

4층 층상 구조물에 대한 강인한 진동 제어 시스템 설계 A Design of Robust Vibration Control System for a Four-story Shear Structure

양주호 · 정황훈 · 정해종

J. H. Yang, H. H. Jeong and H. J. Jeong

Key Words : Vibration Control(진동제어), H_{∞} Control Theory(H_{∞} 제어이론), Four story Shear Structure(4층 층상 구조물), Robust Controller(강인한 제어기)

Abstract : This paper introduces basic study how to restrain the vibration of a four story shear structure. We have modeled a four story shear structure mathematically and have identified each parameters by experiment. We have gotten a reduced nominal model through modal analyzing method and the H_{∞} control theory is used in the control system design to get the robust controller. It's shown that the desirable performances is confirmed through the mathematical simulation. And a designed controller applying the H_{∞} control theory shows the good performance for the impulse disturbance through the simulation results. That is, the robustness of this control system is confirmed for the ability of disturbance rejection and modeling error.

1. 서 론

현대 과학 기술의 발달로 인해 현대 건물이나 교량 등은 고층화, 대형화되고 있으며, 건물에 사용되어지는 재료의 경우 예전에 비해 유연 경량화 되어 가는 추세를 보이고 있다. 따라서 이러한 구조물들은 예전의 소형 또는 저층 구조물에 비하여 대단히 많은 외력을 받고 있으며, 외력에 의해 발생하는 진동으로 인해 구조물의 피로 누적 증가 및 구조물 내부 손상을 가져오게 한다. 또한 환태평양 화산지대에 가까운 한반도의 경우, 매년 발생하는 지진에 의해 구조물의 피로가 증가되고 있는 실정이다¹⁾. 이러한 지진이나 바람과 같은 자연에 의해 발생하는 구조물 외력에 대하여 건물의 안전성을 유지하고 보다 안락한 주거공간을 만들기 위해 구조물에 대한 진동문제는 반드시 고려되어야 한다.

구조물의 진동을 억제하는 기법으로는 동흡진기 등을 이용한 수동적인 방법과 제어 기법을 도입한 능동적인 기법이 있는데, 근래의 연구 동향은 수동

적인 제진 장치에 의한 연구를 벗어나 현대 제어 이론 등 다양한 제어 이론을 적용한 능동적인 진동 제어에 초점을 맞추고 있고, 특히 지진대에 위치한 국가들에서는 토목 구조물이나 플랜트 등의 대형 구조물에 대해서 설계 단계부터 시공과정은 물론 준공되어 구조물의 수명이 다할 때까지 진동으로 인해서 발생하는 안전 문제를 고려한 능동적인 진동 제어에 관한 연구가 활발히 수행되고 있다²⁻³⁾. 그러나 국내의 경우, 대형 구조물이나 교량의 주탑 등에 대해 능동제어기에 의한 제진 연구는 타국에 비해 활발하지 못한 상태에 있다.

본 연구에서는 4층 층상 구조물로 근사화된 다층 층상 구조물의 능동적 진동제어를 목적으로 하고 있다. 먼저 이 구조물에 대한 수학적 모델링을 구하고, 구해진 운동방정식의 각 파라미터들을 추정하기 위하여 실험 데이터로부터 고유진동수와 감쇠비를 구한 후 강성계수와 감쇠계수를 동정하였다. 물론 구해진 파라미터들은 실험과 시뮬레이션을 통해서 정확성을 확인한다.

이러한 운동 방정식으로부터 모드 해석 기법을 이용하여 고차 모드(3차, 4차)를 제거한 공칭 모델을 구하고, 주어진 공칭 모델을 실험 대상으로 하여 H_{∞} 제어 이론을 이용한 강인한 제어기를 설계하고, 실험장치의 플랜트에 대해서 강인한 제어를 구현하기 위하여 먼저 시뮬레이션을 통하여 외란

접수일: 2002년 7월 26일
양주호(책임저자) : 부경대학교 기계공학부
E-mail : jhyang@pknu.ac.kr Tel. 051-620-1580
정황훈 : 부경대학교 기계공학부
정해종 : 한국해양수산연수원

억제 기능과 공칭모델의 오차에 대한 강인성을 검증한다.

2. 실험장치의 구성 및 수학적 모델링

2.1 다층층상구조물의 모델링

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 4자유도 층상 구조물을 설계 제작하였다. 이 장치는 구조물의 외곽 지지대 및 4층판(plate), 제진 장치, 가진 장치 등 크게 3 가지 부분으로 이루어져 있다.

