

# 불확실성을 고려한 동조질량 감쇠기(TMD) 시스템의 다자유도 슬라이딩 모드 지진동 제어

## Seismic Control of Tuned Mass Damper System with MDOF Sliding Mode Control Accounting for the Uncertainties

이진호<sup>1)</sup>\*

Lee, Jin Ho

### Abstract

The control performance in active structural control system can be drastically deteriorated when the modeling errors and the uncertainties existing in the disturbances are disregarded in the designing stage. It can even throw the control system into an unstable phase, resulting in out of control against the seismic excitations. The purpose of the study is to investigate the control effectiveness of a non-linear control system called sliding mode controller(SMC) in cooperation with a Tuned Mass Damper subjected to the three seismic excitations selected from the FFT analysis. Even though the transient performance such as settling time and overshoot were deteriorated, the robustness against the system stability was appeared from SMC when the structural masses and stiffness perturbed within the range of  $\pm 30\%$ . SMC is a feasible technique for active structural control in cooperation with TMD against seismic disturbances, exhibiting robustness in perturbation of system stiffness and mass as well as uncertainties of the disturbances.

**Keywords** : Sliding mode control, Tuned mass damper, Non-linear control, Uncertainty

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

최근 구조시스템의 발전과 재료의 발달로 인한 강도 증가, 컴퓨터의 발달로 건축물의 초고층화와 상대적인 경량화가 가능하게 되었다. 이러한 추세에서 건물은 상대적인 강성과 감쇠가 저하되어 바람이나 지진 같은 횡하중에 대해 과다하게 진동하는 현상이 발생한다. 이런 문제를 해소하기 위해 외부 에너지를 제어장치에 투입하여 제진하는 이른바 능동제어(active control)를 동조질량감쇠기(Tuned Mass Daper: TMD) 시스템과 통합하는 하이브리드 진동제어 시스템을 생각해 볼 수 있다. 구조물의 진동을 제어하기 위해 사용하는 능동제어의 알고리즘은 제어 대상구조물의 특성, 제어시스템의 조건, 제어목적에 따라 여러 제어 알고리즘으로 나눌 수 있다. 그 중에서도 구조물이 가지는 큰 불확실성과 외란에 대한 불확실성에

서도 구조물의 안전과 제어성능을 확보할 수 있는 강인 제어기법이 크게 환영받는 추세이다. 슬라이딩 모드 제어(Sliding Mode Control : SMC)는 비선형 제어기로서 모델에 불확실성과 미지 외란에 불확실성이 존재하더라도 제어성능을 유지하는 우수한 강인성을 가지고 있다.

기존의 연구에서 단자유도 시스템을 대상으로 실제 시스템과 공칭 시스템 사이의 불확실성을 반영하여 모델 불확실성만 고려하였고, 단순한 다자유도 전단빌딩을 대상으로 제어기 저차화 설계에 따른 모델 불확실성만 반영한 경우도 있었다. 본 연구에서는 현실성에 중점을 두어 다자유도(다변수) 구조물을 대상으로 삼아, 실제 시스템과 공칭 시스템간의 괴리에서 파생하는 모델 불확실성과 제어기 저차화 설계 과정에서 발생하는 불확실성 및 미지 외란에 대한 불확실성, 이들을 전부 포함시켜 통합적으로 고려해보았다. 결국, 이러한 총체적인 불확실성들이 존재할 경우에도 SMC 시스템은 강인성을 보이는지를 판단하고 TMD 구조물과 결합된 능동제어기로서 적절하지 그

1) 정회원, 동의대학교 건축공학과 교수

\* Corresponding author : jhl@deu.ac.kr 051-890-1629 031-400-5132

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2011년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

타당성을 고찰하는데 목적이 있다.

## 1.2 연구의 방법 및 절차

본 연구의 제어 대상은 4층의 구조물로서 구조물의 동적 시스템의 특성을 정의하기 위해 4개의 자유도를 가진 집중질량 시스템(Lumped Mass System)으로 단순화시켜 질량, 강성 및 감쇠행렬을 산정하였다. 시스템을 가진 시킬 외란을 선정하기 위해 무작위로 선택한 11개의 지진파를 Fast Fourier Transform(FFT)분석을 하고, 이 가운데 탁월주파수의 차이가 비교적 뚜렷한 3개의 지진파를 택하였다. 그 결과 El-Centro 남북성분의 지진, Kobe 지진 및 Loma Prieta를 선정했으며 최대지반가속도(PGA)의 크기를 동일하게 스케일(scale)을 조정하여 가진 시켰다. 그 다음 구조물의 응답을 제어하기 위하여 수동 제어기인 동조질량감쇠기를 두정점이론을 적용하여 설계한다. 그리고 TMD가 장착된 제어대상에 SMC를 설계하고 응답을 구하여 특성을 분석한다.

