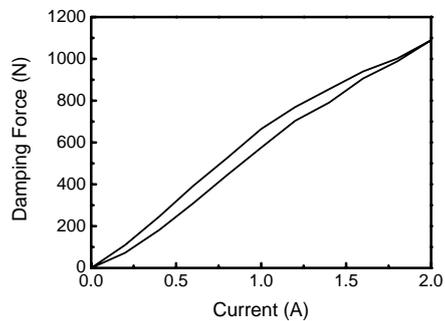


Fig. 3 Hysteretic behavior of the MR damper

스테리시스를 결정하기 위한 수치적 함수  $T(\alpha_k, \beta_k)$  를 다음과 같이 정의한다.

$$T(\alpha_k, \beta_k) = F^{\alpha_k} - F^{\alpha_k \beta_k} \quad (1)$$

즉, 증가전류  $\alpha_k$  일 때의 댐핑력  $F^{\alpha_k}$  와  $\alpha_k$  에서  $\beta_k$  로 전류가 감소하였을 때의 댐핑력  $F^{\alpha_k \beta_k}$  의 차 로 히스테리시스를 표현하게 된다. 입력의 변화에 따른  $T(\alpha_k, \beta_k)$  는 실험적으로 구현한 FOD 곡선으 로부터 결정할 수 있다. 이를 위해 Fig. 4(a)와 같 이 전류를 인가하여 Fig. 4(b)의 FOD 곡선을 실험 적으로 구축하였다. 이로부터 수치적 프라이어작 모 델을 구축하면 다음과 같다.

$$F_{MR,inc}(t) = \sum_{k=1}^{n(t)-1} [T(\alpha_k, \beta_{k-1}) - T(\alpha_k - \beta_k)] + T(H(t), \beta_{n(t)-1}) \quad (2)$$

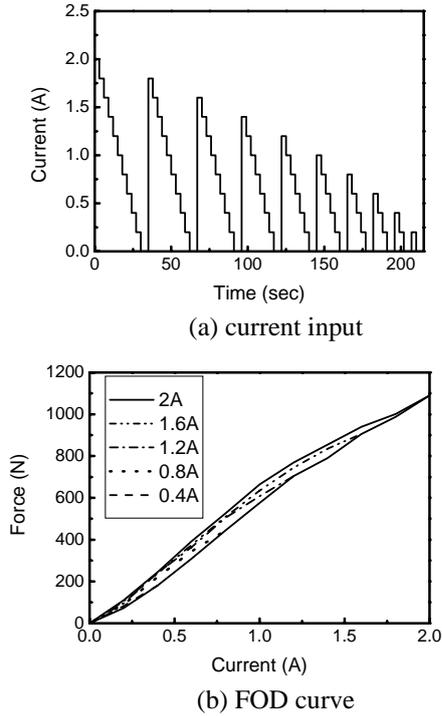


Fig. 4 Measured FOD curves

$$F_{MR,dec}(t) = \sum_{k=1}^{n(t)-1} [T(\alpha_k, \beta_{k-1}) - T(\alpha_k - \beta_k)] + [T(\alpha_{n(t)}, \beta_{n(t)-1}) - T(\alpha_{n(t)}, Ht)]$$

여기서 *inc* 와 *dec* 는 각각 입력 자기장이 증가하는 경우와 감소하는 경우를 나타낸다.  $T(\alpha_k, \beta_k)$  는 유한한 측정데이터로, 연속적이지 못하므로 다음과 같이  $T(\alpha_k, \beta_k)$  의 보간함수를 적용한다.

$$T(\alpha_k, \beta_k)_{square} = c_0 + c_1\alpha_k + c_2\beta_k + c_3\alpha_k\beta_k, \quad (3)$$

$$T(\alpha_k, \beta_k)_{triangular} = c_0 + c_1\alpha_k + c_2\beta_k$$

여기서 *square* 는 보간지점의 사방에 측정데이터가 있는 경우이며, *triangular* 는 보간지점의 한쪽에 측정데이터가 없는 경우이다.

