

능동 진동제어를 위한 시스템 동정 (System Identification for Active Vibration control)

송철기*, 황진권**, 최종호***, 이장부****
(C.K.Song, J.K.Hwang, J.-H.Choi, J.M.Lee)

This paper proposes an identification method for a thin plate where multiple actuators and sensors are bonded. Since a thin plate has small damping ratios of all modes, each mode can be identified separately with a bandpass filter for each modal signal. With the bandpass filter and the characteristics of the plate, the Multi-Input Multi-Output (MIMO) model of the plate can be converted to several Multi-Input Single-Output (MISO) models of second order linear difference equations of the modes. Parameters for each mode are obtained by using the Least Square method. From these MISO models, the MIMO model is obtained in the form of the state space. Experiments were performed for an all-clamped plate with two pairs of piezoelectric actuators and sensors. The outputs of the identified model and the experimental data match well.

Key words: System identification, Active vibration control, Piezoelectric materials, Multi-input multi-output system

1. 서론

능동 진동제어는 보, 평판, 우주선, 그리고 로보트 팔과 같은 유연 구조에 적용하기 위해 오랫동안 연구되어 왔다[1]-[5]. 최근에는 압전체가 능동 진동제어의 적용에 있어서 중요한 위치를 차지하고 있다. 이는 압전체가 가진과 센서에서 좋은 정확도를 보이고 경량, 소형, 저렴한 가격 등의 장점을 가지고 있으며 또한, 반작용없이 큰 힘을 발생시킬 수 있다는 장점을 갖고 있기 때문이다. 제어 문제에 있어서 압전가진기와 센서의 실용성과 적용성의 범위가 많은 연구자들에 의해 논의되어 왔다. Hagood 등은 압전체를 사용한 탄성 구조물의 방정식을 유도하고 상태 공간 모델을 도출하였다[6]. Dimitriadis 등은 단순지지된 평판의 진동 응답에 관한 근사 동적 모델을 전개하였다[7]. Clark 등은 실험적으로 압전가진기를 사용하여 단순지지된 평판의 동적모델을 유도하였다[8]. Tzou와 Fu는 구조적 모니터링과 탄성 연속체의 제어를 위한 압전센서와 가진기에 대해 연구하였다[9]. Hong은 콜로케이션된 압전센서와 가진기의 개념을 도입하여 단일주파수 외란에 의해 야기된 고정단 평판의 진동을 SISO시스템 개념에 근거하여 실험적으로 저감시켰다[10]. Falangas 등은 속도 되먹임 제어와 H_{∞} 제어에 기초하여 압전가진기와 가속도계를 사용함으로써 고정단 평판의 진동을 제어하였다[11].

(* : 기아자동차 기술센터, ** : 서울대 대학원,
*** : 서울대 제어계측공학과 **** : 서울대 기계설계학과)

지금까지 언급된 대부분 연구는 이론적 해석과 모달시험에 의해 모달파라미터를 추출하고 단일 입출력 제어로 진동제어를 수행하였다. 유연구조물의 전통적인 모델링에 있어서 고유진동수는 모달시험과 유한요소해석에 의해, 감쇠비는 모달시험에 의해 산정되었다. 압전가진기와 센서에 관련된 다른 파라미터는 압전체의 특성 상수와 유연 구조물의 고유함수를 사용함으로써 계산되었다. 그러나 이러한 계산은 압전가진기 및 센서의 형상과 위치에 의존하므로 매우 복잡하고 많은 계산량을 요구하게 된다.

본 논문에서는 압전가진기와 센서가 부착된 평판의 간단한 시스템 동정방법을 소개한다. 이 방법은 가진기와 센서의 신호로부터의 모달정보를 추출해 내기 위해 설계된 밴드패스 필터를 사용한다. 각각의 모드의 대해 밴드패스 필터를 사용함으로써 MIMO시스템의 동정분세가 평판 운동의 선형 모달방정식으로 구성된 수 개의 MISO 시스템의 문제로 바뀌게 된다. 이 동정방법은 압전체와 평판의 어떤 특성치도 요구하지 않는다. 또한 이 방법은 압전체의 형상, 개수, 그리고 위치에 관계없이 적용될 수 있다. 제시된 동정방법을 두 쌍의 압전가진기와 센서를 부착한 고정단 평판에 적용하여 실제 실험결과와 비교하여 그 결과가 서로 잘 일치함을 확인하였다.

