

압전감쇠를 통한 압전단일패널의 전달 소음저감성능

이 중 근* · 김 재 환** · 김 기 선*** · 이 형 식****

Transmitted Noise Reduction Performance of Piezoelectric Single Panel through Piezo-damping

Joong Kuen Lee*, Jae Hwan Kim**, Key-Sun Kim***, and Hyuong Sik Lee****

요약 저주파공진에서의 소음저감을 위한 압전단일패널에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 압전단일패널은 압전재료를 평판 구조물에 부착하고, 션트회로를 압전재료에 연결한 구조물이다. 구조물의 저주파공진에서의 전달 소음저감을 위하여 압전감쇠를 이용하였다. 압전감쇠의 파라미터 튜닝은 제한한 새로운 방법을 적용하였다. 이 방법은 전기적 임피던스모델을 기초로 하여 공진회로에서 에너지 소산이 최대가 되도록 하는 방법으로 구조물에 부착된 압전재료에서 전기적 임피던스를 측정하여 시스템의 공진주파수 근처에서 등가 전기회로를 구성하였다. 압전감쇠를 위한 공진션트 회로는 직렬로 연결된 저항과 인덕터로 구성되었으며, 저항과 인덕터는 회로에서 소산되는 에너지가 최대가 될 수 있는 값으로 최적설계 하였다. 압전단일패널의 전달 소음저감성능은 음향터널을 이용하여 실험을 수행하였다. 음향터널은 사각단면이며 소음 원으로 터널의 한 쪽 끝에 스피커가 설치되었다. 패널은 터널의 중앙에 설치하여 투과 음압을 측정하였다. 압전감쇠를 통하여, 공진주파수에서의 좋은 소음 저감을 얻었다. 압전감쇠를 이용한 압전단일패널은 간단하고 경제적인 측면에서 소음 저감을 위한 유망한 기술이다.

Abstract The possibility of a noise reduction of piezoelectric single panels is experimentally studied. Piezoelectric single panel is basically a plate structure on which piezoelectric patch with shunt circuit is mounted. The use of piezoelectric shunt damping can reduce the transmission at resonance frequencies of the panel structure. Piezo-damping is implemented by using a newly proposed tuning method. This method is based on electrical impedance model and maximizing the dissipated energy at the shunt circuit. By measuring the electrical impedance at the piezoelectric patch bonded on a structure, an equivalent electrical model is constructed near the system resonance frequency. Resonant shunt circuit for piezoelectric shunt damping is composed of resistor and inductor in series, and they are determined by maximizing the dissipated energy throughout the circuit. The transmitted noise reduction performance of single panel is tested on an acoustic tunnel. The tunnel is a tube with a square cross section and a loud speaker is mounted at one side of the tube as a sound source. Panels are mounted in the middle of the tunnel and the transmitted sound pressure across panels is measured. By enabling the piezoelectric shunt damping, noise reduction is achieved at the resonance frequencies as well. Piezoelectric single panel with piezoelectric shunt damping is a promising technology for noise reduction in a broadband frequency.

Key Words : Electrical impedance model, Energy dissipation, Resonant shunt, Piezo-damping

1. 서 론

편안함과 안락함을 추구하는 현대인에게 생활 환경주

변에서 발생하는 각종 진동 및 소음은 공학적 측면에서 큰 문제로 대두되고 있다. 이러한 진동 및 소음에 대한 대책으로 여러 가지 방법이 있으나 소형·경량이며, 보다 우수한 성능을 발휘할 수 있는 방법의 개발에 많은 관심이 집중되고 있다. 구조물 진동에 의해 발생하는 소음 억제를 위하여 일반적으로 사용하는 방법은 크게 수동적인 방법(passive control)과 능동적인 방법(active control)으로 나눌 수 있다. 수동적인 방법은 구조물에

*주)NSV 기술연구소 책임연구원

**인하대학교 기계공학과

***천안공립대학 기계공학과

****대전기능대학 컴퓨터응용기계과

본 논문은 압전재료의 감쇠능을 이용하여 소음저감을 이루는 패널의 개발에 대한 연구결과이다. 그 핵심 내용은 압전재료에 연결된 공진회로를 통하여 발생에너지를 소산시켜 감쇠를 이루는 메커니즘을 제안한 것이다. 이 연구결과는 경제적이며 실용적인 패널 및 응용장치 개발에 활용할 계획이다. (Tel: 032-816-7992)

