

# 압전 분기회로를 이용한 다중모드제어

## Multiple-Mode Vibration Control Using Piezoelectric Shunted Actuator

박철휴\*  
Chul. H. Park

**Key Words** : Shunt Circuit (분기 회로), Multiple Mode (다중 모드), Vibration Control (진동 제어)

### ABSTRACT

This paper deals with a novel shunted actuator, which has a capability to suppress multi-mode vibration amplitudes by using a pair of piezoceramic patches. In order to describe the characteristic behaviors of shunted dampers connected with a series and a parallel resistor-negative capacitive branch circuit, the stiffness ratio and loss factor with respect to the non-dimensional frequency are considered. To obtain a guideline model of a piezo/beam system connected with a series and a parallel resistor-negative capacitor branch circuit, the governing equations of motion is derived through Hamiltons principle and a piezo sensor equation as well as a shunt damping matrix is developed. The theoretical analysis shows that the shunted actuator developed in this study can significantly reduce multiple-mode vibration amplitudes simultaneously over the whole structural frequency range.

### 1. 서론

분기회로 (shunt circuit)를 사용한 다중모드 (multiple mode)의 구조적 진동제어는 진동 감쇠 성능과 낮은 동력의 요구로 인한 가능성과 안정성으로 인해 흥미로운 주제중의 하나였다. Hollkamp<sup>(1)</sup>은 다중 모드 분기 네트워크 (shunt network)로 연결된 단일 압전 소자를 사용하는 것으로 다중 모드들을 강제 제어하기 위한 이론을 개발하였다. Wu<sup>(2)</sup>는 불필요한 전류 주파수를 걸러낼수있는 필터회로를 개발하여 다중 진동 모드들의 감쇠를 할 수 있는 분기 네트워크를 발표하였고 Browning과 Wynn<sup>(3)</sup>은 공명 분기기법(R-L 회로)과 함께 판재의 표면에 부착시킨 다중 압전소자(piezoceramic)를 사용한 다중 진동 모드들의 동

시적 감쇠를 수행하는 실험을 수행했다. 하지만, 이러한 방법들은 진동 증폭 감쇠의 한계로 인한 결함을 가지고 있다.

이 논문에서는 음극 축전기(negative capacitive) 분기회로를 이용한 다중 진동 모드 감쇠방법을 소개한다.

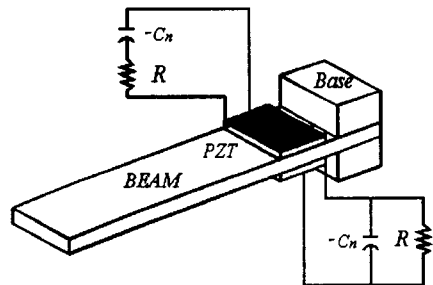


Fig. 1 A schematic drawing of the shunted piezo/beam system

\* 포항공대 기계공학과  
E-mail : drparkch@postech.ac.kr  
Tel : (054) 279-2962, Fax : (054) 279-5899

그림 1에 보여진 것과 같이 보위에 부착된 압전 (piezo) 패치는 저주파 진동 진폭들을 조절하기 위

하여 직렬 저항기-음극축전기 (resister-negative capacitor) 분기회로와 연결된다. 보 아래 부착된 다른 패치는 고주파에서 진동모드들을 억제하기 위하여 병렬 저항기-음극축전기 분기회로와 연결된다. 운동 방정식과 분기된 압전/보 시스템의 연관된 경계 조건들은 해밀턴의 원리를 사용하여 구해진다. 경계조건을 만족하는 형상함수(shape function)는 시스템의 굴곡 운동을 분석하기 위해 사용된다. 그 얻어진 결과들은 negative capacitive 분기 작동기가 광대역 주파수 범위를 통한 다중모드의 진동 감쇠를 위한 유효한 도구임을 보여준다.

