

자기민감 고무를 이용한 구조물의 면진성능 연구

A Study on Base Isolation Performance of Magneto-Sensitive Rubbers

황인호¹⁾ · 임종혁²⁾ · 이종세³⁾

Hwang, In-Ho · Lim, Jong-Hyuk · Lee, Jong-Seh

국문 요약 >> 최근 들어 지진발생 빈도의 증가와 더불어 초고층 빌딩, 장대교량 등과 같은 대형구조물의 경량화, 유연화로 인해 발생하는 구조물의 과도한 동적거동을 효과적으로 제어할 수 있는 제진시스템의 필요성이 증가하고 있다. 본 연구에서는 지진으로부터 구조물을 보다 효과적으로 보호하기 위해 자기장에 의해 역학적 성질을 변화시킬 수 있는 제어가 가능한 지능형재료인 자기민감 고무 (Magneto-Sensitive Rubber)를 이용한 반 능동 기초격리 시스템을 제안하였다. 제안된 기초격리 시스템은 기존의 LRB(Lead-Rubber Bearing) 시스템과의 비교·분석을 통해 면진성능을 평가하였으며 이를 위해 몇 가지 역사적 지진들을 이용 수치해석을 수행하였다. 제안된 자기민감 고무를 이용한 반 능동 기초격리 시스템은 기존의 수동 시스템보다 기초전단력이나 상부구조물에 가속도 전달을 차단함과 동시에 기초변위를 현저하게 감소시킬 수 있음을 보였다. 그러므로 자기민감 고무를 이용한 반 능동 기초격리 시스템은 지진으로부터 구조물을 효과적으로 보호할 수 있을 것으로 사료된다.

주요어 자기민감 고무, 기초격리 시스템, 납-고무 면진시스템, 지능형 제어

ABSTRACT >> Recently, as large structures such as high-rise building and long span bridge become lighter and more flexible, the necessity of structural control for reducing excessive dynamic response due to seismic excitation is increased. In this study, a semi-active base isolation system using Magneto-Sensitive (MS) rubbers is proposed to effectively protect structures against earthquakes. MS Rubber is a class of smart controllable materials whose mechanical properties change instantly by the application of a magnetic field. To demonstrate the performance of this device, the MS Rubber isolation system is compared to Lead-Rubber Bearing (LRB) isolation systems and judged based on computed responses to several historical earthquakes. The MS Rubber isolation system is shown to achieve notable decreases in base drifts over comparable passive systems with no accompanying increase in base shears or in accelerations imparted to the superstructure. The proposed MS Rubber system is shown to perform better than the passive isolation system.

Key words MS rubbers, base isolation, LRB system, smart controllable materials

1. 서론

최근 전 세계적으로 대규모의 지진이 연이어 발생하여 엄청난 인명과 경제적 손실을 가져왔다. 이러한 지진의 피해로 인하여 우리나라를 비롯한 많은 나라에서 주요 사회기반 구조물과 주거지역의 아파트 및 고층빌딩에 대한 내진설계에 대한 관심이 높아져왔다. 내진설계는 크게 강도증가와

연성증가의 두 가지 방법으로 분류되는데 이 가운데 강도증가에 의한 내진설계의 경우 지나치게 큰 부재가 설계되어 비경제적이며, 구조물의 갑작스런 취성파괴 양상에 의해 큰 인명피해를 유발할 수 있다. 연성증가에 의한 내진설계는 구조부재의 소성변형에 의해 지진에너지를 흡수함으로써 지진하중의 크기를 효과적으로 줄일 수 있도록 하는 방법이지만 지진발생 후 보수보강이 어렵고 비용이 많이 드는 단점이 있다.

이러한 내진설계의 한계를 극복하기 위해 구조물에 유입되는 진동에너지를 부가적인 장치를 이용하여 흡수 또는 차단함으로써 구조물을 보호하고자 하는 면진시스템이 관심을 가지게 되었다. 대표적인 면진시스템인 기초격리장치에 대한 연구는 Kelly(1986)⁽¹⁾, Su 등(1989)⁽²⁾ 등에 의해 시작

¹⁾ 정회원·한양대학교 토목공학과 박사과정
(대표저자: hinho@hanyang.ac.kr)

²⁾ 한양대학교 토목공학과 석사

³⁾ 정회원·한양대학교 토목공학과 교수

본 논문에 대한 토의를 2006년 10월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2006. 4. 25 / 심사종료일 : 2006. 5. 10)

되어, Elastomer Bearing, Lead Rubber Bearing, Sliding Bearing 등 다양한 개념의 기초격리 장치들이 개발되었으며 미국, 일본, 뉴질랜드 등의 국가들을 중심으로 기초격리 시스템을 이용한 교량, 건축물의 내진설계 규정을 제시하고 있다.

그러나 면진장치를 이용한 내진설계는 기초격리 시스템과 구조물로 구성된 구조계의 고유주기를 증가시켜 구조물의 상대변위 응답을 증가시킴으로써, 사용성 및 기초격리 장치의 설계에 불리함을 초래하게 되며, 강한 비선형성을 보이는 동적특성 때문에 광범위한 입력지반운동에 대해서는 적절하지 않은 것으로 알려져 있다. 예컨대 El Centro형의 지진을 위해 설계된 기초격리시스템의 효과는 Mexico City형의 지진과 같은 지진하중의 탁월주파수 성분 등이 변화되고 진원지가 가깝고, 파속이 빠르며, 주기가 긴 지진의 경우 면진성능을 제대로 발휘하지 못한다.

