

< 논문 >

동흡진기를 이용한 유연 구조물의 강건제어

심상덕* · 강호식* · 정남희* · 송오섭† · 장강석** · 김두훈**

(2005년 3월 8일 접수, 2005년 7월 9일 심사완료)

Robust Control of Flexible Structure Using Dynamic Vibration Absorber

Sangdeok Sim, Hoshik Kang, Namheui Jeong, Ohseop Song, Kangseok Jang, Doohoon Kim

Key Words: Dynamic Vibration Absorber(동흡진기), Flexible Structure(유연 구조물), Robust Control(강건제어), Structural Vibration(구조진동), Kalman Filter(칼만 필터)

Abstract

Hybrid mass damper systems have recently been introduced as a dynamic vibration absorber to exploit the benefits of both the conventional tuned mass damper system and the active control system. A hybrid system is programmed to function as either a conventional TMD or as an active system according to the wind conditions and the resultant building and damper mass vibration characteristics. This paper deals with the design of the robust controller for the control of the flexible box structure. The control algorithm was devised based on H_2 (LQG) robust control logic with acceleration feedback and to improve the capability of the controller Kalman Filter was accepted for the system. To test the ability of the robust controller using the linear motor damper system, performance tests and simulations were carried out on the full-scale steel frame structure. Through the performance tests, it was confirmed that acceleration levels are reduced down.

1. 서론

최근에 발생한 대형 지진 참사와 관련하여 구조물의 진동현상에 대한 관심이 고조되고 있으며 내진에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 지진 발생시 지반진동에 의하여 영향을 받으면 안 되는 원자력 발전소의 원자로 등의 주요설비, 교량 등의 토목구조물, 고층빌딩, 공항관제탑 등의 건축구조물을 중심으로 지진이나 태풍에 대하여 어떻게 적절하게 대응토록 하는가의 문제로 다양한 종류의 내진장치를 적

용하거나 적용을 검토 중에 있다.^(1,2)

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

구조물진동의 능동제어를 위해서는 다양한 구동기가 사용된다. 그 중에서 부가적인 가동질량의 관성력을 이용하는 동흡진기(dynamic vibration absorber)의 원리를 활용하여 건물 및 교량 등 대형구조물의 진동을 제어하기 위한 노력이 시도되고 있다. 일반적으로 수동형 동흡진기는 TMD(tuned mass damper), 능동형은 AMD(active mass

† 책임저자, 회원, 충남대학교 기계공학과

E-mail : songos@cnu.ac.kr

TEL : (042)821-5650 FAX : (042)822-5642

* 충남대학교 기계공학과

** 유니스테크놀러지(주)

damper), 수동형과 능동형을 혼합한 형태는 HMD(hybrid mass damper)라고 불리고 있다.^(4,5)

본 연구에서는 실크기의 철골 구조물을 설계, 제작하였으며 제작된 실크기의 구조물의 유연한 진동(flexible vibration)을 능동적으로 제어하기 위하여 LQG 제어알고리즘을 이용하였다. 액추에이터는 플레밍의 오른손법칙을 이용한 선형모터의 원리와 같은 하이브리드 질량댐퍼(hybrid mass damper, HMD)를 설계하여 적용하였고 제어할 구조물의 진동모드(vibration mode)는 구조물진동에 가장 지배적인 최 저차모드를 대상으로 하여 구조물의 모델축소를 수행하였고 제어기 성능 검증 실험을 수행하였다.

2. 제어구조물 설계

2.1 제어 구조물의 제원

초고층 빌딩과 같이 실제 구조물에 적용되는 제진장치의 경우 장치의 동적인 신뢰성을 확보해야 하며 이를 위해선 실험실 규모의 축소 모형의 실험에 머무르지 않고 실제규모의 구조물의 진동 제어 실험을 수행하여야 한다. 반면, 실제규모의 구조물의 제작에 있어서도 모형실험에 따른 대상 구조물의 특성을 잘 묘사하도록 제작하여야 하며 그러기 위해서는 여러 가지 요소에 대한 고려가 필요하다. 초고층 구조물을 역학적 상사모형으로 제작한 구조물을 Fig. 1에 나타내었다. 바닥의 가로, 세로는 각각 6m 정방형이며, 층고는 6m이며 전체 높이는 30m이다.

2.2 구조물의 동특성시험

구조물의 능동진동제어장치를 설계하기 위해서는 구조물의 동특성을 파악할 필요성이 있다.⁽⁶⁾ 실제 구조물에 있어서는 여러 가지 요인에 의해 FE해석에 의해서는 정확한 구조물의 특성을 파악하기 어렵다. 따라서 동특성 시험을 통해 구조물의 모달 변수(modal parameter)를 확인하였다. 구조물의 동특성을 측정하기 위한 장비는 B&K pulse에 의해 실시간으로 분석 처리하였다.

