

# 준능동 MR감쇠기가 설치된 실물크기 구조물의 분산제어 알고리즘 성능평가<sup>#</sup>

## Performance Evaluation of Decentralized Control Algorithm of a Full-scale 5-story Structure Installed with Semi-active MR Damper Excited by Seismic Load

윤 경 조\* · 박 은 천\* · 이 헌 재\*\* · 문 석 준\*\*\* · 민 경 원\* ·  
정 형 조\*\* · 이 상 현†

Kyung-Jo Youn, Eunchurn Park, Heon-Jae Lee, Seok-Jun Moon,  
Kyung-Won Min, Hyung-Jo Jung and Sang-Hyun Lee

(2007년 12월 12일 접수 ; 2008년 1월 17일 심사완료)

**Key Words :** Decentralized Control(분산제어), Semi-active Control Algorithm(준능동제어 알고리즘), Test of Full-scale Structure(실물크기 구조물 실험), Large MR Damper(대형 MR감쇠기)

### ABSTRACT

In this study, seismic response control performance of decentralized response-dependent MR damper which generates the control force using only the response of damper-installed floor, was experimentally investigated through the tests of a full-scale structure installed with large MR dampers. The performance of the decentralized control algorithm was compared to those of the centralized ones such as Lyapunov, modulated homogeneous friction, and clipped-optimal control. Hybrid mass damper were controlled to induce seismic response of the full-scale structure under El Centro earthquake. Experimental results indicated that the proposed decentralized MR damper provided superior or equivalent performance to centralized one in spite of using damper-installed floor response for calculating input voltage to MR damper.

### 1. 서 론

진동제어분야에 있어서, 준능동 감쇠장치는 수동 감쇠장치(passive damper)의 안전성(reliability)과

능동 제어장치(active damper)의 다양성과 외부환경 변화의 적응성을 제공하고, 능동 제어장치에 비해 적은 양의 전력을 필요로 하면서, 그 제어 성능이 매우 우수하기 때문에 전세계적으로 많은 연구가 진행되고 있다<sup>(1)</sup>. 이 중 자기유변유체(magneto-rheological, MR)를 이용한 MR감쇠기는 Spencer와 Sain(1997)에 의해 처음 건축, 토목 분야에 적용된 이후로 전기신호를 자유자재로 조절하여 자기장의 크기를 변화시킴에 따라 MR감쇠기 가변적인 제어력을 생성할 수 있는 장점과 더불어 MR감쇠기의 다양한 이력거동 및 비선형 특성을 규명하기 위한 다양한 해석적, 실험적 연구가 진행되었다<sup>(2,4,5)</sup>. MR감쇠

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

\* 정희원, 단국대학교 건축공학과  
\*\* 정희원, 한국과학기술원 토목환경공학과  
\*\*\* 정희원, 한국기계연구원

# 이 논문은 2007 추계 소음진동 학술대회에서 우수논문으로 추천되었음.

기의 비선형 특성을 모사하기 위한 해석 모델로서 Bingham 모델, Bouc-Wen 모델, 현상학적 모델 등이 제안되었고, 미국 노틀담 대학에서는 실제 20톤의 제어력을 생성할 수 있는 대용량 MR감쇠기가 설계 및 제작하여 실험을 통해 비선형 특성을 조사하여 해석적 모델과 비교하였다<sup>(6)</sup>. 또한, MR감쇠기의 준능동적으로 운영하여 최적 마찰력을 생성하는 다양한 준능동 제어 알고리즘에 관한 연구도 활발히 수행되었다. Jansen과 Dyke(2000)는 LQG/H<sub>2</sub> 제어기를 통해 얻어진 최적의 요구 제어력과 MR감쇠기의 제어력을 비교하여 MR감쇠기의 입력 전압을 조절하는 clipped-optimal 제어 알고리즘, Lyapunov 안정이론을 기반으로 하여 함수가 음수로 얻어지는 요구 제어력을 통해 입력 전압을 조절하는 Lyapunov 제어 알고리즘, 그리고 Inaudi(1997)에 의해 제안된 마찰 감쇠기의 수직항력을 감쇠기 양단의 변위에 따라 조절할 수 있는 modulated homogeneous friction(MHF) 등을 제안하여 수치해석을 통해 각 제어 알고리즘별 제어 성능을 수동인 경우와 비교하였다<sup>(6,7)</sup>. 한편 윤경조 등 (2007)은 기존에 제안된 준능동 제어 알고리즘이 구조물의 모든 응답을 피드백 받아서 최적의 제어 알고리즘을 생성하는 형태의 중앙집중식 제어(centralized control) 방식과는 달리 구조물의 국부적인 응답 또는 MR감쇠기가 설치된 층의 응답만을 이용하여 제어력을 산정하는 형태의 분산제어(decentralized control) 방식을 제안하여, 20개의 지진하중에 대한 평균적인 정규화된 응답스펙트럼 해석을 통해 제어성능을 평가하고, 3층 전단형 구조물에 적용하여 El Centro 지진데이터에 대해 수치해석을 수행하여, 기존의 중앙집중식 LQR 제어방식과 비교하였다<sup>(8,11)</sup>.

