

단자유도 시스템에 대한 이력점성 모델을 사용한  
MR감쇠기 변수 연구  
Parametric Study on SDOF System with MR Damper  
Using Hysteretic Biviscous Model

이 상 현\*      민 경 원\*\*      이 루 지\*\*\*      김 대 곤\*\*\*\*  
Lee, Sang-Hyun    Min, Kyung-Won    Lee, Roo Jee    Kim, Dae-Kon

---

ABSTRACT

In this paper, various dynamic model of magnetorheological (MR) damper, is required for describing the hysteresis of MR damper and for their application are investigated to structural control. The dynamic characteristics and control effects of the modeling methods for MR dampers such as Bingham, biviscous, hysteretic biviscous, simple Bouc-Wen, Bouc-Wen with mass element, and phenomenological models are studied. Of these models, hysteretic biviscous model which is simple and describes the hysteretic characteristics, is chosen for numerical studies. The capacity of MR damper is determined as a portion of not the building weight but the lateral restoring force.

---

1. 서    론

지진이나 바람과 같은 동하중에 의하여 구조물에 유발되는 진동응답의 크기를 줄이기 위하여 많이 사용되고 있는 감쇠장치 중, 준능동 감쇠장치는 적은 전력을 가지고 우수한 제어능력과 안정성을 확보할 수 있으므로, 강진하중을 받는 건축구조물, 교량, 그리고 대형토목구조물의 진동제어에 유리한 점을 가지고 있다<sup>[1-2]</sup>. 준능동 감쇠기의 하나인 MR감쇠기는 자기신호에 따라 MR 유체의 점성을 쉽게 바꿀 수 있고, 대용량의 감쇠력도 감쇠장치 외의 특별한 기계적 장치 없이 쉽게 구현할 수 있어서 최근 들어 많은 학자들에 의하여 건축구조물에의 적용성에 대한 이론적, 실험적 연구가 수행되고 있다<sup>[3-6]</sup>. 감쇠기는 고유의 이력특성과 설계변수를 가지고 있기 때문에 설계방법도 그에 따라 매우 다르다. 이상현 등은 고유 값 지정방법을 통하여 단위크기의 점성 및 강성에 대한 구조물의 고유 값의 변화율에 의하여 점탄성 감쇠기의 최적분포를 구할 수 있음을 보였다<sup>[7]</sup>. Filatrault 와 Cherry는 마찰감쇠기에 대하여, 구조물의 주기, 지진의 주요주기, 그리고 감쇠기의 미끄러짐 힘에 대한 변수 연구를 통하여, 변위와 소산에너지의 합으로 주어지는 성능지수를 최소화하는 마찰감쇠기 미끄러짐 힘의 최적분포를 제시하였다<sup>[8]</sup>. Fu와 Cherry는 마찰감쇠된 시스템의 횡력수정 계수를 구하고

