

〈논 문〉

MR 감쇠기를 이용한 구조물의 변형된 슬라이딩 모드 제어 Modified Sliding Mode Control of Structures Using MR Dampers

민 경 원[†] · 정 진 욱^{*}

Min, Kyung-Won and Joung, Jin-Wook

(2001년 12월 3일 접수 ; 2002년 1월 25일 심사완료)

Key Words : Sliding Mode Control(슬라이딩 모드 제어), Semi-active Control(준능동제어), MR Dampers(MR 감쇠기)

ABSTRACT

Semi-active control devices have received significant attention in recent years because they offer the adaptability of active-control devices without requiring the associated large power sources. Magnetorheological(MR) dampers are semiactive control devices that use MR fluids to produce controllable dampers. This paper applies sliding mode control method using target variation rate of Lyapunov function for the control of structures by use of MR dampers. The three-story building model under earthquake excitation is analyzed by installing a MR damper in the first-story. The performance of semi-active controllers designed by clipped-optimal algorithm and modified sliding mode control algorithm is compared to the performance of passive-type MR dampers. The results indicate that semi-active controllers achieve a greater reduction of responses than passive-type system and especially the controller by modified sliding mode control method shows a good applicability in the view of response control and control force.

1. 서 론

최근 10년간, 지진 및 바람에 대한 구조물의 안정성을 증가시키기 위해 여러 가지 제어기법들을 적용하려는 노력이 있어 왔다. 이러한 제어기법중의 하나인 능동제어는 구조물의 응답을 효율적으로 제어할 수 있는 장점이 있는 반면에 구조물의 불안정성 야기, 외부전원에 대한 의존성이라는 단점을 가지고 있기도 하다.

준능동제어 장치는 능동제어 장치와 달리 큰 동력

원을 필요로 하지 않는다. 또한 구조물의 제어를 효과적으로 하기 위해 능동제어 알고리즘을 사용함으로써 감쇠기의 특성을 변화시킬 수 있는 능동제어장치의 장점을 가지고 있다. 준능동제어 장치중의 하나인 MR(magnetorheological damper)감쇠기는 능동제어 알고리즘을 이용하여 감쇠기에 입력되는 전압의 크기를 조절함으로써 입력전압의 크기에 비례하는 감쇠기의 제어력을 구현할 수 있다. 사용하는 능동제어기법으로는 슬라이딩 모드 제어, Lyapunov함수를 이용한 제어 알고리즘, 그리고 H_2/LQG 방법을 이용한 준최적제어(clipped-optimal control) 등이 있다.^(1~10)

Lyapunov함수를 이용한 제어 알고리즘은 구조물의 위치에너지와 운동에너지의 합으로 나타내는 Lyapunov함수를 설정하고, 이 함수의 변화율이 음수가 되도록 제어기를 설계한다. 설계된 제어기는 함수의 변화율이 양수인 구간에서는 MR감쇠기에 최대전

† 책임저자, 정회원, 단국대학교 건축공학과
E-mail : kwmin@dankook.ac.kr
Tel : (02) 709-2731, Fax : (02) 709-2536

* 인천대학교 대학원 건축공학과

압값을 입력하여 구조물을 제어하게 되며 음수인 구간에서는 제어하지 않는다.^(3,4)

준최적제어는 H_2/LQG 방법을 이용하여 설계된 제어기와 MR감쇠기에서 구현되는 제어력을 비교하여 입력전압값을 변화시킴으로써 구조물을 제어하게 된다.⁽²⁾

슬라이딩 모드 제어는 구조물이 안정적인 거동을 보이는 슬라이딩 표면을 정의한 후, 항상 구조물의 응답이 슬라이딩 표면으로 보내지도록 제어력을 설정한다. 이를 위해, 슬라이딩 표면으로부터의 거리를 Lyapunov 함수로 설정하고, 이 함수의 시간에 대한 변화율이 항상 음수가 되도록 제어력을 설정한다.

