

〈論 文〉

압전소자를 액츄에이터로 이용한 탄성보 진동의 능동제어

Active vibration control of flexible beam using piezoelectric actuator

김 종 선*

Jong-Sun Kim

(1992년 7월 6일 접수; 1992년 8월 1일 심사완료)

ABSTRACT

A boundary control method that controls interior state by actively controlling the boundary conditions in boundary value problems is proposed for the vibration control of flexible beam by using piezoelectric actuators. The governing equations are derived based on the Euler beam theory and the reduced order model is obtained by modal truncation. The spillover effects caused by the uncontrolled high frequency modes are analyzed and the method selecting a suitable sensor location is also proposed. The lag compensator in digital form is realized by using a microcomputer and its peripheral devices. The efficiency of the proposed control scheme is demonstrated experimentally and compared with the simulation results.

1. 서 론

종래의 일반 기계류 뿐만 아니라 최근 발전이 현저한 메카트로닉스 관련제품, 예를 들면 유연성있는 로봇의 팔이라든가 정보산업 관련제품의 주요 부품인 기억장치의 디스크 헤드 등에서는 경량화, 고속화와 더불어 고정밀화가 필연적으로 요구되고 있으며 이에 는 작동 중 발생하는 과도한 진동의 효과적인 제어가 매우 중요하다^(1~5). 특히 작동 중이거나 운송장치에 탑재되어 있는 경우 등에는 단순한 수동형 방진기구로는 요구되는 신뢰성과 정밀도를 얻기 어려우므로 능동제어가 필수 불가결하다는 것이 널리 인식되고 있다. 또한 이들 제품은 고속화를 위한 경량화가 필수적으로 요구되므로 액츄에이터와 센서가 가능하면

소형이고 가벼워야만 하며 고정도의 스트레인 감지능력과 위치제어 능력이 요구되는데 이에 가장 적합한 요소로 등장한 것이 압전 세라믹 소자이다^(6~10).

압전소자는 응력을 가하면 이에 상응하는 전하가 발생되고 반대로 압전소자 양단에 전위차가 인가되면 스트레인이 발생하는 이른바 압전 효과와 역압전효과를 가지고 있어 이미 여러 용도의 센서와 액츄에이터로써 사용되고 있다. 이러한 좋은점과 적용범위의 넓이에도 불구하고 국내에서는 이에 대한 연구가 극히 미약한 실정이며 최근센서로서의 압전소자의 응용은 간혹 발견되고 있고⁽⁷⁾ 액츄에이터로서의 응용도 유연한 구조물의 진동제어⁽⁸⁾ 및 초정밀 위치제어 기기의 부품으로서 연구되기 시작한 것으로 알려졌지만⁽⁹⁾ 아직 미미한 기초 단계에 있다. 이 연구에서는 이런 압전 세라믹 소자를 액츄에이터로 이용하여 유연성 있는 기계구조물의 대표적 모델인 탄성보의 진동제어에

* 정회원, 한국항공대학 기계설계학과

적합한 제어기를 설계하고 그 성능을 이론 해석 및 실험적으로 검증하였다.

연구의 내용은 크게 (1) 탄성보의 동적 모델링 및 수학적 해석, (2) 제어기의 설계 및 시뮬레이션, 실험으로 분류할 수 있다. (1)에서는 해석적 방법으로 Euler 보이론을 기반으로 운동방정식을 유도하고 연속체의 모우드 해석법을 이용하여 무한차원의 문제를 축약된 제어모델로 간략화시켰다. 모우드 변수 및 강제진동 해석을 통하여 개회로계의 응답특성을 시간 및 주파수 영역에서 해석하였다. 또한 적층형 압전 액츄에이터를 이용하여 보의 경계조건을 능동적으로 변화시키는 경계제어(boundary control)를 이용하여 탄성보의 진동을 제어할 수 있는 방법을 제시하고 아울러 이에 관련된 해석을 수행하였다. 이는 보가 경계치 문제에 속하므로 적절한 제어방법이라 판단된다. 이 방법은 비교적 큰 힘이나 모멘트를 낼 수 있기 때문에 얇은 보 뿐만 아니라 비교적 두꺼운 보의 끝단의 진동 및 위치제어에 유리한 측면이 있다. (2)에서는 개루프계의 모델에 기초한 제어기 설계 및 시뮬레이션을 통한 성능해석이 포함되어 있다. 제어기 설계시 탄성보는 일종의 분포파라메타계(distributed parameter system) 즉 무한차원계이므로 모델의 축약이 필수적이고 이에 따라 모델에서 제외된 모우드에 의한 영향(spillover effect)이 중요하며 이에 대한 연구도 아울러 수행하였다. 이에는 센서의 위치가 중요하며 최적의 위치 선정방법도 함께 제시하였다. 마지막으로 퍼스널컴퓨터 및 주변기기를 이용한 디지털 제어 실험을 수행하여 시뮬레이션과 비교하였다.

