

실험적으로 구한 MR 댐퍼의 개선된 Bouc-Wen 모델을 이용한 자동차 서스펜션 제어

Vehicle Suspension Control Using an MR Damper of a Bouc-Wen Model Obtained from Experimental Studies

전 형 진, 정 슬*

(Hyeong Jin Jeon and Seul Jung)

Abstract: This paper presents the modelling of an MR damper system through extensive experimental studies. The hysteresis of the MR damper is modelled by using the improved Bouc-wen model. A test bed for experimental studies of measuring parameters of the MR damper is designed and implemented. Based on the experimental data, the Bouc-Wen Model is modified for the MR damper system. To check the modelling property, a vehicle suspension system is controlled using a PID controller for the verification of the MR damper model.

Keywords: MR damper, modified Bouc-Wen model, vehicle suspension

I. 서론

시스템의 응답을 제어하는 변수 중 자동차에서 중요한 것은 댐핑이다. 노면으로부터 입력되는 다양한 외란에 대해 운전자가 편하게 느끼도록 하는 것이 현가장치의 역할이다. 가장 간단한 현가장치로는 곁판 스프링을 사용하여 노면으로부터의 입력이 운전자에게 미치는 영향을 부드럽게 하는 경우이다. 탄성으로는 운전자에게 미치는 영향을 제대로 제어 할 수 없으므로 댐퍼가 추가로 필요하게 된다.

최근에는 자동차 기술의 발달로 인해 다양한 형태의 반능동형 제어장치를 사용하고 있다. 이 장치 중에서 최근 많이 사용되는 있는 재료에는 자기유변 (MR: Magneto-Rheological)유체와 전기 (ER: Electro-Rheological)유체가 있다. 이 재료의 특성은 자기장 또는 전기장을 형성하게 되면 유효점성에 변화가 일어나게 되고 최종적으로는 항복강도 즉 댐퍼의 감쇠력을 조절할 수 있게 된다.

MR 댐퍼는 에너지 소모가 적고, 기계적인 마찰이 적으며, ER 유체보다 응답속도가 빠르고 적은 와트(watt)로도 감쇠력이 조절이 가능하다. 지진 발생 시 교량과 같은 건물 외부에 충격을 완화하는 장치에 많이 사용되고 있다. MR 브레이크도 마찬가지로 사용되고 있다.

감쇠력을 조절할 수 있는 댐퍼들은 전항복(pre-yield) 영역에서의 속도의 증가 및 감소할 때의 감쇠력의 차이를 보이는 이력현상(hysteresis)이 나타난다. MR 댐퍼는 이러한 비선형 특성을 갖고 있기 때문에 시스템에 적용하여 원하는 성능을 얻기 위해서는 정확한 모델링을 이용한 제어가 필요하다.

많이 사용되고 있는 MR 댐퍼 모델로는 Bingham 모델 [1,2], Bouc-Wen 모델[3], 개선된 Bouc-Wen 모델 및 Polynomial 모델[4] 등이 있다. 이 중에서 Bouc-Wen 모델은 Bouc가 제안하고, Wen과 여러 학자들에 의해 수정 보완됐으며, 시스템의 비선형적인 이력현상 특성을 모델링하는데 폭 넓게 사용되고 있다. Spencer은 MR 댐퍼의 비선형성과 이력현상 특성을 반영하는 개선된 Bouc-Wen 모델링을 제안하였다[5].

본 논문에서는 MR 댐퍼를 모델링하기 위해 시험기를 설계 및 제작하여 실험을 하였고, 얻어진 데이터를 통해 개선된 Bouc-Wen 모델의 모델링을 하였다. 다양한 데이터를 수집하기 위해 많은 실험하였고, 실험에서 얻은 데이터를 기반으로 모델링을 수행하였다. 그리고 모델링된 MR 댐퍼 모델을 MR 댐퍼의 감쇠력 제어 및 자동차의 시트 서스펜션에 적용시켜 성능을 검증하였다. 실험에 사용된 MR 댐퍼는 Load사의 "RD-1005-3"을 사용하였다.

II. MR 댐퍼 모델링

1. 개선된 Bouc-Wen 모델

그림 1은 개선된 Bouc-Wen 모델을 나타낸다. 개선된 Bouc-Wen 모델의 방정식은 다음과 같이 주어진다[5].

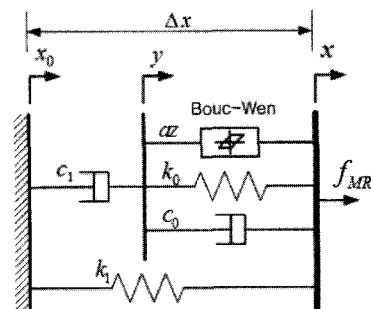


그림 1. 개선된 Bouc-Wen 모델.

Fig. 1. Modified Bouc-Wen model.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 9. 24., 수정: 2009. 11. 9., 채택확정: 2009. 12. 15.

