

# 압전섀트 댐핑을 이용한 지능패널의 다중 모드 소음 저감

## Multi-mode Noise Reduction of Smart Panels Using Piezoelectric Shunt Damping

김 준 형\* · 김 재 환†

Joon Hyoung Kim and Jaehwan Kim

(2003년 1월 21일 접수 : 2003년 3월 13일 심사완료)

**Key Words** : Smart Panels(지능 패널), Piezoelectric Shunt Damping(압전 섀트 감쇠), Electrical Impedance (전기적 임피던스)

### ABSTRACT

This paper presents the multi-mode noise reduction of smart panels of which passive piezoelectric shunt damping is introduced. For the piezoelectric shunt damping, a passive shunt circuit composed of inductors and a load resistor is connected to the piezoelectric patch mounted on the panel structure. An electrical impedance model is introduced for the system based on the measured electrical impedance, and the criteria for maximum energy dissipation at the shunt circuit is used to find the optimal shunt parameters. For multi-mode shunt damping, the shunt circuit is modified by the introduction of a block circuit. Also the optimal location of the piezoelectric patch is studied by finite element analysis in order to cause the maximum admittance from the patch for each mode of the structure. An acoustic test is performed for the panels and a remarkable noise reduction is obtained in multiple modes of the panel structure.

### 1. 서 론

소음이 중요한 환경 문제로 대두되면서 공학분야에서도 구조물의 진동에 의한 소음 발생을 저감 시키는 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 저감 시키는 방법이 있다.<sup>(1~3)</sup> 하지만 능동제어를 위하여 부가적으로 많은 장비와 비용이 들어가며 시스템이 복잡해지는 단점이 있다.

이를 극복하기 위한 방법으로 최근 활발한 연구가 진행중인 지능재료를 사용하는 방법이 연구 되고 있다. 지능재료 중에서도 압전재료는 가진되는 전기에너지에 의해 기계적 변형을 일으키며 또한 반대의 기 능도 갖춘 재료로서 작동기와 감지기로 많이 이용되고 있다. 따라서 이러한 압전재료를 구조물에 부착하여 사용하면 감지거나 작동기를 따로 설치할 필요가 없으므로 시스템이 간단해지는 장점이 있다.<sup>(4~5)</sup> 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

† 책임저자, 정회원, 인하대학교 기계공학과  
E-mail : jaehwan@inha.ac.kr

Tel : (032)860-7326, Fax : (032)868-1716

\* 정회원, 인하대학교 대학원 기계공학과

적용하여 소음 저감 성능을 검증하고자 한다. 또한 하나의 공진 모드에 대하여 각각의 독립된 회로를 사용하였던 방법과<sup>(6)</sup> 다르게 차단 회로를 이용하여 하나의 회로로 두개 이상의 공진 모드에 대하여 감쇠 효과를 갖도록 선트회로를 설계하여 실험하였다.<sup>(7-8)</sup> 또한 선트회로를 구성하는 합성인덕터를 상용코일 인덕터로 대체하여 회로 구동을 위한 전원공급을 요구하지 않게 됨으로써 기술의 상용화에 더욱 근접하게 되었으며 이의 성능 평가를 위하여 두 인덕터의 전기적 특성을 비교하였다.

## 2. 압전선트감쇠

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.<sup>(9)</sup> 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 소산시키도록 유도하기 위하여 회로 내의 리액턴스(reactance)와 인덕턴스(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.<sup>(10)</sup>

### 2.1 압전 패널

압전 패널은 알루미늄 판에 압전재료가 부착된 형태의 지능 구조물을 말한다. Fig. 1은 실험에 사용된 압전 패널의 개념도를 나타낸다. 패널에 연결된 선트회로는 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 한다.

### 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(Van Dyke model)을 사용하여 압전구조물을 모델링한다. 반다이크 모델에 필요한 계수는 구조물과 결합된 압전재료의 전기적 임피던스를 측정(impedance analyzer, HP4192A)하여 임피던스 정보를 압전재료 전용해석 프로그램인(PRAP, piezoelectric resonance analysis program)에 입력하여 추출한다. 압전구조물과 선트회로의 모델링은 기계적 동흡진기를 전기적으로 상사하여 간단한 회로로 나타내게 된다. Fig. 2는 구조물과 이에 부착된 선트회로를 등가의 전기적 회로모델로 나타낸 그림이다.

