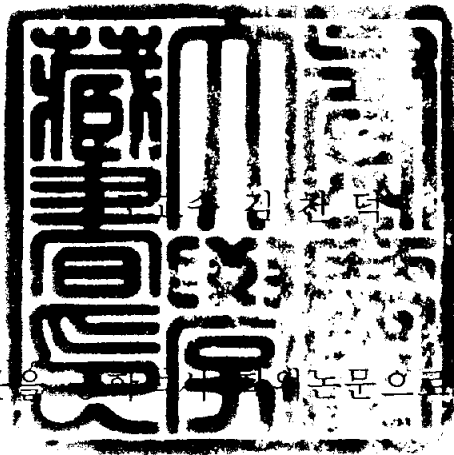


공학석사 학위논문

압전 트랜스듀서를 이용한
능동 제진법에 관한 연구



이 논문을 학위논문으로 제출함

2003년 2월

부경대학교 대학원

음향진동공학 협동과정

강 성 학

강성학의 공학석사 학위논문을 인준함

2002 년 12월 26일

주 심 공학박사 김 무 준



위 원 공학박사 하 강 렬



위 원 공학박사 김 천 덕



목 차

Abstract	1
1. 서론	3
2. 이론	5
2-1. 주파수 가변 압전 트랜스듀서	5
2-2 GIC에 의한 전자 인덕턴스	19
3. 실험 및 결과	24
3-1. 전자 인덕턴스의 제작 및 특성결과	24
3-2. 주파수 가변 압전 트랜스듀서의 제작 및 가변 특성	30
3-3. 제진 실험 및 결과	36
4. 결론	41
참고문헌	42

Study of active vibration control method using piezoelectric transducer

Sung-Hak Kang

Interdisciplinary Program of Acoustics and Vibration Engineering

Graduate School,

Pukyong National University

Abstract

The purpose of this paper is to study on the possibility of active vibration control using piezoelectric transducer.

Hydraulic actuator and electro-magnetic liner actuator have been used as typical active vibration control methods. However these methods have many kinds of disadvantages such as causing space limit, difficult maintenance, complicate structures, etc. Therefore introduction on new method of active vibration has been requested. Piezoelectric transducer generates vibration and GIC(General Impedance Converter) amplifier is adopted to give adjustable vibration signal to transducer and high amplitude of vibration. Resonance frequency of piezoelectric transducer

was controlled by GIC amplifier and higher amplitude of vibration was achieved.

Finally active vibration control using piezoelectric was performed.

1. 서론

구조물의 과도한 진동은 구조부재의 피로파괴, 탑재 장비의 손상 및 기능 장애를 초래할 수 있으며, 거주지역의 안락성 및 작업자의 능률 등을 저하시킬 수 있다. 또한 최근의 구조물들은 경량화·대형화 추세속에 유연성이 증대한 반면 감쇠비는 감소하는 경향으로 인하여 가진력에 대한 진동응답이 과도하게 나타날 수 있다. 따라서 효과적인 진동제어방법이 모색되고 있다. 특히 정밀한 위치제어가 필요한 광학대나 실험 설비 혹은 원동기의 지속적인 가진이 수반된 구조물 등의 지지대 등은 내구성이 유지되고 제진효과 및 안정성이 높은 능동제어시스템의 개발이 요구되고 있다. 원동기를 지니고 있는 구조물의 경우, 내구성 및 강도를 유지하면서 원동기로 부터의 진동을 차단하는 것은 한계가 있다. 왜냐하면 일반적인 방진재는 진동의 흡수를 위하여 구조가 조밀하지 않은 재질을 사용하는 것이 효과적이고 따라서 내구성은 매우 취약한 것이 일반적이기 때문이다.

구조물 진동제어에 관한 연구는 미국 및 일본을 중심으로 활발하게 진행되고 있으며^[1-3], 국내에서도 여러 종류의 액추에이터를 이용한 능동제어연구^[4-6]가 진행되고 있다. 실제의 대형 구조물인 경우에는 큰 제어력이 필요하므로 유압식 액추에이터를 이용한 실험적 연구^[7,8]가 진행되었으나, 유압식 액추에이터는 복잡하고 유지보수등에서 매우 불리한 것으로 알려지고 있다. 또한 리니어 진동 액추에이터^[9-11]를 이용한 능동 제진법이 제안된바 있으나 영구자석 및 가동 코일 등을 사용한 복잡한 구조이며 그 구조상 상술한 내구성 및 구조물의 지지를 수행할 수는 없다.

본 논문에서는 주파수 가변 압전 트랜스듀서^[12,13]를 이용한 새로운 능동 제

진법을 제안 한다. 이는 구조물의 기둥 등 지지부에 직접 삽입하여 외부 진동을 차단하는 방법으로 볼트로 체결된 란주반 방식의 압전 트랜스듀서를 사용한다. 일반적으로 란주반형 진동자는 밀도 높은 탄성체로 구성되어 있어 상술한 구조물내의 지지부에 삽입하여도 충분한 내구성을 얻을 수 있다. 그러나 압전 진동자의 공진 영역이 주로 초음파 영역의 높은 주파수이고, 기계적 품질계수가 높아 비공진 영역에서의 가진이 거의 불가능하다는 것이 문제가 된다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 란주반형 진동자의 금속 탄성체 부분에 적층된 압전 세라믹을 삽입하고 그 압전체의 전기 단자에 전기적인 인덕턴스를 접속하는 것에 의해 겉보기 기계임피던스를 크게 증가시킬 수 있다는 연구^[14]를 적용한다. 이와 같이 란주반형 진동자의 구동용 압전층의 양쪽에 큰 기계임피던스를 가진 탄성매질을 갖게 되면 전체적인 공진 주파수는 저주파로 이동하게 되어 외부진동 주파수와 같은 진동수의 진동을 가진할 수 있게 되고 이때의 위상을 외부 진동과 역상으로 함으로써 진동을 상쇄시킬 수 있다. 이상의 원리를 이용하여 압전진동자의 공진주파수를 일반적인 진동 주파수에 맞추기 위하여는 매우 큰 인덕턴스가 요구되는데, 현실적으로 코일을 감아 이를 실현하기에는 무리가 따른다. 따라서 본 연구에서는 연산증폭기와 전기적인 용량을 사용한 GIC(General Impedance Converter)^[15,16]를 이용하여 필요한 인덕턴스를 얻는다. 이상의 목적을 위하여 본 논문은 우선 압전 진동자를 사용한 주파수 가변 트랜스듀서에 대한 이론 및 실험적 고찰을 행하고 제진 대상 주파수의 공진을 위한 전기 단자에 접속된 인덕턴스의 범위를 구한다. 필요한 인덕턴스를 구현하기 위하여 GIC를 이용한 전자 인덕터를 이론적으로 검토하고 설계 및 제작한다. 이들을 결합하여 능동 제진 시스템을 구성하고 제진특성을 고찰한다.

2. 이론

2-1. 주파수 가변 압전 트랜스듀서

본 논문에서는 내구성이 요구되는 진동 제어에 압전 트랜스듀서를 적용하였다. 사용된 압전 트랜스듀서는 란쥬반형 진동자의 금속 탄성체 부분에 적층된 압전 세라믹을 삽입하고 그 압전체의 전기 단자에 전기적인 인덕턴스를 접속하는 것에 의해 공진 영역을 저주파 영역으로 하고, 공진 모드를 가변하였다. 이런 란쥬반형 주파수 가변 압전 트랜스듀서에 전기 신호를 구동할 때 주파수 특성을 등가회로로 해석하고자 한다.

두께 방향으로 진동하는 원형 압전체의 기본식은 전기장 E , 전기변위 D 와 기계적인 변형 S , 응력 T 사이에서 독립변수는 서로 상호관계를 갖고 있으며, 4개의 파라메타로 구성하는 일반적인 관계식이 있다. 원형 압전체에서 응력 T 와 전기변위 D 와의 상호관계만을 고려한다면 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned}T &= T(S, E) \\ D &= D(S, E)\end{aligned}\tag{1}$$

식 (1)로 부터 Taylor전개를 사용하면

$$T = \left(\frac{\partial T}{\partial S}\right)_E S + \left(\frac{\partial T}{\partial E}\right)_S E\tag{2}$$

$$D = \left(\frac{\partial D}{\partial S} \right)_E S + \left(\frac{\partial D}{\partial E} \right)_S E \quad (3)$$

이 된다. 위의 두 식에서 전기장이 일정할 때 실험적으로 결정되는 양은

$$c^E = \left(\frac{\partial T}{\partial S} \right)_E, \quad e^E = \left(\frac{\partial D}{\partial S} \right)_E \quad (4)$$

이다. 식 (4)에서 c^E 는 압전체 재료의 탄성율이고, e^E 는 역 압전상수이다. 그리고 압전체의 변형이 일정할 때 결정되는 양은

$$e^S = \left(\frac{\partial T}{\partial E} \right)_S, \quad \epsilon^E = \left(\frac{\partial D}{\partial E} \right)_S \quad (5)$$

이다. 식 (5)에서, e^S 는 압전상수이며, ϵ^S 는 유전율이다. 열역학적인 측면에서 압전상수는 $-e^S = e^E = e$ 이므로 (2), (3) 식을 정리하면 다음의 식(6),(7)로 표현된다.

$$T = c^E S - e E \quad (6)$$

$$D = e S + \epsilon^S E \quad (7)$$

식 (6)과 (7)에서 e 는 압전응력 정수이고, 기본적인 압전 관계식이 된다.

