

H_{∞} 제어기법에 의한 다층 층상 구조물의 진동제어에 관한 연구

°정해중* · 김창화** · 변정환*** · 양주호****

A Study on Vibration Control of Multi-layer Structure

by H_{∞} Control

Hae-Jong Jeong*, Chang-Hwa Kim**, Jung-Hoan Byun***,
Joo-Ho Yang****

ABSTRACT

This paper is concerned with the vibration control of multi-layer structure for ultra-tall buildings and main tower of large bridge etc. We have modeled the multi-layer structure with the distributed mass system as the lumped mass system of two-degree-of-freedom structure and made experimental equipment.

The H_{∞} control theory is applied to the design of the control system. The designed control system is simulated by computer. As a result, the designed H_{∞} controller showed good vibration control performance to impact excitation and the good frequency response.

1. 서 론

최근에 신축되고 있는 빌딩, 교량 등의 구조물은 고층화, 대형화, 유연 경량화 경향을 보이고 있다. 이와같은 구조물은 바람, 지진 등에 의해 여기되는 진동으로 여러가지 문제가 발생되기 쉽기 때문에 이에 대한 대책이 강구되어야 한다. 특히 바람, 지진 등에 의한 진동에 대한 대책은 구조물의 변형 등의 안전성문제, 건축물의 수명감소 및 안락한 주거환경의 개선측면에서도 향후 고려되어야 할 사항이다.

선진국에서는 구조물의 건설단계에 있어서 건물 옥상에 동흡진기 등의 제진장치를 대부분 설치하고 있는 실정이며, 최근에는 대형 교량건설에 있어서도 진동제어 기술이 도입되고 있다.^{1)~6)}

한편 국내에서는 대형건물과 각종 교량의 붕괴사 고가 근래 많이 일어나고 있으며, 또한 최근 지

진과 기상이변이 자주 일어나서 고층건물과 교량의 내진설계 등 안전성에 대한 대책이 절실히 요구되고 있으나, 이러한 진동문제 및 제진대책에 관한 연구가 활발하지 못한 상태에 있다.

그러므로 본 연구에서는 향후 많이 건설될 초고층의 건물과 고가 교량 및 사장교(斜張橋) 등에 대한 보다 적극적인 진동문제 및 제진대책에 관한 기초연구로서 다층 층상 구조물을 2자유도 구조물로 단순 모델링하였다. 그리고 이 모델을 실험대상으로 하여 실험장치를 제작하고, 강풍 또는 지진과 같은 외란을 가하기 위한 가진장치를 DC 서보모터로 설계·제작하고, 아울러 능동적으로 진동을 제어하기 위하여 제진장치를 부착한다. 이와같이 설계·제작된 제어대상을 수학적으로 모델링한 후 실험에 의하여 파라미터를 구한다.

실험실 상에서 제진실험을 하기 위하여 제작한 본 실험장치는 실제 구조물의 고차모드가 생략되어 있어, 고주파 영역에서 모델의 불확실성이 크게 나타나게 된다. 이러한 불확실성에 대해 강인한 제어성능을 확보할 수 있는 제어기가 H_{∞} 제어기라는 것은 널리 알려져 있는 사실이다. 또한 저자 등

* 한국어업기술훈련소

** 경남전문대학

*** 부경대학교대학원

**** 부경대학교

에 의하여 기 발표된 LQ 제어기법에 의한 다층 층상 구조물의 진동제어⁷⁾는 1, 2차 모드를 어느 범위 내에서 제진 시키는 것은 가능하였으나, 그 이상으로 둔갑하게 하는 것은 LQ제어기의 구조상 불가능하였다.

따라서 본 연구에서는 루프전달함수의 감도조절 특성이 탁월한 H_∞ 제어기법을 이용하여 1, 2차 모드의 제진 뿐만 아니라, 무시된 고차모드의 불확실성에 대해서도 강인한 성능을 갖는 제어기를 설계하여 실제 구조물에 대해서도 바람직한 성능을 확보할 수 있게 한다.