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

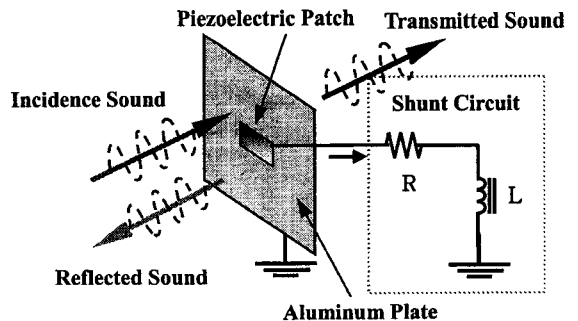


Fig. 1 Schematic diagram of piezoelectric structure

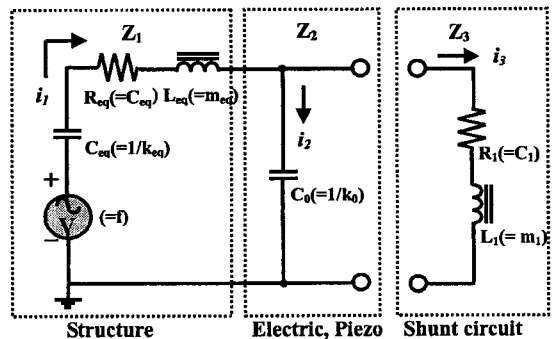


Fig. 2 Electrical analog circuit of MCK system with piezoelectric element and resonant shunt

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

$Z_1$ 은 1차 시스템의 임피던스이며  $Z_2$ 와  $Z_3$ 는 병렬로 연결되어 2차 시스템의 임피던스를 나타낸다. 따라서 전체 시스템의 총 임피던스는 다음과 같이 나타낸다.

$$Z = Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} \quad (2)$$

$$T_r = \left| \frac{I}{V} \right| = \frac{1}{|Z|} = |Y| \quad (3)$$

전달함수는 식 (3)과 같이 전기적 임피던스의 역수인 어드미턴스(admittance)로 표현할 수 있다. 이는 기계전기 상사 법칙에 의해 기계적으로 속도와 힘의 비를 나타낸 것이다.

### 2.3 다중모드에 대한 압전선풀감쇠

감쇠하고자 하는 공진 모드가 두개 이상일 경우 기존에는 각각의 압전재료에 대하여 독립된 선풀회로를 썼다. 그 이유는 OP AMP와 저항과 같은 소자로 이루어진 가상 인덕터를 사용하므로 회로간의 간섭이 일어나고 이로 인해 튜닝을 하기가 쉽지 않기 때문이다. 그러나 각각의 선풀회로를 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 선풀회로를

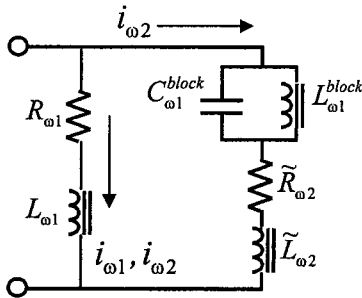


Fig. 3 Schematic of shunt circuit for multi-mode

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. 선풀회로는 기존 단일모드에 대한 회로에 차단회로(blocking circuit)와 인덕터, 저항을 추가하여 구성한다. Fig. 3은 다중 모드 선풀회로를 나타낸 회로도이다.

### 2.4 선풀회로의 파라미터 튜닝

(1) 단일 모드에 대한 튜닝

효율적인 압전 감쇠성능을 위하여 선풀회로를 구성하는 인덕턴스와 저항을 정확히 튜닝하여야 한다. 압전재료는 고유의 정전용량을 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 선풀 회로의 저항으로 흐르는 전류는,

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

이고, 저항에서 소산되는 손실에너지는,

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

이다. 따라서 두 에너지의 비는,

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

로 나타내어진다. 최적의 인덕턴스 값과 저항값 ( $R^*$ ,  $L^*$ )을 구하기 위한 목적 함수는 광대역 주파수

범위에서의 손실 에너지 비의 합이 최대가 되도록 식 (8)과 같이 정하였다.

