

준능동 MR 댐퍼가 설치된 건축 구조물의 분산제어

Decentralized Control of Building Structures Installed with Semi-active MR Damper

윤경조† · 이상현* · 민경원** · 이성경***

Youn, Kyung-Jo, Lee, Sang-Hyun, Min, Kyung-Won, Lee, Sung-Kyung

Key Words : Magnetorheological Damper(MR 댐퍼), Decentralized Control(분산제어), Semi-active Algorithms(준능동 알고리즘)

ABSTRACT

In this paper, to overcome local damages of structures, an uncertainty of structural model, installing sensors of structures, and economics of building system, decentralized semi-active magnetorheological(MR) damper using the displacement or velocity transferred to the response of floor installed damper is proposed. Relative magnitude between the control force of dampers and the story shear force is defined as design variables and the performance indices response spectra analysis through nonlinear time history analysis excited by seismic loads is performed according to this design variables. And the performance of this decentralized MR damper is compared with previous centralized LQR control algorithm using 3-stories benchmark building structure excited by El Centro (1940, N.S) in order to evaluate the application of building structures.

1. 서 론

예측할 수 없는 외부 동적하중으로부터 대형 구조물의 동적 응답을 감소시키기 위한 노력은 매우 중요하다(1). 최근, 적은 양의 전력으로 우수한 제어성능과 안전성을 동시에 확보할 수 있는 스마트 제어장치인 MR 감쇠기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(2). MR 감쇠기는 1990년대 중반 건축 및 토목 구조물에 처음 소개된 이후 간단한 전기 혹은 자기신호에 따라 강성, 점성, 마찰 등의 특성을 쉽게 바꿀 수 있고, 대용량의 감쇠력도 감쇠장치 외의 특별한 기계적 장치없이 쉽게 구현할 수 있어, 전 세계적으로 많은 이론적, 실험적 연구가 진행되고 있다(3)(4)(5)(6)(7).

한편, 이러한 구조물의 진동제어장치로 이용되는 준능동 MR 감쇠기 역시 구조물의 응답정보접근방식에 따라 중앙 집중 제어방식과 분산 제어방식으로 나누어질 수 있다. 선형이차안정기, 선형이차 가우시안과 같은 일반 제어이론에서 처럼 모든 가력신호에 측정된 모든 구조물의 응답을 포함시키며, 측정된 응답과 미리 구해진 혹은 가정된 전체 구

조물에 대한 모델에 기반하여 제어력을 산정하는 것을 중앙집중 제어방식이라 한다면, 분산 제어방식은 구조물의 전체응답을 해석해야 하는 번거로움을 피하고 제어의 효율성을 높이기 위해 감쇠기가 설치된 층의 응답만을 가지고 제어하는 시스템이다. 그러나, 중앙집중식 준능동 감쇠기는 설치상의 제한조건과 주어진 목표응답수준을 만족시키기 위해서 전력공급, 센서, 그리고 감쇠기 등을 포함하는 복잡한 제어시스템을 구축하고 유지하는 노력이 필요하고, 구조물 유한요소모델의 큰 차수, 모델의 불확실성, 가력장치의 제한 등의 이유로 실제 대부분의 대형 건축 및 토목구조물에 이러한 중앙집중 제어방식을 적용하는 것은 구조물이 선형 탄성인 경우에도 현실적으로 적용하기가 불가능하며, 매우 큰 노력을 들여 제어시스템을 설계한 경우에도 제어성능이 저하될 우려가 있다.

건축 및 토목 구조물에 분산제어 방식을 적용하기 위해 Lynch와 Law는 시장기반시스템을 제안하였으며, 구조물 진동제어를 위한 요구 제어력은 Pareto 이론에서 제안된 시장원리에 따라 수용와 공급곡선의 함수로 최적 산정하며 구조물의 변위와 속도에 비례하도록 제어력을 산정하였다(8). 조상원 등은 EMI(electromagnetic induction) 시스템을 이용한 센서 없이 MR 감쇠기의 제어력을 생성하는 스마트 MR 감쇠기를 개발하였다(9).

