

자기민감 고무를 이용한 구조물의 면진성능 연구

A Study on Base Isolation Performance of Magneto-Sensitive Rubbers

황인호* · 임종혁** · 이종세***

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

ABSTRACT

Recently, as large structures become lighter and more flexible, the necessity of structural control for reducing excessive displacement and acceleration due to seismic excitation is increased. As a means to minimize seismic damages, various base isolation systems are adopted or considered for adoption. In this study, a base isolation system using Magneto-Sensitive(MS) rubbers is proposed and shown to effectively protect structures against earthquakes. The MS Rubber is a class of smart controllable materials whose mechanical properties change instantly by the application of a magnetic field. To demonstrate the advantages of this approach, 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.

Keywords: MS Rubbers, Base Isolation, LRB System, Smart Material, Clipped-Optimal Control

1. 서론

지진과 같은 동적하중으로부터 건물, 교량, 플랜트, 발전소 및 구조물 내의 설비 등 다양한 형식의 구조물을 보호하기 위해, 1970년대부터 Kelly(1982, 1987)와 Su et al. (1989) 등에 의해 격리면을 설치하여 구조물의 고유진동수를 지진파의 탁월 진동수 성분보다 낮게 하는 기초격리시스템(Base Isolation System)에 관한 연구가 꾸준히 진행되어 왔다. 특히, 최근 들어 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 기초격리 시스템은 구조물의 고유주기 증가로 인해 기초격리시스템의 상대변위 응답을 증가시킴으로써, 구조물의 사용성 및 기초격리장치의 설계에 불리함을 초래하게 된다. 이러한 한계를 극복하기 위해 ER(Electro-rheological), MR(Magneto-rheological) 등 제어성 유체를 이용한 반 능동 제어기법에 대한 연구가 국내외에서 활발히 진행 중이다. 이러한 반 능동 제어 시스템은 큰 전력공급을 필요로 하지 않는다는 장

* 정희원 · 한양대학교 토목환경공학과 박사과정 E-mail: hinho@ihanyang.ac.kr

** 한양대학교 토목환경공학과 석사 E-mail: lims2001@ihanyang.ac.kr

*** 정희원 · 한양대학교 토목환경공학과 교수 E-mail: ionglee@hanvang.ac.kr

점으로 1992년 이후 많은 장치들이 개발되었으며 소규모 구조물 모형실험에 의해 제어장치로서의 가능성을 확인하였다(Dyke et al. 1996; Spencer et al. 1997; Johnson et al. 1998; Yang, et al. 2000). 그러나 이러한 반능동 제어장치는 기초격리장치와 더불어 사용하여야 함으로 경제적으로나 실구조물 적용에 문제를 가지고 있다.

그러므로 본 연구에서는 반 능동 제어장치와 유사한 성능을 지닌 MS(Magneto-Sensitive) Rubber를 이용한 기초격리장치를 제안하였다. 그림 1과 같이 MS Rubber는 기존의 기초격리장치와 같은 역할을 함과 동시에 자기장을 조절함으로써 반 능동 제어가 가능하다. 이러한 지능형 재료(Smart Material)인 MS Rubber는 Jacob Rainow에 의해 1948년 처음으로 소개가 되었으며, 이후 MS Rubber에 관한 연구와 실험이 계속 수행되어져 왔다(Kordonsky, 1993; Jolly et al., 1996a; Carlson and Jolly, 2000). 최근들어 Brigadnov와 Dorfmann에 의해 MS Rubber의 수학적 모델링을 제안하였으며(2003), 많은 연구자들이 참여하여 MS Rubber의 성능에 대해 활발한 연구가 진행 중이다(Ogden, 2004; Blom, 2005). 본 논문에서는 MS Rubber를 이용한 반 능동 기초격리 장치를 기존의 LRB(Lead Rubber Bearing) 시스템과 비교함으로써 제안된 시스템의 면진성능을 확인하였다.