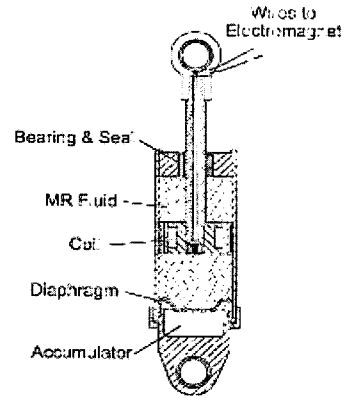
본 논문에서는 Lyapunov함수의 변화율이 음수라는 조건만 만족하도록 제어기를 설계하는 기존 연구와 달리, Lyapunov함수의 목표 변화율을 설정하고 이를 구현할 수 있는 제어기를 설계함으로써 제어기의 성능을 효율적으로 활용할 수 있도록 하는 변형된 슬라이딩 모드 제어알고리즘을 MR감쇠기에 적용하여 효율성을 살펴보기로 한다. 목표 변화율을 이용한 제어 알고리즘은 설정된 목표 변화율에 모자라는 크기만큼의 제어력을 발생시켜 불필요하게 큰 제어력이 발생하지 않는다.⁽⁹⁾

사용한 제어알고리즘의 유효성을 증명하기 위해서 1층에 MR감쇠기가 설치된 3층 구조물에 대한 지진 해석을 수행하였다. 지진하중은 El Centro 하중을 사용하였으며 MR 감쇠기의 수치모델은 Spencer가 제안한 병행소성모델⁽¹⁾(bingham plastic model)을 사용하였다. 또한 Spencer가 제안한 준최적제어알고리즘과의 수치해석 비교를 통하여 본 논문에서 사용한 Lyapunov함수의 목표변화율을 고려한 제어알고리즘의 유효성을 검증하고자 한다.

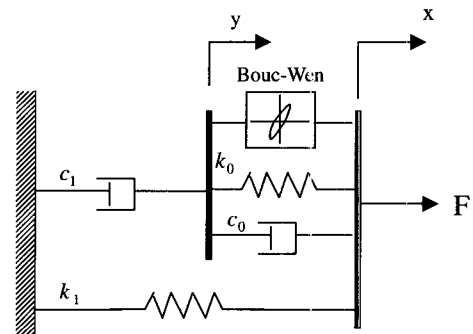
2. MR 감쇠기의 비선형 해석모델

2.1 병행소성모델

MR 감쇠기는 MR 유체의 점성특성과 입력된 전류에 따른 MR 유체의 자기장에 따른 특성변화에 기인하는 소성특성이 복합적으로 나타나는 점소성특성을 가지고 있다. 본 논문에서는 MR감쇠기의 운동속도 및 외부에서 입력되는 전압에 따른 비선형 특성을 표현하기 위하여 비선형 모델인 병행소성모델을 사용하였다. 본 절은 Spencer가 제안한 MR감쇠기의 병행소



(a) Schematic of MR damper



(b) Mechanical model of MR damper

Fig. 1 MR damper

성모델에 대한 연구 내용을 정리한 것이다.⁽¹⁾

이 모델로부터 구현되는 제어력 f 는 다음과 같은 연립미분식 (1~3)으로부터 구할 수 있다.

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

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

$$f = \alpha z + c_0 (\dot{x} - \dot{y}) + k_0 (x - y) + k_1 (x - x_0) \quad (3)$$

윗 식에서 k_1 은 어큐물레이터(accumulator)의 강성이며, c_0 와 c_1 은 각각 큰 속도에서의 점성감쇠와 저속에서의 비선형 롤-오프(roll off)특성을 나타낸다. k_0 는 고속에서의 댐퍼 강성을 나타내며, x_0 는 어큐물레이터로 인한 댐퍼력과 관련된 스프링 k_1 의 초기 변위이다. γ, β, A 는 MR 감쇠기 이력곡선의 형상을 결정하는 무차원 계수이다. Bouc-Wen 모델은 감쇠기

의 이력거동특성을 나타낸다.

2.2 자기장 변화에 따른 모델

자기장 변화에 따른 모델을 고려하기 위하여, 입력된 전압(v)과 계수간의 상관관계가 결정되어야 한다. MR 유체의 항복응력은 자기장의 세기에 좌우되므로, 식 (1)과 (3)에서의 계수 α 는 입력전압의 함수로 표

현될 수 있다. 점성감쇠상수 또한 자기장의 세기와 관련되므로 식 (1)과 (3)에서의 계수, c_0, c_1 도 입력 전압의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b(u) \quad (4)$$