이 논문에서는 기존 연구에서 제안된 MR감쇠기가 설치된 층의 응답만을 이용한 분산제어식 응답의존형 MR감쇠기 제어 알고리즘을 실험적으로 검증하기 위해서 실물크기 5층 구조물에 대형 준능동 MR감쇠기를 설치하여, 전 층의 응답을 피드백 받아 제어력을 산정하는 기존의 중앙집중식 제어 알고리즘과 지진응답 제어성능을 비교 평가하였다. 전 층의 응답을 예측하기 위해 칼만 필터를 사용하였고, 중앙집중식 제어 알고리즘으로 Lyapunov 제어, MHF 제어, 그리고, clipped-optimal 제어 알고리즘이 사용되었다. 5층 바닥에 설치된 하이브리드 질량 감쇠기

(hybrid mass damper, HMD)를 이용하여 실물크기 구조물이 최대가속도가 0.05g로 스케일 조정된 El Centro 지반가속도로 가진된 응답과 유사한 거동을 보이도록 구조물을 가진하였으며, 기존의 중앙집중식 제어 알고리즘과 제안된 분산제어 알고리즘의 각 층 가속도 및 1층 변위 응답 제어성능을 비교 평가하였다.

## 2. 제어 알고리즘

준능동 MR감쇠기가 설치된  $n$ 자유도 구조물의 운동방정식은 다음과 같다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = Hf_f + M\ddot{x}_g \quad (1)$$

여기서,  $M$ ,  $C$ , 그리고  $K$ 는 구조물의 질량, 감쇠, 그리고, 강성행렬을 나타내고,  $f_f$ 와  $\ddot{x}_g$ 는 MR감쇠기의 마찰력과 지반가속도를 나타낸다. 이 논문에서는 MR감쇠기는 1층에만 설치되었기 때문에 제어력 작용 벡터  $H$ 는  $\{0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1\}^T$ 이 사용되었다.

식 (1)의 미분방정식을 상태공간방정식으로 구성하면 식 (2)와 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} \dot{z} &= Az + Bf_f + E\ddot{x}_g \\ y &= Cz + Df_f + w \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $z$ 는 상태벡터,  $y$ 는 출력신호,  $w$ 는 출력신호 시 고려되는 노이즈벡터이다.

실제로 외부 신호에 의해 준능동 MR감쇠기의 제어력을 직접적으로 조절하기는 어렵다. 따라서 이 논문에서는 MR감쇠기에 전류( $v_f$ )를 조절함으로써 전압신호를 가변적으로 생성하여 준능동 MR감쇠기의 제어력을 생성하는 방법을 이용한다.

### 2.1 중앙집중식 준능동 제어 알고리즘

Jansen과 Dyke(2000)는 기존 연구에서 MR감쇠기를 준능동적으로 가변 마찰력을 생성하기 위한 전압의 크기를 산정하는 준능동 제어 알고리즘을 제안하고, 수치해석을 수행하였다<sup>(6)</sup>. 이 논문에서는 제안된 분산제어식 준능동 알고리즘을 기존의 모든 층의 응답값을 피드백 받아 알고리즘을 구현하는 중앙집중식 준능동 알고리즘과 비교하기 위하여 Jansen과 Dyke(2000)가 제안한 알고리즘들을 사용하였다.

중앙집중식 준능동 알고리즘은 다음과 같은 제어 법칙을 갖는다.

1. 입력전압의 범위는  $v_i = [0 \quad V_{\max}]$ 로 제한된다.
2. MR감쇠기 제어력  $f_i$ 는 전압의 크기에 비례한다.
3. 제어력 산정을 위해 전 층의 가속도 응답을 측정 후 칼만 필터를 이용하여 상태변수  $z$ 를 추정한다.

(1) Lyapunov 제어

Lyapunov 제어 알고리즘은 먼저 Lyapunov 함수,  $V(z)$ 를 식 (3)과 같이 정의한다<sup>(10)</sup>.

$$V(z) = \frac{1}{2} [z^T P z]^2 \quad (3)$$

여기서,  $P$ 행렬은 고유치가 양수인 대칭행렬을 나타낸다.

