

비선형 구조물에 대한 수정 슬라이딩모드 제어알고리즘 성능 평가

Experiment Performance Evaluation of Modified Sliding Mode Control Algorithm for Nonlinear Structures

이 상 현†

Lee, Sang-Hyun

(논문접수일 : 2006년 8월 10일 ; 심사종료일 : 2007년 1월 22일)

요 지

본 논문에서는 수정 슬라이딩 모드제어의 비선형 이력구조물의 지진응답 제어성능이 평가되었다. 수정 슬라이딩모드 제어는 제어력을 계산하기 위해 Lyapunov함수의 목표변화율을 이용하는 기법으로 기존 연구에서는 선형구조물에 대한 성능만이 조사되었다. 그러나 강진시 대부분의 구조물은 비선형 거동을 보인다는 점을 고려할 때 기존 연구의 결과는 실제 적용에 있어 제한점을 가지고 있다. Bouc-Wen 모델을 사용하여 구조물의 비선형 거동을 모델링 하였으며, 이력이선형 단자유도 구조물에 대한 통계해석과 비선형이력 면진구조물에 대한 해석결과는 제안된 수정 슬라이딩모드 제어알고리즘이 기존의 슬라이딩모드 제어기보다 우수한 성능을 가짐을 보여준다.

핵심용어 : 비선형 이력구조물, 수정 슬라이딩모드 제어, Bouc-Wen 모델, 지반분리 시스템

Abstract

In this study, the performance of the modified sliding mode control proposed in the previous study is evaluated for seismic response control of nonlinear hysteretic structures. Modified sliding mode control(MSMC) utilizes the target derivative of Lyapunov function in order to calculate control force, and its performance was evaluated only for linear structures in the previous study. However, considering that most structures subject to strong earthquake show nonlinear hysteretic behavior, the results from the previous study have limitations in practical application. The results from numerical analyses of single degree of freedom systems and base isolated system, which were described using Bouc-Wen model, indicate that the proposed MSMC algorithm shows better control performance than the existing sliding mode controller.

Keywords : nonlinear hysteretic structures, modified sliding mode control, Bouc-Wen model, base-isolated system

1. 서 론

구조물의 동적응답제어를 위해 에너지 소산능력을 부가할 수 있는 수동, 능동, 그리고 준능동 제진장치의 적용성에 대한 연구가 많은 국내외 학자들에 의해 수행되고 있으며, 개발된 제진장치가 실제 구조물에 이용되고 있는 사례도 점차적으로 증가하고 있다(Housner 등, 1997; Soong, 1990)

일반적으로 대부분의 제진장치 설계는 구조물의 탄성거동에 기초하여 수행된다. 이상현 등(2004)은 구조물의 고유값

의 변화율에 기초한, 박지훈 등(2004)은 상태변수로 구성된 2차의 목적함수를 최소화하는 점탄성감쇠기(Viscoelastic Damper, VED)의 최적설계방법론을 제시하였다. 이러한 변화율 기반(gradient based) 최적설계방법들은 일반적으로 탄성구조물 및 선형감쇠기에 대해서만 적용이 가능한 것으로, 설계에 있어 편이성을 확보함과 동시에 제진장치가 부가된 구조물은 탄성거동을 보여야 한다는 가정을 배경으로 한 것이다. Moreschi와 Singh(2003)은 변화율에 기초한 최적화는 마찰감쇠기 혹은 항복형감쇠기와 같은 비선형 감쇠기에

† 책임저자, 정회원 · 단국대학교 건축대학 건축공학과 전임강사
Tel: 02-799-1439 ; Fax: 02-749-8653
E-mail: lshyun00@dankook.ac.kr

• 이 논문에 대한 토론을 2007년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2007년 8월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

적용하기 어려움을 밝히고, 유전자 알고리즘을 사용하여 마찰감쇠기의 최적 슬립하중을 결정하였다. 박관순 등(2003)은 구조부재와 점탄성감쇠기의 사용량을 설계변수로 하여, 생애주기비용을 최소화하도록 최적화문제를 정식화하였으며, 유전자알고리즘을 적용하여 최적의 설계변수를 구하였다. 유전자 알고리즘의 경우 비선형 문제를 쉽게 풀수 있다는 장점을 가지고 있으나 반복적으로 비선형 시간이력해석을 수행해야 하는 문제점을 가지고 있다. 또한 대상하중이 일반적으로 풍하중인 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper, TMD), 동조액체감쇠기(Tuned Liquid Damper, TLD)의 경우, 구조물이 설계풍하중에 대하여 탄성거동을 보여야 하므로, 당연히 제진장치의 유무에 관계없이 구조물의 탄성 거동에 기초하여 설계된다(Yalla, 2001).

능동 및 준능동 제어장치는 제어력을 산정하기 위한 제어 알고리즘을 요구하며, 많은 연구자들에 의해 하중의 크기, 최대 제어력, 제어기 위치, 그리고 센서의 수 등의 주어진 하중 조건 혹은 제약조건에서 제어기의 성능을 최대화 할 수 있는 제어 알고리즘들이 제안되어 왔다. Spencer 등(1998)은 선형 이차안정기의 제어알고리즘을 사용하여 3층 소형 벤치마크 구조물에 설치된 능동질량감쇠기를 설계하였으며, 그 효과를 실험적으로 검증하였다. 박규식 등(2002)은 지진하중을 받는 벤치마크 사장교를 위한 복합제어 기법을 제시하였다. Dyke 등(1996)은 MR 자기유변유체(Magnetorheological Fluid) 감쇠장치를 운용하기 위한 준능동 제어알고리즘을 소개하고, 지진하중에 대한 성능을 평가 하였다. 이상현 등(2004)은 구조물의 에너지를 소산시키는 제어알고리즘을 제안하고, 이의 유효성을 바람하중을 받는 76층 벤치마크 구조물에 적용하여 검증하였다. 그러나 이러한 능동 혹은 준능동 제어알고리즘은 실시간으로 예측된 구조물의 응답과 탄성모델을 기초로 컴퓨터에 의해 제어력이 계산되는 것을 전제로 하며, 강인제어에서 고려되는 강성변화는 하중의 증가에 따른 이력특성이 아닌 단순한 모델링의 오차를 반영한 결과이다.