2. 가진기와 센서가 부착된 평판의 시스템동정

탄성 연속체와 압전체 사이의 관계는 Hagood 등에 의해 제시되었다[6]. 고유좌표계에서 평판의 운동방정식이 비

연성된 방정식의 집합으로 나타낼 수 있는 것은 잘 알려진 사실이다[12]. 다중 압전가진기에 의해 가진된 얇은 평판의 모달 방정식은 다음과 같이 표현된다[9].

$$\ddot{q}_n(t) + 2\zeta_n \omega_n \dot{q}_n(t) + \omega_n^2 q_n(t) = \sum_{l=1}^{m_l} \left\{ \iint_D \phi_n(x, y) \nabla^2 M_l(x, y) dx dy \right\} u_l(t), \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

여기서, D 는 평판의 (x, y) 영역, $q_n(t)$ 는 n 번째 고유좌표, ω_n 은 n 번째 고유진동수(rad/sec), ζ_n 은 n 번째 감쇠비, $\phi_n(x, y)$ 은 n 번째 고유함수, m_l 은 압전가진기의 개수, $u_l(t)$ 는 l 번째 압전가진기의 전압 입력, ∇^2 는 라플라스 연산자, $M_l(x, y)$ 는 l 번째 압전가진기에 의해 발생된 유효 굽힘 모멘트이다. 식 (1)의 적분형은 Green의 정리에 의해 다음 형태로 바뀐다.

$$\begin{aligned} & \iint_D \phi_n(x, y) \nabla^2 M_l(x, y) dx dy \\ &= \oint_D \left\{ \phi_n \frac{\partial M_l}{\partial \eta} - \frac{\partial \phi_n}{\partial \eta} M_l \right\} d\Gamma + \iint_D M_l \nabla^2 \phi_n dx dy \quad (2) \\ &= m_l S_n''(x_l, y_l), \\ & S_n''(x_l, y_l) \triangleq \iint_{D_l} \nabla^2 \phi_n(x, y) dx dy, \quad n = 1, 2, 3, \dots \end{aligned}$$

여기서, Γ 는 영역 D 의 경계, $\partial(\cdot)/\partial\eta$ 은 $\text{grad}(\cdot)$ 의 법선 방향 성분이고, D_l 는 l 번째 압전가진기의 영역이고, m_l 는 압전체의 탄성 특성에 의해 결정되는 모멘트-전압 상수이다. $S_n''(x_l, y_l)$ 은 주어진 영역 D_l 에서의 가진기의 n 번째 모달감도로 정의된다. 식 (2)에서 경계적분형은 압전체가 평판의 경계와 접촉하지 않는다면 무시될 수 있다. 따라서 식 (1)은 모달방정식이라 불리는 다음 형태로 단순화된다.

$$\ddot{q}_n(t) + 2\zeta_n \omega_n \dot{q}_n(t) + \omega_n^2 q_n(t) = \sum_{l=1}^{m_l} m_l S_n''(x_l, y_l) u_l(t). \quad (3)$$

압전센서에 의해서 측정된 변위는 센서의 모달감도를 사용하여 다음 형태로 표현된다.

$$\begin{aligned} z_m(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} v_n S_n''(x_m, y_m) q_n(t), \\ S_n''(x_m, y_m) &\triangleq \iint_{D_m} \nabla^2 \phi_n(x, y) dx dy, \quad m = 1, 2, \dots, n_s. \quad (4) \end{aligned}$$

여기서, $z_m(t)$ 는 m 번째 압전센서의 출력 전압이고, D_m 는 m 번째 압전센서의 영역이고, n_s 는 압전센서의 개수이고, 그리고 v_n 는 압전체의 성질과 평판의 탄성 특성에 의해 결정되는 전압-변위 상수이다. $S_n''(x_m, y_m)$ 은 주어진 영역 D_m 에서의 센서의 n 번째 모달감도로 정의된다. 시스템 동정에서 고유진동수, 감쇠비, 그리고 모달감도와 같은 모달 파라미터들이 일어져야 할 값들이다. 편의를 위해 산정되어야 할 미지수를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} a_n &\triangleq 2\zeta_n \omega_n, & b_n &\triangleq \omega_n^2, \\ c_{nl} &\triangleq m_l S_n''(x_l, y_l), & d_{mn} &\triangleq v_n S_n''(x_m, y_m). \end{aligned}$$