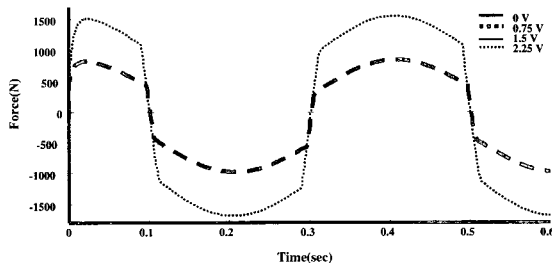
$$c_1 = c_1(u) = c_{1a} + c_{1b}(u) \quad (5)$$

$$c_0 = c_0(u) = c_0 + c_0(u) \quad (6)$$

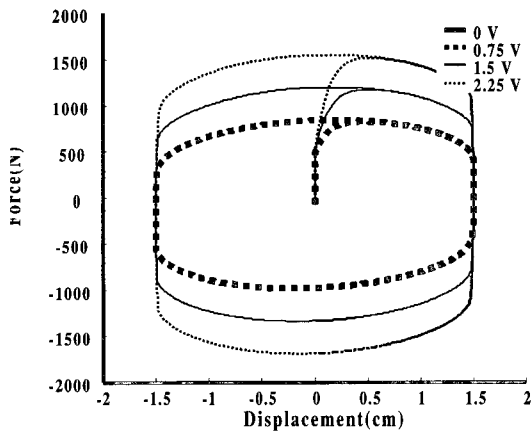
MR 유체가 유동 평형상태에 이르는 동특성은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다. v 는 드라이버에 입력되는 전압이다.

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

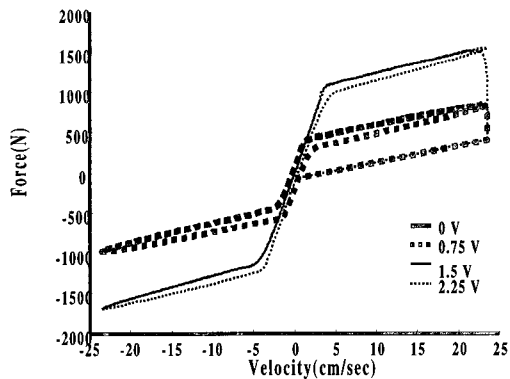
MR 감쇠기의 동특성 모사를 위하여 식 (1~7)의 각 계수값들은 Spencer가 실험을 통해 얻은 값을 사용하였다.⁽¹⁾ 실험에서 입력전압 2.25 V부터 MR 감쇠기의 포화현상(saturation)이 발생하기 때문에 동특성



(a) Force vs. time

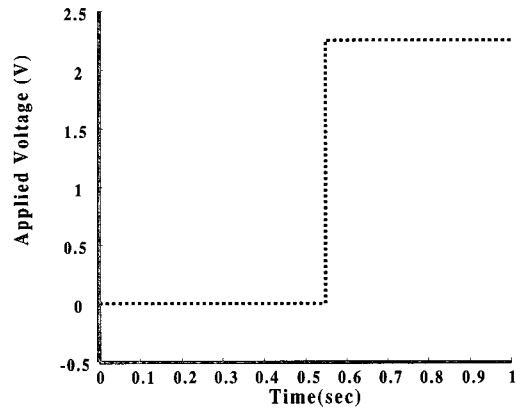


(b) Force vs. displacement

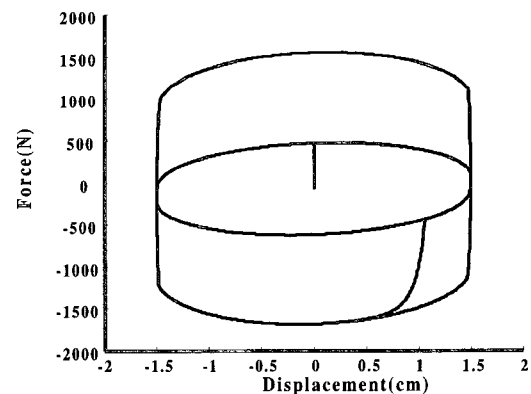


(c) Force vs. velocity

Fig. 2 Force response for 2.5 Hz sinusoidal excitation with an amplitude of 1.5 cm



(a) Applied voltage vs. time



(b) Force vs. displacement

Fig. 3 Force response for applied voltage

모사에 사용하는 전압은 0 V에서 2.25 V사이로 한다. 이상과 같은 MR감쇠기 모델의 특성을 알아보기 위하여 입력전압에 따른 제어력을 구해 보았다.

