

〈논 문〉

압전세라믹 외팔보형 진동센서의 설계 및 제작

Design and Fabrication of Piezoceramic Cantilever Type Vibration Sensors

정 이 봉* · 노 용 래**

Ibong Jung and Yongrae Roh

(1996년 11월 26일 접수 ; 1997년 5월 9일 심사완료)

Key Words : Piezoelectric Ceramics(압전 세라믹), Vibration Sensor(진동 센서), Bimorph Cantilever(이중형 외팔보)

ABSTRACT

A cantilever type piezoceramic vibration sensor was developed that could make up for the shortcomings of current vibration sensors, such as high price, low sensitivity, and complex structure. For the design, in conjunction with piezoelectric constitutive equations, we derived full analytic response equations of the piezoelectric bimorph sensor to external forces. The external forces were supposed to take the form of either step or sinusoidal force. Based on the results, actual piezoelectric vibration sensors were fabricated and tested for verification of the theoretical results. Further, comparison of the performance of the developed sensor was made with that of a commercially available representative vibration sensor so that quantitative evaluation of its sensitivity could be made. The sensor developed in this work showed excellent sensitivity and thermal stability in addition to the merits of simple structure and low fabrication cost in comparison with conventional mass-loaded piezoelectric sensors.

1. 서 론

구조물의 진동을 감지하기 위한 진동센서 중에서 압전세라믹을 이용한 센서는 압전세라믹의 전기-기계 에너지간의 상호변환원리를 직접 이용하므로 전기회로적 변환장치를 요구하는 타 종류의 진동센서들에 비해 반응 속도, 중량, 크기, 출력감도 및 경제성 등에서 보다 우수한 장점을 가지고 있으므로 많이 연구, 실용화되고 있다. 대표적인 예로 압전세라믹에 금속 질량체를 증착시킨 질량체형 가속도센서를 들 수 있다. 그러나 이 센서들은 여전히 그 구조나 규격, 감도면에서 한정되어 있을 뿐만아니라

경제성에서 고가시스템이 아닌한 장착이 불합리한 경우가 많다. 그래서 본 연구에서는 설계나 제작이 간편하고 소형시스템에 직접 장착이 가능한 경제적이고 감도가 우수한 새로운 센서를 개발하고자 한다. 새로운 센서의 구조로는 압전 외팔보형을 채택하였는데, 압전세라믹을 이용한 외팔보는 그 구조의 단순함과 높은 에너지 변환 효율성 때문에 지금까지는 액츄에이터로 대부분 연구되어왔다^(1~3). 그러나 본 연구에서는 압전세라믹 외팔보를 센서의 관점에서 이론적으로 해석하고 그 특성을 분석하여, 요구되는 출력감도와 사용주파수 대역에 맞는 센서를 쉽게 설계하고 제작할 수 있도록 하였다. 본 논문에서 개발하고자 하는 센서에 요구되는 사양은 측정 주파수 범위가 300 Hz까지이고, 최소 5.0 mV/g의 감도를 가져야 한다는 것이다. 센서재료는 압전효율이 우수한 PZT를 사용하였고, 온도보상을 위하여

*경북대학교 센서공학과

**정회원, 경북대학교 전자전기공학부/센서공학과

bimorph형으로 제작하였으며, 감도를 높이기 위하여 전극을 병렬형으로 구현하였다. 센서의 설계를 위해 우선 2장에서는 일정 크기의 외력이 가해졌을 때 압전 bimorph형 외팔보에 나타나는 출력신호의 일반적 해를 압전 구조방정식에 연계하여 유도하였다. 3장에서는 인가되는 외력으로서 가장 일반적인 두 형태인 정현함수와 계단함수의 형태를 설정하여, 이들 외력이 가해졌을 때 외팔보의 진동특성에 따른 변형률을 구하고 이를 2장에서 구한 센서 출력식과 결합하여 외력에 대한 센서의 전체 출력을 구하였다. 4장에서는 유도된 식을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 센서의 시간영역, 주파수영역 반응특성을 알아보고, 이를 이용해 위에서 밝힌 감도와 사용 주파수대역에 맞는 센서의 규격을 결정하였다. 그 결과를 바탕으로 5장에서는 실제 압전 진동센서를 제작, 측정하여 이론적 설계치와 비교해 봄으로써 본 논문에서 유도된 설계식의 타당성을 밝혔다. 나아가 외부의 진동원에 대한 출력감도를 기존의 상용 센서와 비교하고 상온에서 온도의 변화에 대한 안정성을 검증함으로써 본 논문에서 개발된 센서의 우수성을 입증해보고자 하였다.

2. 압전 외팔보의 외력에 대한 일반적 출력특성

통상 압전재료는 초전특성도 동시에 가지고 있어서 외부로 부터의 힘 뿐만 아니라 온도변화에도 반응하여 전하를 발생시키는 특성을 가진다⁽⁴⁾. 그러나 주위의 온도 변화에 의한 출력이 진동에 의한 출력으로 오인이 되는 경우가 나타나면 안되므로, 압전 재료를 진동센서로 사용하기 위해서는 이 온도에 대한 반응특성을 반드시 없애주어야만 하는데, bimorph형 구조는 이러한 온도보상 효과를 가지고 있다⁽⁵⁾. 대개의 경우 외부열원을 수동적으로 차단하여 열 반응을 방지하나 본 연구에서는 bimorph형으로 하여 열원에 대해 상하단에서의 반응이 능동적으로 상쇄되도록 하였다. 또한 압전 bimorph의 전극 연결 형태에는 직렬형과 병렬형이 있는데, 센서 출력의 측정형태가 전하형일 경우 통상 병렬형이 직렬형에 비해 2배의 감도를 가진다고 알려져 있다⁽⁵⁾. 따라서 본 논문에서 개발하고자 하는 압전 진동센서는 온도 보상과 고감도 구현을 위하여 병렬형 bimorph형태를 취하도록 하였다. Fig. 1은 병렬형 bimorph 외팔보의 일반적 구조를 나타낸다.

