

기초격리된 구조물에서 자기유동성 유체감쇠기의 면진성능에 관한 연구

A Study on the Seismic Performance of MR Fluid Dampers in Base-Isolated Structures

이종세*
Lee, Jong Seh

도학용**
Doh, Hark Yong

ABSTRACT

The design concepts using vibration reduction techniques, or structural control, have been proposed recently to protect infrastructure against earthquakes. The magnetorheological(MR) fluid damper is one of the most promising new devices for structural vibration reduction because of its mechanical simplicity, high dynamic range, low power requirement, large force capacity and robustness. In this study, the seismic performance of MR devices are compared with that of NZ systems as an attempt to provide some data for improving seismic design techniques applied to structures. For nonlinear time domain analysis of a base isolation system, a six-story building model is considered as a numerical example. The ground acceleration data of El Centro 1940, Mexico City 1985 and Kobe 1995 earthquakes are used as seismic excitations. The results show that MR damper systems for outperform NZ systems in wide-ranging seismic excitations with respect to intensity and period characteristics.

1. 서론

최근 대규모 지진의 발생으로 인하여 우리나라를 비롯한 많은 나라에서 주요 사회기반구조물의 내진설계에 대한 관심이 높아졌으며 이러한 관심의 일환으로 제진설계를 통하여 구조물을 보호하고자 하는 노력이 제기되고 있다. 그러나 제진설계를 위해 사용되는 수동제어 형태의 베어링은 복원력과 적절한 감쇠성능을 하나의 장치내에서 얻을 수 있다는 장점이 있는 반면, 강한 비선형성을 보이는 동적특성 때문에 광범위한 입력지반운동에 대해서는 적절하지 않은 것으로 알려져 있다. 예를 들어 El Centro형의 지진을 위해 설계된 격리시스템의 효과는 탁월주파수 성분이 다른 Mexico City형의 지진등과 같이 진원지가 가깝고, 파속이 빠르며, 주기가 긴 지진의 경우 그 면진성능이 감소한다. 따라서 최근에는 다양한 방법들을 이용한 능동 또는 반능동제어장치에 대한 제진설계의 새로운 연구가 수행되고 있다(Yang *et al.*, 2000).

제어성 유체를 이용한 반능동제어 시스템은 아직 기초격리시스템에는 적용된 바 없으나, 능동 제어시스템과 유사한 성능을 발휘하며 큰 전력공급을 필요로 하지 않는다는 장점 때문에 1992년 이후 ER 유체와 MR 유체를 이용한 진동제어 장치들이 개발되었고, 소규모 구조물 모형실험을 통

* 정회원 · 한양대학교 토목·환경공학과, 교수

** 학생회원 · ㈜신성엔지니어링, 사원

하여 제어장치로서의 가능성이 확인된 바 있으며(Dyke *et al.*, 1996; Spencer *et al.*, 1997; Johnson *et al.*, 1998), 최근 20ton 규모의 장치가 개발되어 실 구조물에 적용하기 위한 연구 또한 진행 중이다(Symans와 Kelly, 1999; Jansen과 Dyke, 2000; Spencer *et al.*, 2000).

본 연구에서는 지진하중이 작용하는 구조물의 진동문제를 해결하기 위한 방법으로 기초격리장치로서 MR 유체감쇠기를 적용하여 면진구조물의 설계를 위한 기초자료를 제시하고자 한다. 기초격리시스템으로 사용되는 다양한 수동제어장치의 동적특성에 관한 비교연구는 이미 보고된 바 있으나(Su와 Ahmadi, 1989; Su *et al.*, 1989), 지진의 특성을 예측하기 힘든 현실에서 기존의 수동장치만으로는 지진피해로부터 대처하기 어렵기 때문에, 다양한 특성의 지진하중을 적용하여 기초격리된 구조물의 상대변위와 절대가속도 응답을 통해 MR 유체감쇠기의 면진성능을 수동제어시스템(NZ 시스템)과 비교하였다. 특히, 본 연구에서 적용된 MR 유체감쇠기는 제어기의 고장이나 유지보수의 미흡으로 인한 전력공급의 제어가 원활하지 못할 경우의 거동으로도 기존의 장치를 대체할 수 있는지를 확인하고자, 능동제어가 배제된 상태에서 입력전류가 일정하게 유지되는 경우에 대하여 고려하였다. 수치해석을 위한 대상구조물은 기초격리된 빌딩으로 6층의 프레임구조이며, 전체 시스템의 응답은 각기 다른 특징을 갖는 El Centro지진(1940), Mexico city지진(1985) 그리고 Kobe지진(1995)을 적용하였을 경우 기초격리장치로서의 성능을 확인하였다.

