

論文

압전 세라믹 작동기와 폴리머 센서를 이용한 유리 / 에폭시 복합재료 외팔보의 능동 진동 억제

윤광준* · 이영재* · 김현수**

Active Vibration Suppression of Glass/Epoxy Composite Cantilever Using Piezo-electric Ceramic Actuator and Polymer Sensor

Kwang-Joon Yoon*, Young Jae Lee* and Hyun-Soo Kim**

ABSTRACT

Fiber reinforced composite incorporated with piezo-electric materials is the new concept of material structure which has self-structural control abilities. In this paper, Glass/Epoxy cantilever beam attached by a piezo-electric ceramic and a piezo-electric polymer is designed for active vibration control. Piezo-electric ceramic is used as actuator to suppress the beam vibration and piezo-electric polymer is used to sense the strain induced by beam vibration. When the beam vibrates, the piezo-electric polymer transforms the mechanical strain into electric signal, which is used as input signal of PD (Proportional plus Derivative) feedback control system. Then the output signal of control system makes the piezo-electric ceramic actuate to suppress the beam vibration. A analogue feedback control model to perform active vibration damping is proposed and verified by experimental investigation.

초 록

압전재료 제어 복합재료는 기존의 복합재료에 압전 소재의 능동제어 기능을 추가한 새로운 개념의 신소재 구조라고 할 수 있다.

본 논문에서는 곤충이나 항공기 날개와 비교적 유사한 외팔보 형태를 택하여 유리 / 에폭시 주요 구조재료의 윗면에 작동기능을 가진 압전세라믹을 부착하고 아래면에 감지기능의 압전 폴리머를 부착하여 능동 제어 구조재료를 고안하였다. 주 구조물이 진동할 경우, 압전 폴리머 감지재료에서 발생된 전기신호를 아날로그 회로로 구성된 PD(Proportional plus Derivative) 되먹임 제어계에 적용하면 압전 세라믹 작동재료가 작동하여 외팔보의 진동을 능동적으로 감쇠 시킬 수 있도록 하는 것이다. 이러한 능동억제 기능의 재료구조를 설계, 제작하여 그 기능을 실험적으로 검증하였다.

* 전국대학교 항공우주공학과

** 전국대학교 전자공학과

1. 서 론

압전재료(Piezo-electric Material)는 전기에너지를 기계적 에너지로 변환시키면서 작동기(Actuator)의 역할을 할 수도 있고 기계적 변형을 전기적 신호로 바꿀 수 있는 감지기(Sensor)의 기능을 가지고 있는 소재이다. 기존의 섬유강화 복합재료에 이러한 기능의 압전 재료를 첨가하여, 능동제어가 가능한 복합 구조 재료는 새로운 개념의 재료구조라 할 수 있다. 즉 복합재료의 내부구조에 전기적으로 제어가 가능한 재료인 압전세라믹(Piezo-Ceramic)이나 압전 폴리머(Piezo-Polymer) 등을 복합시켜 전기신호에 의한 능동제어를 가능하게 한다면 재료내부의 전기회로는 생체 구조와 비교하여 볼 때 신경계통이라 할 수 있고, 압전재료는 생체의 근육이나 피부에 해당되며, 복합재료 주 구조물은 뼈에 대응되는 인위적인 능동제어 재료로 볼 수도 있는 것이다.

이러한 능동제어 재료구조는 적응 구조물이라 하여 우주 정거장이나 대형 우주안테나와 같은 대형 구조물의 저주파 진동을 능동적으로 제어하기 위하여 1980년대 말부터 미국, 일본 등의 선진국에서는 연구가 활발히 진행중에 있다. Baily 등[1]은 금속 외팔보 윗면 전체에 압전 폴리머를 부착시켜, 외팔보의 진동억제를 위한 작동재료로서의 역할이 가능함을 보였으며, Crawley 등[2]은 탄소섬유 복합재료 외팔보에 작동기 역할의 압전 세라믹을 부착시켜, 세라믹 작동기능에 의한 외팔보의 진동 특성을 해석하고 실험적으로 검증하였다. Wiesshaar[3] 등은 압전재료 작동기를 이용하여 항공기 날개의 플러터 억제를 위한 방법을 연구한 바 있으며, 평판이나 보의 진동억제를 위한 압전재료의 최적위치 분포 및 구조 설계에 대한 이론적 연구가 국내에서도 진행되었다[4,5]. 또한 규모가 큰 항공우주구조물에서의 응용 뿐만 아니라 일반 컴퓨터 Hard Disk Head Arm의 진동억제를 위한 제어, 정밀 공작기계의 미세진동억제 등을 위한 연구도 활발하다. 컴퓨터 Hard Disk Head Arm의 형태와 유사한 금속 박판 외팔보의 상하면에 압전 폴리머센서와 작동기를 부착시켜 되먹임 제어에 의한 빠른 진동 억제 효과를 본 연구도 발표되었다[6~8]. 이러한 연구의 시편

재료 구성 형태를 보면, 압전재료 작동기만을 이용하였거나, 동일한 재료의 압전재료로 감지기와 작동기를 구성하였다. 압전 세라믹을 시편의 상하면에 부착하여 감지기와 작동기로 쓸 경우 감지기 역할의 세라믹은 구조물의 강성도(Stiffness)를 높이는 단점이 있고, 압전 폴리머의 경우에는 주 구조물의 강성에 영향을 적게 주어 감지기로써의 역할은 우수하나 작동기로써 가하는 힘이 비교적 적다는 단점이 있다.

