한국마린엔지니어링학회지 제33권 제8호, pp. 1212~1219, 2009. 11 (ISSN 1226-9549)
Journal of the Korean Society of Marine Engineering

다층상구조물의 강인 진동제어에 관한 연구

김창화[1] · 정병건† · 정해종[2]

(원고접수일 : 2009년 9월 28일, 원고수정일 : 2009년 11월 18일, 심사완료일 : 2009년 11월 21일)

A Study of Robust Vibration Control for a Multi-Layer Structure

Chang-Hwa Kim[1] · Byung-gun Jung† · Hae-Jong Jung[2]

요 약 : 본 연구에서는 실용설계의 새로운 도구로써 제어계의 강인성, 성능, 안정성 등의 설계지침을 정량화하기 쉽고 해가 효율적으로 구해져 주목받는 선형행렬부등식을 이용하여 강인한 LMI 제어기를 설계한다. 우선 다층상 구조물의 진동제어를 위해 수학적 모델링을 행하고 적분형 서보계를 적용한 LMI 제어기법으로 상태 피드백 제어칙을 설계한다. 다음으로 설계한 제어칙으로 시스템 불확실성의 변동에 대해 시간영역의 설계사양을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대하여 시뮬레이션을 행하고 실제 적용 가능성을 검토한다.

주제어 : 다층상 구조물, 극배치 영역, 강인 제어, 선형 행렬 부등식, 파라미터 변동

Abstract: In this paper, a state feedback gain controller using linear matrix inequality(LMI) for the multi-objective synthesis is designed, in the multi-layer structure with integral type servo system. The design objectives include H_∞ performance, asymptotic disturbance rejection, time-domain constraints, on the closed-loop pole location. The results of computer simulation show the validity of the designed controller.

Key words: Multi-layer structure, Pole assignment region, Robust control, Linear matrix inequality, Parameter perturbation

1. 서 론

지구 온난화 등의 영향으로 기후 변화가 진행되면서 대형 태풍이나 지진이 많이 발생하고 있는 실정이다. 그러나 유연하고 가벼운 건설재료 및 기술의 발전으로 건물이나 교량 등은 고층화, 대형화되어가면서 대형 사고의 우려가 커지고 있다[1]. 이에 따라 이러한 구조물의 진동억제를 위한 제어기법 및 제진장치 등에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이를 건물 등에 적용한 사례도 보고되고 있다[2].

한편 국내에서는 각종 교량과 건물 등의 붕괴사고가 일어난 사례들이 있으며, 또한 기상이변 등의 영향으로 지진의 강도가 많이 커지고 있어 고층건물과 교량의 내진설계 등 안전성에 대한 대책이 절실히 요구되고 있다.

따라서 초고층의 건물과 고가 교량 및 사장교(斜張橋) 등에 대한 보다 적극적인 진동문제 및 제진대책에 관한 기초연구가 LQ 최적제어이론 및 H_∞ 이론 등 다양한 제어기법을 이용하여 수행되고 있다[3].

다층상 구조물은 다수의 모드를 가지고 있어 H_∞ 제어기법을 적용하게 되면 제어기의 차수가 크게

† 교신저자(한국해양대학교 선박전자기계공학부, E-mail: bgjung@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4269)
1 경남정보대학 전자정보계열
2 한국해양수산연수원

증가하게 되므로, 제어대상의 저차원화를 행하여 제어기를 설계하고 있는데, 이때 저차원화에 따른 스필오버(spill over)가 발생된다. 이에 대응한 강인한 제어계설계법으로 선형 행렬 부등식(Linear Matrix Inequality: LMI)법이 있다[4].

본 연구에서는 실용설계의 새로운 도구로써 제어계의 강인성, 성능, 안정성 등의 설계지침을 정량화하기 쉽고 해가 효율적으로 구해져 주목받는 선형행렬 부등식을 이용하여 강인한 LMI 제어기를 설계한다.

우선 다층상 구조물의 진동제어를 위해 수학적 모델링을 행하고 적분형 서보계를 적용한 LMI 제어기법으로 상태 피드백 제어칙을 설계한다. 다음으로 설계한 제어칙으로 시스템 불확실성의 변동에 대해 시간영역의 설계사양을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대하여 시뮬레이션을 행하고 실제 적용 가능성을 검토한다.

