

압전감쇠를 이용한 압전지능패널의 전달 소음저감 성능

이 중 근*

Transmission Noise Reduction Performance of Smart Panels using Piezoelectric Shunt Damping

Joong Kuen Lee*

요 약 압전감쇠에 의해 전달 소음을 저감시키는 압전지능패널에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 압전지능패널은 기본적으로 압전재료를 부착한 평판 구조물에 선트회로를 연결하고 흡음재들을 부가한 구조물이다. 지능패널은 중 주파수영역에서 흡음재의 수동적 특성을 이용하고 저주파수영역의 공진주파수에서는 압전감쇠를 적용하여 소음저감을 이루는 개념이다. 저주파공진에서의 소음저감을 위하여 측정된 전기적임피던스모델을 이용하는 압전감쇠를 적용하였다. 압전감쇠를 위한 공진 선트회로는 직렬로 연결된 저항과 인덕터로 구성되었으며, 저항과 인덕터는 회로에서 소산되는 에너지가 최대가 될 수 있는 값으로 최적설계하였다. 압전지능패널의 전달 소음저감성능은 음향터널을 사용하여 실험을 수행하였다. 음향터널은 사각단면 형태이며 소음 원으로 터널의 한 쪽 끝에 스피커가 설치되었다. 패널들을 터널의 중앙에 설치하여 부과 음압을 측정하였다. 흡음재를 갖는 지능패널과 흡음재와 공기층을 갖는 압전지능패널은 수동적 특성에 의해 저주파영역의 공진주파수를 제외한 중 주파수영역에서 뚜렷한 소음저감 효과를 나타내었다. 압전감쇠를 통하여, 첫 번째 공진주파수에서 약 10dB, 8dB의 소음저감 효과를 얻었다. 압전감쇠와 수동특성을 혼용하는 압전지능패널은 넓은 주파수영역에서의 소음저감을 위한 유망한 기술이다.

Abstract The possibility of a transmission noise reduction of piezoelectric smart panels using piezoelectric shunt damping is experimentally studied. Piezoelectric smart panel is basically a plate structure on which piezoelectric patch with shunt circuits is mounted and sound absorbing materials are bonded on the surface of the structure. Sound absorbing materials can absorb the sound transmitted at mid frequency region effectively while the use of piezoelectric shunt damping can reduce the transmission at resonance frequencies of the panel structure. To be able to reduce the sound transmission at low panel resonances, piezoelectric damping using the measured electrical impedance model is adopted. 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 smart panels is investigated using an acoustic tunnel. The tunnel is a tube with 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. Noise reduction performance of a smart panels possessing absorbing material and/or air gap shows a good result at mid frequency region but little effect in the resonance frequency. By enabling the piezoelectric shunt damping, noise reduction of 10dB, 8dB is achieved at the resonance frequencies as well. Piezoelectric smart panels incorporating passive method and piezoelectric shunt damping are a promising technology for noise reduction in a broadband frequency.

Key Words : Piezoelectric shunt damping, Electrical impedance model, Maximum dissipation energy, Absorbing

1. 서 론

고전적 개념의 수동적 소음제어 방법은 흡음재, 차음재 등을 이용하거나 구조적인 보완하는 것을 의미한다. 그러나 수동적 방법으로는 저주파대역의 감쇠를 증가시

키기 위하여 부가되는 감쇠 재료에 의해 무게가 증가하는 문제점을 가지고 있다[1]. 대부분의 수동 감쇠는 점탄성 재료(viscoelastic materials)를 이용한다. 점탄성 재료는 수동 감쇠의 효율성에 큰 영향을 미치는 손실계수(loss factor)의 최대치와 적용 주파수 영역 폭이 서로 상반되게 나타나는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 극복할 수 있는 새로운 수동 감쇠 재료로서 압전재료가

*아시아소음진동연구소 부소장
Tel: 019-9151-6131

도입되었다. 압전재료를 이용하면 전기장에 의한 강성 변화에 따른 감쇠효과 뿐만 아니라 에너지 측면에서의 감쇠효과도 얻을 수 있다.