최근에는 기초격리장치와 더불어 능동 장치를 결합한 혼합제어시스템이 개발 되었는데(Kelly et al., 1987; Yang et al., 2000; Nishimura and Kojima, 1998)⁽³⁻⁵⁾, 이러한 혼합 제어 시스템은 수동제어장치에 비하여 다양한 입력하중에 효과적으로 진동을 감소시킬 수 있으며, 또한 구조물의 다중진동모드를 제어할 수 있는 장점이 있다. 반면 능동제어로 인한 고용량의 외부전력이 요구되기 때문에 비용이 높아지고, 장기간에 걸쳐 장치 성능의 신뢰성을 확보하기 어렵다는 단점이 있다.

이에 반해, 제어성 유체를 이용한 반능동제어 시스템은 능동제어시스템과 유사한 성능과 큰 전력공급을 필요로 하지 않는다는 장점 때문에 1992년 이후 ER 및 MR 유체를 이용한 진동제어 장치들을 개발되었고, 소규모의 구조물 모형실험을 통해 제어장치로서의 기능이 확인된 바 있다(Gavin et al., 1996; Dyke et al., 1996; Makris, 1997; Spencer et al., 1997).⁽⁶⁻⁹⁾ 특히 ER 유체감쇠기에 비해 낮은 전력의 공급으로도 작동이 가능한 MR 유체감쇠기는 1994년 이후 Dyke와 Spencer 등에 의해 꾸준히 연구가 되고 있으며, 최근 20ton 규모의 장치가 개발되었다. 그러나 이러한 반 능동 제어장치는 기초격리장치와 더불어 사용하여야 함으로 경제적으로나 실구조물 적용에 문제를 가지고 있다.

그러므로 본 논문에서는 MS Rubber를 이용한 반 능동 기초격리 장치를 제안하였으며 MS Rubber 시스템의 면진 성능을 확인하기 위해 수치해석을 수행하였다. MS Rubber Bearing은 기존의 기초격리장치와 같은 역할을 함과 동시에 자기장을 조절함으로써 반 능동 제어가 가능하다. 수치 해석은 Kelly(1987)등이 사용한 6자유도를 가진 5층 건물을 사용하였으며 전체 시스템의 응답은 각기 다른 특성을

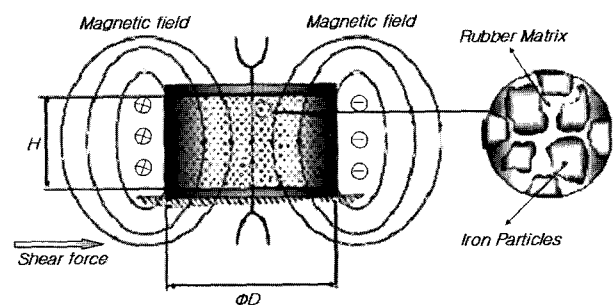
갖는 El Centro 지진(1940), Kobe 지진(1995), Northridge 지진(1994)을 적용하여 MS Rubber Bearing의 기초격리 장치로서의 성능평가를 수행하였다. 또한 각 기초격리시스템의 효율성을 분석하기 위하여 본 연구에서는 세 가지 경우, 즉 (1) 제어되지 않는 기초지지된 구조물, (2) 납삽입형 적층고무베어링이 설치된 기초격리 시스템(LRB 시스템)을 갖는 구조물, (3) 자기장 발생을 통해 제어되는 MS Rubber가 적용된 기초격리 구조물에 대한 해석을 수행하여 그 결과를 비교, 분석하였다.

2. 자기민감 고무(Magneto-Sensitive Rubber)를 이용한 기초격리시스템

2.1 자기민감고무(Magneto-Sensitive Rubber)

MS Rubber는 고무구조체(Rubber Matrix) 내에 철과 같은 입자(iron particles)를 함유함으로써 자기장에 의해 구조체의 성질을 변화시킬 수 있는 스마트 재료(Smart Material)이며, Jacob Rainow 의해 1948년 처음으로 소개가 되었다. 이후 MS Rubber에 관한 연구와 실험이 계속 수행되어져 왔다(Kordonsky, 1993; Jolly et al., 1996a; Carlson and Jolly, 2000).⁽¹⁰⁻¹²⁾ 최근 들어 Brigadnov와 Dorfmann에 의해 MS Rubber의 수학적 모델링이 제안되었으며(2003)⁽¹³⁾, 많은 연구자들이 참여하여 MS Rubber의 성능에 대해 활발한 연구가 진행 중이다(Dorfmann, 2003; Kari, 2005).^(14,15) MS Rubber는 현재 소음 흡수 장치, 소규모의 진동흡수장치, 자동차의 Bushing, 완충장치 등에 성공적으로 적용시켰으나 아직 구조물에 적용된 사례를 찾아볼 수 없다.

본 논문에서는 그림 1과 같이 MS Rubber를 이용한 기초격리장치를 제안하였다. 제안된 MS Rubber Bearing은 기존의 기초격리장치와 같이 전단변형에 의해 지진력으로부터 구조물에 가해지는 진동 에너지를 흡수 또는 차단한다. 그러나 제어시스템을 이용하여 적절히 자기장을 변화시킴으로써 반능동 제어가 가능하도록 모델링되었다.



