

분포모달감도를 이용한 평판의 능동진동제어

(Active Vibration Control of a Plate Using the Distributed Modal Sensitivity)

송철기*, 박재상*, 이장무**, 황진권*, 최중호***

*:서울대학교 대학원, **:서울대학교 기계설계학과, ***:서울대학교 제어계측공학과

Abstract

This study deals with the active vibration control system for an all-clamped rectangular plate with piezoceramic actuators and sensors. A line moment algorithm (LMA) with the distributed modal sensitivity(DMS) is proposed to reduce the structural vibrations effectively and to select the optimal locations and the optimal directions (skewed angles) of uniform piezoelectric actuators or sensors. Experimental results show that each mode can be attenuated by about 10~13 dB in case a piezoelectric actuator generate the psuedo-random disturbances that excite the plate modes.

Key words : active vibration control(AVC), distributed piezoceramic actuator /sensor, distributed modal sensitivity(DMS), line moment algorithm (LMA)

1. 서론

최근에 대형 구조물의 진동을 능동적으로 제어하는데 많은 연구가 진행되고 있다. Forward와 Swigert (1981)는 이론과 실험을 병행함으로써 압전가진기를 사용한 막대의 굽힘모드진동을 저감하였다. Bailey와 Hubbard (1985)는 압전폴리머를 사용하여 외팔보의 능동제어장치를 설계하여 세 가지 제어알고리즘(리아프노프법, 일정이득 속도 되먹임법, 일정크기 속도 되먹임법)으로 감쇠특성을 비교하였으며, Fansen과 Chen (1986)은 압전세라믹과 아날로그회로를 사용하여 보진동을 제어하였다. Baz와 Poh (1988)는 최적제어위치를 선정하는 수정독립모달공간법(Modified independent modal space control method)을 제시하였으며 1990년에는 이를 외팔보에 적용하였다. Dimitriadis, Fuller와 Rogers (1991)는 압전세라믹쌍을 사용하여 단순지지평판에 대한 이론적 진동에측모델을 개발하였고 Clark, Flemming와 Fuller (1993)는 이의 타당성을 실험적으로 증명하였다. Hong (1992)은 진동제어용 동일위치 센서/가진기를 제안하였고, 등가힘을 이용한 연성모달제어법(Coupled modal space control algorithm)으로 고정단 평판의 진동을 제어하였다. 이제까지의 연구에서 분포압전가진기와 센서가 구조진동의 저감을 위해 효과

적으로 사용될 수 있음을 알 수 있었으며, 비교적 간단한 요소의 구조진동을 제어하기 위하여 여러 제어알고리즘이 제시되었으나, 분포압전기진기와 분포센서를 동시에 사용하는 제어계의 연구는 그리 많지 않았다.

본 연구에서는 분포모달감도(DMS)와 선모멘트 알고리즘(LMA)을 제안하였다. 절가진기와 심센서에 적합한 연성모달제어법을 수정한 이 알고리즘은 분포가진기가 생성하는 선모멘트와 분포센서로 측정되는 출력전압을 포함한다. 또한 이 분포모달감도는 분포가진기와 분포센서의 최적제어위치와 최적장착각을 선정하는 데 응용될 수 있다.

2. 시스템의 제어식

2.1 선모멘트와 측정전압

고정단 평판의 운동방정식은 다음과 같은 형태로 표현될 수 있다.

$$M \ddot{w}(x, y, t) + C \dot{w}(x, y, t) + K w(x, y, t) = f(x, y, t) \quad (1)$$
$$(0 \leq x \leq a, 0 \leq y \leq b)$$

여기서 M, C, K 는 각각 평판의 질량, 감쇠, 강성을 의미하는 연산자이며, $w(x, y, t)$ 는 위치변수 (x, y) 와 시간변수 t 로 나타나는 변위이다. 분포가진기를 특정 영역

($p_k \leq x_k \leq q_k$, $r_k \leq y_k \leq s_k$, $k = 1, 2, \dots, mp$)에 장착할 때, 분포제어력 $f(x, y, t)$ 는 가진기가 생성하는 모멘트 m_k 로 표현될 수 있다.