본 논문에서는 유리섬유 적층 외팔보의 능동진동 억제를 위한 재료 구조 형태로, 주 구조물의 강성에 영향을 적게주어 센서로 적합한 압전 폴리머를 감지기로 택하였고, 압전 폴리머에 비하여 낮은 전압으로 큰 힘을 낼 수 있는 압전 세라믹을 작동기로 택하였다. 이러한 재료구조 형태의 유리섬유 적층판 복합재료 외팔보 시편을 설계하고 제작하여, 되먹임 제어에 의한 능동진동 감쇠 효과를 실험적으로 검증하였다.

2. 압전재료의 특성과 기본원리

100여년전 Jacques Curie와 Pierre에 의해 수정의 크리스탈로부터 압전효과(Piezo electricity)가 발견된 후 압전소재들은 의료, 군사, 가전제품 등 여러 분야에서 이용되어 왔다.

특히 2차세계대전 전후로 세라믹 계통의 압전소재들이 개발되어 이를 응용한 응용개발은 더욱 확장되었으며 대표적인 것으로 가속도 센서, 적외선 센서, 초음파 트랜스듀서, 스피커, 마이크로폰 및 수중탐지기 센서 등이 있다.

압전 효과(Piezo electricity)란 압전소자에 압력이나 힘을 가했을 때 압전소자 표면에 전압이 발생하며 또한 반대로 전압을 가했을 때 압전소자의 크기에 변형을 일으키는 현상을 뜻한다. 전자의 응용으로는 마이크로폰 또는 진동센서 등을 들 수 있고, 후자의 응용으로는 스피커 또는 작동기(Actuator) 등을 들 수 있다.

그림 1-a에서 볼 수 있듯이 재료의 극성 방향과 같은 방향으로 외부 전압을 걸어주면 극성축 방향으로 인장변형이 일어나고 그 수직방향으로는 수

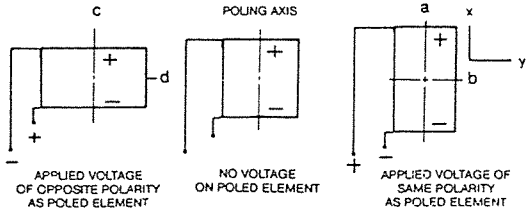


Fig. 1-a. Piezoelectric Actions from Applied Voltages.

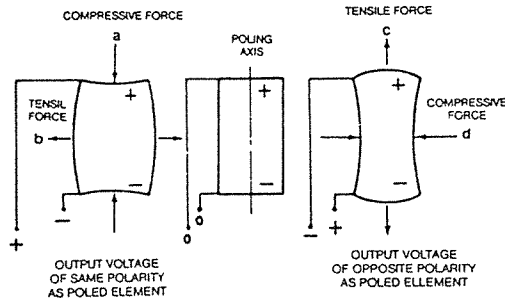


Fig. 1-b. Piezoelectric Voltages from Applied Forces

축을 한다. 만약 외부의 전압방향을 역으로 하면 변형의 방향도 모두 반대로 된다. 그림 1-b는 기계적인 에너지를 가하여 재료를 변형시키면 전기 에너지가 발생하는 현상을 보여주고 있다.

압전재료에 가하여지는 전압과 수직응력에 의하여 발생하는 수직 변형도와 전하 밀도의 관계는 식 (1) 과 (2)와 같이 일반적으로 표현하고 있다[9].

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

$$D_i = d_{iq} \sigma_q + \varepsilon_{ik}^0 E_k ; i, k = 1, 2, 3 \quad (2)$$

여기서, ε_p : 수직 변형도(normal strains)
 σ_q : 수직 응력(normal stress)
 E_i : 전기장(electric field)
 D_i : 전하밀도(charge density or electric displacement)
 S_{pq}^E : 탄성 순응계수(elastic compliance matrix)
 d_{ip} : 압전 변형 상수(piezoelectric strain constants)
 ε_{ik}^0 : 부전도계수(dielectric permittivity matrix)

즉 변형도와 전하 밀도는 압전재료에 가하여지는 응력과 전기장의 크기에 비례함을 의미한다. 예를 들어, 두께가 h_3 인 압전재료에서 3축 방향으로만 전압 V (이때 전기장 $E_3 = V/h_3$)가 걸리고 외부 응력은 없을 경우, 1축 방향으로 발생하는 변형도는 식(3)과 같이 표현된다.

$$\varepsilon_1 = d_{31} E_3 = d_{31} V/h_3 \quad (3)$$

이 변형도에 압전재료의 탄성계수와 단면적이 곱하여지면, 압전재료가 어떠한 주구조물에 부착되었을 경우, 구조물을 변형시키는 작동력이 된다.

