

〈論 文〉

# 압전형 센서/액추에이터를 이용한 진동구조물의 능동-수동제어

Active-Passive Control of Flexible Structures using Piezoelectric Sensor/Actuator

고 병 식\*

Byeongsik Ko

〈1995년 6월 접수 ; 1995년 8월 22일 심사완료〉

**Key Words :** Active/Passive Control(능동/수동제어), Vibration Control(진동제어), Piezoelectric Sensor(압전센서), Piezoelectric Actuator(압전액추에이터), PVDF(압전필름), Viscoelastic Material(점탄성물질), Optimum Size(최적크기), Parallel Actuator(병렬액추에이터)

## ABSTRACT

Two active/passive vibration dampers were designed to control a cantilever beam first mode of vibration. The active element was a piezoelectric polymer, polyvinlidene fluoride (PVDF). The passive damping was provided by the application of a viscoelastic layer on the surface of the steel beam. Two substantially different damper configurations were designed and tested. One damper consisted of a piezoelectric actuator bonded to one face of the beam, with a viscoelastic layer applied to the other surface of the beam. The second one was composed of a layer viscoelastic layer with one surface bonded to the beam, and with other being constrained by nine piezoelectric actuators connected in parallel. A control law based on the sign of the angular velocity of the cantilever beam was implemented to control the beam first mode of vibration. The piezoelectric sensor output was digitally differentiated to obtain the transverse linear velocity, and its sign was used in the control algorithm. Two dampers provided the system a damping increase of a factor of four for the first damper and three for the second damper. Both dampers were found to work well at low levels of vibration, suggesting that they can be used effectively to prevent resonant vibrations in flexible structure from initiating and building up.

기 호 설 명

- $\Lambda$  : 유발변형률
- $d_{31}$  : 압전변형률 계수
- $t_{pe}$  : 압전액추에이터의 두께
- $t_{ve}$  : 점탄성물질의 두께
- $t_b$  : 보의 두께

- $E_b$  : 보의 탄성계수
- $E_{pe}$  : 압전액추에이터의 탄성계수
- $G$  : 점탄성물질의 전단계수
- $\Gamma$  : 점단지연계수
- $\epsilon_b^r, \epsilon_b^t$  : 구조물에 부착된 압전액추에이터 양단에서의 변형률
- $\Psi$  : 무차원 탄성계수비
- $w$  : 보의 변위

\*정회원, 대우자동차 기술연구소 선임연구원

$q$	: 일반좌표
$\emptyset$	: 가상모드형상
$a$	: 압전액추에이터 중심의 $x$ 좌표
$L$	: 보의 전체길이
$l$	: 압전액추에이터의 길이
$V$	: 압전액추에이터로의 입력전압
$n$	: 유효손실계수
$W$	: 초기 상태에서의 계의 전체 에너지
$\Delta W$	: 사이클당 손실에너지
$\xi$	: 댐핑계수
$\delta$	: 대수적 감소량
$m_0$	: 보의 단위길이당 질량
$I$	: 관성모멘트

## 1. 서 론

기계구조물의 진동제어문제는 최근 집중적으로 연구되어왔다. 구조물 진동문제는 구조물표면에 점탄성물질층을 부착하여 수동제어에 사용하였다<sup>(1, 2)</sup>. 이러한 점탄성물질층(viscoelastic material)은 변형시 에너지를 분산시키기 때문에 구조물진동의 수동제어에 사용된다. 이러한 물질의 감쇠효과는 점탄성물질의 전단효과에 의해 나타나며 전단효과는 구조물진동시 부착된 점탄성물질층에 의해 극대화된다<sup>(3)</sup>.

구속감쇠층(constrained damping layer)의 감쇠효과는 Kerwin<sup>(1, 3)</sup>에 의해 최초로 해석연구되었다. Kerwin은 탄성물질층(elastic layer)간에 점탄성물질층을 가진 적층보(laminate beam)에 대해 감쇠효과 또는 손실계수(loss factor)의 이론적 연구를 수행하였다. Kerwin은 연구를 통하여 감쇠효과는 주파수와 온도에 유관하며 저진폭진동시 진폭에 무관함과 점탄성물질층 두께에 최적치가 있음을 밝혔다. Noke<sup>(4)</sup>, Plunkett<sup>(5)</sup>은 구속점탄성물질층(constrained viscoelastic material layer)의 최적길이에 대해 연구하였다. 실험에 의해 증명된 사실로<sup>(5)</sup>, 그들은 구속점탄성물질층이 매우 길 때 양단에서의 전단응력은 점탄성물질층에 길이방향의 변형을 유발하여 양단에서 먼 위치의 점탄성물질층에는 매우 작은 전단응력만이 존재하며 감쇠효과는 매우 작은 감쇠효과를 나타낸다는 것도 밝혔다. 이러한 연구실험결과로부터 에너지손산(energy dissipation)을 최대화하는 구속감쇠물질층의 길이가 존재함을 알게되어 Plunkett<sup>(5)</sup>는 이의 최적길이에 감쇠효과를 구하는 방법을 연구하였다.

수동감쇠제어방식은 무게제한조건이나 정밀감쇠효

과를 요구하지않는 분야에서는 매우 효과적이다. 그러나 최근들어 저감쇠경량구조물(light structure with low damping)의 진동제어를 위해 능동제어기법이 활발하게 되었다. 능동진동제어분야에서 특히 압전형 액추에이터와 센서의 사용에 대해 활발한 연구가 진행되었다. 압전형소재는 경량이며 소형으로 구조물에 부착시에도 기존구조물의 특성을 과도하게 변화시키지 않는 장점이 있다. 또한 압전형 액추에이터의 경우 가진기(shaker)와 달리 지지구조물이 필요없다는 장점도 있다.

압전형소재에 가한 전압은 기계적 변형을 유발하고 구조물에 부착시 국부적변형을 구조물에 가함으로써 구조물진동의 효과적 감쇠 또는 제어가 가능하다. 이전의 연구들<sup>(6, 7)</sup>은 외팔보(cantilever beam)의 과도진동의 감쇠시간을 감소시키는 능동감쇠기로서 압전형 액추에이터를 사용하였다. Bailey가 사용한 액추에이터는 PVDF(polyvinyliden fluoride) 필름층으로 구성되어있다. 초기실험에서 Bailey<sup>(7)</sup>는 외팔보의 한 쪽면에 부착된 압전형 필름을 액추에이터로 사용하였으며 자유단에 위치한 가속도계를 센서로 사용하였다. 외팔보 자유단에서 측정된 속도를 근거로 외팔보의 1차진동모드의 감쇠계수는 제어기에 의해 증가될 수 있음을 보여주었다. 또한 Crawley<sup>(8, 9)</sup>은 표면에 부착된 압전형 액추에이터에 대한 이론적 모델을 제시하였다. Clark<sup>(10)</sup>은 단일액추에이터가 아닌 다수의 소형압전액추에이터에 의한 구조물진동에 대해 연구하였다. 이외에 유연보와 단일link 탄성 arm의 진동제어를 위한 압전 감지기/작동기설계<sup>(11, 13)</sup>가 이론적으로 수행되었으며, 압전필름을 이용한 외팔보의 능동진동제어를 위해 가속도계를 센서로 사용하고 압전필름을 액추에이터로 사용하였다<sup>(14)</sup>. 이외에 압전필름대신 전기유도유체를 액추에이터로 사용한 진동제어도 시도되고 있다<sup>(15)</sup>.

본 연구에서는 구조물진동을 효과적으로 감쇠시키기 위해 점탄성물질과 압전형 액추에이터를 결합사용하였다. 연구에 사용된 구조물은 강철외팔보이며 구조물의 능동/수동제어를 위해 PVDF압전필름과 점탄성 polymer를 사용하였다. 구조물 진동측정을 위해 PVDF 압전필름을 센서로 사용하였다. 외팔보의 1차진동모드를 제어하기 위해 두가지 형태의 능동-수동 감쇠기가 사용, 비교되었다. 첫번째는 압전형 액추에이터가 외팔보의 한 면에 직접 부착된 경우이고 두번째는 점탄성물질과 결합된 소형 압전액추에이터 배열이 능동구속점탄성감쇠기(active constrained viscoelastic damper)로서 사용되었다. 본

연구에서는 연구용으로 제작된 구조물에 압전액추에이터와 점탄성물질을 동시에 사용하여 구조물의 능동/수동제어를 실험적으로 구현되었다. 또한 압전액추에이터의 크기를 최적설계기법으로 선정하여 대형의 단일 액추에이터가 아닌 다수의 소형압전액추에이터의 효용성을 실험으로 입증하였다.

