

MR 엘라스토머를 이용한 기초격리 시스템에 대한 타당성 연구

Feasibility Study of MR Elastomer-based Base Isolation System

장 동 두*

Jang, Dong-Doo

무하마드 우스만**

Muhammad Usman

성 승 훈**

Sung, Seung-Hoon

문 영 종***

Moon, Yeong-Jong

정 혼 조†

Jung, Hyung-Jo

(논문접수일 : 2008년 11월 10일 ; 심사종료일 : 2008년 12월 12일)

요지

본 논문에서는 지진으로부터 구조물을 효과적으로 보호하기 위하여 MR 엘라스토머(MRE)를 이용한 새로운 형태의 스마트 기초격리 시스템을 제안하고, 이에 대한 내진성능을 평가하였다. MRE는 자성물질을 포함한 실리콘 혹은 고무로 씌어 기장에 의해 강성이 변하는 스마트 재료이다. 기초격리 시스템은 토목 및 건축분야에서 구조물의 내진성능 향상을 위해 가장 널리 쓰이는 장치로 지반과 구조물을 격리시켜 구조물에 가해지는 입력 하중을 감소시켜주는 장치이다. 기존 수동형태의 기초격리 장치는 다양한 입력하중에 대한 적응성이 부족하고 기초격리 장치에서의 과도한 변위 등의 단점이 있는 반면, 새로 제안한 시스템은 제어가능한 강성범위가 넓어 이를 개선할 수 있다. MRE를 이용한 기초격리 장치의 성능을 확인하기 위하여 기초격리 장치를 도입한 단층 및 5층의 건물에 대해 다양한 역사지진 하중을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과, 제안된 시스템은 기존 수동형태의 시스템에 비해 구조물의 응답 및 기초격리장치의 변위를 감소시키는 데 탁월한 효과가 있음을 확인하였다.

핵심용어: MR 엘라스토머(MRE), 기초격리 장치, 지진하중, 내진, 진동제어

Abstract

The feasibility study of a newly proposed smart base isolation system employing magneto-rheological elastomers(MREs) has been carried out. MREs belong to a class of smart materials whose elastic modulus or stiffness can be adjusted by varying the magnitude of the magnetic field. The base isolation systems are considered as one of the most effective devices for vibration mitigation of civil engineering structures such as bridges and buildings in the event of earthquakes. The proposed base isolation system strives to enhance the performance of the conventional base isolation system by improving the robustness of the system wide stiffness range controllable of MREs, which improves the adaptability and helps in better vibration control. To validate the effectiveness of the MRE-based isolation system, an extensive numerical simulation study has been performed using both single-story and five-story building structures employing base isolated devices under several historical earthquake excitations. The results show that the proposed system outperformed the conventional system in reducing the responses of the structure in all the seismic excitations considered in the study.

Keywords : MR elastomer(MRE), base isolation system, seismic load, vibration control

1. 서 론

최근 몇 년 사이 동남아시아 Tsunami 대재앙, 인도네시아 강진 및 중국 쓰촨성 대지진에 이르기까지 전 세계적으로 많이 발생한 대규모 지진에 의해 엄청난 인명피해와 경제적

손실이 발생했다. 특히 지난 5월에 발생한 중국 쓰촨성 대지진은 사상 최악의 지진피해로 전세계에 내진에 대한 중요성이 다시금 부각되었다. 이와 같이 위험한 자연재해인 지진으로부터 교량이나 건물과 같은 대형구조물을 보호하기 위해 일반적으로 가장 많이 활용되고 있는 것이 기초격리 장치이

* 책임저자, 정회원 · KAIST 건설 및 환경공학과 조교수

Tel: 042-350-3626 ; Fax: 042-350-3610

E-mail: hjung@kaist.ac.kr

** KAIST 건설 및 환경공학과 박사과정

*** KAIST 건설 및 환경공학과 석사과정

**** 삼성건설 기술연구소 선임연구원

• 이 논문에 대한 토론을 2008년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2009년 2월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

다. 기초격리 장치는 구조물을 지진하중이 유입되는 지반과 격리시켜 지진에 의한 영향을 줄이고자 하는 기술이다. 그러나 기존의 수동 형태의 기초격리 장치는 지진하중의 특성에 대한 적응성이 부족하고 기초격리 장치에서 과도한 변위가 발생하는 등의 문제가 있다. 최근 이런 문제를 해결하기 위해 수동형 기초격리 장치와 능동제어 장치를 결합한 복합형 기초격리 시스템이 제안되었다(Kelly 등, 1987; Yang 등, 2000; Nishimura 등, 1998). 복합형 기초격리 시스템은 기존 수동 기초격리 장치에 비해 다중 진동모드를 제어할 수 있고 기초격리 장치의 과도한 변위를 줄일 수 있는 장점이 있다.

그러나 능동제어 장치를 사용할 경우 능동제어기에 필요한 커다란 용량의 외부전력 확보를 위한 경제성 문제 및 능동제어기에 의한 구조물의 안정성 확보, 정기적인 유지관리 등의 문제가 있어 실제 대형 구조물에 설치하는데 어려움이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해, 1990년대 이후 반능동제어 장치를 활용한 반능동 기초격리 장치에 대한 연구가 이루어지고 있다(Feng 등, 1990). 반능동제어 장치는 능동제어 장치와 비슷한 성능을 발휘하고 상대적으로 적은 외부 전력으로도 구동이 가능하며 구조물에 직접 제어력을 가하는 것이 아니기 때문에 지진하중에 대한 적응성 및 구조물의 안정성 확보가 가능하다. 이러한 장점 때문에 1992년 이후 ER 및 MR 유체를 이용한 진동제어 장치들이 개발되었고, 소규모 구조물 모형실험을 통해 제어 장치로서의 적합성이 확인되었다(Gavin 등, 1996; Dyke 등, 1996; Makris, 1997; Spencer 등, 1997). 또한 Ramallo 등(2002)과 Yoshioka 등(2002)은 반능동제어 장치인 MR유체 감쇠기와 기초격리 장치를 결합한 반능동형 기초격리 장치를 제작하였다. 그러나 이런 MR유체 감쇠기를 이용한 제어장치는 MR유체의 누출에 의한 환경오염, 입자 잔류물에 의한 MR 유체 감쇠기의 성능저하, 유체를 담기 위한 컨테이너 구비 등 실제 적용에 있어 여러 문제점이 있다.