2. 실험장치의 구성

일반적으로 다층 층상 구조물은 엄밀하게 보면 무한도의 자유도를 갖고 있지만, 제어계의 설계시에는 이산화된 다자유도로 취급하는 경우가 많으며, 특히 지진이나 풍하중의 경우는 저주파 대역에서 에너지를 가지므로 다자유도의 저차모드성분에 주목하여 저차원화 모델인 2자유도 구조물로 모델링하는 경우가 많다. 그러므로 본 연구에서는 실험대상을 Fig. 1과 같은 2자유도 층상 구조물로 제작하였으며, 그 제원은 Table 1과 같다.

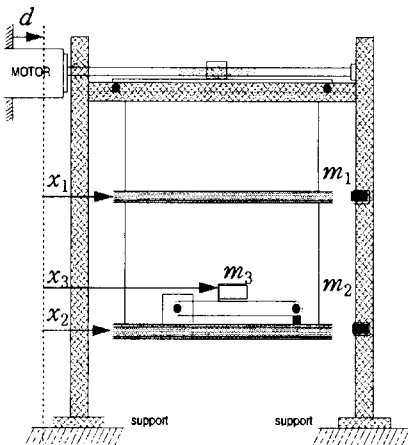


Fig. 1 Schematic diagram of two-degree-of-freedom structure

Fig. 1에서 지지대(support)는 4개의 H-형강으로 제작되었고, 가진기 모터로 2자유도 다층 층상 구조물을 가진 시킬 때에 구조물을 지지하기 위한 장치로서 가진시 지지대 자체의 진동을 무시할 수 있도록 바닥에 4개의 아이볼트로 고정시켰다. 그리고 상부의 가진기 모터는 대풍과 같은 강풍과 지

진 등에 의한 외란을 가하기 위한 것으로 0.4[Kw] 정격출력의 DC 서보모터를 사용하였다.

질량 m_1 , m_2 는 실험장치의 상판과 하판으로서 다층 층상 구조물을 집중계(lumped system)로 모의하여 철판을 절단하여 제작하였다. 그리고 상·하판부를 지지하는 최상판부와 상·하판 사이는 판스프링으로 연결하였다.

변위 x_1 , x_2 을 측정할 수 있도록 우측면에 레이저 센서를 설치하였으며, 다층 층상 구조물의 최상부에 해당되는 실험장치의 최하판부에 제진장치를 설치하였다.

질량 m_3 는 제진하기 위한 가반중량체로 제어조건에 따라 가반중량체를 조정가능하도록 취부부분을 제작하였다.

상·하부 각각의 4개 스프링은 탄소공구강 강재 5종의 판스프링으로 취부하였고, 제진을 하기 위한 액츄레이터는 60[W]급의 소형 DC 서보모터를 이용하였으며, 대차(Cart) 위의 질량 m_3 을 움직이기 위해서는 타이밍 벨트(Timing Belt)를 이용하였다.

Table 1 Specifications of experimental apparatus

Support	Specification	Height[mm]	Width[mm]	Length[mm]
	H-beam, 125×125	1,700	1,300	2,400
Mass, m_1	Specification	Thickness	Width[mm]	Length[mm]
	Steel Plate, ss41	20'	950	950
Mass, m_2	Specification	Thickness	Width[mm]	Length[mm]
	Steel Plate, ss41	15'	950	950
Mass, m_3	Specification	Thickness	Width[mm]	Length[mm]
	Steel Plate, ss41	30'	35	120
Spring	Specification	Thickness	Width[mm]	Length[mm]
	Flat Type, SK-5	3.5'	60	660

3. 대상 구조물의 모델링

3.1 수학적 모델링

Fig. 1에 표시된 2자유도 구조물의 모델은 Fig. 2와 같이 등가적으로 표현할 수 있다.

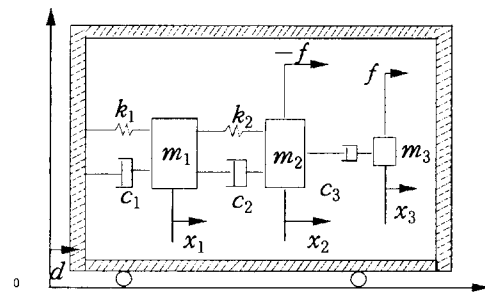


Fig. 2 Analytical model of two-degree-of-freedom structure

Fig. 2와 같은 시스템의 운동방정식은 다음과 같다.

