

# 자기유변유체 감쇠기에 기반한 스마트 수동 감쇠 시스템의 성능 평가

## Performance Verification of Smart Passive Damping System using MR damper

조 상 원\*                  장 지 은\*\*                  윤 우 현\*\*\*                  이 인 원\*\*\*\*  
Cho, Sang-Won              Jang, Ji-Eun                  Yoon, Woo-Hyun              Lee, In-Won

---

### ABSTRACT

MR damper is one of the most promising control devices for civil engineering applications to earthquake hazard mitigation. However, a control system including a power supply, controller, and sensors is required to maximize the performance of the MR damper and this complicated control system is not effective to most of large civil structures. This paper proposes and experimentally verified a smart passive damping system using MR(Magnetorheological) dampers by introducing electromagnetic induction(EMI) system as an external power source to MR damper. It is easy to build up and maintain EMI system, because it does not require any control system such as a power supply, controller, and sensors. Numerical simulations using experimental model of EMI system are carried to verify the effectiveness of the proposed EMI system. The performances of smart passive damping system are compared with those of passive and semiactive MR dampers.

---

### 1. 서 론

자기유변유체(MR) 감쇠기는 최근에 각광 받는 제어장치로써, 1990년대 B.F.Spencer 교수가 토목분야에 MR 감쇠기를 도입한 이래로 활발히 연구되고 있다. 자기유변유체 감쇠기는 배터리와 같은 소규모 전력을 사용하고, 이에 따른 비상시의 신뢰성, 그리고 상대적으로 저렴한 제작단가 등의 장점들 때문에 토목구조물에 사용하기에 적당하다. 이러한 자기유변유체 감쇠기의 성능을 극대화 하기 위하여 반능동 제어 시스템이 도입되었고 이에 따른 다양한 반능동 제어 알고리즘들이 제안되었다. 그러나 반능동 제어 시스템은 자기유변유체 감쇠기에 전달할 입력전압을 결정하기 위하여 복잡한 제어기와 계측장비를 필요로 하기 때문에 대형의 구조물이나 극한 환경에 설치된 구조물에는 적용하기 힘들다.

---

\* BLWTL, University of Western Ontario, Post Doctoral Fellowship

\*\* 한국과학기술원 건설및환경공학과 위촉연구원

\*\*\* 경원대학교, 산업환경대학원, 부교수

\*\*\*\* 한국과학기술원 건설및환경공학과 교수

본 연구진은 전자기유도(Electromagnetic Induction, EMI) 시스템을 도입한 바 있다. 전자기유도 시스템은 영구자석과 유도코일로 이루어져있으며 Faraday의 전자기 유도 법칙을 따른다. 외부하중에 의하여 구조물에 변형이 발생되면 전자기 유도 시스템의 회로와 전자기장의 상대운동에 의해 생긴 유도전류가 자기유변유체 감쇠기에 공급되어 감쇠 특성을 변화시킴으로써 효과적으로 구조물의 변형을 제어하게 된다. 이러한 전자기유도 시스템은 설치와 유지관리가 용이하고 복잡한 설계과정을 필요로 하지 않는 장점을 갖는다. 본 연구에서는 실험을 통하여 이러한 스마트 수동 감쇠 시스템이 실제 토목구조물에 적용시킬 수 있음을 보이고, 실험을 통해 얻어진 EMI시스템의 모델을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 또한 그 성능을 수동 감쇠 시스템과 반능동 제어 시스템의 성능과 비교 분석하였다

## 2. EMI 시스템을 구비한 자기유변유체 감쇠기

자기유변유체 감쇠기는 감쇠기 내부에 장착된 전자석에 전류를 가해서 자기장을 형성시켜 자기유변유체의 점성 특성을 변화시키는 과정을 통해 효율적으로 구조물의 진동을 감쇠시키는 장치이다. 따라서 자기유변유체 감쇠기를 이용하여 구조물의 응답을 효과적으로 감쇠시키기 위해서는 전원, 제어기, 그리고 센서들로 이루어진 제어시스템이 필요하다. 그러나 이러한 복잡한 제어시스템은 큰 규모의 토목구조물에 적용하기 어려우므로 그림 1과 같이 전자기유도법칙에 의해 진동에너지를 전기에너지로 변환시키는 EMI 시스템을 자기유변유체 감쇠기에 장착하여 제어시스템과 외부 전원을 대신하도록 하였다.

