1778 대한기계학회논문집 A 권, 제 27 권 제 10 호, pp. 1778~1784, 2003

공진분기회로를 이용한 평판의 진동제어

김영호* • 박철휴† • 박현철**

(2003 년 4 월 30 일 접수, 2003 년 7 월 24 일 심사완료)

Vibration Control of Plates Using Resonant Shunted Piezoelectric Material

Young Ho Kim, Chul Hue Park and Hyun Chul Park

Key Words : Resonant Shunt Circuit(공진분기회로), Passive Vibration Control(수동진동제어), Electrical Absorber(전기적흡진기), Piezoelectric Material(압전체)

Abstract

Vibration control of plates with a passive electrical damper is presented in this paper. This electrical absorber, piezoelectric patches connected with a resistor and an inductor in series, is analogous to the damped mechanical vibration absorber. For estimating the effectiveness of piezoelectric absorber, the governing equations of motion are derived using a classical laminate plate theory and Hamilton principle. The developed theoretical analysis is validated experimentally for a simply-supported aluminum plate in order to demonstrate the performance of passive electrical damper. The result shows that the vibration amplitude is reduced about 14dB for the targeted first vibration mode.

1. 서 론

80 년대 이후 본격적으로 연구되기 시작한 압전체(piezoelectric material)를 이용한 능동제어 방법은 고전압 전원 장치의 필요성과 복잡한 제어 알고리즘으로 인하여 그 성능에 비해 시스템의 설치 고비용의 단점이 존재하였다.

최근에 이르러서는 이러한 단점들을 보완하기 위해 압전체에 부가적인 전기회로(shunt circuit)를 연결시킴으로써 진동에 의해 발생된 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환하여 소산 시키는 전기적 진동 흡진기로써 사용하는 연구가 수행되기 시작하였다. Hagood 와 Von Flotow[1] 등은 저항분기회로 감쇠(resistive shunted damping)와 공진분기회로에 의한 감쇠(resonant shunted damping)에 관하여 재료적인 측면과 시스템적인 측면에서의 이론적인 고찰 및 시스템의 이론적인 전달함수를 수식화하고 이를 실험과 비교하였다.

Hollkamp[2]은 공진분기회로 시스템의 특성에 따라 스스로 동조 주파수를 조절하는 자기동조(self-tuning) 압전 감쇠기에 대한 연구를 수행하였으며, Park[3] 등은 공진 분기회로의 특성상 낮은 주파수 영역에서 큰 인덕턴스를 필요로 하는 단점을 극복하기 위해서 인덕턴스를 줄이는 대신에 캐패시턴스를 추가 시킴으로써 공진분기회로의 성능을 향상시켰다. 압전체를 이용하여 진동 감쇠기로써의 역할을 함과 동시에 작동기의 역할도 할 수 있는 연구도 수행되었는데 Tang 와 Wang[4] 등은 다양한 형태의 Active-passive hybrid piezoelectric networks (APPN)의 진동 감쇠 성능 향상에 대한 연구를 수행 하였다.

본 연구에서는 압전체에 공진분기회로(resonant shunt circuit)를 전기적으로 연결시킨 압전체를 수동감쇠기로서 이용하여 사각 평판의 특정 진동모드만을 감쇠 시키는 선택적인 진동모드 제어를 수행하였다. 압전체가 부착된 사각 판의 시스템 모델링은 고전 판이론과 해밀턴의 원리를 이용하여 시스템의 모드 운동방정식을 유도하였으며, 기계적 진동 흡진기 모델을 적용하여 시스템의 전달함수를 구함으로써 공진분기회로가 시스템의 특정 진동모드에 미치는 감쇠 효과를 해석적으로 시뮬

† 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과
Email: drparkch@postech.ac.kr
TEL : (054)279-2962 FAX : (054)279-5899
* 포항공과대학교 대학원 기계공학과
** 회원, 포항공과대학교 기계공학과

레이션 하였고 이를 실험 결과와 비교 분석하였다. 실험은 단순지지 경계조건 하에서 수행되었으며 실험 결과 사각 판의 1 차 진동모드에서 약 14 dB 의 진동제어 성능을 보였다.

