

스마트 수동 제어 시스템을 이용한 면진 건물의 내진 성능 개선

Seismic Performance Improvement of Base Isolated Buildings using Smart Passive Control System

정찬국¹⁾ · 정형조²⁾ · 최강민³⁾ · 이인원⁴⁾

Jung, Chan-Kuk · Jung, Hyung-Jo · Choi, Kang-Min · Lee, In-Won

국문 요약 >> 본 연구에서는 면진 건물의 내진 성능을 개선하기 위하여 최근 개발된 스마트 수동 제어 시스템을 적용하고 이의 효용성을 수치 모의실험을 통해 검증하였다. 스마트 수동 제어 시스템은 효과적인 반동동 제어 장치로 알려진 MR 감쇠기에 전자기 유도부를 도입하여 응답 변화에 따라 MR 감쇠기로 입력되는 전류를 변화시킴으로써 MR 감쇠기의 감쇠 특성을 조절하는 새로운 개념의 스마트 제진 시스템이다. 스마트 수동 제어 시스템에서 전자기 유도부는 영구자석과 솔레노이드 코일로 구성되며, 기존 스마트 제진 시스템의 계측기, 제어기, 외부 전원장치를 한꺼번에 대체할 수 있다. 면진 건물에 대한 스마트 수동 제어 시스템의 내진 성능을 수치적으로 검증하기 위하여 미국토목학회에서 제시한 면진 건물에 대한 벤치마크 제어 문제를 활용하였다. 스마트 수동 제어 시스템의 제진 성능을 MR 감쇠기를 이용한 기존 스마트 제어 시스템의 성능과 비교하였다. 수치 모의실험 결과를 통해 스마트 수동 제어 시스템이 면진 건물의 내진 성능을 개선하는 데 매우 유용함을 확인하였다.

주요어 스마트 수동 제어, MR 감쇠기, 전자기 유도부, 면진 건물, 내진

ABSTRACT >> In this study, the efficacy of the newly developed smart passive control system to improve seismic performance of base isolated building structures is numerically verified. The smart passive control system consists of a magnetorheological (MR) damper and an electromagnetic induction (EMI) part. The damping characteristics of an MR damper can be controlled by the current generated in an EMI part according to the Faraday's law of electromagnetic induction. An EMI part consisting of a permanent magnet and a solenoid coil could substitute a control system including sensors, a controller and an external power supply in a conventional smart control system. The benchmark control problem for a base isolated building presented by the American Society of Civil Engineers is considered for numerical simulation. The control performance of the smart passive control system is compared to that of the conventional smart control system using MR dampers. It is demonstrated from the numerical simulation results that the smart passive control system is useful to improve the seismic performance of base isolated buildings.

Key words smart passive control system, MR damper, electromagnetic induction part, base isolated building, seismic protection

1. 서론

토목 및 건축 분야에서 구조물의 내진 성능 개선 대책으로 구조부재의 단면을 키우거나 부재의 개수를 증가시키는 것과 같은 보강 방법을 일반적으로 많이 사용해 왔다. 하지만, 1990년대 이후부터 보다 적극적인 내진 성능 개선책으

로 진동제어 장치를 이용하려는 연구가 활발하게 수행되고 있으며, 국내에서도 건축물과 교량에 적용된 사례가 다수 있다. 대형 구조물의 내진 성능 개선을 위한 진동제어 장치는 구조물의 외부로부터 추가 에너지 공급의 필요 유무에 따라 수동형, 능동형, 스마트(반능동형) 진동제어 장치로 나눌 수 있으며, 최근 들어 수동형과 능동형의 장점을 모두 갖추고 있는 스마트 진동제어 장치에 대한 관심이 고조되고 있다. 스마트 진동제어 장치의 장점은 성능이 우수할 뿐만 아니라, 구조물 물성치 및 하중 조건의 변화에 대한 적응성도 우수하며 안정성이 보장된다는 점이다. 또한, 능동 제어에 비해 비용이 저렴하고 유지관리도 상대적으로 용이하다는 장점도 있다. 하지만, 수동 제어에 비해서는 상대적으로

¹⁾ 세종대학교 토목환경공학과 석사과정

²⁾ 정회원·세종대학교 토목환경공학과 조교수

(대표저자: hjung@sejong.ac.kr)

³⁾ 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사후연구원

⁴⁾ 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 명예교수

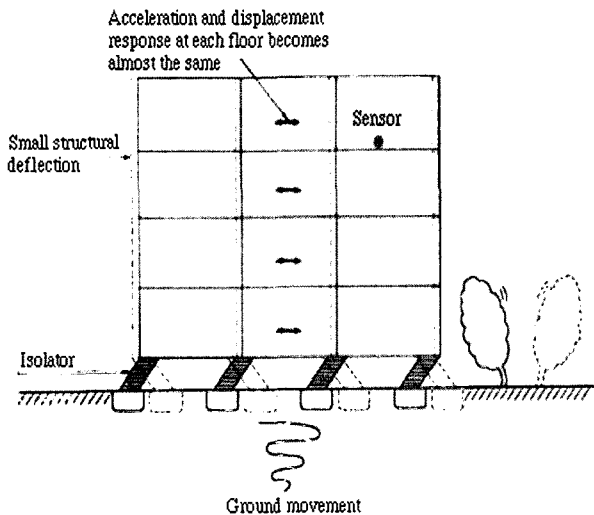
본 논문에 대한 토의를 2007년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2006. 10. 10 / 심사종료일 : 2006. 11. 22)

유지관리가 어렵고 비용이 과다하게 소요되는 단점도 존재한다.

면진 시스템(base isolation system)은 건물의 내진 대책으로 가장 널리 사용되고 있는 수동형 진동제어 방법이다. 일반적으로 상부구조와 기초 사이에 면진 장치를 설치하여 지진 하중이 상부구조로 전달되지 않도록 한다.^(1,2) 그 기본 개념은 그림 1을 통해 간단히 파악할 수 있다. 아래 그림에서 볼 수 있듯이, 면진 장치로 인해 지진력이 상부구조에 전달되지 않기 때문에 층간 변위 및 가속도가 현저하게 감소된다.

