

압전센트를 이용한 패널의 다중 모드 소음 저감에 관한 연구

Multi-mode noise reduction of using piezoelectric shunt damping smart panels

김준형*·김재환**

Joon-Hyoung Kim, Jaehwan Kim

Key Words : Smart panels(지능 패널), Piezoelectric shunt damping(압전 션트 감쇠), Electrical impedance(전기적 임피던스).

ABSTRACT

In this paper, the transmitted noise reduction of smart panels of which passive piezoelectric shunt damping is used, is experimentally studied. Shunt damping experiments are based on the measured electrical impedance model. A passive shunt circuit composed of inductors, and a load resistor is devised to dissipate the maximum energy into the joule heat energy. For multi-mode shunt damping, the shunt circuit is redesigned by adding a blocking circuit. Also the optimal location of the piezoelectric patch is studied by FEM in order to cause the maximum admittance from the patch for each mode of aluminum plate. In results, the transmitted sound pressure level of panels is efficiently reduced for multi-modes

1. 서론

소음이 중요한 환경 문제로 대두되면서 공학분야에서도 구조물의 진동에 의한 소음 발생을 저감시키는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 소음의 저감을 위해서 수동적 방법(passive method)과 능동적 방법(active control)이 사용되고 있다. 수동적 방법은 방음, 흡음재의 부착이나 구조물의 설계를 바꾸는 방법 등이 있으며, 이는 중, 고주파대역에서 좋은 소음 저감 성능을 갖는다. 하지만 질량의 증가와 설계변경의 한계로 인한 제약성이 있다. 또한 능동적 방법은 부가적 음원을 동원하여 음장을 상쇄하거나 억제하는 방법과, 소음원의 진동을 직접 제어하여 진동에 의한 소음을 저감시키는 방법이 있다⁽¹⁻³⁾. 하지만 능동제어를 위하여 부가적으로 많은 장비와 비용이 들어가며 시스템이 복잡해지는 단점이 있다.

이를 극복하기 위한 방법으로 최근 활발한 연구가 진행중인 지능재료를 사용하는 방법이 연구되고 있다. 지능재료 중에서도 압전재료는 가진되는 전기에너지에 의해 기계적 변형을 일으키며 또한 반대의 기능도 갖춘 재료로서 작동기와 감지기로 많이 이용되고 있다. 따라서 이러한 압전재료를 구조물에 부착하여 사용하면 감지기나 작동기를 따로 설치할 필요가 없으므로 시스템이 간단해

지는 장점이 있다⁽⁴⁻⁵⁾. 또한 압전재료를 이용한 새로운 개념의 수동적 방법이 활발히 연구 중이다. 저감하고자 하는 주파수에 전기적 회로를 튜닝하여 압전재료가 붙어있는 구조물에 연결하여 에너지 소산에 의한 소음 진동의 감쇠효과를 얻는 것이다.

본 논문에서는 압전재료를 이용한 수동적 방법을 적용하여 소음 저감 성능을 검증하고자 한다. 또한 하나의 공진 모드에 대하여 독립된 회로를 사용하였던 방법과⁽⁶⁾ 다르게 차단 회로를 이용하여 하나의 회로로 두개 이상의 공진 모드에 대하여 감쇠 효과를 갖도록 회로를 설계하여 실험하였다⁽⁷⁻⁸⁾.

2. 압전감쇠

압전재료는 기계적 변형을 전기에너지로 전환시키거나 전기에너지를 가함으로써 기계적 변형을 얻어낼 수 있다. 압전감쇠는 전자의 원리를 이용한다. 구조물의 기계적 변형으로부터 압전재료에 저장된 전기에너지는 회로가 연결되어짐으로써 부하 저항을 지나게 되고 이때 전기에너지는 열에너지로 소산되게 된다⁽⁹⁾. 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. 이때 부하 저항에서 가장 큰 에너지를 소산 시키도록 유도하기 위하여 회로 내의 리액턴스(reactance)와 인

* 인하대학교 기계공학과 대학원
E-mail : jjooney@hotmail.com
Tel : (032) 872-7925, Fax : (032) 872-7925
** 인하대학교 기계공학과

덕턴스(inductance)를 최적화하는 과정이 필요하다. 이와 같은 파라미터를 정하기 위하여 압전구조물과 회로를 전기적 임피던스 해석을 통하여 모델링하여 부하저항에서 가장 큰 에너지가 소산되게 하는 방법을 사용하였다⁽¹⁰⁾.

