

MR댐퍼 기반의 스마트 수동제어 시스템

Smart Passive System Based on MR Damper

조상원* 조지성** 김춘호*** 이인원****
Cho, Sang-Won Jo, Ji-Seong Kim, Chun-Ho Lee, In-Won

국문요약

Magnetorheological(MR) 댐퍼는 반능동 제어장치로써, 능동 제어장치의 적응성과 수동 제어장치의 안정성을 동시에 갖는다. 또한 적은 전력소모, 안정성, 경제성 등의 장점이 있다. 그러나 사장교와 같은 대형 구조물에서, 여러 개의 MR댐퍼를 사용하는 경우에는, 각각의 댐퍼와 이에 연결되는 전원과 제어기, 센서, 그리고 이들 각각을 연결하는 연결망이 복잡해져, 전체 제어 시스템의 설치와 유지관리에 어려움이 있다.

본 연구에서는 위의 어려움을 해결하기 위해, 스마트 수동제어 시스템을 제안하였다. 스마트 수동제어 시스템은 MR댐퍼와 EMI시스템으로 구성되며, EMI시스템은 영구자석과 솔레노이드 코일로 이루어진다. EMI시스템은 MR댐퍼의 왕복운동에너지를 전기에너지로 변환하므로, 스마트 수동제어 시스템은 외부 전원 없이 외부하중에 따라 댐퍼의 점성을 바꾸는 적응성을 갖는다. 따라서 간단하고 효율적인 장치로써, 대형토목구조물에 적용 가능하다. 이의 확인을 위해 예제를 통한 수치해석을 수행하였으며, 스마트 수동제어 시스템이 강진에 대해서는 기존의 반능동 제어 MR댐퍼 시스템 보다 우수한 성능을 보인다.

주요어 : MR댐퍼, 반능동 제어, 수동 제어, Faraday의 전자기 유도법칙, 전자기유도 시스템

ABSTRACT

Magnetorheological(MR) dampers are one of the most promising semi active control devices, because they have advantages such as small power requirement, reliability, and low price to manufacture. To reduce the responses of structures with MR dampers, a control system including power supply, controller, and sensors is required. However, when a mount of MR dampers are used to a large scale civil structure such as cable stayed bridges, the control system becomes complex. Therefore, it is not easy to install and maintain the MR damper based control system.

To resolve above difficulties, This paper proposes a smart passive system that consists of a MR damper and an electromagnetic induction(EMI) system. According to the Faraday's law of induction, EMI system that is attached to the MR damper produces electric energy. The produced energy is supplied to the MR damper. Thus, the MR damper with EMI system does not require any power at all. Furthermore, the induced electric energy is proportional to external loads like earthquakes, which means the MR damper with EMI system is adaptable to external loads without any controller and corresponding sensors. Therefore, it is easy to build up and maintain the proposed smart passive system.

Key words : MR damper, semi active control, passive control, Faraday's law of induction, electromagnetic induction system

1. 서 론

자기유변유체댐퍼(Magnetorheological Fluid, 이하 MR 댐퍼)는 반능동 제어장치의 일종으로써, 자기유변유체(이하 MR유체)를 사용한다. MR유체는 어떤 유체(물, 실리콘 오일 등)내에 미세하고 자성을 띤 입자를 포함하여, 평상시에는 일반적인 점성 유체처럼 자유롭게 유동한다. 그러나 자기장이 가해지면 매우 짧은 시간에 입자들이 정렬하여 유체의 유동을 제한하고, 결과적으로 항복 강도를 발생시키는 제어 가능한 유체이다. 이러한 MR유체의 특성을 이용하여 제작된 MR댐퍼는 자기장을 통해 댐퍼내의 MR 유체를 제어하고 결과적으로 댐퍼의 감쇠특성을 변화시킨다. 1990년 중반에 미국 University of Illinois at Urbana

Champaign의 B. F. Spencer Jr. 교수가 MR댐퍼를 처음으로 토목분야에 소개한 이후로, 배터리 수준의 소규모 전력사용과 작동의 신뢰성 및 내구성 그리고 경제성 등의 이유로 활발하게 연구되고 있다. 최근에 MR댐퍼 제어시스템은 2001년도에 중국의 사장교인 Dongting Lake Bridge와 일본의 과학미래관에 진동제어를 위해 설치되었다. 이는 실험실 규모를 제외하고, 실제 구조물에 적용된 세계최초의 적용 예이다.⁽¹⁾

MR댐퍼를 사용하여 구조물의 진동을 줄이기 위해서는 배터리 규모의 외부 전원과, 구조물 응답을 측정하는 센서, 그리고 센서 신호로부터 제어 명령을 결정하는 제어기 등을 포함하는 제어시스템이 필요하다. 앞에서 말한 여러 장점에도 불구하고, 사장교의 케이블 진동제어나 초고층 빌딩의 진동제어를 위해 많은 수의 MR댐퍼를 사용할 경우, 전력공급 및 센서 그리고 제어기 등을 포함하는 제어시스템을 구축하고 유지 관리하는 것은 많은 노력을 필요로 한다.