---

\* 서울대학교 공학연구소 객원연구원, 공학박사, 전화: 02-709-2731, E-mail: lshyun@msn.com

\*\* 단국대학교 건축대학 건축공학과 부교수

\*\*\* 단국대학교 건축대학 건축공학과, 석사과정

\*\*\*\* 서울산업대학교, 구조공학과, 조교수

이를 사용하여 마찰감쇠기의 설계하였다<sup>[9]</sup>. 일반적으로 MR 감쇠기는 탄성, 점성, 그리고 마찰 특성 모두를 가지고 있으며, 자기장의 크기에 따라 그 크기가 변하기 때문에 매우 강한 비선형성을 가지고 있다<sup>[10]</sup>. MR 감쇠기의 힘-변위와 힘-속도 관계를 모사하기 위하여 Bingham<sup>[11]</sup>, 이점성(biviscous)<sup>[12]</sup>, 이력 이점성(hysteretic biviscous)<sup>[13]</sup>, 단순 Bouc-Wen, 질량요소를 가지는 Bouc-Wen<sup>[14]</sup>, 그리고 현상학 모델<sup>[15]</sup> 등이 기존 연구에 의하여 사용되었다. Yang은 이러한 모델들의 이력특성을 비교한 후 실험을 통하여 구한 20ton급 대용량 MR 감쇠기의 이력곡선과의 오차를 최소화하도록 단순 Bouc-Wen 모델, 질량요소를 가지는 Bouc-Wen 모델, 그리고 현상학 모델의 변수들의 수치를 정하였다<sup>[16, 17]</sup>. 본 연구의 목적은 감쇠기의 이력특성을 고려하여 감쇠기의 용량, 설치위치, 그리고 설치 개수 등을 체계적으로 제시하는 예비설계절차에 적합한 모델을 제안할 때, 그에 따른 설계변수를 선정하기 위한 것이다. 먼저, Yang이 20ton급 감쇠기에 대하여 제시한 모델들과, 이 모델들과 유사한 이력특성을 보이도록 변수가 설정된 각 모델들을 3층 전단건물에 적용하여, 제어성능들을 비교 검토하였다. 이를 통하여 선정된 이력이점성 모델을 사용하여 단자유도 구조물에 대한 변수연구를 수행하여 각 변수가 제어성능에 미치는 영향을 분석함으로써, 목표제어성능을 달성하기 위하여 요구되는 감쇠기 이력특성을 파악하였다. 지진응답특성이 지진 및 구조물의 주기에 따라 매우 달라짐을 고려하여 20개의 지진을 사용하여 얻은 결과를 평균하였고, 비제어시 구조물의 응답스펙트럼에 대하여 정규화한 변수를 사용하였다.

## 2. MR감쇠기 모델

Wereley는 다음과 같이 MR감쇠기의 힘-속도 관계에서 이력특성을 가지는 이력 이점성 모델을 제안하였다<sup>[13]</sup>.

$$F_{MR} = \begin{cases} C_1\dot{x} - f_y, & \dot{x} < -\dot{x}_1 & \ddot{x} > 0 \\ C_0(\dot{x} - v_o), & -\dot{x}_1 \leq \dot{x} < \dot{x}_2 & \ddot{x} > 0 \\ C_1\dot{x} + f_y, & \dot{x}_2 \leq \dot{x} & \ddot{x} > 0 \\ C_1\dot{x} + f_y, & \dot{x}_1 \leq \dot{x} & \ddot{x} < 0 \\ C_0(\dot{x} + v_o), & -\dot{x}_2 \leq \dot{x} < -\dot{x}_1 & \ddot{x} < 0 \\ C_1\dot{x} - f_y, & \dot{x} < -\dot{x}_2 & \ddot{x} < 0 \end{cases} \quad (1)$$

여기서,

$$\dot{x}_1 = \frac{f_y - C_o\dot{x}_o}{C_o - C_1}, \quad \dot{x}_2 = \frac{f_y + C_o\dot{x}_o}{C_o - C_1} \quad (2)$$

이고,  $v_o$ 는 저속도 영역의 이력곡선의 폭을 결정하는 변수이다.

본 연구에서는 감쇠력 계산에 Bouc-Wen 모델을 사용하는 경우와 달리 적분과정을 요구하지 않기 때문에 적은 시간노력을 요구하며, 힘-속도 관계의 이력특성을 모사할 수 있는 이력 이점성 모델을 사용하여 변수연구를 수행하기로 한다.

## 3. MR 감쇠기 용량을 결정하기 위한 변수연구

### 3.1 성능평가지수

단자유도 및 다자유도 구조물의 제어성능을 평가하기 위한 성능지수는 다음과 같다.

$$J_1 = \max_{i=1, \dots, n} \left\{ \frac{\max_t |d_i(t)|}{d_n^{\max}} \right\}, J_2 = \max_{i=1, \dots, n} \left\{ \frac{\max_t |\ddot{x}_{ai}(t)|}{\ddot{x}_{an}^{\max}} \right\}, J_3 = \max_{i=1, \dots, n} \left\{ \frac{\sigma_{d_i}}{\sigma_{d_n}^{\max}} \right\}, J_4 = \max_{i=1, \dots, n} \left\{ \frac{\sigma_{\ddot{x}_{ai}}}{\sigma_{\ddot{x}_{an}}^{\max}} \right\} \quad (3)$$