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

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

$$m_3(\ddot{x}_3 + \dot{d}) = f - c_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) \quad (3)$$

단, m_i , c_i ($i=1,2,3$), k_i ($i=1,2$)는 각각 질량, 감쇠 및 강성계수를 나타내고 있으며, x_1 , x_2 , x_3 는 외곽 프레임(frame)을 기준으로 한 상대변위이며, d 는 가진변위이다.

여기서, 상태 X_1 , X_2 , X_3 와 제진력 f 을 각각

$$X_1 = x_1 + d, \quad X_2 = x_2 + d, \quad X_3 = x_3 + d, \quad f = k_T u \quad \text{라고 두면}$$

식 (1)~(3)은 다음 식 (4)~(6)으로 된다.

$$m_1\dot{X}_1 = -(c_1+c_2)X_1 + c_2X_2 - (k_1+k_2)X_1 + k_2X_2 + c_1\dot{d} + k_1d \quad (4)$$

$$m_2\dot{X}_2 = c_2X_1 - (c_2+c_3)X_2 + c_3X_3 + k_2X_1 - k_2X_2 - k_Tu \quad (5)$$

$$m_3\dot{X}_3 = c_3X_2 - c_3X_3 + k_Tu \quad (6)$$

단, k_T 는 모터토크정수를 나타내며, u 는 제어입력이고, X_1 , X_2 을 출력변수로 하였다. 즉,

$$y_1 = X_1 \quad (7)$$

$$y_2 = X_2 \quad (8)$$

\dot{X}_1 , \dot{X}_2 , \dot{X}_3 을 식 (9)와 같이 새로운 상태로 정의하면,

$$\dot{X}_1 = X_4, \quad \dot{X}_2 = X_5, \quad \dot{X}_3 = X_6 \quad (9)$$

식 (1) ~ (9)의 상태방정식과 출력방정식은 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} \dot{x} = A_p x + B_p u + E_1 \dot{d} + E_2 d \\ y = C_p x + D_p u \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{단, } x = [X_1 \ X_2 \ X_3 \ X_4 \ X_5 \ X_6]^T, \quad y = [y_1 \ y_2]^T$$

여기서, 식 (10)의 각 계수행렬은 다음과 같이 표현된다.

$$A_p = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_1+k_2}{m_1} & \frac{k_2}{m_1} & 0 & -\frac{c_1+c_2}{m_1} & \frac{c_2}{m_1} & 0 \\ \frac{k_2}{m_2} & -\frac{k_2}{m_2} & 0 & \frac{c_2}{m_2} & -\frac{c_2+c_3}{m_2} & \frac{c_3}{m_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c_3}{m_3} & -\frac{c_3}{m_3} \end{bmatrix}$$

$$B_p = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -\frac{k_T}{m_2} & \frac{k_T}{m_3} \end{bmatrix}^T$$

$$E_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{c_1}{m_1} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \quad E_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & k_1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$C_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D_p = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

3.2 각 파라미터 값의 추정

식 (10)에 포함되어 있는 파라미터 m_i , c_i , k_i 중 m_i 는 계량기로 실측한 값을 이용하였으며, c_i 와 k_i 의 값들을 추정하기 위하여 다음과 같은 실험을 수행하였다.

우선 c_1 과 k_1 의 값을 추정하기 위하여 하판부를 제거한 후 질량 m_1 을 좌측으로 일정한 크기로 잡아 당겼다가 놓았을 때의 자유진자운동하는 것을 레이저 센서로 변위를 계측하였으며, 그에 대한 결과는 Fig. 3-1과 같다. 이 응답은 질량 m_1 만이 있을 때의 단진자운동에 의한 결과로 이 관계로부터 파라미터 c_1 , k_1 의 값을 추정하였다.

또한 c_2 와 k_2 의 값을 추정하기 위해서는 상판부를 제거하고 하판부만을 고정한 후 앞에서와 같은 실험을 통하여 c_2 와 k_2 의 값을 추정하였다. 이때의 실험결과는 Fig. 3-2와 같다.

그리고 c_3 의 값은 제진용 모터에 단위 계단함수의 기준입력을 가하고, 이에 대한 시간응답을 계측하여 그 실험결과로부터 추정하였으며, 그때의 응답은 Fig. 3-3과 같다.