따라서 본 논문에서는 기존 MR댐퍼의 제어시스템을

* 한국과학기술원 건설환경공학과 연수연구원, 공학박사
(대표지자:s.w.cho@kaist.ac.kr)

** 포스코건설 기술연구소 건설기술연구원, 공학박사

*** 중부대학교 건설환경공학과 교수, 공학박사

**** 정희원, 한국과학기술원 건설환경공학과 교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2005년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2004. 12. 15 / 심사종료일 : 2005. 1. 4)

대체하기 위하여, MR댐퍼와 전자기유도 시스템(Electromagnetic Induction System, 이하 EMI시스템)으로 구성된 스마트 수동제어 시스템을 제안하였다. EMI시스템은 솔레노이드 코일과 영구자석으로 구성되며, Faraday의 전자기 유도법칙⁽²⁾에 따라, MR댐퍼의 왕복운동을 전기에너지로 변환한다. 이렇게 생성된 전기에너지는 다시 MR댐퍼의 감쇠력을 변화시키는 전원으로 사용되므로, 외부 전원이 전혀 필요하지 않다. 따라서, EMI시스템을 부착한 MR댐퍼는 외부전원이 필요하지 않은 수동제어 시스템이다. 또한 외부하중의 강도에 따라 생성되는 전기에너지의 양이 다르기 때문에, 제어기나 센서 없이도 외부하중에 대한 적응성을 갖는다. 이러한 외부하중에 대한 적응성은 기존 수동제어 시스템의 단점을 극복할 수 있다. 따라서 EMI시스템을 부착한 MR댐퍼는 다른 수동제어 시스템의 단점을 극복한, 외부하중에 대한 적응성을 갖는 '스마트'한 장치이다. 그러므로, 본 연구에서 제안한 스마트 수동제어 시스템은 외부전원, 제어기, 그리고 센서가 없는 간단한 구조로 외부하중에 대한 적응성을 갖는다. 이는 스마트 수동제어 시스템의 가장 큰 장점이다.

EMI시스템에 관한 기존 기술으로써, 자동차 엔진 마운트의 진동제어를 위한 대한민국 특허(등록번호2000-004066)와 Electrorheological 댐퍼의 진동제어를 위한 일본 특허(등록번호 2-145337)가 있으며, 본 연구진의 토목구조물의 적용을 위한 대한민국 특허(등록번호 0416398)가 있다.

논문에서는 스마트 수동제어 시스템을 제안하고 토목구조물에 대한 적응성을 평가하였다. 스마트 수동제어 시스템의 성능을 검증하기 위해서, 먼저 EMI시스템의 설계변수 설정과정을 소개하고, 수치해석을 통해서, 기존 반동제어 알고리즘을 사용하는, MR댐퍼 시스템과의 효율성을 비교하였다. 이를 위해서 기존 MR댐퍼 시스템의 제어알고리즘은 최근에 활발하게 연구되고 있는 Clipped-Optimal 제어이론을 사용하였다.

2. 스마트 수동제어 시스템

스마트 수동제어 시스템에 앞서, 기존 MR댐퍼의 개념도를 그림 1에 나타내었다.

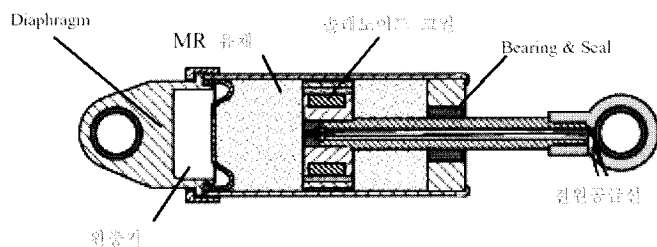


그림 1 MR댐퍼의 개념도

그림 1의 MR댐퍼는 미국 Lord Corporation社의 제품으로써, Dyke등이 성능시험을 위해 사용하였다.⁽³⁾ 피스톤이 늘어 났을 때, 댐퍼의 길이는 21.5cm이고, 실린더 지름은 3.8cm이다. 실린더는 피스톤과 전자석, 그리고 완충기(accumulator)와 50ml의 MR유체를 감싸고 있고, 댐퍼의 스트로크는 ± 2.5 cm이다. 그림 1에서, 피스톤 헤드 부분의 전자석에 외부로부터 전원이 공급되면 자기장이 발생한다. 측정된 입력하중 및 구조물의 응답에 따라 제어기에 의해 최대 2.25볼트까지 공급전원이 조절된다. 공급된 전원이 발생시킨 자기장에 의해 MR유체의 점성이 변하고, 결과적으로 MR댐퍼의 감쇠특성이 변한다. 따라서 MR댐퍼를 이용하여 구조물의 응답을 감소시키기 위해서는, 전원, 제어기, 그리고 센서로 이루어진 제어시스템이 필요하다. 따라서 사장교나 고층빌딩과 같은 대형 구조물에서, 여러 개의 MR댐퍼를 사용하는 경우에는, 각각의 댐퍼와 이에 연결되는 전원과 제어기, 센서, 그리고 이들 각각을 연결하는 연결망을 포함하는 제어시스템이 복잡해져, 제어 시스템의 설치와 유지관리에 어려움이 있다.

그림 2는 MR댐퍼를 기반으로 하는 스마트 수동제어 시스템의 개념도이다. 스마트 수동제어 시스템은 MR댐퍼와 EMI시스템으로 구성되며, EMI시스템은 다시 영구자석과 솔레노이드 코일로 구성된다. EMI시스템은 MR댐퍼의 피스톤 왕복운동에 의한 운동에너지를 Faraday의 전자기 유도법칙에 따라 전기에너지로 변환시킨다. 즉, 그림 2에서 영구자석과 코일2의 상대운동에 의해 유도된 전류는 코일1에 공급되어 자기장을 발생시킨다. 이 자기장에 의해, MR댐퍼의 점성이 변화하며, 결과적으로 MR댐퍼의 감쇠특성이 변한다. 발생하는 전기에너지는 식 (1)과 같이, Faraday의 법칙으로 나타낸다.

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (1)$$

여기서 ε 는 볼트의 단위를 갖는 유도기전력이고, N 은 코일의 회전 수, 그리고 Φ_B 는 자기 flux이다. 식 (1)에 있는 음의 부호는 유도기전력의 방향을 나타낸다. 식 (1)에서 자기 flux는 다음과 같이 정의된다.

