

Clipped-Optimal Control을 사용한 MR 감쇠기의 면진성능에 관한 연구

A Study on Base Isolation Performance of MR Dampers Using Clipped-Optimal Control

고봉준* · 이종세**

Ko, Bong Jun · Lee, Jong Seh

ABSTRACT

As large structures such as high-rise buildings and cable-stayed bridges become lighter and more flexible, the necessity of structural control for reducing excessive displacement and acceleration due to seismic excitation is increased. As a method to minimize seismic damages, various base isolation systems are adopted or considered for adoption. In this study, the seismic performance of MR dampers are studied and compared with that of the NZ system as a base isolation system. As the control algorithm of the MR damper, the clipped-optimal control(applied LQR method) is employed. A five-story building is modeled and the seismic performance of the two systems subjected to three different earthquakes is compared. The results show that the MR damper system can provide superior protection than the NZ system for a wide range of ground motions.

1. 서 론

기초격리시스템(Base Isolation System)은 건물, 교량, 플랜트, 발전소(Power Plant), 구조물 내의 설비 등 다양한 형식의 구조물에 적용되고 있으며, 최근들어 각국의 지진피해증가로 인한 내진설계규정의 강화로 일반 주거건물에도 적용되고 있는 추세이다. 이 분야에 대한 연구는 1970년대부터 최근까지 국내외에서 활발히 진행되고 있다. 기초격리의 개념은 기초격리시스템을 계획된 지진 격리면에 설치하여 구조물과 기초격리시스템으로 구성되는 계의 고유진동수를 상부구조물의 고유진동수와 지진파의 탁월 진동수 성분보다 낮게 하는 것이다. 그로인해 건물의 층간 변형 및 각 층에서의 가속도응답을 현저하게 작아지도록 하는 것이다. 그러나 계의 고유주기 증가는 기초격리시스템의 상대변위 응답을 증가시킴으로써, 기초격리장치의 설계, 건물의 사

*한택기술사원(E-mail:bongjunko@hanmail.net)

**정희원 · 한양대학교 토목환경공학과 교수(E-mail:jonglee@hanyang.ac.kr)

용성, 상세 설계 측면에서 불리함을 초래하게 된다. 하지만, 이러한 변위응답은 기초격리시스템의 감쇠를 증가시켜줌으로써 감소시킬 수 있다. 이 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위한 면진 설계방법의 일환으로 반능동 제어장치를 도입하고자하였다. 이러한 반능동 장치들 중에서 MR(magneto-rheological) 감쇠기는 빠른 반응속도를 가지면서도 외부온도가 변하거나 불순물이 첨가되어도 항복응력의 변화가 거의 없이 일정한 성능을 유지하는 장점을 갖는다. 따라서, 지진하중에 대하여 빠른 반응을 요하는 제어시스템에 효과적이기 때문에, 근래에 들어 활발히 연구·개발되고 있는 장치이다. 제어성 유체를 이용한 반능동제어 시스템은 비록 기초격리시스템에는 적용된 바 없으나, 능동제어 시스템과 유사한 성능과 큰 전력공급을 필요로 하지 않는다는 장점 때문에 1992년 이후 ER 유체와 MR 유체를 이용한 진동제어 장치들이 개발되었고, 소규모 구조물 모형실험을 통해 제어장치로서의 가능성 또한 확인되었다(Yang, et al. 2000; Dyke et al. 1996; Johnson et al. 1998; Spencer et al. 1997). 본 논문에서는 5층의 기초지지건물에 대해서 기초격리장치를 갖는 6자유도 건물(Kelly et al. 1987)에 대하여 지진하중이 작용할 때 면진장치로서 NZ 시스템과 MR 감쇠기에 따른 구조물의 거동에 대해서 비교해 보았다. 비교 방법으로는 외부 입력으로 El Centro 지진(1940), Northridge 지진(1994), Kobe 지진(1995)을 사용하여 각각의 장치에 대해서 상태공간해석법을 이용하여 구조물의 기초변위와 최상층의 가속도를 비교하고 응답에 대한 FFT(Fast Fourier Transform)을 실시하여 MR 감쇠기의 면진장치로서의 성능을 분석해 보았다. 특히 MR 감쇠기가 부착된 경우에 대한 해석에서는 최적제어이론중의 하나인 LQR(Linear Quadratic Regulator) method를 사용하여 상태공간방정식으로 표시된 시스템에 대하여 Matlab Control System Toolbox Package를 이용하여 출력 feedback gain 및 Riccati방정식의 해를 얻어냈다.

