

어드미턴스를 이용한 압전 션트 구조물의 설계방법과 O.D.D. 메인 베이스로의 응용

Design of Piezoelectric Shunt Structure using Admittance Analysis with Application to O.D.D. Main Base

박종성*·임수철*·최승복*·김재환*·박영필**

Jong Sung Park, Soo Cheol Lim, Seung Bok Choi, Jae Hwan Kim and Young Pil Park

Key Words : Piezoelectric Shunt, Admittance, O.D.D, Main Base, Design

ABSTRACT

In this paper, the design of damped structures associated with the piezoelectric shunt circuits is undertaken and it is applied to optical disk drive (O.D.D) main base in order to reduce unwanted vibration. In order to design effective piezoelectric structure, the admittance of the structure is introduced as the performance index of the piezoelectric shunt system. And the admittance effect of the shunt performance is theoretically investigated. It is also presented that the admittance can be calculated by commercial finite elements program. To verify the admittance calculated by F.E.M, admittance measurement is performed by impedance analyzer. In this verifying process, the validity of the finite element admittance analysis is found. As a practical approach, to reduce the vibration of the O.D.D. main base, piezoelectric shunt system is designed using the proposed admittance analysis and shunt effect is evaluated at all prescribed frequencies

1. 서론

최근, 보다 고속 경량의 제품들이 증가하면서 이들 수명의 증가와 사용자들의 불편을 감소시키기 위해 구조물 또는 시스템의 진동 및 소음 저감 노력이 다양하게 시도되고 있으며 이러한 진동 및 소음을 억제하는 방법으로 근래 압전 재료를 이용한 수동 감쇠(압전 션트) 기법이 널리 이용되고 있다⁽¹⁾. 압전 션트 기법은 잘 알려진 바와 같이 구조물에 가해지는 기계적 에너지를 해당 구조물에 부착된 압전체를 이용, 전기적 에너지로 변환시키고 이 전기적 에너지를 션트 회로의 저항에서 열로 소산 시키는 것이다⁽²⁾. 따라서 압전 션트 시스템은 압전체가 부착된 구조물(압전 구조물)과 션트 회로로 구성되며 효과적인 진동 또는 소음의 감소를 위해서는 압전 구조물 부분과 션트 회로 부분을 각각의 기능에 맞도록 설계하는 것이 매우 중요하다. 그러나 지난 10 여년간, 동 기법은 압전 구조물에 대한 연구 보다는 효율적 션트 회로 개발, 다중 모드 션트 회로 설계 등 주로 션트 회로에 대한 연구가 수행되었으며, 최근 모드 해석 등을 이용하여 압전 구조물의 동역학적 특성을 파악하고 목표 주파수와 모드 형상에 따른 압전

재료의 부착 위치를 결정한 연구 결과들이 있지만^(3,4) 압전 구조물의 기계적 특성만을 고려했을 뿐 전기-기계적인 특성이 고려되지 않았기 때문에 해당 압전 션트 시스템의 성능 예측이 곤란하여 실제 적용을 위한 압전 구조물의 설계 시 어려움이 많았다.

따라서 본 논문에서는 압전 션트 시스템의 효율적인 진동/ 소음의 소산을 위해 압전 구조물의 설계 방법을 제안하고 이를 정보저장기에 응용하였다. 압전 션트 성능을 향상시키기 위해서는 압전 구조물에서 기계적 에너지의 전기적 에너지로의 변환 효율이 높아야 하므로 본 논문에서는 압전 구조물의 전기-기계적 특성값인 어드미턴스(admittance)를 성능/설계 지수로 선정하였고, 이론과 실험을 통하여 해당 압전 구조물의 어드미턴스가 압전 션트 시스템의 성능과 비례함을 밝힘으로써 어드미턴스가 압전 션트 시스템의 설계/성능 지수가 될 수 있음을 검증 하였다.