2.1 압전 패널

압전 패널은 알루미늄 판에 압전재료가 부착된 형태의 지능 구조물을 말한다. Fig.1 은 실험에 사용된 압전 패널의 개념도를 나타낸다. 패널에 연결된 션트회로는 전기적 에너지를 열에너지로 소산시키는 일종의 흡진기 역할을 하게 된다. 회로는 저항과 인덕터로 구성되어 있으며 또한 압전재료의 위치는 구조물의 변형이 가장 잘 전달될 수 있는 위치에 부착되어야 하며 이는 상용 FEM 프로그램(ANSYS)을 이용하여 가장 변위가 크게 일어나는 곳을 찾아내어 적용한다.

2.2 압전 구조물의 전기적 모델링

압전재료의 모델링은 공진과 비공진 상태에 따라 다르며 압전감쇠는 압전재료의 공진을 이용하므로 공진 모델링을 사용하여 등가의 전기회로로 표현한다. 본 논문에서는 공진 모델링 중에 반다이크 모델(Vandyke Model)을 사용하여 압전구조물을 모델링한다. 반다이크 모델에 필요한 계수는 구조물과 결합된 압전재료의 전기적 임피던스(Electrical Impedance)를 측정(Impedance Analyzer, HP4192A)하여 임피던스 정보를 압전재료 전용해석 프로그램인 (PRAP, Piezoelectric Resonance Analysis Progtam)에 입력하여 구한다. 압전구조물과 션트 회로(Shunt Circuit)의 모델링은 기계적 동흡진기(mechanical dynamic absorber)를 전기적으로 상사하여 간단한 회로로 나타내게 된다. Fig.2 는 기계적 동흡진기와 힘과 전압의 상사법칙을 통해 나타낸 회로도이다.

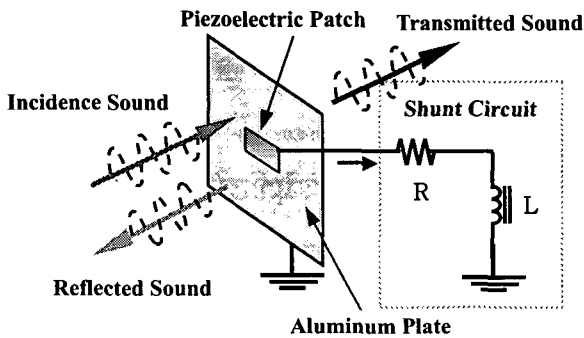


Fig.1 Schematic diagram of piezoelectric structure

Fig.2 와 같은 등가의 회로를 각각의 임피던스로 표현하면 다음과 같다.

$$Z_1(s) = m_{eq}s + \frac{k_{eq}}{s} + c_{eq} = j\omega L_{eq} + \frac{1}{j\omega C_{eq}} + R_{eq}$$

$$Z_2(s) = \frac{k_0}{s} = \frac{1}{j\omega C_0}$$

$$Z_3(s) = L_1s + R_1 = j\omega L_1 + R_1$$

Z₁ 은 1 차 시스템의 임피던스이며 Z₂ 와 Z₃ 는 병렬로 연결되어 2 차 시스템의 임피던스를 나타낸다. 따라서 전체 시스템의 총 임피던스는 다음과 같이 나타낸다.

$$Z = Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3}$$

$$T_r = \left| \frac{v}{F} \right| = \left| \frac{I}{V} \right| = \frac{1}{|Z|} = |Y|$$

기계적 동흡진기의 1 차 시스템에서의 전달함수는 식(3)과 같이 입력 힘에 대한 속도로 나타낼 수 있으며 이는 힘과 전압사이의 상사법칙에 의해 전기적 임피던스의 역수인 어드미턴스(Admittance)로 표현할 수 있다.

