

압전센트감쇠 기초이론

김재환*
(인하대학교 기계공학부)

압전센트감쇠란 압전재료를 구조물에 부착시키고 간단한 센트회로를 연결시켜 구조물의 진동에너지를 압전재료에서 전기적 에너지로 변환시킨 후 연결된 회로에서 전기에너지를 열 에너지로 소산시킴으로서 구조물의 진동 및 소음을 저감시키는 방법이다. 이 방법은 공진주파수에서 간단한 회로를 사용하여 효과적으로 진동 및 소음을 저감시킬 수 있으며 구조가 간단하고 가격이 저렴하므로 소음진동의 여러 분야에 응용이 가능하다. 본 글에서는 압전센트 감쇠의 원리와 단일모드, 다중모드의 감쇠 기법의 이론을 소개한다.

1. 압전센트감쇠

압전재료는 기계적 변형을 전기에너지로 전환시키거나 전기에너지를 가함으로써 기계적 변형을 얻어낼 수 있다. 압전감쇠는 전자의 원리를 이용한다. 구조물의 기계적 변형으로부터 압전재료에 저장된 전기에너지는 연결된 센트회로의 부하 저항에서 열에너지로 소산되게 된다. 결국, 진동이나 음향에 의해 가진 되는 구조물의 변형을 일으키게 되고 부착되어있는 구조물과 결합되어 있는 압전재료로부터 전기에너지로 전환되어 회로를 통과하면서 열에너지로 소산됨으로써 구조물의 진동에 의해 전달되는 소음을 저감하게 되는 것이다. 압전재료의 양단에 연결하는 회로요소들 즉, 저항, 인덕터, 캐apasitance 등의 조합된 형태에 따라 여러 종류의 회로를 구성하게 된다.

이러한 부하 임피던스(load impedance)에는 저항으로만 구성된 저항센트(resistive shunt) 저

항과 인덕터로 구성된 공진 센트(resonant shunt) 그리고 저항과 캐apasitance 컨버터 센트(negative capacitance converter shunt)가 있다. 여기서 인덕터와 부캐apasitance 컨버터는 압전재료 양극에 축전된 전하가 보다 많이 저항으로 이동할 수 있도록 하여 에너지 소산을 도와주게 된다.

2. 저항센트

압전재료에 그림 1에서 부하 임피던스에 저항을 연결하면 연결된 저항은 전기회로 측면에서 에너지 소산을 일으키게 되며 따라서 압전

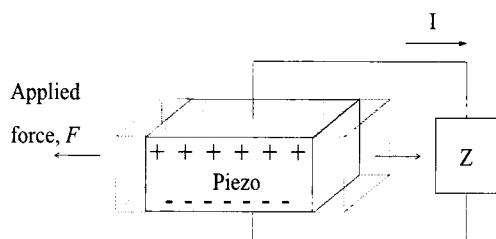


그림 1 압전센트 개념도

* E-mail : jaehwan@inha.ac.kr / Tel : (032)860-7326

재료 자체의 감쇠성질에 부연해서 전체적인 압전감쇠계수를 증가시킨다.

압전재료가 감쇠용 점탄성재료의 대용으로 사용될 수 있는 주된 이유는 압전재료가 온도에 대한 영향이 비교적 작다는 점과(Curie 온도 아래에서) 점탄성재료의 강성이 1 MPa인 것에 비해 63 GPa에 달하는 압전세라믹의 높은 강성 때문이다. 가해진 변형에 대하여 재료의 강성이 크면 클수록 저장할 수 있는 변형에너지가 많기 때문에 압전재료는 실질적으로 점탄성재료보다 손실계수가 크다고 할 수 있다. 압전재료의 강성은 압전재료의 전극 사이의 전기적 경계조건, 즉 전극 사이에 부하 임피던스(여기서는 저항)를 가하였을 때, 그 값에 따라 변하며 이 값은 또한 최대의 손실계수를 갖게 하는 주파수를 변화 시킨다. 따라서 적절한 저항을 선택하면 손실계수가 최대가 되게 하는 주파수를 조절할 수 있으므로 진동을 줄이고자 하는 주파수로 튜닝(tuning)이 가능하다. 즉, 압전재료의 전극 사이에 부하 임피던스가 걸리면 개회로 상태에서의 임피던스에 부하 임피던스가 더해지므로 압전재료의 전기적 특성이 변하게 되며 이에 따라 압전재료의 강성 및 손실계수가 변한다. 이것을 무차원 수식으로 나타내면 다음과 같다⁽¹⁾.