2. 기초격리시스템의 모형화 이론

2.1 운동방정식

일반적인 기초격리장치는 구조물의 고유진동수를 지진에너지가 우수한 진동수영역 밖으로 이동시켜 지진에너지의 전달을 감소시키고, 장치의 감쇠효과를 통한 에너지의 흡수·분산으로 상부구조물을 보호하는 것으로서, 그림1과 같이 간단한 2자유도 모형으로 나타낼 수 있으며 구조물과 기초지지부의 운동방정식은 각각 식(1) 및 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

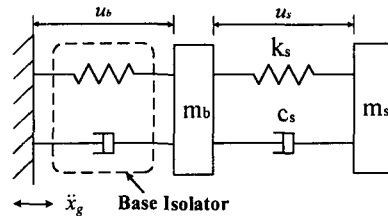


그림 1. 기초격리시스템의 역학적 모델

$$m_s \ddot{u}_s + c_s \dot{u}_s + k_s u_s = m_s r (\ddot{x}_g + \ddot{u}_b) \quad (1)$$

$$m_b \ddot{u}_b + c_b \dot{u}_b + k_b u_b + f = -m_b \ddot{x}_g - r^T m_s [\ddot{u}_s + r (\ddot{x}_g + \ddot{u}_b)] \quad (2)$$

여기서, u_b , u_s 는 각각 기초판과 상부구조물의 지반에 대한 상대변위, m_b , m_s , c_b , k_b , c_s , k_s 는 각각 기초판과 상부구조물의 질량, 감쇠, 강성이며 \ddot{x}_g 는 지반가속도, r 은 기초와 자유도에 따른 상부구조의 변위에 관한 영향계수, f 는 기초격리장치에 집적된 비선형력이다.

기초지지된 상부구조물의 질량을 다음의 식(3)에 만족시키기 위해 일반화된 모달벡터 Φ 를 이용하여 모드중첩에 의한 전체시스템에서의 지배방정식(4)를 유도할 수 있다.

$$u_s = \Phi u_s^* \quad (3)$$

$$[M][\ddot{U}] + [C][\dot{U}] + [K][U] + [F] = [P] \ddot{x}_g \quad (4)$$

여기서, 각 항은 다음과 같다.

$$[M] = \begin{bmatrix} I & \Phi^T m_s r \\ r^T m_s \Phi & r^T m_s r + m_b \end{bmatrix}, \quad [C] = \begin{bmatrix} 2\zeta_i \omega_i & 0 \\ 0 & c_b \end{bmatrix}, \quad [K] = \begin{bmatrix} \omega_i^2 & 0 \\ 0 & k_b \end{bmatrix}$$

$$\{U\} = \begin{Bmatrix} u_s^* \\ u_b \end{Bmatrix}, \quad \{F\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ f \end{Bmatrix}, \quad \{P\} = - \begin{bmatrix} \Phi^T m_s r \\ r^T m_s r + m_b \end{bmatrix}$$

여기서, ζ_i, ω_i 는 i 번째 모드에서 기초지지된 상부구조물의 감쇠비와 고유진동수이다.

위 식들에서 표현된 c_b, k_b 혹은 f 의 값과 그 배열형태에 따라 기존의 기초격리장치들이 설계되어 각 장치들의 변진성능 향상을 위한 연구를 수행하였다.