여기서,  $d_i$ 는  $i$ 층 층간변위를,  $d_n^{\max}$  비제어시 최대층간변위,  $\ddot{x}_{ai}$ 는  $i$ 층 절대가속도,  $\ddot{x}_{an}^{\max}$ 는 비제어시 최대 절대가속도를 나타낸다. 그리고,  $\sigma$ 는 RMS 응답을 나타낸다.

### 3.2 질량정규화된 단자유도 시스템

다음과 같이 질량 정규화된 단자유도 시스템에 대한 수치해석을 통하여 MR 감쇠기의 변수연구를 수행하기로 한다.

$$\ddot{x} + 2\zeta_1\omega_1\dot{x} + \omega_1^2x = F_{MR} - \ddot{x}_g \quad (4)$$

여기서,  $\zeta_1$ ,  $\omega_1$ 은 각각 단자유도 시스템의 감쇠비와 고유진동수를 나타내고,  $x$ 는 구조물의 변위,  $\ddot{x}_g$ 는 지반가속도이다.  $F_{MR}$ 은 앞 절에서 언급한대로 이력 이점성 모델을 나타내는 (1)식에 의하여 주어진다.

### 3.3 조화하중

이력 이점성 모델의 이력곡선을 결정하는 변수는  $f_y, c_o, c_1, x_o$ 이다. 본 절에서는 최대 크기 1이고, 진동수  $\omega$ 를 가지는 조화하중을 지진하중으로 사용하여,  $\zeta_1=0.05$ 이고,  $\omega_1=1$ 을 가지는 단자유도 시스템을 가진하였다. 그리고 각 변수의 크기를 다음과 같이 바꾸면서 성능에 미치는 영향을 파악하였다.  $f_y=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ ,  $c_o=0.5\omega_1, 1.0\omega_1, 2.0\omega_1, 4.0\omega_1$ ,  $c_1=0, 0.1\omega_1, 0.2\omega_1, 0.4\omega_1$ ,  $v_o=0, 0.1V_o, 0.5V_o, 1V_o$ . 여기서,  $V_o$ 는 비제어시 속도응답의 표준편차를 나타낸다.

그림 1은  $c_o=4.0\omega_1$ ,  $c_1=0$ ,  $v_o=0$ 인 경우에,  $f_y$ 의 변화에 따른 성능지수의 변화를 보여준다.  $f_y$ 가 증가하면서  $J_1$ 은  $\omega$ 의 크기에 관계없이 감소함을 알 수 있다.  $\omega$ 가 2보다 작은 구간에서는  $\omega$ 에 따라 감쇠기의 성능의 변화가 매우 심하며, 공진시 가장 좋은 성능을 보인다.  $\omega$ 가 2보다 큰 구간에서는  $f_y$ 의 영향이 성능지수 감소에 일정한 영향을 미치며,  $\omega$ 의 변화에 따른 성능지수의 변화는 거의 없다. 절대가속도 응답의 경우,  $\omega$ 가