〈그림 1〉 제안된 MS Rubber Bearing 장치 모델

2.2 기초격리 시스템의 운동방정식

일반적인 기초격리 장치의 역할은 지진하중에 대해 구조물의 고유진동수를 지진에너지가 우수한 진동수 영역 밖으로 이동시켜 지진에너지의 전달을 감소시키고, 장치의 감쇠효과를 통해 에너지를 흡수·분산시켜 하부구조의 진동으로부터 상부구조물을 보호하는 것이다. 이에 대한 역학적 모델은 그림 2와 같이 구조물과 기초지지부로 간단히 2자유도 모형으로 나타내면 다음과 같은 운동방정식으로 표현할 수 있다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = Af - M\ddot{x}_g \tag{1}$$

여기서, f 와 $A=[1 \ 0]^T$ 는 각각 기초격리장치에 의한 추가력과 위치벡터, \ddot{x}_g 는 지진하중, 그리고 $x=[x_b \ x_s]^T$ 는 기초와 구조물의 변위를 나타내며 질량(M), 감쇠(C), 강성(K) 행렬은 다음과 같다.

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

여기서 m_b, m_s 는 각각 기초판과 상부구조물의 질량, c_b, k_s, c_s, k_s 는 각각 기초판과 상부구조물의 감쇠와 강성이다.

상태변수를 $q=[x^T \ \dot{x}^T]^T$ 로 정의하여 기초격리시스템을 상태공간방정식으로 나타내면 다음과 같다.

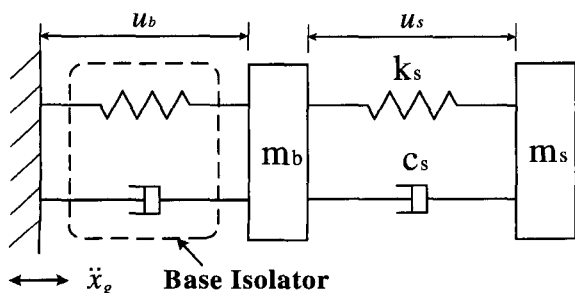
$$\dot{q} = Aq + Bf + E\ddot{x}_g \tag{3}$$

여기서 $A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 \\ -M^{-1}A \end{bmatrix}$, $E = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}$ 로 각각 시스템 행렬, 제어행렬, 외란행렬을 나타낸다.

3. 수치해석

3.1 대상구조물

본 논문에서는 MS Rubber Bearing의 기초격리 시스템으



〈그림 2〉 기초격리시스템의 역학적 모델

로서의 면진성능을 검증하기 위해 그림 3과 같이 6자유도를 가진 Kelly(1987) 등이 사용한 5층 건물에 대한 수치해석을 수행하였다. 대상구조물의 질량과 강성, 감쇠 등은 표 1과 같다. 기초 지지된 구조물은 첫 번째 모드에서 2%의 감쇠와 0.3초의 고유주기를 가진다. 구조물의 동적 비선형성을 무시하였지만 과도한 구조적 움직임을 충분히 고려하였다.

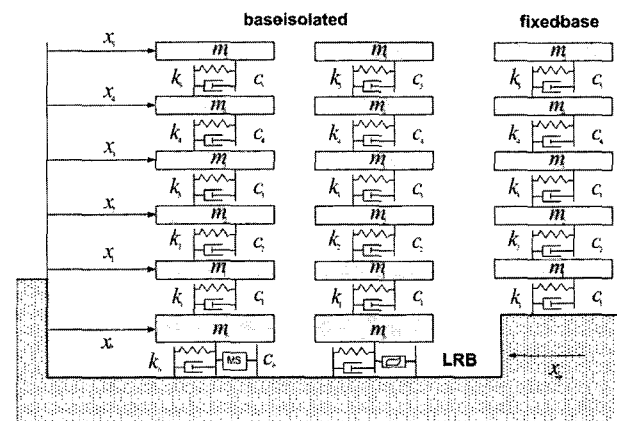
제안된 기초격리시스템의 면진성능 비교를 위한 LRB 시스템은 14.83kN의 항복력을 갖는 납삽입적층고무형 기초격리장치로 설계하였으며, 본 연구에서 사용할 이력복원력 f_{LRB} 와 무차원 이력 변수 z 는 식 (4)와 (5)로 부터 구해진다.

$$f_{LRB} = Q_{pb} + k_b x_b + c_b \dot{x}_b \tag{4}$$

$$z = -\gamma |\dot{u}_b| |z|^{n-1} - \beta \dot{u}_b |z|^n + A \dot{u}_b \tag{5}$$

여기서, Q_{pb} 는 납의 항복하중으로 $Q_{pb} = (1 - K_{yield}/K_{initial}) \cdot Q_y$ 로부터 구해지며, Q_y 는 구조물 전체 무게의 5%로 가정하였으며 납의 항복 전/후의 강성비(β, γ), 무차원 매개변수(A), 정수계수(n) 등 LRB 시스템에 사용된 매개 변수의 값들은 표 2에서와 같이 Ramallo(2002)⁽¹⁶⁾의 논문에서 사용한 설계변수를 사용하였다.