하지만, 면진 시스템을 통해 기존 건물의 응답을 상당히 감소시킬 수 있다 하더라도, 면진 장치가 설치되어 있는 부분의 변위가 과도하게 커지는 문제점이 발생한다. 이러한 변위를 감소시키기 위해 면진 장치에 추가적으로 감쇠기를 설치해 감쇠를 키우는 방법이 적용되기도 하지만, 이로 인해 상부구조의 가속도 응답 및 층간 변위가 많이 증가하게 되는 단점이 유발된다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 복합제어 기법이 최근 들어 연구되고 있다. 복합 제어란, 수동 제어 방법인 면진 장치에 능동 또는 반능동(스마트) 제어 방법인 유압식 가력기 또는 MR 감쇠기를 같이 설치하는 것이다. 이러한 방법은 단순히 면진 장치에 수동형 감쇠기를 설치하는 것보다 성능이 우수한 것으로 알려져 있다.^(4,5) 특히 MR 감쇠기와 같은 반능동 진동제어 장치는 지진 발생 시의 신뢰성 및 다양한 지진 하중에 대한 적응성, 낮은 전력 요구량 등의 장점 때문에 최근 수요가 늘어나고 있다. 하지만, 기존 MR 감쇠기-기반 스마트 진동제어 시스템은 여러 가지 문제점(즉, 부대장치(계측기, 제어용 컴퓨터, 전원 공급장치, 전선)가 너무 많고, 극한 환경에 설치된 구



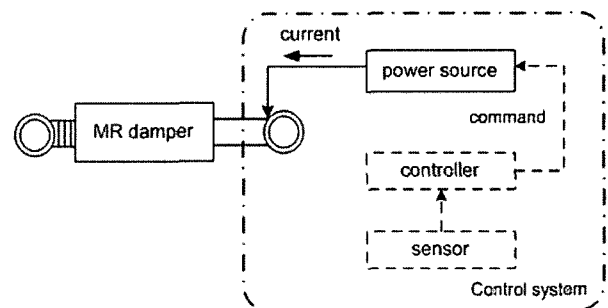
〈그림 1〉 면진 건물의 개념도⁽³⁾

조물에는 적용하기 힘들고, 전체 제진 시스템을 조종할 공간(제어룸)이 필요하다는 문제점 등)이 존재하기 때문에 이를 해결해야만 실제 활발하게 적용될 것으로 예상된다. 조상원 등⁽⁶⁻⁸⁾은 위와 같은 기존 MR 감쇠기-기반 스마트 진동제어 시스템의 문제점을 최소화하기 위한 방법으로 스마트 수동제어 시스템을 제안하였다. 이 시스템은 MR 감쇠기와 전자기 유도부(electromagnetic induction (EMI) part)로 구성된다. 전자기 유도부에서 Faraday의 전자기 유도법칙을 이용하여 전류를 발생시켜서 이 전류를 MR 감쇠기의 감쇠 특성을 바꾸기 위한 입력 전류로 활용하기 때문에 외부 전원장치가 따로 필요 없을 뿐만 아니라, 구조물 응답 크기에 따라 발생 전류의 크기가 적절하게 변화하기 때문에 계측기 및 제어기도 필요 없다. 따라서, 스마트 수동 제어 시스템은 기존 시스템에 비해 매우 간단하고 경제적인 진동제어 대책이다.

본 연구에서는 면진 건물의 내진 성능 개선 대책으로 최근 개발된 스마트 수동 제어 시스템이 적합한 지를 수치적으로 검증하고자 한다. 이러한 목적을 효과적으로 수행하기 위해 미국토목학회에서 제시한 면진 건물에 대한 벤치마크 제어 문제⁽⁹⁻¹²⁾를 활용하였다. 면진 건물에 대한 스마트 수동 제어 시스템의 진동 제어 성능을 기존의 MR 감쇠기-기반 스마트 제어 시스템과 비교하였다. 다양한 지진에 대한 수치 모의실험을 통해 스마트 수동 제어 시스템이 면진 건물의 내진 성능을 개선하는 데 효과적인지를 확인하였다.

2. 스마트 수동 제어 시스템

스마트 수동 제어 시스템은 반능동 제어 장치로 알려진 MR 감쇠기에 전자기 유도부를 도입하여 구조물의 응답 변화에 따라 감쇠기에 입력되는 전류를 변화시킴으로써 감쇠기의 감쇠 특성을 조절하는 새로운 개념의 스마트 진동 제어 시스템이다. 그림 2는 MR 감쇠기를 사용하는 기존 스마트 진동 제어 시스템의 개념도를 보여준다. 그림에서 알 수



〈그림 2〉 기존 스마트 제진 시스템 개념도

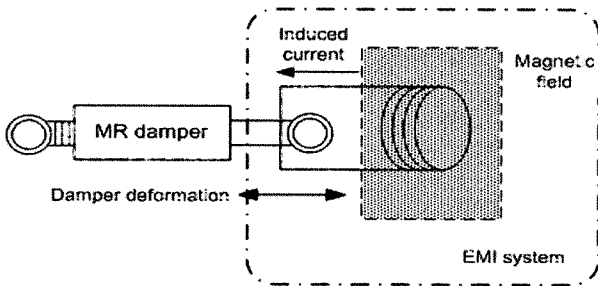
있듯이, 이 시스템에는 구조물의 응답을 측정하기 위한 계측기, 구조물의 진동을 최적으로 감소시키기 위해 필요한 MR 감쇠기의 입력전류 값을 계산하기 위한 제어기 및 MR 감쇠기에 제어기에서 계산된 전류를 공급해 주는 외부 전력 공급 장치가 필요하다.

그림 3은 스마트 수동 제어 시스템의 개념도를 보여주고 있다. 그림 2와 3을 비교하면 알 수 있듯이, 스마트 수동 제어 시스템에서는 영구자석과 솔레노이드 코일로 구성된 전자기 유도부(EMI system)를 도입함으로써 기존 스마트 제진 시스템의 제어 시스템(Control system; 계측기, 제어기, 전원 공급장치로 구성됨)를 대체하였다.