질량이나 강성을 추가하는 방법으로, 고주파 영역에서는 효과적이다. 능동적 소음제어 방법에는 스피커 등의 부가적인 음원을 이용하여 음장을 억제하는 방법(active noise control)과 소음의 원인이 되는 구조물에 직접 제어 입력을 가함으로써 구조물의 거동을 제어하여 음장을 억제하는 방법(active structural acoustic control)등이 있으며 저주파 영역에서 우수한 성능을 발휘한다[1]. 그러나 능동적 방법을 이용한 저주파 공간에서의 소음 저감을 위해서는 고성능의 제어기 뿐만 아니라 부대설비가 필요하게 되므로 실용화와 경제적인 면에서 문제점을 내포하고 있다. 최근 구조소음저감 방법의 일환으로 지능재료 및 지능 구조물을 이용하는 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 특히, 진동, 소음분야에서는 압전재료를 감지기와 작동기로 이용한 능동 구조소음제어를 통하여 성공적 소음저감을 이루었다[2,3]. 본 논문에서는 압전재료를 이용한 소음저감 방법으로 저주파수 공간에서의 능동구조소음제어를 위한 복잡한 제어기 대신에 압전감쇠를 이용하는 압전단일패널을 제안하려 한다.

압전재료는 점탄성 재료의 손실계수의 최대치와 적용 주파수 영역 폭이 서로 상반되게 나타나는 단점을 극복하는 수동감쇠재료로 알려져 있다. 압전재료를 이용한 압전감쇠의 개념은 Forward에 의해서 논의되어 실험을 통하여 증명되었다[4]. 압전감쇠의 기본개념은 저항, 인덕터 또는 저항과 인덕터를 이용한 전기회로를 압전재료에 연결하여 진동역제를 이루는 것이다. Hogood와 Flotow는 전기회로를 이용하여 압전재료의 기계적 에너지 소산가능성을 제한하였나[5]. 그들은 특정 모드에 대하여 기계 동흡진기에 상사하는 방법으로 구조물의 공진주파수에 일치하는 선트회로의 공진을 튜닝 하였다. 이 방법은 특정모드에 대한 튜닝이 나머지 다른 모드에 영향을 미치기 때문에 다중 모드에 대한 진동역제에 적용하기 어려움이 있다. Edberg 등은 이론적 결과 없이 실험적으로 한 개의 압전재료를 이용하여 이중모드에 대한 감쇠를 수행하였다[6]. Holkamp는 한 개의 압전재료를 이용한 단일모드에 대한 압전감쇠를 선트 파라미터의 최적설계를 통하여 이중모드제어에 적용할 수 있음을 이론적으로 확대하였다[7]. 그러나 기계적개념에 기초한 압전지능구조물에 대한 모델링을 선트 파라미터의 최적설계에 적용하기에는 너무 복잡하다. 따라서 Kim 등은 전기적 임피던스모델과 최대 손실 에너지 개념에 기초를 둔 새로운 튜닝방법을 제안하고 그 타당성을 제시하였다[8]. 기계 동흡진기에 기초를 둔 보편적인 튜닝방법과 대조적으로 제안된 방법은 측정된 전기적 계수를 활용하는 전기적 임피던스모델을 사용하

였다. 튜닝과정에서, 최적 선트 파라미터는 선트회로에서 소산에너지가 최대가 되는 요소들이다. 이 방법은 측정된 전기적 임피던스를 토대로 하므로 임의의 지능구조물에 쉽게 적용할 수 있으며, 제안된 방법과 동일한 절차를 통하여 하나의 압전재료를 이용한 다중모드 감쇠에도 적용할 수 있다.

2. 압전단일패널

Figure 1은 압전단일패널의 기본개념을 나타내고 있다. 제안된 단일패널은 구조물에 압전재료를 부착하고 압전재료와 선트회로가 연결된 형태를 이루고 있다. 선트회로는 저주파수공간에서의 소음저감을 위하여 압전재료에 연결하였다. 제안한 개념을 증명하기 위하여 단일패널을 제작하였다. 300 mm×300 mm×1.5 mm의 알루미늄평판을 주구조물로 하고 압전재료는 첫번째 모드와 두 번째모드를 고려하여 평판의 중앙에 위치하였다. 선트회로는 직렬로 연결된 저항과 인덕터로 구성되었으며 공간선트를 위하여 압전재료에 연결하였다.