식을 단순화하기 위하여 압전가진기와 센서의 개수를 2개로 하였다. 식 (3)과 식 (4)는 위의 파라미터에 의해 다

음과 같이 쓸 수 있다.

$$\ddot{q}_n(t) + a_n \dot{q}_n(t) + b_n q_n(t) = \sum_{l=1}^2 c_{nl} u_l(t), \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (5)$$

$$z_m(t) = \sum_{n=1}^{\infty} d_{mn} q_n(t), \quad m = 1, 2. \quad (6)$$

이 시스템이 MIMO시스템이고 모든 모달변위에 의해 야기되는 변위는 센서의 출력으로 변환되기 때문에 모든 모달 파라미터들- a_n, b_n, c_{nl}, d_{mn} -을 직접 구하는 것은 매우 어렵다. 이러한 파라미터를 쉽게 구하기 위해서 다음 사실이 사용된다.

사실: 얇은 평판은 작은 감쇠비를 가지고 있고, 운동방정식이 식 (3)과 같은 비연성된 모달 방정식에 의해 표현될 수 있다. 그러므로, 얇은 평판의 주파수응답 함수는 모든 모드에서 공진 피크점을 갖는다.

이 사실은 평판의 각 모드가 상용하는 모드를 위해 설계된 밴드패스 필터를 사용함으로써 독립적으로 동정될 수 있게 한다. 랜덤신호로 평판을 가진함으로써 얻은 센서 출력의 주파수응답에서 각각의 공진피크점을 설정한다. 각각의 공진주파수를 중심으로 하여 적당한 차수와 적당한 대역폭을 갖는 디지털 밴드패스 필터를 설계하는 것이 그리 어렵지 않게 된다. 밴드패스 필터로 여과된 신호는 관심 주파수에 대한 정보를 갖고 있는 반면, 다른 모드에 대한 정보는 거의 갖고 있지 않다. 여과된 신호에서 다른 모드를 무시했을 때 각 모드에 대한 식 (5), (6)은 같은 형태로 근사화된다. 근사된 방정식은 밴드패스 필터에 의해 선택된 각 모드에 대해서만 유효하다.

$$\ddot{q}(t) + a \dot{q}(t) + b q(t) = c_1 u_1'(t) + c_2 u_2'(t), \quad (7)$$

$$z_1'(t) = d_1 q(t), \quad (8)$$

$$z_2'(t) = d_2 q(t), \quad (9)$$

여기서 $u_1'(t)$, $u_2'(t)$, $z_1'(t)$, $z_2'(t)$ 는 같은 밴드패스 필터를 갖는 $u_1(t)$, $u_2(t)$, $z_1(t)$, $z_2(t)$ 의 여과된 신호이다. 식 (7), (8), (9)에서의 파라미터 a, b, c_1, c_2, d_1, d_2 는 얻어야 할 값들이다. 첫째로 더 큰 파워를 갖는 신호를 각각의 $z_m'(t)$ ($m=1, 2$)에서 샘플링된 데이터의 제곱합을 비교함으로써 여과된 출력 $z_1'(t)$, $z_2'(t)$ 중에서 선정한다. 일반적으로 $z_1'(t)$ 가 $z_2'(t)$ 보다 더 큰 파워를 갖는다. 이 때 d_1 은 1로 놓는다. 식 (8), (9)로부터 d_2 는 다음의 제곱 오차합의 목적함수를 최소화함으로써 얻을 수 있다.

$$\min_p \sum_{k=1}^K |z_2'[k] - p z_1'[k]|^2, \quad (10)$$

여기서 $z_1'[k]$ 과 $z_2'[k]$ 는 $z_1'(t)$ 와 $z_2'(t)$ 의 샘플링된 신호이고, p 는 배율상수, 그리고 K 는 샘플의 개수이다. 식 (10)을 최소화하기 위하여 최소자승법을 사용하였다[15]. d_2 를 p 로 하면 $z_1'(t)$ 와 $z_2'(t)$ 의 관계식은 다음과 같이 된다.