일반적으로 강한 비정상(nonstationary) 지진하중을 받는 건축 및 토목 구조물과 같은 대형 구조물의 내진설계는 주요부재의 소성거동을 전제로 수행되며, 구조물의 내진 안전성은 안정적인 소성거동에 좌우된다. 또한 비내진 설계된 기존 구조물의 내진성능을 보강한다는 것도 설계규준에 명시된 수준의 강도, 강성, 그리고 연성을 확보하는 것을 의미하며 제진장치를 사용하여 탄성거동을 확보한다는 것은 비경제적이다. 면진 시스템의 경우 비록 구조부재는 선형탄성거동을 보이나 면진장치 자체는 비선형 이력특성을 보인다. 따라서 과도한 지진하중을 받는 일반 구조물을 제어하거나 혹은 면진 시스템에 부가의 제진장치를 설치하여 면진효과를 증대 혹은 유지함과 동시에 면

진장치 자체의 과도한 변위응답을 줄이려 하는 경우나(김현수 등, 2005), 구조물이 비선형 이력특성을 보이는 경우에도 그 제어효과가 검증될 필요가 있다.

수동형 감쇠장치인 소성감쇠기, 마찰감쇠기, 점탄성 감쇠기, 그리고 비좌굴 가새 등의 경우 능력스펙트럼법, 에너지설계 법 등의 성능 기초 설계법에 따라 비선형 이력구조물에 대한 설계 방법이 제시되었다(Li 등, 1995; 최현훈 등, 2005). 그러나 전술한대로 일반적으로 탄성모델에 기초한 제어알고리즘을 사용하는 능동 및 준능동 제어의 경우 비선형 구조물에 대한 적용성 연구는 매우 부족한 실정이다. Spencer 등(1998)은 지진하중을 받는 20층 철골구조물에 대하여 비구조재의 파괴에 따른 강성저하가 고려된 지진 전후의 평가 모델 구축하고, 수동, 능동, 그리고 준능동 제진장치에 대한 벤치마크 문제를 제안하였다. 그러나 이 모델도 지진전과 후의 강성차이를 가지는 각기 다른 탄성모델에 기초한 것으로 구조물 자체의 실시간 비선형 이력특성을 고려하지는 않는다.

능동 및 준능동 제진장치를 설계하는데 이용되는 슬라이딩 모드 제어기(Sliding Mode Controller, SMC)는 선형구조물뿐만 아니라 비선형 구조물의 제어에 있어서도 효율적인 제어 알고리즘의 하나로 알려져 있다(Yang 등, 1994). Yang 등(1995)은 비선형 이력특성을 가지는 구조물에 대한 SMC의 지진응답제어성능을 조사하였다. 이상현 등(2001), 민경원 등(2003)은 SMC를 설계하기 위해 요구되는 Lyapunov 함수의 변화율에 제약조건을 설정하고, 이를 달성하도록 제어력을 산정함으로써 기존의 SMC와 다른 제어력을 산정하는 수정 SMC(Modified SMC, MSMC)를 제안하였으며, 선형 탄성구조물에 대하여 MSMC가 기존 SMC의 제어성능을 향상시킬 수 있음을 보였다.

본 연구에서는 MSMC의 비선형 이력구조물에 대한 지진응답제어 성능이 평가되었다. 이를 위해 Bouc-Wen 모델을 사용하여 표현된 비선형 이력거동을 보이는 단자유도 구조물과 기초분리 시스템에 대한 수치해석을 수행하였다. 비선형 이력거동을 보이는 단자유도 시스템의 경우 지진하중과 구조물의 주기에 따라 응답의 특성이 크게 바뀌는 것을 고려하여 3개의 서로 다른 주기를 가지는 단자유도 시스템들에 대하여 20개의 지진하중을 사용하여 해석을 수행한 후 그 결과를 평균하여 SMC와 MSMC의 제어성능을 비교하였다. 또한 Yang 등이 SMC의 성능을 검증하기 위해 사용한 8층 면진 구조물에 MSMC를 적용하여 수치해석을 수행한 후, 최대제어력의 변화에 따른 제어성능을 조사하고, 이를 SMC에 의한 결과와 비교하였다.

2. 제어 알고리즘

2.1 운동 방정식

지반가속도 \ddot{x}_g 와 크기 $r \times 1$ 의 제어력 u 를 받는 n -자유도 질량, 감쇠, 강성 시스템의 상태운동방정식은 다음과 같다.

$$\dot{z} = Az + B_1 \ddot{x}_g + B_2 u \tag{1}$$

여기서,

$$z = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix},$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}E \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}H \end{bmatrix}$$

M , C 그리고 K 는 각각 질량, 감쇠, 그리고 강성행렬을 나타내고, x 는 변위 벡터, E 와 H 는 각각 지진 영향행렬과 제어력 영향 행렬을 나타낸다. I 와 O 는 각각 단위행렬과 영행렬을 나타낸다.