Fig. 2는 MR 감쇠기에 크기 1.5 cm, 주기 2.5 Hz 인 사인함수를 입력했을 때, 각각의 입력전압에 따른 감쇠력을 시간, 변위, 속도에 대하여 나타낸 것이다. MR 감쇠기의 감쇠력은 입력전압의 크기에 비례하며 비선형적인 특성을 나타낸다. Fig. 3은 MR 감쇠기에 0 V에서 2.25 V로 변하는 계단함수를 입력했을 때의 힘-변위 응답곡선이다. MR 감쇠기는 입력전압의 변화에 따라 감쇠력의 크기를 순간적으로 변화시키는 것을 알 수 있다.

3. 제어알고리즘

구조물의 상태방정식과 출력방정식은 각각 식 (8) 과 (9)로 표현되며, \dot{x}_g 는 지반가속도, U 는 제어력, Z 는 상태벡터, C 는 출력벡터이다.

$$\dot{Z} = AZ + BU + E \ddot{x}_g \quad (8)$$

$$Y = CZ \quad (9)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M_s^{-1}K_s & -M_s^{-1}C_s \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ -M_s^{-1}\Gamma \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} 0 \\ \Lambda \end{bmatrix}$$

여기서, $M_s, C_s, K_s, \Gamma, \Lambda$ 는 각각 질량, 점성, 강성, 감쇠기의 위치, 지진의 영향을 나타내는 행렬이다. 출력방정식을 구성하는 행렬 C 는 측정하고자 하는 값에 따라 그 구성을 달리한다.

3.1 준최적제어알고리즘⁽²⁾

위 알고리즘은 측정응답 Y 와 측정제어력 f 를 이용하여 최적제어력 U 를 산출하는 최적제어기 $K_c(s)$ 를 설계하는 방법이다. 최적제어기 $K_c(s)$ 를 설계하는 데 있어서, H_2/LQG 방법의 기본인 가속도 되먹임 제어기법을 사용하며 성능지수 J 는 측정응답 과 제어력 크기의 평균으로 설정되었다.

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left[\int_0^T \{ (CZ)Q(CZ) + rU^2 \} dt \right] \quad (10)$$

다음 식 (11)에서 K 는 상태변수 되먹임 이득값이

며, F 는 칼만추정기의 이득값으로 최적제어기 $K_c(s)$ 를 표현한다.

$$K_c(s) = K[sI - (A - FC)]^{-1} \bar{B} \quad (11)$$

$$\bar{B} = [F \quad B - FD]$$

따라서, 최적제어력 U 는 식 (12)와 같이 측정응답 Y 와 측정제어력 f 의 라플라스 변환값에 $K_c(s)$ 를 곱하여 구할 수 있다. $L(\cdot)$ 은 라플라스변환이며 $L^{-1}(\cdot)$ 은 라플라스역변환이다.

$$U = L^{-1} \left\{ -K_c(s) L \left(\begin{bmatrix} Y \\ f \end{bmatrix} \right) \right\} \quad (12)$$

MR 감쇠기의 제어력은 입력전압 v 의 값에 따라 변하게 된다. MR 감쇠기가 최적제어력을 구현하기 위해서는 최적의 입력전압을 선택하여야 한다. MR 감쇠기가 최적제어력을 구현할 경우, 즉 감쇠기에서 구현되는 제어력(f)와 제어기에서 산정된 최적제어력(U)가 일치할 때 입력전압값은 현재의 값을 사용하며 최적제어력의 크기가 감쇠기에서 구현된 제어력 보다 작고 두 값의 부호가 같을 경우에는 입력전압을 최대값(2.25 V)까지 증가시킨다. 그 외의 경우에는 입력전압값을 0 V로 한다. 제어력에 대한 입력전압을 선정하는 식은 식 (13)과 같다.

$$v = V_{max} H((U-f)f) \quad (13)$$

V_{max} 는 MR 감쇠기에서 포화현상이 발생할 때의 최대전압값이며 본 논문에서는 2.25 V로 사용한다. $H(\cdot)$ 는 단위계단함수이다.

3.2 슬라이딩 모드 제어^(5~9)

위에서 설명한 준최적제어알고리즘은 최적제어기 설계와 MR감쇠기의 입력전압 선정으로 이루어진다. 본 논문에서는 제어기로써 MR감쇠기를 이용하므로 입력 전압 선정은 위에서 제시한 식 (13)의 방법을 따르기로 하나, Lyapunov 제어기법인 슬라이딩 모드 제어 기법에 목표변화율을 설정하여 효율적인 제어력을 설계하는 기법을 적용하여 결과를 비교하기로 한다.