제안된 프라이작 모델의 타당성을 입증하기 위하여 측정된 실험결과와 모델에 의한 추정결과를 비교해 Fig. 5 에 나타내었다. Fig. 5(a)와 같은 계단 입력을 인가하였을 경우 실제 댐핑력과 모델에 의한 추정 댐핑력은 Fig. 5(b)와 같다. Fig. 5(c), (d)의 확대그래프를 통해 전류가 증가할 때에는 프라이작 모델과 빙햄 모델간의 차이가 크지 않으나, 전류가 감소할 때에는 프라이작 모델이 실험결과의 히스테리시스를 잘 추종하는 데 비해 빙햄 모델은 오차가 크게 발생함을 확인할 수 있다. 이 결과로부터 제안된 프라이작 모델이 제어입력인 전류와 출력인 댐핑력 사이의 히스테리시스 거동을 잘 기술하는 것을 확인할 수 있으며, 응용장치에 적용

시 우수한 제어성능이 예상된다.

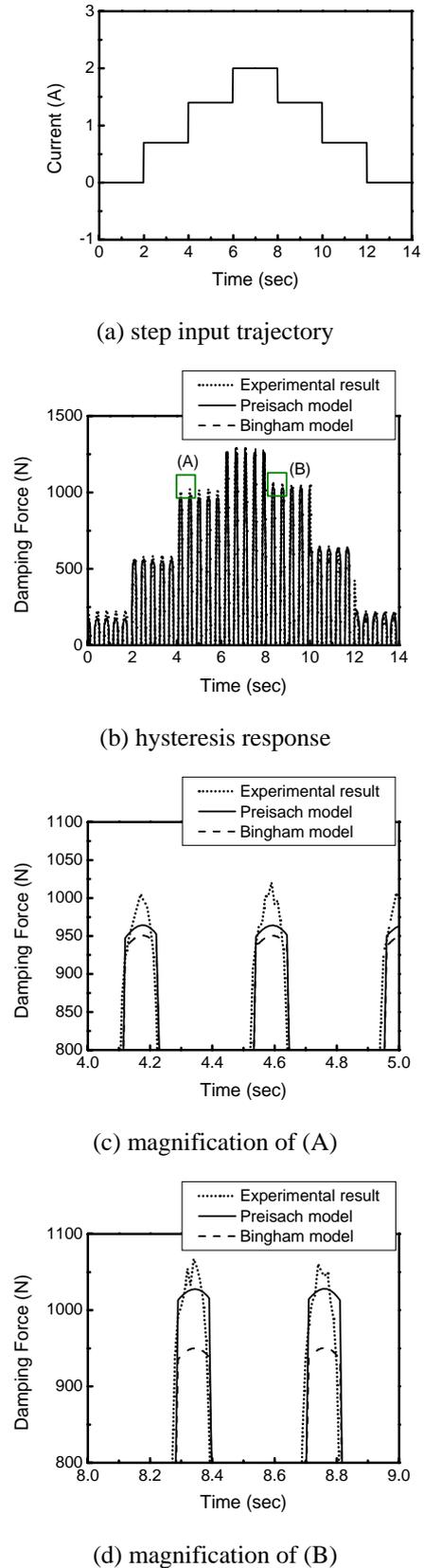


Fig. 5 Actual and predicted hysteresis responses under step input

### 3. 제어기 설계

Fig. 6은 본 연구에서 제안한 MR 현가장치의 제어블록선도를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 1/4 현가장치의 진동제어를 위해서 LQR 되먹임 제어기를 도입하여 요구댐핑력  $F_d$ 를 결정한다. Biviscous 모델을 이용하여  $F_d$ 로부터 전류에 의한 댐핑력  $F_{MR}$ 을 도출하고, 프라이작 히스테리시스 보상기와 역빙햄모델을 설계하여  $F_{MR}$ 로부터 제어 전류  $i_f$ 를 결정한다. 결정된 최종 제어전류  $i_f$ 를 시스템에 인가한다.

