

## 지반 기진력을 받는 구조물의 진동제어를 위한 자기유변 감쇠기의 실험적 연구

An Experimental Study on a Magneto-Rheological Fluid Damper  
for Structural Control Subject to Base Excitation

문 석 준<sup>†</sup> · 김 병 현\* · 정 종 안\*

Seok-Jun Moon, Byung-Hyun Kim and Jong-Ahn Jeong

(2004년 6월 8일 접수 : 2004년 7월 13일 심사완료)

**Key Words :** MR Damper (자기유변 감쇠기), Structural Control (구조물 진동제어), Semi-active Control Device (반능동형 진동제어장치)

### ABSTRACT

Semi-active control systems have attracted a great deal of attention in recent years, because they offer the adaptability of active devices without requiring large power sources. One of the most promising semi-active devices proposed for structural control is magneto-rheological fluid dampers (MR damper). In this paper, an MR damper having the capacity of about 1 ton was designed and fabricated, and series of tests were performed to grasp the fundamental performance characteristics of it. It was also applied to a 6-story steel structure under random excitation and 3-different seismic excitations for the confirmation of its validity on structural vibration absorption. Through this study, the techniques and know-hows for MR damper production were acquired.

### 1. 서 론

최근 10여년 동안 수동형 및 능동형 진동제어장치의 장점을 결합한 반능동형 진동제어 장치에 관한 연구가 꾸준히 증가하고 있다. 반능동형 진동제어장치는 장치의 특성(제어력 크기, 동조 주파수 등)을 실시간으로 변경 가능한 반면, 소규모 에너지만을 요구한다. 따라서 작은 전력원을 이용하여 능동형과 같은 적응성을 얻을 수 있는 장치로서 많은 주목을 받고 있다. 연구되고 있는 많은 반능동형 진동제어장치는 소규모 전지 전원만을 필요로 하기 때문에 지진 등에

의해 외부 전원이 차단될 경우에도 장치가 원하는 동작(기능)을 유지할 수 있다.

지반 기진력을 받는 구조물의 진동제어용 반능동형 장치로서는 가변 오리피스 댐퍼(variable orifice damper),<sup>(1)</sup> 가변 마찰댐퍼(variable friction damper),<sup>(2)</sup> 조절형 동조 유체댐퍼(adjustable tuned liquid damper)<sup>(3)</sup> 및 특수한 유체를 이용한 자기/전기유변 댐퍼(electro-rheological/magneto-rheological fluid damper)<sup>(4)</sup> 등이 알려져 있다. 특히 자기유변 감쇠기는 자기유변 유체가 큰 항복 강도(yield strength)를 가지고 있으며, 비교적 낮은 전압에서도 작동이 가능한 장점을 가지고 있어 많은 분야에서 활발하게 연구가 진행되고 있다. 또한 넓은 운용 온도범위를 가지고 있어 적용범위가 확대되고 있다.

본 연구에서는 국외에서 진행되었던 유사한 연구결과<sup>(4, 5)</sup>를 바탕으로 지반 기진력을 받고 있는 구조물의 진동제어를 위한 자기유변 감쇠기를 자체 설계·

\* 책임저자 : 정희원, 한국기계연구원 구조연구부  
E-mail : sjmoon@kimm.re.kr

Tel : (042) 868-7428, Fax : (042) 868-7418

† 정희원, 한국기계연구원 구조연구부

제작하고, 단독시험 및 구조물 적용시험을 통해 성능을 평가하였다. 일련의 연구개발을 통해 구조물 진동 제어용 대규모 자기유변 감쇠기를 설계·제작 및 평가할 수 있는 기술 및 know-how를 확보하였다.