SMC는 Linear Quadratic Gaussian(LQG)을 이용하여 슬라이딩 평면을 구하고, 이 슬라이딩 평면에 도달하여 구속할 수 있도록 도달법칙을 적용하여 제어입력을 결정하였다. SMC는 가변구조 제어이기 때문에 시스템의 상태를 슬라이딩 평면상에 구속시킴으로써 높은 강인성을 얻을 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 실제 구조물과 수학적 모델간의 차이에서 발생하는 불확실성과 지진 외란의 불확실성이 존재할 경우에 SMC의 강인성 여부에 대해서 조사해본다.

강인성을 판단하기 위해 첫째, 실제 구조물을 공칭 시스템으로 표현하는 과정에서 발생하는 파라미터 불확실성은 질량과 강성의 값을 최대  $\pm 30\%$  각각 섭동 및 동시 섭동도 시켜서 응답을 검토한다. Fig. 1은 슬라이딩 모드 제어를 적용한 전체 제어시스템의 블록선도이다. 여기서,  $G(s)$ 는 공칭 시스템(nominal system)이고,  $K(s)$ 는 제어기,  $r(s)$ 는 기준입력,  $e(s)$ 는 오차,  $\Delta_1$ 은 실제 구조물을 공칭 시스템으로 표현할 때 발생하는 파라미터 불확실성,  $\Delta_2$ 는 제어기의 저차화 설계에 따른 모델 불확실성,  $\Delta_3$ 는 외란에 대한 불확실성이다.

둘째, 외란에 대해 불확실성에 대한 강인성을 탁월 주파수 성분이 차이가 나는 El-Centro, Kobe 및 Loma Prieta 지진을 불특정 외란으로 취급한 후 제어시스템의 응답을 조사하여 판단한다. 이상을 종합하여 SMC가

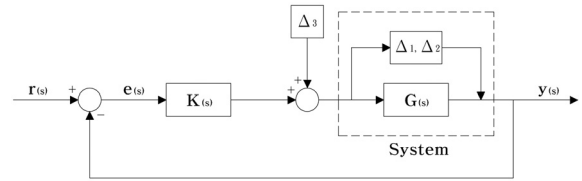


Fig. 1 A block diagram of the control system

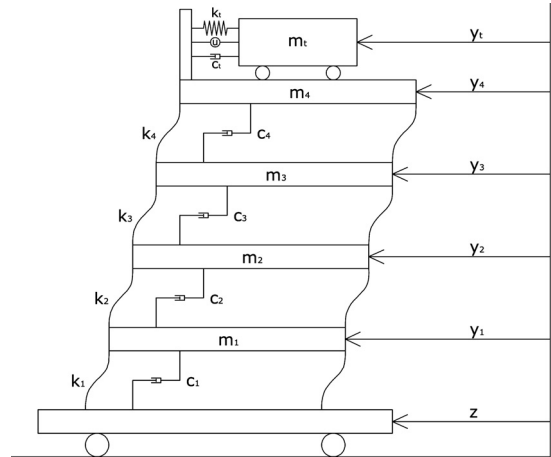


Fig. 2 Lumped mass system

TMD와 결합된 구조물의 능동 제어기로서 적합한지 결론을 도출한다.

## 2. SMC의 설계

SMC의 설계 부분은 크게 슬라이딩 평면의 설계와 상태가 슬라이딩 평면에 도달하고 평면에 구속될 수 있는 제어입력의 설계로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 Utkin과 Young이 제안한 LQG를 이용한 슬라이딩 평면의 방법으로 설계하였고, 도달법칙(reaching law)을 이용하여 제어입력을 도출하였다. 먼저, Fig. 2에서 상대변위를 다음과 같이 정의해보자.

$$x_i = y_i - z \quad (1)$$

식 (1)에 의한 운동방정식은 다음과 같다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -M\ddot{z} + Lu \quad (2)$$

여기서,  $I$ 와  $L$ 은 지진파와 제어입력의 위치행렬이다. 식 (2)를 외란 항을 고려하지 않은 일반적인 상태공간방정식의 형태로 변환하면 다음과 같다.

$$\dot{X} = AX + BU \quad (3)$$

식 (3)에서 입력에 영향을 받는 상태와 입력에 영향을 받지 않는 상태를 분리한 정규형태로 변환할 필요가 있으며 그 형태는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \widetilde{A}_{11} & \widetilde{A}_{12} \\ \widetilde{A}_{21} & \widetilde{A}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (4)$$

이때,  $\dot{z}_2 = \widetilde{A}_{21}z_1 + \widetilde{A}_{22}z_2$ 가 성립하며, 가격함수를 다음과 같이 정의한다.

$$J = \int_{t_s}^{\infty} x^T(t) Q x(t) dt \quad (5)$$

여기서,  $t_s$ 는 슬라이딩 모드 시작시간이고  $Q$ 는 양한정 대칭행렬로 표현되는 가중함수이다. 본 연구에서는 가중함수를 다음과 같이 선정하였다.