## 2. 음극 축전기 분기감쇠기의 특성

분기회로의 특성은 강성비,  $\bar{E}(\omega)$ ,와 주파수에 의존하는 재료 손실계수,  $\eta(\omega)$ ,에 의해 표현되는 무차원 기계적 임피던스  $\bar{Z}_{ME}$  로써 나타낼 수 있다.

$$\bar{Z}_{ME} = \bar{E}(\omega)[1 + \eta(\omega)] \quad (1)$$

음극 축전기 분기 감쇠기의 무차원 기계적 임피던스는 주파수에 의존하는 점탄성 재료의 전단계수와 비슷한 특성을 보인다. 압전 분기회로의 무차원 기계적 임피던스를 구하기 위해 분기회로의 전류와 변형률은 아래처럼 유도할 수 있다.

$$I = \frac{1}{Z_{PZT}} V_{SH} + sAdT \quad (2)$$

$$S = \frac{d}{t} V_{SH} + s^E T \quad (3)$$

여기서  $Z_{PZT}$  는 아래 식(4)과 같이 주어지는 압전 소자의 임피던스 이다

$$Z_{PZT} = \frac{1}{sC_p^T} \quad (4)$$

이때  $C_p^T$ 는 스트레스가 일정한 상태에서의 압전 소자의 내부 축전용량(capacitance)이며  $s$ 는 라플라스 복소변수이다. 전류  $I$ 는 외부 힘에 의해서 발생되며 이 전류가 다시 압전재료로 되먹임 된다. 그림 2에서 보여지는 바와 같이  $V_{SH}$ 는 분기회로에 걸리는 전압이며  $S$ 와  $T$ 는 각각 기계적 변형률 기계적 힘이다. 식(2)에서  $A$ 와  $d$ 는 각각 압전 재료 전극 면적의 대각 행렬과 압전상수이다. 또한  $t$ 는 압전재료가 부착된 보의 두께에 대한 행렬이다.

그림 2에 의하면 분기회로의 전압은 다음과 같다.

$$V_{SH} = -Z_{SH}I \quad (5)$$

여기서  $Z_{SH}$ 는 분기회로의 전기적 임피던스이다. 분기회로의 전압은 식(5)의 분기회로 전류를 식(2)에 대입함으로써 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{SH} = -sAZ_{EL}dT \quad (6)$$

여기서  $\frac{1}{Z_{EL}} = \frac{1}{Z_{PZT}} + \frac{1}{Z_{SH}}$  이다.

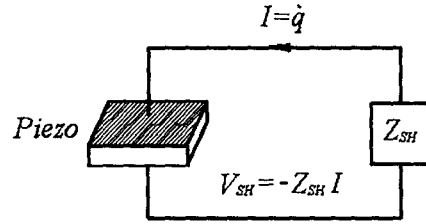


Fig.2 Feedback shunt voltage generated due to shunt impedance

식(6)을 식(3)에 대입하여 분기회로의 변형률을 나타내보면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} S_{SH} &= \frac{d}{t} (-sAZ_{EL}dT) + s^E T \\ &= s^E T (1 - s C_p^T k_{ij}^2 Z_{EL}) \\ &= s^E T (1 - k_{ij}^2 \bar{Z}_{EL}) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $k_{ij} = \frac{d_{ij}^2}{s^E \epsilon_i^T}$ 이며 무차원 전기적 임피던스는  $\bar{Z}_{EL} = Z_{EL}/Z_{PZT}$  이다.

Hagood 와 von flotow<sup>(4)</sup>가 표현한 무차원 기계적 임피던스,  $\bar{Z}_{ME}$ , 는 아래와 같다.

$$\bar{Z}_{ME} = \frac{S^D}{S_{SH}} = \frac{(1 - k_{ij}^2)}{(1 - k_{ij}^2 \bar{Z}_{EL})} \quad (8)$$

그림 1에서 보여지는 분기회로의 음극 축전기 분기회로에 대한 무차원 전기적 임피던스는 아래와 같이 주어진다.

직렬 분기회로

$$\bar{Z}_{EL}^{SE} = \frac{(sRC_n^T - 1)C_p^T}{C_n^T - C_p^T + sRC_p^T C_n^T} \quad (9a)$$

병렬 분기회로

$$\bar{Z}_{EL}^{PA} = \frac{sC_p^T R}{1 + sC_p^T R - sC_n^T R} \quad (9b)$$

여기서  $-C_n^T$ 는 음극 축전기의 값이며 이 값은 임피던스값을 동일하게 하기위한 압전재료 본래의 고유한 축

전용량(capacitance)  $C_p^T$ 와 같은 값을 가지게 된다.