2.2 자기유동성 유체감쇠기(MR Fluid Damper)

MR 유체감쇠기는 구조물의 진동을 감소시키기 위한 새로운 제진장치로서 역학적인 간편성, 넓은 동적범위, 작은 전력요구, 큰 감쇠능력, 장치의 견고성 등의 장점으로 인해 취약한 환경에 노출되어 있는 토목구조물에 적용이 가능할 것으로 보인다. 본 연구에서는 장치의 능동제어에 의한 응답보다는 일정한 전류공급에서의 거동에 관심을 갖기 때문에 매개변수의 개수를 최소화하는 Simple Bouc-Wen model(Spencer 등., 1997)을 이용했으며, 적용변수 또한 Spencer에 의한 실험에서 결정된 값을 사용하였다. 개략적인 역학적 모델을 그림2에 나타내었다.

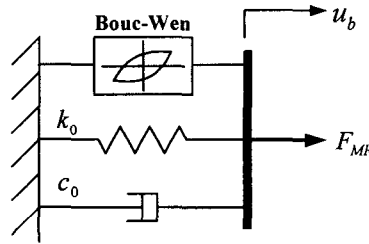


그림 2. Simple Bouc-Wen model (Spencer 등., 1997)

선회변수 z 에 의해 지배되는 MR 감쇠기의 제어력은 식(5)와 같다. 이 때 z 값은 무차원 이력변수 ($|z| \leq 1$)로 식(6)의 비선형 1차 미분방정식에 따른다.

$$F_{MR} = c_0 \dot{u}_b + k_0 (u_b - x_0) + \alpha z \quad (5)$$

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{u}_b| z |z|^{n-1} - \beta \dot{u}_b |z|^n + A \dot{u}_b \quad (6)$$

모델에서 γ, β, A 의 매개변수 조정에 의해 이력형상이 변화하며, 정수계수인 n 값에 따라 하중 제거시의 선형성과 선항복에서 후항복 영역으로의 이력형상 변화의 매끄러움을 조절할 수 있다. 또한, 가력기에 의한 초기력은 선형스프링 상수 k_0 와 초기 변형 x_0 에 의해 처리될 수 있다. 여기서, α 는 입력되는 전류에 직접적인 영향을 받는 변수로서 Spencer 등(1997)의 연구를 통한 관계식은 식(7)과 같다.

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_d v \quad \text{and} \quad c_0 = c_{0c} + c_{0d} v \quad (7)$$

여기서, v 는 전원으로 공급되는 전압으로 변수 η 를 포함하는 1차 미분방정식 $\dot{v} = -\eta(v - u)$ 에 따르며, 본 연구에서는 실험과 수치해석을 통해 결정된 일정전류 공급시의 값을 사용하였다.

2.3 비선형 기초격리시스템의 해석

기초격리시스템을 적용한 구조물에 대한 효과적인 지진응답 해석을 위해서는 격리장치의 비선

형 현상을 고려할 수 있는 적절한 수학적 모델링 방법과 이를 효율적으로 상부구조와 연성시킨 해석방법의 적용이 필요하다. 대상구조물의 해석에는 모달좌표계에서 n 개의 독립미분방정식의 시간적분을 위해 Constant-Average-Acceleration Method($\gamma=1/2$, $\beta=1/4$)를 이용하였으며, 기초 격리장치의 비선형성을 고려하기 위하여 시간증분의 크기를 제어하면서 비교적 빠른 수렴성을 갖는 Runge-Kutta fourth Method를 사용하여 수치적 발산문제를 방지하였다.

3. 수치해석 및 결과분석

3.1 대상구조물

기초격리시스템의 면진성능을 검증하기 위해서 그림3과 같은 6층의 프레임 구조물에 대한 수치 해석을 수행하였으며, 각 층의 질량 m_i 는 16ton 이고 기초지지부와 격리장치를 포함하는 하부구조는 그림과 같이 배치하였다. 여기서 사용된 적층고무베어링은 LRB(Laminated Rubber Bearing)로서 대상구조물의 수직하중과 기초지지부의 지반과의 격리를 위해 사용되었다.

