모델기반 신경망 제어기를 이용한 열린 박스 구조물의 진동제어

장승익† · 신윤덕* · 기창두**

Active Vibration Control of a Opened Box Structure By a Model Reference Neuro-Controller

Seung Ik Jang, Yun De Shen and Chang Doo Kee

Key Words : Neuro-Controller(신경망제어기), Piezoelectric Material(압전재료), Opened box-structure(열린박스 구조물), Adaptive Vibration Control(적응진동제어)

Abstract

Vibration causes noise and sometimes makes structure unstable. Especially, due to the efforts of lightening, deformation of flexible structure is increased in its shape. Just a little disturbance can cause vibration and low damping ratio makes residual vibration last long time. This research is concerned with the model reference neuro-controller design for the vibration suppression of smart structures. By using a model reference neuro-controller, which is one of the algorithms of adaptive control, we performed an adaptive control of flexible cantilever plate and opened box structure with piezoelectric materials. The proposed adaptive vibration control algorithm, a model reference neuro-controller, was proved in its effectiveness by applying to an opened box structure. The model reference neuro-controller is implemented with DSP, and the real-time adaptive vibration control experiment results confirm that the model reference neuro-controller is reliable.

1. 서 론

박스 구조물은 정적 하중에 대한 안정성과 강성, 진동 특성에 대한 안정성 그리고 충격을 받을 때 에너지 흡수 등을 위하여 많이 적용되고 있다. 이러한 특성 때문에 박스 구조물의 기계적인 거동에 많은 관심이 집중 되고 있으며, 특히 유연 구조물의 기계적인 거동에 상당한 관심이 집중되고 있다.

유연 구조물의 진동 제어를 위한 가진기와 센서로 사용되고 있는 매체에는 여러 종류가 있는데 이 중에서 PZT(lead zirconate titanate)와 PVDF (polyvinylidence flourede)는 진동의 가진과 측정에서 좋은 정확도를 보이고 반작용 없이 큰 힘을 발생시킬 수 있으며 경량, 소형, 저렴한 가격 등의 장점을 가지고 있어, 진동제어를 위한 가진기와 센서로 널리 이용되고 있다.

Bailey[(1)]는 PVDF 압전체를 외팔보 전체에 부착하고 리아프노프(Lyapunov) 제어기법에 의하여 진동이 감소됨을 실험하였다. Dimitriadis[(2)]는 PZT 압전체에 의한 단순지지 평판의 진동을 이론적으로 해석하였고, Falangas[(3)]는 PZT 압전가진기와 가속도계를 사용하여 고정단 평판의 진동을 제어하였고 Hwang[(4)]는 평판의 진동제어를 위한 압전감도 함수를 제시하고 진동제어 실험을 통하여 이 압전감도함수의 유용성을 보였다. 이러한 보와 평판 구조물의 진동 제어에 압전재료 사용의 효용성을 보여준 연구사례들은 많으나 박스 구조물에 대해서는 연구결과가 극히 드물다.

또한 신윤덕[(7)]은 박스구조물에 지도학습 방법을 이용한 신경망 제어기를 적용하였다. 본 연구에서는 시스템 동정화와 신경망 제어기의 학습을 실시간으로 수행하였으며 기준입력을 도입하여 이를 추종하도록 제어기를 설계하였다. 그리고 두께와 재질이 같은 정사각형 평판이 박스형으로 연결된 열린박스 구조물의 진동특성의 해석방법을 연구하였다. 각각의 판의 경계에서 발생하는 모멘트

† 전남대학교 대학원
E-mail : j9424080@empal.com
TEL : (062)530-0210 FAX : (062)530-1680
* 전남대학교 대학원
** 전남대학교