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

(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  $\omega_1, \omega_2 (\omega_1 < \omega_2)$ 에 대한 다중 모드 선트회로이며,  $R_n, L_n$ 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  $R_n^{block}, L_n^{block}$ 로 구성되어서  $n$ 차 모드의 공진 주파수의 입력을 차단한다. 차단회로에 대한 파라미터는

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

가 만족되도록 값을 정한다. 또한 2차 모드에 대한 튜닝 파라미터는 식 (10), (11)과 같이 정한다.

$$\tilde{L}_2 = \frac{L_1 L_2 + L_2 L_1^{block} - L_1 L_1^{block} - \omega_2^2 L_1 L_2 L_1^{block} C_1^{block}}{(L_1 - L_2)(1 - \omega_2^2 L_1^{block} C_1^{block})} \quad (10)$$

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

식 (10), (11)은 2차 모드에 대한 주파수에 대해서 모든 인자를 포함한 회로의 등가의 인덕턴스 값과 레지스턴스 값을 구한 것으로 회로의 임피던스 계산을 통해 얻어졌다.

### 3. 인덕터의 성능비교

선트회로는 인덕터와 저항으로 이루어진다. 하지만 목적 주파수가 상당히 낮으므로 압전재료의 정전용량을 고려하였을 때 상당히 큰 값의 인덕턴스 값을 요구하게 된다. 따라서 지금까지 OP Amp와 저항으로 이루어진 합성 인덕터를 사용하여 왔다. 이는 인덕턴스

값을 마음대로 조절할 수 있는 장점이 있으나 OP Amp를 작동시키기 위한 전원공급이 필요하고 소자간에 전기적 간섭이 있는 단점이 있다. 따라서 이를 극복하고자 상용코일 인덕터를 사용하여 그 전기적 성능을 비교하였다. 두개의 인덕터가 500 Hz에서 같은 인덕턴스를 갖도록 튜닝하였으며 1 kHz까지 임피던스 분석기를 이용하여 측정하였으며 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 측정결과 임피던스의 크기에는 큰 차이가 없었으나 내부저항에는 고주파로 갈수록 큰 차이가 나는 것을 알 수 있다. 합성인덕터의 경우 증가율이 상당히 커짐을 알 수 있으며 이는 최적의 댐핑을 위한 저항 설정에 큰 영향을 주게 된다. 저주파에서는 오히려 저항이 작은 값을 갖으며 위상도 90도에 가까우므로 이상적인 인덕터에 가까운 경향을 보이거나 고주파에서는 그 경향이 코일 인덕터에 비해 많이 떨어지는 것을 알 수 있다. 본 실험에서는 멀티모드에 대해서 이루어지므로 전반적으로 넓은 주파수에서 안정적인 성능을 갖는 코일 인덕터를 사용하였다.

## 4. 실험 및 장치

### 4.1 음향 실험 장치

Fig. 5는 음향 터널과 실험 장비의 개략도이다. 터널 내부는 음의 반사를 막기 위하여 흡음재로 처리하였으며 끝 단에는 무 반사단(anechoic terminator)을 설치하여 터널 내 공진에 의한 음의 굴곡을 방지 하였다.<sup>(11)</sup> 음향 터널은 800 Hz 까지 평면파 특성을 갖는다. 실험에 사용된 시편(aluminum)과 압전재료(PZT-5 H)의 크기는 각각  $300 \times 300 \times 1.5$  mm와  $100 \times 50 \times 0.5$  mm이다. 압전재료는 방사소음에 가장 큰 영향을 주는 모드를 실험과 FEM으로 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 1은 추출된 반다이크 파라미터를 나타낸다. Fig. 6은 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 선트회로 파라미터를 구하여 실험에 적용