## 2. 자기유변 감쇠기의 설계 및 제작

### 2.1 설계

지반 기진력을 받는 구조물의 진동제어용 자기유변 감쇠기는 Yang<sup>(4)</sup>이 연구한 실린더 내부에 다단계 피스톤 헤드에 코일이 감겨져 있는 형태와 Sunakoda 등<sup>(5)</sup>이 연구한 by-pass 내부회로에 다단계 코일을 삽입한 형태가 있다. 전자의 경우 20톤급 규모의 자기유변 감쇠기가 제작되었으며, 후자의 경우 30톤급 규모가 제작되었다. 본 연구에서는 구조가 간단하고 제작하기 쉬운 전자의 형태를 선정하고 설계를 수행하였다.

본 연구에서는 시험실 규모의 1톤급 자기유변 감쇠기를 설계 및 제작하였으며, 보유하고 있는 시험구조물의 적용시험을 고려하였다. 시험구조물에 대한 자세한 사항은 4장에 기술하였다. 설계 변위는  $\pm 30$  mm이며, 설계한 자기유변감쇠기의 개략도는 Fig. 1과 같다. 원형실린더 내부에 3곳(stage)에 코일이 감긴 피스톤 헤드가 있는 형태이다. Fig. 1에서 검정색 무늬가 있는 부분이 코일이 감긴 곳을 표시하고 있다. 자기유변 감쇠기의 제어력(감쇠력)은 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.<sup>(6)</sup>

$$F = \left( 2.07 + \frac{12Q\eta}{12Q\eta + 0.4wh^2\tau_0} \right) \frac{\tau_0 LA_p}{h} \quad (1)$$

여기서

$F$  : Control force

$h$  : Gap width of the damper's annular flow

$w$  : Mean circumference of the damper's annular flow path

$\tau_0$  : Fluid yield stress

$\eta$  : Plastic viscosity

$A_p$  : Cross area of the piston head

$Q$  : Volume flow rate

$L$  : Axial pole length

식 (1)을 이용하여 자기유변 감쇠기의 실린더 내경, 피스톤 직경, 피스톤 헤드 직경과 길이 등 필요한 기하학적 형상을 결정할 수 있다. 자기유변 유체의 항복응력은 실험을 통해 파악을 해야 하며, 본 연구에서는 구입할 때 제공되는 시험자료의 전단강성 값을 이용하였다.

자기 회로에 대한 설계는 다음의 식 (2)을 이용하였다.

$$NI = H_f g + H_s L_s \quad (2)$$

여기서,

$N$  : Coil turns

$I$  : Current

$H_f$  : Magnetic field intensity of the MR fluid

$H_s$  : Magnetic field intensity of the steel

$g$  : Total length of gaps

$L_s$  : Length of steel path

식 (2)로부터 코일의 양( $N$ ) 및 직경 등이 결정이

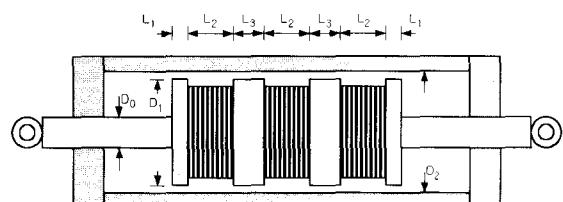


Fig. 1 Outline of the MR damper

Table 1 Principal specification of the MR damper

Item	Value
Max. force( $F$ )	10 kN
Max. stroke	$\pm 30$ mm
Designed velocity	62.8 mm/sec
Cylinder outer diameter	95 mm
Cylinder inner diameter( $D_2$ )	80 mm
Piston diameter( $D_0$ )	35 mm
Gap between cylinder and piston head( $h$ )	1 mm
Coil size(Diameter)	20 gage(0.81 mm)
Coil turns( $N$ )	800 turns
Designed Current( $I$ )	2 A

된다. 여기서 직경은 전류  $I$ 가 결정되면,  $I$ 를 수용할 수 있는 코일의 직경을 선정한다. 식 (1) 및 (2)로부터 산출된 설계치를 Table 1에 정리하였다.