$$Q = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} \\ Q_{21} & Q_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} \\ 0_{6 \times 6} & I_{6 \times 6} \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (5)를 최소화하는 슬라이딩 평면을 설계하면 다음과 같다.<sup>5)8)</sup>

$$S = Cz = [C_1 \ C_2]z = 0 \quad (7)$$

식 (7)에서  $S$ 는 슬라이딩 평면을 나타내고  $C_1, C_2$ 는 LQR 문제를 해결함에 따라 구할 수 있으며 다음과 같다.

$$C = [C_1 \ C_2] = [Q_{11} \ \widetilde{A}_{21}^T P + Q_{12}] \quad (8)$$

여기서 행렬  $P$ 는 다음과 같은 Riccati식의 해이다.

$$P\widetilde{A}_{22} + \widetilde{A}_{22}^T P - P\widetilde{A}_{21}Q_{11}^{-1}\widetilde{A}_{21}P + (Q_{22} - Q_{21}Q_{11}^{-1}Q_{12}) = 0 \quad (9)$$

위의 과정으로부터 슬라이딩 평면의 설계를 수행하였고 다음으로 설계된 슬라이딩 평면에 구속할 수 있는 제

어입력을 생성해야 한다. 그 첫 번째 과정으로 식 (7)에서 정의한 슬라이딩 평면  $S$ 의 동특성 식을 다음과 같이 선정한다.

$$\dot{s} = -Ks - \epsilon \text{sign}(s) \quad (10)$$

여기서  $K, \epsilon$ 는 양한정 대각행렬로 각각 연속항의 계인과 불연속항의 계인으로 설계 파라미터가 된다.

식 (4), (7) 및 (10)에 의해 다음의 식을 유도할 수 있다.

$$\dot{s} = -Ks - \epsilon \text{sign}(s) = \widetilde{C}Az + \widetilde{C}Bu + \widetilde{C}D \quad (11)$$

식 (11)에 의해 제어입력을 유도할 수 있으며 다음과 같다.

$$U = -(\widetilde{C}B)^{-1} [Ks + \epsilon \text{sign}(s) + \widetilde{C}Az + \widetilde{C}D] \quad (12)$$

### 3. 제어된 구조물의 응답 특성에 대한 고찰

TMD를 장착한 모델의 응답특성을 토대로, 제어기의 설계사양은 구조물의 사용성(serviceability) 확보를 위해 TMD층을 제외하고 Roof Drift가  $h/500$  ( $h$ : 구조물의 높이)이하, 즉  $x_4 \leq 2.7cm$ 를 만족하는 것으로 가정한다. 구조물은 4층짜리 골조로서 최상층에 능동 제어입력이 투입되는 TMD(Tuned Mass Damper)를 설치하였다. 이런 시스템을 외란으로 가진시키면 TMD가 외란과 반작용을 이루며 에너지를 소산시켜 구조물의 변위를 제어하게 된다. 그러나 순수 TMD 만에 의존한 제진은 단지 1차 모드에 동조됨에 따라 고차모드에 대한 영향에 적절히 대처 할 수 없다는 점과 파라미터 변동 등의 제진대상의 동특성변화에 영향을 받아 제진효과가 크게 퇴화할 수 있는 단점이 있다. 이러한 점을 보완하고자 다음의 능동 제어이론을 활용하여 구조물의 변위를 효과적으로 제어하고자 한다.

가진 외란입력으로 El-Centro 지진 남-북 성분이 적용되었으며 최대 지반가속도가  $0.36g$ , 지속시간은 대략 19초 정도이다. Table 1은 El-Centro 지진으로 교란시킬 때 제어되지 않은 구조물 각 층의 최대변위 응답이다.

Table 1 Maximum floor displacement of the uncontrolled structure

Floor	Displacement	
		Max. Relative Displacement ( $_{\max} x_i$ )
1st Fl.		1.51cm
2nd Fl.		3.66cm
3rd Fl.		6.26cm
4th Fl.		9.09cm

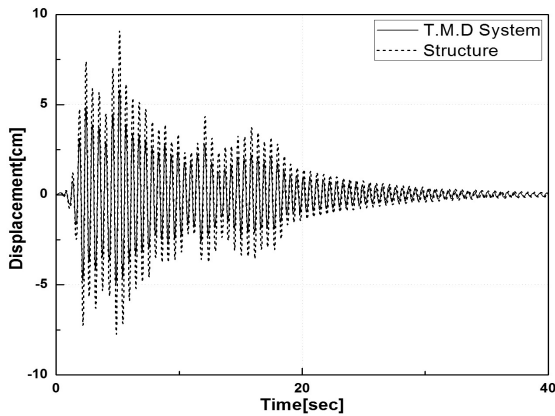


Fig. 3 Roof drift of TMD system and the original structure

이 표에서 알 수 있듯이, 설계사양을 만족하기 위해서는 4층의 변위가 6cm 이상 제어되어야 한다. Fig. 3은 TMD만의 제어성능을 보여주는 것으로 4층의 시간이력 응답을 나타낸다. 이 그림에서 보듯이 TMD만으로도 36% 정도의 Roof Drift가 감소된 것을 확인 할 수 있다.