압전재료를 이용한 압전감쇠의 개념은 Forward에 의해서 논의되었으며, 실험을 통하여 증명되었다[2]. 압전감쇠의 기본개념은 저항, 인덕터 또는 저항과 인덕터를 이용한 전기회로를 압전재료에 연결하여 진동억제를 이루는 것이다. Hogood와 Flotow는 전기회로를 이용하여 압전재료의 기계적 에너지의 소산가능성을 제안하였다[3]. 그들은 특정 모드에 대하여 기계 동흡진에 상사하는 방법으로 구조물의 공진주파수에 일치하는 선트회로의 공진을 튜닝 하였다. 이 방법은 특정모드에 대한 튜닝이 나머지 다른 모드에 영향을 미치지 때문에 다중모드에 대한 진동억제에 적용하기 어려움이 있다. Holkamp는 한 개의 압전재료를 이용한 단일모드에 대한 압전감쇠를 선트 파라미터의 최적설계를 통하여 이중모드제어에 적용할 수 있음을 이론적으로 확대하였다[4]. 그러나, 기계적 개념에 기초한 압전지능구조물에 대한 모델링을 선트회로의 파라미터에 대한 최적설계에 적용하기에는 너무 복잡하다. 따라서, Kim등은 전기적 임피던스모델과 최대 손실에너지 개념에 기초를 둔 새로운 튜닝방법을 제안하고 그 타당성을 제시하였다[5, 6, 7]. 기계 동흡진기에 기초를 둔 보편적인 튜닝방법과 대조적으로, 제안된 방법은 측정된 전기적 계수를 활용하는 전기적 임피던스모델을 사용하였다. 튜닝과정에서, 최적의 선트회로 파라미터는 선트회로에서 소산에너지가 최대가 되도록 하는 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.

본 논문에서는 압전재료를 이용한 소음저감 방법으로 저주파수영역에서의 능동 구조소음제어를 위한 복잡한 제어기 대신에 압전감쇠와 수동적 특성을 갖는 압전지능패널을 제안하려 한다. 이는 일종의 차음재 개념으로 압전재료를 부착한 평판에 흡음재와 공기층을 부가한 형태로 흡음재와 공기층에 의한 고주파 영역에서 수동적 소음저감과 저주파의 특정 주파수, 즉 구조물의 공진 주파수에서의 압전감쇠에 의한 효과를 얻는 것이다. 압전 감쇠를 이용하면 기존의 저주파대역에서의 능동적 방법에 의한 소음 저감을 위해 필수적으로 사용되던 여러 측정장비 및 제어 시스템 대신에 간단한 공진회로만 구성하여 압전 지능구조물에 부착하면 되므로 경제적인 측면 등에서 여러 이점을 가지고 있다. 이와 같은 압전 지능패널은 압전감쇠에 의한 공진 주파수에서의 소음저감효과와 더불어 흡음재들의 영향으로 중주파수이상에서의 저감효과를 부가할 수 있으므로 넓은 주파수 영역

에서 저감효과를 기대할 수 있다. 실제로 이러한 장점을 방음벽이나 실내 장식재료의 활용을 위한 연구를 수행중이다.

2. 압전지능패널

Figure 1에 압전지능패널의 기본개념을 나타내고 있다. 제안한 지능패널의 소음저감 성능을 증명하기 위하여 압전지능패널 그리고 압전이중지능패널을 제작하였다. 기본적으로 주구조물은 두께 1.5 mm, 단면 340 mm × 340 mm의 알루미늄 평판을 사용하여 중앙 부위에 압전 재료를 부착하고 압전재료와 선트회로를 연결하여 압전 감쇠를 이루는 구조로 되어있다. 이에 수동적 특성을 부여한 형태로 압전지능패널은 가로, 세로 각각 300 mm이고 두께가 15 mm인 폴리우레탄 폼(polyurethane foam, 밀도 100 kg/m³, 한국펄퍼사)을 주구조물의 압전재료가 부착되지 않은 다른 면에 부착한 형태이다. 그리고 지능패널의 흡음효과를 증대시키기 위하여 지능패널에 10 mm의 공기층을 두고 다른 알루미늄 평판을 갖는 형태인 이중지능패널을 제작하였다[8]. 압전재료는 평판의 첫 번째 모드를 고려하여 평판의 중앙에 부착하였다. 선트회로는 직렬로 연결된 저항과 인덕터로 구성되었으며 공진선트를 위하여 압전재료에 연결하였다.

3. 압전감쇠

압전감쇠는 에너지 소산 기구이다. 열린 상태의 회로와 연결된 압전장치는 유도된 기계적 변형에너지의 일부를 전기적 에너지로 표면의 진극에 저장하게 되며 전극사이에 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, 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 임피던스모델에 기초하여 최대 소산에너지 개념을 적용한 새로운 파라미터 튜닝 방법을 간단히 요약하였다[5].

3.1 압전재료의 전기회로 모델

압전재료는 공진에서 등가의 전기회로 요소들로 표현할 수 있다. 공진회로에는 반다이크(Van Dyke)모델과 컴플렉스(Complex)모델을 이용하여 나타낼 수 있으며 회로에서 일반적으로 유전손실(dielectric loss) R_e , 압전재료 고유의 정전용량 C_e , 기계적 특성 즉 질량, 감