이 연구에서 개발된 제어기는 비교적 저렴하면서도 정밀도가 높고 작고 가벼우며 특별한 외부 지지장치가 필요하지 않으므로 위에 예를 든 대상이외에도 초정밀 위치제어기, 초정밀 모우터, 장래의 우주구조물의 진동 및 형상제어, 고속회전체의 진동제어 등 매우 광범위하게 이용될 수 있을 것이다.

2. 시스템 모델링 및 탄성보의 모우드 해석

Fig. 1에 센서와 액츄에이터를 포함한 시스템의 개략도가 그려져 있다. 압전 액츄에이터는 보의 왼쪽 끝단에 위치하며 경계조건중 기울기를 제어하여 보의 오른쪽 단의 위치를 원하는 위치로 제어하는 역할을 한다. 그림과 같이 길이 L 인 유연한 보를 $x=0$ 인 경계에서 기울기가 시간의 함수로 주어진 경우로 모형화하면 보의 운동 방정식은 다음과 같다.

$$m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + c \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right] = 0 \quad (1)$$

여기서 m 은 보의 단위길이 당 질량, c 는 비례감쇠 계수, EI 는 강성상수로 E 는 탄성계수, I 는 보 단면의 관성 모멘트이고 윗첨자는 시간에 대한 미분을 의미한다. 보의 변위 $w(x, t)$ 는 다음과 같은 경계조건과 초기조건을 만족해야 한다.

$$w(0, t) = \frac{\partial^2 w(L, t)}{\partial x^2} = \frac{\partial^3 w(L, t)}{\partial x^3} = 0, \quad \frac{\partial w(0, t)}{\partial x} = \theta(t) \quad (2a)$$

$$w(x, 0) = w_0(x), \quad \dot{w}(x, 0) = \dot{w}_0(x) \quad (2b)$$

식 (1)은 $w = x\theta + z$ 의 관계식을 이용하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$m \frac{\partial^2 z(x, t)}{\partial t^2} + c \frac{\partial z(x, t)}{\partial t} + EI \frac{\partial^4 z(x, t)}{\partial x^4} = m x \ddot{\theta}(t) - c x \dot{\theta}(t) \quad (3)$$

개루프 시스템($\theta=0$)일 때 처짐 z 를 다음과 같이 각각의 모우드 성분별로 분리하여 전개하고

$$z(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \Phi_i(x) q_i(t) \quad (4)$$

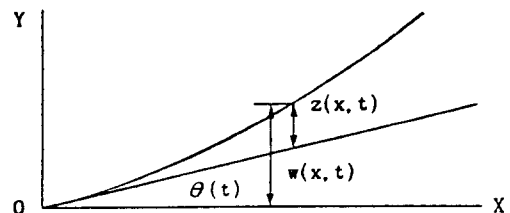
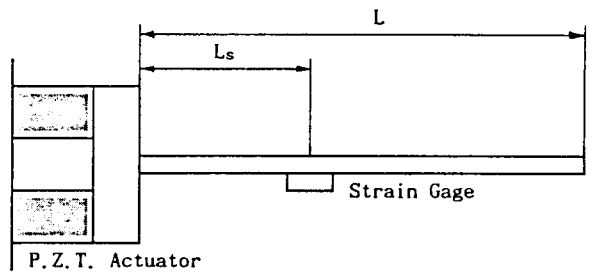


Fig. 1 Flexible beam model including sensor and actuator

이를 식 (3)의 지배방정식에 대입한 후 여기에 다음과 같은 정규 모우드의 직교성을 이용하면

$$\int_0^L m \Phi_i(x) \Phi_j(x) dx = \delta_{ij} \quad (5a)$$

$$\int_0^L EI \Phi_i(x) \Phi_j(x) dx = \omega_i^2 \delta_{ij} \quad (5b)$$

식 (3)는 다음과 같이 분리된 간단한 형태의 모우드 식이 된다.

$$\ddot{q}_i(t) + 2\zeta_i \omega_i \dot{q}_i(t) + \omega_i q_i(t) = d_i (\ddot{\theta}(t) + 2\zeta_i \omega_i \dot{\theta}(t)) \quad (6)$$

$i=1, 2, 3, 4, \dots$

여기서

$$d_i = -\int_0^L m x \Phi_i(x) dx, \quad 2\zeta_i \omega_i = c/m$$

센서로서 스트레인 게이지를 사용할 경우 단순 굽힘의 경우를 가정하면 측정되는 스트레인 ϵ_s 다음과 같다.

