

유연 구조물의 진동제어를 위한 선형모터댐퍼

Linear Motor Damper for Vibration Control of Flexible Structure

심상덕† · 강호식* · 송오섭* · 김영찬** · 김두훈***

Sangdeok Sim, Hoshik Kang, Ohseop Song, Youngchan Kim and Doohoon Kim

(2005년 2월 18일 접수 : 2005년 3월 28일 심사완료)

Key Words : Linear Motor Damper(선형모터댐퍼), Vibration Control(진동제어), Natural Frequency(고유진동수), System Stability(시스템 안정성), Flexible Structure(유연 구조물)

ABSTRACT

A linear motor damper based on the linear motor principle is developed to suppress structural vibration. This paper deals with the design, analysis, and manufacture of the linear motor damper. It is designed to be able to move the auxiliary mass of 1500 kg, up to ± 250 mm stroke. The control algorithm was designed based on LQG control logic with acceleration feedback. Through performance tests, it was confirmed that the developed hybrid mass damper has reliable feasibility as a control device for structural control. In addition, the linear motor damper is more economical than both hydraulic and electric motor driving mass damper with respect to simple structure and low maintenance cost. A series of performance tests of the linear motor damper system were carried out on the full-scale steel frame structure in UNISON Corporation. Through the performance tests, it was confirmed that acceleration levels are reduced down 10 dB for first mode of structure

1. 서 론

최근 구조공학의 발전으로 건축 및 토목분야에서 고강도 재료의 사용으로 구조물이 대형화, 경량화 추세에 있다. 특히, 건축분야에서 구조강성과 감쇠비가 매우 낮은 초고층건물의 건축이 날로 증가하고 있으며 건물에 요구되는 기능은 점차 복잡해져 주상복합 건물과 같이 사무실, 상가 및 주거공간이 함께 건물 내에 공존하는 경우가 많다. 이러한 구조물이 고층화 됨에 따라 건물의 사용성(serviceability), 안전성, 주거성을 확보하기 위한 노력으로 건물내외의 진동원, 풍하중, 지진

하중과 같은 극한 상황에서도 진동변위 및 가속도제어와 같은 동적 설계기술이 함께 발전되어 왔다.⁽¹⁾

대형구조물의 진동제어기술은 수동제어(passive control)와 능동제어(active control)방법으로 분류할 수 있으며, 현재까지 개발된 대표적인 수동제어 장치로는 고무적층 베어링, 탄성받침, 포트베어링 등의 기초 격리장치와 재료의 점성을 이용한 점탄성감쇠기를 포함하여, 동흡진기 원리의 TMD(turned mass damper) 등이 있으며, 능동제어 장치로는 서보모터(servo motor), 유압실린더 등을 작동기(actuator)로 활용하여 외부의 에너지를 적극적으로 이용하여 구조물의 진동응답을 줄이는 입출력 제어방식의 AMD(active mass damper)가 있다.⁽²⁾

구조물 진동제어 방법 중 기존의 수동방식은 다양한 동하중에 대한 대응력 부족과 같은 제어성능에 한계가 있고 능동방식은 외부에너지 공급문제가 있어 반능동(semi-active) 방식의 연구 또한 활발히 이루어지고 있다. 기초격리장치는 구조물에 작용하는 기진력

† 책임저자 : 정회원, 유니슨(주) 기술연구소
E-mail : sdsim@unison.co.kr
Tel : (041) 620-3470, Fax : (041) 552-7416

* 정회원, 충남대학교 기계공학과

** 정회원, 유니스테크놀러지(주)

*** 정회원, 유니슨(주) 기술연구소

을 크게 줄일 수 있는 수동방식이나, 유연한 기초격리장치 위에 설치된 구조물에서는 필연적으로 큰 변위응답이 발생하게 된다. 따라서 기초 격리된 구조물을 대상으로 반능동 또는 별도의 액추에이터를 사용한 하이브리드(hybrid) 방법이 연구의 주류를 이루고 있다.⁽³⁾

