

# 건축구조물의 지진응답제어를 위한 MR 감쇠기 예비설계절차

## Preliminary Design Procedure of MR Dampers for Controlling Seismic Response of Building Structures

이 상 현\*      민 경 원\*\*      이 루 지\*\*\*      김 중 구\*\*\*\*  
Lee, Sang-Hyun      Min, Kyung-Won      Lee, Roo-Jee      Kim, Joong-Koo

### 국문요약

본 연구의 목적은 건축구조물의 지진응답제어를 위한 MR 감쇠기의 크기, 개수 및 최적위치를 결정하는 설계절차를 제안하는 것이다. 기존의 연구에서 제안된 MR 감쇠기의 모델링 방법들의 특성과 차이점을 진동제어효과와 관점에서 분석하였으며, 이 모델 중 해석이 간단하고 이력특성을 모사할 수 있는 이력 이점성 모델을 사용하여 MR 감쇠기의 변수연구를 수행하였다. 건축구조물의 층간에 설치되는 MR 감쇠장치의 용량은 지진응답의 경우 구조물의 주기와 감쇠비에 따라 층전단력이 다르게 됨을 고려하여, 20개의 지진하중에 대한 해석으로부터 구한 응답스펙트럼을 이용하여 결정하였으며, 설치 갯수에 따른 제어경향을 분석하였다. MR 감쇠기의 크기, 개수, 그리고 최적위치를 결정하기 위한 방법이 제안되었으며, 기존의 점성감쇠기 설계시 이용되는 층간변위 혹은 층간속도가 가장 큰 층에 순차적으로 설치하는 방법과의 비교를 통해 유효성을 검증하였다. 수치해석결과는 제안된 방법을 사용하여 MR 감쇠기의 크기, 개수, 그리고 위치를 합리적으로 결정할 수 있음을 보여준다.

주요어 : MR감쇠기, 예비설계절차, 이력이점성 모델

### ABSTRACT

In this paper, the preliminary design procedure of magnetorheological (MR) dampers is developed for controlling the building response induced by seismic excitation. The dynamic characteristics and control effects of the modeling methods of MR dampers such as Bingham, biviscous, hysteretic biviscous, simple Bouc Wen, Bouc Wen with mass element, and phenomenological models are investigated. Of these models, hysteretic biviscous model which is simple and capable describing the hysteretic characteristics, is used for numerical studies. The capacity of MR damper is determined as a portion of not the building weight but the lateral restoring force. A method is proposed for optimal placement and number of MR dampers, and its effectiveness is verified by comparing it with the simplified sequential search algorithm. Numerical results indicate that the capacity, number and the placement can be reasonably determined using the proposed design procedure.

Key words : MR damper, preliminary design procedure, hysteretic biviscous model

## 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 제어성과 안정성을 확보할 수 있으므로, 막대한 인명 및 재산 피해를 가져올 수 있는 강진하중을 받는 건축구조물, 교량, 그리고 대형토목구조물의 진동제어에 유리한 점을 가지고 있다.<sup>(1)-(2)</sup> 이러한 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> 토목공학 분야에는 20톤 용량의 감쇠기가 설계되고 제작되어서 현재 미국 노틀담 대학에 설치되어 실험되었으며, 실제 적용사

례는 사장교인 중국 후난(Hunan)의 동팅교(Dongting Bridge)의 진동을 막기 위해 MR감쇠기가 설치되었다.

감쇠기의 설계방법은 주어진 목표성능을 달성하기 위하여 요구되는 감쇠기의 용량, 설치위치, 설치방법 등을 체계적으로 제시할 수 있어야 한다. 감쇠기는 고유의 이력특성과 설계변수를 가지고 있기 때문에 설계방법도 그에 따라 매우 다르다. Soong 등은 점성과 탄성을 구조물에 추가함으로써 진동을 줄이는 점탄성 감쇠기의 설계를, 모달 변형에너지 법을 이용하여 감쇠기의 성능을 등가감쇠비로 치환하는 방법을 사용하여 수행하였다.<sup>(7)</sup> Shulka와 Datta<sup>(8)</sup>, Garcia와 Soong<sup>(9)</sup>는 단순 순차적 최적설계 방법(simplified sequential search algorithm, SSSA)을 적용하여 각각 점탄성감쇠기와 점성감쇠기의 최적위치를 구하였다. 이상현 등은 고유 값 지정방법을 통하여 단위 크기의 점성 및 강성에 대한 구조물의 고유 값의 변화율에 의하여 점탄성 감쇠기의 최적분포를 구할 수 있음을 보였다.<sup>(10)</sup> Filatrault와 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>(11)</sup> Fu와 Cherry는 마

\* 정회원 : 서울대학교 공학연구소 객원연구원, 공학박사  
(대표저자 : lshyun00@msn.com)

\*\* 단국대학교 건축대학 건축공학과, 부교수

\*\*\* 단국대학교 건축대학 건축공학과, 석사과정

\*\*\*\* 고려정공주식회사, 대표이사

본 논문에 대한 토의를 2004년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.  
(논문접수일 : 2004. 7. 19 / 심사종료일 : 2004. 9. 2)

찰감쇠된 시스템의 횡력수정 계수를 구하고 이를 사용하여 마찰감쇠기를 설계하였다.<sup>(12)</sup> Moreshi와 Singh는 유전자 알고리즘을 사용한 금속항복감쇠기와 마찰감쇠기의 설계절차를 제안하였다.<sup>(13)</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>(14)</sup> MR 감쇠기의 설계절차는 이러한 MR 감쇠기의 이력특성을 고려할 수 있어야 한다. MR감쇠기의 힘-변위와 힘-속도 관계를 모사하기 위하여 Bingham<sup>(15)</sup>, 이점성 (biviscous)<sup>(16)</sup>, 이력 이점성 (hysteretic biviscous)<sup>(17)</sup>, 단순 Bouc-Wen, 질량요소를 가지는 Bouc-Wen<sup>(18)</sup>, 그리고 현상학 모델<sup>(19)</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>(20),(21)</sup>

