

# 응답 의존형 MR 감쇠기의 성능 평가

## Performance Evaluation of Response-Dependent MR Damper

이상현\*  
Lee, Sang-Hyun

민경원\*\*  
Min, Kyung-Won

윤경조\*\*\*  
Youn, Kyung-Jo

---

### ABSTRACT

In this study, seismic response mitigation effect of an MR damper generating response-dependent frictional force is investigated. It has been reported in previous studies that passively operated MR damper with constant input current doesn't show better control performance than semi-active MR damper with varying input current calculated by control algorithms such as linear quadratic regulator and sliding mode control. However, in order to operate the MR damper semi-actively, other control systems besides the damper itself such as sensors for measuring structural responses and controller for calculating optimal input current are necessary, which deteriorate the economical efficiency. This study presents a MR damper generating frictional force of which magnitude is controlled in accordance to the displacement and velocity transferred to the damper. Numerical analyses results indicate that the performance of the response dependent MR damper is closely related with the range of the friction force and it can be designed to show better control performance than the passive MR damper.

---

### 1. 서론

건축 및 토목구조물의 지진 및 풍응답 제어를 위해 이용되고 있는 MR감쇠기는 감쇠기 속의 MR 유체에 주어지는 자기장의 크기에 따라 감쇠력의 특성이 변화하는 특성을 가지고 있기 때문에, 준능동 제어장치로서의 적용성이 국내외 학자들에 의해 조사되었으며, 실제 구조물에 적용되고 있는 사례도 점차적으로 증가하고 있다 [1, 2].

MR유체를 감싸고 있는 코일에 흐르는 전류의 크기가 증가함에 따라 자기장은 증가하며, 이에

---

\* 정회원.단국대학교 건축공학과, 전임강사 (lshyun00@dankook.ac.kr)

\*\* 정회원.단국대학교 건축공학과, 부교수

\*\*\* 학생회원.단국대학교 건축공학과, 석사과정

따라 MR 감쇠기의 제어력도 증가하는 특성을 가진다. 그러나 구조물 및 가진하중의 종류에 따라서는 제어력의 크기가 클수록 항상 최적의 제어성능을 보이는 것은 아니기 때문에, MR감쇠기 설계자는 자기장의 크기를 결정해야 한다. 구조물의 응답의 크기에 관계없이 일정한 크기의 전류를 발생하도록 설정한 경우를 수동제어라 하며, 구조물의 응답에 따라 자기장의 크기를 조절하는 것을 준능동 제어라 한다. 최적으로 설계된 준능동제어는 일반적으로 수동제어보다 우수한 제어성능을 보이는 것으로 알려져 있으며, 준능동제어를 하기 위한 뱅뱅제어, 온오프제어, clipped LQR 최적제어, 그리고 슬라이딩 모드제어와 같은 다양한 형태의 제어알고리즘이 적용되고 있다 [3]. 그러나 이러한 제어알고리즘을 적용하기 위해서는 구조물의 전체 혹은 국부적인 응답을 예측하기 위한 센서가 설치되어야 하며, 알고리즘을 구현할 컴퓨터, MR 감쇠기 입력 전압 신호를 보내는 장치 등의 부가적인 시스템이 필요한 실제 적용시의 문제점을 가지고 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 알고리즘 내장형 MR 감쇠기 등이 개발되었으며 [4], 조상원 등은 MR 감쇠기에 코일로 구성된 부가 장치를 설치하여 피스톤의 병진운동에 의해 코일에 유도되는 전류를 이용함으로써, MR 감쇠기에 걸리는 자기장이 구조물의 속도에 비례하게 자동적으로 조절되는 스마트 MR 감쇠기를 개발하여, 이의 성능을 수동 MR 감쇠기의 경우와 비교 평가하였다 [5]. 이 연구는 MR 감쇠기에 입력할 전류를 생성할 별도의 외부전원을 필요로 하지 않는다는 장점을 가지고 있다. 또한 Kim 등은 스마트 MR 감쇠기와 유사하게 피스톤에 회전 기어를 설치하고 이로부터 전류를 생성함으로써 외부전원을 필요로 하지 않은 ER 서스펜션 시스템을 개발하였다 [6]. 그러나 알고리즘 내장형 MR 감쇠기의 경우에는 비록 제어력을 계산할 별도의 컴퓨터가 필요하지는 않으나 내장형 보드에 입력될 신호를 생성할 장치가 필요하다. 또한, 조상원 등의 연구에서는 MR 감쇠기에 의해 구현되는 제어력의 범위에 따른 효과를 조사하지 않았으며, 자체 매커니즘의 특성상 구조물의 변위가 제어력 산정에 고려되지 않는다.