이 논문에서는 지진이나 풍하중에 민감한 유연한 철골구조물을 실크기로 제작하여, 제진장치로 수동 제어 기능을 하는 TMD와 AMD의 역할을 하는 전자기력을 이용하는 선형모터 원리의 선형모터댐퍼(linear motor damper)를 설계하였다. 설계된 LMD를 이용하여 철골구조물의 유연 진동의 가장 지배적인 저차모드를 제어 대상으로 하여 모델 축소를 수행하였다. 축소된 모델을 바탕으로 제어기를 설계하였고 성능 검증 실험을 수행하였다.

2. 시스템의 모델링

2.1 선형모터댐퍼의 운동방정식

선형모터댐퍼는 가동코일형 선형모터의 구조를 갖지만, 이 연구모델에서는 Fig.1과 같이 코일이 고정되어 있고 영구자석과 철심이 능동질량의 역할을 동시에 수행하면서 가동되는 구조를 갖는다. 또한 가동자의 양편에 스프링이 존재함으로써 수동 댐퍼로서의 역할도 함께 수행할 수 있다. 따라서 특성 해석에 있어서 가동코일형 리니어 모터와 동일하다. 만일 가동자가 x 방향으로만 운동하고 모터의 스택(stack) 길이(z 방향), 코일 턴수 등의 설계사양을 고려하면 발생 추력은 다음 식과 같다.

$$F_x = 2lNB_g i = k_E i \quad (1)$$

여기서 l 은 공극자계속에 있는 가동코일의 축방향 유효길이, N 은 공극자계속에 있는 가동자 코일에서의 유효 권선수, B_g 은 영구자석에 의한 공극자속밀도, i 는 가동자 코일에 흐르는 전류, k_E 는 추력 및 유기전압 상수로 $2lNB_g$ 이다.

LMD의 기계적인 운동방정식은 다음 식과 같다

$$m_d \frac{d^2 x_d}{dt^2} = k_T i - k_d x_d - c_d \frac{dx_d}{dt} \quad (2)$$

여기서 m_d 는 가동부 질량, k_T 는 추력 상수, k_d 는 등가 스프링 상수, c_d 는 마찰계수, $d^2 x_d / dt^2$ 는 가동자 가속도이며, 우변의 두 번째 항은 전류변화에 따른 변압기 기전력 항이고 세 번째 항은 자계 속에서 코일이 운동함에 의해 발생하는 속도 기전력항이다. 실제 가동코일형 LMD에서 유효 공극이 매우 크므로 코일 인덕턴스는 작다. 따라서 전류변화에 의한 기전력은 속도 기전력보다 작아 무시할 수도 있다. 또한 코일에서 전압방정식은 다음 식으로 표현된다.

$$V_c = R_c i + L \frac{di}{dt} + k_E \frac{dx_d}{dt} \quad (3)$$

여기서 R_c , L , dx_d / dt 는 각각 코일저항, 코일 인덕턴스, 가동자의 속도이다.

식 (2)과 식 (3)은 $\dot{x} = Ax + Bu$ 의 관계를 이용하여 다음과 같은 상태방정식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_d \\ \dot{x}_d \\ \dot{i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{k_d}{m_d} & -\frac{c_d}{m_d} & \frac{k_T}{m_d} \\ 0 & -\frac{k_E}{L} & -\frac{R_c}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d \\ \dot{x}_d \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} V_c \quad (4)$$

여기서 상태변수는 변위와 전류이다. 시스템 출력은

Table 1 Specifications of fabricated LMD

Items	Experiment
Voltage constant (k_E)	120 [Vsec/m]
Coil DC resistance (R_c)	3.16 [Ω]
Coil inductance (L)	1.04 [H]
Moving mass (m_d)	1500 [kg]
Stiffness (k_d)	14,200 [N/m]/0.49 [Hz]
Damping ratio	0.15