전형진, 정슬: 충남대학교 메카트로닉스공학과

(wjs9773@hanmail.net/jungs@cnu.ac.kr)

※ 본 논문은 2008년 교육과학기술부의 특정기초사업과 2008년 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업에서 지원하여 연구하였음.

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

여기서 α 는 무차원 변수이고, k_0 는 큰 속도에서의 댐퍼 강성, c_0 는 큰 속도에서의 점성 댐핑, c_1 는 저속에서 비선형 roll-off 특성을 표현한다. 그리고 Bouc-Wen 모델의 \dot{z} 는 다음과 같다.

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

위 식에서 A, β, γ 는 댐퍼의 히스테리시스 소성특성을 결정하는 무차원 변수이며, \dot{y} 는 식(1)로부터 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{y} = \frac{1}{(c_0 + c_1)} \{ \alpha z + c_0 \dot{x} + k_0(x-y) \} \quad (3)$$

위 식에서 α 와 c_0 및 c_1 는 댐퍼에 인가되는 전압의 함수로서 입력전압에 따른 이중점성 특성을 표현하며, 감쇠력 f_{MR} 는 다음과 같이 주어진다.

$$f_{MR} = \alpha z + c_0(\dot{x}-\dot{y}) + k_0(x-y) + k_1(x-x_0) \quad (4)$$

여기서 k_1 는 어큐뮬레이터(accumulator)의 강성이고 x_0 는 댐퍼의 초기변위이다. 식 (1)을 식 (4)에 대입하여 간략히 정리하면 최종 감쇠력은 다음과 같다.

$$f_{MR} = c_1 \dot{y} + k_1(x-x_0) \quad (5)$$

MR 댐퍼의 특성은 인가전압과 관계가 있으며, 이 관계는 다음 식에 의해 주어진다.

$$\begin{aligned} \alpha &= \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \\ c_0 &= c_0(u) = c_{0a} + c_{0b} u \\ c_1 &= c_1(u) = c_{1a} + c_{1b} u \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $\alpha_a, \alpha_b, c_{0a}, c_{0b}, c_{1a}, c_{1b}$ 는 상수이고, u 는 외부 전압 v 와 다음 수식으로 표현되는 시간지연효과를 갖고 있다.

$$\dot{u} = -\eta(u-v) \quad (7)$$

또한, MR 댐퍼의 전압에 따른 최대 하중 및 등가점성 감쇠력(C_{eq})를 알아보기 위해 한 주기 당 소산되는 점성 에너지 식은 다음과 같다[6].

$$U_d = \oint f_{MR} dx = \int_0^{2\pi/\omega} f_{MR} \dot{x} dt \quad (8)$$

여기서 x 는 다음과 같이 주어진다.

$$x = X_0 \sin \omega t \quad (9)$$

식 (8)과 식 (9)을 이용하여 C_{eq} 을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} U_d &= \oint C_{eq} \dot{x} dx = C_{eq} \int_0^{2\pi/\omega} f_{MR}(\dot{x})^2 dt \\ &= C_{eq} X_0^2 \omega^2 \int_0^{2\pi/\omega} (\cos \omega t)^2 dt = C_{eq} \pi \omega X_0^2 \end{aligned} \quad (10)$$

위 식을 다시 정리하면 최종 식은 다음과 같이 주어진다.

$$C_{eq} = \frac{U_d}{\pi \omega X_0^2} \quad (11)$$

2. 실험 방법 및 모델링

MR 댐퍼를 모델링을 하기 위해서는 먼저 특성 실험을 해야 한다. 이를 위해 그림 2와 같이 시험기를 제작을 하였고, 댐퍼의 압축 및 인장 실험을 위해 DC motor를 사용하였다. 제어주기는 4ms이고, 모터의 사양은 500rpm, 19Ncm이며, 댐퍼의 감쇠력을 측정하기 위해 $\pm 1000N$ 을 측정할 수 있는 로드셀을 사용하였다.

메인 프로세서는 ATmega128이고, MFC 프로그램을 이용하여 PC제어를 하였고, MR 댐퍼를 제어하기 위해 "Wonder Box(UI7000)"을 사용하였다. 특성 실험은 MR 댐퍼의 변위 변화를 $\pm 0.4cm$ 진폭, 0.4Hz 주파수를 갖는 사인파를 입력하고, MR 댐퍼의 제어장치에 입력전압은 0.0V, 0.2V, 0.4V, 0.6V, 0.8V, 1.0V, 1.2V이고, 초기 변위는 2.0cm이다. 이때 초기 감쇠력을 0N으로 설정하여 감쇠력을 측정하는 실험을 하였다[7].

그림 3은 실험 결과로서, (a)는 변위와 힘과의 관계, (b)는 힘과 속도의 관계를 나타낸다. 여기서 데이터의 떨림 현상은 실험장비의 성능에 의해서 발생하는 현상이다. (c)는 한 주기 당 소산되는 점성 에너지, (d)는 전압에 따른 최대 하중 및 등가점성 감쇠력을 나타내고, 이를 바탕으로 3차 최소사승법을 이용하여 보간하였고 표 2의 개선된 Bouc-Wen 모델에 필요한 변수들을 찾는데 이용하였다.