본 논문에서는 센서 혹은 컴퓨터없이 MR 감쇠기 자체의 응답전달메커니즘에 의해 제어력 특성이 조절되는 분산제

† 책임저자; 단국대학교 건축공학과
* 교신저자; 단국대학교 건축공학과
E-mail : lshyun00@dankook.ac.kr
Tel : (031) 8005-3735, Fax : (031) 8005-3741
** 단국대학교 건축공학과
*** 단국대학교 건축공학과

어식 준능동 MR 감쇠기를 제안한다. 그리고, MR 감쇠기가 설치된 층의 응답만을 이용하여 제어력의 크기가 변하는 분산제어식 준능동 제어알고리즘을 변위, 속도, 변위-속도에 따라 설계하고 구조물의 층복원력에 대한 가변마찰력 크기 비의 변화에 따른 준능동 MR 감쇠기와 수동 MR 감쇠기의 지진제어성능을 비교 평가한다. 마지막으로 기존의 개발된 중앙집중식 LQR 알고리즘과 본 논문에서 제안된 분산제어식 알고리즘과 동일한 조건에서 비교 평가함으로써 개발된 알고리즘의 유효성을 검증한다.

2. 모델링

MR 감쇠기의 비선형 이력거동을 모사하기 위해 Bingham 모델, 이점성 모델, 이력이점성 모델, Bouc-Wen 모델, 질량형 Bouc-Wen 모델, 그리고 현상학적 모델 등이 제안되었다(10)(11)(12)(3)(13). Yang은 이 모델들의 성능을 비교하기 위해 20-ton MR damper의 0.5Hz Sine 하중 실험을 통해 이력이점성을 모사하는 변수들을 구하였다(6). 또한 이상현 등은 각 모델들을 3층 전단형 구조물에 적용하여, El Centro(1942, NS성분) 지진에 대한 제어성능을 평가를 수행하였다(14). 그 결과, 지진 제어성능의 경우 이력 특성에 의한 구조물의 응답의 차이는 크지 않음을 알 수 있었다. 따라서, 본 논문에서는 Bouc-Wen 모델과 같이 복잡한 적분과정이 요구되지 않고, 간단한 수학적 계산만으로 모델링할 수 있는 Bingham 모델을 사용하였으며, 다음 식과 같다

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

여기서, f_f 는 MR 감쇠기의 자기장의 크기에 따른 가변 마찰력을 나타내고, C_1 은 점성감쇠계수를 나타낸다.

3. 알고리즘

본 장에서는 MR 감쇠기가 기본적으로 가변마찰과 선형 점성으로 구성된 점과 MR 감쇠기 구동축의 거동은 설치된 층간 응답의 함수인 점을 고려하여 가변마찰력의 크기가 설치된 층의 층간변위와 층간속도의 함수인 경우에 지진 응답 제어성능을 수동인 경우와 비교평가한다. 이러한 제어력의 형태를 사용하는 것은 전술한 바와 같이 기존의 중앙집중 제어방식이 아닌 분산 제어방식을 설계하기 위한 MR 감쇠기 자체의 응답 전달 메커니즘에 의해 MR 감쇠기의 제어력이 조절되는 시스템을 개발하기 위함이다.

3.1. 수동형 MR 감쇠기

MR 감쇠기와 같이 마찰력을 이용한 감쇠기는 강한 비선

형성으로 인해 동일한 크기의 마찰력인 경우에도 구조물의 고유주기, 가진하중의 크기, 그리고 구조물의 응답에 따라 제어 성능이 크게 달라진다. 이상현 등은 건축 구조물의 층전단력에 기초한 가세-마찰감쇠기의 최적설계방법을 제시하기 위해 구조물의 층전단력에 대한 마찰력의 비에 따른 지진제어성능의 변화를 조사하였다(14). 본 논문에서는 MR 감쇠기의 최대 제어력의 범위의 범위에 따른 MR 감쇠기 제어력의 성능의 변화를 조사하기 위해 층전단력의 0.1, 0.2, 0.3의 경우를 사용하였으며, 최소 제어력은 층전단력의 0.01로 가정하였다.

