

슬라이딩 모드제어 기법을 적용한

건물의 능동제어 실험

Experimental Study on the Active Control of Building Using Sliding Mode Control Method

° 김 성 춘*

박 정 근**

민 경 원***

정 진 옥****

Kim, Sung-choon

Park, Jeung-geun

Min, Kyung-won

Joung, Jin-wook

ABSTRACT

The active structural control has emerged as structural safety of structures against natural loadings such as earthquake and wind loadings. Of many control algorithms, Sliding-Mode Control (SMC) can design both linear controller and nonlinear controller. The robustness against parameter variations as well as excitation uncertainties that is imparted to the SMC due to its nonlinear control action, could make SMC an attractive control algorithm when dealing with structures where the external excitation constitutes the main uncertainty in the system.

This paper demonstrates experimentally the efficacy of the SMC algorithm based on the active mass driver system in reducing the response of seismically excited buildings. The SMC control strategy is verified with the experimental study on the one-story building model equipped with the active mass driver.

Key words : sliding mode control, active mass driver (AMD), sliding surface, nonlinear control, active control

1. 서론

능동제어기법은 지진이나 바람 하중처럼 자연 현상에 영향을 받은 건축, 토목 구조물에 구조적 안정성과 기능을 향상하는데 효과적인 방법으로 알려지고 있다. 최근에 다양한 제어 알고리즘과 제어장치의 발달이 이루어졌으며 활발히 연구가 진행되고 있다. 특히 건축·토목구조물은 큰 하중 작용시 구조물의 거동이 탄성에서 비탄성으로 이전

하므로 선형제어 기법보다 비선형 제어기법이 제어기의 안정성과 제어 성능을 발휘하여 구조물의 응답을 효과적으로 줄일 수 있다.

비선형 제어기법으로는 펄스 제어, 가속도 제어, 순간최적제어 그리고 슬라이딩 모드제어⁽¹⁾ 등이 있다. 그 중 슬라이딩 모드제어는 구조물이 탄성일 경우에 안정성과 우수한 제어 성능을 발휘하며 구조물의 항복후의 비선형 거동⁽²⁾⁽³⁾ 에도 구조물의 응답을 줄이는 효과를 가지고 있다.

슬라이딩 모드제어는 구조물이 안정적인 거동을 보이는 슬라이딩 표면을 정의한 후, 항상 구조물의 응답이 슬라이딩 표면으로 보내지도록 제어력을 설정하며 이를 위해, 슬라이딩 표면으로부터의 거리를 Lyapunov⁽²⁾ 함수로 설정하고, 이 함수의 시간

* 특별회원, (주)엔에스브이 기술연구소 연구원
** 정회원, (주)엔에스브이 기술연구소 소장
*** 정회원, 인천대학교 건축공학과, 교수
**** 인천대학교 건축공학과, 석사과정

에 대한 변화율이 항상 음수가 되도록 제어력을 산정한다.

본 논문에서는 건물 모형을 이용하여 가속도 응답을 받아 슬라이딩 모드 제어 기법을 적용하여 제어 성능을 입증하기 위한 실험 모형 구성과 제어기 설계에 목적이 있다. 입증 방법으로 단자유도계 건물 모형에 제어력을 구현하는 능동 질량 감쇠기(Active Mass Driver, 이하 AMD라 함)를 설치하고 지반에 건물의 주응답이 포함할 수 있는 필터링된 15Hz 램덤파를 가하여 실험을 수행하기로 하며, 이러한 일련의 신호처리 흐름이 실시간으로 이루어질 수 있도록 적합한 제어 시스템을 구성하기로 한다.

2. 실험 모델

본 실험 모델은 그림 1과 같은 단자유도계 건물의 슬래브에 AMD를 설치한 모델⁽⁴⁾이며 AMD의 이동 질량체의 관성력으로 건물에 제어력을 가하게 된다. 건물과 AMD의 순수 이동 질량체의 무게는 30kg과 3.5kg이다. 사용되는 진동대는 스텝핑 모터(steping motor)를 이용한 소형 진동대이다. 산정된 제어력을 정확히 구현하기 위해서 신호처리 보드에서 모터 컨트롤러로 신호를 보내 모터의 회전운동 제어를 사용하였다. 사용된 모터는 토크 성능이 뛰어나며 고속회전이 용이하고 제어 성능이 좋은 영국 Parker Motion & Control사의 AC서보모터를 이용하였다.

