

압전형 감지기/작동기를 이용한 외팔보의 능동 진동 제어

최 수영*, 김 진태*, 정 태수*, 강 기원**, 박 기현*
 *성균관 대학교, **정보통신연구진흥원

Active Vibration Control of a Cantilever Beam Using Piezoelectric Sensor/Actuator

Sooyoung Choi*, Jintae Kim*, Taesoo Jung*, Kiwon Kang**, Kiheon Park*
 *SungKyunKwan University, **Institute of Information Technology Assessment

Abstract - This paper presents the use of piezoelectric ceramics for sensing and actuation purposes for vibration control. The PZT sensors and actuators are designed and fabricated. The transfer function of the beam is obtained via the Lagrangian method.

용하여 감지기와 작동기를 직접 제작하고, 외팔보 시스템에 부착하여 능동 진동 제어 실험을 위한 기초적인 실험을 수행 하였다. 또한 진동 제어 실험을 위한 피드백(Feedback) 제어기 설계를 위해 모델링을 수행하여 전달함수를 구하였다.

2. 외팔보 시스템

1. 서 론

2.1 외팔보의 제작

우주 항공 산업이나 기계구조물에 대한 경량화 추세 및 제어기법 개발로 구조물이 점차적으로 유연하게 되고, 이러한 경우 내력이나 외력에 의한 진동이 시스템 성능에 심각한 문제를 유발시킬 수 있다. 특히 플러터(flutter)현상 혹은 돌풍(gust)에 대한 반응감소를 위해 제어이론을 응용한 억제 시스템에 대한 연구가 활발하며, 이와 같은 진동을 억제하기 위한 방법으로는 크게 수동제어와 능동제어로 나눌 수 있다. 수동제어는 외부에서의 에너지 유입 없이 구조물 자체의 동역학적 특성을 변화시킴으로서 응답을 조절하는 것을 말하며, 능동 진동 제어는 구조물 자체에 감지기와 작동기를 표면에 부착하거나 구조물의 한 부분으로 삽입하여 진동을 능동적으로 제어하는 개념을 말한다. 감지기와 작동기, 그리고 능동 진동 제어회로를 구조물에 포함시킨 구조물을 일반적으로 지능 구조물(Smart Structure)이라고 말한다. 지능 구조물의 재료로 쓰이는 것으로는 전기유동 유체, 형상기억합금(shaped memory alloy), 압전재료(piezoelectric material) 등이 있으며, 신소재인 압전 재료의 개발로 새로운 방향을 제시하고 있다. 가해지는 전압에 비례해서 변형을 일으키는 압전재료는 구조물의 적절한 위치에 부착되어 수축, 팽창을 유발하여 발생된 변위 에너지를 모구조물에서 제어력으로 작용시켜, 설계자가 원하는 반응을 얻고자 하는데 응용되고 있다. 널리 쓰이고 있는 압전재료로는 PZT(Lead Zirconia Titanium)와 PVDF(Polyvinylidene fluoride)가 있다. PZT는 다른 압전재료에 비하여 높은 감도를 가지며, 압음성분이 적게 나타나고 열변화에 민감하지 않고, 가벼운 중량비와 넓은 주파수대역을 가지고 있으며 또한 높은 강성과 뛰어난 선형성 때문에 취성이 큰 단점에도 불구하고 감지기 및 작동기로서 가장 널리 사용되고 있다. 압전재료에 대한 연구는 Crawley, de Luis[1,2]와 Crawley, Anderson, Lazarus, Tzou, Lee[3,4,5]등에 의해서 간단한 등방성, 복합재 보 및 평판에 대한 정적, 동적 거동에 대한 이론적 해석과 간단한 실험이 실시되었고, Preumont[6]등은 3차원 대형 트러스 구조물의 제어를 위해 압전재료를 이용한 실험적 연구를 하였다. Hanagud, Oba[7]등은 압전재료를 감지기/작동기로 사용하여 외팔보에 대한 최적 진동제어 알고리즘을 개발, 그 성능에 대한 효과를 조사하였다. 압전재료가 구조물과 결합된 시스템에 대한 해석은 간단한 보의 해석으로부터 출발하는데 Crawley등[2,8]은 압전작동기를 부착한 구조물의 모델화에 대한 초기 논문들이다. 본 연구에서는 대표적인 압전재료인 PZT-8A 소자를 이