제안된 MS Rubber 시스템의 반 능동 제어시스템을 도입하기 위해 우선 능동시스템의 설계를 하였다. 능동시스템의



〈그림 3〉 수치해석을 위한 대상구조물

〈표 1〉 구조물 물성(Kelly et al. 1987)

위치	층별 질량[kg]	층별 강성[kN/m]	층별 감쇠[kNs/m]
Base	$m_b = 6800$	$k_b = 231.5$	$c_b = 3.74$
1층	$m_1 = 5897$	$k_1 = 33732$	$c_1 = 67$
2층	$m_2 = 5897$	$k_2 = 29093$	$c_2 = 58$
3층	$m_3 = 5897$	$k_3 = 28621$	$c_3 = 57$
4층	$m_4 = 5897$	$k_4 = 24954$	$c_4 = 50$
5층	$m_5 = 5897$	$k_5 = 19059$	$c_5 = 38$

〈표 2〉 LRB 시스템의 설계변수

매개변수	값	매개변수	값
Q_{pb}	14.48(kN)	γ	38.37
Q_y	18.14(kN)	A	76.74
$\frac{K_{yield}}{K_{initial}}$	6	n	1
		β	-38.37

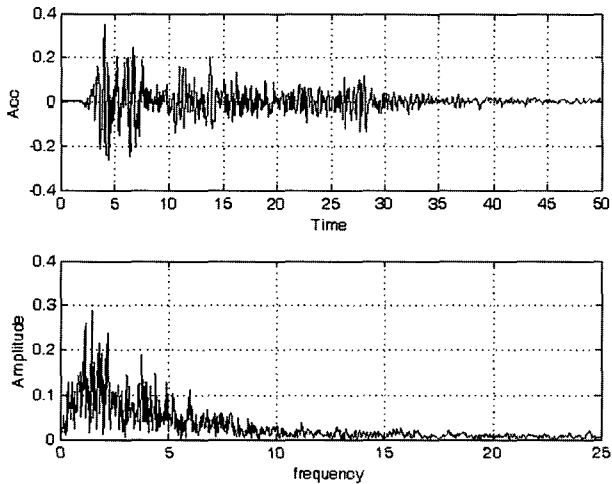
설계에 있어서 첫 번째로 식 (6)과 같은 성능지수를 최소화 하는 Q 값과 R 값을 구하였다.

$$J = \int_0^{\infty} (z^T Q z + F^T R F) dt \quad (6)$$

본 연구에서는 수많은 시행착오를 통해 $R = \frac{1}{(22kN)^2}$
 $= \frac{1}{(22000)^2}$, $Q = \text{diag} \begin{pmatrix} q'_{drifts} I & 0 \\ 0 & q'_{accels} I \end{pmatrix}$ 을 사용하였다. 여기서 $q'_{drifts} = 33.1$, $q'_{accels} = 99.3$ 이다. 또한 반 능동 제어를 위해 Clipped-Optimal Control 알고리즘을 사용하여 기본적으로 감쇠력을 가지고 있는 MS Rubber의 최소 감쇠력을 1kN으로 하였고 최대 감쇠력을 200kN으로 가정하여 수치 해석을 실시하였다.

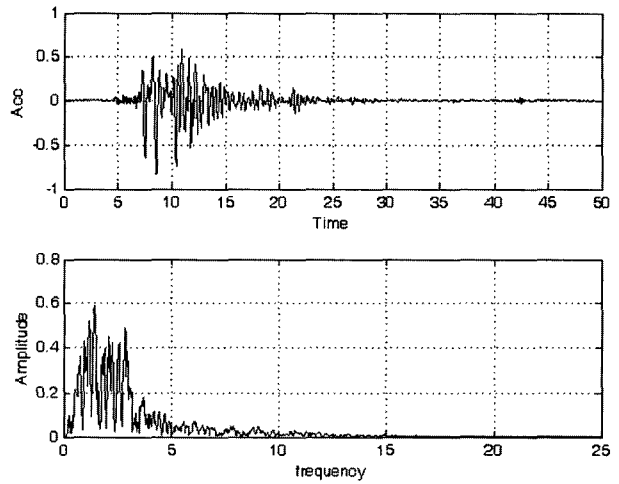
3.2 입력 지진하중

현재까지 내진설계기준이나 기초격리장치에 대한 연구와

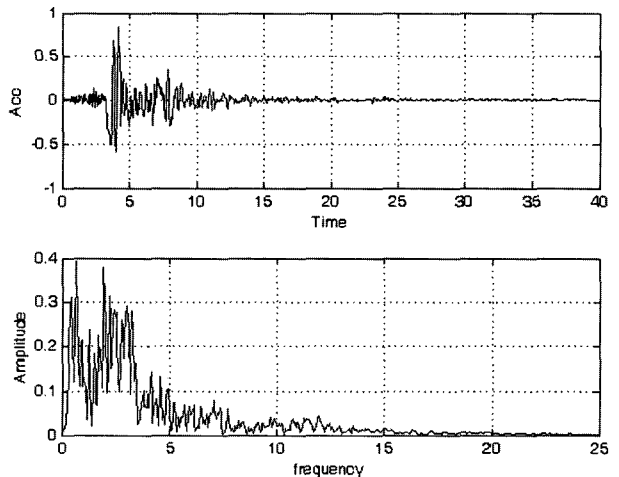


〈그림 4〉 El Centro지진의 지반가속도 및 FFT 변환

설계 시 El Centro(1940) 지진이 표준 지진처럼 언급되어져 왔다. 이는 가속도계로 기록되어진 최초의 강진이란 역사적 의의 뿐 아니라, 가속도그램의 푸리에 스펙트럼이 대부분의 이용가능한 주 지진기록을 위한 에너지의 일반적인 분포이기 때문이다. Kobe(1995) 지진은 멕시코시티와 유사한 퇴적지반에서의 지진이며, 지표아래 20km에서 발생한 천발지진으로 최대지반가속도가 0.83g를 기록한 도심직하형 강진의 대표적인 경우이다. Northridge(1994) 지진은 규모 6.8의 강진으로 역단층운동에 의하여 일어났으며 오늘날 전 세계적으로 진행되고 있는 성능에 기초한 내진설계개발의 직접적인 배경이 되었던 지진이다.