$$\epsilon_s = -\frac{y}{\rho} \approx -\frac{d^2 z}{dx^2} y \quad (7)$$

여기서 ρ 는 처짐이 생긴 보의 곡률 반경이고 y 는 중립축으로 부터의 거리이다. 스트레인 게이지가 $y = -h/2$ 인 보의 표면에 부착되어 있고 고정단으로 부터의 거리를 L_s 라하고 스트레인 게이지의 증폭 계수를 K_s 라 하면 최종 출력은 다음과 같다.

$$\tau_s \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = \frac{K_s h}{2} \sum_{i=1}^{\infty} \Phi''(L_s) q_i(t) \quad (8)$$

여기서 τ_s 는 센서 및 증폭기의 시정수로서 스트레인 증폭기의 저역 통과 필터의 시정수와 거의 일치한다. 식 (8)에서 보면 센서의 출력은 모우드의 형상의 2계 미분에 비례하므로 센서의 위치는 2계미분 즉 $\Phi''(L_s)$ 가 최대가 되는 점에 위치 시키는 것이 가장 좋다는 것을 알 수 있다. 특히 이 값이 0이 되는 점에서는 그 모우드 성분을 측정하지 못하므로 가 관측성(observability)이 성립하지 않게되어 제어 불가능함을 알 수 있다. $L_s = L$ 이 되면 즉 스트레인 게이지를 자유단에 부착시키면 자유단에서는 항상 곡률 변경이 무한대가 되어 스트레인이 발생하지 않으므로 어떤 모우드도 제어 할 수 없음을 알 수 있다. 1차

모우드의 경우 자유단을 제외한 모든 점에서 출력이 검출되지만 2차, 3차 모우드는 각각 1개와 2개의 노드(node)점이 있어 그 지점에 센서가 위치하면 그 모우드 성분은 검출되지 않는다.

다음으로 액츄에이터에 해당하는 부분을 모델링하면 일반적으로 변형률과 응력, 전계와의 관계를 나타내는 압전효과와 역효과의 기본식은 다음과 같다⁽¹⁰⁾.

$$D_m = d_{mi} T_i + \epsilon^T_{mk} E_k \quad (9a)$$

$$S_i = s^E_{in} T_n + d_{ki} E_k \quad i, j=1, 2, \dots, 6, m, k=1, 2, 3 \quad (9b)$$

여기서 S_i 와 T_i 는 변형률과 응력, D_m 와 E_k 는 전기변위와 전계의 세기, d_{ki} , s^E_{in} , ϵ^T_{mk} 는 각각 탄성 콤플라이언스, 전기상수, 유전률을 나타낸다. s^E_{in} 와 d_{ki} 중에서 결정의 대칭성에 의해 0이 되는 항이 있는 관계로 압전성이 있고 이 연구에서 사용된 압전 액츄에이터처럼 분극축이 3인 경우 식 (9b)는 응력이 작용하지 않을 경우($T=0$) 다음과 같다.

$$S_1 = S_2 = d_{31} E_3, \quad S_3 = d_{33} E_3, \quad S_4 = S_5 = S_6 = 0 \quad (10)$$

즉 분극축 3방향에 E_3 를 인가하면 3방향이 늘어나고 ($d_{33} > 0$), 수직방향(1, 2방향)은 수축한다($d_{31} < 0$). 압전소자의 전압과 변위특성($S_3 = d_{33} E_3$)에서 전력증폭기로부터 인가되는 전압 v 와 압전소자의 변위 Δl 과의 관계식은 $\Delta l(t) = K_1 v_1(t)$ 로 쓸 수 있고, Fig. 1에 도시된 바와같이 미소 변형을 가정하여 Δl 과 보의 고정단의 기울기 θ 와의 관계를 $\theta(t) = K_2 \Delta l(t)$ 의 선형관계로 표시하면 전압 v 와 기울기 θ 와의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_a \frac{d\theta(t)}{dt} + \theta(t) = K_a v_1(t) \quad (11)$$

여기서 τ_a 는 압전소자의 시정수이고 $K_a = K_1 K_2$ 는 압전소자에 인가되는 전압과 기울기 사이의 비례상수이다. 보통 압전소자는 응답특성이 보의 진동수에 비하여 매우 빠르므로 시정수 τ_a 는 거의 무시할 수 있다. 모우드 식 (6)과 출력 관계식 (8), 액츄에이터의 동특성식 (11)을 고려하면 개회로계의 수학적 모델식은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\frac{Y(s)}{V_1(s)} = G(s) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{K_s}{(1 + \tau_s s)}$$

$$\frac{c_i d_i (s^2 + 2\zeta_i \omega_i s)}{(s^2 + 2\zeta_i \omega_i s + \omega_i^2) (1 + \tau_{ai} s)} \quad (12)$$

여기서

$$c_i = \frac{h}{2} \phi''(L_s) \text{이다.}$$

3. 제어기 설계 및 시뮬레이션

식 (12)로 표시되는 단일 입출력 시스템에 대하여 액추에이터, 센서 및 제어기등을 포함한 폐회로계를 블록 선도(block diagram)로 나타내면 Fig. 2와 같으며 폐회로 전달 함수 $G_c(s)$ 는 다음과 같다.

$$G_c(s) = \frac{N_c(s)}{D_c(s)} = \frac{G(s)H(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (13)$$

여기서 $H(s) = K \frac{1 + \tau_1 s}{1 + \tau_2 s}$

위식에서 $G(s)$ 및 $H(s)$ 는 각각 개회로계의 전달 함수와 제어기의 전달함수이며 K, τ_1, τ_2 는 적절한 사양을 만족 시키도록 결정될 제어기의 계수이다. 제어기 설계 및 시뮬레이션을 위해 선정된 변수는 다음

과 같다.

