끝단이 탄성 지지된 강체판의 최적진동제어

이성기† · 윤신일* · 한상보**

Optimal Vibration Control of Rigid Plate Elastically Supported at the Edges

Seongki Lee, Shinil Yun and Sangbo Han

Key Words : Optimal vibration control(최적진동제어), Rigid plate(강체판), Output feedback(출력되먹임), Multi-degree of freedom(다자유도), Relative weighting parameter(상대가중변수), Design constraint(설계제한조건), Active vibration control(능동진동제어)

Abstract

Rigid plate elastically supported at the edges is modeled and the performance of the optimal vibration control under sinusoidal excitation is tested. The controller based on the linear quadratic regulator with output feedback is designed to control the multi-degree of freedom vibration. Relative weighting parameters are considered as design constraints to determine the limitation of maximum control force and state parameters. Control force calculated by proportional output feedback of the displacement and velocity is used to suppress the vibration induced by the sinusoidal external force. The active vibration control of vibrating plate by the LQR controller is examined through the numerical simulations that show the effectiveness of optimal control scheme on the three degrees of freedom structure.

기호설명

m	:	판의 질량
θ, φ	:	C.G 기준 y, x 축방향의 회전각
k_1, k_2, k_3, k_4	:	스프링 상수 (spring constant)
l_1, l_2, l_3, l_4	:	C.G 기준 판끝단까지의 거리
a, b	:	C.G 기준 외력까지 x, y 축 방향의 거리
J_1, J_2	:	C.G 기준 y, x 축방향의 관성모멘트
f_e	:	외력
$F_{cz}, M_{c\theta}, M_{c\varphi}$	:	C.G 기준 z 축방향의 제어력 및 y, x 축방향의 제어모멘트

1. 서 론

외란에 의한 구조물의 진동제어문제는 수동제어 방법과 능동제어 방법으로 구별할 수 있다. 수동제어는 구조물의 동적특성을 변화시켜 진동의 크기를 감소시키는 방법으로 일단 구조물이 제작 완료된 경우에는 비용과 효율 측면에서 적용하기에 어려운 점이 많다. 구조물의 능동진동제어는 1972 년 Yao(1)에 의해 처음 개념이 소개되었으며, 최근 컴퓨터의 발달로 최적제어(optimal control)(2-3)는 다 자유도계 구조물의 능동진동제어에 많이 이용되고 있다.

본 연구에서는 최적제어 기법을 네 귀퉁이에서 탄성적으로 지지된 강체 평판이 외력에 의해 진동하는 경우의 진동제어에 대해 적용해 보고자 한다. 탄성적으로 지지된 강체 평판은 3 자유도계 구조물로, 강체 평판의 거동은 4 개의 탄성 지지점의 진동변위를 통하여 계측 할 수 있도록 모형화 하였다. 또한 센서에 의한 상태변수의 직접 측정이 불가능 하기 때문에 탄성 지지점에서의 출력 되먹임 제어기를 구성하였다. 상태 및 출력 사이의 관계는 상태방정식의(4-5) 출력 행렬로 나타낼 수 있으며, 시스템이 제어 가능하기 위한

† 경남대학교 대학원 기계설계학과
E-mail : skl_2002@doosanheavy.com
TEL : (055)241-1833 FAX : (055)249-2617
* 경남대학교 대학원 기계설계학과
** 경남대학교 기계자동화 공학부

필요충분 조건으로 가관측 및 가제어성[6-7]을 고려하였다. 출력되먹임 LQR(linear quadratic regulator)[7-9]제어기 설계는 성능지수를 최소화 하는 제어 이득 행렬을 구하는 것이며, 가중행렬은 상태방정식의 상태 변수와 제어력을 결정하는 LQR 문제의 설계변수가 된다. 제어력(control force)은 구조물로부터 얻은 출력값을 제어이득 행렬에 곱함으로써 얻어지며, 계산된 제어력을 시스템에 되먹여 진동을 제어 할 수 있다.

LQR 제어기를 이용하여 제어 시스템을 구성한 능동진동제어의 알고리즘에 대한 타당성을 검증하기 위하여 제시된 구조물에 대한 시뮬레이션을 수행하여 제어성능을 검토 해 보았다.

