

<논 문>

# $H_\infty$ 제어기법에 의한 다층 층상 구조물의 진동제어에 관한 연구

A Study on Vibration Control of Multi-layer Structure by  $H_\infty$  Control

정 해 종\* · 김 창 화\*\* · 변 정 환\*\*\* · 양 주 호\*\*\*\*

Hae-Jong Jeong · Chang-Hwa Kim · Jung-Hwan Byun and Joo-Ho Yang

(1997년 5월 22일 접수 ; 1997년 6월 13일 심사완료)

**Key Words** : Vibration Control(진동제어), Multi-layer Structure(다층 층상 구조물), Two-Degrees-of-Freedom(2자유도),  $H_\infty$  Control ( $H_\infty$  제어)

## 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  $H_\infty$  control theory was applied to the design of the control system. The designed control system was simulated by computer. As a result, the designed  $H_\infty$  controller showed the good vibration control performance to impulse response and frequency response.

## 1. 서 론

최근에 신축되고 있는 빌딩, 교량 등의 구조물은 고층화, 대형화, 유연 경량화 경향을 보이고 있다. 이와 같은 구조물은 바람, 지진 등에 의해 여기(excitation)되는 진동으로 여러가지 문제가 발생되기 쉽기 때문에 이에 대한 대책이 강구되어야 한다. 특히 바람, 지진 등에 의한 진동에 대한 대책은 구조물의 변형 등의 안전성 문제, 건축물의수명감소 및 안락한 주거 환경의 개선 측면에서도 향후 고려되어야 할 사항이다.

이미 선진국에서는 구조물의 건설 단계에 있어서 건물 옥상에 동흡진기 등의 제진장치를 대부분 설치하고 있는 실정이며, 최근에는 대형 교량 건설에 있어서도 진동제어 기술이 도입되고 있다.<sup>(1~6)</sup>

한편 국내에서는 대형 건물과 각종 교량의 붕괴 사고가 근래 많이 일어나고 있으며, 또한 최근 지진과 기상이변이 자주 일어나서 고층 건물과 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 다층 고가 교량 등에 대한 보다 적극적인 진동문제 및 제진대책에 관한 기초 연구로서 다층 층상 구조물을 2자유도 구조물로 단순 모델링하였

\* 한국어업기술훈련소  
.. 경남전문대학  
... 부경대학교 대학원  
\*\*\*\* 정회원, 부경대학교

Table 1 Specifications of experimental apparatus

Support	Specification	Height[mm]	Width[mm]	Length[mm]
	H-beam, 125×125		1,700	1,300
Mass, $m_1$	Specification	Thickness	Width[mm]	Length[mm]
	Steel Plate, SS41	20 <sup>t</sup>	950	950
Mass, $m_2$	Specification	Thickness	Width[mm]	Length[mm]
	Steel Plate, SS41	15 <sup>t</sup>	950	950
Mass, $m_3$	Specification	Thickness	Width[mm]	Length[mm]
	Steel Plate, SS41	30 <sup>t</sup>	35	120
Spring	Specification	Thickness	Width[mm]	Length[mm]
	Flat Type, SK-5	3.5 <sup>t</sup>	60	660

다. 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. 이와 같이 설계·제작된 제어대상을 수학적으로 모델링한 후 실험에 의하여 파라미터를 구한다.

실험실 상에서 제진실험을 하기 위하여 제작한 본 실험장치는 실제 구조물의 고차 모드가 생략되어 있어, 고주파 영역에서 모델의 불확실성이 크게 나타나게 된다. 이러한 불확실성에 대해 강인한 제어 성능을 확보할 수 있는 제어가  $H_\infty$  제어기라는 것은 널리 알려져 있는 사실이다. 또한 저차 등에 의하여 기 발표된  $LQ$  제어기법에 의한 다층 층상 구조물의 진동제어<sup>(7)</sup>는 1, 2차 모드를 어느 범위 내에서 제진 시키는 것은 가능하였으나, 그 이상으로 둔감하게 하는 것은  $LQ$  제어기의 구조상 불가능하였다.