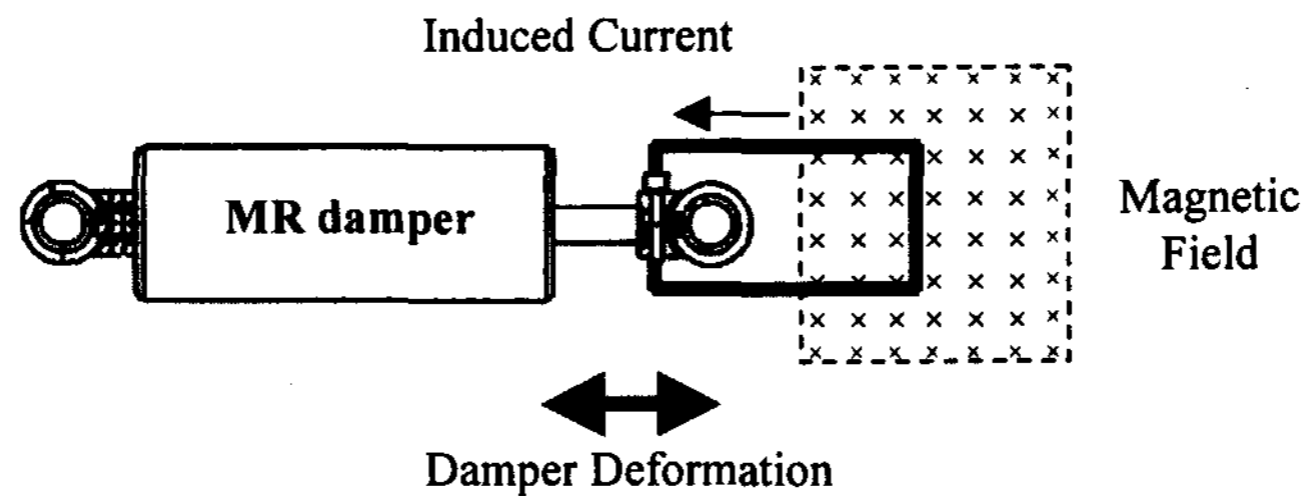


그림 1. EMI 시스템을 구비한 자기유변유체 감쇠기의 개략도

EMI 시스템은 영구자석과 유도 코일로 구성되며 식 (1)과 같은 패러데이의 전자기유도법칙을 따른다.

$$\varepsilon = -n \frac{d\Phi_B}{dt} = -n \times B \frac{dA}{dt} \quad (1)$$

이때,  $\varepsilon$ 는 유도 기전력,  $n$ 은 코일이 감긴 횟수,  $\Phi_B$ 는 Magnetic Flux,  $B$ 는 자기장의 세기,  $A$ 는 자기장 내부에 위치한 코일의 면적이다.

따라서 EMI 시스템에서 생성되는 전기에너지는 영구자석의 세기 그리고 솔레노이드 코일의 감긴 횟수와 코일의 크기 등을 통하여 조절할 수 있고, 자기유변유체 감쇠기가 설치된 지점의 구조물의 변형 속도에 비례하여 자기유변유체 감쇠기의 점성을 증가시킨다.

EMI 시스템을 자기유변유체 감쇠기에 적용할 수 있음을 보이기 위하여 그림 2와 같이

영구자석과 솔레노이드 코일로 EMI 시스템을 구성한 후, 그림 3과 같이 EMI 시스템으로부터 생성된 유도 전류가 자기유변유체 감쇠기에 공급되어 감쇠기의 감쇠 특성을 변화시키도록 하였다. 자기유변유체 감쇠기와 EMI 시스템이 장착된 양 지점 사이의 거리가 변하면 EMI 시스템의 유도전선에 유도전류가 흐르게 되고 코일에 연결된 전선을 통하여 자기유변유체 감쇠기에 전달 되어 감쇠기 내부에 자기장을 형성하게 된다.