스마트 수동 제어 시스템의 거동 매커니즘을 좀 더 자세히 설명하고자 한다. 전자기 유도부에서는 영구 자석에 의한 자기장 내에서 솔레노이드 코일이 MR 감쇠기의 변형에 의해 운동하면서 유도전류가 발생되며, 이는 Faraday의 전자기 유도 법칙을 따른다. Faraday의 전자기 유도 법칙을 수식으로 표현하면 다음 식과 같다.

$$u = -N \frac{d\Phi_B}{dt} = -N \cdot B \frac{dA}{dt} = -N \cdot B \cdot w \frac{dx}{dt} = -K_{emf} \frac{dx}{dt} \quad (1)$$

여기서 u 는 유도 기전력을 나타내며 단위는 volt이다. 또한, N 은 코일이 감긴 횟수, Φ_B 는 Magnetic Flux, B 는 자기장의 세기, A 는 자기장 내부에 위치한 코일의 면적, w 는 코일



(그림 3) 스마트 수동 제어 시스템 개념도

의 폭, x 는 감쇠기의 변형이다.

따라서, 전자기 유도부에서 생성되는 전기에너지는 영구 자석의 세기(B) 그리고 솔레노이드 코일의 감긴 횟수(N)와 코일의 크기(w)등을 통하여 조절할 수 있으며, 이 값을 모두 포함한 전자기 유도부의 gain을 K_{emf} 로 정의하였다. 즉, 스마트 수동 제어 시스템의 성능을 보다 우수하게 하기 위해서는 최적의 K_{emf} 를 찾는 과정이 필수적이다. 식 (1)에서 파악할 수 있는 것은 MR 감쇠기가 설치된 지점에서의 감쇠기의 상대 속도에 비례하여 MR 감쇠기의 입력 전류값이 정해지며 이에 준해 감쇠력이 발생하기 때문에, 상대 속도가 크면 클수록 커다란 감쇠력을 갖게 되어 제어 성능을 향상시킬 수 있다는 점이다.

본 연구에서 사용한 MR 감쇠기의 동적 모델은 그림 4와 같다.⁽¹⁰⁾ 그림에서 볼 수 있듯이, MR 감쇠기의 높은 비선형성을 고려하기 위하여 Bouc-Wen 모델, 감쇠기 및 스프링 요소를 한꺼번에 고려하였다. 이러한 동적 모델에서 발생하는 MR 감쇠기의 감쇠력은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.⁽¹⁰⁾

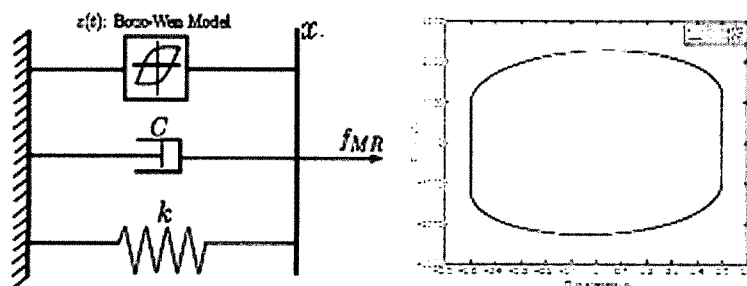
$$f_{MR} = (\alpha z) f(u) + C \dot{x} + kx \quad (2)$$

여기서, $\alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u$, $C(u) = C_a + C_b u$, $f(u)$ 는 u 의 함수이고, $z(t)$ 는 이력변수이다. 또한, k 는 스프링 상수이다. 기존 스마트 제진 시스템에서는 제어기에서 제어 알고리즘을 이용하여 적절한 입력 전압값(u)을 계산하여 MR 감쇠기의 감쇠력을 변화시켰으나, 스마트 수동 제어 시스템에서는 전자기 유도부에서 발생하는 유도기전력이 바로 입력 전압값(u)이 되어 감쇠력을 변화시킴을 알 수 있다.

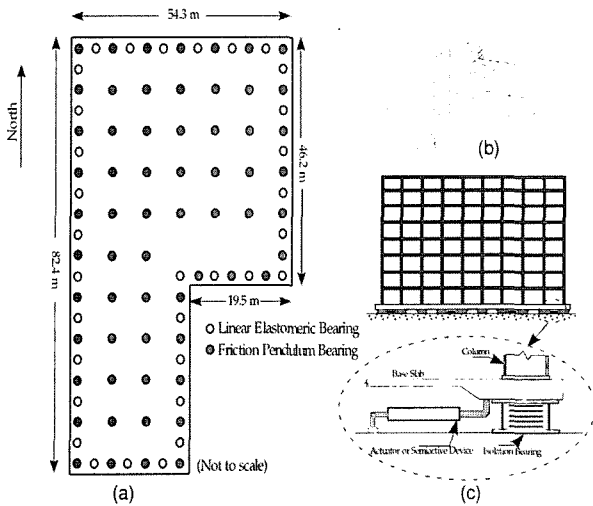
3. 수치해석

3.1 해석 대상 구조물

본 연구에서 스마트 수동 제어 시스템의 제어 성능을 수치적으로 검증하기 위하여 고려한 해석 대상 구조물은 미국



(그림 4) MR 감쇠기 모델 및 힘-변위 관계 그래프⁽¹⁰⁾



〈그림 5〉 면진 건물: (a) 평면도, (b) 상부구조 유한요소모델, (c) 감쇠기 설치

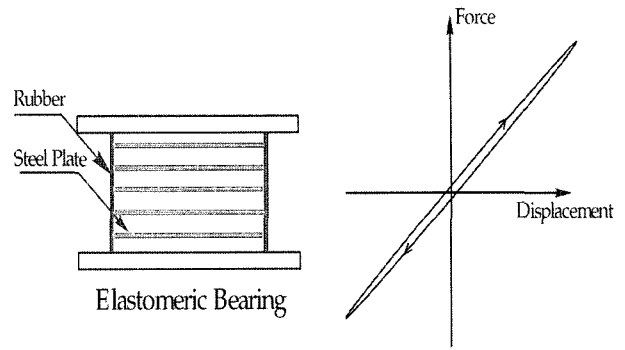
토목학회의 면진 건물에 대한 벤치마크 제어 문제에 사용된 8층짜리 면진 건물이다. 이 건물의 높이는 82.4m이고 폭은 54.3m이며, 그림 5에서 보는 바와 같이 L형 모양의 층단면을 가지고 있다. 상부구조는 3차원 선형 탄성 시스템으로 모델링되었으며, 층 슬래브와 기초는 평면상에서 강체라고 가정하였다. 상부구조는 24개의 자유도, 면진 시스템은 3개의 자유도로 고려하여 전체 구조물의 총 자유도수는 27개로 모델링하였으며, 상부구조의 감쇠비는 모든 모드에서 5%라고 가정하였다. 면진 받침으로는 그림 6과 같은 저감쇠 면진 받침을 고려하였으며, 92개의 저감쇠 면진 받침이 그림 5(a)와 같은 위치에 그림 5(c)와 같이 설치된 것으로 가정하였다. 해석 대상 구조물의 여러 제원에 대한 보다 자세한 사항은 참고문헌 [9-10]에 제시되어 있으니 참고하기 바란다.