본 논문에서는 구조물의 응답에 비례하여 마찰력의 크기가 변하는 MR 감쇠기의 지진응답제어 성능을 평가하였다. MR 감쇠기의 마찰력은 감쇠기 양단에 발생하는 변위와 속도의 함수의 형태를 가지는 것으로 가정하였다. 이러한 가정은 추후의 연구에서 센서 혹은 컴퓨터없이 MR 감쇠기 자체의 응답 전달 매커니즘에 의해 MR 감쇠기의 감쇠력 특성이 조절되는 시스템을 개발하기 위함으로 MR 감쇠기 자체에는 구조물 응답 중 설치된 부분의 응답만이 감쇠기의 양단에 전달되기 때문이다. 또한, MR 감쇠기의 마찰력이 일정한 범위를 가지는 것을 고려하여, 범위의 변화에 따른 수동제어와 준능동 제어 효과를 비교하였다.

## 2. MR감쇠기 모델링

MR 감쇠기의 비선형 이력거동을 모사하기 위해 많은 동적 모델들이 개발되었으며, 이 모델 중에는 Bingham, 이점성(biviscous), 이력 이점성(hysteretic biviscous) 모델, 그리고 임의의 이력 곡선을 모사할 수 있는 미분방정식 형태의 Bouc-Wen 모델을 이용한 모델 등이 있다 [7]. 이상현 등은 건축구조물의 제어성능을 평가하는 데에는 각 모델에 따른 차이가 크지 않음을 보였다 [8]. 따라서 본 논문에서는 다음과 같이 수학적으로 그 형태가 가장 간단하게 쿨롬 마찰력과 선형점성으로 구성된 Bingham 모델을 사용하도록 한다.

$$f_{MR} = f_s(H)sgn(\dot{x}) + c\dot{x} \quad (1)$$

여기서,  $f_s$  는 최대마찰력,  $c$  는 점성계수,  $\dot{x}$  은 속도, 그리고  $\tau$  는 MR 감쇠기의 자기장의 크기를 나타낸다. MR 감쇠기의 최대마찰력은 자기장의 함수임을 알 수 있다.

그림 1에 나타난 유동 모드형 MR감쇠기의 마찰력 항은 다음 식에 의해 주어진다 [9].

$$f_s = \tau L \omega \text{sgn}(\dot{x}_p) \quad (2)$$

여기서,  $\eta$  는 점성,  $w$  는 내부 코일실린더의 바깥쪽 둘레,  $\dot{x}_p$  는 피스톤의 속도,  $L$  은 자기장이 작용하는 부분의 실린더의 길이, 그리고  $\text{sgn}(\cdot)$  는 부호함수이다.  $\tau$  는 항복전단응력으로 자기장  $H$ 의 함수이다. 자기장  $H$ 는 다음 식에 의해 주어진다.

$$H = \frac{NI}{2h} \quad (3)$$

여기서,  $N$ 은 코일턴수,  $I$ 는 전류, 그리고  $h$ 는 자기장이 가해지는 부분의 간극이다. 자기장  $H$ 와 항복전단응력  $\tau$ 의 관계는 사용한 MR유체의 고유특성으로 주어지며, 그림 2는 Lord사에서 제작한 MRF-132AD의 자기장-항복전단응력 관계를 보여준다 [10].