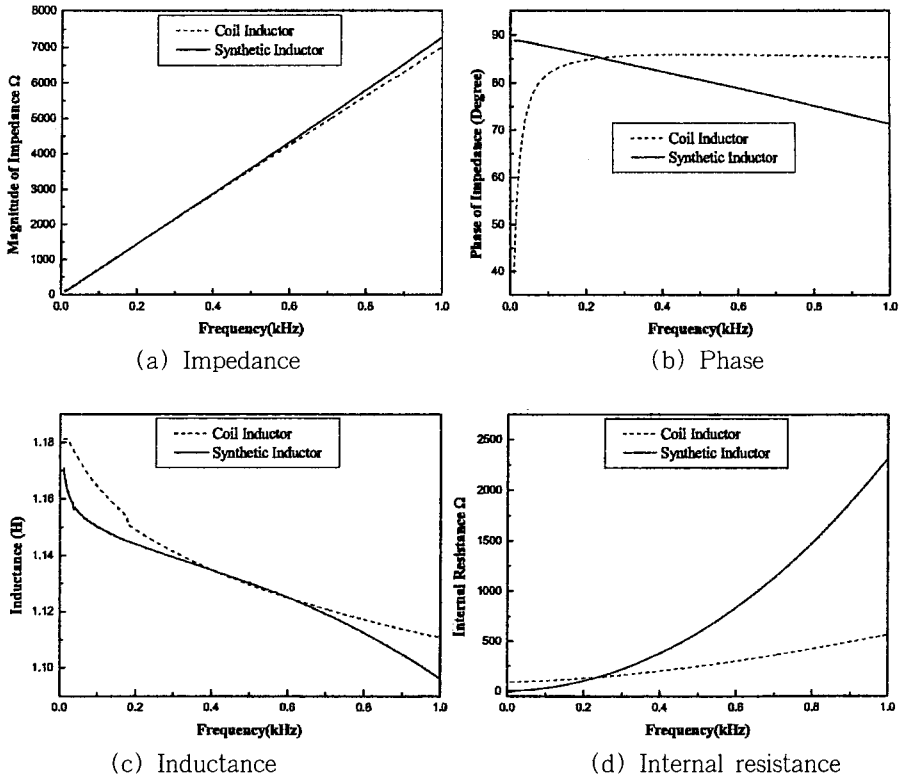


Fig. 4 Comparison of coil inductor and synthetic inductor(two inductors have same inductance, 1.13 H at 500 Hz)

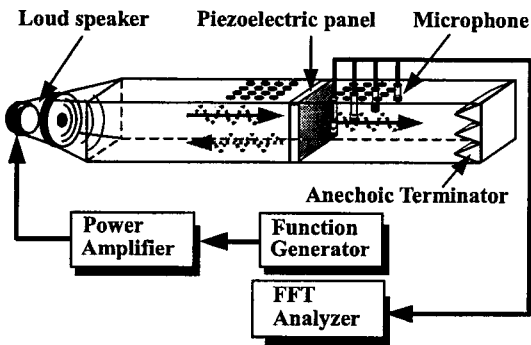


Fig. 5 A schematic diagram of the experimental

하였다.

함수 발생기(Wavetek178)를 통해 발생된 신호를 증폭기를 거쳐 음향 터널 내에 라우드 스피커에서 소음을 발생시키게 된다. 이 때 압전 패널을 통과한 소음은 마이크로폰을 통해 신호 분석기(HP35665A)에서 측정, 분석되어진다.