를 외력으로 간주하면 단일판의 모드를 이용하여 지배방정식의 해를 표현할 수 있으며 모멘트에 대한 연립방정식의 해를 풀어 최종적으로 진동변위를 구하는 방법을 제시하였다. 동적모델링하는데 있어서 두 평판의 공통 끝단을 연결하는 결합부가 강체라는 가정을 하였고 굽힘파(bending wave)의 전달만 고려하였다. 그러나 실제로는 비틀림 모드도 존재하나 작은 하중이 작용하는 강체의 진동해석에서 비틀림모드를 생략하여도 큰 오차가 발생하지 않아서 연산의 간결성을 위해 생략하였다. 실험 모델에 대해 FEM 해석을 수행하였으며 진동제어 실험을 통하여 모델 기반 신경망 제어기의 유용성을 검증하였다.

2. 열린 박스구조물의 운동 방정식과 압전재료의 부착위치

2.1 열린 박스구조물의 모델링

두께와 재질이 같은 열린박스 구조물은 Fig.1 에 보여지는것과 같다. 박스의 네 평판들은 평판 ABCD 를 오른쪽 방향으로 회전하는 형태로 되면 A, B, G, H 네 모서리를 고정하고 인접된 두 평판의 공통 끝단을 연결하는 결합부가 강체이고 경계에서 발생하는 모멘트를 외력으로 간주한다면 박스의 네 평판은 다음과 같은 경계조건을 갖는 단일평판으로 모델링할 수 있다. 즉, 면 ABCD(면 1)는 AB 와 CD 에서 각각 단순 지지단와 용수철 지지단으로 된 평면으로, 면 CDEF(면 2)는 CD 와 EF 에서 각각 단순 지지된 평면으로, 면 FEGH(면 3)는 FE 와 GH 에서 각각 단순 지지단와 용수철 지지단으로 된 평면으로, 면 ABGH (면 4)는 AB 와 GH 에 각각 용수철 지지단으로 된 단일판으로 가정된다[5].

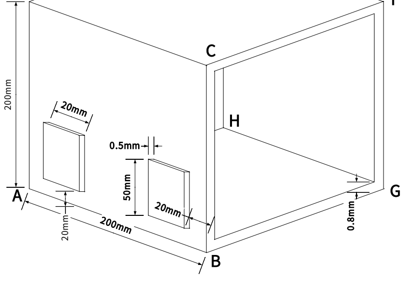


Fig.1 A typical open box

이때 정사각형 평판 i (i =1,2,3,4)에서 단순 조화하중 $F(i\omega t)$ 가 점 $A(x_{ia}, y_{ia})$ 에 작용할 때 평판의 굽힘진동 변위 $W_i(x_i, y_i, t)$ 는 경계에서 발생하는 모멘트를 외력으로 간주하면 다음 식에 의해 지배된다.[6]

$$D_i \nabla^4 W_i - \rho_i \omega^2 W_i = F\delta(x_i - x_{ia}, y_i - y_{ia})$$
$$+ T_{x0}(y_{ia})\dot{\delta}(x_{ia}) + T_{xL}(y_{ia})\dot{\delta}(x_{ia} - L_{ix})$$
$$+ T_{x0}(y_{ia})\dot{\delta}(x_{ia}) + T_{xL}(y_{ia})\dot{\delta}(x_{ia} - L_{ix})) \quad (1)$$

여기서,

$D_i = E_i h_i / 12(1 - \mu_i^2)$

ρ_i : 면 밀도

L_{ix}, L_{iy} : (x_i, y_i) 방향으로의 길이

T_{x0}, T_{xL} : $x_i = 0$, L_{ix} 에서 발생하는 모멘트

T_{y0}, T_{yL} : $y_i = 0$, L_{iy} 에서 발생하는 모멘트

E_i : 탄성계수

h_i : 판 i 의 두께

2.2 경계조건에 따른 단일 평판의 처짐

단일평판 ABGH 의 경계조건은

$$W_i = 0, \; EI\frac{\partial^2 W_i}{\partial x^2} = 0 \quad (x = 0, \quad x = a) \quad (2)$$