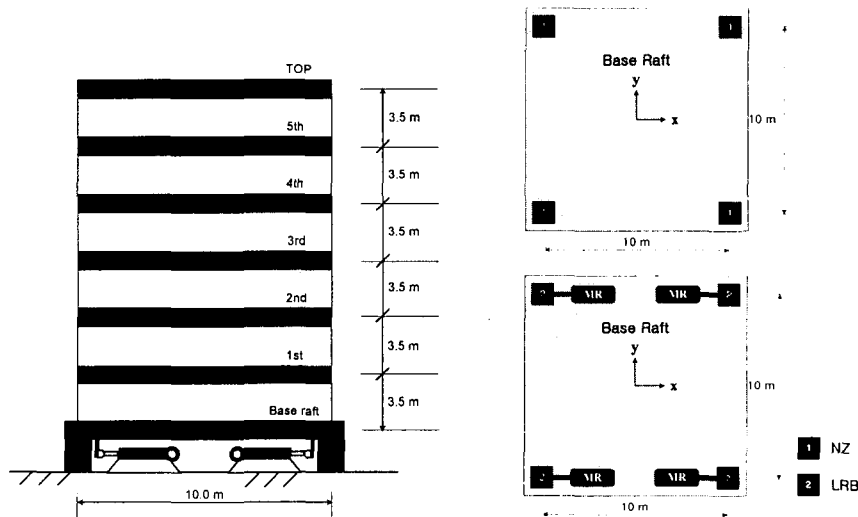


그림 3. 수치해석 대상구조물 및 기초격리시스템을 포함한 하부구조

수치해석을 위해 전체구조물을 선형시스템의 상부구조와 기초지지부를 포함한 비선형 기초격리 장치의 하부구조로 분리하였고, 각 부분구조에 대한 운동방정식과 구조합성법을 이용하여 동특성 해석의 효율성을 극대화 하였다. 구조물의 지진응답 해석은 집중질량계로 모델링한 상부구조를 기초지지된 조건에서 모드별 주기와 고유진동수를 계산하여, NZ 시스템과 MR 유체감쇠기를 각각 적용한 하부구조에 포함시켜 MATLAB[®]을 이용한 전체시스템의 해석에 사용하였다.

Spencer의 실험에 의해 2A의 일정한 전류공급하에서 결정된 변수는 표1에 나타내었고, 식(8)과 같은 NZ 요소에 집적된 비선형력 f_{NZ} 에 따른 매개변수의 값들은 Contaninou와 Tadjbakhsh (1985)의 sine 지진입력에 대한 실험에 의해 결정된 결과값으로 표2에 나타내었다.

$$f_{NZ} = \alpha \frac{F_y}{Y} u_b + (1-\alpha) F_y Z \quad (8)$$

$$Y \dot{Z} = -\gamma |\dot{u}_b| Z |Z|^{\eta-1} - \beta \dot{u}_b |Z|^{\eta} + \theta \dot{u}_b \quad (9)$$

여기서, Y 와 f_{NZ} 는 NZ시스템에서의 이력거동에 따른 항복변위와 항복력, γ , β , θ 는 무차원

매개변수이며, η 는 탄성영역에서 소성영역으로의 전환과정에서 매끄러움을 조절하는 정수계수이다. 또한 α 는 후항복에 대한 선항복 강성비를 나타낸다.