압전체의 등가회로는 그림 1과 같다. 그림 1에서 2개의 기계계인 부분과 1

개의 전기계인 부분으로 구성되고 압전체의 P_1, P_2 는 양면에 작용하는 힘이다. 그리고 v_1, v_2 는 변위 속도, V 는 압전체 구동 전압, I 는 압전체를 흐르는 전류이다.

식 (6), (7)로부터

$$\begin{aligned} T &= c^E S - e E \\ &= S [c^E + \frac{e^2}{\epsilon S}] - \frac{e}{\epsilon S} D \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, $c^E + \frac{e^2}{\epsilon S}$ 를 C^D 라 두고 (8) 식을 거리 x 에 대해 미분하면

$$\frac{\partial T}{\partial x} = C^D \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \quad (9)$$

단, $S = \frac{\partial \xi}{\partial x}$, ξ 는 변위이다.

운동방정식에서 음속을 $v = \sqrt{\frac{C^D}{\rho}}$ 라 하면, 파동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{C^D}{\rho} \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \quad (10)$$

여기서 변위 ξ 를 $\xi = \xi_0 e^{j\omega t}$ 라 놓고, 식 (10)에 대입하면

$$\begin{aligned}
-\omega^2 \xi &= v^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \\
\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\omega^2}{v^2} \xi &= 0
\end{aligned} \tag{11}$$

이 된다.

$$\begin{aligned}
v^2 = \frac{\omega^2}{v^2} \text{ 라 두면 } \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + v^2 \xi &= 0 \text{ 이 되고 그 해는} \\
\xi &= A \cos vx + B \sin vx \text{ 이다.}
\end{aligned}$$

여기서 압전체 작용하는 힘 P 를 $S' \cdot T$ 라 놓으며 다음 식과 같다.

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} = v (-A \sin vx + B \cos vx) \text{ 가 되고, 식 (8)에 대입하여 정리하}$$

면

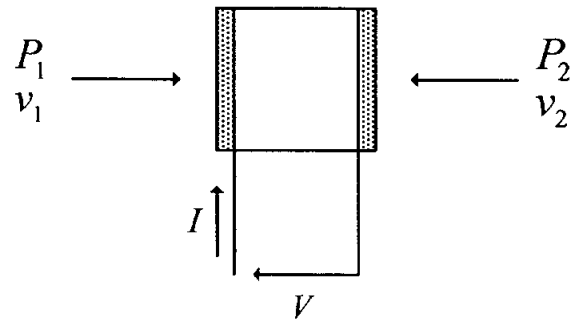
$$T = C^D v (-A \sin vx + B \cos vx) - \frac{e}{\epsilon^S} D \tag{12}$$

이 된다.

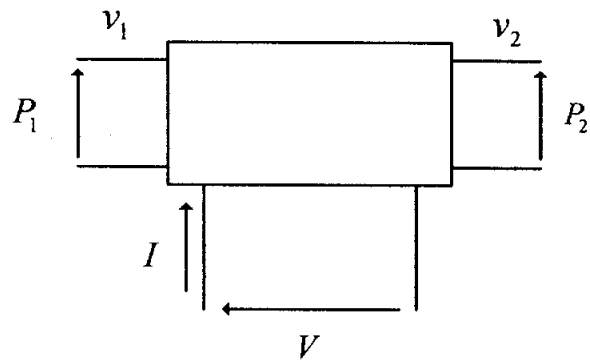
식 (12)의 양변에 압전체 단면적 S' 을 곱하면

$$P = S' C^D v (-A \sin vx + B \cos vx) - \frac{e}{\epsilon^S} D S' \tag{13}$$

이다.



(a)



(b)

그림 1. 압전 트랜스듀서

(a) 압전 트랜스듀서, (b) 3 단자로 나타낸 압전 트랜스듀서

Fig. 5. Construction of piezoelectric transducer

(a) Schematic diagram of transducer

(b) Piezoelectric transducer regarded as a three port box

$C^D v = \rho v^2 \frac{\omega}{v} = \rho v \omega$ 이고, 전하 Q 는 $D \cdot S'$ 이므로, 식 (13)을 정리하면

$$\begin{aligned} P + \frac{e}{\epsilon S} Q &= S' \rho v \omega (-A \sin vx + B \cos vx) \\ &= Z_0 \omega (-A \sin vx + B \cos vx) \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, $Z_0 = S' \rho v$ 이고, Z_0 를 특성 기계 임피던스라 한다.

이 식을 이용하여 경계 조건을 대입함으로서 A, B 를 구할 수 있다.

x 가 l 에서 음압과 입자속도를 $P_l, v_l = \left(\frac{\partial \xi}{\partial t} \right)_l$ 라하고,

x 가 0 에서 $P_0, v_0 = \left(\frac{\partial \xi}{\partial t} \right)_0$ 라 하면

위의 경계 조건을 적용하면

$$B = \frac{P_0 + \frac{e}{\epsilon S} Q}{Z_0 \omega} \quad (15)$$

$\frac{\partial \xi}{\partial t} = (A \cos vx + B \sin vx) j \omega$ 로부터

$$A = \frac{v_0}{j \omega} \quad (16)$$

$$v_l = j \omega (A \cos \gamma l + B \sin \gamma l) \quad (17)$$

가 된다.

식 (14) ~ (17)를 연립하여 정리 하면

$$\begin{aligned} P_l + \frac{e}{\epsilon S} Q &= \left(P_0 + \frac{e}{\epsilon S} Q \right) \cos \gamma l + j Z_0 v_0 \sin \gamma l \\ v_l &= v_0 \cos \gamma l + j \frac{P_0 + \frac{e}{\epsilon S} Q}{Z_0} \sin \gamma l \end{aligned} \quad (18)$$

이 된다. 식 (18)을 정리하여 다음 식과 같이된다.

$$\begin{cases} P_l = -j Z_0 (\cot \gamma) v_l + j Z_0 (\operatorname{cosec} \gamma) v_0 - \frac{e}{\epsilon S} Q \\ P_0 = -j Z_0 (\operatorname{cosec} \gamma) v_l + j Z_0 (\cot \gamma) v_0 - \frac{e}{\epsilon S} Q \end{cases} \quad (19)$$

식 (19)은 전송 선로 방정식이다.

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} P_l \\ P_0 \end{bmatrix} = [Z] \begin{bmatrix} v_l \\ v_0 \end{bmatrix} .$$

그리고 $E = \frac{D}{\epsilon S} - \frac{e}{\epsilon S} S$ 에서 $S = \frac{\partial \xi}{\partial x}$ 이므로, 전압 V 를 구하면

$$\begin{aligned}
V &= \int_0^l E dx \\
&= \frac{D}{\epsilon^S} l - \frac{e}{\epsilon^S} (\xi_l - \xi_0) \\
&= \frac{l}{\epsilon^S S} Q - \frac{e}{\epsilon^S} (\xi_l - \xi_0) \\
&= \frac{Q}{C_0} - \frac{e}{\epsilon^S} (\xi_l - \xi_0)
\end{aligned} \tag{20}$$

단, C_0 는 정전용량이다.

이고, $Q = Q_0 e^{j\omega t}$ 이므로, 전류 I 는

$$\begin{aligned}
I &= \frac{dQ}{dt} = j\omega Q \quad \rightarrow \quad Q = \frac{I}{j\omega} , \\
\frac{d\xi_l}{dt} &= v_l = j\omega \xi_l \quad \rightarrow \quad \xi_l = \frac{v_l}{j\omega} , \\
\frac{d\xi_0}{dt} &= v_0 = j\omega \xi_0 \quad \rightarrow \quad \xi_0 = \frac{v_0}{j\omega} .
\end{aligned} \tag{21}$$

이 된다.