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

## 2. 실험 장치의 구성

다층 층상 구조물은 엄밀하게 보면 무한의 자유도를 갖고 있지만, 설계의 편의상 또는 제어 시스템의 구현에 있어서의 제약 때문에 저차원화 모델로 모델링하는 것이 통상적인 방법이다.

특히 지진이나 풍하중을 받을 경우 이러한 외란은 저주파 대역에서 에너지를 가지므로 본 연구에서는 실험대상을 Fig. 1과 같은 2자유도 층상 구조물로

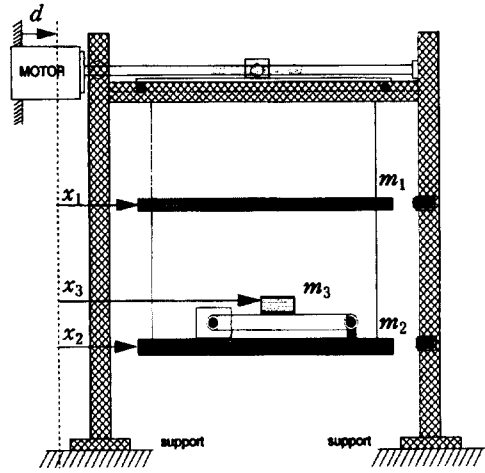


Fig. 1 Schematic diagram of two-degree-of-freedom structure

제작하였으며, 그 제원은 Table 1과 같다.

Fig. 1에서 지지대(support)는 4개의 H-형강으로 제작되었고, 가진할 때 지지대 자체의 진동을 무시할 수 있도록 바닥에 4개의 아이 볼트로 고정시켰다. 그리고 상부의 가진기 모터는 태풍과 같은 강풍과 지진 등에 의한 외란을 가하기 위한 것으로 0.4(kW) 정격 출력의 DC 서보모터를 사용하였다.

$m_1, m_2$ 는 상판과 하판의 질량을 표시하고 있으며, 상·하판 사이는 탄소공구강 강재 5종의 판 스프링으로 연결하였고,  $m_3$ 는 제진하기 위한 가반(可搬)중량체로 제어조건에 따라 질량을 조정 가능하도록 제작하였다.

변위  $x_1, x_2$ 를 측정할 수 있도록 우측에 레이저 센서를 설치하였으며, 하판부에 제진장치를 설치하였고, 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.

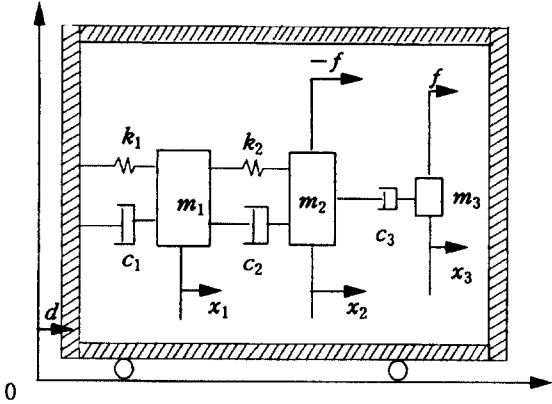


Fig. 2 Analytical model of two-degree-of-freedom structure

### 3. 대상 구조물의 모델링

#### 3.1 수학적 모델링

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

Fig. 2와 같은 시스템의 운동방정식은 다음과 같다.

$$m_1(\ddot{x}_1 + \ddot{d}) = -c_1 \dot{x}_1 - k_1 x_1 - c_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_2(x_1 - x_2) \quad (1)$$

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

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

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  $X_1 = x_1 + d, X_2 = x_2 + d, X_3 = x_3 + d, f = k_T u$ 라고 두면 식 (1)~(3)은 다음 식 (4)~(6)으로 된다.