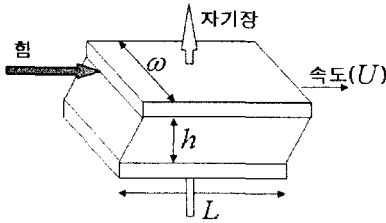


그림 1. 유동모드 형 MR감쇠기

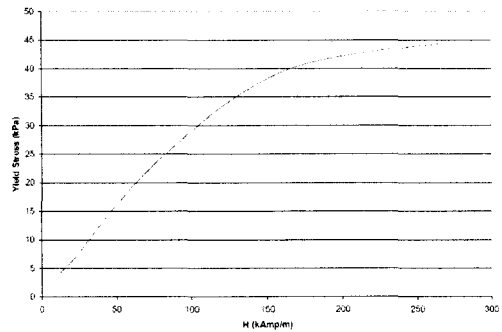


그림 2. MRF132-D 자기장-항복전단응력 관계

### 3. 응답의존형 MR 감쇠기

#### 3.1 MR 감쇠기 마찰력 범위

일반적으로 마찰력은 비선형 특성을 가지고 있기 때문에 동일한 크기의 마찰력인 경우에도 가진의 크기 및 그에 따른 구조물의 응답의 크기에 따라 제어성능은 크게 다르다. 이상현 등은 건축 구조물의 층전단력에 기초한 가새-마찰감쇠기 최적설계방법을 제시하였으며, 층전단력에 대한 마찰력의 비에 따른 지진응답 제어성능의 변화를 조사하였다 [11]. 가새가 설치되기 전의 단자유도 시스템은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + k_f x = -m\ddot{x}_g \quad (2)$$

위 운동방정식의 수치해석을 통해 얻어진 최대 층전단력을 기준으로 최대마찰력을 정규화하면 다음과 같다.

$$\rho = f_s / f_f \quad (3)$$

$$f_f = k_f \max(|x|) \quad (4)$$

여기서,  $\rho$ 는 정규화된 슬립하중이며,  $\max(|x|)$ 는 운동방정식 (2)의 해석을 통해 얻어진 최대 변위이다.

대상 구조물은 질량 정규화되고 5%의 감쇠비를 가지는 단자유도 시스템으로서 수치해석을 통해 가새 강성과 미끄러짐 하중의 영향을 분석하였다. 지반가속도는 인공지진 생성 소프트웨어인 EQmaker를 이용하여 생성하였으며, UBC 97에 따른 설계지진계수  $C_a=0.09$ ,  $C_v=0.09$ 를 가지는 지진응답 스펙트럼을 사용하였다 [12]. 평가를 위한 성능지수는 다음과 같다.

$$R_d = \frac{\max(|x(t)|)}{\max(|x_o(t)|)}, R_a = \frac{\max(|\ddot{x}(t)|)}{\max(|\ddot{x}_o(t)|)} \quad (5)$$

여기서,  $x$ ,  $x_o$ ,  $\ddot{x}$ ,  $\ddot{x}_o$ 는 각각 제진 변위, 비제진 변위, 제진 절대가속도, 비제진 절대가속도를 나타낸다.  $R_d$ 와  $R_a$ 는 비제진 응답에 대한 제진 응답의 비를 나타낸다.

그림 3(a)에서  $\rho$ 가 0.3보다 작은 구간에서는  $\rho$ 가 증가함에 따라 전체적으로  $R_d$ 의 크기가 감소하는 경향을 가지나  $\rho$ 가 0.3보다 증가하는 경우에는 감소폭이 작거나 오히려  $R_d$ 가 증가한다. 구조물 층강성에 대한 가새강성의 비인 SR의 크기가 증가할수록 모든  $\rho$ 에 대해서  $R_d$ 의 값은 감소하며, 이로부터 고유주기가 1.0초인 구조물은 가새 강성이 증가할수록 변위 성능제어효과가 우수해 짐을 알 수 있다. 그림 3(b)에서  $R_a$ 는  $\rho$ 가 0.3보다 작은 구간에서는  $\rho$ 에 따른 변화는 거의 없고 SR이 증가할수록 감소한다. 그러나  $\rho$ 가 0.3보다 큰 구간에서는  $\rho$ 가 증가함에 따라  $R_a$ 가 급격히 증가하는 경향을 보인다. 그림 3에서  $\rho$ 가 약 0.3보다 작은 구간에서는 큰  $\rho$ 값이 더욱 큰 변위 응답감소효과를 보인다는 사실에서 MR 감쇠기의 힘의 최대값이 충전단력의 30%보다 작은 경우에는 MR 감쇠기가 항상 최대마찰력을 구현하는 passive-on 상태의 제어효과가 우수할 것을 유추할 수 있다. 그러나 이 경우에 가속도의 감소 효과가 저하될 우려가 있으며, 변위응답과 함께 가속도를 감소시키기 위해서는 MR 감쇠기를 준능동적으로 운영할 필요가 있음을 알 수 있다. 기존의 연구에서 준능동 MR감쇠기가 수동 MR 감쇠기 보다 우수한 제어성능을 보이는 경우는 일반적으로 MR 감쇠기의 최대제어력이 충전단력에 대비하여 일정 크기 이상을 차지할 때이며, 충전단력에 비하여 매우 작은 경우에는 passive-on상태로 항상 최대 크기의 제어력을 구현하도록 고정하는 것이 제어효과를 확보하는데 유리하다. 특히 기존의 준능동 제어를 위해서는 센서, 케이블, 그리고 컴퓨터 등의 별도의 부가장치가 필요하다는 것을 고려할 때 준능동 MR 감쇠기가 수동보다 크게 우수한 성능을 보여주지 않는다면 MR 감쇠기를 수동적으로 운영하는 것이 현실 적용성에 있어 유리하다.