본 연구의 목적은 지진하중을 받는 건축구조물의 진동 제어를 위한 MR 감쇠기를 설치할 때, 감쇠기의 이력특성을 고려하여 감쇠기의 용량, 설치위치, 그리고 설치 개수 등을 체계적으로 제시하는 예비설계절차의 개발이다. 예비설계절차에 적합한 모델과 그에 따른 설계변수를 선정하기 위하여, 먼저, Yang이 20ton급 감쇠기에 대하여 제시한 모델들과, 이 모델들과 유사한 이력특성을 보이도록 변수가 설정된 Bingham, 이점성, 그리고, 이력이점성 모델들을 3층 전단건물에 적용하여, 각 모델의 제어성능들을 비교 검토하였다. 그리고, 이를 통하여 선정된 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. 단자유도 구조물에 대한 해석의 결과를 사용하여 다자유도 구조물의 목표응답성능을 달성하기 위하여 요구되는 MR 감쇠기들의 총 용량을 결정하였으며, 최종적으로 감쇠기를 전 층에 고루 분포시키는 방법 (uniformly distributed damping system, UDDS), SSSA, 그리고 반복 해석을 요구하지 않고 특정 위치에 설치하는 방법의 유효성을 비교 평가하여 감쇠기의 최적설치위치와 설치 개수를 구하였다.

## 2. MR 감쇠기 모델

MR 감쇠기 비선형 힘-속도 관계를 모사하기 위한 동적 모델로는, Bingham, 이점성, 이력이점성, 단순 Bouc-Wen, 질량요소를 가지는 Bouc-Wen, 그리고 현상학 모델 등이 있다.

### 2.1 Bingham 모델

Bingham모델은 MR 감쇠기의 이력특성을 가장 간단히 표현하는 모델로서, 다음과 같이 단순히 마찰력과 점성으로 구성된다.<sup>(15)</sup>

$$F_{MR} = f_y \operatorname{sgn}(\dot{x}) + C_1 \dot{x} \quad (1)$$

여기서,  $f_y$ 는 최대마찰력,  $C_1$ 는 점성계수이다. 일반적으로, 이 두 변수는 자기장에 따른 함수로 주어진다.

### 2.2 이점성 모델

Bingham 모델은 MR 감쇠기의 감쇠력이 저속도 영역에서 작아지는 것을 고려하지 못한다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 다음과 같이 저속도구간과 고속도구간에서 점성의 크기가 다르게 되는 이점성 모델이 고려되었다.<sup>(16)</sup>

$$F_{MR} = \begin{cases} C_1 \dot{x} - f_y & \dot{x} < -\dot{x}_1 \\ C_0 \dot{x} & -\dot{x}_1 \leq \dot{x} < \dot{x}_1 \\ C_1 \dot{x} + f_y & \dot{x} \geq \dot{x}_1 \end{cases} \quad (2)$$

여기서,  $C_0$ ,  $C_1$ 는 각각 저속도와 고속도 영역의 점성계수를 나타낸다.

### 2.3 이력 이점성 모델

MR 감쇠기의 힘-속도 관계는 일반적으로 이력특성을 가지고 있지만 Bingham 모델과 이점성모델은 이러한 이력특성을 고려하지 못한다. Wereley는 다음과 같은 이력 이점성 모델을 제안하였다.<sup>(17)</sup>

$$F_{MR} = \begin{cases} C_1 \dot{x} - f_y & \dot{x} < -\dot{x}_1 \quad \ddot{x} > 0 \\ C_0(\dot{x} - v_o) & -\dot{x}_1 \leq \dot{x} < \dot{x}_2 \quad \ddot{x} > 0 \\ C_1 \dot{x} + f_y & \dot{x}_2 \leq \dot{x} \quad \ddot{x} > 0 \\ C_1 \dot{x} + f_y & \dot{x}_1 \leq \dot{x} \quad \ddot{x} < 0 \\ C_0(\dot{x} + v_o) & -\dot{x}_2 \leq \dot{x} < \dot{x}_1 \quad \ddot{x} < 0 \\ C_1 \dot{x} - f_y & \dot{x} < -\dot{x}_2 \quad \ddot{x} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

여기서,

$$\dot{x}_1 = \frac{f_y - C_0 \dot{x}_o}{C_0 - C_1} \quad \text{and} \quad \dot{x}_2 = \frac{f_y + C_0 \dot{x}_o}{C_0 - C_1} \quad (4)$$

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

상기 기술된 Bingham 모델과 이점성 모델은 이력 이점성 모델의 하나의 형태라 할 수 있다. 이력 이점성 모델에서  $v_o=0$ 인 경우는 이점성 모델을 나타내고,  $v_o=0$ 이고,  $C_0 \rightarrow \infty$ 인 경우는 Bingham 모델을 나타낸다.

### 2.4 단순 Bouc Wen Model

Bouc와 Wen은 일반적인 이력특성을 묘사할 수 있는 미분방정식을 제안하였으며, 이를 사용하여 MR 감쇠기의 이력특성도 모델링 할 수 있다.

$$F_{MR} = \alpha z + c\dot{x} + kx + f_o \quad (5)$$

여기서,  $k$ 는 축압기의 강성이고,  $c$ 는 점성,  $f_o$ 는 밀봉과 축정시의 편중성분(bias)에 의하여 발생하는 초기 마찰력이다.  $z$ 는 이력특성을 묘사하기 위하여 도입한 무차원 변수이고,  $\alpha$ 는  $z$ 의  $F_{MR}$ 에 대한 영향의 크기를 조절하는 상수이다.  $z$ 는 다음 미분방정식에 의하여 주어진다.

$$\dot{z} = -\gamma|\dot{x} - \dot{y}|z|z|^{n-1} - \beta\dot{x}|z|^n + A\dot{x} \quad (6)$$

여기서,  $\gamma, \beta, A, n$ 는 이력곡선의 모양을 결정하는 계수이다.

### 2.5 질량요소를 가지는 단순 Bouc Wen 모델

단순 Bouc-Wen 모델에 질량요소를 추가한 모델로 관성효과를 고려하기 위하여 Spencer 등에 의하여 제안되었다.<sup>(18)</sup>

$$F_{MR} = \alpha z + c\dot{x} + kx + m\ddot{x} + f_o \quad (7)$$

여기서,  $m$ 는 관성력의 크기를 나타내기 위한 질량이며,  $z$ 는 (6)식에 의하여 주어진다.