(21)식을 (20)식에 대입하여 정리하면,

$$V = - \frac{I}{j\omega C_0} + \frac{e}{\epsilon^S} (v_l - v_0) \tag{22}$$

이다.

입자속도 v_1, v_2 의 방향을 고려하면 $v_0 = -v_1$, $v_l = v_2$ 이 되고,

$h = \frac{e}{\varepsilon S}$ 라 두면,

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ V \end{bmatrix} = -j \begin{bmatrix} Z_0 \cot \gamma l & Z_0 \operatorname{cosec} \gamma l & \frac{h}{\omega} \\ Z_0 \operatorname{cosec} \gamma l & Z_0 \cot \gamma l & \frac{h}{\omega} \\ \frac{h}{\omega} & \frac{h}{\omega} & \frac{1}{\omega C_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ I \end{bmatrix} \quad (23)$$

식 (23)에서 $Z_{11}=Z_{22}= Z_0 \cot \gamma l$, $Z_{12}=Z_{21}=Z_0 \operatorname{cosec} \gamma l$ 라고 하면 식(24)

와 같이 정리된다.

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ V \end{bmatrix} = -j \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \frac{h}{\omega} \\ Z_{21} & Z_{22} & \frac{h}{\omega} \\ \frac{h}{\omega} & \frac{h}{\omega} & \frac{1}{\omega C_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ I \end{bmatrix} \quad (24)$$

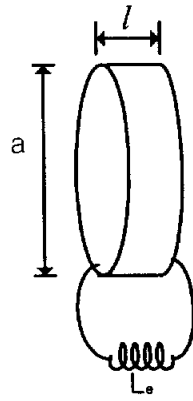
식 (24)와 같은 압전체에 전기-기계 변환 기본식이 유도되고 Mason 등가회로는 식 (24)의 임피던스 매트릭스를 구하는 것을 목적으로 하여 회로를 해석하는 것이 가능하다. 그리고, 두계진동모드의 압전진동자의 전기단자에 공진 모드를 가변하기 위해 전기적인 인덕턴스가 접속되어 있는 경우 그 Mason의 등가회로는 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

전기단자에 접속된 인덕턴스 L_e 에 의해 그림 2의 등가 회로는 그림 3과 같이 표시할 수 있고 인덕턴스 L_e 에 의한 등가 기계임피던스 Z_3 는 식(25)와 같다.

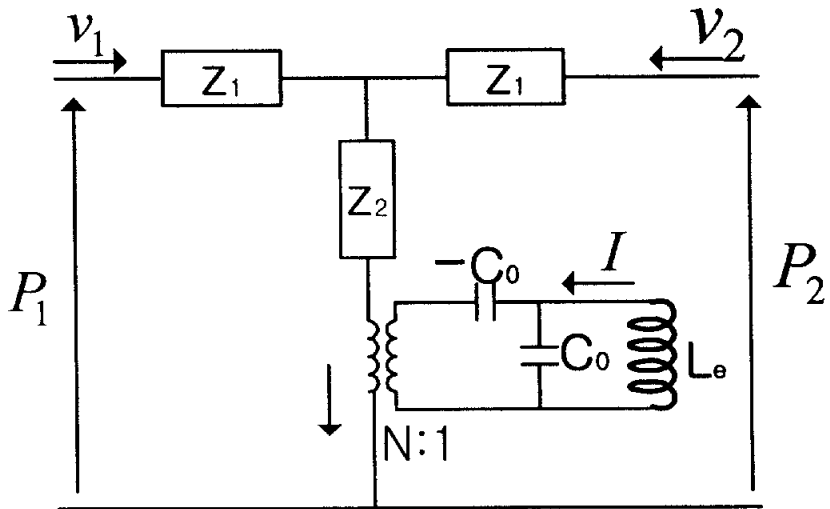
$$Z_3 = j \frac{n^2}{\omega C_0} \frac{1}{1 - \omega^2 C_0 L_e} \quad (25)$$

이 식으로부터 전기단자에 접속한 전기적인 인덕턴스의 값에 따라 압전체의 등가 기계임피던스를 큰 범위 걸쳐 제어할 수 있음을 알 수 있다.

이와 같은 압전 진동자 2층을 공진 주파수 제어용 탄성체로 사용하여 구동용 압전층의 양쪽에 위치시키고 금속 탄성체 봉과 함께 볼트로 체결하여 그림 4에 나타낸 구조와 같은 란쥬반형 주파수 가변 트랜스듀서를 설계할 수 있다. 이에 대한 Mason 등가회로는 그림 5에 나타내었다. 그림 4 및 그림 5에 나타나 있는 주파수 제어용 압전층의 전기단자에 접속한 전기적 인덕턴스는 그 압전층의 기계적 임피던스를 크게 변화시켜 전체적인 공진 주파수가 변하게 한다.



(a)



(b)

그림 2. (a) 전기단자에 코일이 접속된 두께진동모드 압전진동자

(b) Mason 등가회로 표현

Fig. 2. (a) Thickness mode piezoelectric vibrator with a coil in electric terminals, (b) Mason's equivalent circuit of the vibrator

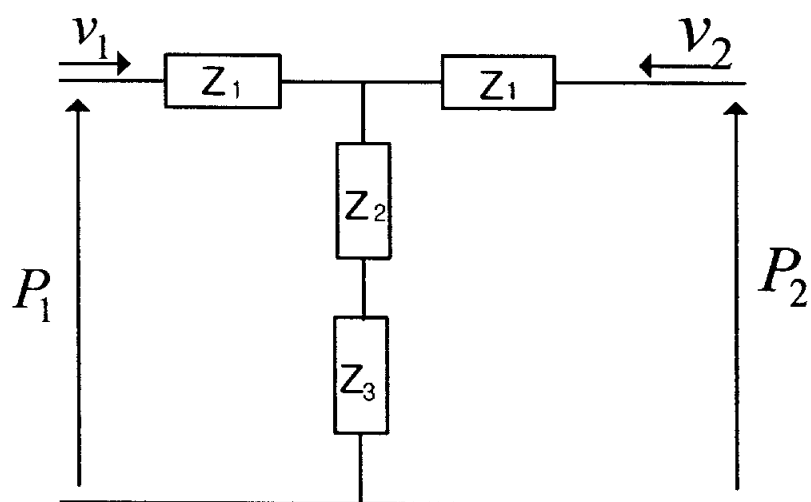


그림 3. 기계임피던스로 구성된 등가회로

Fig. 3. Equivalent circuit consisted of mechanical impedance

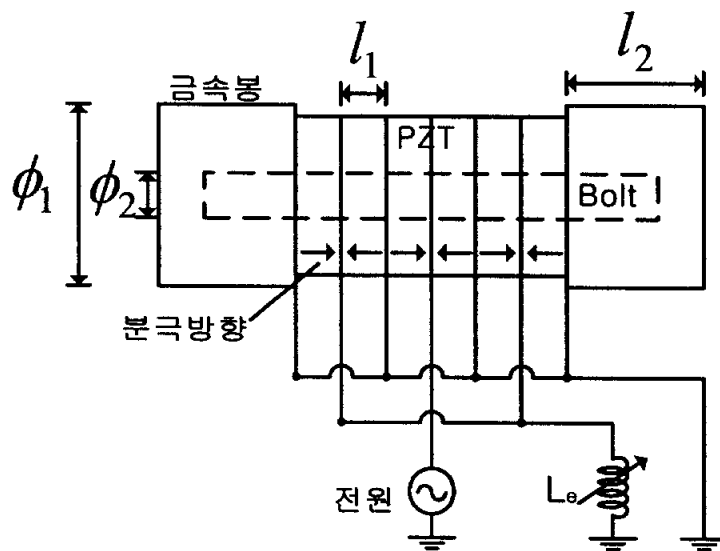


그림 4. 주파수 가변 트랜스듀서의 구조

Fig. 4. Construction of frequency controllable transducer

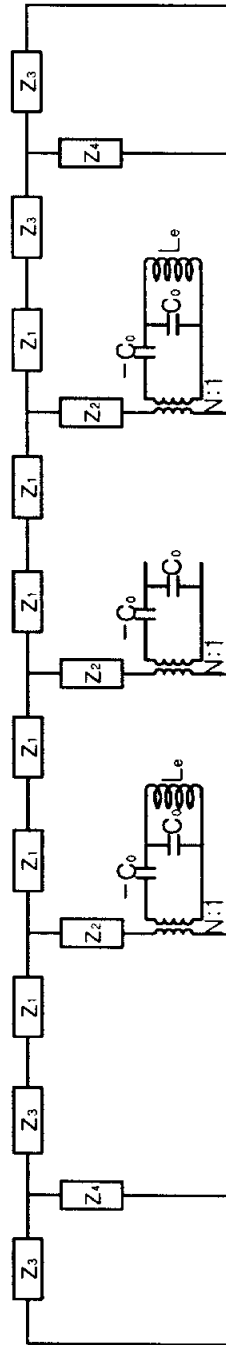


그림 5. 주파수 가변 트랜스듀서의 등가회로
Fig. 5. Equivalent circuit of frequency controllable transducer

2-2 GIC에 의한 전자 인덕턴스

이 연구에서는 란쥬반형 압전 진동자의 전기 단자에 인덕턴스를 추가하는 방법으로, 기계임피던스를 크게 증가시켜 압전 트랜스듀서의 공진 주파수를 가변하였다.