모델링 시뮬레이션은 실험데이터의 모양을 만족하도록 시행착오 과정을 거쳐 변수들의 값을 찾았고, 이를 바탕으로 모델링한 결과는 그림 4이다. 여기서 입력전압이 0V, 0.6V인 경우에 유사하게 감쇠력이 나타나는데, 이것은 MR 댐퍼의 코일에 인가되는 전압이 일정한 값 이상인 경우만 전자석이 활성화되는 임계영역이 있기 때문이다. 그리고 그림 4(b)에서 입력전압 1.0V, 1.2V인 경우 속도가 (+)방향으로 증가할 때는 모델링 오차가 작지만 속도가 (-)방향으로 증가할 때는 모델링 오차가 크게 발생하였다. 그 이유는 MR 댐퍼의 특성보다는 실험장비의 성능 중 인장능력이 압축능력보다 떨어지기 때문에 생성되는 실험 오차이다.

표 1은 실험데이터와 모델과의 오차를 나타낸다. $\epsilon = \sqrt{\sum_{i=1}^{629} e_i^2}$ 이다. 평균오차는 샘플수(629)로 나눈 값이다.

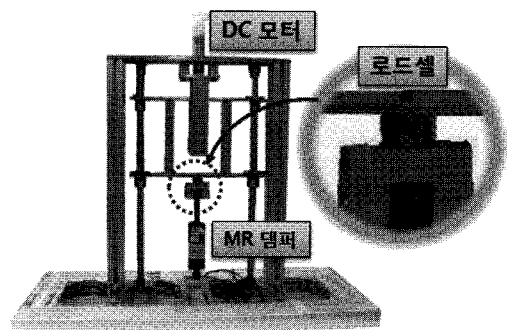
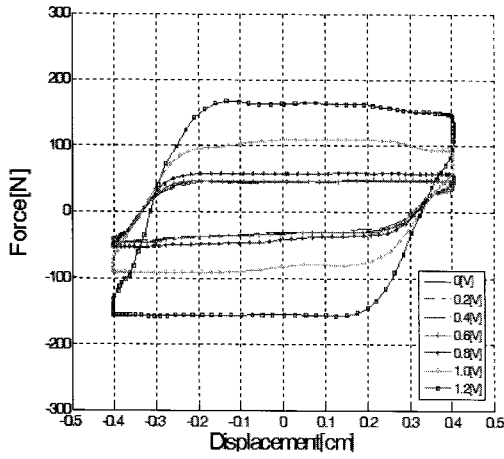
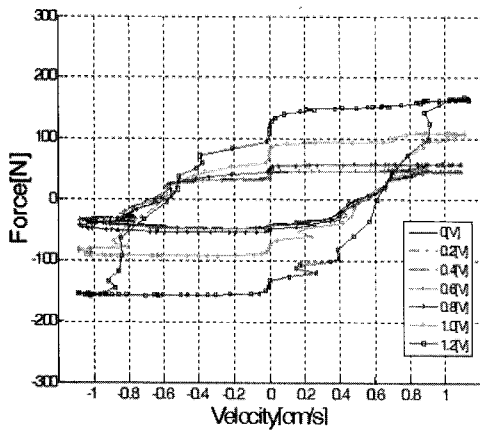


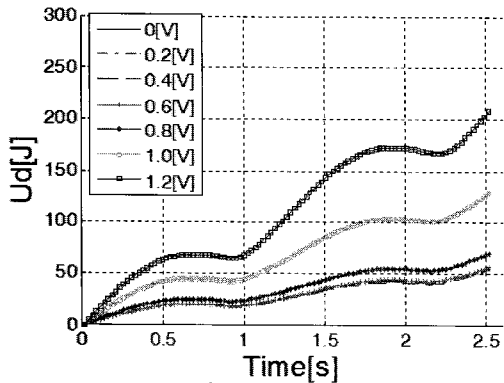
그림 2. MR 댐퍼의 성능 시험기.
Fig. 2. MR damper performance tester.