구조물의 응답특성을 측정하기 위해 칼럼의 약축 방향으로 가속도계를 설치하여 측정하였으며 가진은 4층에 설치된 불평형가진기를 이용하여 가진 하였고, 가진 주파수는 14rpm(0.23Hz)에서 55rpm(0.91Hz)까지 단계별로 가진 하였다. 측정결

과와 FE해석을 통해 구한 값을 비교하여 FE모델의 신뢰성을 검증하였다. Fig. 2는 5층 바닥에서 측정한 주파수 응답그래프로 1차 고유진동수가 0.5 Hz에 있음을 알 수 있다. 그래프 상의 포인트는 측정 데이터이며, 커브 피팅(curve fitting)된 측정 데이터와 FE해석으로 얻은 응답곡선이 거의 일치함을 보여주고 있다.

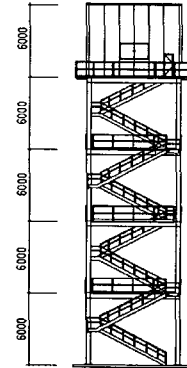
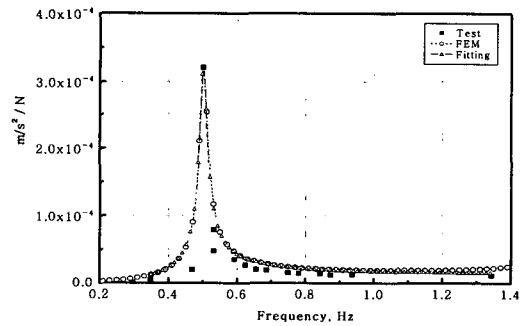
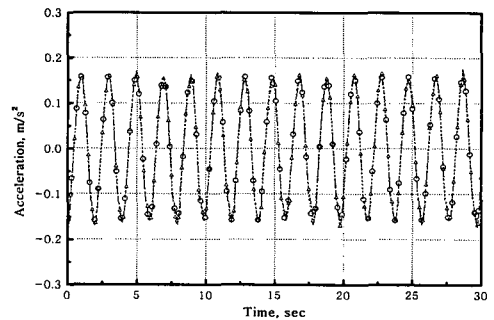


Fig. 1 Structure for vibration control



(a) Frequency response on 5th floor



(b) Time response on 5th floor

Fig. 2 Response of excited structure

2.3 구조물 가진기

구조물의 동특성을 실험하기 위한 장치로는 불평형가진기(unbalance mass exciter)와 질량 댐퍼형 가진기(mass damper exciter)를 사용하였다. 먼저, 불평형가진기를 이용한 가진은 주기적인 회전력을 발생시켜 시스템의 동특성분석 목적에는 적절히 사용될 수 있으나 풍하중과 지진하중 발생시 제진장치에 의한 구조물의 응답 저감을 관찰하기에는 한계가 있다. 따라서 구조물을 가진시키기 위해 직선방향으로 추력을 낼 수 있으며, 상대적으로 손쉽게 랜덤(random)하중을 묘사할 수 있는 리니어 모터 댐퍼(linear motor damper)와 같은 원리인 질량 댐퍼형 가진기를 사용하였다. 고층건물이 풍하중에 의해 고유주기로 움직일 때, 저주파수의 진동은 거주자에게 피로움을 크게 하며 건물의 구조안전성에 대한 불안감을 느끼게 하며 멀미증상을 유발한다. 풍하중에 의한 건물 진동으로 사람이 느끼는 정도는 0.1~2Hz에서 0.005g 이하는 거의 느끼지 못하며 0.005g는 인식 한계, 0.015g는 피로움, 0.05g는 매우 피로움을 느끼는 것으로 보고 되고 있다.

Fig. 3은 불평형가진기를 나타내며 사양은 옥상에서 약 0.05g의 가속도레벨을 발생시키기 위해 0.65Hz에서 600N을 발생할 수 있도록 제작하였으