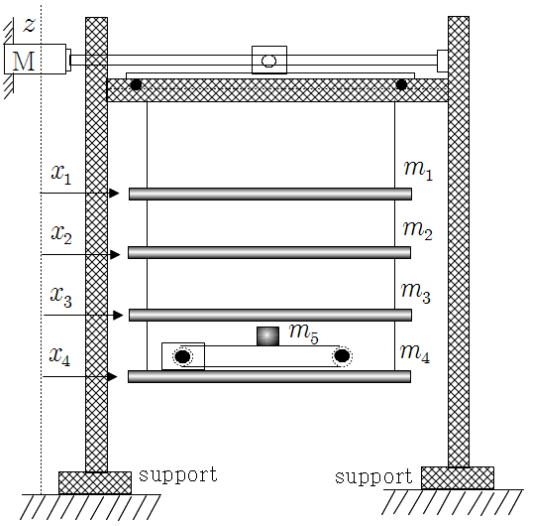


Figure 1: Schematic diagram of four-degrees-of-freedom structure

2. 제어기 설계

2.1 다층상 구조물의 수학적 모델링

본 연구에서 사용할 다층상 구조물의 개념도는 Figure 1과 같으며, 본 구조물의 4자유도 등가 모델은 Figure 2와 같이 표현할 수 있다. 등가 모델의 운동방정식은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다[5].

$$
\begin{aligned}
&m_1\ddot{x}_1+c_1\dot{x}_1+c_2(\dot{x}_1-\dot{x}_2)+k_1x_1+k_2(x_1-x_2)= -m_1\ddot{z}\\
&m_2\ddot{x}_2+c_2(\dot{x}_2-\dot{x}_1)+c_3(\dot{x}_2-\dot{x}_3)+k_2(x_2-x_1)+k_3(x_2-x_3)= -m_2\ddot{z}\\
&m_3\ddot{x}_3+c_3(\dot{x}_3-\dot{x}_2)+c_4(\dot{x}_3-\dot{x}_4)+k_3(x_3-x_2)+k_4(x_3-x_4) = -m_3\ddot{z}\\
&m_4\ddot{x}_4+c_4(\dot{x}_4-\dot{x}_3)+k_4(x_4-x_3)= -m_4\ddot{z}+u
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

여기서, x_1, x_2, x_3, x_4는 z의 좌표(외각 프래임(frame)을 기준)를 기준으로 한 상대 변위이다. 4층 구조물 최하단의 x_4를 출력으로 두고, $\dot{x}_1=x_5$, $\dot{x}_2=x_6$, $\dot{x}_3=x_7$, $\dot{x}_4=x_8$이라 두면, 식 (1)의 상태공간 표현식은 식 (2)로 된다.

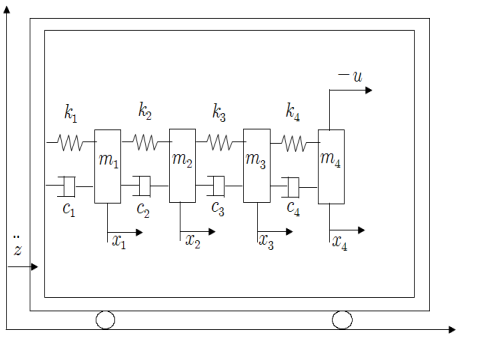


Figure 2: Analytical model of four-degree-of-freedom structure

$$
\begin{aligned}
\dot{x} &= A_p x+B_z\ddot{z}+B_p u\\
y &= C_p x+D_p u
\end{aligned}
\qquad (2)
$$

이때,

$$
\boldsymbol{x}=\begin{bmatrix}x_1\,x_2\,x_3\,x_4\,\dot{x}_1\,\dot{x}_2\,\dot{x}_3\,\dot{x}_4\end{bmatrix}^T=\begin{bmatrix}x_1\,x_2\,x_3\,x_4\,x_5\,x_6\,x_7\,x_8\end{bmatrix}^T
$$

$$
A_p=\begin{bmatrix}A_{11}\,A_{12}\\A_{21}\,A_{22}\end{bmatrix},\ A_{11}=\begin{bmatrix}0000\\0000\\0000\\0000\end{bmatrix},\ A_{12}=\begin{bmatrix}1000\\0100\\0010\\0001\end{bmatrix}
$$

$$
A_{21}=\begin{bmatrix}
-\dfrac{k_1+k_2}{m_1} & \dfrac{k_2}{m_1} & 0 & 0\\
\dfrac{k_2}{m_2} & -\dfrac{k_2+k_3}{m_2} & \dfrac{k_3}{m_2} & 0\\
0 & \dfrac{k_3}{m_3} & -\dfrac{k_3+k_4}{m_3} & \dfrac{k_4}{m_3}\\
0 & 0 & \dfrac{k_4}{m_4} & -\dfrac{k_4}{m_4}
\end{bmatrix}
$$