이상의 기본 구조를 바탕으로 PZT bimorph 외팔보의 전기적 출력특성을 알아보기 위해 Fig. 2에서와

같이 외팔보의 자유단에 힘 P 가 가해지는 경우를 알아보았다. 힘 P 에 따라 외팔보는 일정량의 처짐을 갖고, 이 처짐은 압전 물질 내에 변형을 야기하여 전압을 발생시킨다. 이 전압의 크기는 압전물질의 종류, 가공 방향, 변형의 크기 및 외팔보의 규격에 따른다. 출력 전압을 구하기 위해서는 변형된 재질 내에서의 변형률 분포를 알아야 하고, 이 변형률을 압전 센서방정식에 연계함으로써 발생하는 전기를 구할 수 있고, 나아가 이를 소자 전면에 대하여 적분함으로써 전체 발생 전압을 구할 수 있다. Fig. 2의 외팔보에서 임의의 진동에 대한 변위 $z(x, t)$ 가 구해지면 전체 두께가 H 인 외팔보의 상단 압전소자의 중심 즉 외팔보의 중심면에서 $H/4$ 떨어진 각 지점에서 발생하는 변형률 $s(x, t)$ 는 식 (1)과 같이 얻어진다⁽⁶⁾. 여기서 상단 압전소자의 중심에서의 변형률을 구한 것은, 외팔보의 중심에서 상단 소자의 표면 즉 $H/2$ 지점에 이르는 동안 변형률은 선형적으로 변하므로 상단 소자 전체에서 발생하는 변형률은 이 $H/4$ 점에서의 변형률로 평균하여 해석할

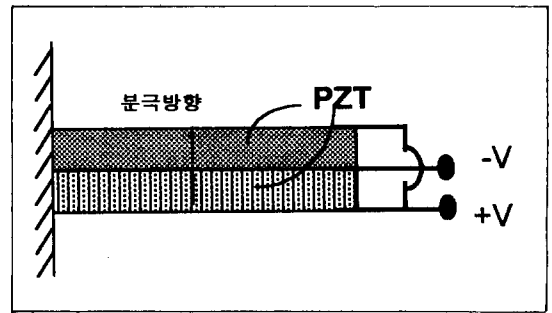


Fig. 1 Schematic structure of the piezoelectric parallel bimorph cantilever

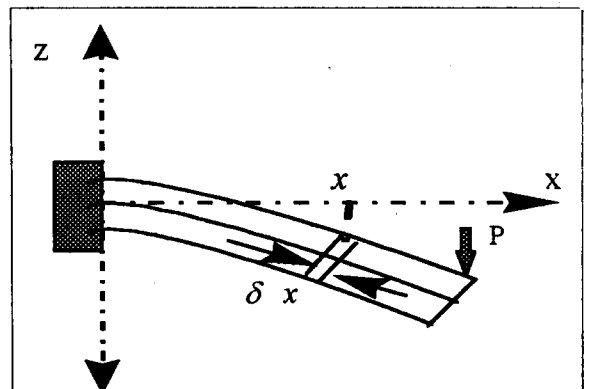


Fig. 2 Deformation of the piezoelectric bimorph cantilever with a static force at its free end

수 있기 때문이다.

$$s(x, t) = \frac{H}{4R(x, t)} \quad (1)$$

식 (1)에서 Z축 방향의 변위가 작으면 외팔보 중의 임의의 x지점에서의 곡률반경 R(x, t)는 다음과 같이 구해진다⁽⁷⁾.

$$R(x, t) = \left[\frac{d^2 z(x, t)}{dx^2} \right]^{-1} \quad (2)$$

외력 P에 의해 압전소자에 발생된 변형률 s(x, t)은 식 (3)의 압전 구조방정식에 의해 s(x, t)에 비례하는 Z축 방향의 전기장 E₃을 발생시킨다⁽⁸⁾.

$$E_3(x) = h_{31}s(x, t) \quad (3)$$

여기서 h₃₁은 X축 방향의 변형에 따라 Z축 방향으로 전기장을 발생토록 하는 압전상수이다. 그러므로 외력에 의해 상단 압전소자의 임의의 x지점에서 발생하는 전압은 식 (1), (2)와 (3)으로부터 식 (4)와 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} V(x, t) &= \frac{H}{2} \cdot E_3(x, t) = \frac{H}{2} \cdot h_{31} \frac{H}{4R(x, t)} \\ &= h_{31} \frac{H^2}{8} \cdot \frac{d^2 z(x, t)}{dx^2} \end{aligned} \quad (4)$$

그런데 압전소자의 전후면에는 전극이 깔려 있어서 실제로 측정되는 전압은 식 (4)에 나타나는 전압의 압전소자 면적 전체에 대한 평균값으로 나타나므로, 병렬형 bimorph의 최종 출력전압 V_r는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_r(x, t) &= \frac{\int_0^W \int_0^L V(x, t) dx dy}{A} \\ &= \frac{h_{31}WH^2}{8WL} \int_0^L \frac{d^2 z(x, t)}{dx^2} dx \\ &= \frac{h_{31}H^2}{8L} \left[\frac{dz(x, t)}{dx} \Big|_{x=L} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

단, W : 외팔보의 폭

L : 외팔보의 길이

A : 압전소자의 면적

ε₃₃ : Z축 방향의 유전계수

식 (5)는 외력에 의해 압전 외팔보에 나타나는 자유단의 변위 z(x, t)만 알면, 센서에서 발생하는 출력전압을 바로 알 수 있도록 하는 것으로서, 다음 장에서 실제적인 하중형태에 대해서 z(x, t)를 구한 후 그에 따른 V_r값의 구체적인 식을 유도한다.

3. 압전 외팔보센서의 이론적 진동 응답특성

Fig. 1에 나타난 센서가 실제 진동측정에 사용되는 경우를 알아보면, 외팔보의 자유단에 외력이 직접 가해지는 경우는 없을 것이다. 실제적인 경우는 Fig. 1의 센서가 밀폐된 용기내에 밀봉된 상태에서 측정 대상 구조물에 부착되어, 그 구조물의 진동력이 센서의 지지단을 통해 외팔보로 전달되는 형태가 될 것이다. 진동센서가 부착된 구조물 즉 센서의 지지부가 변위 u(t)를 가지고 움직인다면 소자내의 각 질점은 그 반대방향으로 반력을 가진다. 즉 외팔보의 지지부가 변위를 가지고 움직이는 상황은 이를 역으로 보면 지지대는 고정된 채로 있는 상태에서 외팔보의 전면에 일정량의 외력이 가해지고 있는 시스템으로 등가화 할 수 있을 것이다⁽⁹⁾. 등가 시스템을 구하기 위해서 외팔보 내의 임의의 x지점에서의 변위를 z(x, t) + u(t)로 두고 이를 외팔보의 자유 진동방정식에 대입하면 식 (6)이 얻어진다⁽¹⁰⁾.