2.2 SMC

슬라이딩 표면은 다음과 같이 구조물의 상태변수에 행렬 $P(r \times n)$ 를 곱한 형태로 정의된다. 즉, 상태 변수를 이루는 구조물의 변위 혹은 속도의 선형함수로 슬라이딩 표면을 정의한다. 슬라이딩 표면은 상태공간에서 구조물이 안정적인 거동을 보이는 임의의 가상 평면으로 슬라이딩 모드제어기는 구조물의 궤적을 슬라이딩 표면으로 유도하고 슬라이딩 표면에 머무르도록 하는 역할을 한다.

$$s = Pz \tag{2}$$

여기서, P 행렬은 극값 지정(pole assignment) 혹은 LQR 방법에 의해 결정될 수 있으며, 본 연구에서는 Yang 등이 사용한 LQR방법을 사용하여 다음 성능지수를 최소화하도록 설정하였다(Yang 등, 1994).

$$J = \int_0^{\infty} z^T Q z dt \tag{3}$$

여기서, Q 는 $2n \times 2n$ 의 크기를 가지는 양의 한정행렬이다. 일반적으로 Q 를 적절히 선택하는 것이, 즉 슬라이딩 표면을 구조물 및 제어력의 특성에 맞게 적절히 선택하는 것이 SMC의 성능을 확보하는 데 있어 매우 중요하다.

기존의 SMC는 제어력을 결정하기 위해 다음과 같이 슬라

이딩 표면으로 부터의 거리에 비례하는 Lyapunov함수를 정의한다.

$$V(s) = \frac{1}{2} s^T s \tag{4}$$

Lyapunov 안정화이론에 바탕하여, 제어력은 Lyapunov 함수의 변화율을 항상 0이하가 되도록 결정한다.

$$\dot{V}(s) = \lambda(u - u_{eq}) \leq 0 \tag{5}$$

$$u_i^* = u_{eqi} - \delta_i \lambda_i \tag{6}$$

여기서, u_{eqi} 와 λ_i 는 각각 다음 u_{eq} 와 λ_{eq} 의 i 번째 요소이고, δ_i 는 양의 상수로 설계자에 의해 결정되는 제어이득이다.

$$\lambda = s^T P B_2 = [\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_r] \tag{7}$$

$$u_{eq} = -(P B_2)^{-1} P A z - (P B_2)^{-1} B_1 \ddot{x}_g \tag{8}$$

식 (6)에서 등가제어력 u_{eqi} 는 구조물의 궤적을 슬라이딩 표면에 머무르게 하는 항이고, $\delta_i \lambda_i$ 는 슬라이딩 표면으로 보내는 역할을 하는 항이다. 식 (8)의 제어력을 식 (5)에 대입하면 Lyapunov함수의 변화율은 다음과 같이 항상 0이하가 됨을 알 수 있다.

$$\dot{V}(s) = - \sum_{i=1}^r \delta_i \lambda_i^2 \leq 0 \tag{9}$$

2.3 MSMC

SMC의 설계절차는 Lyapunov함수의 변화율에 제한조건을 설정함으로써 전개된다. 기존의 SMC에서는 단순히 식 (9)에서의 같이 Lyapunov변화율을 0이하가 되도록 제한조건을 두는 반면 MSMC에서는 변화율이 상태변수의 궤적에 따라 다음과 같은 두 가지 제한조건을 만족하도록 설정한다 (이상현 2003, b).

1) 조건 1: 상태변수의 궤적이 슬라이딩 표면에 접근함에 따라 Lyapunov함수의 목표 변화율은 0에 근접하도록 설정한다.

$$\lim_{|\lambda_i| \rightarrow 0} \dot{V}_{Ti} = 0 \tag{10}$$

식 (10)의 목표변화율을 구현하는 제어력은 등가제어력

u_{eq} 에 가까워진다.

2) 조건 2: Lyapunov함수의 목표변화율은 슬라이딩 표면으로부터의 거리에 음의 비례(negatively proportional) 하는 형태가 되도록 설정한다. 이때 제어력은 슬라이딩 표면에서 멀어지는 상태변수의 궤적을 슬라이딩 표면으로 되돌리는 역할을 수행한다.

$$\lim_{|\lambda_i| \rightarrow \infty} \dot{V}_{Ti} = -\chi \left| \frac{\lambda_i}{\sigma_{\lambda_{i0}}} \right|^q \quad (11)$$

여기서, χ , q 는 설계자에 의해 설계되는 지정되는 양의 상수 값들이고, $\sigma_{\lambda_{i0}}$ 는 비제어시의 λ_i 값인 λ_{i0} 의 표준편차로 λ_i 값을 정규화하기 위해 사용된다.

위의 두 가지 조건은 다음 모양함수(shape function)를 정의함으로써 하나의 방정식으로 표현될 수 있다.

$$S(\lambda_i) = \frac{\lambda_i^{2p}}{\lambda_i^{2p} + v^{2p}} \quad (12)$$

여기서, p 와 v 는 설계자에 의해 지정되는 자연수로 모양함수는 λ_i 의 변화에 대하여 다음과 같은 성질을 가지고 있다.

$$\lim_{\lambda_i \rightarrow 0} S(\lambda_i) = 0 \quad (13a)$$

$$\lim_{\lambda_i \rightarrow \infty} S(\lambda_i) = 1 \quad (13b)$$

\dot{V}_{Ti} 는 식 (12)의 모양함수를 사용하여 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\dot{V}_{Ti} = -\chi S(\lambda_i) \left| \frac{\lambda_i}{\sigma_{\lambda_{i0}}} \right|^q \quad (14)$$

제어력은 다음과 같이 Lyapunov함수의 변화율이 목표변화율 이하가 되도록 설정한다.

$$\dot{V} = \lambda(u - u_{eq}) = \sum_{i=1}^r \lambda_i(u_i - u_{eqi}) \leq \sum_{i=1}^r \dot{V}_{Ti} \quad (15)$$

식 (15)의 조건을 구현하는 제어력은 다음 개념에 따라 설정한다: (1)제어력 없이도 목표변화율을 달성할 수 있는 경우에는 제어하지 않는다; (2)목표변화율을 달성하기위해 요구되는 만큼의 최소 크기의 제어력을 사용한다; (3)제어력