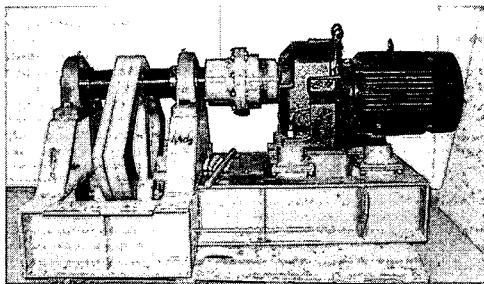


Fig. 3 Exciter with unbalance mass

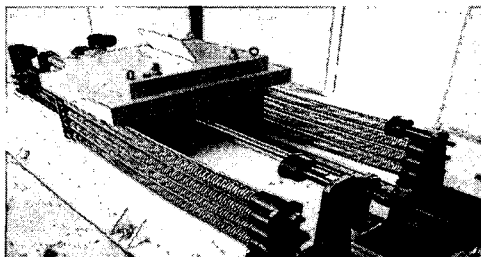


Fig. 4 Exciter of mass damper type

며, 전체 무게가 440kg이고 크기는 모터 축 방향을 길이 방향으로 하여 너비가 1,060mm 길이가 1,215mm 높이가 600mm로 제작되었다. Fig. 4는 질량 댐퍼형 가진기를 나타내며 1방향 미끄럼 질량방식으로 이동질량의 무게는 500kg이고 16개의 스프링을 이용하였다. 가변 오리피스 댐퍼를 이용하여 감쇠를 조절할 수 있으며 강성과 질량을 변경하여 0.3~0.7Hz 정도로 변경할 수 있다. 또한 이동질량과 스프링 댐퍼로 구성된 1자유도 진동 시스템이며 설계요건은 질량 댐퍼형 가진기의 고유진동수를 구조물의 1차 고유진동수와 같아지도록 조절하여 미세한 외력으로도 1차 고유진동수의 진동을 감소시킬 수 있도록 하였다.

2.4 동흡진기(DVA)

선형 왕복운동 액추에이터(LOA : linear oscillating actuator)에 정현파 또는 펄스형 구형파의 교번전압을 공급하여 일정한 스트로크로 왕복구동을 하는 것이 선형 모터이다. 그 중에서도 보이스코일형 LOA라 불리는 가동코일형 리니어 모터는 영구자석으로 이루어지는 계자와 보빈에 코일을 감은 가동체로 구성되며, 선형성과 정밀 제어성 등에서 특별히 우수한 장점을 갖는 액추에이터이다. 그러나 지금까지는 영구자석재료로 페라이트, 사마륨코발트 등이 사용되었기 때문에 소형 시스템으로만 응용 개발이 되어 왔으나, 최근 잔류 자속밀도가 1.0 테슬라(Tesla) 이상의 합금재료인 NdFeB가 개발됨에 따라 고밀도 영구자석을 이용한 고출력 대형 시스템의 제작이 가능해졌다.

따라서 본 연구는 유압식 구동시스템에 비해, 구조가 간단하고 부품수가 적어 경제적이며 유지 보수 측면에서 유리한 장점을 갖는 전자기력형 액추에이터를 사용한 리니어 모터 댐퍼를 동흡진기로 사용하였다. 즉 액추에이터는 NdFeB의 영구자석 계자와 SUS 보빈에 감겨진 코일로 이루어지는데 가동자는 철심과 자석으로 그 자체가 1500kg의 능동질량으로 0.5Hz로 왕복 운동시킨다. 따라서 가동자를 1500kg으로 설계하고 실험과 해석을 통해 제어정수를 산정하고 시스템이 성능을 파악하고자 동특성 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 리니어 모터 댐퍼를 구동할 수 있는 저주파수 인버터를 사용하였다. 선형모터를 이용한 리니어 모터 댐퍼는 원리상 하이브리드 질량댐퍼(hybrid mass damper)이며, 전류가 공급되지 않는 상태에

서 수동형 질량댐퍼인 동조 질량댐퍼의 역할을 한다. Fig. 5는 구조물의 제어를 위해 사용된 동흡진기를 나타내며, Fig. 6은 입력 전압에 따른 전압, 전류 및 변위의 동특성을 보여준다. 입력전압이 90V인 경우 가동자는 스토퍼에 부딪치지 않고 왕복운동을 하였다. 그리고 스프링에 의해 운동에너지가 저장되므로 공진이 발생하여 전류는 0에 가깝게 줄어들을 알 수 있다.