## 2. 시스템의 개요

### 2.1 점탄성감쇠층(Viscoelastic Damping Layer)

점탄성 polymer는 높은 유연성을 가진 amorphous물질이다. 기존의 구조물과 부착된 점탄성감쇠물질간의 변형률 차이에 의한 전단력은 점탄성 감쇠물질의 팽창과 미끄러짐을 유발시킨다. 이러한 변형에 의해 진동에너지의 일부가 마찰열에너지로 소산된다. 변형되었던 점탄성물질이 원형으로 복귀할 때 진동에너지가 다시 소산된다(Fig. 1). 점탄성물질의 에너지소산은 손실계수(loss factor)로 나타나며 탄성계수는 전단계수(shear modulus)에 의해 결정된다. 본 연구에서 사용된 점탄성물질은 Soundcoat사 제품으로 0.5mm두께의 DYAD 606을 사용하였다.

### 2.2 압전형 센서와 액추에이터

본 연구에서 센서와 액추에이터로 사용된 압전형 소재는 PVDF필름이다. PVDF는 생산단계에서 가해진 고전압에 의해 전기적 극성을 가지는 반결정상태의 polymer이다. 압전형소재는 전극역할을 하는 전도성물질층인 silver ink layer에 의해 양면이 덮혀 있다. 전극에 전압을 가하면 압전소재는 전압극성에 따라 수축 또는 팽창을 하며 반면에 압전소재가 기계적 변형을 받으면 양전극간에 변형량에 비례하는 전하(charge)가 발생한다. 구조물에 부착된 압전소재에 전압을 가하면 액추에이터로 사용이 가능하며 반면에 양단간에 발생한 전하를 측정하면 센서로 사

용이 가능하다. 일반적으로 압전소재는 작용된 전압 방향에 따라 물성치와 응답성이 다른 비등방성물질이다. Fig. 2에서는 좌표축을 가지는 PVDF필름의 일부분을 나타내었다. 좌표축 1은 길이방향, 2는 너비 방향이며 3은 두께방향을 나타낸다. 본 연구에서는 두께방향으로 전압이 가해질 때 길이방향의 변형률이 가장 크게 나타나는 단일축방향(uniaxially)으로 극성을 갖는 PVDF필름이 사용되었다. 압전운동성(piezoelectric activity)은 압전변형률 계수  $d_{31}$  (piezoelectric strain constant)로 특징지어진다.

구조물에 부착된 액추에이터에 전압이 가해지면 변형률(stain)은 액추에이터가 부착된 영역에 걸쳐 나타난다. 전압이 액추에이터의 길이방향으로 변할 때 변형률도 길이방향에 따라 변한다. 이것은 분포 액추에이터(distributed actuator)의 특징이다. 이 실험에서 사용된 압전소재는 Pennwalt사에서 제조된 것으로 두께는 0.11mm이다. 해당 압전소재의 물성치는 참고문헌 (16)을 참고하기 바란다.

### 2.3 구조물의 제원 및 능동-수동 감쇠기의 제원

본 연구에서는 Bernoulli-Euler의팔보를 대상구조물로 선정하였다. 사용된 보의 소재는 스프링강이며 보의 치수는 사용가능한 압전소재필름의 치수를 고려하여 선정되었다. 대상구조물은 밀도  $7800\text{kg/m}^3$ 이며 탄성계수가  $210 \times 10^9\text{Pa}$ 인 스프링강이며, 두께 1.02mm, 너비 2.54cm, 길이 20.0cm이다. 두가지 형태의 감쇠제어기가 본 연구를 위해 제작되었다. 첫째로 균일분포(uniformly distributed) 압전필름액추에이터가 외팔보의 한 면에 부착되었고 다른 한 면에는 점탄성물질이 부착되었으며 그 위에 센서역할을 담당하는 균일분포 압전소재 필름이 구속층(constraining layer)으로 부착되었다. 두번째의 감쇠제어기는 균일분포 압전센서가 부착되었고 다른 면에는 점탄성물질이 부착되었으며 그 위에 능동구

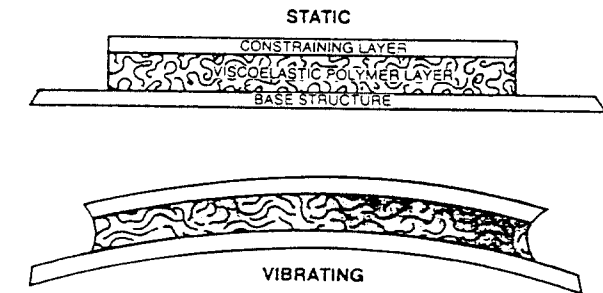


Fig. 1 Viscoelastic material behavior under constrained damping treatment

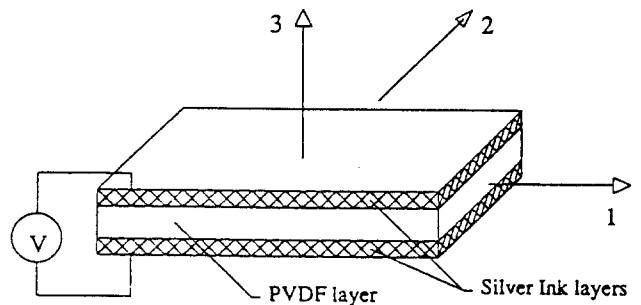


Fig. 2 Coordinate system for piezoelectric film

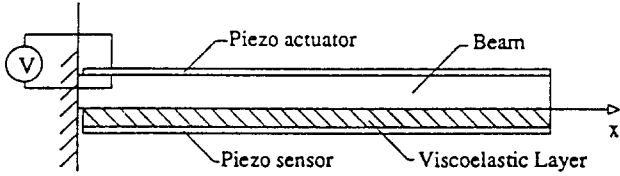


Fig. 3 Configuration of beam #1. Top view

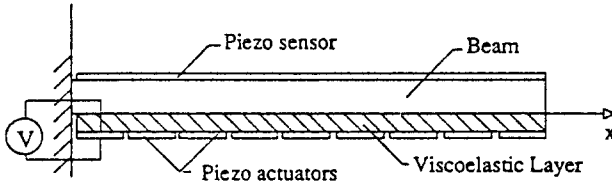


Fig. 4 Configuration of beam #2. Top view

속층(active constraining layer)로써 소형압전 액추에이터가 배열되었다. Fig. 3과 4는 두 가지 감쇠제어기의 구조를 나타낸다. 압전필름의 방향 1은 외팔보의 길이방향으로 배치되었다. 따라서 액추에이터 양단의 전압은 압전소재의 길이방향 변형을 유발하며 또한 외팔보의 길이방향으로 분포 굽힘 모멘트(distributed bending moment)를 유발한다.

### 3. 이론적 배경

#### 3.1 압전소재 액추에이터

비구속(unconstrained) 압전소재가 극성방향으로 가해진 전압에 의해 가진될 때 압전소재는 수축 또는 팽창변형이 일어난다. 단일방향성 액추에이터는 축 3방향으로 극화되어(polarized) 있으므로 축 1방향으로 나타난다. 유발변형률(induced strain)의 크기  $\Lambda$ 는 작용전압  $V$ 와 압전변형률계수  $d_{31}$ 에 비례하며, 액추에이터의 두께  $t_{pe}$ 에 반비례한다.

$$\Lambda = \frac{d_{31}}{t_{pe}} V \quad (1)$$

#### 3.2 압전소재/구조물의 결합모델

표면부착액추에이터에 대한 정적모델은 Crawley와 De Luis<sup>(8)</sup>에 의해 제시되었다. 압전소재 액추에이터에 의해 구동되는 시스템응답해석을 위해 정역학적모델이 구조진동모델에 결합되었다<sup>(8,9)</sup>. 여기에서는 그 중 필요한 결과만을 기술한다. 압전액추에이터가 점탄성물질층을 통해 간접적으로 구조물표면과 부착시 전단지연해(shear lag solution)를 고려해야 한다. 이 전단지연해는 점탄성물질층내의 전단응

력  $\tau$ 에 대한 식으로 나타난다.

$$\tau(x) = \frac{\bar{G} E_b}{t_{ve} E \Gamma} \left( \frac{\epsilon_b^s + \epsilon_b^t}{2} \frac{\cosh \Gamma x}{\sinh \Gamma} + \left( \frac{\epsilon_b^s + \epsilon_b^t}{2} - \Lambda \right) \frac{\sinh \Gamma x}{\cosh \Gamma} \right) \quad (2)$$

여기에서  $E_b$ 는 보의 Young's modulus,  $\bar{E} = \frac{E_b}{E_{pe}}$ ,  $\bar{G} = \frac{G}{E_{pe}}$ ,  $\Lambda = \frac{d_{31} V}{t_{pe}}$ ,  $E_{pe}$ 는 압전액추에이터의 Young's modulus,  $G$ 는 점탄성물질의 전단계수,  $L$ 은 보의 전체길이이며,  $t_{ve}$ 는 점탄성물질층의 두께이다. 또한  $V$ 는 압전액추에이터에의 입력전압,  $t_{pe}$ 는 압전액추에이터의 두께이다. 또한  $\Gamma$ 는 전단지연계수(shear lag parameter)이며 다음과 같이 표현된다.