Fig. 4는 감쇠계수 c_1 , c_2 및 강성계수 k_1 , k_2 을 구하기 위하여 상·하판을 일정한 간격으로 당겨 자유진자운동을 하도록 여러번 실험을 수행한 것 중에 각각 3개씩의 데이터를 선정한 후 각 진폭의 꼭지점을 찾아서 곡선접합(Curve fitting)을 한 결과이다.

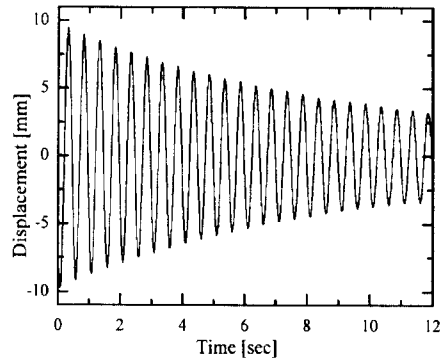


Fig. 3-1 Free vibration of upper plate

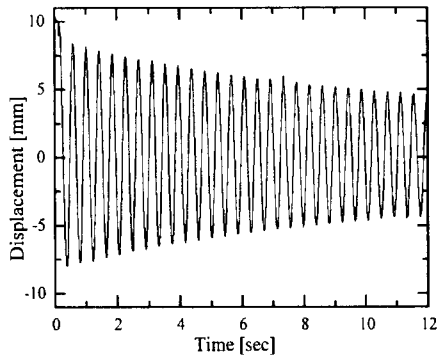


Fig. 3-2 Free vibration of bottom plate

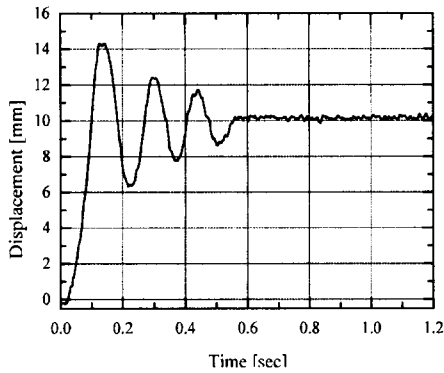


Fig. 3-3 Step response of m_3 mass

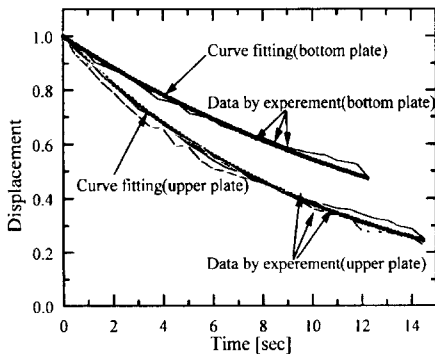


Fig. 4 Curve fitting of upper and bottom plate

그리고 Fig. 5-1과 Fig. 5-2는 앞에서 추정하여 구한 계수값을 이용한 시뮬레이션 응답결과이며, 실험으로 구한 상·하판의 단진자운동인 Fig. 3-1과 Fig. 3-2를 비교하여 검토한 결과 파라미터값들이 잘 추정되었다는 것을 알 수 있다. 이렇게 추정된 파라미터의 값은 Table 2와 같고, 이때 구한 파라미터의 값으로 대상구조물의 모델링에 대한 주파수 응답을 구해보면 Fig. 6과 같다.