압전 진동자의 공진 주파수를 일반적인 진동 주파수에 맞추기 위하여 매우 큰 인덕턴스가 요구된다. 현실적으로 코일을 감아 이를 실현하기에는 무리가 따른다. 따라서 본 연구에서는 연산증폭기와 전기적인 용량을 사용한 GIC(General Impedance Converter)를 이용하여 필요한 인덕턴스를 얻었다.

GIC라는 것은 그림 6과 같이 2개의 OP 앰프와 5개의 임피던스 소자로 구성된 회로이다. 이 회로의 전체 임피던스($1-1'$)는

$$Z_{11'} = \frac{Z_a Z_c Z_e}{Z_b Z_d} \quad (26)$$

식(26)와 나타내고, $Z_a \sim Z_e$ 를 적당한 저항, 콘덴서로 치환하면, 등가적으로 인덕턴스의 특성을 가진 회로로 얻어진다.

인덕터스의 특성을 갖게 할 경우에는 식 (27)과 같이 4개의 저항과 1개의 콘덴서로 구성된다.

$$\begin{aligned} Z_a &= R_a, & Z_b &= R_b, & Z_c &= R_c \\ Z_d &= -j \frac{1}{\omega C_d}, & Z_e &= R_e \end{aligned} \quad (27)$$

따라서, 식(26)에 식(27)를 대입하면

$$Z_{11'} = \frac{R_a R_b R_e}{R_b \left(-j \frac{1}{\omega C_d} \right)} = j\omega \frac{R_a R_c C_d R_e}{R_b} \quad (28)$$

로 되므로 식(29)는 인덕턴스인 코일과 동가이다.

$$L_e = \frac{R_a R_c C_d R_e}{R_b} \quad (29)$$

GIC를 회로의 다이내믹 레인지 내에서 동작을 이해하기 쉽게 하기 위해 그림 7과 같이 등가하였다.

Z_e 에 $e_1(=e_5)$ 의 전압을 가했을 때에 흐르는 전류를 i_3 로 했을 때, i_3 에 의한 Z_d 의 전압강하 $e_1(=e_3)$ 을 기준으로 해서, Z_b/Z_c 의 이득을 가진 반전 앰프에 통해서 전압 e_2 를 얻는다. 이 e_2 와 입력전압 e_1 과의 차이에 의해 Z_a 에는 i_1 의 전류가 흐르게 된다.

입력 임피던스는 e_1/i_1 으로 표시되기 때문에 임피던스는 e_2 의 값을 크게 하는 Z_d 와 Z_b 에 반비례하고, Z_e 와 Z_c 에 비례하고, 똑같이 i_1 을 제한하는 Z_a 에 비례한 값으로 된다.

OP_1 과 OP_2 및 $Z_b \sim Z_e$ 가 e_1 에 대해서 위상과 전압값을 변화시킨 전압을

발생하고, Z_a 이 그 전압에 의해 흐르는 전류를 컨트롤한다고 말하는 것 같이 2단계의 동작으로 되어 있기 때문에 $Z_b \sim Z_e$ 에서 전압 다이내믹 레인지가 결정된다.

예를 들면 사용하는 OP 앰프의 출력전압이 최대 7Vrms이고, 출력 가능한 전류가 3.5 mArms이었다고 하면, 입력에 대해서 OP 앰프의 동작범위 내에서 동작시키는 것에는 Z_a 에는 $2\text{ k}\Omega(7\text{V}/3.5\text{mA})$ 이상의 저항을 사용하도록 하는 것이 목표로 된다(입력전류 i_1 을 3.5mA 이내로 되도록 하는 입력전압 e_1 으로 해서 둔다면, Z_a 은 $2\text{ k}\Omega$ 이하에서도 동작가능). OP 앰프의 전압 다이내믹스 레인지 내에서 동작시키는 것에는 $e_1(1+Z_4/Z_5)$ 가 OP_1 의 최대출력전압이 되지 않도록 하고, 또 $[e_3-(e_4-e_3)(Z_2/Z_3)]$ 가 OP_2 의 최대 출력전압 내에 되도록 e_1 과 $Z_b \sim Z_e$ 를 결정한다.

(26)식에서는 $Z_a \sim Z_e$ 는 자유롭게 선택하는 것이 가능하도록 되어 있지만, 실제로는 OP 앰프의 동작조건으로부터 제한을 받는다. 제한을 받는 조건으로서 OP 앰프의 직류 루프의 성립과 OP 앰프의 귀환루프의 위상 주변에 의한 발전이다. 예를 들면 $Z_a \sim Z_e$ 을 전체 콘덴서로 한 경우 직류귀환 루프가 성립하지 않으므로 동작불가능한 것이 명백하다.

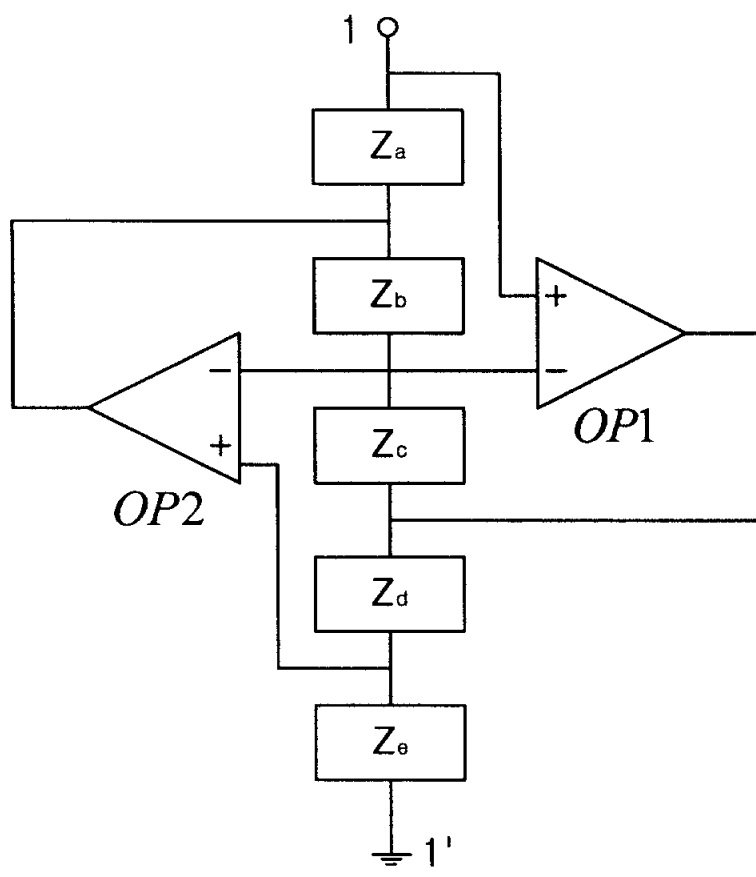


그림 6. GIC의 구성

Fig. 6. Construction of Generalized Impedance Converter

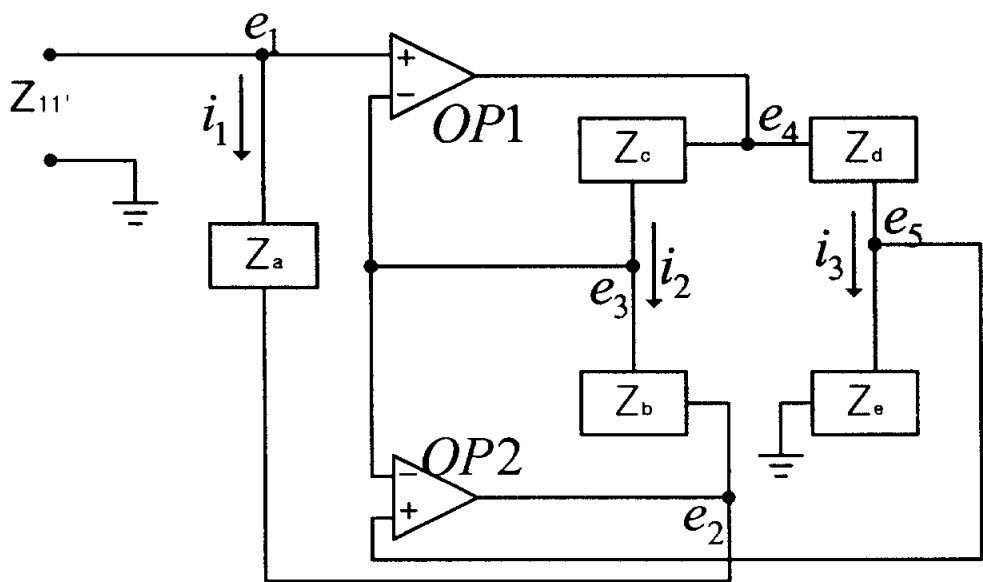


그림 7. GIC의 등가회로

Fig. 7. Equivalent circuit of GIC.