AMD를 구동시키기 위하여 모터 드라이버에 보내야 할 신호를 신호처리용 보드를 사용하여야 한다. 본 실험에서는 미국 National Instruments사 제품인 AT-MIO-16-E2을 사용하였다. 최대 샘플링 속도(sampling rate)는 100kHz이며 실험에서는 축소된 건물 모형의 주된 주파수 대역이 저주파수이므로 이를 잘 표현하는 50Hz로 하였다.

신호처리 프로그램은 제어 해석 프로그램으로 널리 이용되는 MathWorks사의 Matlab를 사용하였으며 신호의 입출력은 DSP(Digital Signal Processor) 보드에 의해 이산 신호로 변환시키며 SIMULINK로 제어기 설계를 하여 제어력을 산출한다. Matlab의 RTW Target(Real Time Windows Target)에 의해서 AMD의 모터에 입력 신호를 보내 제어력을 가한다. Matlab의 RTW(Real Time Workshop)은 SIMULINK로 구성된 제어기를 하드웨어 구동이 용이한 C code로 자동적으로 변환시켜 실시간 제어를 하게 한다.

사용된 건물 모델에서 건물 슬래브에 설치된 가속도계로부터 측정하여 제어력을 산정하여 AMD에 제어력을 발생시키는 시스템이며, 해석의 편의상 제어력과 건물의 상호작용은 무시하기로 한다.

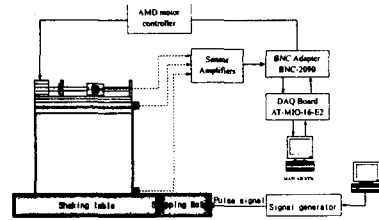


Figure1. Schematic diagram of experimental setup

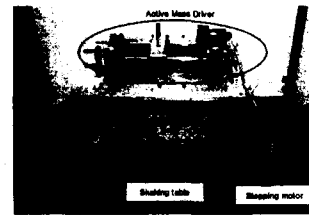


Figure 2. Building model with AMD system

3. 슬라이딩 모드 제어

위의 그림 1과 같은 모델에 대한 상태운동방정식은 다음과 같다.

$$\dot{z} = Az + Bu + H \ddot{x}_g, \quad z = [x \dot{x}]^T \quad (1)$$

여기서, $x, \dot{x}, u, \ddot{x}_g$ 는 각각 구조물의 변위, 속도, 제어력, 지반가속도를 나타내며, 행렬 A, B, H 는 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \\ B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}D \end{bmatrix} H = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}E \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, M, C, K, D, E 는 각각 질량, 점성, 강성, 제어기의 위치, 지진의 영향을 나타내는 행렬이다.

슬라이딩 모드 제어는 구조물 응답의 궤적을 슬

라이딩 표면⁵⁾으로 보내고, 그 표면에 머무르도록 제어기를 설계한다. 슬라이딩 표면에서 구조물은 안정적인 거동을 보이며, 다음과 같이 상태변수의 선형조합으로 정의된다.

$$S = PZ = 0 \quad (3)$$

여기서, S 는 r -벡터이며 r 은 제어기의 숫자를 나타낸다. P 는 슬라이딩 표면에서의 운동이 안정하도록 결정되는 $(r \times 2n)$ 행렬이다. P 를 결정하는 방법은 고유값 지정, LQR등이 있으며, 본 논문에서는 LQR방법에 의하여 다음 성능지수를 최소화하도록 P 를 결정하였다.

$$J = \int_0^{\infty} Z(t)QZ(t)dt \quad (4)$$

여기서, Q 는 $(2n \times 2n)$ 가중행렬이다.