$$m_1 \dot{X}_1 = -(c_1 + c_2) \dot{X}_1 + c_2 \dot{X}_2 - (k_1 + k_2) X_1 + k_2 X_2 + c_1 \dot{d} + k_1 d \quad (4)$$

$$m_2 \dot{X}_2 = c_2 \dot{X}_1 - (c_2 + c_3) \dot{X}_2 + c_3 \dot{X}_3 + k_2 X_1 - k_2 X_2 - k_T u \quad (5)$$

$$m_3 \dot{X}_3 = c_3 \dot{X}_2 - c_3 \dot{X}_3 + k_T u \quad (6)$$

단,  $k_T$ 는 모터 토크정수를 나타내며,  $u$ 는 제어 입력이고,  $X_1, X_2$ 을 출력변수로 하였다. 즉,

$$[y_1 \ y_2]^T = [X_1 \ X_2]^T \quad (7)$$

그리고  $\dot{X}_1, \dot{X}_2, \dot{X}_3$ 을 식 (8)과 같이 새로운 상태로 정의하면,

$$\dot{X}_1 = X_4, \dot{X}_2 = X_5, \dot{X}_3 = X_6 \quad (8)$$

식 (1) ~ (8)의 상태방정식과 출력방정식은 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} \dot{x}_p = A_p x_p + B_p u + E_1 \dot{d} + E_2 d \\ y_p = C_p x_p + D_p u \end{cases} \quad (9)$$

단,

$$x_p = [X_1 \ X_2 \ X_3 \ X_4 \ X_5 \ X_6]^T$$

$$y_p = [y_1 \ y_2]^T$$

여기서, 식 (9)의 각 계수행렬은 다음과 같이 표현된다.

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

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

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

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

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

#### 3.2 각 파라미터 값의 추정

식 (9)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 Fig. 1에서 하판부를 제거한 후, 질량  $m_1$ 을 좌측으로 일정

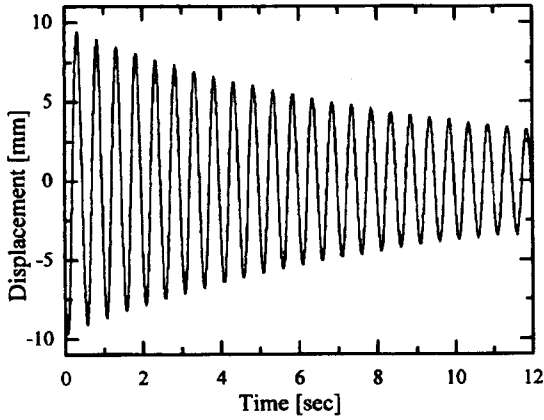


Fig. 3-1 Free vibration of upper plate

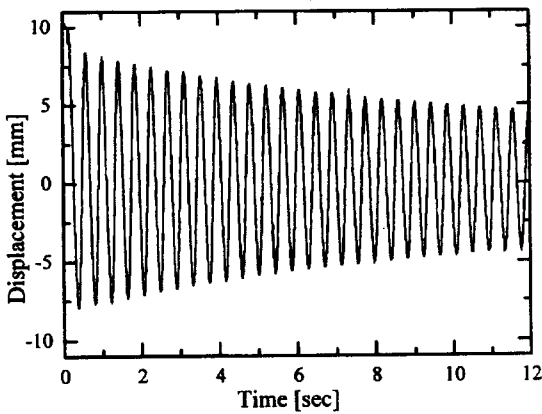


Fig. 3-2 Free vibration of bottom plate

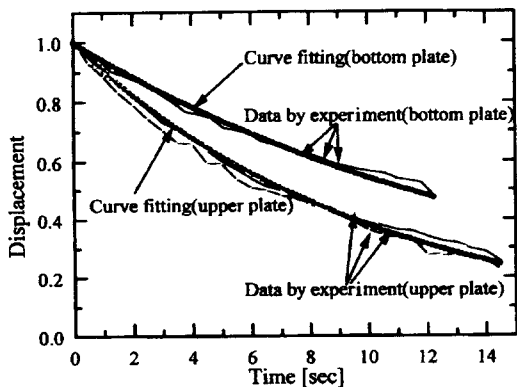


Fig. 3-3 Curve fitting of upper & lower plate

한 크기로 잡아 당겼다가 놓았을 때의 자유진자운동하는 것을 레이저 센서로 변위를 계측하였으며, 그 결과는 Fig. 3-1과 같다.