이므로 다음과 같이 처짐식을 가정할 수 있다.

$$W_i(x, y) = D_i \sin\frac{n\pi y}{b} \sin\frac{m\pi x}{a} \quad (2a)$$

단일평판 ABCD 와 FEGH 의 경계조건은

$$W_i = 0, \; EI\frac{\partial^2 W_i}{\partial x^2} = 0 \quad (x = 0)$$
$$\frac{\partial}{\partial x}[EI\frac{\partial^2 W_i}{\partial x^2}] = -K_{ie}W_i, \; EI\frac{\partial^2 W_i}{\partial x^2} = 0, \; (x = a) \quad (3)$$

여기서, K_{ie} 는 대응되는 평판의 등가용수철 상수이다.

단일평판 CDEF 의 경계조건은

$$\frac{\partial}{\partial x}[EI\frac{\partial^2 W_i}{\partial x^2}] = -K_{ie}W_i, \; EI\frac{\partial^2 W_i}{\partial x^2} = 0 \quad (4)$$
$$(x = 0, \quad x = a)$$

여기서, 구조물의 거동을 정확히 표현하기 위해서 두 평판의 인접부 CD 와 FE 에서 인접한 평판의 횡변위를 내평면 변위와 일치한다고 가정하였다.

2.3 단일평판의 운동 방정식과 압전체 부착위치

압전체는 전기-기계적 에너지 변환이 우수하고 두께 방향에 수직이되는 두 방향으로 등방성

(trans- versely isotropic)이 되는 물질로서, 평판의 일부분에 압전체를 부착하여 외부로부터 전계를 인가하여 굽힘 모멘트 $M(x,y,t)$ 를 발생시킬 수 있다. 압전체에 인가한 전압을 $u(t)$ 라 하면, 평판의 굽힘 모멘트 $M(x,y,t)$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V(x,y,t)=[H(x-x_1)-H(x-x_2)]\times [H(y-y_1)-H(y-y_2)]\cdot u(t)$$

$$M_x(x,y,t)=M_y(x,y,t) = -\eta_P V(x,y,t) \quad (5)$$

$$\eta_p=\frac{1}{2}d_{31}Y_1h_1(h_1+h_2)$$

여기서 $V(x,y,t)$ 는 압전체에 인가된 전압분포를 나타내고 $M_x(x,y,t)$ 와 $M_y(x,y,t)$ 는 각기 x 와 y 방향의 굽힘 모멘트이고 η_p 는 인가 전압에 의한 굽힘 모멘트 계수이며, h_1 , h_2 , d_{31} , Y_1 은 각각 압전체의 두께, 평판의 두께, 전계에 대한 압전변형 계수, 압전체의 영률이며 $H(x)$ 는 단위계단함수이다.

평판의 진동에 대하여 압전체에 평면 응력이 작용하므로 x 와 y 방향의 변형률과 압전체에 발생되는 전기적 변위 D_3 은 다음과 같다.

$$S_1=s_{11}^E T_1+s_{12}^E T_2$$

$$S_2=s_{12}^E T_1+s_{11}^E T_2$$

$$D_3= \frac{d_{31}h}{s_{11}^E+s_{12}^E}\left[\frac{\partial\omega^2(x,y,t)}{\partial x^2}+\frac{\partial\omega^2(x,y.,t)}{\partial y^2}\right] \quad (6)$$

단순 지지단이 $x=0$ 이고 용수철 지지단이 $x=a$ 인 균일한 얇은 평판의 진동 감쇠비는 매우 작으므로 이를 무시하면, 평판의 국소부에 부착한 압전 가진기에 의한 평판의 진동 변위 $\omega(x,y,t)$ 는 아래의 식으로 주어진다[(1)].