$$E^{RESI}(\omega) = 1 - k_{ij}^2 / (1 + \rho^2) \quad (1)$$

$$\eta^{RESI}(\omega) = \rho \cdot k_{ij}^2 / ((1 + k_{ij}^2) + \rho^2) \quad (2)$$

$$\rho = R \cdot C_{pi}^s \cdot \omega \quad (3)$$

여기서 η^{RESI} 는 감쇠계수, E^{RESI} 는 강성계수, k_{ij} 는 압전상수, R 은 부하저항, $C_{pi}^s = C_p(1 - k_{ij}^2)$, C_p 는 압전재료의 캐패시턴스 그리고 ρ 는 무차원 주파수이다. 그림 2는 압전재료의 강성 및 손실계수를 무차원 주파수에 따라 나

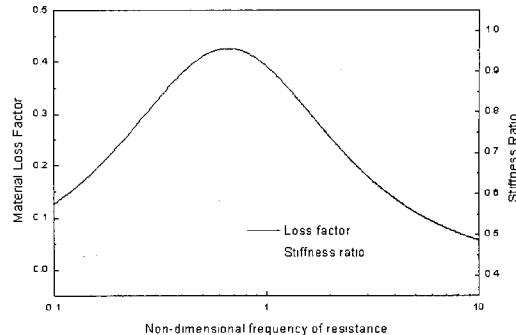


그림 2 저항선탑된 압전재료의 감쇠성질

타내었다. 주어진 부하저항에서 최대 손실계수를 가지는 주파수를 찾을 수 있는데 그 값은 다음과 같다.

$$\eta_{\max}^{RESI} = k_{ij}^2 / 2\sqrt{1 - k_{ij}^2} \quad (4)$$

그리고, 그 위치는 다음과 같다.

$$\rho = \sqrt{1 - k_{ij}^2}$$

압전재료의 감쇠효과는 점탄성재료와 비슷한 경향을 갖는 것을 알 수 있다. 이것을 압전재료의 강성의 변화에 의한 감쇠효과라고 할 수 있으며 저항선탑(resistive shunt)라고도 한다.

3. 공진센트

저항선탑는 회로가 매우 간단하기 때문에 소음진동의 효과적인 저감에 매력이 있다. 압전재료의 전극 양단에 저항을 걸어주면 기계적 에너지를 전극 표면에 자유전하의 형태, 즉 전기적 에너지 형태로 축적되었던 전하 중 일부가 압전재료의 양단에 연결된 선탑회로 내를 흘러 저항을 통하여 열에너지의 형태로 방출되어 에너지를 소산 시킨다. 하지만 압전재료가 가지고 있는 캐패시턴스(capacitance)에 의한

반발적(reactive) 작용 때문에 저항만 연결된 상태에서는 효율적인 에너지 손실이 이루어지지 못한다. 따라서 이 반발적 요소를 상쇄시키기 위하여 인덕터(inductor)를 추가로 연결하게 된다. 이 때 압전재료의 캐패시턴스를 포함한 부하임피던스식은

$$Z^{RES} = R + j(L\omega - \frac{1}{C_p\omega}) \quad (5)$$

위 식에서 알 수 있듯이 임피던스의 허수 부분을 0이 되게 하면 이 회로에 공진이 발생하는데 이 때의 공진주파수는

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{LC_p}} \quad (6)$$

따라서 이 공진주파수에서는 반발적 작용이 서로 상쇄되어 회로내의 전압과 전류 사이의 위상(phase)은 0이 되며 부하 임피던스에는 오로지 실수부분(real part)만 남아 결국 감쇠의 역할을 하게 된다. 즉 압전재료를 포함한 회로내에 구조물의 공진주파수와 일치하는 주파수의 공진을 일으켜서 해당 모드에서 보다 많은 전하가 이동할 수 있게 하여 주어진 저항에서의 에너지 소산을 도와주게 되는 것이다. 손실되는 에너지의 양은 바로 이 저항에 의해 결정이 되므로 적절한 저항을 선택하면 최대의 손실에너지를 얻을 수 있다. 이 방법을 공진센트(resonant shunt)라 한다. 하지만 저항으로 인해 회로 내의 공진주파수가 정확히 구조물의 공진주파수와 일치할 때에 최대의 손실에너지가 발생하는 것은 아니기 때문에, 회로 내의 공진주파수를 결정 짓는 인덕턴스와 저항을 최적화하는 것이 중요하다.