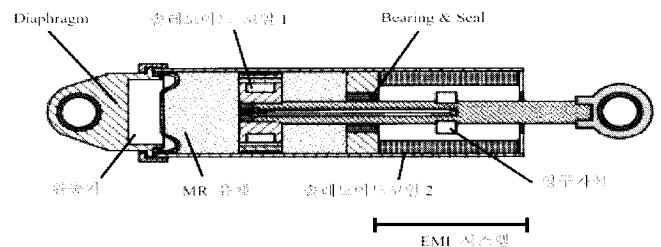


그림 2 스마트 수동제어 시스템의 개념도

$$d\Phi_B = \vec{A} \cdot d\vec{B} = AdB \cdot \cos\phi \quad (2)$$

여기서 \vec{B} 는 자기장, \vec{A} 는 단면적, 그리고 ϕ 는 \vec{B} 와 $d\vec{A}$ 의 사이각이다. 식 (2)를 이용하여, Faraday의 법칙을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt} = -N A \frac{dB}{dt} \quad (3)$$

식 (3)에 의하면, 단면적과 솔레노이드의 코일 회전수가 일정할 때, 유도기전력의 크기는 자기장의 변화속도에 비례한다. 자기장변화는 EMI시스템내의 영구자석과 솔레노이드 코일2, 사이의 상대변위에 의해 발생한다. 따라서, 강진과 같이 외부하중의 변화가 크고 심하면, 강한 유도기전력이 유도되며, 반대로 약진에서는 약한 기전력이 유도된다. 이와 같이 스마트 수동제어 시스템은 유도기전력에 의해 전원을 공급받으며, 공급되는 전원은 외부하중에 따라 변화하는 적응성을 갖는다. 따라서 스마트 수동제어 시스템은 외부전력을 필요로 하지 않으며, 이의 제어를 위한 센서와 제어기 없이 독립적으로 구조물의 응답을 감소시킬 수 있다.

스마트 수동제어 시스템의 실현 가능성을 가늠하기 위하여, 그림 1의 MR댐퍼를 대상으로, 유도가능한 최대기전력을 Faraday의 법칙으로부터 계산할 수 있다. EMI시스템에 사용되는 영구자석 자기장의 세기를 1.2 Tesla이라 가정하고, 댐퍼 피스톤 운동의 최대 속도를 9cm/sec (이 속도는 수치예제에 나타나 있는 비제어시 구조물의 응답 최대속도에 해당한다), 그리고 솔레노이드 코일의 회전수를 900이라 놓으면, 스트로크 5cm동안의 자기장 변화율은 2.16 Tesla/sec이다. 따라서 그림 1의 MR댐퍼에 앞에서 가정한 값과 같은 EMI시스템을 부착하면, Faraday의 법칙에 따라 최대 2.54V의 기전력이 유도된다. 그림 1의 MR댐퍼 제어를 위해 사용되는 최대전원이 2.25V임을 감안할 때, 유도기전력의 크기는 MR댐퍼를 작동시키기에 충분하다. 물론 유도기전력의 크기는 EMI시스템에 사용되는 영구자석의 크기와 솔레노이드 코일의

회전수를 변화시켜 조절이 가능하다.

3. 스마트 수동제어 시스템의 설계

3.1 MR댐퍼 모델

스마트 수동제어 시스템의 설계는 EMI시스템에 들어가는 영구자석의 세기와 솔레노이드 코일의 회전 수를 결정하는 것이다. 이를 위해서, MR댐퍼의 해석적인 모델이 필요하며, 본 연구에서는 그림 3과 같은 간단한 모델⁽⁴⁾을 사용하였다. 이 모델은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} f &= c_1 \dot{y} + k_1(x - x_0) \\ \dot{z} &= -\gamma |\dot{x} - \dot{y}| z |z|^{n-1} - \beta(\dot{x} - \dot{y}) |z|^n + A(\dot{x} - \dot{y}) \\ \dot{y} &= \frac{1}{(c_0 + c_1)} \{ \alpha z + c_0 \dot{x} + k_0(x - y) \} \end{aligned} \quad (4)$$

자기장에 따라 바뀌는 MR댐퍼의 특성을 나타내기 위해서, Spencer는 다음과 같은 식을 제안했다.

$$\begin{aligned} \alpha(u) &= \alpha_a + \alpha_b u \\ c_1(u) &= c_{1a} + c_{1b} u \\ c_0(u) &= c_{0a} + c_{0b} u \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 u 는 다음과 같은 일차 필터로부터 구한다.

$$\dot{u} = -\eta(u - \varepsilon) \quad (6)$$

식 (6)에서 ε 는 입력 전압을 나타내며, EMI시스템에서 유도되는 기전력에 해당한다. 이 절에서 사용된 모델의 여러 변수들은 공정한 비교를 위하여 참고문헌(4)와 동일한 값을 사용하였다.

3.2 EMI시스템의 설계

EMI시스템의 설계는 사용되는 구조물과 노출되는 외부 하중에 따라 다를 것이므로, 그림 4와 같은 예제 구조물에 대해 설계하였다. 그림 4의 예제구조물은 참고문헌

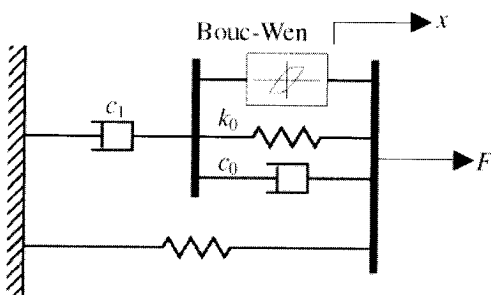


그림 3 MR 댐퍼 모델⁽⁴⁾

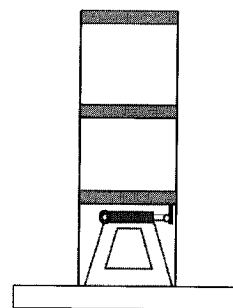


그림 4 예제 구조물

(4)에서 사용된 것과 동일하며, 스마트 수동제어 시스템의 성능검증 시에 기존 연구들과의 공정한 비교를 위해 사용하였다. 예제구조물의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\dot{z} = Az + Bf + E\ddot{x}_g \quad (7)$$