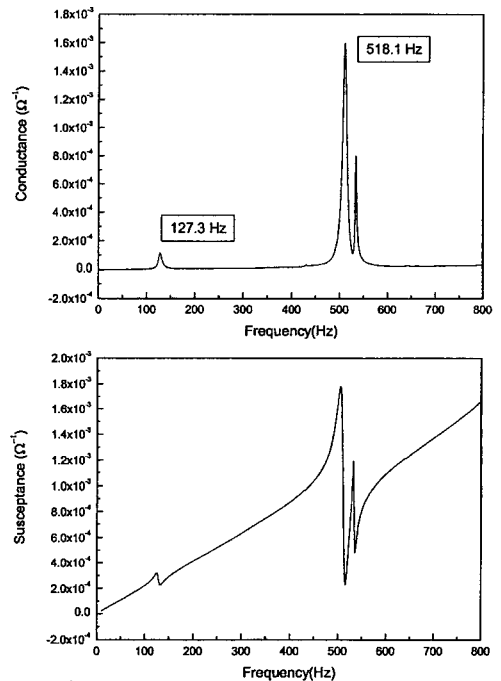


Fig. 6 Measured admittance of piezoelectric structure

## 5. 결과 및 고찰

### 5.1 압전감쇠 실험 결과

압전 패넌을 이용한 압전감쇠 실험을 수행하였다. 식 (8)에서 설명한 목적 함수는 MATLAB의 optimization toolbox를 이용하여 회로를 구성하는 파라미터의 값들을 최적화 하였다. 최적화된 회로의 인덕턴스와 저항 값은 Table 1에서 나타나고 있다. Fig. 7과 Fig. 8은 각각 첫번째 공진 모드(129 Hz)와

두 번째 공진 모드(513 Hz)에 대하여 압전감쇠 효과를 이용하여 패넌을 지나는 투과 및 전달 소음의 저감에 관한 실험 결과이다. 첫번째 공진 모드에 관한 실험결과 압전재료에 셉트회로가 연결되어 있지 않을 때의 음압 보다 최대 약 14 dB 가량의 전달소음 감쇠를 보였고 공진 주파수 양 옆의 주파수 대역에서 소음이 조금 커진 것을 고려하여 다시 튜닝하여 실험한 결과 7 dB의 감쇠효과를 보였다. 또한 두 번째 공진 모드에서는 더 큰 감쇠효과가 확인되었는데 이는 두 번째 모드의 특성 상 압전재료의 변형이 더 크게 발생 되어 더 많은 전기적 에너지가 발생되어진 것으로 인한 것이며 그 결과는 공진 주파수에 대하여 최대 26 dB 감쇠되었고 주변 주파수 대역을 고려한 튜닝에서는 약 20 dB의 감쇠 효과를 보였다. 본 연구에서는 다중 모드에 대한 전달 소음의 압전감쇠 실험을 수행하였으며 Fig. 9는 전달 소음이 저감된 결과를 보여 주고 있다. 먼저 첫번째 공진 모드에 대한 차단회로

Table 1 Electrical impedance parameters for the piezoelectric structure

Freq.	Parameter	VanDyke	Optimization
1 <sup>st</sup> mode (127.3 Hz)	$C_0$ (F)	3.3161e-7	$L_1=4.42$
	$C_{eq}$ (F)	9.413e-9	
	$L_{eq}$ (F)	9097	$R_1=511.02$
	$R_{eq}$ (ohm)	162.9	
2 <sup>nd</sup> mode (518.1 Hz)	$C_0$	3.160e-7	$L_2=0.30$
	$C_{eq}$	1.161e-8	
	$L_{eq}$	644	$R_2=125.25$
	$R_{eq}$	8.421	

Table 2 Experimental parameters of shunt damping for the piezoelectric structure

	1 <sup>st</sup> mode	2 <sup>nd</sup> mode	Multi mode		
			Simulation	Experiment	
$L_i$	3.98	0.301	$L_1$	4.42	3.98
			$R_1$	511.02	150
$R_i$	600	100	$L_2$	0.458	0.446
			$R_2$	165.92	120