의 제한을 고려하는 포화제어기(saturated controller)로 설계한다. 최종적인 제어력은 다음과 같다.

$$u_i^* = \begin{cases} 0; & \text{if } -\lambda_i u_{eqi} \leq \dot{V}_{Ti} \\ -\dot{V}_{Ti}/\lambda_i + u_{eqi}; & \text{if } -\lambda_i u_{eqi} > \dot{V}_{Ti} \end{cases} \quad (16)$$

$$u_i = \begin{cases} u_i^*; & \text{if } |u_i^*| \leq u_{imax} \\ u_{imax} \text{sgn}(u_i^*); & \text{if } |u_i^*| > u_{imax} \end{cases} \quad (17)$$

여기서, u_{imax} 는 i 번째 제어력의 최대 제어력한계를 나타내고, $\text{sgn}(\cdot)$ 는 부호함수이다.

3. 수치해석

3.1 성능지수

구조물의 변위, 층간변위, 그리고 층 절대가속도 최대응답을 줄이는 제어기의 성능을 평가하고, 제어기가 사용한 평균 에너지의 크기를 비교하기 위해 다음과 같은 평가지수를 설정하였다.

$$J_1 = \max_{i=1, \dots, n} \left\{ \frac{\max_t |x_i(t)|}{x^{\max}} \right\}, J_2 = \max_{i=1, \dots, n} \left\{ \frac{\max_t |d_i(t)|}{d_n^{\max}} \right\} \quad (18A)$$

$$J_3 = \max_{i=1, \dots, n} \left\{ \frac{\max_t |\ddot{x}_{ai}(t)|}{\ddot{x}_a^{\max}} \right\}, J_4 = \frac{1}{W} \sqrt{\frac{1}{T} \sum_i^r \int_0^T u_i^2 dt} \quad (18b)$$

여기서, $\max\{\}$ 는 최대값을 나타내고, x^{\max} , d^{\max} , 그리고 \ddot{x}^{\max} 는 각각 비제어시 최대 변위, 최대 층간변위, 그리고 최대 절대 층가속도를 나타낸다. T 는 제어력이 가해진 총 시간을, 그리고 W 는 구조물의 무게를 나타낸다. J_1 , J_2 , 그리고 J_3 는 비제어시 응답에 대한 제어시 응답의 비를 나타내기 때문에 작은 값 일수록 제어성능이 좋음을 의미하고, 작은 J_4 는 제어를 위해 사용된 평균 제어력의 크기가 작음을 의미한다.

3.2 최대 제어력 한계

일반적으로 구조물의 응답을 항상 안정적인 거동을 보이는 슬라이딩 표면으로 보내기 위한 SMC의 제어력은 그 크기가 매우 과도한 경향을 가진다. 따라서, 안정성 혹은 실제 적용에 있어서 제어력의 한계를 일정 수준이하로 제한할 필요가 있다. 이상현 등(2004)은 다음과 같이 구조물의 1차 모드에 대한 유효 제어력의 최대값을 1차 모드 응답에 의한 밀면 전

단력의 비로 산정하였으며, 동일한 ρ 값에 의해 제어력을 산정하는 경우 모든 주기구간에 걸쳐 거의 동등한 제어성능을 확보함을 보임으로써 이 방법에 의해 최대 제어력을 산정하는 것이 합리적임을 보였다.

$$|m_1^{-1}\phi^T H u_{\max}| = \rho \omega_o^2 S_d(\omega_o, \xi_o) \quad (19)$$

여기서,

$$0 \leq \rho \leq 1, \quad m_1 = \phi^T M \phi, \quad \omega_o = \sqrt{\phi^T K \phi / \phi^T M \phi},$$

$\xi_o = \phi^T C \phi / 2\omega_o m_1$ 이고, S_d 와 ϕ 는 각각 변위 스펙트럼과 1차 모드 벡터를 나타낸다.

3.3 Bouc-Wen 모델

구조물이 항복하는 경우에 발생하는 이력거동은 잘 알려진 Bouc-Wen 모델을 사용하여 모사될 수 있다. 이력거동을 보이는 단자유도 구조물의 복원력은 다음 식을 상용하여 표현된다(Whittaker 등, 1998).

$$F = akx + (1 - a)kD_y \eta \quad (20)$$

여기서, a 는 항복후 강성비, D_y 는 항복변위를 나타내고, η 는 이력거동을 모사하기 위해 도입된 변수로 다음 미분 방정식식에 의해 결정된다.

$$D_y \dot{\eta} + \gamma |\dot{x}| \eta^{n-1} + \beta \dot{x} \eta^{n-1} - A \dot{x} = 0 \quad (21)$$

여기서, γ , β , n , 그리고 A 는 이력곡선의 형상을 결정하는 변수이다.

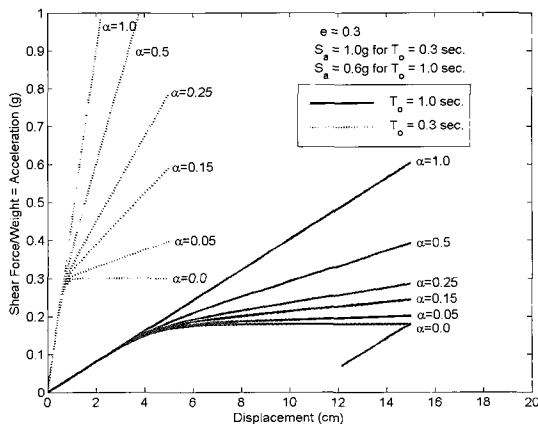


그림 1 Inelastic hysteretic curve (Whittaker et al. 1998)

그림 1은 Whittaker 등(1998)이 Bouc-Wen 모델을 사용하여 모사한 주기 1.0초, 0.3초 구조물의 항복후 강성비와 항복변위비에 따른 이력 곡선의 변화 형상을 보여준다. Bouc-Wen 모델에서 사용된 설계변수는 $\gamma=0.5$, $\beta=0.5$, $n=5$, 그리고 $A=1$ 이다.