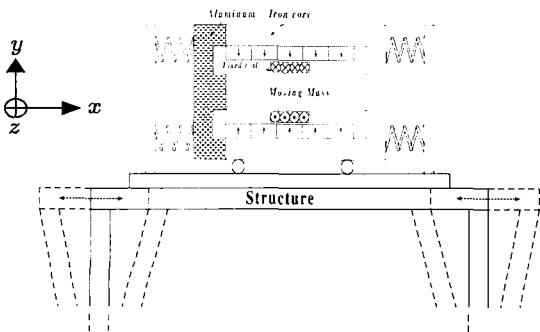


Fig. 1 Schematic of LMD

질량댐퍼의 변위를 이용하면 다음 식과 같이 나타나며, $C=[1\ 0\ 0]$, $D=[0]$ 의 행렬이다.

$$y = Cx + Du \quad (5)$$

2.2 제어 구조물의 운동방정식

Fig. 2는 초고층 구조물을 역학적 상사모형으로 제작한 철골구조물을 나타내며 전체 높이는 30m이고 층고는 6m이다. 바닥의 가로, 세로는 각각 6m 정방형이다. 철골구조물을 전단 집중질량 모델로 모델링하면 운동 방정식은 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = fF_d(t) \quad (6)$$

여기서 상태벡터는 다음 식처럼 표현되고 이는 지반에 대한 각층의 상대 변위를 나타내며, $F_d(t)$ 는 외란을 나타낸다.

$$x(t) = [x_2\ x_3\ x_4\ x_5\ x_6]^T \quad (7)$$

질량 계수 행렬 M 은 각 층별 집중질량으로 기둥 질량과 층 베이스 질량의 합이다. 실제 건물을 n 개의 자유도를 가지는 집중질량으로 모델링 하였을 때, 실제 제어기의 설계에 n 개의 진동모드의 수만큼 큰 차원을 갖는 모델을 사용할 수 없다. 즉 제어 대상 구조물의 차수 축소의 필요성이 대두된다. 이 때 사용되는 가장 일반적인 방법은 구조물의 저차 모드만을 고려하고 그 이상의 모드는 절단해 버리는 것이다. 철골구조물은 5자유도의 집중질량으로 모델링 되었

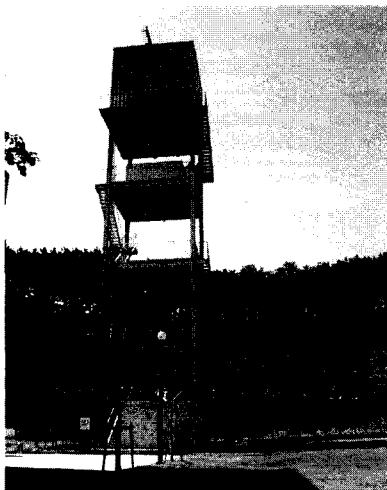


Fig. 2 Structure for vibration control

며, 제어기 설계를 위해 2자유도 모델로 축소하였다. 물리적 의미를 가지도록 LMD가 설치된 5층과 3층에 각각 집중질량을 가지는 2자유도 모델로 축소하였다. 식 (6)으로부터 축소된 모델은 식 (8)과 같이 표현될 수 있다.

$$M_r\ddot{x}_r(t) + C_r\dot{x}_r(t) + K_r x_r(t) = f_r F_d(t) \quad (8)$$

여기서, $x_r(t)=[x_3\ x_5]^T$ 은 지반에 대한 3층과 5층의 상대 변위를 나타낸다. 제어 입력 전압과 인버터를 통해 코일에 공급되는 전압은 다음과 같다.

$$V_c = G_i V_m \quad (9)$$

여기서 V_m 는 제어 입력 전압, G_i 는 인버터를 통해 증폭되는 전압 증폭 계인이다.