#### 4. 제어 응답 특성

##### 4.1 모델의 불확실성에 대한 SMC의 응답

###### 4.1.1 수학적 모델의 불확실성

제어해석을 위해 수학적 모델로 이상화시키는 과정에서 실제 건물과의 오차가 발생하게 되는데 이런 오차에 강인한 제어기가 아니면 전체 시스템은 불안정해질 수 있다. SMC의 강인성을 판별하기 위해 두 가지를 조사해본다. 첫째는 실제 구조물을 수학적 모델로 이상화시키는 과정에서 발생하는 시스템 파라미터의 불확실성 즉, 모델 불확실성, 둘째는 미지의 지진 외란에 대한 불확실성에 대해서 분석한다.

###### 4.1.2 모델의 불확실성에 대한 SMC의 강인성

수학적 모델의 불확실성은 파라미터의 섭동 즉, 질량행

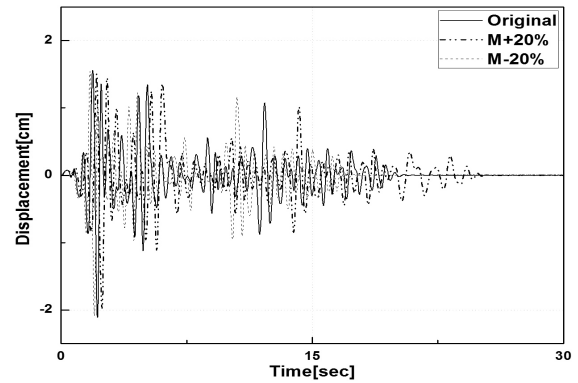


Fig. 4 Mass perturbation  $\pm 20\%$  : SMC time history for  $x_4$

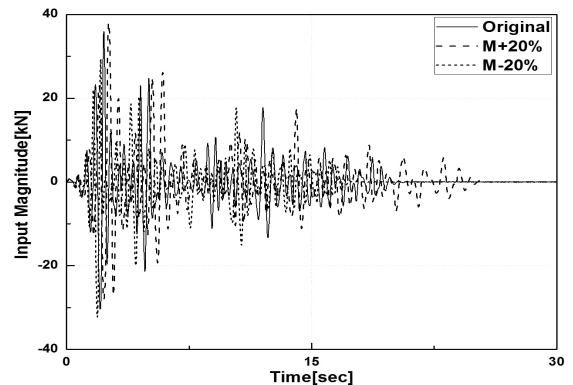


Fig. 5 Mass perturbation  $\pm 20\%$  : SMC control force time history

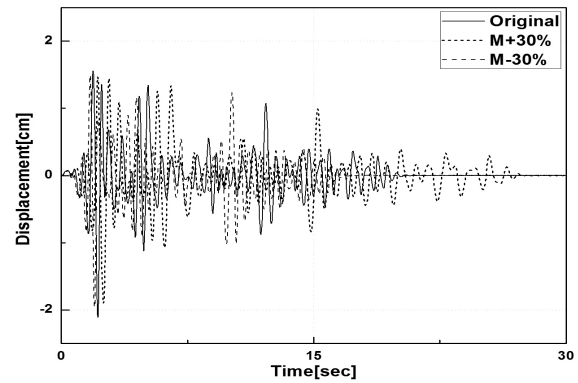


Fig. 6 Mass perturbation  $\pm 30\%$  : SMC time history for  $x_4$

렬과 강성 행렬을 최대  $\pm 20\% \sim \pm 30\%$ 의 변화된다고 가정하여 분석한다. 이때, 슬라이딩 모드 어긋나기의 파라미터 섭동 시 고정된 계인에서 강인성 검토와 고정된 제어 입력일 때의 강인성 검토를 통해 본 연구에서 구현한 계인 값과 제어입력의 타당성을 검토하고 SMC가 수학적 모델 불확실성인 파라미터 변동에서도 강인하다는 것을 확인하고자 한다. 먼저, 질량 행렬과 강성행렬이  $\pm 20\%$ ,  $\pm 30\%$  섭동시켜 본다. 또한 고정된 계인 값에 대한 파라미터 섭동에 따른 강인성을 검토해 보았다.