3.1 기계적 모델

압전공진센트는 기계구조물과 공진센트회로

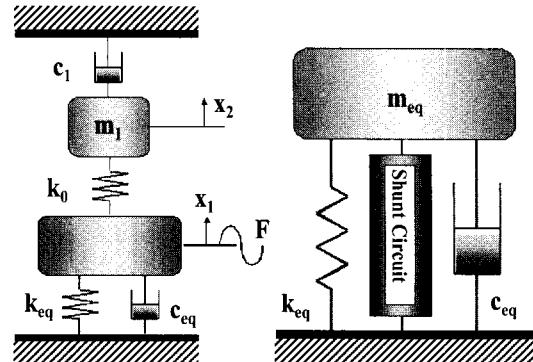


그림 3 기계동흡진기와 압전공진감쇠의 상사

가 압전재료를 통해 결합된 기계-전기 복합시스템이다.

이 시스템은 기계적 시스템 또는 전기적 시스템으로 모델링 할 수 있다. 기계적 시스템으로 모델링하면 그림 3과 같이 나타나는데 이는 기계동흡진기(mechanical vibration absorber)와 유사하다. 즉, 압전공진센트 시스템은 기계동흡진기 시스템과 같은 원리에 의해 제1차 시스템의 진동이 저감됨을 알 수 있다.

기계동흡진기에 힘이 1차 시스템에 입력될 때 속도에 대한 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{v_1}{F} &= [j\omega m_2 + c_2 + \frac{k_2}{j\omega}] / [-\omega^2 m_1 m_2 + \\ &\quad + j\omega(m_1 c_2 + m_2 c_1) + k_1 m_2 + k_2 m_1] \\ &\quad + k_2 m_2 + \frac{k_1 c_2}{j\omega} - \frac{k_2 k_1}{j\omega} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서

$$\begin{aligned} \omega_1^2 &= \frac{k_1}{m_1}, \quad \omega_2^2 = \frac{k_2}{m_2}, \quad \beta = \frac{\omega}{\omega_1}, \quad \alpha = \frac{\omega_1}{\omega_2}, \\ \mu &= \frac{m_2}{m_1}, \quad \zeta = \frac{c_2 \omega_2}{2k_2}, \quad \frac{c_2}{k_2} = \frac{2\zeta}{\omega_2} \end{aligned}$$

로 치환하면

$$\frac{v_1 k_1}{F \omega_1 j \beta} = [(1 - \beta^2 \alpha^2) + j(2\zeta\beta\alpha)] / [\{\beta^4 \alpha^2 - \beta^2(\alpha^2 + \mu + 1) + 1\} + j(2\zeta\beta\alpha)(1 - \beta^2(1 + \mu))] \quad (8)$$

좌변의 $\frac{v_1}{\omega_1 j \beta}$ 는 m_1 의 변위임을 알 수 있다.

3.2 전기적 모델

기계적 시스템은 기계-전기 회로상사(circuit analogy)에 의해 이에 상응하는 전기회로 모델로 변환하여 보다 쉽게 구성하여 해석할 수 있다. 힘-전압 상사는 임피던스 상사라고도 하며, 힘-전류 상사는 모빌리티(mobility) 상사라고도 한다. 그림 3의 기계동흡진기를 전기적 임피던스 모델로 나타내면 그림 4와 같다²⁾. 각 분기(branch)에서의 임피던스는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} Z_1(s) &= m_{eq}s + \frac{k_{eq}}{s} + c_{eq} = j\omega L_{eq} + \frac{1}{j\omega C_{eq}} + R_{eq} \\ Z_2(s) &= \frac{k_0}{s} = \frac{1}{j\omega C_0} \\ Z_3(s) &= L_1 s + R_1 = j\omega L_1 + R_1 \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 Z_1 은 동흡진기의 일차 시스템의 임피던스, Z_2 와 Z_3 는 2차 시스템의 임피던스를 나타낸다. 전체 임피던스를 구하면,

$$Z = Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} \quad (10)$$

이 되고, 전달함수는,

$$T_r = \left| \frac{V}{F} \right| = \left| \frac{I}{V} \right| = \frac{1}{|Z|} = |Y| \quad (11)$$