$$z_2'(t) = p z_1'(t). \quad (11)$$

다른 파라미터 a, b, c_1, c_2 를 더욱 정확하게 얻기 위해서, 새로운 신호가 정의되는 데 이는 여과된 출력 $z_i'(t)$ 와

$\dot{z}_2'(t)$ 로 구성된다.

$$z'(t) \triangleq z_1'(t) + sgn(p) z_2'(t), \quad (12)$$

여기서, $sgn(\cdot)$ 은 부호함수이다. 이는 $z'(t)$ 의 크기를 $z_1'(t)$ 의 크기보다 향상크게 만들어준다. 식 (8), (9), (12)를 사용하면 식 (7)은 MISO시스템과 같이 $u_1'(t)$, $u_2'(t)$, $z'(t)$ 만으로 구성된 다음 형태로 표현된다.

$$\ddot{z}'(t) + a \dot{z}'(t) + b z'(t) = d_1 \{1 + abs(p)\} \{c_1 u_1'(t) + c_2 u_2'(t)\} \quad (13)$$

여기서, $abs(p)$ 는 p 의 절대값이다. 최소 자승법을 적용하기 위해서 시간에 대한 연속함수인 식 (13)은 이산시간 방정식으로 변환된다. 정확도와 단순성의 장점이 있기에 Tustin의 원리가 도입된다. 식 (13)에 라플라스 변환을 취하면 각각의 s 는 $2(1 - Z^{-1})/T(1 + Z^{-1})$ 로 대치되는 데 여기서 T 는 샘플링 시간간격이고, Z^{-1} 은 자연연산자이다. 따라서 식 (13)은

$$z'[k+2] + \bar{a} z'[k+1] + \bar{b} z'[k] = \bar{c}_1 v_1[k] + \bar{c}_2 v_2[k], \quad (14)$$

$$v_1[k] \triangleq u_1'[k] + 2 u_1'[k-1] + u_1'[k-2], \quad (15)$$

$$v_2[k] \triangleq u_2'[k] + 2 u_2'[k-1] + u_2'[k-2], \quad (16)$$

이 된다. 여기서, “-”는 연속시간 파라미터로부터 전환된 이산시간 파라미터를 의미한다. 충분히 작은 샘플링 시간간격을 가질 때 이산시간 모델은 연속시간 시스템을 충분히 잘 기술해준다. 연속시간 파라미터와 이산시간 파라미터 사이의 관계는 다음 식에 의해 계산된다.

$$a = \frac{4(\bar{b}-1)}{T(\bar{a}-\bar{b}-1)}, \quad (17)$$

$$b = -\frac{4(\bar{a}+\bar{b}-1)}{T(\bar{a}-\bar{b}-1)}, \quad (18)$$

$$c_1 = -\frac{16 \bar{c}_1}{T^2 (\bar{a}-\bar{b}-1)(1+abs(p))}, \quad (19)$$

$$c_2 = -\frac{16 \bar{c}_2}{T^2 (\bar{a}-\bar{b}-1)(1+abs(p))}, \quad (20)$$

$$d_1 = 1, \quad (21)$$

$$d_2 = p. \quad (22)$$

식 (14)는 $z'[k]$, $v_1[k]$ 와 $v_2[k]$ 에 대한 선형 방정식이다. 복적함수는 다음의 제곱 오차합으로 표현된다.

$$\min_{\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}_1, \bar{c}_2} \sum_{k=1}^{K-2} [z'[k+2] + \bar{a} z'[k+1] + \bar{b} z'[k] - \bar{c}_1 v_1[k] - \bar{c}_2 v_2[k]]^2 \quad (23)$$