$$A_{22}=\begin{bmatrix} -\frac{c_1+c_2}{m_1} & \frac{c_2}{m_1} & 0 & 0 \\ \frac{c_2}{m_2} & -\frac{c_2+c_3}{m_2} & \frac{c_3}{m_2} & 0 \\ 0 & \frac{c_3}{m_3} & -\frac{c_3+c_4}{m_3} & \frac{c_4}{m_3} \\ 0 & 0 & \frac{c_4}{m_4} & -\frac{c_4}{m_4} \end{bmatrix}$$

$B_z = [00001111]^T$, $B_p = [0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ k_r/m_4]^T$

$C_p = [00010000]$, $D_p = [0]$

로 표현된다.

외부에서 들어오는 외란 $\ddot{z}=0$이라 두면, 식 (2)는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A_p x + B_p u \\ y &= C_p x \end{aligned} \tag{3}$$

따라서, 본 연구에서는 식 (3)으로 표현되는 다층상 구조물을 안정화하고 파라미터 변동에 강인하도록 Figure 3과 같은 적분형 서보 시스템을 적용한다[6].

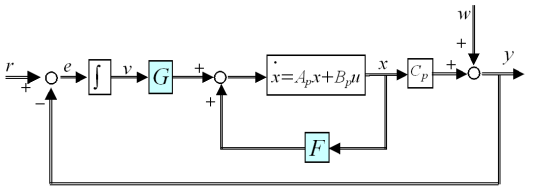


Figure 3: Integral type servo system

이때 식 (4)는 Figure 3의 시스템에 대한 확대 편차계의 상태공간표현이다.

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}(t) &= \widetilde{A}_p \tilde{x}(t) + \widetilde{B}_p \tilde{u}(t) \\ e(t) &= \widetilde{C}_p \tilde{x}(t) \end{aligned} \tag{4}$$

여기서, $\tilde{x}(t)=\begin{bmatrix}\hat{x}(t)\\ \hat{v}(t)\end{bmatrix}$, $\widetilde{A}_p=\begin{bmatrix}A_p & 0\\ -C_p & 0\end{bmatrix}$

$\widetilde{B}_p=\begin{bmatrix}B_p\\ 0\end{bmatrix}$, $\widetilde{C}_p=[-C_p\ 0]$

외란 w를 부가하여 정리하면, 다층상 구조물의 적분형 서보계의 상태공간 표현식은 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}(t) &= (\widetilde{A}_p + \widetilde{B}_p K)\tilde{x}(t) + \widetilde{B}_w w(t) \\ y(t) &= \widetilde{C}_p \tilde{x}(t) + \widetilde{D}_w w(t) \end{aligned} \tag{5}$$

단, $\widetilde{B}_w=[00\ 0\ -100\ 0\ 0]^T$, $\widetilde{D}_w=1$

2.2 LMI에 의한 제어기 설계

2.2.1 설계사양

(1) 물리 파라미터의 변동

시스템 표현 식 (4)에 있어, 시스템 행렬 A_p, B_p, C_p계수의 변동을 파라미터의 변동으로 생각한다. 이때, 계수행렬을 행렬 폴리토프의 형태로 표현하면 파라미터 변동에 대한 제어계의 강인성은 보증된다. 본 연구에서는 4층 구조물의 질량, 감쇄 및 강성계수를 다음과 같이 변동하는 것으로 생각한다.

$$\begin{aligned} M_{i_{\min}} &\leqq M_i \leqq M_{i_{\max}}, \quad \text{단, } i = 1,2,3,4 \\ C_{i_{\min}} &\leqq C_i \leqq C_{i_{\max}} \\ K_{i_{\min}} &\leqq K_i \leqq K_{i_{\max}} \end{aligned} \tag{6}$$

(2) H_∞ 노옴 조건

Figure 3에서 w로부터 y까지의 $\|G_{yw}\|_\infty < \gamma$를 최소화하고, 출력측 외란의 영향을 저감화하는 것을 목적으로 한다.