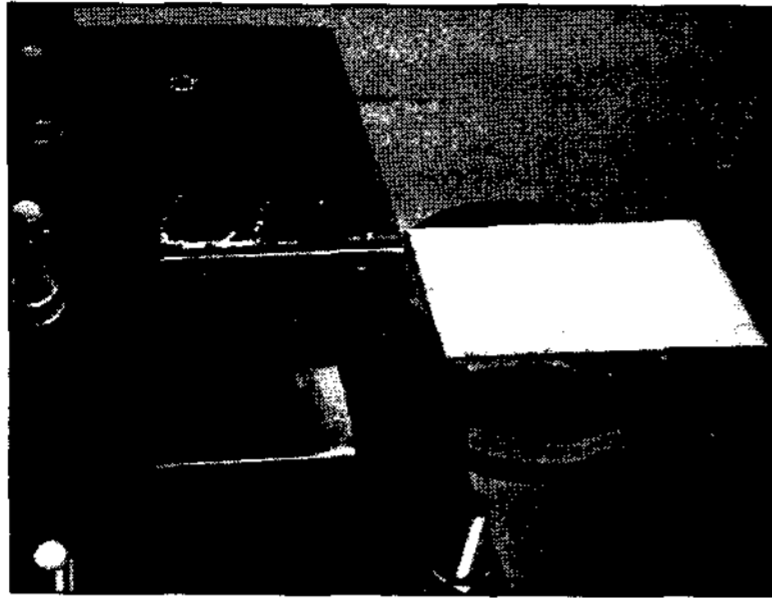


그림 2. EMI 시스템

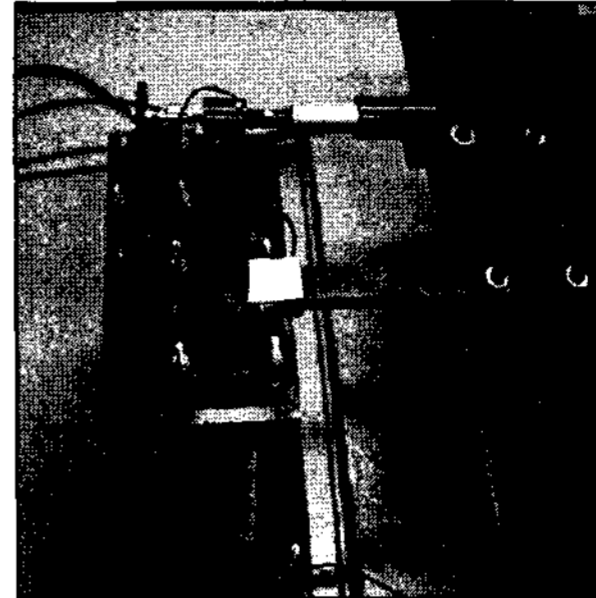


그림 3. EMI 시스템을 구비한 자기유변유체 감쇠기

그림 4 는 진동대를 사용하여 EMI 시스템과 자기유변유체 감쇠기에 임의의 변형을 유발하였을 때 측정된 유도 기전력과 패러데이 법칙을 통하여 계산한 유도 기전력을 표시한 그래프로 측정된 값과 예측한 값이 서로 잘 일치한다. 또한 유도기전력이 최대 4V 까지 생성되어 자기유변유체 감쇠기에 적용시키기 적당함을 알 수 있다.

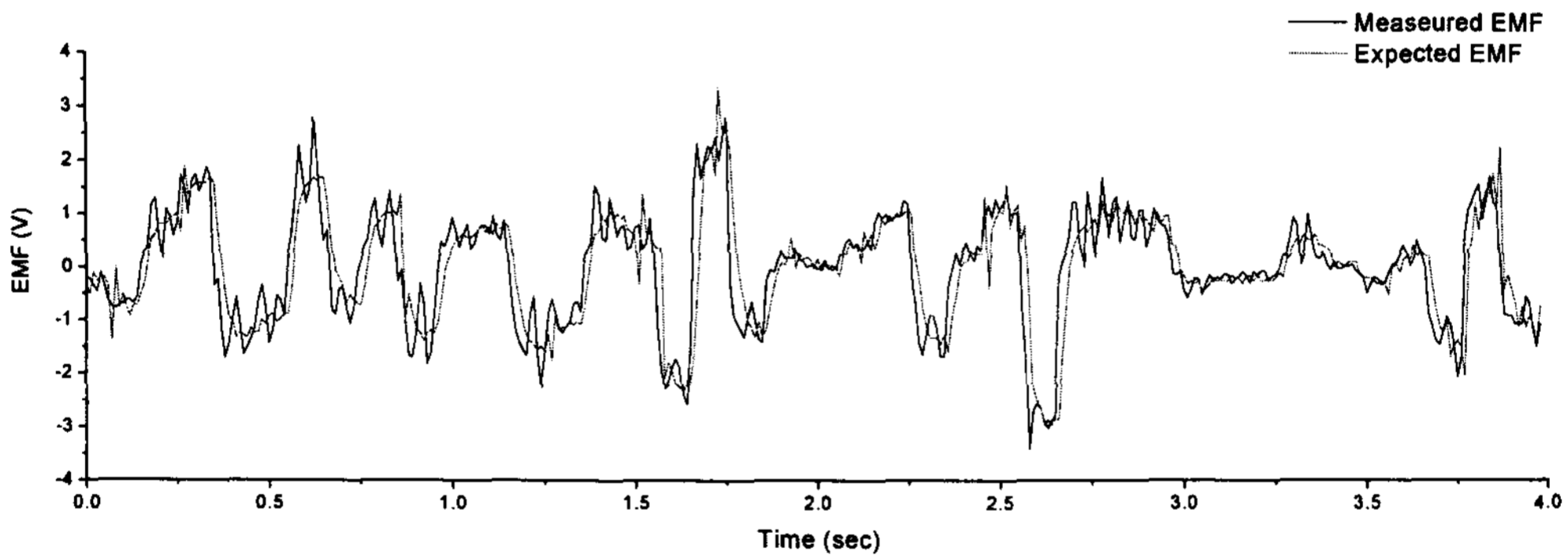


그림 4. 임의 변형에서의 EMI 시스템의 유도 기전력

### 3. 스마트 수동 감쇠 시스템의 성능 평가

#### 3.1 대상 구조물과 자기유변유체 감쇠기

EMI 시스템의 성능을 비교 평가하기 위하여 Jansen 등(2000)이 수치해석에 사용하였던 그림 5 와 같은 6 층짜리 전단빌딩을 대상으로 수치해석을 수행하였다. 각 층의 질량은  $0.227 N/(cm/s^2)$ , 각 층의 강성은  $297 N/cm$ , 각 모달 감쇠비는 0.5% 이며, 이 빌딩의 1 층과 2 층 사이와 2 층과 3 층 사이에 각각 한 개의 자기유변유체 감쇠기가 설치되어 있다.