3. 외팔보 구조의 설계 및 제작

본 연구에서 선택한 압전재료 제어 복합재료의 기본구조는 곤충이나 항공기 날개와 비교적 유사한 외팔보 형태를 택하였다. 주요 구조재료의 윗면과 아랫면에 각각 감지기능과 작동기능을 가진 압전재료를 부착하여 외팔보의 진동을 능동적으로 감쇠시킬 수 있도록 하였다.

3-1. 적층 구조의 변형 및 진동기본이론

작동층 / 주구조층 / 감지층으로 구성된 그림 2와 같은 형태의 보가 작동층의 작동력을 받을 때의 변형관계를 유도하면 다음과 같다. 작동층, 주구조층, 감지층의 탄성계수와 높이를 각각 $E_a, h_a, E_m, h_m, E_s, h_s$ 라고 하면 중립면의 위치 D 는 식(4)와 같이 주어진다.

$$D = \frac{h_s^2 E_s + (2h_s + h_m)h_m E_m + (2h_s + 2h_m + h_a)h_a E_a}{2(h_s E_s + h_m E_m + h_a E_a)} \quad (4)$$

각 층에서의 보의 축방향 응력과 변형률의 관계는

$$\begin{aligned} \sigma_x &= E(\varepsilon_x - \varepsilon_x^a) \\ &= E(\varepsilon_x^0 + \kappa_x y - \varepsilon_x^a) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 ε_x^a 는 압전재료 층에만 존재할 수 있는 변형률로 압전재료에 외부 전압이 걸리면 발생한다. 이 변형률은 온도 변화에 의한 열팽창 변형률과 같은

응력-변형도 관계를 갖는다. ϵ_x^o 와 κ_x 는 중립면의 변형률과 곡률이다. 각 층간의 완전 접착을 가정 하면, x 축 방향으로의 결과 힘과 결과 모멘트는 그림 2의 좌표계에서 단면에 대한 적분형태로 식(6)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} N_x &= \int \sigma_x dy = \int E_k (\epsilon_x^o + \kappa_x y - \epsilon_x^a) dy \\ M_x &= \int \sigma_x y dy = \int E_k (\epsilon_x^o + \kappa_x y - \epsilon_x^a) y dy \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (6)$$

여기서 E_k 는 각 층의 탄성계수이다. 작동층의 변형률에 의하여 발생된 힘과 모멘트는

$$\begin{aligned} N_x^a &= \int E_k \epsilon_x^a dy \\ M_x^a &= \int E_k \epsilon_x^a y dy \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (7)$$

로 표현할 수 있으며 작동층에 대한 적분만 취하면 된다. 식(6)과 (7)에서

$$\begin{aligned} N_x &= \epsilon_x^o \int E_k dy + \kappa_x \int E_k y dy - N_x^a \\ M_x &= \epsilon_x^o \int E_k dy + \kappa_x \int E_k y^2 dy - M_x^a \end{aligned} \quad \dots\dots (8)$$

외부에서 가하는 힘과 모멘트가 없을 경우 $N_x=0$, $M_x=0$ 이므로 식(8)은 식(9)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} \epsilon_x^o \int E_k dy + \kappa_x \int E_k y dy &= N_x^a \\ \epsilon_x^o \int E_k y dy + \kappa_x \int E_k y^2 dy &= M_x^a \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (9)$$

식(9)의 관계에서 작동층에 의하여 발생된 중립면의 변형률과 곡률을 구할 수 있으며, 식(5)의 관계를 이용하여 각층의 응력분포를 알 수 있다.

작동층의 두께 방향으로 전압 V 가 걸릴 경우, 작동층의 작동 변형율은 전압에 비례하므로 식(7)로부터

$$\begin{aligned} N_x^a &= c_1 V \\ M_x^a &= c_2 V \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (10)$$

로 표현될 수 있으며 c_1 과 c_2 는 적분결과에 의한 상수이다. 이 결과는 작동층이 발생시킨 힘과 모멘트는 외부에서 가하는 전압에 비례함을 의미한다.

