

# 지진응답 제어를 위한 MR-토글 가새 시스템의 실험적 연구

## Experimental Study on the MR-Toggle Brace System for Vibration Control

민 경 원\*      이 명 규\*\*      강 상 훈\*\*      이 상 현\*\*\*      황 재 승\*\*\*\*

Min, Kyung-Won Lee, Myoung-Kyu Kang, Sang-Hoon Lee, Sang-Hyun Hwang, Jae-Seung

---

### ABSTRACT

The purpose of this paper is to compare the control effect of toggle brace system having amplifying displacement mechanism with that of conventional brace system when the identical MR damper is applied to each system. The force-displacement and force-velocity relationships of MR damper are obtained using harmonic load test and the analytical model for MR damper is presented. White noise excitation tests of a single degree of freedom system with MR-toggle brace system and MR-chevron system are conducted and the transfer functions of the systems are compared. Test results show that the control effect of the toggle system is superior to that of the conventional brace system.

---

### 1. 서    론

지진이나 바람에 의해 발생하는 구조물의 진동을 제어함에 있어서 강성보다는 감쇠에 의하여 더욱 효과적으로 저감되는 특성을 가지고 있다. 때문에 경제성 원리에 의해 비효율적으로 부재를 크게 하여 강성을 늘리는 고전적인 방법보다는 감쇠장치를 이용하여 구조물의 내진 및 내풍 성능을 향상시키는 방법이 증가하고 있는 추세이다 [1]. 그러나 이러한 감쇠장치에도 설치방법의 문제와 제어용량의 한계를 극복하는데 많은 노력을 기울이고 있는 현실이다. 일반적으로 큰 강성을 가지는 건축 및 토목구조물의 경우 작은 지점간에 발생하는 변위, 속도, 가속도는 매우 작은 값을 가진다. 이러한 작은 크기의 물리량에 비례하는 감쇠력을 발생시키는 감쇠장치가 적정수준의 제어효과를 가지기 위해서는 감쇠장치의 용량이 커지거나 다수의 감쇠장치가 사용되어야 한다. 특히, 일반적인 가새 시스템인 대각형이나 웨브론 형태의 가새는 구조물의 층간 변위보다 작은 크기의 변위가 가새에 발생하기 때문에 이러한 문제는 더욱 심각해진다. 만약, 가새 시스템에 의하여 구조물의 상대변위 등이 증폭되어 감쇠장치 양 끝단에 전달된다면 그 증폭된 비율만큼 감쇠장치의 용량을 줄이거나, 또는 그 비율만큼 같은 용량의 댐퍼에 의하여 더욱 큰 제어효율을 가질 수 있다. 이렇게 변위를 증폭하거나 역으로 감소시켜 힘을 전달하는 시스템의 하나가 토글 시스템이다[2]. 토글시스템은 기계장치에 매우 광범위하게 사용되고 있으며, 작용 매커니즘에 따라 분쇄기, 압축기, 그리고 충격완화장치 등으로 응용

---

\*    단국대학교 건축대학 건축공학과 부교수  
\*\*   단국대학교 건축대학 건축공학과 석사과정  
\*\*\* 서울대학교 공학연구소 객원연구원  
\*\*\*\* 전남대학교 건축공학과 조교수

되고 있다.

본 연구의 목적은 동일한 용량의 감쇠장치를 토글시스템과 일반적인 가새시스템을 사용하여 구조물에 설치한 경우의 제어효과의 차이를 실험적으로 검증하는 것이다. 이를 위해 토글가새시스템과 층간변위와 동일한 변형을 발생시키는 시스템을 사용하여 단자유도 소형구조물에 MR 감쇠기를 설치한 후 진동대 실험을 수행하였다. 우선 대상건물에 가속도계와 변위계를 장치한 후 백색잡음 실험을 수행하고 고유진동수와 전달함수의 크기를 측정하였다. 다음으로 토글시스템을 장치하고 백색잡음 하중실험을 통하여 고유진동수의 변화를 측정하고 MR 감쇠기를 달아서 입력전류의 변화를 주어 실험을 수행한 후 전달함수의 변화를 확인하였다. 마찬가지로 셰브론 가새와 같이 층간변위와 동일한 크기의 감쇠기 변위를 발생시키는 강성이 매우 큰 레퍼런스 부재에 MR 감쇠기를 달고 토글시스템의 실험방식과 동일한 조건으로 실험을 수행하였으며 그 결과를 토글가새시스템의 실험 결과와 비교하여 토글가새시스템의 효과와 MR 감쇠기의 제어효과를 검증하였다.