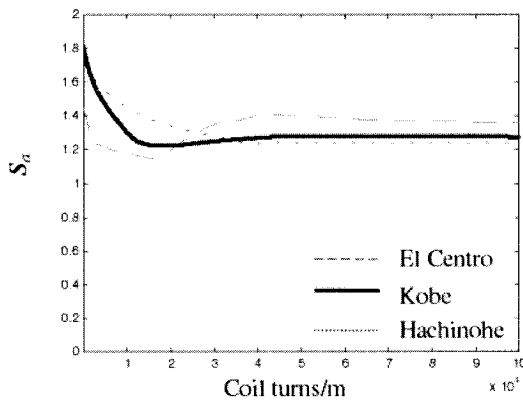
여기서 \ddot{x}_g 는 지반 가속도, f 는 MR댐퍼의 제어력, 그리고 z 는 상태벡터이며, 각각의 계수는 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}\Gamma \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} 0 \\ A \end{bmatrix}$$

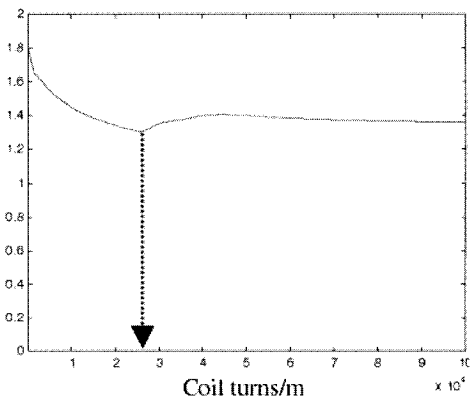
$$M = \begin{bmatrix} 98.3 & 0 & 0 \\ 0 & 98.3 & 0 \\ 0 & 0 & 98.3 \end{bmatrix} kg, \quad C = \begin{bmatrix} 175 & -50 & 0 \\ -50 & 100 & -50 \\ 0 & -50 & 50 \end{bmatrix} \frac{N \cdot sec}{m}$$

$$K = 10^5 \times \begin{bmatrix} 12.0 & -6.84 & 0 \\ -6.84 & 13.7 & -6.84 \\ 0 & -6.84 & 6.84 \end{bmatrix} \frac{N}{m}, \quad \Gamma = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

EMI시스템의 설계는 앞 절에서 설명했듯이, 영구자석의 세기와 솔레노이드 코일의 회전 수를 결정하는 것이다. 그러므로 EMI시스템의 성능을 발휘하기 위해서는 설계과정에서 EMI시스템이 사용되는 구조물에 적합하도록 솔레노이드 코일의 회전 수를 결정해야 한다. 본 연구에서는 편이를 위하여, 영구자석의 크기를 고정하고 코일의 회전 수를 결정하였으며, 두 가지 설계변수, 즉 각 층의 최대 가속도의 합에 해당하는 S_a 와 각 층의 최대 층간변위의 합에 해당하는 S_i 를 도입하였다. S_a 와 S_i 둘 모두 비제어시의 최대값으로 각각 정규화(normalize)하였다. 코일의 회전수를 결정하기 위하여, El Centro, Hachinohe, Kobe지진에 대해서, S_a 와 S_i 각각을 최대응답 접근법⁽⁵⁾으로 결정하였다. 그림 5(a)는 각 지진에 대한 S_a 의 변화를 나타내고, 그림 5(b)는 그림 5(a)의 최대 응답들의 포락선을 나타낸다. 그림 5(b)로부터, 화살표로 표시된, 포락선의 최저점에서의 코일 회전 수를 최적회전수라 할 수 있다. 그림 6은 설계변수 S_i 에 관한 것으로서, 내용은 그림 5와 동일하다. 따라서 그림 5와 그림 6으로부터, 예제 구조물에 적합한 솔레노이드 회전수에 대한 설계 값을 결정

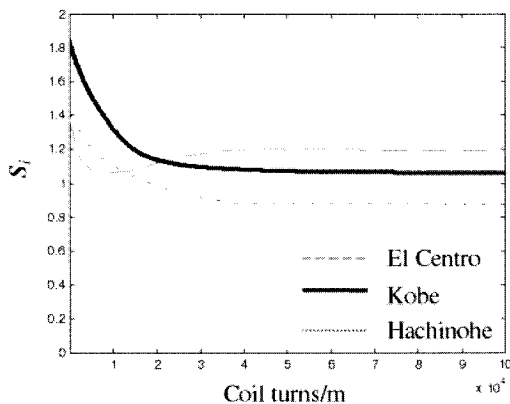


(a) 코일회전 수에 따른 설계변수Sa의 변화

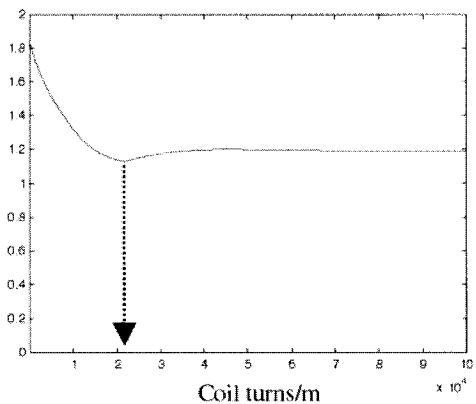


(b) 그림(a)의 최대값 포락선

그림 5 설계변수 Sa 에 대한 스마트 수동제어 시스템의 설계



(a) 코일회전 수에 따른 설계변수Si의 변화



(b) 그림(a)의 최대값 포락선

그림 6 설계변수 Si 에 대한 스마트 수동제어 시스템의 설계

할 수 있다. 결정된 슬레노이드 회전수는, 설계변수 S_a 로부터 2.16×10^4 turns/m, 설계변수 S_i 로부터 2.6×10^4 turns/m이다. 변수 S_a 로부터 설계된 스마트 수동제어 시스템을 SMA_{ac} , 변수 S_i 로부터 설계된 것을 SMA_{it} 로 표시한다.