식 (8)의 축소된 모델 식과 LMD 모델의 운동방정식인 식 (2), 식 (3) 및 식 (9)을 결합하여 상태방정식으로 표현하면 식 (10)과 같다.

$$\dot{X}_r(t) = A_r X_r(t) + B_r V_m(t) + E_r F_d(t) \quad (10)$$

여기서 상태변수 $X_r = \{x_3\ x_5\ x_d\ \dot{x}_3\ \dot{x}_5\ \dot{x}_d\ i\}^T$ 이다.

2.3 제어기 설계

시스템의 제어를 위해서 LQG(linear quadratic gaussian) 기법을 사용하였으며 LQG 제어는 광범위한 응용분야에 사용되고 있는 최적제어 기법이다. 사용되는 비용함수(cost function)의 가중치와 성능지수(performance index)사이의 관계는 다입력 시스템이나 고차시스템에서도 유효하다는 장점이 있다. 반면 시스템 안정성을 높이며, 제어 신호를 발생시키기 위해서는 모든 상태의 값을 알고 있어야 하는 단점이 있다. 모든 시스템의 상태를 측정하는 것은 비용면에

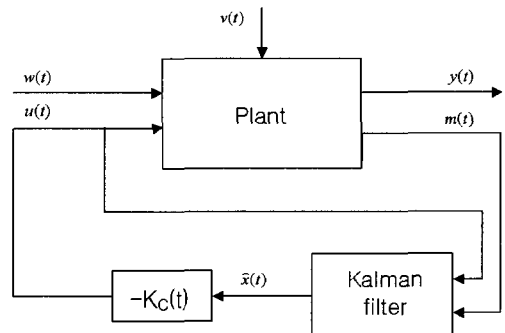


Fig. 3 LQG optimal control system

서 비효율적이며 각종 잡음으로 인한 측정오차가 모델에 고려되어야 한다. LQG 제어기를 사용할 때, 모든 상태를 측정해야 하는 단점을 상태 관측기를 이용하여 극복할 수 있으며, 이 연구에서는 널리 사용되고 있는 칼만 필터(kalman filter)를 이용하였다. Fig. 3은 LQG 제어기의 개념도이다.⁽¹⁾ 플랜트의 상태 방정식은 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + B_u u(t) + B_w w(t) \\ y(t) &= C_m x(t) + Du(t) + v(t) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 $y(t)$ 는 측정되는 물리량을 뜻한다. LQG 제어의 비용함수는 출력항과 제어입력항의 자승에 비례하며 다음 식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} J(x(t), u(t)) &= E \left[\frac{1}{2} y^T(t_f) H_y y(t_f) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \int_0^{t_f} \{ y^T(t) Q_y y(t) + u^T(t) R u(t) \} dt \right] \end{aligned} \quad (12)$$

식 (13)은 발생하는 제어신호로 칼만 필터에 의해 생성된 상태 추정값과 게인 행렬 K_c 를 곱한 값이다. LQG 제어기 설계는 비용함수 J 를 최소화하는 게인 행렬 K_c 를 구하는 것으로 귀결된다.

$$u(t) = -K_c(t) \hat{x}(t) \quad (13)$$

상태 피드백 제어기의 이득(K_c)는 상태방정식 (11)과 칼만 필터 식과의 관계를 정리하면 식 (14)처럼 나타난다. 응답 가중치 행렬 Q, R 은 식 (15)과 같다.

$$\begin{aligned} K_c(t) &= -R^{-1} B_u^T P \\ &= [-9570 \quad 151233.2] \end{aligned} \quad (14)$$

$$Q = \begin{bmatrix} 10000 & 0 \\ 0 & 400 \end{bmatrix}, \quad R = 1e-6 \quad (15)$$

3. 수치해석 및 실험 결과

3.1 선형모터댐퍼의 성능시험

설계하고자 하는 선형모터댐퍼는 1500 kg의 부하질량으로 높이 30 m, 120분의 5층 구조물의 진동을 능동적으로 제어하는 시스템에 응용을 하기 위한 것이다. Fig. 4는 비감쇠 1 자유도 모형의 응답과 비감쇠