2. 탄성 지지된 강체 모델링

2.1 운동방정식

Fig.1 의 사각판에 대한 운동방정식을 구하기 위해 무게중심점을(C.G) 기준으로 z 축방향의 변위와 y 축, x 축 방향에 대하여 각각 θ, φ 만큼 회전한 자유물체도를 Fig.2 및 Fig.3 과 같이 고려한다. 외력과 제어력을 받는 구조물의 운동방정식은 θ 와 φ 만큼의 회전을 동시에 고려해야 된다. 운동변수의 양(+)의 값을 주어진 자유 물체도 대로 잡으면 수직방향에 대한 힘의 평형방정식과 C.G 에 대한 모멘트 방정식은 식 (1)과 같이 표현된다. 이때 사각판 자체의 변형은 없는 것으로 가정한다.

$$\begin{aligned} m\ddot{z} &= -k_1(z-l_1\theta-l_3\varphi)-k_2(z-l_1\theta+l_4\varphi) \\ &\quad -k_3(z+l_2\theta-l_3\varphi)-k_4(z+l_2\theta+l_4\varphi)+f_e+F_{cz} \\ J_1\ddot{\theta} &= k_1(z-l_1\theta-l_3\varphi)l_1+k_2(z-l_1\theta+l_4\varphi)l_1 \\ &\quad -k_3(z+l_2\theta-l_3\varphi)l_2-k_4(z+l_2\theta+l_4\varphi)l_2+af_e+M_{c\theta} \\ J_2\ddot{\varphi} &= k_1(z-l_1\theta-l_3\varphi)l_3-k_2(z-l_1\theta+l_4\varphi)l_4 \\ &\quad +k_3(z+l_2\theta-l_3\varphi)l_3-k_4(z+l_2\theta+l_4\varphi)l_4+bf_e+M_{c\varphi} \end{aligned} \tag{1}$$

일반적으로 n 자유도, q 개의 외력 및 m 개의 제

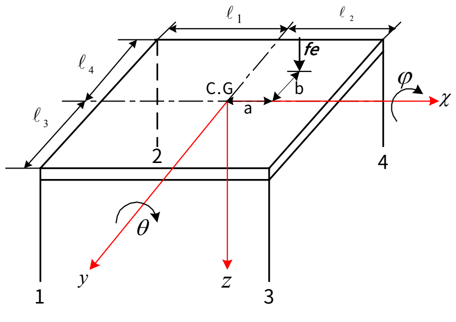


Fig.1 Schematic diagram of rigid rectangular plate

어력을 받는 구조물의 운동방정식은 다음과 같은 행렬형태로 표현할 수 있다.

$$[M]\ddot{p}(t)+[K]p(t)=[E_1]f_e(t)+[E_2]u(t) \tag{2}$$

본 모형에 대한 n x n 질량행렬[M], n x n 강성행렬[K], n x q 외력의 위치행렬[E_1] 및 n x m 제어력의 위치행렬[E_2]은 다음과 같다.

$$[M]=\begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & J_1 & 0 \\ 0 & 0 & J_2 \end{bmatrix},\ [E_1]=\begin{bmatrix} 1 \\ a \\ b \end{bmatrix},\ [E_2]=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[K]=\begin{bmatrix} k_1+k_2+k_3+k_4 & -k_1l_1-k_2l_1+k_3l_2+k_4l_2 & -k_1l_3+k_2l_4-k_3l_3+k_4l_4 \\ -k_1l_1-k_2l_1+k_3l_2+k_4l_2 & k_1l_1^2+k_2l_1^2+k_3l_2^2+k_4l_2^2 & k_1l_1l_3-k_2l_1l_4-k_3l_2l_3+k_4l_2l_4 \\ -k_1l_3+k_2l_4-k_3l_3+k_4l_4 & k_1l_1l_3-k_2l_1l_4-k_3l_2l_3+k_4l_2l_4 & k_1l_3^2+k_2l_4^2+k_3l_3^2+k_4l_4^2 \end{bmatrix}$$

또한 q x 1 외력벡터 $f_e(t)$는 단일입력(single input)으로 가정하고 n x 1 상태벡터 $p(t)$와 m x 1 제어력 벡터 $u(t)$는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p(t)=[z(t)\ \ \theta(t)\ \ \varphi(t)]^T\ ,\ u(t)=[F_{cz}\ \ M_{c\theta}\ \ M_{c\varphi}]^T$$