#### 3.1 LQR 제어기 설계

MR 댐퍼를 장착한 1/4 차량의 지배방정식을 도출하기 위하여, Fig. 7와 같이 차량의 모델을 구성하였다. 따라서, 제안된 1/4 차량 모델의 상태방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + Bu + Lz_r, \quad (4)$$

$$y = Cx$$

$$x = [z_s \quad \dot{z}_s \quad z_u \quad \dot{z}_u]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -k_s/m_s & 0 & k_s/m_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ k_s/m_u & 0 & -(k_t + k_s)/m_u & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = [0 \quad -1 \quad 0 \quad 1]^T, \quad u = F_d$$

$$L = [0 \quad 0 \quad 0 \quad k_t/m_u]^T$$

$$C = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

상태변수는 각각 현가질량(sprung mass)의 변위  $z_s$ 와 속도  $\dot{z}_s$ , 비현가질량(unsprung mass)의 변위  $z_u$ 와 속도  $\dot{z}_u$ 이다. 1/4 차량의 차체질량  $m_s$ 는 Magneride™ 댐퍼가 실제 장착되는 차량의 무게를 고려하여 457kg으로 적용하였고, 그 외 변수들은 실측을 통해 결정하였다. MR 댐퍼에 의한 댐핑력  $F_d$ 는 Fig. 6의 제어알고리즘을 통해 결정된 제어 전류  $i_f$ 로부터 발생한다.

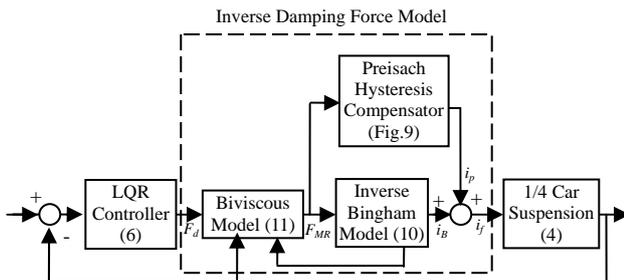


Fig. 6 Block-diagram of the control system

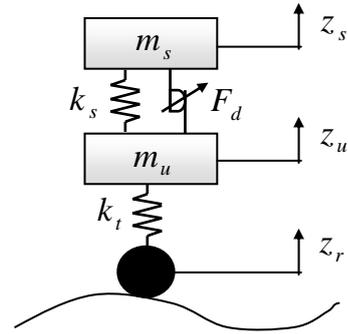


Fig. 7 Mechanical model of the quarter car MR suspension system

1/4 차량의 진동 제어를 위해 LQR 제어기를 사용하였으며<sup>(9)</sup>, 승차감 향상을 위해 성능지수(performance index)  $J$ 를 다음과 같이 설정하였다.

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + 2x^T N u + u^T R u) dt \quad (5)$$

상태되먹임식인

$$u = -Gx \quad (6)$$

의 gain  $G$ 는 다음과 같은 Riccati equation을 이용해 구할 수 있다.

$$(A - BR^{-1}N)^T P + P(A - BR^{-1}N) \quad (7)$$

$$+ (Q - N^T R^{-1}N) - PBR^{-1}B^T P = 0$$

$$G = R^{-1}(B^T P + N)$$

#### 3.2 Biviscous 모델 및 역빙햄모델

MR 댐퍼의 댐핑력은 유체 점성에 의한  $F_{\eta}$ 와 MR 효과에 의한  $F_{MR}$ 의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_d = F_{\eta}(\dot{x}, i) + F_{MR}(i) \quad (8)$$

여기서  $F_{\eta}$ 는 제어입력전류에 영향을 받으므로 식 (8)은 simplified biviscous 모델을 이용하여<sup>(10,11)</sup> 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$\dot{x}_1 = a \cdot i_B^2 + b \cdot i_B + c$$

$$F_d = \begin{cases} c_{pr} \dot{x} & -\dot{x}_1 \leq \dot{x} \leq \dot{x}_1 \\ c_{po} \dot{x} + f_y + F_{MR} & \dot{x} > \dot{x}_1 \\ c_{po} \dot{x} + f_y - F_{MR} & \dot{x} < -\dot{x}_1 \end{cases} \quad (9)$$