표 1. MR 유체감쇠기(Spencer 등., 1997)

매개변수	값	매개변수	값
c_0 (N·sec/cm)	50	γ (cm^{-2})	100
k_0 (N/cm)	25	β (cm^{-2})	100
x_0 (cm)	3.8	n	2
α (N/cm)	880	A	120

표 2. NZ 시스템(Contaninou 등., 1985)

매개변수	값	매개변수	값
F_y (kN)	46	γ	1.4
Y (mm)	7.7	θ	1
α	0.157	η	1
β	-0.54		

3.2 지진강도에 따른 구조물의 지진응답 해석 결과

최대지반가속도에 따른 기초격리장치의 성능을 비교하기 위해 El Centro지진(0.350g), Mexico City지진(0.171g), 그리고 Kobe지진(0.833g)의 응답을 비교하였다. 수치해석을 통한 각각의 지진에 대한 기초지부에서의 변위와 구조물상단으로 전달되는 절대가속도는 그림4에 도시하였으며, 강도별 입력지진에 따른 NZ 시스템에 대한 MR 유체감쇠기의 응답감소율은 표3에서 비교·분석하였다.

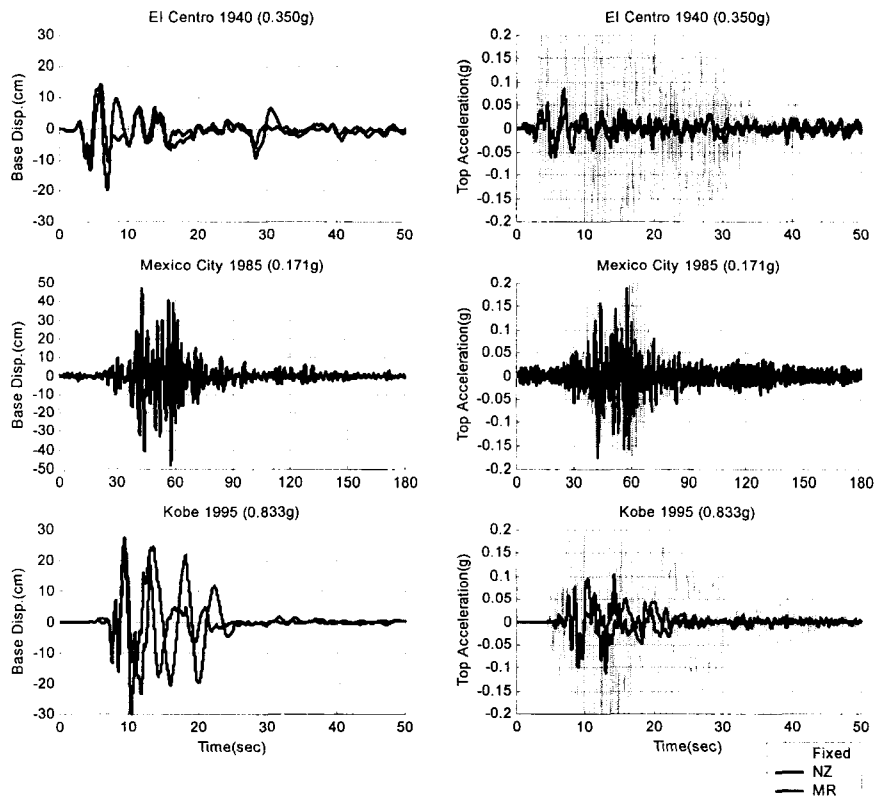


그림 4. 지진강도별 상대변위 및 절대가속도응답

이 같은 결과는 Kobe지진과 같은 강진의 경우 El Centro지진과 Mexico City지진에서 보인 약 30%의 변위응답 감소와 약 41~58%의 가속도응답 감소에 비해 NZ 시스템에 대한 MR 유체감쇠기의

응답감소 효과가 적음을 보이는 것이다. 그러나 Mexico City지진의 경우 MR 유체감쇠기의 응답해석에서 기초지지부의 최대변위는 34cm로 NZ에 비해 약 30% 감소효과를 보이며, 구조물상단의 최대가속도는 0.077g로 기초지지된 경우의 0.275g에 대해 72% 감소시키는 효과를 보인다. 이는 El Centro 및 Kobe지진의 94 ~ 97% 보다 적은 감소이긴 하지만, 기초지지된 경우에 대한 NZ의 감소를 33%와 비교해 볼 때 탁월한 감소효과를 보인다고 할 수 있다.