(3) 극 배치영역

폐루프 시스템의 극을 지정영역에 배치하는 것은 과도응답을 개선하기 위한 목적을 가지고 있다. 따라서 아래와 같은 2차 시스템에 대해

$$\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \tag{7}$$

스텝 입력에 대한 2%의 정착시간과 오버슈트와의 관계는

$$\text{정착시간 : } T_s = 4\tau = \frac{4}{\zeta\omega_n} \tag{8}$$

$$\text{오버슈트 제로 : } \zeta > 0.707 \tag{9}$$

로 된다. 따라서 과도응답에 대한 설계 사양을 만족하기 위해서는 Figure 4에 나타난 것과 같이 폐루프 극점들이 원뿔 내(Conic sector)와 극의 실수부가 특정값 이하가 되는 영역에 있어야 한다.

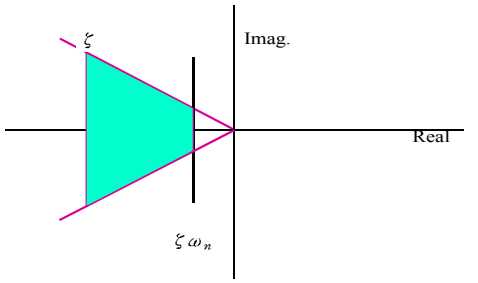


Figure 4: Pole assignment region

2.2.2 LMI에 의한 상태피드백 제어기 설계

연속시간 선형 시불변 플랜트와 정수 게인에 의한 상태 피드백 제어기를 생각하자.

$$\dot{x} = Ax + Bu, \qquad y = Cx + Du \tag{10}$$

$$u = Kx$$

이것에 대응하는 폐루프 계는

$$\dot{x} = (A + BK)x \tag{11}$$

로 된다. 폐루프 계가 안정하고 주어진 영역에 극이 존재하기 위한 상태 피드백 제어기 K는 다음의 정리 1에 의해 구해진다.

〔정리 1〕 식 (4)로 주어진 시스템에 대해서, 폐루프계가 안정하고 지정된 영역에 극이 존재하며, w에서 y까지의 전달함수 $\|G_{yw}\|_\infty < \gamma$를 만족시키는 상태 피드백 제어기 K가 존재하기 위한 필요충분조건은

$$1)\ \begin{pmatrix} M(X,Y) & \widetilde{B}_w & X\widetilde{C}_p \\ \widetilde{B}_w^{\,T} & -\gamma I & \widetilde{D}_w^{\,T} \\ \widetilde{C}_w X & \widetilde{D}_w & -\gamma I \end{pmatrix} < 0$$

$$2)\ \widetilde{A}_p X + X\widetilde{A}_p + \widetilde{B}_p Y + Y\widetilde{B}_p < -2\alpha X$$

$$3)\ \begin{bmatrix} \sin\theta A_{11} & -\cos\theta A_{12} \\ \cos\theta A_{21} & \sin\theta A_{22} \end{bmatrix} < 0$$

단, $M(X,Y) = \widetilde{A}_p X + X\widetilde{A}_p^{\,T} + \widetilde{A}_p Y + Y\widetilde{A}_p^{\,T}$

$$A_{11} = (\widetilde{A}_p X + X\widetilde{A}_p^{\,T} + \widetilde{B}_p^{\,T} Y + Y^T \widetilde{B}_p^{\,T})$$
$$A_{12} = (\widetilde{A}_p X - X\widetilde{A}_p^{\,T} + \widetilde{B}_p^{\,T} Y - Y^T \widetilde{B}_p^{\,T})$$
$$A_{21} = (\widetilde{A}_p X - X\widetilde{A}_p^{\,T} + \widetilde{B}_p^{\,T} Y - Y^T \widetilde{B}_p^{\,T})$$
$$A_{22} = (\widetilde{A}_p X + X\widetilde{A}_p^{\,T} + \widetilde{B}_p^{\,T} Y + Y^T \widetilde{B}_p^{\,T})$$

을 동시에 만족하는 정정 대칭행렬 X와 변수 Y가 존재하는 것이다.