3. 실험 및 결과

3-1. 전자 인덕턴스의 제작 및 특성결과

란주반형 진동자의 주파수 가변을 위해 사용된 인덕턴스 특성을 갖는 GIC 회로의 특성을 범용 시뮬레이션 프로그램인 Pspice를 사용하여 시뮬레이션 실험을 하였다. GIC회로의 Pspice 시뮬레이션 등가회로를 그림 8에 나타내었다. GIC를 이용하여 필요한 인덕턴스를 얻기 위해 그림 6에서의 Z_b, Z_c, Z_e 는 각각 $1[k\Omega]$, Z_d 는 $0.1[\mu F]$ 으로 접속하였다. Z_a 는 가변 저항으로 접속하고 Z_a 의 변화에 따른 특성을 시뮬레이션 하였다. 그리고, 연산증폭기는 모토로라사의 MC1741으로 하고 전원 내부 저항을 $50[\Omega]$ 으로 하였다.

그림 8에 나타내었던 구조를 이용하여 그림 9와 같이 회로를 구성하였다. 목적하는 인덕턴스 값을 얻기 위하여 회로내의 가변저항을 변화시켜가며 제작한 전자 인덕턴스의 특성을 실험적으로 고찰하여 보았다. 그림 8의 가변 저항 R2를 변화시켜 가며 Impedance Analyzer로 주파수에 따른 Inductance를 측정한 결과를 시뮬레이션 결과와 함께 그림 10에 나타내었다. 이 결과를 보면 주파수의 증가에 따라 인덕턴스의 값이 증가하는 경향을 보이고 있지만, GIC회로 내의 가변저항을 조절함에 따라 손쉽게 원하는 인덕턴스의 값을 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다. 특히 주어진 주파수 영역 내에서는 측정결과와 시뮬레이션 결과의 차이가 근소하여 PSpice 시뮬레이션 기법이 가변 인덕턴스 설계에 매우 유용함을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 GIC회로 내의 가변저항 R2의 값을 $200[\Omega]$ 에서 $300[\Omega]$ 까지 $25[\Omega]$ 간격으로 변화시켜가며 인덕턴스의 변화를 관찰 한 결과, $10[kHz]$ 를 기준으로 하였을 때 약 $22.5[mH]$ 에서 약 $32.5[mH]$ 까지의 인덕턴스 변화를 얻을 수 있었다.

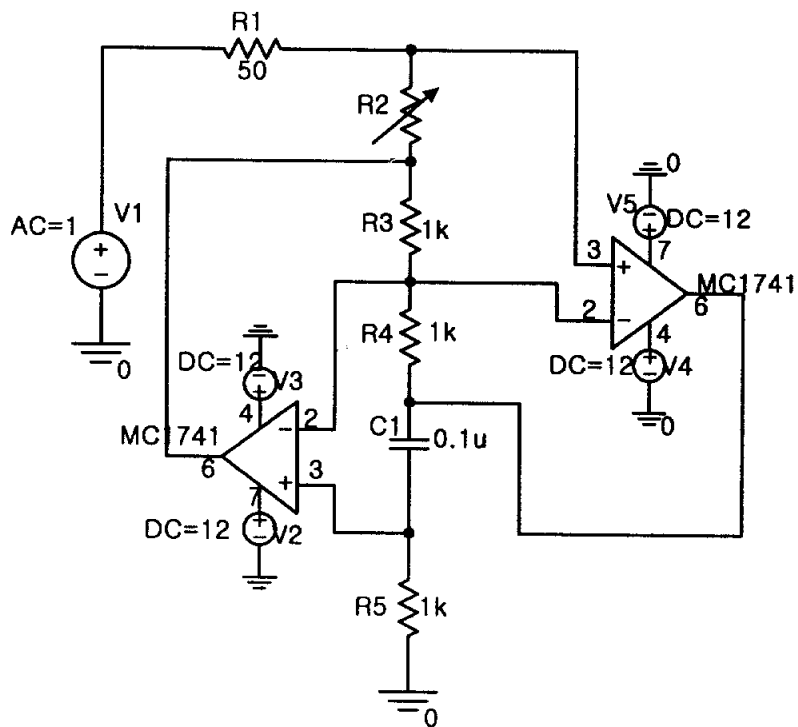


그림 8 전자 인덕턴스의 PSpice 해석 모델

Fig. 8 PSpice equivalent model for electronic inductance

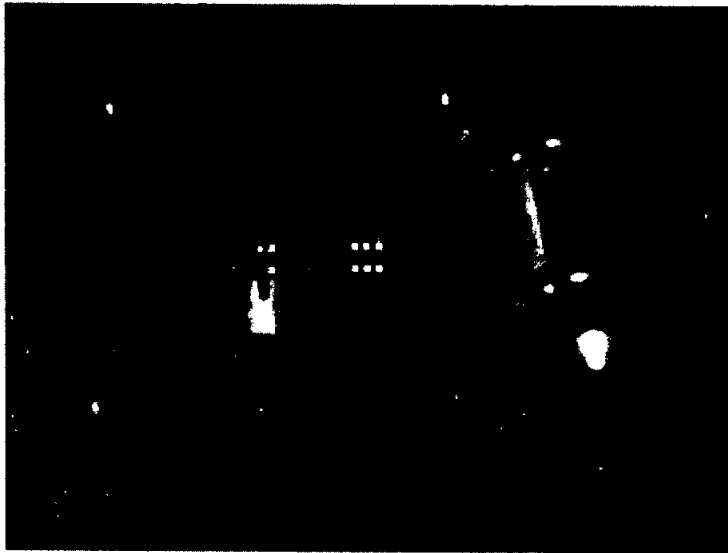
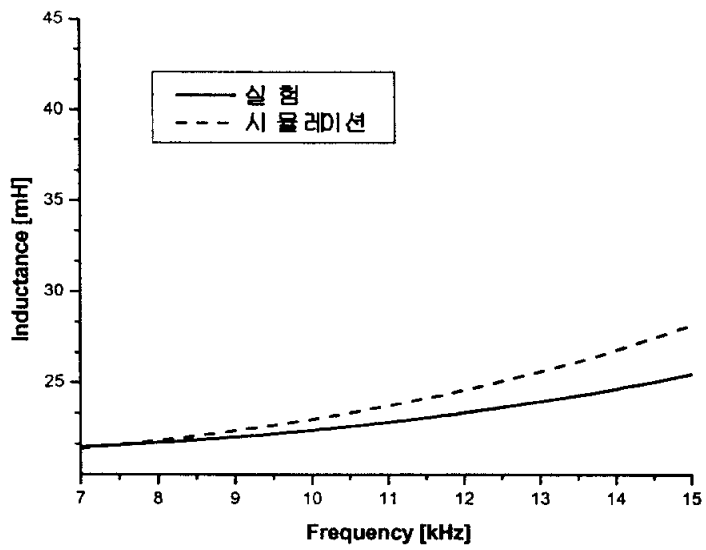
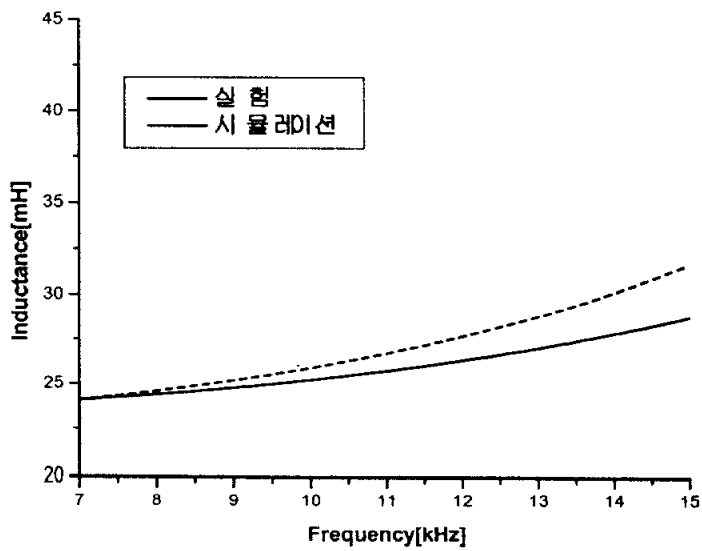