## 2. MR 감쇠기

MR 유체의 특성으로 유체 내 흐트러진 입자들에 자기장이 가해질 때 흐트러져 유동적이었던 성질이 체인 구조로 정렬되어 자기장의 크기에 비례하는 마찰력을 발생시킨다. MR 유체를 사용한 MR 감쇠기는 감쇠기 조작에 요구되는 전력이 매우 작고, MR 유체의 자기장에 대한 반응 속도가 매우 빠르다는 장점을 가지고 있기 때문에 준능동 제어 시스템으로 자동차 흔들림 충격 흡수제, 엔진 진동제어, 먼진 테이블, 유압 밸브 체계, 그리고 대형 토목 및 건축구조물의 진동제어 분야에서 이용되고 있다 [3-4].

### 2.1. MR 감쇠기의 동적모델

본 절에서는 MR 감쇠기의 특성을 가장 간단하게 표현하는 Bingham 모델과 이력거동의 특성을 묘사하는 단순 Bouc-Wen 모델을 소개하고자 한다. 마찰력과 점성력으로 MR 감쇠기의 특성을 나타내는 Bingham 모델 (식 1) 식과 무차원 변수  $z$  와 설계 상수를 사용한 단순 Bouc-Wen 모델(식 2,3)은 다음과 같다 [5].

$$F_1 = f_c \operatorname{sgn}(\dot{x}) + c\dot{x} \quad (1)$$

$$F_2 = \alpha z + c\dot{x} + k(\dot{x} - \dot{x}_o) \quad (2)$$

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}| z |z|^{n-1} - \beta \dot{x} |x|^n + A\dot{x} \quad (3)$$

(1)식에서  $f_c$ 는 MR 감쇠기의 마찰력,  $c$ 는 점성,  $x$ 는 감쇠기의 변위이고, (2)식과 (3)식에서  $\alpha, \beta, \gamma, n$ 는 무차원 변수  $z$ 의 설계상수이며,  $k$ 는 강성이다. Bingham 모델의 경우, MR 감쇠기가 실제로 거동하였을 때의 그 감쇠력의 크기만을 묘사할 뿐 실제 감쇠기의 이력거동과는 차이가 있다. 단순 Bouc-Wen 모델은 무차원 변수  $z$ 를 사용하여 보다 근접하게 이력거동을 묘사할 수 있고, 설계상수를 조절해서 다양한 이력곡선을 그리게 된다. 마찬가지로 MR 감쇠기의 이력거동을 묘사하면서도 Bingham 모델처럼 거동을 간단하게 표현할 수 있는 이력이점성 모델이 있다 [5].

$$F_3 = \begin{cases} C_{po}v - f_c & v \leq -v_1 \quad \dot{v} > 0 \\ C_{pr}(v - v_o) & -v_1 \leq v \leq v_2 \quad \dot{v} > 0 \\ C_{po}v + f_c & v_2 \leq v \quad \dot{v} > 0 \\ C_{po}v + f_c & v_1 \leq v \quad \dot{v} < 0 \\ C_{pr}(v + v_o) & -v_2 \leq v \leq v_1 \quad \dot{v} < 0 \\ C_{po}v - f_c & v \leq -v_2 \quad \dot{v} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

여기서,

$$v_1 = \frac{f_c - C_{pr}v_o}{C_{pr} - C_{po}} \quad \text{그리고} \quad v_2 = \frac{f_c + C_{pr}v_o}{C_{pr} - C_{po}} \quad (5)$$

$v_o$ 는 저속도 영역의 이력곡선의 폭을 결정하는 변수이다.