이에 대해 MR엘라스토머(MR elastomer, MRE)를 활용한 새로운 방식의 반능동 기초격리 장치가 제안되었다. MRE는 실리콘 재료나 천연 고무와 같은 폴리머 재료 안에 체인 형태로 극성화할 수 있는 자성입자를 내포하여 자기장에 의해 성질을 변화시킬 수 있는 스마트 재료이다. MR유체의 경우 자기장의 변화에 의해 점성이 변하는 반면, MRE는 강성이 변하는 특징을 갖는다. 이러한 강성 변화의 특성을 갖는 MRE는 1948년 Jacob Rainow에 의해 처음 소개되었고 이후 지속적인 연구가 수행되었는데, 주로 기계공학분야에서 활용하기 위한 개발되었다. Ginder 등(2001)에 의해 처음으로 수학적 모델링이 제안되었고, Ford 연구소에서 천연고무와 합성고무를 이용하여 MRE를 직접 제작하였으며(Ginder,

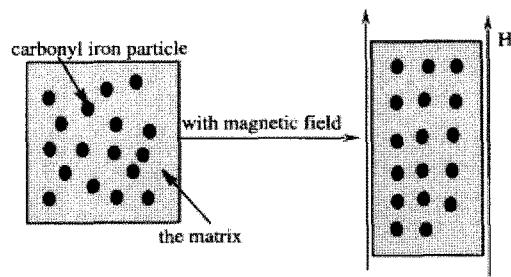


그림 1 MRE 시스템 모델(Wang 등, 2006)

2000), MRE를 사용해 특성 조정이 가능한 자동차 부싱이 개발되었다(Watson, 1996). 이처럼 소음흡수 장치, 자동차의 부싱, 완충장치 등 주로 기계분야에서 사용되었던 MRE는 이후 이를 토목·건축분야에서 기초격리 장치로 활용하기 위한 개념적인 연구가 진행되었지만, 자세한 연구는 아직 이루어지지 않고 있다(황인호 등, 2006). 그림 1은 MRE의 강성변화 특성을 간략하게 표현하는 그림으로써 전자석을 통해 MRE에 자기장을 가해줌으로써 MRE의 강성을 변화시킬 수 있다.

본 논문에서는 MRE를 이용한 새로운 형태의 기초격리 장치에 대한 타당성을 수치적으로 확인하고자 한다. 이를 위해, Gandhi and Anusonti-Inthra(2003)이 제안한 가변강성 장치의 동적모델을 MRE의 동적모델로 활용하여 다양한 수치해석을 수행하였다. 입력 하중은 대표적인 4개의 역사지진 (El Centro, Hachinohe, Kobe, Northridge지진)이며, 대상 구조물은 단층 및 5층의 건물이다.

2. 수치해석 모델 구성

2.1 구조물 모델

그림 2와 같이 지진 하중을 받는 MRE를 활용한 기초격리 장치가 설치된 단층 건물의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다(Soong, 1990).

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{f} - \mathbf{M}\Gamma\ddot{\mathbf{x}}_g \quad (1)$$

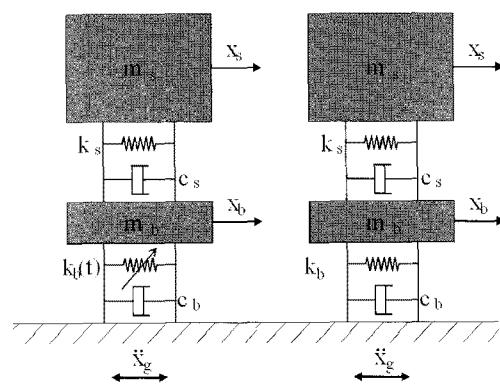


그림 2 지진하중을 받는 2자유도 구조물 모델

여기에서 f 는 MRE의 강성변화에 의한 제어력이고, $\Lambda = [1 \ 0]^T$ 는 제어력의 위치로 기초에만 작용한다. $\Gamma = 1_{2 \times 1}$ 는 지반가속도 가진위치로 전 자유도에서 1이다. \ddot{x}_g 는 지반가속도, \mathbf{x} 는 변위벡터이고, \mathbf{M} , \mathbf{C} , \mathbf{K} 는 질량, 감쇠, 강성행렬로 다음과 같다.

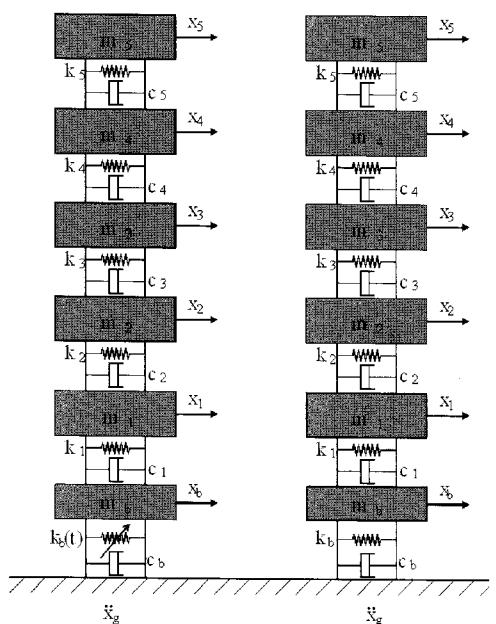
$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_b & 0 \\ 0 & m_s \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_b + c_s - c_s \\ -c_s & c_s \end{bmatrix}, \mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_b + k_s - k_s \\ -k_s & k_s \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기에서 아래첨자 s와 b는 각각 구조물과 기초격리를 의미한다.