직렬 분기회로

$$\bar{Z}_{ME}^{SE} = \frac{\rho^2}{k_{ij}^4 + \rho_i^2} + i \frac{\rho k_{ij}^2}{k_{ij}^4 + \rho_i^2} \quad (10a)$$

병렬 분기회로

$$\bar{Z}_{ME}^{PA} = \frac{(1 - k_{ij}^2)^3}{(1 - k_{ij}^2)^2 + (k_{ij}^2 \rho_i)^2} + i \frac{\rho k_{ij}^2 (1 - k_{ij}^2)^2}{(1 - k_{ij}^2)^2 + (k_{ij}^2 \rho_i)^2} \quad (10b)$$

여기서  $\rho_i$ 는 무차원 주파수이며 아래와 같이 나타내어진다.

$$\rho_i = R_i C_p^S \omega = \omega / \omega_e \quad (11)$$

이때  $C_p^S = C_p^T (1 - k_{ij}^2)$  이다. 식(1)에 의하여 강성비(분기회로가 부착되었을 때의 강성과 단락 상태에서의 강성비)  $\bar{E}$  와 재료 손실계수  $\eta$  는 아래와 같이 나타내어진다.

직렬 분기회로

$$\bar{E}^{SE}(\omega) = \text{Re}(\bar{Z}_{ME}^{SE}) = \frac{\rho_i^2}{k_{ij}^4 + \rho_i^2},$$

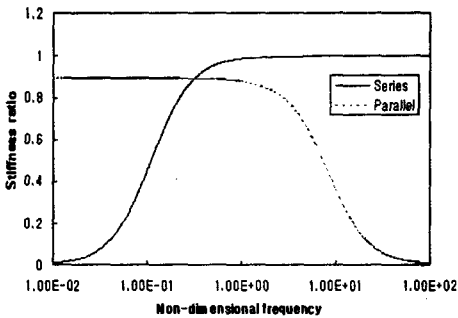
$$\eta^{SE} = \frac{\text{Im}(\bar{Z}_{ME}^{SE})}{\text{Re}(\bar{Z}_{ME}^{SE})} = \frac{k_{ij}^2}{\rho_i} \quad (12a)$$

병렬 분기회로

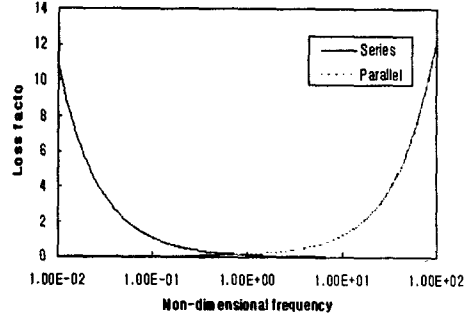
$$\bar{E}^{PA}(\omega) = \text{Re}(\bar{Z}_{ME}^{PA}) = \frac{(1 - k_{ij}^2)^3}{(1 - k_{ij}^2)^2 + (k_{ij}^2 \rho_i)^2},$$

$$\eta^{SE} = \frac{\text{Im}(\bar{Z}_{ME}^{PA})}{\text{Re}(\bar{Z}_{ME}^{PA})} = \frac{\rho k_{ij}^2}{(1 - k_{ij}^2)^2} \quad (12b)$$

그림 3에는 직렬과 병렬 음극축전기 분기회로의 강성비와 손실계수를 무차원 주파수에 대하여 나타내었다. 이 논문에서 사용되어진 전기적-기계적 연성 계수는 0.33이다.



(a) Stiffness ratio



(b) Loss factor

Fig. 3 Material properties of a series and a parallel negative capacitive shunt

병렬 분기회로의 경우에는 무차원 주파수가 증가함에 따라서 강성비가 감소하여 0 으로 접근하는 것을 볼 수 있으며 이와는 반대로 직렬 분기회로의 경우 무차원 주파수가 증가함에 따라서 0 으로부터 점차 증가하는 경향을 볼 수 있다.