## 2.2. MR 감쇠기 성능평가

실험을 통하여 Lord사 마찰형 소형 MR 감쇠기(RD-1097-01)의 자기장에 따른 이력거동의 실험결과 및 단순 Bou-Wen 모델과 Bingham 모델, 그리고 이력 이점성모델을 사용한 소형 MR 감쇠기의 동적모델을 나타내었다. 그림 1은 1.5Hz의 조화하중상태에서 MR 감쇠기가 passive off 상태였을 때 제어력의 시간이력과 힘-변위그림, 힘-속도 그림을 각각의 모델로 표현한 것이다. 여기서 Bingham 모델의 설계상수는  $f_c = 8 \text{ N}$ ,  $C_o = 10$  이고, 단순 Bouc-Wen 모델의 무차원변수  $z$ 의 설계상수는  $\alpha = 280 \text{ N}$ ,  $n = 2.45$ ,  $\gamma = 431400 \text{ m}^{-1}$ ,  $\beta = 0 \text{ m}^{-1}$ ,  $A = 75.33 \text{ m}^{-1}$ ,  $C = 8 \text{ N}\cdot\text{sec}/\text{m}$ ,  $k = 0 \text{ N}/\text{m}$ ,  $f_o = 0 \text{ N}$  이다. 본 MR 감쇠기의 이력거동을 가장 잘 묘사하면서도 수식 또한 간단한 이력이점성모델의 설계상수는  $f_y = 7.5$ ,  $C_{po} = 10 \text{ N}\cdot\text{sec}/\text{m}$ ,  $C_{pr} = 1000 \text{ N}\cdot\text{sec}/\text{m}$ ,  $V_o = 0.01735 \text{ m}/\text{sec}$  이다.

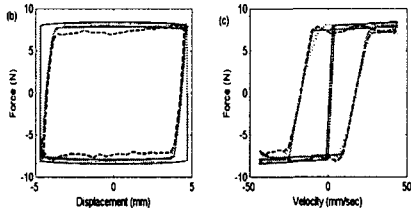
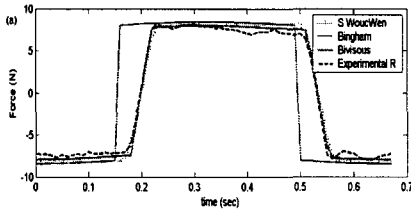


그림 1. MR 감쇠기 passive off일 때 이력거동 (1.5Hz)

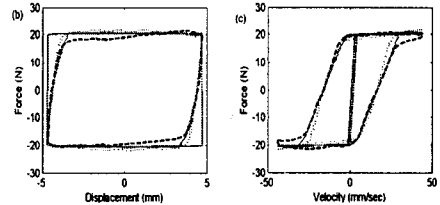
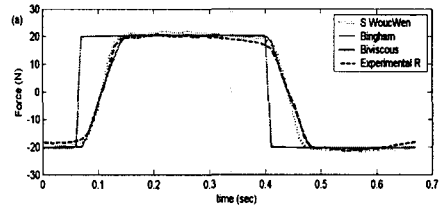


그림 2. MR 감쇠기 passive on일 때 이력거동 (1.5Hz)

그림 2는 passive on (0.2A) 상태의 시간이력이다. Bingham 모델의 설계상수는  $f_c = 20 \text{ N}$ ,  $C_o = 10$  이고, 심플 Bouc-Wen 모델의 무차원변수  $z$ 의 설계상수는  $\alpha = 280 \text{ N}$ ,  $n = 2.83$ ,  $\gamma = 431400 \text{ m}^{-1}$ ,  $\beta = 0 \text{ m}^{-1}$ ,  $A = 200.33$ ,

$C = 65 \text{ N}\cdot\text{sec/m}$ ,  $k = 0 \text{ N/m}$ ,  $f_o = 0 \text{ N}$  이다. 이력이점성모델의 설계상수는  $f_y = 20$ ,  $C_{po} = 10 \text{ N}\cdot\text{sec/m}$ ,  $C_{pr} = 1500 \text{ N}\cdot\text{sec/m}$ ,  $V_o = 0.01735 \text{ m/sec}$  이다.