기초격리 장치의 변위와 절대가속도, 구조물의 기초에 대한 상대변위와 절대가속도를 구하기 위해 상태변수 벡터 $\mathbf{z} = [\mathbf{x} \ \dot{\mathbf{x}}]^T$ 와 출력벡터 $\mathbf{y} = [x_b \ (x_s - x_b) \ \ddot{x}_b^a \ \ddot{x}_s^a]^T$ 로 정의하여 운동방정식 (1)을 상태공간방정식으로 치환하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{z}} &= \mathbf{Az} + \mathbf{Bf} + \mathbf{Ex}_g^a \\ \mathbf{y} &= \mathbf{Cz} + \mathbf{Df} + \mathbf{Fx}_g^a \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 0_{2 \times 2} & I_{2 \times 2} \\ -M^{-1}\mathbf{K} & -M^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0_{2 \times 1} \\ M^{-1}\Lambda \end{bmatrix} \\ \mathbf{C} &= \begin{bmatrix} \Delta & 0_{2 \times 2} \\ -M^{-1}\mathbf{K} & -M^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix}, \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0_{2 \times 1} \\ M^{-1}\Lambda \end{bmatrix} \\ \mathbf{E} &= \begin{bmatrix} 0_{2 \times 1} \\ -\Gamma \end{bmatrix}, \mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0_{2 \times 1} \\ -\Gamma \end{bmatrix}, \Delta = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$



(a) MRE base-isolation system (b) Base-isolation system

그림 3 6자유도 구조물 모델

표 1 6자유도 구조물 모델 물성치(Kelly 등, 1987)

Floor masses (kg)	Stiffness coefficients (kN/m)	Damping coefficients (kN·s/m)
$m_b = 6800$	$k_b = 232$	$c_b = 3.74$
$m_1 = 5897$	$k_1 = 33732$	$c_1 = 67$
$m_2 = 5897$	$k_2 = 29093$	$c_2 = 58$
$m_3 = 5897$	$k_3 = 28621$	$c_3 = 57$
$m_4 = 5897$	$k_4 = 24954$	$c_4 = 50$
$m_5 = 5897$	$k_5 = 19059$	$c_5 = 38$

표 2 2자유도 구조물 모델 물성치(Kelly 등, 1987)

Floor masses (kg)	Stiffness coefficients (kN/m)	Damping coefficients (kN·s/m)
$m_b = 6800$	$k_b = 232$	$c_b = 3.74$
$m_s = 29485$	$k_s = 11912$ ($T_1 = 0.3\text{sec}$)	$c_s = 23.71$ ($\zeta_1 = 2\%$)

다층 건물에 대한 운동방정식 또한 마찬가지 방식으로 유도할 수 있다.

본 논문에서는 Kelly 등(1987)에서 주어진 5층짜리 건물을 그림 3과 같은 6자유도(구조물 5자유도, 기초격리 장치 1자유도) 전단 건물로 모델링하였다. 각 층의 구조물 물성치는 표 1과 같다.

5층짜리 구조물에 대한 고유치 해석 결과 1차 모드의 고유주기는 0.3초이고 감쇠비는 2%이다. 이를 이용하여 5층 구조물을 구조물의 전 질량과 1차 모드의 동특성을 갖는 단층 구조물로 모델링하여 기본 1차 모드만의 영향을 파악하고자 하였다. 2자유도(구조물 1자유도, 기초격리 장치 1자유도) 구조모델은 그림 2와 같으며 구조 특성은 표 2와 같다.

2.2 MRE 모델

본 논문에서 MRE는 제어가능한 반동장치로 고려하였다. 다시 말해 외부 입력 전류를 통해 자성을 변화시켜 MRE 내부에 있는 자성입자들의 재배열을 통해 강성을 변화시킬 수 있는 장치이다. 따라서 MRE의 강성은 다음과 같이 표현된다(Gandhi and Anusonti-Inthra, 2003).

$$k_b(t) = k_{b0} + k_{b1}(u(t)) \quad (5)$$

$$-1 \leq u(t) \leq 1$$

여기에서 k_{b0} 는 MRE의 기본강성으로 본 연구에서는 k_b 와 같은 값으로 가정하였다. $k_{b1}(u(t))$ 는 입력 전류 $u(t)$ 에 따라 가변되는 강성값이다. 따라서 MRE의 최소, 최대 강성값은 각각 $k_{b0} - k_{b1}$, $k_{b0} + k_{b1}$ 이다. 기존 실험 연구에 의해

가변 강성 k_{b1} 의 최대값은 $0.5k_{b0}$ 이다(Koo 등, 2008). 따라서 MRE에 강성값은 다음과 같은 범위를 갖는다.

$$\begin{aligned} k_{b0} - k_{b1} &\leq k_b(t) \leq k_{b0} + k_{b1} \\ 0.5k_{b0} &\leq k_b(t) \leq 1.5k_{b0} \end{aligned} \quad (6)$$

식 (5)와 (6)에 의해 가변 강성 k_{b1} 에 의해 부가적으로 가해지는 제어력 범위는 다음과 같다

$$-0.5k_{b0}x_b(t) \leq f(t) \leq 0.5k_{b0}x_b(t) \quad (7)$$

2.3 제어알고리즘

본 논문에서 사용한 제어 알고리즘은 가장 일반적인 최적 제어 설계기법인 LQR(Linear Quadratic Regulator) 제어기법이다(Soong, 1990). 다음 식 (8)과 같이 주어진 상태공간 방정식을 고려하자.

$$\dot{z} = Az + Bu \quad (8)$$

여기서, z 는 상태변수 벡터, u 는 제어 입력벡터이다. LQR 제어기법은 식 (8)의 상태방정식을 구속조건으로 하여 주어진 목적함수(cost function)을 최소화하는 최적제어이론에 기반을 둔 상태 피드백 기법이다. 이 때 목적함수는 다음 식 (9)와 같이 표현된다.

$$J = \int_0^{\infty} z^T Q z + u^T R u dt \quad (9)$$

여기에서 Q 는 양의 반-한정행렬이고 R 은 양의 한정행렬로 가중행렬이라 하며, 목적함수를 최소화하는 과정에서 상태변수와 제어 입력간의 상대적 중요도에 따라 그 크기가 결정된다. 식 (9)의 목적함수를 최소화하기 위해 시스템의 상태벡터와 제어 입력벡터에 대한 적절한 가중치(weighting factor) Q , R 의 값을 산정해야 한다. 최적제어를 위한 충분 조건으로 다음의 Riccati 행렬방정식을 만족해야 한다.

$$A^T P + P A - (P B) R^{-1} (B^T P) + Q = 0 \quad (10)$$

여기서 P 는 Riccati 행렬이다.

또한 최적제어기는 다음과 같이 주어진다.

$$u = -K z \quad (11)$$

여기서 K 는 control gain으로 다음 식으로 구해진다.

$$K = R^{-1} B^T P \quad (12)$$

2.4 지진하중

MRE를 이용한 기초격리장치의 내진성능을 확인하기 위한 가진하중으로 다음의 5가지 지반가속도를 이용하였다. 먼저 White noise 지반가속도에 대해 최적의 가중치 값을 구하고 다음으로 4종류의 역사지진을 이용하여 내진성능을 검증하였다.