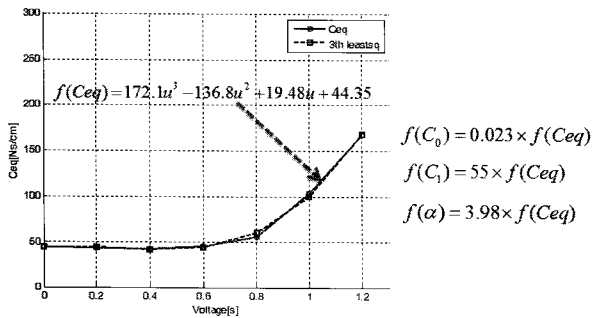
(a) Force vs. Displacement



(b) Force vs. Velocity



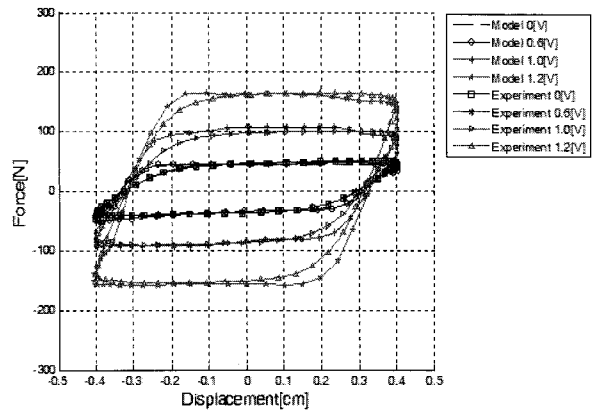
(c) U_d



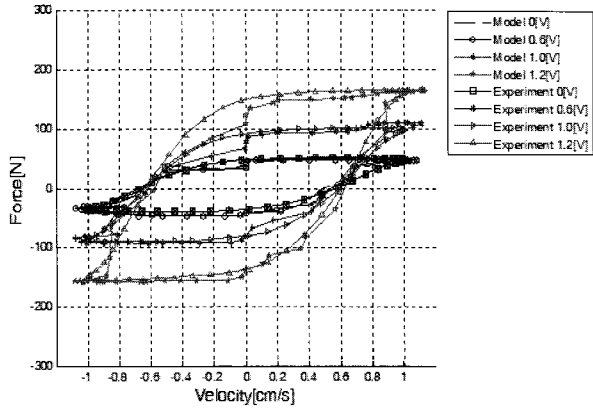
(d) C_{eq}

그림 3. MR 댐퍼의 실험 결과.

Fig. 3. Experimental results of MR damper.



(a) Force vs. Displacement



(b) Force vs. Velocity

그림 4. 모델링 결과.

Fig. 4. Modeling results.

표 1. 모델링 오차.

Table 1. Modelling error.

입력전압(V)	ϵ (N)	평균오차(N)
0	153.1209	0.2434
0.6	167.7520	0.2667
1.0	172.9907	0.2750
1.2	515.1501	0.8190
총 RMS 오차	252.2534	0.4010

표 2. 모델 변수.

Table 2. Model parameters.

변수	값	변수	값
C_{0a}	1.02005 $N \cdot s/cm$	α_{0a}	176.513 N/cm
C_{0b}	0.44804 $N \cdot s/cm \cdot V$	α_{0b}	77.5304 $N/cm \cdot V$
C_{0c}	-3.1464 $N \cdot s/cm \cdot V^2$	α_{0c}	-544.464 $N/cm \cdot V^2$
C_{0d}	3.9583 $N \cdot s/cm \cdot V^3$	α_{0d}	684.958 $N/cm \cdot V^3$
k_0	20 N/cm	γ	111.995 cm^{-2}
C_{1a}	2439.25 $N \cdot s/cm$	β	111.995 cm^{-2}
C_{1b}	1071.4 $N \cdot s/cm \cdot V$	A	12.843
C_{1c}	-7524 $N \cdot s/cm \cdot V^2$	n	2
C_{1d}	9465.5 $N \cdot s/cm \cdot V^3$	η	190 sec^{-1}
k_1	-3 N/cm	x_0	2 cm

III. 개선된 Bouc-Wen 모델의 감쇠력 제어

1. 감쇠력 제어기

실험적으로 구한 변수로 모델링된 MR 댐퍼의 감쇠력 제어에 사용된 방식은 모델 기반의 PID 제어를 사용하였다. 그림 5는 제어 블록도이고, 여기서 오차 e_f 는 현재 모델에서 나오는 감쇠력 f_{MR} 과 목표 감쇠력 f_d 의 차이이며, f_c 는 PID 제어기의 출력이다. u 는 f_c 에 모델링에 의해서 계산된 현재 감쇠력 \hat{f}_{MR} 을 합한 제어량이고, u 를 모델의 입력전압 v 로 변경하여 개선된 Bouc-Wen 모델의 감쇠력 제어를 하였고, x 는 모델의 변위입력이다. 개선된 Bouc-Wen 모델을 이용하여 모델링 된 모델과 실제 MR 댐퍼의 특성이 같다는 가정하에 감쇠력 제어를 하였다.

2. 제어기의 제어량과 MR 댐퍼의 입력전압과의 관계

제어 성능 향상을 위해 제어기의 제어량과 MR 댐퍼의 입력전압과의 관계를 알아야 한다. 이 관계는 앞의 실험을 통해서 구한 전압과 감쇠력의 관계식을 다음과 같이 정의하였다.

$$f_{MR} = 172.1v_{(i)}^3 - 136.8v_{(i)}^2 + 19.48v_{(i)} + 44.35 \quad (12)$$

이때 f_{MR} 는 모델링 되어진 MR 댐퍼의 감쇠력이고 $v_{(i)}$ 는 입력전압이다. 원하는 f_{MR} 를 알고 있으면, 입력 전압 $v_{(i)}$ 는 3차 방정식의 해를 구하는 식을 이용하면 된다. 하지만 3차 방정식의 해는 3개 이므로 이 중 원하는 해를 찾아야 한다. 그림 6은 f_{MR} 가 0~160N까지 변화 할 때 각 해의 변화 그래프를 나타낸다. f_{MR} 가 45.5 이하인 경우 해가 일정한 형태가 아니므로 식 13과 같이 제어량과 MR 댐퍼의 입력전압 간에 관계를 정의하였다.