자기유변유체 감쇠기의 최대 감쇠력은 24 N, 입력 최대 전압은 5V 이며, 식 (2), (3), (4), (5)에 의하여 감쇠력이 결정된다.

$$f = c_0 \dot{x} + \alpha z \quad (2)$$

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

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_b \quad c_0 = c_{0a} + c_{0b} u \quad (4)$$

$$\dot{u} = -\eta(u - v) \quad (5)$$

여기서,  $c_{0a}, c_{0b}, \alpha_a, \alpha_b, n, \gamma, \beta$ , 그리고  $A$ 는 감쇠기의 특성을 나타내는 상수로써 그 값은 표 1 과 같다.

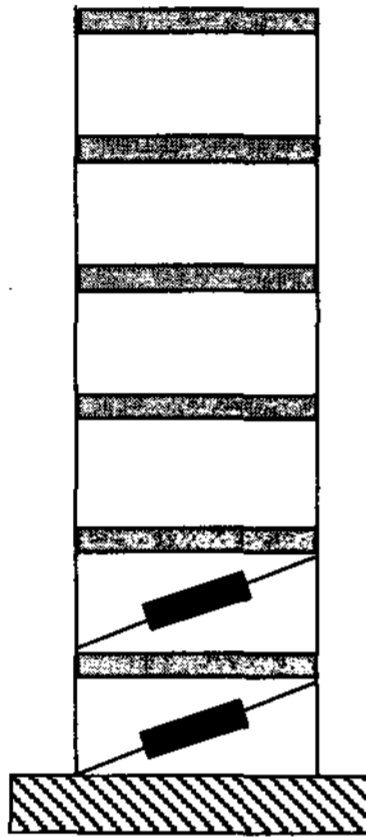


그림 5.6 층 전단 빌딩

표 1. 자기유변유체 감쇠기 상수

항 목	상 수 값	항 목	상 수 값
$\gamma$	$1.3 \times 10^5$	$c_{0b}$	125
$n$	1	$\alpha_a$	70
$\beta$	$1.3 \times 10^5$	$\alpha_b$	700
$A$	200	$\eta$	70
$c_{0a}$	50		

### 3.2 스마트 수동 감쇠 시스템의 설계

패러데이의 법칙에 따라 유도되는 기전력은 식 (6)과 같이 코일의 감긴 횟수와 자기장 세기에 비례한다. 이 두 값은 설계에 따라 임의로 변화시킬 수 있으므로 감긴 횟수와 자기장의 세기의 곱을  $K_{emf}$ 로 지정하여  $K_{emf}$ 를 변화시킴으로써 EMI 시스템의 성능을 변화시킨다.

$$\varepsilon = -n \frac{d\Phi_B}{dt} = -n \times B \frac{dA}{dt} = -K_{emf} \frac{dA}{dt} \quad (6)$$

스마트 수동 감쇠 시스템의 성능을 극대화 하기 위하여 수치해석을 통하여 최적의 EMI 시스템을 설계한다. EMI 시스템의 설계를 위하여 본 연구에서는 대상 구조물에 실측값의 10%에 해당하는 1940 El Centrol 지진 하중을 가하여 최대 변위, 최대 층간 변위, 최대 가속도, 최대 감쇠력의 값을 구하고, 최대 변위, 최대 층간 변위, 최대 가속도 값들은 비제어시의 최대값으로, 그리고 최대 감쇠력은 구조물의 총 질량으로 각각 정규화한  $J_1, J_2, J_3, J_4$ 를 평가기준으로 사용하였다.

$$J_1 = \max_{t,i} \left( \frac{|x_i(t)|}{x_{\max}} \right) \quad (7)$$

$$J_2 = \max_{t,i} \left( \frac{|d_i(t)|}{d_{\max}} \right) \quad (8)$$

$$J_3 = \max_{t,i} \left( \frac{|\ddot{x}_i(t)|}{\ddot{x}_{\max}} \right) \quad (9)$$

$$J_4 = \max_{t,i} \left( \frac{|f_i(t)|}{W} \right) \quad (10)$$

이때,  $x_i$ 는 지지층에 대한  $i$ 층의 상대 변위,  $x_{\max}$ 는 비제어시의 최대 변위,  $d_i$ 는  $i$ 층의 층간 변위,  $d_{\max}$ 는 비제어시의 최대 층간 변위,  $\ddot{x}_i$ 는  $i$ 층의 가속도,  $\ddot{x}_{\max}$ 는 비제어시의 최대 가속도,  $f_i$ 는  $i$ 층의 감쇠력,  $W$ 는 구조물의 총 질량이며, 비제어시의 값들과 구조물의 총 질량은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_{\max} &= 1.313\text{cm} & d_{\max} &= 0.2943\text{cm} \\ \ddot{x}_{\max} &= 146.95\text{cm/s}^2 & W &= 1335\text{N} \end{aligned}$$