- White Noise: PGA 0.434g

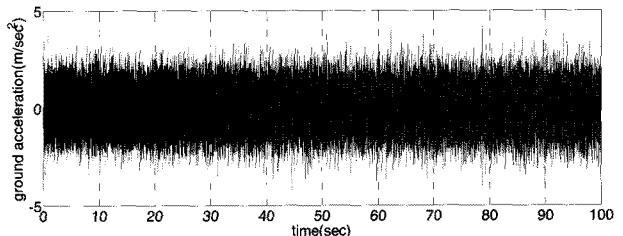


그림 4 White noise 지반가속도 시간이력

- El Centro(1940): PGA 0.350g

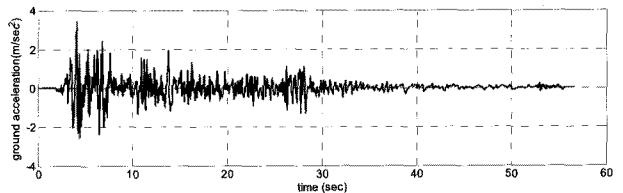


그림 5 El Centro지진 지반가속도 시간이력

- Kobe(1995): PGA 0.834g

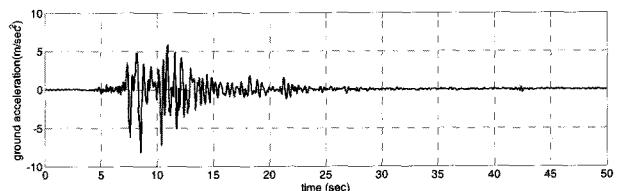


그림 6 Kobe지진 지반가속도 시간이력

- Northridge(1994): PGA 0.843g

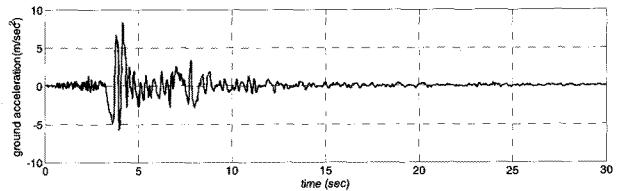


그림 7 Northridge지진 지반가속도 시간이력

- Hachinohe(1968): PGA 0.229g

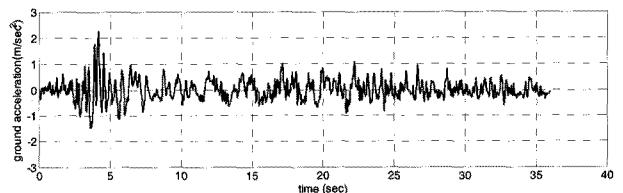


그림 8 Hachinohe지진 지반가속도 시간이력

3. 수치해석 결과

MRE를 이용한 기초격리 시스템의 내진성능을 검증하기 위하여 MATLAB을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 대상 구조물은 앞에서 모델링한 2자유도 및 6자유도 구조물 모델을 대상으로 하였다.

3.1 2자유도 구조물 모델

먼저 White noise를 이용하여 최적의 가중치 값을 산정하였다. 그 결과, 그림 9에서 볼 수 있듯이 White Noise 가진 시 MRE를 이용한 기초격리 시스템은 기존 수동 형태

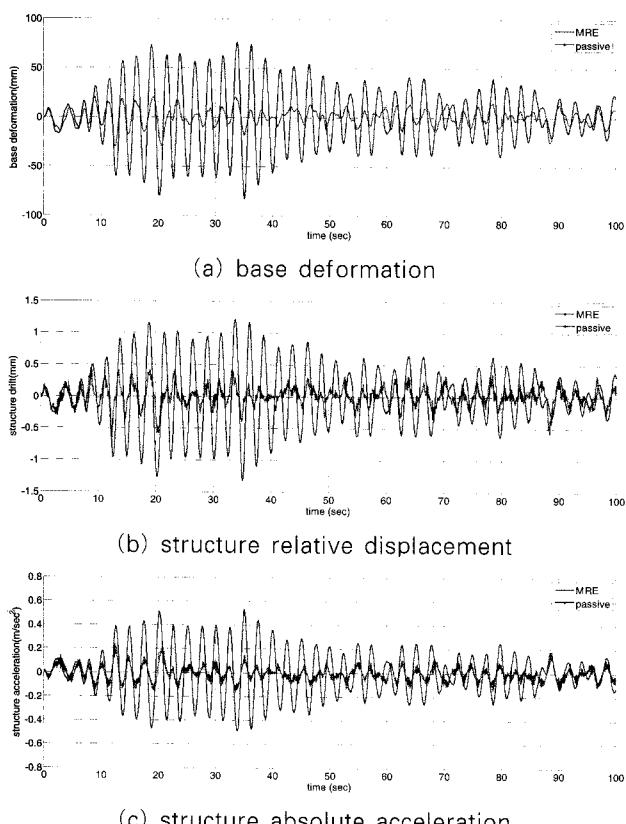


그림 9 2자유도 구조물 모델의 응답시간이력(White noise)

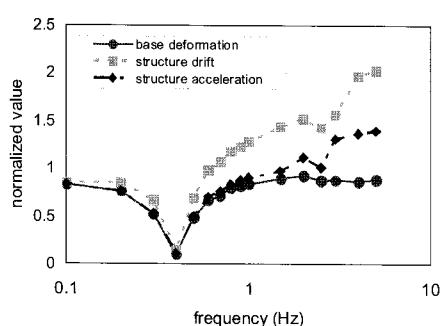


그림 10 조화하중 가진주파수 변화에 따른 MRE 기초격리장치의 성능

에 비해 기초격리 장치의 변위는 36%, 구조물의 상대변위는 54%, 구조물의 가속도는 44%로 감소시켰다.

White noise에 대한 해석을 통해 얻어진 가중치 값을 이용하여 다양한 주파수의 조화하중에 대해 MRE를 이용한 기초격리 시스템의 지반가속도 주파수에 대한 제진 특성을 확인하였다. 그림 10에서 확인할 수 있듯이 지반가속도가 일정한 주파수의 조화하중으로 가해질 경우, 기초격리 장치의 변위는 전 주파수에 대해 감소하지만, 구조물의 상대변위나 가속도는 0.7Hz 이상에 대해서는 오히려 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 이는 White noise에 대해서 최적으로 산정된 가중치에 대한 것으로 각각의 가진주파수에 대해 가중치를 다르게 산정할 경우 제어성능은 달라질 수 있다. 0.4Hz에서 최대의 제진효과가 나타났는데, 이는 이때 지반가진이 2자유도 모델의 1차모드 고유진동수와 동조된 효과로 보인다.