Fig. 8과 같이 피스톤 속도가 항복응력속도  $\dot{x}_1$ 보다 작을 경우에는 댐핑계수  $c_{pr}$ 을 적용하며, 항복응력속도보다 클 경우에는 댐핑계수  $c_{po}$ 를 적용한다. 전류의 영향을 받는 항복응력점  $\dot{x}_1$ 의 전류  $i_B$ 는 역빙햄모델에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$i_B = (F_{MR} / \alpha)^{1/\beta} \quad (10)$$

따라서 식 (9)와 식 (10)으로부터 전류에 의한

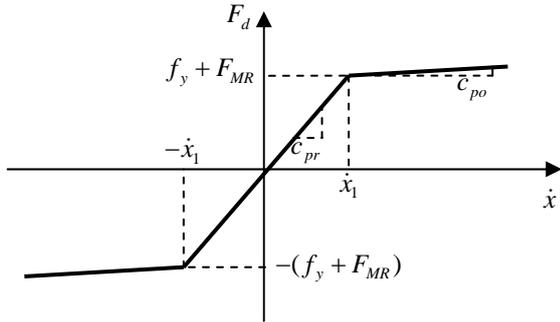


Fig. 8 Simplified biviscous model

댐핑력  $F_{MR}$  을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{x}_1 = a \cdot \{(F_{MR} / \alpha)^{1/\beta}\}^2 + b \cdot (F_{MR} / \alpha)^{1/\beta} + c$$

$$F_{MR} = \begin{cases} 0 & -\dot{x}_1 \leq \dot{x} \leq \dot{x}_1 \\ F_d - c_{po} \dot{x} - f_y & \dot{x} > \dot{x}_1 \\ F_d - c_{pr} \dot{x} - f_y & \dot{x} < -\dot{x}_1 \end{cases} \quad (11)$$

요구 댐핑력을 인가하기 위해 필요한 제어 입력 전류는 식 (10)의 역빙햄모델로부터 도출할 수 있다.

### 3.3 프라이작 히스테리시스 모델

기존의 연구에서는 역빙햄모델을 이용하여 요구 댐핑력으로부터 제어입력전류를 계산하였다. 하지만 제 2 장에서 고찰한 바와 같이 MR 댐퍼는 제어입력에 따른 히스테리시스 거동을 하기 때문에 정확한 댐핑력을 인가하기 어려운 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 프라이작 히스테리시스 보상기를 제안하여 히스테리시스에 의한 제어입력 오차를 보상하고자 한다. 이를 위하여 Fig. 9 와 같이 역프라이작모델을 이용한 히스테리시스 보상 알고리즘을 구축하였다. 제안된 보상 알고리즘은