외곽 지지대는 가진기 모터로 4자유도 층상 구조물을 가진 시킬 때 구조물을 지지하기 위한 것으로서, 가진 지지대 자체의 진동을 무시할 수 있을 정도로 강성이 큰 4개의 H 형강으로 제작하였다. 각 기둥은 바닥에 4개의 아이볼트로 각각 고정시켰으며, 각층(1st~4th plate)은 구조용 압연강재를 절단하여 제작하였고, 각층에 연결된 각각의 4 개의 스프링은 탄소공구강 강재 5종의 판스프링을 부착하였다.

변위는 레이저 변위 센서를 설치하여 측정하였으며, 제진 장치는 제어조건에 따라 조정 가능하도록 제작하였다.

이 연구에서 사용한 Actuator의 구동 질량체는 2.5 [kg]으로 선정하였고, 제진을 위한 액추에이터는 90 [W] 급의 소형 DC 서보모터를 이용하였다. 제진 질량체와 서보모터는 타이밍 벨트로 연결하였으며, 제진 질량체는 가이드 라인을 따라 좌우로 움직이도록 제작하였다.

Fig. 1에 표시된 4자유도 구조물은 Fig. 2와 같이 등가적으로 표현 할 수 있고, 이와 같이 표현된 시스템의 운동방정식은 다음과 같이 들 수 있다.

$$m_1\ddot{x}_1 + c_1\dot{x}_1 + c_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1x_1 + k_2(x_1 - x_2) = -m_1\ddot{d} \quad (1)$$

$$m_2\ddot{x}_2 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + c_3(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + k_2(x_2 - x_1) + k_3(x_2 - x_3) = -m_2\ddot{d} \quad (2)$$

$$m_3\ddot{x}_3 + c_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) + c_4(\dot{x}_3 - \dot{x}_4) + k_3(x_3 - x_2) + k_4(x_3 - x_4) = -m_3\ddot{d} \quad (3)$$

$$m_4\ddot{x}_4 + c_4(\dot{x}_4 - \dot{x}_3) + k_4(x_4 - x_3) = -m_4\ddot{d} + f \quad (4)$$

단, m_i, c_i, k_i ($i=1, \dots, 4$)는 각각 질량, 감쇠 및 강성 계수를 나타내고 있으며, x_1, x_2, x_3, x_4 는 Fig. 2에서의 외곽 프레임(frame)을 기준(Fig. 1에서의 가진 플레이트 기준)으로 한 상

대 변위이고, f 는 제진력이고 이것은 $k_v u$ 로 들 수 있다. u 는 제어 입력으로 제진용 모터에 가해지는 입력 전압이고, k_v 은 모터 상수이다⁶⁾.

식 (1)~(4)를 행렬을 이용하여 하나의 식으로 나타내면, 식 (5)과 같이 된다.