$$f(x, y, t) = \sum_{k=1}^{mp} \left\{ \nabla^2 m_k(x, y) V_k(t) \right\} \quad (2)$$

$$m_k = m_n \{ h(x - p_k) - h(x - q_k) \} \{ h(y - r_k) - h(y - s_k) \} \quad (3)$$

$$\nabla^2 m_k = m_n \left\{ \delta'(x - p_k) - \delta'(x - q_k) \right\} \left\{ h(y - r_k) - h(y - s_k) \right\} \quad (4)$$

$$+ m_n \left\{ h(x - p_k) - h(x - q_k) \right\} \left\{ \delta'(y - r_k) - \delta'(y - s_k) \right\}$$

여기서 mp 는 가진기수를 나타내며, m_n 는 압전체의 특성과 압전체가 장착된 평판계의 탄성특성으로 결정되는 모멘트-전압상수이다. $h(\cdot)$ 는 단위스텝함수(Heaviside unit step function)이며, $\delta'(\cdot)$ 는 델타함수(Dirac delta function) $\delta(\cdot)$ 를 공간미분한 것으로 선모멘트로 해석될 수 있으며, 분포압전가진기의 수학적 등가모델은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 가진기의 네 모서리의 선모멘트로 표현될 수 있다.

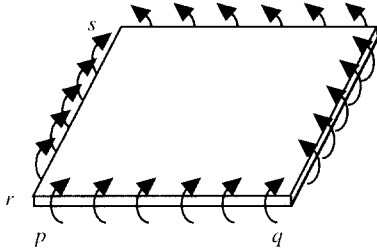


Fig. 1 Line moments of the rectangular piezoelectric actuator

초기 조건과 경계조건을 만족하는 변위 $w(x, y, t)$ 는 위치함수와 시간함수의 곱으로 변수분리될 수 있다. 즉,

$$w(x, y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} w_n(x, y) \eta_n(t) \quad (5)$$

식 (2) - (5)을 식 (1)에 대입하면 평판의 운동방정식은 다음과 같은 비연성식들이 된다. ($n = 1, 2, 3, \dots$)

$$\ddot{\eta}_n(t) + 2\zeta_n \omega_n \dot{\eta}_n(t) + \omega_n^2 \eta_n(t) = \sum_{k=1}^{mp} \left\{ \int_{D_k} \tilde{w}_n \nabla^2 m_k dD_k \right\} V_k(t) \quad (6)$$

여기서 $\tilde{w}_n(x, y)$ 는 모드형상의 질량정규화함수로서 다음을 만족한다.

$$\tilde{w}_n(x, y) = \beta_n w_n(x, y) \quad (7)$$

$$(\beta_n \equiv \{\rho h ab\}^{-0.5}, \rho h \text{는 평판의 면밀도})$$

고정단 경계조건의 경우 식 (6)의 적분항을 그린(Green)의 정리(Greenberg, 1971)를 이용하여 변환하면 다음과 같다.

$$\int_{D_0} w_n(x, y) \cdot \nabla^2 m_k(x, y) dD \quad (8)$$

$$= \int_{\Gamma} \left\{ w_n \frac{\partial m_k}{\partial n} - \frac{\partial w_n}{\partial n} m_k \right\} d\Gamma + \int_{D_0} m_k \nabla^2 w_n dD$$

$$= m_n \int_{D_k} \nabla^2 w_n(x, y) dD_k$$

여기서 D_k 는 k -번째 압전체를 의미한다. 따라서 식 (6)은 모달식으로 분리우는 다음 형태로 간략히 된다.

$$\ddot{\eta}_n(t) + 2\zeta_n \omega_n \dot{\eta}_n(t) + \omega_n^2 \eta_n(t) = \sum_{k=1}^{mp} \left\{ \beta_n m_n s_n(x_k, y_k) \right\} V_k(t) \quad (9)$$

$$\text{where } s_n(x_k, y_k) = \int_{D_k} \nabla^2 w_n(x, y) dD_k, \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

입력벡터 $u(t)$ 를 $u(t) = [V_1(t) \ V_2(t) \ \dots \ V_{mp}(t)]^T$ 로.