2. 제어시스템의 해석 및 설계

2.1 구조물의 최적제어 feedback 제어

구조물의 진동제어를 고려할 때의 하나의 방법으로서 가능한 한 작은 제어력으로서 가능한 한 큰 제어효과를 얻으려고 하는 것이며 이를 위한 것이 feedback의 최적화, 즉 최적 feedback제어라고 한다. 여기서 진동제어의 성능을 나타내는 제진지표(Performance Index, 성능지수)를 다음과 같이 나타낸다.

$$J = \int_0^{\infty} [x(t)^T Q x(t) + R \{u(t)\}^2] dt = J_1 + J_2 \quad (1)$$

이와 같이 응답과 제어력의 2차식의 조화(Linear Quadratic)를 고려하여 이를 최소화하도록 제어력을 결정하는 것이다. 이러한 의미에서 최적 feedback제어는 LQ제어 또는 LQ최적제어라고도 한다.

또한 식 (1)에서 행렬 R , Q 는 제어설계에 있어서의 가중계수이다. 식 (1)을 최소로 하는 최적제어력은,

$$u(t) = -f x(t) \quad f = R^{-1} B^T P$$

로 주어진다. 여기서 P 는 다음과 같은 행렬 Riccati 방정식을 만족시키는 정수이다.

$$PA + A^T P - PBR^{-1} B^T P + Q = 0$$

2.2 Clipped-Optimal Control Algorithm

Clipped-Optimal Control은 목표제어력을 결정하는 능동제어기를 설계하는 단계와 기설계된 제어기의 목표 제어력과 실제 감쇠기의 제어력을 비교하여 매 순간 MR 감쇠기의 입력전압을 최대값 또는 최소값으로 결정하는 단계로 구성된다. 능동제어기는 앞서 살펴본 일반적인 최적제어이론에 기반한 LQR이나 LQG 제어기법을 이용하여 설계할 수 있는데, 이 연구에서는 LQR 제어기법을 적용하였다. LQR에 의한 최적제어력은 식 (2)과 같고,

$$u(t) = f_{opt} = -Kz(t) = R^{-1}B^T Pz(t) \quad (2)$$

MR 감쇠기에 입력되는 전압의 결정은 식 (3)에 따라 최대값, 최소값의 두 단계로 이루어진다. f_{opt} 는 LQR 제어기법을 통해 얻은 최적 감쇠력이고 f_D 는 실제 MR 감쇠기가 발휘하는 감쇠력이다. 그리고, V_{max} 는 MR 감쇠기에 입력될 수 있는 최대전압이고, H 는 Heaviside Step Function이다.

$$v = V_{max}H\{f_{opt} - f_D\} \quad (3)$$

Clipped-Optimal Control은 1단계에서 결정되는 능동제어기의 설계에 따라 제어성능에 많은 영향을 받게 된다.

3. 수치해석

3.1 구조물의 모델링

본 연구에서 기초격리시스템으로서 변진성능을 검증하기 위해서 그림 1의 Kelly 등(1987)이 사용한 5층 건물에 대해서 수치해석을 하였다.

대상구조물의 질량과 강성, 감쇠 등은 표 1에 나타내었다. 여기서 기초지지된 구조물의 물성 값은 Kelly 등(1987)의 수치해석과 같은 값을 사용하였다.

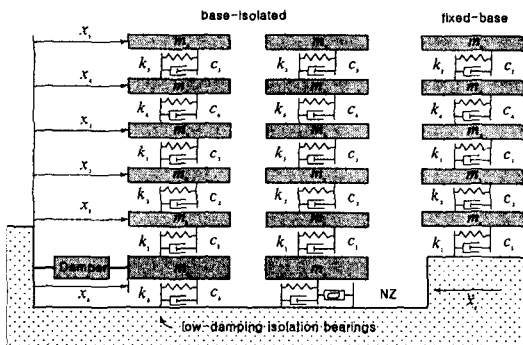


그림 1 수치해석 대상구조물

표 1 구조물 물성 (Kelley et al, 1987)

층별 질량 [kg]	층별 강성 [kN/m]	층별 감쇠 [kNs/m]
$m_b = 6800$	$k_b = 231.5$	$c_b = 7.45$
$m_1 = 5897$	$k_1 = 33732$	$c_1 = 67$
$m_2 = 5897$	$k_2 = 29093$	$c_2 = 58$
$m_3 = 5897$	$k_3 = 28621$	$c_3 = 57$
$m_4 = 5897$	$k_4 = 24954$	$c_4 = 50$
$m_5 = 5897$	$k_5 = 19059$	$c_5 = 38$

3.2 해석방법 및 절차

본 연구에서는 해석구조물에 대해서 El Centro, Kobe, Northridge 세 지진이 작용시 기초지지상태와 Passive 시스템, NZ 시스템, Active 시스템, Clipped-Optimal Control에 의한 MR 감쇠기를 사용하여 Base에서의 변위와 상부 가속도, 최대 감쇠력에 대해 비교 분석하였다.