2.2 상태공간방정식

선형 미분 방정식으로 표현되는 시스템은 상태변수를 정의함으로써 1 차의 상태벡터와 행렬로 조합된 상태 방정식으로 나타낼 수 있다. 상태벡터 $x(t)$를 다음과 같이 정의하면,

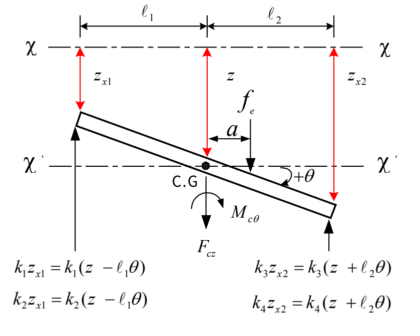


Fig.2 F.B.D of plate viewed on y-axis

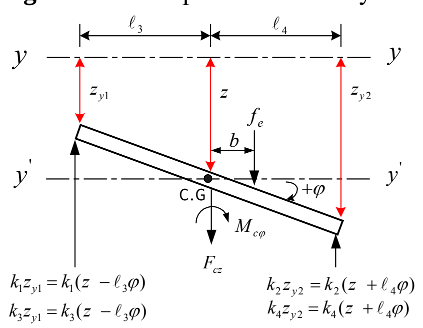


Fig.3 F.B.D of plate viewed on x-axis

$$x(t)=[x_1(t)\ \ x_2(t)]^T=[p(t)\ \ \dot{p}(t)]^T \tag{3}$$

식 (2)는 다음과 같은 상태방정식으로 표현된다.

$$\dot{x}(t)=[A]x(t)+[B]u(t)+[E]f_e(t) \tag{4}$$

$$[A]=\begin{bmatrix}0 & I\\ -M^{-1}K & 0\end{bmatrix},\ [B]=\begin{bmatrix}0\\ M^{-1}E_2\end{bmatrix}$$

$$[E]=\begin{bmatrix}0\\ M^{-1}E_1\end{bmatrix}$$

본 모형에 대한 2n x 2n 시스템 행렬[A], 2n x m 제어행렬[B], 2n x q 외력행렬[E], 2n x 1 상태벡터 $x(t)$, m x 1 제어력벡터 $u(t)$는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 이때 q x 1 외력벡터 $f_e(t)$는 본 연구에서 단일 입력만을 고려하였다.

$$x(t)=[x_1\ \ x_2\ \ x_3\ \ x_4\ \ x_5\ \ x_6]^T=[z\ \ \theta\ \ \varphi\ \ \dot{z}\ \ \dot{\theta}\ \ \dot{\varphi}]^T$$

$$u(t)=[F_{cz}\ \ M_{c\theta}\ \ M_{c\varphi}]^T$$

$$[A]=\begin{bmatrix}0(3x3) & I(3x3)\\ -M^{-1}K & 0(3x3)\end{bmatrix} \tag{5}$$

$$[B]=\begin{bmatrix} & 0(3x3) & \\ \hline 1/m & 0 & 0\\ 0 & 1/J_1 & 0\\ 0 & 0 & 1/J_2\end{bmatrix},\ [E]=\begin{bmatrix}0(3x1)\\ \hline 1/m\\ a/J_1\\ b/J_2\end{bmatrix}$$

여기서 시스템행렬[A]의 $-M^{-1}K$ 는 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} -1/m(k_1+k_2+k_3+k_4) & -1/m(-k_1l_1-k_2l_1+k_3l_2+k_4l_2) & -1/m(-k_1l_3+k_2l_4-k_3l_3+k_4l_4)\\ -1/J_1(-k_1l_1-k_2l_1+k_3l_2+k_4l_2) & -1/J_1(k_1l_1^2+k_2l_1^2+k_3l_2^2+k_4l_2^2) & -1/J_1(k_1l_1l_3-k_2l_1l_4-k_3l_2l_3+k_4l_2l_4)\\ -1/J_2(-k_1l_3+k_2l_4-k_3l_3+k_4l_4) & -1/J_2(k_1l_1l_3-k_2l_1l_4-k_3l_2l_3+k_4l_2l_4) & -1/J_2(k_1l_3^2+k_2l_4^2+k_3l_3^2+k_4l_4^2)\end{bmatrix}$$