모달 상태벡터 $x(t)$ 를 $x_n(t) = [\eta_n(t) \ \dot{\eta}_n(t)]^T$ 의 벡터쌍으로 나타낸다고 정의하면, 2차원 평판구조물의 상태방정식은 시스템행렬 \bar{A}_n 과 제어행렬 \bar{B}_n 로 구성된다.

$$\dot{x}_n(t) = \bar{A}_n x_n(t) + \bar{B}_n u(t) \quad (10)$$

$$\bar{A}_n = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\omega_n^2 & -2\zeta_n \omega_n \end{bmatrix}, \quad \bar{B}_n = \beta_n m_n \begin{bmatrix} 0 \\ s_n(x_k, y_k) \end{bmatrix}$$

$$(n = 1, 2, 3, \dots) \quad (k = 1, 2, \dots, mp)$$

연성모달제어법(Meirovitch, 1990; Hong, 1992)에서는 제어행렬이 점가진기의 특정 위치 (x_k, y_k) 에서의 정규화 고유함수 $\tilde{w}_n(x_k, y_k)$ 로 나타나는 반면, 선모멘트 모달제어에서는 제어행렬이 분포가진기의 특정 영역 ($p_k \leq x_k \leq q_k$, $r_k \leq y_k \leq s_k$)에서의 분포모달감도로 나타낸다. 즉, 이러한 선모멘트 모달제어를 위해서는 모드주파수 ω_n , 모달감쇠계수 ζ_n 과 분포모달감도를 먼저 알아야 한다. 한편 분포가진기의 등가 가진력에서와 마찬가지로 분포센서의 측정전압도 분포센서의 특정 위치 ($p_l \leq x_l \leq q_l$, $r_l \leq y_l \leq s_l$)에서의 분포모달감도로 표현된다.

$$y_l(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \bar{C}_n \cdot x_n(t) \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (11)$$

$$\bar{C}_n = k_n [s_n(x_l, y_l) \ 0] \quad (l = 1, 2, \dots, ms)$$

여기서 ms 는 센서의 수를 나타내며, k_n 는 압전체의 압전특성과 압전체를 장착한 평판의 탄성특성으로 결정되는 출력전압계수이다. 따라서 연성모달제어에서 정규고유함수는 점가진기의 점가진력과 점센서의 변위 혹은 속도를 표현할 수 있지만, 선모멘트제어에서 분포모달감도는 분포가진기의 선모멘트와 분포센서의 출력전압을 잘 표현할 수 있다.

2.2 분포모달감도 (Distributed modal sensitivity, DMS)

이차원 구조물의 모드형상에 대한 일반해는 존재하지 않으나 사각평판의 경우는 변분법을 이용하여 일차원 보모드의 조합으로 근사화된다(Young, 1950).

$$w_n(x, y) = \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} \alpha_{ij}^n \phi_i(x) \phi_j(y) \quad (12)$$

$$\phi_i(x) = \cosh\left(\frac{\lambda_i x}{a}\right) - \cos\left(\frac{\lambda_i x}{a}\right) - \kappa_i \left\{ \sinh\left(\frac{\lambda_i x}{a}\right) - \sin\left(\frac{\lambda_i x}{a}\right) \right\} \quad (i = 1, 2, 3, \dots)$$

$$\phi_j(y) = \cosh\left(\frac{\lambda_j y}{b}\right) - \cos\left(\frac{\lambda_j y}{b}\right) - \kappa_j \left\{ \sinh\left(\frac{\lambda_j y}{b}\right) - \sin\left(\frac{\lambda_j y}{b}\right) \right\} \quad (j = 1, 2, 3, \dots)$$

- λ_i, λ_j : $i(j)$ -th natural frequency parameter of the clamped beam
- κ_i, κ_j : $i(j)$ -th natural mode shape parameter of the clamped beam
- α_{ij}^n : n -th mode shape coefficient of the all-clamped plate
- ω_n : n -th natural frequency of the plate
- D_n : bending stiffness ($\omega_n = \sqrt{\frac{D_n}{\rho h a^4 b}} \lambda_n, D_n = \frac{E h^3}{12(1-\mu^2)}$)
- λ_n : n -th natural frequency parameter

여기서 $w_n(x, y)$ 는 고정단 평판의 n -번째 모드형상이고, $\phi_i(x)$ 와 $\phi_j(y)$ 는 양 끝단 $x=0, a$ 와 $y=0, b$ 에서 고정 경계를 만족하는 보모드형상이다. Table 1은 고정단 직사각평판(길이비 $a:b=6:5$)에 대하여 레일리-리츠 방법을 이용하여(Young, 1950) 구한 n -번째모드의 노달선(nodal line), 모드형상계수 α_{ij}^n 와 고유진동수 파라미터 λ_n 를 나타내는 표이다. 모드형상함수를 얻은 후, 특정 영역 ($p_k \leq x_k \leq q_k, r_k \leq y_k \leq s_k$)에서의 분포가진기 또는 분포센서의 n -번째 분포모달감도 $s_n(x_k, y_k)$ 를 계산할 수 있다.