$$M_f\ddot{x}_f + C_f\dot{x}_f + K_f x_f = H_f\ddot{d} + F_f u \quad (5)$$

여기서,

$$M_f = \text{diag} [m_1 \ m_2 \ m_3 \ m_4]$$

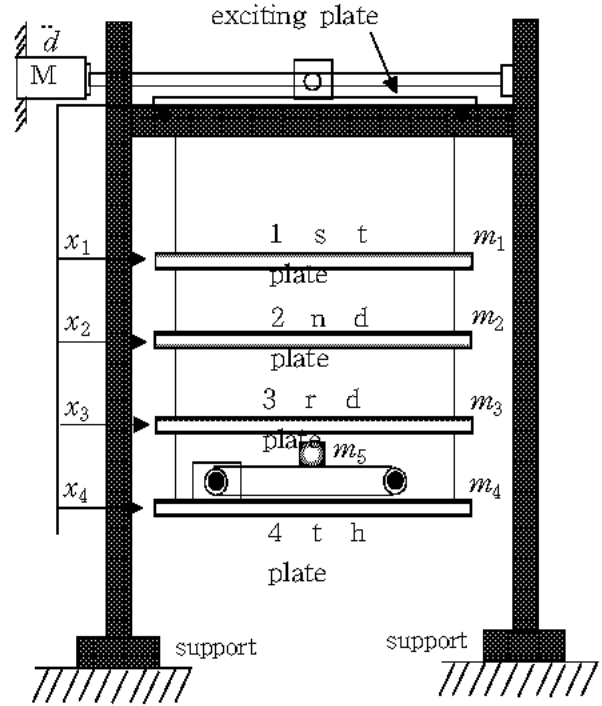


Fig. 1 Schematic diagram of a fourstory shear structure

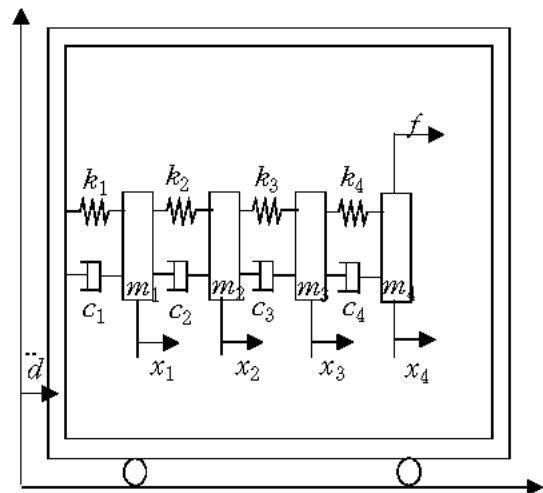


Fig. 2 Analytical model

$$C_f = \begin{bmatrix} (c_1 + c_2) & -c_2 & 0 & 0 \\ c_2 & (c_2 + c_3) & -c_3 & 0 \\ 0 & c_3 & (c_3 + c_4) & -c_4 \\ 0 & 0 & -c_4 & c_4 \end{bmatrix}$$

$$K_f = \begin{bmatrix} (k_1 + k_2) & -k_2 & 0 & 0 \\ -k_2 & (k_2 + k_3) & -k_3 & 0 \\ 0 & -k_3 & (k_3 + k_4) & -k_4 \\ 0 & 0 & -k_4 & k_4 \end{bmatrix}$$

$$H_f = [-m_1 \quad -m_2 \quad -m_3 \quad -m_4]^T$$

$$F_f = [0 \quad 0 \quad 0 \quad k_4]^T$$

$$\mathbf{x}_f = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4]^T$$

이다.

시스템의 동특성을 검토하기 위해서 외부로부터 들어오는 외란 $\ddot{\mathbf{d}}=0$ 이라 두면, 식 (5)는 식 (6)과 같이 나타내어진다.

$$M_f \ddot{\mathbf{x}}_f + C_f \dot{\mathbf{x}}_f + K_f \mathbf{x}_f = F_f u \quad (6)$$

x_4 를 출력이라 생각하고, 변수 x 에 대한 미분값들을 $\dot{x}_1 = x_5, \dot{x}_2 = x_6, \dot{x}_3 = x_7, \dot{x}_4 = x_8$ 라 두면, 식 (6)을 식 (7)과 같은 상태 공간으로 표현할 수 있다.

$$\dot{\mathbf{x}} = A_s \mathbf{x} + B_s u \quad (7)$$

$$y = C_s \mathbf{x}$$

여기서,

$$A_s = \begin{bmatrix} 0_{4 \times 4} & I_{4 \times 4} \\ -M_f^{-1} K_f & -M_f^{-1} C_f \end{bmatrix}$$

$$B_s = \begin{bmatrix} 0_{4 \times 1} \\ M_f^{-1} F_f \end{bmatrix}$$

$$C_s = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0] = [C_{y1 \times 4} : 0_{1 \times 4}]$$

$$C_y = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]$$

$$\mathbf{x} = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \quad x_5 \quad x_6 \quad x_7 \quad x_8]^T$$

이다.

Fig. 1과 같은 4차 모드를 갖는 시스템을 2차 모드로 저차원화하기 위해 모드 좌표변환을 한다.

$\Phi^T M \Phi = I$ 와 같은 성질을 가지는 정규 직교 고유벡터 Φ 를 구한다. 모드 좌표를 $\boldsymbol{\eta} = [\eta_1 \quad \eta_2 \quad \eta_3 \quad \eta_4]^T$ 로 정의하고 $\mathbf{x} = \Phi \boldsymbol{\eta}$ 라 두고, 식 (6)에 대입하여 정리하면 식 (8)과 같이 된다⁷⁻¹⁰.

$$\ddot{\boldsymbol{\eta}} + C_m \dot{\boldsymbol{\eta}} + K_m \boldsymbol{\eta} = F_m u \quad (8)$$

여기서,

$$C_m = \Phi^T C_f \Phi, K_m = \Phi^T K_f \Phi, F_m = \Phi^T F_f$$

이다.

1차와 2차 모드만으로 이루어진 모드 좌표변환에 의한 저차원화 모델의 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\ddot{\boldsymbol{\eta}}_r + C_r \dot{\boldsymbol{\eta}}_r + K_r \boldsymbol{\eta}_r = F_r u \quad (9)$$

여기서,

$$\boldsymbol{\eta}_r = [\ddot{\eta}_1 \quad \eta_2]^T, C_r = \text{diag} [C_{11} \quad C_{22}], K_r = \text{diag} [\omega_1^2 \quad \omega_2^2], F_r = [f_1 \quad f_2]^T$$

이다.