(1) 슬라이딩 표면의 설계

슬라이딩 모드 제어는 구조물 응답의 궤적을 슬라이딩 표면으로 보내고, 그 표면에 머무르도록 제어기를 설계한다. 슬라이딩 표면에서 구조물은 안정적인 거동을 보이며, 다음과 같이 상태변수의 선형조합으로

정의된다.

$$S = PZ = 0 \quad (14)$$

여기서, S 는 r -벡터이며 r 은 제어기의 숫자를 나타낸다. P 는 슬라이딩 표면에서의 운동이 안정하도록 결정되는 $(r \times 2n)$ 행렬이다. n 은 구조물의 자유도 개수를 나타낸다. P 를 결정하는 방법은 고유값 지정, LQR 등이 있으며, 본 논문에서는 LQR 방법에 의하여 다음 성능지수를 최소화하도록 P 를 결정하였다.

$$J = \int_0^{\infty} Z'(t)QZ(t)dt \quad (15)$$

여기서, Q 는 $(2n \times 2n)$ 가중행렬이다.

(2) Lyapunov 방법을 이용한 제어기 설계

제어기는 상태변수의 궤적을 슬라이딩 표면 $S=0$ 으로 유도하도록 설계된다. 이렇게 설계하는 이유는 구조물이 슬라이딩 표면에 있다는 것이 안정적인 거동을 한다는 것을 의미하기 때문이다. 이 목적을 달성하기 위해 Lyapunov 함수 V 를 다음과 같이 설정한다.

$$V = 0.5S'S = 0.5Z'P'PZ \quad (16)$$

상태변수의 궤적이 $t \rightarrow \infty$ 일때, 슬라이딩 표면에 머무르기 위한 충분조건은 다음과 같다.

$$\dot{V} = S'S \leq 0 \quad (17)$$

식 (17)의 \dot{S} 에 상태방정식을 대입하면 Lyapunov 함수의 변화율은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= S'\dot{S} = S'P\dot{Z} = S'P(AZ + BU + E\ddot{x}_g) \\ &= S'PB PB^{-1}PAZ + PB^{-1}RE\ddot{x}_g + U \\ &= \lambda U - G \end{aligned} \quad (18)$$

여기서, λ 와 G 는 다음과 같다.

$$\lambda = S'PB = Z'P'PB \quad (19)$$

$$G = -[(PB)^{-1}PAZ + (PB)^{-1}PE\ddot{x}_g] \quad (20)$$

식 (19)로부터 λ 는 상태변수에 상수를 곱해 형성되는 1차 선형 공간을 나타냄을 알 수 있다. 제어력이 λ 에 비례하는 형태가 되면 선형제어의 역할을 수행하고 LQR제어와 유사한 제어력을 발생하게 된다. G 는 지진하중과 구조물의 응답에 의해 발생하는 힘을

을 표현하며, λ 의 부호와 같은 경우 이 힘은 상태변수의 궤적을 슬라이딩 표면으로 보내고, 다른 경우는 멀어지게 하는 역할을 한다.

본 논문에서는 작은 제어력이 요구되는 구간은 최대제어력이 아니라 목표값에 모자라는 만큼의 제어력만 발휘할 수 있도록 Lyapunov 함수의 변화율이 λ^2 에 비례하는 형태가 되도록 목표 변화율을 설정하는 변형된 슬라이딩 모드 제어기법을 적용한다. Lyapunov 함수의 변화율과 제어력은 식 (21), (22)와 같다.⁽⁹⁾

$$\dot{V} = \lambda(U - G) \leq -\kappa_2 \lambda^2 \quad (\kappa_2 > 0) \quad (21)$$

$$U = \begin{cases} 0 & ; \text{if } \lambda G \geq \kappa_2 \lambda^2 \\ -\kappa_2 \lambda + G & ; \text{if } \lambda G < \kappa_2 \lambda^2 \end{cases} \quad (22)$$

위와 같이 설계된 제어력 U 는 식 (13)을 이용하여 입력전압으로 변환된다.

4. 구조물의 지진응답 해석

본 논문에서는 Spencer가 제안한 준최적 제어기법과 본 논문에서 제시한 Lyapunov 함수의 변화율을 이용한 슬라이딩 모드 제어기법을 이용하여 MR감쇠기 모델의 타당성을 분석하였다.