식 (3)을 이용하여  $\dot{V}(z)$ 가 절대 음수로 나타나는 선형시스템인 경우에 행렬  $P$ 는 Lyapunov 방정식을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A^T P + P A = -Q_p \quad (4)$$

정의된 고유치가 양수의 행렬  $Q_p$ 를 이용하여 Lyapunov 함수의 미분형식으로 상태공간 방정식을 풀면 나타내면 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{V}(z) = -\frac{1}{2} z^T Q_p z + z^T P B f + z^T P E \ddot{x}_g \quad (5)$$

식 (5)에서 제어력의 크기를 조절할 수 있는 부분은  $f$ 가 포함된 가운데 부분이다. 따라서,  $\dot{V}$ 를 최소값으로 만들기 위한 준능동 제어 전압은 다음과 같이 생성할 수 있다.

$$v = V_{\max} H((-z)^T P B f_f) \quad (6)$$

여기서,  $H$ 함수는 Heaviside step 함수로써 전압의 크기를 0과  $V_{\max}$ 로 한정시켜주는 함수이고,  $f_f$ 는 MR감쇠기에 측정된 제어력을 나타낸다. 결국, Lyapunov 제어 알고리즘은 적절한  $Q_p$ 행렬을 정의함으로써 제어의 성능을 결정할 수 있다.

(2) MHF 제어

MHF 알고리즘은 Inaude(1997)에 의해 가변형 마찰감쇠기에 처음 적용되었다<sup>(7)</sup>. 이후 Jansen과 Dyke (2000)는 이를 준능동 MR감쇠기에 적용하였

다<sup>(6)</sup>. 이 알고리즘은 MR감쇠기 양단의 상대속도가 0이되는 변형치에 비례하여 감쇠기 마찰표면의 수직항력  $N(t)$ 을 다음 식과 같이 정의한다.

$$N(t) = g |P[\Delta(t)]| \quad (7)$$

여기서  $g$ 는 양의 계인이고,  $P$  연산자 (앞선 구간의 최대값 함수)는 다음과 같다.

$$P[\Delta(t)] = \Delta(t-s) \quad (8)$$

여기서,  $s = \{\min x \geq 0: \Delta(t-x) = 0\}$ , 그리고  $\Delta(t-s)$ 는 감쇠기의 가장 최근에 발생한 변형의 극점을 나타낸다.

이 알고리즘은 가변형 마찰감쇠기에 제안된 알고리즘이므로 이를 MR감쇠기의 동특성을 고려하여 수정하면 요구제어력  $f_c$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$f_c = \mu g |P[\Delta(t)]| = g_n |P[\Delta(t)]| \quad (9)$$

여기서, 수정된 계인  $g_n$ 은 강성단위 ( $N/mm$ )를 갖는다.

MR감쇠기에 발생하는 제어력은 구조물의 개별적인 응답에 의존적이므로, 항상 요구 제어력만을 발생시킬 수 없다. 따라서, 제어 전압  $v$ 를 조절함으로써 식 (9)를 통해 결정된 요구 제어력과 예측된 제어력의 크기를 비교한 후 식 (6)에서 사용된 Heaviside step 함수를 이용하여 식 (10)과 같이 제어 전압을 발생시켜 요구제어력  $f_c$ 에 근사시키는 알고리즘을 구성한다.

$$v = V_{\max} H(f_c - |f_f|) \quad (10)$$

(3) Clipped-optimal 제어

Dyke 등(1996)에 의해 제안된 clipped-optimal 제어 알고리즘은 선형 최적제어기(linear-optimal controller),  $K_c(s)$ 를 설계하여 예측된 제어력  $f$ 와 구조물의 응답  $y$ 를 이용하여 MR감쇠기의 요구 제어력을 산정한다<sup>(3)</sup>.

$$f_c = L^{-1} \left\{ -K_c(s) L \left\{ \begin{matrix} y \\ f \end{matrix} \right\} \right\} \quad (11)$$

여기서  $L\{\cdot\}$ 는 라플라스 변환을 나타낸다.