3.4 비탄성 단자유도 시스템

비탄성 구조물에 대한 SMC는 식 (20)으로 주어지는 복원력의 선형 부분인 첫 번째 항은 구조물의 강성행렬에, 그리고 비선형 부분인 두 번째 항은 외부 가진력에 포함시킨 후, 선형 구조물과 동일한 절차에 따라 제어력을 산정한다 (Yang 등, 1995).

비선형 지진응답특성은 가진 하중에 따라 크게 달라지게 때문에 암반지역에서 측정된 표 1에 나타난 20개의 지진을 사용하여 응답을 계산한 후 평균을 취하였다.

모든 지진하중은 최대가속도가 0.3g가 되도록 크기를 조정하였다. 단자유도 시스템의 질량은 1ton, 감쇠는 2%, 그리고 탄성강성은 주어진 질량에 대하여 구조물의 탄성주기가 0.5초, 1.0초, 그리고 2.0초를 가지는 3개의 값을 사용하였다. 비선형 거동이 반드시 발생하도록 주어진 지진하중에 대하여 탄성해석

표 1 Earthquake load

No.	Earthquake	Site	Mag.	Dir.	PGA(cm/sec ²)
1	Washington (1949)	325	7.1	N04W	161.6
2	Washington (1949)	325	7.1	N86E	-274.6
3	Eureka (1954)	022	6.5	N11W	164.5
4	Eureka (1954)	022	6.5	N79E	-252.7
5	San Fernando (1971)	241	6.6	N00W	-250
6	San Fernando (1971)	241	6.6	S90W	-131.7
7	San Fernando (1971)	458	6.6	S00W	113.9
8	San Fernando (1971)	458	6.6	S90W	103.5
9	Imperial Valley (1940)	El Centro	6.6	S00E	341.0
10	Kern Country (1952)	Taft Lincoln School	7.6	S69E	175.4
11	Loma Prieta(1989)	Hollister	7.1	90	-174.5
12	Loma Prieta(1989)	Hollister	7.1	0	361.9
13	Landers (1992)	Yermo	7.5	360	-148.6
14	Landers (1992)	Yermo	7.5	270	-240.0
15	Landers (1992)	Joshua	7.5	90	278.4
16	Landers (1992)	Joshua	7.5	0	268.3
17	Northridge (1994)	Moorpark	6.7	180	286.2
18	Northridge (1994)	Moorpark	6.7	90	189.3
19	Northridge (1994)	Century	6.7	90	250.7
20	Northridge (1994)	Century	6.7	360	217.6

표 2 Performance index of SDOF structures

Weighting	Controller	Performance Index	Tn=0.5s	Tn=1.0s	Tn=2.0s
Q1	SMC	J1	0.494	0.597	0.678
		J3	0.883	0.956	1.032
		J4	0.052	0.041	0.026
	MSMC	J1	0.474	0.558	0.669
		J3	0.943	1.009	1.078
		J4	0.050	0.038	0.023
Q2	SMC	J1	0.838	0.876	0.880
		J3	0.860	0.935	1.027
		J4	0.059	0.044	0.026
	MSMC	J1	0.500	0.555	0.624
		J3	0.955	0.991	1.024
		J4	0.052	0.039	0.023

을 먼저 수행하여 최대탄성변위를 구한 후, 항복변위가 최대탄성변위의 절반 값을 가지도록 지진하중마다 조정하였다. $\alpha = 0$, $\eta_b = 100$ 을 사용하여 완전 탄-소성 이력 특성을 보이는 구조물을 고려하였다. 기존 SMC의 제어력은 제어이득 $\delta = u_{\max} / \sigma_{\lambda_0}$ 를 가지고, MSMC는 $x = 20u_{\max} / \sigma_{\lambda_0}$, $v = 0.02 \sigma_{\lambda_0}$, $p = 1$, 그리고 $q = 3$ 을 사용하여 제어력을 산정하였다. 그리고 식 (4)의 가중행렬은 $Q_1 = \text{diag}[\omega_{n1}^2 \ 1]$ 과 $Q_2 = \text{diag}[\omega_{n1}^2 \ 1]$ 를 고려하였다.

표 2는 비선형 단자유도 시스템에 대한 수치해석을 통해 얻어진 성능지수를 보여준다. 일반적으로 MSMC가 기존 SMC보다 작은 J1과 J4를 가짐을 확인할 수 있다. 이것은 변위 응답 제어에 있어 MSMC가 기존 SMC보다 더 효율적이고, 이러한 변위 제어 성능이 작은 평균 제어력을 사용하면서도 획득되었음을 의미한다. 또한 가중행렬이 Q_1 에서 Q_2 로 바뀔 때 기존 SMC의 변위 제어성능이 급격히 나빠진 반면, MSMC의 성능은 큰 변화를 보이지 않는다는 사실로부터 MSMC의 성능은 가중행렬에 의해 결정되는 슬라이딩 표면의 특성에 큰 영향을 받지 않았음을 알 수 있다. 이것은 슬라이딩 모드제어를 설계함에 있어 슬라이딩 표면을 결정하기 위한 가중행렬을 결정하는데 따른 노력이 크게 줄어들음을 의미한다.