〈그림 5〉 Kobe지진의 지반가속도 및 FFT변환



〈그림 6〉 Northridge지진의 지반가속도 및 FFT변환

〈표 3〉 적용된 지진하중의 특성

지진	발생일자	기록시간 (sec)	탁월주파수 (Hz)	규모	PGA (g)
El Centro	1940. 5. 18	50	1.5	7.1	0.35
Kobe	1995. 1. 17	50	1.3	7.2	0.833
Northridge	1994. 1. 17	40	0.63	6.8	0.843

앞서 세 가지 각기 다른 성격의 지진동을 통해 기초격리 시스템으로서 작용하는 LRB 시스템과 MS Rubber의 면진 성능을 비교하였다. 본 수치해석에서 입력지진동으로 사용된 지진의 가속도그램 및 FFT변환을 그림 4, 5, 6에 나타내었으며, 각 지진의 특성은 표 3과 같다.

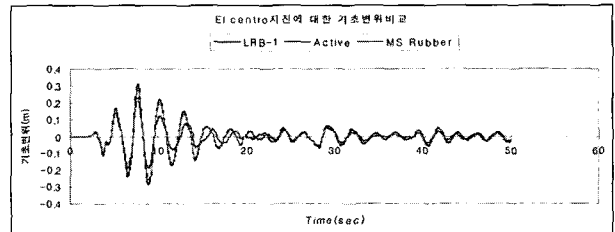
3.3 지진강도에 따른 구조물의 지진응답 해석 결과

최대지반가속도의 강도에 의해 El Centro지진(0.350g), Kobe지진(0.833g), Northridge지진(0.843g)에서 나타나는 기초격리장치의 성능을 최대 기초변위, 최상위층의 최대가속도, 1-2층간 상대 변위를 비교하였다. 해석 결과 표 4와 5에서와 같이 LRB 시스템에 비해 본 연구에서 제안된 MS Rubber를 이용한 기초격리시스템이 모든 지진에 대해 월등히 우수한 면진성능을 보임을 알 수 있었다.

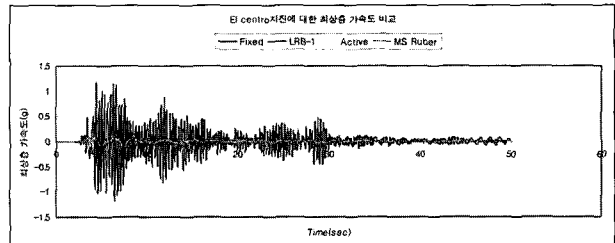
먼저 El Centro 지진에 대한 동적거동을 살펴보면, 그림 7, 8, 9과 같이 기초변위에 있어서 MS Rubber는 28cm, LRB 시스템은 30cm 로서 2cm 감소되는 결과를 보여주고 최상층 가속도에서는 MS Rubber에서는 0.191g, LRB 시스템은 0.542g 로서 기초지지상태에 비해 MS Rubber는 약 84%의 감소를 보여주었고 LRB 시스템은 약 55%의 감소를 보여주고 있다. 1-2층간 상대 변위는 MS Rubber가 1.5mm, LRB 시스템은 2.7mm로서 기초 지지된 구조물의 1-2층간 상대 변위에 비해 MS Rubber는 80%이상, LRB 시스템은 약 68%이상의 감소를 보이면서 MS Rubber의 층간 상대변위가 LRB 시스템보다 우수한 것으로 나타내고 있다.

그림 10은 El Centro 지진에 대한 LRB 시스템과 MS Rubber에서의 변위와 감쇠력의 관계를 나타내고 있다. LRB 시스템은 약 80.49kN, MS Rubber는 약 119kN의 감쇠력을 나타내었다.

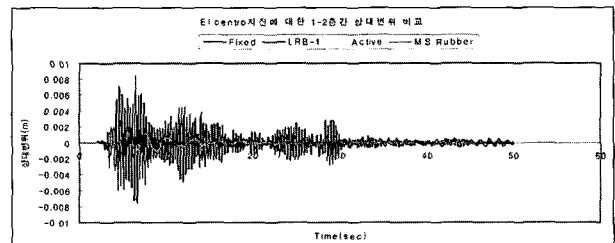
다음으로 근역지진인 Kobe 지진에 대한 기초 변위와 최상층의 가속도, 1-2층간 상대 변위에 대해 비교해 보았다. 그림 11, 12, 13과 같이 기초변위에 있어서 MS Rubber는 36.1cm, LRB 시스템은 43.3cm로서 약 7cm 정도의 감소되는 결과를 나타내었다. 최상층 가속도에서는 MS Rubber에서는 0.244g, LRB 시스템에서는 0.372g으로서 기초지지상