MHF 제어 알고리즘과 같이 제어 전압  $v$ 를 조절함으로써 결정된 요구 제어력과 예측된 제어력의 크

기를 비교하여 Heaviside step 함수를 통해 요구제어력  $f_c$ 에 근사시키는 알고리즘을 구성하는 제어 전압은 다음 식과 같다.

$$v = V_{\max} H[(f_c - f_f) f_f] \quad (12)$$

### 2.2 분산제어식 응답의존형 제어 알고리즘

MR감쇠기가 설치된 층만의 응답만을 이용하여 MR감쇠기의 제어력을 준능동적으로 생성하는 분산 제어식 응답의존형 제어 알고리즘이 윤경조 등 (2007)에 의해 제안되었다. 제어 알고리즘에 의해 생성되는 요구제어력은 식 (13)와 같다<sup>(9)</sup>.

$$f_c = \begin{cases} f_{\min} & V < V_1 \\ \frac{f_{\max} - f_{\min}}{V_2 - V_1} (V - V_1) & V_1 \leq V \leq V_2 \\ f_{\max} & V > V_2 \end{cases} \quad (13)$$

여기서,  $V$ 는 MR감쇠기가 설치된 층의 응답으로 본 논문에서는 실험건물 모델 2층 바닥에 설치된 가속도계에서 측정된 절대 가속도를 적분해서 얻어진 속도 데이터가 사용되었다.

## 3. 실험개요

이 장에서는 2장에서 언급된 분산제어식 응답의존형 MR감쇠기의 지진응답 제어성능을 실제 실험을 통해 검증하고, 모든 층의 응답정보를 피드백 받아 최적의 제어력을 산정하는 중앙집중식 준능동 알고리즘과의 지진응답 제어성능 비교하기 위해, (주)유니슨에 위치한 실물크기 5층 철골조 구조물에 한국기계연구원에서 제작된 준능동형 대형 MR감쇠기를 설치한 후 구조물 5층 바닥에 설치된 HMD를 설계하여 유사 지진하중을 구현하여, 대형 MR감쇠기의 지진응답 제어성능 평가 실험을 수행하였다<sup>(8)</sup>.

### 3.1 실험모델

대상 건물은 Fig. 1과 같이 실물규모의 5층 철골조 구조물이다. 층고 6 m, 슬래브 평면 6 m×6 m, 그리고 각 층의 질량은 각각 20000 kg이다. 각 층은 4개의 H형강(H-310X310X20X20) 기둥으로 구성되고, 5층에 설치된 hybrid mass damper는 대용량 리니어 모터를 이용한 감쇠기(linear motor damper;

LMD)로서 코일이 고정되어 있고 영구자석과 철심이 가동되어 계자부 역할과 가동질량(1500 kg)의 역할을 동시에 함으로써 가진기 이외에 수동댐퍼로도 사용될 수 있도록 설계 제작 되었다. H형강 기둥은 약 축 및 강축 방향을 가지고 있으며 HMD는 약축방향으로 5층 바닥 중앙에 설치되어있다. 각 층별 바닥 가속도 응답을 측정하기 위해 PCB사 393B12가 2~5층 바닥 슬래브 끝에 설치되었고, HMD와 지붕층의 가속도 응답은 KYOWA사 모델명 AS-2GB가 설치되었다. 데이터 케이블은 BNC 동축케이블을 사용하였으며, 각 데이터는 NI DAQCard-6035E의 16bit AD/DA 보드를 사용하여 수집하였다.

### 3.2 가진하중

대형 MR감쇠기의 지진응답제어 성능을 평가하기 위해서는 실험모델을 진동대를 이용하여 실험을 수행해야만 한다. 그러나, 실제 구조물을 진동대 위에 올려 놓고 실험을 수행하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서, 이상현 등 (2006)은 실험용 구조물 5층 바닥에 설치된 HMD 가진기와 구조물의 역전달

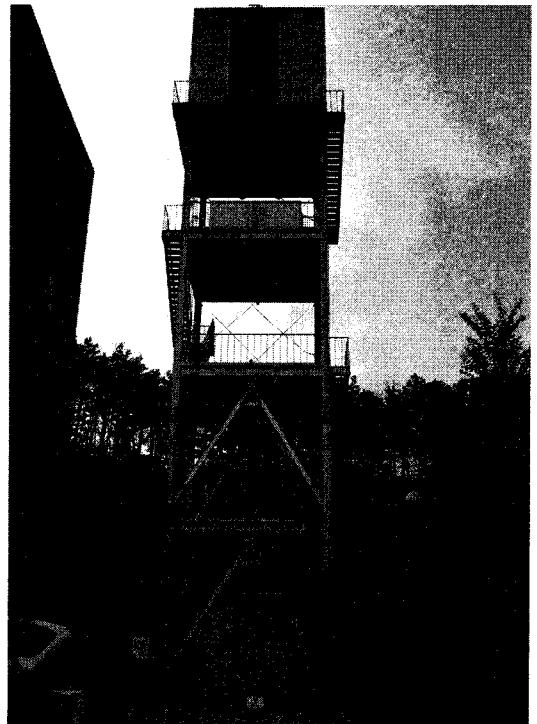


Fig. 1 A full-scale five-story steel structure (UNISON. CO.)