식 (23)에 최소자승법을 사용함으로써 각 모드에 상응하는 파라미터인 \bar{a} , \bar{b} , \bar{c}_1 , \bar{c}_2 가 얻어질 수 있다. 식 (17)~(22)를 사용하면 이산시간 파라미터들로부터 연속시간파라미터를 계산할 수 있다. 상태공간 형태에 있어서 연속시간의 MIMO 모델은 식 (5), (6)을 사용하여 각 모드의 연속시간 파라미터로부터 얻을 수 있다. 평판에 부착된 두 쌍의 가진기, 센서와 관심있는 모드의 수가 n 일 때 상태공간 모델은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{w}(t) = A w(t) + B u(t), \quad (24)$$

$$z(t) = C w(t), \quad (25)$$

여기서, $w(t) = [q_1(t) \ q_1'(t) \ q_2(t) \ q_2'(t) \ \dots \ q_n(t) \ q_n'(t)]^T$, $u(t) = [u_1(t) \ u_2(t)]^T$, $z(t) = [z_1(t) \ z_2(t)]^T$ 이다. 또한, 행렬 A , B , C 는

$$A = \text{diagonal}(A_1, A_2, \dots, A_n, \dots, A_n), \quad A_i \triangleq \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -b_i & -a_i \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & c_{11} & 0 & c_{21} & \dots & 0 & c_{n1} \\ 0 & c_{12} & 0 & c_{22} & \dots & 0 & c_{n2} \end{bmatrix}^T,$$

$$C = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & d_{21} & 0 & \dots & d_{n1} & 0 \\ d_{12} & 0 & d_{22} & 0 & \dots & d_{n2} & 0 \end{bmatrix}, \quad i=1, 2, \dots, n$$

이 되며, 0는 2×2 영행렬을 의미한다.

3. 실험장치

실험장치는 두쌍의 압전가진기와 센서가 부착된 고정된 강철 평판으로 구성되어 있다. 평판의 치수는 $360mm \times 300mm \times 0.8mm$ 이고, 밀도는 $7870 kg/m^3$, 영률은 $210e9 N/m^2$, 포화송 비는 0.30이다. 평판은 Fig.1에 나타난 것처럼 윗 경계보와 아래 경계보 ($15mm$ 두께, $30mm$ 넓이) 외 수 개의 클램프로 고정하였다. 실험에 사용된 압전체는 G1195 (Piezo Systems Co.)로서 밀도가 $7600 kg/m^3$, 스트레인 상수가 $166e-12 m/V$, 허용률이 $151e-10$, 영률이 $63e9 N/m^2$, 그리고 포화송 비가 0.31이다. 두 가진기와 센서는 처음 세 개의 모드가 잘 가진되고 측정되며, 이 세 모드의 변위가 지배적일 뿐만 아니라 파워면에서 거의 동일한 값을 갖는 위치에 부착되었다. Fig.1에서 보는 바와 같이 각각의 센서는 가진기 둘레에서 일정한 간격을 갖고 병치되었고 이 센서는 전선으로 연결된 4개의 직사각형 모양의 압전체로 구성되었다. 가진기와 센서의 데이터 수집을 위해서 디지털 신호 처리 보드는 Texas Instrument Inc.의 TMS 320C30 DSP Chip과 12비트의 분해능을 갖고 최대 절대 전압으로 5 Volt를 갖는 두 개의 A/D 변환기와 한 개의 D/A 변환기로 구성되었다. 그리고, 두 개의 아날로그 보드가 설계되었다. 그 중 하나는 센서용으로 낮은 증폭비를 갖는 두 개의 전압 증폭기와 1×2 아날로그 디멀티플렉서로 구성되어 있으며 이는 D/A 변환기에 연결되어 있다. 다른 하나는 두 개의 압전가진기를 가진하기 위해 높은 증폭비를 갖는 두 개의 전압 증폭기로 구성되어 있다. 두 아날로그 보드의 모든 이득은 가진기와 센서의 전압 수준을 고려하여 조정된다. 실험장치의 블럭 선도가 Fig.2에 나타나 있다. 두 센서의 출력 $z_1(t)$, $z_2(t)$ 는 A/D 변환기를 통해 직접 샘플링된다. 두 가진기를 가진하기 위한 신호는 저주파 필터로 여과된 백색잡음으로 독립적으로 발생된다. 입력 $u_1(t)$ 과 $u_2(t)$ 는 고증폭비를 갖는 두 개의 전압 증폭기의 출력이다.