$$s_n(x_k, y_k) = \int_{p_k}^{q_k} \int_{r_k}^{s_k} \nabla^2 w_n(x, y) dD_k \quad (13)$$

$$= \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} \alpha_{ij}^n \left[\left\{ \phi_i'(q) - \phi_i'(p) \right\} \int_{r_k}^{s_k} \phi_j(y) dy + \int_{p_k}^{q_k} \phi_i(x) dx \left\{ \phi_j'(s) - \phi_j'(r) \right\} \right]$$

Fig.2는 정사각가진기 또는 정사각센서(평판 대비 7.1% 가로길이와 8.5% 세로길이)를 고정단 직사각평판(6:5 길이비)에 장착했을 때의 n -번째 분포모달감도 $s_n(x_k, y_k)$ 를 나타내는 그림이다. 고정단 경계조건에서의 분포모달감도는 반공진점 부근의 영역에서 최대치를 가지며 노달선과 네 꼭지점뿐만 아니라 모드형상의 변곡선에서는 0값을 갖는다. 분포모달감도와 모드형상과의 또다른 차이점은 평판의 네 모서리에서 0 아닌 값을 갖는다는 점이다. 분포모달감도의 이와 같은 특성을 이용하여, 분포가진기의 가진효과를 극대화하고 분포센서의 측정효과를 극대화하는 최적위치와 최적장착각을 구할 수 있다. 또한 분포모달감도는 제어계에서 가제어성과 가관측성의 지표가 될 수 있다.

3. 실험장치구성

실험장치는 고정단 평판, 압전가진기와 압전센서, 가진보드와 센서보드, DSP보드 등으로 구성된다. 그

Table 1 Mode shape coefficient α_{ij}^n and λ_n for the all-clamped rectangular plate ($a:b=6:5$)

mode (i,j)	nodal line	λ_n	α_{ij}^n (6 × 6 matrix)					
1st (1,1)		1534.8	-0.9997	0.0000	-0.0102	0.0000	-0.0014	-0.0002
			0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
			-0.0195	0.0000	0.0029	0.0000	0.0007	0.0000
			0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
			-0.0028	0.0000	0.0011	0.0000	0.0004	0.0000
0.0003	0.0000	0.0002	0.0000	0.0000	0.0000			
2nd (2,1)		5346.6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
			0.9994	0.0001	0.0315	0.0000	0.0050	0.0006
			0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
			0.0142	0.0007	-0.0025	0.0000	-0.0009	-0.0001
			0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0022	0.0000	-0.0007	0.0000	-0.0004	0.0000			
3rd (1,2)		8281.3	0.0000	-0.9986	0.0000	-0.0071	0.0000	-0.0011
			0.0000	-0.0003	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
			0.0000	-0.0509	0.0000	0.0016	0.0000	0.0004
			0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
			0.0000	-0.0094	0.0000	0.0011	0.0000	0.0003
0.0000	-0.0012	0.0000	0.0002	0.0000	0.0000			
4th (2,2)		14688.9	0.0000	-0.0003	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
			-0.0001	0.9988	0.0001	0.0242	0.0001	0.0039
			0.0000	0.0004	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
			0.0000	0.0426	0.0000	-0.0016	0.0000	-0.0005
			0.0000	0.0003	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0074	0.0000	-0.0008	0.0000	-0.0003			
5th (3,1)		15823.6	0.0193	0.0000	-0.0097	0.0000	-0.0011	-0.0001
			0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
			0.9983	0.0003	0.0517	0.0000	0.0097	0.0013
			0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
			0.0098	0.0000	-0.0017	0.0000	-0.0009	-0.0002
0.0012	0.0000	-0.0003	0.0000	-0.0002	0.0000			
6th (1,3)		28394.3	0.0101	0.0000	-0.9970	0.0000	-0.0049	-0.0006
			0.0000	0.0000	-0.0007	0.0000	0.0000	0.0000
			-0.0057	0.0004	-0.0741	0.0000	0.0007	0.0001
			0.0000	0.0000	-0.0002	0.0000	0.0000	0.0000
			0.0022	0.0000	-0.0163	0.0000	0.0008	0.0001
0.0003	0.0000	-0.0023	0.0000	0.0002	0.0000			