다시 정규 직교화된 고유벡터에서 1차와 2차 모드에 관련된 부분만을 모아서 임의의 고유벡터 Φ_r 이라고 두고 이에 대하여 모드 좌표 역변환을 하기 위하여 $\boldsymbol{\eta}_r = \Phi_r^{-1} \mathbf{x}_r$ 를 식 (9)에 대입한다.

$$\ddot{\mathbf{x}}_r + C_{rr} \dot{\mathbf{x}}_r + K_{rr} \mathbf{x}_r = F_{rr} u$$

여기서,

$$C_{rr} = \Phi_r C_r \Phi_r^{-1}, K_{rr} = \Phi_r K_r \Phi_r^{-1}, F_{rr} = \Phi_r F_r$$

이다.

이상과 같이 저차원화한 공칭 플랜트의 상태 공간 표현은 식 (10)과 같다.

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_r = A_n \mathbf{x}_r + B_n u \\ y = C_n \mathbf{x}_r \end{cases} \quad (10)$$

여기서,

$$A_n = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -K_{rr} & -C_{rr} \end{bmatrix}, B_n = \begin{bmatrix} 0 \\ F_{rr} \end{bmatrix}$$

$$C_n = [\Phi_y \quad 0], \Phi_y = C_y \Phi_r$$

$$\mathbf{x}_r = [x_{r1} \quad x_{r2} \quad x_{r3} \quad x_{r4}]^T$$

이다.

2.2 운동방정식에 사용된 각 파라미터의 추정

식 (5)에 포함되어 있는 파라미터 m_i, c_i, k_i 중 m_i 는 실측한 값을 이용하였으며, c_i 와 k_i 의 값들을 추정하기 위하여 다음과 같은 실험을 수행하였다^{4,5}.

c_1 과 k_1 의 값을 추정하기 위하여 $m_2 \sim m_4$ 제거한 후, m_1 을 일정한 거리로 잡아 당겼다가 순간적으로 놓았을 때 판이 자유 진동하는 것을 레이저 변위 센서로 변위를 계측하였다. 실험에서 자유진동의 피크치(peak point)들을 실측하여 식 (11)을 이용하여 대수감쇠율 δ 를 구하고, 그 값을 식 (12)에 대입하여 ζ (감쇠비)를 구한다.

구해진 감쇠비를 이용하여 식 (13)에서 ω_n (고유진동수)을 구한다. 구해진 감쇠비와 고유진동수를

식 (14)과 식 (15)에 대입함으로써 감쇠계수 c 와 강성계수 k 를 구할 수 있다.

$$\delta = \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (11)$$

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{((2\pi)^2 + \delta^2)}} \quad (12)$$

$$\omega_n = \frac{\omega_d}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (13)$$

(단, $\omega_d = \frac{2\pi}{\tau_d}$)

$$c = 2m\zeta\omega_n \quad (14)$$

$$k = m\omega_n^2 \quad (15)$$

여기서, h_1, h_2 는 변위, δ 는 대수감쇠율, ω_n 은 고유진동수, ζ 는 감쇠비, ω_d 는 감쇠고유진동수, c 는 감쇠계수, k 는 강성계수, τ_d 는 주기이다.

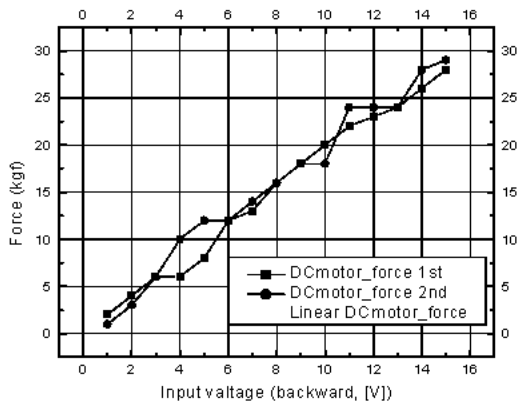


Fig. 4 Relation between voltage and force (backward)