3. 압전감쇠

압전감쇠는 에너지 소산 기구이다. 열린 상태의 회로와 연결된 압전장치는 유도된 기계적 변형에너지의 일부를 전기적 에너지로 표면 전극에 저장되게 되며 전극 사이에 저항을 연결할 경우, 저장된 에너지는 회로 내로 흐르게 되어 열로 에너지는 소산된다. 이와 같이 연결된 선트회로의 구성 요소인 인덕터는 압전재료의 반작용 성분을 제거하는 역할을 하며, 기계적 시스템에 맞는 최적의 저항은 회로의 전기적 공진을 발생시켜 더 많은 전하의 흐름을 돕는 역할을 수행한다. 이러한 회로를 공진선트라 한다. 최대 에너지 소산이 시스템의 공진주파수에서 발생하게 하기 위하여 최적의 인덕턴스와 저항을 찾는 것이 중요하다. 본 논문에서는 전기적 임피던스

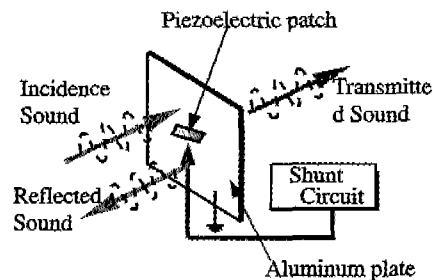


Figure 1. Schematic diagram of the proposed piezo-damping system.

모델에 기초하여 최대 소산에너지 개념을 적용한 새로운 파라미터 튜닝 방법을 간단히 요약하였다[8].

3.1. 압전재료의 전기회로 모델

압전재료는 공진에서 동가의 전기회로 요소들로 표현할 수 있다. 공진회로에는 반다이크(Van Dyke)모델과 컴플렉스(complex)모델을 이용하여 나타낼 수 있으며 회로에서 일반적으로 유전손실(dielectric loss) R_0 , 압전재료 고유의 정전용량 C_0 , 기계적 특성 즉 질량, 감쇠, 강성을 L_m, R_m, C_m 으로 표기한다. 대부분의 경우 유전손실계수(R_0)는 매우 작다고 가정하여 실수인 4개의 요소로 반다이크모델을 나타낸다. 반면에 컴플렉스모델은 비공진 회로에 기초를 둔 것이다. 이 모델은 복소수인 3개의 요소(C_0, C_1, L_1)를 갖는다. 이는 개별적인 6개의 요소를 나타내며, 무 부하 압전재료 공진기의 전기적 특성을 이상적으로 나타낸다. 작동주파수가 구조물의 공진 근처이면 이 시스템은 반다이크 모델(Figure 2)을 이용하여 나타낼 수 있다. 시스템을 전기적 임피던스 회로로 표현하면 회로의 각 노드 사이의 전기적 임피던스는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} Z_1(s) &= \frac{K_{ew}}{s} + c_1 = \frac{C_1}{j\omega} + R_1 \\ Z_2(s) &= m_1 s = j\omega L_1 \\ Z_3(s) &= \frac{1}{sC_0} = \frac{1}{j\omega C_0} \\ Z_4(s) &= Ls + R = j\omega L_2 + R_2 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 C_1, R_1, L_1 은 시스템의 강성, 감쇠, 질량을 각각 나타낸다. 일반적인 손실이 없다고 하면 Kirchhoff의 전압과 전류법칙을 임피던스회로에 적용하여 전체 시스템의 전기적 임피던스는

$$Z = \frac{Z_1 \left[Z_2 + \frac{Z_3 Z_4}{Z_3 + Z_4} \right]}{Z_1 + \left[Z_2 + \frac{Z_3 Z_4}{Z_3 + Z_4} \right]} \quad (2)$$

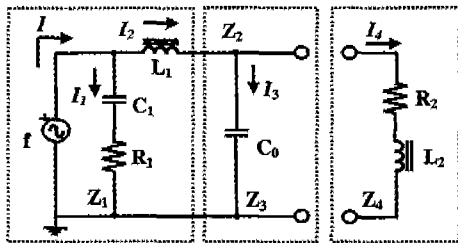


Figure 2. Equivalent electrical circuit.

가 된다. 압전재료에 입력전류와 셉트회로를 통과하는 전류 사이의 전달함수는 다음과 같이 된다.

$$\frac{I_2}{I} = 1 - \frac{Z}{Z_1} \quad (3)$$

이 전달함수는 기계 동흡진기의 전달함수의 상사이다 [5]. 제안된 지능구조물의 전기적 임피던스모델을 사용하기 위해서는 반다이크모델의 계수를 구하여야 한다. 이를 위하여 지능구조물의 전기적 임피던스를 직접 측정하였다.

반다이크모델 또는 컴플렉스모델에 사용되는 계수들은 전기 임피던스 측정기(impedance analyzer, HP4192A)와 압전재료 해석 프로그램(Piezoelectric Resonance Analysis Program, PRAP)을 이용하여 구하였다[9].