〈그림 7〉 El Centro 지진에 대한 기초변위응답



〈그림 8〉 El Centro 지진에 대한 최상층 가속도 응답



〈그림 9〉 El Centro 지진에 대한 1-2층간 상대변위응답

〈표 4〉 지진하중을 적용한 각 시스템의 해석결과

	Fixed Base			LRB System			MS Rubber		
	El Centro	Kobe	Northridge	El Centro	Kobe	Northridge	El Centro	Kobe	Northridge
최대 기초변위(m)	-	-	-	0.305	0.433	0.979	0.282	0.361	0.811
최상층 가속도(g)	1.197	2.986	4.008	0.542	0.372	0.815	0.191	0.244	0.543
1-2층간 상대변위(m)	0.00836	0.019	0.0251	0.00277	0.0096	0.0066	0.0015	0.002	0.0043

〈표 5〉 LRB 시스템에 대한 MS Rubber의 응답효과

지진	최대기초변위		최상층의 최대 가속도		1-2층간의 상대변위	
	LRB	MS Rubber	LRB	MS Rubber	LRB	MS Rubber
El Centro(0.350g)	-	7%	(55%)	65%(84%)	(68%)	46%(80%)
Kobe(0.83g)	-	17%	(88%)	34%(92%)	(50%)	79%(90%)
Northridge(0.843g)	-	17%	(80%)	33%(86%)	(74%)	35%(83%)

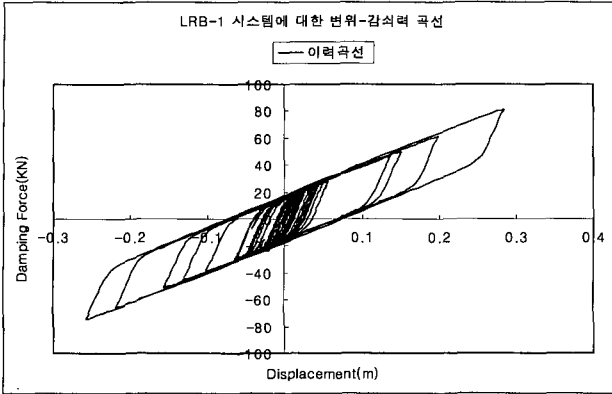
*()안은 Fixed Base에 대한 응답감소효과를 나타냄.

태에 비해 MS Rubber는 약 92%의 감소를 보여주었고 LRB 시스템에 대해서는 약 88%의 감소를 보여주고 있다. 1-2층간 상대변위는 MS Rubber가 1.95mm, LRB 시스템은 9.61mm로서 기초 지지된 구조물의 1-2층간 상대변위에 비해 MS Rubber는 약 90%, LRB 시스템은 약 50%의 감

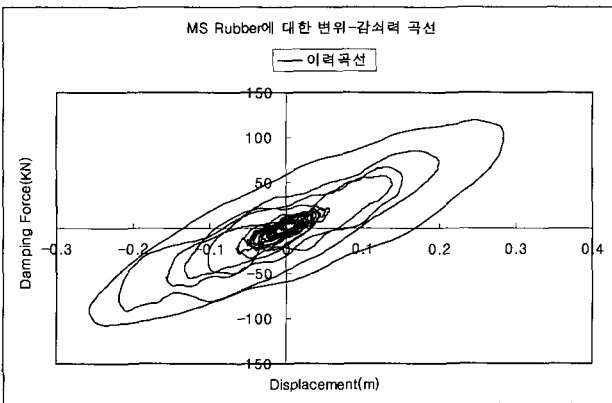
소를 보이면서 MS Rubber의 층간 상대 변위가 LRB 시스템보다 우수한 것으로 나타났다.

그림 14는 Kobe 지진에 대한 LRB 시스템과 MS Rubber에서의 변위와 감쇠력의 관계를 나타내고 있다. LRB 시스템은 약 98.98kN, MS Rubber는 약 190.57kN의 최대 감쇠력을 나타내었다.

마지막으로 Northridge 지진에 대한 기초 변위와 최상층의 가속도, 1-2층간 상대 변위에 대해 비교해 보았다. 그림 15, 16, 17과 같이 기초변위에 있어서 MS Rubber는 81cm, LRB 시스템은 97.9cm로서 약 17cm 정도의 감소되는 결과를 나타내었다. 최상층 가속도에서는 MS Rubber에서는 0.543g,