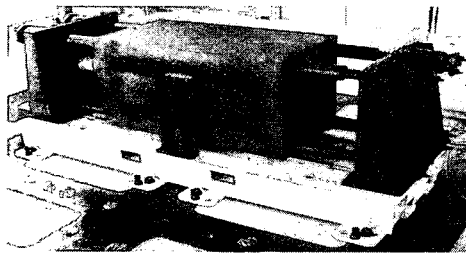


Fig. 5 Dynamic vibration absorber

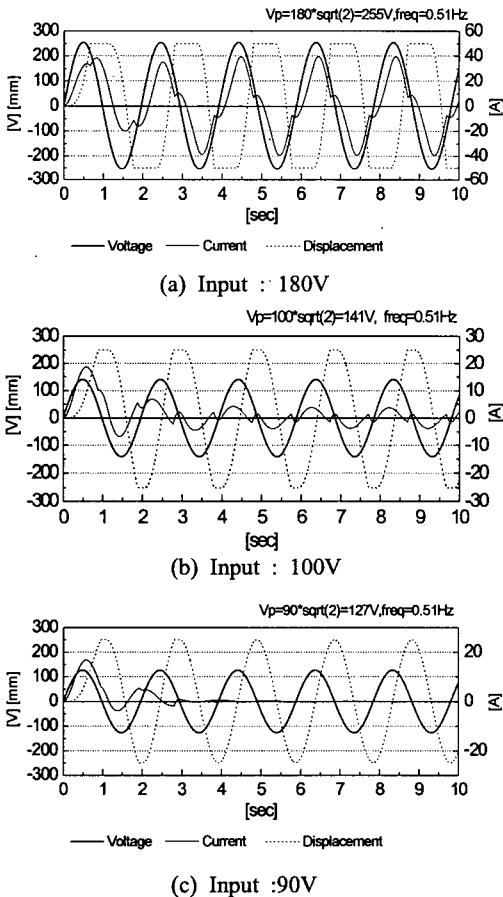


Fig. 6 Dynamic properties of DVA by input voltage

3. 구조물의 진동제어

3.1 H_2 강건제어

일반적인 제어문제, 특히 외력 제거문제 (disturbance rejection problem)는 외력 w 가 존재할 때 목적변수 z 를 최소로 유지하는 제어기를 구성하는데 있다. 따라서 외력 제거문제에 있어서 성능은 w 와 z 사이의 페루프 전달함수 $T_{zw}(s)$ 의 크기에 관련되게 된다. 이것은 추종에러(tracking error)를 최소화하기 위한 제어문제에도 마찬가지로이다. 다시 한번 정리하면 외력 w 가 목적변수 z 에 미치는 영향을 나타내는 페루프 전달함수 $T_{zw}(s)$ 의 크기를 최소화하는 제어기를 구성하는 것이 목표이다. 여기서 전달함수 $T_{zw}(s)$ 는 전달함수 행렬이므로 그 크기를 나타내는 데 적절한 방법이 필요한데, 통상적으로 물리적 의미를 가지고 있는 H_2 (LQG) 놈(norm)을 사용한다.

H_2 (LQG) 놈을 살펴보면, 선형 시불변 시스템의 전달함수를 다음과 같이 정의한다.

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B \tag{1}$$

시스템 $G(s)$ 의 크기를 결정하기 위해 적절한 놈을 정의해야 한다. 놈은 복합 s 평면내의 모든 점에 대해서 $G(s)$ 크기를 대표할 수 있는 상수값 (scalar)이 되어야 한다. 행렬 A 의 크기를 정의하기 위한 방법 중 하나로 최대 특이값을 놈으로 정의할 수 있으며 H_2 놈은 다음과 같다.⁽⁷⁾

$$\begin{aligned} \|G\|_2 &= \left(\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \text{trace} [G(j\omega) G^*(j\omega)] d\omega \right)^{\frac{1}{2}} \\ &= \left(\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 [G(j\omega)] d\omega \right)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \tag{2}$$

H_2 놈은 물리적으로 중요한 의미를 지니는데, 만일 $G(s)$ 가 독립적이고 평균값이 0이며 그 강도(intensity)가 1인 백색잡음에 의한 전달함수라면 출력 y 의 분산값이 전달함수 $G(s)$ 의 H_2 놈의 제곱과 일치하게 되며 이는 다음 식과 같다.

$$E [y^T(t) y(t)] = \|G(s)\|_2^2 \tag{3}$$

즉, H_2 놈은 출력 신호의 RMS값에 해당함을

알 수 있다. 통계적 시스템에 있어 출력의 평균 값은 적절한 Lyapunov 방정식을 풀어서 구할 수 있으며 상태공간에서의 H_2 norms 식 (4), (5)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} AL_c + L_c A^T + BB^T &= 0 \\ A^T L_0 + L_0 A + C^T C &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \|G\|_2 &= [\text{trace}(CL_c C^T)]^{\frac{1}{2}} \\ &= [\text{trace}(B^T L_0 B)]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 L_c 는 (A, B) 의 Controllability Gramian 이고 L_0 는 (A, C) 의 Observability Gramian 이다.

결국 LQG 제어기 설계는 H_2 norms 을 최소화하는 제어기를 설계하는 문제로 귀결된다.