여기서 Y 는 전체 임피던스 Z 의 역수인 어드미턴스(admittance)로서 결국, 전달함수는 전

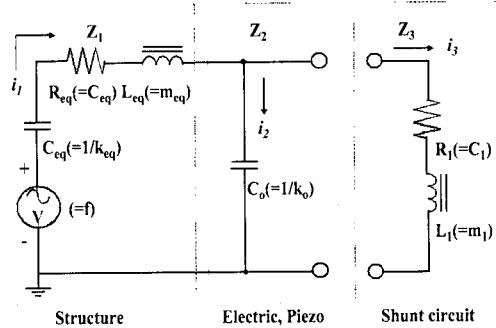


그림 4 압전센트감쇠 시스템의 전기적 상사회로

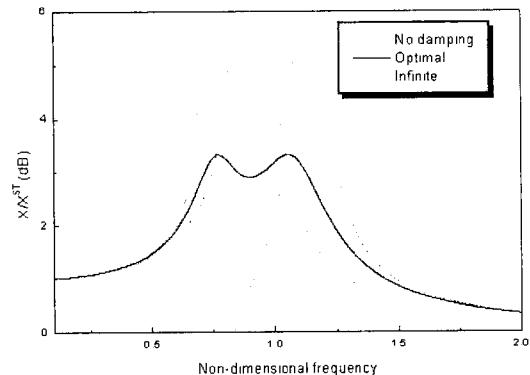


그림 5 두 공진점의 전달함수

체 어드미턴스의 역수로 나타내어진다.

전기적 모델의 한가지 특징은 그림 4의 구조물 및 압전재료의 모델은 압전재료의 공진 모델인 반다이크 모델(Vandyke Model)과 같다. 따라서 구조물과 결합된 압전재료의 전기적 임피던스를 임피던스 해석기(Impedance Analyzer, HP4192A)로 측정하면 임피던스 정보를 압전재료 전용해석 프로그램인(PRAP, piezoelectric resonance analysis program)을 사용하여 반다이크 모델의 계수를 쉽게 구할 수 있다. 따라서, 압전재료를 구조물에 부착하고 임피던스를 측정함으로서 전기적인 모델을 쉽게 구할 수 있는데, 이 방법은 임의의 압전 구조물을 쉽게 모델링할 수 있는 장점이 있다.

3.3 공진센트의 튜닝

공진센트에서 저항 및 인덕터 값의 선택은 감쇠성능에 중요하다. 따라서 최적의 선택을 하여야 한다. 기계동흡진기와 압전공진센트의 상사성이 있으므로 기계동흡진기의 튜닝을 압전공진센트에 그대로 적용할 수 있다.

(1) 기계동흡진기법

기계동흡진기의 튜닝에는 1차 시스템의 감쇠를 무시한다면, 2차 시스템의 감쇠에 상관없이 전달함수의 크기가 변하지 않는 두 개의 고정점(fixed point,)이 1차 시스템의 공진주파수 좌우측에 존재한다(그림 5). 이 두 개의 고정점은 1, 2차 시스템의 공진주파수의 비에 의해 결정되는데 이 비가 변함에 따라 두 고정점에서의 진동크기가 변한다. 따라서 임의로 선택한 질량에 대하여 2차 시스템의 최적 공진주파수는 두 고정점에서의 크기를 같게 하여 얻는데 이것을 최적튜닝(optimal tuning)이라고 한다. 최적 공진주파수가 결정이 되면 이로부터 이차 시스템의 강성을 얻을 수 있다. 최적튜닝에 의해 결정된 두 개의 고정점에서 전달함수값이 최소가 되기 위해서는 최적의 감쇠계수값을 구해야 하는데, 이를 최적감쇠(optimal damping)이라고 한다. 이와 같이 기계진동흡진기의 경우에는 질량을 임의 값으로 설정하고 나머지 두 파라미터를 얻어낸다.