해석은 구조물의 운동방정식을 상태공간 방정식으로 변환하여 시간영역 해석을 수행하였다. 구조물의 운동방정식은 다음 식과 같다.

$$M_s \ddot{x} + C_s \dot{x} + K_s x = \Lambda f - M_s \Lambda \ddot{x}_g \quad (4)$$

여기서, $\Lambda = [1 \ 0]^T$ 로서 MR 감쇠기의 위치벡터를 나타내고, f 는 MR 감쇠기에 의한 감쇠력을 나타낸다. 위의 식을 상태공간방정식으로 정리하면 다음과 같다. A , B , C 는 각각 시스템 행렬, 제어행렬, 외란행렬을 나타낸다.

$$\dot{z} = Az + Bf + E\ddot{x}_g \quad A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M_s^{-1}K_s & -M_s^{-1}C_s \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ -M_s^{-1}\Lambda \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}$$

3.3 NZ 시스템의 설계

NZ 시스템은 46ton의 항복력을 갖는 납삽입적층고무형 기초격리장치로 구성했다. NZ 요소에 집적된 비선형력 f_{NZ} 는 다음과 같다.

$$f_{NZ} = \alpha \frac{F_y}{Y} u_b + (1 - \alpha) F_y Z, \quad Y\dot{Z} = -\gamma |u_b| Z |Z|^{\eta-1} - \beta u_b |Z|^{\eta} + \theta u_b$$

이 연구에서 NZ 시스템에 사용된 매개변수의 값들은 Contaninou-Tadjbakhsh(1985)에서 sine 지진입력에 대한 실험에 의해 결정된 결과 값으로 표 2에 나타내었다.

표 2 NZ시스템을 위한 변수 (Contaninou and Tadjbakhsh 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		

3.4 Active 시스템의 설계

MR 감쇠기에 제어시스템을 도입하기 위해서는 우선 Active 시스템의 설계가 필요하다. Active 시스템의 설계에 있어서 첫 번째로 다음과 같은 성능지수를 최소로 하는 Q값과 R값을 구하여야한다.

$$J = \int_0^{\infty} (z^T Q z + F^T R F) dt \quad (5)$$

본 연구에서는 수많은 시행착오를 통해 다음과 같은 값을 사용하였다.

$$R = \rho \frac{1}{(100kN)^2} = \rho \frac{1}{(100000)^2} \quad Q = \text{diag}[1.5 \quad 0_{1 \times 5} \quad 0.035 \quad 0_{1 \times 5}]$$

이 값을 이용하여 ρ 값을 10^{-3} 에서 10^3 으로 조절하며 그에 따른 제어력과 Base의 변위를 구해보면 다음 그래프와 같다.

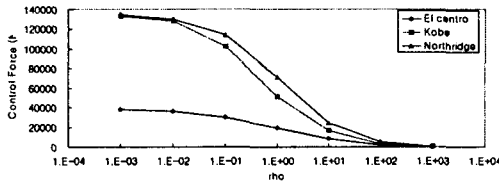


그림 2 ρ 값과 제어력의 관계

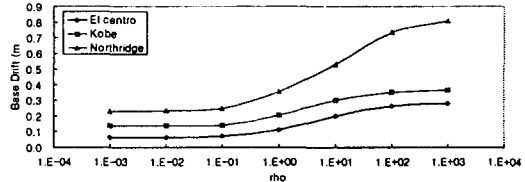


그림 3 ρ 값과 Base Drift의 관계

두 그래프에서 Active 시스템의 제어력의 최대 값인 $100kN$ 의 범위와 Base Drift의 최대값을 $50cm$ 로 정하여 최적의 ρ 값으로 1값을 선택하여 Active 시스템을 설계하였다.

3.5 MR 감쇠기의 설계

MR 감쇠기의 해석모델로 Modified Bouc-Wen model을 적용하였고, 그림 4에 개략적인 역학 모델이 제시되어있다.