4개의 역사지진하중에 대해 MRE를 이용한 기초격리 시스템이 설치된 2자유도 구조물 모델의 시간이력 응답을 수동 형태의 기초격리시스템이 설치된 경우와 비교하여 그림 11~그림 14에 도시하였다.

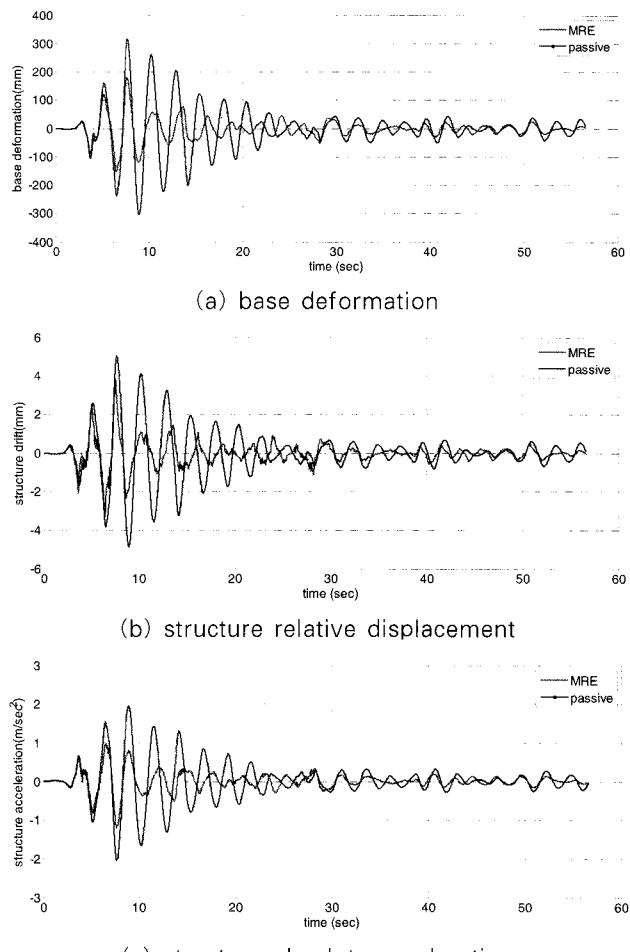
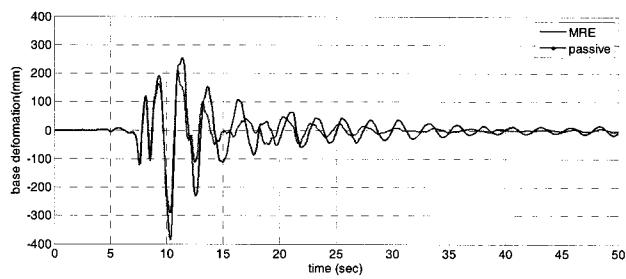
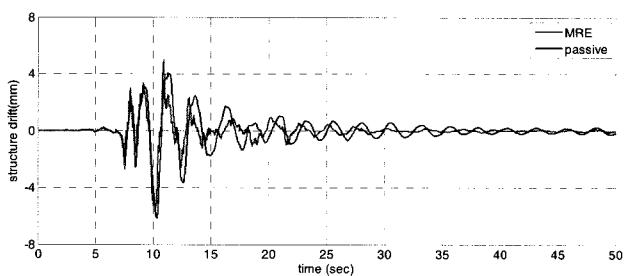


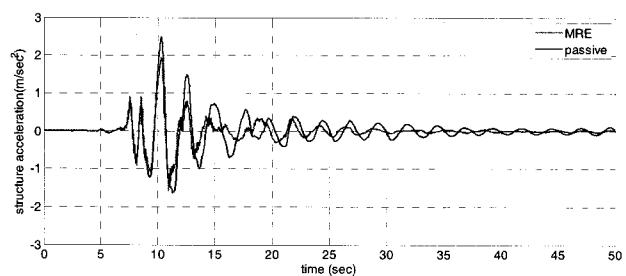
그림 11 2자유도 구조물 모델의 응답시간이력(EI Centro 지진)



(a) base deformation

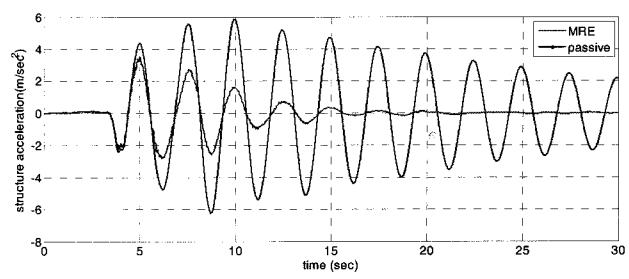


(b) structure relative displacement



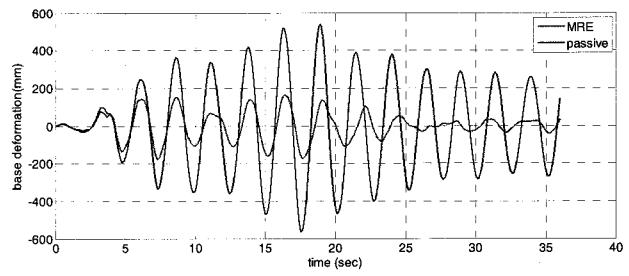
(c) structure absolute acceleration

그림 12 2자유도 구조물 모델의 응답시간이력(Kobe 지진)

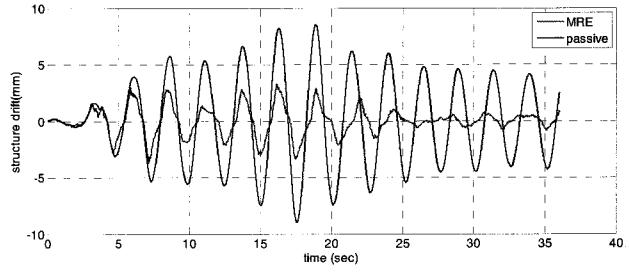


(c) structure absolute acceleration

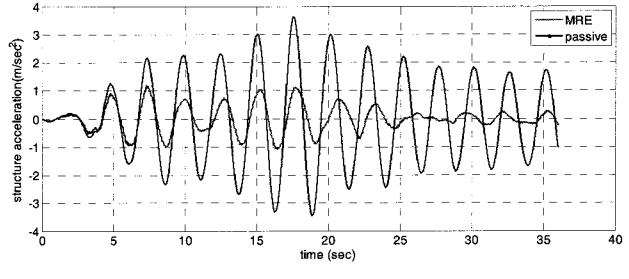
그림 13 2자유도 구조물 모델의 응답시간이력(Northridge 지진)