### 3.2 제작

산출된 설계 값을 이용하여 상세 설계한 자기유변 감쇠기의 설계도는 Fig. 2와 같으며, 자기유변 감쇠기는 유압서보시스템 제작전문업체인 동양시스템(주)에서 제작되었다. 피스톤의 헤드는 전자석 코어로서 효율이 좋은 순철(low carbon steel)을 사용하였다. Fig. 1에서 피스톤 헤드 길이  $L_1$ ,  $L_2$  및  $L_3$ 는 각각 24 mm, 47 mm 및 40 mm로 결정되었으며, 피스톤 헤드와 실린더 내벽사이의 간격(gap, 1 mm)을 정확히 유지시키기 위해 내부에 반지형태의 링(inner annular ring)을 설치하였다. 내부 링도 순철로 제작하고자 하였으나, 국내에서 원하는 크기의 재료를 구할 수가 없어서 일반 철로 제작한 후 피스톤 헤드와 용접(8곳)으로 연결하였다. 내부 링과 실린더 사이의 마찰을 최대한 줄이기 위해 저 마찰 패드를 삽입하였으며, 실린더를 따라 누설되는 자기를 내부 링의 설치로 최대한 방지할 수 있었다. 실린더 양단에는 실리콘 오일 셀(O ring)을 사용하여 마찰을 줄이고 자기유변 유체의 누유를 방지하였으며, 고온 환경에서도 사용 가능하도록 선정하였다. 탬퍼의 양끝 단은 구조물에 볼트로 연결 가능하도록 제작되었다. 3개의 코일은 병렬 연결하였다.

제작시 가장 어려운 점은 화장품 크림과 같이 놓

도가 짙은 자기유변 유체(본 연구에서는 Lord사의 MRF-336AG를 사용하였음.)를 탱퍼의 내부로 충진하는 것이다. 설계한 자기유변 감쇠기 내부의 최소 간격은 1 mm이며, 내부의 공기를 제거하면서 완전하게 충진하기 위해서 특별한 장치가 필요하였다. 먼저 Yang<sup>(4)</sup>이 제안한 방법으로 자기유변 유체의 충진을 시도해 보았으며, 여러 문제점이 발견되어 기존 장치를 보완·개량하였다. 개량된 자기유변 유체 충진장치는 Fig. 3에 보이는 바와 같다. 진공펌프를 이용하여 자기유변 유체 및 탱퍼 안에 있는 공기를 제거하였으며, 탱퍼 내부 구석구석 완전히 유체를 충진하기 위해 고압질소가스를 이용한 공압 실린더를 사용하였다. 구체적인 충진 순서를 정리하면 다음과 같다.

- ① 자기유변 감쇠기를 만능시험기에 설치한다.
- ② 밸브 1, 2, 3 및 4를 닫는다.
- ③ 공압 실린더 내부에 자기유변 유체를 넣는다.
- ④ 밸브 1, 3을 개방한다.
- ⑤ 진공 펌프를 가동하여, 자기유변 감쇠기 및 공압 실린더 내부의 공기를 제거한다.
- ⑥ 밸브 1, 3을 닫는다.
- ⑦ 밸브 2, 4를 개방한다.
- ⑧ 만능시험기를 천천히 움직여 자기유변 감쇠기의 피스톤이 상하운동을하도록 한다.
- ⑨ 자기유변 감쇠기의 내부에 자기유변 유체가 완전히 충진될 때까지 계속한다.
- ⑩ 충진하면서 탱퍼 상단에 설치된 삽입 나사식 공기弁을 열어 내부의 공기를 외부로 유출시킨다.