그림 4의 개념도로부터 감쇠기가 발휘하는 제어력(F)은 식 (6)으로 표현될 수 있다.

$$F = az + c_0(x - y) + k_0(\dot{x} - \dot{y}) + k_1(x - x_0) = c_1y + k_1(x - x_0) \quad (6)$$

$$\dot{z} = -\gamma|\dot{x} - \dot{y}|z|\dot{z}|^{n-1} - \beta(\dot{x} - \dot{y})|z|^n + A(\dot{x} - \dot{y}), \quad \dot{y} = \frac{1}{c_0 + c_1}[az + c_0\dot{x} + k_0(x - y)]$$

x_0 : 초기변위 c_0 , k_0 : 점성감쇠와 강성(높은 속도) c_1 : 점성감쇠(낮은 속도) k_1 : accumulator의 강성

이 식들에서 계수들 α , c_0 그리고 c_1 은 감쇠기의 변하는 거동특성을 묘사하는 변수들로서 다음과 같은 전압에 대한 함수로서 표현된다.

$$\alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \quad c_1 = c_1(u) = c_{1a} + c_{1b} u, \quad c_0 = c_0(u) = c_{0a} + c_{0b} u \quad \dot{u} = -\eta(u - v)$$

표 3 MR 감쇠기 역학모델의 계수들

Parameter	Value	Parameter	Value
C_{0a}	$21.0 \text{ N} \cdot \text{sec} / \text{cm}$	a_a	$140 \text{ N} / \text{cm}$
C_{0b}	$3.50 \text{ n} \cdot \text{sec} / \text{cm} \cdot \text{V}$	a_b	$695 \text{ N} / \text{cm} \cdot \text{V}$
K_0	$46.9 \text{ N} / \text{cm}$	γ	363 cm^{-2}
C_{1a}	$283 \text{ N} \cdot \text{sec} / \text{cm}$	β	363 cm^{-2}
C_{1b}	$2.95 \text{ n} \cdot \text{sec} / \text{cm} \cdot \text{V}$	A	301
x_0	$5.00 \text{ N} / \text{cm}$	n	2
K_1	14.3 cm	η	190 sec^{-1}

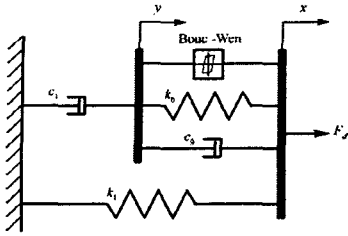


그림 4 MR 감쇠기의 역학모델

4. 지진하중에 따른 기초격리시스템의 해석결과

표 4 해석결과

지진파	El Centro	Kobe	Northridge
Peak Base Drift [m]			
Passive	0.284	0.365	0.820
NZ	0.150	0.362	0.640
Active	0.111	0.202	0.356
MR 감쇠기	0.140	0.262	0.498
Peak Roof Absolute Acceleration [g]			
Fixed	1.197	2.986	4.008
Passive	0.191	0.248	0.546
NZ	0.158	0.366	0.610
Active	0.117	0.224	0.351
MR 감쇠기	0.132	0.228	0.387
Peak Applied Force [N]			
NZ	18166	38089	64533
Active	18692	51497	71021
MR 감쇠기	12962	21647	30815

4.1 El Centro 지진에 대한 해석결과

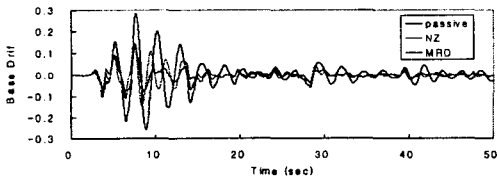


그림 5 El Centro 지진에 대한 Base Drift 비교

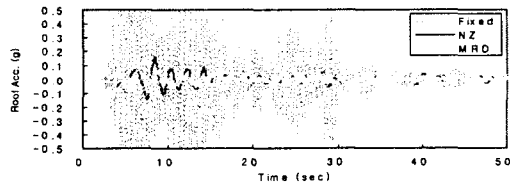
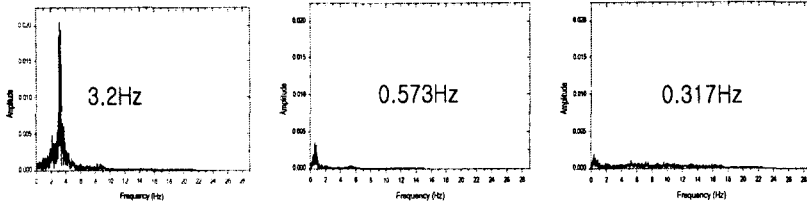