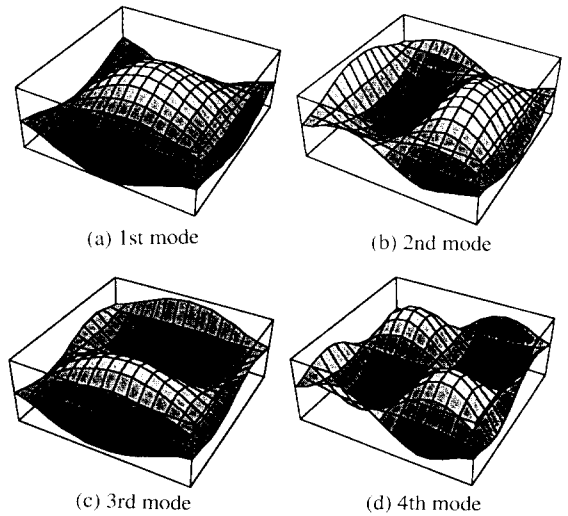


Fig. 2 Distributed modal sensitivity for the all-clamped plate

의 보조장치로 가진 신호를 공급하는 고전압 전원공급기(-150 V ~ 150 V), 개인용 컴퓨터, 외란신호를 생성하는 신호발생기 등이 있다. 또한 신호발생기에서 만들어진 외란 신호를 평판에 가하는 외란가진기, 오차신호의 신뢰도를 높이기 위한 경량가속도계 등도 사

용된다. 강철로 된 시험평판은 크기가 360 mm × 300 mm (6:5 길이비)인 직사각형이며 그 두께는 0.8 mm이다.

Fig. 3은 압전가진기와 센서를 장착한 고정단평판의 그림이며, 두께 15 mm, 폭 30 mm의 직사각기둥을 상하로 부착하고 수 개의 클램퍼로 고정하므로써 고정단 경계조건을 구현하였다. 압전가진기는 Channel Industries Inc.의 PZT(C-5500) 제품으로 밀도 7600 Kg/m³, 압전전하계수(piezoelectric strain constant, d_{31}) 185×10^{-12} m/V, 비전하량(permittivity ϵ_{33}^T) 160×10^{-10} , 영률(Young's modulus) 64×10^9 Pa, 포아송비 0.31, 크기 25.4 mm × 25.4 mm × 1.27 mm를 갖는다. 압전센서는 Piezo systems Inc.의 PZT(G1195) 제품으로 밀도 7600 Kg/m³, 압전전하계수 166×10^{-12} m/V, 비전하량 151×10^{-10} , 영률 63×10^9 Pa, 포아송비 0.31, 크기 38.1 mm × 63.5 mm × 0.191 mm를 갖는다.

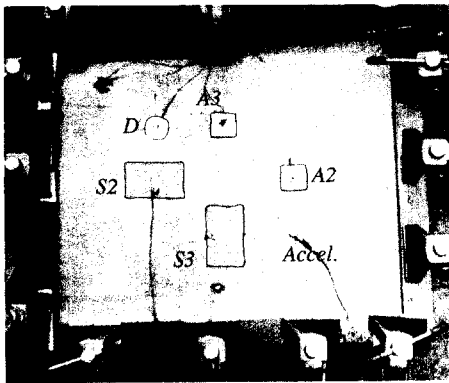


Fig. 3 All-clamped plate configured with piezoceramic actuators and sensors

Fig. 3에서 2차모드용 압전센서는 센서 중앙이 30% x-길이위치, 50% y-길이위치인 S2 영역에 장착하였으며, 이 위치는 그 모드의 최대 분포모달감도($s_2 = 3.039$)를 갖는 영역이다. 또한 대응되는 가진기는 A2 영역(70% x-길이위치, 50% y-길이위치, $s_2 = 0.850$)에 위치하였다. 가로배치한 2차모드의 분포모달감도와 세로배치한 분포모달감도는 각각 3.039과 2.956이다. 이러한 비교에서 알 수 있듯이 가로배치한 2차모드의 분포모달감도는 세로배치한 것보다 2.8% 더 큰 값을 갖는다. 이와 같은 방법으로, 센서 중앙이 50% x-길이위치, 70% y-길이위치인 S3 영역에 장착한 세로배치한 3차모드의 분포모달감도($s_3 = 3.670$)는 가로배치한 분포모달감도($s_3 = 3.435$)보다 더 큰 값을 갖는

다. 또한 대응되는 가진기는 A3 영역(50% x-길이위치, 30% y-길이위치, $s_3 = 1.024$)에 위치하였다.