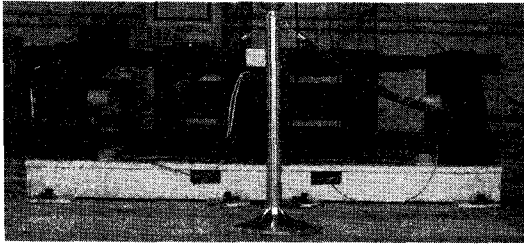


Fig. 2 HMD installed on fifth floor

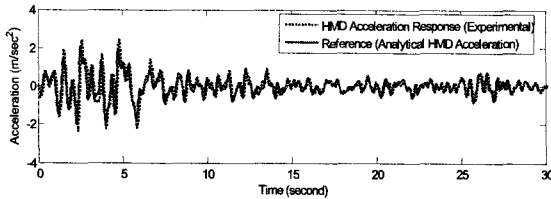
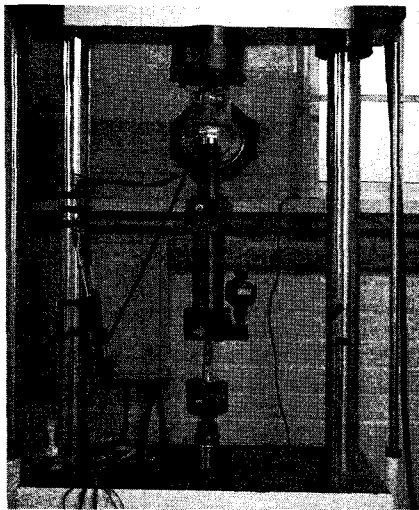
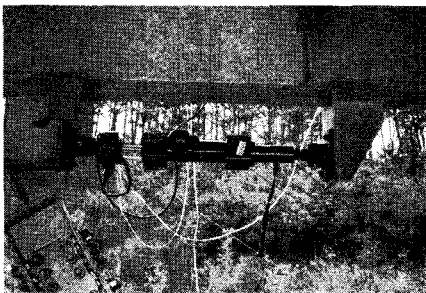


Fig. 3 Acceleration of HMD for simulating pseudo-seismic response



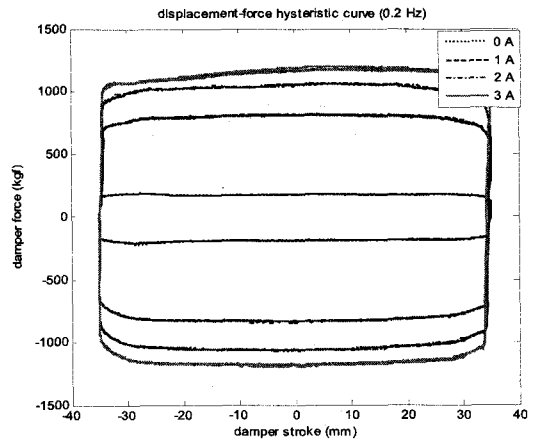
(a) Large-scale MR damper



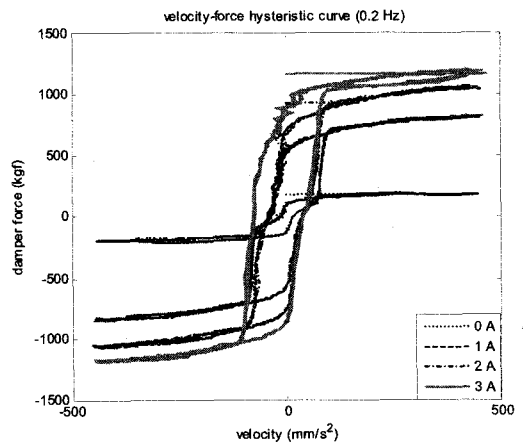
(b) Installation configuration of MR damper

Fig. 4 A large-scale MR damper and installation configuration of MR damper in the structure