2. 이 론

2.1 시스템의 운동방정식

시스템의 운동방정식을 구하기 위하여 판이론과 해밀턴 원리가 이용되었으며 또한 패치 형태의 압전체를 고려하기위해 계단함수(Heaviside's function)를 이용하였다.

2.1.1 변형율-변위 관계

본 논문에 이용된 판이론은[5] 판의 중립면의 변형이 없고 처짐이 작은 경우의 판이론인 kirchhoff 가정에 의하여 다음과 같이 변형률-변위의 관계는 나타내어 진다.

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x},\quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y},\quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \tag{1}$$

식 (1)을 z 성분에 관하여 적분을 행하면 다음과 같다.

$$u = u_0(x,y) - z\frac{\partial w}{\partial x},\ v = v_0(x,y) - z\frac{\partial w}{\partial y},\quad w = w(x,y) \tag{2}$$

식 (2)에서 중립면에서의 x,y 방향으로의 변위를 나타내는 u_0 와 v_0 는 고전 판이론의 가정에 의하여 $u_0 = v_0 = 0$ 이 된다. 식 (1)과 (2) 을 이용하여 x, y, xy 방향의 변형률을 변위 w 에 관하여 나타내어 보면 다음과 같다.

$$\varepsilon_x = -z\frac{\partial^2 w}{\partial x^2},\ \varepsilon_y = -z\frac{\partial^2 w}{\partial y^2},\ \gamma_{xy} = -2z\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \tag{3}$$

2.1.2 운동방정식

Fig. 1 와 같이 판에 압전체가 패치 형태로 부착된 시스템의 운동방정식을 유도하기 위해서 에너지 방법중의 하나인 해밀턴원리(Hamilton's principle)를 이용하였으며 다음과 같은 가정을 통하여 유도되었다: 1) 압전체는 판과 완전히 부착되었으며 접착층의 두께는 무시된다. 2) 압전체의 전극의 두께는 무시된다. 3) 압전체의 전극 방향은 양의 횡방향 변위 방향과 일치한다. 4) 회전관성은 무시된다.

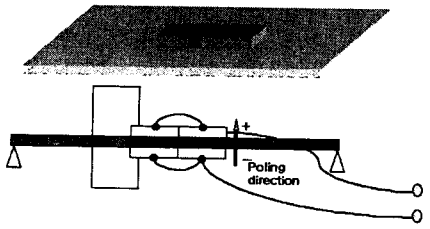

Fig. 1 Schematic diagram of piezo/plate system

해밀턴 원리를 적용하면 다음과 같다.

$$\int_{t1}^{t2}\left[\delta T_p + 2\delta T_s - \delta U_p - 2\delta U_s - 2\delta U_{ES} - \delta W_v\right]dt = 0 \tag{4}$$

식 (4)에서 아래 첨자 p,s 는 각각 판과 압전체를 나타낸다. 즉, T_p 는 판의 운동 에너지, T_s 는 압전체의 운동 에너지, U_p 는 판의 변형률 에너지, U_s 는 압전체의 변형률 에너지, U_{ES} 는 압전체의 전기적인 에너지, 그리고 W_v 는 가상일 (virtual work) 항이며 각각을 구해 보면 다음과 같다.

$$T_p = \frac{1}{2}\int_A \rho_p h_p \left(\frac{\partial w}{\partial t}\right)^2 dxdy$$

$$T_s = \frac{1}{2}\int_A \rho_s h_s \left(\frac{\partial w}{\partial t}\right)^2 \Delta H dxdy$$

$$U_p = \frac{1}{2}\int_A D_p \left\{\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)^2 + 2\nu_p \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2(1-\nu_p)\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}\right)^2\right\} dxdy$$

$$U_s = \frac{1}{2}\int_A D_s \left\{\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)^2 + 2\nu_s \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2(1-\nu_s)\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}\right)^2\right\} \Delta H dxdy$$

$$U_{ES} = \frac{1}{2}\int_A \left\{\beta_{33} h_s D_3^2 + h_{31} J_s D_3^* \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right) + h_{32} J_s D_3^* \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right) + h_{31} J_s D_3 \left(\frac{\partial^2 w^*}{\partial x^2}\right) + h_{32} J_s D_3 \left(\frac{\partial^2 w^*}{\partial y^2}\right)\right\} \Delta H dxdy$$

$$W_v = 2V_s \int_A D_3 \Delta H dxdy + \int_A \left(f(x,y,t)w(w,y,t) - c_b \frac{\partial w}{\partial t} w\right) dxdy \tag{5}$$