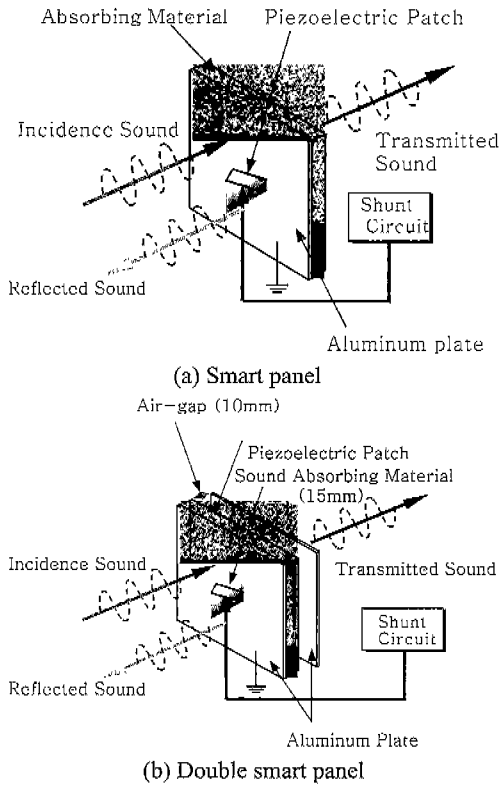


Figure 1. Concept of the proposed piezoelectric smart panels

쇠, 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_1, 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.

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

여기서 C_1, R_1, L_1 은 시스템의 강성, 감쇠, 질량을 각

각 나타낸다. 일반적인 손실이 없다고 하면 Kirchhoff의 전압과 전류법칙을 임피던스 회로에 적용하여 전체 시스템의 전기적 임피던스는

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

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

$$\frac{I_2}{I} = 1 - \frac{Z}{Z_1} \tag{3}$$

이 전달함수는 기계 동흡진기의 전달함수의 상사이다 [2]. 제안된 지능구조물의 전기적 임피던스 모델을 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 압전감쇠 성능을 최대 하기 위해서는 필수적이다. 공진선에서 인덕턴스는 구조물의 공진주파수와 션트회로의 공진주파수가 일치하도록 선정하여야 하며 션트회로의 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 등가 전기적 임피던스 모델에서 외부 가진에 의해 구조물에 유도되는 에너지는

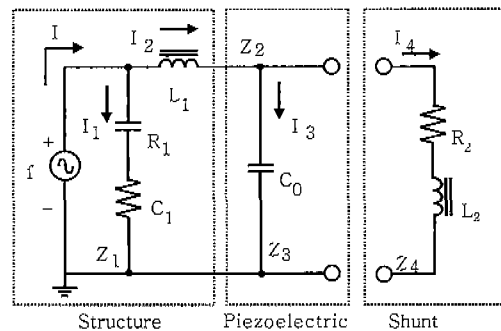


Figure 2. Equivalent electrical circuit

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

이다. 이 에너지는 연속적으로 생산되므로 이를 선트회로의 입력 에너지라 한다. 선트회로에서의 소산에너지는 공진회로에 따른 전기적 임피던스와 전압의 향으로 쓸 수 있다.

선트회로 입력전류와 소산에너지는

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

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

이므로, 소산에너지와 입력 에너지의 비는 다음 식과 같다.

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

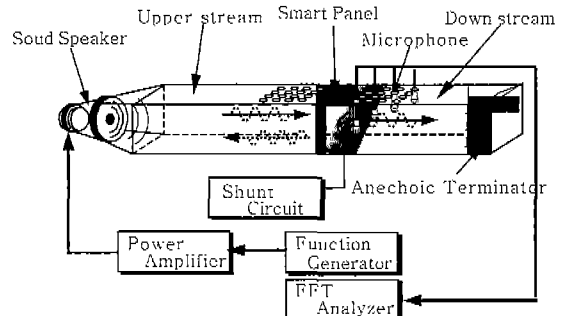
튜닝과정에서, 선트 파라미터를 최적상태로 선정함으로써 에너지 소산을 최대화 할 수 있으므로 소산에너지는 최적설계를 위한 목적함수로 정의하고 설계변수로 선트회로의 저항과 인덕턴스로 정한다.

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

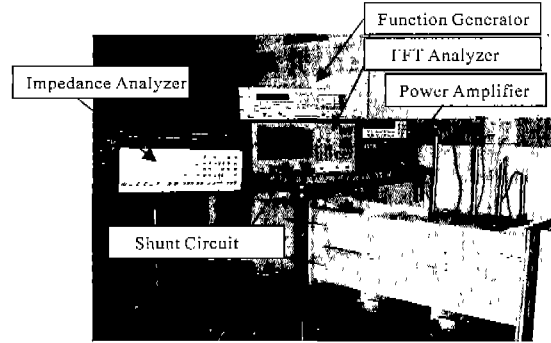
압전지능구조물을 전기적 임피던스모델로 나타낼 때 모델의 계수는 측정된 전기적 임피던스와 PRAP프로그램을 이용하여 추출할 수 있으며 소산에너지를 이용한 선트회로의 최적 인덕턴스와 저항을 구하여 구조물의 진동을 감쇠할 수 있다.