$$c^2 \frac{\partial^4 z(x, t)}{\partial x^4} + \frac{\partial^2 z(x, t)}{\partial t^2} = - \frac{\partial^2 u(t)}{\partial t^2} \quad (6)$$

단, c = √(YI/ρWH), Y : 영률

I : 관성 모멘트, ρ : 밀도

식 (6)은 외팔보의 일반적인 강제응답 방정식과 동일한 형태의 식임을 알 수 있고, 우변은 단위 질량에 가해지는 외력 즉 가속도를 나타낸다. 즉, 외팔보의 지지단에 외부로부터 u(t)라는 변위가 가해지는 경우는, 마치 지지단은 고정되어 있고 외팔보의 각 질점에 ∂²u(t)/∂t²라는 크기의 가속도가 가해지는 경우와 같다고 둘 수 있는 것이다. 본 연구에서 사용한 외부 가진 즉 u(t)의 종류로는 정현함수와 계단함수를 설정하였다. 이들 두 함수는 실제상황에서 가장 많이 나타나는 진동신호로서 시스템의 시간응답과 주파수응답 등 성능평가에 많이 사용되는 것들이며, 여타 다른 진동형태들은 이들 두 경우들을 적절히 조합하면 대부분 구현가능하기 때문이다.

3.1 외팔보 지지단이 U₀(1-e^{-t/τ})의 변위로 가진될 때

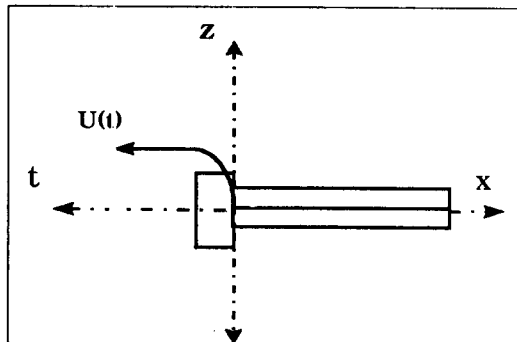
Fig. 3에서 보는 바와 같이 센서 지지단의 변위가 지수함수로 증가하여 일정값에 이르는 U₀(1-e^{-t/τ})의 형태의 외력을 가했을 때의 외팔보의 응답을 살펴본다. 여기서 U₀는 진폭의 초기상수이다. 시상수 τ값이 클수록 지지부의 변위는 계단함수에 가까워질

것이다. 이 경우에 대하여 식 (6)의 진동방정식을 쓰면 다음과 같다.

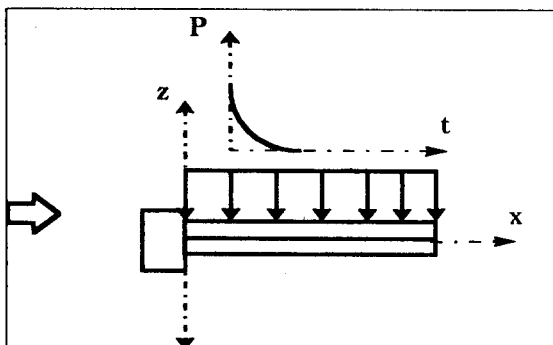
$$c^2 \frac{\partial^4 z(x, t)}{\partial x^4} + \frac{\partial^2 z(x, t)}{\partial t^2} = -\frac{\partial^2}{\partial t^2} U_0(1 - e^{-\tau t}) = U_0 \tau^2 e^{-\tau t} \quad (7)$$

즉, 외팔보 지지단에 $U_0(1 - e^{-\tau t})$ 형태의 변위가 가해지는 경우는, 지지단은 고정되고 대신에 Fig. 3(b)에 나타낸 바와 같이 외팔보의 각 질점에 $U_0 \tau^2 e^{-\tau t}$ 형태의 힘이 가해지는 경우와 같음을 알 수 있다. 이 식에 대한 강제응답 $z_p(x, t)$ 는 외팔보의 고유진동함수 $\Phi_n(x)$ 와 강제함수에 관계된 시간함수 $q_n(t)$ 와의 곱을 모든 모드에 대하여 선형 중첩한 형태가 된다⁽⁹⁾. 즉,

$$z_p(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_n(x) q_n(t) \quad (8)$$



(a) Step displacement of the support of the sensor. $U(t)$ means the displacement of the support



(b) Equivalent force model to the support displacement $U(t)$. P means the equivalent distributed force to the bimorph cantilever caused by the $U(t)$

Fig. 3 Equivalent force model of the cantilever vibration excited by the step displacement of its support

가 되며, 여기서

$$\Phi_n(x) = C_{1n} [(\cos \beta_n x - \cosh \beta_n x) - K_m (\sin \beta_n x - \sinh \beta_n x)]$$

단, C_{1n} =상수,

$$K_m = \frac{\cos \beta_n L + \cosh \beta_n L}{\sin \beta_n L + \sinh \beta_n L} \text{ 이고,}$$

$\beta_n L$ 은 $\cos \beta_n L \cosh \beta_n L = -1$ 을 만족하는 값임.

시스템에 외력 P_n 가 가해진 경우의 응답 $q_n(t)$ 는 입력 P_n 과 시스템의 전달함수 $h(t)$ 의 Convolution 이 된다. 즉,

$$q_n(t) = P_n * h(t) = \int_0^t P_n(t-r) h(t) dr = -\frac{UC_{1n}}{m_{nn}\beta_n\omega_n} [\sin \beta_n L - \sinh \beta_n L + K_m (\cos \beta_n L + \cosh \beta_n L) - 2K_m] \times \frac{r \sin \omega_n t - \omega_n \cos \omega_n t + \omega_n e^{-\tau t}}{\tau^2 + \omega_n^2} \quad (9)$$

여기서 $h(t) = \frac{1}{m_{nn}\omega_n} \sin \omega_n t (t > 0)$,

$$m_{nn} = \int_0^L \Phi_n^2(x) dx = \frac{L}{2} (\text{정규화} : C_{1n} = 0.707),$$

$$P_n = \int_0^L U e^{-\tau t} \Phi_n(x) dx,$$

$$\omega_n = \beta_n L^2 \left(\frac{YI}{\rho A L^4} \right)^{1/2}$$

따라서 지지부가 $U_0(1 - e^{-\tau t})$ 의 변위를 가지고 운동할 때 bimorph 진동센서에 의해 발생하는 등가 전압은 식 (5), (8), (9)에 의해서 다음과 같이 구해진다.

$$V_r = \frac{h_{31} H^2}{8L} \sum_{n=1}^{\infty} C_{1n}^2 [-(\sin \beta_n L + \sinh \beta_n L) - K_m (\cos \beta_n L - \cosh \beta_n L)] \times \frac{U}{m_{nn}\beta_n\omega_n} [\sin \beta_n L - \sinh \beta_n L + K_m (\cos \beta_n L + \cosh \beta_n L) - 2K_m] \times \frac{r \sin \omega_n t - \omega_n \cos \omega_n t + e^{-\tau t} \omega_n}{\tau^2 + \omega_n^2} \quad (10)$$

식 (10)은 외부에서 외팔보의 지지부에 인가되는 계단함수 형태의 초기값 U_0 와 시상수 τ 만 알면 주어진 외팔보 규격에 따른 센서의 출력전압을 바로 계산해 낼 수 있는 식이다.