- 보의 길이(L), 폭(b) 및 높이(h) : $L=0.2\text{m}$, $b=0.01\text{m}$, $h=0.002\text{m}$
- 보의 단위 길이당의 질량: $m=0.1578\text{kg/m}$
- 전력 증폭기 및 액추에이터를 포함한 증폭계수: $K_a=2.4 \times 10^{-4} \text{ rad/v}$
- 고정단에서 센서까지의 거리 : $L_s=0.057\text{m}$
- 스트레인 게이지 및 증폭기의 증폭계수 및 시정수 : $K_s=10^4 \text{V}/\epsilon$, $\tau_s=0.0016\text{s}$.

위에 제시된 보의 재원을 이용하여 고유진동수와 감쇠비를 구한 결과 $\omega_1=41.37\text{Hz}$, $\zeta_1=0.003$, $c_1=0.6079$, $d_1=0.0202$ 가 되었다. 감쇠비는 대수 감쇠율로부터 실험적으로 추정한 값이다.

Fig. 3에 개루프계의 극좌표선도(polar plot)가 나타나 있다. 극좌표선도에서 보면 0에 위치한 영점(zero)의 영향으로 저주파영역에서 위상이 앞서므로 진상 보상기(lead compensator)나 미분 제어기를 이용해 위상을 진상시키면 오히려 불안정해지는 것을 알 수 있다. 그러므로 이 시스템에서는 지상 보상기가 오히려 안정도를 개선하는 것을 알 수 있으며 적분 제어가 가장 적합함을 알 수 있다. 이는 Fig. 4의 근궤적선도에서 잘 나타나 있다. 지상 보상기($\tau_1=0.001\text{sec}$, $\tau_2=0.01\text{sec}$)의 경우 비례이득 K 의 증가에 따라 감쇠가 커지면서 계가 안정해 짐을 알 수