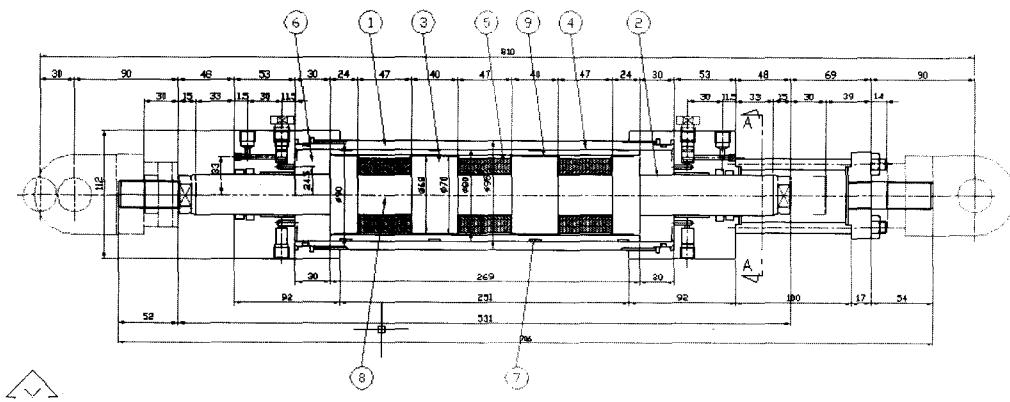


Fig. 2 Drawing for the designed MR damper

### 3. 단독 성능시험

제작한 자기유변 감쇠기의 특성을 조사하기 위해 Fig. 4에서 보는 바와 같이 자기유변 감쇠기를 만능 시험기(UTM)에 정착하여 단독 성능시험을 수행하였다. 참고로 자기유변 감쇠기 옆에 부착되어 있는 실린더가 Fig. 3의 공압 실린더이다. 시험은 동작주파수와 변위의 크기를 변경시켜 정현파형을 입력하여 이때의 감쇠력을 계측하는 방법으로 수행하였다. 감쇠력은 시험기의 상단에 load cell을 설치하여 측정하였다. 자기유변 감쇠기에 전류를 입력하기 위해 자체 제작한 전력 공급기(power supply)를 사용하였다. 즉, 대부분의 컴퓨터용 AD/DA 보드에서는 미소 전류를 가지는 ±10 V 사이의 전압만을 출력할 수 있으므로 전력 공급기를 이용하여 컴퓨터에서 출력된 신호를 증폭하여 자기유변 감쇠기의 코일에 필요한 전류를 공급하였다.

먼저 전류 변화에 따른 감쇠력의 영향을 살펴보았다. Fig. 5의 위 그림은 동작주파수 3 Hz에서 변위-감쇠력 곡선을 입력 전류에 따라 보여주고 있다. 표시된 입력전류는 3개의 코일에 투입된 값이며, 각 코일에 입력된 수치는 표시된 값의 1/3이다. 곡선 모양이 직사각형으로 전형적인 자기유변 감쇠기의 특성을 잘 나타나고 있으며, 입력전류에 따라 감쇠력이 증가하고 있음을 알 수 있다. 하지만 입력전류가 클수록 변화되는 감쇠력 증가는 크지 않다. Fig. 5의 그림은

6.8 A에서의 계측된 결과로서 2초간의 변위 및 감쇠력 시간이력을 보여주고 있다.

Fig. 6에는 1 Hz 정현파형 시험에서 변위를 증가시키면서 시험한 결과를 보여주고 있다. 즉, 변위를 ±1 mm, ±5 mm, ±10 mm 및 ±15 mm으로 변화시켜 감쇠력을 계측하였다. 변위가 증가할수록 감쇠력이 증가하고 있음을 알 수 있으며, 선형적으로 증가하고 있는지는 않다. 하지만 특성곡선의 형태는 변화가 없음을 확인할 수 있다. Fig. 7은 일정한 피크 속도(62.8 mm/s)에서의 실험한 결과를 보여주고 있다. 일정한 피크 속도를 입력하기 위해 주파수와 변위를 조정하면서 시험을 수행하였다. 변위가 작고 주파수가 높은 영역에서 다소 높은 감쇠력 특성을 보여주고 있었으나, 거의 일정한 감쇠력을 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다. 단독 성능시험으로부터 자기유변 감쇠기의 감쇠력은 공급전류 및 속도 의존성을 가지고 있음을 확인할 수 있으며, 이 결과는 식 (1)의 의미와 일치한다.