$$f_{MR} = \begin{cases} f_{MR} = 45.5 & \text{if } f \leq 45.5 \\ f_{MR} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

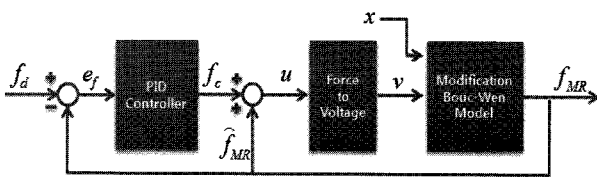


그림 5. PID 제어 블록도.

Fig. 5. PID control block diagram.

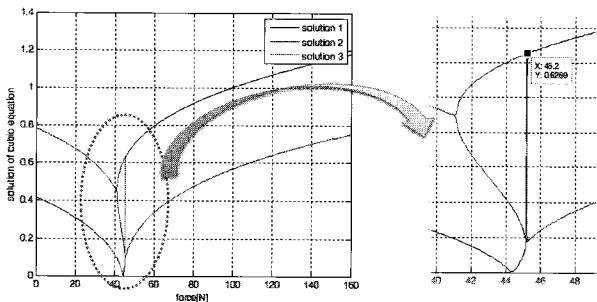
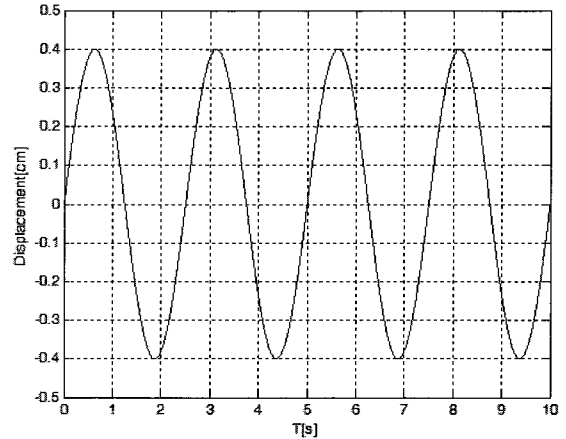


그림 6. 방정식 해의 변화.

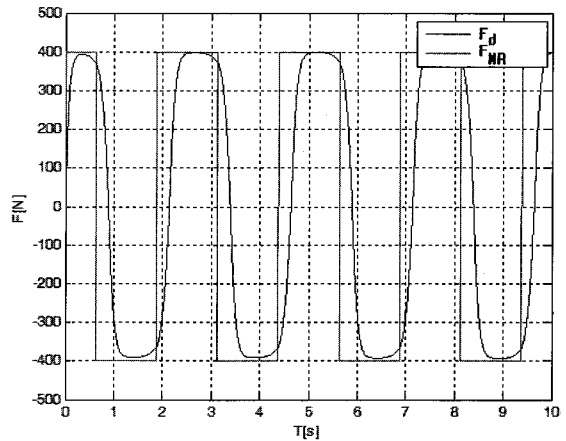
Fig. 6. The change of the solution of equation.

3. 감쇠력 제어 결과

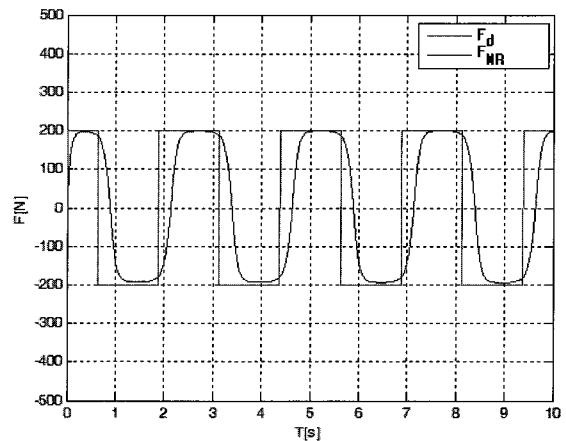
입력 변위가 그림 7(a)일 경우에 목표 MR 댐퍼의 감쇠력의 최소·최대치를 조절하는 시뮬레이션을 하였다. 그림 7(b),(c)는 MR 댐퍼의 감쇠력이 $\pm 400N$, $\pm 200N$ 인 경우에 대한 감쇠력 출력 그래프이며, 원하는 감쇠력을 잘 추종하는 것을 볼 수 있다. 응답속도가 지연되는 현상은 MR 댐퍼의 반응속도가 빠르지 않기 때문이다.



(a) 변위 x



(b) $f_d : \pm 400N$



(c) $f_d : \pm 200N$

그림 7. MR 댐퍼의 감쇠력 시뮬레이션.

