

압전감쇠와 수동적 특성을 갖는 압전지능패널의 광대역 전달 소음저감성능

Broadband Transmission Noise Reduction Performance of Smart Panels Featuring Piezoelectric Shunt Damping and Passive Characteristics

이 중 권*, 김 재 환*
(Joong-Kuen Lee*, Jae-Hwan Kim*)

*인하대학교 기계공학과
(접수일자: 2001년 8월 6일; 수정일자: 2001년 12월 6일; 채택일자: 2001년 12월 21일)

광대역 소음저감을 위한 압전지능패널에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 압전지능패널은 기본적으로 압전재료를 부착한 평판 구조물에 셉트회로를 연결하고 흡음재들을 부가한 구조물이다. 압전감쇠와 수동적 특성을 혼용하여 중 주파수영역에서 흡음재의 수동적 특성을 이용하고 저주파수 영역의 공진주파수에서는 압전감쇠를 적용하여 소음저감시키는 개념이다. 저주파수 공진에서의 소음저감을 위하여 측정된 전기적 임피던스 모델을 이용하는 압전감쇠를 적용하였다. 압전감쇠를 위한 공진 셉트회로는 직렬로 연결된 저항과 인덕터로 구성되었으며, 저항과 인덕터는 회로에서 소산되는 에너지가 최대가 될 수 있는 값으로 최적설계하였다. 압전지능패널의 전달 소음저감 성능은 음향터널을 사용하여 실험을 수행하였다. 음향터널은 사각단면 형태이며 소음 원으로 터널의 한 쪽 끝에 스피커가 설치되었다. 패널들을 터널의 중앙에 설치하여 투과 음압을 측정하였다. 흡음재와 공기층을 갖는 압전지능패널은 수동적 특성에 의해 저주파수 영역의 공진주파수를 제외한 중주파수 영역에서 뚜렷한 소음저감 효과를 나타내었다. 압전감쇠를 통하여, 공진주파수에서의 좋은 소음저감을 얻었다. 압전감쇠와 수동적 방법을 혼용하는 압전지능 패널은 넓은 주파수 영역에서의 소음저감을 위한 유망한 기술이다.

핵심용어: 압전감쇠, 공진셉트, 전기적 임피던스 모델, 최대 소산에너지, 흡음재

투고분야: 구조음향 및 진동 (11.1, 11.5)

The possibility of a broadband noise reduction of piezoelectric smart panels is experimentally studied. Piezoelectric smart panel is basically a plate structure on which piezoelectric patch with shunt circuits is mounted and sound absorbing material is 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 tune the piezoelectric shunt circuit, the measured electrical impedance model is adopted. Resonant shunt circuit composed of register and inductor in series is considered and the circuit parameters are determined based on maximizing the dissipated energy through the circuit. The transmitted noise reduction performance of smart panels is investigated using an acoustic tunnel. The tunnel is a square crosses sectional tunnel and a loud speaker is mounted at one side of the tunnel as a sound source. Panels are mounted in the middle of the tunnel and the transmitted sound pressure across the panels is measured. Noise reduction

performance of a double smart panel possessing absorbing material and air gap shows a good result at mid frequency region except the first resonance frequency. By enabling the piezoelectric shunt damping, noise reduction is achieved at the resonance frequency as well. Piezoelectric smart panels incorporating passive method and piezoelectric shunt damping are a promising technology for noise reduction in a broadband frequency.

Keywords: Piezoelectric damping, Resonant shunt, Electrical impedance model, Maximum dissipation energy, Absorbing material

ASK subject classification: Structural acoustics and vibration (11.1, 11.5)

I. 서론

최근 생활 환경주변에서 발생하는 각종 진동 및 소음들로 인하여 발생하는 많은 문제들이 공학적 측면에서 큰 주제로 대두되고 있다. 이러한 진동 및 소음에 대한 대책으로 여러 가지 방법이 있으나 소형 경량이며, 보다 경제적이고 우수한 성능을 발휘할 수 있는 기술 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 고주파수 영역에서 효과적인 방법으로 구조물에서의 소음 방사가 최소화되도록 하는 구조설계 또는 재료의 선택에 기초를 둔 것으로 흡음재나 공기 층을 이용하는 것이 수동적 방법의 좋은 예라 할 수 있으며, 적절한 흡음 및 차음재를 사용할 경우 중고주파수 영역에서 탁월한 소음 저감 효과가 있으므로 지속적인 연구가 진행되고 있다[1, 2]. 능동적 소음제어 방법은 주로 저주파수 영역에 많이 적용하는 방법으로 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 있다. 이러한 능동적 방법을 이용하여 저주파수 공진에서 다중모드제어에 의한 소음저감을 위해서는 고성능의 제어기 뿐만 아니라 부대설비가 필요하게 되므로 실용화와 경제적인 측면에서 어려움이 있다. 최근 능동적 방법의 일환으로 지능재료 및 지능 구조물을 이용하는 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 특히, 진동 소음분야에서는 압전재료를 감지기와 작동기로 이용한 능동 구조소음제어를 통하여 성공적 소음 저감을 이루었다[3]. 넓은 주파수 영역에서의 소음저감을 위해서는 제한적 소음제어에서 벗어나 수동적 방법과 능동적

방법을 혼용하는 것이 효과적이다. 이러한 개념으로 압전 재료와 흡음재 등을 이용하여, Fuller 등은 수동적 방법으로 고주파수 영역에서의 소음을 저감하기 위해 폴리우레탄 폼을 사용하였고, 능동적 방법으로 저주파수 영역에서의 소음을 저감시키기 위해 PVDF (polyvinylidene fluoride) 작동기를 사용하는 스마트 폼 (smart foam)을 제안하기도 하였다[4, 5].