그리고  $c_2$ 와  $k_2$ 의 값을 추정하기 위해서 상판부를 제거하고 하판부만을 설치한 후 앞에서와 같은 실험을 통하여 Fig. 3-2와 같은 결과를 얻었다.

Fig. 3-3은 Fig. 3-1 및 Fig. 3-2의 실험을 여러 번 수행한 것 중에서 상·하판 각각 3개씩의 데이터를 선정하여 그 데이터로부터 곡선적합(curve fitting)을 한 결과이다. 이 그림에서 감쇠계수  $c_1, c_2$  및 강성계수  $k_1, k_2$ 의 값을 추정하였다.

그리고  $c_3$ 의 값을 추정하기 위하여 제진용 모터에 단위 계단함수의 기준입력을 가하여 시간응답을 Fig. 4와 같이 구하였으며, 이 그림으로부터 감쇠계수  $c_3$ 을 추정하였다.

그리고 Fig. 5-1과 Fig. 5-2는 앞에서 추정된 계수 값들의 타당성을 검증하기 위해서, 추정된 계수 값들을 식 (9)에 대입하여 시뮬레이션한 결과이다.

이 그림과 Fig. 3-1 및 Fig. 3-2를 비교해 본 결과, 각 파라미터가 비교적 잘 추정되었음을 알 수 있었다. 이렇게 추정된 파라미터의 값은 Table 2와 같고, 이렇게 구한 파라미터의 값으로부터 구조물의 수학적 모델링에 대한 주파수 응답을 구해 보면 Fig. 6 과 같다.

#### 4. $H_\infty$ 제어기의 설계

본 논문에서의 제어계 설계사양은

첫째, 공칭 플랜트 주파수응답의 크기를 0 [dB] 이하가 되도록 하고,

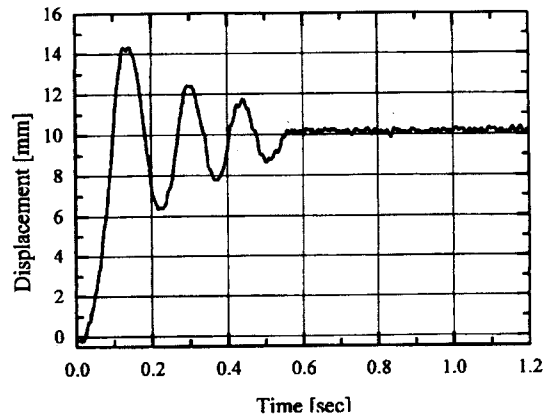


Fig. 4 Step response of  $m_3$  mass

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	$N \cdot s/m$
	$c_2$	14.22	$N \cdot s/m$
	$c_3$	11.33	$N \cdot s/m$
Stiffness coefficient	$k_1$	23,817	$N/m$
	$k_2$	25,855	$N/m$
Motor torque constant	$k_T$	0.5	$N \cdot m/A$