그림 6, 7, 8, 9는 각각  $K_{emf}$ 와  $J_1, J_2, J_3, J_4$ 의 관계를 나타내며 각 그래프에 근거하여 최적의  $K_{emf}$ 의 값을 산정할 수 있다. 그림 6과 그림 7로부터는  $K_{emf}$ 의 값이  $4V \cdot \text{sec/cm}$  이상인 범위에서는 최대 변위와 최대 층간 변위에 대하여 스마트 수동 감쇠 시스템이 최적의 성능을 발휘한다는 것을 알 수 있다. 이때, 그림 8에 근거하여 구조물의 최대 가속도를 가장 크게 감소시키는 최적의  $K_{emf}$ 의 값을  $4V \cdot \text{sec/cm}$ 로 선정할 수 있으며, 이때 최대 감쇠력은 감쇠기의 포화 감쇠력인  $24\text{N}$ 이다.

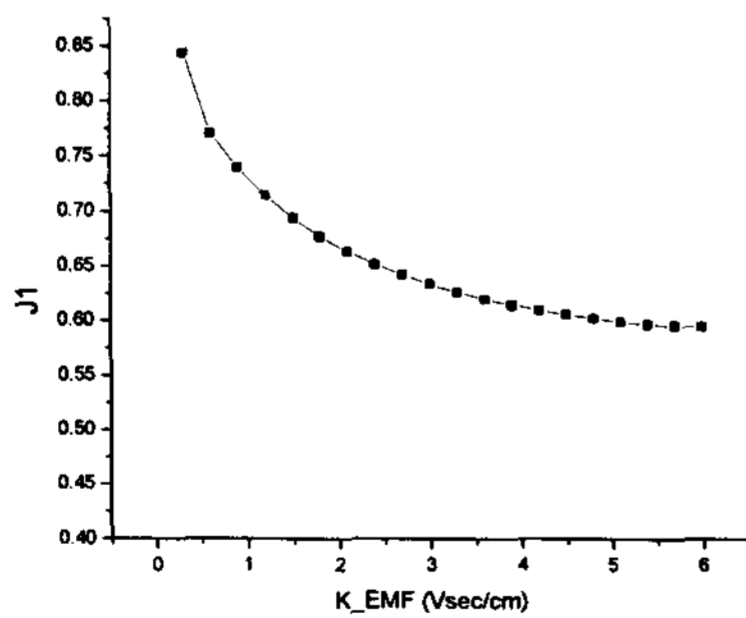


그림 6.  $K_{emf}$ 와  $J_1$ 의 관계