### 4. 구조물 적용시험

제작한 자기유변 감쇠기를 철골 시험구조물에 설치하여 구조물 진동제어 성능을 시험적으로 조사하였다. 6층 시험구조물은 각종의 후판이 4개의 기둥으로 지지되고 있으며, 총 중량은 약 8톤이다. 가로×세로×높이가 2,100 mm × 1,200 mm × 3,500 mm이다. Fig. 8

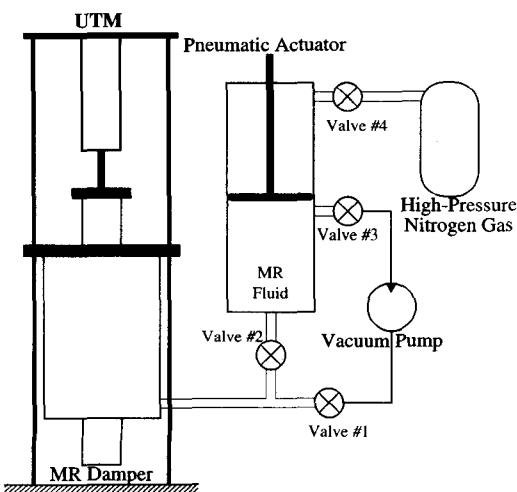


Fig. 3 MR fluid supplier



Fig. 4 MR damper installed on the UTM

에 보이는 바와 같이 시험구조물은 대형진동대 위에 고정되어 있으며, 자기유변 감쇠기는 바닥층과 1층 사이에 약  $16^\circ$  기울어진 대각선 방향으로 설치되었다. 시험구조물의 1층에 변위계(LVDT)를 설치하여 층 간 변위를 계측하였고, 각층 후판에 가속도계를 부착하여 감쇠기 설치 전·후의 응답을 계측하였다. 또한 감쇠기의 제어력을 계측하기 위하여 load cell을 감쇠기의 한 끝단에 설치하였다. 본 연구에서는 Fig. 8에 보는 시험구조물의 수평 좌우방향에 대한 응답만을 고려하였다. 시험구조물의 동적 특성치는 시험을 통해 확인하였으며,<sup>(7)</sup> 시험구조물의 1차 고유진동수 및 감쇠비는 각각  $2.4\text{ Hz}$  및  $0.5\%$ 이다. 본 연구에서 적용된 반능동형 제어기는 clipped optimal algorithm<sup>(8)</sup>을 사용하여 설계되었으며, 제어신호를 산정하기 위해서 시험구조물의 상태량(가속도)과 감쇠기의 상태량(감쇠력)을 되먹임 시켰다.