2. 어드미턴스

2.1 압전 션트시스템에서 어드미턴스의 역할

어드미턴스는 임피던스의 역수로 어떤 회로나 시스템에 흐르는 교류 흐름의 쉬운 정도를 의미한다. 전술한 바와 같이 압전 션트 시스템은 기계적 에너지의 전기적 에너지로의 변환 과정이므로 변환 메커니즘을 담당하는 압전 구조물의 어드미턴

* 인하대학교 기계공학과
E-mail : Erdinger@paran.com
Tel : (032) 872-7925, Fax : (032) 868-1716

** 연세대학교 기계공학과

스가 높다는 것은 변환된 전기에너지가 션트회로로 쉽게 이동할 수 있다는 의미이고 만일 변환/이동된 에너지가 션트 회로에서 모두 소산 된다고 가정 하면 어드미턴스는 압전 션트 시스템의 감쇠 성능을 예측할 수 있는 지수(index)가 될 수 있다.

압전 구조물의 작동 주파수가 압전 재료의 공진 주파수보다 충분히 낮을 때, 전기-기계 상사 모델을 이용하면 공진 압전 션트 시스템은 Fig. 1 과 같이 모델링 되며⁽⁵⁾ 이 때 구조물(s), 압전 재료(p), 션트 회로(cir)의 임피던스(Z)는 식(1)로 나타낼 수 있다.

$$Z_1 = Z_s(s) = m_1 s + \frac{k_1}{s} + c_1 = j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} + R_1$$

$$Z_2 = Z_p(s) = \frac{k_2}{s} = \frac{1}{j\omega C_0}$$

$$Z_3 = Z_{cir}(s) = L_{cir} s + R_{cir} = j\omega L_{cir} + R_{cir}$$

(1)

개회로 상태, 즉 $Z_{cir} = \infty$ 일 때, 외력에 의해 발생하는 압전 구조물의 전체 전류, I_0 는 식(2)로 주어지며

$$I_0 = \frac{V_0}{(Z_s + Z_p)} = V_0 \cdot Y_{sp} \quad (2)$$

여기서, $Y_{sp} = (Z_s + Z_p)^{-1} = I_0/V_0$ 이고 개회로 상태에서 압전 구조물의 어드미턴스이다. 또 $Z_{cir} \neq \infty \neq 0$ 일 때, 즉 션트 회로가 연결되었을 때 발생하는 압전 션트 시스템의 전체 전류는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = I_s = I_p + I_{cir} = V_{cir} \cdot \left(\frac{Z_p + Z_{cir}}{Z_p \cdot Z_{cir}} \right) \quad (3)$$

션트 회로, Z_{cir} 가 연결되기 전과 후에 동일한 조건의 외력이 압전 구조물에 작용한다면 발생하는 전체의 charge 양은 같으므로⁽²⁾ $I_0 = I$ 이고 식

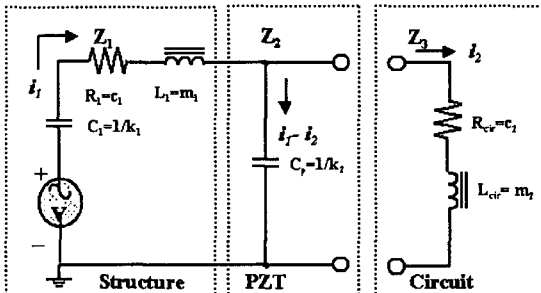


Fig. 1 Impedance Model of Piezoelectric Shunt System with Resonant Circuit

(2)와 (3)으로 부터 션트 회로에 인가되는 전압 V_{cir} 과 전류 I_{cir} 은 식(4)가 된다.

$$V_{cir} = V_0 \cdot Y_{sp} \cdot \frac{Z_p \cdot Z_{cir}}{Z_p + Z_{cir}} \quad (4)$$