Table 2은 각 모드별 최적 제어위치와 최적장착각을 나타낸 표이다. 세로로 장착할 때 1차, 3차와 4차 모드의 분포모달감도는 가로로 배치한 것보다 각각 1.1%, 6.8%, 2.8% 더 큰 값을 갖는다. 따라서 각 모드에서 극대 분포모달감도를 얻기 위하여 Fig. 3에서는 센서 S2는 가로장착으로, 센서 S3는 세로장착하였다.

Table 2 Optimal locations and optimal directions due to the distributed modal sensitivity

mode	1st	2nd	3rd	4th
optimal location	(50%,50%)	(30%,50%)	(50%,30%)	(30%,30%)
		(70%,50%)	(50%,70%)	(70%,70%)
			(30%,70%)	(70%,30%)
distributed modal sensitivity				
horizontally attached	1.723	-3.039	3.435	-4.492
vertically attached	1.742	-2.956	3.670	-4.619

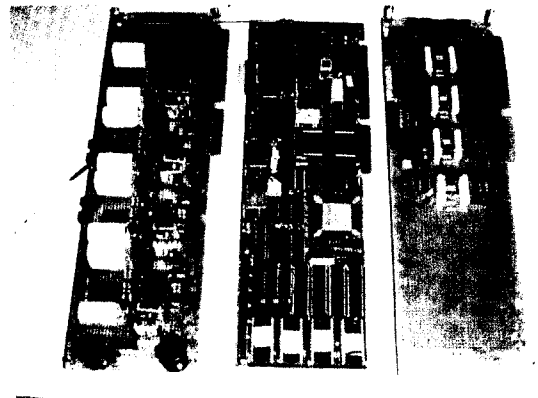


Fig.4 An actuating board, a DSP board, and a sensing board

제어계는 486 PC상에서 C-언어와 어셈블러로 통제된다. Fig. 4는 본 연구를 위하여 설계/제작된 가진보드, DSP보드와 센서보드를 보여준다. Texas Instrument사의 TMS320C30-DSP 칩을 사용하여 최대 16MIPS의 계산속도를 낼 수 있는 DSP보드는 센서보드에서 들어오는 최대 4개의 입력신호를 다중화시켜서 2개의 A/D변환기로 받아들이고, 최대 4개의 가진기출력을 2개의 D/A변환기로 순서적으로 역다중화시켜서 내보낸다. 이 때 다중화, 역다중화에 필요한 제어신호는 DSP보드로부터 공급받는다. PC와의 통신은 Dual-Port

RAM에 의한 메모리공유를 통하여 이루어진다. 센서 보드는 압전센서에서 감지한 미약한 전기 신호를 받아서 이것을 증폭 및 다중화하여 DSP보드의 A/D변환기로 내보낸다. 다중화시키는 제어신호는 DSP보드에서 내보내는 센서선택신호에 의하여 이루어진다. 센서신호의 증폭율은 DSP보드 내부의 A/D변환기의 최대 허용입력전압 ($\pm 5 V$)과 압전센서가 발생시키는 전압의 크기를 고려하여 결정할 수 있다. 가진기보드는 DSP보드의 D/A변환기로 받은 제어신호 ($\pm 5 V$)를 고전압 ($\pm 150 V$)으로 변화시킨 후 이를 압전가진기에 인가하는 회로이다. D/A변환기를 거친 신호들은 DSP보드에서 내보내는 가진기선택신호에 의해 역다중화된 후 가진기보드에서 증폭되어 각 가진기에 인가된다.

4. 실험결과

4.1 단일 모드제어(single mode control)

Fig. 3과 Fig. 4와 같은 제어실험장치를 구성한 후, 2차모드에 대하여 센서 S2와 가진기 A2만을 사용하여 일정한 이득의 변위 피드백제어를 수행하였다. 이 때, 외란가진기 D에서 2차모드에 해당하는 주파수로 외란(sinusoidal wave)을 발생시킨 경우 진동이 최대 25~30dB 까지 저감되었고, 평균의 저차 4개모드를 가진하도록 200 Hz까지의 백색외란(white noise)을 가했을 때는 Fig. 5에서 나타난 바와 같이 진동이 약 15dB 저감되었다. Fig. 5에서 고유진동수가 약간 상향됨을 발견할 수 있는데, 이는 제어입력에 의하여 계의 강성이 증가되는 효과라고 추측된다. 저차의 다른 모드도 2차 모드의 방법과 같은 방법으로 진동을 감쇠시킬 수가 있었다.