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 진행된다. 진다(Standard Recommended Practice for Laboratory Measurement of Airborne Sound Transmission Loss of Building Partitions)[10]. 그러나 이러한 실험장비가 고가인 관계로 간단한 음향터널을 설계, 제작하였다. Figure 3(a)와 같이 음향터널은 340 mm × 340 mm의 사각튜브에 길이가 4 m이다. 이것



(a) Schematic diagram of experiment apparatus



(b) Photograph of experiment apparatus

Figure 3. Experimental apparatus

은 같은 길이로 2등분된 상·하부 터널로 되어 있으며, 터널의 내부는 벽면에서의 반사를 막기 위하여 20 mm 두께의 흡음재를 부착하였으며, 스피커는 상부터널의 끝부분에 설치하고 왜지(wedge)로 제작된 무 반사단(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 누설을 막기 위하여 단단히 결합하였다. 터널은 음향학적으로 강제 표면을 만들기 위하여 4.5 mm 두께의 강철 판으로 제작하였다. 상부와 하부터널에 각 4개의 단면, 한 단면의 16개 지점에서 음압을 측정할 수 있도록 제작하였다. 전달음 측정은 Figure 3에서와 같이 하부터널의 내부 단면의 대각선으로 설치된 4개의 마이크로 폰을 사용하여 음압을 측정하였으며 측정 음압 평균값을 전달음 계산에 이용하였다[11]. Figure 3(b)는 실험장치의 사진을 나타낸다. 음향터널의 음특성을 확인하기 위하여 단면에 따라 반복적으로 음압 분포를 측정하여, 평면파를 가정할 수 있는 한계주파수를 800 Hz까지로 하였다(Figure 4). 음향터널의 음특성 실험을 통하여 저주파수영역에서 측정된 음압에는 차이가 없었으나 800 Hz 이상에서는 터널의 단면에 따른 압력 차이에 기인한 굴곡현상이 발생하였다. 이와 같이 지능패널의 음

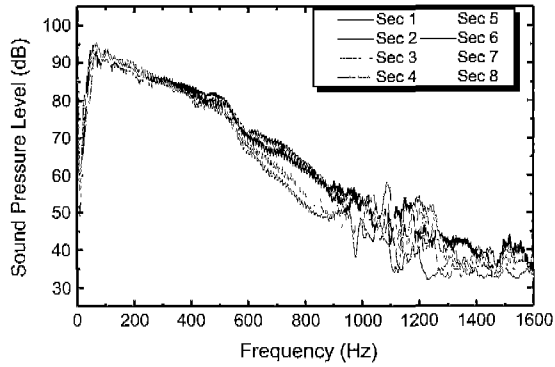


Figure 4. Measured sound pressure level at each section

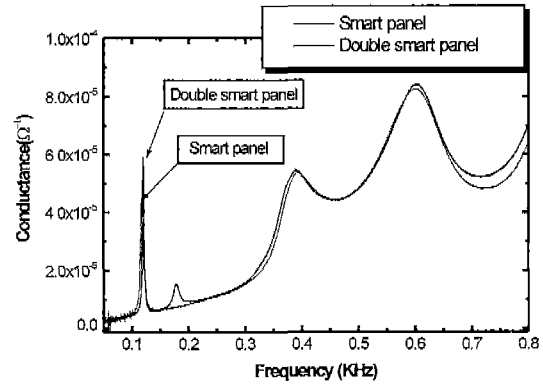


Figure 6. Measured electric impedance of smart panels

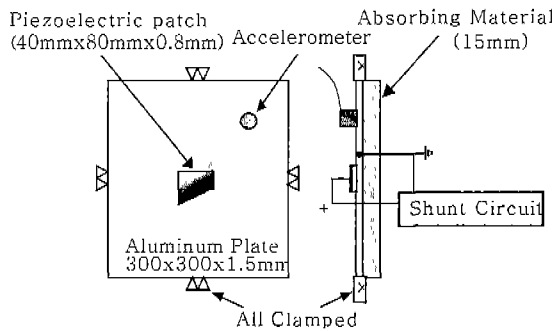


Figure 5. A schematic diagram of proposed smart panel

실험을 위한 실험장치를 설계, 제작하였고 음향적 특성을 검증하는 실험을 수행하였다. 그 결과 800 Hz까지는 평면파라는 가정하에 간단하게 마이크로폰으로 투과음을 측정할 수 있음을 확인하였으며 그 이상의 주파수에서는 측면 모드들의 영향에 의하여 단면 한 지점의 음압이 아니라 그 단면에서의 음향파위를 측정하여야 정확한 음의 투과를 구할 수 있다.