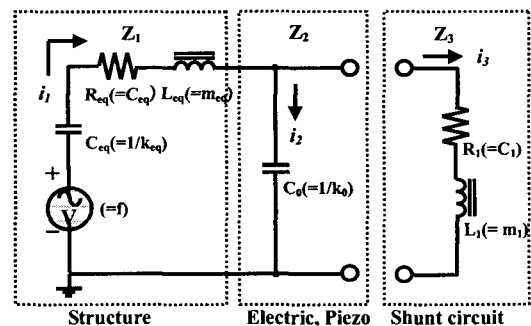
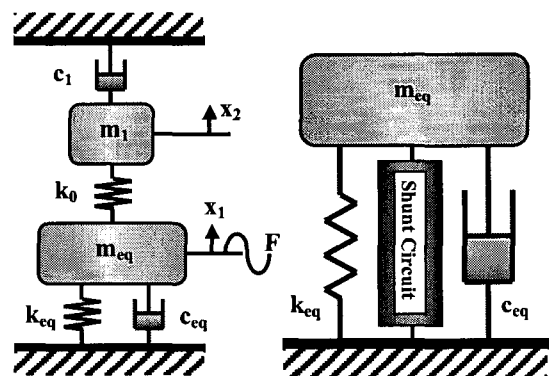


Fig.2 Electrical analog circuit of MCK system with piezoelectric element and resonant shunt

2.3 다중모드에 대한 압전감쇠

감쇠하고자 하는 공진 모드가 두개 이상일 경우 기존에는 각각의 압전재료에 대하여 독립된 셉트 회로를 썼다. 그 이유는 OP-AMP 와 저항과 같은 소자로 이루어진 가상 인덕터(synthetic inductor)를 사용하므로 회로간의 간섭이 일어나고 이로 인해 튜닝을 하기가 쉽지 않기 때문이다. 또한 각각의 셉트회로를 사용하기 위해선 모드 개수 만큼의 압전재료가 구조물에 부착되어야 하기 때문에 구조물의 중량이 증가하고 구조물의 특성이 변하기 때문에 상당히 제한적이라 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 하나의 압전재료와 하나의 셉트회로를 이용해 다중모드의 압전감쇠 실험을 수행하였다.

다중 모드 압전감쇠를 위하여 여러 공진 모드에 대해 변위를 크게 낼 수 있도록 압전재료의 위치를 찾아내며 이 과정은 상용 FEM 프로그램으로 수행되었다. 셉트회로는 기존 단일모드에 대한 회로에 차단회로(blocking circuit)와 인덕터, 저항을 추가하여 구성한다. Fig.3은 다중 모드 셉트회로를 나타낸 회로도이다.

2.4 셉트회로의 파라미터 튜닝

(1) 단일 모드에 대한 튜닝

효율적인 압전 감쇠성능을 위하여 셉트회로를 구성하는 인덕턴스(inductance)와 레지스턴스(resistance)를 정확히 튜닝하여야 한다. 압전재료는 고유의 캐패시턴스(capacitance)를 갖고 있으므로 회로 내의 인덕턴스와 공진을 일으켜 저항으로 가장 큰 에너지가 소산되도록 하는 것이 파라미터 튜닝의 주목적이다. 구조물에 가해지는 음압은 등가회로에서 다음과 같이 입력 전기에너지로 나타내어진다.

$$P_{IN} = \frac{1}{2} |V \cdot i^*| = \frac{1}{2} |(Z \cdot i) \cdot i^*| = \frac{1}{2} |Z| \cdot |i|^2 \quad (4)$$