및 감쇠 동조질량댐퍼가 설치되었을 때 주 구조물의 응답을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 동조질량댐퍼를 장착하므로 주 구조물의 공진 영역을 회피하게 되어 구조물 응답이 감소되었음을 알 수 있다. 특히, 이상적인 비감쇠 시스템을 첨가한 경우 동조 주파수에서 응답 변위의 진폭이 0이 되는 효과를 볼 수 있다. 반면 비감쇠 구조의 경우 주 구조물 주파수와 다른 영역에서 과도한 진동이 발생하기 때문에 구조물의 안정성을 확보하기 위하여 어느 정도의 감쇠값을 가지는 동조질량댐퍼가 사용된다.⁽⁵⁾

구조물의 진동을 제어하기 위한 최적 동조질량댐퍼의 설계를 위하여 3가지 무차원 계수(동조질량댐퍼와 구조물간의 질량비, 고유진동수비, 감쇠비)를 결정하여 동조질량댐퍼의 질량 m_2 , 강성 k_2 , 감쇠 c_2 를 구한다. 고유치 해석을 통하여 계산된 구조물의 1차 모드 질량, 강성 및 감쇠를 각각 m_1, k_1, c_1 라 하

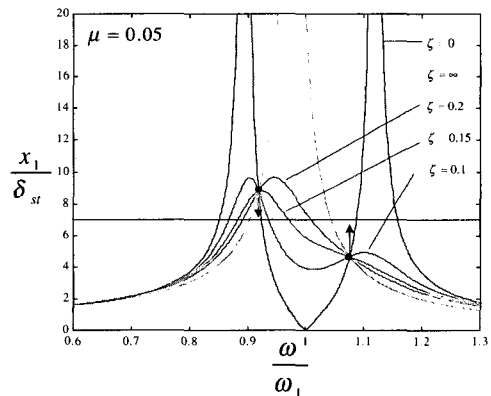


Fig. 4 Response of primary structure with TMD for damping ratio

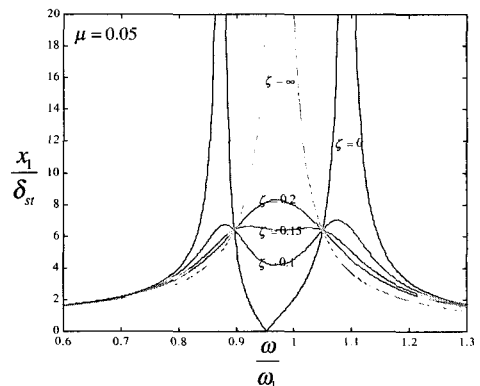


Fig. 5 Optimal damping ratio of structure with TMD

면, TMD의 질량과 구조물의 1차 모드질량과의 비, 동조주파수비, TMD 감쇠비는 각각 다음 식과 같다.

$$\mu = \frac{m_2}{m_1}, \gamma = \frac{\omega_2}{\omega_1}, \xi_2 = \frac{c_2}{2m_2\omega_2} \quad (16)$$

여기서, $\omega_1 = \sqrt{k_1/m_1}$, $\omega_2 = \sqrt{k_2/m_2}$ 이다.

Hartog⁽⁶⁾는 구조물에 조화하중이 작용할 때 이 무차원 계수들의 최적값을 결정하기 위하여 동조주파수비와 감쇠비를 다음 식과 같이 질량비, μ 의 함수로 나타내는 방법을 제안하였다.

$$\gamma_{opt} = \frac{1}{1+\mu}, \eta_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} \quad (17)$$

위 식에 의해 설계된 최적 동조질량댐퍼에 의해 구조물의 감쇠비는 다음 식과 같이 늘어난다.

$$4\xi_{eq} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu/2}{1+\mu/2}} \quad (18)$$