$$\rho_a h\ddot{\omega}(x,y,t)+\frac{Eh^3}{12(1-\mu)}\nabla^4\omega(x,y,t) =\nabla^2 M(x,y,t) \qquad 0\le x\le a \quad (7)$$

여기서, ρ_a , h , E 및 μ 는 각기 평판의 면 밀도, 평판의 두께, 영률 및 프아송 비로서 고정단과 자유단에서의 경계조건들은 다음과 같다.

$$\omega(x,y,t)=\frac{\partial\omega(x,y,t)}{\partial x}=0,\ \text{for}\ \ x=0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2\omega(x,y,t)}{\partial x^2}=\frac{\partial^3\omega(x,y,t)}{\partial x^3}=0,\ \text{for}\ x=1 \quad (9)$$

평판의 진동변위 $\omega(x,y,t)$ 는 무한개의 진동모드들의 합으로 구해지며, 각 진동모드는 시간함수들과 진동형상을 나타내는 고유함수의 곱으로 표현할 수 있다.

$$\omega(x,y,t)=\sum_{i=1}^{\infty}\phi_i(x,y)q_i(t) \quad (10)$$

여기서, 첨자 i 는 진동모드의 차수이며, $\phi_i(x,y)$ 는 평판의 i 번째 고유함수이고, $q_i(t)$ 는 평판의 i 번째 고유좌표이다.

고유함수의 직교성(orthogonality)과 경계조건을 이용하면 평판의 진동은 각 진동모드 별로의 운동으로 나타낼 수 있으며 압전체가 부착된 단측 고정평판의 운동 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\ddot{q}_i(t)+\omega_i^2 q_i(t) =\int_0^a\int_0^a\bar{\phi}_i(x,y)\nabla^2 M(x,y,t)dxdy \quad (11)$$

$$i=1,2,3,\cdots$$

여기서 ω_i 는 평판의 i 번째 고유주파수(rad/sec)이고 $\bar{\phi}_i(x,y)$ 는 아래와 같이 정규화된 고유함수이다.

$$\rho_a h\int_0^a\int_0^a\bar{\phi}_i(x,y)\bar{\phi}_i(x,y)dxdy=1 \quad (12)$$

평판의 $x_1\le x\le x_2$, $y_1\le y\le y_2$ 영역에 부착된 압전 가진기와 센서에 의한 압전 가진식과 센서식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\ddot{q}_i(t)+\omega_i^2 q_i(t)=\eta_a\varphi_i u(t), \quad (13)$$

$$V_s(t)=\eta_s\varphi_i q_i(t), \quad (14)$$

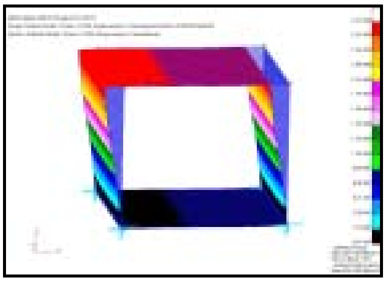
$$\varphi_i=\int_{y_1}^{y_2}\int_{x_1}^{x_2}\nabla^2\bar{\phi}_i(x,y)dxdy, \qquad i=1,2,3,\cdots$$

압전 가진식과 압전 센서식에서 고유함수의 Laplacian 을 압전체의 부착면적으로 적분한 값 φ_i 의 크기는 i 번째 진동모드에 대한 압전체의 가진 세기를 나타낸다. 압전체의 부착위치를 변경하면서 φ_i 의 크기를 조사하면 i 번째 진동모드에 대한 좋은 부착위치를 찾을 수 있다. 이러한 부착위치 선정의 기준으로 고유함수의 2 차 도함수를 이용할 수 있으며, 본 논문에서 이것을 위치감도함