지진응답해석을 통하여 각 알고리즘의 특성을 파악하고 MR감쇠기의 수동제어시와 알고리즘을 적용한 두가지 입력전압(0 V, 2.25 V)에 따른 준능동제어시의 제어성능을 비교해 보고자 한다.

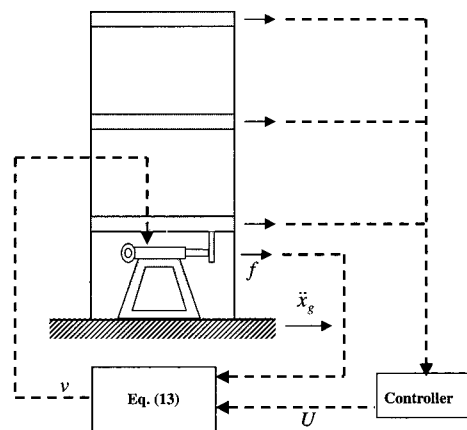


Fig. 4 Diagram of MR damper implementation

4.1 해석예제

건물모델은 Fig. 4와 같이 3층 건물의 지반과 1층 사이에 MR 감쇠기가 설치되어 있는 형태이다. 본 논문에서는 Spencer가 사용한 건물특성을 수치해석에 이용하였다.⁽²⁾

구조물의 운동방정식은 식 (23)과 같다.

$$M_s \ddot{x} + C_s \dot{x} + K_s x = \Gamma f - M_s \Lambda \ddot{x}_g \quad (23)$$

f 는 MR 감쇠기의 제어력이며, 식 (1~7)에 의해 정의된다. 본 논문에서 이용하는 준최적제어기법과 슬라이딩 모드 제어기법의 의한 제어력 U 는 각각 식 (12)와 식 (22)에 의해서 계산된다. 3층 모델에 관한 식 (23)의 행렬은 다음과 같다.

$$M_s = \begin{bmatrix} 983 & 0 & 0 \\ 0 & 983 & 0 \\ 0 & 0 & 983 \end{bmatrix} \quad C_s = \begin{bmatrix} 175 & -50 & 0 \\ -50 & 100 & -50 \\ 0 & -50 & 50 \end{bmatrix}$$

$$M_s = 10^5 \begin{bmatrix} 12.0 & -6.84 & 0 \\ -6.84 & 13.7 & -6.84 \\ 0 & -6.84 & 6.84 \end{bmatrix}$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \Gamma = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

여기서, M_s , C_s , K_s , Γ , Λ 는 각각 질량(kg), 점성(N·sec/m), 강성(N/m), 감쇠기의 위치, 지진의 영향을 나타내는 행렬이다.

4.2 수치해석 결과

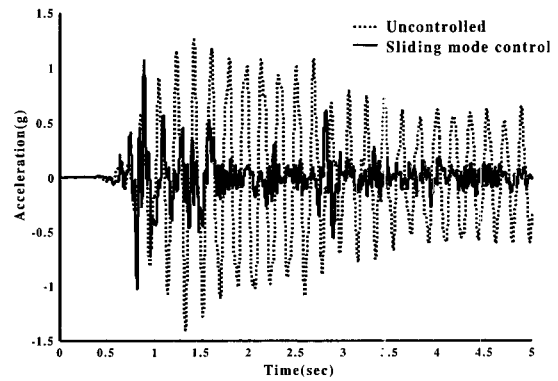
MR 감쇠기를 수동장치로 적용함에 있어서 2가지 경우에 대하여 고려하였다. 첫 번째는 입력전압이 0 V를 유지하는 수동제어의 경우이고 두 번째는 입력전압이 2.25 V를 유지하는 수동제어의 경우이다. Table 1은 비제어시, 수동장치로 적용하였을 경우 그리고 준최적 제어기법과 슬라이딩 모드 제어기법을 사용하여 구조물을 제어하였을 때의 각각에 대한 최대 응답을 나타낸 것이다.