### 3. 분기회로가 연결된 압전/보의 운동방정식

음극축전기 분기 회로를 가지는 외팔보로 된 압전/보 시스템의 수학적 모델은 굽힘 진동 거동을 설명하기 위해 개발 되었다. 이 보의 형상 및 물성치는 길이  $l_b$ , 폭  $b_b$ , 두께  $h_b$ , 탄성계수  $E_b$  그리고 밀도  $\rho_b$ 이다. 그리고 압전 물질의 형상 및 물성치는 두께  $h_p$ , 탄성 계수  $E_p$ , 이고 길이방향에서 압전 상수  $d_{31}$ 이다. 압전/보 층의 어떤 수직 단면위의 모든 점에서의 횡방향 변위  $w$ 는 같은 것으로 가정한다. 압전/보 층의 전단 변형과 회전 관성 모멘트는 Bernoulli-Euler 보 이론을 채택함으로써 무시된다. 압전소자 패치의 대칭적인 배열 때문에, 보의 종방향 변위는 영으로 가정한다. 추가적으로, 기본 beam층과 압전 세라믹층은 서로 완전히 결합된 것으로 간주한다.

압전 요소의 구성 방정식은 전기장  $E$ , 전기적인 변위  $D$  뿐만 아니라 기계적인 응력  $\sigma$ , 변형률  $\epsilon$  에 의존한다. 수동 분기감쇠에 있어서 구성방정식의 일반적인 형태는

$$\begin{bmatrix} \sigma \\ E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C & -h \\ -h & \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon \\ D \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서  $C$ 는 일정변위에서의 탄성계수,  $h$ 는 압전 상수, 그리고  $\beta$  는 유전체상수 (dielectric

constant)이다.

압전/보 시스템의 운동에너지는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$T = T_b + 2T_p \quad (14)$$

$$\text{여기서 } T_b = \frac{1}{2} \int_0^l \rho_b A_b \left( \frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 dx,$$

$$T_p = \frac{1}{2} \int_0^l \rho_p A_p \left( \frac{\partial w}{\partial t} \right) [H(x-x_1) - H(x-x_2)] dx$$

압전/보 시스템의 변형률 에너지는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$U = U_b + 2U_p \quad (15)$$

$$\text{여기서, } U_b = \frac{1}{2} \int_0^l E_b I_b \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx$$

$$\begin{aligned} U_p &= \frac{1}{2} \int_V (\epsilon^T \sigma + ED) dV \\ &= \frac{1}{2} \int_0^l \left[ E_p I_p \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + 2A_p h_{33} D z_n \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + A_p \beta_{33} D^2 \right] \\ &\quad \times [H(x-x_1) - H(x-x_2)] dx \end{aligned}$$

여기서  $z_n = \frac{1}{2} h_p (h_b + h_p)$  그리고  $A_b$  와  $A_p$ 는 각각 보와 압전소자층의 단면적이다. 또한,  $I_b$  와  $I_p$ 는 각층의 중립축에 대한 면적 관성 모멘트이다. 위 식에서,  $(x_2 - x_1)$ 는 압전소자 패치의 길이이다. 가상 일은 다음과 같이 4개항으로 구성된다.

$$\delta W = \delta W_{SE} + \delta W_{PA} + \delta W_{ex} + \delta W_{in} \quad (16)$$

여기서

$$\delta W_{SE} = \left[ \left( -R_{SE} + \frac{1}{s} C_n \right) \delta Q \right] [H(x-x_1) - H(x-x_2)]$$

$$\delta W_{PA} = \left[ \left( \frac{-R_{PA}}{1 - s C_n R_{PA}} \right) \delta Q \right] [H(x-x_1) - H(x-x_2)]$$

$$\delta W_{ex} = \int_0^l f(x, t) \delta w dx$$

$$\delta W_{in} = - \int_0^l c_b \frac{\partial w}{\partial t} \delta w dx$$

여기서  $H$ 는 Heavyside 함수이고  $Q$ 는 외력에 의해서 발생하는 전기적인 전하이다.