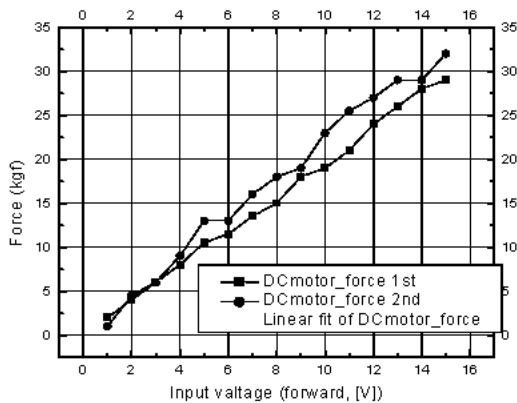


Fig. 5 Relation between voltage and force (forward)

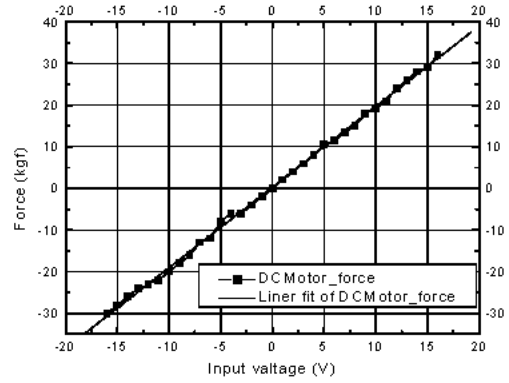


Fig. 6 Linear curve fitting between voltage and force

또한 c_2, k_2 의 값을 추정하기 위해서 1층판을 고정하고 하부에 2층 판을 설치하여 1층 판에서와 같은 방법으로 일정거리를 밀었다가 놓았을 때의 변위를 측정하여 구하였다.

c_3, k_3, c_4, k_4 도 위와 같은 방법으로 구하였다. 또한, 액추에이터로 사용되어진 모터의 토크상수를 실험에 의하여 구하였다. Fig. 4는 정방향 회전에서의 실험 결과이고, Fig. 5는 역방향 회전에서의 실험 결과이다.

Table 1 The estimated parameter values

parameter	value	Unit
Mass	m_1	150.3 kg
	m_2	150.3 kg
	m_3	150.3 kg
	m_4	116.5 kg
Stiffness coefficient	k_1	71550.80 N/m
	k_2	72427.43 N/m
	k_3	74512.40 N/m
	k_4	75513.83 N/m
Damping coefficient	c_1	54.09 N · s/m
	c_2	54.37 N · s/m
	c_3	56.11 N · s/m
	c_4	47.83 N · s/m
Motor torque constant	k_r	2.5 N · m/A

액추에이터의 정회전과 역회전에서 거의 비슷한 특성을 나타내며, Fig. 6은 입력 전압과 힘에 대한 선형 커브 피팅한 결과를 표시한 그림이다. 그 결과는 식 (16)과 같다.

$$\text{Force } 1.93282 \times \text{Voltage} + 0.28788 \quad (16)$$

식(16)과 모터의 저항(13.2Ω) 및 풀리(pulley) 직경(0.02m)의 관계로부터 구한 모터의 상수값과 이렇게 구하여진 각 층판의 파라미터 값들은 Table 1과 같다.

3. 제어기의 설계

주어진 공칭 플랜트에 대해 강인한(Robust) 안정성을 확보하기 위해 H_∞ 제어기법을 사용하여 제어기를 설계한다.

먼저 주어진 공칭 플랜트의 제어 목적을 외란을 억제하는 것으로 생각한다.

즉, 주어진 제어대상의 입력에 가해지는 외란 d_1 에 대한 출력 z_1 의 크기를 하중함수 W_S 을 사용하여 그 크기를 제한하는 것으로 한다. 이것은 작은 γ 의 값에 대해 식 (17)을 만족하는 제어기 K 을 구함으로써 달성될 수 있다.

$$\|W_S \frac{P_r}{1 - P_r K}\|_\infty < \gamma \quad (17)$$

여기서, W_S 는 외란 억제에 대한 하중 함수이다.

또한, 주어진 공칭 플랜트의 강인한 안정성을 확보하기 위해서 외란 억제 제어와 함께 d_1 에서 z_2 까지의 하중함수를 승법적 오차로 두어 평가하도록 한다.

추정된 승법적 오차 Δ_m 에 대해서 식 (18)을 만족하는 하중함수 W_T 를 구하여, d_1 에서 z_2 까지의 H_∞ Norm을 1미만으로 함으로써 강인한 안정성을 확보한다.

$$\|W_T \frac{P_r K}{1 - P_r K}\|_\infty < 1 \quad (18)$$

$$|\Delta_m(j\omega)| \leq |W_T(j\omega)|, \forall \omega \quad (19)$$

이상을 블록선도로 표시한 일반화 플랜트(General plant)는 Fig. 7과 같다.