$$\Gamma^2 = \frac{\bar{G} \theta_s}{t_{pe}^2} \left( 1 + \frac{3}{\Psi} \right) \quad (3)$$

$\epsilon_b^s$ 과  $\epsilon_b^t$ 은 구조물에 부착된 압전액추에이터의 양단에서의 변형률을 나타내며  $\Psi$ 는 무차원 강성비이다.  $\theta_s = \frac{t_{ve}}{t_{pe}}$ 이며  $\Psi = \frac{E_b t_b}{E_{pe} t_{pe}}$ 이다. 여기에서  $t_b$ 는 보의 두께,  $E_b$ 는 보의 탄성계수,  $E_{pe}$ 는 압전소재의 탄성계수이며,  $t_{pe}$ 는 압전소재의 두께이다. 매우 얇은 점탄성물질층( $t_{ve} \ll t_b$ )인 경우 전단지연계수  $\Gamma$ 는 증가되며 액추에이터양단에서 멀리 떨어진 점탄성물질층내에서의 전단응력  $\tau$ 는 영에 가까워진다. 이 경우는 외팔보와 압전소재간에 점탄성물질층이 존재하지 않는 완전부착모델(perfectly bonded model)로 근사화할 수 있다. 점탄성물질층내의 전단응력은 입력전압에 비례하며 구조물에 부착된 액추에이터 양단에서의 표면변형률(surface substructure strain)에 관계됨을 알 수 있다. 전단응력  $\tau$ 를 계산하기 위해  $\epsilon_b^s$ 과  $\epsilon_b^t$ 를 계산해야 한다.  $\epsilon_b^s$ 과  $\epsilon_b^t$ 는 모달함수에 관계되며 단일모드의 Rayleigh-Ritz모델에서는 일반좌표(generalized coordinate)  $q$ 와 가상모드형상(assumed mode shape)  $\Phi$ 로써 나타내어진다. 변위  $w(x,t)$ 는 일반좌표와 가상모드형상과의 곱의 무한합으로 나타난다.

$$w(x,t) = \sum_{j=1}^{\infty} \Phi_j(x) q_j(t)$$

또한 변형률  $\epsilon_b$ 는 다음과 같이 표시되어진다.

$$\epsilon_b = -\frac{t_b}{2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = -\frac{t_b}{2} \frac{d^2 \Phi}{dx^2} q \quad (4)$$

여기에서  $\Phi$ 는 Bernoulli-Euler보의 엄밀해(exact solution)으로 간주되었다.

앞서 유도된 점탄성물질내의 전단응력  $\tau$ 는 구조물에 굽힘모멘트를 구현하는 force로 나타난다. 보의 진동을 나타내는 Rayleigh-Ritz 방정식에서 압전 액추에이터의 효과는 다음과 같은 modal force  $Q$ 로 나타난다.

$$Q = \int_{\bar{a}-\bar{m}}^{\bar{a}+\bar{m}} \tau b t_b \bar{\Phi}' dx \quad (5)$$

여기에서  $\bar{a} = \frac{a}{l}$ ,  $\bar{\Phi} = \frac{\Phi}{l}$ ,  $\bar{m} = \frac{L}{2l}$  이며,  $a$ ,  $l$  과  $L$  은 압전액추에이터 중심의  $x$  좌표, 압전액추에이터의 길이와 보의 길이를 나타낸다. 방정식 (2)를 방정식 (5)에 대입하면 modal force  $Q$ 는 다음 식으로 나타낸다.

$$\begin{aligned} Q &= -\frac{Gbt_b^2}{4t_s\Gamma l^2} \left\{ \frac{\bar{\Phi}''(\bar{a}+\bar{m}) - \bar{\Phi}''(\bar{a}-\bar{m})}{\sinh\Gamma} I_c \right. \\ &\quad \left. + \frac{\bar{\Phi}''(\bar{a}+\bar{m}) + \bar{\Phi}''(\bar{a}-\bar{m})}{\cosh\Gamma} I_s \right\} q \\ &\quad - \frac{Gbt_b}{t_s\Gamma} \left( \frac{I_s}{\cosh\Gamma} \right) \Lambda \\ &= -K_p q + Q_p \Lambda \quad (6) \end{aligned}$$

여기서  $I_c = \int_{\bar{a}-\bar{m}}^{\bar{a}+\bar{m}} \cosh\left(\frac{2\Gamma}{L}(x-\bar{a})\right) \bar{\Phi}'(\bar{x}) d\bar{x}$ ,  $I_s = \int_{\bar{a}-\bar{m}}^{\bar{a}+\bar{m}} \sinh\left(\frac{2\Gamma}{L}(x-\bar{a})\right) \bar{\Phi}'(\bar{x}) d\bar{x}$  이다. 식 (6)에서 첫째 항은 일반좌표  $q$ 에 비례하고, 부가적인 modal stiffness  $K_p$ 가 나타나는 반면 두번째 항은 입력전항  $V$ 에 비례한다. 이에 따라 압전액추에이터가 부착된 보의 단일모드모델은 운동방정식은 다음과 같이 나타나며 이는 보의 거동을 예측하는 데 유용하다.

$$M\ddot{q} + B\dot{q} + (K + K_p)q = Q_p\Lambda = Q_p \frac{d_{31}}{t_{pe}} V \quad (7)$$

여기서  $M$ ,  $B$ ,  $K$ 는 각각 보의 modal mass, modal damping, modal stiffness를 나타낸다.

### 3.3 에너지 소산과 유효손실계수(Energy Dissipation and Effective Loss Factor)

감쇠진동을 하는 기계시스템의 감쇠를 나타내는 일반적인 방법중 하나는 손실계수(loss factor)  $n$ 를 이용하는 것이다. 손실계수는 초기상태의 전체 에너지에 대해 한 사이클동안 소산된 에너지의 비로써 정의된다.

$$n = \frac{\Delta W}{2\pi W} \quad (8)$$

여기에서  $\Delta W$ 는 한 사이클동안의 에너지소산이며

$W$ 는 초기 상태에서의 전체에너지이다. 진동의 각 모드는 각각의 손실계수를 가지므로  $n$ 는 모드손실계수(model loss factor)로서도 사용된다. 저감쇠선형시스템에 대해 손실계수  $n$ 는 대수적감소량  $\delta$ 와 감쇠비  $\xi$ 로 나타낸다.

$$n = 2\xi = \pi\delta \quad (9)$$

본 연구에서의 감쇠계수를 측정하기위해 사용하는 방법은 과도진동(transient vibration)시험시에 나타나는 감쇠포락선(decay envelope)에서 나타나는 유효손실계수를 이용하였다. 유효손실계수(effective loss factor)는 선형점성감쇠(linear viscous damping)시 감쇠포락선을 결정하는 손실계수를 비선형계에서도 사용가능 하도록 일반화한 계수이다.

저감쇠선형시스템의 감쇠포락선을 시간대역에서 나타내면

$$\phi(t) = \phi(0) \exp\left(\frac{-n\omega t}{2}\right) \quad (10)$$

여기에서  $\phi$ 는 감쇠포락선의 진폭,  $\omega$ 는 무차원 고유진동수이며  $n$ 는 손실계수이다. 양변에 자연대수를 취하면

$$\ln\phi(t) = \ln\phi(0) - \frac{n\omega t}{2} \quad (11)$$

감쇠포락선의 기울기는 손실계수를 구하는 데 사용된다.

$$n = -\frac{2}{\omega} \frac{\delta \ln(\phi)}{\delta t} \quad (12)$$

대수선도로 나타낸 선형시스템의 감쇠포락선은 직선이며 감쇠계수는 일정하다. 본 연구에서는 이러한 손실계수의 개념을 비선형시스템에서도 적용가능하도록 일반화하였다. 여기에서의 비선형시스템은 대수선도에서 나타난 감쇠포락선이 곡선이며 시스템의 감쇠계수가 진폭에 따라 변하는 시스템을 지칭한다. 이 경우 진동주파수  $\omega$ 는 일정하게 유지된다고 가정한다. 그리하여 일반적인 유효손실계수  $n$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$n(t) = -\frac{2}{\omega} \frac{\delta[\ln(\phi(t))]}{\delta t} \quad (13)$$

윗 식은 본 연구에서 얻어지는 감쇠포락선으로부터 유효손실계수를 구하는 데 사용된다.