### 3. 토글 시스템

#### 3.1. 증폭 계수

감쇠기가 설치된 층의 층간 변위와 감쇠기의 양단에 발생하는 변위의 관계는 다음과 같은 관계식으로 표현될 수 있다.

$$u_d = f \cdot u \quad (6)$$

여기서,  $u$  는 구조물의 층간 변위,  $u_d$  는 감쇠기의 양단에 발생하는 변위이고,  $f$  는 증폭계수를 나타낸다. 증폭계수  $f$  는 일반적으로 층간 변위, 그리고 가새 시스템의 형상에 따라 결정되는 비선형 함수이다. 감쇠장치의 감쇠력이 속도의 함수인 경우에는 다음과 같이 (6)식의 양단을 시간에 대하여 미분하여 감쇠장치에 발생하는 속도를 구해야 한다.

$$\dot{u}_d = f \cdot \dot{u} + \frac{df}{du} \dot{u}u = \left(f + \frac{df}{du} u\right) \dot{u} \quad (7)$$

증폭계수가 층간변위의 함수가 아닌 경우에는 다음과 같이 각 응답의 증폭비가 모두 동일해진다.

$$\frac{u_d}{u} = \frac{\dot{u}_d}{\dot{u}} = f_o \quad (8)$$

여기서,  $f_o$  는  $f$  가 상수일 때의 값이며, 일반적인 셰브론가새는  $f_o = 1$ , 대각가새는  $f_o = \cos\theta$  를 가진다.  $\theta$  는 대각가새가 바닥면과 이루는 각도이다. 토글 시스템은 크게 감쇠장치의 양단을 가새와 구조물에 연결하는 경우와 양단을 모두 가새시스템에만 연결하는 경우로 나눌 수 있다.

#### 3.2. 가새변형과 감쇠기변형의 관계

구조물의 상대변위( $\Delta$ ) 와 감쇠기양 끝단의 상대변위( $\Delta_r$ )는 다음 관계식을 가진다 [2].

$$\Delta_r = \cos \frac{\theta}{2} - \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta}{2L} + \sin \frac{\theta}{2}\right)^2} \quad (9)$$

(7)식을 이용하여 감쇠기 속도와 구조물 속도의 관계식을 구하면 다음과 같다.

$$\dot{\Delta}_r = \frac{-\left(\frac{\Delta}{2L} + \sin \frac{\theta}{2}\right)}{2L \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta}{2L} + \sin \frac{\theta}{2}\right)^2}} \dot{\Delta} \quad (10)$$

그러나 구조물의 상대변위가 매우 작은 경우에는 구조물의 상대변위와 감쇠기의 상대변위에 대한 관계를 간단히 (11)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta_r = \frac{1}{2} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \Delta \quad (11)$$