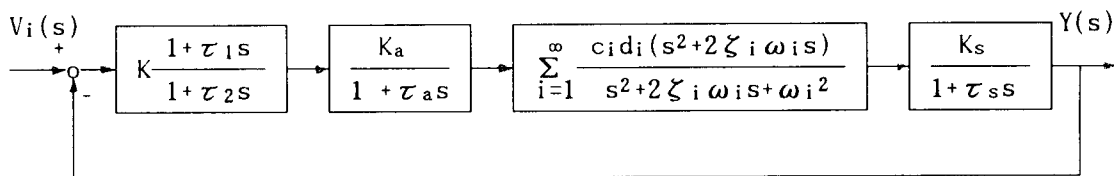


Fig. 2 Block diagram of single-input single-output system

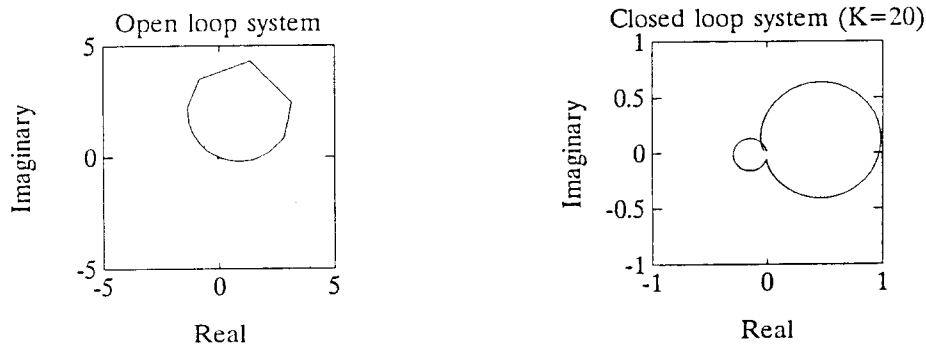


Fig. 3 Polar plots of open loop and closed loop systems

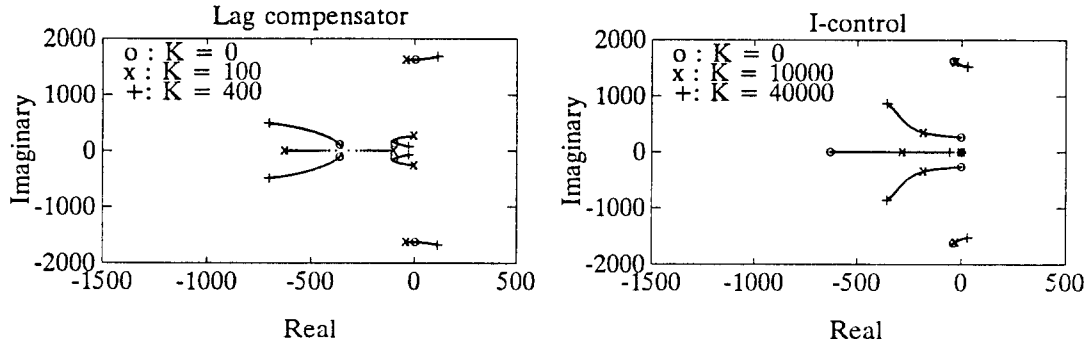


Fig. 4 Root-loci of closed loop system.

있다. 그러나 지나치게 큰 이득은 오히려 페루프계의 상대 안정도를 해친다. 이론적으로 적분제어기가 가장 효과적임을 알 수 있지만 실제구현(implementation)상의 문제로 센서의 드리프트(drift)에 의한 제어기의 포화(saturation) 또는 적분기 wind-up 등의 문제 때문에 지상 제어가 보다 효율적이다.

통상 외팔보는 첫번째 고유진동수가 두번째 고유진동수 보다 상당히 낮아서(특히 외팔보 끝단에 집중 질량이 있는 경우는 더욱 그 비율이 크다) 1 자유도 계로 모델링해도 무방하지만 액츄에이터 및 센서의 위치에 따라 고주파 모우드의 영향이 안정도에 큰 영향을 줄 수도 있다. 두번째 고유진동수는 259.27Hz (1629rad/s)로 첫번째 고유진동수 보다 약 6.5배 높다. 현재 스트레인 게이지가 붙어 있는 위치는 첫번째 모우드와 두번째 모우드가 위상이 반대가 되므로 ($c_1=0.6079$, $c_2=-1.6537$), 스페일오우버(spillover) 현상에 의해 두번째 모우드가 안정성에 큰 영향을 줄 수가 있다. 식 (8)의 출력식에서 3차 모우드까지 고려할 때 외팔보의 길이(L)에 대한 센서의 위치(L_s)의 비 $r(L_s/L)$ 에 따라 스페일오우버에 의한 불안정 가능영역을 조사하면 $0.19 < r < 1.0$ 에서는 2차 모우드가 $0.12 < r < 0.50$ 에서는 3차 모우드가 첫번째 모우드와 반대 위상이 되므로 스페일오우버가 발생할 수 있다. 그러므로 스페일오우버로 인해 불안정 해 지는 것을 방지하려면 가능한 한 센서를 고정단 가까이 위치시키는 것이 좋을 수 있다. 현재의 센서의 위치는 $r=0.28$ 에 위치해 있으므로 2, 3차모우드에 의한 스페일오우버가 발생할 여지가 있으나 고차 모우드 일수록 자연적인 감쇠가 크고 하드웨어 상의 문제로 비레이득을 지나치게 크게 할 수 없으므로 외팔보의 경우 스페일오우버에 의한 불안정 현상은 쉽게 발생하지 않는다. 개루프계와 페루프계 ($K=20$, $\tau_1=0.001$,

$\tau_2=0.01$)의 극좌표선도를 보면 개루프계의 경우에 비해 페루프계의 1차 모우드가 감쇠가 커진 반면 2차 모우드는 스페일오우버에 의해 비록 불안정 해 지지는 않지만 상대적인 안정도가 낮아졌음을 알 수 있다.

제어변수의 변화가 전체계에 미치는 영향을 분석하고 실험결과와 비교하기 위하여 제어기의 변수들을 바꾸어 가면서 시뮬레이션을 수행하였다. 비레이득 K의 변화에 따른 계의 특성을 조사하기 위해 시정수 $\tau_1=0.001\text{sec}$, $\tau_2=0.01\text{sec}$ 로 고정한 후 K를 0, 5, 10, 20으로 변화시키면서 단위 충격응답(impulse response) 해석을 수행했다. 이결과가 Fig. 5에 나타나 있다. 그림에서보면 개루프계의 경우 감쇠가 매우 작아서 잔류 진동이 상당시간 지속되는 것을 알 수 있다. 비레이득 K가 증가하면서 감쇠가 거의 비례적으로 증가하므로 과도 진동이 쉽게 소멸되는 것을 알 수 있다. 고유진동수도 약간 감소하겠지만 그 효과가 미미하여 그림상에서는 판별하기 힘들다. 2차 모우드의 경우 그 영향은 그림에서 보듯 전체적인 성능에 거의 영향을 주지 않으므로 2차 모우드는 안정성만 보장되면 제어기 설계시 무시해도 무방한 것처럼 보인다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 실험 장치