4. 실험결과 및 토의

이 실험에서 샘플링 주파수는 $4.867 kHz$ 로 고정되었고 샘플링 횟수는 16384이다. 각각의 가진기의 대역폭 제한

백색 잡음은 180 Hz의 대역폭을 갖는 디지털 저주파 필터로써 랜덤 잡음을 필터링하여 발생되었고 이는 TMS 320C30 DSP 어셈블리에 의해 프로그래밍되었다. 입력 $u_1(t)$ 와 $u_2(t)$ 의 주파수응답은 Fig. 3에 나타나 있다. 이 입력으로 평판을 가진할 때 출력의 주파수응답은 Fig. 4에 보여진다. Fig. 4에 나타나 있지 않은 고주파 모드의 공진 파크점은 입력의 180 Hz의 대역폭과 평판의 가진기와 센서의 위치 때문에 매우 작다. 저자 6개의 모드를 동정대상모드로 하였다. 이 6개의 모드에 대한 각각의 디지털 밴드패스 필터는 6 Hz~10 Hz의 대역폭을 갖는 4차 버터워스 필터로 설계되었다. 이 실험을 위해 제안된 시스템 동정방법을 적용함으로써 시스템 행렬 A , B , C 를 다음과 같이 얻었다.

$$\begin{aligned} A_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1.8619 \times 10^5 & -1.8768 \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -6.1840 \times 10^5 & -2.3140 \end{bmatrix}, \\ A_3 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -9.4863 \times 10^5 & -3.0408 \end{bmatrix}, \quad A_4 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1.7277 \times 10^6 & -7.9215 \end{bmatrix}, \\ A_5 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1.8262 \times 10^6 & -4.4072 \end{bmatrix}, \quad A_6 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -3.2634 \times 10^6 & -9.6997 \end{bmatrix}, \\ B &= \begin{bmatrix} 0 & -2.8866 \times 10^2 & 0 & 5.5301 \times 10^2 & 0 & -2.2506 \times 10^3 \\ 0 & -2.8093 \times 10^2 & 0 & -1.2391 \times 10^3 & 0 & 7.9116 \times 10^2 \\ 0 & -9.9263 \times 10^3 & 0 & -2.3095 \times 10^3 & 0 & 2.7348 \times 10^3 \\ 0 & -6.1057 \times 10^3 & 0 & 4.71877 \times 10^2 & 0 & -4.6160 \times 10^3 \end{bmatrix}^T, \\ C &= \begin{bmatrix} 7.2281 \times 10^{-1} & 0 & -2.9284 \times 10^{-1} & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & -3.5961 \times 10^{-1} & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & -4.4944 \times 10^{-1} & 0 \\ 5.9907 \times 10^{-1} & 0 & -2.1083 \times 10^{-1} & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

고유진동수와 감쇠비는 간단한 계산에 의해 행렬 A 로부터 얻을 수 있고 Table 1에 요약되어 있다. 본 연구에서 제안된 방법으로 얻은 결과를 유한요소법과 모달시험으로 얻은 결과와 비교하였다. FEM에서는 ANSYS 프로그램이 사용되었고 각각의 요소는 8개의 노드를 가진 구조 웨일로서 간주되었다. 요소의 수는 10×10 이다. 부착된 압전체에 의한 강성효과를 포함하지 않은 FEM결과를 Table 1에 요약하였다. 반면에 감쇠비는 FEM으로부터 얻을 수가 없다. 모달시험에서는 경량 가속도계와 충격헤더, 그리고 주파수분석기가 사용되었다. LMS Cada-X v. 3.3을 이용한 모달시험의 결과를 Table 1에 추가하였다 [16]. Table 1은 제안된 동정방법에 의해 얻은 고유진동수가 다른 방법으로 얻은 것들과 유사함을 보여준다. FEM과 모달시험을 통해 모달감도나 특성상수 m_i , v_i 등을 포함한 압전체에 관련된 행렬 B , C 를 계산하는 것은 매우 어렵고 복잡한 데, 그 이유는 이 행렬이 실험에서 평판에 부착된 압전가진기와 센서의 형상, 위치 및 부착 방향에 의존하기 때문이다. 행렬 B , C 가 압전체에 관련된 특성에 의존한다고 할지라도 제안된 동정방법에 의해 이 행렬을 구하는 것은 용이하다. Fig. 4와 Fig. 5는 실제 출력과 모델 출력의 주파수응답을 보여준다. Fig. 4와 Fig. 5를 비교했을 때 주파수응답의 측면에서 동정 모델이 6번째 모드 까지 실제 시스템과 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 6은 시간 영역에서의 실제 출력과 모델 출력의 일부분을 보여