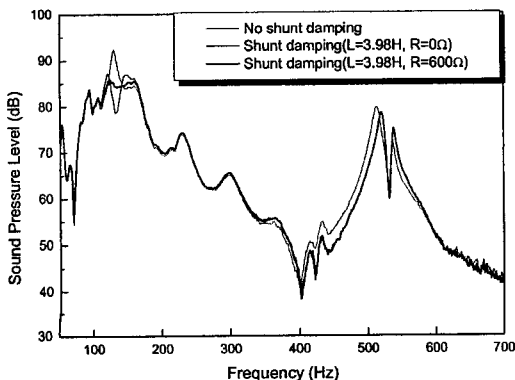


Fig. 7 Experimental results for 1<sup>st</sup> mode

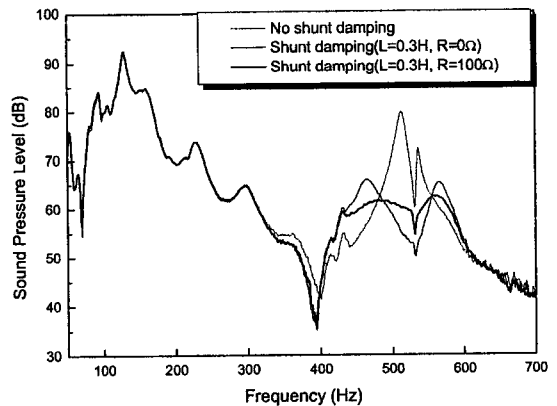


Fig. 8 Experimental results for 2<sup>nd</sup> mode

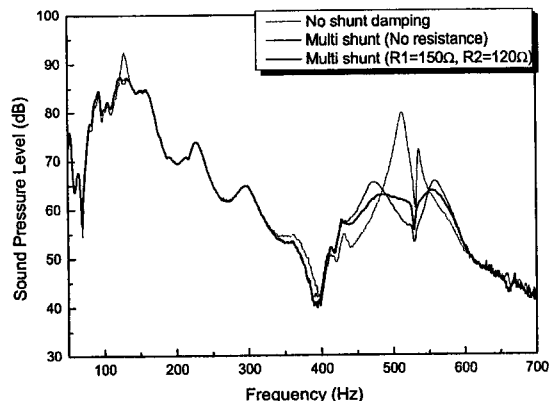


Fig. 9 Experimental results for multi-mode

를 구성하고 전체의 회로가 두 번째 공진 모드에서 독립된 압전감쇠 실험의 파라미터 값을 갖도록 인덕턴스와 저항 값을 식 (10), (11)에 따라 정한다. 실제 회로는 각 구성 인자가 내부저항을 포함하므로 실험 시 임피던스 분석기로 직접 측정을 하면서 튜닝을 하였다. 실험결과 첫번째 공진 모드에서는 차단회로에 의해 두 번째 공진 모드에 대하여 튜닝된 회로로 전류가 흘러들어가지 않도록 하였으나 실제로는 차단회로의 내부저항으로 인해 첫번째 모드에 대한 임피던스가 커지게 되므로 통하는 전류의 양이 줄어들었기 때문에 독립적으로 튜닝하였을 경우 보다 음압이 덜 감쇠된 경향을 보인다. 음압은 약 6 dB감쇠 되었다. 두 번째 모드에서도 상당한 압전감쇠 효과가 확인되었으며 최대 20 dB이상 감소되었다. 실험에 사용된 각각의 파라미터들은 Table 2에 나타내었다.

## 6. 결 론

압전감쇠 효과를 이용한 소음의 감쇠에 관한 실험을 수행하였다. 기존의 모드의 개수 만큼 압전재료를 붙이던 방법과는 달리 한개의 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 것 보다 감쇠 효과가 약간 작게 나타났으며 이는 차단회로에서 내부 저항으로 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 6~20 dB 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.

## 후 기

본 연구는 과학재단 국제공동연구(20006-304-05-2)와 학술진흥재단의 지원(KRF-2002-041-D00031)에 의해 수행되었음.

## 참 고 문 헌

- (1) 김재환, 1996, "압전 지능 구조물의 원리와 소음제어에의 응용," 한국소음진동공학회는문집, 제 6 호 제 3 호, pp. 267~273.
- (2) Varadan, V. V., Bao, X. and Varadan, V. K., 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) Clark, R. L. and Fuller, C. R., 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) Crawley, E. F. and J. de Lues, 1989, "Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures," AIAA J., Vol. 25, No. 10, pp. 1373~1385.
- (5) Kim, J., Ko, B., Lee, J. and Nam, M., 1998, "Optimal Design of Piezoelectric Smart Structures for Active Cabin Noise Control," 5<sup>th</sup> Annual Symp. On Smart Structures & Materials (SPIE), Vol. 3323, pp. 228~223, San Diego CA, USA.
- (6) Kim, J. and Lee, J.-K., 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) 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.

(8) Wu, S. Y., 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) Hagood, N. W. and 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) Kim, J., Ryu, Y.-H. and Choi, S.-B., 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) Bell, L. H. and Bell, D. H., 1994, Industrial Noise Control, Marcel Dekker Inc., New York.