성능의 평가를 위해서, Clipped-Optimal 알고리즘^{(6),(7)}을 사용하는 기존 반응동 MR댐퍼 제어시스템과 비교하였다. 이 과정에서 H_2/LQG 제어기를 사용하였으며, 지진을 stationary white noise로 고려하였고, 성능지수를 다음과 같이 선택하였다.

$$J = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} E \left[\int_0^{\tau} \{z^T Q z + f^T R f\} dt \right] \quad (9)$$

여기서 R 은 단위행렬이고, Q 는 응답가중행렬로써, 식 (12)와 같다.

$$Q = \begin{bmatrix} q_a I_{3 \times 3} & 0 \\ 0 & q_i I_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (10)$$

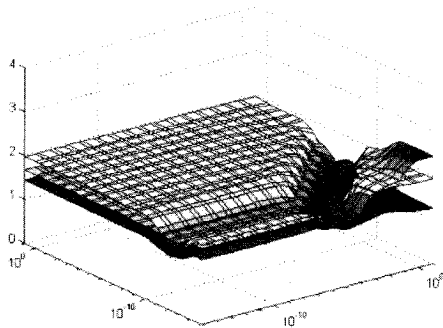
여기서 q_a 와 q_i 는 가중변수로써, 각 층의 가속도와 층간

변위에 대한 가중치를 부여한다. 가중변수를 결정하기 위해서, 스마트 수동제어 시스템에서와 같이 세 지진에 대한 최대응답 접근법을 사용하였다.

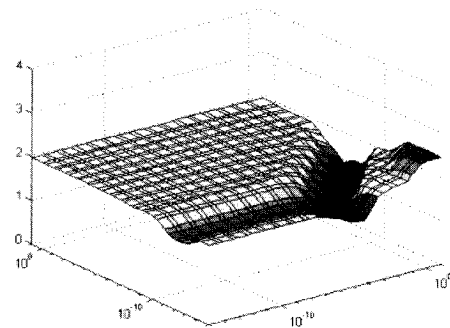
그림 7(a)는 가중변수의 증가에 따른, 설계변수 S_a 의 변화를 각각의 지진에 대해 삼차원으로 나타낸다. 그림 7(b)는 그림 7(a)의 최대 포락면이다. 그림 7(b)로부터, 포락면의 최저점을 가중변수로 결정한다. 그림 8은 설계변수 S_i 에 관한 그림으로써, 설계변수 S_a 와 동일한 설계과정을 갖는다. 이렇게 그림 7과 그림 8로부터 결정된 가중변수는 설계변수 S_a 에 대해 $q_a=5.0 \times 10^{13}$, $q_i=1.0 \times 10^5$, 설계변수 S_i 에 대해 $q_a=5.0 \times 10^{15}$, $q_i=5.0 \times 10^6$ 이다. 위와 같이 설계된 반응동 제어장치를 각각의 설계변수의 이름을 따라, 가속도 설계변수 S_a 에 대해서는 SMA_{ac} 그리고 층간변위 설계변수 S_i 에 대해서는 SMA_{it} 로 표시한다.

4. 수치예제

제안된 스마트 수동제어 시스템의 효율성을 검증하기 위해서, 예제를 통한 수치해석을 수행하였다. 그림 4의 예제구조물을 수치모델로 사용하였으며, 입력지진으로, 4개의 역사지진 - El Centro, Hachinohe, Kobe, Northridge 지진을 사용하였다. Northridge 지진은 설계단계에서는 포함되지 않았지만, 스마트 수동제어 시스템 및 반응동

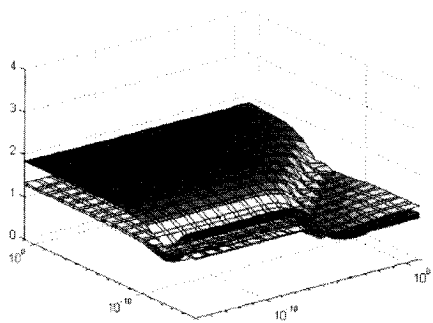


(a) 가중변수에 따른 설계변수 S_a 의 변화

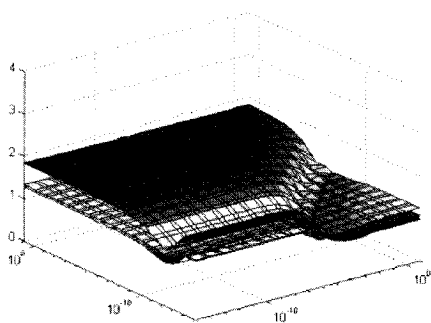


(b) 그림(a)의 최대값 포락면

그림 7 설계변수 S_a 를 이용한 반응동 제어시스템의 설계



(a) 가중변수에 따른 설계변수 S_i 의 변화

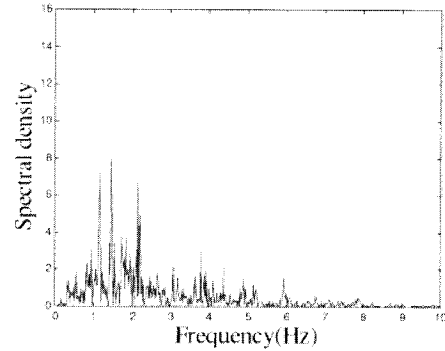
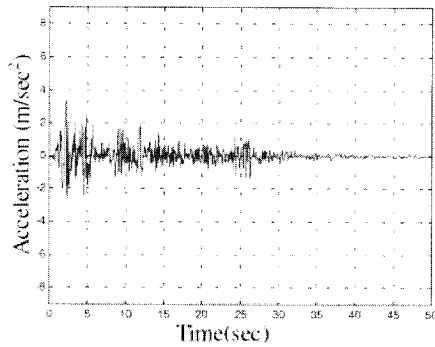