〔증명〕 제어대상에 대한 물리 파라미터 섭동이

$$q_i^- \leqq q_i(t) \leqq q_i^+, \quad i = 1 \cdots r \tag{12}$$

와 같이 표현되면, 식 (4)로 주어지는 적분형 서보 시스템의 확대 오차계에 대한 상태공간 행렬은 다음과 같이 정리된다.

$$\widetilde{A}_p = \sum_{i=0}^{k} \alpha_i \overline{A}_i, \quad \widetilde{B}_p = \sum_{i=0}^{k} \alpha_i \overline{B}_i \tag{13}$$
$$\widetilde{C}_p = \sum_{i=0}^{k} \alpha_i \overline{C}_i, \quad \sum_{i=0}^{k} \alpha_i = 1, \quad \alpha \geqq 0,$$
$$i = 1 \cdots\cdots k, \quad k = 2^r$$

여기서 $\overline{A}_i, \overline{B}_i, \overline{C}_i$는 단점행렬이다. 따라서 정리 1에 있는 A행렬 대신에 시스템의 불확실성을 표현한 식 (13)의 행렬 $\widetilde{A}_p$을 적용한 후 이를 변수 변환하면 된다.

$$K = YX^{-1} \tag{14}$$

Table 1은 본 연구에 사용된 다층상 구조물의 각 파라미터의 공칭값이다.

Table 1: 모델의 피라미터 값

Parameter		Value	Unit
Mass	m_1	150.3	kg
	m_2	116.5	
	m_3	116.5	
	m_4	116.5	
Damping coefficient	c_1	29.12	N · s/m
	c_2	14.22	
	c_3	14.12	
	c_4	14.22	
Stiffness coefficient	k_1	23,817	N/m
	k_2	25,855	
	k_3	25,855	
	k_4	25,855	

Table 2는 다층상 구조물의 진동에 가장 큰 영향을 받는 x_4변위와 이에 관련된 물리적인 파라미터 m_4, c_4, k_4의 최소값(min.), 공칭값(nom.) 및 최대값(max.)을 나타낸 것이다.

Table 2: The values of parameter

	m_4	c_4	k_4
min.	58.25	7.11	12,928
nom.	116.50	14.22	25,855
max.	174.75	21.33	38,783

Table 3은 Table 3 제어계의 각 물리 파라미터의 변동을 9가지 경우 즉, *case_1*~*case_9*로 설정하고 이를 정리한 것이다.

Table 3: Various cases with perturbed system parameters

case	m_4	c_4	k_4
case_1	m_4_min	c_4_min	k_4_min
case_2	m_4_min	c_4_max	k_4_max
case_3	m_4_min	c_4_min	k_4_max
case_4	m_4_nom	c_4_nom	k_4_nom
case_5	m_4_nom	c_4_nom	k_4_nom
case_6	m_4_nom	c_4_nom	k_4_nom
case_7	m_4_max	c_4_min	k_4_min
case_8	m_4_max	c_4_max	k_4_min
case_9	m_4_max	c_4_max	k_4_max

이러한 물리 파라미터의 변동에 대해 식 (14)를 만족하는 상태 피드백 제어칙을 구하기 위해 우선 다층상 구조물이 가안정을 만족하도록 외부에 미소한 가상입력을 추가하고 Matlab toolbox를 이용하여 구한 결과는 다음과 같다[9].

상태 피드백 게인 :

$$F = \begin{bmatrix} 4.354\times10^{7} & -5.127\times10^{7} & 1.336\times10^{7} \\ 7.007\times10^{6} & -2.352\times10^{5} & -6.335\times10^{5} \\ 9.541\times10^{5} & 4.649\times10^{4} \end{bmatrix}$$

적분기 게인 :

$$G = [-6.5906\times10^{6}]$$

또한 비교를 위해 극 영역을 고려하지 않은 경우, 즉 시스템 안정화만을 고려한 경우에 있어 구한 상태피드백 게인은 다음과 같다.

상태 피드백 게인 :

$$F_{wo} = \begin{bmatrix} -1.845\times10^{4} & 3.834\times10^{4} & -3.635\times10^{4} \\ 1.330\times10^{4} & -4.397\times10^{2} & 1.021\times10^{3} \\ -2.060\times10^{3} & 1.572\times10^{3} \end{bmatrix}$$

적분기 게인 :

$$G_{wo} = [-1.1996\times10^{-1}]$$

Figure 5는 극 영역을 고려하여 구해진 상태피드백 제어칙을 사용하여 폐루프 시스템의 극점을 나타낸 것이며, 모두 안정영역에 존재하여 내부안정성이 확보됨을 알 수 있다.