Table 1로부터 두가지 경우의 수동시스템 모두 상부층의 층간변위 응답과 가속도 응답을 50 % 정도 줄이는 것을 알 수 있다. 그러나, 수동제어 2의 경우는 상부층의 가속도 응답과 층간변위 응답이 수동제어 1에 비하여 증가한다. 그러므로 감쇠력이 큰 수동장치를 사용하는 것이 항상 효과적인 것은 아니다. 준최적 제어기법 및 슬라이딩 모드 제어기법을 적용한 시스템의 경우 수동제어 2의 최대제어력(981 N)보다 각

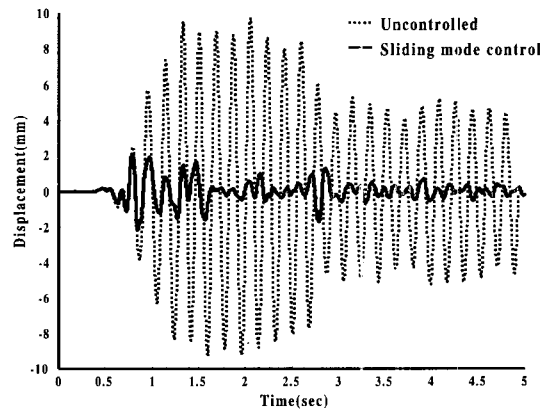
Table 1 Peak response due to the El centro earthquake

		No control	Passive 1 (0 V)	Passive 2 (2.25 V)	Clipped optimal	Sliding mode
Displ.	3floor	9.7	4.5	3.0	2.1	2.1
	2floor	8.3	3.5	1.9	1.8	1.8
	1floor	5.4	2.1	0.7	1.1	1.3
Story drift	3floor	2.0	1.0	1.1	1.0	0.9
	2floor	3.1	1.5	1.5	0.8	0.8
	1floor	5.4	2.1	0.7	1.1	1.3
Accel.	3floor	1400	720	770	702	1000
	2floor	1070	487	496	737	679
	1floor	878	419	282	722	732
Control force		-	259	981	950	876

(Displ. Story drift:mm, Accel.:cm/sec², Control force:N)

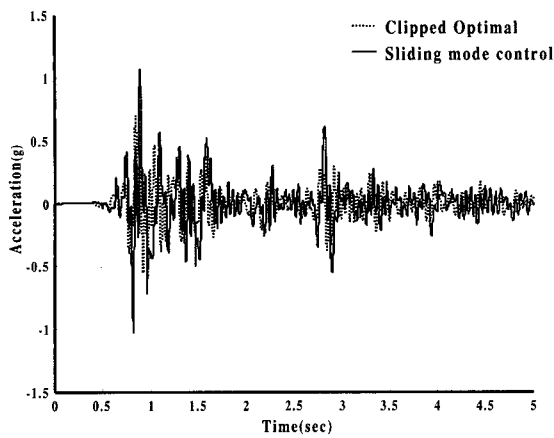


(a) Acceleration at third floor

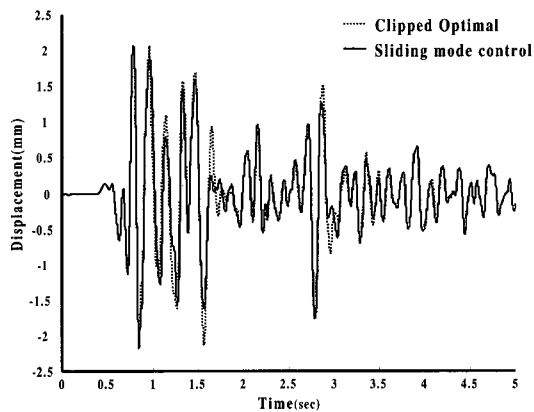


(b) Displacement at third floor

Fig. 5 Structural responses of uncontrolled and sliding mode control



(a) Acceleration at third floor



(b) Displacement at third floor

Fig. 6 Structural responses of sliding mode control and clipped-optimal systems

각 더 적은 제어력(950 N, 876 N)을 사용하면서도 상부층의 층간변위를 제어하는데 더 효과적인 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 슬라이딩 모드 제어시와 비제어시의 3층의 가속도응답과 변위응답이다.

Fig. 6은 슬라이딩 모드 제어기법과 준최적 제어기법을 사용하여 구조물을 제어하였을 경우 3층의 가속도응답과 변위응답이다.

슬라이딩 모드 제어기법을 적용하였을 경우 변위응답은 준최적 제어기법에 비해 전체적으로 감소하는 것을 알 수 있으나 가속도 응답은 증가하는 현상을 보인다.