Fig. 5는 최적 감쇠비를 갖는 1 자유도 모델의 응답으로 최적 감쇠비로 인하여 주 구조물의 응답이 최적으로 줄어들음을 알 수 있다. Fig. 6은 LMD의 실물 사진이며 사용된 스프링은 이동질량의 변위량이 ± 250 mm이기 때문에 충분한 변위확보를 위해 인장 스프링이 사용되었다. 구조물의 1차 모드 질량과 주파수는 84톤, 약 0.51 Hz를 갖는다. 또한 이동질량이 되는 영구자석과 철심은 자체가 능동질량이 되므로 1500 kg이 되어야 하며 댐퍼의 안정도를 고려하여 가능한 높이는 낮고 폭이 넓은 구조를 갖게 설계되어야 한다. Fig. 7은 모터의 입력 전류에 따른 정추력 특성을 보여준다. 영구자석이 전체 자기회로에 비하여 작으므로 자기장하가 작고 전기장하가 크다. 따라서 요크를 포화시켰음에도 불구하고 전기자 반작용에 의한

추력의 불평형이 발생한다. 그러나 ± 15 A 영역에서는 비교적 선형성을 가지며 스프링에 의해 불평형 추력은 감소될 수 있을 것으로 예상된다. Fig. 8은 입력 전압에 따른 전압, 전류 및 변위의 동특성을 보여준다. 입력전압이 90V인 경우 가동자는 스톱퍼에 부딪치지 않고 왕복운동을 하였다. 그리고 스프링에 의해 운동에너지가 저장되므로 공진이 발생하여 전류는 0에 가깝게 줄어든다.

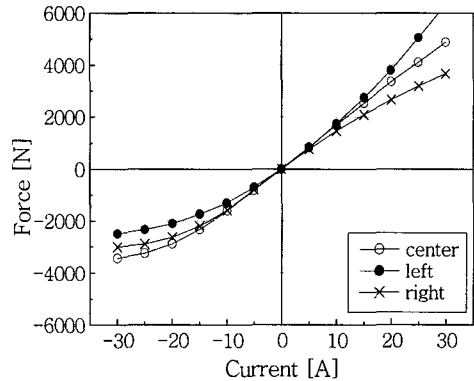


Fig. 7 Thrust of motor according to current and Position of coil

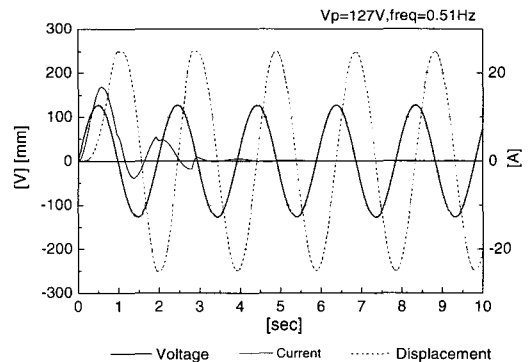


Fig. 8 Dynamic property of LMD by input voltage



Fig. 6 Linear motor damper

Table 2 Specifications of fabricated LMD

Items	Specification
Voltage/Current	180 [V]/23 [A]
Moving mass	1500 [kg]
Magnetic flux density	1.1 [T]
Electric current density	4 [A/mm ²]
Conductor area	5.31 [mm ²]
Spring length	1 [m]
Air gap	50 [mm]

3.2 구조물의 진동 제어

구조물의 능동 제어장치를 설계하기 위해서는 구조물의 동특성을 파악할 필요성이 있다. 실제 구조물에 있어서 여러 요인에 의해 해석으로 정확한 구조물 특성을 파악하기 어렵다. 따라서 동특성 시험을 통해 구조물의 특성을 확인하였다. 측정결과와 FE해석을 통해 구한 값을 비교하여 FE모델의 신뢰성을 검증하였다. 구조물의 응답 특성을 측정하기 위해 칼럼 약축 방향으로 가속도계를 설치하였다. 가진은 4층에 설치된 불평형 가진기와 수평가진기를 이용하여 가진하였고, 가진 주파수는 14 rpm(0.23 Hz)에서 55 rpm


Mode	1	2	3	4	5
Natural freq.(Hz)	0.501	0.665	0.852	1.511	2.089
Mode shapes					

Fig. 9 Dynamic characteristics of structure

(0.91 Hz)까지 단계별로 가진 하였다. 동특성 성능시험 결과를 요약하면 Table 3과 같다.