식 (5)에서 h는 압전체가 대칭적으로 부착된 평판의 중립면으로부터의 거리, $J_s=\frac{1}{2}(Z_{us}^2-Z_{ls}^2)$ 이고 D_3는 압전체의 전기적 변위이다. 그리고 V_s, $f(x\,y\,t)$, c_b는 각각 압전체에 작용하는 전압과 외력 그리고 감쇠 상수를 나타낸다. D_3^*와 w^*는 에너지 방법을 적용할 때 변분 원리(variational principle)를 취할 수 없는 변수를 나타낸다. 식 (5)를 이용하여 압전체가 패치형태로 대칭적으로 부착된 평판의 운동방정식을 구해보면 다음과 같다.

$$\rho_p h_p\left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}\right)+2\rho_s h_s\left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}\right)+D_p\left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}\right)+D_p\left(\frac{\partial^4 w}{\partial y^4}\right)+2D_p v_p\left(\frac{\partial^4 w}{\partial y^2\partial x^2}\right)+2D_p(1-v_p)\left(\frac{\partial^4 w}{\partial y^2\partial x^2}\right)+\Pi_1\triangle H+\Pi_2\frac{\partial\triangle H}{\partial x}+\Pi_3\frac{\partial\triangle H}{\partial y}+\Pi_4\frac{\partial^2\triangle H}{\partial x^2}+\Pi_5\frac{\partial^2\triangle H}{\partial y^2}+\Pi_6\frac{\partial^2\triangle H}{\partial y\partial x}+c_b\frac{\partial w}{\partial t}=F \tag{6}$$

식 (6)에서 $\Pi_1\sim\Pi_6$는 아래와 같다.

$$\Pi_1=\left[2D_s\left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}\right)+2v_s\left(\frac{\partial^4 w}{\partial y^4}\right)+4D_s v_s\left(\frac{\partial^4 w}{\partial y^2\partial x^2}\right)+4D_p(1-v_p)\left(\frac{\partial^4 w}{\partial y^2\partial x^2}\right)\right]$$

$$\Pi_2=\left[4D_s\left(\frac{\partial^3 w}{\partial x^3}\right)+4D_s v_s\left(\frac{\partial^3 w}{\partial y^2\partial x}\right)+4D_s(1-v_s)\left(\frac{\partial^3 w}{\partial y^2\partial x}\right)\right]$$

$$\Pi_3=\left[4D_s\left(\frac{\partial^3 w}{\partial y^3}\right)+4D_s v_s\left(\frac{\partial^3 w}{\partial y\partial x^2}\right)+4D_s(1-v_s)\left(\frac{\partial^3 w}{\partial y\partial x^2}\right)\right]$$

$$\Pi_4=\left[2D_s\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)+2D_s v_s\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)+D_3\right]$$

$$\Pi_5=\left[2D_s\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)+2D_s v_s\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)+D_3\right]$$

$$\Pi_6=\left[4D_s(1-v_s)\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y\partial x}\right)\right]$$

여기서 D_3항은 압전체에 의해서 부가적으로 발생하는 감쇠효과에 영향을 미치는 항이다.

2.2 모달 운동방정식

식 (6)의 운동방정식을 이용하여 각각의 모드별로 분리된 모달 운동방정식을 구한 후 공진분기회로에 의해 각각의 모드에 부가적으로 증가된 모달 감쇠량의 영향을 알아 보기위해 참고논문(1)에서 사용된 진동 흡진기 시스템의 전달 함수를 이용하여 공진분기회로에 의한 영향을 알아보고자 한다.