(b) 그림(a)의 최대값 포락면

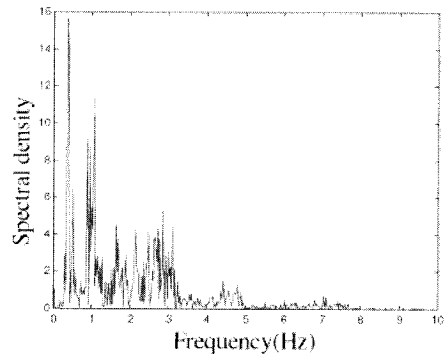
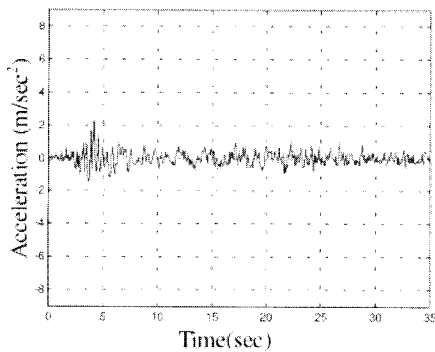
그림 8 설계변수 S_i 를 이용한 반응동 제어시스템의 설계

제어시스템 설계의 유효성을 검증하기 위하여 추가하였으며, 각 지진의 시간이력곡선과 Power spectral density를 그림 9에 표시하였다. 각 지진에 대한 제안된 스마트 수동제어 시스템의 수치해석결과를 반능동 제어시스템의

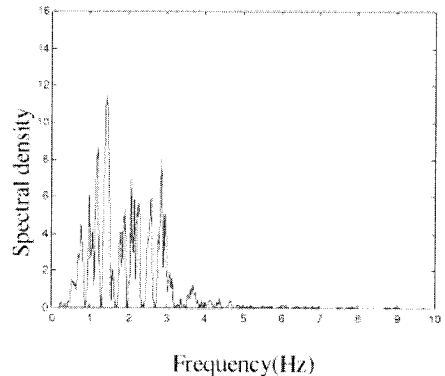
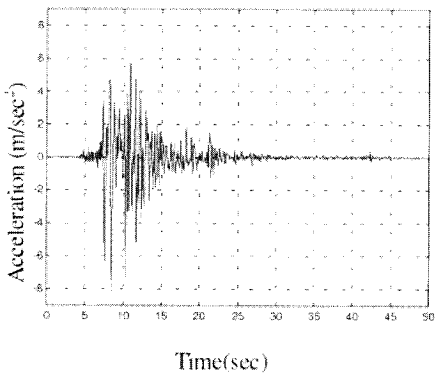
결과와 비교하였다. 비교에 사용된 평가기준은 Spencer가 1997년에 Benchmark문제를 위해 제안한 기준⁽⁸⁾을 사용하였다. 평가기준은 각각, 정규화된 최대 가속도, 그리고 층간변위로써 식 (13)과 같다.



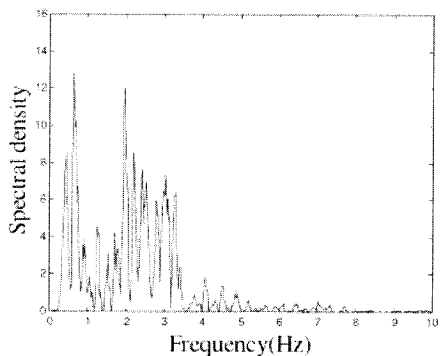
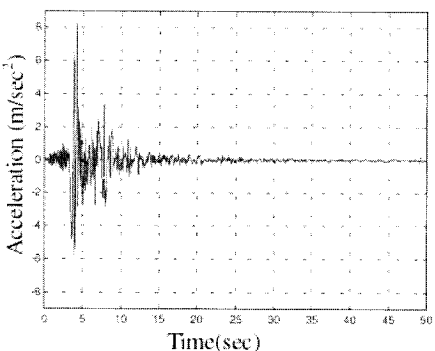
(a) El Centro 지진



(b) Hachinohe 지진



(c) Kobe 지진



(d) Northridge 지진

그림 9 다양한 지진의 시간이력곡선 및 Power spectral density

$$J_1 = \max_{t,i} \left(\frac{|\ddot{x}_{ai}(t)|}{\ddot{x}_a^{\max}} \right), J_2 = \max_{t,i} \left(\frac{|d_i(t)|}{d_n^{\max}} \right) \quad (13)$$

여기서, $X_{ai}(t)$ 는 i 층에서의 절대가속도, X_n^{\max} 는 비제어시의 최대 가속도를 나타낸다. 또한 $d_i(t)$ 는 각 층에서의 층간변위, d_n^{\max} 는 비제어시의 최대 층간변위이다.

4개의 역사지진에 대한 스마트 수동제어 시스템의 응답곡선을 그림 10에 나타내었다. 그림 10는 각각의 지진에 대해, MR댐퍼가 설치되어 있는 1층에서의 응답속도와 그에 따라서 EMI시스템에서 유도되는 기전력을 보여준다. 그림에서 보듯이, El Centro와 Hachinohe 지진 같은 중진보다 Kobe와 Northridge 지진과 같은 강진에서 더 많은 기전력이 유도되었다. 최대 유도기전력은 El Centro, Hachinohe, Kobe, Northridge 지진에 대해서 각각 1.6V, 0.9V, 2.25V, 2.25V이다. 단, MR댐퍼의 용량을 고려하여 최대 유도기전력을 2.25V로 제한하였으며, 이것은 반능동 제어시스템과의 공정한 비교를 위한 조치이다. 그림 10에서도 볼 수 있듯이, 스마트 수동제어 시스템의 MR댐퍼를 위한 입력전원은 연속적으로 변하는데 비하여, 기존 반능동 제어시스템의 입력전원은 최대 입력

전원 또는 0V의 비제어 모드값을 갖는다.