3.2. 파라미터 튜닝

파라미터 튜닝은 압전감쇠성능을 최대로 하기 위해서는 필수적이다. 공진현트에서 인덕턴스는 구조물의 공진주파수와 셉트회로의 공진주파수가 일치하도록 선정하여야 하며 셉트회로의 저항은 소산에너지가 최대가 되도록 선택하여야 한다. 본 논문에서는 일반적으로 사용하는 방법과 같이 도시적으로 전달함수를 튜닝하는 대신에 최대 소산에너지와 연관된 새로운 파라미터 튜닝방법을 적용하였다. Figure 2와 같은 동가 전기적 임피던스모델에서 외부 가진에 의해 구조물에 유도되는 에너지는

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

이다. 이 에너지는 연속적으로 생산되므로 이를 셉트회로의 입력 에너지라 한다. 셉트회로에서의 소산에너지는 공진회로에 따른 전기적 임피던스와 전압의 함으로 쓸 수 있다.

셉트회로 입력전류와 소산에너지는

$$I_4 = \frac{Z_3}{(Z_3 + Z_4)} \cdot \frac{(Z_1 - Z)}{Z_1} I \quad (5)$$

$$\begin{aligned} P_D &= \frac{1}{2} Re[(Z_4 \cdot I_4) \cdot I_4^*] \\ &= \frac{1}{2} Re \left[\frac{Z_3 \cdot Z_4}{(Z_3 + Z_4)} \cdot \frac{(Z_1 - Z)}{Z_1} \right] |I|^2 \end{aligned} \quad (6)$$

이므로, 소산에너지와 입력 에너지의 비는 다음 식과 같다.

$$J = \frac{P_D}{P_{IN}} = \frac{Re \left[\frac{Z_1 \cdot Z_4}{(Z_3 + Z_4)} \cdot \frac{(Z_1 - Z)}{Z_1} \right]}{|Z|} \quad (7)$$

튜닝과정에서, 섀트 파라미터를 최적상태로 선정함으로써 에너지 소산을 최대화 할 수 있으므로 소산에너지는 최적설계를 위한 목적함수로 정의하고 설계변수로 섀트 회로의 저항과 인덕턴스로 정한다.

$$[L_i^*, R_i^*] = \underset{L, R}{Max} [J] \quad (8)$$

압전지능구조물을 전기적 임피던스모델로 나타낼 때 모델의 계수는 측정된 전기적 임피던스와 PRAP프로그램을 이용하여 추출할 수 있으며 소산에너지를 이용한 섀트회로의 최적 인덕턴스와 저항을 구하여 구조물의 진동을 감쇠할 수 있다[5].

4. 음향터널

패널의 소음저감 성능을 실험하기 위해서는 저주파수에서 고주파 영역까지 전달음을 측정할 수 있어야 한다. 대부분의 패널 재료에서 전달손실은 엄격한 조건하에서 측정된다. 실험과정은 대부분 ASTM 표준 E90에 따라서 진행되어 진다[10]. 그러나 이러한 실험장비가 고가인 관계로 간단한 음향터널을 설계, 제작하였다. 음향터널은 300 mm×300 mm의 사각튜브에 길이가 4 m이다. 이것은 같은 길이로 2등분된 상, 하부터널로 되어 있으며, 스피커는 상부터널의 끝부분에 설치하고 웨지(wedge)로 제작된 무 반향 막음(anechoic terminator)을 하부터널의 다른 끝에 설치하였다. 두 단면이 결합되는 지점에 특별히 설계된 플랜지를 설치하여 패널을 이 곳에 장착하였다. 패널의 4면은 볼트를 이용하여 체결하고 두 단면사이에서 음압의 누기를 막기 위하여 단단히 결합하였다. 터널은 유향적으로 고체 표면을 만들기 위하여 4.5 mm 두께의 강철 판으로 제작하였다. 상부와 하부터널의 4개의 단면에서 인가되는 음원의 주파수에 따른 음압을 측정하기 위하여 16개의 구멍을 제작하였다[11]. 전달음 측정은 Figure 3에서와 같이 하부 단면의 대각선으로 설치된 4개의 마이크로 폰을 사용하였다. 관내소음측정표준에 의해서 4개 마이크로 폰의 음압 평균값을 전달음 계산에 이용하였다. 터널의 음향특성 실험으로 단면에 따라 반복적으로 음압 분포를 측정하여, 평면파를 가정할 수 있는 한계주파수를 800 Hz까지로 하였다(Figure 4). 실험을 통하여 저주파영역에서

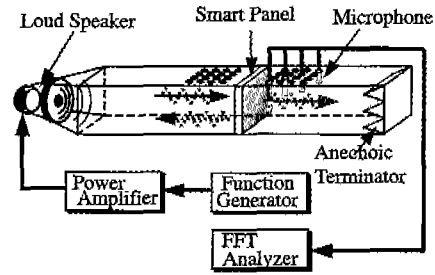


Figure 3. Experimental apparatus.