3.2 분산제어식 준능동 MR 감쇠기

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(15). Dyke 등의 연구에 의하면 일반적으로 제어력을 많이 사용하는 알고리즘이 변위응답 감소 효과는 우수하지만 절대가속도 응답제어에 있어 비효율적임을 확인할 수 있다(15). 그러나, 본 연구는 주어진 MR 감쇠기 제어력의 범위에 국한된 것으로 제어력의 범위가 변하는 경우에 대한 조사가 필요하고, 구조물의 고유주기에 따른 제어성능 평가도 조사되어야 한다. 또한, 지진과 같은 외부동적하중이 재하된 후에 구조물의 국부적 손상이나, 제한된 정보만을 이용하는 경우에도 구조물의 제어성능을 유지할 수 있는 분산 제어 시스템이 고려되어야 한다. 따라서, 본 절에서는 MR 감쇠기가 설치된 층간 변위와 층간 속도의 함수인 점을 고려하여 MR 감쇠기의 제어력이 층간 응답에 의해 결정되는 준능동 제어알고리즘을 제안한다.

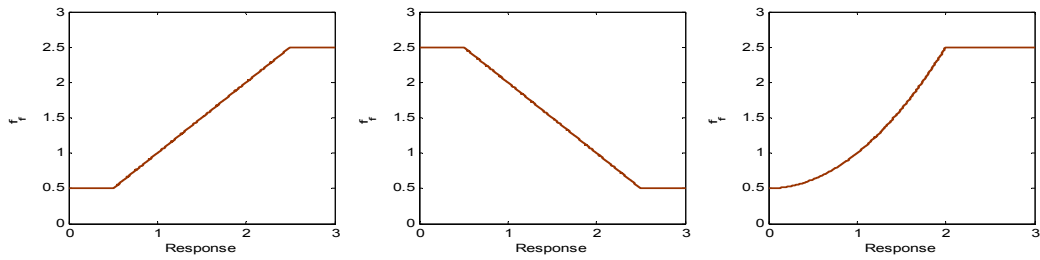
MR 감쇠기의 가변 마찰력은 다음과 같은 형태를 가지는 것으로 가정한다.

$$V(x, \dot{x}) = \alpha_D |x|^n + \alpha_V |\dot{x}|^m \quad (2)$$

여기서, α_D , α_V 는 각각 층간변위와 층간속도에 대한 상대적인 가중치를 결정하는 상수, n , m 은 각각 마찰력 크기의 변형 형상을 결정하는 상수이다. 최종적인 MR 감쇠기 마찰력은 다음과 같다.

$$f_f = \begin{cases} f_{\min} & V < V_1 \\ \frac{f_{\max} - f_{\min}}{V_2 - V_1} (V - V_1) & V_1 \leq V \leq V_2 \\ f_{\max} & V > V_2 \end{cases} \quad (3)$$

여기서, f_{\max} , f_{\min} 은 각각 MR 감쇠 장치가 구현할 수



(a) $\alpha = 0, \alpha_V = 1, n = 1, m = 1$ (b) $\alpha = 1, \alpha_V = 3, n = 1, m = 0$ (c) $\alpha = 0.5, \alpha_V = 0.5, n = 2, m = 0$

그림 1 분산제어식 준능동 MR 감쇠기의 속도-제어력 변화 경향

있는 최대 및 최소 마찰력을 나타내며, V_1, V_2 는 최대 및 최소 마찰력을 나타내는 V 의 범위를 결정하는 설계변수이다. 그림 1은 $f_{min}=0.5, f_{max}=2.5, V_1=0.5, V_2=2.5$ 인 경우에, 다양한 α_D, α_V, n, m 에 대한 (2), (3)식에 의한 MR 감쇠 장치 제어력의 변화경향을 보여준다. 힘과 응답의 단위는 무차원으로 정규화하였다.

그림 1(a)는 속도가 증가함에 따라 마찰력의 크기가 선형 증가하는 경우를, 그림 1(b)는 변위가 증가함에 따라 마찰력의 크기가 선형 감소하는 경우를, 그리고 그림 1(c)는 마찰력의 크기가 변위의 제곱에 비례하는 경우의 예를 보여준다. 이로부터, α_D, α_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 1(a)의 형태와 유사한 경향을 가지는 시스템의 하나의 예라 할 수 있다(9).