지진강도별 MR 유체감쇠기의 면진성능은 강진의 경우 NZ와 비교해 볼 때, 기초지지부의 변위감소와 구조물 상단에서의 가속도 감소효과는 미미함을 알 수 있다. 이는 NZ와 MR감쇠기의 면진성능이 강진에서 기초지지된 경우보다 95% 이상의 가속도 응답감소를 보이고 있어 우수한 성능을 발휘하는 반면, 약한 지반가속도를 갖는 입력지진에 대해 NZ와 비교해 볼 때, 기초지지부의 변위감소가 뛰어나다. 구조물상단의 가속도 감소효과는 NZ가 기초지지된 경우에 33% 감소한 것에 비해 MR 유체감쇠기는 72% 감소효과를 보이면서 NZ에 비해 두 배 이상의 성능을 발휘함을 보인다.

표 3. NZ에 대한 MR의 응답감소효과 (지진강도별 해석)

	최대변위 (Base)	최대가속도 (Top)	
	MR damper의 감소	NZ의 감소	MR damper의 감소
El Centro (0.350g)	29%	(90%)	41% (94%)
Mexico City (0.171g)	30%	(33%)	58% (72%)
Kobe (0.83g)	9%	(96%)	36% (97%)

* () 안은 Fixed Base에 대한 감소

3.3 주기특성별 입력지진에 대한 구조물의 응답 해석

이미 언급된 기초격리장치의 면진성능을 입력지진의 주기특성별로 비교·분석하기 위해 각각의 최대지반가속도를 Scale Factor에 의해 0.35g로 정규화하여 해석을 수행하였다. 0.5 Hz의 탁월주파수를 보이는 장주기 특성의 Mexico City지진과 1-2 Hz 사이의 주파수영역에서 탁월주파수를 가지는 El Centro지진 및 Kobe지진과 같은 단주기 특성의 지진에서 나타나는 기초격리장치의 성능을 비교한 결과는 그림5에 나타내었으며, 주기특성별 입력지진에 따른 NZ 시스템에 대한 MR 유체감쇠기의 응답감소율은 표4에서 비교·분석하였다.

그림5에서 볼 수 있듯이, 단주기 특성이 강한 El Centro지진과 Kobe지진의 경우 기초격리장치를 적용한 구조물의 기초지지부에서의 최대변위가 10~20cm이고, 구조물상단의 최대가속도가 0.04~0.08g로 기초지지된 경우의 0.8~1.0g보다 약 90% 이상의 감소를 보인 반면, 장주기 특성이 강한 Mexico City지진에서는 MR감쇠기의 경우 약 64cm로 큰 변위를 보이고, NZ의 경우에는 두 배 정도인 약 117cm 정도의 값을 가지며, 최대절대가속도는 NZ의 경우 0.4g로 기초지지된 경우의 0.56g와 큰 차이가 없으나, MR감쇠기를 적용한 경우는 0.13g로 1/4의 감소효과를 보이고 있어 상대적으로 우수한 면진성능을 확인할 수 있다. 이런 해석결과에 의해 장주기 특성이 강한 지진의 경우 기초격리장치의 설계시 변위허용량에 대한 주의가 필요할 것이다.

El Centro지진과 Kobe지진에 적용된 MR 유체감쇠기의 면진성능은 NZ에 대한 기초지지부의 변위감소가 약 16~30%이고, 구조물상단의 가속도 감소효과도 NZ와 비교해서는 약 40% 정도, 기초지지된 경우와 비교해서는 약 95% 정도로 우수한 효과를 보인다. 이는 NZ로 기초격리된 경우(약 90% 감소)와 큰 차이를 보이지는 않는다. 그러나 Mexico City지진에서 MR 유체감쇠기의 면진성능은 NZ에 대해 기초지지부의 변위감소가 45%이고, 구조물상단의 가속도 감소효과도 NZ가 기초지지된 경우와 비교할 때 28% 감소한 것에 비해 MR 유체감쇠기는 76% 감소함으로써 NZ보다 약 3배의 높은 감소효과를 보인다. 특히 MR 유체감쇠기의 경우는 일정한 전류공급상태로 인해 능동제어 요소

가 결여되었음에도 불구하고, 구조물 상단으로 전달되는 가속도를 상당히 감소시킴으로써 기초격리장치로서의 역할을 충실히 수행하는 것으로 판단된다.