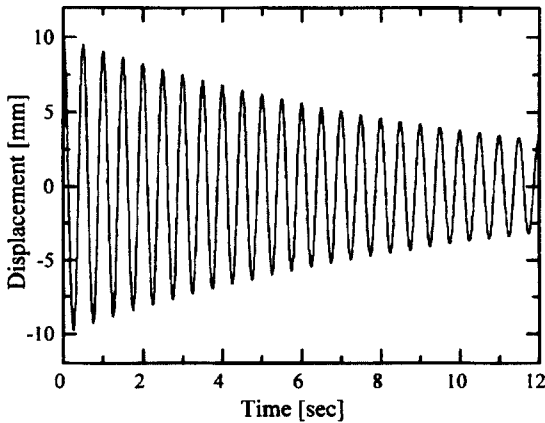


Fig. 5-1 Free vibration simulation of upper plate by estimated parameters

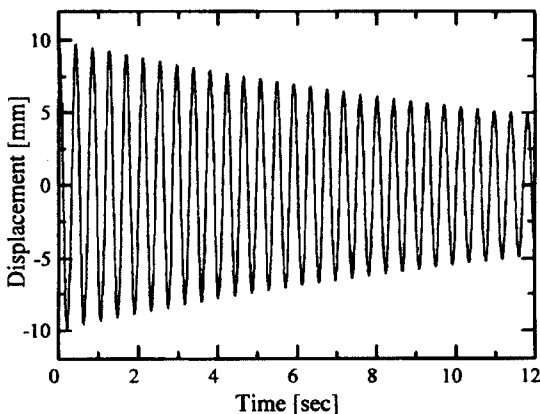


Fig. 5-2 Free vibration simulation of bottom plate by estimated parameters

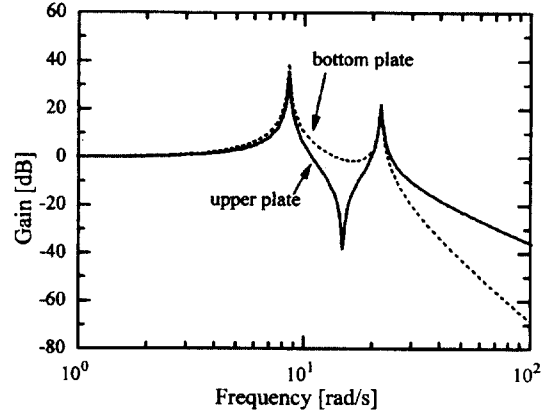


Fig. 6 Frequency response of two-degree-of-freedom for multi-layer structure

둘째, 레이저 변위계에 입력되는 고주파 잡음 및 고주파 대역에서 무시된 고차 모드에 대한 모델의 불확실성에 대한 강인한 안정성을 만족하도록 하는 것이다.

4.1  $H_\infty$  표준문제

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

이때의  $G(s)$ 는 식 (10)과 같이 전달함수행렬로 주어진다.

$$\begin{bmatrix} z \\ y \end{bmatrix} = G(s) \cdot \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서, 변수벡터  $w, u, z, y$ 는 각각 외란 입력, 제어 입력, 제어량, 관측 출력이다.

이 제어계에 대하여  $w$ 에서  $z$ 까지의 페루프 전달함수 행렬  $T_{zw}(G, K)$ 는 식 (11)과 같이된다.

$$z = T_{zw}(G, K) w \quad (11)$$

단,

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

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

$$\|T_{zw}(G, K)\|_\infty < \gamma \quad (12)$$

$H_\infty$  제어 문제의 해를 구하는 방법은 여러 가지 있으나, 본 연구에서는 Glover과 Doyle이 제안한 상태공간에서의 해법을 이용하기로 한다. 따라서 식 (10)을 상대방정식으로 표현하면 식 (13)과 같이

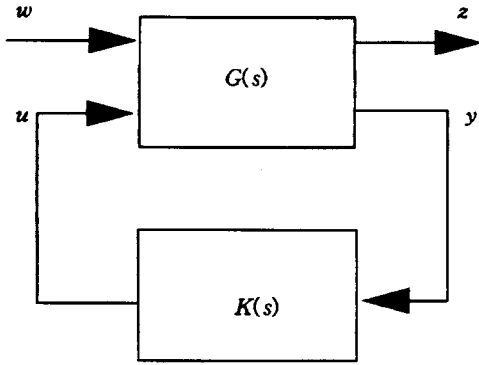


Fig. 7  $H_\infty$  control system

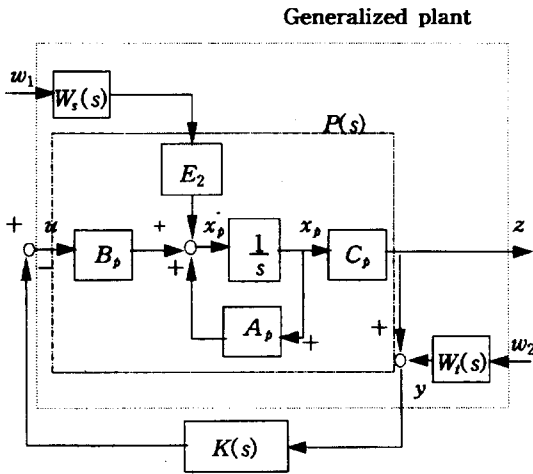


Fig. 8 Generalized plant (1)