MSMC의 가속도 제어 성능은 기존 SMC보다 조금 떨어지는 경향을 보인다. 그러나 비선형 이력거동을 보이는 경우에 최대 변위 응답이 최대 가속도 응답보다 내진설계에 있어 중요한 지수임을 고려할 때, MSMC 슬라이딩 모드 제어가 SMC보다 비탄성 이력 거동을 보이는 구조물의 내진성능을 향상시키는 데 있어 효율적임을 알 수 있다.

3.5 면진 8층 구조물

기초부분에 횡방향 강성이 매우 작은 고무-베어링을 설치함으로써 지반으로부터 전달되는 지진력이 상부구조물에 전달되지 않도록 하는 면진시스템에 있어 면진장치 자체의 최대 변위 값은 중요한 설계 변수이다. 최근 들어 면진장치에 부가의 제어력을 가할 수 있는 능동 혹은 준능동 장치를 사용하여 면진장치의 과도한 변형을 감소시킴과 동시에 상부구조물의 응답을 면진장치만을 사용한 경우보다 더욱 감소시킬 수 있는 혼합형 시스템이 도입되고 있다(김현수 등, 2005).

Yang 등(1995)은 부가의 가력기가 설치된 고무-베어링 면진장치를 가지는 8층 구조물을 대상으로 SMC를 적용하여, 면진장치에 발생한 과도한 변형을 감소시켰다. 본 절에서는 Yang 등(1995)이 사용한 8층 면진 구조물에 MSMC를 적용하고, 그 효과를 SMC와 비교하였다.

8층 건물은 345.6ton의 동일한 층 질량을 가지고, 층강성 $k_i (i = 1, 2, \dots, 8) = 3.4 \times 10^5, 3.2 \times 10^5, 2.85 \times 10^5, 2.69 \times 10^5, 2.43 \times 10^5, 2.07 \times 10^5, 1.69 \times 10^5$, 그리고 1.37×10^5

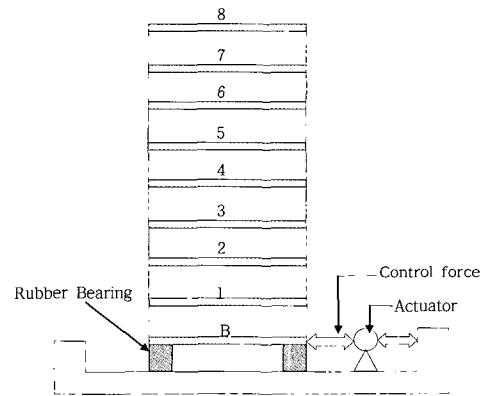


그림 2 8-story base-isolated building

표 3 Inter-story drift of 8-story base-isolated building (unit: cm)

층	BIS	SMC		MSMC	
		umax = 1484(kN)	umax = 742(kN)	umax = 1484(kN)	umax = 742(kN)
B	21.394	10.615	11.822	10.601	10.008
1	0.625	0.144	0.260	0.143	0.179
2	0.606	0.145	0.251	0.145	0.188
3	0.652	0.160	0.259	0.161	0.200
4	0.634	0.155	0.249	0.155	0.195
5	0.637	0.138	0.234	0.139	0.186
6	0.647	0.179	0.228	0.179	0.180
7	0.603	0.199	0.206	0.200	0.200
8	0.413	0.151	0.188	0.151	0.151

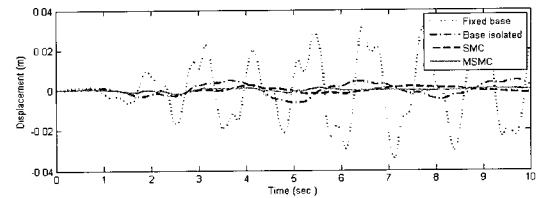
105 kN/m를 가진다. 층 단위 점성 감쇠는 $c_i(i=1, 2, \dots, 8) = 490, 467, 410, 386, 349, 298, 243$ 그리고 196 kN·s/m을 가진다. 면진장치의 복원력은 $k=18,050$ kN/m, $D_y=4$ cm, $\alpha=0.6$, 그리고 $\eta_b=3$ 을 가지는 Bouc-Wen 모델을 사용하여 모사되었으며, 질량과 감쇠는 각각 450ton, 그리고 26.17 kN·s/m 을 가진다. 그림 2는 8층 면진구조물과 가력기의 개략도를 보여준다.

시간이력해석은 Yang 등(1995)이 대상 구조물에 사용한 최대 가속도 0.3g를 가지도록 크기 조정된 El Centro 지반가속도를 사용하여 수행하였다. 슬라이딩 표면을 설정하기 위한 가중행렬은 대각성분이 $Q_{11}=0.01$, $Q_{ii}(i=2, 3, \dots, 9) = 5000$, 그리고 $Q_{ii}(i=10, 11, \dots, 18)=1$ 인 행렬을 사용하였다. 이 행렬은 상태방정식이 상태변수가 층간변위와 속도로 주어진 경우의 각 상태변수에 대한 가중치를 나타낸다.

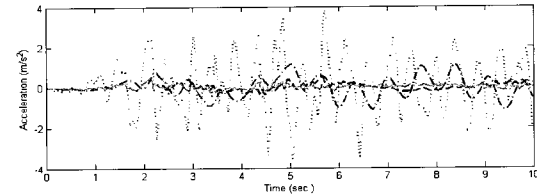
기존 SMC의 제어력은 $\delta=5 \times 10^4$ kN·ton·cm/s를 사용하여 계산하였으며, MSMC는 $x = 20u_{\max} / \sigma_{\lambda_0}$, $v = 0.02 \sigma_{\lambda_0}$, $p=1$, $q=3$ 을 사용하여 계산하였다. 최대 제어력에 따른 제어 경향의 변화를 알아보기 위해 $u_{\max} = 1484$ kN과 $u_{\max} = 742$ kN의 두 가지 경우가 고려되었다.