### 3.4 제어기 설계

본 연구에서 사용된 제어이론은 Bailey와 Hubbar-

d<sup>(6, 7)</sup>가 개발한 제어기설계이론을 이용하였다. 본 연구에서의 제어문제는 압전센서로 부터의 출력신호를 이용하여 압전액추에이터로 입력전압  $V(t)$ 를 제어 신호로 사용하여 기계시스템의 진동을 제어하는 것이다. 입력전압  $V(t)$ 는 허용가능 전압에 의해 제한된다( $|V(t)| \leq V_{\max}$ ). 제어이론은 Lyapunov방법을 이용하여 구성한다. Lyapunov함수  $F$ 는 전체시스템의 에너지이다.

$$F = \frac{1}{2} \int_0^1 \left\{ E_b I w^2 + m_0 \left( \frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 \right\} dx \quad (14)$$

본 연구에서 사용된 외팔보의 운동방정식은 다음과 같이 나타내어진다.

$$E_b I \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + m_0 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \text{ for } 0 \leq x \leq 1 \quad (15)$$

이에 부수되는 경계조건은 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} w &= \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \text{ for } x=0 \\ E_b I \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} &= c V_{(x,t)} \text{ for } x=l \\ E_b I \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} &= c \frac{\partial V_{(x,t)}}{\partial x} \text{ for } x=l \end{aligned} \quad (16)$$

Lyapunov 함수  $F$ 의 시간미분을 취하면

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \int_0^1 \left\{ E_b I w \frac{\partial w}{\partial t} + m_0 \frac{\partial w}{\partial t} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \right\} dx \quad (17)$$

외팔보의 운동방정식 (15)를 대입하면

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \int_0^1 \left\{ E_b I w \frac{\partial w}{\partial t} - E_b I \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \frac{\partial w}{\partial t} \right\} dx \quad (18)$$

경계조건을 도입하기 위해 식 (18)의 두번째 항을 부분적분하면

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial t} &= \int_0^1 E_b I \left\{ w \frac{\partial w}{\partial t} - \frac{\partial^3 w}{\partial t \partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right\} dx \\ &\quad - c V_{(t)} \frac{\partial^2 w}{\partial t \partial x} \Big|_{x=l} \end{aligned} \quad (19)$$

여기에서  $c$ 는  $c = \frac{Q_p}{w(x)|_{x=l}} \frac{d_{31}}{t_{pe}}$ 이다. 입력전압은 하나의 항에만 나타나므로 식 (19)를 최소화하기 위해 negative항은 그의 절대값이 다음과 같이 최대화 되어야 한다.

$$V(t) = -sgn \left\{ \frac{\partial^2 w}{\partial t \partial x} \Big|_{x=l} \right\} V_{\max} \quad (20)$$

여기에서  $sgn(*)$ 은 다음과 같은 특성을 갖는 sign 함수이다.

$$\begin{aligned} sgn(x) &= 1 \text{ for } x > 0 \\ &= -1 \text{ for } x < 0 \end{aligned} \quad (21)$$

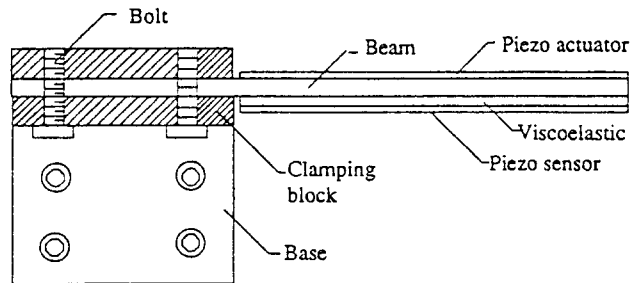
$V(t)$ 는 각 시간에서 시스템으로부터 가능한 많은 에너지를 소산시키기 위해 결정된 입력전압이다.  $\frac{\partial^2 w}{\partial t \partial x} \Big|_{x=l}$ 는 외팔보 자유단에서의 각속도(angular velocity)이다.

식 (12)로부터 피드백된 전압크기는 가능한한 커야하며 ( $V_{\max}$ ) 피드백전압은 외팔보 자유단의 각속도와 반대위상의 굽힘모멘트를 발생시켜야 함을 알 수 있다. 자유단 속도신호에 기초한 피드백제어기가 본 연구에서 사용되었다. 압전센서의 신호는 외팔보의 변위에 비례하므로 자유단 속도의 부호는 압전센서신호를 수치미분하여 얻었다. 본 연구에서는 가장 실험이 용이한 1차 전동모드를 제어하였다.

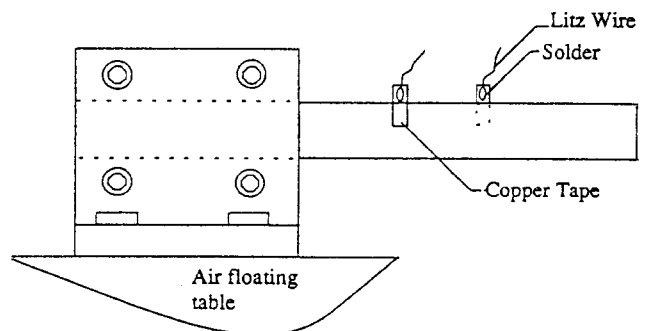
#### 4. 실험적 해석 및 고찰

##### 4.1 외팔보의 제작

Fig. 5는 실험에 사용된 외팔보의 개요이다. 외팔보의 재질은 두께 1.02mm, 너비 2.54cm, 길이 20cm의 스프링강으로 구성되었다. 두께 0.5mm, 너비 2.5cm, 길이 20cm의 점탄성물질층의 외팔보의 한



(a) Top view of beam and fixture.



(b) Side view of beam and fixture.

Fig. 5 Schematic of beam and fixture. Top and side views

면에 부착되었다. 사용된 점탄성물질층은 저점성 에폭시(epoxy)를 사용하여 접착되었다. 충분한 경도의 에폭시접착층을 만들기 위해 R.B.C. #3215 resin과 AB-530 hardener를 2대 1의 비율로 혼합하였다. 에폭시층의 두께를 최소화하고 에폭시내의 기포를 없애기 위해 점탄성물질층을 외팔보에 접착후 12시간 동안 압력을 가하였다. 두 개의 감쇠제어기에 사용된 압전액추에이터와 센서는 단방향성 PVDF필름이다. PVDF필름을 면도칼로 절단후 소독용 알콜을 이용하여 절단면을 세척하였다. PVDF필름 역시 앞서 언급한 R.B.C. 에폭시를 이용하여 외팔보에 접착되었다.

Served Litz 선을 구리테이프(copper foil tab)에 납땀하여 전기적인 접속을 하였다. 사용된 Litz선은 MWS wire Co. 에서 생산한 15/44 SPSN Served Litz선이다. 구리테이프는 Scotch회사에서 생산된 전도성 1181 Foil Shielding Tape이다. Litz선과 연결된 구리테이프를 압전소재의 전극에 부착하여 압전소재와 Litz선은 견고하게 연결된다. 전기적인 노이즈를 없애기 위해 외팔보와 외팔보를 지지하는 마운트는 접지되었고 외팔보 면방향(faced to beam)의 압전소재전극도 접지되었다. 첫번째의 외팔보 #1의 외형은 Fig. 3에 제시되었다. 압전액추에이터는 외팔보에 직접 부착되었고 uniform액추에이터의 크기와 외팔보 부착면의 크기는 동일하다. 압전액추에이터의 효과는 외팔보의 자유단에 작용하는 굽힘모멘트와 같으므로 선정된 액추에이터 크기는 외팔보의 1차 진동모드를 제어하기에 최적의 크기이다. 외팔보의 다른면에는 액추에이터와 동일한 크기의 압전센서가 사용되었다. 압전센서로 부터의 출력신호는 외팔보의 변위에 비례하며 제어신호를 결정하기 위해서는 변위의 시간미분부호(sign of time derivative)가 필요하다. 압전센서는 점탄성물질층의 상면에 부착되었다.

두번째의 외팔보 #2의 외형은 Fig. 4에 제시되었다. 소형액추에이터배열은 능동구속점탄성감쇠기(active constrained viscoelastic damper)를 구성하기 위해 점탄성물질층 상면에 부착되었다. 압전센서는 강철외팔보의 다른 면에 직접 부착되었다. 각각의 소형액추에이터의 너비는 외팔보와 같은 2.54cm이다. 소형액추에이터의 길이는 점탄성전단응력에 대해 수행된 최적설계기법에 의해 결정되었다. 최적설계시 목적함수는 구속점탄성물질층에 의한 감쇠를 최대화하는 것이다. 감쇠는 점탄성물질층내의 전단응력에 비례한다. 최적설계결과, 각 소형액추에이터

간에 최소한 여유를 가지는 2cm의 길이를 가지는 액추에이터가 최적임을 찾아냈다. Fig. 4에 나타난 것처럼 2cm 길이의 소형액추에이터 9개를 1mm 여유를 유지하며 배열하였다. 기하학적으로 외팔보의 자유단에는 1cm의 비구속점탄성물질층이 존재하나 이 부분에서는 전단응력이 최소이므로 액추에이터효과에 큰 영향을 끼치지 않는다. 1차 진동모드만을 제어하므로 9개의 소형액추에이터들은 같은 위상(phase)를 갖도록 병렬로 연결되었다.