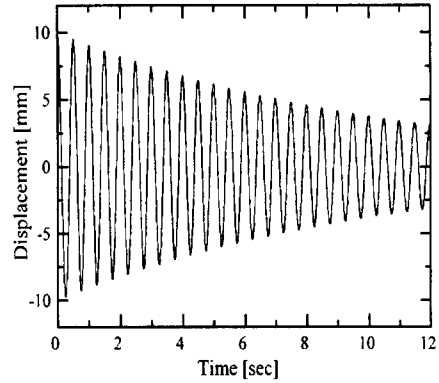


Fig. 5-1 Free vibration simulation of upper plate by estimated parameters

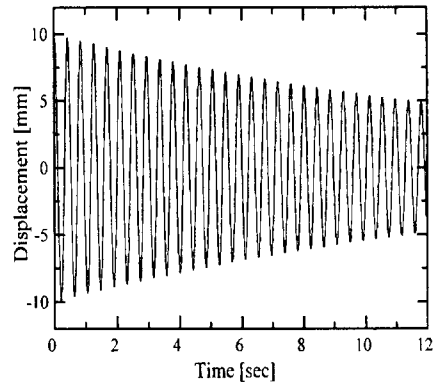


Fig. 5-2 Free vibration simulation of bottom plate by estimated parameters

Table 2 Estimated parameters for analytical model

Parameter	Value	Unit
Mass	m_1	150.3 kg
	m_2	116.5 kg
	m_3	1.5 kg
Damping coefficient	c_1	29.12 N·s/m
	c_2	14.22 N·s/m
	c_3	11.33 N·s/m
Stiffness coefficient	k_1	23,817 N/m
	k_2	25,855 N/m
Motor torque constant	k_T	0.5 N·m/A

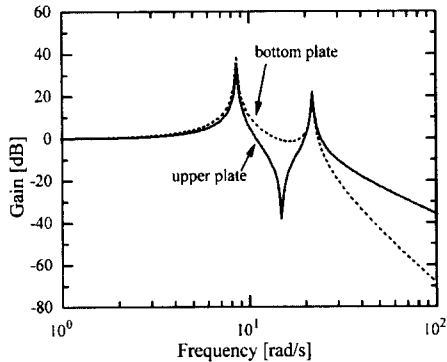


Fig. 6 Frequency response of two-degree-of-freedom for multi-layer structure

4. H_∞ 제어기의 설계

본 논문에서의 설계사양은 첫째, 공칭 플랜트 주파수응답의 크기를 0 [dB]이하가 되도록 한다.

둘째, 레이저 변위계에 입력되는 고주파 잡음 및 고주파 대역에서 무시된 모드에 대한 강인한 안정성을 만족하도록 제어기를 H_∞ 제어기법을 이용하여 설계한다.

4.1 H_∞ 표준문제

하중함수를 포함한 일반화 플랜트 $G(s)$ 와 제어기 $K(s)$ 로 구성되는 일반적인 H_∞ 제어계는 Fig. 7과 같다.

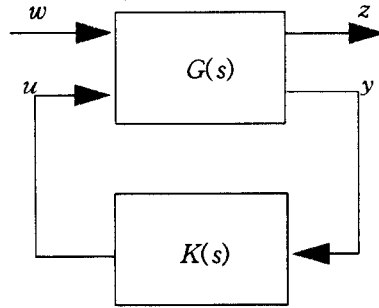


Fig. 7 H_∞ control system

이때의 $G(s)$ 는 식(11)과 같은 전달함수행렬로 주어진다.

$$\begin{bmatrix} z \\ y \end{bmatrix} = G(s) \cdot \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서, w, u, z, y 는 각각 외란입력, 제어입력, 제어량, 관측출력이다.

이 제어계에 대하여 w 에서 z 까지의 폐루프 전달함수 행렬 $T_{zw}(G, K)$ 는 식 (12)와 같이 정리된다.

$$z = T_{zw}(G, K) w \quad (12)$$

$$\text{단, } T_{zw}(G, K) = G_{11} - G_{12}K(I + G_{22}K)^{-1}G_{21}$$

이 경우 H_∞ 최적제어 문제는 양의 실수 $\gamma > 0$ 가 주어질 때, 식 (13)을 만족하는 안정화 제어기 $K(s)$ 을 찾는 문제가 된다.

$$\|T_{zw}(G, K)\|_\infty < \gamma \quad (13)$$

식 (11)로 표현된 시스템을 상태방정식으로 표현하면 식 (14)와 같이된다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_1 w + B_2 u \\ z &= C_1 x + D_{11} w + D_{12} u \end{aligned} \quad (14)$$

$$y = C_2 x + D_{21} w + D_{22} u$$

이때 안정화 제어기 $K(s)$ 가 존재하기 위해서는 다음의 가정을 만족해야 한다.