표 3은 면진 8층 구조물의 고무-베어링의 변형과 각 층의 최대 층간 변위를 보여주고 있다. "B"는 고무-베어링을 나타내고, BIS(Base Isolated System)는 가력기가 설치되지 않은 즉, 능동 제어력이 가해지지 않은 일반 면진 시스템을 나타낸다. 표 3으로부터 SMC 혹은 MSMC를 사용하여 능동 제어력을 가함으로써 과도했던 BIS의 고무-베어링의 변형이 크게 감소했음을 알 수 있다. 특히, 가력기를 설치함으로써 고무-베어링의 변형뿐만 아니라 구조물의 각 층 최대 층간변위의 크기까지 감소 시킴으로써 면진시스템에 능동제어를 혼합하여 적용하는 것이 면진시스템만 적용하는 것 보다 효과적임을 확인할 수 있다. $u_{\max} = 1484$ kN인 경우에는 SMC와 MSMC의 제어성능의 거의 동등하나 $u_{\max} = 742$ kN로 최대 제어력의 크기가 감소한 경우에는 SMC의 성능은 급격히 저하되는 반면 MSMC의 성능은 크게 저하되지 않았음을 알 수 있다. 이것은 제한된 MSMC가 주어진 최대 제어력의 한계내에서 가력기의 성능을 최대한 활용하고 있음을 의미한다.

그림 3은 $u_{\max} = 742$ kN인 경우에 고정기초, 비제어 면진구조물, 그리고 SMC와 MSMC를 사용하여 제어된 면진구조물의 1층 상대변위와 절대가속도의 시간이력을 보여준다. 그림 3으로부터 면진시스템을 사용함으로써 고정된 기초를 사용한 경우에 과도하게 발생했던 1층 상대변위와 가속도를 크게 줄일 수 있음을 알 수 있다. 또한 면진시스템에 부

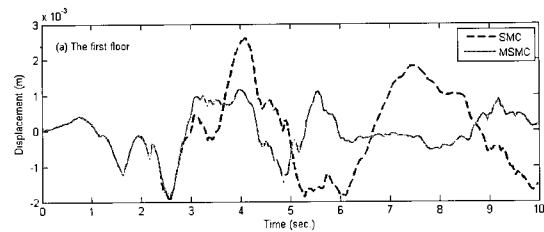


(a) Displacement

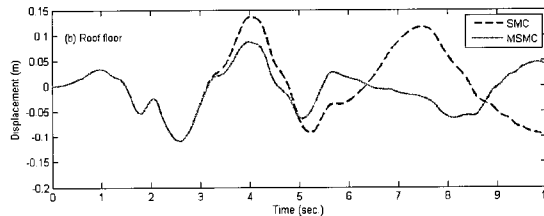


(b) Absolute acceleration

그림 3 The time history of the first floor



(a) Displacement of the first floor



(b) Displacement of the roof floor

그림 4 Comparison between SMC and MSMC

가적인 가력장치를 설치함으로써 구조물의 응답을 비제어 면진구조물보다 좀 더 큰 응답감소효과를 가져옴을 알 수 있다. 그림 4는 SMC와 MSMC에 의한 1층 상대변위와 최상층 변위의 시간이력을 보여준다. MSMC가 변위응답제어에 있어 기존의 SMC보다 우수한 성능을 보여줌을 알 수 있다.

그림 5는 면진시스템의 남-고무 베어링의 힘-변위 이력을 보여준다. 그림 5(a)에서 면진시스템만 사용하는 경우에는 남-고무 베어링에 과도한 크기의 횡변위가 발생함을 확인할 수 있다. 그림 5(b), (c)는 각각 $u_{\max} = 742$ kN를 가지는 SMC와 MSMC를 사용한 경우의 이력을 보여준다. 부가적인 제어력을 면진시스템에 가함으로써 과도했던 크기의 변위를 크게 줄일 수 있으며, MSMC가 SMC보다 좀 더 크게 면진시스템의 변위를 줄임을 알 수 있다. 이것은 MSMC가 면진시스템과 구조물의 변위를 함께 줄이는 데 있어 SMC보다 우수한 제어성능을 보임을 의미한다.

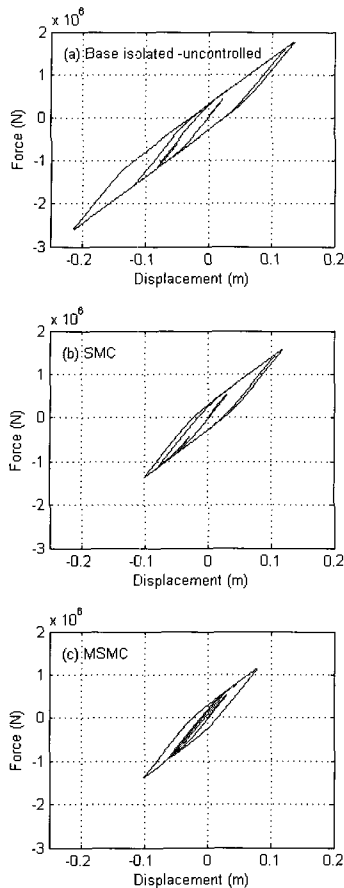


그림 5 Hysteresis of rubber bearing

4. 결론

본 연구에서는 비선형 이력거동을 보이는 단자유도 구조물과 8층 면진구조물의 지진응답제어에 대한 수정 슬라이딩 모드 제어기의 성능이 평가되었다.