압전재료의 기계적 임피던스를 이용하여 얻은 변위에 대한 전달함수(식 8)로부터 우선 감쇠를 0과 무한대로 놓은 다음 각각의 전달함수가 같다고 하면 두 개의 고정점에 대한 식을 얻을 수 있다. 이 식으로부터 최적의 주파수비를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\delta^* = \sqrt{1 + k_{ij}^2} \quad (12)$$

그리고 최적의 감쇠는 구조물의 공진주파수에서의 크기가 고정점에서의 크기와 같다고 하

여 식 (3)에서 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$r^* = \rho|_{\omega=\omega_n^E} = \frac{\sqrt{2}k_{ij}}{1+k_{ij}^2} \quad (13)$$

따라서 최적의 레지스턴스와 인덕턴스를 아래의 식과 같이 얻을 수 있다.

$$R_i^* = \frac{r^*}{C_{pi}^S \omega_n^E}, \quad L_i^* = \frac{1}{C_{pi}^S \omega_n^2} \quad (14)$$

여기서

$$\omega_n^F = \sqrt{\frac{k+k_{ij}}{M}}, \quad \omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_i^* C_{pi}^S}} \quad (15)$$

(2) 최대손실에너지법

압전재료와 공진회로를 이용한 압전공진센트는 구조물에 부착된 압전재료의 압전효과를 이용하여 구조물의 진동으로 인한 기계적 에너지를 공진회로 내의 저항을 통해서 열에너지로 소산 시켜 구조물에 감쇠효과를 주는 것이다. 따라서 전기적회로 모델에서 최적의 저항과 인덕터 값은 저항에서 손실되는 에너지가 최대가 되도록 결정하면 된다.

최대 손실에너지법은 저항에서의 손실에너지를 전기적 임피던스만으로 나타내어 최대 손실에너지를 갖게 하는 파라미터들을 찾는 것이다. 그림 4에서 구조물에 가해지는 입력파워는

$$P_{IN} = \frac{1}{2} |V \cdot i_1| = \frac{1}{2} |(Z \cdot i_1) \cdot i_1| = \frac{1}{2} |Z| |i_1|^2 \quad (16)$$

공진회로에 흐르는 전류를 전체 입력 전류로 나타내면,

$$i_3 = \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} i_1 \quad (17)$$

저항에서의 손실파워는,

$$\begin{aligned} P_D &= \frac{1}{2} |V_{RI} \cdot i_3^*| \\ &= \frac{1}{2} |(\operatorname{Re}(Z_3) \cdot i_3) \cdot i_3^*| \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{Re}(Z_3) \cdot \left| \left(\frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \right)^2 \cdot |i_1|^2 \right| \end{aligned} \quad (18)$$

이므로, 입력파워 대 손실파워의 비는 다음과 같다.

$$J = \frac{P_D}{P_{IN}} = \frac{\operatorname{Re}(Z_3) \cdot \left| \left(\frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \right)^2 \right|}{|Z|} \quad (19)$$

식 (19)는 최적설계를 위한 목적함수로써 공진회로와 관련된 변수를 제외하고는 모두 압전공진센트를 적용하려는 시스템에 대한 변수들이므로 다음과 같은 식에 의하여 에너지비가 최대가 되는 인덕턴스와 레지스턴스를 결정할 수 있다.

$$[L^*, R^*] = \underset{L, R}{\operatorname{Max}} \left[\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |J_k| \right] \quad (20)$$

최대 손실에너지를 이용한 방법을 적용하기 위해서는 구조물과 압전재료를 나타내는 임피던스, 즉 반다이크 모델의 변수들을 결정할 필요가 있다. 그런데 이 모델의 변수들은 상용으로 이용 가능한 임피던스 분석기(impedance analyzer)를 이용하여 구할 수 있다. 압전구조물을 반다이크 모델로 나타내면 손실에너지를 L 과 R 의 함수로 나타낼 수 있으므로 최대의 손실에너지를 얻도록 파라미터를 튜닝할 수 있다.

(3) 다중 모드에 대한 튜닝

다중 모드에 대한 튜닝은 우선 각 공진 주파수에 대해서 최적의 파라미터를 구한 후 차단회로를 포함한 전체 회로의 임피던스 해석을 통하여 등가의 파라미터를 찾는다. 그림 6은 두 개의 공진 모드 $\omega_1, \omega_2 (\omega_1 < \omega_2)$ 에 대한 다중 모드 션트회로이며, R_n, L_n 은 n 차 단일