4. 수치해석예제

4.1 MR 감쇠기가 설치된 구조물의 성능지수 응답스펙트럼 해석

본 절에서는 질량 정규화된 5%의 감쇠비를 갖는 단자유도 구조물에 MR 감쇠기 제어력의 범위가 변하는 경우에 대한 성능을 조사하고, 구조물의 고유주기에 따른 성능변화, 그리고 제안된 3가지 경우의 응답의준형 MR감쇠기와 수동인 경우의 제어성능을 비교하기 위해 비선형 시간이력해석이 수행되었다. 지반하중은 미국 캘리포니아 암반지역에서 계측된 20개의 지반가속도를 사용하여 각각의 지진별로 MR 감쇠기가 설치된 구조물의 응답을 MR 감쇠기가 설치되지 않은 구조물의 응답으로 정규화하였으며, 20개 지진에 대한 평균정규응답을 구하여 스펙트럼을 작성하였다. 분석에 사용된 구조물의 응답은 최대 상대변위응답과 RMS 절대가속도 응답이다(15). 그림 2-3은 각각 선형점성이 0인 MR 감쇠기의 최소, 최대마찰력의 범위가 3.1절에서 제시한 3가지 경우의 성능지수변화를 보여준다.

그림 2-3에서 Semiactive-1은 $\alpha_D=0, \alpha_V=1/\omega_n, n=1, m=1$ 인 속도 의존형 제어알고리즘, Semiactive-2는

$\alpha_D=1, \alpha_V=0, n=1, m=1$ 인 변위 의존형 알고리즘, Semiactive-3은 $\alpha_D=1, \alpha_V=1/\omega_n$, 그리고 $n=1, m=1$ 인 속도-변위 의존형 알고리즘을 나타낸다. 여기서, ω_n 은 구조물의 고유 각진동수를 나타낸다. 식 (3)에서 제안된 알고리즘을 사용하고, $V_1 = 0.05(\alpha_D\sigma_D^n + \alpha_V\sigma_V^m)$, $V_2 = \alpha_D\sigma_D^n + \alpha_V\sigma_V^m$ 로 설정하였다. 여기서, σ_D, σ_V 은 각각 비제어 변위의 표준편차와 비제어 속도의 표준편차를 나타낸다.

그림 2로부터 모든 주기구간에서 항상 passive-on의 경우가 가장 좋은 변위 응답 제어성능을 보임을 알 수 있다. 준능동제어의 경우 passive-off와 passive-on의 중간값을 가지며, 대체적으로 속도에 비례하여 마찰력의 크기가 변하는 Semiactive-1이 준능동 제어에서는 가장 좋은 성능을 보인다. 그림 3로부터 단주기 구간의 RMS절대가속도를 제외하면 Semiactive-1이 가장 우수한 절대가속도 제어성능을 보임을 알 수 있다. 특히 속도 의존적인 Semiactive-1과 변위 의존적인 Semiactive-2의 제어성능 차이는 절대가속도에 있어 더욱 분명해진다. 변위와 가속도가 최대일 때 최대마찰력을 생성하는 Semiactive-2의 제어력은 물체의 운동방향에 급격한 변화를 주어 가속도를 증가시키며, 속도가 최대이고 가속도가 작을 때 최대마찰력을 생성하는 Semiactive-1의 제어력은 가속도 제어에 있어 부정적인 효과가 작다. 또한 Passive-on이 가 증가함에 따라 장주기 구조물의 가속도 제어성능이 급격히 저하되는 반면 Semiactive-1,2,3는 주기와 상관없이 일정한 제어성능을 보임을 알 수 있다. 이는 최대마찰력이 큰 MR 감쇠기를 사용하여 장주기 구조물의 가속도 응답제어를 하는 경우에는 MR 감쇠기를 준능동적으로 운영할 필요가 있음을 의미한다.

4.2 3층 구조물 예제

본 절에서는 전 층의 응답정보가 필요한 중앙집중 제어식 LQR 제어 알고리즘을 이용한 MR감쇠기와 본 논문에서 제안된 분산제어식 준능동 MR 감쇠기의 제어성능이 수동형 경우와 함께 비교평가된다.