주기가 0.5, 1.0, 그리고 2.0초인 단자유도 구조물들에 대한 수치해석 결과로부터 수정 슬라이딩 모드 제어기가 변위응답감소에 있어 기존의 슬라이딩 모드 제어기 보다 전체적으로 우수한 성능을 보이고 있음을 확인하였다. 특히 수정 슬라이딩 모드 제어기는 기존의 방법보다 작은 평균 제어력을 사용하고, 슬라이딩 표면을 결정하는 가중행렬에 따른 제어성능의 변화가 크지 않은 장점들을 가지고 있다.

8층 면진구조물에 적용한 결과는 면진장치에 가력기를 부가적으로 설치함으로써 면진장치에 발생하는 과도한 변위를 제어함과 동시에 상층부 구조물의 층간변위응답도 감소시킬 수 있음을 보여준다. 가력장치의 최대 제어력 한계치가 감소하는 경우 기존의 슬라이딩 모드제어기의 성능이 급격히 저하되는 반면 수정 슬라이딩 모드제어기의 성능은 큰 변화가 없다는 사실로부터 제안한 알고리즘에 의해 주어진 최대 제

어력의 한계내에서 가력기의 성능을 최대한 활용할 수 있음을 알 수 있었다.

본 연구에서는 제어력 산정에 지반가속도와 전체구조물의 응답을 이용하였는데, 센서의 제한으로 지반가속도 혹은 구조물의 응답 중 측정하지 못한 응답이 존재하는 경우에 관측기를 사용하여 제어력을 산정하는 방법에 관한 추후 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 단국대학교 교내 신진연구(2006.9~2007.8) 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

김현수, Roschke, P. N., Lin, P. Y.(2005) MR 감쇠기와 FPS를 이용한 하이브리드 면진장치의 파괴제어, 한국지진공학회논문집, 9(1), pp.61~70.

박관순, 함대기, 고현무(2003) 생애주기비용 최소화에 의한 점탄성감쇠기 장착 빌딩구조물의 통합최적설계 및 비용효율성 평가, 한국지진공학회논문집, 9(2), pp.17~27.

박규식, 정형조, 이종현, 이인원(2002) 지진하중을 받는 벤치마크 사장교를 위한 복합제어 기법, 대한토목학회논문집, 22(3-A), pp.573~585.

이상현(2003) 건축구조물의 비선형 진동제어 알고리즘 및 성능평가 기법의 개발, 박사학위 논문, 서울대학교. p.173.

이상현, 민경원, 강경수(2001) Lyapunov함수의 목표 변화율을 이용한 가진된 건물의 슬라이딩 모드제어, 한국지진공학회논문집, 5(3), pp.73~78.

이상현, 민경원, 강상훈(2004) 에너지소산 제어 알고리즘의 제어이득 산정, 한국전산구조공학회논문집, 17(4), pp.343~350.

최현훈, 김진구(2005) 보정된 등가 에너지를 이용한 비좌굴 가새골조의 내진설계, 대한건축학회논문집(구조계), 21(4), pp.91~100.

Dyke, S. J., Spencer, Jr. B. F., Sain, M. K., Carlson, J. D.(1996) Modeling and Control of Magnetorheological Dampers for Seismic Response Reduction, *Smart Materials and Structures*, 5, pp.565 ~575.

Housner, G. W., Bergman, L. A., Caughey, T. K., Chassiakos, A. G., Claus, R. O., Masri, S. F., Skelton, R. E., Soong, T. T., Spencer, B. F. Jr., Yao, J. T. P.(1997) Special issue structural control: past, present, and future, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 123, pp.897~971.

- Lee, S. H., Son, D. H., Kim, J., Min, K. W.**(2004) Optimal Design of Viscoelastic Dampers Using Eigenvalue Assignment, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 33, pp.521~542.
- Lee, S. H., Min, K. W., Lee, Y. C., Chung, L.** (2004) Improved Design of Sliding Mode Control for Civil Structures with Saturation Problem, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 33, pp.1147~1164.
- Li, C., Reinhorn, A. M.**(1995) Experimental and Analytical Investigation of Seismic Retrofit of Structures with Supplemental Damping: Part II - Friction Devices, Technical Report NCEER-95-0009, State University of New York at Buffalo, Buffalo, NY. p.190.
- Moreschi, L. M., Singh, M. P.**(2003) Design of Yielding Metallic and Friction Dampers for Optimal Seismic Performance, *Earthquake Engineering Structures Dynamics*, 32, pp.1291~1311.
- Park, J. H., Kim, J., Min, K. W.**(2004) Optimal Design of Added Viscoelastic Dampers and Supporting Braces, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 33, pp.465~484.
- Soong, T. T.**(1990) Active structural control: theory and practice, Longman Wiley, London. p.194.
- Spencer, Jr. B. F., Christenson, R. E., Dyke, S. J.**(1998) Next Generation Benchmark Control Problem for Seismically Excited Buildings, Proceedings of the Second World Conference on Structural Control, Kyoto, Japan, pp.1351~1360.
- Spencer, B. F. Jr., Dyke, S. J., Deoskar, H. S.** (1998) Benchmark Problems in Structural Control: Part I-Active Mass Driver System, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 27, pp.1127~1139.
- Whittaker, A., Constantinou, M., Tsopelas, P.** (1998) Displacement estimates for performance-based seismic design, *Journal of Structural Engineering*, ASCE 124, pp.905~912.
- Yalla, S. K.**(2001) Liquid Dampers for Mitigation of Structural Response: Theoretical Development and Experimental Validation, Ph.D Dissertation, Nortre Dame University. p.193.
- Yang, J. N., Wu, J. C., Agrawal, A. K., Li, Z.** (1994) Sliding mode control for seismic-excited linear and nonlinear civil engineering structures, Technical Report NCEER-95-0017, National Center for Earthquake Engineering Research. p.84.
- Yang, J. N., Wu, J. C., Agrawal, A. K.**(1995) Sliding mode control for nonlinear and hysteretic structures, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 121, pp.1330~1339.