3.2 구조물의 모델링

실제 구조물을 n 개의 자유도를 가지는 집중질량으로 모델링 하였을 때에, 실제 제어기의 설계 시에는 n 개의 진동모드의 수만큼 큰 차원을 갖는 모델을 사용할 수는 없다. 즉 제어 대상 구조물의 차수 축소의 필요성이 대두된다. 이 때 사용되는 가장 일반적인 방법은 가장 쉽게 가진되는 구조물의 저차 모드만을 고려하고 그 이상의 모드는 절단해 버리는 것이다. 구조물은 5자유도의 집중 질량으로 모델링 되었으며, 제어기 설계를 위해 2자유도 모델로 축소하였다. 즉, 구조물의 1, 2차 진동 모드를 제어하도록 제어기를 설계할 경우를 위해서 정리하였으며 본 연구에서는 1차 모드만을 제어하도록 설계하였다.

모델이 물리적 의미를 가지도록 LMD가 설치된 5층과 3층에 각각 집중질량을 가지는 2자유도 모델로 축소하였으며 구조물의 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$M_r \ddot{x}_r(t) + C_r \dot{x}_r(t) + K_r x_r(t) = f_r F_d(t) \quad (6)$$

여기서, $x_r(t) = [x_3 \ x_5]^T$ 은 지반에 대한 3층과 5층의 상대 변위를 나타낸다.

전체 모델과 축소된 모델을 주파수 영역에서 비교해 보면 Fig. 7과 같으며 이는 3층에서의 외력 입력에 대한 5층에서의 가속도 응답의 전달함

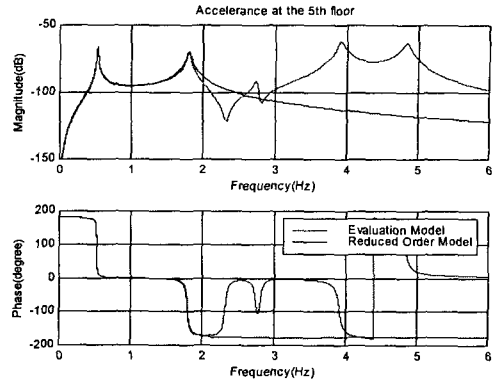


Fig. 7 Transfer function of reduced 2DOF model

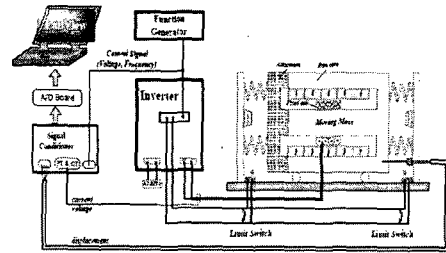


Fig. 8 Schematic diagram of DVA

수를 보여주고 있는데, 축소된 모형의 응답전달 함수가 원래의 모델 2차 모드까지 특성을 잘 묘사하고 있음을 알 수 있다.

3.3 DVA의 수치 모형화

능동형 제진장치인 DVA는 코일에 전류를 입력하면 자기장 내에서 생기는 힘을 이용하여 가동 질량을 움직이도록 설계되어 있다. 가동질량은 1500kg, 최대 ± 250 mm의 변위를 가지며, 구조물의 1차 고유주파수인 0.51Hz에서 최대 5.3kN의 제어력을 낼 수 있다. DVA는 구조물의 5층에 설치되어 있으며 전기회로는 아래 Fig. 8과 같다.

DVA의 운동방정식은 기계적인 운동방정식, 코일의 전압 방정식 및 인버터의 방정식으로 구성된다. DVA의 기계적 운동방정식은 다음과 같다.

$$m_d \ddot{x}_d = k_T i - k_d x_d - c_d \dot{x}_d \quad (7)$$

여기서, m_d 는 가동질량, k_T 는 추력상수, k_d 는

강성계수, c_d 는 마찰계수, x_d 는 가동질량의 변위이다. 코일의 전압방정식은 다음과 같다.

$$V_c = R_c i + L \frac{di}{dt} + k_E \dot{x}_d \quad (8)$$

여기서 V_c 는 인버터를 통해 코일에 공급되는 전압, R_c 는 코일 저항, L 은 코일 인덕턴스, k_E 는 유기기전력 상수, \dot{x}_d 는 가동질량의 속도이다.

제어 입력 전압과 인버터를 통해 코일에 공급되는 전압은 다음의 식과 같다.

$$V_c = G_i V_{in} \quad (9)$$

여기서 V_{in} 은 제어 입력 전압, G_i 는 인버터를 통해 증폭되는 전압 증폭 계인이다. 식 (7), (8), (9)를 식 (10)의 상태방정식으로 표현할 수 있다.

$$\dot{X} = AX + BV_{in} \quad (10)$$

여기서,

$$X = \begin{bmatrix} x_d \\ \dot{x}_d \\ i \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{k_d}{m_d} & -\frac{c_d}{m_d} & \frac{k_T}{m_d} \\ 0 & -\frac{k_E}{L} & -\frac{R_c}{L} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{G_i}{L} \end{bmatrix}$$

출력을 DVA의 변위로 두면 출력방정식은 다음의 식과 같이 표현된다.

$$y = CX + DV_{in} \quad (11)$$

여기서 $C = [1 \ 0 \ 0]$, $D = [0]$ 이다.