또한 셉트 회로의 저항으로 흐르는 전류는,

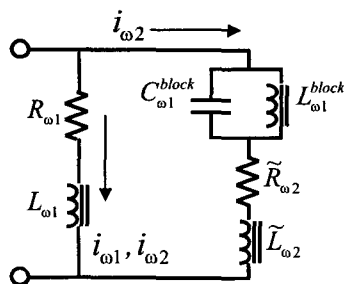


Fig.3 Schematic of shunt circuit for multi-mode

$$i_3 = \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} i \quad (5)$$

이고, 저항에서 소산되는 손실에너지는,

$$\begin{aligned} P_D &= \frac{1}{2} |V_{R1} \cdot i_3^*| \\ &= \frac{1}{2} |(Re(Z_3) \cdot i_3) \cdot i_3^*| \\ &= \frac{1}{2} Re(Z_3) \cdot \left| \left(\frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \right) \cdot i \right|^2 \end{aligned} \quad (6)$$

이다. 따라서 두 에너지의 비는,

$$J = \frac{P_D}{P_{IN}} = \frac{Re(Z_3) \cdot \left(\frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \right)^2}{|Z|} \quad (7)$$

로 나타내어진다. 최적의 파라미터를 구하기 위한 목적 함수는 광대역 주파수 범위에서의 손실 에너지의 합이 최대가 되도록 정하여 식(8)과 같이 나타낸다.

$$[L^*, R^*] = \underset{L, R}{Max} \left[\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |J_k| \right] \quad (8)$$

(2) 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. Fig.3은 두개의 공진 모드 ω_1, ω_2 ($\omega_1 < \omega_2$)에 대한 다중 모드 셉트회로이며, R_n, L_n 은 n 차 단일 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. 차단회로에 대한 파라미터는

$$\omega_n^2 = \frac{1}{L_n^{block} \cdot C_n^{block}} \quad (9)$$

가 만족되도록 값을 정한다. 또한 2 차 모드에 대한 튜닝 파라미터는

$$\tilde{L}_2 = \frac{L_1 L_2 + L_2 L_1^{block} - L_1 L_1^{block} - \omega^2 L_1 L_2 L_1^{block} C_1^{block}}{(L_1 - L_2)(1 - \omega^2 L_1^{block} C_1^{block})} \quad (10)$$

$$\tilde{R}_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 - R_2} \quad (11)$$

식(10)과 (11)과 같이 정한다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 음향 실험 장치

Fig.4 는 음향 터널과 실험 장비의 개략도 이다. 터널 내부는 음의 반사를 막기 위하여 흡음재로 처리하였으며 끝 단에는 무 반사단(anechoic terminator)을 설치하여 터널 내 공진에 의한 음의 굴곡을 방지 하였다⁽¹¹⁾. 음향 터널은 800hz 까지 평면파 특성을 갖는다. 실험에 사용된 시편(aluminum)과 압전재료(PZT-5H)의 크기는 각각 300x300x1.5mm 와 100x50x0.5mm 이다. 압전재료는 방사소음에 가장 큰 영향을 주는 모드를 실험과 FEM 으로 확인하여 중앙에 부착하였으며 터널에 완전 고정하였다. 임피던스의 측정은 임피던스 분석기(HP4192A)으로 수행되었고 측정된 데이터는 압전재료 해석 프로그램(PRAP)을 통해 해석에 필요한 파라미터를 추출하였다. Table 1 은 추출된 반다이크 파라미터를 나타낸다. Fig.5 는 측정된 압전 구조물의 어드미턴스(admittance)를 나타낸다. 각각 실수부(conductance)와 허수부(susceptance)를 나타내며 공진은 압전구조물의 기계적 공진과 일치하므로 구조물의 기계적 특성을 나타낸다. 이 값들을 임피던스 해석 최대에너지 소산법에 적용하여 최적의 선포회로 파라미터를 구하여 실험에 적용하였다.