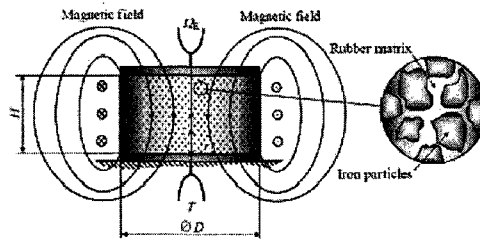


그림 1 MS Rubber의 이상적 형상

2. MS Rubber를 이용한 반능동 기초격리시스템

본 연구에서는 MS Rubber를 이용한 반 능동 기초격리시스템을 제안하였다. 제안된 시스템의 제어성능평가를 위한 구조물의 운동방정식은 다음과 같다.

$$M_s \ddot{x} + C_s \dot{x} + K_s x = \Lambda f - M_s 1 \ddot{x}_g \tag{1}$$

여기서, f 와 $\Lambda = [1 \ 0]^T$ 는 각각 MS Rubber의 감쇠력과 위치벡터이다.

식(1)을 상태공간방정식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{z} = Az + Bf + E\ddot{x}_g \tag{2}$$

여기서, $A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M_s^{-1}K_s & -M_s^{-1}C_s \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 \\ -M_s^{-1}\Lambda \end{bmatrix}$, $E = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}$ 으로 각각 시스템 행렬, 제어행렬, 외란행렬을 나타낸다.

MS Rubber에 제어시스템을 도입하기위해 우선 Active 시스템의 설계를 하였다. Active 시스템의 설계에

있어서 첫 번째로 다음과 같은 성능지수를 최소로 하는 Q값과 R값을 구하였다.

$$J = \int_0^{\infty} (z^T Q z + F^T R F) dt \tag{3}$$

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 반능동 제어를 위해 Clipped-Optimal Control 알고리즘을 사용하여 기본적으로 감쇠력을 가지고 있는 MS Rubber의 최소 감쇠력을 1kN으로 하였고 최대 감쇠력을 200kN으로 가정하였다.

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

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

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

여기서, Q_{pb} 는 납의 항복하중으로 $Q_{pb} = (1 - K_{yield}/K_{initial}) * Q_y$ 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 1에서와 같이 Ramallo(2002)의 논문에서 사용한 설계변수를 사용하였다.

표 1 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

3. 수치해석

본 연구에서는 MS Rubber를 이용한 반 능동 기초격리 시스템의 면진성능을 검증하기 위해서 그림 2에서 보이는 것처럼 Kelly(1987)등이 사용한 5층 건물에 대하여 수치해석을 수행하였으며 대상구조물의 질량과 강성, 감쇠비는 표 2와 같다. 수치해석에 사용된 기초 지지된 구조물은 첫 번째 모드에서 2%의 감쇠와 0.3초의 고유주기를 가진다. 기초의 강성 k_b 는 기초 격리된 구조물의 고유주기 2.5초에 의한 값을 사용하였다. 이러한 구조물에 MS Rubber와 LRB 시스템을 적용하였다.

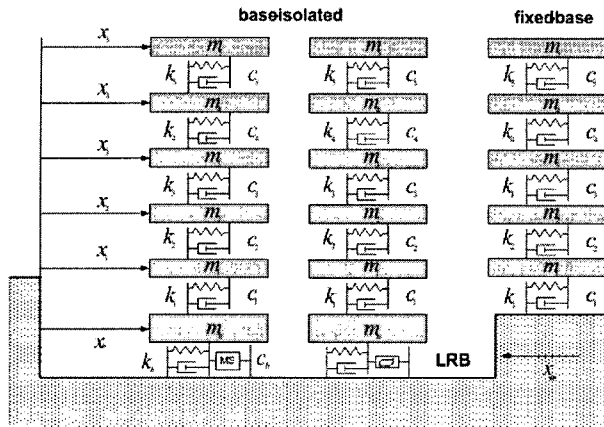


그림 2 수치해석을 위한 대상구조물

표 2 구조물 물성 (Kelly et al. 1987)

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

현재까지 내진설계기준이나 기초격리장치에 대한 연구와 설계 시 El Centro(1940) 지진이 표준 지진처럼 언급되어져 왔다. 이는 가속도계로 기록되어진 최초의 강진이란 역사적 의미 뿐 아니라, 가속도그램의 푸리에 스펙트럼이 대부분의 이용가능한 주 지진기록을 위한 에너지의 꽤 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.