식(10)의 모멘트 분포를 Bernoulli-Euler보의 진동해석법을 적용하면

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} [EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - c_2 V(x, t)] + \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (11)$$

로 보의 진동방정식이 표현된다. 그림 2와 같이 외팔보의 구조에서 $0 < x < L_a$ 구간의 경우 중립면에 대하여 $EI = E_a I_a + E_m I_m + E_s I_s$ 이고, $\rho A = \rho_a A_a + \rho_m A_m + \rho_s A_s$ 이다. $L_a < x < L$ 구간의 경우 $EI = E_m I_m$, $\rho A = \rho_m A_m$ 이며, $V(x, t) = 0$ 이다. 또한 경계조건은 식(12)와 같다.

$$\begin{aligned} y(x, t) &= 0 \\ \frac{\partial y(x, t)}{\partial x} &= 0 \quad \text{for } x = 0 \\ EI \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} &= 0 \quad \dots\dots\dots (12) \\ EI \frac{\partial^3 y(x, t)}{\partial x^3} &= 0 \quad \text{for } x = L \end{aligned}$$

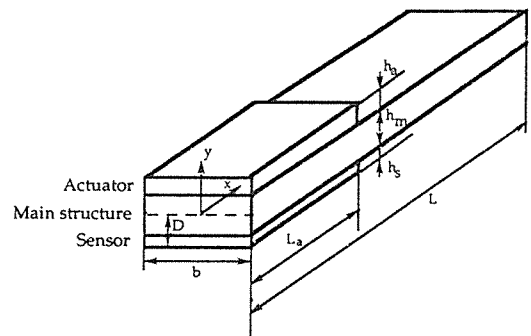


Fig. 2. Schematic Diagram of Actuator / Main structure / Sensor Cantilever.

3-2. 기본 구조 설계 및 제작

외팔보의 기본구조를 기능별로 주구조물, 작동 구조와 감지 구조의 세 부분으로 나누어 그 특성에 부합될 수 있는 재료를 택하였다. 본 연구의 주구조물의 재료로는 탄성계수($E_x = E_y$)가 27GPa이고 두께가 0.5mm인 직조형유리섬유 복합재료 적층판을 선택하여 얇은 보의 형태로 이용하였다.

작동재료가 작동하여 주구조재료가 변형되도록 하려면 작동재료의 탄성계수가 주구조재료보다 크거나 비슷하면 효과적이다. 현재까지 작동재료로 쓰이고 있는 대표적인 재료는 압전 세라믹이나 형상

기억합금 등이 있다. 형상 기억합금은 전기 에너지가 열로 변하여 작동하는 재료로 반응속도는 느리나 큰 변형량을 줄 수 있는 특징을 가지고 있다. 압전 세라믹은 반응 속도 빠른 반면 변형이 크지 못하다. 본 연구의 목적은 진동하는 구조물의 능동제어이므로 반응 속도가 빠른 압전 세라믹을 작동재료로 택하였다. 압전 세라믹의 종류는 특성이 표 1과 같은 미국 Piezo-Electric사의 모델 G-1195를 선택하였으며 그 두께는 0.25 mm이다.

감지 재료는 구조물에 부착하여서 구조물의 구조적 특성을 크게 변화시키지 않으면서 변형을 전기적 신호로 전환시켜 줄 수 있는 기능이 있어야 한다. 대표적으로 응용되고 있는 센서에는 스트레인

게이지, 압전 폴리머, 압전 세라믹 등이 있다. 이중 압전 세라믹은 본 연구에서 택한 구조물의 특성을 많이 변화시키므로 제외하였다. 탄성계수가 비교적 적고 필름 형태로 되어 있어 부착하기 편한 압전 폴리머를 감지재료로 선택하였다. 선택된 감지 재료는 미국 AMP Inc.에서 제작한 PVDF(Polyvinylidene fluoride) 압전 폴리머(모델 LDTI-028K)이고, 두께는 0.028 mm이며 박판의 상하면에 니켈 전극면이 코팅되어 있다. 그 특성은 표 1과 같다.

외팔보 형태의 구조재료 판재의 윗면에 압전 세라믹 판재를, 아랫면에 압전 폴리머를 부착한 제어 구조를 그림 3과 같이 설계하였다. 진동에 의한 외팔보의 변형을 압전 폴리머가 감지하면, 감지된 전압을 되먹임 제어에 의한 출력 전압으로 압전 세라믹 작동재료가 외팔보를 변형시켜 외팔보의 진동을 억제하도록 하였다. 본 연구에서는 외팔보의 1차 모드 진동 억제에 역점을 두어, 감지기와 작동기의 위치를 외팔보의 지지부분부터 시작하여 그 길이를 전체길이의 약 1/4 정도로 하였다.