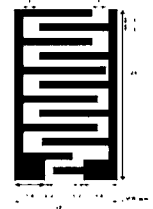


그림 1. Interdigitated 전극 패턴

PZT-8A 압전세라믹의 압전특성을 감지기 및 작동기에 응용하기 위하여 그림 1과 같은 적층면체의 PZT를 유기물 제거방법인 Organic cleaning을 한 후 그림 1과 같이 마스크 패턴(mask pattern)을 이용하여 전극을 성장하였다. 기판의 세척은 초음파 세척기에서 아세톤에 10분간 세척하여 유기물을 제거한 후 메탄올과 D.I. water에 각각 10분간 세척한 후 질소 가스를 사용하여 건조시켰으며 세척 시 온도는 70°C로 유지하였다. 세척이 끝난 기판에 thermal evaporator를 이용하여 전극을 증착 하였다. 증착 시의 진공도는 3×10^{-5} Torr이었으며, 텅스텐 보트를 사용하였고 전극 증착에 사용된 전극 재료는 전기적 전도도가 높은 알루미늄(Al)을 사용하였다. shadow mask 전극의 형태는 그림 1과 같이 압전소자 표면을 전면 도포하고, 두께방향진동을 이용하는 경우와, 비틀림 진동을 이용하는 interdigitated 형을 선형하여 제작하였다.

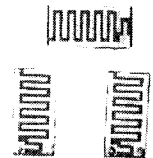


그림 2. 제작된 작동기와 감지기

그림 2는 제작된 작동기와 감지기의 실물 사진이며, 그림 3은 제작 공정의 순서도이다.

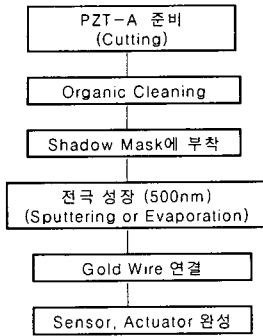


그림 3. 감지기 및 작동기의 제작 순서도

실험에 사용된 구조물을 제작하기 위하여 길이 0.2m, 높이 0.05m의 강철 bare에 L-bracket을 이용, 보의 고정대를 제작하였고, 그림 4에 제작된 외팔보의 실물 사진을 나타내었다. 여기서 만들어진 고정대와 보 연결 부분의 길이는 0.03m이며, 보의 재료인 스테인레스를 컷터(cutter)를 이용하여 0.22m로 잘라서 보를 제작하였다. 제작한 보에 PZT-8A의 후면에 에폭시 접착제와 실버 페이스트(silver paste)를 이용하여 부착하였다.

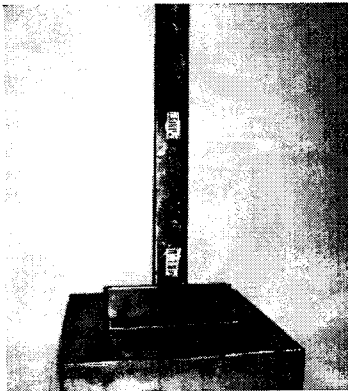


그림 4. 외팔보 시스템의 실물 사진

2.2 외팔보 시스템

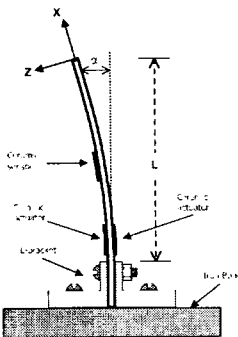


그림 5. 외팔보 시스템의 개략도

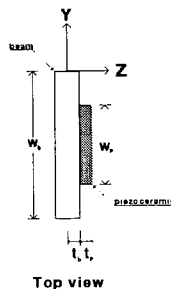


그림 6. 감지기 및 작동기가 부착된 외팔보의 평면도

그림 5는 감지기와 작동기가 부착된 외팔보시스템의 개략도이며, 그림 6은 감지기와 작동기가 부착된 외팔보의 평면도를 나타낸다. 제작된 압전세라믹과 보의 매개변수를 다음의 표 1.2에 나타내었다.