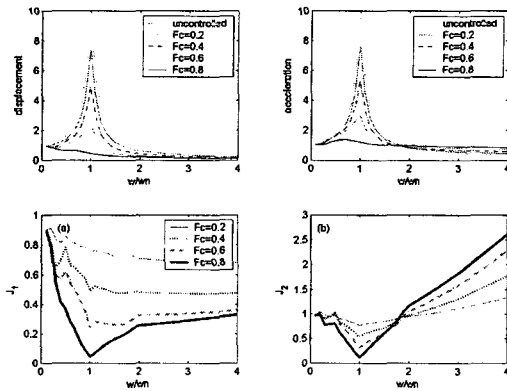


그림 1  $f_y$ 의 성능지수에 대한 효과

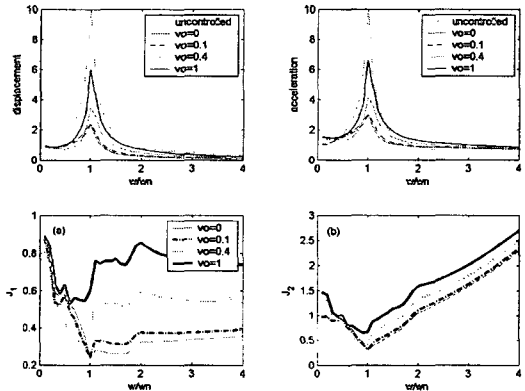


그림 2  $v_o$ 의 성능지수에 대한 효과

2보다 작은 구간에서는 변위응답과 같이 큰  $f_y$ 가 큰 응답감소를 가져오며, 그 효과는 공진시 가장 크다. 그러나  $\omega$ 가 2보다 큰 구간에서는 절대가속도응답의 크기가 비제어시 응답보다 오히려 증가하고, 이 현상은  $f_y$ 의 크기가 증가할수록 더욱 분명해진다. 이는, 구조물의 주 진동수보다 큰 진동수 성분을 가지는 하중이 가해지는 경우, 가속도응답 제어를 위해서는 MR 감쇠기의 최대마찰력을 최소화해야 함을 의미한다.

그림 2는  $f_y=0.6$ ,  $c_o=4.0\omega_1$ ,  $c_1=0$  인 경우에,  $\nu_o$ 에 따른 성능지수의 변화를 보여준다.  $\omega$ 가 1보다 작은 경우에는  $\nu_o$ 가 성능지수에 주는 영향이 불규칙한 경향을 보이나,  $\omega$ 가 1보다 큰 경우에는  $\nu_o$ 의 크기가 증가할수록 제어성능이 떨어짐을 알 수 있다.

그림 3은  $f_y=0.6$ ,  $\nu_o=0$ ,  $c_1$ 과  $c_o$ 에 따른 성능지수의 변화를 보여준다. 공진 시에는  $c_1$ 과  $c_o$ 에 따른 성능지수의 변화가 거의 없으며,  $c_o$ 가 증가할수록 변위제어성능은 우수해지나, 가속도제어성능은 떨어진다. 저속도 영역의 점성인  $c_o$ 가 증가한다는 것은 최대마찰력을 사용하는 속도구간이 커진다는 것을 의미하고, 최대마찰력의 빈번한 사용은 변위제어에는 좋은 영향을 주지만 가속도제어에는 좋지 않은 영향을 준다.

### 3.4 지진하중 해석

지진응답은 구조물의 주기에 따라 응답 특성이 크게 다르다. 즉, 동일한 크기의  $f_y$ 가 제어성능에 미치는 영향은 구조물의 주기에 따라 다르며, 전 절의 조화하중의 경우와 같이 동일한  $f_y$ 를 사용하는 것은, 서로 다른 주기를 가지는 구조물에 대한  $f_y$ 의 영향을 평가하기 위하여 적절하지 않다. 이상현 등은 감쇠기의 최대제어력의 구조물의 충전단력에 대한 비율이 제어성능을 결정함을 보였다<sup>[18]</sup>. 따라서, 본 연구에서는 다음과 같이  $f_y$ 를 충전단력에 대한 비율  $\rho$ 로 산정한 후,  $\rho$ 의 크기에 따른 영향을 분석하였다.

$$f_y = \rho \omega_1^2 S_d(\xi_1, \omega_1) \quad (7)$$

여기서,  $S_d(\xi_1, \omega_1)$ 는 비제어시 최대변위응답을 나타내며, 본 연구에서는 20개의 지진에 대한 평균을 통하여 구하였다.  $\nu_o$ 의 경우,  $\nu_o=0, 0.5V_o, 1.0V_o, 1.5V_o, 2V_o$ , 변화시켜가며, 해석을 수행하였다.