기본 구조의 제조과정은 다음과 같다.

a) 주구조판과 압전 세라믹을 설계치수대로 정밀 절단을 할 수 있는 다이아몬드 절단기로 냉각수를

표 1. G-1195 압전 세라믹과 LDTI-28K 압전 폴리머의 특성

특 성	기호(단위)	G-1195	LDTI-028K
압전변형계수	$d_{31}(\text{m/m})(\text{V/m})$	190×10^{-12}	23×10^{-12}
탄성계수	$E(\text{GPa})$	63.0	2.0
최대허용전압	$\epsilon_{\text{max}}(\text{V/mm})$	600	10,000
Curie Temp.	($^{\circ}\text{C}$)	360	-
밀도	$\rho(\text{g/cc})$	7.6	1.78

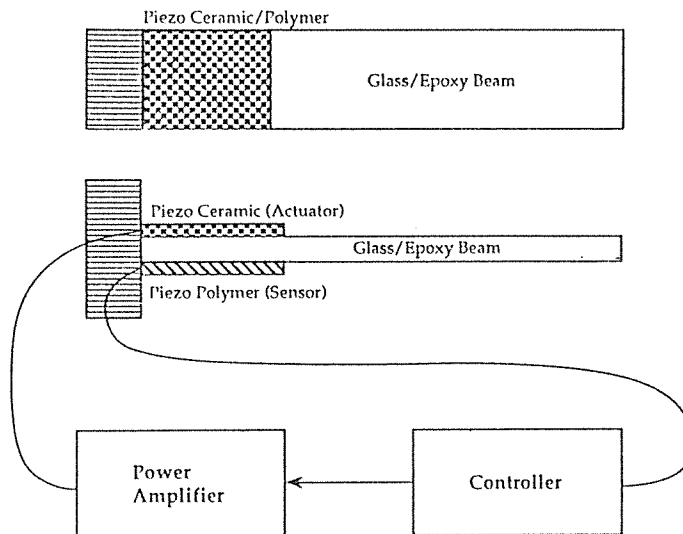


Fig.3. Material Structure of Active Vibration Control Cantilever.

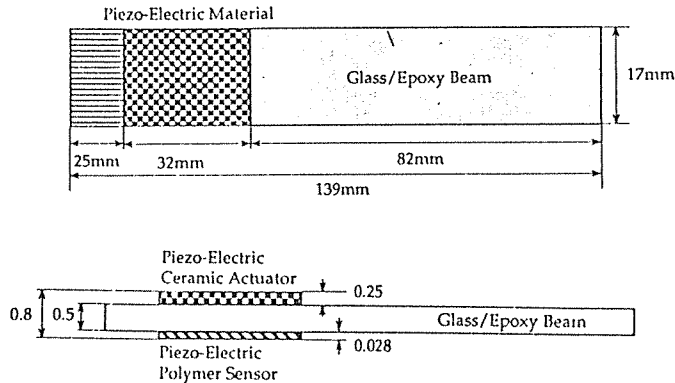


Fig.4. Specimen Geometry of Cantilever.

뿌러가며 제단한다. 구조판의 절단 속도는 약 5cm/분의 속도로 절단한다. 압전 세라믹은 깨지기 쉬우므로 유리섬유 판재를 아래위로 겹쳐서 약 0.5 cm/분의 절단 속도이면 된다.

b) 압전 필름은 전극에 전선까지 접속되어 있는 원하는 크기의 제품(AMP Inc.의 LDT1-028K)을 선택하여 이용하였다.

c) 세가지 재료들을 접착하기 위하여, 서로의 접착면을 샌드 페이퍼(600번)로 갈아낸 다음 아세톤으로 세척하여 24시간용 에폭시 접착제를 최대한 얇게 발라서 원하는 위치에 부착한다. 전체 구조의 아래윗면에 이형지를 놓고 약 3 mm의 고무판을 대고 직각 바이스를 이용하여 접착면에 압력을 약간 가하며 하루 정도 놓아둔다.

d) 압전 세라믹과 폴리머가 접착된 구조물을 잘 다듬은 다음 압전 세라믹 상하면의 전극에 전선을 연결하고 양쪽극의 절연상태를 점검한다. 절연 상태가 불량할 경우, 실제 실험에서 전극에 걸린 전압에 의한 스파크 발생 위험이 있다.

그림 4는 제조된 기본구조의 시편 형태이다. 접착하기전의 각층 두께를 합한 량과 총 두께를 비교하여, 0.022 mm이 차이가 있음은 양면의 접착 두께가 0.011 mm 정도임을 의미한다.