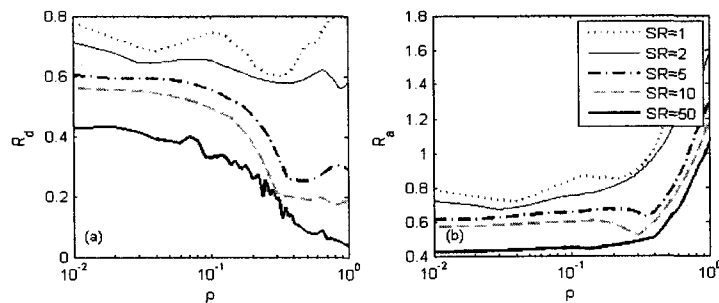


그림 3. 마찰력에 따른 성능지수의 변화

### 3.2 제어 알고리즘

MR 감쇠기를 준능동적으로 운영하기 위해 많은 제어 알고리즘이 기존의 연구에서 제안되었다.

Dyke 등은 기존의 다양한 제어 알고리즘 중 Lyapunov, 분산화 뱅뱅제어 (decentralized bang-bang), 최대 에너지 소산(maximum energy dissipation), 잘린 최적제어 (clipped optimal control), 가변 마찰(variable friction) 제어알고리즘 등을 소개하고 6층 예제구조물에 적용하여 수동제어의 경우와 그 성능을 비교 평가하였다 [1]. Dyke 등의 연구에 의하면 일반적으로 제어력을 많이 사용하는 알고리즘이 변위응답감소 효과는 우수하지만 절대가속도 응답제어에 있어 비효율적임을 확인할 수 있다. 그러나 이 연구는 주어진 MR 감쇠기의 제어력의 범위에 국한된 것으로 제어력의 범위가 변하는 경우에 대한 조사가 필요하다.

본 연구에서는 MR 감쇠기가 기본적으로 가변마찰과 선형점성으로 구성된 점과 MR 감쇠기의 구동축의 거동은 설치된 층간 응답의 함수인 점을 고려하여 가변마찰력의 크기가 설치된 층의 층간변위와 층간속도의 함수인 경우에 지진응답 제어성능을 수동인 경우와 비교평가하기로 한다. 이러한 제어력의 형태를 사용하는 것은 전술한 바와 같이 추후의 연구에서 센서 혹은 컴퓨터 없이 MR 감쇠기 자체의 응답 전달 메커니즘에 의해 MR감쇠기의 감쇠력 특성이 조절되는 시스템을 개발하기 위함이다.