한편 1차모드는 대칭모드로 평판 중앙 영역에서 분포모달감도가 극대가 되므로 그 위치에 콜로케이션(collocation)를 시키는 것이 가장 좋은 제어점이 된다. 그러나, 1차모드 제어실험에서는 본 연구의 목적상 가진기와 센서를 동일 평면에 장착하고자 하였기에 1차모드 외의 다른 모드의 누설효과가 발생하여 좋은 실험결과를 얻지 못하였다. 이를 해결하기 위해서는 평판의 양면에 가진기와 센서를 각각 장착하든지 Hong (1992)이 제안하였던 일체형 가진기/센서를 사용하든지 함으로써 콜로케이션시키는 방법 등이 있을 것이다.

4.2 다중 모드제어(multi-mode control)

여러 모드를 동시에 제어하는 다중 모드제어는 단일 모드제어알고리즘을 선형적으로 중첩하여 실현할

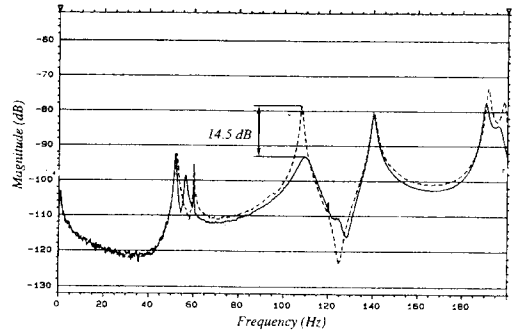


Fig. 5 Frequency response function of the single mode control (2nd mode)

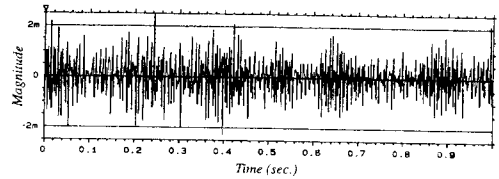


Fig. 6(a) Time response for uncontrolled system

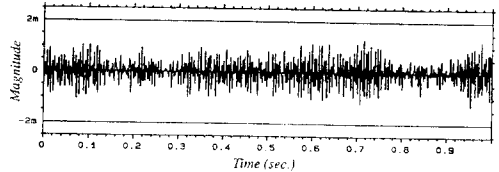


Fig. 6(b) Time response of the multi-mode control

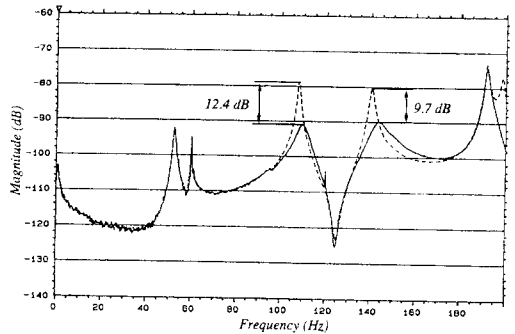


Fig. 6(c) Frequency response function of the multi-mode control (2nd and 3rd mode)

수 있다. 본 실험에서는 2차와 3차모드를 동시에 제어하기 위하여 우선 제어감도가 각 모드에 대하여 가장 우수한 위치인 S2, S3와 A2, A3를 선정하고, 외란가진기 D에서 백색외란을 가하였다. 실험한 결과 단일 모드 제어할 때보다는 감소량이 적었으나, 역시 상당한 진동을 저감시킬 수 있었다. Fig. 6(a)는 제어하기 전의 시간영역 측정결과이며, Fig. 6(b)는 제어한 후의 측정결과이다. Fig. 6(c)에 나타난 바와 같이 2차와 3차모드의 진동을 약 10~13dB 저감시킬 수 있었다.

5. 결론

평판진동의 능동제어를 위한 하드웨어 구성 및 제어 알고리즘에 대한 연구를 수행하였으며 주요 내용은 다음과 같다.

(1) 분포센서와 분포가진기를 사용하여 평판의 진동을 능동적으로 제어하기에 적합한 분포모달감도 및 선모멘트 제어법을 제안하였다.

(2) 분포모달감도를 이용하면 분포가진기의 가진효과와 분포센서의 측정효과를 극대화하는 최적위치와 최적장착각을 구할 수 있다. 또한 분포모달감도는 제어계에서 가제어성과 가관측성의 지표가 된다.

(3) 분포가진기/센서와 가진기/DSP/센서 보드를 고정된 평판에 장착한 능동진동제어장치를 제작하고 그 효용성을 실험적으로 보여주었다.