4. 제어계의 설계

제어계는 정확도가 좋고 입력의 변화나 시스템의

특성 변화에 따른 민감도가 낮아 제어특성이 좋은 그림 5와 같은 폐회로계(Closed-Loop Control System)를 사용하였다. 이 실험에 사용된 폐회로 제어계는 시스템 출력 $Y(s)$ (이 논문의 실험에서는 보의 변위 변화에 따른 전압의 변화)를 되먹임하여 기준되는 입력 $R(s)$ 와 비교해 그 차이 $E(s)$ 를 제어계 $C(s)$ 에 전달한다. 그러므로 시스템 출력과 기준 입력이 같아지면(즉, $E(s)=0$) 제어계에 들어가는 입력이 “영”이므로 제어계는 작동하지 않는다. 제어계에는 미리 설계되어 있는 제어 법칙(Control Law)에 의해 대상 시스템 $G(s)$ 에 입력할 $u(s)$ 를 계산해낸다. 이와 같은 폐회로 시스템의 전달함수 $H(s)$ 는 식(13)과 같다.

$$H(s) = \frac{G(s)C(s)}{1+G(s)C(s)} \quad \dots\dots\dots (13)$$

간단하며 제어효과가 커서 가장 널리 쓰이고 있는 PID 제어계(Proportional-Integral-Derivative Cont-

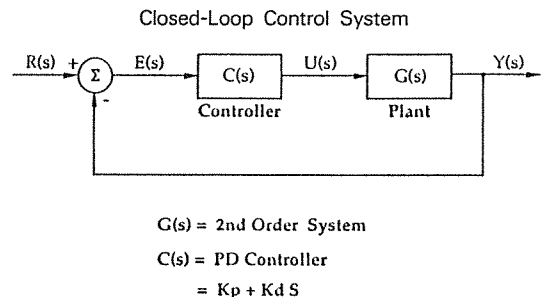


Fig.5. Closed Loop Control System.

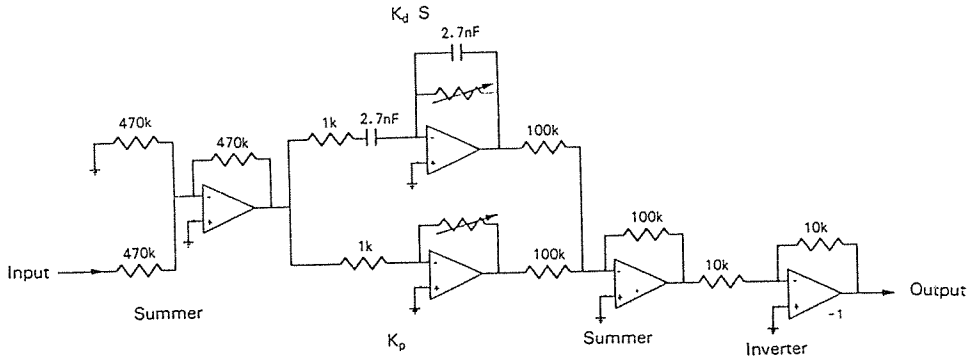


Fig. 6. Control Circuit Diagram.

roller)를 채택하였다. 그러나, PID 제어제 중 정상상태오차(Steady-State Error)의 축적을 방지하는 역할을 하는 적분제어기는, 이 진동계의 변위가 일반적으로 음과 양으로 빨리 변하며 진동하므로, 이 경우에는 적분 제어기의 역할이 매우 작으리라 판단되어 이를 제외한 PD 제어제를 사용하였다.

본 연구를 위한 제어계의 실현은 디지털 제어제로 실험하기에 앞서, 장치가 비교적 간단하고 경제적인 아날로그 제어제를 사용하였다. 이 제어제를 전자 회로로 실현하면 그림 6과 같다. 이 실험에서는 보의 1차 모드가 주로 발생하므로, 이 시스템의 전달함수를 식(14)와 같이 근사화할 수 있다.

$$G(s) = \frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad \dots\dots\dots (14)$$

PD제어제(Propositional-Derivative Control System)를 포함한 폐회로 전체의 특성 방정식은 식(15)와 같다.

$$D(s) = s^2 + (2\zeta\omega_n + K_d)s + (\omega_n^2 + K_p) \quad \dots\dots\dots (15)$$

즉, 식(15)와 같이 비례기 이득 K_p 와 미분기 이득 K_d 는 시스템의 특성 방정식의 상수항을 바꾸어 시스템의 반응을 결정한다. 그림 3은 실험장치의 전체의 구성을 보여주고 있다.

5. 진동제어 실험 및 결과

5-1. 고유 진동수 측정

그림 3과 같이 외팔보를 고정하고 외팔보 끝의

일정한 변위를 초기조건으로 하여 자유진동을 시킬 때, 압전 폴리머가 진동에 의한 재료의 변형을 전기 신호로 감지한다. 측정된 아날로그 신호를 AD 변환기를 거쳐 디지털 신호로 변환하여 파형을 기억시킨 다음 Power Spectrum 해석을 하여 1차 및 2차 고유진동수를 구하였다. 그림 7은 외팔보의 자유진동에 대한 Power Spectral Density 형상으로 1차 고유 진동수는 34 Hz, 2차 고유 진동수는 170 Hz임을 알 수 있다. 외팔보를 소형 가진기에 고정시켜 가진 주파수를 변화시켜 가며 진동의 진폭 변화를 관찰한 결과 1차 및 2차 고유진동수가 파형해석에서 구한 고유진동수의 5% 오차 범위 이내에 있는 것을 확인하였다.