MR 감쇠기 가변 마찰력은 다음과 같은 형태를 가지는 것으로 가정한다.

$$V(x, \dot{x}) = \alpha_D |x|^n + \alpha_V |\dot{x}|^m \quad (6)$$

여기서,  $\alpha_D$ ,  $\alpha_V$ 는 각각 변위와 속도에 대한 상대적인 가중치를 결정하는 상수,  $n$ ,  $m$ 은 각각 마찰력 크기의 변형 형상을 결정하는 상수이다. 최종적인 MR 감쇠기 마찰력은 다음과 같다.

$$f_s = \begin{cases} f_{\min} & V < V_1 \\ \frac{f_{\max} - f_{\min}}{V_2 - V_1} (V - V_1) + f_{\min} & V_1 \leq V \leq V_2 \\ f_{\max} & V > V_2 \end{cases} \quad (7)$$

여기서,  $f_{\max}$ ,  $f_{\min}$ 은 각각 MR 감쇠기가 구현할 수 있는 최대 및 최소 마찰력을 나타내며,  $V_1$ ,  $V_2$ 는 최대 및 최소 마찰력을 나타내는  $V$ 의 범위를 결정하는 설계변수이다. 그림 4는  $f_{\min}=0.5$ ,  $f_{\max}=2.5$ ,  $V_1=0.5$ ,  $V_2=2.5$ 인 경우에, 다양한  $\alpha_D$ ,  $\alpha_V$ ,  $n$ ,  $m$ 에 대한 (6), (7)식에 의한 MR 감쇠기 마찰력의 변화경향을 보여준다. 힘과 응답의 단위는 무차원으로 정규화하였다.

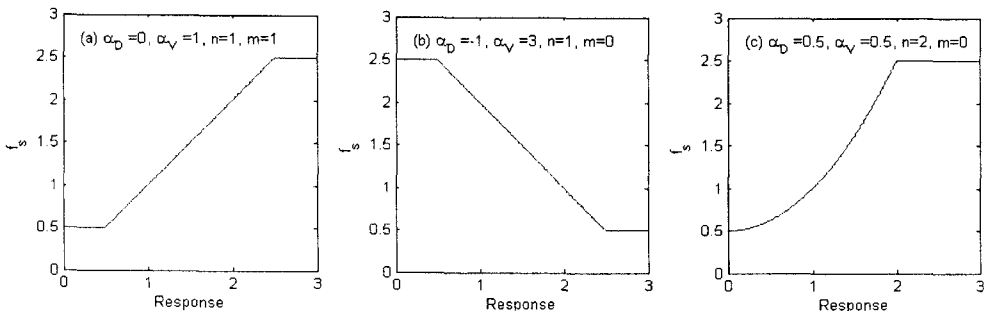


그림 4. 응답 의존형 마찰력의 변화

그림 4(a)는 속도가 증가함에 따라 마찰력의 크기가 선형 증가하는 경우를, 그림 4(b)는 변위가 증가함에 따라 마찰력의 크기가 선형 감소하는 경우를, 그리고 그림 4(c)는 마찰력의 크기가 변위

의 제곱에 비례하는 경우의 예를 보여준다. 이로부터,  $\alpha_D$ ,  $\alpha_V$ ,  $n$ ,  $m$ 의 변화에 따라 마찰력이 의존하는 응답의 종류와 변화 경향을 조절 할 수 있음을 알 수 있다. 조상원 등의 연구는 마찰력이 속도에 비례하기 때문에 그림 4(a)의 형태와 유사한 경향을 가지는 시스템의 하나의 예라 할 수 있다.

### 3.3 수치해석 예제

El Centro (1942, NS성분) 지반가속도를 사용하여 질량 정규화되고 5%의 감쇠비를 가지는 단자유도 시스템에 대한 수치해석을 수행하였다. 그림 5-7은 각각 선형점성이 0인 MR감쇠기의 마찰력의 범위가  $0.01 \leq \rho \leq 0.05$ ,  $0.1 \leq \rho \leq 0.2$ , 그리고  $0.2 \leq \rho \leq 0.3$ 인 경우의 성능지수의 변화를 보여준다. 그림 5-7에서 case-1은  $\alpha_D=0$ ,  $\alpha_V=1/\omega_n$ ,  $n=1$ ,  $m=1$ , case-2는  $\alpha_D=1$ ,  $\alpha_V=1/\omega_n$ ,  $n=1$ ,  $m=1$ , case-3은  $\alpha_D=0$ ,  $\alpha_V=1/\omega_n$ ,  $n=1$ ,  $m=2$ 인 경우를, passive-off와 passive-on은 각각 최소마찰력과 최대마찰력이 작용하는 경우를 나타낸다. 여기서,  $\omega_n$ 은 고유 각진동수를 나타낸다.  $V_1 = 0.05(\alpha_D \sigma_D^n + \alpha_V \sigma_V^m)$   $V_2 = \alpha_D \sigma_D^n + \alpha_V \sigma_V^m$ 로 설정하였다. 여기서,  $\sigma_D$ ,  $\sigma_V$ 은 각각 비제어 변위의 표준편차와 비제어 속도의 표준편차를 나타낸다.