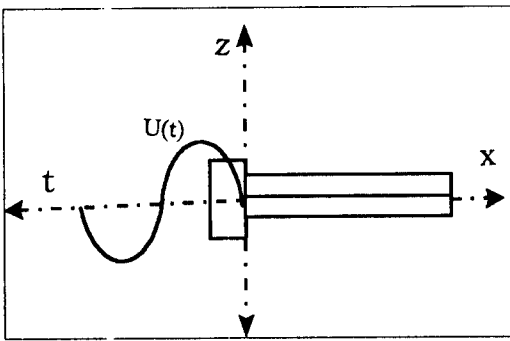
3.2 외팔보 지지단이 $U_0 \sin \omega t$ 의 변위로 가질 때 Fig. 4는 외팔보의 지지부가 $U_0 \sin \omega t$ 의 사인함수

형태의 변위를 가지며 움직일 때의 등가 모델을 나타낸다. 이 경우 앞 절에서와 같은 방법으로 식 (6), (7)의 과정에 의해서 식 (11)와 같은 지배방정식을 얻을 수 있다.

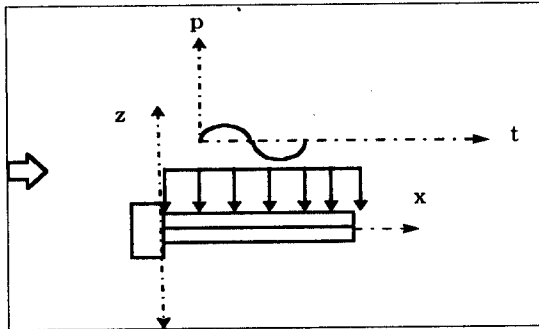
$$c^2 \frac{\partial^4 z(x, t)}{\partial x^4} + \frac{z^2 z(x, t)}{\partial t^2} = U_0 \omega^2 \sin \omega t \quad (11)$$

즉 지지부에 $U_0 \sin \omega t$ 의 변위가 가해지는 경우는, 지지부는 고정되고 대신에 외팔보의 각 질점에 $U_0 \omega^2 \sin \omega t$ 형태의 힘이 가해지는 경우와 같음을 알 수 있다. 3.1절에서와 동일한 과정을 거치면 다음과 같은 센서 출력전압을 구할 수 있다.

$$V_T = \frac{h_{31} H^2}{8L} \sum_{n=1}^{\infty} C_{1n} \beta_n [-(\sin \beta_n L + \sinh \beta_n L) - K_m (\cos \beta_n L - \cosh \beta_n L)]$$



(a) Sinusoidal displacement of the support of the sensor. $U(t)$ means the displacement of the support



(b) Equivalent force model to the support displacement $U(t)$. P means the equivalent distributed force to the bimorph cantilever caused by the $U(t)$

Fig. 4 Equivalent force model of the cantilever vibration excited by the sinusoidal displacement of its support

$$\begin{aligned} & \times \frac{2UC_{1n}}{L\beta_n\omega_n} [\sin \beta_n L - \sinh \beta_n L \\ & + K_m (\cos \beta_n L + \cosh \beta_n L) - 2K_m] \\ & \times [\sin \omega_n t \left[\frac{1 - \cos(\omega - \omega_n)t}{2(\omega - \omega_n)} + \frac{1 - \cos(\omega + \omega_n)t}{2(\omega + \omega_n)} \right] \\ & - \cos \omega_n t \left[\frac{\sin(\omega - \omega_n)t}{2(\omega - \omega_n)} - \frac{\sin(\omega + \omega_n)t}{2(\omega + \omega_n)} \right]] \quad (12) \end{aligned}$$

식 (12)는 외부에서 외팔보의 지지부에 인가되는 정현파함수 형태의 초기값 U_0 와 가진주파수 ω 만 알면 주어진 외팔보 규격에 따른 센서의 출력전압을 바로 계산해낼 수 있는 식이다.

4. 센서구조 설계

이상에서 유도한 식 (10)과 (12)는 각 가진상태에 따라 가진 초기조건과 센서의 규격만 알면 바로 센서의 출력전압을 알아낼 수 있는 식들이다. 따라서 본 장에서는 이 식들을 바탕으로 계단함수와 정현함수 형태의 진동이 외부에서 가해질 경우에 주어진 사양을 만족시킬 수 있는 외팔보의 규격을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 도출하였다. 여기서 외팔보의 규격이란 길이 L 과 두께 H 이다. 외팔보의 폭 W 는 센서의 반응특성에 직접적인 영향은 미치지 않으므로 편의상 임의의 값으로 설정하였다. 요구되는 사양은 측정 주파수 범위가 300 Hz까지이고, 최소 5.0 mV/g의 감도를 가져야 한다는 것이다. 우선 센서규격의 결정을 위해 각 규격인자들에 따른 응답특성의 변화를 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 알아보았다. 계산에 사용된 압전소자의 물성과 실험 조건은 Table 1에 나타나 있고 사용된 모드는 열변체까지로 한정하였다⁽¹¹⁾. Table 1에서 시상수 값은 임의로 정한 값인데 클수록 실제 계단 함수에 가까워질 것이다. 계산에서는 3.1절에서 설명한 고정단의 변위를

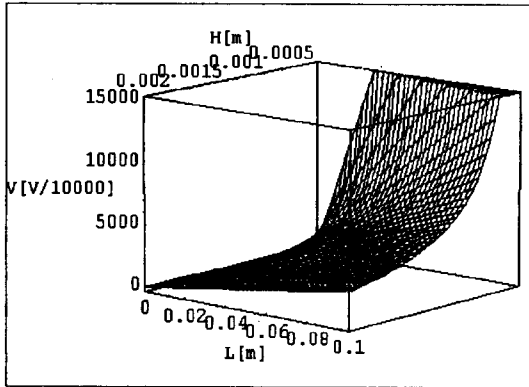
Table 1 Material properties of the bimorph cantilever type vibration sensor