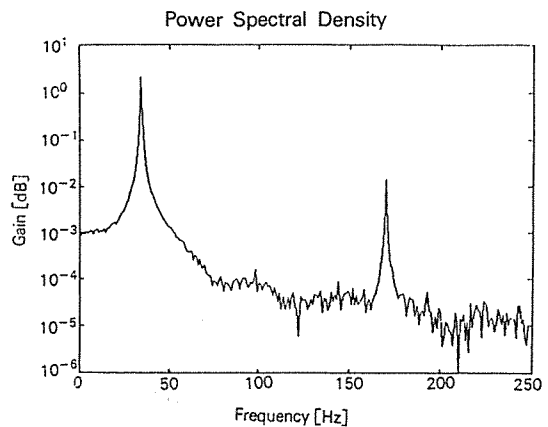


Fig. 7. Power Spectral Density of Cantilever.

5-2. 압전 세라믹과 폴리머의 진동 특성 시험

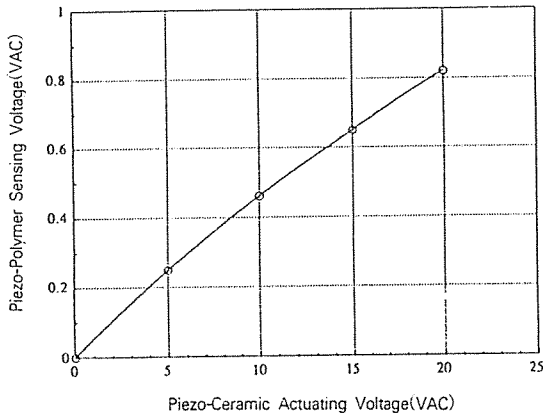
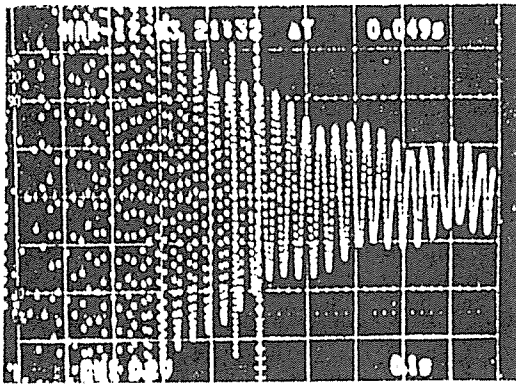


Fig. 8. Response of Polymer Sensor for the Ceramic Actuation at First Bending Vibration Mode.

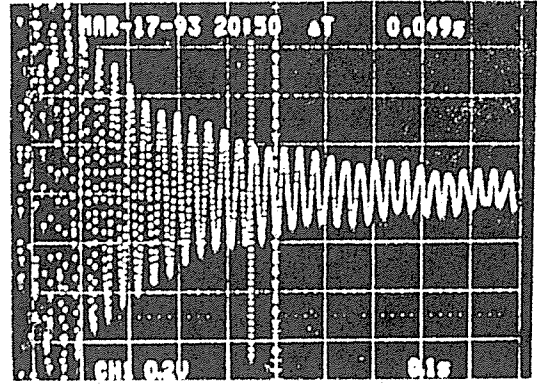
압전 세라믹에 외팔보의 1차 고유진동수로 가진 하면서 전압 진폭을 20V까지 증가시키며 조화진동을 시킬 때, 압전 폴리머가 감지하는 조화 진동 전기 신호의 진폭을 측정하였다. 압전 세라믹의 작동 전압 진폭과 압전 폴리머의 감지 전압 진폭의 관계는 그림 8과 같다. 압전 세라믹에 20V의 조화진동 전압을 가할 때, 1차 모드의 진동의 경우 외팔보 끝에서 1.2 mm 진폭의 변위를 관찰할 수 있었다.