Fig. 8에서 실선으로 표시된 부분은 실제 플랜트를, 점선으로 표시된 부분은 공칭 플랜트를 주파수 응답 선도로 나타낸 것이다.

Fig. 8에서 모드 변환을 통해 원래의 플랜트가 3차와 4차 모드가 소거된 1, 2차 모드 특성만을 가

지는 공칭 플랜트로 변환된 것을 알 수 있다. Fig. 8에서 보여지는 실제 플랜트와 공칭 플랜트의 오차는 저차원화로 생긴 모델링 오차로 생각한다.

실제 플랜트와 공칭 플랜트의 오차를 통해 승법적인 오차를 구하면 Fig. 9와 같이 나타낼 수 있다.

시행착오방법(Try and error method)에 의한 결과, 외란 억압 제어에 관한 하중함수 W_S 는 식 (20)으로 한다. 또한, W_T 는 일반적으로는 식 (19)를 만족하도록 Fig. 10으로부터 구해야 한다.

$$W_S = \frac{80(s+1000)}{s+10} \quad (20)$$

$$W_T = \frac{s^2 + 2.1s + 7^2}{s^2 + 18s + 30^2} \quad (21)$$

그러나 이 연구에서 선정된 W_T 는 Fig. 10에서와 같이 전주파수 영역에서 Δ_m 을 포함하지 않는 것으로 식 (19)에서 정의한 부분을 위배하는 형태를 보여주고 있다.