5. 실험결과 및 논의

5.1 션트 파라미터 튜닝

제한한 지능패널들에 대한 압전감쇠를 위한 튜닝 방법으로 본 논문에서 적용한 최대 소산에너지법은 구조물과 압전재료에 대한 전기적 임피던스모델의 계수들이 필요하다. 제안한 지능패널은 Figure 5에서와 같이 주 구조물은 300 mm × 300 mm × 1.5 mm 사각 알루미늄 판과 첫 번째 공진주파수에서의 압전감쇠성능을 고려한 40 mm × 80 mm × 0.8 mm 압전재료(PZT-5)가 판의 중앙에 부착된 구조로 하여 반대쪽에 흡음재로 15 mm 두께의 폴리우레탄 폼을 붙인 형태이다. 이중지능패널은 지능패널의 한 쪽면에 10 mm의 공기층을 두고 다른 알루미늄 평판이 부착된 형태이다. Figure에서와 같이 패

Table 1. Electrical impedance parameters for the smart panels

Freq. (Hz)	Parameter	Van Dyke	Complex
Smart Panel (118 Hz)	$C_0(F)$	$1.941 e^{-7}$	$1.941 e^{-7} - j6.808e^{-9}$
	$C_1(F)$	$3.341e^{-9}$	$2.59 e^{-9} + j2.42e^{-10}$
	$R_1(\Omega)$	$2.284e^4$	
	$L_1(H)$	545.7	$697.4 - j99.36$
Double Smart Panel (128 Hz)	$C_0(F)$	$1.956 e^{-7}$	$1.956 e^{-7} - j5.532e^{-9}$
	$C_1(F)$	$2.449e^{-9}$	$2.029e^{-9} + j1.34e^{-10}$
	$R_1(\Omega)$	$2.018e^4$	
	$L_1(H)$	634.6	$765.4 - j32.37$

널의 소음저감 성능 뿐만 아니라 패널의 진동 저감량을 측정하기 위하여 가속계를 이용하여 가속도의 크기를 측정하였다. Figure 6은 패널들을 음향터널에 완전히 고정된 후 임피던스 측정기(HP4192A)를 이용하여 측정된 지능패널과 이중지능패널의 콘덕턴스곡선이다. 콘덕턴스는 임피던스의 역수인 어드미턴스의 실수부이다. 그림에서와 같이 지능패널과 이중지능패널의 첫 번째 공진주파수는 각각 118 Hz, 128 Hz에서 발생하였다. 이들 주파수는 강성제어영역에 해당하는 차음특성을 갖으므로 압전감쇠에 의한 소음진동 저감을 위하여 computer와 PRAP 프로그램을 이용하여 측정된 어드미턴스에서 등가 전기적 임피던스모델의 계수를 추출하였다. Table 1은 패널들의 첫 번째 공진주파수에 대한 추출된 만다이크와 콤플렉스모델의 계수를 나타낸다. Figure 7은 지능패널과 이중지능패널의 첫 번째 공진주파수에 대한 시뮬레이션한 어드미턴스와 측정된 어드미턴스를 비교한 결과이다. 그림에서 두 어드미턴스는 공진주파수들에서 매우 일치함을 알 수 있다. 이는 설정