2.2.1 모달 운동방정식

2 차원 평판의 횡방향 변위 $w(x,y)$는 다음과 같이 변수 분리되어 질 수 있다.[6]

$$w(x,y,t)=\sum_{m=1}\sum_{n=1}W_{mn}(t)\Phi_{mn}(x,y) \tag{7}$$

여기서 $W_{mn}(t)$와 $\Phi_{mn}(x,y)$는 각각 평판의 (m,n) 모드에서의 시간만의 함수와 모달 형상 함수이다. 변수 분리와 모드 직교성을 이용해 모달 운동방정식을 구하기 위해 앞에서 구한 시스템의 운동방정식 (6)에 식 (7)를 대입한 후 양변에 (m,n)모드의 고유함수 $\Phi_{mn}(x,y)$를 곱하여 모달 운동방정식을 구해보면 다음과 같다.

$$M\ddot{W}_{mn}(t)+(C_b+C_{shunted})\dot{W}_{mn}(t)+KW_{mn}(t)=F \tag{8}$$

여기서 M, C_b, K는 각각 모달질량, 모달감쇠, 모달강성이며 F와 $C_{shunted}$는 각각 시스템에 가해지는 외력과 공진분기회로에 의해 발생된 부가적인 모달감쇠이며 각각은 다음과 같다

$$M=\rho_p h_p\int_A\Phi\Phi\,dxdy+\rho_s h_s\int_A\Phi\Phi\Delta H\,dxdy$$

$$C_b=c_b\int_A\Phi\Phi\,dxdy$$

$$K=\int_A\left\{\left[D_p\left(\frac{\partial^4\Phi}{\partial x^4}+\frac{\partial^4\Phi}{\partial y^4}+2v_p\frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2}\frac{\partial^2\Phi}{\partial y^2}+2(1-v_p)\frac{\partial^4\Phi}{\partial x^2\partial y^2}\right)\right]\Phi+\left[D_s\left(2\frac{\partial^4\Phi}{\partial x^4}+2\frac{\partial^4\Phi}{\partial y^4}+4v_s\frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2}\frac{\partial^2\Phi}{\partial y^2}+4(1-v_s)\frac{\partial^4\Phi}{\partial x^2\partial y^2}\right)\right]\Phi\Delta H+\left[D_s\left(4\frac{\partial^3\Phi}{\partial x^3}+4v_s\frac{\partial^3\Phi}{\partial x\partial y^2}+4(1-v_s)\frac{\partial^3\Phi}{\partial x\partial y^2}\right)\right]\Phi\frac{\partial\Delta H}{\partial x}+\left[D_s\left(4\frac{\partial^3\Phi}{\partial x^3}+4v_s\frac{\partial^3\Phi}{\partial x^2\partial y}+4(1-v_s)\frac{\partial^3\Phi}{\partial x^2\partial y}\right)\right]\Phi\frac{\partial\Delta H}{\partial y}+\left[D_s\left(2\frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2}+2v_s\frac{\partial^2\Phi}{\partial y^2}\right)\right]\Phi\frac{\partial^2\Delta H}{\partial x^2}+\left[D_s\left(2\frac{\partial^2\Phi}{\partial y^2}+2v_s\frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2}\right)\right]\Phi\frac{\partial^2\Delta H}{\partial y^2}+\left[D_s\left(4(1-v_s)\frac{\partial^2\Phi}{\partial x\partial y}\right)\right]\Phi\frac{\partial^2\Delta H}{\partial x\partial y}\right\}dxdy \tag{9}$$

여기서 ΔH는 계단함수 $H(x-x_1)-H(x-x_2)$이다.