3.2 제진 시스템

스마트 수동 제어 시스템의 내진 성능을 상대적으로 비교하기 위하여 기존 스마트 제진 시스템을 고려하였다. 기존 스마트 제진 시스템에서는 MR 감쇠기의 감쇠력을 조절하기 위하여 clipped optimal 제어 알고리즘을 사용하였다.⁽¹³⁾ Clipped-optimal 제어 알고리즘에서는 LQG 제어 알고리즘을 기본 제어기로 고려하여 능동 제어력을 먼저 구한다. 아래 식은 LQG 제어 알고리즘에서 사용하는 가격함수(cost function)를 보여준다.

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left[\int_0^T \{ z_a^T Q z_a + f_c^T R f_c \} dt \right] \quad (3)$$

여기서, z_a 는 regulated output, f_c 는 제어력, Q 는 $q_1 \times I_{54 \times 54}$



〈그림 6〉 저감쇠 면진받침의 개략도 및 힘 변위 그래프(9)

인 응답 가중 행렬, 그리고 R 은 $r_1 \times I_3$ 인 제어력 가중 행렬을 나타낸다. LQG 제어 알고리즘을 통해 계산된 f_c 와 실제 MR 감쇠기의 감쇠력 f_{MR} 을 비교하여 MR 감쇠기가 최대로 에너지 소산을 발현하도록 입력전압을 아래의 식 (4)를 통해 바꾼다.

$$u = V_{max} H(\{f_c - f_{MR}\} f_{MR}) \quad (4)$$

여기서, u 는 MR 감쇠기에 들어가는 입력전압, V_{max} 는 최대 전압(10volt), H 는 heaviside function이며 식 (4)를 통해 계산된 전압값이 외부전원 공급 장치에 의해 MR 감쇠기에 입력되어 적절한 감쇠력을 발휘하게 된다.

반면에, 스마트 수동 제어 시스템에서는 식 (1)을 통해 MR 감쇠기의 변형 속도에 비례한 유도 기전력이 발생되고 그 값이 MR 감쇠기에 자동적으로 입력되어 감쇠력을 일으키기 때문에, 제어기, 계측기 및 전원 공급 장치가 모두 필요 없게 된다. 또한, MR 감쇠기의 최대 입력전압은 clipped-optimal 제어 알고리즘과 마찬가지로 10volt를 사용하였다.

3.3 성능평가 기준

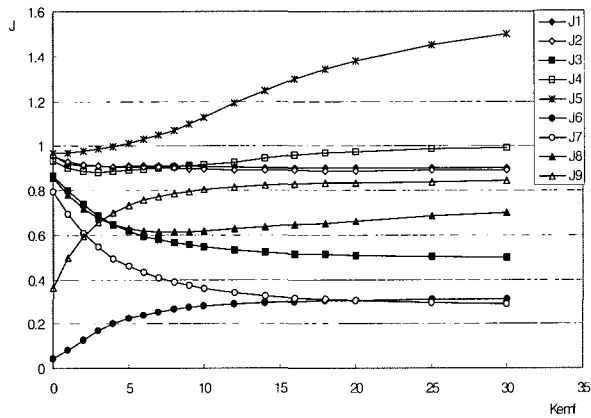
본 연구에서는 진동 제어 시스템의 내진 성능을 객관적으로 평가하기 위해 벤치마크 문제⁽⁹⁾에서 제시한 성능평가 기준을 준용하였다. 먼저, 구조물의 최대값에 대한 응답 5가지(기초 전단력, 구조물 전단력, 층간변위, 기초부의 변위 (또는 면진장치의 변형), 절대 층가속도)를 비교하고, 응답의 평균치를 비교, 평가하기 위해 RMS 응답 2가지(기초부의 변위 및 절대 층가속도)를 비교하였다. 여기서 각 응답들은 비제어시(92개의 저감쇠 면진 받침 만을 설치하였을 때)의 값으로 정규화 되어 있다. 또한, 제어 장치의 최대 제어력과 제진 장치에 의해 소산되는 총에너지량을 각각 비교하였다. 구체적인 성능 평가 기준은 아래에 소개되어 있다.

(그림 8(a))와 각 지진의 결과 값 중 최대값만을 취한 경우 (그림 8(b))로 수치해석 결과를 구별하여 제시하였다. 평균값과 최대값 그래프의 공통된 경향은 K_{emf} 값이 커짐에 따라 전체적인 내진 성능이 향상되지만 어느 값 이상에서는 최대 증가속도 (J_5) 값이 급격히 증가한다는 것이다. 예를 들면, K_{emf} 값이 15에 다다르자 최대 증가속도 (J_5)의 평균값이 비제어시 (즉 수동형 면진장치만 설치되어 있는 경우)보다 28%정도 증가하였고 최대값은 2배가 넘게 증가하였다. 이는 K_{emf} 값이 커짐에 따라 기초부와 건물하단 사이에 설치된 면진장치의 면진 효과가 감소하고 반면에 입력 지반 가속도가 건물의 가속도 응답에 직접적으로 좀 더 많은 영향을 미치기 때문으로 판단된다.