그림 9. 연산증폭기로 구성된 전자 인덕턴스

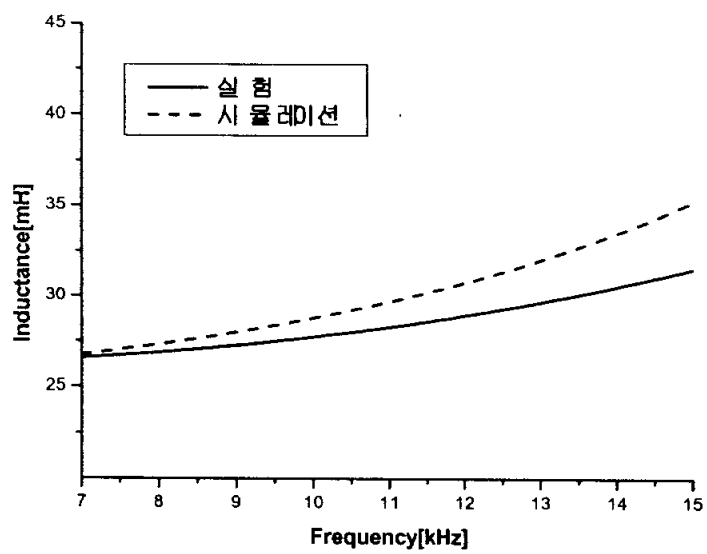
Fig. 9. Electronic Inductance made of OP-Amp.



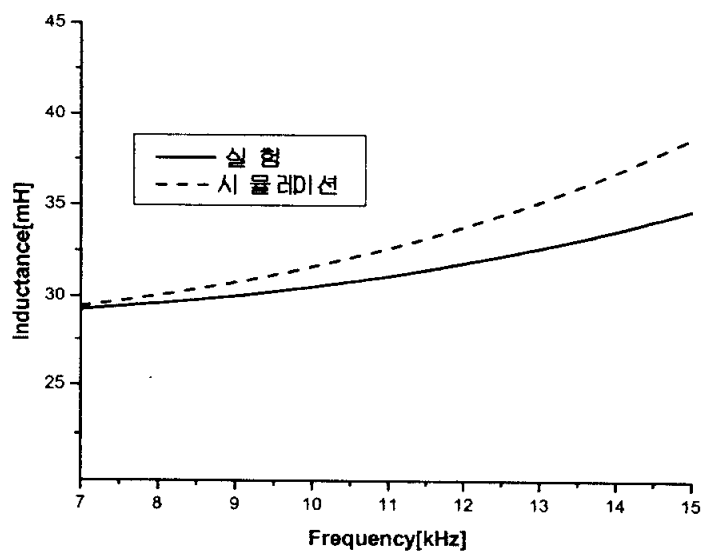
(a) $200[\Omega]$



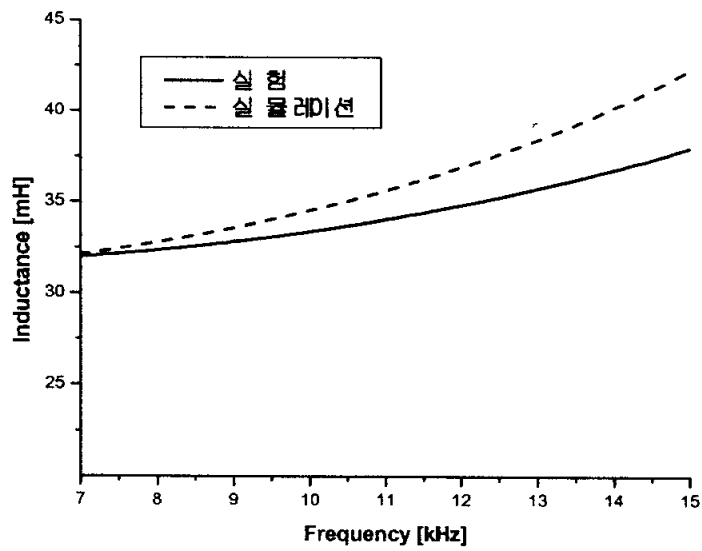
(b) $225[\Omega]$



(c) 250[Ω]



(d) 275[Ω]



(e) 300[Ω]

그림 10. 전자 인덕턴스의 주파수 특성결과

Fig. 10. Results of frequency characteristics of electronic inductance

3-2. 주파수 가변 압전 트랜스듀서의 제작 및 가변 특성

본 연구에서 제안한 능동 제진법을 검증하기 위하여 실제로 란주반형 압전 트랜스듀서를 제작하여 그 주파수 특성을 조사하였다. 실험에 사용한 압전 진동자는 그림 11에 나타난 것과 같은 링형으로써 외경 38[mm], 내경 15[mm], 두께 5[mm]의 압전 세라믹이었으며 그 공진 특성은 그림 12와 같이 404[kHz]의 공진 주파수를 갖고 있었다. 이 압전 진동자 6장을 이용하여 그림 13과 같은 란주반형 압전 트랜스듀서를 제작하였다. 이때 그림 4에 나타난 것과 같이 2장의 압전체를 분극방향이 마주보게 적층을 하여 두께가 2배인 한 장의 압전체와 같은 거동을 하도록 하였다. 금속봉은 알루미늄 봉으로 하였으며 전기단자에 접속된 인덕턴스의 변화에 따른 공진특성의 변화를 관찰하기 위하여 Impedance Analyzer를 사용하여 제작된 트랜스듀서의 공진 주파수의 변화를 관찰하였다.

그림 14에 나타난 것과 같이 제작한 전자 인덕턴스를 주파수 가변 압전 트랜스듀서의 주파수 제어단에 연결하고 인덕턴스의 변화에 따른 공진주파수의 변화를 Impedance Analyzer로 측정하였다. 그림 15에 측정 결과와 시뮬레이션을 나타내었다. 그림 15에 나타난 결과를 보면 어드미턴스의 크기는 차이가 있지만, 전자 인덕턴스회로 내의 가변 저항의 값을 변화시킴에 따라 측정 결과와 시뮬레이션 결과 모두 트랜스듀서의 공진주파수가 약 12[kHz] 부근에서 10[kHz]부근으로 이동하는 것을 알 수 있다. 어드미턴스 크기의 차이는 시뮬레이션에서는 손실을 고려하지 않았기 때문이라고 사료된다. 앞서 나타난 인덕턴스 측정결과로부터 약 23.2[mH]에서 33.2[mH]까지의 인덕턴스 변화를 준것과 같음을 알 수 있다. 인덕턴스를 접속하지 않았을 때 트랜스

듀서의 공진주파수가 약 30[kHz]인 것을 고려하면 전자인덕턴스 및 주파수 제어용 압전층에 의해 상당히 큰 공진주파수의 이동이 있음을 알 수 있다.