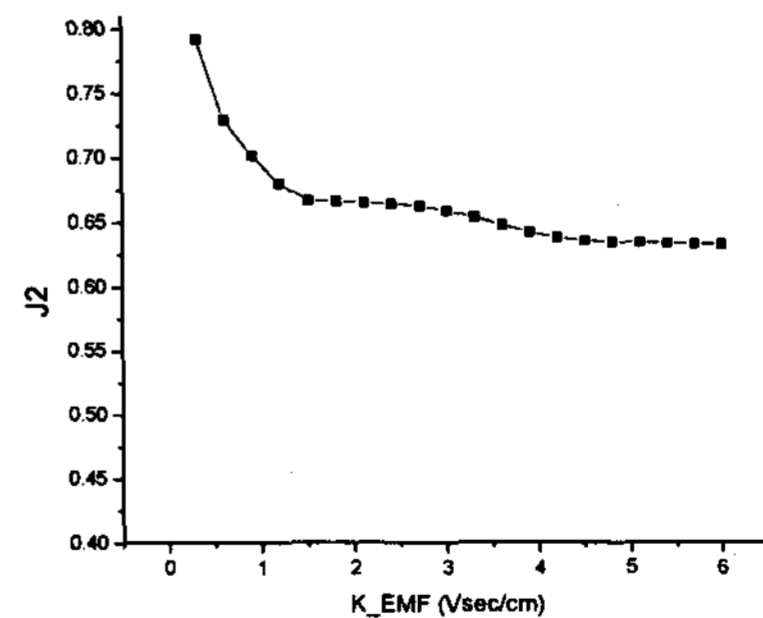


그림 7.  $K_{emf}$ 와  $J_2$ 의 관계

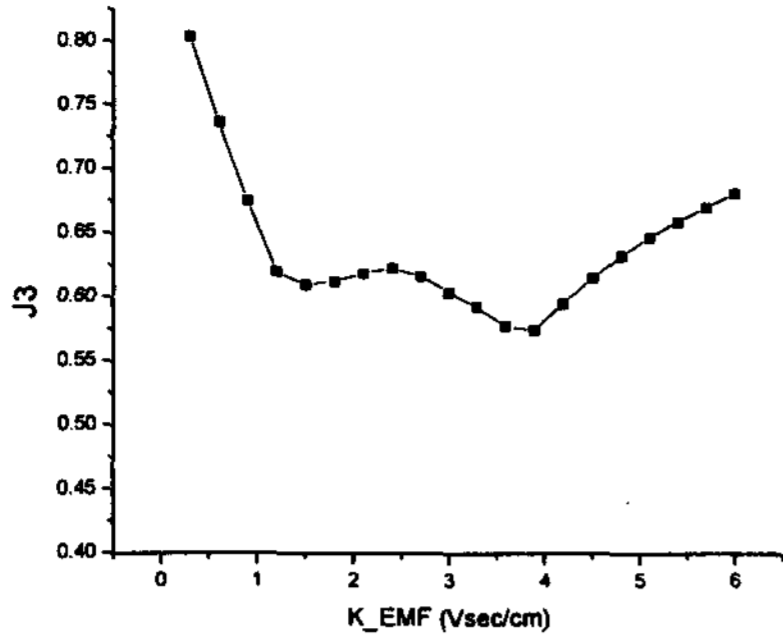


그림 8.  $K_{emf}$  와  $J_3$  의 관계

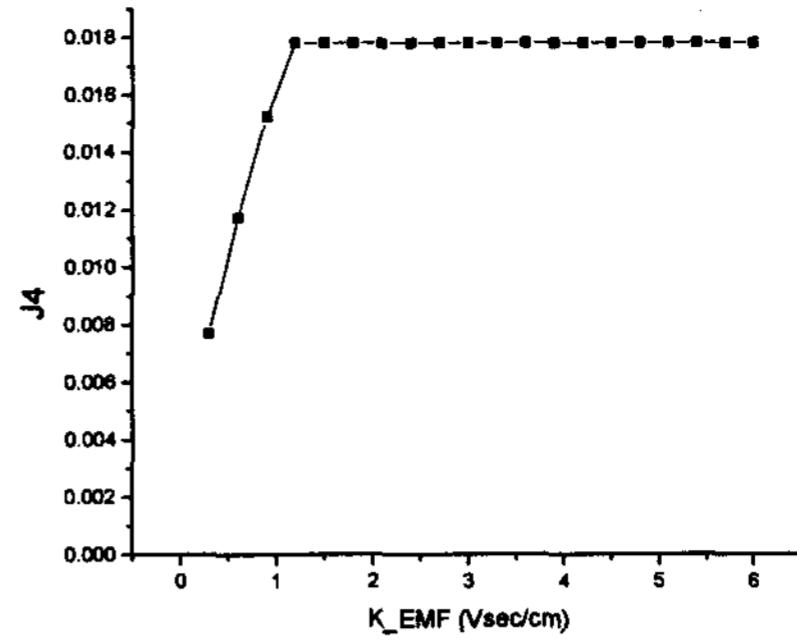


그림 9.  $K_{emf}$  와  $J_4$  의 관계

그림 10은 15초간의 지진하중과 지진하중으로 인하여 발생한 구조물의 변형에 기반하여 EMI 시스템에서 발생한 유도 기전력을 나타낸 그래프이다. EMI 시스템에서 발생한 유도 기전력은 구조물의 변형 속도와 비례하기 때문에 지진하중이 클수록 그로 인하여 발생된 전기에너지 양도 크다는 것을 확인할 수 있다. 이때 자기유변유체 감쇠기에 전달되는 유도 기전력의 최대 허용량은 자기유변유체 감쇠기의 최대 전압입력인 5V로 가정한다.