운동 방정식과 경계조건은 Hamilton 법칙을 적용하면 구할 수 있다:

$$\delta H = \delta \int_{t_1}^{t_2} (T - U + W) dt = 0 \quad (17)$$

변형 에너지와 운동 에너지를 Hamilton 법칙에 대입하면 다음과 같은 운동방정식과 전기적인 회로 방정식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} &\rho_b A_b \left( \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \right) + c_b \left( \frac{\partial w}{\partial t} \right) + E_b I_b \left( \frac{\partial^4 w}{\partial t^4} \right) \\ &+ 2 \left[ \rho_p A_p \left( \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \right) + E_p I_p \left( \frac{\partial^4 w}{\partial t^4} \right) \right] \\ &\quad \times [H(x-x_1) - H(x-x_2)] \\ &= f(x, t) - \frac{1}{2} b_p h_{31} D_3 h_p (h_b + h_p) \\ &\quad \times \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} [H(x-x_1) - H(x-x_2)] \right) \end{aligned} \quad (18)$$

저항기-음극축전기 분기 회로에 연결된 윗면과 아랫면의 압전체에 대한 전기회로 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &\left[ \frac{1}{2} h_{31} h_p (h_b + h_p) \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + \right. \\ &\quad \left. \frac{\beta_{33} h_p}{b I_p} Q - \left( R_{SE} - \frac{1}{s C_n} \right) \frac{dQ}{dt} \right] \\ &\quad \times [H(x-x_1) - H(x-x_2)] = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} &\left[ \frac{1}{2} h_{31} h_p (h_b + h_p) \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{\beta_{33} h_p}{b I_p} Q - \left( \frac{R_{PA}}{1 - s C_n R_{PA}} \right) \frac{dQ}{dt} \right] \\ &\quad \times [H(x-x_1) - H(x-x_2)] = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

외팔보의 횡방향 운동은 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$w(x, t) = \sum_{i=1}^n \phi_i(x) W_i(t) = [\phi]^T [W] \quad (21)$$

여기서  $\phi_i(x) = \cosh \beta_i x - \cos \beta_i x - \sigma_i (\sinh \beta_i x - \sin \beta_i x)$  이다. 여기서 상수  $\sigma_i$ 는 모드형상계수이다.(Inman<sup>(6)</sup>). 이러한 모드형상함수(mode shape function)를 식 (18)의 지배방정식에 적용하면 다음과 같은 이산화된(discretized) 압전/보 시스템의 미분방정식이 나온다.

$$M \ddot{W}(t) + C_b \dot{W}(t) + K W(t) = f_{ext} + f_{piezo} \quad (22) \text{여기서}$$

$$M = \rho_b A_b \int_0^l \phi_i \phi_i^T [H(x-x_1) - H(x-x_2)] dx$$

$$C_b = c_b \int_0^l \phi_i \phi_i^T dx$$

$$K = E_b I_b \int_0^l \phi_i'' \phi_i''^T dx$$

$$+ 2 E_p I_p \int_0^l \phi_i'' \phi_i''^T [H(x-x_1) - H(x-x_2)] dx$$

$$\begin{aligned} f_{piezo} &= - \frac{1}{2} (b_p d_{31} E_p V_{SH}^{SE} (h_b + h_p) \\ &\quad \times \int_0^l \phi_i \delta' (x-x_1) - \delta' (x-x_2) \\ &\quad + b_p d_{31} E_p V_{SH}^{PA} (h_b + h_p) \\ &\quad \times \int_0^l \phi_i \delta' (x-x_1) - \delta' (x-x_2) dx \end{aligned}$$

여기서  $d_{31}$ 은 압전재료상수 (piezoelectric material

constant)이다. 분기전압  $V_{SH}^{SE}$ 과  $V_{SH}^{PA}$ 는 직렬과 병렬로 연결된 저항기-음극축전기 분기회로에서 발생된다. 압전체가 붙어있는 외팔보의 진동에 의해서 압전체에서 발생하는 전하는 전기장변위 (electric field displacement),  $[D]$ 로부터 구할 수 있다 (IEEE Std<sup>(6)</sup>).

$$Q(t) = \int_A D dA \quad (23)$$

$$[D] = [d]^T [T] + [\epsilon]^T [E] \quad (24)$$

여기서  $[d]$ ,  $[T]$ ,  $[\epsilon]$ 와  $[E]$ 는 각각 압전변형률 상수(piezo-electric strain constant), 응력, 유전체 유전율 (dielectric permittivity)와 가해진 전기장 강도 행렬(field strength matrix)를 나타낸다. 모드 형상 함수를 (23)식에 대입하면, 압전 감지기의 출력이 다음과 같이 구해진다.