표 1은 각 경우에 대한 각층에서의 가속도와 층간변위를 비제어시의 응답으로 정규화하여 나타내었다. 회색으로 표시된 칸은 각 층에서의 최소값을 나타낸다. El Centro와 Hachinohe 지진과 같은 중간규모의 지진에 대해서는 Clipped-Optimal 제어기를 사용하는 기존 반능동 제어시스템이 우수한 성능을 보인다. 스마트 수동제어 시스템은 1층에서 최소값을 갖는다. 중진에서는 전체적으로 반능동 제어시스템이 우수하나, 스마트 수동제어 시스템 역시, 반능동 제어시스템에 준하는 성능을 보인다. 표1에서와 같이, Kobe와 Northridge와 같은 강진에 대해서는 스마트 수동제어 시스템이 기존의 반능동 제어시스템보다 최대 가속도에서 35.5% 그리고 최대 층간변위에서 24.1% 만큼 추가적으로 응답을 감소시킨다. 한편, 그림 9에 표시한 입력 지진의 주파수 특성은 표1의 결과에 영향을 미치지 않는 것으로 보인다. El Centro와 Hachinohe의 주파수 성분이 비교적 상이함에도 불구하고, 기존 반능동 제어시스템의 우수한 경향에는 변함이 없고, 마찬가지로, Kobe와 Northridge의 상이한 주파수 성분 역시 스마트 수동제어 시스템의 우수한 경향에 영향을 미치지 않는 것으로 보인다.

표 1 정규화된 최대 가속도와 층간변위

Story	Accelerations							
	El Centro (0.3495)*				Hachinohe (0.2294)			
	SMA _{ac}	SMA _{it}	SMP _{ac}	SMP _{it}	SMA _{ac}	SMA _{it}	SMP _{ac}	SMP _{it}
1 st	0.499	0.551	0.355	0.340	0.492	0.515	0.372	0.377
2 nd	0.354	0.433	0.436	0.396	0.431	0.520	0.526	0.530
3 rd	0.441	0.473	0.512	0.492	0.384	0.465	0.404	0.423
Story	Kobe (0.8337)				Northridge (0.8428)			
	SMA _{ac}	SMA _{it}	SMP _{ac}	SMP _{it}	SMA _{ac}	SMA _{it}	SMP _{ac}	SMP _{it}
	1 st	0.370	0.429	0.367	0.345	0.897	0.881	0.568
2 nd	0.494	0.493	0.484	0.485	0.587	0.554	0.612	0.586
3 rd	0.410	0.384	0.387	0.393	0.815	0.800	0.725	0.738

Story	Inter-story Drifts							
	El Centro (0.3495)				Hachinohe (0.2294)			
	SMA _{ac}	SMA _{it}	SMP _{ac}	SMP _{it}	SMA _{ac}	SMA _{it}	SMP _{ac}	SMP _{it}
1 st	0.228	0.212	0.168	0.180	0.295	0.243	0.178	0.194
2 nd	0.423	0.448	0.476	0.457	0.289	0.319	0.357	0.355
3 rd	0.441	0.473	0.512	0.492	0.384	0.465	0.404	0.423
Story	Kobe (0.8337)				Northridge (0.8428)			
	SMA _{ac}	SMA _{it}	SMP _{ac}	SMP _{it}	SMA _{ac}	SMA _{it}	SMP _{ac}	SMP _{it}
	1 st	0.348	0.308	0.293	0.301	0.563	0.473	0.359
2 nd	0.456	0.442	0.428	0.435	0.859	0.846	0.827	0.835
3 rd	0.410	0.384	0.387	0.393	0.815	0.800	0.725	0.738

* () is peak ground acceleration (g)