그림 6 El Centro 지진에 대한 Roof Acc. 비교



(a) Fixed (b) NZ 시스템 (c) MR 감쇠기

그림 7 Roof Acc. 에 대한 FFT 변환

4.2 Kobe 지진에 대한 해석결과

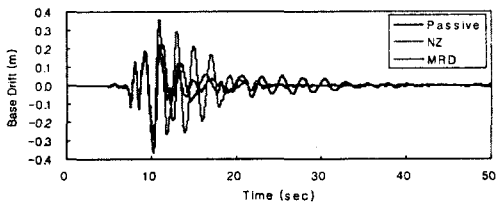


그림 8 Kobe 지진에 대한 Base Drift 비교

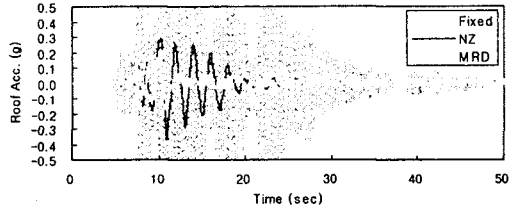
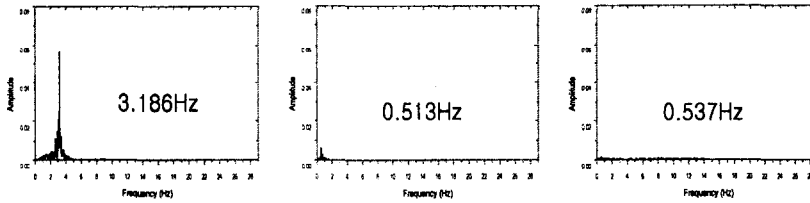


그림 9 Kobe 지진에 대한 Roof Acc. 비교



(a) Fixed (b) NZ 시스템 (c) MR 감쇠기

그림 10 Roof Acc. 에 대한 FFT 변환

4.3 Northridge 지진에 대한 해석결과

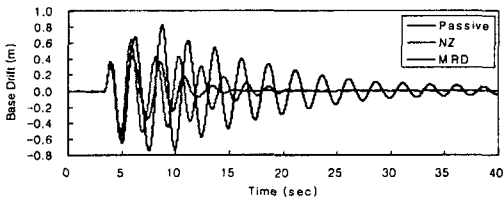


그림 11 Northridge 지진에 대한 Base Drift 비교

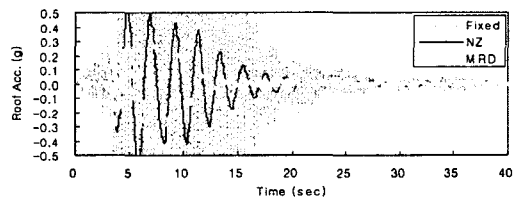


그림 12 Northridge 지진에 대한 Roof Acc. 비교

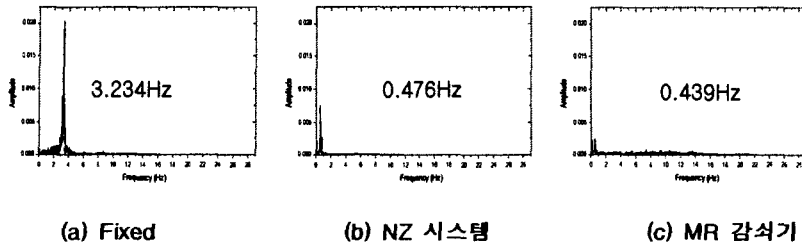


그림 13 Roof Acc. 에 대한 FFT 변환

5. 결론

본 연구에서는 Clipped-Optimal Control을 사용한 MR 감쇠기를 도입하여 지진하중이 작용하는 기초 격리장치가 적용된 5층 구조물에 대한 구조응답을 구하였으며, NZ 시스템과의 비교를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 단주기 성분의 지진에 맞춰 설계된 NZ시스템의 경우 El Centro 지진에 있어서 MR 감쇠기와 비슷한 성능을 보여준다.
- 2) Kobe, Northridge 지진과 같은 경우에 있어서 NZ 시스템에 대한 MR 감쇠기의 성능이 훨씬 우수함을 알 수 있었다.
- 3) 각 지진에 대해 지붕에 대한 가속도 FFT 변환 결과 NZ 시스템과 MR 감쇠기 모두 우수한 성능을 보였으나, NZ 시스템과는 달리 MR감쇠기는 다양한 입력지진에 대해 고른 성능을 발휘함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실 사업과 교육인적자원부의 BK21 사업의 재정지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Yang, G., Ramallo, J.C., Spencer, Jr., B.F., Carlson, J.D. and Sain, M.K. (2000) Dynamic Performance of large-scale MR fluid dampers. *Proceedings of 14th ASCE Engineering Mechanics Conference, Austin, Texas.*
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, 565-575.
3. 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, 367-376.
4. 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, 159-180.
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, 230-238.
6. Constantinou, M.C. and Tadjbakhsh, I.G. (1985) Hysteretic dampers in base isolation: Random approach, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 111, 705-721.