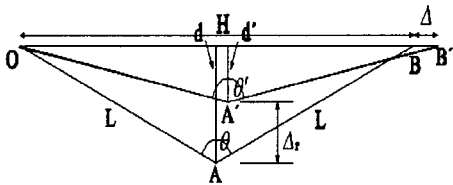


그림 3 토글의 형상

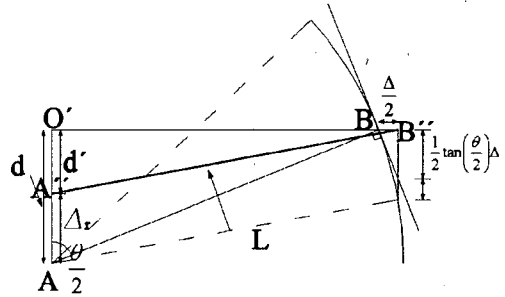


그림 4 토글변형도 상사

그림3에서 삼각형OAB의 중앙점을  $O'$ 이라고 하고  $\Delta$ 의 변형이 양쪽에서  $1/2\Delta$ 씩 늘어나는 것으로 가정하여 점  $B'$ 을  $B'$  위치로 조정하여 작도를 하면 그림 4와 같고 물리적인 의미로 쉽게 증폭길이  $\Delta_r$ 을 (11)식으로 유추할 수 있고  $\Delta$ 변형이 작을수록 그 오차가 작음을 알 수 있다.

### 3.3. 구조물변형과 감쇠기변형의 관계

원래 구조물의 상대변위가  $\Delta_o$ 라고 하면 토글형상의 양끝단을 잇는 대각선의 길이는 대각가새의 변형형상과 같다. 대각가새와 설치된 층간의 사이각을  $\varphi$ 라고 하면 대각가새의 상대변위의 증감은  $\Delta_o \cos\varphi$ 로 나타낼 수 있다.

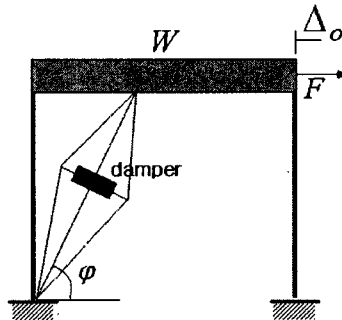


그림 5 가위-잭토글 형상

그림 5는 본 연구에서 사용한 토글의 형상이다 [6]. 그림 3의 시스템이 두 개가 합쳐졌기 때문에 변위의 증폭은 (11)식의 2 배가 되며, 최종적으로 구조물의 층간 변위와 감쇠기의 변위는 층간변위의 크기가 작은 경우에는 다음 관계식을 가진다.

$$\Delta_{Jr} = \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \Delta_o \cos\varphi \quad (12)$$

그림 6은 선형 변위증폭비, 비선형 변위증폭비, 그리고 비선형 속도증폭비를 나타낸 것이고, 그림 7은 토글의 사이각  $\theta$ 와 가새의 대각  $\varphi$ 에 따른 선형증폭비의 변화를 보여준다.