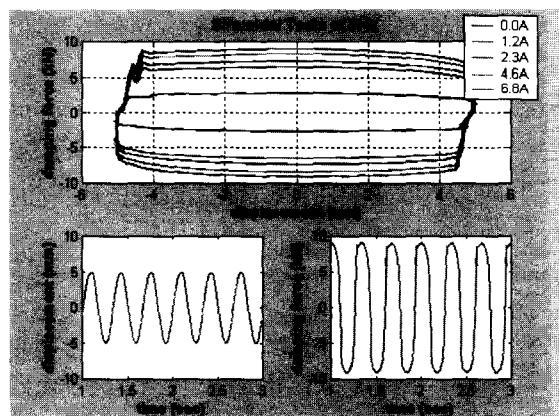


Fig. 5 Current-dependent curves at 3 Hz

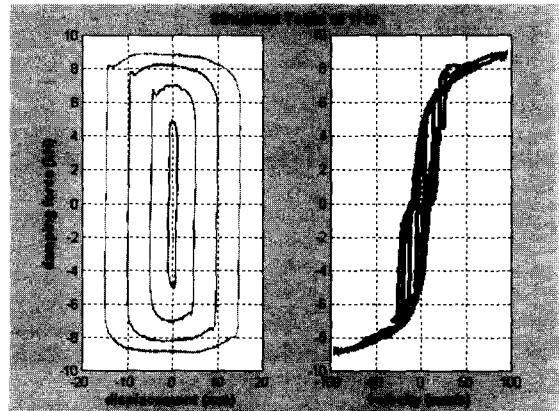


Fig. 6 Displacement-dependent curves at 1 Hz

지반 기진력을 받는 구조물에 대한 자기유변 감쇠기의 제어성능을 평가하기 위해 랜덤파형 가진 및 특정 지진파형에 대한 응답의 변화를 살펴보았다. 먼저 랜덤파형 가진에 대한 실험을 수행하였으며, 과정의 RMS 가속도레벨은  $0.03\text{ g}$ 이며, 최대주파수는  $33\text{ Hz}$ 이다. 지반(진동대) 가속도에 대한 최상층 6층에서의 가속도 응답의 전달함수를 Fig. 9에 보여주고 있다. 자기유변 감쇠기의 설치로 인해 시험구조물의 공진파크에서 각각  $10\text{ dB}$  이상의 가속도 응답레벨을 줄이

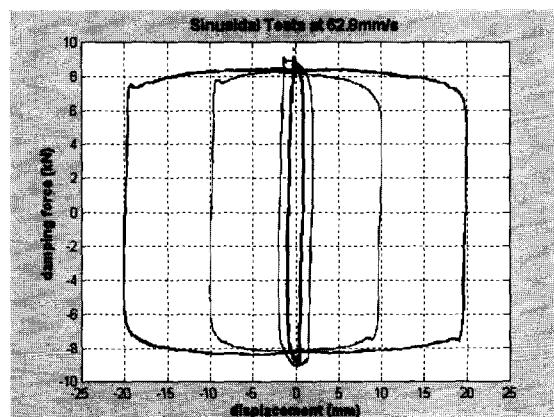


Fig. 7 Displacement-force curve at 62.8 mm/s

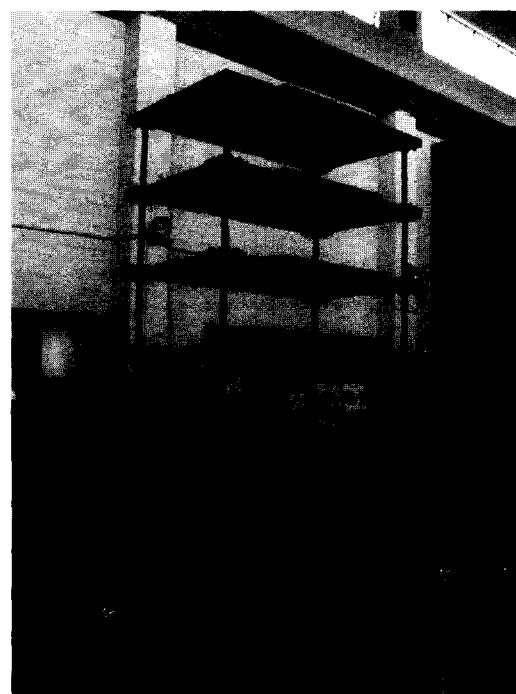


Fig. 8 Experimental set-up of the test structure

는 효과가 있음을 알 수 있으며, 저차 진동형뿐만 아니라 고차 진동형도 동시에 제어하는 효과를 확인할 수 있다. 시험구조물의 고유진동수가 약 10% 정도씩 상승하는 현상이 발생하고 있음을 확인할 수 있는데, 이는 자기유변 감쇠기의 강성효과로 인하여 발생하는 것으로 판단된다.<sup>(9)</sup>