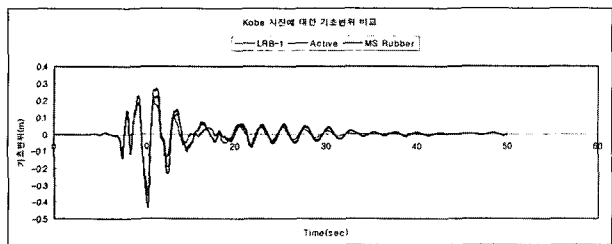


(a) LRB 시스템

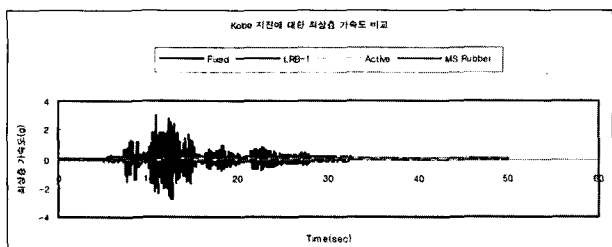


(b) MS Rubber

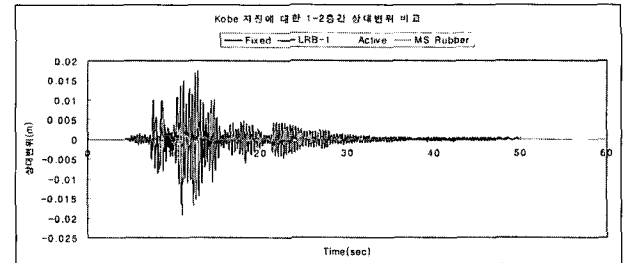
〈그림 10〉 El Centro 지진에 대한 변위-감쇠 곡선



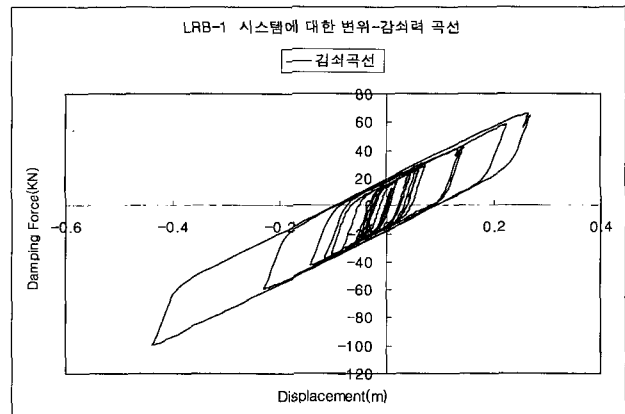
〈그림 11〉 Kobe 지진에 대한 기초변위 응답



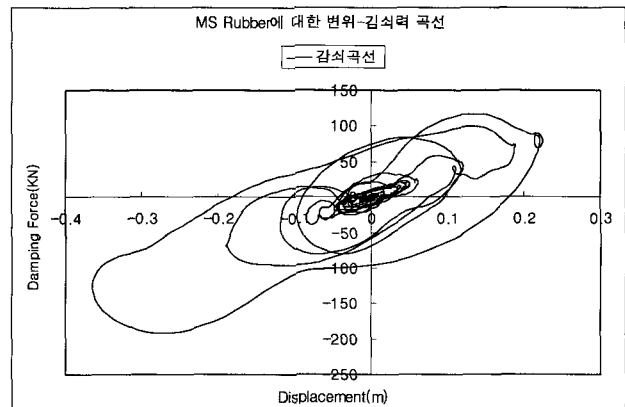
〈그림 12〉 Kobe 지진에 대한 최상층 가속도 응답



〈그림 13〉 Kobe 지진에 대한 1-2층간 상대변위

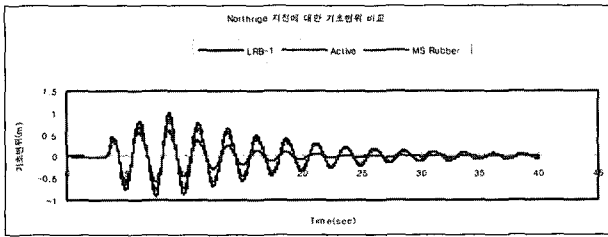


(a) LRB 시스템

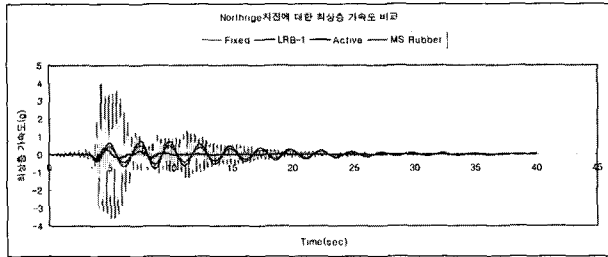


(b) MS Rubber

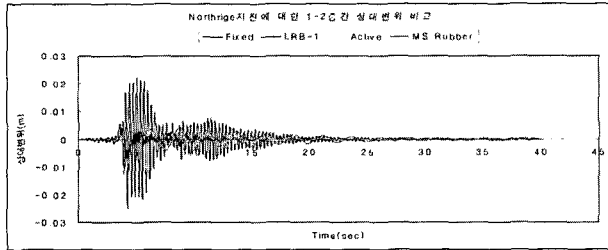
〈그림 14〉 Kobe 지진에 대한 변위-감쇠력 곡선



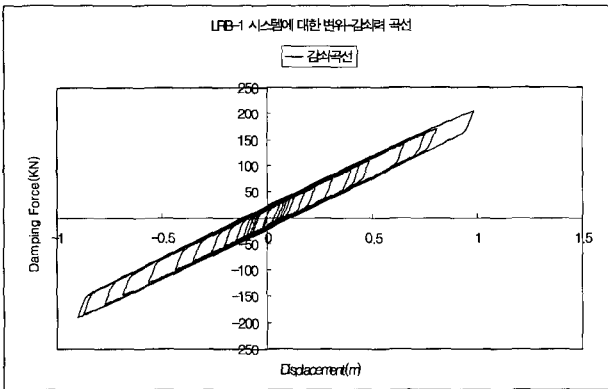
〈그림 15〉 Northridge 지진에 대한 기초변위 응답



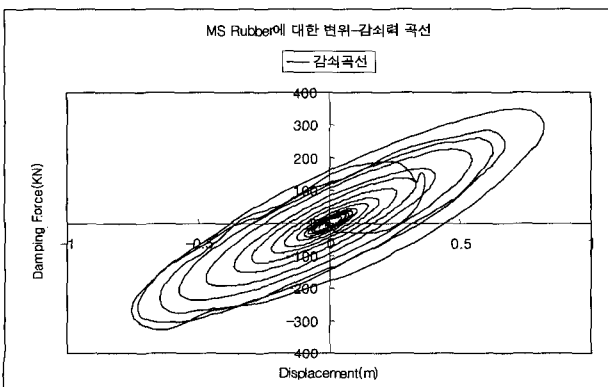
〈그림 16〉 Northridge 지진에 대한 최상층 가속도 응답



〈그림 17〉 Northridge 지진에 대한 1-2층간 상대변위 응답



(a) LRB 시스템



(b) MS Rubber

〈그림 18〉 Northridge 지진에 대한 변위-감쇠력 곡선

LRB 시스템에서는 0.815g 으로서 기초지지상태에 비해 MS Rubber는 약 86%의 감소를 보여주었고 LRB 시스템에 대해서는 약 80%의 감소를 보여주고 있다. 1-2층간 상대변위는 MS Rubber가 4.3mm, LRB 시스템은 6.6mm로서 기초 지지된 구조물의 1-2층간 상대변위에 비해 MS Rubber는 약 83%, LRB 시스템은 약 74%의 감소를 보였다.

그림 18은 Northridge 지진에 대한 LRB 시스템과 MS Rubber에서의 변위와 감쇠력의 관계를 나타내고 있다. LRB 시스템은 약 204.98kN, MS Rubber는 약 341.17kN의 최대 감쇠력을 나타내었다.

4. 결론

본 논문에서는 MS(Magneto-Sensitive) Rubber를 이용한 반 능동 기초격리 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템의 면진성능을 분석하기 위해 수치해석을 수행하였으며, LRB 시스템과 비교·분석을 함으로써 MS Rubber가 기존의 격리장치와 같은 역할을 함과 동시에 반 능동제어가 가능함을 알아보았다. 수치해석 결과 지진하중에 의한 구조물 파괴의 중요한 요소들인 최상층 가속도 및 1-2층간 상대 변위를 비교하였을 때 기존의 단편적인 하중조건에 대하여 좋은 성능을 보인 LRB 시스템보다 보다 다양한 하중조건 하에서 고른 면진성능을 보임을 알 수 있었다. 그러므로 본 연구에서 제안된 MS Rubber가 기초격리 장치로서의 가능성을 보여주었다. 그러나 아직까지 국내·외적으로 아직 구조물에 적용할 수 있는 이론적, 실험적 데이터가 부족한 상태이다. 앞으로 반 능동 기초격리 장치로서의 MS Rubber의 면진기능을 확실히 증명된다면, 현재 활발히 연구되고 있는 수동 시스템에 부가적으로 설치되어 사용하는 MR 감쇠기보다 사용성과 적용성, 경제적 이점을 바탕으로 구조물 진동제어에 널리 사용될 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. Kelly, J.M., "A seismic base isolation: Review and Bibliography," *Soil dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 5, 1986, pp. 202-216
2. Su, L. and Ahmadi, G., "A comparative study of performances of various base isolation systems, Part 1: Shear beam structures," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 18, 1989, pp. 11-32.