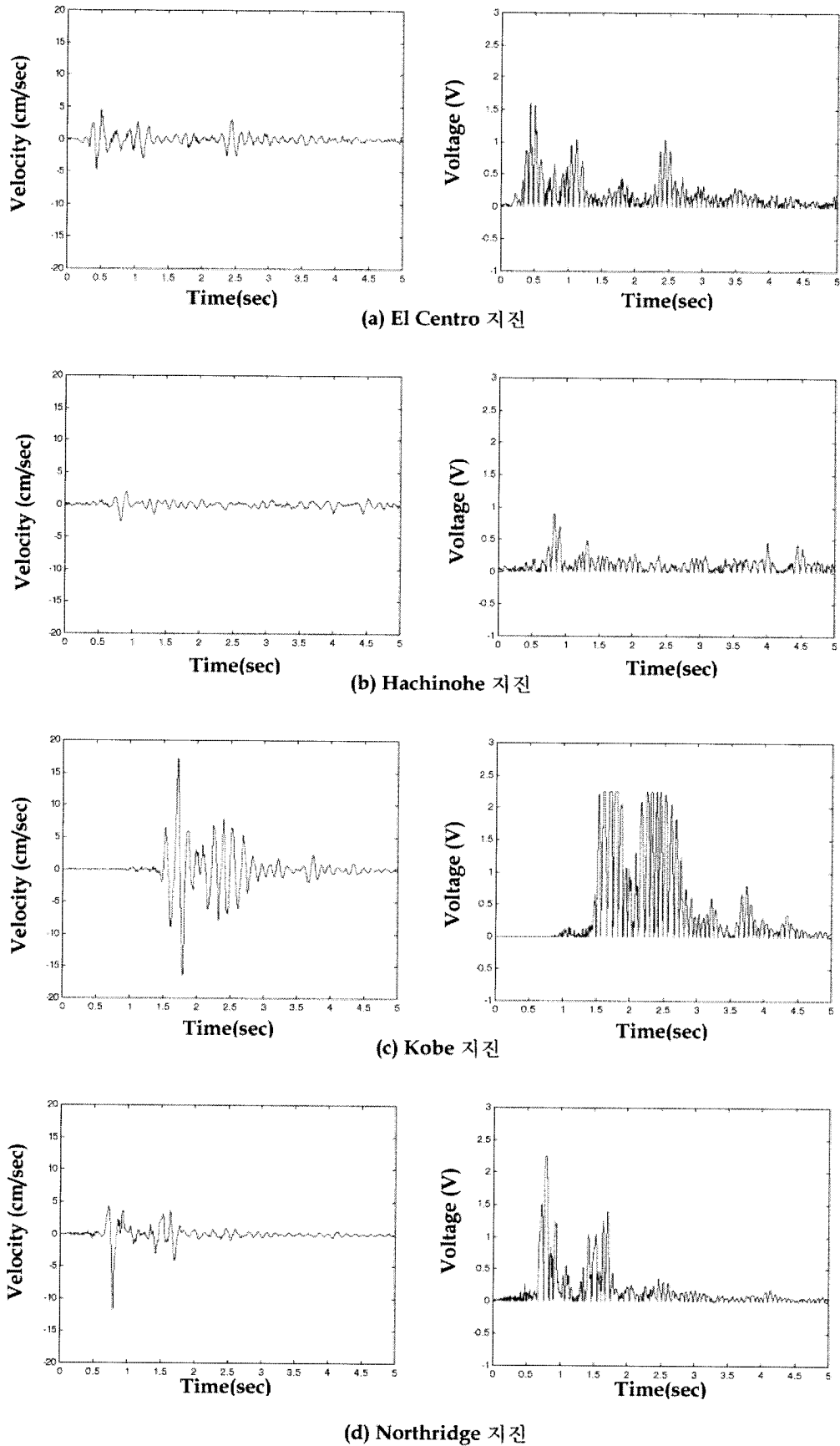


그림 10 다양한 지진에 대한 1층의 속도 및 유도기전력

각각의 제어기가 세 지진 - El Centro, Hachinohe, Kobe에 대해서 설계 되었으나, Northridge 지진에 대해서도 응답저감의 효과를 보인다.

정리하면, 스마트 수동제어 시스템은 센서 및 제어기, 그리고 전원을 사용하지 않았음에도 불구하고, 중진에 대해서 기존 반능동 제어시스템의 성능에 필적하고, 강진에

대해서는 더 우수한 성능을 보인다. 이것은 스마트 수동 제어 시스템의 가장 큰 장점이라 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 토목구조물을 위한 스마트 수동제어 시스템을 제안하였다. 스마트 수동제어 시스템은 MR댐퍼와 EMI시스템으로 구성되며, EMI시스템은 영구자석과 솔레노이드 코일로 이루어져 MR댐퍼에 부착된다. EMI시스템은 댐퍼의 왕복 운동에너지를 Faraday의 전자기유도법칙에 따라 기전력으로 변환시키며, 이것은 MR댐퍼의 감쇠특성을 변화시킨다. 이러한 스마트 수동제어 시스템은 전원과 센서 그리고 제어기를 사용하는 기존 MR댐퍼 시스템에 비해 간단하며 설치 및 유지관리가 용이하다.

스마트 수동제어 시스템의 성능을 연구하기 위해서, 2개의 스마트 수동제어 시스템을 설계하였고, 같은 기준으로 설계된 기존 반능동 제어기의 성능과 수치해석을 통해 비교하였다. 비교한 결과, El Centro와 Hachinohe지진과 같은 중간규모의 지진에 대해서는 기존 반능동 제어시스템이 더 우수한 성능을 보이고, 스마트 수동제어 시스템은 이에 필적할 만한 성능을 보인다. 반면 Kobe와 Northridge와 같은 강진에 대해서는 스마트 수동제어 시스템이 기존의 반능동 제어기보다 최대 가속도에서 35.5% 그리고 최대 층간변위에서 24.1% 만큼 추가적으로 응답을 감소시킨다.

간단한 구조임에도 불구하고 스마트 수동제어 시스템이 기존 반능동 제어시스템 만큼의 성능을 갖기 때문에, 실제 구조물에 적용할 수 있는 충분한 잠재력이 있는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 정형조, 이인원, "토목/건축 분야의 스마트제어 기술",

- 전산구조공학회지, Vol. 16, No. 3, 2003, pp. 41-50.
2. Reitz, J.R. Milford, F.J., and Christy R.W., *Foundations of electromagnetic theory*, Addison-Wesley Pub. Co., 1993.
3. Dyke, S.J., Spencer Jr., B.F., Sain, M.K. and Carlson, J.D., "Modeling and Control of Magnetorheological Dampers for Seismic Response Reduction," *Smart Materials and Structures*, Vol. 5, 1996, pp. 565-575.
4. Spencer Jr., B.F., Dyke, S.J., Sain, M.K., and Carlson, J.D., "Phenomenological Model of a Magnetorheological Damper," *J. Engrg. Mech., ASCE*, Vol. 123, No. 3, 1997, pp. 230-238.
5. Park, K.S., Jung, H.J and Lee, I.W., "Hybrid Control Strategy for Seismic Protection of a Benchmark Cable-Stayed Bridge," *Engineering Structures*, Vol. 25, No. 4, 2003, pp. 405-417.
6. Dyke, S.J., Spencer Jr., B.F., Sain, M.K, and Carlson, J.D., "Modeling and Control of Magnetorheological Dampers for Seismic Response Reduction," *Smart Materials and Structures*, Vol. 5, 1996, pp. 565-575.
7. Dyke, S.J., Spencer Jr., B.F., Sain, M.K, and Carlson, J.D., "Seismic Response Reduction Using Magnetorheological Dampers," *Proc. of the IFAC World Congress*, San Francisco, CA, June 30 -July 5, 1996.
8. Spencer Jr., B.F., Dyke, S.J., Sain, M.K, and Carlson, J.D., "Benchmark Problems in Structural Control - Part I: Active Mass Driver System," *Proc. ASCE Struct. Congr. XV.*, ASCE, New York, 1997, pp. 1265-1269.