중앙집중식 LQR 제어 알고리즘은 상태공간변수를 이용한 방정식이 다음 식에 제시된 성능지수를 최소화시키는

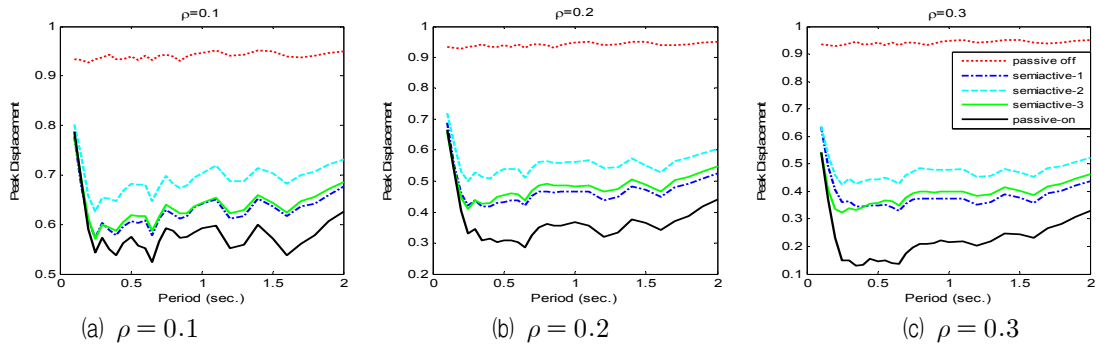


그림 2 MR 감쇠기가 설치된 구조물의 정규화된 최대 상대변위의 응답스펙트럼

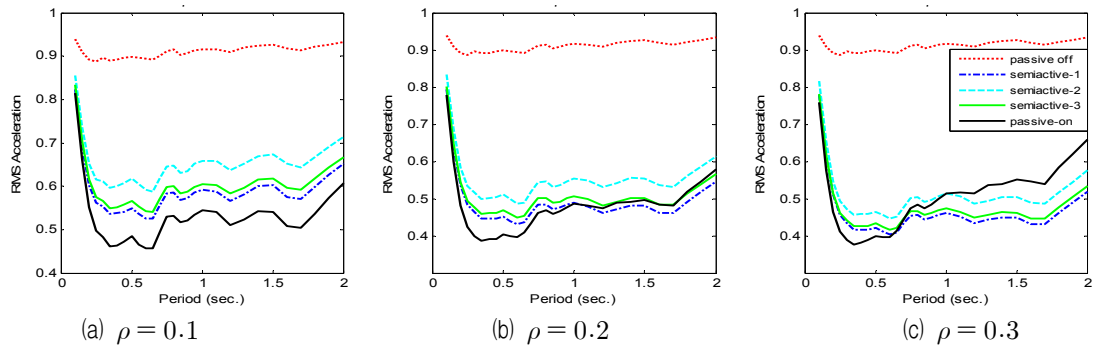


그림 3 MR 감쇠기가 설치된 구조물의 정규화된 RMS 절대가속도 응답스펙트럼

형태로 제안된다.

$$J = \int_0^{\infty} (z^T Q z + u^T R u) dt \quad (4)$$

여기서, z 는 바닥판의 층간 변위와 층간 상대속도로 구성된 상태변수이고, Q 와 R 은 각각 제어 가중치 행렬을 나타내고, $[1.2 \times 10^6 \ 1.2 \times 10^6 \ 1.2 \times 10^6 \ 40 \ 40 \ 40]$ 로 된 대각행렬과 0.001이 사용되었다.

다음 식은 LQR 제어알고리즘에 의해 생성된 MR 감쇠기의 제어력을 나타낸다.

$$f_{MR} = \begin{cases} \text{passive-off} & f_{LQR} < f_{\min} \\ f_{LQR} & f_{\min} \leq f_{LQR} \leq f_{\max} \\ \text{passive-on} & f_{LQR} > f_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

여기서, f_{\min} 과 f_{\max} 는 최소 마찰력과 최대 마찰력을 나타낸다. 그리고, f_{LQR} 은 LQR 제어 알고리즘에 의해 계산된 제어력이고, f_{MR} 은 MR 감쇠기에 의해 실제 구현되는 제어력을 나타낸다.