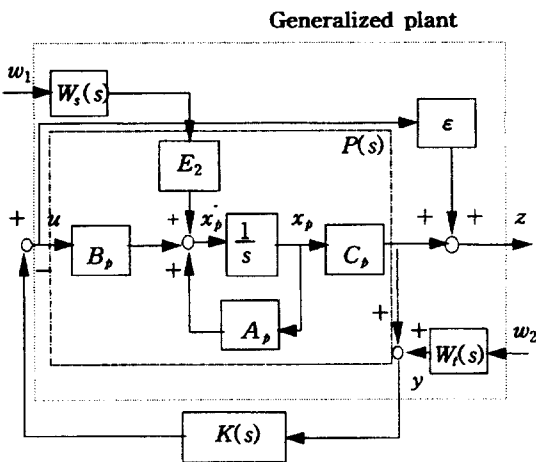


Fig. 9 Generalized plant (2)

된다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_1 w + B_2 u \\ z &= C_1 x + D_{11} w + D_{12} u \end{aligned} \quad (13)$$

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

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

A1 :  $(A, B_2)$ 는 가안정,  $(C_2, A)$ 는 가검출

A2 :  $\text{rank } D_{12} = m2$  ( $D_{12}$ 가 열 full rank)

A3 :  $\text{rank } D_{21} = p2$  ( $D_{21}$ 가 행 full rank)

$$A4 : \text{rank} \begin{pmatrix} A - j\omega I & B_2 \\ C_1 & D_{12} \end{pmatrix} = n + m2,$$

$$\forall \omega \in [0, \infty] (\text{열 full rank})$$

$$A5 : \text{rank} \begin{pmatrix} A - j\omega I & B_1 \\ C_2 & D_{21} \end{pmatrix} = n + p2,$$

$$\forall \omega \in [0, \infty] (\text{행 full rank})$$

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

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

#### 4.2 일반화 플랜트의 구성

우선 가진기의 외란  $d$ 로부터 하판의 변위까지의 루프게인(loop gain)이 특정 주파수 영역에서 작게 되도록 하기 위하여 하중함수  $W_s(s)$ 을 도입한다. 그리고 측정 잡음과 무시된 고차 모드의 모델 불확실성에 대해서도 강인한 안정성을 확보하기 위하여 상보감도함수(complementary sensitivity function)에 대한 하중함수  $W_f(s)$ 을 도입한다. 이렇게 했을 경우의 일반화 플랜트는 Fig. 8과 같이된다.

Fig. 8과 같이 일반화 플랜트를 구성한 경우에는 제어 입력  $u$ 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  $\epsilon$ 으로써  $u$ 에서  $z$ 까지의 직달항을 만드는 것을 Fig. 9와 같이 제안한다.

Fig. 9와 같이 구성된 일반화 플랜트에서  $w_1$ 에서  $z$ 까지 및  $w_2$ 에서  $z$ 까지의 루프 전달함수  $T_{z w_1}(s)$ 와  $T_{z w_2}(s)$ 을 구해 보면 식 (14)과 식 (15)과 같이된다.

$$T_{z w_1}(s) = \frac{(I - \epsilon K(s))}{(I + P_{B_1}(s)K(s))^{-1} P_{E_2} W_1(s)} \quad (14)$$

$$T_{z w_2}(s) = \left[ -(I + P_{B_1}(s)K(s))^{-1} P_{B_1} K(s) + \epsilon K(s) \{ I + (I + P_{B_1}(s)K(s))^{-1} P_{B_1} K(s) \} \right] W_1(s) \quad (15)$$

여기서,  $P_{B_1}(s) = C(sI - A)^{-1} B_1$  이고,

$P_{E_2}(s) = C(sI - A)^{-1} E_2$ 이다.