준다. 이 두 신호 또한 잘 일치함을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 다중 가진기와 센서가 부착된 얇은 평판에 관한 간단한 시스템 동정방법을 제시하고 있다. 이 제시된 방법은 얇은 평판이 작은 감쇠비를 갖고 있다는 사실에 근거하고 있다. 밴드패스 필터는 동정되어야 할 저주파수 모드에 따라 설계되었다. 밴드패스 필터와 얇은 평판의 특성을 사용함으로써 MIMO시스템이 다루기 쉬운 MISO시스템으로 변환된다. 최소 자승법은 각 모드의 파라미터를 얻기 위하여 사용되었다. 고정된 평판의 실험 결과는 제안된 방법이 실제로 유용하고 각 모드에 대한 파라미터를 쉽게 구할 수 있음을 보여준다. 제안된 방법은 다음의 몇 가지 장점을 가지고 있다. (1) 밴드패스 필터를 사용함으로써 관심있는 모드를 명확하게 분리해낼 수 있다. (2) 이 방법은 압전체의 특성치나 평판의 고유함수를 필요로 하지 않는다. (3) 이 방법은 압전체의 개수, 위치, 부착 방향, 그리고 형상에 관계없이 사용될 수 있다. (4) 이 방법은 감쇠비가 작은 일반 구조물에도 쉽게 적용할 수 있다. 제안된 방법에 의해 얻어진 모델의 유용성은 검증되었다[17].

참고문헌

- [1] 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.
- [2] Baz, A. and Poh, S., 1988, "Performance of an Active Control System with Piezoelectric Actuators," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 126(2), pp. 327-343.
- [3] Sakawa, Y. and Luo, Z. H., 1989, "Modeling and Control of Coupled Bending and Torsional Vibrations of Flexible Beams," *IEEE Trans. Auto. Control*, Vol. 34, No. 9, pp. 970-977.
- [4] Lee, C. K. and Moon, F. C., 1989, "Laminated Piezopolymer Plates for Torsion and Bending Sensors and Actuators." *Journal of Acoust. Soc. Am.*, Vol. 85(6), pp. 2432-2439.
- [5] Williams, T. and Juang, J. N., 1992, "Sensitivity of the Transmission Zeros of Flexible Space Structures," *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 15, No. 2, pp. 368-375.
- [6] Hagood, N. W., Chung, W. H. and von Fltow, A., 1990, "Modelling of Piezoelectric Actuator Dynamics for Active Structural Control," *AIAA 31st Structure, Structural Dynamics and Materials Conference*, Long Beach, April.
- [7] 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.
- [8] 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," *ASME, Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 115, pp. 332-339.
- [9] Tzou, H. S. and Fu, H. Q., 1994, "A Study of Segmentation of Distributed Piezoelectric Sensor and Actuators Part I: Theoretical Analysis," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 172, No. 2, pp. 247-259.
- [10] Hong, S. Y., 1992, "Active Vibration Control of Adaptive Flexible Structures Using Piezoelectric Smart Sensors and Actuator," Ph. D. Thesis, The Pennsylvania State University.
- [11] Falangas, E. T., Dworak, J. A. and Koshigoe, S., 1994, "Controlling Plate Vibrations Using Piezoelectric Actuators," *IEEE, Control System*, Vol. 14, No. 4, pp. 34-41.
- [12] Meirovitch, L., 1990, *Dynamics and Control of Structures*. Wiley Interscience.
- [13] Song, C. K., Han, S. W., Lee, J. M., Lee, S. W. and Hwang, J. K., 1995, "Distributed Modal Sensitivities of Piezoelectric Materials for Active Vibration Controls," *KSEA Association International Conference*.

- San Francisco, CA., Aug. 30- Sep. 3, pp. 263-276.
- [14] 송철기, 박재상, 이장무, 황진권, 최종호, 1995, "분포보달감도를 이용한 평판의 능동 진동제어," 한국 정밀 공학회, 춘계 학술대회, pp. 320-325.
- [15] Söderström, T. and Stoica, P., 1989, *System Identification*, Prentice-Hall, Inc., pp. 60-71.
- [16] CADA-X Rev. 3.3, 1995, *User manual*, LMS International.
- [17] 송철기, 이장무, 황진권, 최종호, 1995, "분포 압전 가진기와 센서를 이용한 평판의 강인한 LQG 제어," 대학 기계 학회, '95년도 동력학 및 제어부문 학술대회 논문집, pp. 118-121.