함수를 이용하는 방법을 사용하여 수치해석을 통해 얻어진 구조물의 지진응답을 모사하는 가진기를 설계한 후 이를 실험을 통해 갱신된 FE 모델을 사용한 지반가속도 가진 해석 결과와 HMD가진을 통해 얻어진 각 층 응답의 시간이력과 주파수 특성은 대체적으로 일치하는 것을 확인하였다. 이 논문에서는 기존 연구에서 구현된 지진하중 가운데 최대값이 0.05 g로 스케일 조정된 El Centro (1940, NS) 지진 하중을 사용하였다. Fig. 2는 5층 바닥에 설치된 HMD 모습을 나타내고, Fig. 3은 구조물이 El Centro 지진하중을 받는 경우와 유사한 거동을 보이도록 하는 HMD의 가속도 신호를 보여준다. 실제



(a) Displacement-force hysteretic curve of large-scale MR damper



(b) Velocity-force hysteretic curve of large-scale MR damper

Fig. 5 Displacement-force and velocity-force curves of MR damper

계측치와 이론적으로 계산된 신호(reference)가 일치하는 것을 알 수 있다.

이 실험에 사용된 준능동 대형 MR감쇠기는 Fig. 4(a)와 같다. 준능동 대형 MR감쇠기는 한국기계연구원에 의해 2개가 제작되었으며, Fig. 4(b)와 같이 실제 실험용 건물 모델 1층 천장과 기둥 바닥에 연