2.2.2 시스템의 일반화된 전달함수

공진분기회로를 시스템의 관점에서 보면 스프링-감쇠기-질량으로 구성되는 기계적 진동 시스템

의 흡진기와 유사하다. 질량과 시스템의 자체 강성, 그리고 시스템의 자체 강성과 평행하게 연결된 모달 임피던스가 첨가된 시스템에 외력이 가해질 때의 힘과 변위에 관한 시스템의 일반화된 전달함수는 다음과 같다.[1]

$$\frac{x}{F/K_{total}} = \frac{\left\{\left(\delta^2+\Omega^2\right)+\delta^2 r\Omega\right\}}{\left\{\left(1+2\xi\Omega+\Omega^2\right)\left(\delta^2+\Omega^2+\delta^2 r\Omega\right)+K_{ij}^2\left(\Omega^2+\delta^2 r\Omega\right)\right\}} \tag{10}$$

식 (10)에서 사용된 각각의 무차원화 변수들은 각각 무차원 주파수 $\Omega = s/\omega_n^E$, 전기적인 감쇠계수 $r = RC_p^s\omega_n^E$, 동조비(tuning ratio) $\delta = \omega_e/\omega_n^E$, 전기적인 공진주파수 $\omega_e = 1/\sqrt{LC_p^s}$, 단선상태(short circuit)의 압전체가 부착된 시스템의 기계적인 공진주파수 $\omega_n^E = \sqrt{\left(K+K^E\right)/M}$ 이다. 일반화된 전기-기계적인 연성계수(generalized coupling coefficient) K_{ij} 는 다음과 같다.[1]

$$K_{ij}^2 = \left(\frac{K^E}{K+K^E}\right)\left(\frac{k_{ij}^2}{1-k_{ij}^2}\right) \tag{11}$$

식 (11)에서 K, K^E 는 각각 평판-압전체 시스템의 모달강성과 단락상태에서의 모달강성을 나타낸다. 식 (9)에서 구한 압전/보 시스템의 모달질량, 모달감쇠, 모달강성을 정의된 무차원 변수를 구하여 1 차 자유도 시스템의 전달함수 식 (10)에 대입함으로써 이론적 시뮬레이션을 통한 해석적인 결과를 얻을 수 있다. 즉 본 논문에서 제시한 이론을 이용하면 실험적 결과에 의존 없이 이론적 시뮬레이션이 가능하다.

3. 실험방법 및 결과

3.1 실험장치 및 방법

실험에 이용된 압전체는 후지세라믹사의 평판형태(plate type) 작동기용 압전 세라믹으로 길이, 폭, 두께가 $50\times20\times0.5\,mm$ 인 네 개의 패치를 그림 1 에서처럼 알루미늄 판중앙 위와 아래에 각각 두 개식 에폭시를 사용하여 접착 하였다. 평판으로 사용된 알루미늄 판은 길이, 폭,두께가 $195\times195\times1\,mm$ 이다. 압전 세라믹에 대한 물성치는 Table 1 에 나타내었다. 공진분기회로에 이용된 인덕터는 Fig.2 와 같으며 이는 인덕터와 등가의

Table 1 Main piezoelectric parameters of the PZT

Property	Symbol	Value
Dielectric Const.	$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	3400
Young' s modulus	E_{11}	59 *GPa*
Young' s modulus	E_{33}	52 *GPa*
Coupling Coeff.	k_{31}	0.36
Capacitance	C_p^s	$0.06\,\mu F$
Poisson' s ratio	v_s	0.3

역할을 하여 인덕턴스를 발생시키는 액티브 필터(active filter)이다. 주파수 동조시 발생하는 시행착오 횟수를 감소시키기 위해 회로해석 프로그램인 Pspice 를 이용하였다.

실제 실험 장치의 모습을 각각 Fig. 3 에 나타내었다. 시스템의 주파수 응답을 측정하기 위해 입력으로써 랜덤 전압을 사용하여 지그 위에 설치된 판을 가진 시켰고, 출력전압은 압전체 바로 옆에 부착된 가속도계를 이용하여 측정하였다. 주파수 응답 측정에 필요한 랜덤 전압 입력은 스펙트럼 분석기 내의 소스모듈에서 발생시키는 랜덤 입력전압을 이용하였고, 출력 전압은 가속도계에서 감지한 전하를 전하 증폭기(charge amplifier)를 이용하여 전압으로 변환 시킨 후 이를 출력 전압으로 이용하였다.