- A1: (A, B_2) 는 가안정, (C_2, A) 는 가검출
- A2: $\text{rank } D_{12} = m_2$ (D_{12} 가 열 full rank)
- A3: $\text{rank } D_{21} = p_2$ (D_{21} 가 행 full rank)
- A4: $\text{rank} \begin{pmatrix} A - j\omega I & B_2 \\ C_1 & D_{12} \end{pmatrix} = n + m_2, \forall \omega \in [0, \infty]$
(열 full rank)

$$A5: \text{rank} \begin{pmatrix} A - j\omega I & B_1 \\ C_2 & D_{21} \end{pmatrix} = n + p_2, \forall \omega \in [0, \infty)$$

(행 full rank)

$$A6: D_{22} = 0$$

$$A7: D_{12} = \begin{pmatrix} 0 \\ I \end{pmatrix}, D_{21} = (0 \ I)$$

4.2 일반화 플랜트의 구성

이상과 같은 H_∞ 제어기법을 본 연구의 제어대상에 적용하여 제어를 설계하기로 한다.

우선 가진기로 부터의 외란 d 로부터 하판의 변위까지의 루프게인(loop gain)을 작게하기 위하여 하중함수 $W_i(s)$ 을 도입한다. 그리고 측정잡음과 무시된 고차모드에 대해서도 강인한 안정성을 확보하기 위하여 상보감도함수(complementary sensitivity function)에 대한 하중함수 $W_o(s)$ 을 도입한다. 이렇게 했을 경우의 일반화 플랜트는 Fig. 8과 같이 된다.

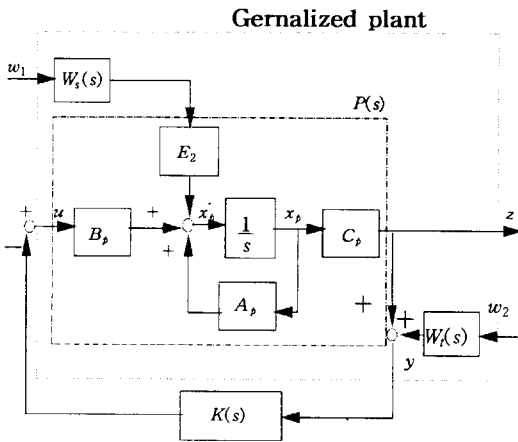


Fig. 8 Generalized plant(1)

Fig.8과 같이 일반화 플랜트를 구성한 경우에는 제어입력 u 에서 y 까지의 직달항이 없기 때문에 안정화 제어기 $K(s)$ 의 존재조건 중 A7을 만족하지 않는다. 이 경우의 해결책은 $D_{12} \neq 0$ 가 되도록 새로운 제어량 z_2 을 도입하는 것이 일반적이지만 본 연구에서는 미소한 크기 ϵ 으로써 u 에서 z 까지의 직달항을 만드는 것을 Fig. 9와 같이 제안한다.

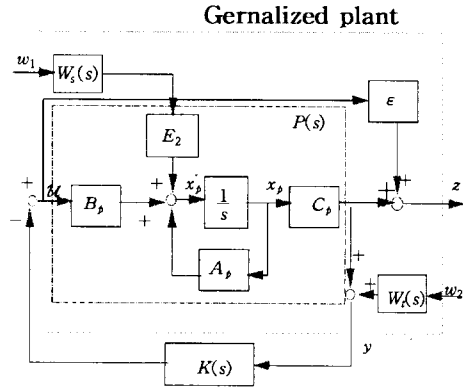


Fig. 9 Generalized plant(2)

Fig. 9와 같이 구성된 일반화 플랜트에서 w_1 에서 z 까지 및 w_2 에서 z 까지의 루프 전달함수 $T_{zw_1}(s)$ 와 $T_{zw_2}(s)$ 을 구해보면 식(15)과 식(16)과 같이 된다.

$$T_{zw_1}(s) = (I - \epsilon K(s)) \{ I + P_{B_i}(s) K(s) \}^{-1} P_{E_i} W_i(s) \quad (15)$$

$$T_{zw_2}(s) = \begin{bmatrix} -(I + P_{B_i}(s) K(s))^{-1} P_{B_i} K(s) \\ + \epsilon K(s) \{ I + (I + P_{B_i}(s) K(s))^{-1} P_{B_i} K(s) \} \end{bmatrix} W_o(s) \quad (16)$$

여기서, $P_{B_i}(s) = C(sI - A)^{-1} B_i$ 이고,

$$P_{E_i}(s) = C(sI - A)^{-1} E_i \text{이다.}$$

식(15), (16)에서 ϵ 값을 전주파수 영역에서 미소한 값으로 취하면 식(12)에 근사하게 됨으로, 이와 같은 방법을 이용하여 H_∞ 제어를 구하여도 무방하다.