Table 1 Natural frequencies and damping ratios.

Mode	Natural frequency (Hz)			Damping ratio ($\times 10^{-4}$)	
	Proposed method	Modal testing	FEM	Proposed method	Modal testing
1	68.67	68.91	68.03	2.175	3.403
2	125.16	125.28	123.15	1.471	2.369
3	155.01	155.56	153.13	1.561	2.913
4	209.20	207.75	204.74	3.013	3.573
5	215.08	213.38	212.02	1.631	2.197
6	287.51	284.38	283.47	2.685	4.062

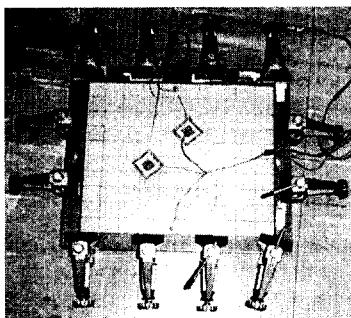


Fig. 1 All-clamped plate with two co-located actuators and sensors.

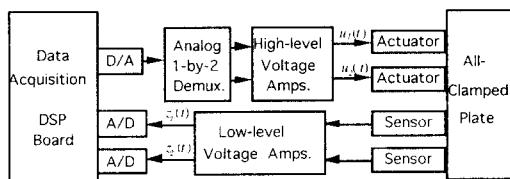
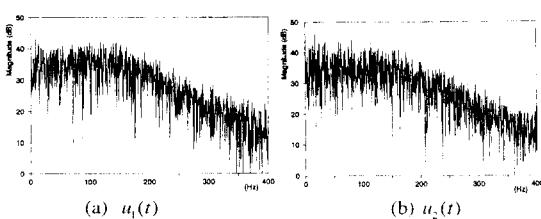
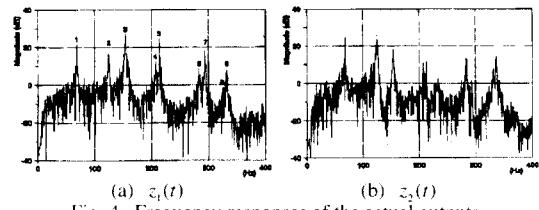


Fig. 2 Block diagram of the experimental system.

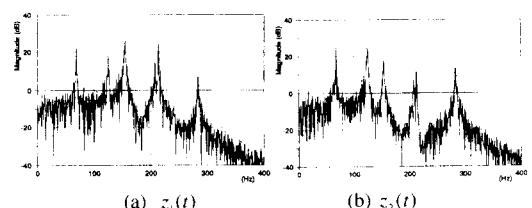


(a) $u_1(t)$ (b) $u_2(t)$

Fig. 3 Frequency responses of the inputs.



(a) $z_1(t)$ (b) $z_2(t)$
Fig. 4 Frequency responses of the actual outputs.
(The numbers denote the corresponding modes)



(a) $z_1(t)$ (b) $z_2(t)$
Fig. 5 Frequency responses of the model outputs.

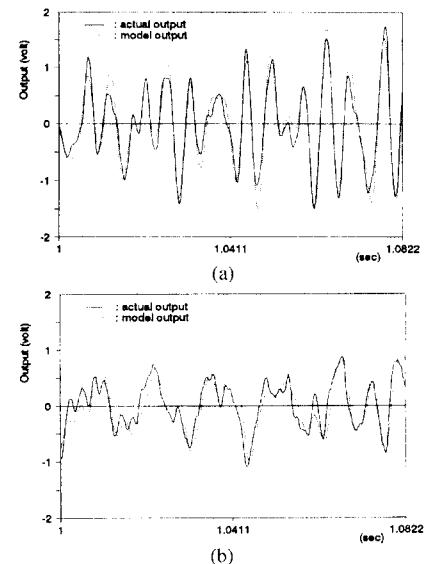


Fig. 6 The actual outputs and the model outputs.
(a) $z_1(t)$, (b) $z_2(t)$