Piezoelectric material	PZT5H
ϵ_{33} (permittivity)	$3400 * 8.854 * 10^{-12} [F/m]$
h_{31} (piezoelectric constant)	$-2.1592 * 10^8 [C/F \cdot m]$
ρ (density)	$7500 [kg/m^3]$
C (capacitance)	$3.01036 * 10^{-9} [F]$
Y (Young's modulus)	$7.584 * 10^{10} [N/m^2]$
τ (time constant)	$15000 [sec^{-1}]$

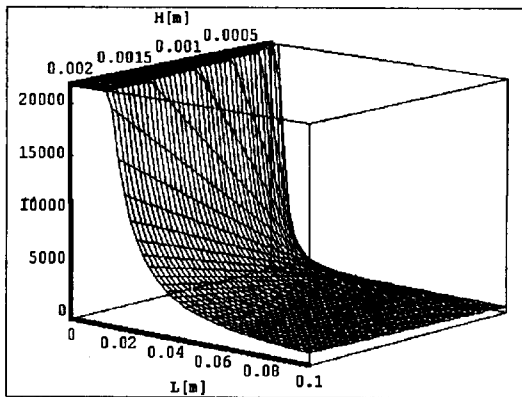
0.01로 설정하여 가한 경우의 출력 특성을 알아보았다.

진동센서의 특성을 평가함에 있어서 통상 가장 중요시되는 두가지 항목은 최대 감도와 작동 주파수대역이다. 넓은 주파수대역에 걸쳐 높은 감도특성을 나타내는 것이 바람직할 것이나 실제로는 이들 두 특성이 서로 양립하는 경우가 많아서 최대의 성능을 얻기 위해서는 센서구조의 신중한 선택이 필요하다. 따라서 우선 전체적인 경향을 파악하기 위해서 Fig. 5(a)에서는 센서의 두께 H 와 길이 L 을 변수로 하여 식 (10)에 의한 출력특성의 변화를 보았다. 두께가 얇을수록 그리고 길이가 길수록 감도가 증가하는 경향을 나타내었다. 감도는 높을수록 좋을 것이다. 그러나 이런 방법으로 구조를 변경할 경우 감도는 증가하나 구조적으로 충격에 견디는 힘은 반대로 감

소하므로 적정선에서 두께와 길이를 결정하여야 한다. Fig. 5(b)에서는 식 (9)에 의해서 두께와 길이 변화에 따른 기본 공진주파수의 변화를 알아보았다. 그림에서와 같이 기본 공진주파수는 길이가 짧을수록, 두께가 클수록 높아진다. 이는 감도특성과 서로 상반된 특성으로서, 감도와 기본 공진모드간에 적정선에서 센서규격이 결정되어야 함을 알 수 있다. 일반적으로 진동센서의 사용 주파수대역은 센서의 주파수응답 특성곡선에서 평탄대역내로 국한시켜야 하는데, 그런 점에서 최대 사용 주파수값은 기본 공진주파수의 40~50% 선에서 결정함이 통례이다⁽¹²⁾. 따라서 주어진 사양의 최대 사용 주파수값이 300 Hz 이므로 Fig. 5(b)에서 L 과 H 는 기본 공진주파수가 최소한 800 Hz는 되도록 설정하여야 하되, 고감도를 위해 가능한 한 L 은 길게, 그리고 H 는 작게 설정하여야 할 것이다. 이상의 결과를 바탕으로 외팔보의 규격은 Table 2에 나타낸 바와 같이 결정하였다. 이 규격들을 채택한 센서의 구체적인 반응특성들은 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)는 Table 2의 규격을 식 (10)에 대입하여 구한 계단파 가진에 대한 응답특성을 보이는데, 초기 출력전압이 -10 V에 이른다. 그림에서 보이는 감쇠현상은 5장에서 설명하는 실제 규격으로 제작된 센서에 대한 측정치로부터 근사화하여서 식 (10)에 부가하여 계산한 것이다⁽⁹⁾. Fig. 6(b)는 센서지지부에 300 Hz의 사인파가 가진될 때의 응답특성이다. 출력전압의 크기는 peak to peak 가 약 6 V에 이른다. 이상의 출력결과들은 감도가 5 mV/g 이상이라야 한다는 요구사항을 충분히 만족시키는 것으로 추정되나, 현재로서는 가진력을 가속도 g 값으로 입력한 것이 아니라서 정확한 정량화가 아직은 어렵다. 따라서 감도의 정량적 평가는 5장에서 감도를 이미 아는 기준 센서와의 성능비교를 수행함으로써 하기로 한다. Fig. 6(c)는 주파수 변화에 따른 응답특성을 보여준다. 기본공진주파수는 약 850 Hz로 나타나고, 사용대역인 300 Hz까지는 상당히 평탄한 반응특성을 보이는 것으로 나타났다. 이는 사용대역이 300 Hz까지라야 한다는 요구조건을 만족시키는 결과이다.



(a) Output voltage vs. length L and height H of the cantilever

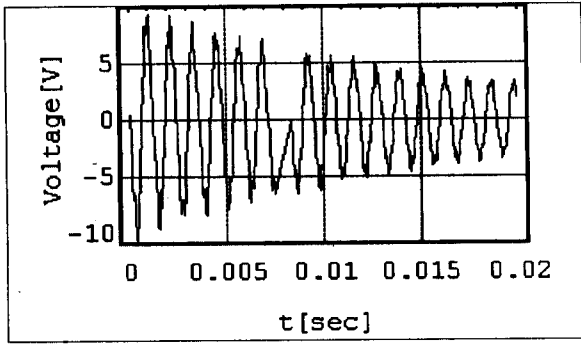


(b) Fundamental resonance frequency vs. length L and height H of the cantilever

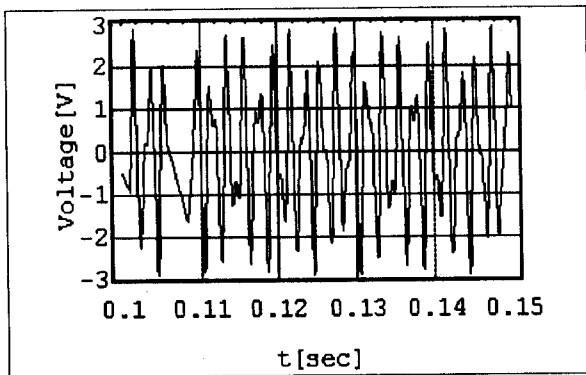
Fig. 5 Variation of response characteristics with dimensional change of the piezoelectric cantilever