표 1. 압전세라믹의 매개변수

piezoceramic parameters	
locations (along the x axis)	0.035m 0.0607m, 0.145m 0.1707m
thickness(t_p)	0.0009m
width(w_p)	0.0127m
stiffness(c_{11})	$1.4688 \times 10^{11} (\text{N}/\text{m}^2)$
stiffness(c_{12})	$0.8109 \times 10^{11} (\text{N}/\text{m}^2)$
poisson's ratio(ν_p)	0.31
piezoelectric constant(d_{31})	$0.97 \times 10^{-12} (\text{m}/\text{V}, \text{C}/\text{N})$
piezoelectric constant(d_{33})	$225 \times 10^{-12} (\text{m}/\text{V}, \text{C}/\text{N})$
piezoelectric material constant(e_{31})	$0.2211 (\text{C}/\text{m}^2)$
area(A_p)	$1.143 \times 10^{-5} (\text{m}^2)$
density(ρ_p)	$7600 (\text{kg}/\text{m}^3)$
capacitance(C_p)	4.1423nF

표 2. 보의 매개변수

beam parameters	
length(L)	0.22m
width(w_b)	0.022m
thickness(2 t_b)	0.001m
stiffness(c_b)	$200 \times 10^9 (\text{Pa} \cdot \text{N} \cdot \text{m}^2)$
poisson's ratio(ν_b)	0.33
density(ρ_b)	$7800 (\text{kg} \cdot \text{m}^3)$
young's modulus(E)	$200 \times 10^9 (\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2)$
moment of inertia(I_b)	$1.83 \times 10^{-12} (\text{m}^4)$
cross section area(A_b)	$2.2 \times 10^{-5} (\text{m}^2)$

3. 모델링

외팔보 시스템의 모델링은 Zeinoun[9] 논문을 참고하여 구하였으며, 먼저 압전방정식을 소개하고, 라그랑지안 방법(Lagrangian method)에 의해 시스템을 모델링하였다.

3.1 압전 방정식

압전재료에 가해지는 전압과 수직응력에 의하여 발생하는 변형도와 전하밀도의 관계는 다음과 같이 연성된 식으로 표현된다.

$$\epsilon_p = S_{pq}^E + d_{ip} E_i \quad (p, q = 1, \dots, 6) \quad (1)$$

$$D_i = d_{iq} \sigma_q + \epsilon_{ik}^E E_k \quad (k = 1, 2, 3)$$

여기서,

ϵ_p : 수직변형도(normal strain)

- σ_q : 수직응력(nomal stress)
- E_i : 전기장(electric field)
- D_i : 전하밀도(charge density)
- S_{pq}^E : 탄성 순응 계수(elastic compliance)
- ϵ_{ik}^s : 부전도 계수(dielectric permittivity)
- d_{ip} : 압전 변형 상수(piezoelectric strain constants)

이다. 즉 변형도와 전하밀도는 압전재료에 가하여지는 응력과 전기장의 크기에 비례함을 의미한다.

3.2 외팔보 시스템의 모델링

라그랑지안 방법에 의해 시스템을 모델링하기 위해 운동에너지(Kinetic energy)와 위치에너지(Potential energy)에 대하여 표현하게 된다. 일반적인 좌표의 벡터 q 는 다음 식(2)와 같이 나타내며, 여기서 η 는 진동 변위의 크기이다. 좌표축은 그림 5를 따른다.

$$q = [\eta_1 \cdots \eta_p] \quad (2)$$

3.2.1 질량 매트릭스(M) 구하기

압전세라믹의 운동에너지와 보의 운동에너지를 고려하여 전체 질량 매트릭스(mass matrix)를 구하면 다음 식(3)과 같다.

$$M = A_p \rho_p \int_a^{a+l} \phi^T \phi dx + A_s \rho_s \int_0^L \phi^T \phi dx \quad (3)$$

여기서,

- a_j : j번째 세라믹의 x축 좌표의 첫 번째 끝부분
- l_j : j번째 세라믹의 길이
- ϕ : 보의 모드모양(mode shape)이다.