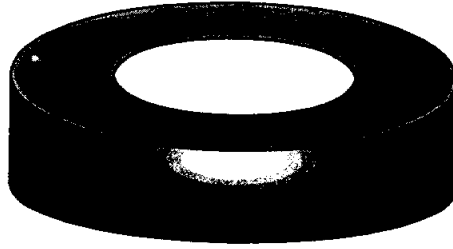


그림 11. 링형 압전 세라믹

Fig. 11. Ring-type piezoelectric ceramic

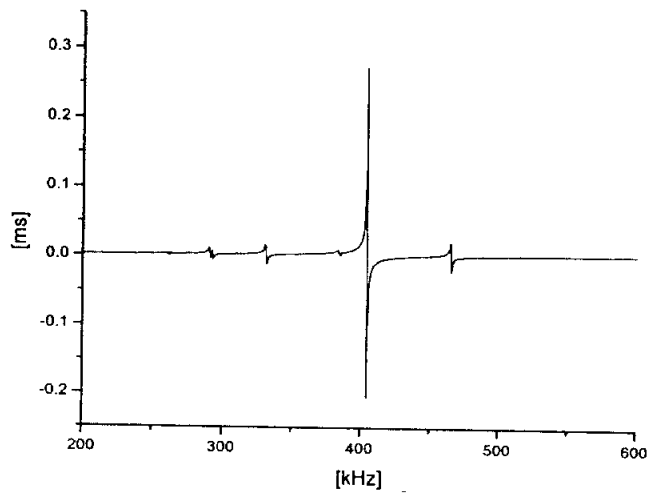


그림 12. 압전 세라믹 진동자의 공진 특성

Fig. 12. Resonance characteristics of piezoelectric vibrator

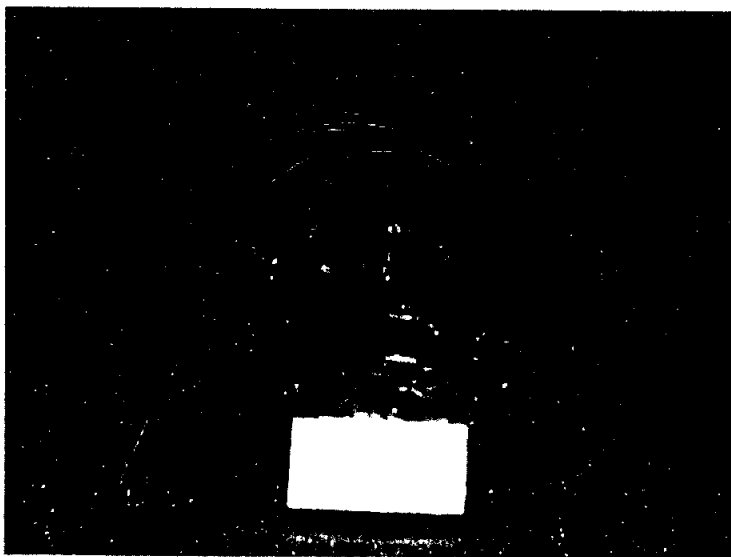


그림 13. 주파수 가변 압전 트랜스듀서의 시작품

Fig. 13. Photograph of frequency controllable piezoelectric transducer

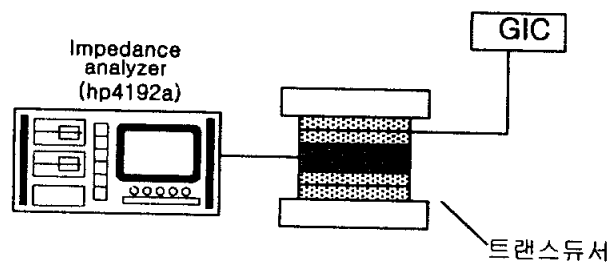
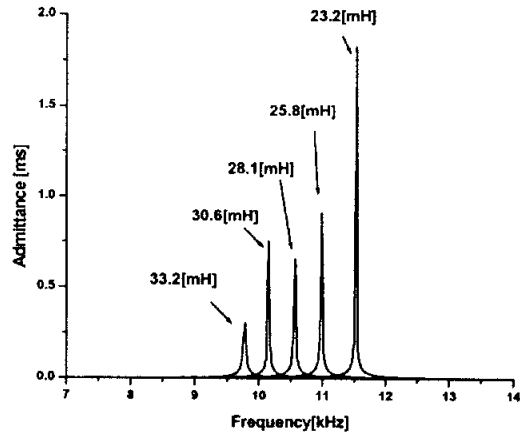
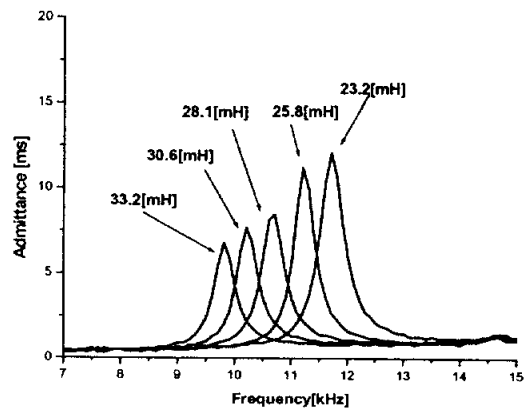


그림 14. 주파수 가변 트랜스듀서의 주파수 특성 측정 장치도
 Fig. 14. Experimental setup for frequency characteristics of transducer



(a) 시뮬레이션



(b) 실험

그림 15. 인덕턴스의 변화에 따른 공진주파수의 변화

Fig. 15. Resonance frequency change by inductance variation

3-3. 제진 실험 및 결과

란주반형 진동자와 GIC로 구성된 주파수 가변 압전 트랜스듀서를 제진에 적용하기 위해 본 논문에서는 10[kHz]의 외부진동으로 설정하여 제진 실험을 하였다. 외부 진동원으로는 LDS(v201)의 가진기를 사용하여 그림 16에 나타낸 장치와 같은 방법으로 제진 실험을 하였다. 그림 17은 본 연구에서 제안한 제진 시스템의 시작품이다. 신호발생기로부터 주파수 10[kHz], 인가 전압 10[v], 2[v]를 각각 진동기와 트랜스듀서에 인가시키고, GIC를 이용하여 외부 인덕턴스를 31.5[mH]로 하였을 때, 진동계로부터 측정된 진동을 그림 18, 19에 나타내었다. 그림 20는 가진기로 가진을 시키고 트랜스듀서로 재진을 시켜 진동계로부터 측정된 결과이다. 그 결과 본 연구에서 제작한 주파수 가변 압전 트랜스듀서를 제진 시스템에 적용한 결과 10[kHz]의 외부진동으로 설정한 가진기로 부터의 진동을 완벽하게 상쇄시킴을 확인하였다. 따라서, 본 연구에서 제안한 제진 시스템을 이용하여 내구성이 요구되는 제진에 적용 가능함을 확인하였다.