랜덤파형 가진시험 후 3가지 지진파형에 대한 시험을 수행하였다. 사용된 지진파형은 미국 El Centro 지진(1940년), Mexico 지진(1985년), 터키Gebze 지진(1999년)이다. 시험구조물의 고유진동수 및 안전성을 고려하여 지진파형을 1:2.6으로 시간 스케일하고,

최대 가속도 크기를 0.1g 또는 0.2g가 되도록 수정하였다. 사용된 3개의 지진파형(최대 가속도 0.1g)은 서로 다른 주파수 특성을 가지고 있다. 대표적인 시험 결과로서 각 지진파형(최대 가속도 0.2g)에 대한 시험구조물 6층에서의 가속도 응답을 Fig. 10에 보였다. 또한 시험구조물 6층에서의 가속도 및 1층에서의 층간변위를 Table 2에 정리하였다. 모든 지진파형에 대해 자기유변 감쇠기의 설치로 인하여 시험구조물의 가속도 및 변위 진동레벨이 약 30~60% 정도 감소하는 것을 확인할 수 있다.

## 5. 고찰 및 결론

본 연구에서는 지반 기진력을 받는 구조물의 진동을 제어하기 위한 제진장치로서 자기유변 감쇠기를 자체 설계·제작하여 단독 성능시험 및 구조물 적용시험을 수행하였다.

자기유변 감쇠기는 Yang<sup>(4)</sup>이 연구한 형태를 기반으로 해서 실린더 내부의 피스톤 헤드에 코일을 감는 방식으로 약 1톤급을 설계·제작하였다. 화장품 크림 같이 농도가 짙은 자기유변 유체를 자기유변 감쇠기 내부로 주입하기 위한 장치를 제안하였으며, 이 장치

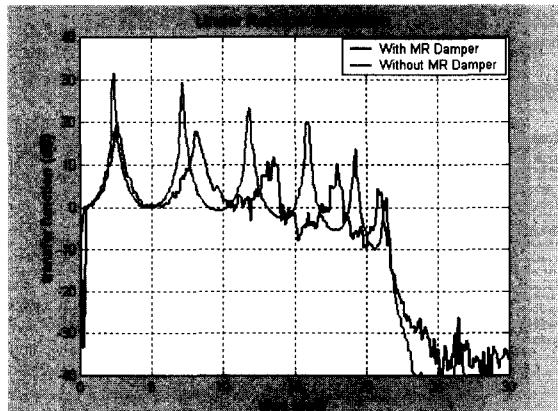


Fig. 9 Transfer function under random excitation

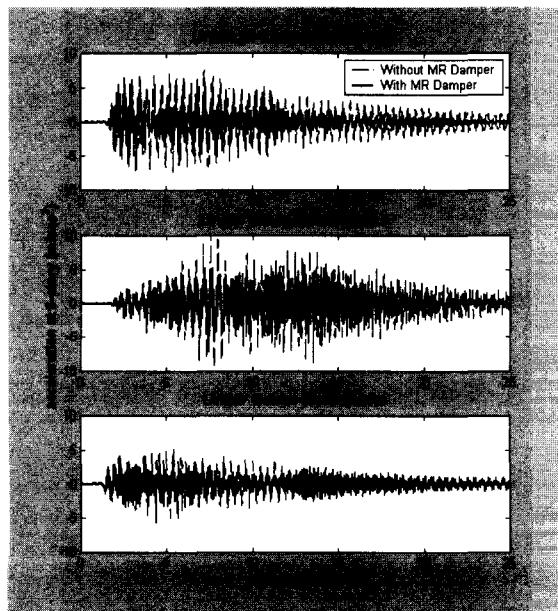


Fig. 10 Acceleration responses at 6th story

Table 2 Response results

	Without Damper		With Damper
	Peak Acc. (m/s <sup>2</sup> )	RMS Acc. (m/s <sup>2</sup> )	Peak Displ. (mm)
Peak Acc. (m/s <sup>2</sup> )	w/o	7.54	10.57
	w/	5.06	4.84
RMS Acc. (m/s <sup>2</sup> )	w/o	1.99	2.19
	w/	0.79	1.01
Peak Displ. (mm)	w/o	5.57	10.32
	w/	3.82	5.43
RMS Displ. (mm)	w/o	1.68	1.49
	w/	0.64	0.83

를 통해 복잡하고 간격이 좁은 자기유변 감쇠기 내부로 유체를 완전하게 충진할 수 있었다.