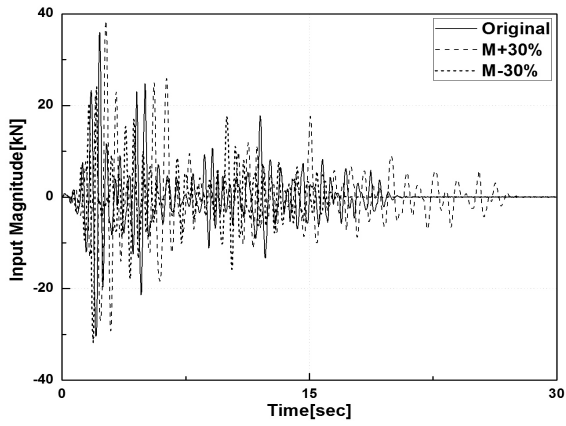


Fig. 7 Mass perturbation  $\pm 30\%$  : SMC control force time history

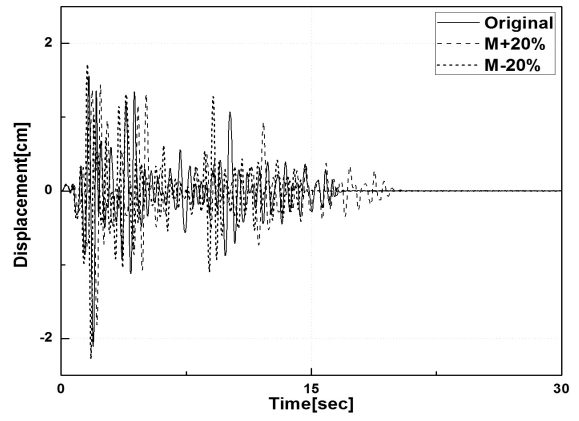


Fig. 8 Stiffness perturbation  $\pm 20\%$  : SMC time history for  $x_4$

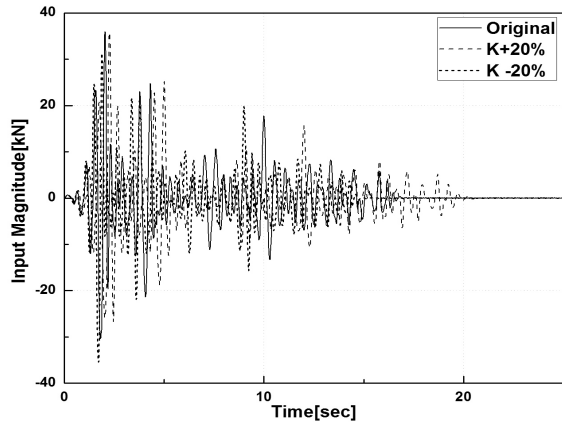


Fig. 9 Stiffness perturbation  $\pm 20\%$  : SMC control force time history

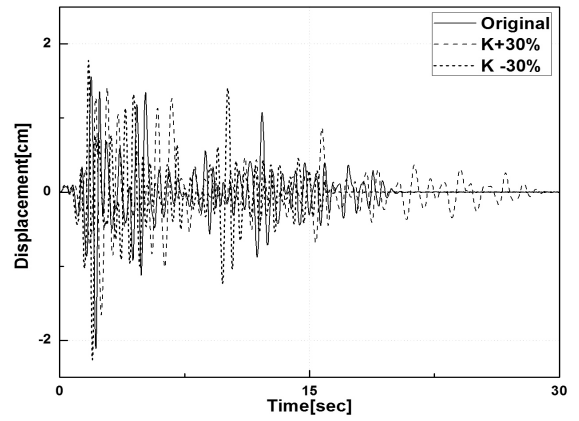


Fig. 10 Stiffness perturbation  $\pm 30\%$  : SMC time history for  $x_4$

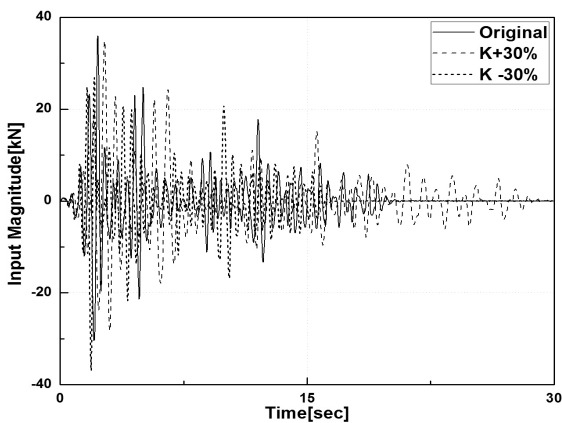


Fig. 11 Stiffness perturbation  $\pm 30\%$  : SMC control force time history

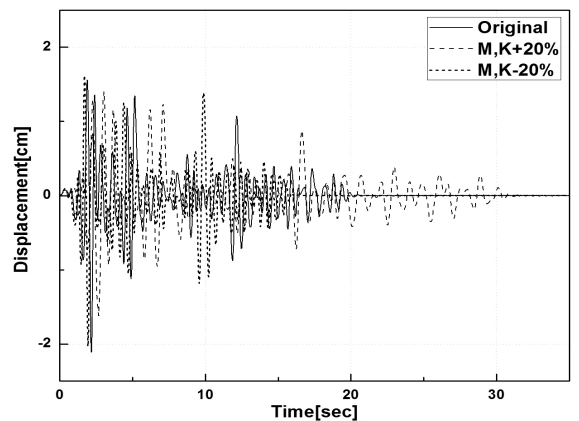


Fig. 12 Mass and stiffness perturbation  $\pm 20\%$  : SMC time history for  $x_4$