#### 4.2 마운트의 설계

마운트는 외팔보의 진동에 영향이 없이 지지하도록 설계되었으며 가능한한 마운트의 고유진동수가 외팔보의 1차고유진동수보다 매우 높도록 설계되었다. Fig. 5는 지지된 외팔보를 가진 마운트를 나타낸다. 베이스는 1.27cm 두께의 알루미늄앵글로 제작되었으며 4개의 1/4-20스큐루나사를 이용하여 공압정반(Newport Pneumatic Isolation Table)에 고정되었다. 1.27cm 두께의 알루미늄블록의 외팔보를 지지하기 위해 베이스에 연결되었다. 베이스와 알루미늄블록은 편평도와 외팔보의 길이방향축과 직교성을 유지하기 위해 밀링가공되었다. 베이스의 밀면도 정반과의 밀착성과 외팔보와의 평행성을 유지하기 위해 밀링가공 되었다.

#### 4.3 감쇠실험

##### (1) 실험장비 구성 및 절차

Fig. 6은 감쇠실험을 위해 사용된 실험장비의 개략도이다. 압전센서로 부터의 센서신호는 ENDEVCO Model 104 charge amplifier에 의해 증폭되었다.

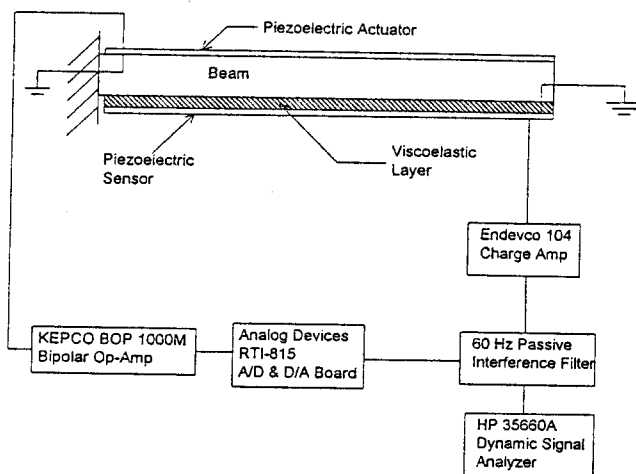


Fig. 6 Schematic of equipment and connections

Litz선에 의해 감지되는 60Hz 노이즈를 감소시키기 위해 60Hz 수동간섭필터(passive interference filter)를 사용하여 센서신호를 필터링하였다. FFT분석기(HP 35660A Dynamic Signal Analyzer)는 센서신호의 모니터를 위해 사용되었다. 센서신호는 Analog Device Co.에 의해 제작된 RTI-815 A/D와 D/A 보드를 정착한 386 IBM PC에 저장되었다. 피드백제어기는 C언어를 이용하여 PC에 정착되었다. 수집된 센서신호는 외팔보의 변위에 비례하므로 수치미분개념을 사용하여 피드백제어에 필요한 각속도의 부호를 구하였다. 외팔보의 1차진동모드의 능동감쇠를 위해 일정증폭이득제어(constant gain control)이론을 사용하였다.

RTI 815 D/A 보드로 부터의 출력전압은 압전액츄에이터에 공급되기 전에 KEPCO Inc.에서 제작된 전압증폭기(BOP-1000M Bipolar Operational Power Amplifier)에 의해 증폭되었다. BOP-1000M의 전

압증폭도는 100이며 RTI-815 D/A 보드의 출력전압 한도는  $\pm 10$  V이므로 압전액츄에이터에 공급가능한 제어입력전압한도는  $\pm 1000$  V이다. 그러나 안전성을 위해 제어입력전압한도를  $\pm 500$  V로 제한하였다. 그이상의 제어입력전압은 공급시에는 액츄에이터 양 전극사이에 전압leakage에 의해 전기스파크가 발생하였다. 압전센서와 charge amp간은 ENDEVCO에서 제작된 3060A 케이블을 이용하였고 다른 연결구간들은 BNC 콘넥터와 케이블이 사용되었다.

실험절차는 자유단에 1.5cm의 변위를 가한후 외력을 제거하여 과도진동시 감쇠포락선을 측정하는 방법이다. 자유단에 초기 변위를 가하므로 1차진동모드가 지배적인 진동모드가 되어 2차이상의 고차진동모드는 거의 나타나지 않는다. 이는 FFT해석기를 이용하여 확인되었다. 감쇠포락선은 두가지 형태의 외팔보에 대해 모두 측정되었다. 일차적으로는 제어기를 사용하지 않을 경우 ( $V=0$ )와 constant-

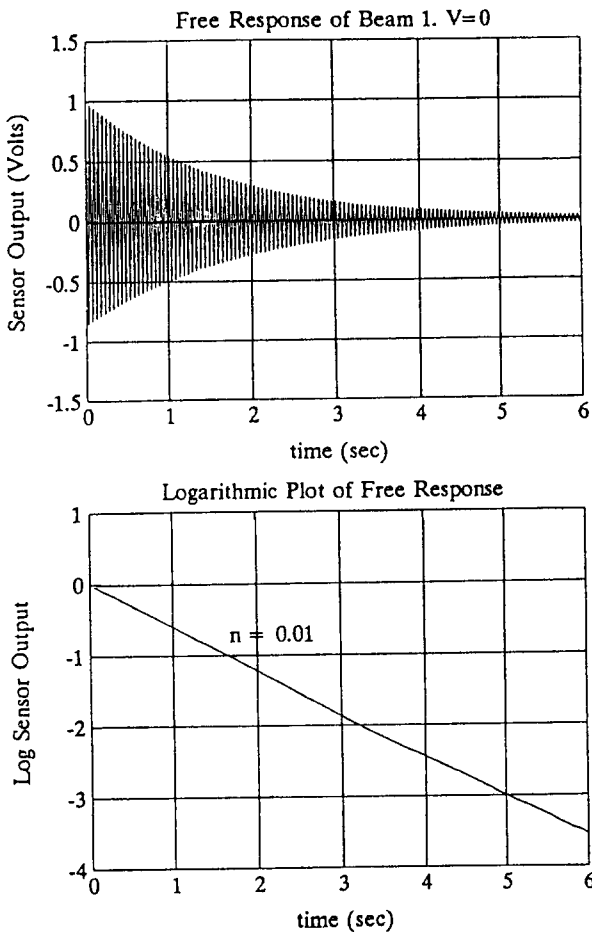


Fig. 7 Free decay of first mode of beam #1, and logarithmic plot,  $V=0$  volts

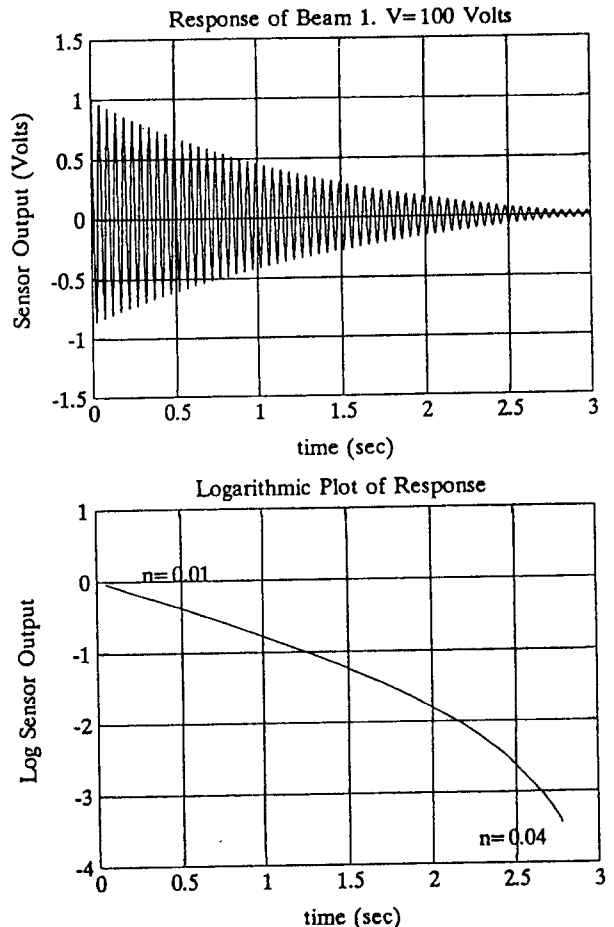


Fig. 8 Forced decay of first mode of beam #1, and logarithmic plot,  $V=100$  volts



gain 제어를 작동시킨 경우를 비교시험하였다. 제어기의 gain은 최대입력전압이 100, 200, 300, 500 V에 도달하도록 조정되었다. 시험결과는 D/A 보드를 통해 PC에 저장되었다. 저장된 결과들은 Matlab S/W를 이용해 해석되었다.