3.2 이론 및 실험결과

평판의 (1,1)모드에 대한 실험 및 이론적인 해석을 수행하여 이를 비교 분석하였다. 여기서 사용된(1,1)모드를 진동 제어 하기위한 파라미터 값으로 인덕턴스는 6.65H 와 자유경계조건(constant stress)하에서의 총 축전용량은 $0.24\mu F$ 가 사용되었다. 이때 목표가 된 1 차 모드 고유진동수는 135Hz 이다.

3.2.1 (1,1)모드 진동제어(실험)

본 실험에서는 여러 저항을 번갈아 사용하는 시행착오 법을 사용하여 먼저 15000 Ω 부터 차례대로 공진분기회로의 저항 값을 감소시키며 실험을 하였으며 이에 대한 시스템의 주파수 응답을 측정하여 Fig. 4 에 나타내었다.

Fig. 4 에서 알 수 있듯이 저항 값을 줄임에 따라서 제어 효과가 증가하게 되는데, 그 이유는 전기적인 관점에서 직렬 RLC 공진회로에서 저항 값이 줄어들수록 같은 전압 값에 대해서 더 큰 전류가 흐르므로써 Q factor 가 증가하기 때문이다.

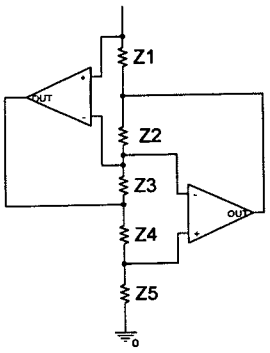

Fig. 2 Electrical circuit diagram of an active filter [7]

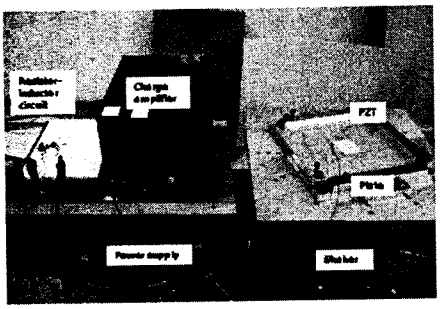

Fig. 3 Experimental setup for piezo/plate system

하지만 저항 값이 너무 작아지면 오히려 감쇠시키고자 하는 주파수에 대칭적으로 진동이 더욱 커지게 되므로 최적의 저항 값은 대략 650 Ω 정도이며 약 14 *dB* 정도의 진동 감쇠 효과가 있다. 또한 본 실험에서 공진 분기회로에 의한 진동감쇠는 감쇠 시키고자 하는 모드 외에는 영향을 미치지 않음 목격할 수 있었다.

3.2.2 (1,1)모드 진동제어(해석)

실험에서 사용되어진 압전체의 전기-기계적인 연성 계수가 k=0.36 을 사용하여 해석적인 시뮬레이션 결과를 각각 Fig. 5 에 나타내었다. 그림에서 보여진 결과에 의하면 저항값 (b) 15000 Ω (c) 4000 Ω 을 사용했을 때 압전/판 시스템의 주파수 응답 함수는 일치하는 경향을 보이나 저항값이 낮아질수록 실험치와는 일치하지 않는 경향을 보인다. 이는 인위적 인덕터에서 발생하는 주파수 증가에 따라 증가하는 잠재 저항과 전기부품소자에서 발생하는 저항에 의한 것이다[3].

이러한 단점을 극복하고 실험치를 예견할 수 있는 해석적인 시뮬레이션을 위해 연성계수, k, 를 0.17 로 두고 , 해석적인 결과를 얻었다[Fig. 6]. 해석에 사용된 저항값은 실험에서 사용된 저항값과

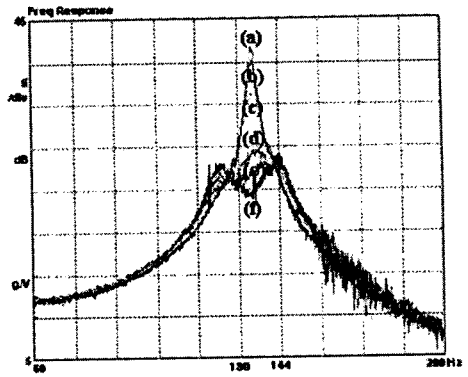

Fig. 4 Experimental transfer response of the piezo/plate system for the (1,1) vibration mode: (a) open (b) 15000 Ω (c) 4000 Ω (d) 1000 Ω (e) 650 Ω (f) 450 Ω