MR 감쇠기가 설치된 3층 구조물의 각 바닥층의 최대 변위, 절대 가속도 응답은 그림 4와 같다. 그 결과 단자유도 구조물의 수치해석 결과와 같이 준능동 제어알고리즘이 변위제어에서는 수동제어의 경우보다 약간 낮은 제어성능을 나타내지만, 절대가속도 제어에 있어서는, 좀 더 좋은 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 특히 제안된 분산제어식 준능동 MR감쇠기는 감쇠기가 설치된 층의 상대속도정보만

을 사용하고도 전 층의 정보를 이용하는 중앙집중식 LQR과 거의 동등하거나 우수한 제어성능을 보인다. 그림 5는 MR감쇠기의 제어력-속도 곡선을 보여준다. Passive-on과 Passive-off는 항상 일정한 크기의 제어력을 산정하는 반면, 준능동 MR은 속도에 대하여 가변적임을 알 수 있다. 또한 중앙집중식 LQR 알고리즘의 제어력은 전 층의 정보가 들어 있기 때문에 감쇠기 양단의 속도에 대체적으로 비례하지만 명확한 함수관계를 가지지 않는 반면 제안된 분산제어식 응답의존형 MR감쇠기는 감쇠기가 설치된 층의 상대속도 크기에 선형 비례하는 명확한 관계를 가짐을 알 수 있다.