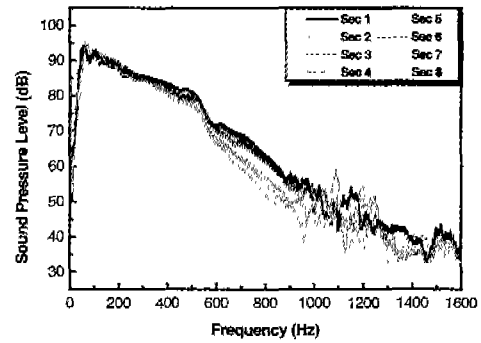


Figure 4. Measured sound pressure level at each section.

는 4개의 마이크로폰에서의 측정 음압에는 차이가 없었으나 800 Hz 이상에서는 터널의 단면에 따른 압력 차이에 기인한 굴곡현상이 발생하였다.

5. 실험결과 및 논의

5.1. 섀트 파라미터 튜닝

제한한 패널에 대한 압전감쇠를 위한 튜닝 방법으로 본 논문에서 제안한 최대 소산에너지 방법은 구조물과 압전재료의 대한 전기적 임피던스모델의 계수들이 필요하다. 압전지능패널은 Figure 5에서와 같이 구조물인 300 mm×300 mm×1.5 mm 사각 알루미늄 판과 40 mm×80 mm×0.8 mm 압전재료(PZT-5)가 판의 중앙에 부착된 구조이다. 패널의 진동을 측정하기 위하여 가속도계를 이용하였다. Figure 6은 HP4192A 임피던스 측정기를 이용하여 측정한 단일패널의 콘덕턴스곡선이다. 콘덕턴스는 임피던스의 역수인 어드미턴스의 실수부이다. 그림에서와 같이 단일패널의 첫번째, 두 번째 공진주파수는 각각 140 Hz, 548 Hz이다. Computer와 PRAP 프로그램을 이용하여 측정된 어드미턴스에서 등가 전기적 임피던스모델의 계수를 추출하였다. Table 1은 패널의 첫번째, 두 번째 공진주파수에 대한 추출된 만다이크와 콤포렉스모델의 계수를 나타낸다. Figure 7은 단일패널

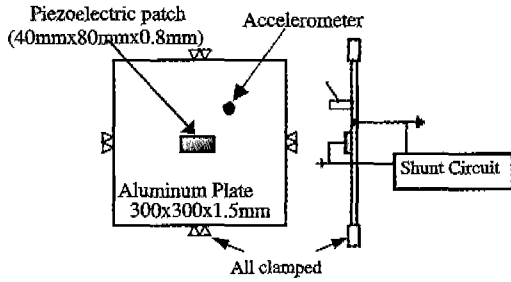


Figure 5. A schematic diagram of the proposed single panel for test.

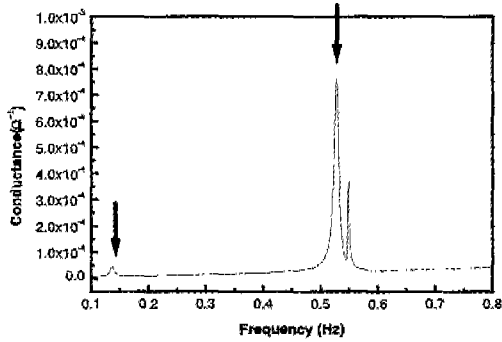


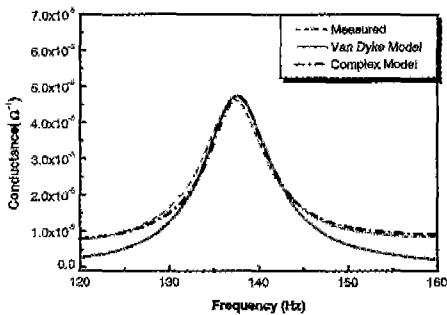
Figure 6. Measured electrical impedance of the single panel.