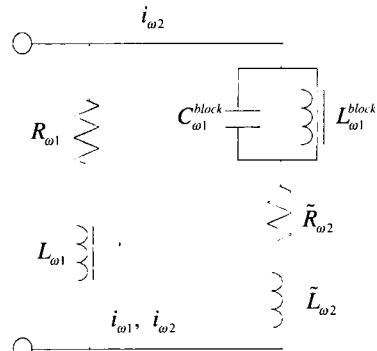


그림 6 다중모드 션트회로

모드에 대한 최적 파라미터이고, \tilde{R}_n , \tilde{L}_n 은 차단회로를 포함한 전체 회로의 임피던스 해석을 통해 n 차 모드에 대해 수정된 파라미터 값이다. 또한 차단회로는 C_n^{block} , L_n^{block} 로 구성되어서 n 차 모드의 공진 주파수의 입력을 차단한다^(3,4). 차단회로에 대한 파라미터는

$$\omega_n^2 = \frac{1}{L_n^{block} \cdot C_n^{block}} \quad (21)$$

가 만족되도록 값을 정한다. 또한 2차 모드에 대한 튜닝 파라미터는

$$\tilde{L}_2 = \frac{L_1 L_2 + L_2 L_1^{block} - L_1 L_1^{block} - \omega_2^2 L_1 L_2 L_1^{block} C_1^{block}}{(L_1 - L_2)(1 - \omega_2^2 L_1^{block} C_1^{block})} \quad (22)$$

$$\tilde{R}_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 - R_2} \quad (23)$$

식 (22)과 (23)과 같이 정한다.

4. Negative Capacitor Converter(NCC) Shunt

식 (8)에서의 전달함수를 최소로 하기 위해서는 션트회로를 적절히 구성하여야 한다. 먼저,

공진회로 션트는 저항과 인덕터로 구성되며, 2차 시스템의 기계동흡진기로 모델링 할 수 있다. 여기서 인덕터는 압전 재료 고유의 캐페시턴스를 포함하는 회로에서 구조물의 공진주파수에 가까운 공진을 일으켜 해당 모드에서 보다 많은 전하가 이동할 수 있게 하여 에너지 소산을 도와주게 된다.

같은 개념으로 공진회로의 인덕터 대신 압전 재료의 캐페시턴스와 부호가 반대인 캐페시턴스로 션트회로를 구성하여 같은 감쇠효과를 얻을 수 있다.

$$Z_{ncc} = R - \frac{1}{j\omega C} \quad (24)$$

$$Z_{num} = Z_2 + Z_{ncc} = R + J \left(\frac{1}{\omega C} - \frac{1}{\omega C_0} \right) \quad (25)$$

식 (24)에서 Z_{ncc} 는 NCC 회로의 임피던스를 나타낸다. 만약 압전재료의 캐페시턴스 (C_0)와 NCC 회로의 캐페시턴스 (C) 값을 같게 튜닝하면 전달함수의 임피던스에는 실수부분만 남게 되어 같은 감쇠 효과를 얻을 수 있다. NCC 션트는 구조물의 특정 주파수에 튜닝하지 않기 때문에, 구조물의 공진 주파수의 변화에 민감한 공진회로 션트와는 달리 공진 주파수 변화에 강건하며 다중 모드 감쇠 효과를 얻을 수 있다. 또한

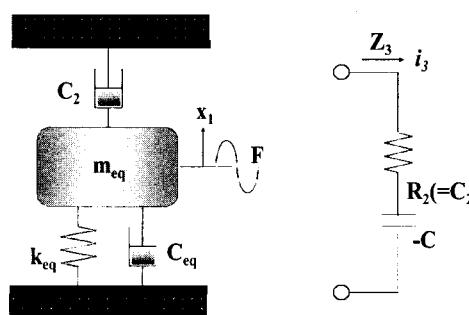


그림 7 NCC 션트의 기계적 모델

그림 7과 같이, NCC 션트는 공진회로 션트의 기계적 모델링과는 달리 스카이 흑 댐퍼(sky hook damper)를 가진 시스템으로 모델링 된다.

NCC 션트 회로를 구성하기 위해서는 부 임피던스 컨버터(negative impedance converter)를 이용하여 압전재료의 캐페시턴스와 부호가 반대인 캐페시턴스를 생성할 수 있다^(5,6). 부 임피던스 컨버터는 부 입력 임피던스를 생성하기 위해 사용되며 OP Amp와 두개의 저항으로 구성할 수 있다. 그림 8은 부 임피던스 컨버터와 부하 임피던스 (Z_L)를 나타낸 그림이다.