본 연구에서 제작된 외팔보의 진동제어를 위한 시스템의 구성도는 Fig. 6과 같다. 16비트 퍼스널 컴퓨터(IBM-AT)내에서 생성된 제어신호가 12비트 자료변환 장치(lab master 2009 W-TH-40)를 통하여 전력증폭기에 인가된다. 직류 전력증폭기는 최대 출력전압 및 전력이 $\pm 50\text{V}$ 및 100W 로써 증폭률은

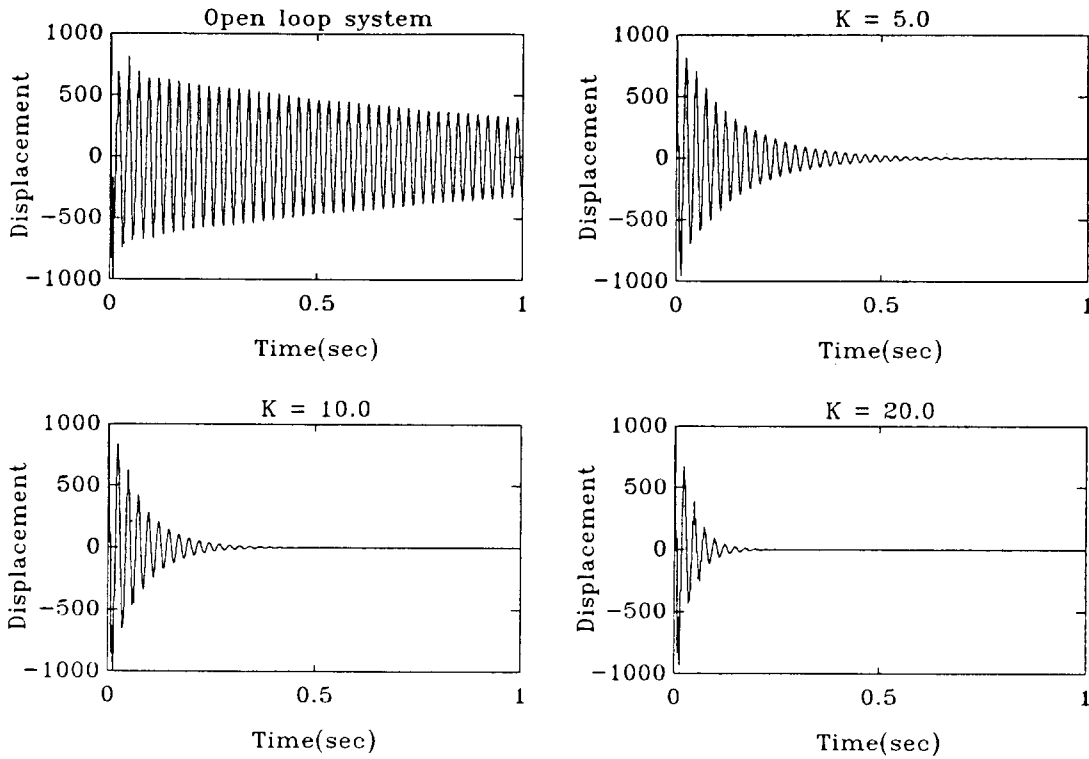


Fig. 5 Impulse responses(Simulation).

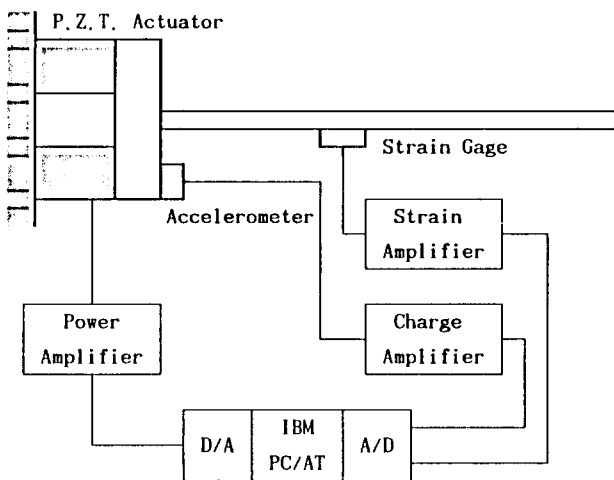


Fig. 6 Experimental setup.

40이다. 전력증폭기를 통하여 증폭된 입력신호는 압전소자를 구동시켜 그림에서 보인 바와 같이 보의 경계조건 중 기울기를 임의로 제어할 수 있도록 설계되었다. 보의 경계조건을 변경시킴으로써 보의 진동을 유발시키거나 제어할 수 있도록 하는 것이 본 실험의 핵심이 된다. 본 연구에 사용한 적층형 압전 액츄에

이터는 Tokin사의 모델 NLA-10×10×18이며 이 모델은 정전용량 6500 μ F, 절연저항 50M Ω , 변위 15 μ m/100V, 발생력 350kgf/100V이다⁽¹¹⁾.