(2) 실험결과

Fig. 7은 제어를 작동시키지 않은 상태 ( $V=0$ )에서 외팔보#1에 대한 압전센서로 부터의 출력신호와 대수선도 상에서의 해석결과이다. 센서출력신호에 따르면 자유단진동이 충분히 감쇠되는데 6초 이상의 시간이 소요됨을 알 수 있다. 감쇠포락선은 대수선도상에 직선으로 나타나는 지수함수(exponential function)곡선으로 나타난다. 작성된 대수선도상에서 나타난 유효손실계수(effective loss factor)는 0.01이다. Fig.8은 액추에이터에 작용하는 허용제어전압이 100 V일 때의 출력신호를 나타낸다.  $V=0$ 일 때 진동감쇠까지 6초 이상이 소요되는 반면 이 경우에는

3초미만이 소요되었다. 대수선도는 진동진폭이 감소함에 따라 기울기가 급격히 변화함을 보여주고 있다. 진폭이 1.5에서 1cm일 때는 유효손실계수가  $n=0.01$ 이나 진폭이 감소함에 따라 유효손실계수는  $n=0.04$ 까지 증가하였다. Fig.9는 허용제어전압이 200 V일 때 외팔보#1의 출력신호를 나타낸다. 진동감쇠까지 약 2초가량이 소요되었으며 대변위에서는  $n=0.013$ 이고 소변위상태에서는  $n=0.06$ 까지 증가되었다. 허용제어전압이 300 V와 500 V로 증가시 (Fig.10과 11) 감쇠계수가 더욱 증가하였다. 진동감쇠까지 1에서 1.5초가 소요되었으며 소변위상태에서 유효손실계수는  $n=0.09$ 까지 증가하였다.

Fig.12에서는 제어를 작동시키지 않은 상태 ( $V=0$ )에서 외팔보 #2에 대한 압전센서로 부터의 출력신호와 대수선도 상에서의 해석결과이다. 대수선도는 유효손실계수가 진폭에 무관함을 나타내는 일정 기울기를 가진 직선으로 나타낸다. 외팔보 #2의 유

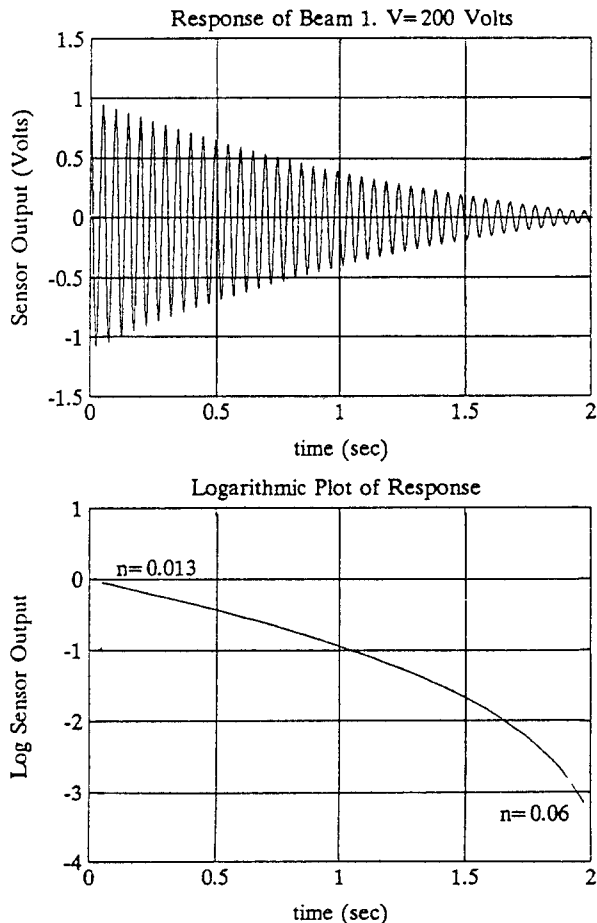


Fig. 9 Forced decay of first mode of beam #1, and logarithmic plot,  $V=200$  volts

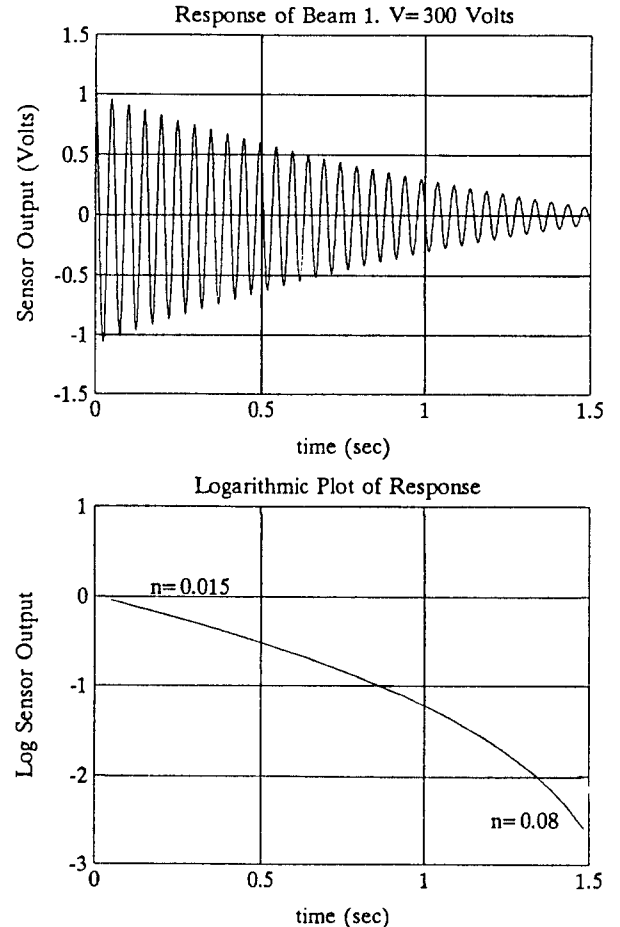


Fig. 10 Forced decay of first mode of beam #1, and logarithmic plot,  $V=300$  volts

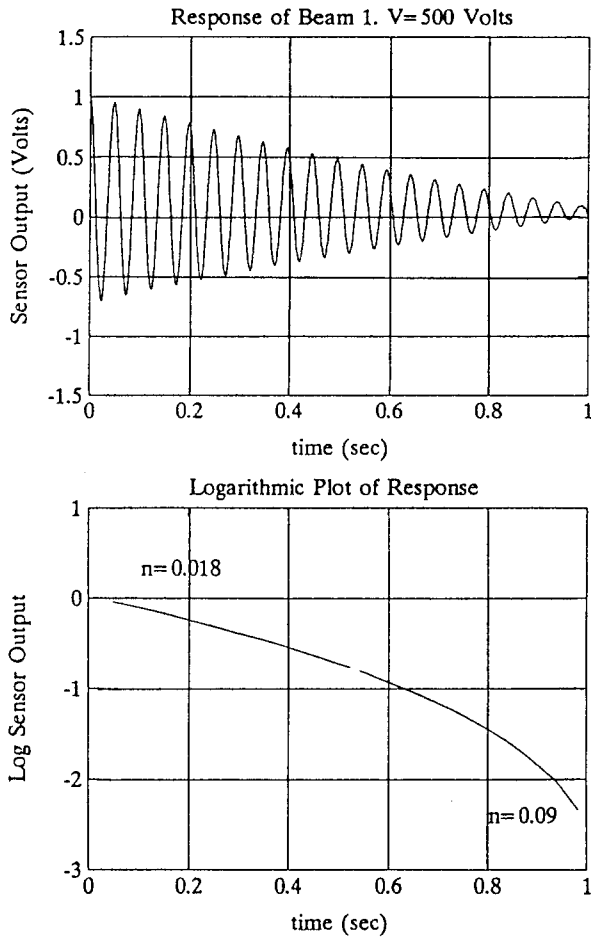


Fig. 11 Forced decay of first mode of beam #1, and logarithmic plot,  $V=500$  volts