### 3.3 대형 MR감쇠기 특성 평가

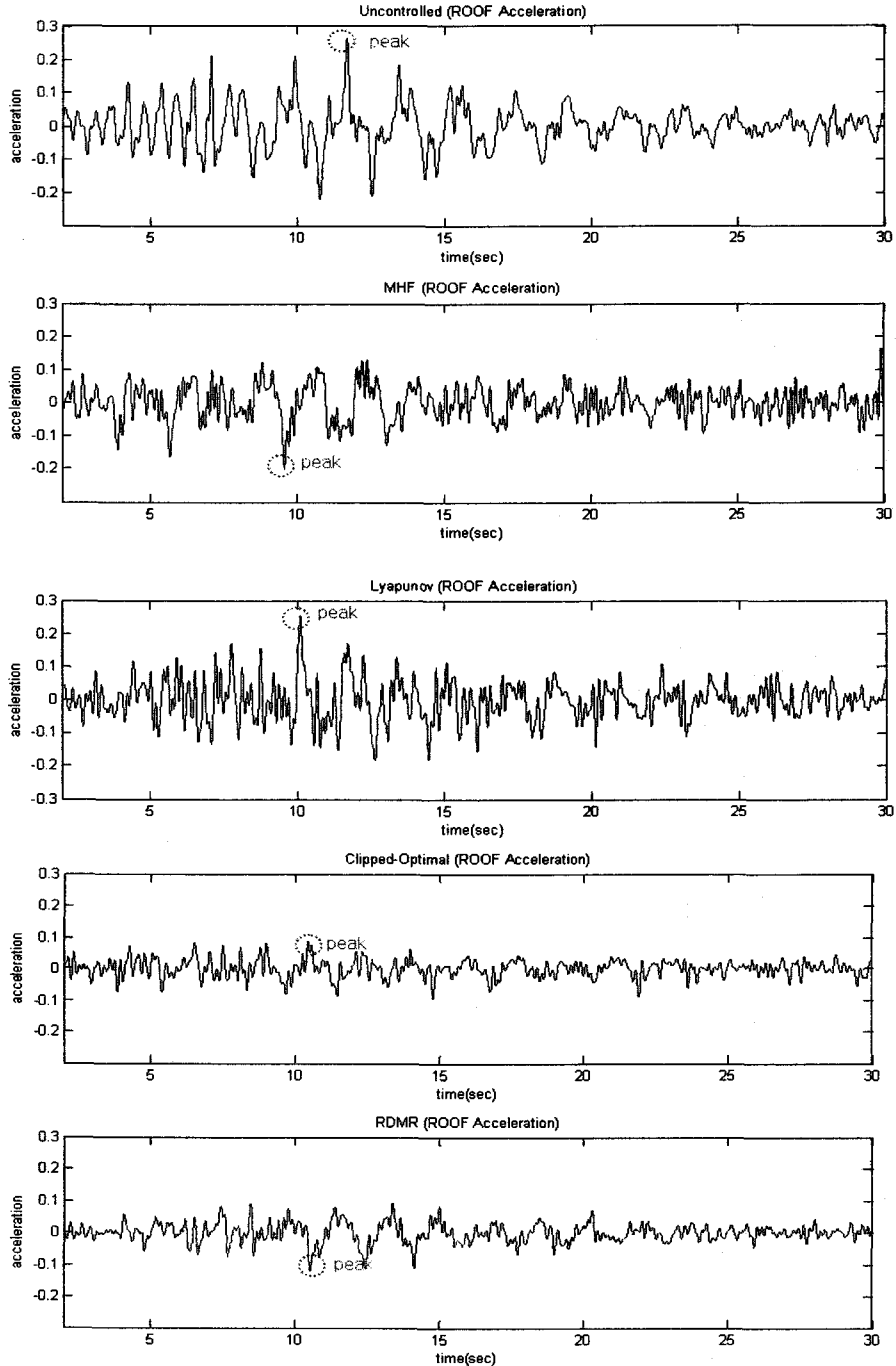


Fig. 6 Time history curve of roof acceleration response of the model structure

결된 2개의 쉐브론 가새에 각각 1개씩 설치되었다. 실제 구조물의 지진응답 제어성능 실험이 수행되기 전에 MR감쇠기 단품 성능 실험을 수행하였으며, Fig. 5는 입력전류에 따른 MR감쇠기의 변위-힘, 속도-힘 관계를 보여준다. Fig. 5로부터 passive-off일 때 3 kN, passive-on일 때, 최대 12 kN이 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

#### 4. 실험결과

분산제어식 응답의존형 제어 알고리즘을 기존연구에서 Jansen과 Dyke(2000)에 의해 제안된 전 층의 응답정보를 이용하여 MR감쇠기의 가변전압을 생성하는 중앙집중식 제어 알고리즘(MHF, Lyapunov, clipped-optimal)과의 El Centro 지진 응답 제어 성능 평가 수행 결과 비제어시, MHF, Lyapunov, clipped-optimal, 그리고 각 알고리즘별 지붕층 가속도 시간이력은 Fig. 6과 같이 나타났다. 그리고, Fig. 7은 각 층별 최대 가속도, RMS 가속도의 분포를 나타내었고, 이러한 지진응답 제어성능을 효율적으로 판단할 수 있도록 비제어시 응답에 대해 정규화시켜 각각 peak 응답 성능지수와 RMS 응답 성능지수로 나타내어 Table 1에 정리하였다. 각 층 가속도 응답 성능지수와 건물 모델 1층에 설치된 2개의 변위계로부터 측정된 변위응답에 대한 평균값을 비교한 결과, 3개의 중앙집중식 준능동 제어 알고리즘 중에서는 clipped-optimal 제어 알고리즘의 제어 성능이 가장 좋은 것으로 나타났고, 이 논문에서 제안된 1층의 가속도 응답만을 이용한 분산제어식 응답의존형 제어 알고리즘의 가속도 제어에서는 clipped-

optimal 제어 알고리즘과 거의 동등한 제어성능을 나타내는 것을 확인하였다. 또한, 변위 제어성능에 있어서는 분산제어식 응답의존형 제어 알고리즘이 가장 우수한 제어성능을 보이는 것으로 나타났다. 물론, 이 논문에서 사용한 모든 중앙집중식 제어 알고리즘이 최적의 제어성능을 나타내도록 설계된 것은 아니지만, 분산제어식 응답의존형 제어 알고리즘이 단지 감쇠기가 설치된 층만의 응답을 이용하여 최적의 제어력을 생성하기 때문에 다른 중앙집중식 제어 알고리즘과 동등한 제어성능을 보인다면, 제어의 효율적 측면에서, 또는 구조물의 국부적 손상이나 정전과 같이 설비시설의 오류로 인한 응답 계속이 제한적인 경우를 고려한다면 매우 실용적인 제어 알고리즘이 될 수 있다.