제어기는 상태변수의 궤적을 슬라이딩 표면 $S=0$ 으로 유도하도록 설계된다. 이렇게 설계하는 이유는 구조물이 슬라이딩 표면에 있다는 것이 안정적인 거동을 한다는 것을 의미하기 때문이다. 이 목적을 달성하기 위해 Lyapunov 함수 V 를 다음과 같이 설정한다.

$$V = 0.5S'S = 0.5Z'P'PZ \quad (5)$$

상태변수의 궤적 $t \rightarrow \infty$ 일 때, 슬라이딩 표면에 머무르기 위한 충분조건은 다음과 같다.

$$\dot{V} = S' \dot{S} \leq 0 \quad (6)$$

위 (6)식의 \dot{S} 에 상태방정식을 대입하면 Lyapunov 함수의 변화율은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= S' \dot{S} = S'P(AZ + BU + E \ddot{x}_g) \\ &= S'PB[(PB)^{-1}PAZ + (PB)^{-1}PE \ddot{x}_g + U] \\ &= \lambda[U - G] \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, λ 와 G 는 다음과 같다.

$$\lambda = S'PB = Z'P'B \quad (8)$$

$$G = -[(PB)^{-1}PAZ + (PB)^{-1}PE \ddot{x}_g] \quad (9)$$

(8)식으로부터 λ 는 상태변수에 상수를 곱해 형성되는 1차 선형 공간을 나타냄을 알 수 있다. 제어력이 λ 에 비례하는 형태가 되면 선형제어의 역할을 수행하고 LQR제어와 유사한 제어력을 발생하게 된다.

G 는 지진하중과 구조물의 응답에 의해 발생하는 힘을 표현하며, λ 의 부호와 같은 경우 이 힘은 상태변수의 궤적을 슬라이딩 표면으로 보내고, 다른 경우는 멀어지게 하는 역할을 한다.

질량, 점성, 강성이 각각 m, c, k 인 단자유도 시스템에서 가중함수를 (10)식과 같이 설정하여 각 설계변수의 영향을 알아본다. Q 를 (10)식과 같이 설정하는 것은 최소로 할 성능지수가 구조물의 에너지인 것을 의미한다.

$$Q = \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \quad (10)$$

슬라이딩 표면은 다음 (12)식과 같다.

$$P = [\omega \ 1] \quad (11)$$

$$S = \omega x + \dot{x} = 0 \quad (12)$$

여기서, $\omega = \sqrt{k/m}$

변수 λ 와 G 는 다음과 같다.

$$\lambda = m^{-1}[\omega \ 1]Z \quad (13)$$

$$G = [k \ c - m\omega]Z + m \ddot{x}_g \quad (14)$$

(13)식에서, λ 는 힘의 단위가 아니므로, 제어력 산정에 이용하는 경우 상수를 곱하여 크기를 조절하여야 함을 알 수 있다(gain margin δ 사용). (14)식에서 G 는 힘의 단위와 같고, 구조물에 내재하는 힘과 지진에 의한 관성력을 나타낸다.

지진과 구조물의 강성, 점성, 질량이 Lyapunov 함수의 변화율에 미치는 영향을 알아보기 위해 제어력이 존재하지 않는 경우의 Lyapunov 함수의 변화율을 구해본다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\omega^3 x^2 + \omega \dot{x}^2 - m^{-1}c \dot{x}^2 \\ &\quad - m^{-1}c\omega x \dot{x} + \omega x \ddot{x}_g + \dot{x} \ddot{x}_g \end{aligned} \quad (15)$$

정상상태에서 변위의 크기에 대한 속도의 크기의 비가 ω 이고, 속도, 변위, 지반가속도가 모두 서로 관계가 없다면 (15)식의 평균값은 다음과 같다.

$$E\{\dot{V}\} = -m^{-1}c\sigma_x^2 = -2\omega\xi\sigma_x^2 \quad (16)$$

구조물의 강성과, 질량은 각각 독립적으로 Lyapunov 함수의 변화율에 영향이 없고, 구조물의 진동수와 감쇠비가 클수록 변화율이 음의 방향으로 증가하여 상태변수의 궤적이 빨리 슬라이딩 표면으로 접근하게 된다.