노드 1, 2에서 전압-전류 관계식을 이용하면

$$-I_1 R_1 - \frac{V_1 R_2}{Z_L} = 0 \quad (26)$$

$$Z_{in} = \frac{V_1}{I_1} = -\frac{R_1}{R_2} Z_L \quad (27)$$

입력 임피던스 (Z_{in})를 얻을 수 있다. 그림 7의 회로는 부 임피던스(negative impedance)를 생성할 수 있고, 두 저항의 비에 의해 입력 임피던스 값이 조절된다. 만약, 부하 임피던스가 캐페시턴스면 입력 임피던스는 부호가 반대인 부 캐페시턴스가 되며, 주로 Gyrator 필터에 사용된다.

NCC 션트 회로를 사용하여 압전감쇠를 수행할 경우 압전재료의 캐페시턴스에 션트 회로의 캐페시턴스를 튜닝하여야 한다. 그러나 구조물

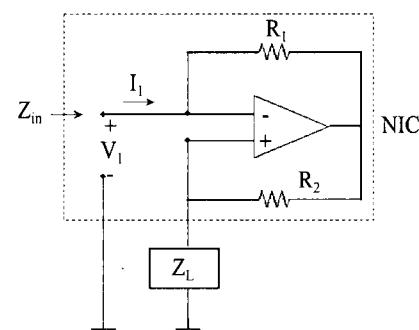


그림 8 NIC 회로

에 부착된 압전재료의 캐패시턴스는 구조물의 공진모드에 따라 약간의 차이를 나타낸다. 결국 각 공진모드에서의 캐패시턴스의 차이는 감쇠 효과를 저해하는 원인이 된다. 이러한 점을 해결하기 위해서 압전소자를 상용 캐패시터(capacitor)를 대용하는 이중 압전 패치 센트 방법이 있다. 센트용 압전소자와 크기가 동일한 압전소자를 구조물의 반대쪽에 부착하여 각 공진모드에서 같은 크기의 캐패시턴스를 생성하는 것이다.

5. 맷음말

압전센트감쇠에 대한 기본 이론을 소개하였다. 저항센트 및 공진센트를 단일모드에 적용했을 때 진동 및 소음에서 약 10~20 dB를 저감할 수 있음이 여러 해석 및 실험에 의해 입증되었다^[7,8]. Blocking 회로를 이용한 다중모드를 적용했을 때 7~13 dB의 소음저감 성능이 확인되었다. 또한 NCC센트를 사용하면 다중모드와 같은 성능을 얻을 수 있다. 이러한 압전센트 감쇠는 경량이고, 구조가 간단하며, 저렴하므로 경량구조물의 소음진동 수단으로 아주 유용하다. 앞으로 시스템의 변화에 강건한 설계, 변화에 대처하는 능동성의 부여 그리고 내구성 등의 문제가 해결된다면 이 기술의 상용화가 한 걸음 다가오게 될 것이다. ■

참고문헌

- (1) N. W. Hagood, A. von Flotow, 1991, "Damping of Structural Vibrations with Piezoelectric Materials and Passive Electrical Networks", Journal of Sound and Vibration, Vol. 146, No. 2, pp. 243~268.
- (2) J. Kim, Y.-H. Ryu and S.-B. Choi, 2000, "New Shunting Parameter Tuning Method for Piezoelectric damping Based on Measured Electrical Impedance," Smart Materials and Structures, Vol. 9, No. 6, pp. 868~877.
- (3) S.Y. Wu, March 1999, "Multiple PZT transducer implemented with multiple-mode piezoelectric shunt for passive vibration damping," Proceeding SPIE: Smart Structures and Materials 1999: Passive Damping and Isolation, Vol. 3672, pp. 112~122.
- (4) J. J. Hollkamp, 1994, "Multimodal Passive Vibration Suppression with Piezoelectric Materials and Resonant Shunts", J. of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 5, pp. 49~57.
- (5) K. Soundararajan and K. Ramakrishna, March 20, 1975, "Nonideal Negative Resistors and Capacitors Using an Operational Amplifier", IEEE Transactions on Circuits and Systems, September 1975, pp. 760~763.
- (6) A.I. Larky, "Negative-Impedance Converters," IRE Transactions on Circuit Theory, September, pp. 124~131.
- (7) J. Kim and J.-K. Lee, September 2002, "Broadband transmission noise reduction of smart panels featuring piezoelectric shunt circuits and sound absorbing material", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 112, No. 3, pp. 990~1008.
- (8) J. Kim and J.-H. Kim, 2004, "Multi-mode shunt damping of piezoelectric smart panel for noise reduction", J. Acous. Soc. Am., in print.