일반적으로 MR 감쇠기는 저속도 영역의 점성인  $c_o$ 가 고속도 영역의 점성인  $c_1$ 보다 매우 크다. 특히,  $c_o$ 가

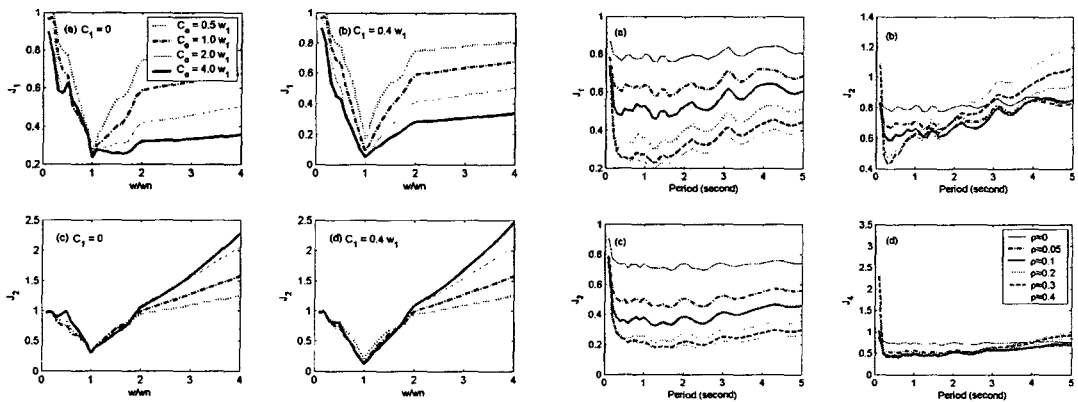


그림 3  $c_o$ 와  $c_1$ 의 성능지수에 대한 효과

그림 4.  $\rho$ 의 성능지수에 대한 효과:

$$c_1 = 0.1\omega_1, \nu_o = 0$$

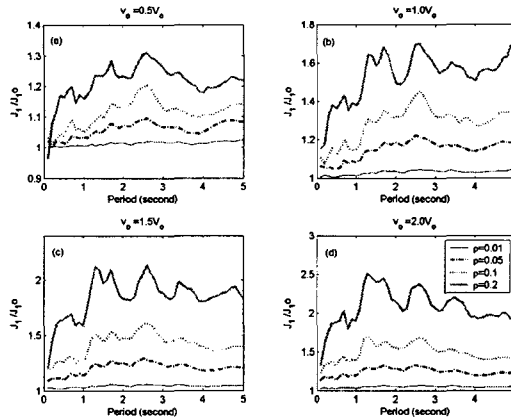


그림 5.  $v_0$ 의 성능지수에 대한 효과

크게 증가하면, 저속도 영역이 매우 작아져, MR 감쇠기의 감쇠력은 Bingham 모델의 경우와 같이  $f_y$ 의 마찰력과  $c_1$ 의 점성의 합으로 주어진다. 이 경우,  $c_1$ 은 단순히 구조물의 감쇠비를 증가시키는 역할을 하기 때문에, 그 효과는 쉽게 예측할 수 있다. 따라서, 본 절의 지진해석의 경우에는  $c_0$ 는 구조물에 100% 감쇠비를 추가하는 크기로 고정된 후,  $c_1=0, 0.1\omega_1, 0.2\omega_1, 0.4\omega_1$ 에 대하여 해석을 수행하였다. 이는 각각 구조물에 0%, 5%, 10%, 그리고 20%의 감쇠비를 추가할 수 있는 크기이다.