4. 제어기 설계

본 연구에서 제어실험시 필요한 제어기 설계에 필요한 상태 방정식을 위해 다음과 같은 과정을 통해 얻었다. 먼저 일반적으로 슬라이딩 모드 제어기는 다음과 같이 표현할 수 있다.⁽⁶⁾

$$u = K_b x + K_f \ddot{x}_g \quad (17)$$

여기서 K_b , K_f 는 각각 피드백 게인(feedback gain)과 피드포워드 게인(feedforward gain)를 나타내며, K_b 는 다음과 같다.

$$K_b = -(PB)^{-1}PA - \delta B^{-1}P \quad (18)$$

여기서 δ 는 게인 마진이다. 본 실험에서는 K_f 를 고려하지 않았다.

슬라이딩 모드 제어 기법에서 운동을 안정시키는 P 를 본 실험에서는 LQR를 이용하여 결정하였으며, 제어기를 설계하는데 측정값이 가속도값을 이용하므로 상태변수 추정을 위해 칼만 필터를 이용하였다.

칼만 필터 게인 L 을 이용하여 실제 상태 변수 x 를 추정한 상태추정변수, \hat{x} , 는 다음과 같다.

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - C\hat{x} - Du) \quad (19)$$

위 식(19)에 제어력 $u = K_b x$ 를 대입하여 정리하면 제어기 상태 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{\hat{x}} = (A + BK_b - LC - LDK_b)\hat{x} + Ly \quad (20)$$

$$u = K_b \hat{x}$$

따라서, 다음 그림 3에 있는 제어기의 상태 방정식은 다음과 같이 정리된다.

$$K_{control} = K_b(sI - A - BK_b + LC + LDK_b)^{-1}L \quad (21)$$

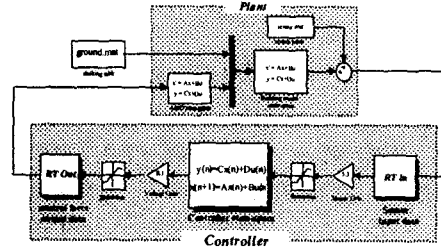


Figure 3. Control diagram for systems

5. 실험 결과

본 실험에서는 제어실험을 위해서 모터 제어용 프로그램, 제어기 설계용 프로그램, 신호분석용 프로그램 등 여러 프로그램이 이용되는데 본 연구에서는 Matlab 프로그램으로 통일시켜 실험의 편의성을 높였다. 시스템 식별 결과를 이용하여 제어력을 산출하기 위한 제어 알고리즘으로 제어기법을 적용하여 제어기를 설계하였다. 사용된 제어기는 그림 3과 같이 SIMULINK의 블록선도로 표현되었으며 Plant인 건물-AMD 모델에 대한 제어력을 산출한다.

지반 진동대에 입력되는 값은 건물의 고유 주파수 대역이 저주파임을 고려하여 25Hz 이상 주파수 대역이 필터링한 PGA가 0.08g인 랜덤파를 진동대에 발생시켜 제어 대상층인 1층의 응답가속도와 비제어시의 시간 영역 응답을 비교하였다. 그리고, 그림 4, 5은 제어시와 비제어시의 건물의 가속도 응답과 제어시 AMD의 이동 질량체의 가속도, 모터 입력된 제어 볼트값을 나타낸 것이다. 표 1은 제어시와 비제어시의 응답을 정량적으로 나타낸 것이다.

아래 그림 4와 같이 초기 2초 이하에서는 초기 조건의 영향을 고려할 수 없기에 제어 효과가 없으나 전체적으로는 제어기 설치 전보다 응답의 RMS값과 최대치를 볼 때 제어 효과가 있다고 판단된다.