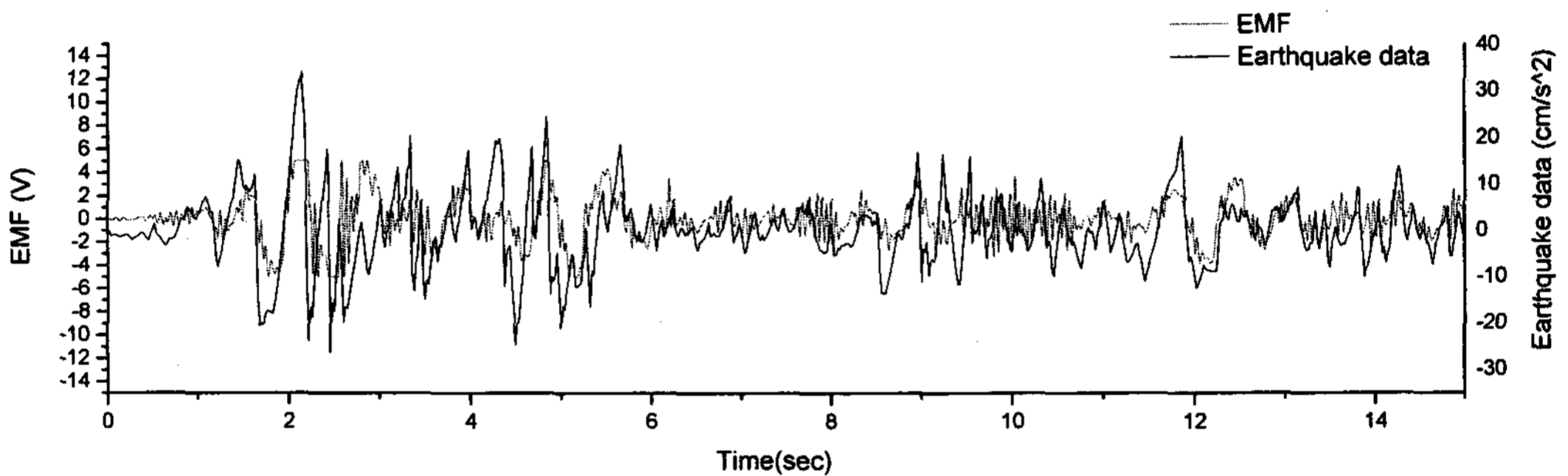


그림 10. EMI 시스템에서 발생한 유도 기전력

### 3.3 스마트 수동 감쇠 시스템의 성능 평가

앞에서 설계한 최적 스마트 수동 감쇠 시스템의 성능을 자기유변유체를 수동형태와 반능동 형태로 구동한 경우의 성능과 비교 평가하기 위하여 같은 대상 구조물에 대하여 수치해석을 수행하였다. 수동형태는 자기유변유체 감쇠기에 전압을 가하지 않는 Passive-off 와 최대 전압인 5V 를 가하는 Passive-on 의 두가지로 구동하고 반능동 형태는 Jansen 등(2000)에 의하여 효율적이라고 평가된 Clipped-optimal 제어 알고리즘을 사용한다. 이때 Clipped-optimal 제어 알고리즘은 각 층의 지지층에 대한 상대 변위에  $840cm^{-2}$  의 가중치를 준 경우(Moderate weighting)와 각 층의 상대 변위에  $9000cm^{-2}$  의 가중치를 준 경우(Hgher weighting)의 두가지 형태를 사용하였다.

표 2 는 각 제어 시스템을 적용한 경우 10%로 축소된 El Centrol 지진 하중에 의하여 유발된

구조물의 변형에 대한 각 평가 기준 값을 나타낸 도표이다. 최대 감쇠력은 Passive-on, Higher Weighting 을 가한 Clipped-optimal 제어기, 스마트 수동 감쇠 시스템에서 나타남을 알 수 있다.

표 2. El Centrol 지진 하중에 의하여 발생된 정규화된 최대 응답

Control strategy	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$
Passive-off	0.8603	0.8132	0.9034	0.0029
Passive-on	0.5077	0.7071	1.4087	0.0178
Clipped-optimal-higher	0.4230	0.5830	0.7861	0.0178
Clipped-optimal-moderate	0.6410	0.6653	0.6513	0.0110
Smart passive	0.6147	0.6423	0.5746	0.0178

그림 11 은 표 2 의 평가 기준 중  $J_1$ ,  $J_2$ ,  $J_3$  의 값을 각 제어 시스템에 대하여 나타낸 그래프이다. 그림 11 로부터 알 수 있듯이, 스마트 수동 시스템은 반능동 제어 시스템인 Clipped-optimal 제어 시스템과 유사한 성능을 보이면서도 구조물의 최대 가속도를 효과적으로 감소 시킴을 알 수 있다. 이에 반하여 Passive-off 시스템은 구조물의 변형을 거의 제어하지 못했고, Passive-on 시스템은 구조물의 변위는 크게 감소시켰으나, 구조물의 최대가속도를 크게 증가시켰다. 반능동 제어 시스템인 Clipped-optimal 제어 시스템은 큰 가중치를 준 경우는 변위를 크게 감소시켰으나 Passive-on 과 마찬가지로 최대 가속도를 크게 증가시키고, 작은 가중치를 준 경우는 복잡한 제어 시스템에도 불구하고 스마트 수동 감쇠 시스템보다 성능이 떨어졌다.