3.2.2 강성 매트릭스(K) 구하기

압전세라믹의 운동에너지와 보의 운동에너지를 고려하여 전체 강성 매트릭스(stiffness matrix)를 구하면 다음과 같다.

$$K = I_p \widehat{c}_p \int_a^{a+l} \phi''^T \phi'' dx + c_s I_s \int_0^L \phi''^T \phi'' dx \quad (4)$$

$$\widehat{c}_p = c_{11} (1 + \nu_j^2) - 2c_{12} \nu_j \quad (5)$$

$$I_p = \frac{1}{3} w_p t_p (t_p^3 + 3t_p t_b + 3t_b^2) \quad (6)$$

여기서,

- p_j : j번째 세라믹
- ϕ'' : 보의 모드모양을 두 번 미분한 값
- ν_j : j번째 세라믹의 포아송 비(poisson ratio)

3.2.3 Γ 구하기

$$\Gamma = \frac{1}{2} w_p (2t_b + t_p) e_{31} (1 - \nu_p) \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_a^{a+l} \quad (7)$$

$$e_{31} = d_{31} (c_{11} + c_{12}) \quad (8)$$

3.3 시스템의 전체 상태공간 모델

앞에서 구한 값을 역학방정식에 넣은 일반화된 미분방정식은 다음과 같다.

$$M \ddot{\eta} + N \dot{\eta} + K \eta = \Gamma V_p \quad (9)$$

여기서 V_p 는 피에조세라믹 작동기에 가해지는 전압을 의미하며, N 은 감쇠(damping matrix)로서 실험적으로 구하였다. 위의 식(9)를 상태공간 모델식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{X} = AX + Bu \quad (10)$$

$$y = CX + Du$$

$$X = \begin{bmatrix} \eta \\ \dot{\eta} \end{bmatrix}, \quad u = V_p = [v_{p1} \cdots v_{pr}] \quad (11)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}N \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}\Gamma \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$C = [\Gamma^T \quad 0], \quad y = Q \quad (13)$$

여기서, r 은 r 번째 세라믹의 입력 전압을 나타내며 Q 는 피에조세라믹 감지기의 출력 전하(charge)를 나타낸다. 위의 식들로부터 구한 상태공간 모델을 외팔보 시스템의 전체 전달함수로 나타내면 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{3.638 \times 10^{-4} s^3 + 1.1665 \times 10^{-3} s^2 + 1.1995 \times 10^{-4} s + 0.0001253}{s^2 + 6060.4315 s^2 + 509376.4985 s - 1933899.9457 s - 967252517.8563} \quad (14)$$

4. 결 론

본 연구에서는 압전세라믹 소자인 PZT-8A를 이용하여 감지기와 작동기를 제작하였으며 제작 되어진 감지기와 작동기를 스테인레스 스틸의 보에 장착하여 외팔보 시스템을 구축하였다. 또한 라그랑지안 방법을 이용하여 모델링을 수행하여 전체 시스템의 전달함수를 구하였다. 이후에 피드백 제어를 설계하여 능동 진동 제어실험을 수행 하는데 이용할 것이다.

- 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2000-00 0252-0)지원으로 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] Crawley, E.F., de Luis, J., "Use of Piezo Ceramics as Distributed Actuators in Large Space Structure," AIAA Paper No.85-0626.
- [2] Crawley, E.F., de Luis, J., "Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures," AIAA Journal, Vol.25, No.10, pp.1373-1385, 1987.
- [3] Crawley, E.F., Lazarus, K.B., "Induced Strain Actuation of Isotropic and Anisotropic Plates," AIAA Paper No.89-1326.
- [4] Crawley, E.F., Anderson, E.H., "Detailed Models of Piezoelectric Actuation of Beams," AIAA Paper No.89-1388.
- [5] Tzou, H.S., Zhong, J.P., "Adaptive Piezoelectric Shell Structures: Theory and Experiments," AIAA Paper No.91-1238.
- [6] Preumont, A., Dufour, J., Malekian, C., "Active Damping by Local Force Feedback with Piezoelectric Actuators," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol.15, No.2, pp.390-395, March-April 1992.
- [7] Hanagud, S., Obal, M.W., Calise, A.J., "Optimal Vibration Control by the Use of Piezo-ceramic Sensors and Actuators," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol.15, No.5, pp.1199-1206, September-October 1992.
- [8] Crawley, E.F. and Anderson, E.H., "Detailed Models of Piezoceramic Actuation of Beams," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol.1., No.1., pp.4-25, 1990.
- [9] Issam J. Zeinoun, "Piezoelectric Ceramics for Vibration Damping of Flexible Structures," Master's thesis, Polytechnic University, January 1995.