(a) base deformation

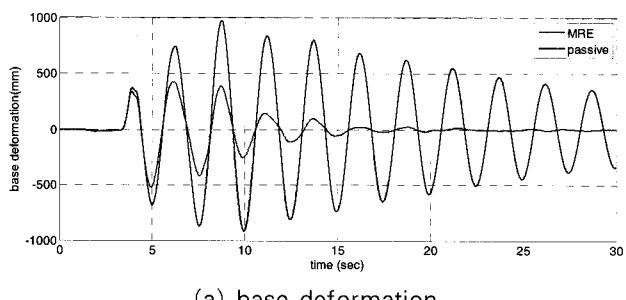


(b) structure relative displacement

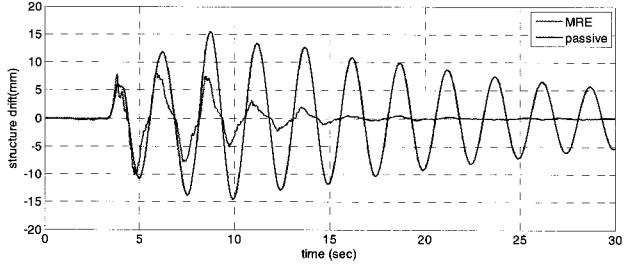


(c) structure absolute acceleration

그림 14 2자유도 구조물 모델의 응답시간이력(Hachinohe 지진)



(a) base deformation



(b) structure relative displacement

그림에서 알 수 있듯이, 다양한 역사지진 하중에 대해 MRE를 이용한 기초격리 시스템은 기존 수동형태의 기초격리 장치에 비해 구조물의 응답, 즉, 지반에 대한 상대변위와 절대가속도를 감소시키는데 탁월하였다. 또한 동시에 기초격리 장치의 변위도 크게 감소시키고 있음을 확인하였다. 그림 15에서는 구조물의 응답의 최대값을 수동형 기초격리 장치의 경우로 정규화하여 결과를 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯

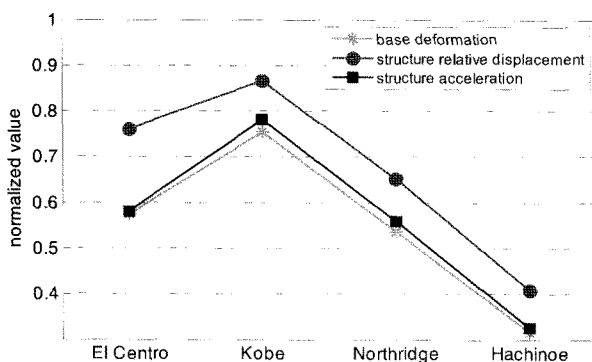


그림 15 2자유도 구조물 모델에 대한 MRE 기초격리 장치의 성능(수동 기초격리 장치에 대해 각각의 최대값을 정규화)

표 3 2자유도 구조물 모델 응답 시간이력의 최대값
(괄호안은 응답감소량)

지진 하중	구분	base deformation (mm)	structural relative displacement (mm)	structural acceleration (m/sec^2)
El Centro	수동	316.51	5.03	2.03
	MRE	181.96(43%)	3.82(24%)	1.18(42%)
Kobe	수동	384.89	6.14	2.48
	MRE	290.41(25%)	5.32(13%)	1.94(22%)
Northridge	수동	971.58	15.45	6.24
	MRE	521.79(46%)	10.10(35%)	3.50(44%)
Hachinoe	수동	564.03	8.96	3.62
	MRE	177.45(69%)	3.66(59%)	1.18(67%)

이, 모든 경우에 대해서 수동 형태보다 성능이 우수했으며, 특히 구조물의 가속도와 기초 변위가 응답 감소가 구조물의 변위의 응답 감소보다 전체적으로 크게 나타났다. 또한, Hachinoe 지진의 경우가 MRE-기반 기초격리 시스템의 성능이 가장 우수했으며(69%~59% 감소), 반면에 Kobe 지진의 경우가 상대적으로 응답 감소가 가장 적었다(25%~13% 감소). 이는 Hachinoe지진의 가장 주된 주파수성분은 0.4Hz 근처에서 이루어져 있고 반면에 Kobe지진의 가장 주된 주파수성분은 1Hz이상에서 존재하기 때문으로 보인다. 또한 본 수치해석에서 사용한 가중치값들은 각각의 역사지진 하중에 대해서는 최적이 아닌 영향으로 판단되며, 만약 개별 하중에 대해서 가중치값을 최적화시킨다면 보다 우수한 제진 성능을 얻을 수 있을 것이다. 하지만, 실제로는 대상 구조물에 가해질 외부 하중을 미리 알 수 없으므로 임의의 White noise를 이용하여 가중치값을 결정하는 것이 타당하다. 물론, 지반의 특성을 고려할 수 있는 Kanai-Tajimi filter 등을 이용하면 좀 더 의미있는 결과를 얻을 수 있다.

표 3은 이상의 수치해석 결과를 정량적으로 나타내고 있다.