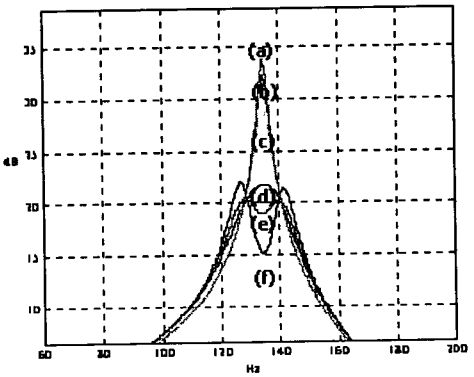

Fig. 5 Analytical transfer response of the piezo/plate system for the (1,1) vibration mode, k=0.36: (a) open (b) 15000 Ω (c) 4000 Ω (d) 1000 Ω (e) 650 Ω (f) 450 Ω

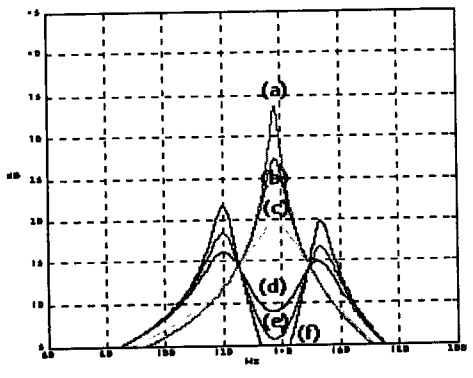

Fig. 6 Analytical transfer response of the piezo/plate system for the (1,1) vibration mode, k=0.17: (a) open (b) 15000 Ω (c) 4000 Ω (d) 1000 Ω (e) 650 Ω (f) 450 Ω

Table 2 Normalized vibration amplitude for (1,1) mode

Resistance	Experiment	Theory
15000 Ω	0.5561	0.5937
4000 Ω	0.5144	0.5330
1000 Ω	0.4171	0.4043
650 Ω	0.3754	0.3492
400 Ω	0.337	0.2794

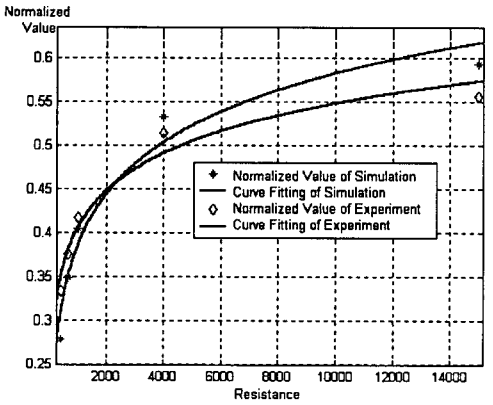

Fig. 7 Comparison between experimental result and analytic simulation result for the (1,1) mode

같은 값을 사용하였다. 실험에서와 마찬가지로 저항 값이 줄어들수록 시스템의 진동감쇠 효과가 증가 하였으며 저항값 650 Ω 에서 최적의 진동감쇠 효과를 나타내었다.

3.2.3 (1,1)모드에 대한 실험과 해석의 비교

해석적인 방법에 의한 주파수 응답은 모달 방정식에 대한 주파수 응답이므로 이를 실험결과와 비교 할 때 각각의 모드의 중첩(superposition)에 의해 나타나는 주파수응답의 경우에 다른 모드의 겹침(overlapping) 효과가 커서 스펙트럼 분석기에 나타나는 주파수응답과 한 모드만을 고려한 해석적인 시뮬레이션에 의해서 구해진 모달주파수 응답의 직접적인 절대 값 비교는 무리가 있다고 생각되어 본 논문에서는 보다 더 정확한 해석을 위해서 각각의 저항 값에 따른 주파수응답 크기를 0 과 1 사이의 값들로 정규화(normalization)하여 그 값들의 오차를 비교 하였다. Table 2 에서 k=0.17 로 가정한 해석적인 결과와 실험값이 비교적 잘 일치하고 특히 최적저항 값 근처에서의 오차는 더욱 작기 때문에 실험적으로 찾기 어려운 최적저항 값을 이론적으로 쉽게 찾아낼 수 있었다.