상태의 일부 혹은 그 조합인 r 개의 출력값을 갖는 r x 1 출력벡터 $y(t)$를 나타내는 출력방정식은 식 (6)과 같다.

$$y(t)=[C]x(t)+[D]u(t) \tag{6}$$

여기서 [C]는 r x 2n 출력행렬이고 센서의 위치에 따라 각 요소의 값이 달라진다. [D]는 r x m 인 0 행렬이다. 본 모형에 대한 출력행렬은 상태벡터 $(x(t))$의 측정 가능성을 고려해야 된다. 즉 상태벡터 $(x,\theta,\varphi,\dot{x},\dot{\theta},\dot{\varphi})$ 는 사각판 C.G 에서의 변위, 각도 및 속도와 각속도를 나타내기 때문에 센서에 의한 측정이 불가능하다. 따라서 측정(센서)에 의한 출력값의 위치는 사각판을 지탱하고 있는 지지대에서 측정된 변위를 고려하도록 한다. Fig.1 로부터 지지대 1, 2, 3, 4 에 대한 상하 방향의 변위 z_1, z_2, z_3, z_4에 대하여 z, θ, φ 와의 관계식은

$$\begin{aligned} z_1 &= z-l_1\theta-l_3\varphi\ ,\ \ z_2=z-l_1\theta+l_4\varphi\\ z_3 &= z+l_2\theta-l_3\varphi\ ,\ \ z_4=z+l_2\theta+l_4\varphi \end{aligned} \tag{7}$$

이며, 상태벡터와 측정지점의 위치, 속도와의 관계를 나타내는 출력 행렬[C]는 식 (7)을 고려하여 다음의 행렬식으로 나타낸다.

$$[C]=\begin{bmatrix}CC & 0(4x3)\\ 0(4x3) & CC\end{bmatrix},\ [CC]=\begin{bmatrix}1 & -l_1 & -l_3\\ 1 & -l_1 & l_4\\ 1 & l_2 & -l_3\\ 1 & l_2 & l_4\end{bmatrix}, \tag{8}$$

본 모형에서 $y(t)$는 식 (6)의 출력방정식으로부터 지지대 1,2,3,4 에 대한 변위와 속도를 나타내는 8 x 1 출력벡터 이다.

3. 제어기 설계

3.1 가제어성과 가관측성

제어 시스템 설계 문제에서 완전해의 존재를 결정하는 중요한 요소는 시스템의 가제어성(controllability)과 가관측성(observability)이다. 식 (4)와 식(6)에서 외력을 제외한 상태 및 출력 방정식

$$\begin{aligned}\dot{x}(t)&=[A]x(t)+[B]u(t)\\ y(t)&=[C]x(t)+[D]u(t)\end{aligned} \tag{9}$$

으로부터 시스템이 가제어이면 초기상태에서 임의의 최종상태로 유한시간 $t_0 \le t \le t_1$ 내에 이동시킬 수 있는 제어입력 $u(t)$를 구성할 수 있다.

모든 상태가 가제어성인 완전상태 가제어성의 조건은 식 (9)의 상태방정식에서 가제어성 2n x 2n·m 행렬

$$\left[B \mid AB \mid A^2B \mid \cdots \mid A^{2n-1}B\right]$$

의 차수(rank)가 2n 이면 된다. 그러나 본 모형에서는 시스템의 상태보다는 출력을 제어 하려고 한다. 따라서 완전 출력 가제어성(7)을 별도로 정의하면, 다음의 출력가제어성 r x (2n+1)m 행렬

$$\left[CB \mid CAB \mid CA^2B \mid \cdots \mid CA^{2n-1}B \mid D\right]$$

의 차수(rank)가 r 일 때 시스템에서 출력을 제어하기 위한 필요 충분 조건이 된다.

또한 시스템이 완전 가관측이면 모든 상태 $x(t_0)$가 유한시간 $t_0 \le t \le t_1$ 동안의 출력 $y(t)$의 관측에 의해 구하여질 수 있다.