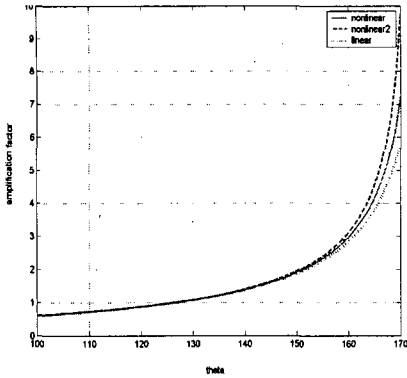


그림 6.  $\theta$  에 따른 증폭계수 변화율

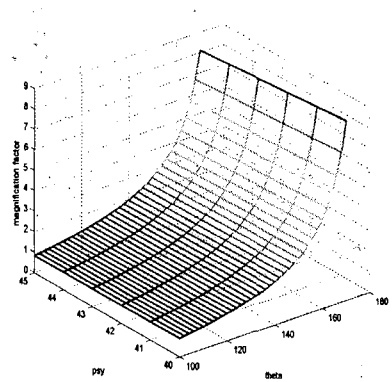


그림 7.  $\theta$  와  $\varphi$  에 따른 증폭계수 변화율

## 4. 실험

### 4.1. 가새시스템

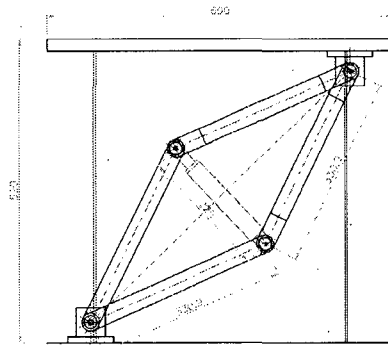
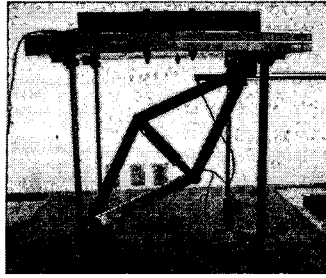
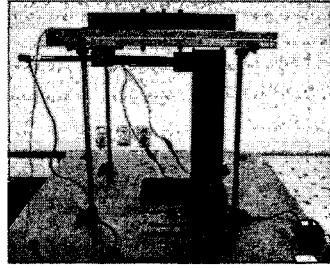


그림 8 토글시스템 설계상세

그림 8 은 본 연구에서 사용한 토글시스템의 설계도면이다. 감쇠기와 연결되는 부분과 구조물과 연결되는 부분은 모두 힌지로 되어있고, 가새장치와 구조물 그리고 감쇠기를 연결할 때 마찰력을 발생시키지 않게 하기 위하여 베어링치리를 하였다. 장치를 구성하였을 때 마찰력으로 인한 불규칙 거동은 없었으며 실험을 통해 구조물의 고유진동수의 변화를 알아본 결과 가새시스템의 무게로 인한 약간의 진동수 이동현상만 있을 뿐 전혀 시스템의 특성에는 영향을 끼치지 않았다. 본 실험에 쓰인 토글-가새시스템의 증폭비는 (12)식에 나타낸 것과 같이 그 변위가 미세한 경우, 토글의 사이각( $\theta = 140.25^\circ$ ),과 대각가새와 층간의 사이각( $\varphi = 43^\circ$ )에 의하여 2.0231 이 되고 층간변형이 커질수록  $\theta$ 가 커지게 되므로 증폭비는 더 커진다. 실제로 본 실험구조물의 기하학적 조건상 2cm 변형이 일어났을 때 MR 댐퍼의 변형은 4.5cm 이상이 된다. 따라서, 쉘브론 타입의 비증폭 가새시스템과의 제어효과의 차이를 기대할 수 있다. 그림 9(a)는 토글가새의 실제 설치형상을, 그림 9(b)는 레퍼런스 윌을 사용하여 쉘브론형태의 가새시스템과 같은 변위증폭비를 가지는 시스템의 설치형상을 보여준다.



(a) 토글가새



(b) 웨브론타입

그림 9 단자유도 시스템 (중폭시스템과 비중폭시스템)

## 4.2. 실험결과

3장에서 예측한 중폭메커니즘의 효과를 비교하기 위하여 토글 시스템과 웨브론타입의 시스템의 단자유도 실험을 수행하였다. 그림 10은 0.2g의 가속도 백색잡음 하중을 주었을 때 측정된 토글가새의 전달함수와 웨브론타입 가새의 전달함수이다. Passive on 상태일 때는 충분한 제어력을 발휘하므로 중폭시스템을 사용하지 않더라도 제어효과가 좋다. 그러나 passive off 상태일 때는 토글가새시스템의 제어효과가 더 좋을 변위, 가속도 전달함수를 통하여 알 수 있고 그림 11의 시간이력에서도 그 효과를 확인할 수 있다. 표 1은 변위와 가속도시간이력의 최대값 및 표준편차를 표시한 것이다.