Fig. 7. The simulation of the MR damper force.

IV. 시트 서스펜션에 적용 결과

1. 시트 서스펜션

자동차에 많이 사용되는 시트 서스펜션을 이용하여 모델링을 검증하였다. 그림 8에서 사용되어진 변수들은 서스펜션 변위 x_{s0} , x_{s1} , x_{s2} , 시트상의 부하질량 m_1 , 서스펜션 이동질량 m_2 , 시트의 쿠션으로 인한 감쇠계수 c_s , 스프링 계수 k_{s2} , 시트와 차체 사이의 스프링 계수 k_{s1} 이며, 이 사이에 MR 댐퍼가 연결되어 있어 서스펜션의 진동을 제어한다. 전체 서스펜션에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m_2 \ddot{x}_{s2} &= -c_s(\dot{x}_{s2} + \dot{x}_{s1}) - k_{s2}(x_{s2} - x_{s1}) \\ m_1 \ddot{x}_{s1} &= -k_{s1}(x_{s1} - x_{s0}) - f_{MR} + c_s(\dot{x}_{s2} - \dot{x}_{s1}) + k_{s2}(x_{s2} - x_{s1}) \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 f_{MR} 은 개선된 Bouc-Wen 모델의 감쇠력이고 식은 다음과 같다.

$$f_{MR} = c_1(\dot{y} - \dot{x}_{s0}) + k_1[(x_{s1} - x_{s0}) - x_0] \quad (15)$$

식 (14)에 식 (15)를 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_{s1} &= c_s(\dot{x}_{s2} - \dot{x}_{s1}) + k_{s2}(x_{s2} - x_{s1}) - (k_1 + k_{s1})(x_{s1} - x_{s0}) \\ &\quad - c_1(\dot{y} - \dot{x}_{s0}) + k_1 x_0 \end{aligned} \quad (16)$$

여기서

$$\begin{aligned} \dot{y} &= \frac{1}{(c_0 + c_1)} \{ \alpha z + k_0(x - y) + c_0 \dot{x}_{s1} + c_1 \dot{x}_{s0} \} \\ \dot{z} &= -\gamma |\dot{x}_{s1} - \dot{y}| |z|^{n-1} - \beta (x_{s1} - y) |z|^n + A(x_{s1} - \dot{y}) \end{aligned}$$

위 식들을 $x_s = [x_{s1} \ x_{s2}]^T$ 에 관하여 다시 정리를 하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \ddot{x}_{s1} &= -\frac{c_s}{m_1} \dot{x}_{s1} + \frac{c_s}{m_1} \dot{x}_{s2} - \frac{(k_1 + k_{s1} + k_{s2})}{m_1} x_{s1} + \frac{k_{s2}}{m_1} x_{s2} \\ &\quad + \frac{c_1}{m_1} \dot{x}_{s0} + \frac{(k_1 + k_{s1})}{m_1} x_{s0} - \frac{c_1}{m_1} \dot{y} + \frac{k_1}{m_1} x_0 \\ \ddot{x}_{s2} &= \frac{c_s}{m_2} \dot{x}_{s1} - \frac{c_s}{m_2} \dot{x}_{s2} + \frac{k_{s2}}{m_2} x_{s1} - \frac{k_{s2}}{m_2} x_{s2} \end{aligned} \quad (17)$$

x_s 에 관하여 행렬식 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\ddot{\bar{x}}_s = C\dot{\bar{x}}_s + K\bar{x}_s + E\dot{a} + Fv$$

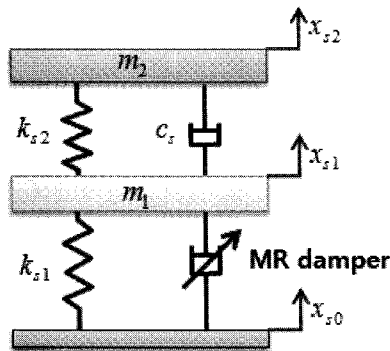


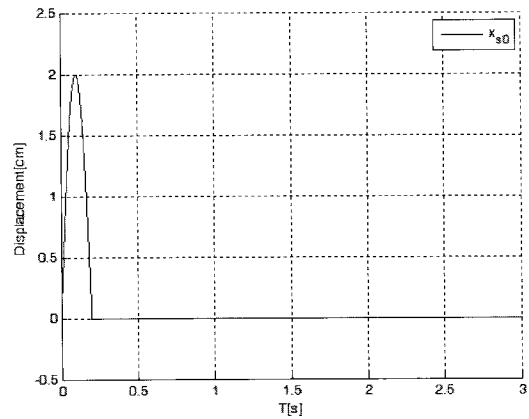
그림 8. 시트 서스펜션 구조.
Fig. 8. Seat suspension diagram.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \ddot{x}_{s1} \\ \ddot{x}_{s2} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{c_s}{m_1} & \frac{c_s}{m_1} \\ \frac{c_s}{m_2} & -\frac{c_s}{m_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_{s1} \\ \dot{x}_{s2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{(k_1 + k_{s1} + k_{s2})}{m_1} & \frac{k_{s2}}{m_1} \\ \frac{k_{s2}}{m_2} & -\frac{k_{s2}}{m_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{s1} \\ x_{s2} \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} \frac{c_1}{m_1} & \frac{(k_1 + k_{s1})}{m_1} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_{s0} \\ x_{s0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{c_1}{m_1} & -\frac{k_1}{m_1} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y} \\ x_0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (18)$$