$$I_{cir} = \frac{Z_p}{Z_p + Z_{cir}} \cdot I_0$$

이제 2 장에서 얻어진 공진 션트 회로의 저항에서 소산되는 에너지, P_D 는 식(5)로 다시 나타낼 수 있으며^(5,6),

$$\begin{aligned} P_D &= \frac{1}{2} |V_{cir}^R \cdot I_{cir}^*| = \frac{1}{2} \text{Re}(Z_{cir}) \cdot |I_{cir}|^2 \\ &= \frac{1}{2} \text{Re}(Z_{cir}) \cdot \left| \frac{Z_p}{Z_p + Z_{cir}} \right|^2 \cdot |I_0|^2 \\ &= \frac{1}{2} \text{Re}(Z_{cir}) \cdot \left| \frac{Z_p}{Z_p + Z_{cir}} \right|^2 \cdot |V_0|^2 \cdot |Y_{sp}|^2 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 V_{cir}^R 은 공진 션트 회로의 저항 양단에 걸리는 전압이고 I_{cir}^* 는 션트 회로에 흐르는 전류의 복소 공액(complex conjugate) 이다. 식(5)에서 알 수 있듯이 어떤 주파수에서 압전 재료와 션트 회로의 임피던스가 동일하다면 회로에서 소산되는 감쇠 에너지는 개회로 상태의 압전 구조물 전기-기계적 특성치인 I_0 또는 V_0 그리고 Y_{sp} 의 제공에 비례한다는 것을 알 수 있으며 따라서 개회로 상태의 압전 구조물 어드미턴스 Y_{sp} 는 압전 션트 시스템 성능의 지표가 된다.

2.2 어드미턴스의 해석

압전 구조물의 어드미턴스는 임피던스 측정기를 이용하여 손쉽게 측정할 수 있다⁽⁶⁾. 그러나 이미 제작된 압전 구조물의 성능 평가를 위해서 임피던스 측정기를 사용하는 것은 유용하지만 압전 구조물의 설계 단계에서 사용하는 것은 다수의 압전 구조물을 제작해야 하는 등의 시간과 재화의 낭비가 발생한다. 따라서 효율적인 압전 구조물의 설계를 위해서 해당 압전 구조물의 어드미턴스를 예측하는 것은 매우 중요하다. 압전 구조물의 어드미턴스 계산은 해석적인 방법과 수치적인 방법으로 나눌 수 있으며 본 연구에서는 수치적인 방법 중 하나인 유한 요소 해석을 이용하였다.

R. Lerch⁽⁷⁾가 제안한 유한 요소 행렬 방정식에서 압전 재료의 전극 표면에 흐르는 전류는 계산된 각 노드의 전하량을 이용하면 얻을 수 있으며 압전 재료의 어드미턴스는 식(6)과 같이 얻을 수

$$|Y| = \left| \frac{I}{V} \right|, I = i\omega \sum_i Q_i \quad (6)$$

있다. 본 연구에서는 ANSYS™를 이용하였다.

3. 평판 구조물의 압전 션트 효과

본 장에서는 단순한 평판 압전 구조물의 유한 요소 어드미턴스 해석을 이용하여 계산된 압전 구조물의 어드미턴스가 측정 결과와 일치함을 보이고 어드미턴스 해석에서 예측된 주파수/모드에서 션트 효과가 발생됨을 실험을 통해 검증 하였다

3.1 유한 요소 어드미턴스 해석 검증

Fig. 2 에 검증에 사용된 알루미늄과 압전 재료로 구성된 사각 평판의 유한 요소 모델을 나타내었다. 압전 재료는 Morgan 社의 PZT-5H 를 사용하였고 부착위치는 평판 내에 임의로 선정하였다. 구조물, 압전 재료 모두 8-node 고체 요소를 사용하였고 두 재료가 완전히 밀착되었으며 접착 후 접착제의 댐핑은 없는 것으로 가정하여 접착제는 모델링 하지 않았다.

Fig. 3 은 임피던스 측정기를 이용하여 측정된 어드미턴스 결과와 유한 요소 해석을 이용하여 계산된 결과를 비교하여 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 측정과 해석 결과는 주파수와 크기 모두 5% 이내에서 일치하고 있으며 3 개의 주파수에서 어드미턴스의 급격한 상승을 보이고 있다. 해당 주파수는 잘 알려진 평판 구조물의 모드 1, 2, 5 를 나타내며 전 장의 식(5)에서 알 수 있듯이 해당 주파수/모드에서 압전 션트 효과가 발생할 것으로 예상된다.