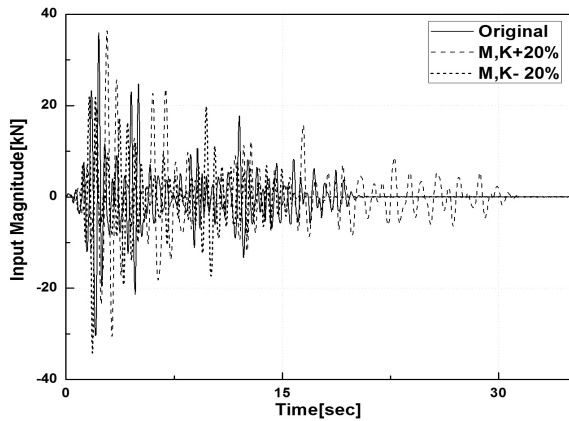


Fig. 13 Mass and stiffness perturbation  $\pm 20\%$  : SMC control force time history

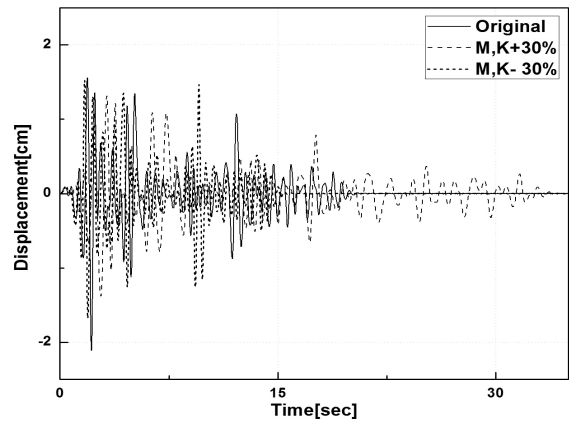


Fig. 14 Mass and stiffness perturbation  $\pm 30\%$  : SMC time history for  $x_4$

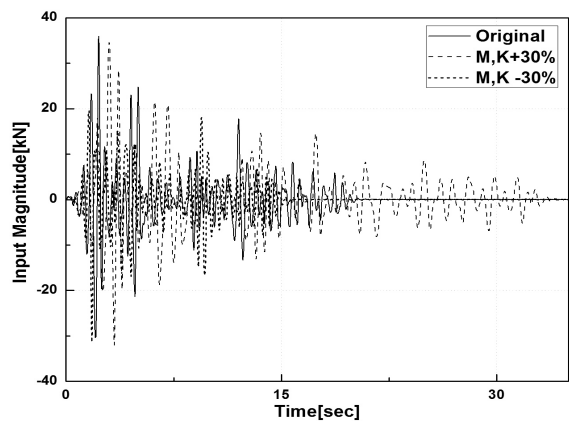


Fig. 15 Mass and stiffness perturbation  $\pm 30\%$  : SMC control force time history

SMC에 의한 TMD 시스템을 El-Centro 지진파로 가진시킬 경우, 연속 항과 불연속 항의 게인 값  $K$ 와  $\epsilon$ 를 고정된 상태에서 구조물의 파라메터인 질량행렬과 강성행렬을 섭동시켰을 때 제어입력과 Roof Drift 응답에 미

Table 2 SMC response for the parameter perturbations(fixed gain)

	Story Drift [cm]	Input Magnitude [kN]	Roof Drift/Input Magnitude error
Original	2.11	35.93	-
M+20%	1.97	37.94	6.6% Decrease / 5.2% Increase
M-20%	2.08	32.33	1.4% Decrease / 10% Decrease
M+30%	1.90	38.51	9.9% Decrease / 6.6% Increase
M-30%	1.95	31.75	7.5% Decrease / 11.6% Decrease
K+20%	1.81	35.75	14.2% Decrease / 0.5% Increase
K-20%	2.27	35.48	7.5% Increase/1.2% Decrease
K+30%	1.65	34.87	21% Decrease / 3.0% Decrease
K-30%	2.26	36.97	6.6% Increase/2.8% Increase
M,K+20%	1.62	36.38	23.2% Decrease / 1.2% Increase
M,K-20%	2.03	34.21	3.7% Decrease / 4.7% Decrease
M,K+30%	1.38	34.57	34.5% Decrease / 3.7% Decrease
M,K-30%	1.67	31.36	20.8% Decrease / 12.7% Decrease

치는 영향을 조사하여 Table 2에 정리하였다. 이 표에서 볼 수 있듯이 SMC 제어시스템은 파라메터 섭동에도 불구하고 설계사양 2.7cm를 모두 만족시키며, 제어입력도 35.93kN에서 6.6% 벗어난 정도의 근소한 차이만 나타난다. 특기할 사항은 Fig. 7, 9, 11, 13, 15에서 보듯이 질량과 강성 파라메터를 섭동시키면 오버슈트가 다소 증가하고 정정시간(settling time)이 길어지는 등, 과도응답성능은 약간 저하되는 추이를 보인다.