시스템이 완전 가관측일 필요충분조건은 아래의 가관측성 2n x 2n·r 행렬

$$\left[C^T \mid A^T C^T \mid (A^T)^2 C^T \mid \cdots \mid (A^T)^{2n-1} C^T\right]$$

의 차수(rank)가 2n 이면 된다. 본 모형에 대한 출력가제어성 8 x 21 행렬 및 가관측성 6 x 48 행렬의 차수는 각각 8, 6 이며 이는 완전해가 존재함을 보인다.

3.2 출력되먹임을 갖는 Linear Quadratic Regulator

식 (4)와 식(6)의 상태 및 출력방정식으로부터

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= [A]x(t) + [B]u(t) + [E]f_e(t) \\ y(t) &= [C]x(t) + [D]u(t) \end{aligned} \tag{10}$$

시스템(A, B)가 제어가능하고 (A, C)가 관측가능하다는 가정 아래서 출력 되먹임 제어력 *u(t)*를 아래와 같이 하면,

$u(t) = -Ky(t)$

폐루프 시스템의 상태공간 모델은 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{x}(t) = [A - BKC]x(t) + [E]f_e(t) \tag{11}$$

본 연구에서 제어문제는 식 (11)의 상태변수 *x(t)*를 최소화 시키는 출력 되먹임 제어이득 K 를 구하는 것이다. 식 (9)와 같이 외력을 제외한 상태 및 출력방정식에 대하여 상태 되먹임 제어력을 $u(t) = -Kx(t)$라 할 때, LQR 문제는 상태방정식을 만족하고 식 (12)의 2 차 목적함수(quadratic objective function)를 최소화 시키는 제어 이득값 K 를 구하는 것이다.

$$J = \frac{1}{2}\int_0^T (x^T Qx + u^T Ru)dt \tag{12}$$

여기서 Q 는 2n x 2n 대칭 양의 반한정행렬(symmetric, positive semi-definite)이고, R 은 m x m 대칭 양의 한정행렬(symmetric, positive definite)이다. 가중행렬 Q, R 은 상태변수 *x(t)*와 제어입력 *u(t)*를 결정하는 LQR 문제의 설계변수로 사용된다. 제어이론에서 성능지수(2 차목적함수)를 최소화 시키는 해는

$$u(t) = -Kx(t) = -R^{-1}B^T Px(t)$$

이 되고, P 는 다음의 Riccati 방정식을 만족한다.

$$A^T P + PA + Q - PBR^{-1}B^T P = 0$$

본 연구에서는 상태와 출력 되먹임 제어이득 사이의 관계를 먼저 정의하고, Riccati 방정식을 풀어 최적 제어 이득을 구하는 Matlab 함수(10-11)를 이용하여 LQR 문제의 해를 구하였다.

3.3 설계제한조건

설계제한이란 구조물의 상태(변위, 각도, 속도, 각속도)와 제어력을 허용범위 내에 두는 것이다. 특히 제어력은 효율적 측면을 고려하여 상태 제한 조건을 만족하면서 상대적으로 작은 값을 가져야 한다. 제어기 설계시 고려되는 설계제한 조건은 식 (13)으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} -x_{i,\max} < x_i < x_{i,\max} \qquad & i = 1,\cdots,n \\ -u_{j,\max} < u_j < u_{j,\max} \qquad & j = 1,\cdots,r \end{aligned} \tag{13}$$

제어시 시스템의 상태와 제어력이 식 (13)을 만족할 수 있도록 하기 위해 성능지수의 Q, R 행렬을 적절히 결정한다. 가중행렬 Q, R 은 구조물의 상태와 제어력간의 가중치를 나타내며, R 에 비해서 Q 를 크게 잡는 것은 시스템의 상태를 빨리 0 으로 수렴시킬 수 있으며, 제어력은 상대적으로 더 많이 필요하게 된다. 또한 Q 에 비해서 R 의 값이 클수록 제어력 최소화에 대한 가중치가 커져서 작은 제어력을 사용하는 시스템을 설계할 수 있다. 본 연구에서는 주어진 제한 조건을 만족할 수 있게 하기 위해 성능지수의 Q, R 행렬을 식(14)에서와 같이

$$\begin{aligned} [Q] &= diag(n_1, n_2, \cdots, n_8) \qquad n_1, n_2, \cdots, n_8 = 1 \\ [R] &= \rho \cdot diag(m_1, m_2, m_3, m_4) \quad m_1, m_2, m_3, m_4 = 1 \end{aligned} \tag{14}$$

가중변수 ρ 의 값을 조정함으로써 설계목적에 적합한 제어기를 구성한다.