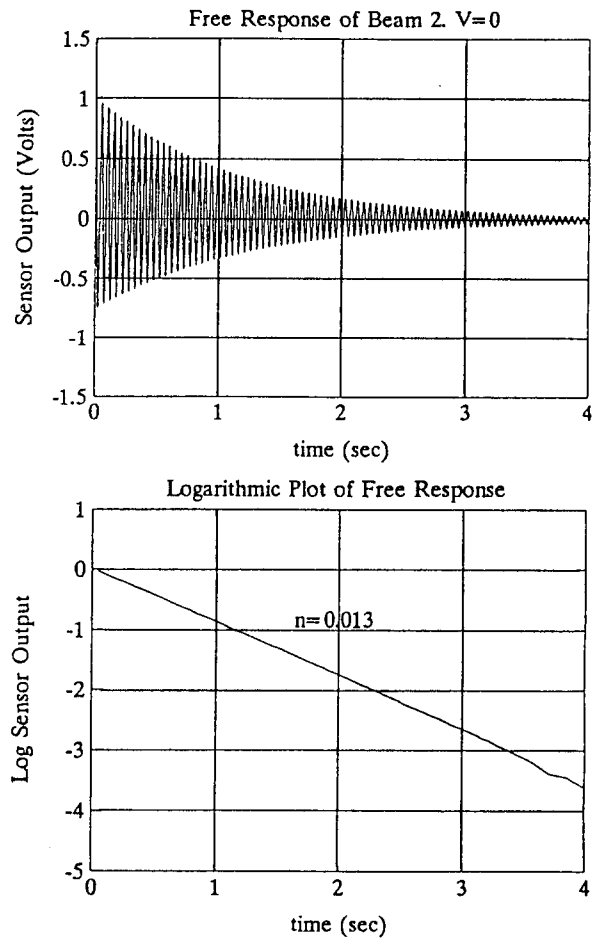


Fig. 12 Forced decay of first mode of beam #2, and logarithmic plot,  $V=0$  volts

효손실계수는 외팔보 #1보다 다소 높은  $n=0.013$ 이다.  $V=0$ 일 때 충분한 진동감쇠까지는 4초이상 소요됨을 압전센서출력으로 부터 알 수 있다. 허용제어전압이  $100 V$ 일 때 3초 이내에 진동감쇠가 되었다(Fig. 13). 이 역시 고진폭시(1.5~1cm)는 유효손실계수가  $n=0.014$ 인 반면, 저진폭시 유효손실계수가  $n=0.035$ 로 증가함을 알 수 있다. Fig. 14는 허용제어전압이  $200 V$ 일 때 외팔보 #2의 시간응답을 나타낸다. 2.5초내에 진동감쇠가 나타나며 유효손실계수는  $n=0.015$ 에서 저진폭시  $n=0.04$ 로 증가된다. 허용제어전압이  $300 V$ 와  $500 V$ 로 증가시 유효손실계수는 저진폭시  $n=0.07$ 까지 증가되며 외팔보의 진동은 1.5~2초내에 충분한 감쇠가 이루어진다. 두가지 형태의 외팔보실험시 비교적 간단한 능동감쇠제어에 의해 감쇠계수를 증가시켰으며 액추에이터가 강철보에 직접 부착된 외팔보 #1의 경우 허용제

어전압  $100 V$ 만으로도 유효손실계수는 4배로 증가하였다. 더 높은 허용제어전압의 경우 더욱 높은 유효손실계수증가(6~9배)가 나타났다. 액추에이터가 점탄성물질을 통해 강철보에 작용하는 외팔보 #2의 경우 허용제어전압  $100 V$ 에서 유효손실계수는 3배 증가하였고 더 높은 전압의 경우 5~6배로 증가하였다. 유효손실계수가 증가했으나 외팔보 #1의 경우보다 유효손실계수증가율이 감소되었다. 이는 압전액추에이터에 의해 점탄성물질층을 통해 전달력이 전달되기 때문에 액추에이터가 외팔보에 직접 부착된 외팔보 #1에 비해 감소하기 때문이다.

## 5. 결 론

두가지 형태의 능동-수동감쇠제어기가 외팔보의 진동을 효과적으로 제어하기 위해 개발되었다. 능동

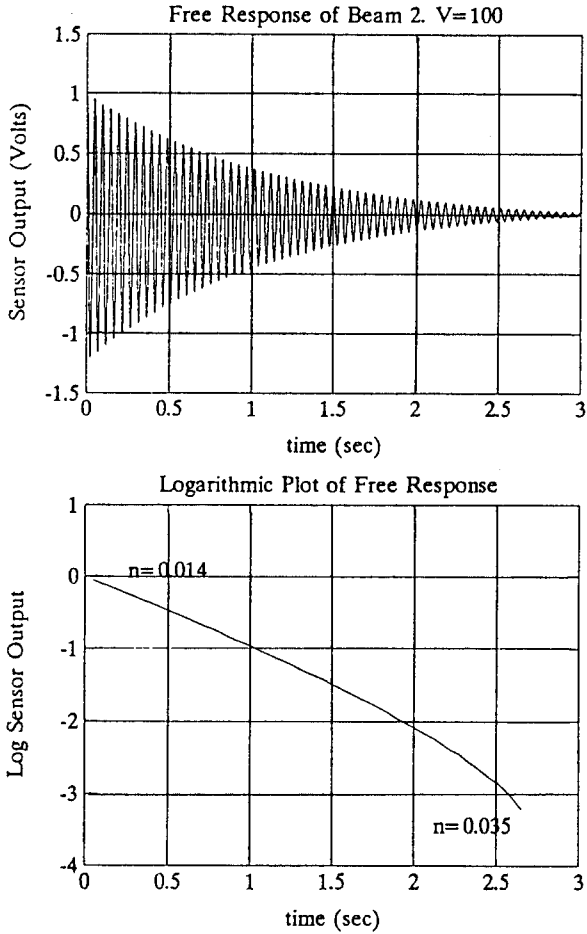


Fig. 13 Forced decay of first mode of beam #2, and logarithmic plot, V=100 volts

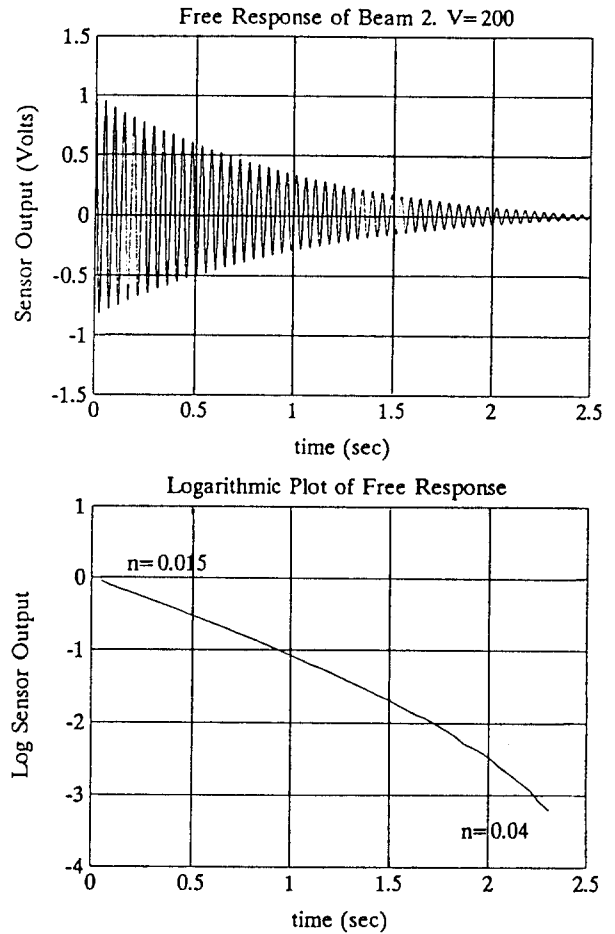


Fig. 14 Forced decay of first mode of beam #2, and logarithmic plot, V=200 volts

감쇠제어소재는 PVDF압전 polymer이며 수동감쇠제어소재는 강철보의 표면에 부착된 점탄성 물질층을 이용하였다. 외팔보 #1은 압전액추에이터가 강철보의 표면에 직접 부착되었고 외팔보 #2는 능동구속 점탄성 감쇠기를 구성하기 위해 강철보의 표면에 부착된 점탄성물질층 위에 여러개의 소형압전액추에이터를 배열부착되었다. 외팔보 #1은 액추에이터가 강철보내에 최대변형률을 유발하고 1차진동모드를 효과적으로 감쇠시키기 위해 설계되었다. 외팔보 #2는 액추에이터가 부착된 점탄성물질층에 최대전단력을 유발시키기 위해 설계되었다.