$$Q_i(t) = [2C_0 D_n + C_p^T (V_{SH}^{SE} + V_{SH}^{PA})] \times [H(x-x_1) - H(x-x_2)] \quad (25)$$

여기서

$$C_0 = d_{31} E_p b_p \left( \frac{h_b + h_p}{2} \right),$$

$$D_n = \int_0^l \frac{\partial^2 \psi_i}{\partial x^2} [H(x-x_1) - H(x-x_2)] dx \quad \text{이다.}$$

압전재료의 전극으로 흐르는 전류는 압전재료 감지기에서 나오는 전하로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I_i(t) = \frac{dQ_i}{dt} = [2C_0 D_n \dot{W}_n(t) + C_p^T (\dot{V}_{SH}^{SE} + \dot{V}_{SH}^{PA})] \times [H(x-x_1) - H(x-x_2)] \quad (26)$$

압전 재료의 내재되어있는 축전용(capacitance),  $C_p$ , 와 외부의 음극축전용량을,  $C_n$ , 같게 놓으면 직렬인 경우와 병렬인 경우의 분기전압은 식(5)에 의해 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$V_{SH}^{SE} = - \left( \frac{1 - sC_p R_{SE}}{s^2 C_p R_{SE}} \right) C_0 D_n \dot{W}_i(t) \quad (27)$$

$$V_{SH}^{PA} = -R_{PA} C_0 D_n \dot{W}_i(t) \quad (28)$$

이러한 분기전압들을 식 (22)의 압전체힘,  $f_{piezo}$ ,에 대입하면 지배 방정식의 최종적인 형태는 다음과 같다.

$$M\ddot{W}(t) + C\dot{W}(t) + KW(t) = f_{ext} \quad (29)$$

여기서  $C = C_b + f_{piezo}$ 이다.

#### 4. 이론적 해석과 토의

음극축전기 분기회로감쇠는 이론적으로 넓은 주파수 대역에 걸쳐서 외팔보의 다중모드 진폭을 줄이는데 적용 될 수 있다. 알루미늄과 piezoceramic의 특성은 표 1에 나타내었다.

Table. 1 Physical and geometrical properties of the beam and piezoceramic

	Young's modulus(pa)	Density (Kg/m <sup>3</sup> )	Length (m)	Width (m)	Thickness (m)
Al	7.1E10	2700	2.0E-1	2.54E-2	0.8E-3
PZT	6.2E10	7800	4.5E-2	2.54E-2	2.6E-4

그림 4는 직렬 저항기-음극축전기 분기회로에 대한 모드를 가정함으로써 수행된 시스템의 응답을 해석적으로 나타낸 것이다. 주파수가 증가함에 따라 진동진폭도 동시에 커짐을 알 수 있다. 이 현상은 직렬 저항기-음극축전기 분기회로의 재료 손실 계수 방정식(12a)을 고려함으로써 설명할 수 있다. 시뮬레이션 결과를 얻기 위해 5 Ohm의 저항과 200 nF의 축전용량을 사용하였다.

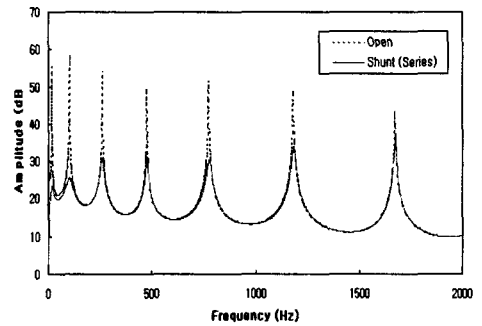


Fig. 4 Analytical frequency response function of shunted piezo/beam system with a series negative capacitive shunting

그림 5는 병렬 저항기-음극축전기 분기회로가 연결된 압전체/보 시스템의 해석적 전달함수응답을 보여준다. 이 때에는 직렬연결 경우와 반대로 주파수가 높아질수록 진폭이 줄어드는 반대의 거동을 보여준다. 재료 손실 계수 방정식(12b)과 그림 3b는 이 현상을 유효하게 설명해준다. 즉, 무차