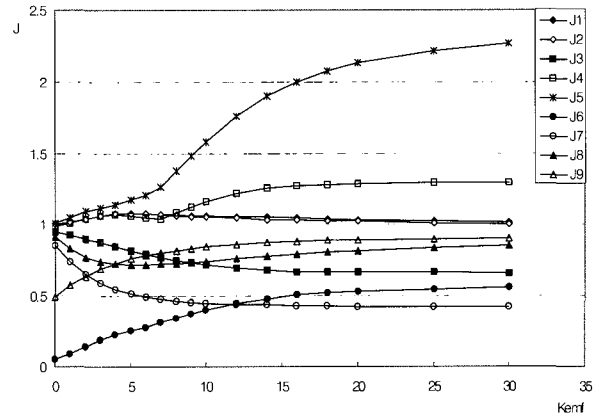
스마트 수동 제어 시스템에서 최적의 K_{emf} 값을 보다 객관적으로 얻기 위하여 K_{emf} 의 변화에 성능평가 지수 J의 평균값과 최대값의 합을 그림 9와 같이 그래프로 도시하였다. 여기서, 최대제어력 값 (J_6)과 최대에너지소산량 (J_9)은 제외

하였다. 아래 그림에서 알 수 있듯이 K_{emf} 값은 8에서 최소가 되었다. 하지만 K_{emf} 값이 8일 때 최대 증가속도(J_5) 값이 1보다 크게 된다. 전체적인 내진 성능 향상을 위해서는 최소가 되는 8보다 가속도가 1이 넘지 않는 K_{emf} 의 최대값인 4를 최적값이라 할 수 있다. 이 값은 전자기 유도부에서 영구 자석의 세기 (B), 솔레노이드 코일의 감긴 횟수 (N)와 코일의 크기 (w)등을 통하여 쉽게 구현할 수 있는 값이다.

제안 방법의 효율성을 객관적으로 비교하기 위해서는 먼저 기존 스마트 시스템에서 사용하고 있는 clipped-optimal 제어 알고리즘의 파라미터를 최적화시켜야 한다. 그러기 위해서 제어력 가중 행렬 R의 계수인 $r_1 = 1$ 로 고정하고 응답 가중 행렬 Q의 계수인 q_1 을 10부터 108까지 변화시키며 수치해석을 수행하고, 그 결과를 그림 10과 같이 나타내었다. 아래 그림에서 알 수 있듯이, 기존 스마트 시스템에서도 일정한 파라미터 이상의 값에서는 절대가속도 응답이 급격히 커지는 현상이 나타났으며 그 이유는 제안 방법의 경우와

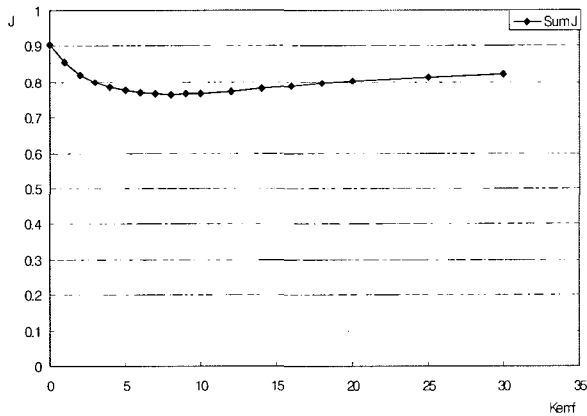


(a) 평균값

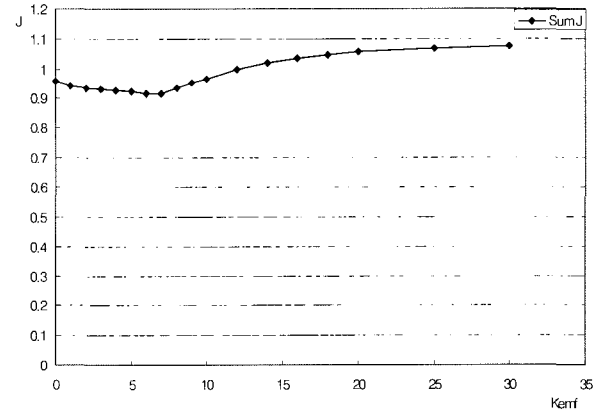


(b) 최대값

〈그림 8〉 K_{emf} 값의 변화에 따른 J값과의 관계



(a) 평균값의 합



(b) 최대값의 합

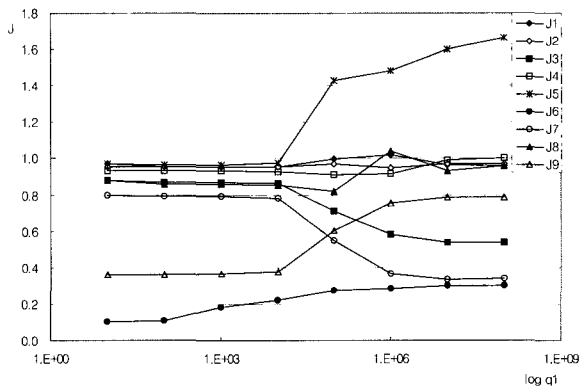
〈그림 9〉 K_{emf} 값의 변화에 따른 J값의 합과의 관계

마찬가지이다.

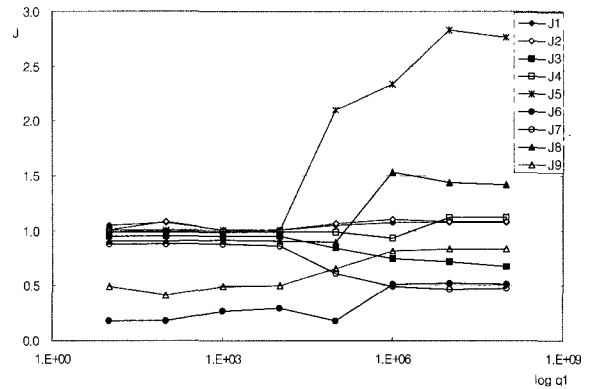
기존 스마트 제진 시스템의 경우 응답 가중치 행렬의 계수 값 (q_1)의 변화에 따른 J의 평균값 및 최대값의 합을 그림 11과 같이 조사하였다. 그 결과, q_1 값이 10^4 일 때 최소값을 나타냈기에, 이 값을 사용한 수치해석 결과를 제안 방법의 해석 결과와 비교하였다.