Table 1. Electrical impedance parameters for the single panel

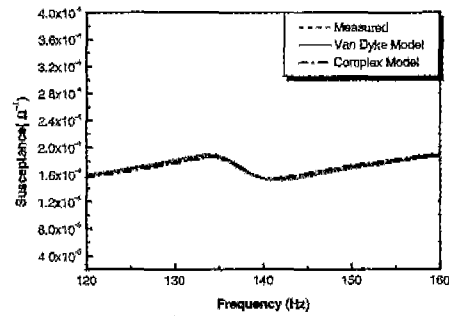
Freq.(Hz)	Para'	Van Dyke	Complex
140 Hz	C ₀ (F)	1.967e-7	1.967e-7-j7.819e-9
	C ₁ (F)	3.716e-9	2.718e-9-j1.51e-10
	R ₁ (Ω)	2.115e4	
	L ₁ (H)	360.1	490.8-j1.243
548 Hz	C ₀ (F)	1.902e-7	1.902e-7-j1.119e-8
	C ₁ (F)	4.471e-9	4.086e-9-j4.759e-10
	R ₁ (Ω)	1147	
	L ₁ (H)	19.18	20.19-j2.06

의 첫번째, 두 번째 공진주파수에서 측정된 어드미턴스와 시뮬레이션한 어드미턴스를 비교한 결과이다. 그림에서 두 어드미턴스는 공진주파수에서 매우 일치함을 알 수 있다. 이는 설정된 등가 전기적 모델이 공진주파수영역에서 패널의 특성을 정확히 나타냄을 증명하는 것이다.

마지막으로, 소산 에너지법을 이용하여 공진회로의 최적 파라미터를 구하였다(Table 2). 비록 Figure 6에서 컴플렉스모델이 반다이크모델 보다 잘 맞지만, 컴플렉스모델에 대한 기계적 상사를 통한 증명이 이루어지지 않은 관계로 반다이크모델을 최적 파라미터 튜닝에 이

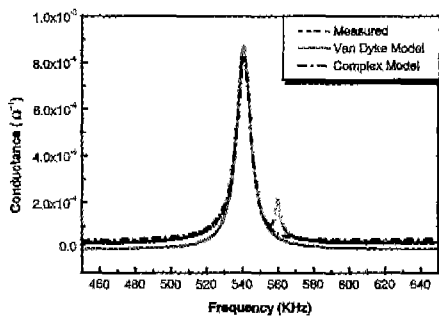


a) Conductance

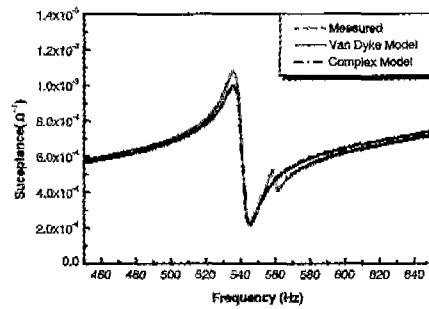


b) Susceptance

(a) For first resonance (140 Hz)



a) Conductance



b) Susceptance

(b) For second resonance (548 Hz)

Figure 7. Simulation result of impedance with PRAP.

Table 2. Optimal parameters of the shunt circuit(DEM method)

Freq.(Hz)	Para'	Van Dyke	Complex	Measured
140 Hz	$R_2(\Omega)$	820.9	820.327	780
	$L_2(H)$	6.762	6.7567	6.87
548 Hz	$R_2(\Omega)$	214.2	213.83	200
	$L_2(H)$	0.4451	0.4443	0.47

용하였다. 선트회로에 대한 최적 파라미터와 등가 전기적모델 계수를 이용하여 단일패널에 대한 속도 전달함수를 시뮬레이션 하였다(Figure 8). 시뮬레이션 결과, 속도전달의 크기가 선트 파라미터의 최적 튜닝에 의해 적절히 감소함을 확인하였다.

5.2. 압전감쇠에 의한 소음저감 성능

공진주파수에서의 전달 소음저감에 대한 압전감쇠 효과를 실험적으로 증명하기 위하여 단일패널에 대한 음향실험을 수행하였다. 먼저, 압전감쇠를 부과하지 않은 상태에서의 전달음 실험을 통하여 단일패널의 첫번째, 두 번째 공진주파수가 140 Hz, 548 Hz에서 발생하였다(Figure 9).

이들 공진주파수를 저감대상으로 설정하여 압전감쇠를 부과한 상태에서의 음향실험을 수행하였다. Table 1

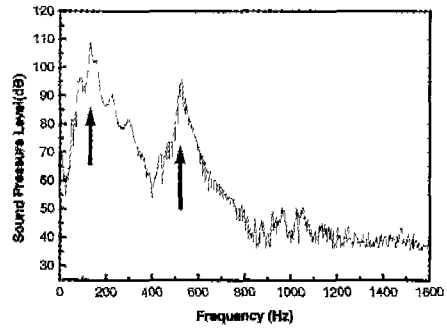


Figure 9. Transmitted sound pressure of single panel with no piezo-damping.