(4) 분포센서와 분포가진기를 개별적으로 또는 동시에 사용하여 2차모드와 3차모드를 제어하는 실험을 수행하였다. 그러나, 1차모드 제어실험에서는 콜로케이션을 시키지 않은 상태에서 가진기와 센서를 동일 평면에 장착하고자 하였기에 1차모드 외의 다른 모드의 누설효과가 발생하여 좋은 실험결과를 얻지 못하였다.

(5) 다변수 최적제어법에 입각한 선모멘트제어법을 적용하는 연구를 계속 수행할 예정이다.

Reference

Bailey, T., and Hubbard, J. E., 1985, "Distributed Piezoelectric-Polymer Active Vibration Control of a Cantilevered beam," *AIAA Journal of Guidance and Control*, Vol. 8, No. 5, pp. 605-611.

Baz, A., and Poh, S., 1988, "Performance of an Active Control System with Piezoelectric Actuators," *Journal of Sound and Vibration*, No.2, pp. 327-343.

Baz, A., and Poh, S., 1990, "Experimental Implementation of the Modified Independent Modal Space Control Method," *Journal of Sound and Vibration*, Vol.139(1), pp. 133-149.

Clark, R. L., Flemming, M. R., and Fuller, C. R., 1993, "Piezoelectric Actuators for Distributed Vibration Excitation of Thin Plates : A Comparison Between Theory and Experiment," *Trans. the ASME*, Vol.115, pp. 332-339, July.

Dimitriadis, E. K., Fuller, C. R., and Rogers, C. A., 1991, "Piezoelectric Actuators for Distributed Vibration Excitation of Thin Plates," *ASME Journal of Vibration and Acoustics*, Vol.113, pp. 100-107, Jan.

Fansen, J. L., and Chen, J. C., 1986, "Structural Control by the Use of Piezoelectric Active Members," *Proceedings of NASA/DOD Control-Structures Interaction Conference*, NASA CP-2447, part 2.

Forward, R. L., and Swigert, C. J., 1981, "Electrical Damping of Orthogonal Bending Modes in a Cylindrical Mast," *AIAA 81-4017/4018, Journal of Spacecraft and Rockets*.

Greenberg, M. D., 1971, *Application of Green's Functions in Science and Engineering*, Prentice-Hall, Inc., pp. 51-60.

Hong, S. Y., 1992, "Active Vibration Control of Adaptive Flexible Structures using Piezoelectric Smart Sensors and Actuators," Ph.D. Thesis, The Pennsylvania State University, Dec.

Meirovitch, L., 1990, *Dynamics and Control of Structures*, John Wiley and Sons, pp. 323-333.

Young, D., 1950, "Vibration of Rectangular Plates by the Ritz method," *Journal of Applied Mechanics*, Vol.17, No.4, pp. 448-453, Dec.

---Nomenclature-----

a, b = plate dimensions

$\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}$ = system matrix, control matrix, sensing matrix

C = operator meaning the homogeneous differential damping

d_{ij} = piezoelectric strain constant

D = domain of the plate

D_n = bending stiffness

D_k = domain of the k -th piezoelectric material

E = Young's modulus

f = distributed control force

h = thickness of the plate

$h(\cdot)$ = Heaviside unit step function

K = operator meaning the homogeneous differential stiffness

k_v, m_v = output voltage constant, moment-voltage constant

m = bending moment

mp, ms = the number of the actuators, the sensors

M = operator meaning the mass density

p, q, r, s = actuator boundaries

$s_n(x, y)$ = n -th distributed modal sensitivity

$u(t)$ = control force vector

$w_n(x, y)$ = n -th mode shape

$\bar{w}_n(x, y)$ = normalized eigenfunction of $w_n(x, y)$

$w(x, y, t)$ = plate transverse displacement

$x(t), y(t)$ = modal state vector, sensing vector

x, y, z = rectangular coordinates

Greek

α_{ij}^n = n -th mode shape coefficient of the plate

β_n = normalizing coefficient

$\delta(\cdot)$ = Dirac delta function

ϵ_{33}^p = the permittivity of piezoelectric material

$\phi_i(x), \phi_j(y)$ = beam mode shapes

$\eta_n(t)$ = n -th natural coordinates of time t

κ, λ = natural mode shape parameter, natural frequency parameter of the beam

μ, ρ = Poisson's ratio, density of the plate

ω_n = n -th modal frequency of the plate

ζ_n = n -th modal damping coefficient

∇^2 = Laplacian operator

Subscripts

i, j, n = modal indices

k, l = piezoelectric element