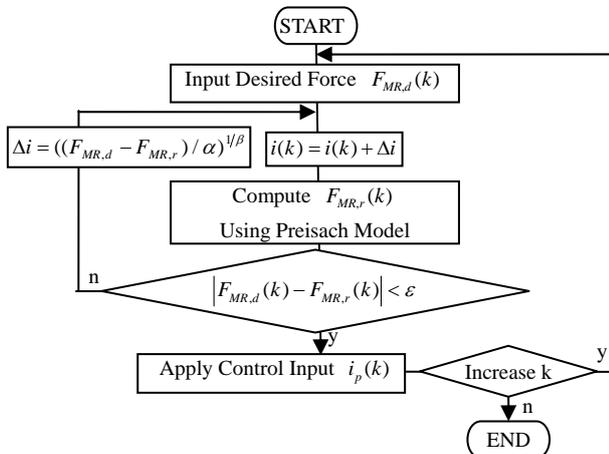


Fig. 9 Flow chart of the Preisach hysteresis compensation

비선형 히스테리시스의 예측과 선형화의 과정으로 구성되어 있으며, 세부적인 알고리즘은 다음과 같이 이루어진다. 먼저 제어기로부터  $k$  번째 요구 댐핑력  $F_{MR,d}(k)$  를 입력받아 역빙햄모델(10)을 이용해 제어입력  $i(k)$  를 계산한다.  $i(k)$  를 수치적 프라이작 모델(2)에  $\alpha_k, \beta_k$  로 판별, 대입해 히스테리시스 댐핑력  $F_{MR,r}(k)$  를 계산한다.  $F_{MR,d}(k)$  와  $F_{MR,r}(k)$  를 비교하여 오차가 오차한계  $\epsilon$  이내에 들 때까지 반복수행하여 제어입력  $i_p(k)$  를 도출한다. 프라이작 역모델 보상기에서 도출된  $i_p$  와 역빙햄모델에서 도출된  $i_b$  를 더해 최종제어입력  $i_f$  를 결정하여 시스템에 인가한다.

## 4. MR 현가장치의 성능시험

본 연구에서는 Fig. 10 과 같은 1/4 차량 시험장치를 구성하여 MR 현가장치 시스템에 대한 성능 시험을 수행하였다. 1/4 차량 시험 방법은 MR 댐퍼 외에 차체질량, 스프링 및 타이어를 장착하여 시험하는 방법으로, 비교적 간단하게 실차실험과 유사한 성능평가를 할 수 있는 장점이 있다. 컴퓨터에 의해 제어되는 유압서보장치를 통해 MR 현가장치 시스템을 가진 하였고, 컴퓨터를 통하여 전달되는 입력 자기장 신호는 전류앰프를 통해 댐퍼에 부하하였다. 이때 발생한 변위와 가속도는 LVDT (linear variable differential transformer)와 가속도계를 통하여 측정하였다.

Fig. 11 은 MR 현가장치 시스템을 장착한 1/4 차량에 단일 범프 (bump) 형태의 노면조건으로 가진 한 경우에 대한 실험결과이다. 이때 차량의 주행 속도는 3.08km/h 이다. Fig. 11(a) 는 차체의 변위를 나타낸 것으로, 프라이작 히스테리시스 보상기를

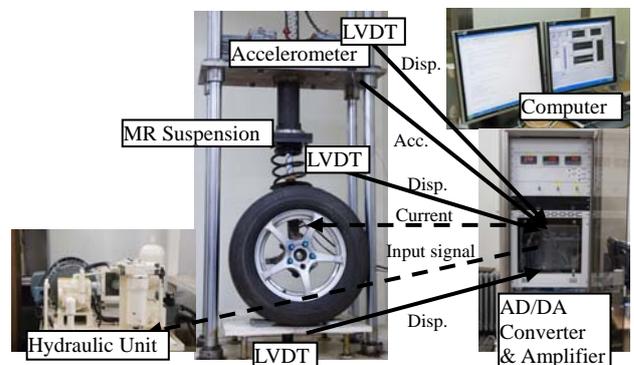
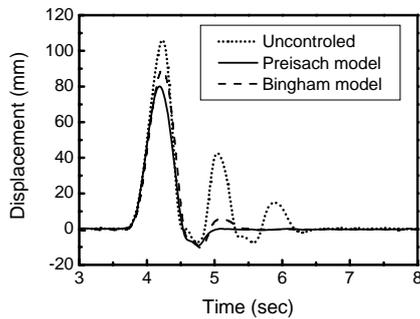
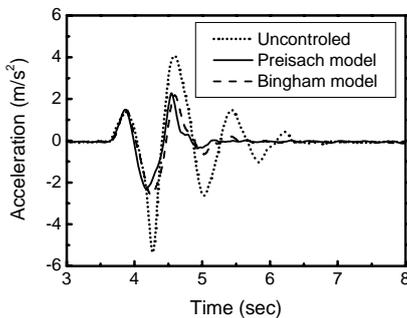