전기 분기회로의 손실 계수가 증가된다. 이 경우의 시뮬레이션 결과를 얻기 위해 200 Ohm의 저항과 200 nF의 축전용량을 이용하였다

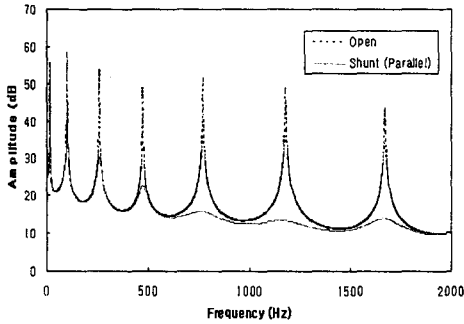


Fig. 5 Analytical frequency response function of shunted piezo/beam system with a parallel negative capacitive shunting

그림 6에서 직렬과 병렬 저항기-음극축전기 분기회로와 동시에 연결된 압전체/보 시스템의 전달함수를 나타내며 이 그림으로부터 시스템 전체의 구조물 모드가 근절되는 것을 볼 수 있다. 병렬 분기회로와 직렬의 분기회로를 결합함으로써 만들어지는 음극축전기 분기작동기는 모든 주파수 대역에 걸쳐서 개방회로의 진폭의 절정값으로부터 25 dB 이상을 감소시킨다.

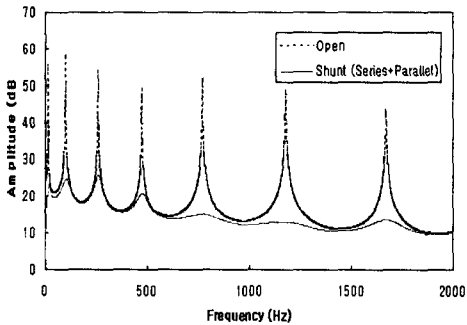


Fig. 6 Analytical frequency response function of shunting piezo/beam system with combined a series with a parallel negative capacitive shunting

## 5. 결론

음극축전기 분기회로 작동기를 이용한 다중모드

진동 감쇠기가 이 논문에서 소개되었다. 직렬 저항기-음극축전기 분기회로와 연결된 보 위의 압전체는 낮은 주파수 영역에서 진동진폭을 억제할 수 있다. 병렬 저항기-음극축전기 분기회로와 연결된 아래 부분의 압전체는 높은 주파수 영역에서 진동을 억제할 수 있다. 두 개의 음극축전기 분기회로를 결합함으로써 전체의 구조 모드를 동시에 억제할 수 있는 다중모드 진동 분기 회로를 만들 수 있다. 이론적 결과들은 전체 주파수 대역에 걸쳐 음극축전기 분기작동기가 압전체/보 시스템의 진동진폭을 25 dB 이상을 효과적으로 감쇠시킬 수 있음을 보여준다.

## 후 기

본 논문은 두뇌한국 21 사업에 의해서 수행되었으며. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- Hollkamp, J. J., 1994, "Multimodal Passive Vibration Suppression with Piezoelectric Materials and Resonant Shunts" J. of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 5, pp. 49-57.
- Wu, S., 1998, "Method for Multiple Mode Piezoelectric Shunting with Single PZT Transducer for Vibration Control" J. of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 9, pp. 991-998.
- Browning, D. R. and Wynn, W. D., 1993, "Multiple-mode piezoelectric passive Damping Experiments for an Elastic plate" Proceedings of the 11<sup>th</sup> international modal Analysis Conference, pp. 1520-1526, Kissimmee, FL.
- Hagood N. W. and von Flotow, A., 1991, "Damping of Structural Vibrations with Piezoelectric Materials and Passive Electrical Networks" J. of Sound and Vibration, 146(2), pp. 243-268.
- Inman, D. J., 1996, Engineering Vibration, Prentice-Hall, Englewood Cliffs NJ.
- IEEE STE 176-1978, 1978, IEEE Standard on piezoelectricity, The institute of Electrical and Electronics Engineers.