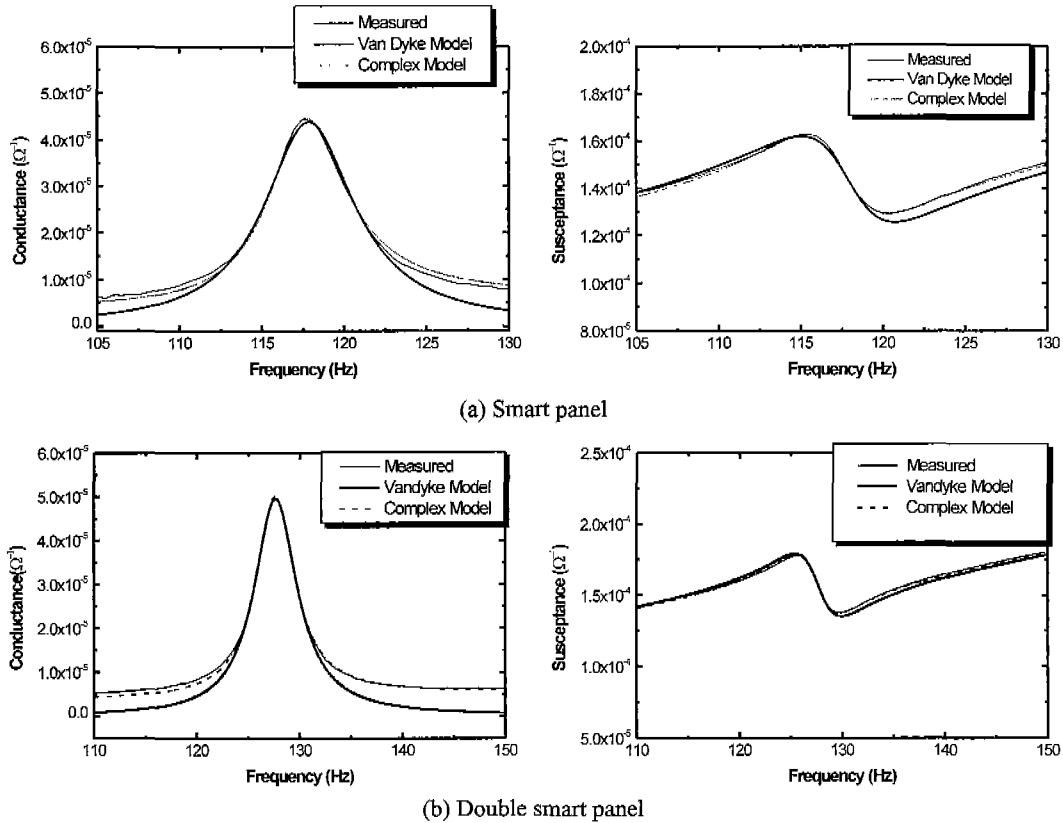


Figure 7. Simulation results of impedance with PRAP

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

Freq. (Hz)	Parameter	Van Dyke	Complex	Measured
Smart Panel (118 Hz)	$R_2(\Omega)$	972.99	972.38	330
	$L_2(H)$	9.37	9.36	9.4
Double Smart Panel (128 Hz)	$R_2(\Omega)$	890	889.73	330
	$L_2(H)$	7.9	7.9	7.4

된 등가 전기적 모델이 공진주파수영역에서 패널의 특성을 정확히 나타냄을 증명하는 것이다.

마지막으로, 소산 에너지법을 이용하여 공진회로의 최적의 섀트 파라미터를 구하였다(Table 2). 비록 Figure 7에서 킴플렉스모델이 반다이크모델 보다 잘 맞지만, 킴플렉스모델에 대한 기계적 상사를 통한 증명이 이루어지지않은 관계로 반다이크모델을 최적 파라미터 튜닝에 이용하였다. 섀트회로에 대한 최적 파라미터와 등가 전기적 모델의 계수를 이용하여 지능패널과 이중 지능패널에 대한 속도 전달함수를 시뮬레이션 하였다(Figure 8). 시뮬레이션 결과를 통하여 속도 전달의 크

기가 최적 섀트 파라미터의 튜닝에 의해 적절히 감소함을 확인하였다.

5.2 수동적 특성에 의한 소음저감 성능

패널의 압전감쇠를 실험하기 전에 주구조물인 평판, 흡음재를 갖는 지능패널과 흡음재와 공기층을 갖는 이중지능패널에 대한 전달음 실험을 수행하였다(Figure 9). 평판에서 첫번째와 대칭모드의 공진주파수는 각각 140 Hz와 548 Hz에서 발생하였으며 지능패널의 첫 번째 공진주파수는 118 Hz, 이중지능패널은 질량효과등에 의해서 첫 번째 공진주파수는 각각 128 Hz에 나타났다. 전달음 실험을 통하여 흡음재와 공기층을 추가함으로써 첫 번째 공진주파수를 비롯하여 질량제어영역에 해당하는 넓은 주파수 영역에서의 큰 소음저감 효과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 저주파수영역에서의 보다 좋은 소음저감을 위하여 전달음 실험에서 발생한 첫 번째 공진주파수에 대하여 압전감쇠를 부과하였다.