### 2.6 현상학 모델

저속도영역에서의 힘의 롤-오프(roll-off) 현상을 고려하기 위한 모델로서 Spencer 등에 의하여 제안되었다.<sup>(19)</sup>

$$F_{MR} = c_1\dot{y} + k_1(x - x_o) \quad (8)$$

여기서,  $y$ 와  $z$ 는 다음과 같다.

$$\dot{y} = \frac{1}{c_o + c_1} \{ \alpha z + c_o\dot{x} + k_o(x - y) \} \quad (9)$$

표 1 3층 전단건물의 각 층 최대 응답

	층	비제어	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Max. Inter-story Disp (cm)	1	4.2	1.8	1.8	1.8	1.6	1.7	1.7
	2	3.2	1.5	1.5	1.5	1.4	1.4	1.5
	3	1.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8
Max. Acc (cm/s <sup>2</sup> )	1	975	461	468	495	461	499	522
	2	1477	672	662	665	618	649	661
	3	1814	880	872	831	769	806	811

(1)Bingham; (2)이점성; (3)이력 이점성; (4)단순 Bouc Wen; (5)질량요소를 가지는 Bouc Wen; (6)현상학모델

$$\dot{z} = -\gamma|\dot{x} - \dot{y}|z|z|^{n-1} - \beta(\dot{x} - \dot{y})|z|^n + A(\dot{x} - \dot{y}) \quad (10)$$

### 2.7 각 모델의 비교 연구

Yang은 최대값 2.54cm을 가지는 0.5Hz 사인함수의 변위제어 실험을 통해서 얻은 20ton급 대용량 MR 감쇠기의 이력곡선과의 오차를 최소화하도록 각 모델의 변수들의 수치를 다음과 같이 구하였다.<sup>(20),(21)</sup> 단순 Bouc-Wen 모델:  $\alpha=318470$  N,  $c=687300$  N·sec/m,  $k=146.81$  N/m,  $f_o = -1456$  N,  $\gamma=3819.4$  m<sup>-1</sup>,  $n=2.3983$ ,  $\beta=100.1$  m<sup>-1</sup>,  $A=833.45$  m<sup>-1</sup>; 질량요소를 가지는 Bouc-Wen 모델:  $\alpha=472710$  N,  $c=643230$  N·sec/m,  $k=279.14$  N/m,  $f_o = -1449.3$  N,  $m=14424$  kg,  $\gamma=5100.7$  m<sup>-1</sup>,  $n=2.2021$ ,  $\beta=150.0$  m<sup>-1</sup>,  $A=550.57$  m<sup>-1</sup>; 현상학 모델:  $\alpha=272790$  N,  $c_o=533100$  N·sec/m,  $c_1=28566000$  N·sec/m,  $k_o=55.9152$  N/m,  $k_1=64.0617$  N/m,  $f_o = -1251.7$  N,  $m=14929$  kg,  $\gamma=4429.6$  m<sup>-1</sup>,  $n=6.6862$ ,  $\beta=8446.5$  m<sup>-1</sup>,  $A=841.41$  m<sup>-1</sup>.

Bouc-Wen 모델을 사용한 상기 모델들과 유사한 이력특성을 보이는 Bingham, 이점성, 그리고 이력 이점성 모델의 변수는 다음과 같다. Bingham 모델:  $f_y=200$  kN,  $C_1=1000$  kN·sec/m; 이점성모델:  $f_y=200$  kN,  $C_1=20000$  kN·sec/m,  $C_1=1000$  kN·sec/m; 이력 이점성 모델:  $f_y=200$  kN,  $C_1=20000$  kN·sec/m,  $C_1=1000$  kN·sec/m,  $v_o=1.5$  cm/s.

그림 1은 6가지 모델에 의한 힘-속도 관계를 보여준다. 감쇠력의 최대크기는 유사하지만 이력 특성은 서로 다를 수 있다. 특히, Bingham 모델과 이점성 모델은 이력현상을 묘사하지 못하는 단점을 가지고 있다. 그림 2는 상기 기술된 변수를 가지는 MR 감쇠기를 1층에 설치한 3층 전단건물의 최상층 변위응답과 절대가속도 시간이력을 보여주고, 표 1은 각 층 최대 층간변위와 최대가속도를 보여준다. 3층 전단건물은 동일한 층물성을 가지며, 층질량은 100ton, 층강성은 98000 kN/m, 층감쇠는 140.7 kN·sec/m이다. 가진하중으로는 El Centro (1942, NS성분) 지진하중을 사용하였다. 비제어시 응답과 비교할 때 제어시 응답이 크게 줄어들었음을 알 수 있다. 비록, 그림

1과 같이 각 감쇠기의 이력특성은 차이를 보이지만 그림 2와 표 1을 통하여 제어시 구조물의 응답의 차이는 크지 않음을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 감쇠력 계산에 Bouc-Wen 모델을 사용하는 경우와 달리 적분과정을 요구하지 않기 때문에 적은 시간노력을 요구하는 Bingham, 이점성, 이력 이점성 중, 힘-속도 관계의 이력특성을 모사할 수 있고 Bingham과 이점성 모델을 표현할 수 있는 이력 이점성 모델을 사용하여 변수연구를 수행하기로 한다.