Fig. 9는 유한요소해석을 통해 구한 철골구조물의 모드 형상이다. 0.501 Hz에서 첫 번째 굽힘 모드가 발생하고 1.511 Hz에서 약축 방향의 2차 굽힘 모드가 있음을 해석적으로 알 수 있다.

Fig. 10은 구조물 5층에 설치된 제어시스템의 액추에이터인 LMD에 전압을 공급하여 구조물의 고유진동수인 0.5 Hz로 구조물을 가진하여 구조물이 공진상태에 도달한 후에 가진력을 제거하여 자유진동 실험과 같은 조건에서 LMD에 제어 입력을 공급하는 LQG 제어를 수행한 결과를 나타낸다. 자유진동의 중요한 성능지수는 정상상태, 즉 5층 바닥의 가속도가 0인 상태에 도달하는데 걸리는 시간이며 그 시간이 짧을수록 감쇠가 크다고 할 수 있다. 실험 결과 제어시에 정상상태의 가속도 피크 값은 2.5 cm/s^2 를 나타냈고 정상상태에 도달하는데 걸리는 시간은 약 2.5초였다. 그러나 비제어시는 가진이 끝난 시점에서 약 30초 이후에도 정상상태에 도달하지 못했으며 이때의 가속도 피크 값은 5 cm/s^2 를 나타냈다. 여기서 비제어시는 수동제어 상태, 즉 LMD가 TMD의 기능만을 수행하는 상태를 말하며 제어시는 선형모터덤퍼가 AMD의 기능을 동시에 수행하는 상태를 나타낸다.

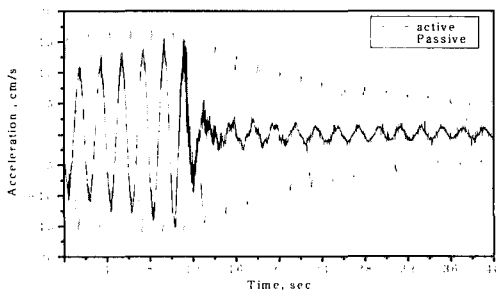
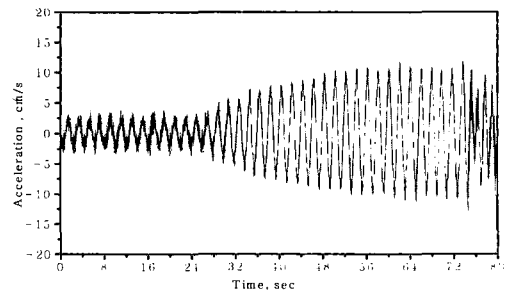
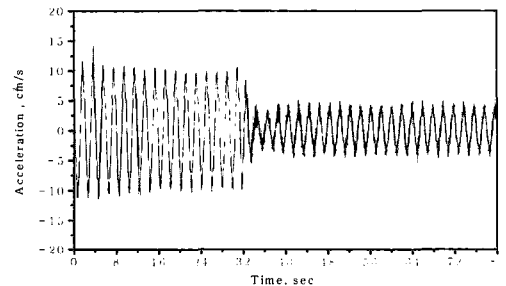


Fig. 10 Active and passive control response



(a) Control on → off



(b) Control off → on

Fig. 11 Active and passive control

Table 3 Modal parameter of structure

Parameters	Frequency (ω_n)	Damping ratio (ζ)	H(ω)MAX ($m/s^2/N$)
Ground	0.5	0.0198	3.635e-6
2 Floor	0.5047	0.0198	9.344e-5
3 Floor	0.50482	0.0198	1.751e-4
4 Floor	0.50443	0.0198	2.598e-4
5 Floor	0.50487	0.0198	3.209e-4
Top	0.50499	0.0198	3.209e-4

그림에서 대수감쇠 식에 의해 감쇠비를 구하면 비제어시는 1.8%이며 제어시는 18%로 감쇠비가 제어시에 10배 더 크음을 알 수 있다.