4. 제어 성능 고찰

4.1 시뮬레이션 모델

외력에 의해 진동하는 판을 상태 방정식으로 표현하고, LQR 제어방법을 통해 출력을 되물림하는 능동제어 시스템을 구성하였다. 시뮬레이션을 위한 구조물로는 Fig.1 과 같은 사각 진동판을 사용하였고, 구조물에 대한 주요 특성치는 Table 1 과 같다. 진동판은 힘의 크기가 최대 10N, 가진 주파수는 구조물의 고유진동수(1 차 : 18.8Hz, 2 차 : 32.7Hz)를 전후로 15Hz, 25Hz, 40Hz 로 하여 정현파 외력에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

제어기 설계에 있어서 제어력의 제한조건은 각 지지대에서 최대 5N 으로 외력 10N 의 50%미만으로 제한하였다. 상태제한조건은 제어를 하지 않았을 때 발생하는 사각평면의 변위, 각도의 15%이하가 되도록 하였다.

구조물의 주요 특성치에 대한 운동방정식을 행렬로 나타내면

$$[M]=\begin{bmatrix}0.25 & 0 & 0\\ 0 & 0.0017 & 0\\ 0 & 0 & 0.0008\end{bmatrix},\quad [E_1]=\begin{bmatrix}1\\ 0.03\\ 0.03\end{bmatrix}$$

$$[K]=\begin{bmatrix}3520 & -26.4 & -17.6\\ -26.4 & 71.7 & 0.1\\ -17.6 & 0.1 & 31.9\end{bmatrix},\quad [E_2]=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

과같다. 시뮬레이션은 Matlab Program 의 Simulink 를 이용했으며 모형의 블록선도는 Fig.4 와 같다.

4.2 시뮬레이션 결과

설정된 설계제한조건을 기준으로 가중변수 ρ 를 변화시켜 가면서 각각의 경우에 따라 제어이득을 구하고 시뮬레이션을 수행한 결과들을 Fig.5, 6 과 Table 2, 3, 4 에 나타내었다.

Fig.5 는 가중변수 ρ 값에 따른 각 지지대의 최대 제어력 및 최대 변위와 각도응답을 가진 주파수 15Hz, 25Hz, 40Hz 에 대해서 그래프로 나타낸 것이다. ρ 값이 작아짐에 따라 최대 제어력이 커지고 그에 따른 응답(z, θ, φ)은 작아짐을 보인다. 가중변수 $\log\rho$=-3 인 경우에 상태 및 제어력의 제한 값이 제한범위(제어력 ≤5N, z, θ, φ ≤ 15%)내에 있는 적절한 설계변수 값이 된다.

Fig.6 은 가중변수 $\log\rho$ = -3 에 대한 변위와 각도응답을 제어시와 비제어시에 따라서 시간 이력으로 나타낸 것이다. 비제어시 응답과 비교하여 제어시의 최대변위가 15%이하로 줄어드는 결과를 보여준다.

Table 2 에서는 설계 제한 조건을 만족하는 지지대의 최대 제어력을 각각의 가진 주파에 대해서 표로 나타내었다. Table 3 에서는 최대변위(z)와 최대각도응답(θ, φ)및 제어비를 보여준다. 또한 Table 4 에서는 출력제어이득을 나타낸다.

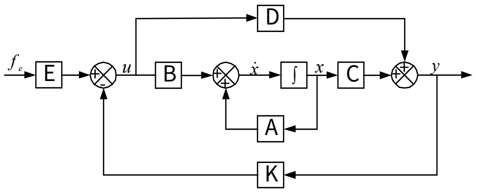


Fig.4 Block diagram of output feedback control

Table 1 Properties of vibrating plate

m	0.25	Kg
J_1, J_2	0.0017, 0.00075	Kgm^2
k_1, k_2, k_3, k_4	880	N/m
Dimensions	285(L) x 190(W) x 1.5(H)	mm
l_1, l_2, l_3, l_4	150, 135, 100, 90	mm
a, b	30, 30	mm