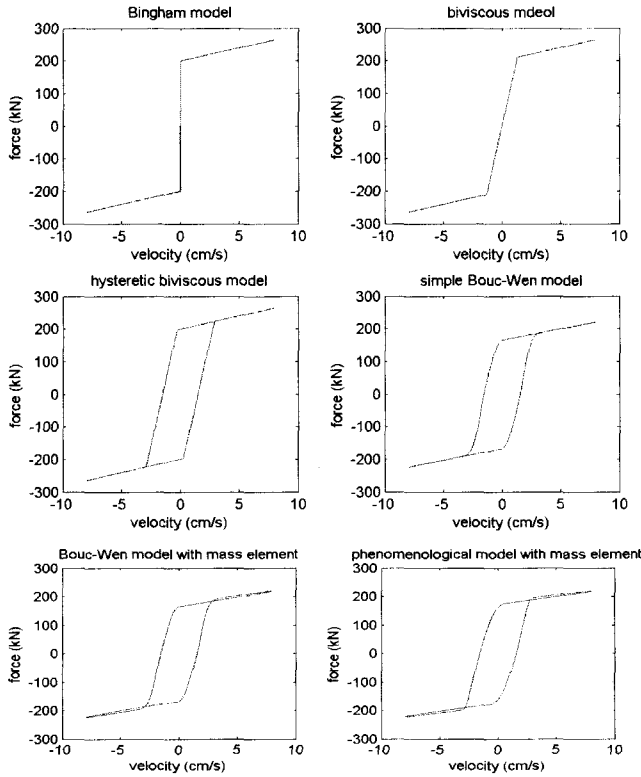


그림 1 사인함수 변위제어시 감쇠기 모델에 따른 힘 속도 관계

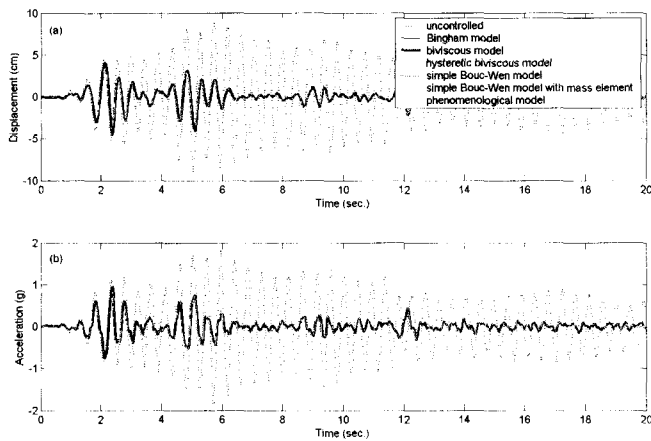


그림 2 3층 전단건물의 3층 변위와 절대가속도 시간이력

### 3. MR 감쇠기 용량을 결정하기 위한 변수연구

#### 3.1 성능평가지수

단자유도 및 다자유도 구조물의 제어성능을 평가하기 위한 성능지수는 다음과 같다.

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

$$J_3 = \max_{i=1, \dots, n} \left\{ \frac{\sigma_{di}}{\sigma_{d_n}^{\max}} \right\}, J_4 = \max_{i=1, \dots, n} \left\{ \frac{\sigma_{\ddot{x}_{ai}}}{\sigma_{\ddot{x}_a}^{\max}} \right\} \quad (11)$$

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 최대절대가속도를 나타낸다. 그리고,  $\sigma$ 는 RMS 응답을 나타낸다.

#### 3.2 질량정규화된 단자유도 시스템

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

$$\ddot{x} + 2\xi_1\omega_1\dot{x} + \omega_1^2x = F_{MR} - \ddot{x}_g \quad (12)$$

여기서,  $\xi_1, \omega_1$ 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 나타내며 (3)식에 의하여 주어진다.

#### 3.3 조화하중

이력 이점성 모델의 이력곡선을 결정하는 변수는  $f_y, C_o, C_1, \dot{x}_o$ 이다. 본 절에서는 최대 크기 1이고, 진동수  $\alpha$ 를 가지는 조화하중을 지진하중으로 사용하여,  $\xi_1=0.05$ 이고,  $\omega_1=1$ 을 가지는 단자유도 시스템을 가진하였다. 그리고, 각 변수의 크기를 다음과 같이 바꾸면서 해석을 수행하여, 각 변수가 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. 참고적으로, 2.7절의 경우,  $v_o=1.5\text{cm/s}$ 의 비제어시 속도응답의 RMS 2.87cm/s에 대한 비율은 0.52이다.

그림 3은  $C_o=4.0\omega_1, C_1=0, v_o=0$ 인 경우에,  $f_y$ 의 변화에 따른 성능지수의 변화를 보여준다. 조화응답의 경우, 최대응답과 RMS응답이 유사한 제어경향을 보이므로, 성능지수 중 최대응답에 해당하는  $J_1$ 과  $J_2$ 만을 도시하였다.  $f_y$ 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 2보다 작은 구간에서는 변위응답과 같이 큰  $f_y$ 가 큰 응답 감소를 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 경우의 가속도응답 제어를 위해서는 MR 감쇠기의 최대마찰력을 최소화해야 함을 의미한다.