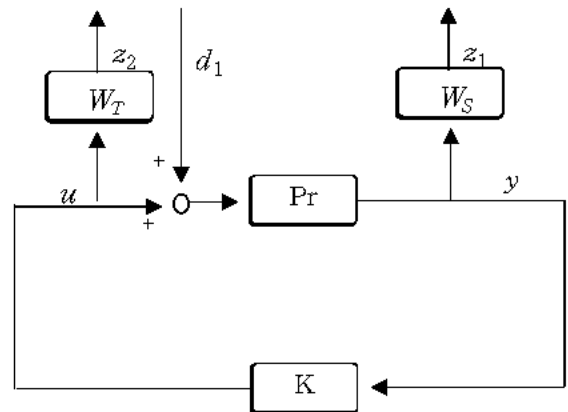


Fig. 7 General plant

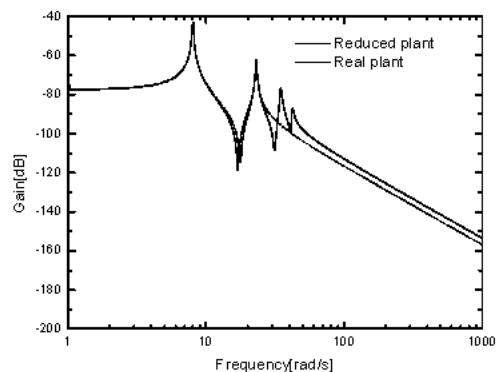


Fig. 8 Frequency response of the real plant and the reduced plant

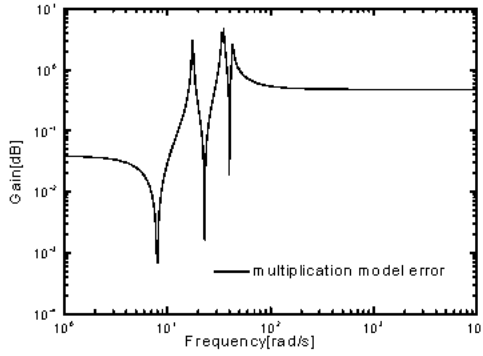


Fig. 9 Multiplication model error for frequency response

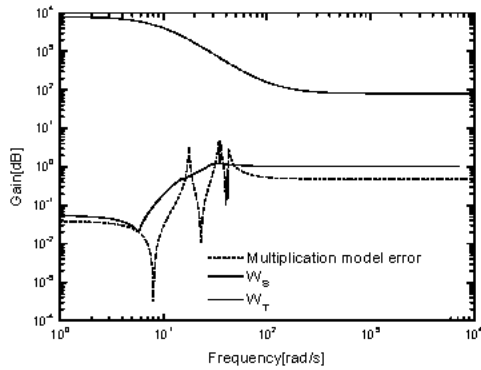


Fig. 10 The graph of W_S and W_T

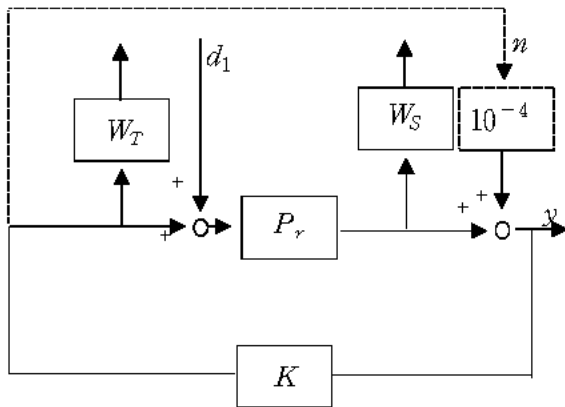


Fig. 11 Modified general plant

이러한 식 (21)의 선정은 식 (19)를 완전히 만족하는 하중 함수 W_T 를 사용하여 제어기를 설계하게 될 경우, 구해진 제어기에 의한 플랜트의 응답이 아주 보수적으로 되어 제어 성능을 저해할 수 있기 때문이다.

Fig. 7과 같이 구성된 일반화 플랜트에 대해 표준 H_∞ 제어기의 해를 구하고자 할 경우, 일반화 플랜트를 구성하는데 있어서 제어대상 P_r 의 직달항 즉, d_1 에서 y 까지의 직달항이 0이 되며, 이는 표준 H_∞ 제어 문제의 해의 존재에 관한 조건 A2을 만족하지 못한다⁵⁾.

따라서 관측 노이즈를 도입하여 d_1 에서 y 까지의 직달항을 미소값 10^{-4} 을 가지는 것으로 하여 표준 H_∞ 제어 문제의 해가 존재하도록 한다. 이와 같이 하여 Fig. 7의 일반화 플랜트로 수정한 블록선도는 Fig. 11과 같이 된다. 이렇게 하여 구해진 제어기 $K(s)$ 는 다음과 같다.

$$K(s) = \frac{N(s)}{D(s)}$$

여기서,

$$N(s) = a_1s^6 + a_2s^5 + a_3s^4 + a_4s^3 + a_5s^2 + a_6s + a_7$$

$$D(s) = s^7 + b_1s^6 + b_2s^5 + b_3s^4 + b_4s^3 + b_5s^2 + b_6s^1 + b_7$$

$$a_1 = 0.06309149947972 \times 10^5$$

$$a_2 = 0.35421608102158 \times 10^5$$

$$a_3 = 0.83572529294588 \times 10^5$$

$$a_4 = 1.06054828171614 \times 10^5$$

$$a_5 = 0.76349316330363 \times 10^5$$

$$a_6 = 0.29567575368100 \times 10^5$$

$$a_7 = 0.04813115027912 \times 10^5$$

$$b_1 = 5.98359736788466$$

$$b_2 = 15.42014616681656$$

$$b_3 = 22.18960201149886$$

$$b_4 = 19.26247256472841$$

$$b_5 = 10.09253242774331$$

$$b_6 = 2.95741334540083$$

$$b_7 = 0.37427604470957$$

이다.

여기서 얻어진 γ 값은 0.9375이다. 이 값은 1보다 작으므로 스몰 게인(small gain)의 정리에 의해 구해진 제어기에 의해 구성된 제어시스템은 안정하다는 것을 알 수 있다.

4. 응답결과 및 고찰

Fig. 12는 실험장치로 제작한 4층 층상구조물의 주파수 응답을 시뮬레이션한 결과이다. 이 응답 결과를 고찰해 보면 점선부분으로 표시된 부분은 제진을 하지 않을 때 주파수 응답이고, 실선으로 표시된 부분은 H_{∞} 제어기에 의하여 제진할 때의 주파수 응답이다.

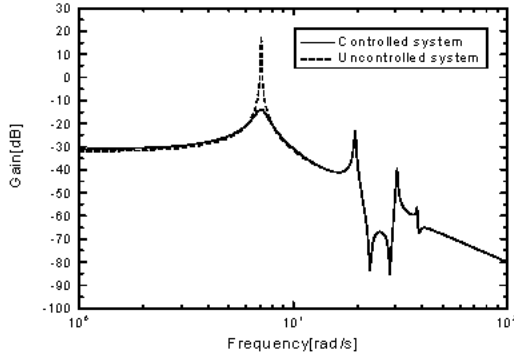
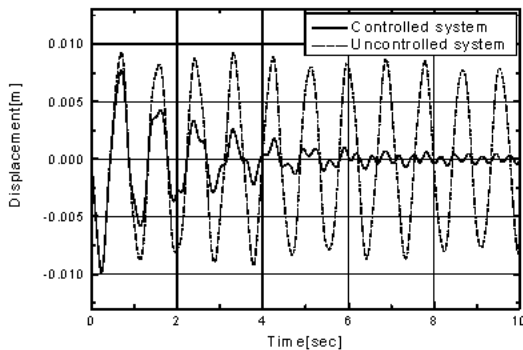
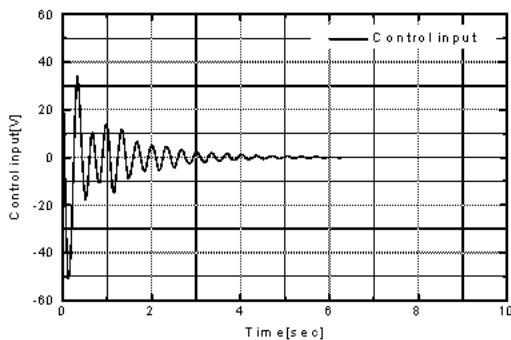