Table 2 Maximum control force for each frequency

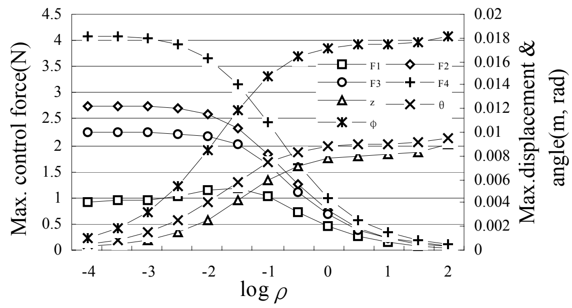
Freq. (Hz)	log ρ	Max. control force(N)			
		f_1	f_2	f_3	f_4
15	-3	0.96	2.74	2.23	4.03
25		0.97	2.74	2.22	4.03
40		0.93	2.58	2.08	3.83

Table 3 Maximum state responses(z, θ, φ) for each frequency

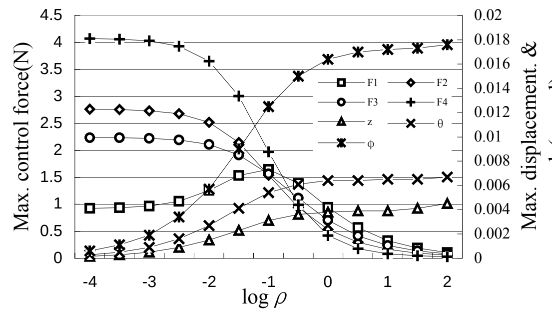
Freq. (Hz)	log ρ	Max. displacement & angle on C.G of plate(m, radian)			Control ratio(%)		
		z	θ	φ	z	θ	φ
15	-3	0.0009	0.0015	0.0032	94	92	90
25		0.0005	0.0009	0.0019	94	96	94
40		0.0003	0.0006	0.0012	81	97	96

Table 4 Output control gains

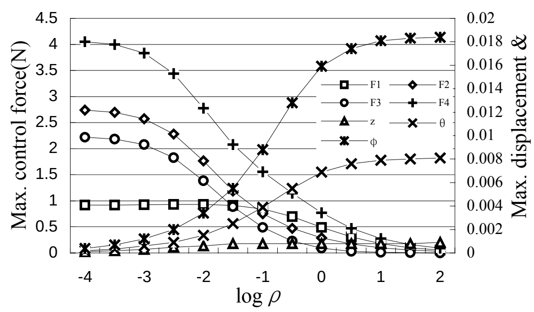
logρ	Output control gains(8 x 4 matrix)							
-3	0.43	0.14	0.14	-0.14	23.72	7.91	7.91	-7.90
	0.14	0.43	-0.14	0.14	7.91	23.72	-7.90	7.91
	0.14	-0.14	0.43	0.14	7.90	-7.90	23.72	7.90
	-0.14	0.14	0.14	0.43	-7.90	7.91	7.91	23.72