그림 5는 변위제어에 있어서는 마찰력의 크기가 변하는 case-1,2,3이 passive-on과 거의 동일한 수준의 응답감소효과를 보이나, 절대가속도 제어에 있어서는 passive-on이 대부분의 주기에서 가장 작은 성능지수를 보여준다. 이러한 현상은 최대마찰력의 크기가 충전단력의 5% 수준으로 매우 작은 편이기 때문에 항상 최대마찰력을 구현해도 구조물에 나쁜 영향을 주지 않음을 의미한다. 그림 6에서는 마찰력의 크기가 그림 5보다 증가하기 때문에 전체적으로 성능지수의 크기가 작아지며, 변위제어에 있어서는 passive-on이 가속도제어에 있어서는 case-1이 가장 좋은 성능을 보인다. 또한 응답의존형 MR감쇠기는 거의 passive-on과 거의 동등한 수준의 변위 응답감소효과를 보이기 때문에 이 구간 범위의 제어력을 가지는 MR감쇠기는 준능동적으로 운영할 필요가 있음을 알 수 있다. 그림 7에서는 전체적으로 passive-off와 passive-on의 성능의 차이가 크지 않으며, 가속도 제어에 있어서는 오히려 작은 힘을 사용하는 passive-off가 더 좋은 성능을 보임을 알 수 있다. 이것은 최대마찰력이 충전단력의 30% 수준으로 매우 크기 때문에 항상 최대마찰력을 구현하는 passive-on은 구조물에 급격한 힘의 변화를 주고 이것이 가속도를 증가시키는 것으로 판단된다.

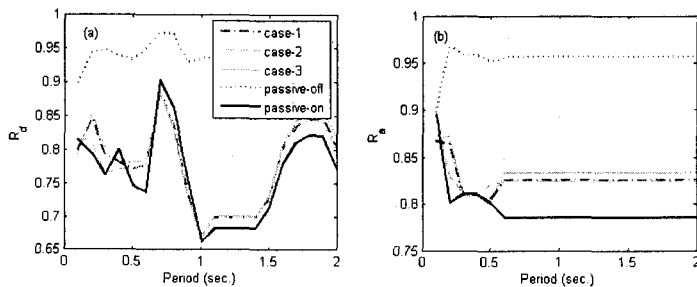


그림 5. 성능지수의 변화 ( $0.01 \leq \rho \leq 0.05$ )

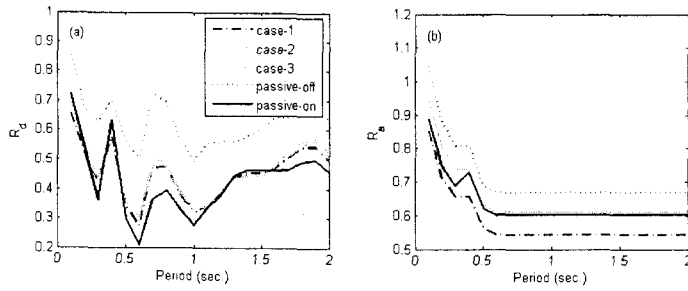


그림 6. 성능지수의 변화 ( $0.1 \leq \rho \leq 0.2$ )

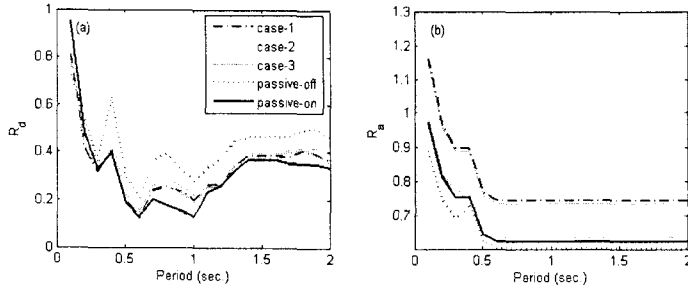


그림 7. 성능지수의 변화 ( $0.2 \leq \rho \leq 0.3$ )