제작한 자기유변 감쇠기의 성능을 확인하기 위해 단독성능시험 및 구조물 적용시험을 수행하였다. 단독성능시험에서는 입력전류 의존성, 변위 의존성 및 속도 의존성을 조사하였으며, 속도 의존성이 매우 큰 것을 확인하였다. 6층 시험구조물의 이용한 적용시험에서는 랜덤파형 및 지진파형에 대한 시험을 수행하였다. 랜덤파형 시험에서는 가속도 응답 레벨을 각 고유진동수에서 약 10dB이상 제어할 수 있음을 확인하였다. 3개의 특성이 다른 지진파형에 대한 시험결과 모든 파형에 대해 약 30~60% 지진응답(가속도, 층간변위)을 제어할 수 있음을 확인하였다.

본 연구를 통해 구조물 진동제어를 위한 자기유변 감쇠기의 설계, 제작 및 평가에 필요한 기술 및 know-how를 확보하였다. 추가적으로 다른 방식의 반능동형 진동제어장치와의 비교연구 및 다양한 제어로직의 적용에 대한 연구를 계획하고 있다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업 중 “제진장치를 활용한 제진설계 기술개발” 사업 과제로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) 문석준, 김병현, 정종안, 2004, “반능동형 오리피스 유체댐퍼를 이용한 구조물 진동제어에 관한 실험적 연구,” 한국지진공학회논문집, 제 8 권 제 2 호, pp. 55~62.
- (2) Inaudi, J. A., 1997, “Modulated Homogeneous Friction: a Semi-active Damping Strategy,” Earthquake Engineering and Structural Dy-

namics, Vol. 30, pp. 465~484.

(3) Yalla, S. K., 2001, “Liquid Dampers for Mitigation of Structural Responses: Theoretical Development and Experimental Validation,” Ph. D Dissertation, University of Notre Dame.

(4) Yang, G. Q., 2002, “Large-scale Magnetorheological Fluid Damper for Vibration Mitigation: Modeling, Testing and Control,” Ph. D Dissertation, University of Notre Dame.

(5) Sunakoda, K., Sodeyama, H., Iwata, N., Fujitani, H. and Soda, S., 2000, “Dynamic Characteristics of Magneto-rheological Fluid Damper,” Proceeding of SPIE Smart Structure and Materials Conference, Vol.3989, Newport Beach, USA, pp. 194~203.

(6) Spenser, B. F., Yang, G., Carlson, J. D. and Sain, M. K., 1996, “Smart Dampers for Seismic Protection of Structures: a Full-Scale Study,” Proceeding of 2nd World Conference on Structural Control, Kyoto, Japan, pp. 417~426.

(7) 정태영, 임채욱, 김병현, 문석준, 2002, “오리피스 유체댐퍼를 이용한 건축구조물 진동제어의 실험적 연구,” 한국소음진동공학회논문집, 제 12 권 제 6 호, pp. 469~477.

(8) Dyke S. J., Spenser, B. F., Sain, M. K. and Carlson, J. D., 1996, “Modeling and Control of Magentorheological Dampers for Seismic Response Reduction,” Smart Materials and Structures, Vol. 5, pp. 565~575.

(9) Spenser, B. F., Dyke, S. J., Sain, M. K. and Carlson, J. D., 1997, “Phenomenological Model of a Magnetorheological Damper,” Journal of Engineering Structures, ASCE, Vol. 123, pp. 230~238.