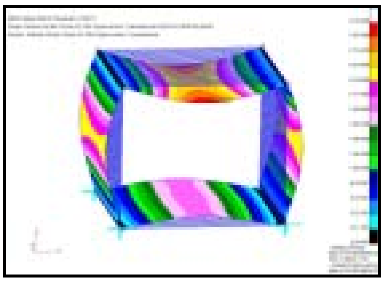
수라 한다. 즉, i 번째 진동모드의 위치감도함수는 다음과 같다[(4)].

$$\lim_{\substack{\Delta x\to 0\\ \Delta y\to 0}}\frac{1}{\Delta x\Delta y}\int_{y}^{y+\Delta y}\int_{x}^{x+\Delta x}\nabla^2\overline{\phi}_i(x,y)dxdy$$
$$=\nabla^2\overline{\phi}_i(x,y) \qquad (15)$$

가로와 세로의 길이 비가 1:1 인 열린 박스 구조물의 처음 3 개의 저주파 진동모드의 형상들이 Fig.2 에 나타나 있다. 1 차와 2 차 진동 모드들을 제어대상으로 할 때, 좋은 부착위치는 그림에서 보듯이 고정단 부근이 된다. 이 부착 위치와 더불어, 가진기와 센서를 동일 위치에 배치하는 것도 매우 중요하다. 동일 위치가 아닌 경우에, 제어시스템은 스필-오버(spill-over)에 의하여 불안정할 수도 있다. 이 동일 위치에 대한 또 다른 장점은 플랜트가 최소 위상 시스템이 되어 다양한 제어 이론을 적용할 수 있다는 것이다.



(a) first mode shape



(b) second mode shape

(c) third mode shape

Fig.2 Mode shape of open box with PZT and PVDF

3. 제어기 설계

신경회로망은 경험과 학습을 통한 사람의 인지 또는 지식 습득 과정을 모방하여 인공적으로 구현한 수학적 모델링으로, 사람의 신경 세포를 하나의 인공 뉴런으로 모델링한 구조이다. 각각의 뉴런(neuron)은 편차(bias)와 연결강도(weight)와 같은 정해진 매개변수를 갖고 전달 함수를 통해 간단한 수치적 연산을 수행하여 출력값이 계산된다. 이러한 뉴런들을 연결하여 신경망을 구성한다.

모델기반 신경망 제어기의 구조는 Fig.3 과 같다. 모델기반 신경망 제어기는 컨트롤러와 플랜트 모델에서 뉴런 네트워크를 사용하게 된다. 플랜트 모델의 시스템 동정화가 선행되며, 이후 컨트롤러가 학습되게 된다. 이때 플랜트의 모델은 기준 모델의 출력과 일치하는 방향으로 학습하게 되는데 이 경우에는 기준 모델의 출력이 항상 0 으로 일정하게 나오게 되며 오차를 최소화 하는 방향으로 학습을 수행하게 된다. 이때 학습방법은 모멘텀(momentum)이 포함된 오차 역전파 학습 방법을 사용하였다.

신경망의 구성은 입력층과 은닉층, 출력층 각각 1 개의 레이어로 구성하였으며 은닉층의 전달함수는 로그시그모이드 함수를 사용하였다. 계산량을 줄이기 위해 은닉층의 뉴런수는 12 개,최대 학습회수는 5 회로 제한하였다. 또한 채집 주파수는 100Hz 로 한정하였다.

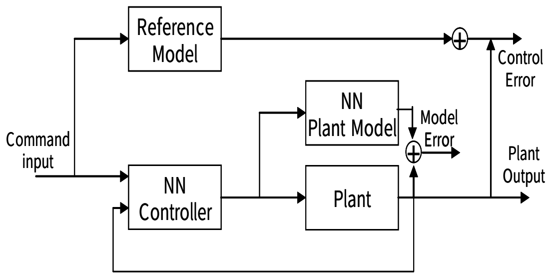


Fig.3 Reference Model Based Nural network controller block diagram

4. 진동 제어 실험

실험을 위하여 Fig.4 과 같이 실험장치를 구성하였다. 구조물은 Fig.1 과 같은 알루미늄 열린 박스 구조물이며 A, B, G, H 네 모서리를 고정하였다.