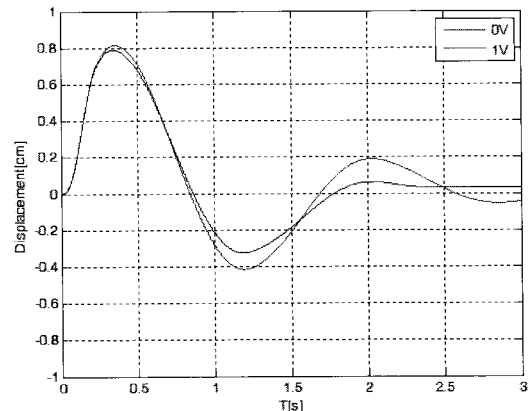
2. 시트 서스펜션 제어

시트 서스펜션의 x_{s0} 을 그림 9(a)인 경우에 대해서 그림 9(b)의 x_{s2} 에 대한 변화를 살펴보았다. 시뮬레이션에 사용된 변수의 값들은 m_1 는 19kg, m_2 는 55kg, k_{s1} 는 1200N/m, k_{s2} 는 800N/m, c_s 는 500Ns/m이다[8].

그림 9에서 보면, x_{s2} 가 0cm로 빠른 수렴을 하기 위해서는 입력전압 제어가 필요하다. 모델링 검증에 사용된 제어기는 반 능동형 댐퍼에 많이 사용되고 있는 방식 중 하나인 SkyHook 제어방식[9,10]과 PID 제어방식의 성능을 비교하였다. SkyHook 제어는 일반적으로 ON/OFF 제어, 연속제어(continuous skyhook control) 및 상대 변위 제어 알고리즘이 있다. 실험에 사용된 제어는 ON/OFF제어와 연속제어만 사용하였다. ON/OFF 제어의 방식은 조건 식 (19)를 만족하도록 MR 댐퍼의 입력전압을 ON/OFF 하는 방식이며, 연속제어의 방식은 식 (20)과 같이 입력전압의 최대값과 최



(a) Input displacement : x_{s0}



(b) x_{s2} response for input voltage.

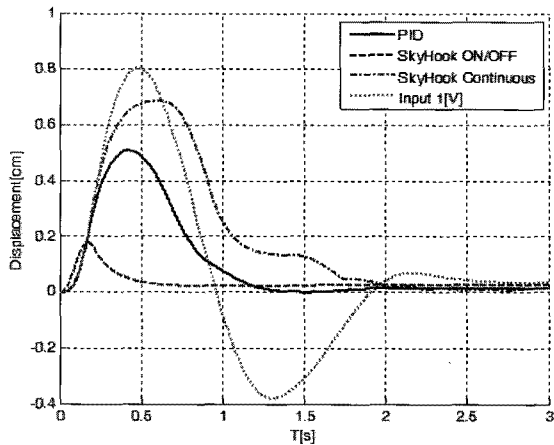
그림 9. 시뮬레이션 결과.
Fig. 9. Simulation results.

소값을 미리 정하고 중간에 식 $c_{sh} \frac{x_{s2}}{x_{s2} - x_{s1}}$ 을 이용하여 입력전압을 생성하는 방식이다[11].

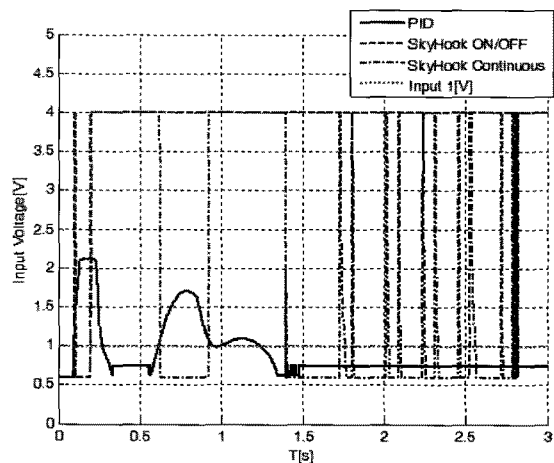
$$c = \begin{cases} c_{on} & \text{if } x_{s1}(x_{s1} - x_{s0}) > 0 \\ c_{off} & \text{if } x_{s1}(x_{s1} - x_{s0}) \leq 0 \end{cases} \quad (19)$$

$$c_d = \begin{cases} c_{max} & \text{if } c_{sh} \frac{x_{s2}}{x_{s2} - x_{s1}} > c_{max} \\ c_{sh} \frac{x_{s2}}{x_{s2} - x_{s1}} & \text{if } c_{min} < c_{sh} \frac{x_{s2}}{x_{s2} - x_{s1}} \leq c_{max} \\ c_{min} & \text{if } c_{sh} \frac{x_{s2}}{x_{s2} - x_{s1}} < c_{min} \end{cases} \quad (20)$$