3.2 6자유도 구조물 모델

6자유도 구조물 모델을 대상으로 MRE를 이용한 기초격리 시스템의 성능을 기존 수동형태의 기초격리 시스템과 비교하여 평가하였다. 그림 16~그림 19는 각 층 레벨에서의 층간변위와 절대가속도의 최대값을 보여준다. 그림에서 확인 할 수 있듯이, MRE를 이용한 기초격리 시스템이 기존 수동 형태의 시스템에 비해 다양한 지진하중 입력 하에서 구조물의 응답을 감소시키는데 탁월하였다. 또한, 층가속도가 모든 층에 걸쳐 일정하게 작은 값을 유지하고 있고, 층간 변위도 1~3mm범위에서 층 별로 큰 차이가 나지 않은 것으로 보아 기초격리 시스템이 적절하게 설계된 것으로 보여진다. El Centro 및 Kobe지진의 경우보다 Hachinoe 및 Northridge지진에서

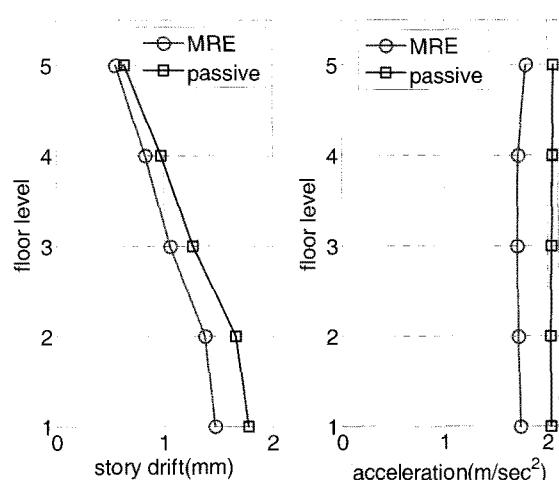


그림 16 6자유도 구조물 모델의 구조물 응답 최대값
(El Centro 지진)

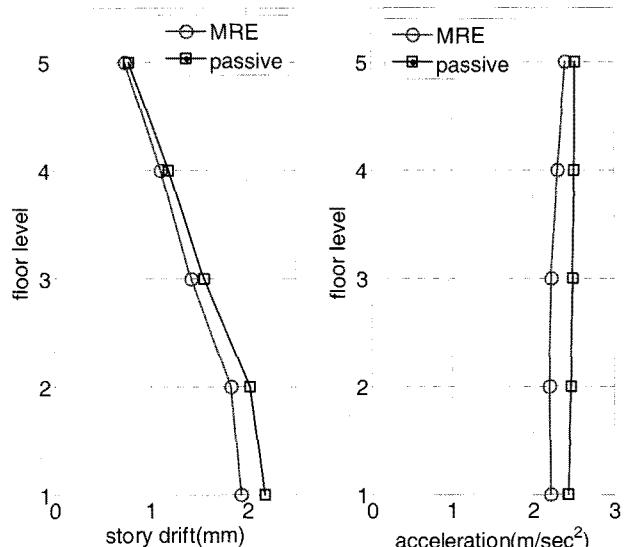


그림 17 6자유도 구조물 모델의 구조물 응답 최대값
(Kobe 지진)

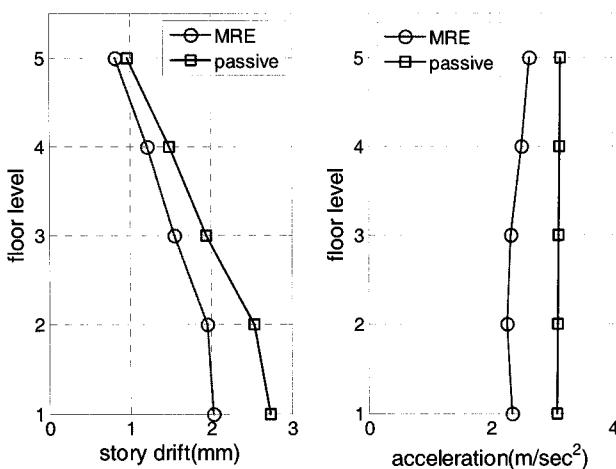


그림 18 6자유도 구조물 모델의 구조물 응답 최대값
(Northridge 지진)

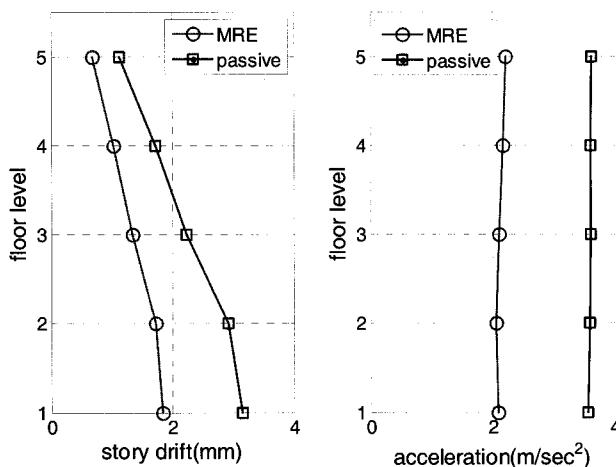


그림 19 6자유도 구조물 모델의 구조물 응답
최대값(Hachinohe 지진)

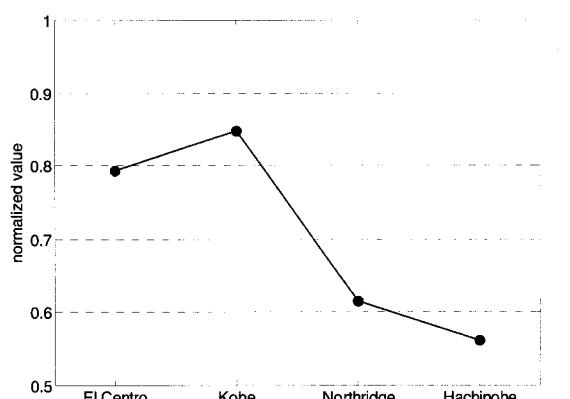


그림 20 6자유도 구조물 모델에 대한 MRE 기초격리장치의 변형
(수동 기초격리장치에 대해 최대값을 정규화)

MRE 시스템의 성능의 우수성이 보다 분명하게 나타나고 있다.

그림 20은 MRE를 이용한 기초격리 장치의 최대변형값을 기존 수동형태의 기초격리 장치의 최대변형값에 대해 정규화

한 그래프이다. 입력 지진하중에 따라 15%에서 최대 40% 이상 기초격리장치의 변형을 감소시킴을 알 수 있다. 2자유도 구조물 모델의 경우와 마찬가지로, Kobe지진에 대해서는 다른 지진에 비해서 MRE의 제어성능이 상대적으로 떨어지는 것으로 나타났다. 그 이유는 2자유도 모델의 경우와 마찬가지로, 개별 지진하중의 탁월주파수 범위의 차이와 제어 알고리즘에서 최적 가중치 값의 차이에서 연유하는 것으로 보인다.