식(14), (15)에서  $\epsilon$ 값을 전주파수 영역에서 미소한 값으로 취하면 식(11)에 근사하게 됨으로, 이와 같은 방법을 이용하여  $H_\infty$  제어를 구하여도 무방하다.

### 4.3 하중함수의 선정 및 제어기 설계

$w_1$ 에서 제어량  $z$ 까지의 전달함수  $T_{z w_1}(s)$ 을 1, 2차 공진주파수대역에서 작아지도록 하기 위하여 하중함수  $W_1(s)$ 을 식(16)과 같이 선정하였다.

한편, 잡음 입력  $w_2$ 에서 제어량  $z$ 까지의 전달함수  $T_{z w_2}(s)$ 는 고주파 측정 잡음에 대해서도 만족스런 성능을 가짐과 동시에, 실제의 제어대상과 공칭 모델사이의 모델링 불확실성에 대해서도 강인한 안정성을 갖도록 약간의 시행 착오를 거쳐 하중함수  $W_1(s)$ 을 식(17)과 같이 선정하였으며, 이때 구해진  $H_\infty$  제어기는 식(18)과 같다.

$$W_1(s) = \frac{10000}{(s+10)^3} \quad (16)$$

$$W_2(s) = \frac{5(s+5)^2}{(s+100)^2} \quad (17)$$

$$K(s) = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (18)$$

여기서,

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

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

## 5. 응답 시뮬레이션 및 고찰

Fig. 10-1과 Fig. 10-2는 다층 층상 구조물의 주파수 응답을 시뮬레이션한 것이다. 이 그림에서 점선으로 표시된 부분은 제진을 하지 않을 때의 주파수 응답이고, 실선으로 표시된 부분은 설계된 제어기에 의하여 제진이 되고 있을 때의 주파수 응답이다. 이들 그림으로부터 제진을 할 경우 상·하판부의 1차 및 2차 공진치는 모두 약 0[dB] 이하가