5-3. 되먹임 제어에 의한 진동 억제 시험

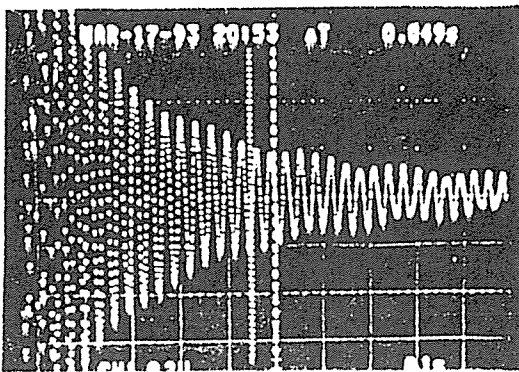
외팔보를 고정하고 외팔보 끝의 일정한 변위를 초기조건으로 한 진동의 능동진동 억제 실험을 하였다. 그림 9-(a)는 외팔보 끝의 초기 변위가 17



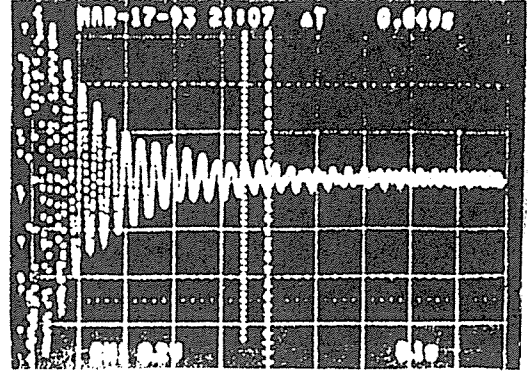
(a) 자연 진동 감쇠 ($K_p=K_d=0$)



(b) $K_p=3.0, K_d=0$



(d) $K_p=3.0, K_d=3.3$



(c) $K_p=0.0, K_d=3.3$

Fig. 9. PD Feedback Control Effect of Active Vibration Damping.

mm인 상태에서 자유진동이 시작되어 진동이 감쇠되는 파형이며 그림 9-(b,c,d)는 능동 제어를 하였을 때의 감쇠 파형이다. 그림의 비교에서 능동 진동 억제에 의한 빠른 진동 감쇠를 볼 수 있다. 감쇠비는 (a)의 경우 0.056, (b)와 (c)의 경우 0.105이며, (d)의 경우는 0.184이다. 이때의 비례기와 미분기의 이득은 튜닝(Tuning)에 의해 그 효과를 명확히 구별할 수 있는 값을 선택하였는데, 각각 $K_p=3.3$, $K_p=3.0$ 이다.

6. 결 론

1) 복합재료에 압전 세라믹 작동 재료와 압전 폴리머 감지 재료를 결합시켜, 능동 제어 복합재료 구조를 설계하고 그 제조 방법을 확립하였다.

2) 작동 및 감지 특성 시험을 한 결과, 압전 세라믹은 $\pm 20V$ 의 범위에서 복합재료 외팔보의 1차 모드의 진동 변형을 관찰할 수 있을 정도의 작동력을 확인하였으며, 압전 폴리머는 외팔보 구조의 진동 변형을 $\pm 0.8V$ 범위의 전기신호로 변환시켜 되먹임 제어의 입력신호로 이용될 수 있음을 관찰하였다.

3) 외팔보가 자유진동을 할 경우, 압전 폴리머가 감지한 전기 신호를 PD 되먹임 제어계를 통하여 진동을 억제하는 작동 전기 신호를 압전 세라믹에 가하여 능동적으로 진동 감쇠시킨 결과, 자유 진동감쇠와 비교하여, 빠른 진동감쇠 효과를 볼 수 있었다.

후 기

본 연구는 1992년도 교육부 신소재분야 연구지원에 의하여 이루어 졌으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. T. Bailey, J.E. Hubbard Jr., "Distributed Piezoelectric-Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam," J. Guidance, Control, and Dynamics Vol.8, No.5, Sep.-Oct. 1985, pp. 605-611.
2. E.F. Crawley, J. de Luis, "Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures," AIAA Journal, Vol.25, No.10, Sep.-Oct. 1987, pp.1373-1385.
3. R.C. Scott and T.A. Weisshaar, "Controlling Panel Flutter Using Adaptive Materials," AIAA-91-1067-CP, pp.2218-2229.
4. 남창호, 황재혁, 오승민, "압전재료에 있는 복합재 평판의 진동제어를 위한 구조/제어 최적 설계," 한국항공우주학회지 제 21권 4호, 1993.8. pp. 49-59.
5. 황재혁, 박현철, "유연보 진동제어를 위한 압전 감지기/작동기 설계," 한국항공우주학회지 제 21권 2호, 1993.4, pp.26-36.
6. C.K. Lee, W.W. Chiang, T.C. O'Sullivan, "Piezoelectric Modal Sensor and Actuators Achieving Critical Active Damping on a Cantilever Plate," IBM Research Report, Aug. 1989.
7. 김승환, 최승복, 정재천, "압전 필름을 이용한 외팔보의 능동진동제어," 한국항공우주학회지 제 21권 5호, 1993. 10, pp.76-87.
8. 김종선, "압전소자를 액츄에이터로 이용한 탄성보 진동의 능동제어," 한국소음진동공학회지, 제 2권 3호, 1992, pp.173-180.
9. In-Gul Kim, A Smart Composite Panel Based on Piezoelectric Sensors, Ph.D. Thesis, The Pennsylvania State University, 1993.