Table 2 Dimension of the piezoelectric bimorph cantilever beam

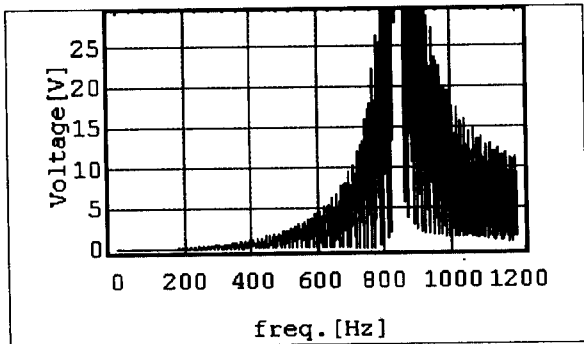
H (height)	$0.8 * 10^{-3}$ [m]
L (length)	$22 * 10^{-3}$ [m]
W (width)	$4 * 10^{-3}$ [m]



(a) Output voltage with the step displacement of the support



(b) Output voltage with the sinusoidal displacement of the support



(c) Frequency response spectrum of the sensor with the sinusoidal displacement of the support

Fig. 6 Theoretically calculated voltage output and frequency response of the piezoelectric sensor

5. 센서의 제작 및 성능평가

이상의 이론적인 해석을 바탕으로 실제 센서를 제작하여 이론의 타당성을 검증하였다. 진동센서를 제

작하기 위하여 먼저 두께 0.4 mm의 PZT 5 H 압전 세라믹 박편을 제작하였다. 전극은 전기전도도가 우수한 Silver Paste를 후막처리하여 성형하였다. 분극은 PZT시편을 Jig에 고정시킨 후 120°C의 실리콘 오일 속에 담근 후 1.2 kV의 전압을 30분간 가하여 실시하였다. 분극이 형성된 PZT는 26×4 mm의 규격으로 절단했다. 절단된 두 개의 소자를 Fig. 7에서와 같이 분극방향을 나란하게 한 후 0.05 mm의 동판을 지지부에 삽입하여 중간전극 역할을 하도록 하고, 소자간은 Silver Paste로 접착하였다. 지지부는 알루미늄 기판을 4×4 mm의 규격으로 절단하여 사용했다. 케이스는 외부 전자기파에 의한 잡음방지를 위해서 0.5 mm의 동판으로 제작하였다. Fig. 7은 제작된 진동센서의 구조를 보여준다.

제작된 센서를 사용해 4장에서 설정한 상황을 실험적으로 재현해 그 결과를 계산치와 비교해 보았다. Fig. 8(a)는 측정장치를 보여준다. 오실로스코프의 입력 임피던스 Z_i 는 1 MΩ으로 하였고 소자의 내부 임피던스는 300 Hz에서 10 MΩ으로 측정되었다. 따라서 관찰되는 센서의 출력전압은 오실로스코프와 압전소자간의 전압분배비에 의해서 실제 센서에 의한 발생전압의 약 1/11이 측정될 것이다. Fig. 8(b)는 측정실험을 통해 구한 외팔보형 압전센서의 단위 계단함수 가진시의 시간응답을 보여주고 Fig. 8(c)는 300 Hz 사인함수 가진시의 시간응답을 보여준다. Fig. 8(d)는 인가된 사인함수의 주파수의 변화에 따른 진동센서의 응답을 보여주는 것으로서, 센서의 주파수 응답특성을 나타낸다. 이상의 실험 결과를 Fig. 6의 이론치와 각각 비교해 보면 출력 전압의 이론치와 실험치의 비가 약 10 : 1로 됨을 알 수 있다. 예측했던대로 센서소자와 오실로스코프 간의 임피던

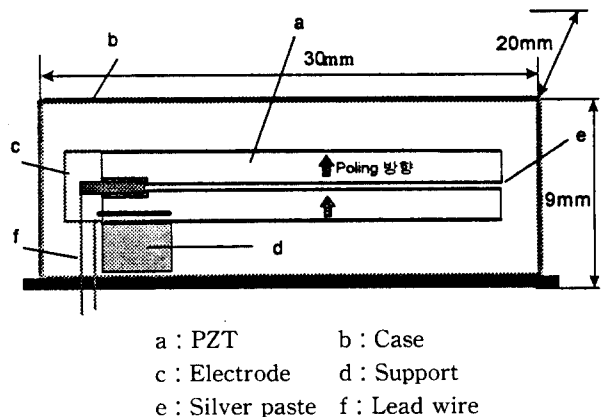


Fig. 7 Fabricated structure of the bimorph cantilever type vibration sensor (parallel type)