(a) Frequency 15Hz

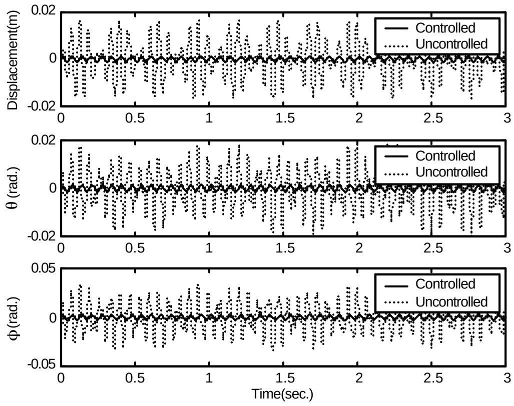


(b) Frequency 25Hz

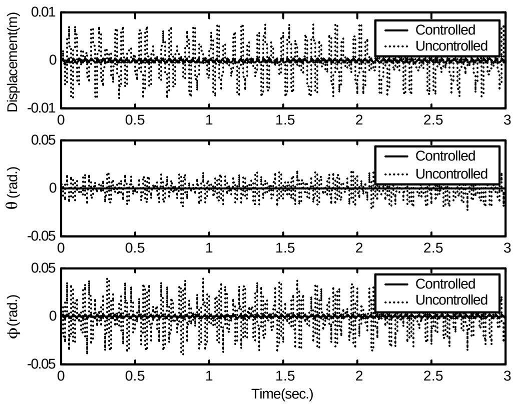


(c) Frequency 40Hz

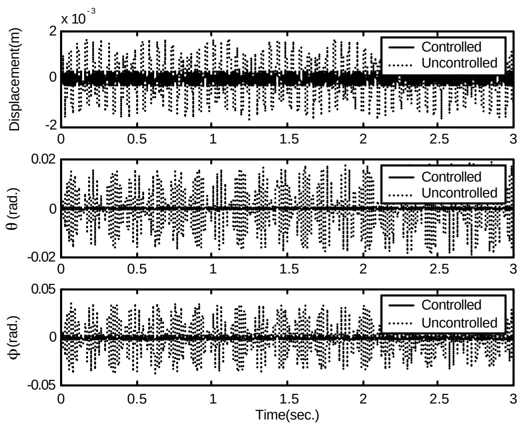
Fig.5 The comparison between max. control force and max. state responses(z, θ, φ)



(a) Frequency 15Hz



(b) Frequency 25Hz



(c) Frequency 40Hz

Fig.6 Comparison of displacement and angle responses on r = -3 during controlled and uncontrolled

5. 결 론

진동판의 능동진동제어에 적합한 제어 알고리즘을 제시하고 시뮬레이션을 통해 효과를 입증하였다. 최적제어기법 중의 하나인 출력되먹임 LQR 을 사용하여 3 자유도와 제한된 센서의 개수를 가진 사각판의 진동제어 문제를 고려하였으며, 구조물의 상태 및 제어력을 설계제한조건으로 제어기를 설계하였다.

모델링 대상구조물로 정현파 외력을 받는 3 자유도계 사각판은 시스템의 상태변수(변위 속도, 각도, 각속도)에 시뮬레이션을 통해 얻은 적절한 제어이득을 가지고 설정한 제어력 및 상태제한조건을 만족시키는 제어기 설계가 가능함을 보였다. 특정한 외력에 대한 설계제한조건을 만족하는 제어기는 일반적인 외력에 대해서도 최적의 제어기로 사용될 수 있음을 가진 주파수 변화에 따른 시뮬레이션을 통해 입증하였다.

최근 능동진동제어에 관한 연구는 다양한 기능성 소재들에 대한 연구와 함께 이루어지고 있으며, 이러한 소재를 감지기 및 작동기로 사용하고 실 모형에 적용하기 위하여 구조물에 대한 실험이 필요하다.

참고문헌

(1) Hyun Moo Koh, Kwan Soon Park, Won Suk Park, 1995, "Active Control of Structural Vibration by Optimal Output Feedback Controller Considering Design Constraints", KSEC report, Vol 15, pp. 1535~1544.

(2) James R. Rowland, 1986, “Linear Control Systems : Modeling, Analysis and Design”, John Wiley & Sons, pp. 469~484.

(3) Sergey Edward Lyshevski, 2001, “Control Systems Theory with Engineering Applications”, Birkhauser, pp. 142~148 & 204~206.

(4) Charles L. Phillips, Royce D. Harbor, 1988, “Feedback Control Systems”, Prentice-Hall, pp. 73~76 & 536~538.

(5) Gene F. Franklin, J. David Powell, 1991, Feedback Control of Dynamic Systems”, 2nd ed., Addison-Wesley, pp. 361~364.

(6) Richard C. Dorf, Robert H. Bishop, 1998, “Modern Control Systems”, 8th ed., Addison-Wesley, pp. 641~645.

(7) Katsuhiko Ogata, 1990, “Modern Control Engineering”, 2nd ed., Prentice-Hall, Vol III, pp. 682~695 & 817~826.

(8) Robert E. Skelton, 1988, “Dynamic Systems Control : Linear Systems Analysis and Synthesis”, John Wiley & Sons, pp. 344~351.

(9) Donald E. Kirk, 1970, “Optimal Control Theory_An Introduction”, Prentice-Hall, pp. 209~227.

(10) Hadi Saadat, 1993, “Computational Aids in Control System using Matlab”, Mc Graw-Hill, pp. 126~133.

(11) Bahram Shahiam, Michael Hassul, 1993, “Control System Design using Matlab”, Prentice-Hall, pp. 366~371.