표 1. 변위, 가속도의 최대값과 표준편차

	비제어	Passive off		Passive on	
		웨브론	토글	웨브론	토글
최대변위	16.7708	13.3390	13.2994	8.4344	7.8817
변위표준편차	5.0744	3.3257	2.6594	1.0442	0.7810
최대가속도	0.4052	0.2763	0.2282	0.1210	0.1038
가속도표준편차	0.1236	0.0806	0.0636	0.0317	0.0346

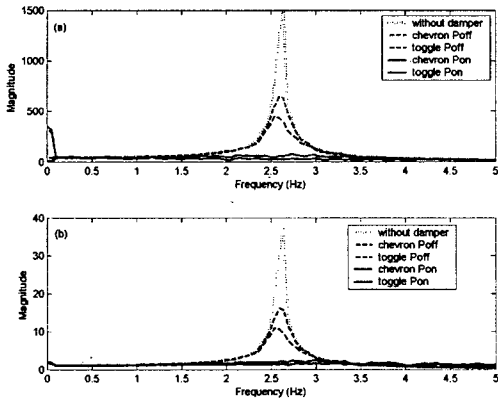


그림 10 (a) 변위전달함수 (b) 가속도전달함수

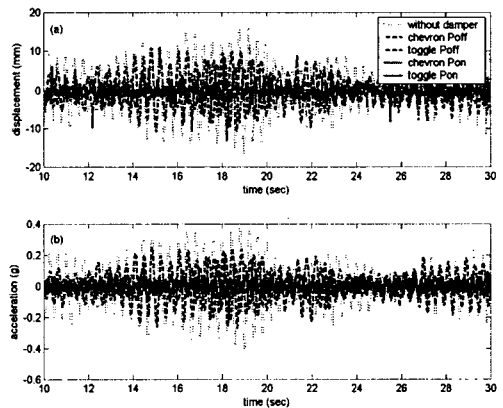


그림 11 (a) 변위시간이력 (b) 가속도 시간이력

## 5. 결 론

본 연구에서는 토글 시스템의 지진응답제어 효과를 검증하기 위하여 소형 MR 감쇠기를 진동대용 단자유도 구조물에 설치하였을 때 일반 가새시스템과 토글시스템의 시간이력과 전달함수, 그리고 각 시스템에서의 최대응답과 표준편차를 비교 분석하였다. 진동대 실험 수행에 앞서 가새시스템에 적용할 MR 감쇠기의 동적 모델을 고찰하고 실험을 통하여 소형 MR 감쇠기의 성능을 평가하고 변위증폭 시스템인 토글시스템의 형상에 따른 증폭메커니즘을 분석하였다. 실험결과는 제한된 용량의 감쇠기 성능을 토글시스템을 사용하여 향상시킬 수 있음을 보여준다.

## 6. 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2003-000-11584-0)지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

## 7. 참고문헌

1. Housner GW, Bergman LA, Caughey TK, Chassiakos AG, Claus RO, Masri SF, Skelton RE, Soong TT, Spencer BF Jr., Yao JTP, "Special issue structural control: past, present, and future", *Journal of Engineering Mechanics* Vol.123, 1997, pp.897-971.
2. 황재승, 이상현, 송진규, 홍성목, "토글-회전관성댐퍼를 이용한 구조물의 성능개선", *대한건축학회 학술 발표논문집*, Vol.23, 2003, pp.47-50.
3. S. J. Dyke, B. F. Spencer Jr., M. K. Sain and J. D. Carlson, "Seismic Response Reduction Using Magnetorheological Dampers", *Proceedings of the IFAC World Congress*, Vol. 1, pp. 145-150, 1996.
4. H. G. Lee, K. G. Sung, S. B. Choi, K. W. Min and S. H. Lee, "Vibration Control of a Multy-story Structure Featuring a Semi-active Double-rod MR Damper ", *ER Fluids and MR Suspensions*, Beijing, China, August 29-September 3, 2004.
5. Yang G, "Large - scale magnetorheological Fluid Damper for Vibration Mitigation: Modeling, Testing and Control", *Ph.D dissertation*, University of Notre Dame, Indiana, 2001
6. 강성덕, 홍성목, 황재승, 주석준, 박지훈, 이상현, "준능동제어장치를 이용한 구조물의 진동제어", *대한건축학회 학술발표논문집*, Vol.17, 1997, pp.413-416.