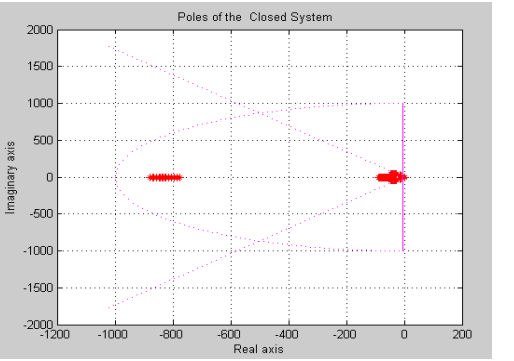


Figure 5: Poles of the closed loop system

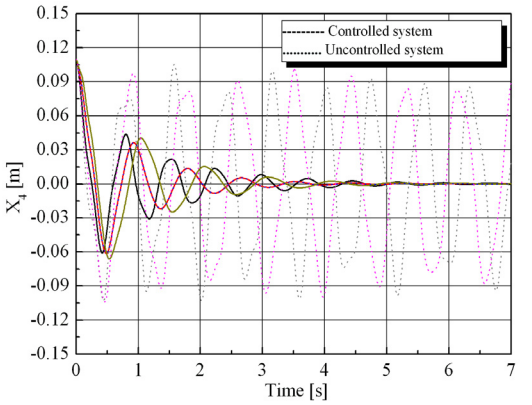
3. 시뮬레이션 및 고찰

시뮬레이션은 Figure 3과 같은 제어계를 구성한 후, Table 2와 같은 파라미터 변동에 대하여 극 영역을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대해서 다음 3가지 상황으로 나누어 수행하였다.

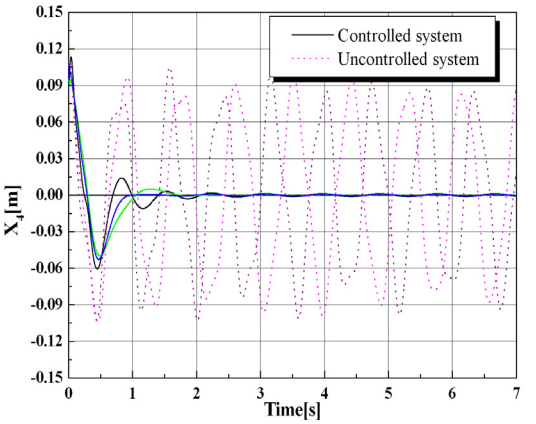
가) 비제어시와 제어시의 응답
나) 초기치 응답인 경우
다) 출력측에 스텝 외란을 가한 경우

우선 가)에 대한 시뮬레이션 결과로서, Figure 6 (a)~(b))는 제어를 하지 않은 경우(점선)와 제어를 행한 경우(실선)에 있어 극 영역을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 응답이다. 이때 파란색은 *case_1*, 적색은 *case_4*, 흑색은 *case_9*에 대

한 응답을 나타낸다. 각 그림의 횡축은 시간을 나타내며 종축은 외각 프레임을 기준으로 한 각층의 거리를 나타낸다. 이 응답실험에서는 Table 3에 제시된 *case_1*, *case_4*, *case_9*의 파라미터의 값을 이용하였다. 이 응답실험으로 알 수 있듯이 제어계를 구성한 경우가 제진특성이 우수하며, 또한 극 영역을 고려한 경우가 고려하지 않은 경우보다 적은 진동의 제진특성을 보여주고 있다. 특히 파라미터의 변동에 대해서도 극 영역을 고려한 경우가 약 2s 이내로 양호한 제어 성능을 보이고 있음을 알 수 있다.

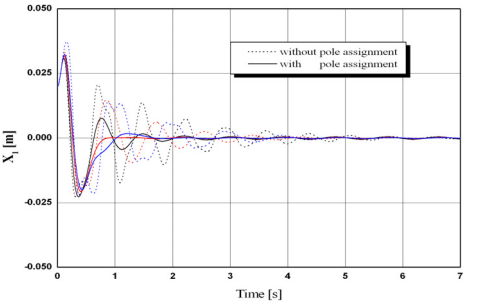


(a) Response without considering pole assignment region

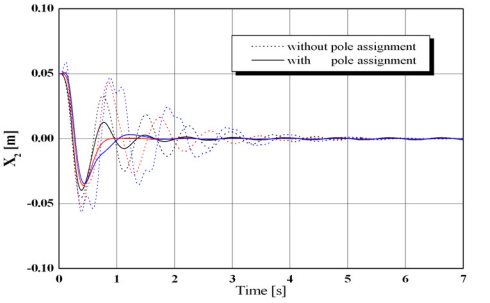


(b) Response with considering pole assignment region

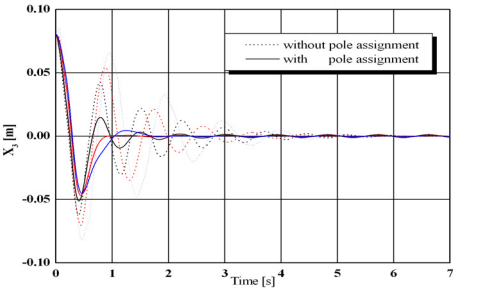
Figure 6: Responses of the controlled system and uncontrolled system