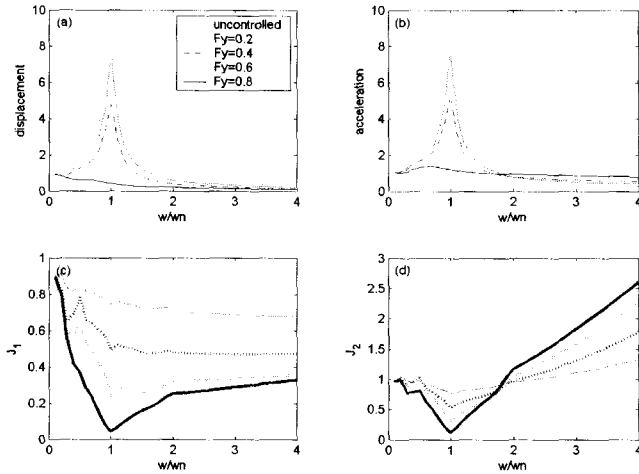


그림 3  $f_y$ 의 성능지수에 대한 효과

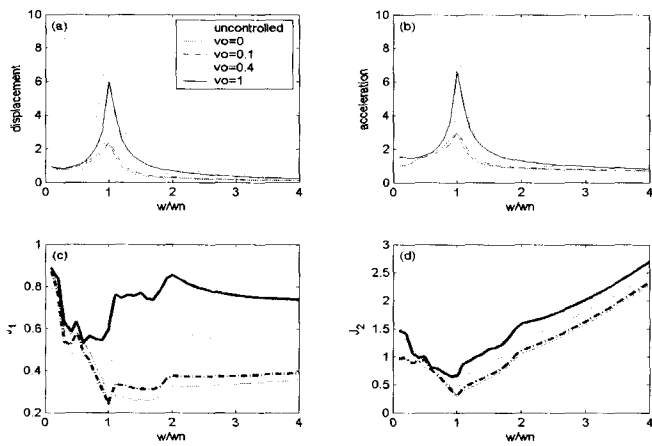


그림 4  $v_0$ 의 성능지수에 대한 효과

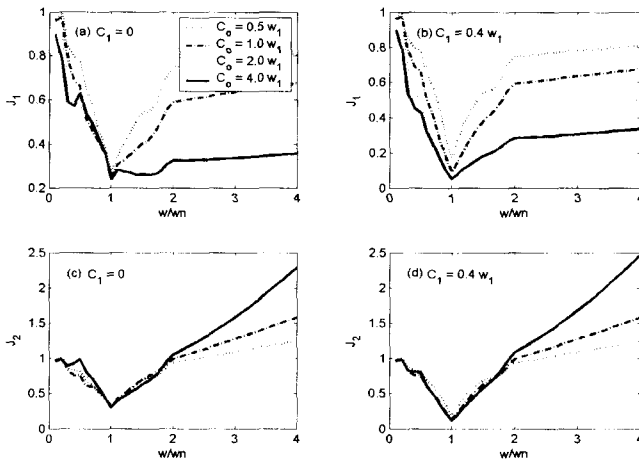


그림 5  $C_0$ 와  $C_1$ 의 성능지수에 대한 효과

그림 4는  $f_y=0.6$ ,  $C_0=4.0\omega_1$ ,  $C_1=0$  인 경우에,  $v_0$ 에

따른 성능지수의 변화를 보여준다.  $\omega$ 가 1보다 큰 경우에는  $v_0$ 가 성능지수에 주는 영향이 불규칙한 경향을 보이거나,  $\omega$ 가 1보다 작은 경우에는  $v_0$ 의 크기가 증가할수록 제어성능이 떨어짐을 알 수 있다.

그림 5는  $f_y=0.6$ ,  $v_0=0$ ,  $C_1$ 과  $C_0$ 에 따른 성능지수의 변화를 보여준다. 공진 시에는  $C_1$ 과  $C_0$ 에 따른 성능지수의 변화가 거의 없으며,  $C_0$ 가 증가할수록 변위제어성능은 우수해지나, 가속도제어성능은 떨어진다. 저속도 영역의 점성인  $C_0$ 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 층전단력에 대한 비율이 제어성능을 결정함을 보였다.<sup>(22)</sup> 따라서, 본 연구에서는 다음과 같이  $f_y$ 를 층전단력에 대한 비율  $\rho$ 로 산정한 후,  $\rho$ 의 크기에 따른 영향을 분석하였다.

$$f_y = \rho \omega_1^2 S_d(\xi_1, \omega_1) \tag{13}$$

여기서,  $S_d(\xi_1, \omega_1)$ 는 비제어시 최대변위응답을 나타내며, 본 연구에서는 20개의 지진에 대한 평균을 통하여 구하였다.  $v_0$ 의 경우,  $v_0=0, 0.5V_0, 1.0V_0, 1.5V_0, 2V_0$ , 변화시켜가며, 해석을 수행하였다.

일반적으로 MR 감쇠기는 저속도 영역의 점성인  $C_0$ 가 고속도 영역의 점성인  $C_1$ 보다 매우 크다. 특히,  $C_0$ 이 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 6은  $C_1$ 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. 단

주기 구조물인 주기가 0.2초인 구조물의 경우에, 동일한  $\rho$ 의 경우, 주기가 0초에서 0.2초로 증가함에 따라 변위와 가속도 성능지수 모두 단조 감소하는 경향을 보인다. 이는 주기가 0인 강체거동을 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 증가시킴에 따라 오히려 감소함을 알 수 있다. 따라서, 가속도응답제어가 주 목적이 되는 구조물이 장주기 구조물인 경우, 작은 최대마찰력을 가지도록 MR감쇠기를 설계해야 한다.

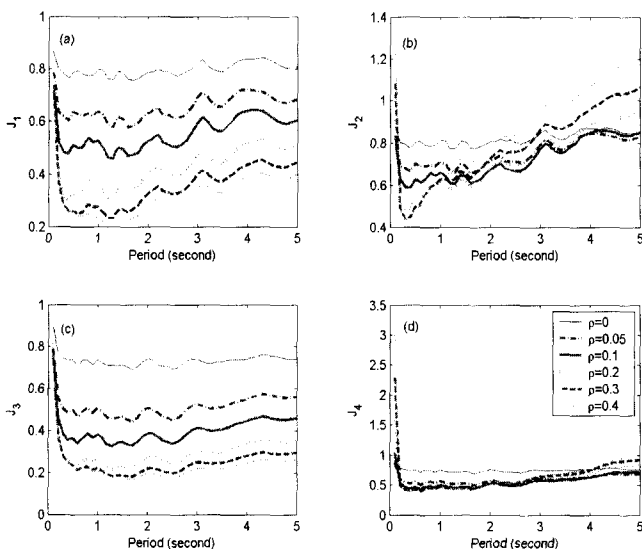


그림 6  $\rho$ 의 성능지수에 대한 효과;  $C_1 = 0.1\omega_1$ ,  $v_o = 0$

그림 7은  $v_o$ 에 따른 성능지수  $J_1$ 의 변화를 보여준다.  $J_1$ 의 값은  $v_o = 0$ 인 경우에 대하여 정규화 되었다.  $v_o$ 가 증가함에 따라 성능지수가 증가함을 알 수 있으며, 그 크기는 최대제어력이 증가함에 따라 증가한다. 특히,  $v_o$

$= 2.0V_o$ ,  $\rho = 0.2$ 인 경우,  $v_o = 0$ 인 경우와 비교할 때, 성능지수가 최대 약 2.5배까지 증가하므로, 설계자는 반드시  $v_o$ 의 효과를 고려하여 최대마찰력을 설계해야 한다.