3. Kelly, J.M., Leitmann, G. and Soldatos, A.G., "Robust control of base-isolated structures under earthquake excitation," *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol. 53,

- 1987, pp. 159-180.
4. Yang, G., Ramallo, J.C., Spencer, Jr., B.F., Carlson, J.D. and Sain, M.K., "Large-scale MR fluid dampers: dynamic performance considerations," *Proceedings of International Conference on Advances in Structure Dynamics*, Hong Kong, China, Vol. 1, 2000, pp. 341-348.
 5. Nishimura, H. and Kojima, A., "Robust Vibration Isolation Control for a Seismically Excited Building," *Proceedings of the Second World Conference on Structural Control*, Kyoto, Japan, Vol. 2, 1998, pp. 1399-1406.
 6. Gavin, H.P., Hanson, R.D. and Filisko, F.E., "Electrorheological Dampers Part 1: Analysis and Design," *Journal of Applied Mechanics*, ASME, Vol. 63, 1996, pp. 669-675.
 7. 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.
 8. Makris, N., "Rigidity-Plasticity-Viscosity: Can Electrorheological Dampers Protect Base-Isolated Structures from Near Source Earthquakes," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 26, 1997, pp. 1399-1406.
 9. Spencer, Jr., B.F., Dyke, S.J., Sain, M.K. and Carlson, J.D., "Phenomenological model of a magnetorheological damper," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 123, 1997, pp. 230-238.
 10. Kordonsky, W., "Magnetorheological effects as a base of new devices and technologies," *J. Mag. & Mag. Mat*, Vol. 122, 1993, pp. 395-398.
 11. Jolly, M.R., Carlson, J.D. and Munoz, B.C., "A model of the behaviour of magnetorheological materials," *Smart Material Structures*, Vol. 2, 1996, pp. 607-614.
 12. Carlson J.D. and Jolly M.R., "MR fluid, form and elastomer devices," *Mechatronics*, Vol. 10, 2000, pp. 55-69.
 13. Brigadnov, I.A. and Dorfmann, A., "Mathematical modeling of magneto-sensitive elastomers," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 40, 2003, pp. 4659-4674.
 14. Dorfmann, A. and Ogden, R.W., "Magnetoelastic modelling of elastomers," *European Journal of Mechanics*, Vol. 22, 2003, pp. 497-507.
 15. Kari, L. and Blom, P., "Magneto-sensitive rubber in a noise reduction context -exploring the potential," *Plastic, Rubber and Composites*, Vol. 34, No. 8, 2005, pp. 365-371.