센서로는 스트레인 게이지를 이용했으며 스트레인 게이지가 보의 탄성 변형만을 측정하므로 보의 강체운동을 측정하기 위해 압전소자의 끝단에 압전형 가속도계를 부착하여 압전소자의 변형이 인가 전압에 비례하여 발생하는지를 확인하였다. 측정된 가속도계(B&K Type 4375)의 전하는 전하 증폭기(B&K Type 2626 Charge Amplifier)를 통하여 증폭되고 100Hz의 저역통과필터를 통하여 자료 변환 장치의 A/D 변환기를 통해 디지털 데이터로써 변화되고 저장된다. 이 출력 신호는 시스템의 고유진동수 등의 모드 변수 규명을 위하여 사용되거나 제어기의 입력 신호로 사용된다.

우선 분산이 1이고 평균이 0인 정규분포를 갖는 랜덤 데이터를 D/A 변환기를 통해 500Hz로 출력시켜 압전 액츄에이터를 구동시켰다. 이때 압전소자에 역 전압이 걸리지 않도록 충분한 바이어스 전압을 더하여 전력 증폭기에 신호를 보냈다. 이를 입력으로 하고 보의 굽힘을 스트레인 게이지로 측정한 값을 A/D변환기로 받아들여 출력으로 한 모드시험을 하

여 매개변수를 규명하였다⁽¹²⁾. 고유진동수가 약 38.20Hz로 이론적으로 구한 값과 약간의 차이가 있다. 이는 경계조건의 불일치 및 물질의 밀도 및 제원, 탄성계수등 입력 자료의 오차 때문인것으로 보인다. 감쇠는 매우 작아서 감쇠율이 약 0.003 정도가 되었다.

4.2 디지털제어기 설계 및 실험

앞장에서 설계된 아날로그 제어기를 샘플링 주파수 1kHz로 이산화시키고 이를 어셈블리 언어로 작성하여 디지털 제어실험을 수행하였다. 앞의 시뮬레이션과 마찬가지로 제어기의 이득 K 를 0, 5, 10, 20으로 순차적으로 변화시켜가면서 실험을 수행하였다. Fig. 7에 나타나 있는 바와 같이 디지털 제어기를 이용한 실험 결과는 시뮬레이션 결과와 대체적으로 잘 일치하고 있다. 이는 1자유도계의 모델링으로 충분하며 모델링시 선택한 변수들이 충분히 정확했음을 보여주는 것이다. 또한 샘플링 주파수가 개루프계의 대역폭에 비하여 충분히 빠르기 때문에 A/D 및 D/A 변환에 의한 시간 지연이 거의 영향을 주지 못하기 때문이다. 스피로우버에 의한 2차모우드의 가진 현상은 나타나지 않았는데 이는 스트레인 증폭기의 저역통과 필터의 영향으로 A/D 변환시 2차 모우드 성분이 거

의 입력되지 않았기 때문이다. 또한 비록 작은 변위량이지만 압전 액추에이터가 보의 진동을 제어하는데 유용하게 이용될 수 있음을 알 수 있으며 보의 두께가 비교적 커서 Bimorph형 압전소자로 구동하기 어려운 경우에도 적층형 액추에이터로 효과적으로 진동을 제어할 수 있음을 보여준다.

5. 결 론

탄성보 진동의 효과적인 제어를 위하여 압전 액추에이터를 이용한 능동제어 방법이 이론해석 및 시뮬레이션 그리고 아날로그 및 디지털 제어 실험을 통하여 그 유용성을 보였다. 해석 및 실험 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 외팔보의 경우 경계조건을 제어하는 경계제어 방법이 진동제어에 매우 효과적이며 지상 보상기 또는 적분제어기가 유용하다.
- (2) 적층형 압전 액추에이터는 소형, 경량이면서 충분한 감쇠효과를 내기 때문에 제어요소로서 적합하며 특히 소형 정밀기기의 진동제어에 유용하다.
- (3) 디지털 제어 실험은 시뮬레이션과 잘 일치하는 결과를 얻었으며 스피로우버 효과를 감소 시키는