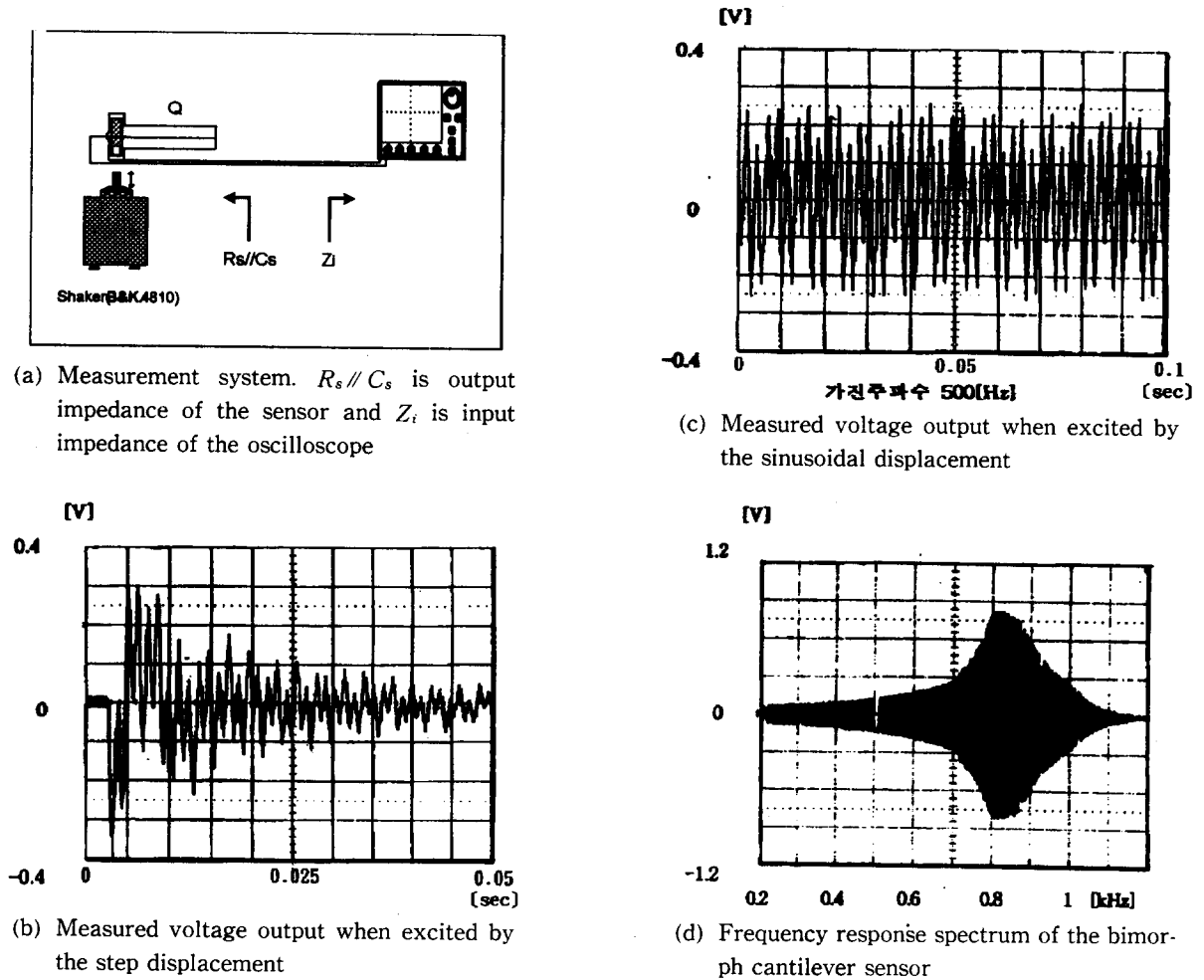
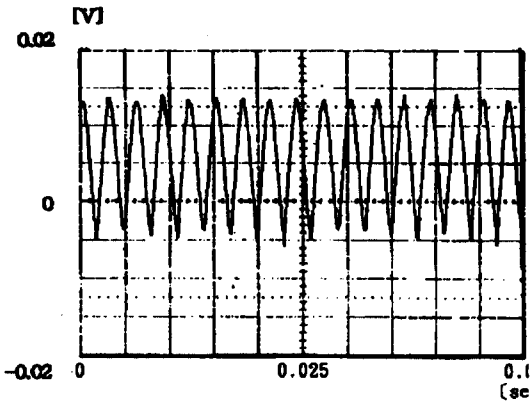


Fig. 8 Experimental setup and measured responses of the piezoelectric bimorph cantilever sensor

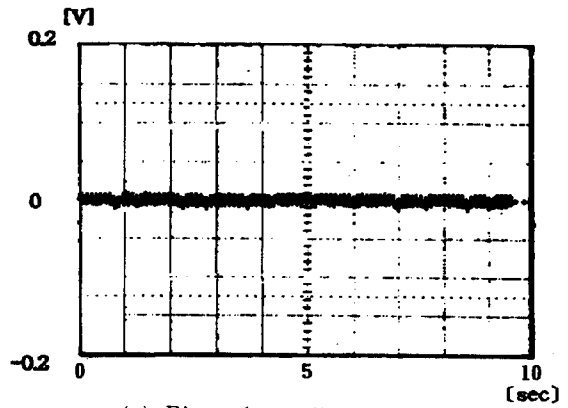
스 크기 차이에 의한 전압 분배율에 의한 것으로서 이론치와 잘 일치함을 알 수 있다. 주파수 응답의 경우에는 기본공진주파수가 약 820 Hz로서, 300 Hz까지는 상당히 평탄한 반응특성을 보인다. 기본 공진주파수는 이론치와 3% 정도의 오차를 가지며 일치하는데 이는 센서재료 물성의 불균일에서 오는 오차로 추측된다. 따라서 이상의 결과로부터 이론적으로 유도한 bimorph형 진동센서 반응식의 타당성이 실험적으로 입증된 것이라 할 수 있다.

다음으로 이렇게 제작된 외팔보형 압전 진동센서의 상대적 성능평가와 감도의 정량적 평가를 위하여 Table 1과 2에 주어진 규격에 따라 제작된 센서의 출력률 기존의 질량체형 압전 가속도센서와 비교해 보았다. 가진신호는 Fig. 8(a)에 나타난대로 B & K 4810 가진기를 사용하여 피크치가 일정한 300 Hz 사인파로 가진하였고, 측정 오실로스코프의 입력 임피

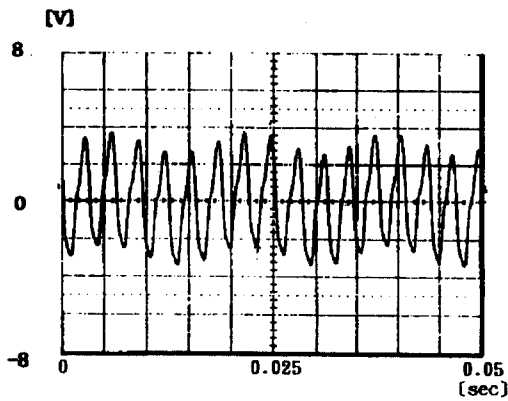
던스는 1 MΩ으로 통일하였다. 비교 센서로는 전형적인 질량체형 압전 가속도센서의 구조를 가지며, 실험에 사용된 가진기에 대하여 센서 자체에 의한 질량인가 효과를 주지않도록 최소의 크기를 가지며, 우수한 감도를 가지는 종류로서 B & K 4375를 택하였다. 그 결과는 Fig. 9에 나타나 있으며, 동일한 조건하에서 본 연구를 통해 개발된 센서는 peak to peak 출력치가 약 6 V로 나타남으로서 기준 센서로 삼은 B & K 4375 진동센서의 약 0.02 V에 비해 약 300배 정도의 감도를 보였다. 제작사측에서 제시하는 B & K 4375 진동센서의 가속도 감도는 0.48 mV/g이므로, 이 결과는 곧 본 논문에서 개발한 진동센서는 약 140 mV/g의 감도를 가짐을 뜻한다. 일반적으로 질량체형 압전 가속도 센서는 저감도로 인해 실제 사용할 때 전하 증폭기를 사용해야 되는 경우가 많다는 점을 고려하면, 이 정도의 감도 증대는