표 1 및 표 2는 7개의 역사지진에 대한 기존 스마트 제진

시스템 및 스마트 수동 제어 시스템의 수치해석 결과를 각각 나타낸 것이다. 기존 스마트 제진 시스템은 제어 알고리즘으로는 clipped optimal 제어 알고리즘을 사용하고 스마트 제진 장치로는 MR 감쇠기를 사용한 경우로써 $r_1 = 1, q_1 = 10^4$ 를 적용한 결과값을 사용하였다. 또한, 스마트 수동 제어 시스템은 전자기 유도부의 gain (K_{emf}) 값을 앞에서 구한 4를 사용하였다. 표에서 알 수 있듯이 스마트 수동 제어 시스템

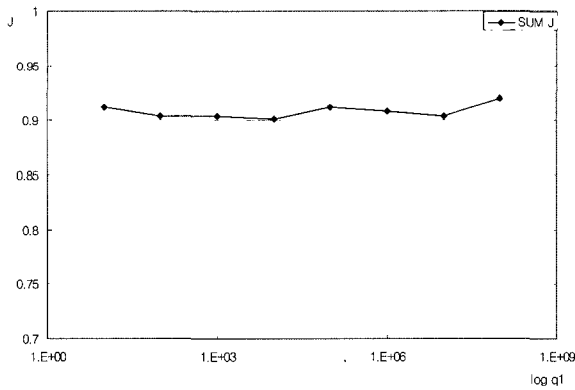


(a) 평균값

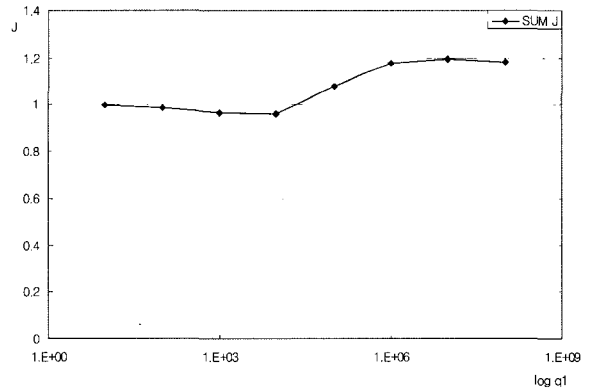


(b) 최대값

〈그림 10〉 q_1 값의 변화에 따른 J값과의 관계



(a) 평균값의 합



(b) 최대값의 합

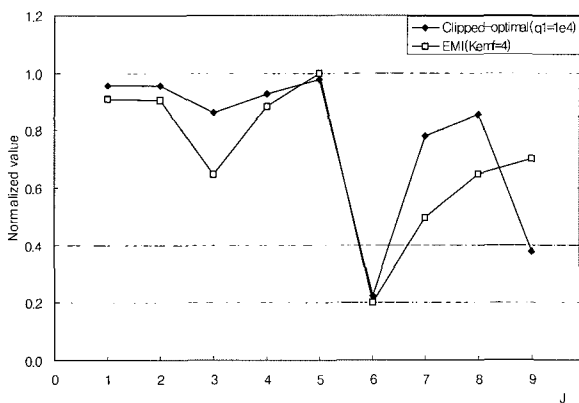
〈그림 11〉 q_1 값의 변화에 따른 J값의 합과의 관계

〈표 1〉 기존 스마트 제진 시스템($r_1 = 1, q_1 = 10^4$)의 수치해석 결과

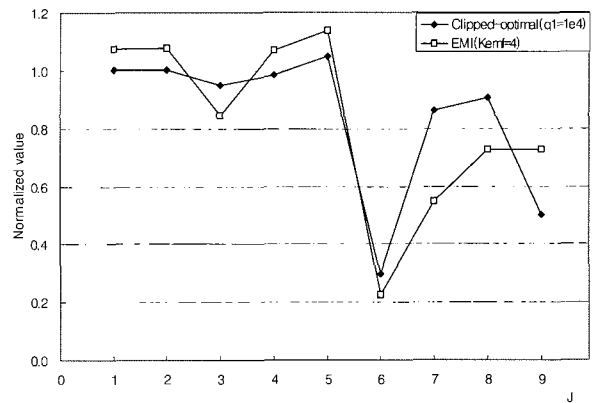
성능평가 지수	Newhall	Sylmar	El Centro	Rinaldi	Kobe	Jiji	Erinkan	평균값	최대값
J_1 (Peak Base Shear)	0.9411	0.9691	0.9677	1.0017	0.8804	0.958	0.9757	0.9562	1.0017
J_2 (Peak Str. Shear)	0.9244	0.9684	0.9472	1.0015	0.8796	0.9561	1.0001	0.9539	1.0015
J_3 (Peak Isolator Deformation)	0.8045	0.9486	0.7523	0.9410	0.7903	0.9213	0.8654	0.8605	0.9486
J_4 (Peak I.S Drift)	0.9446	0.9631	0.8366	0.9851	0.9079	0.9587	0.8872	0.9262	0.9851
J_5 (Peak Absolute Acceleration)	0.9805	0.9886	0.8814	1.0062	0.9745	0.9595	1.0504	0.9773	1.0504
J_6 (Peak Force)	0.2611	0.1862	0.2938	0.1964	0.2957	0.124	0.1981	0.2222	0.2957
J_7 (RMS Displacement)	0.6944	0.8019	0.6813	0.8257	0.7680	0.8322	0.8619	0.7808	0.8619
J_8 (RMS Acceleration)	0.8634	0.9031	0.7311	0.8488	0.8289	0.9045	0.8975	0.8539	0.9045
J_9 (Total Absorbed Energy)	0.4229	0.3594	0.5022	0.3485	0.4093	0.2739	0.3154	0.3759	0.5022

〈표 2〉 스마트 수동 제어 시스템의 수치해석 결과 ($K_{enf} = 4$)