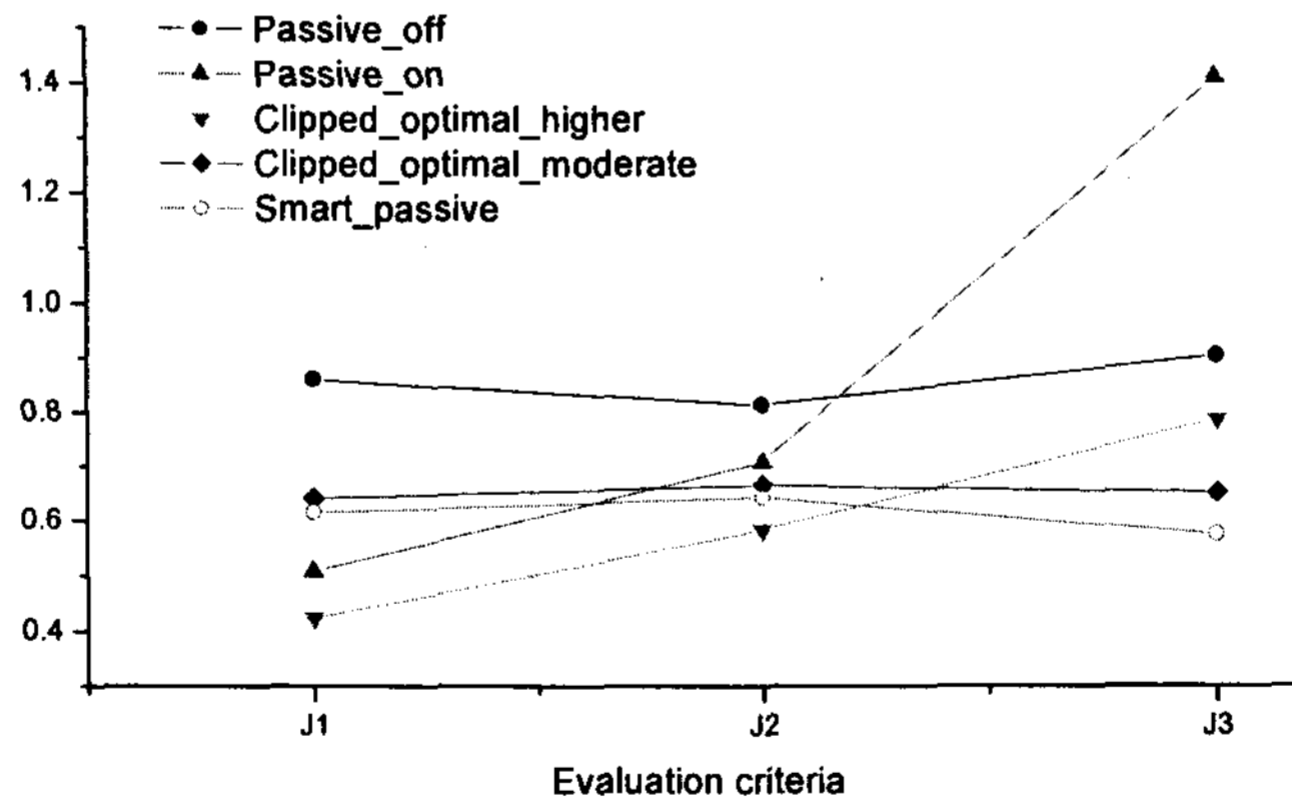


그림 11. 스마트 수동 감쇠 시스템의 성능 비교 평가

#### 4. 결론

본 연구에서는 자기유변유체 감쇠기를 이용한 스마트 수동 감쇠 시스템을 제안하고 실험을 통하여 토목구조물에 적용될 수 있음을 보였다. 스마트 수동 감쇠 시스템은 영구자석과 솔레노이드 코일로 구성되어 전자기유도에 의하여 기전력을 발생시키는 EMI 시스템과 EMI

시스템으로부터 전달된 전압에 따라 감쇠 특성이 변하는 자기유변유체 감쇠기로 구성되어 있다. 이러한 스마트 수동 감쇠시스템은 기존의 능동 제어기와 반능동 제어기의 단점으로 부각되었던 제어기의 전원과 센서 그리고 복잡한 제어기가 필요하지 않고, 제작과 유지관리가 용이하다는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서 제안된 스마트 수동 감쇠 시스템의 성능을 평가하기 위하여 수치해석을 통하여 수동 제어기와 반능동 제어기, 그리고 스마트 수동 감쇠 시스템을 각각 설치 하였을 때의 구조물의 지진 응답을 비교하였다. 그 결과 스마트 수동 감쇠 시스템은 수동형태로 구동한 자기유변유체 감쇠기보다 뛰어난 성능을 보였고, 반능동 제어 알고리즘의 하나인 Clipped-optimal 알고리즘을 사용한 제어기와도 유사한 성능을 보임을 확인하였다.

## 참고문헌

1. 조상원, 이현재, 오주원, 이인원, "MR 댐퍼를 기반으로 하는 스마트 수동제어 시스템," 2004년도 대한 토목학회 학술발표회, 평창, 2004. 10..
2. L. M. Jansen and S. J. Dyke, "Semiactive control strategies for MR dampers: comparative study," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.126, No.8, August, 2000
3. B. F. Spencer Jr., S. J. Dyke, M. K. Sain, and J. D. Carlson, "Phenomenological model of a magnetorheological damper," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 123, no. 3, pp. 230-238
4. 조상원, "Simple Control algorithms for MR dampers and smart passive control system," 박사학위논문, 한국과학기술원, 2004
5. Sang-Won Cho, Byoung-Wan Kim, Hyung-Jo Jung & In-Won Lee, "The Implementation of Modal Control for Seismic Structures using MR Damper," *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 131, No. 2, pp. 177-184, Feb 2005.