그림 4는  $C_1$ 는  $0.1\omega_1$ ,  $v_0$ 는 0인 경우의  $\rho$ 에 따른 성능지수의 변화를 보여준다.  $\rho=0$ 인 경우의 응답감소는  $c_1$ 에 의하여 모든 주기의 구조물에 동일하게 추가된 5%의 선형감쇠로 인함이다. 구조물의 주기에 따라 동일한  $\rho$ 에 대하여도, 성능지수의 변화경향이 다를 수 있다. 단주기 구조물인 주기가 0-0.2초인 구조물의 경우에, 동일한  $\rho$  경우, 주기가 0초에서 0.2초로 증가함에 따라 변위와 가속도 성능지수 모두 단조 감소하는 경향을 보인다. 이는 주기가 0인 강제저동을 보이는 구조물이 제어력의 크기에 관계없이 지반에 대한 상대변위가 발생하지 않기 때문에 감쇠기가 구조물의 거동에 어떠한 영향도 주지 않는다는 것과 주기가 증가함에 따라 감쇠기의 효과가 증가했음을 의미한다. 주기가 0.2초에서 2초인 중간영역의 주기를 가지는 구조물의 경우, 변위응답제어에 있어, 동일한  $\rho$ 로 설계된 MR 감쇠기는 일정한 응답감소효과를 보인다. 변위가 주요설계변수인 내진설계의 대상이 되는 대부분의 건축구조물의 주기가 이 구간에 속한다는 것을 고려할 때,  $\rho$ 에 따라 MR 감쇠기의 최대마찰력을 산정하여 변위응답제어를 하는 것은 합리적이라 할 수 있다. 가속도 응답의 경우, RMS응답은 모든  $\rho$ 에 대하여, 변위의 경우와 유사한 제어경향을 보인다. 그러나, 최대응답은  $\rho$ 가 0.1보다 작은 경우에는 동일한  $\rho$ 에 대하여 일정한 응답감소를 보이나,  $\rho$ 가 0.1보다 큰 경우에는 주기가 증가함에 따라 제어효과가 감소한다. 이는 큰 제어력에 의하여 유발된 급격한 응답변화가 최대가속도의 증가를 가져왔음을 의미한다. 주기가 2초 이상인 장주기 구조물의 경우, 동일한  $\rho$ 에 따른 제어효과는 증가하는 주기에 대하여 감소하는 경향을 보인다. 특히, 주기가 4초 이상인 장주기 구조물의 가속도 응답의 경우, 제어효과가 제어력을 증가시키기에 따라 오히려 감소함을 알 수 있다. 따라서, 가속도응답제어가 주목적이 되는 구조물이 장주기 구조물인 경우, 작은 최대마찰력을 가지도록 MR감쇠기를 설계해야 한다.

그림 5는  $v_0$ 에 따른 성능지수  $J_1$ 의 변화를 보여준다.  $J_1$ 의 값은  $v_0=0$ 인 경우에 대하여 정규화 되었다.  $v_0$

가 증가함에 따라 성능지수가 증가함을 알 수 있으며, 그 크기는 최대제어력이 증가함에 따라 증가한다. 특히,  $\nu_0=2.0V_0$ ,  $\rho=0.2$ 인 경우,  $\nu_0=0$ 인 경우와 비교할 때, 성능지수가 최대 약 2.5배까지 증가하므로, 설계자는 반드시  $\nu_0$ 의 효과를 고려하여 최대마찰력을 설계해야 한다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 MR 감쇠기를 사용하여 건축구조물의 진동제어를 위하여 수행할 때, 감쇠기의 이력특성을 고려하여 감쇠기의 용량, 설치위치, 그리고 설치 개수 등을 체계적으로 제시하기 위한 예비설계절차로 단자유도 시스템에서 MR감쇠기의 변수연구를 수행하였다. 기존 연구에서 제안된 MR 감쇠기의 모델링 방법들 중 이력특성을 모사할 수 있고 해석이 간단한 이력 이점성 모델을 사용하였다. 각 변수가 제어성능에 미치는 영향을 분석함으로써 목표제어성능을 달성하기 위하여 요구되는 감쇠기 이력특성을 파악하였다.

#### 감사의 글

이 연구는 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03산학연 C103A2000010-03A0200-01010)에 의한 것임.