결국, 게인 값을 고정된 상태에서 질량과 강성 파라메터가 각각 또는 동시에 섭동( $\pm 30\%$  이내)되어도 SMC는 강인한 제어성능을 유지한다고 판단된다.

## 4.2 불확실한 외란에 의한 SMC의 응답

### 4.2.1 외란에 의한 불확실성

지진동에 대한 특성과 크기 형태는 예상 할 수 없으므로 11개의 지진동 가운데 FFT 분석을 거쳐 탁월주파수의 큰 차이를 보인 Kobe 지진과 Loma Prieta 지진을 가진 외란으로 선정하였다. 이들 지진 외란에도 SMC가 설계 사양을 만족하는지 조사하여 지진외란에 대한 SMC 제어기의 강인성을 판단한다.

### 4.2.2 불확실한 외란의 특성과 SMC의 응답

El-Centro와 동일한 최대지반가속도(PGA)를 갖도록 스케일링한 Kobe 지진파의 탁월 주파수는 0.7630Hz ( $\approx 4.8\text{rad/sec}$ )이며 지속시간은 대략 33초이다. 그리고

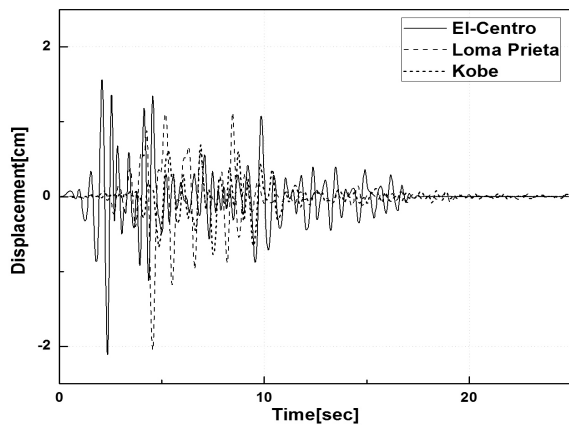


Fig. 16 SMC roof drift for the seismic disturbances

Loma Prieta 지진과의 탁월 주파수는 0.9461Hz(= 5.9rad/sec)이며 약 40초의 지속시간을 갖는다.

Fig. 16에서 보듯이 능동제어를 한 TMD 구조물에 El-Centro 지진, Loma Prieta 지진, Kobe 지진으로 가진시킬 경우, 모두 Roof Drift 설계 사양을 만족하는 변위 응답을 나타낸다. Table 3은 각 지진별 제어된 Roof Drift와 소요 최대 제어 입력을 정리한 것이다. 표에서 보듯이 El-Centro 지진을 대상으로 설계된 SMC 제어시스템은 액추에이터에 의해 36kN 정도의 제어입력만 제공되면 무작위적인 지진동이 가진되어도 설계사양을 만족시켜, 대상 구조물을 안전하게 보호하며 사용성을 유지할 수 있다.

이상에서 고찰한 것처럼 제어입력을 대략 40kN을 구현할 수 있는 SMC를 설계하면 실제 구조물과 수학적 모델간의 차이에서 발생하는 파라미터 불확실성과 동시에 외란의 불확실성에 대해서도 우수한 강인성을 갖는 제어가 가능하여 구조물의 안전과 사용성을 확보할 수 있다.

## 5. 결론

두정점이론으로 설계한 TMD가 부착된 4층 구조물에 FFT 해석으로 선정된 3개의 지진동에 대해 SMC 제어기에 의한 능동제어를 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) TMD만의 수동제진인 경우, 최상층 변위가 5.81cm로 제어되어 대략 36% 제어가 가능했다. 정전과 같은 비상시처럼 시스템에 동력이 차단되는 경우에도 상당한 제진이 가능하다. TMD를 이용한 제진은 1

Table 3 SMC roof drift control and maximum control inputs

Earthquake \ Disp./Input	Roof Drift [cm]	Max. Control Input [kN]
El-Centro	2.11	35.93
Loma Prieta	2.04	34.52
Kobe	0.74	35.73

차 모드에만 동조됨에 따라 고차모드에 대한 영향을 적절히 대처할 수 없는 점과 파라미터 변동 등의 구조물의 동특성변화에 영향을 받아 제진 효과가 크게 저감한다는 단점을 능동적 제어를 추가하여 보완시킨 SMC 제어방식을 혼용하면 변위가 효과적으로 감소되어 고차 모드에 의한 변위도 탄력적으로 제어할 수 있음을 알 수 있었다.