성능평가 지수	Newhall	Sylmar	El Centro	Rinaldi	Kobe	Jiji	Erinkan	평균값	최대값
J_1 (Peak Base Shear)	0.9166	0.8773	0.9249	1.0759	0.8454	0.8391	0.8732	0.9075	1.0759
J_2 (Peak Str. Shear)	0.9238	0.8909	0.8911	1.0783	0.8253	0.8431	0.8973	0.9071	1.0783
J_3 (Peak Isolator Deformation)	0.6119	0.8456	0.5087	0.7748	0.4932	0.7202	0.5742	0.6469	0.8456
J_4 (Peak I.S Drift)	0.9438	0.8707	0.7905	1.0718	0.8503	0.8579	0.8112	0.8852	1.0718
J_5 (Peak Absolute Acceleration)	1.0310	1.0526	0.8797	1.1201	1.1394	0.8717	0.8963	0.9987	1.1394
J_6 (Peak Force)	0.2259	0.2048	0.1964	0.2085	0.1921	0.1514	0.2170	0.1994	0.2259
J_7 (RMS Displacement)	0.4297	0.5431	0.4338	0.5397	0.4521	0.5176	0.5492	0.4950	0.5492
J_8 (RMS Acceleration)	0.7264	0.7118	0.5494	0.6406	0.5937	0.6895	0.6154	0.6467	0.7264
J_9 (Total Absorbed Energy)	0.7282	0.7250	0.7264	0.7190	0.7169	0.5787	0.7166	0.7015	0.7282

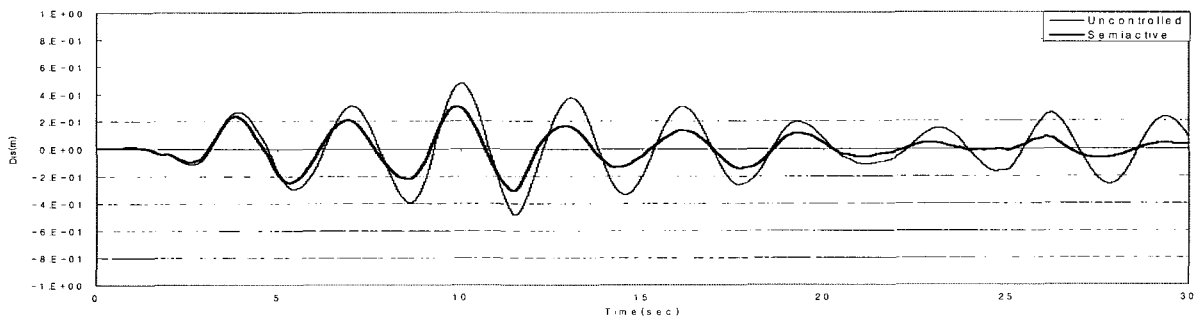


(a) 평균값

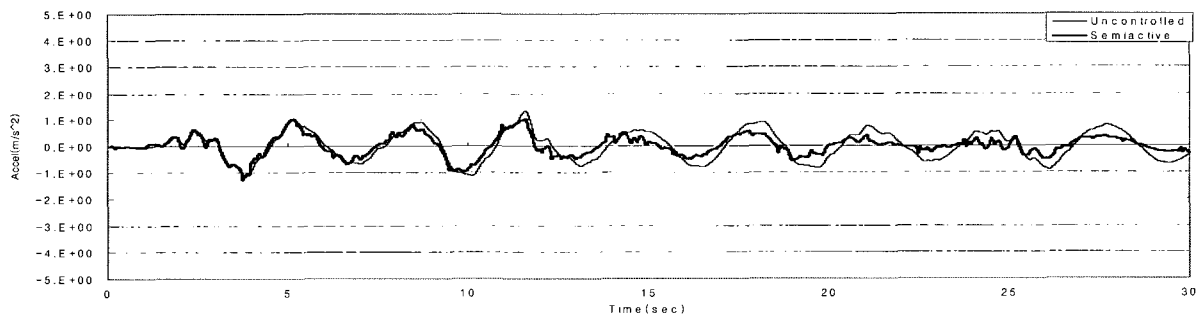


(b) 최대값

〈그림 12〉 면진 건물에 대한 내진 성능 비교

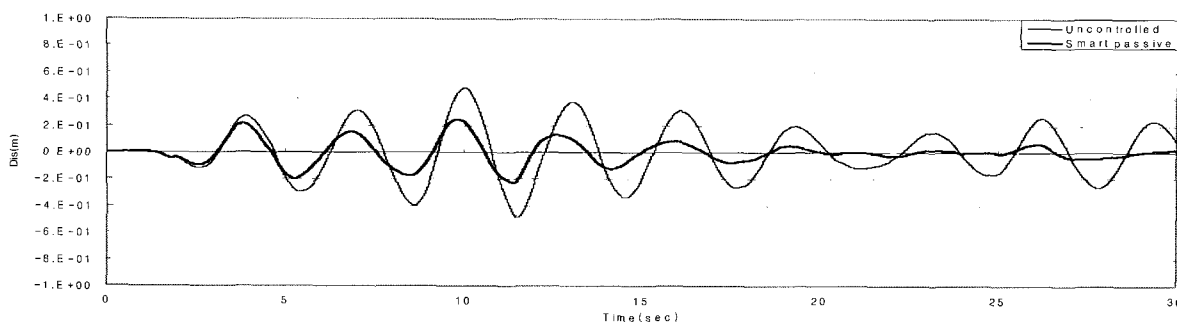


(a) 기초부 변위 또는 면진 받침의 변형

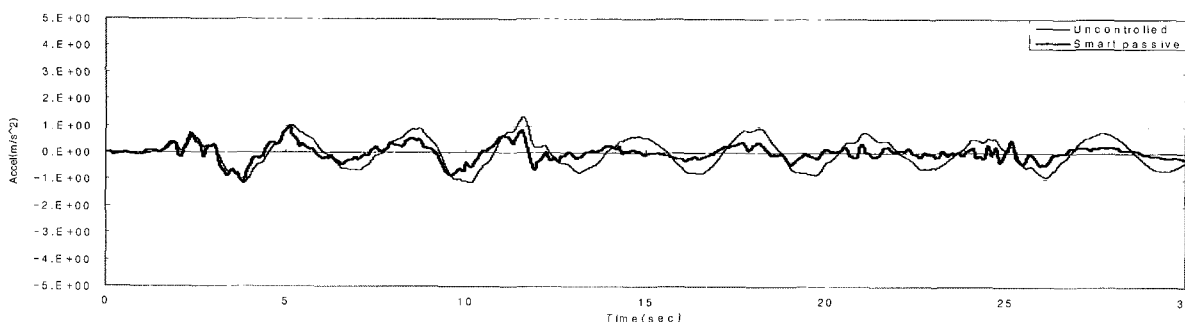


(b) 8층에서의 가속도

〈그림 13〉 기존 스마트 제진 시스템의 응답 시간이력곡선(El Centro 지진)



(a) 기초부 변위 또는 면진 받침의 변형



(b) 8층에서의 가속도

〈그림 14〉 스마트 수동 제어 시스템의 응답 시간이력곡선(EI Centro 지진)

이 여러 지진 하중에 대해서 일관되게 우수한 내진 성능을 보여주고 있음을 보여주고 있다.