4.3 하중함수의 선정 및 제어기 설계

식(15), (16)에서 ϵ 값을 0으로 했을 때의 각 루프전달함수는 식(17), (18)과 같다.

$$T_{zw_1}(s) = \{ I + P_{B_i}(s) K(s) \}^{-1} P_{E_i} W_i(s) \quad (17)$$

$$T_{zw_2}(s) = - \{ I + P_{B_i}(s) K(s) \}^{-1} P_{B_i} K(s) W_o(s) \quad (18)$$

w_1 에서 제어량 z 까지의 전달함수 $T_{zw_1}(s)$ 을 1, 2차 공진주파수대역에서 작아지도록 하기 위하여 하중함수 $W_i(s)$ 을 식(19)과 같이 선정하였다.

한편, 잡음 입력 w_2 에서 제어량 z 까지의 전달함수 $T_{zw_2}(s)$ 는 고주파 측정 잡음에 대해서도 만족스런 성능을 가짐과 동시에, 실제의 제어대상과 공칭 모델사이의 모델링 불확실에 대해서도 강인한 안정성을 갖도록 약간의 시행 착오를 거쳐 하중함수 $W_L(s)$ 을 식(20)과 같이 선정하였으며, 이때 구해진 H_∞ 제어기는 식(21)과 같다.

$$W_f(s) = \frac{10000}{(s+10)^3} \quad (19)$$

$$W_L(s) = \frac{5(s+5)^2}{(s+100)^2} \quad (20)$$

$$K(s) = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (21)$$

여기서,

$$N(s) = -7.051 \cdot 10^6 s^9 - 1.782 \cdot 10^9 s^8 - 1.566 \cdot 10^{11} s^7 - 6.358 \cdot 10^{12} s^6 \\ - 1.779 \cdot 10^{14} s^5 - 3.677 \cdot 10^{15} s^4 - 5.343 \cdot 10^{16} s^3 - 5.176 \cdot 10^{17} s^2 \\ - 3.022 \cdot 10^{18} s - 7.746 \cdot 10^{18}$$

$$D(s) = s^{10} + 134s^9 + 1.3 \cdot 10^4 s^8 + 8.834 \cdot 10^5 s^7 + 3.3636 \cdot 10^7 s^6 \\ + 8.801 \cdot 10^8 s^5 + 1.615 \cdot 10^{10} s^4 + 2.183 \cdot 10^{11} s^3 + 1.755 \cdot 10^{12} s^2 \\ + 6.799 \cdot 10^{12} s + 8.96 \cdot 10^{12}$$

5. 응답시뮬레이션 및 고찰

Fig. 10-1과 Fig. 10-2는 다층 층상 구조물의 주파수 응답결과를 시뮬레이션으로 나타내었다. 이 그림에서 점선으로 표시된 부분은 제진을 하지 않을 때의 주파수 응답이고, 실선으로 표시된 부분은 설계된 제진기에 의하여 제진이 되고 있을 때의 주파수 응답이다. 그럼으로부터 알 수 있는 바와 같이 제진을 할 경우 하판부의 1차 공진치와 2차 공진치는 약 0[dB]이하로 떨어져 설계사양을 만족하고 있음을 보이고 있다.

또한 Fig. 11-1과 Fig. 11-2의 경우는 대상구조물의 상부에 설치된 가진기로 임펄스를 가했을 때 하판부의 시간응답결과를 시뮬레이션으로 나타내었다. 여기서 Fig. 11-1은 제어하지 않을 때의 응답결과이고, Fig. 11-2는 H_∞ 제어를 할 때의 응답결과이며, 이들의 결과로부터도 H_∞ 제어기를 부착한 경우 제진특성이 우수함을 확인할 수 있다.