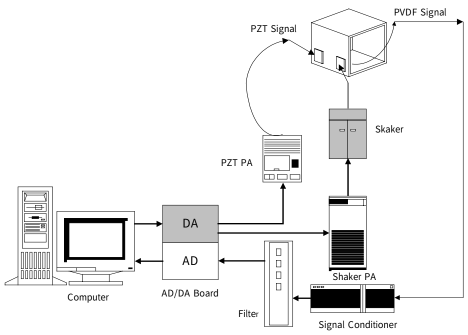


Fig.4 Schematic diagram of the experimental set up

실험에 사용한 작동기용 세라믹과 가진용 세라믹 Digital ECHO 회사의 PZT 세라믹이며, $50\times20\times0.5mm$, $\varepsilon_{33}/\varepsilon_0$ =4300, E_1 =330Gpa, ρ=7700 kg/m^3 , d_{31}=-402×10^{-12} 이다. 감지기로 사용한 PVDF 압전필름은 Measurement Specialties 사의 DT2-028K 이며, 재료의 물성치는 다음과 같다. $60\times12\times0.025mm$, E_1 =2Gpa, d_{31} = -23×10^{-12} m/V, g_{31} = 216×10^{-3} Vm/N, ρ=1780 kg/m^3 이다.

Fig.5 는 B&K4375 가속도계와 B&K3550 FFT 분석기를 사용하여 얻은 주파수 응답곡선이다. Fig.5 의 주파수 응답곡선으로부터 구한 1 차, 2 차, 3 차의 주파수와 FEM 해석을 통해을 얻은 1 차, 2 차, 3 차의 주파수는 Table 1 과 같다.

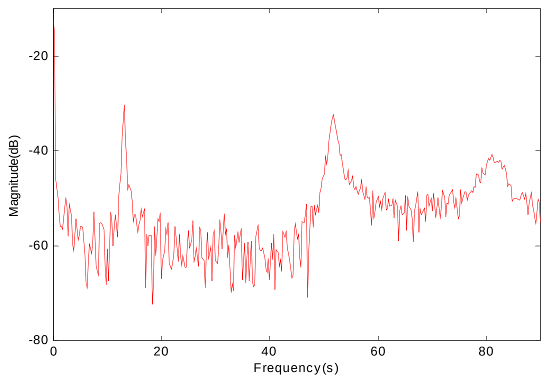


Fig.5 Frequency Response of open box attached Piezoeletric Materials

Table 1 Comparison of modal frequencies for flexible structure

Structure	Cantilever plate			Open box		
Frequency	f_1	f_2	f_3	f_1	f_2	f_3
FEM(Hz)	17.0	41.0	103.4	13.4	52.8	78.8
Modal Analysis	16.5	38.5	89.4	14.1	54.8	80.9

동적 특성 실험결과를 바탕으로 첫 번째 주파수에 대한 제어실험을 하였다. 가진 신호와 제어 신호는 고전압 앰프를 통해 증폭되어 압전 세라믹에 부가된다. 제어기는 DSP 보드를 이용하여 구현하였고, PVDF 감지기를 통해 진동 신호를 감지하고 노치 필터를 통해 노이즈를 제거한 신호는 DSP 보드로 입력이 되어 구현 되어 있는 모델기반 신경망 제어기에 의해 제어가 수행된다.