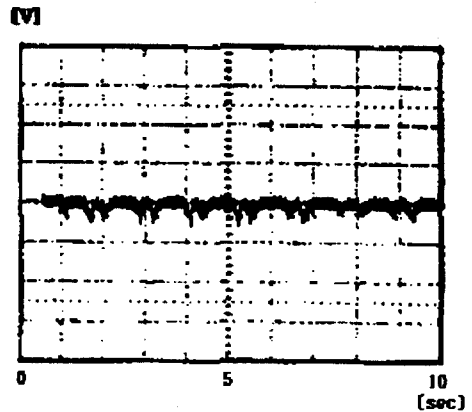
(a) B & K 4375 accelerometer



(a) Bimorph cantilever sensor



(b) Bimorph cantilever sensor



(b) Unimorph cantilever sensor

Fig. 9 Comparison of voltage outputs of the piezoelectric vibration sensors

Fig. 10 Comparison of thermal stability of the piezoelectric cantilever sensors

실제 시스템에 적용시 증폭단 회로 구성을 단순화하거나 아예 없앨 수 있다는 것을 뜻하고, 따라서 센서 가격의 큰 하락이 가능함을 의미한다⁽¹²⁾.

다음으로 본 연구에 사용된 압전재료인 PZT는 주위 온도의 변화에 대해서도 반응하여 전하를 발생시키는 초전특성도 동시에 가지고 있는데, 이러한 특성은 압전재료를 이용해 진동센서를 개발함에 있어서 특히 유의해야할 부분이다. 정확한 진동 측정을 위해서는 이 온도에 의한 영향을 반드시 보상해주어야만 하고, 따라서 본 연구에서 외팔보의 구조를 bimorph로 취한 이유이기도 하다. Fig. 10은 외부 열원에 대한 이 보상효과를 보인 것이다. Fig. 10(a)는 Fig. 7에 나타난 본 연구에서 제작한 bimorph 형태의 외팔보 센서의 출력으로서 온도보상이 된 상태에서의 출력이고, Fig. 10(b)는 Fig. 7의 두 개의 압전 박편 중 상부 박편 하나만을 진동센서로 사용한 unimorph 외팔보 센서의 출력으로서 온도보상이 안

된 상태에서의 출력이다. 외부 열원으로는 적외선광을 주기적으로 센서에 주사함으로써 온도변화를 야기시켰다. 적외선광은 상온(15°C)에서 150 W 할로겐 램프를 1m 거리에서 약 1초 간격으로 순간 조사하였다. Fig. 10(b)에 나타나는 피크신호는 외부 적외선광에 의해 가해지는 열반응 전하를 뜻한다. 보상이 안된 unimorph에 비해 bimorph형으로 보상된 센서의 반응은 외부 열원에 대해 매우 안정된 특성을 보인다.

이상의 실험결과로부터 앞장에서 유도한 압전 bimorph 외팔보형 진동센서의 출력식의 타당성을 확인하였고, 본 연구에서 개발된 센서는 주어진 사양을 만족시킴을 알 수 있었다. 특히 본 센서에서 채택한 bimorph형 구조는 뛰어난 온도 보상효과를 가짐과 동시에 감도면에서 기존 상용 질량체형 진동센서에 비해 약 300배의 고감도를 나타냄을 확인하였다.

6. 결 론

본 연구에서는 기존의 진동 센서들이 가지고 있는 고가, 저감도, 복잡한 구조 등의 단점을 보완할 수 있는 압전세라믹을 이용한 외팔보형 진동센서를 개발하였다. 센서의 설계를 위하여 압전세라믹의 구조 방정식과 연계하여 이중형 압전 외팔보의 외력에 대한 반응특성을 해석하고, 이에 의해 센서출력의 정밀해를 구하였다. 인가되는 외력으로는 정현함수와 계단함수의 형태를 설정하였으며, 센서의 반응으로는 전압 출력특성 및 주파수 응답특성을 알아보았다. 설계결과를 바탕으로 압전세라믹 PZT를 이용한 bimorph 외팔보형 진동센서를 직접 제작하고 그 실험적 데이터를 설계치와 비교하여 이론식의 타당성을 검증하였다. 개발된 진동센서는 사용대역 300 Hz, 감도 0.5 mV/g라는 주어진 사양을 충분히 만족시키며, 종래의 질량체형 압전센서에 비해 간단한 구조와 저가라는 장점들 외에도, 높은 감도와 온도 안정성 등의 특성을 가진다. 본 연구에서 유도한 출력식은 원하는 감도와 주파수 대역에 맞는 다양한 사양의 bimorph 외팔보형 진동센서를 설계할 수 있게 하고, 제작된 센서는 이상의 장점들에 의해 기존의 센서로는 장착이 불합리한 시스템에도 적용이 용이할 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) Ballato, A., and Smits, J. G., 1991, "Network Representation for Piezoelectric Bimorphs," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol. 38, pp. 595~602.
- (2) Smits, J. G., and Ballato, A., 1994, "Dynamic Admittance Matrix of Piezoelectric Cantilever Bimorphs," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 3, pp. 105~111.
- (3) Smits, J. G., 1991 "The Effectiveness of a Piezoelectric Bimorph to Perform Mechanical Work against Various Spring-Type Loads," *Ferroelectrics*, Vol. 120, pp. 241~252.
- (4) Nye, J. F., 1986, *Physical Properties of Crystals*, Oxford University Press, New York.
- (5) Toda, M., 1978, "Design of Piezoelectric Polymer Motional Devices with Various Structures," *The Transactions of IECE of Japan*, Vol. 61, pp. 513~518.
- (6) Morse, P. M., and Ingard, K. U., *Theoretical Acoustics*, McGraw-Hill, New York.
- (7) Tse, F. S., Morse, I. E., and Hinkle, R. T., 1978, *Mechanical Vibrations*, Allyn and Bacon, Inc., Boston.
- (8) Moulson, A. J., and Herbert, J. M., 1993, *Electroceramics*, Chapman & Hall, London.
- (9) Rao, S. S., 1990, *Mechanical Vibrations*, Addison Wesley, New York.
- (10) Logan, D. L., 1991, *Mechanics of Materials*, HarperCollins, New York.
- (11) Vernitron Co., 1991, *Modern Piezoelectric Ceramics-Catalogue of Vernitron Co.*, Cleveland.
- (12) Norton, M. P., 1989, *Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers*, Cambridge University Press, Cambridge.