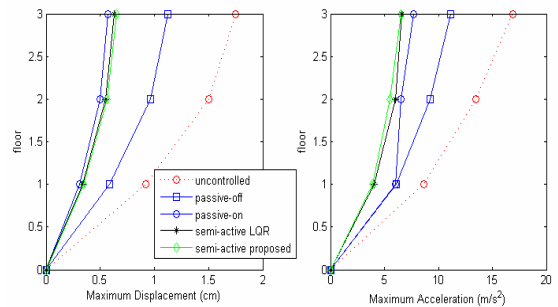


그림 4 MR 감쇠기가 설치된 3층 구조물 제어성능 비교

5. 결론

본 논문에서는 중앙집중 제어방식의 한계를 극복하는 분산 제어식 준능동 MR 감쇠기의 지진응답제어성능을 평가

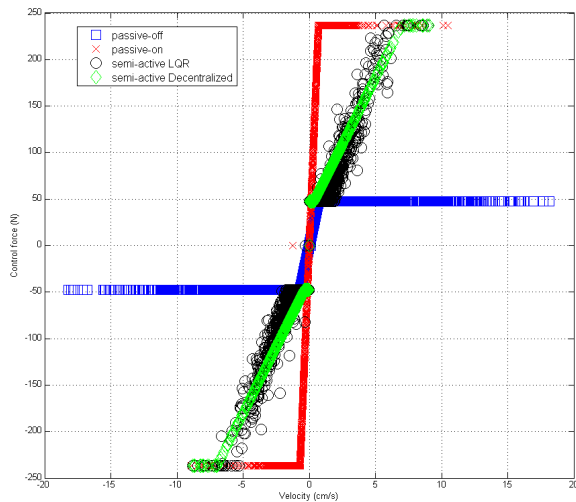


그림 5 MR 감쇠기의 알고리즘에 따른 속도-제어력 변화곡선

되었다. MR 감쇠기의 제어력이 감쇠기가 설치된 층의 변위와 속도 응답정보만을 이용한 함수에 의해 변하는 분산 제어식 준능동 MR 감쇠기의 성능을 수동인 경우와 비교하였다. 20개의 지진하중을 사용한 단자유도 시스템에 대한 해석을 통해, 변위응답제어에 있어서는 항상 최대마찰력을 사용하는 Passive-on이 모든 주기와 마찰력에 대하여 가장 우수한 성능을 보이고, 절대가속도 제어에 있어서는 응답의존형 준능동 제어가 주기와 제어력의 크기에 관계없이 안정적이고 우수한 성능을 보임을 확인하였다. 제안된 여러 가지 응답의존형 MR 감쇠기 중에서는 속도에 비례하는 형태의 제어력을 가지는 경우가 가장 우수한 성능을 보이며, 이는 절대가속도 제어에 있어 더욱 명확해진다. 특히 Passive-on이 최대마찰력이 증가함에 따라 장주기 구조물의 가속도 제어성능이 급격히 저하되는 반면 분산제어식 응답의존형 MR감쇠기는 주기와 상관없이 일정한 가속도 제어성능을 보인다. 3층 구조물에 대한 수치해석을 통해 분산제어식 준능동 MR감쇠기를 사용하여 Passive-on과 거의 동등한 변위제어성능을 확보할 수 있으며, 절대가속도 제어에 있어서는 감쇠기가 설치된 층의 상대속도 정보만을 사용하여 중앙집중식 LQR 제어보다 우수한 제어성능을 보일 수 있음을 확인하였다.

후기

본 연구는 한국과학기술연구원 기초과학 연구지원사업 (R01-2007-000-10872-0)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Chopra, Anil K., 2001, "Dynamics of Structures;

Theory and Applications to Earthquake Engineering ; Second Edition", Prentice Hall, New Jersey.

(2) Soong, T.T., and Dargush, G. F., 1997, "Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering", John Wiley & Sons, Chichester

(3) Spencer Jr. B. F., Dyke S. J., Sain M. K. and Carlson J. D., 1997, "Phenomenological model for magnetorheological dampers", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 123, pp.230-238

(4) Dyke S. J., Spencer Jr. B. F., Sain M. K. and Carlson J. D., 1998, "An experimental study of MR dampers for seismic protection", Smart Materials and Structures, Vol. 7, pp.693-703

(5) Jansen L. M., and Dyke S. J., 2000, "Semiactive control strategies for MR dampers: comparative study", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 126, No. 8, pp.795-803

(6) Yang G., Spencer Jr. B. F., Carlson J. D., and Sain M. K., 2002, "Large-scale MR Fluid Damper: modeling and dynamic performance considerations", Engineering Structures, Vol. 24, No. 3, pp.309-323

(7) Lee S. H., Min K. W., Lee R. J., Lee H. G., Sung K. G., and Kim D. K., 2005, "Preliminary design procedure of MR dampers for controlling seismic response of building structures", International Journal of Modern Physics B, 19, pp.1492-1498

(8) Lynch P. J., and Law K. H., 2002, "Decentralized Control Techniques for Large-scale Civil Structural Systems", Proceedings of the 20th International Modal Analysis Conference, CA, USA, Feb 4-7

(9) Cho S. W., Jung H. J., and Lee I. W., 2005, "Smart passive system based on magnetorheological damper", Smart Materials and Structures, Vol. 14 pp.707-714

(10) Wen, Y. K., 1976, "Method of Random Vibration of Hysteretic Systems", Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 102, pp.249-263.

(11) Stanway R., Sproston J. L., and Stevens N. G., 1987, "Non-linear modeling of an electro-rheological vibration damper", Journal of Electrostatics, Vol. 20, pp.167-184

(12) Gamota D. R., and Filisko F. E., 1991, "Dynamic mechanical studies of electrorheological materials: moderate frequencies", Journal of Rheology, Vol. 35, pp.399-425

(13) Wereley N. M., Pang L., and Kamath G. M. 1998, "Idealized hysteresis modeling of electrorheological and magnetorheological dampers", Journal of Intelligent

Material Systems and Structures, Vol. 9, pp.642-649

(14) Lee, S. H., Min, K. W., Park, J. H., and Lee, R. J., 2005, "Optimal Design of Friction Dampers based on the Story Shear Force Distribution of a Building Structure", Transaction of the Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 9, No. 6, pp.21-30

(15) Dyke S. J., Spencer Jr. B. F., Sain M. K. and Carlson J. D., 1996, "Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction", Smart Materials and Structures, Vol. 5, pp.565-575

(16) Lee, S. H., Park, J. H., Youn, K. J., and Min, K. W., 2007, "Response Spectra of Structure Installed Frictional Damping System", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 17, No. 1, pp.88-94