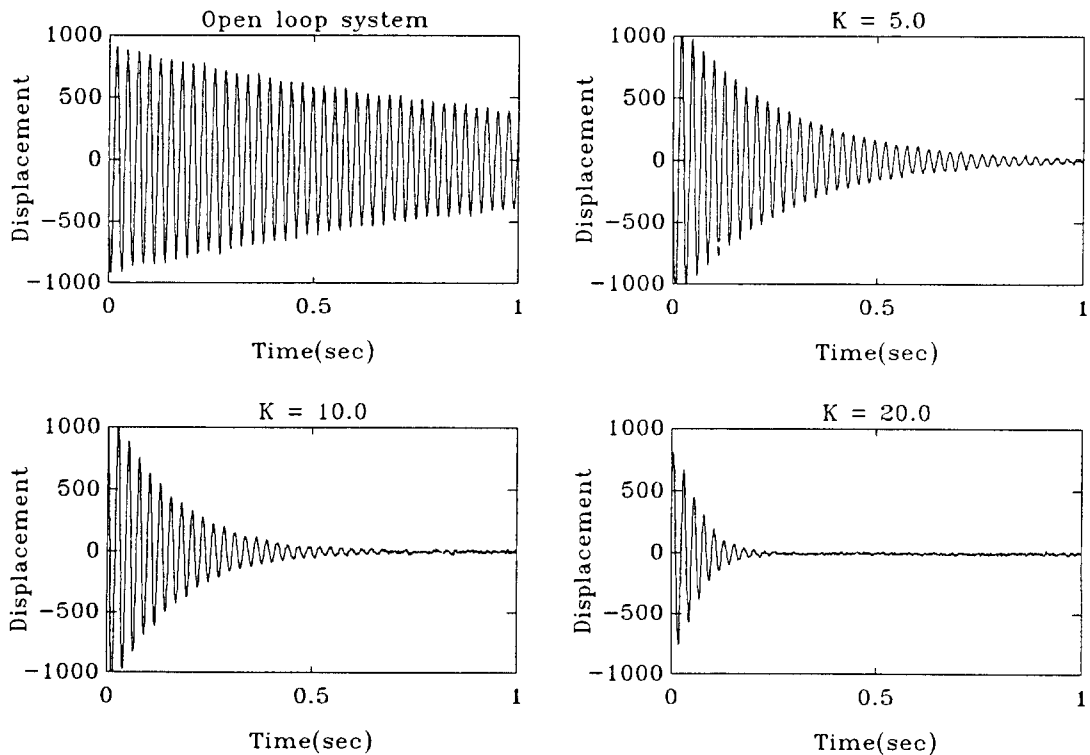


Fig. 7 Impulse responses of digital control system

방법에는 센서의 위치선정 뿐 만 아니라 저역통과 필터를 이용한 고주파 모우드의 제거도 효과적인 방법이다.

후 기

이 논문은 1990년도 문교부지원 한국학술진흥재단의 지방대육성 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

(1) Hagood, N. W., W. H. Chung, and A. Flotow, "Modelling of Piezoelectric Actuator Dynamics for Active Structural Control", Proceedings of the 31th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural Dynamics and Material Conference, pp.2242~2256.

(2) Plump, J. M., I. E. Hubbard, Jr. and T. Bailey, 1987, "Nonlinear Control of Distributed System: Simulation and Experimental Results", ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 109, pp.133~139.

(3) Anderson, E. H., D. M. Moore, and J. L. Fanson, "Development of an Active Member Using Piezoelectric and Electrostrictive Actuation for Control of Precision Structures", Proceedings of the 31-th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural Dynamics and Material Conference, pp.2221~2233.

(4) Jiang, J. W, S. Chonan and J. Tani, 1990, "Control of Flexible Arm Using Piezoelectric Bimorph Cells", 일본기계학회논문집(C편), 제56권, 제522호, pp.160~167.

(5) Tojo, T., 1991, "Current Aspects and Future Trends of Nanometer Positioning", JSPE, Vol. 56, No. 3, pp.29~33.

(6) Forward, R. L., 1980, "Picostrain Measurements with Piezoelectric Transducers", J. of Applied Physics, Vol. 51, No. 11, pp.5601~5603.

(7) 박규연, 1990, "압전형 다축 하중계의 설계, 제작 및 보정", 한국과학기술원 석사학위 논문.

(8) Lee, C. W., S. B. Kim, W. H. Jee and S. H. Lee, 1992, "Vibration Control of Overhung Structure by Using a Piezoelectric Servo-Damper," KSNVE Proceedings, pp.35~41.

(9) '89초정밀 가공 심포지움-초정밀 가공을 위한 기술', 한국과학기술원 1989.

(10) 김호기, 신병철, 압전·전왜 세라믹스-원리와 응용, 반도출판사, 1991.

(11) Tokin Technical Documents, Multilayer Piezoelectric Actuator, 3ed.

(12) 김종선, 1991, 압전소자를 센서와 액츄에이터로 이용한 탄성보 진동의 능동제어, 한국학술진흥재단 보고서.

(13) 이석구, 지원호, 이종원, 1992, "압전형 구동기를 갖는 이동기구의 운동해석 및 제어", 한국소음진동공학회 논문집, Vol. 2, No. 1, pp.49~59.