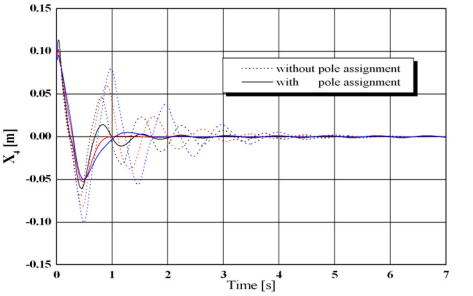
(a) Initial value response of x_1



(b) Initial value response of x_2

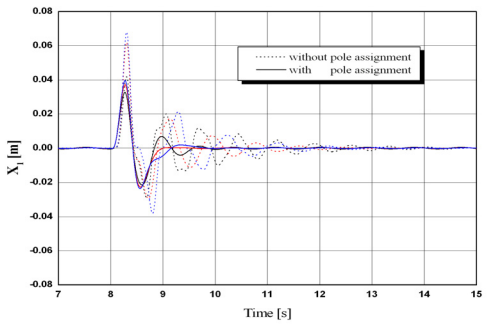


(c) Initial value response of x_3

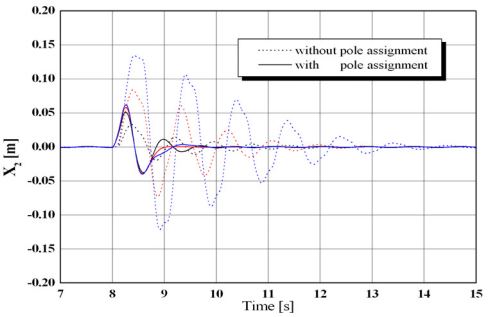


(d) Initial value response of x_4

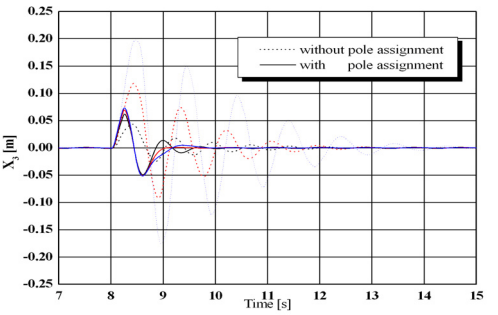
Figure 7: Initial value response



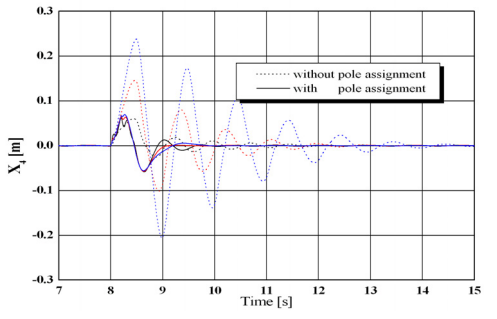
(a) Disturbance response of x_1



(b) Disturbance response of x_2



(c) Disturbance response of x_3



(d) Disturbance response of x_4

Figure 8: Disturbance response

다음은 나)에 대한 초기치 응답으로서, Figure 7(a)~(d)은 각 상태의 초기치를 x_1=0.01, x_2=0.03, x_3=0.07, x_4=0.11로 설정한 후 변위 $x_1 \sim x_4$에 대한 시간응답을 보여주고 있다. 이때 시뮬레이션을 위한 파라미터의 변동은 Table 3에 나타난 *case_1, case_4, case_9*의 값이다. 또한 Figure 7과 Figure 8에 있어 파란색은 *case_1*, 적색은 *case_4*, 흑색은 *case_9*에 대한 응답이고, 점선은 극 영역을 고려하지 않은 경우, 실선은 극 영역을 고려한 경우의 응답이다.

나)에 대한 응답으로부터 모든 파라미터의 변동에 대해 극 영역을 고려하지 않은 경우는 약 5s 이내로 제진특성을 보이지만, 시간영역의 설계사양으로 극 영역을 고려한 응답에서는 2s 이내의 제진특성을 보이고 있어 제어기의 우수함을 알 수 있다. 또한 파라미터 변동에 대해서도 시스템을 안정화하고 있어 설계된 제어기가 강인함을 알 수 있다.