Fig. 12 Frequency response for impulse ($\ddot{d} \rightarrow y$)



(a) Time response



(b) Control input

Fig. 13 Time response for impulse ($\ddot{d} \rightarrow y$)

이 그림으로부터 알 수 있듯이 공칭모델의 1차 공진치는 약 7.07[rad/s]에서 약 17.9[dB]이고, 제어된 시스템의 1차 공진치는 13.9[dB]이다. 본 연구에서 설계된 제어기를 부착한 경우 페루프계의 주파수 응답이 1차, 2차, 3차 및 4차 공진치 모두가 약 10[dB]이하가 됨으로 제진을 할 경우 전주파수 대역에서 응답 특성이 설계사양에 만족함을 알 수 있다.

Fig. 13(a)는 공칭 플랜트에 정현파 \ddot{d} 외란이 들어 왔을 때의 변위 x_4 에 대한 응답 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 여기서, 점선은 제진을 하지 않을 때의 x_4 에 대한 응답결과이고, 실선은 제어시의 x_4 에 대한 응답결과이다.

Fig. 13(b)는 그 때의 제어입력을 나타낸 것이다. 이 결과로부터 설계된 제어기에 의한 제진 특성이 제진을 하지 않을 때에 비하여 양호함을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 4층 층상 구조물을 모드 좌표 변환을 통해 저차원화 모델을 구하고, 각 파라미터 값들을 실험으로 구하였다. 또한, 실제 사용된 액추에이터의 토크를 실험으로 구하여 모델링하였다.

구해진 공칭 모델에 대하여 H_{∞} 제어 이론을 적용하여 제어기를 설계하였고, 설계된 제어기를 이용하여 주파수 응답과 시간응답에 대한 시뮬레이션을 행하였다. 시뮬레이션 결과 설계된 제어기에 의한 다층 층상 구조물의 제진 특성이 제진을 하지 않을 때에 비하여 양호한 응답특성을 구할 수 있었다.

향후 이 연구에서 설계된 제어시스템을 DSP (Digital Signal Process)로써 실험장치에 적용하여 제진 특성을 실제로 검증하는 것이 과제로 남아 있다.

참 고 문 헌

1. 기상청, “기상청 홈페이지 Internet <http://www.kma.go.kr>”, 2002
2. 加賀谷 博昭, “ H_{∞} 制御による橋梁主塔の振動制御”, システム/制御/情報, Vol. 39, No. 6, pp. 282~285, 1995

3. 背戸一登 外 2名, “二次元アクティブマスダンパによる 塔状構造物の 振動制御”, 日本機械學會論文集, Vol. 54, No. 501, pp. 1084~1089, 1988
4. 정해중, “다층구조물의 진동제어에 관한 연구”, 박사 학위 논문, 부경대학교 대학원, pp. 11~37, pp. 49~75, 1998
5. 이기동, “다층구조물의 강인한 진동제어 시스템 설계”, 석사 학위 논문, 부경대학교 대학원, pp. 10~14, 2001
6. 野波健藏, “MATLABによる制御系設計”, 東京電氣大學出版局, pp. 103~139, 1999
7. 김광직, “기계진동학”, 보성문화사, pp. 78~87, 1996
8. 長松昭男, “モード解析”, 培風館, pp. 58~98, 1987
9. 반도 출판사, “기계진동공학”, pp. 302~321, 1991
10. S. S. Rao, “기계진동공학”, 반도출판사, pp. 302~321, 1991
11. 황우현, 안성모, “MATLAB을 이용한 제어시스템 설계”, 대광서림, pp. 523~547, 1977
12. 김종식, “선형제어 시스템공학”, 청문각, pp. 545~550, 1996