에서 나타난 것과 같이 최적 인덕턴스는 현실적으로 구현이 불가능한 값이므로, 가상 인덕터를 사용하였다 [12]. Figure 10은 가상 인덕터의 회로도를 나타내고 있다. 가상 인덕터는 경량이고 여러 인덕턴스를 묘사할 수 있으나, 인덕턴스에 비례하는 저항을 갖게 되므로 이들 저항은 선트회로의 저항을 선정하는 데 영향을 미치게 된다[7]. 가상 인덕터의 인덕턴스는 임피던스 측정기를 이용하여 공진주파수에서 측정하였다(Table 2). 표에서 측정된 선트회로 파라미터와 최적 설계한 파라미터값이 유사한 값을 나타냄을 알 수 있다.

압전감쇠를 부과한 상태에서의 음향실험을 통하여,

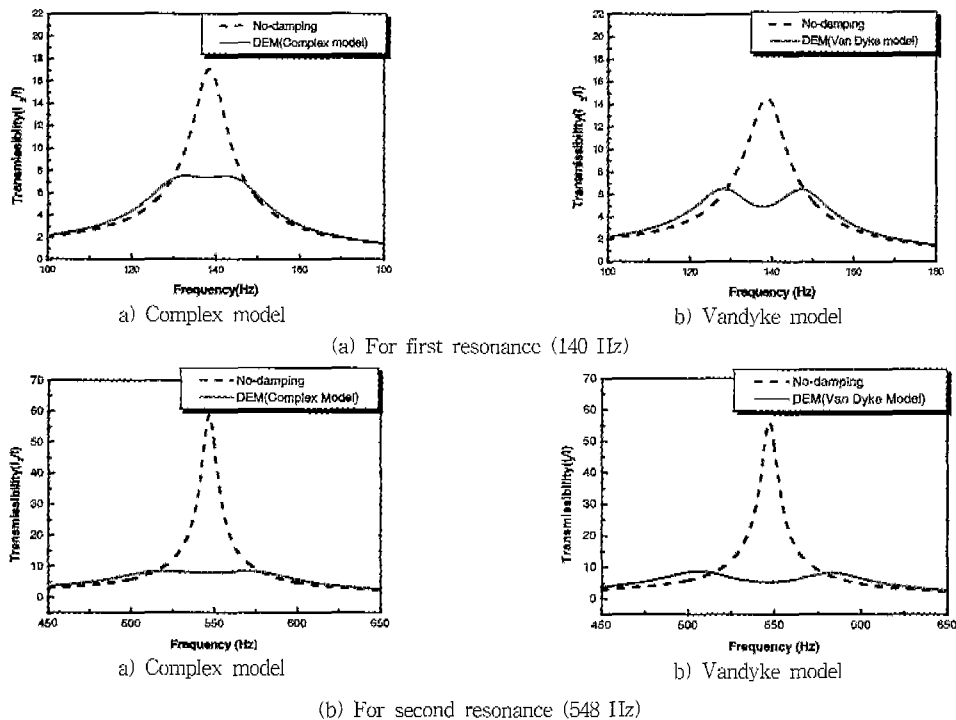


Figure 8. Simulation result of shunt parameter tuning.

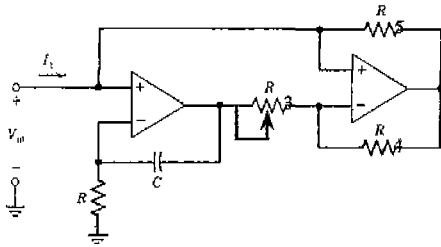
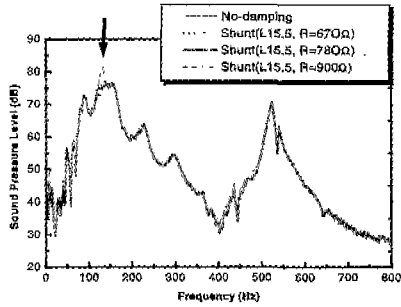
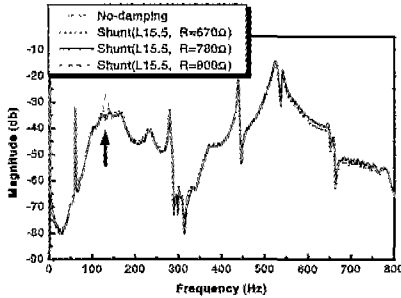


Figure 10. A schematic diagram of synthetic inductor.



a) Sound pressure level



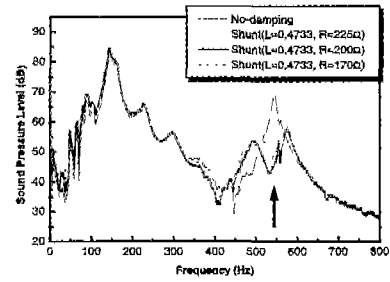
b) Vibration magnitude

Figure 11. Experimental results of single panel with piezo-damping for the 1st resonance (140 Hz).