Fig. 7은 각 제어기법에 따른 감쇠기의 제어력을 나타낸 것이다. 슬라이딩 모드 제어기법의 경우 준최

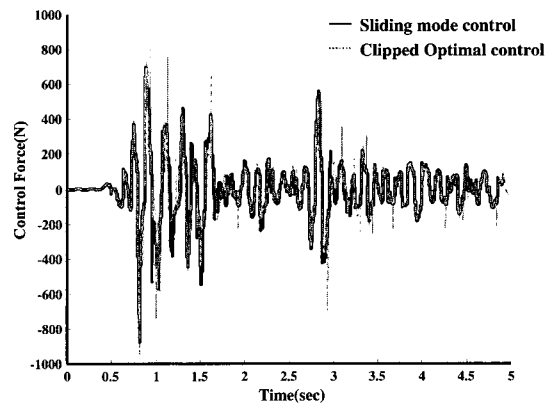


Fig. 7 Comparison of sliding mode control and clipped-optimal control

적 제어기법에 비해 순간적인 제어력 증가현상을 감소시킴으로써 안정적인 제어력을 구현하는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 준능동 감쇠기인 MR 감쇠기의 비선형 해석모델과 피드백 제어기법인 준최적 제어기법 그리고 변형된 슬라이딩 모드 제어기법을 이용하여 3층 건물의 지진응답을 분석하였다. MR 감쇠기는 능동감쇠기와는 달리 동력기를 사용하지 않고 적은 전압으로 제어력을 발휘할 수 있기 때문에 매우 안정적이다. 최대 2.25 V의 전압으로 가동이 되는 감쇠기를 3층 건물의 1층에 설치하여 건물의 응답과 제어력을 수동작동 기법(각각 0 V와 2.25 V일 때)과 제어기법을 적용하였을 때와 비교하였다. 준최적 제어기법 및 슬라이딩 모드 제어기법을 적용한 시스템의 경우 수동제어2의 최대제어력(981 N)보다 각각 더 적은 제어력(950 N, 876 N)을 사용하면서도 상부층의 층간변위를 효과적으로 제어함으로써 준능동의 특성을 반영한 준최적 제어기법과 변형된 슬라이딩 모드 제어기법에 의한 제어 성능이 제어율과 제어력의 관점에서 볼 때 수동작동시의 기법보다 우수한 것을 알 수 있다. 또한 변형된 슬라이딩 모드 제어기법의 경우, 876 N의 제어력으로 950 N의 제어력을 사용하는 준최적 제어기법과 같은 층간변위 제어효과를 나타냄으로써 제어력 측면에서 효과적임을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-1999-00298)지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- (1) Spencer Jr., B. F., Dyke, S. J., Sain, M. K. and Carlson, J. D., 1999, "Phenomenological Model for Magnetorheological Dampers", J. Engrg. Mech., Vol. 123, No. 3.
- (2) Dyke, S. J., Spencer Jr., B. F., Sain, M. K. and Carlson, J. D., 1999, "Modeling and Control of Magnetorheological Dampers for Seismic Response Reduction", Smart Materials and Structures, Vol. 5.
- (3) Leitmann, G., 1994, "Semiactive Control for Vibration Attenuation", J. of intelligent Material Systems and Structures, Vol. 5, pp. 841~846.
- (4) McClamroch, N. H. and Gavin, H. P., 1995, "Closed Loop Structural Control Using Electro-rheological Dampers", Proc. Of the Amer. Ctrl. Conf., Seattle, Washington, pp. 4173~4177.
- (5) Yang, J. N., Wu, J. C. and Agrawal, A. K., 1994, Sliding Mode Control for Seismic-excited Linear and Nonlinear Structures, Technical Report NCEER-94-0017, Sons, Inc., New York.
- (6) Slotine, J. J. E. and Li, W., 1991, "Applied Nonlinear Control", Prentice-Hall : Englewood Cliffs, NJ.
- (7) Khalil, H. K., 1996, "Nonlinear Systems", Prentice-Hall : Upper Saddle River, NJ.
- (8) DeCarlo, R. A., Zak, S. H. and Matthews, G. P., 1988, "Variable Structure Control of Nonlinear Multivariable Systems : A tutorial", Proc. IEEE76.
- (9) 이상현 등, 2001, "Lyapunov 함수의 목표 변화율을 이용한 가진된 건물의 슬라이딩 모드 제어" 한국지진공학회논문집, 제 5권, 제 3호, pp. 73~78.
- (10) 모창기, 1998, "유압식 반능동 진동 흡수기의 모델링과 제어" 한국소음진동공학회지, 제 8권, 제 4호, pp. 700~705.