앞서 세 가지 각기 다른 성격의 지진동을 통해 기초격리시스템으로서 작용하는 LRB 시스템과 MS Rubber의 면진성능을 비교하였다. 본 수치해석에서 입력지진동으로 사용된 지진의 특성은 표 3에 제시했다.

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

4. 해석결과

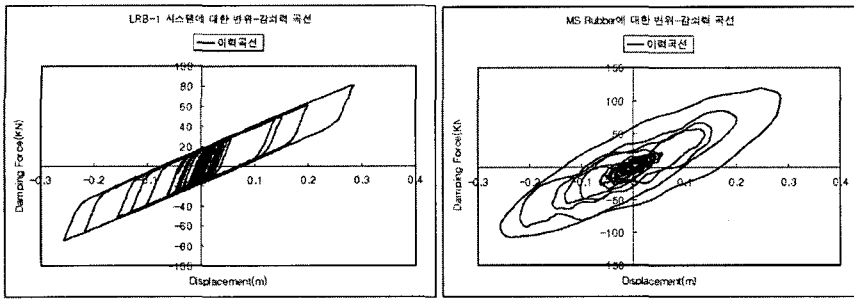
최대지반가속도의 강도에 의해 El Centro지진(0.350g), Kobe지진(0.833g), Northridge지진(0.843g)에서 나타나는 기초격리장치의 성능을 최대 기초변위, 최상위층의 최대가속도, 1-2층간 상대 변위, 최대 감쇠력을 구한 해석결과는 표 4와 같다. 표에서와 같이 LRB 시스템에 비해 MS Rubber 시스템은 모든 지진에 대해 월등히 우수한 면진성능을 보이는 것으로 나타났다.

표 4 해석결과

지진파	El Centro	Kobe	Northridge
최대 기초 변위 [m]			
LRB	0.305	0.433	0.979
MS Rubber	0.282	0.361	0.811
최상위층의 최대 가속도 [g]			
Fixed	1.197	2.986	4.008
LRB	0.542	0.372	0.815
MS Rubber	0.191	0.244	0.543
1-2 층간 상대 변위 [m]			
Fixed	0.00836	0.0190	0.0251
LRB	0.00277	0.0096	0.0066
MS Rubber	0.00150	0.0020	0.0043
최대 감쇠력 [kN]			
LRB	80.50	98.98	204.98
MS Rubber	119	190.57	341.17

먼저 El Centro 지진에 대한 동적거동을 살펴보면, 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 3은 El Centro 지진에 대한 LRB 시스템과 MS Rubber에서의 변위와 감쇠력의 관계를 나타내고 있다. LRB 시스템은 약 80.49kN, MS Rubber는 약 119kN의 감쇠력을 나타내었다.

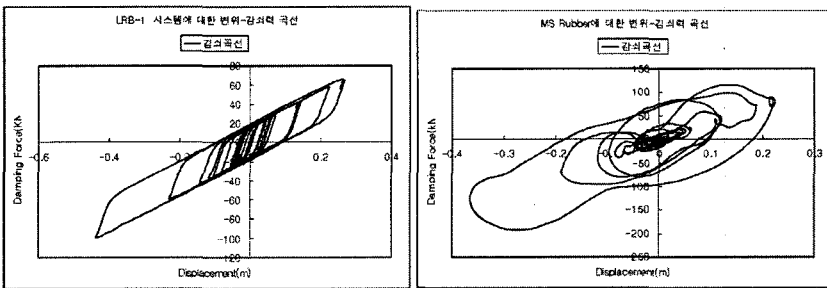


(a) LRB 시스템 (b) MS Rubber

그림 3 El Centro 지진에 대한 변위-감쇠 곡선

다음으로 근역지진인 Kobe 지진에 대한 기초 변위와 최상층의 가속도, 1-2층간 상대 변위에 대해 비교해 보았다. 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 기초지지상태에 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 감소를 보이면서 MS Rubber의 층간 상대 변위가 LRB 시스템보다 우수한 것으로 나타났다.