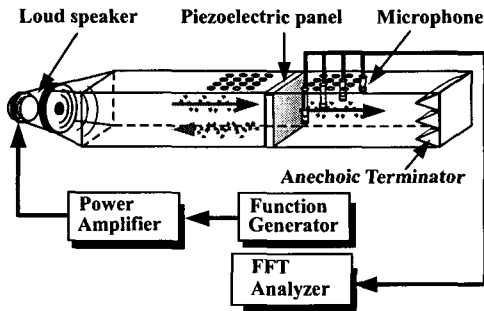


Fig.4 A schematic diagram of the experimental

Table 1. Electrical impedance parameters for the piezoelectric structure

| Freq. | Parameter | Vandyke | Optimization |
|-----------------------------------|-----------------------|-----------|------------------------|
| 1 st mode (127.3hz) | C ₀ (F) | 3.3161e-7 | L ₁ =4.42 |
| | C _{eq} (F) | 9.413e-9 | |
| | L _{eq} (H) | 9097 | R ₁ =511.02 |
| | R _{eq} (ohm) | 162.9 | |
| 2 nd mode (518.1hz) | C ₀ | 3.160e-7 | L ₂ =0.30 |
| | C _{eq} | 1.161e-8 | |
| | L _{eq} | 644 | R ₂ =125.25 |
| | R _{eq} | 8.421 | |

4. 결과 및 고찰

4.1 압전감쇠 실험 결과

압전 패널을 이용한 압전감쇠 실험을 수행하였다. 식(8)에서 설명한 목적 함수는 MATLAB 의 Optimization Toolbox 를 이용하여 회로를 구성하는

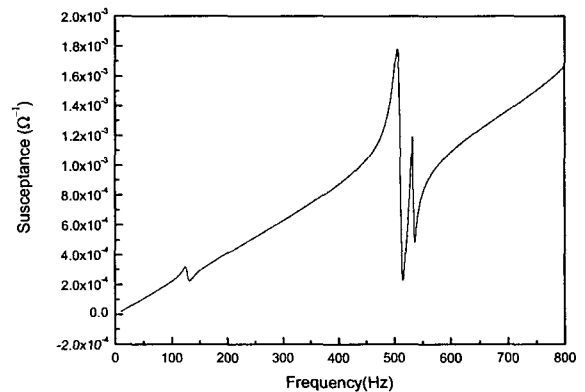
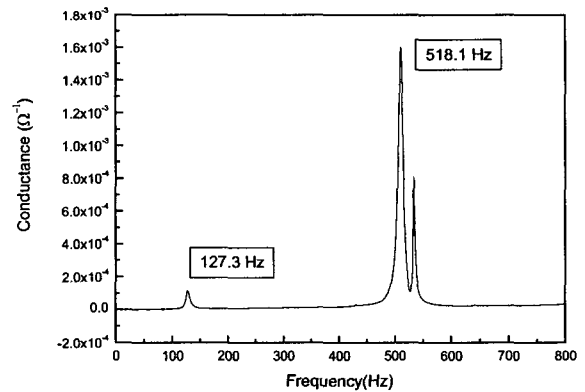


Fig.5 Measured admittance of piezoelectric structure

Table 2. Experimental parameters of shunt damping for the piezoelectric structure

| | 1st mode | 2nd mode | Multi mode | |
|-------|----------|----------|---------------|------------|
| | | | Simulation | Experiment |
| L_i | 3.98 | 0.301 | L_1 | 4.42 |
| | | | R_1 | 511.02 |
| R_i | 600 | 100 | \tilde{L}_2 | 0.458 |
| | | | \tilde{R}_2 | 165.92 |