Fig. 11은 철골 구조물 4층에 설치된 수평 가진기를 이용하여 구조물을 0.5 Hz로 가진하여 구조물에 공진이 발생한 상태에서 5층에 설치된 LMD에 제어 입력을 공급하여 LQG 제어를 수행한 후 구조물의 5층에 설치된 가속도계를 통해 얻는 가속도 값을 나타내고 있다. Fig. 11(a)는 제어를 수행했다가 제어 입력을 제거하여 LMD가 수동제어 상태로 변환했을 경우 구조물 5층에서의 가속도 응답을 나타낸다. 가속도 피크가 능동제어시는 3.23 cm/s에서 수동제어시는 10.205 cm/s²로 증가함을 알 수 있다.

Fig. 11(b)는 동일한 조건으로 가진하여 구조물에 공진발생시 LMD를 수동제어 상태에서 능동제어 상태로 변환했을 때 구조물 5층에서 가속도 응답을 나타내며 수동제어 정상상태에서 가속도 피크의 평균값이 10.547 cm/s²에서 능동제어시 3.76 cm/s²로 감소되었으며 이는 수동제어에 비해 10 dB 가량 감소한 값이다.

4. 결 론

이 논문에서 개발한 선형모터댐퍼는 구조가 간단하고 부품수가 작아 경제적이며 유지보수 측면에서 유리한 장점을 갖는다. 또한 NdFeB의 영구 자석계자와 SUS보빈에 감겨진 코일로 이루어지며, 가동자는 철심과 자석으로 자체가 1500 kg의 능동질량으로 0.1~1.0 Hz 범위에서 왕복 운동할 수 있고 동조질량댐퍼와 능동질량댐퍼의 기능을 동시에 수행하는 복합질량댐퍼로 초고층 구조물 진동제어용 액추에이터로 사용

하기에 용이한 구조임을 확인하였다. 개발한 선형모터댐퍼를 액추에이터로 이용하여 실크기의 구조물의 최상층에 설치하여 구조물의 저차 진동모드를 제어한 결과 설계된 제어기는 강건함을 확인하였고, 실험적 검증을 통하여 구조물의 1차 굽힘 모드에 대해 가속도 응답이 10 dB 감소함을 확인하였다.

참 고 문 헌

- (1) Patten, W. N., Sun, J., Li, G., Kuehn, J. and Song, G., 1999, "Field Test of an Intelligent Stiffener for Bridges at the I-35 Walnut Creek Bridge," *Earthquake Engineering and Structure Dynamics*, Vol. 28, No. 2, pp. 109~126.
- (2) Kobori, T., Takahashi, M., Nasu, T. and Ogasawara, K., 1993, "Seismic Response Controlled Structure with Active Variable Stiffness System," *Earthquake Engineering and Structure Dynamics*, Vol. 22, pp. 925~941.
- (3) Yang, J. N., Kawashima, K. and Unjoh, S., 1995, "Hybrid Control of Seismic-excited Bridge Structures," *Earthquake Engineering and Structure Dynamics*, Vol. 24, pp. 1437~1451.
- (4) 김종식, 1998, 선형제어시스템 공학, 청문각.
- (5) 박진일, 박해동, 최현, 김두훈, 2000, "고층 구조물의 진동제어를 위한 복합형 질량 댐퍼의 제어력 설계에 관한 연구," 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp. 276~281.
- (6) Hartog, J. D. 1956, *Mechanical Vibrations*, McGraw-Hill, New York.