2) SMC 제어시스템의 질량과 강성을 섭동시키면 오버슈트가 증가하고 정정시간(settling time)이 증가하여 과도응답성능이 다소 저하되는 양상을 나타낸다. 그러나 이들 파라미터를 각각 또는 동시에 섭동(±30% 이내)시킨 모든 경우에도 비교적 작은 제어입력으로 효과적으로 변위를 제어하여, Roof Drift를 제한하는 설계 사양을 만족시켰다. 수학적 모델링 과정에서 발생하는 파라미터 불확실성을 ±20%, ±30%의 질량과 강성의 변동으로 가정할 때, SMC에 의한 응답 결과 Story Drift의 오차는 아주 미소하여, 고정된 계인으로 SMC는 강인한 제어성능을 발휘한다고 판단된다.

3) 지진동을 능동제어할 경우에 고려해야 할 문제점은 지진파가 갖는 파형의 불확실성이다. 본 연구에 적용된 지진외란은, 11개의 지진기록 가운데 FFT에 의한 탁월주파수 차이가 비교적 큰 세 개의 지진파로써, El-Centro 지진, Kobe 지진 및 Loma Prieta 지진이다. El-Centro 지진응답에 의거하여 계인이 설계된 SMC 제어기는 주파수 성분이 다른 두 종류의 지진동으로 가진되어도 모두 설계사양을 만족하는 것으로 확인되었다. 이때 액추에이터에 소요되는 제어입력은 최대 36kN 정도로 산정되었다. 이로써 SMC제어시스템은 TMD 건축 구조물과 결합하여 불특정한 지진외란에도 제어성능을 강인하게 발휘하는 제어 성능을 갖추고 있는 것으로 판단된다.

이상의 결과로 SMC는 TMD 건축 구조물에 혼용해 볼 수 있는 효과적인 능동 제어기라고 판단된다.

---

끝으로 본 연구의 결과를 토대로 실험적인 검증을 거치는 문제를 향후의 연구과제로 남긴다.

#### 감사의 글

본 연구는 동의대학교 2010년도 교내연구지원으로 수행되었음(2010AA140).

#### 참고문헌

1. 고현무, 박관순, 박원석, 조익선, "고차 모드 불확실성을 고려한 지진응답의 강인제어", 한국지진공학회 논문집, 제4권2호, 2000. 6, pp.99-108.
2. 민경원, 이영철, 이상현, "건물에 적용된 슬라이딩 모드 제어의 강인성", 대한건축학회 논문집 제22권 1호, 2002.
3. 이진호, "지진동을 받는 구조물에 능동질량제어기(AMC)를 채용한  $H_{\infty}$  제진에 관한 연구", 대한건축학회 논문집 제18권 11호, 2002.

4. 이진호, 황이철 "건축 구조물의 능동 제진에 있어 ILQ 제어알고리즘의 유용성에 관한 연구", 대한건축학회논문집 구조계 18권 1호(통권159호), 2001.
5. Christopher Edwards and Sarah K. Spurgeon, "Sliding Mode Control Theory and Application", Taylor & Francis.
6. Hrovat, D., Barak, p. p. and Rabins, M., Simi-Active Versus Passive or Active Tuned Mass Dampers for Structural Control, J. Eng. Mech., ASCE, Vol. 109(3), 1983, pp.72-74.
7. Kaneko, Mita, A Study on Hybrid Mass Damper Control of Higher Modes Using Hybrid Mass Damper, Proc. AIJ Annual Meeting, 1991.
8. Vadim Utkin, Jurgen Guldner, Jingxin Shi, Sliding Mode Control in Electromechanical Systems, 1999, CRC Press.

(접수일자 : 2010년 8월 5일)  
(심사완료일자 : 2010년 10월 21일)

---

## 요 지

지진동에 대처하기 위한 구조물의 능동제어기를 설계할 때, 모델링의 오차 및 외란의 불확실성을 무시하고 진행하면 제어 성능이 크게 퇴화될 수 있다. 심지어 시스템 전체가 불안정하게 되어 제진이 불가능하게 될 가능성도 배제할 수 없다. 본 연구의 목적은 슬라이딩 모드제어기(SMC)라 불리는 비선형제어기의 제어성능을 TMD가 장착된 구조물에 설계하여 그 적용 가능성을 검토하는 것이다. 이때 가진 외란은 FFT 해석으로 탁월주파수를 분석한 3개의 지진동이다.

SMC로 제어한 결과, 구조물의 질량과 강성이  $\pm 30\%$  섭동되어도 강인성을 유지하고 있음을 확인할 수 있었다. 다만, 오버슈트가 증대되고 정정시간이 증가하는 등 과도응답성능은 다소 퇴화되는 것을 확인할 수 있었다. 전반적으로 SMC는 모델링 및 외란의 불확실성에 대해 강인함을 유지하고 지진동을 효과적으로 제어하는 능동제어법으로 TMD 구조물과 결합시켜 지진동제어에 적용해 볼 수 있는 유용한 기법이라 판단된다.

**핵심 용어** : 슬라이딩모드제어, TMD, 비선형제어, 불확실성

---