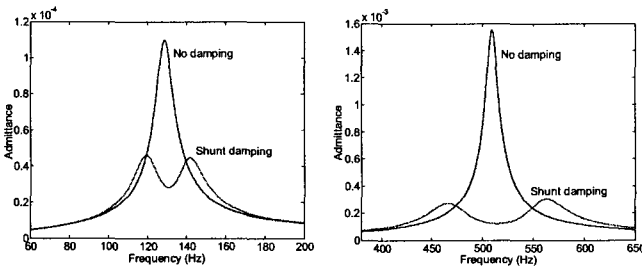


Fig.6 Simulation results for 1st and 2nd modes

파라미터의 값들을 최적화 하였다. 최적화된 회로의 인덕턴스와 레지스턴스 값은 Table 1 에서 나타내고 있다. Fig.6 은 그 값들을 사용하여 시뮬레이션 한 결과이며 전기적 어드미턴스를 이용하여 전달함수를 나타낸 그래프이다. Fig.7 과 Fig.8 은 각각 첫번째 공진 모드(129Hz)와 두번째 공진 모드(513Hz)에 대한 압전 감쇠 실험을 각각의 독립된 모드에 대하여 수행한 결과이다. 첫번째 공진 모드에 관한 실험결과 최대 약 14dB 가량의 감쇠를 보였고 양 옆의 주파수 대역을 고려하여 튜닝한 결과 7dB 의 감쇠효과를 보였다. 또한 두번째 공진 모드에서는 더 큰 감쇠효과가 확인되었는데 그 결과는 공진 주파수에 대하여 최대 26dB 감쇠되었고 주변 주파수 대역을 고려한 튜닝에서는 약 20dB 의 감쇠 효과를 보였다. 본 연구에서는 다중 모드에 대한 압전감쇠 실험을 수행하였으며 Fig.9 는 결과를 보여주고 있다. 먼저 첫번째 공진 모드에 대한 차단회로를 구성하고 전체의 회로가 두번째 공진 모드에서 독립된 압전감쇠 실험의 파라미터 값을 갖도록 인덕턴스와 레지스턴스 값을 정한다 식(10,11). 실제 회로는 각 구성 인자가 내부저항을 포함하므로 실험 시 임피던스 분석기로 직접 측정을 하면서 튜닝을 하였다. 실험 결과 첫번째 공진 모드에서는 차단회로에 의해 두번째 공진 모드에 대하여 튜닝된 회로로 전류가 흘러들어가지 않도록 하였으나 실제로는 전류의 누출이 발생하