마지막은 다)에 대한 시뮬레이션 결과로서, $\ddot{x}_4$에 0.2s 정도의 펄스형 외란이 인가되었을 때 $x_1 \sim x_4$의 거동을 Figure 8(a)~(d)에 보이고 있다. 이 경우에 있어 시스템에 외란을 가한 경우 모두 외란을 억제하는 제진특성을 보이고 있지만, 극 영역을 고려하지 않은 경우는 외란이 가해진 직후 큰 진동폭을 나타내고 있는데 반해 극 영역을 고려한 경우는 적은 진동폭을 보이고 있다. 이는 극 영역을 고려한 경우가 고려하지 않은 경우보다 제진특성이 우수함을 나타내며, 특히 파라미터의 변동에 대해서도 더 나은 제진 효과를 보이고 있어 극 영역을 고려하여 설계된 제어기가 우수하고 강인함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 적분형 서보계로 구성된 다층상 구조물의 제어계에 대해 과도응답 개선을 위해 시간영역의 설계사양을 설정하고, 이를 만족하는 상태 피드백 제어기를 선형행렬 부등식법으로 설계하였다. 시뮬레이션 결과로부터 극 영역을 고려한 제어계의 모든 극점은 시스템의 파라미터 변동에도 불구하고 희망하는 영역에 존재함을 알 수 있었다. 또한 시간영역의 요구사항을 설계사양에 추가함으

로써 과도응답의 개선효과가 극 영역을 고려하지 않은 경우보다 우수함을 알 수 있어 제어기 설계시 시간영역의 설계사양을 고려할 필요가 있음을 알 수 있다. 특히 극 영역을 고려하여 설계된 제어기는 물리 파라미터 변동에 대해서도 제어계의 강인성을 보증하고 있으며, 다층상 구조물의 진동억제 성능과 외란제거성능이 뛰어남을 알 수 있었다.

향후 이러한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 관측기가 추가된 실제 다층상 구조물에 대한 제어계를 구성한 후 응답실험을 행하는 것이 금후의 과제이다.

참고문헌

[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集, vol. 39, no. 6, pp. 282~285, 1995.

[2] 長松昭男 ほか, "二次元アクテイプ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, vol. 54, no. 501, pp. 1084~1089, 1987.

[3] 정해종, "다층구조물의 진동제어에 관한 연구", 부경대학교 대학원 박사학위논문, 1998.

[4] 小原, 松江, "最適化を用いた制御系設計", 日本システム/制御/情報學會, Vol. 38, No. 3, pp.138~146, 1994.

[5] S. S. Rao, 기계진동공학, 반도출판사, pp. 302~321, 1991.

[6] 池田, "2自由度積分形最適サーボ系の構成", 計測自動制御學會論文集, vol. 27, no. 8, pp. 907~914, 1991.

[7] P. Gahinet and P. Apkarian, "A linear matrix inequality approach to H_∞ control", Int. J. Robust Nonlinear Control, vol. 4, pp. 421~448, 1994.

[8] T. Iwasaki and R. E. Skelton. "All controllers for the general H_∞ control problem: LMI existence conditions and state space formulas", Automatica, vol. 30, no. 8, pp. 1307~1317, 1994.

[9] P. Gahinet, A. Nemirovskii, A. J. Laub, and M. Chilali, LMI control toolbox, The Math Works Inc., 1994.

[10] D. W. Gu, P. H. Petkov and M. M. Konstantinov, Robust Control Design with Matlab, Springer, 2005

저 자 소 개

김창화(金昌和)

1991년 부산수산대학교 기관공학과 졸업, 1993년 부경대학교 대학원 석사, 1997년 부경대학교 대학원 박사, 1997년~현재 경남정보대학 전자정보계열 부교수, 당학회 회원

정병건(鄭柄健)

1990년 한국해양대학교 대학원 석사, 1996년 부경대학교 대학원 박사, 1992~현재 한국해양대학교 해사대학 선박전자기계공학부 교수, 당학회 회원

정해종(鄭海宗)

1973년 부산수산대학교 기관학과 졸업, 1991년 부경대학교 대학원 석사, 1998년 부경대학교 대학원 박사, 1991년~현재 한국해양수산연수원 교수, 당학회 회원