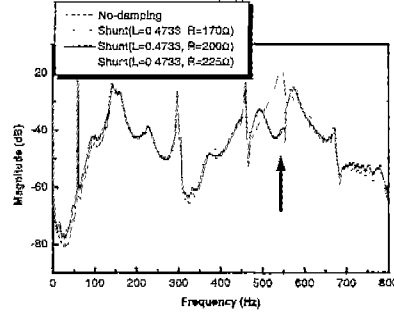
첫번째와 두 번째 공진주파수에서 압전감쇠에 의한 음압과 진동이 8 dB, 25 dB 감소하였다(Figure 11, 12). 이러한 실험을 통하여 압전감쇠에 의한 공진주파수에서의 소음, 진동 저감성능을 확인하였다.

6. 결 론

저주파수 공진에서의 전달 소음저감을 위하여 압전감쇠를 이용하는 압전단일패널을 제안하고 실험적 연구를 수행하였다. 선트회로의 파라미터 튜닝에 전기적 임피던스모델과 최대 소산에너지가 연관된 새로운 방법을 이용하였다. 단일패널의 소음저감성능을 실험하기 위하여 음향터널을 설계, 제작하고 음향터널의 음특성 실험을 통하여 음향장치의 사용주파수를 평가하였다.



a) Sound pressure level



b) Vibration magnitude

Figure 12. Experimental results of single panel with piezo-damping for the 2nd resonance (548 Hz).

공진주파수에서의 소음저감을 위하여 제안된 단일패널의 첫번째와 두 번째 공진에 대한 압전감쇠를 부과한 상태에서의 음향실험을 통하여 8 dB, 25 dB의 전달 소음저감을 확인하였다. 이러한 압전감쇠를 이용하는 지능패널은 실용화와 경제적 측면을 고려한 유망한 소음저감 기술이다.

본 논문에서 제안한 파라미터 튜닝 방법은 압전체료가 부착된 임의의 구조물에 쉽게 적용할 수 있고 하나 압전체료로 다중모드 감쇠가 가능한 장점을 가지고 있다. 또한 압전감쇠 효과를 증대 시키는 방안에 대한 연구 뿐만 아니라 광대역 소음저감을 위한 지능패널의 개발이 필요하다.

참 고 문 헌

[1] J. Kim, J. Lee, B. Im and C. Cheong, "Modeling of Piezoelectric Smart Structures Including Absorbing Materials for Cabin Noise Problems," 6th Annual symp. on Smart Structures and materials (SPIE), Newport Beach, California, USA, March. Vol.3667, pp. 524~529, 1999.
 [2] R. L. Clark and C. R. Fuller, "Experiments on active control of structurally radiated sound

- using multiple piezoceramic actuators," *J. Acoust. Soc. Am.*, 91, (6), pp. 3313~3320, 1992.
- [3] B-T. Wang, R. A. Burdisso and C. R. Fuller, "Optimal Placement of Piezoelectric Actuators for Active Structural Acoustic Control," *J. Intell. Mat. Sys. Str.* 5, pp. 67~77, 1994.
- [4] R. L. Forward, "Electric Damping of Vibrations in Optical Structures," *J. of Applied Optics*, 18(5), pp. 690~697, 1979.
- [5] N. W. Hagood, A. von Flotow, "Damping of Structural Vibrations with Piezoelectric Materials and Passive Electrical Networks," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 146(2), pp. 243~268, 1991.
- [6] D. L. Edberg, A. S. Bicos and J. S. Fechter, "On Piezoelectric Energy Conversion for Passive Damping Enhancement," *Proceedings of Damping '91, San Diego*, Paper GBA 1, 1991.
- [7] J. J. Hollkamp, "Multimodal Passive Vibration Suppression with Piezoelectric Materials and Resonant Shunts," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 5, pp. 49~57, 1994.
- [8] J. Kim, Y.-H. Ryu and S.-B. Choi, "New Shunting Parameter Tuning Method for Piezoelectric damping Based on Measured Electrical Impedance," *Smart Materials and Structures*, 9(6), pp. 868~877, 2000.
- [9] PRAP (Piezoelectric Resonance Analysis Program), TASI technical Software, 174 Montreal Street, Kingston, Ontario K7K 3G4, Canada.
- [10] L. H. Bell and D. H. Bell, *Industrial Noise Control*, (Marcel Dekker Inc., New York, 1994)
- [11] ASTM C384, "Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones, and a digital frequency analysis system," ASTM, PA, USA
- [12] Chen, W. K., *Passive and Active Filters*, New York, John Wiley and Sons, Inc., 1986.