#### 참고문헌

1. GW, Bergman LA, Caughey TK, Chassiakos AG, Claus RO, Masri SF, Skelton RE, Soong TT, Spencer BF Jr., Yao JTP. "Special issue structural control: past, present, and future", Journal of Engineering Mechanics, ASCE ,1997, Vol.123, No.9, pp.897-971.
2. Brogan, W.L, "Modern control theory", Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey1991,
3. Jansen, LM, Dyke SJ. "Semiactive control strategies for MR dampers: comparative study". Journal of Engineering Mechanics, ASCE Vol 126, No 8, 2000, pp. 795-803.
4. Carlson JD, Spencer Jr. BF. "Magneto-rheological fluid dampers for semi-active seismic control", Proceedings of 3rd International Conference on Motion and Vibration Control, vol. 3, Chiba, Japan, 1996. pp. 35-40.
5. H, Sodeyama H, Hata K, Iwata N, Komatsu Y, SunakodaK, Soda S. "Dynamic performance evaluation of magneto-rheological damper", Proceeding of International Conference on Advances in Structural Dynamics, vol. 1, Hong Kong, China, 2000. pp. 319-26.
6. Spencer Jr. BF, Dyke SJ, Sain MK. "Magnetorheological dampers: a new approach to seismic protection of structures", Proceedings of Conference on Decision and Control, Kobe, Japan, 1996. pp. 676-81.
7. Sang-Hyun Lee, Dong-In Son, Jinkoo Kim, Kyung-Won Min, "Optimal Design of Viscoelastic Dampers using Eigenvalue Assignment", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2004, Vol.33, No.4, pp521-542 11.
8. A. Filiatrault, S.Cherry, "Seismic Design Spectra for Friction-Damped Structures", Journal of Structural Engineering, 1990, Vol.116, No.5, pp.1334-1355

9. Yaomin Fu and Sheldon Cherry, "Design of friction damped structures using lateral force procedure", *Earthquake engineering and Structural Dynamics*, 2000, Vol.29, No.7, pp. 989-1010
10. Phillips RW. *Engineering applications of fluids with a variable yield stress*. Ph.D thesis, University of California, Berkeley, California, 1969.
11. Stanway, R., Sproston, J.L. and Stevens, N.G. (1987). "Non-linear Modelling of an Electro-rheological Vibration Damper." *J. Electrostatics*, Vol. 20, pp. 167-184.
12. Gamota, D. R. Filisko, F. E. "Dynamic mechanical studies of electrorheological materials: Moderate frequencies", *J. Rheology*, 1991, Vol. 35, pp.399-425.
13. Wereley NM, Pang L, Kamath GM. "Idealized hysteresis modeling of electrorheological and magnetorheological dampers", *Journal of Intelligent Material, Systems and Structures*, Vol. 9, No 8, 1998, pp. 642-649.
14. Dyke SJ, Spencer Jr. BF, Sain MK, Carlson JD. "Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction", *Smart Materials and Structures*, Vol. 5, 1996, pp. 565-575.
15. Spencer Jr. BF, Dyke SJ, Sain MK, Carlson JD. "Phenomenological model of a magnetorheological damper". *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 1996, Vol. 123, No. 3, 1997, pp. 230-238.
16. G. Yang, "Large-scale magnetorheological Fluid Damper for Vibration Mitigation: Modeling, Testing and Control", Ph.D thesis, University of Notre Dame, Indiana, 2001
17. G. Yang, B.F. Spencer, Jr., J.D. Carlson and M.K. Sain, "Large-scale MR fluid dampers: modeling, and dynamic performance considerations", *Engineering Structures*, Vol. 24, No 3, 2002, pp. 309-323.
18. Sang-Hyun Lee, Kyung-Won Min, Young-Cheol Lee, Lan Chung, "Improved Design of Sliding Mode Control for Civil Structures with Saturation Problem", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol.33, No.11, 2004, pp.1147-1164