5.3 압전감쇠에 의한 소음저감 성능

압전지능패널의 공진주파수에서의 소음저감 성능을 증명하기 위하여 강성제어영역에 해당하는 첫 번째 공

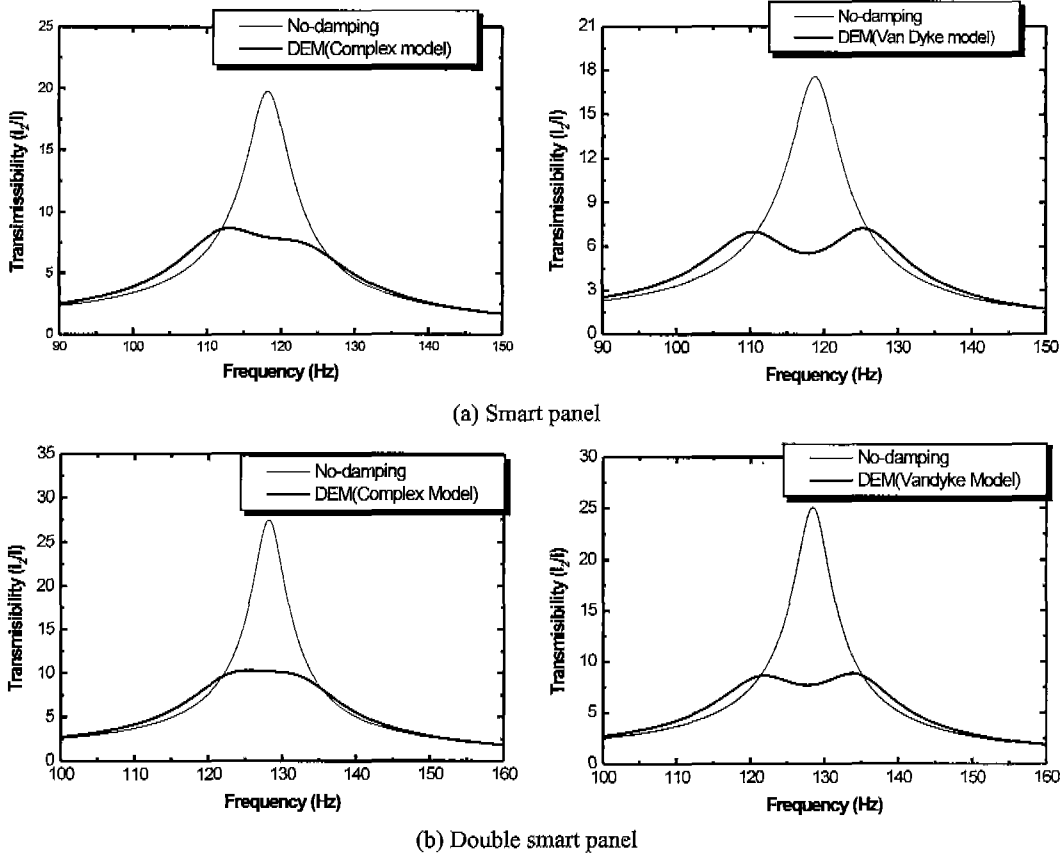


Figure 8. Simulation results of shunt parameter tuning.

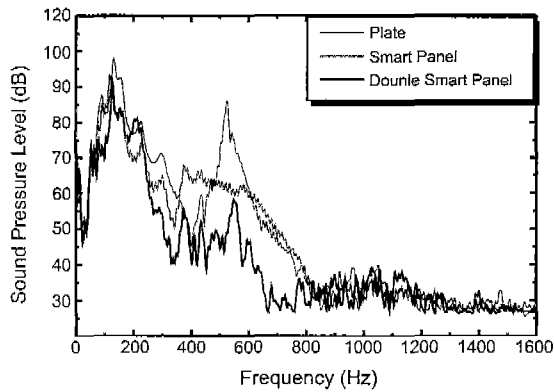


Figure 9. Transmitted sound pressure of smart panels with no piezo-damping.

진주파수에 대한 음향실험을 수행하였다. Figure 9에서 압전감쇠를 부과하지 않은 상태에서 수행한 전달음 실험을 통하여 확인한 지능패널과 이중지능패널의 첫 번째 공진주파수인 118 Hz, 128 Hz에 대한 압전감쇠에 의한 소음저감성능 실험을 하였다. Table 2에서 최적화

를 통하여 얻은 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 선정하는데 영향을 미치게 된다[3]. 가상 인덕터의 인덕턴스는 임피던스 측정기를 이용하여 공진주파수에서 측정하였다(Table 2). Table 2에서 측정된 선트회로 파라미터와 최적화를 통해 얻은 선트회로 파라미터 값이 유사한 값을 나타냄을 알 수 있다. 압전감쇠를 부과한 상태에서의 음향실험을 통하여, 지능패널과 이중지능패널의 첫 번째 공진주파수에서 음압과 진동이 각각 10 dB, 8 dB 감소하였다(Figure 11, 12). 이러한 실험을 통하여 압전감쇠에 의한 공진주파수에서의 소음진동저감 성능을 확인하였다.

6. 결 론

넓은 주파수대역에서의 전달 소음저감을 위하여 압전감쇠와 흡음재에 의한 수동적 특성을 갖는 압전지능

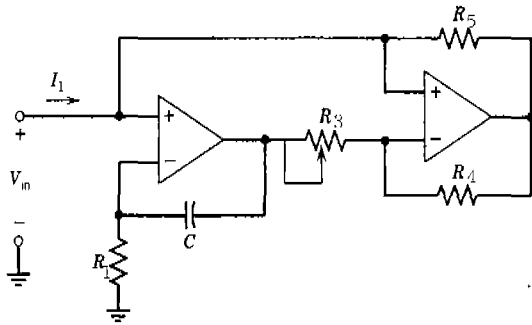
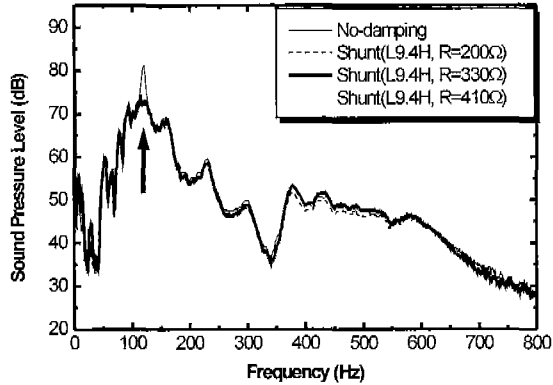
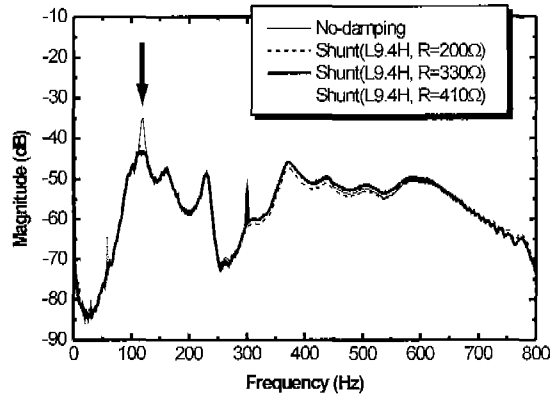


Figure 10. A schematic diagram of synthetic inductor.