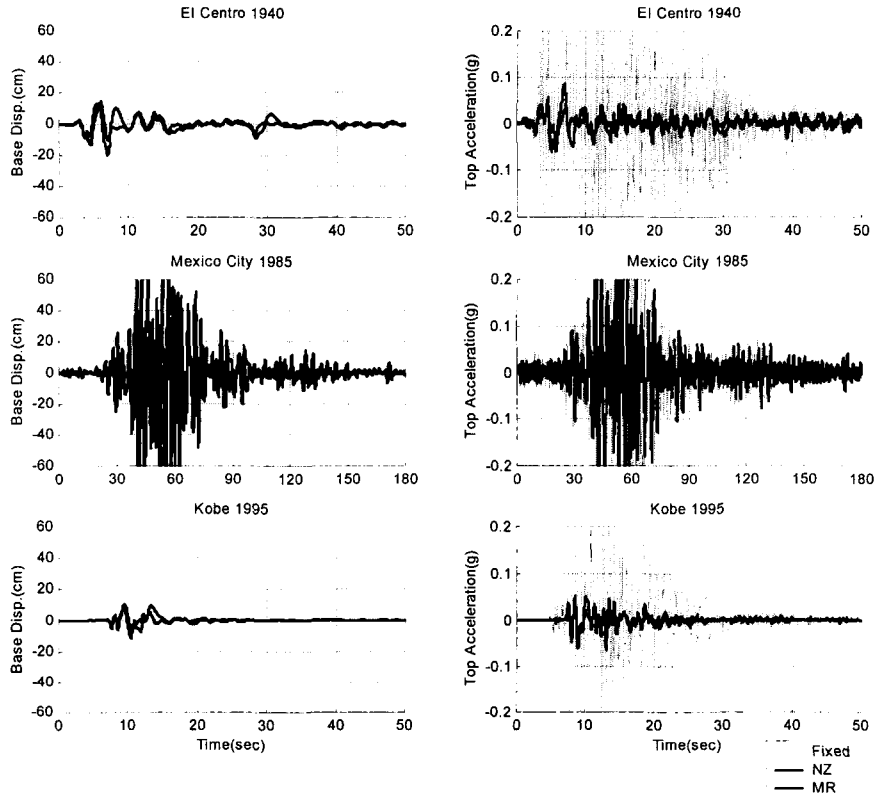


그림 5. 주기특성별 상대변위 및 절대가속도응답 (0.350g)

표 4. NZ에 대한 MR의 응답감소효과 (주기특성별 해석)

	최대변위 (Base)		최대가속도 (Top)	
	MR damper의 감소	NZ의 감소	NZ의 감소	MR damper의 감소
El Centro (0.35g)	29%	(90%)	41%	(94%)
Mexico City (0.35g)	45%	(28%)	67%	(76%)
Kobe (0.35g)	16%	(94%)	41%	(96%)

* () 안은 Fixed Base에 대한 감소

4. 결론

각기 다른 특성을 대표하는 El Centro지진(1940), Mexico City지진(1985), Kobe지진(1995)의 지반가속도 데이터를 지진강도별, 주기특성별 입력지진동으로 하여 NZ시스템과의 비교를 통해 다음과 같은 MR 유체감쇠기의 기초격리시스템으로서의 면진성능을 확인할 수 있었다.