Fig. 9에서 식 (9)와 (10)으로 계산된 제어 입력 전압에 대한 DVA의 변위에 대한 주파수 응답과 실험 결과와 비교하였으며, 대체로 잘 일치함을 확인할 수 있다. 제어 입력 전압이 1.5V일 때 약 0.60Hz에서 피크가 발생하며, 이 때 제어 입력 전압과 변위 사이에 180도의 위상차가 발생한다.

축소된 모델 식 (6)과 LMD 모델의 상태방정식 식 (10) 및 (11)을 결합하면 다음과 같이 표현되며, $X_r = \{x_3 \ x_5 \ x_d \ \dot{x}_3 \ \dot{x}_5 \ \dot{x}_d \ i\}^T$ 이다.

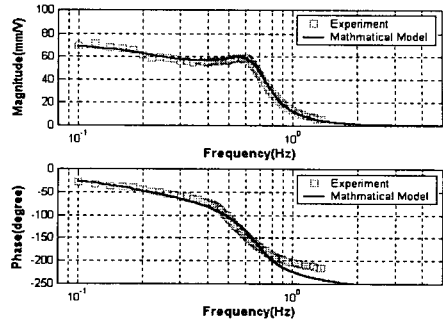


Fig. 9 Comparison of displacement frequency responses of DVA

$$\dot{X}_r(t) = A_r X_r(t) + B_r V_{in}(t) + E_r F_d(t) \quad (12)$$

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

전체 플랜트의 상태 방정식은 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + B_u u(t) + B_w w(t) \\ y(t) &= C_m x(t) + Du(t) + v(t) \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 $y(t)$ 는 측정되는 물리량을 뜻한다.

LQG 제어의 성능지수(performance index)는 출력항과 제어입력항의 제곱에 비례하며 다음 식과 같이 표현된다.⁽⁸⁾

$$\begin{aligned} J(x(t), u(t)) &= E \left[\frac{1}{2} y^T(t_f) H_y y(t_f) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \int_0^{t_f} \{y^T(t) Q_y y(t) + u^T(t) R u(t)\} dt \right] \end{aligned} \quad (14)$$

제어신호는 칼만 필터에 의해 생성된 상태 추정값과 게인 행렬 $K_c(t)$ 를 곱한 값으로서 식 (15)와 같다.

$$u(t) = -K_c(t) \hat{x}(t) \quad (15)$$

LQG 제어기 설계는 성능지수 J 를 최소화하는 게인 행렬을 구하는 것으로 귀결된다.

3.4 관측기(Observer)

측정한 시스템의 상태 및 제어입력으로부터 모든 상태를 추정하는 칼만 필터의 상태모델은 다음의 식 (16)과 같이 표현되며, 최적 제어기의 상태모델은 식 (17)과 같이 표현된다.

$$\hat{\dot{x}}(t) = A\hat{x}(t) + B_u u(t) + G_k(t)[y(t) - C_m \hat{x}(t)] \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \hat{\dot{x}}(t) &= [A - G_k(t)C_m - B_u K_c(t)]\hat{x}(t) + G_k(t)y(t) \\ u(t) &= -K_c(t)\hat{x}(t) \end{aligned} \quad (17)$$

상태케환 이득 $K_c(t)$ 는 다음의 Riccati 방정식을 풀어서 구할 수 있다.⁽⁹⁾

$$\begin{aligned} \dot{P}(t) &= -P(t)A - A^T P(t) - Q + P(t)B_u R^{-1} B_u^T P(t) \\ K_c(t) &= R^{-1} B_u^T P(t) \end{aligned} \quad (18)$$

칼만 필터 게인 G_k 는 다음 식으로 표현된다.

$$G_k = \Sigma_e C_m^T S_v^{-1} = \begin{bmatrix} -15.6 \\ -247.5 \end{bmatrix} \quad (19)$$

여기서 Σ_e 는 상관행렬을 나타낸다.

Fig. 10은 비제어시(제어 게인 $K_c=0$), 칼만 필터를 이용한 추정 상태값과 실제 상태값을 시뮬레이션하기 위한 B/D이며, Fig. 11은 두 값의 시간응답을 비교한 결과이다.