3.2 압전 션트 성능 실험

Fig. 4 에 제안된 압전 구조물의 션트 성능 결과를 도시하였다. 전 절에서 예측하였듯이 해당 주파수에서 큰 감쇠 효과를 보이고 있으며 기타

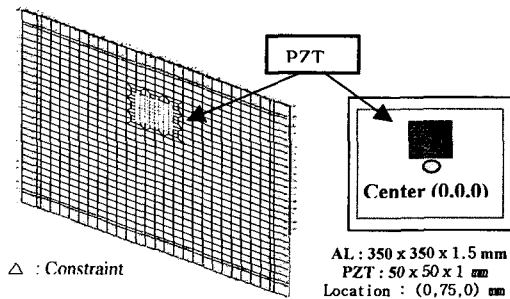


Fig. 2 Finite Element Model of the Proposed Plate Structure

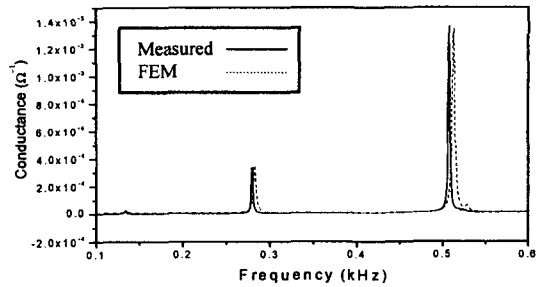


Fig. 3 Comparison of Admittance Results

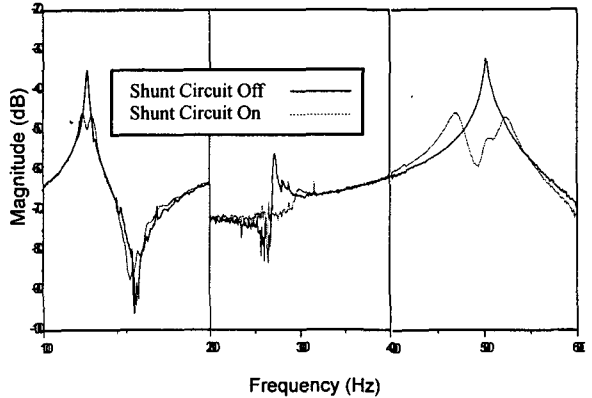


Fig. 4 Shunt Performance Results of the Proposed Plate Model

주파수에서는 션트 효과가 발생되지 않았다. 션트 효과는 각각 126.5Hz 에서 14dB, 280Hz 에서 17dB, 502Hz 에서 21dB 의 감소를 보였으며 이는 전 장의 식(5)를 뒷받침해주는 결과임을 알 수 있다.

4. O.D.D 메인 베이스로의 응용

광 기록 재생 기기는 기본적인 구조상 진동에 매우 취약하다는 특성을 내재하고 있으며 특히 메인 베이스가 공진을 일으킬 경우 광 픽업에 의한 기록 및 재생과정에 치명적인 결함을 유발시킬 수 있다. 현재까지는 주로 방진부 설계에 대한 방향 제시 차원에서 메인 베이스의 진동 특성 연구가 진행되고 있으며⁽⁶⁾ 압전 션트회로를 이용하여 메인 베이스에 대한 단일모드 수동감쇠에 대한 연구도 시도되고 있지만⁽⁴⁾ 압전 메인 베이스의 설계에 대한 방향제시는 이루어 지지 않았다.

4.1 압전 메인 베이스의 동특성 및 어드미턴스
어드미턴스는 2.1 절의 특성 이외에도 압전 구조물의 동특성을 나타낼 수 있으므로⁽⁶⁾ 어드미턴스 해석을 이용하면 션트 성능예측과 함께 해당 구조물의 동특성도 파악할 수 있는 장점이 있다.

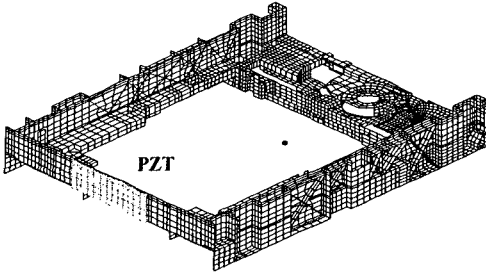


Fig. 5 FE Model of Proposed O.D.D Main

Fig. 5 에 압전 메인 베이스의 유한 요소 모델을 나타내었다. 메인 베이스는 4-node 표면 요소를 사용하였고 접촉체는 전 장과 같이 모델링하지 않았다. Fig. 6 은 어드미턴스 측정 실험과 해석을 비교한 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 두 개의 주파수에서 어드미턴스가 큰 값을 가지고 있음을 알 수 있으며 역시 이 두 주파수에서 큰 감쇠 효과를 예측할 수 있다.