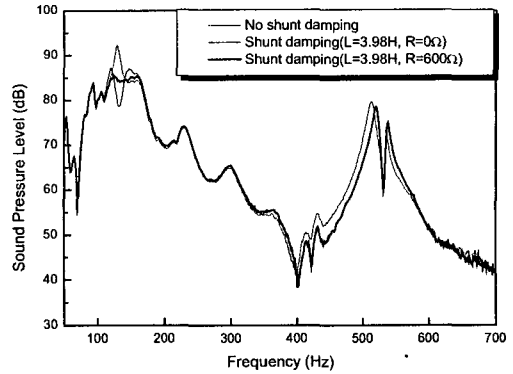


Fig.7 Experimental results for 1st mode

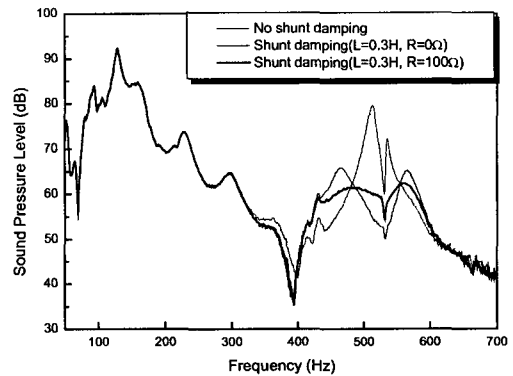


Fig.8 Experimental results for 2nd mode

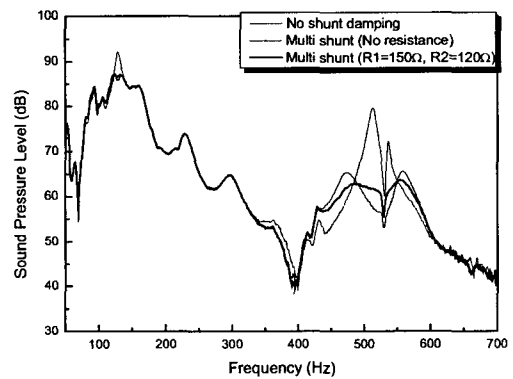


Fig.9 Experimental results for multi mode

므로 독립적으로 튜닝하였을 경우 보다 음압(SPL)이 덜 감쇠된 경향을 보인다. 음압은 약 6dB 감쇠되었다. 두번째 모드에서도 상당한 압전감쇠 효과가 확인되었으며 최대 20dB 이상 감소되었다. 실험에 사용된 각각의 파라미터들은 Table 2 에 나타내었다.

5. 결 론

압전감쇠 효과를 이용한 소음의 감쇠에 관한 실험을 수행하였다. 기존의 모드의 개수 만큼 압전 재료를 붙이던 방법과는 달리 한 개의 압전재료를 이용하여 여러 모드의 소음과 진동을 감쇠시키는 다중 모드 압전감쇠법으로 실험하였다. 본 실험에서는 압전감쇠를 이용하여 패널의 투과소음을 줄이기 위하여 다중모드에 대한 실험을 수행하였으며 회로의 필요한 파라미터의 값은 소산되는 에너지가 최대가 되도록 그 값을 정하였다. 차단회로를 이용하여 두개 이상의 공진 주파수에 대하여 동시에 튜닝을 할 수 있도록 하였다.

실험 결과 하나의 모드에 대하여 수행했던 것보다 감쇠 효과가 약간 작게 나타났으며 이는 차단회로에서 전기적 에너지의 누출로 인해 생기는 것이므로 차 후 좀더 넓은 주파수 대역에서 확실한 차단을 할 수 있는 회로의 설계가 필요하다. 하나의 압전재료와 회로를 이용하여 두 모드의 공진 주파수에 대해 6-20dB 투과소음을 줄였으며 기존 중주파수에 대해서 흡음재를 썼던 것과 비교하여 중량이나 크기에 대하여 훨씬 시스템에 주는 영향이 적으므로 경량의 구조물과 유연한 구조물의 진동 소음을 줄이는데 매우 좋은 효과를 발휘할 수 있다. 또한 본 연구에서 제안된 전기적 임피던스 방법과 최대 에너지 소산법으로 회로의 파라미터를 최적화하는 것은 다른 방법에 비해 실제 시스템에 적용하기 유용하다. 따라서 압전 감쇠를 이용하여 다중 모드의 진동 소음을 줄이는 방법은 그 적용 범위가 넓고 파급효과 또한 큰 기술이라 할 수 있다.

참고문헌

- (1) 김재환, 1996, "압전 지능 구조물의 원리와 소음제어에의 응용", 한국소음진동공학회지, Vol.6, No.3, pp. 267~ 273.
- (2) V.V. Varadan, X. Bao and V.K. Varadan, 1995, "Smart wall paper for noise suppression," *proc of North America Conf. On Smart Structures and Materials(SPIE)*, Vol. 2443, San Diego, California USA.
- (3) R.L. Clark and C.R. Fuller, 1992, "Experiments on active control of structurally radiated sound using multiple piezoceramic actuators," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 91, No. 6, pp. 3313~3320.
- (4) E.F. Crawley and J. de Lues, 1989, "Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures," *AIAA J.*, Vol. 25, No. 10, pp. 1373~1385.
- (5) J. Kim, B. Ko, J. Lee and M. Nam, March 1998, "Optimal design of Piezoelectric smart structures for active cabin noise control," *5th Annual Symp. On Smart Structures & Materials (SPIE)*, Vol. 3323, pp. 228~223, San Diego CA, USA.

(6) 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.

(7) Joseph 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.

(8) 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.

(9) 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.

(10) 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.

(11) L.H. Bell and D.H. Bell, 1994, *Industrial Noise Control*, Marcel Dekker Inc., New York.