각 외팔보의 1차 진동모드를 제어하기 위해 자유단의 각속도를 기준으로 Lyapunov제어이론을 이용한 constant-gain제어기를 이용하였다. 두가지 형태의 감소제어기를 사용해 외팔보의 1차 진동모드를 제어하기 위해 제한제어전압을 바꾸어 가며 외팔보

의 시간응답을 측정하였다. 허용제어전압이 100 V 일 때 유효손실계수는 외팔보 #1의 경우 4배 증가하고 외팔보 #2의 경우 3배 증가하였다. 제어전압이 고압(300~500 V)일때 외팔보 #1의 경우 7~8배 증가하였고, 외팔보 #2의 경우 5~6배 증가하였다. 유효손실계수는 고진폭진동(1.5~1cm)의 경우 변하지 않으나 저진폭진동의 경우 급증한다. 이는 진폭이 감소함에 따라 능동감쇠제어기가 더 많은 퍼센트의 시스템에너지를 소산시키기 때문이다. Lyapunov방법에 기초한 능동제어기는 시스템의 가능한 많은 에너지를 소산시키도록 설계되었다. 반면에 수동제어기는 일정한 퍼센트의 시스템에너지를 소산시키도록 설계되어 저진폭진동시에는 적은 에너지소산이 된다. 압전액추에이터가 표면에 직접 부착된 외팔보 #1이 액추에이터가 점탄성물질층에 부착된 외팔보 #2보다 더 높은 유효손실계수를 나타냈다. 이는 점탄

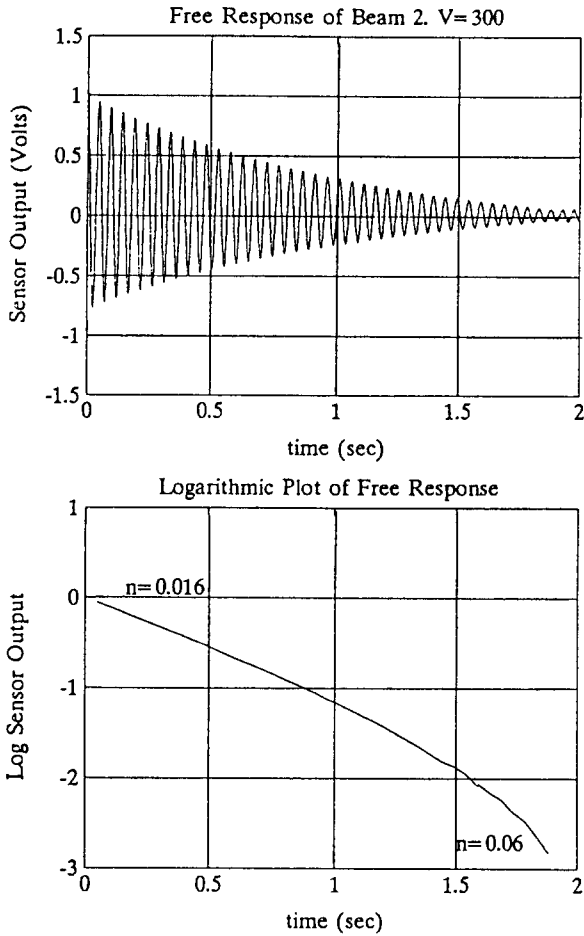


Fig. 15 Forced decay of first mode of beam #1, and logarithmic plot,  $V=300$  volts

성물질 층위에 부착된 압전액추에이터가 외팔보 #1의 경우와 달리 충분한 전단력을 유발하지 못하고 이에 따라 외팔보 #1의 경우와 같은 양의 에너지소산을 시키기 위해 필요한 변형이 일어나지 않았기 때문이다.

본 연구의 결과로 보아 PVDF전압액추에이터를 사용시 고진폭진동의 수동감쇠를 위해서는 점탄성물질을 사용하고 저진폭진동의 능동감쇠를 위해서는 PVDF압전액추에이터를 사용하는 것이 좋다. 또한 PVDF압전액추에이터보다 강렬한 압전액추에이터를 사용하는 것이 효과적일 것이다. 보다 정밀한 압전센서/액추에이터의 해석은 다음 기회로 미룬다.

#### 참고문헌

(1) Kerwin, 1959, "Damping of Flexural Waves by a Constrained Viscoelastic Layer", J. of the Acous-

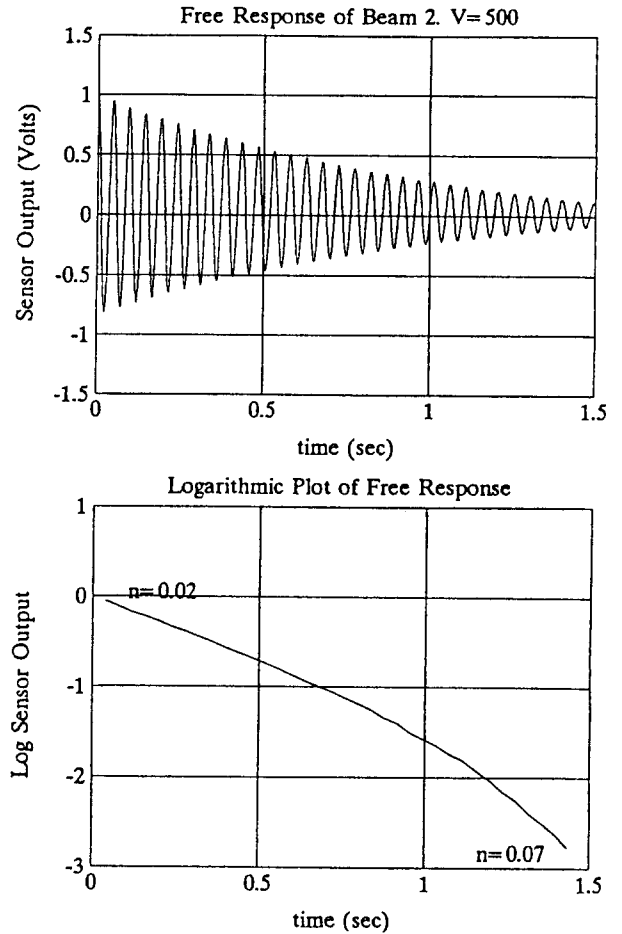


Fig. 16 Forced decay of first mode of beam #2, and logarithmic plot,  $V=500$  volts

tical Society fo America, Vol. 31, pp. 952~962.

(2) Grootenhuis, P., 1970, "The Control of Vibrations with Viscoelastic Materials", Journal of Sound and Vibration, Vol. 11, pp. 421~433.

(3) Ross, D., Ungar, E.E. and Kerwin, E.M., 1969, "Damping of Plate Flexural Vibrations by Means of Viscoelastic Laminae", ASME publ. Structural Damping Section 3.

(4) Nokes, D.N. and Nelson, F.C., 1968, "Constrained Layer Damping with Partial Coverage", The Shock and Vibration Bulletin, Vol. 38, Part 3.

(5) Plunkett, R. and Lee, C.T., 1970, "Length Optimization for Constrained Viscoelastic Layer Damping", Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 48, pp. 150~161.

(6) Bailey, T., 1984, "Distributed Parameter Active Vibration Control of a Cantilever Beam using a

- Distributed Parameter Actuator”, MS/BS Thesis, Department of Mechanical Engineering, MIT.
- (7) Bailey, T. and Hubbard Jr., J.E., 1985, “Distributed Piezoelectric-Polymer Active Vibration of a Cantilever Beam”, Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 8, pp. 605~611.
- (8) Crawley, E.F. and de Luis, J., 1987, “Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures”, AIAA Journal, Vol. 25, pp. 1373~1385.
- (9) Crawley, E.F. and de Luis, J., 1986, “Experimental Verification of Distributed Piezoelectric Actuators for Use in Precision Space Structure”, Proceedings of the 27th AIAA/ASME/ASCE/AHE Structural Dynamics and Material Conference, pp. 116~124.
- (10) Clark, R., Fuller, C.R. and Wicks, A., 1991, “Characterization of Multiple Piezoelectric Actuators for Structural Excitation”, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 90, pp. 346~357.
- (11) 황우석, 박현철, 1993, “유연보의 진동제어를 위한 압전 감지기/작동기 설계”, 한국항공우주학회지, 제21권, 제2호, pp. 26~36.
- (12) 김승환, 최승복, 정재천, 1993, “압전필름을 이용한 외팔보의 능동진동제어”, 한국항공우주학회지, 제21권, 제5호, pp. 76~87.
- (13) 황우석, 황운봉, 한경섭, 박현철, 1993, “압전 재료를이용한 복합재료 보의 능동및 수동제어”, 대한기계학회논문집, 제17권, 제3호, pp. 485~491.
- (14) 최승복, 신호철, 김승환, 1994, “압전필름 작동기및 감지기를 이용한 단일링크 탄성 암의 진동 제어”, 한국항공우주학회지, 제22권, 제3호, pp. 90~99.
- (15) 최승복, 박용근, 서문석, 1993, “전기유동유체를 포함하는 지능외팔보의 진동특성및 제어”, 대한기계학회논문집, 제17권, 제7호, pp. 1649~1657.
- (16) Pennwalt Co., KYNAR Piezo Film Technical Manual, 1987.