그림 10의 경우에 SkyHook ON/OFF 제어가 가장 빠르게 0cm에 가깝게 수렴하지만, SkyHook ON/OFF 제어 및 연속 제어는 0cm로 수렴이 되지 않아 제어 입력 전압이 ON 또는 특정 전압이 계속 들어가는 현상이 나타난다. 이에 반해 PID 제어 방식은 다소 수렴속도가 느리지만 0cm에 수렴하며, 입력전압 또한 offset 전압(+0.6V)로 유지하게 된다. 그러므로 제어 환경에 맞게 제어기를 선택해야 한다.



(a) 변위 x_{s2} 의 응답



(b) Controller input voltages

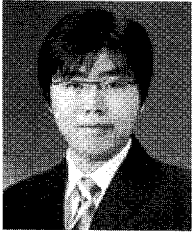
그림 10. 시뮬레이션 결과.
Fig. 10. Simulation results.

V. 결론

본 논문에서는 MR 댐퍼를 모델링하기 위해서 성능 시험기를 설계 및 제작하여 실험을 하였다. 댐퍼의 특성인 이력현상을 개선된 Bouc-Wen 모델을 이용하여 모델링하였다. 이 모델링된 모델의 성능 검증을 위해서 모델 기반의 PID 제어를 이용하여 감쇠력 제어를 해본 결과 원하는 감쇠력을 잘 추종하는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 자동차의 시트 서스펜션 제어에 MR 댐퍼 모델을 적용하여 보았다. 다양한 제어 방식을 적용하여 응답 특성을 확인 할 수 있었다.

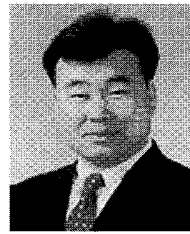
참고문헌

- [1] R. Stanway, J. L. Sproston, and N. G. Stevens, "Non-linear identification of an electrorheological vibration damper," *IFAC Identification and System Parameter Estimation*, pp.195-200, 1985.
- [2] R. Stanway, J. L. Sproston, and N. G. Stevens, "Non-linear modelling of an electro-rheological vibration damper," *J. of Electrostatics*, vol. 20, pp. 167-184, 1987.
- [3] Y. K. Wen, "Method of random vibration of hysteretic systems," *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, vol. 102, no. EM2, pp. 249-263, 1976.
- [4] 이순규, 최승복, "승용차용 MR 댐퍼의 이력현상 모델," 한국자동차공학회, 제9권 제1호, pp. 189-197, 2001.
- [5] B. F. Spencer Jr, S. J. Dyke, M. K. Sain, and J. D. Carlson, "Phenomenological model for a magneto-rheological dampers," *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, vol. 123, no. 3, pp. 230-238, 1997.
- [6] W. H. Li, G. Z. Yao, G. Chen, S. H. Yeo, and F. F. Yap, "Testing and steady state modeling of a linear MR damper under sinusoidal loading," *Smart Materials and Structures*, vol. 9, Issue 1, pp. 95-102, 2000.
- [7] 최현, "유연한 구조물의 진동제어를 위한 전자석 작동기 구동방식의 하이브리드 질량댐퍼," 연세대학교 대학원(기계공학과) 학위논문(박사), 2008.
- [8] 양주호, 김영완, 정황훈, "MR 댐퍼를 갖는 세미-액티브 시트 서스펜션 시스템의 수학적 모델링 및 특성해석에 관한 연구 II," 한국동력기계공학회, 춘계학술대회논문집, pp. 261-266, 2007.
- [9] M. J. Karnopp, M. J. Crosby, and R. A. Harwood, "Vibration control using semi-active force generators," *ASME J. of Engineering for Industry*, vol.96, no.2, pp. 619-626, 1974.
- [10] J. Emura, S. Kakizaki, F. Yamaoka, and M. Nakamura, "Development of the semi-active suspension system based on the sky-hook damper theory," *SAE paper*, no. 940863, 1994.
- [11] 안병일, 전도영, "연속 스카이훅 제어를 이용한 운전석의 진동 제어 연구," 대한기계학회, 춘계학술대회, pp. 769-774, 2002.



전 형 진

2007년 한밭대 제어계측공과 졸업.
2009년 충남대 지능로봇시스템전공 대학원 석사. 관심분야는 보행 보조 장치, 하드웨어 구현, 지능로봇 시스템.



정 슬

1988년 미국 웨인 주립대 전기 및 컴퓨터 공학과 졸업. 1991년 미국 캘리포니아대 데이비스 전기 및 컴퓨터 공학과 석사. 동 대학 박사. 1997년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수. 관심분야는 지능제어 및 지능로봇 시스템, 임베디드 제어기 설계, 로봇과 인간의 상호작용, 가정용 서비스 로봇 개발.