(a) Sound pressure level

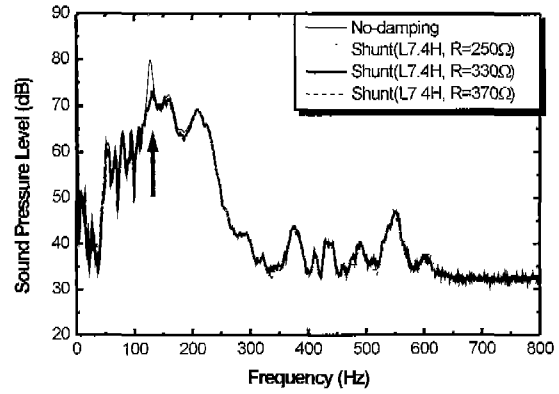


(b) Vibration magnitude

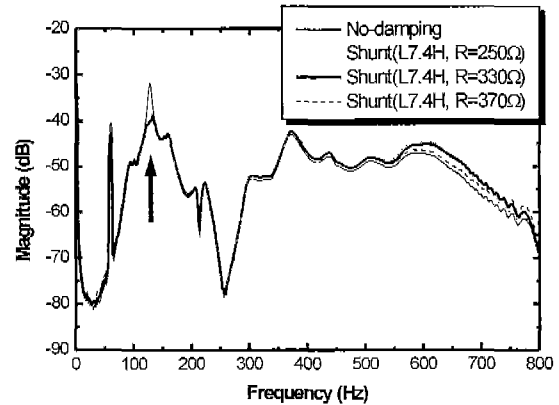
Figure 11. Experimental results of smart panel with piezo-damping for 1st resonance (118 Hz)

패널을 제안하고 실험적 연구를 수행하였다. 이들 지능패널은 중고주파수영역에서의 수동적 효과와 저주파수에서의 압전감쇠를 혼용하는 개념이다.

선트회로의 파라미터 튜닝은 전기적 임피던스모델과 최대 소산에너지에 관련된 새로운 방법을 이용하였다. 지능패널의 소음저감 성능을 실험하기 위해서 음향터널을 설계, 제작하고 터널에 대한 음향실험을 통하여, 음



(a) Sound pressure level



(b) Vibration magnitude

Figure 12. Experimental results of double smart panel with piezo-damping for 1st resonance (128 Hz)

향터널의 사용주파수를 평가하였다.

흡음재와 공기층을 추가한 지능패널들에 대한 음향실험을 수행하여 흡음재의 영향으로 첫 번째, 두 번째 공진주파수에서 5 dB, 20 dB, 중 주파수영역에서는 10 dB 이상의 소음저감효과를 확인하였다. 또한, 압전감쇠 성능에 의하여 지능패널과 이중지능패널의 첫 번째 공진주파수에서 10 dB, 8 dB의 소음저감 효과를 이루었다. 이는 공진주파수에서의 진동에 의해 발생하는 압전재료의 전기에너지를 선트회로의 파라미터 튜닝을 통한 저항에서의 소산시킨 결과이다. 이러한 실험을 통하여 수동적 특성과 압전감쇠를 이용하는 지능패널의 넓은 영역에서의 소음저감 성능을 확인하였다.

참고문헌

- [1] J.D. Irwin, E.R. Graf, Industrial noise and vibration control, Prentice-Hall, 1979, New Jersey.
- [2] R.L. Forward, "Electric Damping of Vibrations in Optical Structures", J. of Applied Optics, 18(5), pp. 690-

- 697, 1979.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] J. H. Kim, J. K. Lee and J. Y. Choi, "Wideband Transmission Noise Reduction of Smart Panels Featuring Piezoelectric Shunt Circuits and Sound Absorbing Materials", *NOISE-CON 2000*, Newport Beach, California.
- [7] 이충근, 김재환외, "압전감쇠를 통한 압전 단일패널의 전달 소음저감 성능", *산학기술성공학회지*, Vol.2, No.2, pp.49-56, 2001.
- [8] L. L. Beranek, G. A. Work, "Sound Transmission through Multiple Structures Containing Flexible Blankets", *J. Acoust. Soc. Am.*, 21(4), pp. 419-427, 1949.
- [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] ISO 7235, *Acoustics-Measurement procedures for ducted, silencers insertion loss, flow noise and pressure loss*, International Organization for Standardization, 1991.
- [12] Chen, W.K., *Passive and Active Filters*, New York, John Wiley and Sons, Inc., 1986.