#### 4. 결 론

본 논문에서는 구조물의 응답에 비례하여 마찰력의 크기가 변하는 MR 감쇠기의 지진응답제어 성능을 평가하였다. MR 감쇠기의 마찰력은 감쇠기 양단에 발생하는 변위와 속도의 함수에 비례하여 변하는 특성을 가지며, 이러한 응답의존적인 MR 감쇠기의 성능을 수동인 경우와 비교하였다. 수치해석결과를 통해, 준능동적으로 응답의존적인 특성을 보이는 MR감쇠기가 수동제어보다 좋은 효과를 보이는 경우는 마찰력의 범위와 밀접한 관련을 가지고 있음을 확인하였다. 최대마찰력의 크기가 총진단력에 비하여 매우 작은 경우에는 단순히 항상 최대힘을 발휘하도록 설정하는 것이 제어효과를 확보하는 데 있어 유리한 반면, 최대마찰력의 크기가 증가함에 따라 마찰력의 크기가 준능동적으로 응답에 따라 변하는 것이 가속도제어에 있어 유리함을 확인하였다.

추후 응답에 따라 자기장의 크기가 자동적으로 조절되는 메커니즘을 가지는 MR 감쇠기를 개발하고, 이를 다자유도 구조물에 적용하며, 그 결과를 기존의 준능동 제어알고리즘을 사용한 경우와의 비교하는 등의 연구가 수행되어야 한다.

#### 감사의 글

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2005년도 건설핵심 기술연구개발사업(05산학연 C105A1050001-05A0505-00110)과 한국과학재단 특정기초연구(R01-2003-000-11584-0)지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Dyke, S. J, Spencer Jr. B. F, Sain M. K, Carlson J. D. "Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction", *Smart Materials and Structures*, Vol. 5, 1996, pp. 565-575.
2. 옥승용, 김동석, 박관순, 고현부. "사장교의 지진응답제어를 위한 준능동 MR 감쇠기의 퍼지 제어", *한국지진공학회*, 제9권, 제6호, 2005, pp.75-90
3. Jansen, L. M, Dyke S. J. "Semiactive control strategies for MR dampers: comparative study". *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.
4. 민경원, 이호근, 김대곤. "초대형 구조물의 내풍 및 내진성능향상을 위한 준능동 제어시스템 개발 2차년도 연구결과 보고서" 한국과학재단, 2004.
5. 조상원, 조지성, 김춘호, 이인원. "MR댐퍼 기반의 스마트 수동제어 시스템", *한국지진공학회*, 제9권, 제1호, 2005, pp.51-59
6. Kim, K. S., Choi, S. B., Cheong, C. C., "ER suspension system with energy generation". *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. Vol.10, 1999, pp.738-742
7. Yang G., "Large-scale magnetorheological Fluid Damper for Vibration Mitigation: Modeling, Testing and Control", Ph.D thesis, University of Notre Dame, Indiana, 2001
8. 이상현, 민경원, 이루지, 김중구, "건축구조물의 지진응답제어를 위한 MR 감쇠기 예비설계절차", *한국지진공학회*, 제8권, 제5호, 2004, pp.55-64
9. Sung, G. G., Choi, S. B., Lee, H. K., Min K. W, Lee, S. H., "Performance Comparison of MR Dampers with Three Different Working Modes: Shear, Flow and Mixed Mode", *International Journal of Modern Physics B*, Vol.19. No.7,8 &9, 2005, pp.1492-1498
10. Lord Corporation, Hydrocarbon-Based MR Fluid MRF-132AD Product Bulletin, 2003
11. 이상현, 민경원, 박지훈, 이루지, "건축구조물의 충전단력 분포에 기초한 마찰감쇠기의 최적설계", *한국지진공학회*, 제9권, 제6호, 2005, pp.21-30
12. Uniform Building Code, International Conference of Building Officials, Whittier, California, 1997