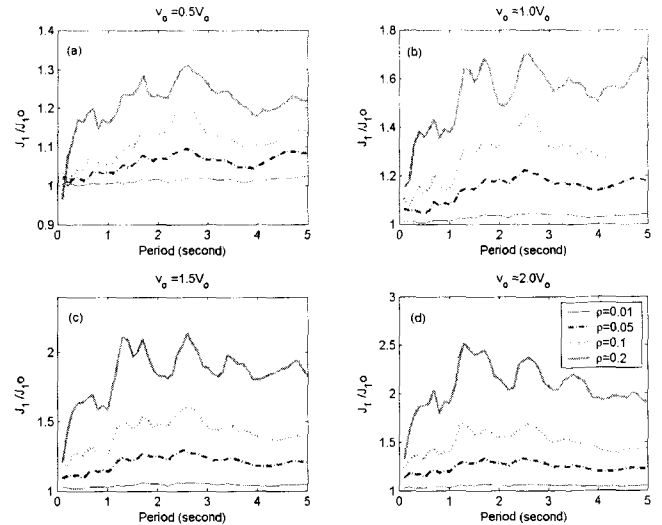


그림 7  $v_o$ 의 성능지수에 대한 효과

#### 4. MR감쇠기의 설치위치 및 개수

감쇠기의 최적위치와 개수에 대한 연구는 많은 연구자들에 의하여 수행되어 왔다. 일반적으로 목적함수에 대한 변화율을 이용하는 최적설계의 경우, 주어진 구속조건에 대하여 감쇠기의 양, 위치, 개수에 대한 정보를 제공하지만 많은 반복수행을 요구하고 경우에 따라 수렴성이 좋지 않은 단점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 주어진 용량을 가지는 하나의 감쇠기를 설치할 때 마다 수치해석을 반복 수행하여, 최대층간변위나 혹은 최대층간속도를 가지는 층에 순차적으로 설치해 가는 SSSA이 이용되고 있으며, Shulka와 Datta는 점성성감쇠기에<sup>(8)</sup>, Garcia와 Soong은 점성감쇠기에 적용하여 그 유효성을 검증하였다.<sup>(9)</sup> 그러나, 이러한 SSSA는 감쇠기의 제어력이 바뀌지 않는 수동형 감쇠기의 경우에만 적합하며, MR감쇠기와 같이 자기장의 신호에 따라 감쇠기의 최대제어력의 크기가 바뀌는 준능동 감쇠기에는 적용하기 어렵다. 특히, 하층의 특성에 따라 최적위치가 바뀌는 특성을 가지고 있다. 만일, SSSA를 MR감쇠기에 적용하기 위해서는 감쇠기의 상태를 일정한 양의 전류를 고정시켜 가하는 passive-on 상태로 가정된 후 특정한 하층에 대한 설계를 수행해야 하며, MR감쇠기의 특성이나 하층이 바뀌는 경우에는 passive-on 상태로 특정하층에 대하여 구한 위치가 최적위치가 아닐 수 있다.

본 절에서는 정형 20층 구조물에 대하여, UDDS, SSSA, 그리고, 반복 해석을 요구하지 않고, 비제어시 응답특성의 정보만을 이용하여 선택된 특정 위치에 설치하는 방법의 유효성을 비교 평가하여, MR감쇠기의 최적설치위치와 설치 개수에 대한 정보를 얻도록 한다. 해석에 사용한 20층

건물의 사양은 Datta가 점탄성감쇠기의 최적설계에 사용한 것과 동일한 사양을 가지고 있으며, 표 2에 나타나 있다. 해석에 사용한 하중은 El Centro 지진하중이고, MR 감쇠기의 사양은  $C_o=91\text{kN}\cdot\text{sec}/\text{m}$ ,  $C_1=1\text{kN}\cdot\text{sec}/\text{m}$ ,  $v_o=0\text{m}/\text{s}$ 이고, 감쇠기의 최대마찰력만을 설계변수로 고려하였다. 설치방법들의 유효성을 비교하기 위하여, 모든 방법들로 설치한 감쇠기들의 최대마찰력의 총합은 다음 식에 의하여 결정하였다.

$$\sum_j^{n_d} f_{yj} \cos^2 \theta_j = \rho \sum_i^n K_i S_{di} \quad (14)$$

여기서,  $f_{yj}$ 과  $\theta_j$ 는 각각  $j$ 번째 감쇠기의 최대마찰력과 설치각도를 나타낸다.  $K_i$ 와  $S_{di}$ 는  $i$ 층의 횡방향 층강성과 비제어시 최대층간 변위를 나타낸다.

해석에서는  $\rho$ 를 0.1로 설정하였으며, 감쇠기의 설치각도는 0인 것으로 가정하였다. 또한, 감쇠기는 모두 동일한 크기를 가지는 것으로 가정하였다. 감쇠기 분포를 위하여, UDDS, 최대층간변위를 최적위치지수로 사용한 SSSA (SSSA-1), 최대층간속도를 최적위치지수로 사용한 SSSA (SSSA-2), 1-10층의 저층부에 설치하는 방법 (Case 1), 6-15층의 중층부에 설치하는 방법 (Case 2), 11-20층의 고층부에 설치하는 방법 (Case 3)을 사용하였다. Case 1, 2, 3은 하나의 층에 2개씩, 모두 20개의 감쇠기를 설치하였다.

표 2 20층 전단건물의 사양

Floor	Mass (tons)	Stiffness (kN/cm)
1 5	300.0	4,000
6 10	250.0	3,000
11 15	175.0	2,000
16 20	100.0	1,000
Damping ratio 2%		

그림 8은 감쇠기 수가 20개로 고정된 UDDS, Case 1, 2, 그리고 3의 성능지수와 감쇠기의 수가 변하는 SSSA방법에 의한 성능지수의 비교를 보여준다. SSSA경우, 감쇠기 수에 관계없이 감쇠기 용량의 총합은 동일하도록 설정하였다. 즉, 하나의 감쇠기는 최대마찰력이 20개의 감쇠기의 최대마찰력의 합과 동일한 감쇠기를 한 층에 설치한 것을 의미한다. 전 층에 동일한 크기의 감쇠기를 설치하는 UDDS가 Case 1, 2, 3보다 우수한 제어효과를 보여준다. 또한, SSSA-1이 SSSA-2보다 우수한 제어효과를 보이는 것으로부터, MR 감쇠기는 층간속도 보다는 층간변위가 큰 층에 설치하는 것이 효과적임을 알 수 있다. 특히, 주목할 것은 SSSA-1을 사용함으로써, 10개의 감쇠기만을 사용하고도 20개의 감쇠기를 사용한 UDDS의 제어효과와 동일한 층간변위제어효과를 얻을 수 있다는 사실

이다. 이것은 전 층에 감쇠기를 설치하는 것이 현실적이지 못함을 고려할 때, 매우 큰 장점이라 할 수 있다. 그러나, SSSA-1은 감쇠기의 수가 20개인 경우를 제외하고는 비제어시보다 절대가속도 응답을 증가시키는 결과를 가져온다. 이것은 SSSA-1이 감쇠기의 수가 작은 경우에는 층간변위가 크게 발생하는 곳에 큰 용량을 가지는 감쇠기를 집중시키고, 층전단력에 비해 과도하게 큰 제어력이 가해지는 층의 급격한 응답의 변화를 가져와 최대절대가속도 응답을 증가시켰기 때문이다.