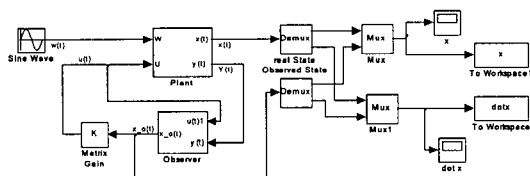


Fig. 10 Block diagram of system for simulation

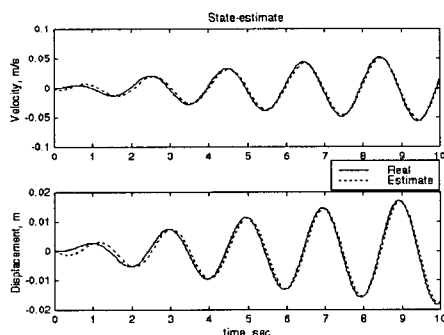


Fig. 11 Estimation of state vector of system with Kalman filter (no control)

3.5 제어기 이득

상태 피드백 제어기의 이득(K_c)는 상태방정식 (11)과 칼만 필터 식 (16)과의 관계를 정리하여 식 (20)처럼 계산된다. 응답 가중치 행렬 Q , R 은 식 (21)과 같이 결정하였다.

$$\begin{aligned} K_c(t) &= -R^{-1} B_u^T P \\ &= [-9570 \quad 151233.2] \end{aligned} \quad (20)$$

$$Q = \begin{bmatrix} 10000 & 0 \\ 0 & 400 \end{bmatrix}, \quad R = 1.0e^{-6} \quad (21)$$

Fig. 12는 LQG 제어 시 시스템의 응답을 시뮬레이션 한 결과이다. 비제어시와 마찬가지로 0.5Hz의 정상파 가진을 입력으로 주었다. Fig. 10의 비제어시 결과와 비교하였을 때, 속도 응답의 최대값이 0.0522m/s에서 0.0141m/s로 감소하였으며 변위 응답 역시 0.0171m에서 0.0044m로 약 1/4 수준으로 감소함을 알 수 있다.

Kalman 필터 작동 시 아래 식과 같이 측정된 출력에서 추정된 출력을 뺀 잉여 (residual) 또는 이노베이션(innovation)이 나타나게 된다.

$$v(t) \cong y(t) - \hat{y}(t) = y(t) - C_m \hat{x}(t) \quad (22)$$

이노베이션은 측정된 출력 $y(t)$ 에서 추정된 출력 $\hat{y}(t)$ 를 뺀 값으로서, 상태벡터 $x(t)$ 와 상태추정벡터 $\hat{x}(t)$ 사이에 추정오차를 발생시키기 때문에 추정성능이 저감된다.

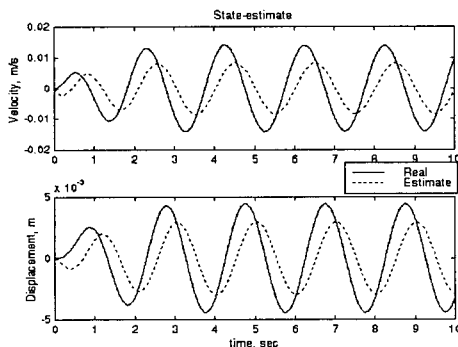
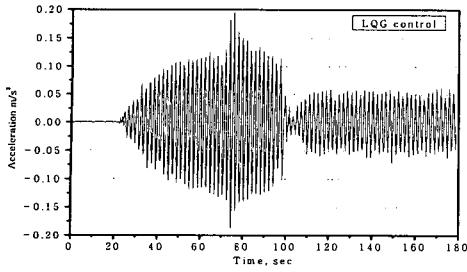
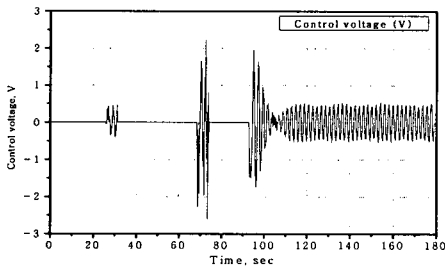


Fig. 12 Estimation of state vector of system with Kalman filter (control on)

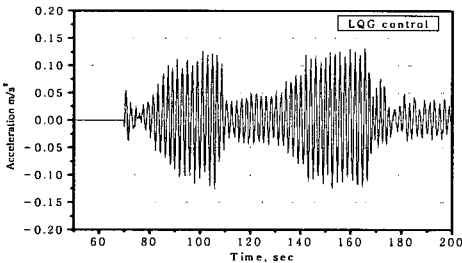


(a) Acceleration at 5th floor

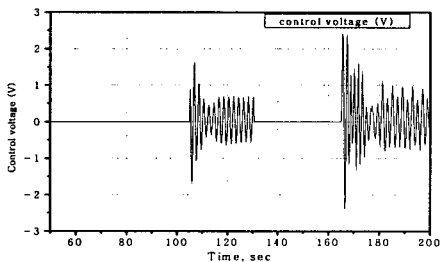


(b) Control input voltage

Fig. 13 Control response (input:5V)