그림 4는 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.

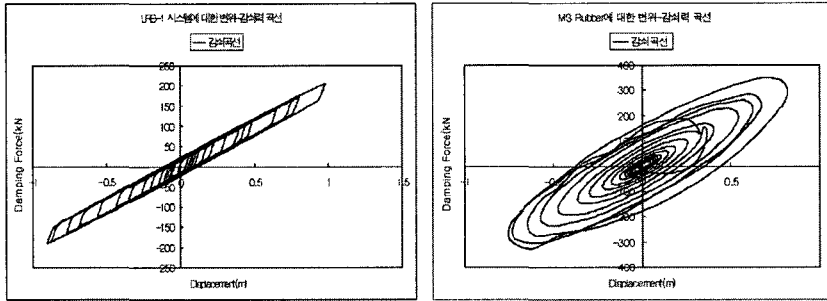


(a) LRB 시스템 (b) MS Rubber

그림 4 Kobe 지진에 대한 변위-감쇠력 곡선

마지막으로 Northridge 지진에 대한 기초 변위와 최상층의 가속도, 1-2층간 상대 변위에 대해 비교해 보았다. 기초변위에 있어서 MS Rubber는 81cm, LRB 시스템은 97.9cm로서 약 17cm 정도의 감소되는 결과를 나타내었다. 최상층 가속도에서는 MS Rubber에서는 0.543g, 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 5는 Northridge지진에 대한 LRB 시스템과 MS Rubber에서의 변위와 감쇠력의 관계를 나타내고 있다. LRB 시스템은 약 204.98kN, MS Rubber는 약 341.17kN의 최대 감쇠력을 나타내었다.



(a) LRB 시스템

(b) MS Rubber

그림 5 Northridge지진에 대한 변위-감쇠력 곡선

5. 결 론

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 LRB 시스템보다 탁월한 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.

참고문헌

Brigadnov, I.A. and Dorfmann, A. (2003), Mathematical modeling of magneto-sensitive elastomers, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 40, pp. 4659-4674.

Carlson J.D. and Jolly M.R. (2000) MR fluid, form and elastomer devices, *Mechatronics*, Vol. 10, pp. 55-69.

Dorfmann, A. and Ogden, R.W. (2003), Magnetoelastic modelling of elastomers, *European Journal of Mechanics*, Vol. 22, pp. 497-507.

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.

- 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.
- Jolly, M.R., Carlson, J.D. and Munoz, B.C. (1996), A model of the behaviour of magnetorheological materials, *Smart Material Structures*, Vol. 2, pp. 607-614.
- Kari, L. and Blom, P. (2005), Magneto-sensitive rubber in a noise reduction context -exploring the potential, *Plastic, Rubber and Composites*. Vol. 34, No. 8, pp. 365-371.
- Kelly, J.M. (1982), A seismic base isolation , *Shock and vibration digest*. Vol. 14, pp. 17-25.
- Kelly, J.M., Leitmann, G. and Soldatos, A.G. (1987), Robust control of base-isolated structures under earthquake excitation , *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol. 53, pp. 159-180.
- Kordonsky, W. (1993), Magnetorheological effects as a base of new devices and technologies, *J. Mag. & Mag. Mat*, Vol. 122, pp. 395-398.
- Ramallo, J.C. Johnson, E.A. and Spencer, B.F. (2002), "Smart" Base Isolation Systems, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 128, No. 10, pp. 1088-1099.
- 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.
- 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.
- 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*, Hong Kong, China, Vol. 1, pp. 341-348.