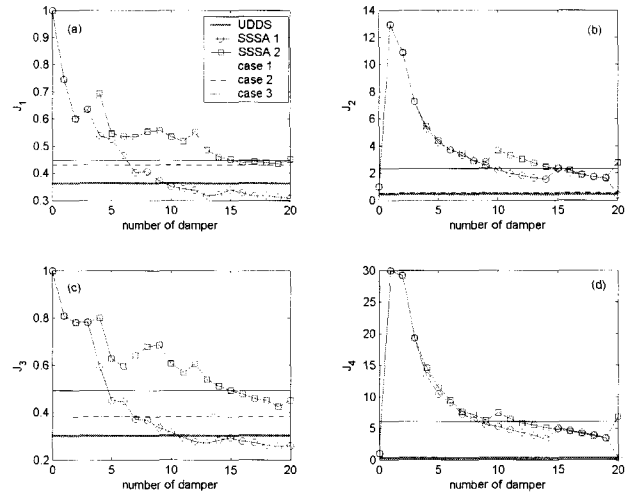


그림 8 20층 건물에 대한 감쇠기 설치방법에 따른 성능지수

앞에서 언급한대로, SSSA는 동일한 크기의 감쇠기만을 기초로 최적설계를 수행하기 때문에, 특성이 변하는 MR 감쇠기의 경우에는 적합하지 않다. 특히, 하중에 따라 위치가 바뀐다는 것은 매우 비현실적이다. 따라서, 비선형성이 강한 MR감쇠기의 경우에는 변화율에 의한 최적설계나, 1개의 설치 시 마다 새로운 해석을 요구하는 SSSA에 의하여 감쇠기의 위치와 용량을 결정하는 것 보다는 오히려, 초기 구조물에 대한 응답정보, 설치상의 제약조건, 층전단력 등의 초기설계조건만을 고려해, 감쇠기 수, 용량, 그리고 층별분포를 대략적으로 설계한 후, 감쇠기의 정확한 모델, 하중, 그리고 준중동 제어알고리즘과 같은 방법을 적용하여 성능을 조율하는 것이 합리적이다.

본 연구에서는 최대마찰력의 총합이 (14)식에 의하여 주어지는 감쇠기를 층별 분포시킬 때, 다음과 같이  $k$ 층에 설치되는 감쇠기의 최대마찰력을 층전단력에 비례하여 산정한다.

$$f_{yk} = \rho K_k S_{dk} \frac{\sum_{i=1}^n K_i S_{di}}{\cos^2 \theta_k \sum_{j=1}^{n_d} K_j S_{dj}} \quad (15)$$

여기서,  $j$ 는 설치되는 위치를 나타내는 지수이다.

표 3은 20개의 감쇠기가 설치된 UDDS, Case-1, 2, 3, 10개의 감쇠기를 설치한 SSSA-1, 2, 그리고 제안된 방법

에 의하여 10개의 감쇠기를 설치한 경우의 성능지수를 보여준다. 제안된 방법은 비제어시 RMS 층간변위가 가장 큰 10곳에 (15)식에 의하여 최대마찰력이 산정된 MR 감쇠기를 설치한 경우이다.

표 3으로부터, 제안된 방법이 변위성능제어에 있어 가장 효율적임을 알 수 있다. 특히, 제안된 방법은 감쇠기 설치 전과 후 2번의 수치해석만을 수행하고, 감쇠기 개수가 10개로 UDDS, Case-1, 2, 3 보다 작은 수의 감쇠기를 사용하는 장점을 가지고 있다. 또한, 가속도응답제어에 있어서는 가장 효율이 좋은 UDDS의 성능에 근접하는 성능을 보이고 있다. 고층부에 동일한 크기의 감쇠기를 설치한 Case 3의 가속도응답이 크다는 사실로부터, 상대적으로 횡강성이 작은 고층부에 저층부보다 작은 용량의 감쇠기가 설치되어야 최대가속도응답의 크기가 증가하는 것을 방지할 수 있음을 알 수 있다.

5. 설계 절차

다음과 같은 절차에 의하여, 지진하중을 받는 다자유도 구조물의 진동제어를 위한 MR 감쇠기의 최대용량, 설치 위치, 및 개수를 산정하고, 그 유효성을 검증한다.

- Step 1: 비제어된 구조물에 대한 수치해석 수행; 시간이력해석, 혹은 응답스펙트럼해석을 이용하여, 비제어시의 구조물의 1차 모드 주기, 층간변위, 절대가속도, 층전단력을 계산한다.
- Step 2: 목표성능지수의 산정; MR감쇠기를 사용하여, 달성하고자 하는 변위 및 가속도 목표성능지수를 결정한다.
- Step 3:  $\rho, C_v, v_o$  결정: 동일한 목표성능지수를 달성하기 위하여 요구되는  $\rho, C_v, v_o$ 의 여러 조합 중, MR감쇠기로 실현 가능한 조합을 선택한다. 초기단계에서는  $C_1$ 과  $v_o$ 를 0으로 두고 1차 모드 주기에 대하여  $\rho$ 의 크기만으로 설계를 수행하여, 대략적인 감쇠기 용량을 산정한다. 이 때의  $\rho$ 는 passive-on시 실현할 수 있는 최대마찰력에 상응하는 크기이다.  $C_1$ 을 실제보다 작게 보는 것은 제어효과를 과소평가하는 반면,  $v_o$ 를 작게

- 보는 것은 제어효과를 과대평가하기 때문에,  $C_1$ 과  $v_o$ 를 0으로 설정하는 것의 오차는 크게 발생하지 않게 된다.
- Step 4: 설치위치, 설치개수, 층별최대용량의 결정: 감쇠기의 수를 결정한 후, 비제어시 RMS 층간변위가 가장 크게 발생하는 곳을 감쇠기 수만큼 선정한다. 그리고, 설치되는 층의 층전단력에 따라 층별 감쇠기 최대용량을 결정한다.
- Step 5: MR 감쇠기 설계: 주어진 층별분포에 따른 최대마찰력의 최대값과 최소값을 실현할 수 있는 MR 감쇠기를 설계한다. 만일 최대값과 최소값의 차가 커서, 하나의 MR 감쇠기로 이를 실현하는 것이 불합리한 경우, 성능이 다른 MR감쇠기를 설계하도록 한다.
- Step 6: 수치해석: 주어진  $\rho$ 와 실제의,  $C_v, v_o$ 을 고려하여 해석을 수행한다.
- Step 7: 목표성능수준이 달성되지 않는 경우, Step 3-5를 반복한다. 변위성능목표를 만족하지 않은 경우에는  $\rho$ 를 증가시키고, 변위성능목표는 만족시키나 가속도성능목표를 만족하지 않은 경우에는 분포시키는 층의 수를 증가하여 하나의 감쇠기의 최대마찰력의 크기를 줄이도록 한다.
- Step 8 (선택): 준능동제어알고리즘 적용: 준능동제어알고리즘 적용을 통하여 성능을 개선하도록 한다.