(a) Response at 5th floor



(b) Control input voltage

Fig. 14 Control response (input:8V)

4. 결과 및 고찰

동흡기를 이용한 구조물의 진동제어 성능을 관찰하기 위한 실험 조건은 다음과 같다. 구조물 4층에 설치한 가진기를 이용하여 구조물의 고유진동수인 0.5Hz로 가진하여 구조물에 공진이 발생한 상태에서 5층에 설치된 동흡진기에 제어입력을 공급하여 LQG 제어를 수행한 후 구조물의 5층에 설치된 가속도계를 통해 얻는 가속도 값과 제어를 위해 공급된 제어입력의 시간응답을 측정하였다. 제어 시 제어기의 성능은 가진된 상태에서 제어입력이 공급된 후 정상상태에 도달하는데 걸리는 시간을 통하여 결정되며 그 시간이 짧을수록 감쇠가 크다고 할 수 있다. 실험을 통해 얻은 구조물의 Damping ratio는 0.0198이었다. 또한, 가진 상태에서의 가속도 피크 값과 제어기가 작동된 다음의 정상상태에서의 가속도 피크 값을 비교하여 제어기의 성능을 파악할 수 있다.

Fig.13은 제어입력 전압을 5V로 제한하였을 때의 가속도 시간응답을 나타낸 것이다. 구조물 공진시 가속도는 LQG 제어를 수행 후 0.19m/s²에서 0.06m/s²으로(정상상태) 감소되었으며, 정상상태에 도달하기까지 걸리는 시간은 약 25초였다.

Fig. 14는 동일 조건으로 가진 시 제어입력 전압을 8V로 변화시킨 경우의 제어응답을 나타내 것으로 제어기에 의해 정상상태에 도달 한 뒤 비 제어 상태로 다시 가진 한 후의 제어기의 제어 성능을 조사하였다. 제어입력의 공급과 차단을 반복하여도 구조물이 안정적으로 제어됨을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 리니어 모터 댐퍼(LMD) 형태의 동흡진기를 이용하여 유연구조물의 강건제어를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

동조 질량댐퍼의 기능과 능동질량댐퍼의 기능을 동시에 수행할 수 있는 하이브리드 질량 댐퍼는 초고층 구조물 진동제어용 액추에이터로 사용하기에 용이한 구조임을 확인하였다.

유연 구조물의 제어를 위하여 LQG 제어 알고리즘을 이용하여 강건제어기를 설계하였으며, 액추에이터인 하이브리드 질량 댐퍼에 적용하였다. 이론 해석과 실험적 검증을 통하여 설계된 제어기의 성능이 강건함을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Patten, W.N., He, Q. Kuo, C.C., Liu, L. and Sack, R.L., 1994, "Suppression of Vehicle-Induced Bridge Vibration via a Semiactive Structural Controller," *Proc. 1st World Conf. on Struct. Control*, Los Angeles, California, pp. FA1:30~38.
- (2) Akbay, Z. and Aktan, H.M., 1990, "Intelligent Energy Dissipation Devices," *Proc. 4th U.S. Nat. Conf. on Earthquake Engrg.*, Vol. 3, pp. 427~435.
- (3) Feng, M. Q., Shinozuka, M. and Fujii, S., 1993, "Friction-Controllable Sliding Isolation System," *J. Engrg. Mech., ASCE*, Vol. 119, pp. 1845~1864.
- (4) Roberson, R.E., 1952, "Synthesis of a Non-linear Dynamic Vibration Absorber," *Journal of Franklin Inst.*, Vol. 254, pp. 205~220.
- (5) Warburton, G.B. and Ayorinde, E.O., 1980, "Optimum Absorber Parameters for Simple Systems," *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol. 8, pp. 197~217.
- (6) Venkayya, V.B. and Tischler, V.A., 1984, "Frequency Control and Its Effect on the Dynamic Response of Flexible Structures," *AIAA Journal*, Vol. 23, No. 11, pp. 1768~1774.
- (7) Doyle, J.C., Glover, K., Khargovekar, P.P. and Francis, B.A., 1999, "State-space Solutions to Standard H_2 and H_∞ Control Problems," *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. 34, No. 8, pp. 831~847.
- (8) Calise, A.J. and Kramer, F.S., 1983, "A Variable Structure Approach to Robust Control of VTOL Aircraft," *J. Guidance*, Vol. 7, pp. 620~626.
- (9) Zhou, K. and Doyle, J.C., 1998, *Essentials of Robust Control*, Prentice-Hall.