그림 5(a)의 모터 입력 볼트값에서는 전체적으로 1볼트내외로 입력되므로 안정적인 AMD의 구동을 발휘시킬 수 있으며 그림 5(b)에서처럼 AMD의 구

동 역시 안정적으로 구동되어 건물의 응답을 제어하고 있다

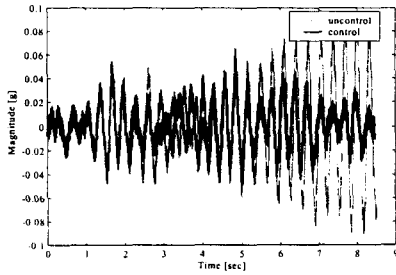


Figure 4. Comparison of experimental responses data with and without controllers

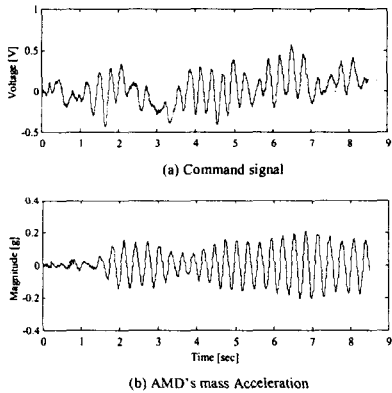


Figure 5. AMD's Acceleration and control force for active mass system using SMC controller

Table 1. Comparison of experimental data with and without controller

		Acceleration of Floor [g]	AMD's Mass Acceleration [g]	Control Force [V]
Uncontrolled response	Peak Value	0.092	-	-
	RMS	0.035	-	-
Controlled response	Peak Value	0.059	0.212	0.564
	RMS	0.018	0.094	0.187
the variation in control ratio [%]	Peak Value	64	-	-
	RMS	51	-	-

6. 결론

건축, 토목 구조물은 지진이나 바람 하중과 같은 외력으로 인해 구조물의 손상으로 특성이 변화하는 경향이 있다. 본 논문은 이러한 구조물의 동적 특성 변화에 따른 비선형 능동제어기법인 슬라이딩 모드 제어기법을 실험으로 검토하였다. 실험에서는 능동제어기 중에 하나인 AMD를 사용하여 슬라이딩 모드 제어기법을 적용하여 지진하중을 받는 건물구조물에 가속도 응답을 통해 제어시와 비제어시를 비교하였다. 본 연구를 통해 기존 선형 제어 알고리즘에서 단점인 비탄성 영역에서 제어할 수 있는 비선형 제어 알고리즘을 실험 모델에 적용하여 제어 효율, 제어기의 구동 그리고 제어 입력값의 안정성을 확인하였다. 제어 효율은 일반적인 최적 제어인 LQR과 비슷한 제어 능력을 발휘했으며, 제어 프로그램에서 산정된 모터 입력 볼트 또한 AMD의 거동 한계치 내에서 입력되므로 능동제어기 구동의 안정성을 확인할 수 있었다. 또한 응답도 효과적으로 제어 가능하였다.

참고 문헌

- (1) J.N. Yang, J.C. Wu and A.K. Agrawal(1994), "Sliding Mode Control for seismic-excited linear and nonlinear structures" - Technical Report NCEER-94-0017.
- (2) Slotine JJE, Li W(1991), "Applied Nonlinear Control" - Prentice-Hall : Englewood Cliffs, NJ.
- (3) Khalil HK (1996), "Nonlinear Systems" - Prentice-Hall : Upper Saddle River, NJ.
- (4) 민경원, 김성춘, 황성호, 호경찬, 정진욱, 주석준 (2000), Matlab을 이용한 축소모형건물의 시스템 식별과 제어기 설계, 소음진동학회 학술대회논문집(2) - 한국 소음진동 공학회, pp.978 - 983.
- (5) R.A.DeCarlo, S.H.Zak, S.V.Drakunov. - "Variable Structure, Sliding Mode Controller Design"
- (6) J.C. Wu, J.N. Yang and A.K. Agrawal(1998), "Applications of Sliding Mode Control to Benchmark Problems"- Earthquake Engng. Struct. Dyn. 27, pp.1247-1265