6. Conclusion

본 연구에서는 건축구조물의 진동제어를 위하여 MR 감쇠기를 사용 할 때, 감쇠기의 이력특성을 고려하여 감쇠기의 용량, 설치위치, 그리고 설치 개수 등을 체계적으로 구하는 예비설계절차가 제시되었다. Bingham, 이점성, 이력 이점성, 그리고 Bouc-Wen 모델을 이용한 모델들의 제어효과를 비교하였으며, 이 모델 중에서 이력특성을 모사할 수 있고 해석이 간단한 이력 이점성 모델을 사용하여 단자유도 구조물에 대한 변수연구를 수행하였다. 단자유도 수치해석결과를 바탕으로 다자유도 구조물의 목표응답성능을 달성하기 위하여 요구되는 MR 감쇠기들의 총 용량을 결정할 수 있는 방법을 제안하였고, 주

표 3 각 방법의 성능 비교

	UDDS	SSSA 1	SSSA 2	Case 1	Case 2	Case 3	Proposed
$J_1$	0.362	0.352	0.535	0.534	0.430	0.447	0.349
$J_2$	0.437	2.218	3.677	0.455	0.550	2.312	0.449
$J_3$	0.300	0.317	0.607	0.394	0.382	0.494	0.274
$J_4$	0.205	5.270	7.413	0.378	0.383	6.051	0.344
감쇠기 개수	20	10	10	20	20	20	10
해석 횟수	2	11	11	2	2	2	2
감쇠기 크기	동일	동일	동일	동일	동일	동일	상이



어진 총 용량의 감쇠기에 대하여, UDSS(Uniformly Distribution Damping System), SSSA(Simplified Sequential Search Algorithm), 그리고 무작위로 특정위치에 설치하는 방법들의 제어효과에 대한 비교를 통하여, MR 감쇠기의 층별분포를 결정할 수 있는 방법을 제안하였다. 수치해석 결과는 제안된 방법이 적은 수의 감쇠기를 가지고도 층간변위와 절대가속도 제어에 있어 모두 효과적임을 보여준다.

## 감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업 (03산학연 C103A200 0010-03A0200-01010)에 의한 것임.

## 참고 문헌

- Housner GW, Bergman LA, Caughey TK, Chassiakos AG, Claus RO, Masri SF, Skelton RE, Soong TT, Spencer BF Jr., and Yao JTP. "Special issue structural control: past, present, and future," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 1997, Vol.123, No.9, pp.897-971.
- Brogan, W.L., *Modern control theory*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1991.
- Jansen, LM and Dyke SJ. "Semiactive control strategies for MR dampers: comparative study," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 126, No 8, 2000, pp. 795-803.
- Carlson JD and 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.
- Fujitani H, Sodeyama H, Hata K, Iwata N, Komatsu Y, Sunakoda K., and 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.
- Spencer Jr. BF, Dyke SJ, and Sain MK. "Magneto-rheological dampers: a new approach to seismic protection of structures," *Proceedings of Conference on Decision and Control*, Kobe, Japan, 1996, pp. 676-81.
- Zhang RH and Soong T.T, "Seismic design of viscoelastic dampers for structural application," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.118, No.5, 1992, pp. 1375-1392.
- Shukla AK and Datta TK. "Optimal use of viscoelastic dampers in building frames for seismic force," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 125, No.4, 1999, pp. 401-409.
- Garcia D. Lopez and T.T Soong, "Efficiency of a simple approach to damper allocation in MDOF structures," *Journal of Structures Control*, Vol.9, No.1, 2002, pp. 19-30.
- Lee Sang-Hyun, Son Dong-In, Kim Jinkoo, and Kyung-Won Min, "Optimal Design of Viscoelastic Dampers using Eigenvalue Assignment," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol.33, No.4, 2004, pp. 521-542.
- Filiatrault A. and Cherry S., "Seismic Design Spectra for Friction-Damped Structures," *Journal of Structural Engineering*, Vol.116, No.5, 1990, pp. 1334-1355.
- Fu Yaomin and Cherry Sheldon, "Design of friction damped structures using lateral force procedure," *Earthquake engineering and Structural Dynamics*, Vol.29, No.7, 2000, pp. 989-1010.
- Mahendra P. Singh and Luis M. Moreschi, "Optimal seismic response control with dampers," *Earthquake engineering and Structural Dynamics*, Vol.30, No. 4, 2001, pp. 553-572.
- Phillips RW. "Engineering applications of fluids with a variable yield stress," Ph.D thesis, University of California, Berkeley, California, 1969.
- Stanway, R., Sproston, J.L., and Stevens, N.G. "Non-linear Modeling of an Electro-rheological Vibration Damper," *J. Electrostatics*, Vol. 20, 1987, pp. 167-184.
- Gamota, D. R. and Filisko, F. E. "Dynamic mechanical studies of electrorheological materials: Moderate frequencies," *J. Rheology*, Vol. 35, 1991, pp.399-425.
- Wereley NM, Pang L, and 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.
- Dyke SJ, Spencer Jr. BF, Sain MK, and Carlson JD. "Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction," *Smart Materials and Structures*, Vol. 5, 1996, pp. 565-575.
- Spencer Jr. BF, Dyke SJ, Sain MK, and Carlson JD. "Phenomenological model of a magnetorheological

- damper," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 123, No. 3, 1997, pp. 230-238.
20. Yang G., "Large-scale magnetorheological Fluid Damper for Vibration Mitigation: Modeling, Testing and Control," Ph.D thesis, University of Notre Dame, Indiana, 2001.
21. Yang G., B.F. Spencer, Jr., J.D. Carlsonb, and M.K. Sain, "Large-scale MR fluid dampers: modeling, and dynamic performance considerations," *Engineering Structures*, Vol. 24, No 3, 2002, pp. 309-323.
22. Lee Sang-Hyun, Min Kyung-Won, Lee Young-Cheol, and Chung Lan, "Improved Design of Sliding Mode Control for Civil Structures with Saturation Problem," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 33, No.11, 2004, pp. 1147-1164.