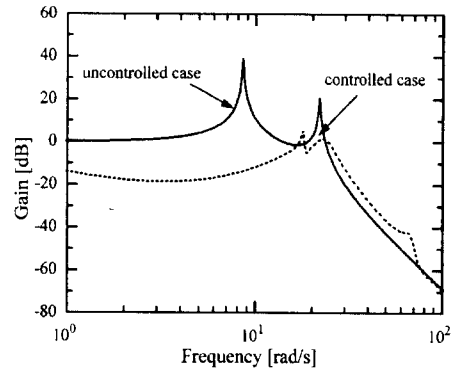


Fig.10-1 Simulation result of frequency response for bottom plate

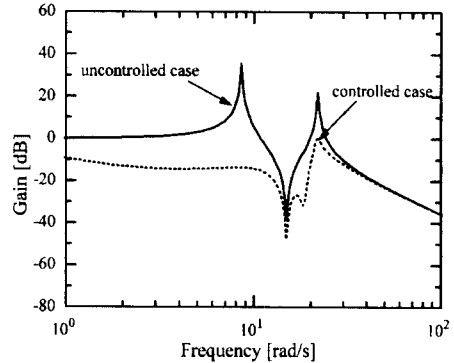


Fig. 10-2 Simulation result of frequency response for upper plate

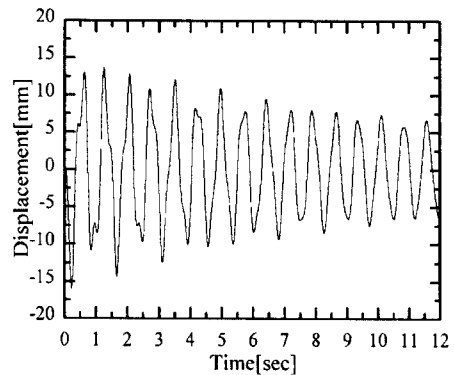


Fig. 11-1 Simulation result of impulse response for uncontrolled case

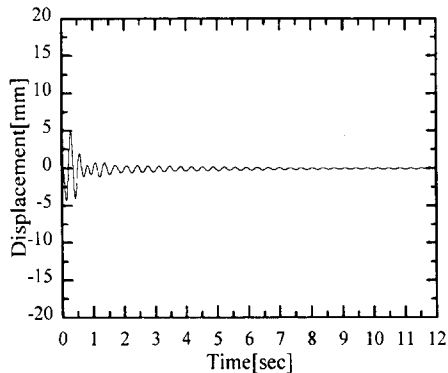


Fig. 11-2 Simulation result of impulse response for controlled case

6. 결 론

본 연구에서는 고층건물과 같은 다층 층상 구조물을 2자유도계로 모델링하고, H_∞ 제어이론을 제어기에 적용하여 상태피드백 제어계를 구성한 다음, 설계된 제어기의 유효성을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 검증하였고, 또한 다층 층상 구조물의 불확실성을 갖는 모델에 대해 로바스트 안정하고, 제진효과가 우수하게 될 것이라는 것을 주파수 응답시뮬레이션을 통하여 예상할 수 있었다.

향후 본 연구에서 설계된 제어계를 실제 실험장치에 적용하여 실험을 수행한 후 그에 대한 유효성과 로바스트(Robust)성을 검증하는 것이 과제로 남아 있다.

참고 문헌

- 1) 加賀谷 博昭, “ H^∞ 制御による橋梁主塔の振動制御”, システム制御情報學會論文誌, Vol.39, No.6, pp282-285, 1995
- 2) 長松昭男 et al., “二次元アクティブマスダンパによる塔狀構造物の振動制御”, 日本機械學會論文集(C集), Vol.54, No.501, pp1084-1089, 1987
- 3) 崔衛民, 野派健藏, 西村秀和, “ H^∞ 最適制御による多自由度構造物のアクティブ振動制御”, 日本機械學會論文集(C編), Vol.58, No.553, pp2859-2865, 1992
- 4) 吉田和夫 et al., “多自由度の振動絶縁のLQR制

御와 H^∞ 制御”, 日本機械學會論文集(C集), Vol.61, No.583, pp975-980, 1995

5) 土井文夫 et al., “長大橋主塔模型構造物の振動制御” 日本機械學會論文集(C集), Vol.62, No.599, pp2583-2590, 1996

6) 富波佳均 et al., “三連彈性構造物の振動制御”, 日本機械學會論文集(C集), Vol.62, No.599, pp2591-2599, 1996

7) 정해중, 변정환, 양주호, “다층 층상 구조물의 진동제어에 관한 연구(I)”, 韓國漁業技術學會, 제 33권 2호, 1997