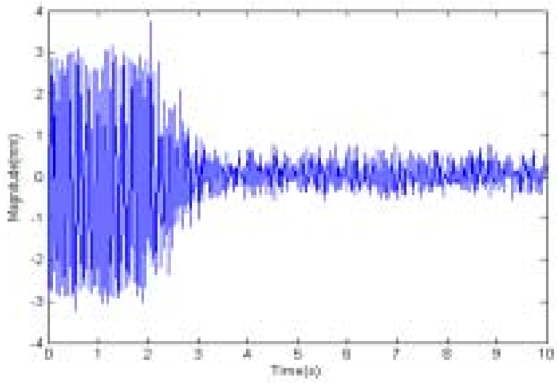


Fig.6 Gap sensor outputs of control and uncontrol

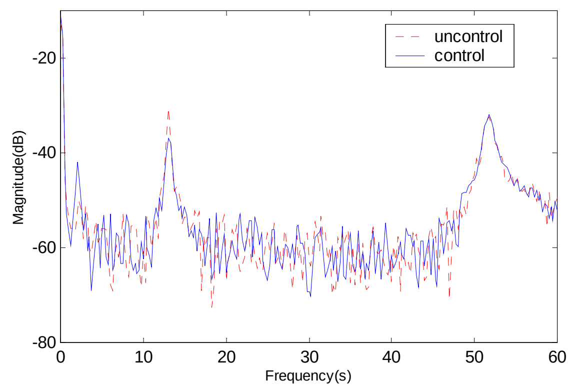


Fig.7 Frequency response function of the first mode control

실험을 통하여 얻은 제어전·후의 진폭의 변화와 주파수응답의 변화는 Fig.6 과 Fig.7 에서 보이는 바와 같다. 1 차 모드 제어에 대한 제어력을 인가 후 13Hz 의 외부 가진에 대해 약 70% 정도의 제어이득을 보고 있으며 신경망 제어기를 적용한 결과 약 11dB 의 감소효과를 얻을 수 있었다.

5. 결 론

열린 박스 구조물의 진동제어를 위한 이론해석방법을 연구하였다. 이 결과는 압전재료를 부착한 박스 구조물의 이론적인 해석과 이론 모델의 타당성을 입증하기 위해 유용하게 사용될 것으로 보인다. 또한, 모델기반 신경망 제어기를 적용하여 제작된 열린 박스 구조물에 대해서, 지속적인 외란

이 가해지는 경우에도 구조물의 적응 능동 진동제어가 효과적임을 확인하였다. 그러나 모델기반 신경망 제어기를 이용하여 적응 진동제어를 수행할 때 신경망 제어기 자체의 계산시간이 오래 걸리기 때문에 만족스러운 제어성능을 얻기 위해 모달해석을 통한 구조물의 특성에 의해 채집 주파수를 적당히 선정하여야 한다.

참고문헌

(1) T. Bailey and J. E. Hubbard, 1985, "Distributed Piezoeletric-polymer active vibration control of a cantilevered beam," AIAA Journal of Guidance and Control, Vol. 8, no. 5, pp.605-611.

(2) E. K. Dimitriadis, C. R. Fuller, and C. A. Rogers, 1991, "Piezoelectric actuators for distributed Vibration Excitation of thin Plates," ASME Trans. Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 113, pp. 100-107.

(3) E. T. Falangas, J. A. Dworak, and S. Koshigoe, 1994 , "Controlling Plate vibration using piezoelectric actuators," IEEE, Control System Magazine, Vol.15, no. 4, pp. 34-41.

(4) K. N. Handa, 1972, "Analysis of inplane vibration of Box-type structures by a finite element Method," Journal of Sound of Vibration," Vol. 21, pp. 107-114.

(5) S. –H. Youn, J.-H. Han and I. Lee, 2000, "Neuro-adaptive vibration control of composite beams subject to sudden delamination," Journal of Sound and Vibration Vol. 238, pp. 215-231.

(6) Tlusty, J., Smith, S., and Zamudia, C., 1990, "Operation Planning Based on Cutting Process Model," Annals of the CIRP, Vol. 39, pp. 517 - 521.

(7) Y.D. Shen, S.I. Jang, C.D.Kee, 2003, "Vibration Control of a Opened Box Structure By Neuro Controller," KSPE April, pp.217