2자유도 모델과 6자유도 모델의 해석 결과를 비교해보면, 먼저 기초변위(즉 기초격리장치의 변형)값이 모든 입력 하중에 대해서 유사하게 나왔고, 이를 통해 제어 설계의 초기 단계에는 단순한 모델을 사용해도 별 문제가 없음을 확인하였다. 또한, 그림 15와 20을 통해 알 수 있듯이, 전체적인 제진 성능의 경향도 모델과 상관없이 유사하게 나타났다. 즉, 2자유도 모델과 마찬가지로 6자유도 모델에서도 MRE 시스템은 기초격리 장치의 변형을 추가적으로 감소시켜 춤과 동시에 충간 변위와 충 가속도와 같은 구조물의 응답을 감소시킴을 확인하였다.

8. 결 론

본 연구에서는 구조물의 내진성능을 향상하기 위하여 기존의 수동형태의 기초격리 장치를 개선한 MRE를 이용한 기초격리 장치를 제안하였다. MRE는 강성을 변화시킬 수 있는 스마트 재료로서 새로운 개념의 기초격리 장치를 가능하게 한다. 본 연구에서는 MRE를 이용한 기초격리 장치의 내진성능을 다양한 역사지진 하중을 활용한 수치해석을 통해 검증하였다. MRE의 수학적 모델은 기존연구(Gandhi and Anusonti-Inthra, 2003)의 모델을 활용하였으며, 2자유도 및 6자유도 구조물 모델에 대해 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과, MRE를 이용한 기초격리 장치는 기존의 수동 형태의 기초격리 장치에 비해 구조물의 응답 뿐 아니라 기초격리 장치의 변위까지 탁월하게 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 또한 다양한 역사지진 하중에 대해 고른 내진 성능을 보여줌으로써 강인성을 가지고 있음을 보여주었다.

MRE를 이용한 기초격리장치의 실제 적용성을 확인하기 위하여 MRE 재료에 대한 특성실험 및 수치해석을 통한 정확한 수학적 모델링이 필요하며 또한 이를 활용한 수치해석 및 실제 MRE 재료를 이용한 실험적 연구가 필요하다. 이에 대한 추가적인 연구를 현재 진행 중에 있다. 또한, 제안 시스템의 타당성을 좀 더 분명하게 검증하기 위해서는 일반 탄성 받침(rubber bearing)보다 성능이 우수한 LRB 또는 FPS와의 성능 비교도 수행되어야 한다.

감사의 글

이 논문은 한국과학재단 지정 “스마트 사회기반 연구센터” 및 2006년도 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2006-331-D0056P)으로 수행되었으므로 이에 감사를 드린다.

참 고 문 헌

- 황인호, 임종혁, 이종세** (2006) A Study on Base Isolation Performance of Magneto-Sensitive Rubbers, 한국지진공학회, 10, pp.77~84.
- Dyke, S. J., Spencer Jr., B. F., Sain, M. K., Carlson, J. D.** (1996) Modeling and Control of Magnetorheological Dampers for Seismic Response Reduction, *Smart Materials and Structures*, 5, pp.565~575.
- Feng, Q., Shinotuka, M.** (1990) Use of a Variable Damper for Hybrid Control of Bridge Response under Earthquake, *Proceedings of U.S. National Workshop on Structural Control Research*, USC Publication No. CE-9013.
- Gandhi, F., Anusonti-Inthra, P.** (2003) Adaptive Control of Semiactive Variable Stiffness Devices for Narrow-Band Disturbance Rejection, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 14, pp.191~201.
- Gavin, H. P., Hanson, R. D., Filisko, F. E.** (1996) Electrorheological Dampers part 1: Analysis and Design, *Journal of Applied Mechanics*, ASME, 63, pp.668~675.
- Ginder, J. M., Nicholas, M. E., Elie, L. D., Clark, S. M.** (2000) Controllable-Stiffness Components Based on Magnetorheological Elastomers, *Proceedings of SPIE3985*, pp.418~425.
- Ginder, J. M., Schlotter, W. F., Nicholas, M. E.** (2001) Magnetorheological Elastomers in Tunable Vibration Absorbers, *Smart Structures and Materials 2001: Damping and Isolation*, 4331, pp.102~110.
- Hua-xia, D., Xing-long, G., Lian-hua, W.** (2006) Development of an Adaptive Tuned Vibration Absorber with Magnetorheological Elastomer, *Smart Materials and Structures*, 15, pp.111~116.
- Kelly, J. M., Leitmann, G., Soldatos, A. G.** (1987) Robust Control of base-Isolated Structures under Earthquake Excitation, *Journal of Optimization Theory Application*, 53, pp.159~180.
- Koo, J. H., Khan, F., Jang, D. D., Jung, H. J.** (2008) Dynamic Characterization and Modeling of Magneto-Rheological Elastomers Under Compressive Loadings, *Proceedings of 11th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions*, Dresden, Germany.
- Markris, N.** (1997) Rigidity-Plasticity-Viscosity: Can Electrorheological Dampers Protect Base-Isolated Structures from Near Source Earthquakes, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26, pp.1399~1406.
- MATLAB을 이용한 제어시스템 설계, Mathworks.
- Nishimura, H., Kojima, A.** (1998) Robust Vibration Isolation Control for a Seismically Excited Building, *Proceedings of Second World Conference on Structural Control*, Kyoto, Japan, 2, pp.1399~1406.
- Ramallo, J. C., Johnson, E. A., Spencer Jr., B. F.** (2002) Smart Base Isolation Systems, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 128, pp.1088~1099.
- Soong, T. T.** (1990) Active Structural Control: Theory and Practice, Longman Scientific&Technical, UK.
- Spencer Jr., B. F., Dyke, S. J., Sain, M. K., Carlson, J. D.** (1997) Phenomenological Model of a Magnetorheological Damper, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 12, pp.230~238.
- Wang, Y. L., Hu, Y., Gong, X. L., Jiang, W. Q., Zhang, P. Q., Ghen, Z.** (2006) Preparation and Properties of Magnetorheological Elastomers based on Silicon Rubber/Polystyrene Blend Matrix, *Journal of Applied Polymer Science*, 103, pp.3143~3149.
- Watson, J. R.** (1996) US Patent 0509353.
- Yang, G., Ramallo, J. C., Spencer Jr., B. F., Carlson, J. D., Sain, M. K.** (2000) Large-Scale MR Fluid Dampers: Dynamic Performance Consideration, *Proceeding of International Conference on Advances in Structure Dynamics*, HongKong, China, 1, pp.341~348.
- Yoshioka, H., Ramallo, J. C., Spencer Jr., B. F.** (2002) Smart Base Isolation Strategies Employing Magnetorheological Damper, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 128, pp.540~551.