4.2 압전 메인 베이스의 압전 션트 성능 실험

션트용 압전 재료는 PZT-5H 를 사용하였으며 가진 압전 메인 베이스에 가진용 압전 재료를 부착하여 가진 하였고 응답은 가속도계를 사용하여 FFT 에서 응답함수를 계산하였다. Fig. 7 은 해당 주파수에서의 압전 션트 성능 결과를 나타낸 그림으로 첫 번째 주파수인 370Hz 부근에서 약 4.5dB, 21 μm 에서 14 μm 로 진동이 감소하였으며, 450Hz 부근 에서는 약 4dB, 13 μm 에서 9 μm 로 진동이 감소 되었음을 나타낸다.

5. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 효율적인 압전 션트 시스템의 설계를 위해 어드미턴스를 설계 지수로 설정하였고 이론적인 고찰과 실험을 통해 어드미턴스가 압전 션트 시스템의 설계 시 압전 구조물의 설계 지수가 됨을 확인 하였다. 또한 어드미턴스 해석을 이용하여 O.D.D 의 압전 메인 베이스를 설계하고

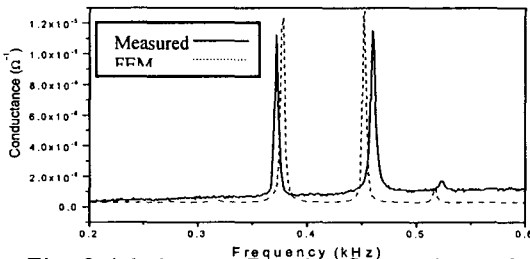


Fig. 6 Admittance Results Comparison of the Proposed O.D.D Main Base

예측된 주파수에서 적절한 진동 감쇠를 얻었다.

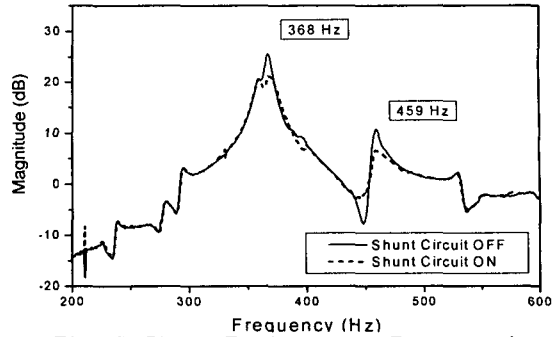


Fig. 7 Shunt Performance Results of the Proposed O.D.D Main Base

어드미턴스 해석을 이용하면 압전 재료의 종류, 형상, 부착위치, 다중 압전 구조물 등에 따른 최적 설계를 수행할 수 있으며 추후 본 연구에서 제시한 설계 방법을 O.D.D 의 픽업 모듈, H.D.D, 고밀도 광학 정보저장기기 등의 진동 감쇠에 적용할 예정이다.

후 기

본 연구는 연세대학교 정보저장기기 연구센터의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) S. O. R. Moheimani, 2003, "A Survey of Recent Innovations in Vibration Damping and Control Using Shunted Piezoelectric Transducers", IEEE Trans. on Control Systems Technology, Vol. 11, No. 4, pp. 482-494.
- (2) H. H. Law *et al.*, 1996, "Characterization of Mechanical Vibration Damping by Piezoelectric Materials", J. of Sound and Vibration, Vol. 197(4), pp. 489-513.
- (3) Emanuele Bianchini and Ronald Spangler, 1998, "The use of piezoelectric devices to control snowboard vibrations", Proc. of SPIE Conf., Vol.3329, pp. 106-114.
- (4) J. S. Park, S. C. Lim, S. B. Choi, J. H. Kim, Y. P. Park, 2004, "Vibration reduction of a CD-ROM drive base using a piezoelectric shunt circuit", J. of Sound and Vibration, Vol. 269, pp. 1111-1118.
- (5) Kim, J., Kim, J.-H., "Multimode shunt damping of piezoelectric smart panel for noise reduction", 2004, The J. of the Acoustical Society of America, v.116 no.2, pp.942-948.
- (6) J. Kim, Y. H. Ryu, 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.
- (7) R. Lerch, 1990, "Simulation of Piezoelectric Devices by Two- and Three-Dimensional Finite Elements", IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 37. No. 2, pp. 233-247.
- (8) 박건순, 임종락, 한용희, 손희기, 1998, "광디스크 드라이브의 진동특성에 대한 유한요소해석", 한국소음진동학회 춘계학술대회논문집, pp. 227-232.