Fig. 10 Experimental configuration of the quarter car MR suspension



(a) displacement of sprung mass



(b) acceleration of sprung mass

**Fig. 11** Bump responses of the quarter car MR suspension system

적용하였을 경우가 역빙햄모델을 적용하였을 경우에 비해 보다 우수한 제어성능을 나타내고 있다. Fig. 11(b)는 차체의 가속도로, 역시 프라이작 히스테리시스 보상기를 적용하였을 경우가 보다 우수한 제어성능을 나타낸다. 이로부터, 입력 전류에 따른 MR 댐퍼의 댐핑력 히스테리시스를 선형화 함으로써 보다 정확한 제어 댐핑력을 인가하고 현가장치의 진동제어성능을 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 MR 댐퍼의 프라이작 히스테리시스 모델을 구축하여 이에 대한 평가를 수행하였다. 프라이작 히스테리시스 보상기를 설계하여 전류인가에 따른 MR 댐퍼의 댐핑력을 선형화 하였고, 이로부터 현가장치의 제어성능을 분석하였다. 먼저, 실험을 통해 구한 MR 댐퍼의 FOD 곡선 데이터에 근거해 프라이작 모델을 구축하였다. 제안된 프라이작 모델은 기존의 빙햄모델에 비해 우수한 댐핑력 추정성능을 보였다. 이후 MR 댐퍼를 위한 프라이작 히스테리시스 보상기를 구축하고 이 보상기를 LQR 제어기와 연계하여 1/4 차량의

MR 현가장치 시스템의 제어성능을 분석하였다. 프라이작 히스테리시스 보상기를 적용한 경우 역빙햄모델에 비해 우수한 제어성능을 나타내었다. 향후 본 연구에서 제안된 제어로직을 이용하여 다양한 노면에서의 제어성능시험이 수행 될 예정이다.

## 후 기

이 연구는 한국과학재단 도약연구지원사업(R17-2007-028-01000-0) 지원에 의하여 이루어졌으며 이에 감사 드립니다. 또한 MR 댐퍼를 제공한 GM Korea 에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Sung, K. G., Han, Y. M., Lim, K. H. and Choi, S. B., 2007, Discrete-Time Fuzzy Sliding Mode Control for a Vehicle Suspension System Featuring an Electrorheological Fluid Damper, *Smart Materials and Structures*, Vol.16, No.3, pp. 798~808.
- (2) Rajendran, Luo, A. C. J. and Rajendran, A., 2007, Periodic Motions and Stability in a Semi-Active Suspensions System with MR Damping, *Journal of Vibration and Control*, Vol.13, No.5, pp. 687~710.
- (3) Choi, S. B., Lee, S. K. and Park, Y. P., 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.
- (4) Wang, E. R., Ma, X. Q., Rakheja, S. and Su, C. Y., 2002, Modeling Hysteretic Characteristics of MR-fluid Damper and Model Validation, *Proceedings of the 41st IEEE Conference*, Vol.2, pp. 1675~1680.
- (5) Mittal, S. and Menq, C. H., 2000, Hysteresis Compensation in Electromagnetic Actuators Through Preisach Model Inversion, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol.5(4), pp. 394~409.
- (6) Shames, I. H. and Cozzarelli, F. A., 1992, *Elastic and Inelastic Stress Analysis*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, pp. 313~315.
- (7) Li, C. and Tan, Y., 2004, A Neural Networks Model for Electrorheological Fluids, *Smart Materials and Structures*, Vol.6, No.3, pp. 351~359.
- (8) Han, Y. M., Lim, K. H. and S. B. Choi, 2006, Hysteresis Investigation of Magnetorheological Fluid Using Preisach Model, *Transactions of the KSNVE*, Vol.16, No.1, pp. 3~11.
- (9) Rajesh Rajamani, 2006, *Vehicle Dynamics and Control*, Springer, New York, USA.
- (10) Wereley, N. M., Pang, L. and Kamath, G. M., 1998, Idealized Hysteresis Modeling of Electro-rheological and Magneto-rheological Dampers, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.9, pp. 642~649.
- (11) Ma, Xiao Qing, Rakheja, S. and Su, Chun-Yi, 2007, Development and Relative Assessments of Models for Characterizing the Current Dependent Hysteresis Properties of Magnetorheological Fluid Dampers, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.18, pp. 487~502.