- 강진의 경우에 대해서 NZ 시스템의 성능과 큰 차이를 보이지는 않지만 기초지지된 경우에 대해 90% 이상의 우수한 감소효과를 보였으며, 약한 지진에 대해서는 NZ 시스템이 약 30% 감소효과를 보인 반면, MR 유체감쇠기는 두 배 이상인 70%의 감소효과를 보인다.

- 장주기 특성이 강한 지진에 대한 MR 유체감쇠기의 기초지지부 변위와 구조물상단으로의 전달가속도는 이러한 지진특성하에서 거의 효율성이 없는 NZ 시스템의 성능과 비교해 약 3 배 이상의 우수한 감쇠효과를 보인다.
- 적용된 MR 유체감쇠기 모델은 세가지 지진동에 대해 일정수준 이상의 고른 응답감소 효과를 보인다.

이상의 결과로부터 본 연구에서 제시한 MR 유체감쇠기의 기초격리시스템 모델은 예측 불가능한 입력지진하중에 적용이 가능하며, 기초지지부의 변위응답과 구조물상부의 전달가속도를 감소시키는 성능 또한 우수하여 일정한 전류공급하에서 기존 장치의 대체효과를 확인할 수 있었다. 특히, 중약진 지역으로 지진으로 인한 대형 피해가 없었던 우리나라의 경우에 능동제어 되지않는 상태의 MR 유체감쇠기로도 지진의 강도나 주기특성 등에 따른 다양한 변화에 대해 충분한 효과를 발휘할 것이라 판단된다. 단, MR 유체감쇠기의 면진성능에 대한 좀더 정확한 분석이 이루어지기 위해서는 실험을 통한 다양한 입력변수의 결정과 이에 따른 정밀한 역학적 모델의 적용이 선행된 추가적인 연구가 필요할 것이라 사료된다.

참고문헌

1. Constantinou, M.C. and Tadjbakhsh, I.G. (1985), "Hysteretic Dampers in Base Isolation: Random Approach," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 111, pp. 705-721.
2. Dyke, S.J., Spencer, Jr., B.F., Sain, M.K. and Carlson, J.D. (1996), "Modeling and Control of Magnetorheological Dampers for Seismic Response Reduction," *Smart Materials and Structures*, Vol. 5, pp. 565-575.
3. Jansen, L.M. and Dyke, S.J. (2000), "Semiactive Control Strategies for MR Dampers: Comparative Study," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 126, pp. 795-803.
4. Johnson, E.A., Ramallo, J.C., Spencer, Jr., B.F. and Sain, M.K. (1998), "Intelligent Base Isolation Systems," *Proceedings of the Second World Conference on Structural Control*, Kyoto, Japan, pp. 367-376.
5. Spencer, Jr., B.F., Dyke, S.J., Sain, M.K. and Carlson, J.D. (1997), "Phenomenological Model of a Magnetorheological Damper," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 123, pp. 230-238.
6. Spencer, Jr., B.F., Johnson, E.A. and Ramallo, J.C. (2000), "Smart Isolation for Seismic Control," *JSME International Journal: Special Issue on Frontiers of Motion and Vibration Control*, Series C, Vol. 43, pp. 704-711.
7. Su, L., Ahmadi, G. and Tadjbakhsh, I.G. (1989), "A Comparative Study of Base Isolation Systems," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 115, No. 9, pp. 1976-1992.
8. Su, L. and Ahmadi, G. (1989), "A Comparative Study of Performances of Various Base Isolation Systems, Part 1: Shear Beam Structures," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 18, pp. 11-32.
9. Symans, M.D. and Kelly S.W. (1999), "Fuzzy Logic Control of Bridge Structures Using Intelligent Semi-Active Seismic Isolation Systems," *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 28, No. 1, pp. 37-60.
10. Yang, G., Ramallo, J.C., Spencer, Jr., B.F., Carlson, J.D. and Sain, M.K. (2000), "Large-Scale MR Fluid Dampers: Dynamic Performance Considerations," *Proceedings of International Conference on Advances in Structure Dynamics*, Vol. 1, Hong Kong, China, pp. 341-348.