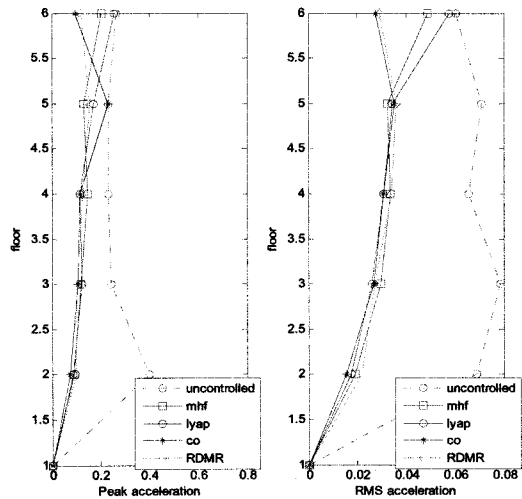


Fig. 7 Structural floor response of the model structure

Table 1 Normalized structural response controlled by semi-active MR damper

	MHF		Lyapunov		Clipped-optimal		RDMR	
	Peak	RMS	Peak	RMS	Peak	RMS	Peak	RMS
2nd floor	0.2235	0.2784	0.2149	0.2558	0.1807	0.2264	0.2455	0.3202
3rd floor	0.4857	0.3787	0.5034	0.3318	0.4296	0.3392	0.4281	0.3480
4th floor	0.6290	0.5093	0.5028	0.4659	0.4925	0.4678	0.5469	0.5157
5th floor	0.5662	0.4594	0.7317	0.4837	0.9891	0.4995	0.6664	0.5059
Roof	0.7612	0.8064	0.9668	0.9549	0.3528	0.4522	0.4441	0.4850
Mean(acc)	0.5331	0.4864	0.5839	0.4984	0.4889	0.39702	0.4662	0.4349
Disp1	0.4013	0.2523	0.2633	0.1727	0.2421	0.1449	0.1467	0.0958
Disp2	0.4086	0.2545	0.3318	0.1867	0.3010	0.1851	0.2613	0.2242
Mean(disp)	0.4049	0.2534	0.2975	0.1797	0.2715	0.1650	0.2040	0.1600

## 5. 결 론

이 논문에서는 지진하중을 받는 실물크기 구조물에 감쇠기가 설치된 층만의 응답을 피드백 받아 MR 감쇠기의 최적 제어력을 산정하는 분산제어식 응답의존형 알고리즘의 유효성이 실험적으로 평가되었다. 실물크기 구조물의 지진하중을 구현하기 위하여 5층 바닥에 설치된 HMD를 이용하여 지진하중을 받는 구조물의 가속도 응답을 모사하는 의사지진하중을 사용하였으며, 기존 연구에서 제시된 3개의 중앙집중식 준능동 제어알고리즘과 지진응답 제어성능을 비교·평가하였다. 그 결과 3개의 중앙집중식 준능동 제어 알고리즘 중에서는 clipped-optimal 제어 알고리즘의 제어 성능이 가장 좋은 것으로 나타났고, 이 논문에서 제안된 1층의 가속도 응답만을 이용한 분산제어식 응답의존형 제어 알고리즘의 가속도 제어 성능이 clipped-optimal 제어 알고리즘과 거의 동등한 제어성능을 나타내는 것을 확인하였다. 또한, 변위 제어성능에 있어서는 분산제어식 응답의존형 제어 알고리즘이 가장 제어 성능을 보이는 것으로 나타났다.

## 후 기

이 연구는 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터 육성사업(R11-2002-101-03004-0)의 지원과 한국과학재단 기초과학 연구지원사업 (R01-2007-000-10872-0)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Casciati, F., Magonette, G. and Marazzi, F., 2006, "Technology of Semiactive Devices and Applications in Vibration Mitigation", John Wiley & Sons.
- (2) Spencer Jr, B. F. and Sain, M. K., 1997, "Controlling Buildings : A New Frontier in Feedback", IEEE Control Systems Magazine: Special Issue on Emerging Technologies (Tariq Samad Guest Ed.), Vol. 17, No. 6, pp. 19~35.
- (3) Dyke, S. J. and Spencer Jr, B. F., 1996, "Seismic Response Control Using Multiple MR Dampers", Proceedings of the 2nd Intl. Workshop on Struc. Control, Hong Kong, pp. 163~173.
- (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: Special Issue on Large Civil Structures, Vol. 7, pp. 693~703.
- (5) Yang, G., Spencer Jr, B. F., Jung, H. J., Carlson, J. D., 2004, "Dynamic Modeling of Large-scale Magnetorheological Damper Systems for Civil Engineering Applications", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 130, No. 9, pp. 1107~1114.
- (6) 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.
- (7) Inaudi, J. A., 1997, "Modulated Homogeneous Friction: A Semi-active Damping Strategy", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 26, No. 3, p. 361.
- (8) Lee, S. H., Park, E., Lee, S. K., Yu, E., Youn, K. J., Min, K. W., Min, J. K. and Kim, Y. C., 2006, "Forced Vibration Test of a Real-scale Structure and Design of HMD Controllers for Simulating Earthquake Response", Transaction of Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 10, No. 6, pp. 103~114.
- (9) Youn, K. J., Min, K. W. and Lee, S. H., 2007, "Seismic Response Control of Structures Using Decentralized Response-dependent MR Dampers", Transaction of Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 20, No. 6, pp. 761~767.
- (10) Leitmann, G., 1994, "Semiactive Control for Vibration Attenuation", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 5, September, pp. 841~846.
- (11) 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.