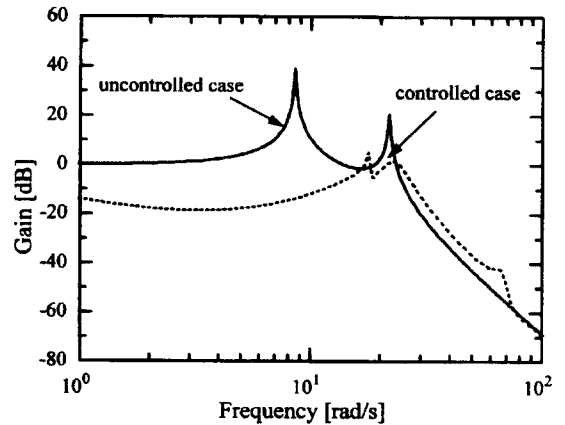


Fig. 10-1 Simulation result of frequency response for bottom plate

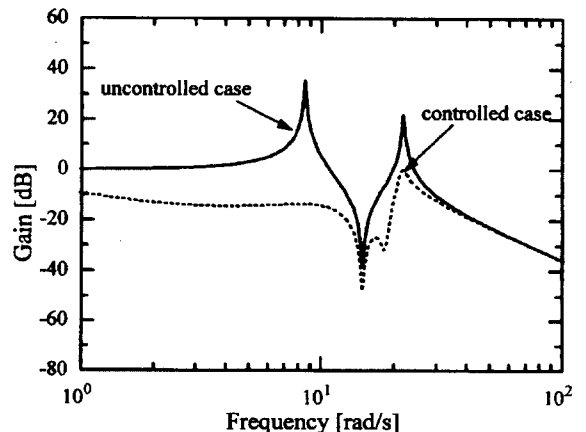


Fig. 10-2 Simulation result of frequency response for upper plate

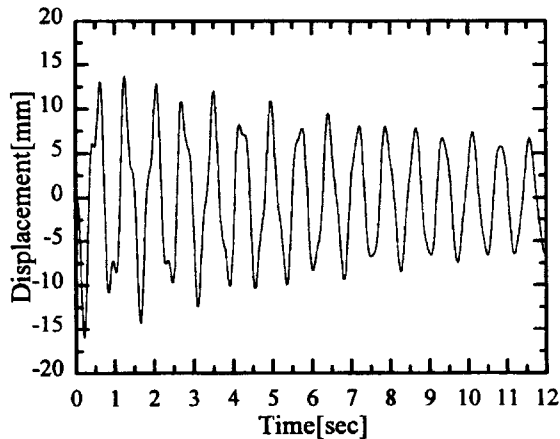


Fig. 11-1 Simulation result of impulse response for uncontrolled case

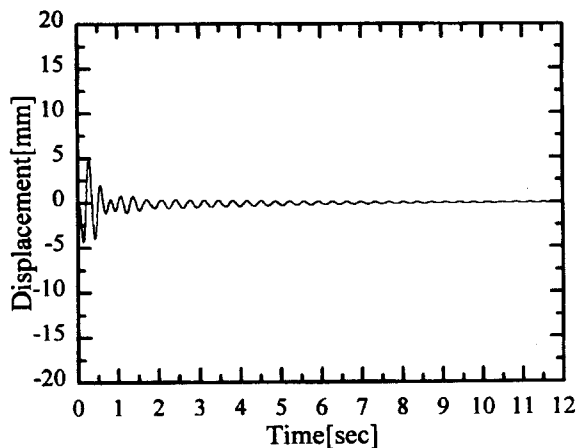


Fig. 11-2 Simulation result of impulse response for control case

되어, 주어진 설계사양을 만족하고 있음을 알 수 있다.

또한 Fig. 11-1과 Fig. 11-2는 대상구조물의 상부에 설치된 가진기로써 임펄스를 가했을 때 하판부의 시간응답 시뮬레이션 결과이다. 여기서 Fig. 11-1은 제어하지 않을 때의 응답이고, Fig. 11-2는  $H_\infty$  제어를 할 때의 응답이며, 이들의 결과로부터도  $H_\infty$  제어기에 의한 제진 특성의 우수성을 확인할 수 있었다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 고층건물과 같은 다층 층상 구조물을 2자유도계로 모델링하고,  $H_{\infty}$  제어이론을 이용하여 제진 제어 시스템을 설계하였으며, 임펄스 응답 및 주파수 응답 시뮬레이션을 통하여 설계된 제어계의 유효성, 즉 제진 효과를 검증하였다.

아울러 실제 구조물에 본 연구에서 설계된 제어기를 적용할 경우 고주파 영역에서 발생할 수 있는 모델의 불확실성에 대해서도 강인할 것이라는 것을 주파수 응답 시뮬레이션을 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.

## 후 기

본 과제는 1996년도 기계공학분야 학술연구조성비에 의해 연구되었으며, 관계되는 여러분께 감사드립니다.

## 참고 문헌

- (1) 加賀谷 博昭, 1995, " $H^\infty$  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集, Vol.39, No.6, pp.282~285.
- (2) 長松昭男 外., 1987, "二次元アクティブマスタングパン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, pp.1084-1089.
- (3) 崔衛民, 野派健藏, 西村秀和, 1992, " $H^\infty$  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, pp.2859~2865.
- (4) 吉田和夫 外., 1995, "多自由度の振動絶縁のLQR制御와  $H^\infty$  制御", 日本機械學會論文集(C集), Vol.61, No.583, pp.975~980.
- (5) 土井文夫 外., 1996, "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, pp.2583~2590.
- (6) 富波佳均 外., 1996, "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, pp.2591-2599.
- (7) 정해중, 변정환, 양주호, 1997, "다층 층상 구조물의 진동제어에 관한 연구(I)", 韓國漁業技術學會, 제33권, 제2호, pp142~146.