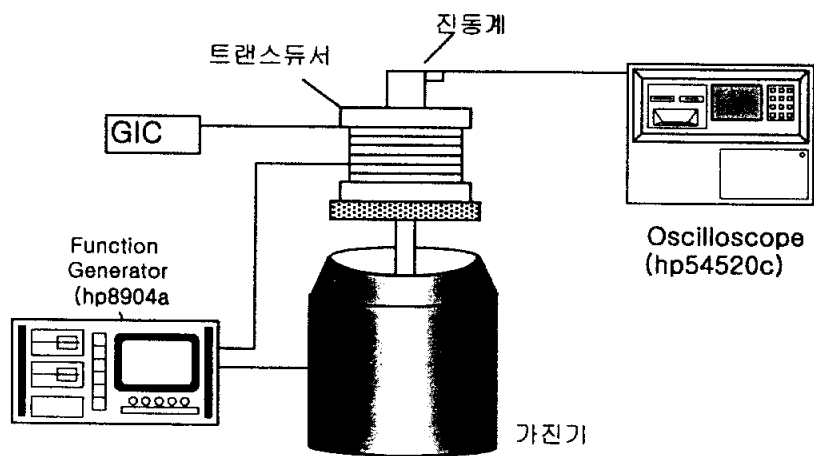


그림 16. 제진실험 장치도

Fig. 16. Experimental setup for active vibration control

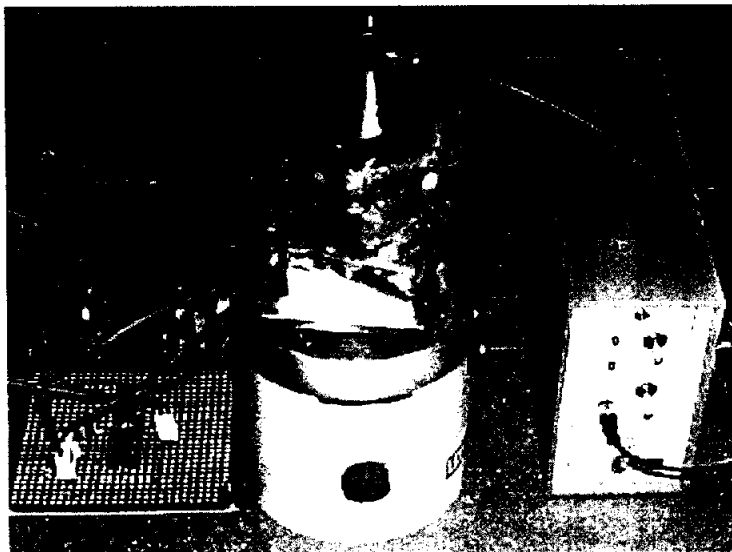


그림 17. 제진 시스템 사진
Fig. 17. System of vibration control

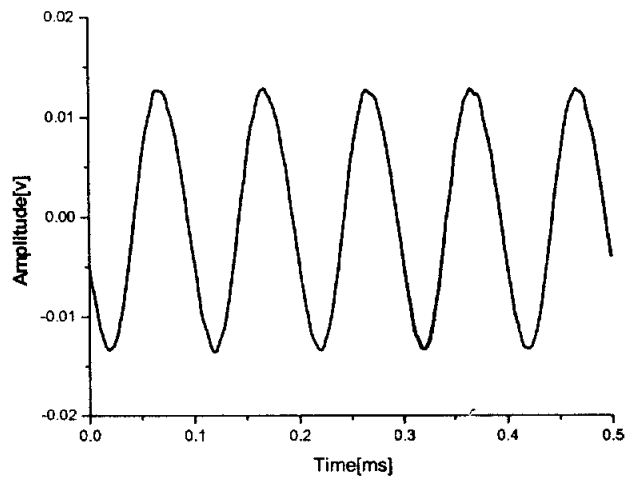


그림 18. 가진기의 진동파형

Fig. 18. Vibration wave from vibrator

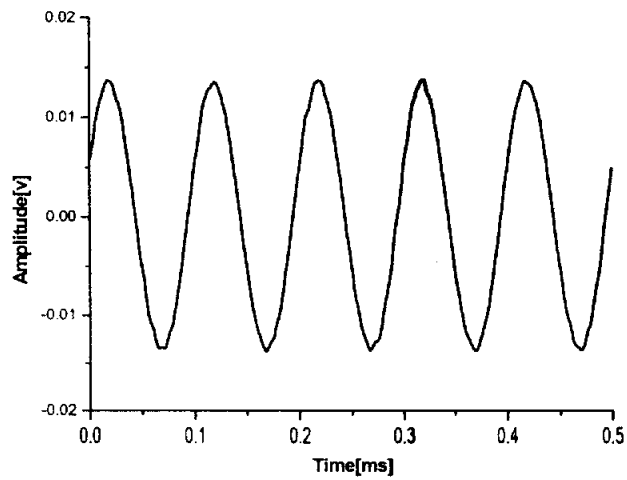


그림 19. 압전트랜스듀서의 가진파형

Fig. 19. Vibration wave from piezoelectric transducer

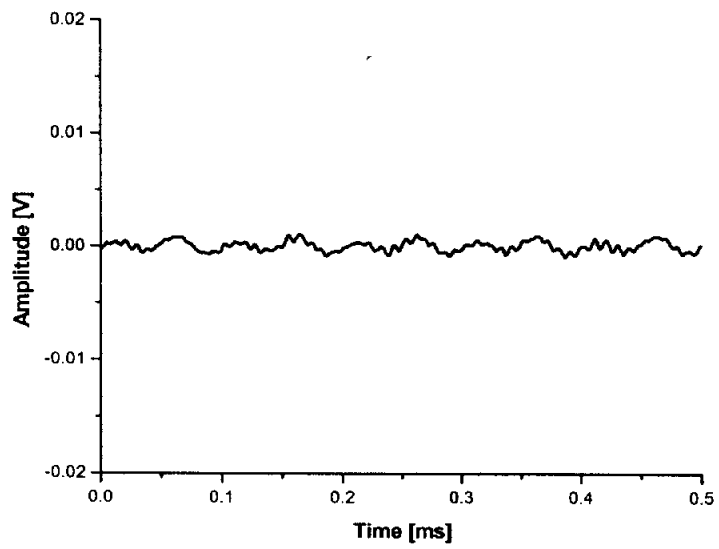


그림 20. 상쇄된 파형
Fig. 20, Cancelated wave

4. 결론

주파수 가변 압전 트랜스듀서를 이용한 새로운 능동 제진법을 제안 하고 이를 이용한 능동 제진 시스템의 가능성을 확인하였다. 그 원리로는 관주반 형 압전 트랜스듀서의 양쪽에 주파수 제어용 압전 세라믹층을 삽입하고 그 제어용 압전층의 전기단자에 전기적인 인덕턴스를 접속하는 방법에 의해 전체 공진 주파수를 큰 범위에 걸쳐 가변 할 수 있음을 확인 하였다. 또한 큰 값의 인덕턴스의 구현 및 인덕턴스의 가변을 위해 GIC회로를 이용한 전자 인덕턴스를 구성하고 그 특성을 확인하여 보았다. 그 결과 PSpice 모델로 시뮬레이션한 결과와 매우 유사한 실험치를 보여 설계에 유용함을 확인 하였 고, GIC 회로내의 가변 저항을 조절함으로써 손쉽게 원하는 인덕턴스의 값을 얻을 수 있음을 확인하였다. 이를 제진 시스템에 적용한 결과 10[kHz]의 외부진동으로 설정한 가진기로 부터의 진동을 완벽하게 상쇄시킴을 확인하였다.

이상의 결과는 구조물의 기둥 등 지지부에 직접 삽입하여 외부 진동을 차단하는 경우, 혹은 정밀 실험이 요하는 실험 테이블의 다리 등에 삽입하여 내구성을 유지하며 완벽한 제진 효과를 기대할 수 있어 금 후 산업 전반에 많은 기여를 하리라 기대한다.

참고문헌

- (1) Leipholz, H. H. E. and Abdel-Rohman, M., 1986, control of Structure, Maritus Nijhoff Publishers, Dordrecht
- (2) Soong, T. T., 1990, Active Structural Control: Theory and Practice, Longman Scientific & Technical, New York, N. Y.
- (3) Fuller, C. R., Elliot, S. J. and Nelson, P. A., 1996, Active Control of Vibration, Academic Press
- (4) Moon, S. J. and Chung, T. Y., 1995, "Develop-Annual Summer Conference, Part A (in Korean)
- (5) Cho, D. S., Lee, S. M., and Chung, K. Y., 1995, "A Study to Develop an Active Control System of Ship Vibration Using a Mechanical Actuator," Transactions of SNAK, Vol. 32, No. 4 (in Korea)
- (6) Ko, W. S., et al., 1996, "A Study on Vibration Control Using Active Dynamic Damper with Linear Electric Motor," Proceeding of KSNVE conference (in Korea)
- (7) Chung, T. Y., et al., 1996, "Practical Application of the Active Vibration Control System to Ship Superstructure," Transactions of SNAK, Vol. 33, No. 2 (in Korea)
- (8) Reinhorn, A. M., et al., 1993, "Full-Scale Implementation of Active Control. II: Installation and Performance," Journal of Structural Engineering, Vol. 119, No. 6

- (9) Nasar, S. A., 1987, Linear Electric Motors: Theory, Design and Practical Applications, Prentice-Hall, Inc.
- (10) Schmitz, N. L. and Novotny, D. W., 1965, Introductory Electromechanics, John Wiley & Sons
- (11) Jang, S. M., et al., 1996, "Design of the Voice Coil Type LOA Using FEM Analysis," KIEE96
- (12) N. Chubachi and M. J. Kim, "A Transmission-Line Model Equivalent Circuit for Piezoelectric Transducers Including the Effect of Electrical Terminal Impedance", Japanese Journal of Applied Physics Vol. 35, Part 1, No. 5B, 1996.
- (13) 김무준, 하강열, 김성부, 이종규, "다층 PZT 초음파 트랜스듀서에 대한 새로운 전송선로형 등가회로의 제안", 한국음향학회지, 제14권, 제4호, pp. 29~37, 1995.
- (14) 中鉢 憲賢, 金 茂俊, "厚み縦振動モード壓電振動子の傳送線路モデル等價回路による多層構造超音波トランスジューサの特性解析について", 電子情報通信學會(日本), US92, No. 9, pp. 67~72, 1992.
- (15) 박송배, "신회로이론", 문운당, 1996.
- (16) 岡村勉夫, "OPアンプ回路の設計", CQ出版社, 1990.

감사의 글

본 논문을 맺기까지 부족한 저를 사랑과 채찍으로 이끌어 주시고 학문의 길을 열어 주신 김천덕 교수님께 깊은 감사와 존경의 마음을 드리며, 바쁘신 중에도 아낌없는 관심으로 논문심사를 위하여 지도와 조언을 해주신 하강렬 교수님과 김무준 교수님께 진심 어린 감사를 드립니다.

이 논문을 위해 많은 관심과 도움을 준 디지털 신호처리 연구실 후배님들과 응용 음향학 연구실 배민건 선생님을 비롯한 후배님들에게 깊은 감사의 마음을 드립니다.

끝으로 항상 변치않는 신뢰를 가지고 묵묵히 지켜 보아준 가족들에게도 감사의 마음으로 이 논문을 바칩니다.