두 제진 방법을 보다 직접적으로 비교하기 위하여 그림 12와 같이 하나의 그래프에 같이 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 제안된 스마트 수동 제어 시스템은 기존 스마트 제진 시스템(clipped-optimal)에 비해 전반적으로 좀 더 나은 제진 성능을 보이고 있다.

그림 13과 14는 EI Centro 지진에 대한 두 제진 방법의 기초부 변위, 즉 면진 받침의 변형과 8층에서의 가속도 응답의 시간 이력곡선을 각각 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 기존 스마트 제진 시스템의 경우에 비해서도 기초부 변위와 8층의 가속도가 감소하였고, 스마트 수동 제어 시스템의 경우 역시 기초부 변위는 기존 스마트 시스템의 경우보다 큰 45% 가까이 감소시키면서도 8층에서의 가속도도 동시에 감소하였다.

이상의 수치해석 결과를 통해, 스마트 수동 제어 시스템이 기존 스마트 제진 시스템보다 전반적으로 좀 더 나은 내진 성능을 보이고 있음을 확인하였다. 또한, 기존 스마트 제진 시스템이 계측기, 제어용 컴퓨터, 전원공급장치 등 많은 부대 장비를 필요로 하는 반면에, 제안된 스마트 수동 제어 시스템은 그러한 부대 장비가 모두 필요하지 않기 때문에 실제 적용 가능성, 유지관리 용이성 및 경제성 면에서 매우 커다란 장점을 가지고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 면진 건물의 내진 성능을 개선하기 위하여 최근 개발된 스마트 수동 제어 시스템을 적용하고 이의 효용성을 수치 모의실험을 통해 검증하였다. 스마트 수동 제어 시스템은 MR 감쇠기에 전자기 유도부를 도입한 신개념 스마트 제진 시스템이다. 이 시스템에서 전자기 유도부는 영구 자석과 솔레노이드 코일로 구성되며, 기존 스마트 제진 시스템의 계측기, 제어기, 외부 전원장치를 한꺼번에 대체할 수 있다. 전자기 유도부에서는 MR 감쇠기가 장착된 부분의 응답 변화에 따라 MR 감쇠기로 입력되는 전류를 변화시킴으로써 MR 감쇠기의 감쇠 특성을 적절히 조절할 수 있다. 본 연구에서는 면진 건물에 대한 스마트 수동 제어 시스템의 내진 성능을 수치적으로 검증하기 위하여 미국토목학회에서 제시한 면진 건물에 대한 벤치마크 제어 문제를 활용하였다. 스마트 수동 제어 시스템의 제진 성능을 MR 감쇠기를 이용한 기존 스마트 제어 시스템의 성능과 비교하였다. 수치 모의실험 결과를 통해 스마트 수동 제어 시스템이 면진 건물의 내진 성능을 개선하는 데 매우 유용함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가

원에서 위탁시행한 2005년도 건설핵심기술연구개발사업 (05산학연C105A1000021-06A0300-01910) 및 한국과학재단·과학기술부 지정 우수연구센터인 “스마트 사회기반시설 연구센터”의 지원으로 수행되었으므로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Skinner, R.I., Robinson, W.H. and McVerry, G.H., *An Introduction to Base Isolation*, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, England, 1993.
2. Soong, T.T. and Constantinou, M.C. (Eds.), *Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engineering*, Springer-Verlag, Wien and New York, 1994.
3. Base Isolation System, http://www.takenaka.co.jp/takenaka_e/quake_e/menshin/menshin.htm.
4. Ramallo, J.C., Johnson, E.A. and Spencer, B.F., Jr., “‘Smart’ base isolation systems,” *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 128, No. 10, 2002, pp. 1088-1099.
5. Yoshioka, H., Ramallo, J.C., and Spencer, B.F., Jr. “‘Smart’ base isolation strategies employing magnetorheological dampers,” *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 128, No. 5, 2002, pp. 540-551.
6. Cho, S.W., Jung, H.J. and Lee, I.W., “Smart passive system based on magnetorheological damper,” *Smart Materials and Structures*, Vol. 14, 2005, pp. 707-714.
7. 조상원, 조지성, 김춘호, 이인원, “MR 댐퍼 기반의 스마트 수동제어 시스템”, 한국지진공학회는논문집, Vol. 9, No. 1, 2005, pp. 51-59.
8. Cho, S.W., Jung, H.J., Lee, J.H. and Lee, I.W., “Smart passive system based on MR damper,” *10th JSSI Symposium on Performance of Response Controlled Buildings*, Yokohama, Japan, Nov. 17-19, 2004.
9. Narasimhan, S., Nagrajaiah, S., Johnson, E.A., and Gavin, H.P. “Smart base-isolated benchmark building. Part I: problem definition,” *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 13, Nos. 2-3, 2006, pp. 573-588.
10. Nagarajaiah, S. and Narasimhan, S. “Smart base-isolated benchmark building. Part II: phase I sample controllers for linear isolation systems,” *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 13, Nos. 2-3, 2006, pp. 589-604.
11. Jung, H.J., Choi, K.M., Spencer, B.F., Jr., and Lee, I.W., “Application of some semi-active control algorithms to a smart base-isolated building employing MR dampers,” *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 13, Nos. 2-3, 2006, pp. 693-704.
12. Lee, H.J., Yang, G., Jung, H.J., Spencer, B.F., Jr. and Lee, I.W., “Semi-active neurocontrol of a base-isolated benchmark structure,” *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 13, Nos. 2-3, 2006, pp. 682-692.
13. Dyke, S.J., Spencer, B.F., Jr., 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.