Table 2 에 나타내었던 이론적인 값과 실험값과의 오차를 curve fitting 을 시행한 결과를 Fig. 7 에 나타내었다. Fig. 7 에서 보여지듯이 최적저항 값 근처에서는 저항 값이 작아짐에 따라서 감쇠효과가 급격히 커지는 현상을 보이는데, 이는 공진분기회로의 Q factor 가 저항 값에 따라 선형적으로 변화하지 않고 최적저항 값 근처에서부터는 지수 함수적으로 증가하기 때문에 그만큼 기계적인 진동에너지가 전기에너지로 많이 변환되어 소모되기 때문이다.

4. 결 론

압전체에 인덕터와 저항을 연결시킨 공진분기회로를 이용하여 압전/평판 시스템의 (1,1)진동모드의 감쇠를 실험적, 이론적으로 수행하였다. 압전체가 부착된 사각 판의 시스템 모델링은 고전 판 이론과 해밀턴의 원리를 이용하여 시스템의 모드 운동방정식을 유도하였으며, 기계적 진동 흡진기 모델을 적용하여 시스템의 전달 함수를 구함으로써 공진분기회로가 시스템의 특정 진동모드에 미치는 감쇠 효과를 해석적으로 시뮬레이션 하였고 이를 실험 결과와 비교 분석하였다. 인위적 인덕터에서 발생하는 주파수 증가에 따라 증가하는 잠재 저항과 전기부품소자에서 발생하는 저항과 그리고 시스템의 실험적 경계조건의 불완전성, 압전체의 생산 명세서의 오차에 의한 에러가 발생하는 이러한 단점을 극복하고 정확한 결과를 예측할 수 있는 해석적인 시뮬레이션을 위해 연성계수를 조절함으로써 최적의 진동감쇠 효과를 나타내는 최적저항 값을 이론적으로 찾아 낼 수 있었다.

후 기

본 논문은 두뇌한국 21 사업에 의해서 수행되었음

참고문헌

(1) Hagood, N. W. and von Flotow, A., 1991, "Damping of Structural Vibration with Piezoelectric Materials and Passive Electrical Networks," *Journal of sound vibration*, Vol. 146(2), pp. 243~268.

(2) Hollkamp, J.J., 1994, "A Self-tuning Piezoelectric Vibration Absorber," *Journal of intelligent material system and structures*, Vol. 5, pp. 559~566.

(3) Park, C. H., Inman, D. J, 2003, "Enhanced Piezoelectric Shunt Design," *Journal of Shock and Vibration*, Vol. 10(2), pp. 127~133.

(4) Tang. J. and Wang, K. W., 2001, "Active-passive

Hybrid Piezoelectric Networks for Vibration Control: Comparisons and Improvement," *Smart materials and structures*, Vol. 10, pp. 794~806.

(5) Reddy, J.N., 1997, *Mechanics of Laminated Plates: Theory and Analysis*, Boca Raton, FL: CRC press.

(6) Meirovitch,L.,1997, *Principles and Techniques of Vibrations*, London, Prentice Hall.

(7) Horowitz, P. and Hill, W., 1989, *The Art of Electronic,* Press Syndicate of the University of Cambridge.

(8) Seungju Choi, Hyunchul Park and Woonbong Hwang, 2001, "Active Vibration Control of a Cylindrical Rod Transmitting Axial Load," *Trans. Of the KSME, A*, Vol. 25, No. 12, pp.1950~1959.

(9) Moon, S. H., Yun, C. Y. and Kim, S. J., 2002, "Passive Suppression of Nonlinear Panel Flutter using Piezoelectric Materials with resonant Circuit," *KSME International Journal*, Vol. 16, No.1, pp. 1~12.