본 논문에서는 압전재료를 이용한 소음저감 방법으로 저주파수 영역에서의 능동 구조소음제어를 위한 복잡한 제어기 대신에 압전감쇠와 수동적 특성을 갖는 압전지능패널을 제안하려 한다. 이는 일종의 차음재 개념으로 압전재료를 부착한 평판에 흡음재와 공기 층을 부가한 형태로 흡음재와 공기 층에 의한 고주파수 영역에서 수동적 소음저감과 낮은 특정 주파수, 즉 구조물의 공진주파수에서의 압전감쇠에 의한 효과를 얻는 것이다.

압전재료는 점탄성 재료의 폭과 높이의 제한을 극복하는 수동감쇠재료로 알려져 있다. 압전재료를 이용한 압전감쇠의 개념은 Forward에 의해서 논의되었으며, 실험을 통하여 증명되었다[6]. 압전감쇠의 기본개념은 저항, 인덕터 또는 저항과 인덕터를 이용한 전기회로를 압전재료에 연결하여 진동억제를 이루는 것이다. Hogood와 Flotow는 전기회로를 이용하여 압전재료의 기계적 에너지의 소산가능성을 제안하였다[7]. 그들은 특정 모드에 대하여 기계 동흡진에 상사하는 방법으로 구조물의 공진 주파수에 일치하는 선트회로의 공진을 튜닝하였다. 이 방법은 특정모드에 대한 튜닝이 나머지 다른 모드에 영향을 미치지 때문에 다중 모드에 대한 진동억제에 적용하기 어려움이 있다. Holkamp는 한 개의 압전재료를 이용한 단일모드에 대한 압전감쇠를 선트 파라미터의 최적 설계를 통하여 이중모드제어에 적용할 수 있음을 이론적으로 확대하였다[8]. 그러나, 기계적 개념에 기초한 압전 지능구조물에 대한 모델링을 선트회로의 파라미터에 대한

최적설계에 적용하기에는 너무 복잡하다. 따라서, Kim등은 전기적 임피던스 모델과 최대 손실에너지 개념에 기초를 둔 새로운 튜닝방법을 제안하고 그 타당성을 제시하였다[9]. 기계 동흡진기에 기초를 둔 보편적인 튜닝방법과 대조적으로, 제안된 방법은 측정된 전기적 계수를 활용하는 전기적 임피던스 모델을 사용하였다. 튜닝과정에서 최적의 섀트회로 파라미터는 섀트회로에서 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.

II. 압전 지능패널

2.1. 압전지능패널

그림 1은 패널의 일반적인 차음 특성을 나타내고 있다 [10]. 패널의 특성은 주파수에 따라서 세 영역으로 나눌 수 있다. 첫번째 패널 구조물의 공진이 발생하는 저주파수 영역을 강성제어영역 (stiffness-controlled region) 이라고 한다. 이 구역에서는 공진현상이 발생하게 되며 재료에 감쇠를 증가시키면 투과손실을 줄여서 차음 성능을 향상시킬 수 있다. 그러나 감쇠를 증가시키기 위하여 점탄성 재료를 사용하게 되면 중량이 증가하여 패널이 무거워지는 단점이 있으나 압전구조물의 능동감쇠나 압전감쇠를 사용한다면 경량화하면서도 공진주파수에서 투과손실의 저하를 막을 수 있는 장점이 있다. 두 번째 영역을 질량제어 영역이라 한다. 이 주파수 대역에서는

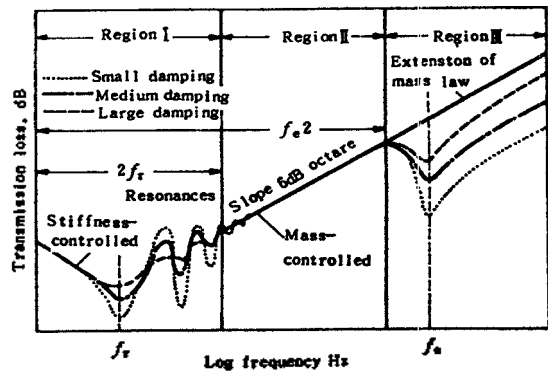


그림 1. 단일패널의 투과손실
Fig. 1. Transmission loss of acoustic energy through single panel.

패널의 밀도 또는 주파수가 2배 증가함에 따라 투과손실은 6배가 증가하게 된다. 그러나 질량법칙은 실질적으로 적용할 수 있는 주파수 영역에 한계를 가지고 있다. 저주파수 영역에서는 차음벽의 강성과 고유 진동 때문에 질량법칙을 만족하지 못하나 흡음재 등을 사용하면 중 주파수 대역에서는 효과적으로 투과손실을 높일 수 있다. 또한 질량을 높이는 방법에 한계가 있으므로 공기 층을 이용하는 이중패널을 이용하기도 한다. 이중패널은 두 패널에 의한 질량효과와 중간층을 구성하는 공기에 의한 완충 등에 의해서 기대이상의 효과를 얻을 수 있다. 세 번째로 질량존영역을 지나면 한계주파수 영역 (critical-frequency region)이 된다. 이 영역의 일치주파수 (coincidence frequency)에서는 차음벽의 투과손실이 강성제어영역의 공진점에서 발생하는 현상과 같이 감소하는 현상이 발생한다. 제안한 압전지능패널은 수동적인 방법으로 고주파수 영역에서 흡음재료와 공기 층을 이용하고 저주파수

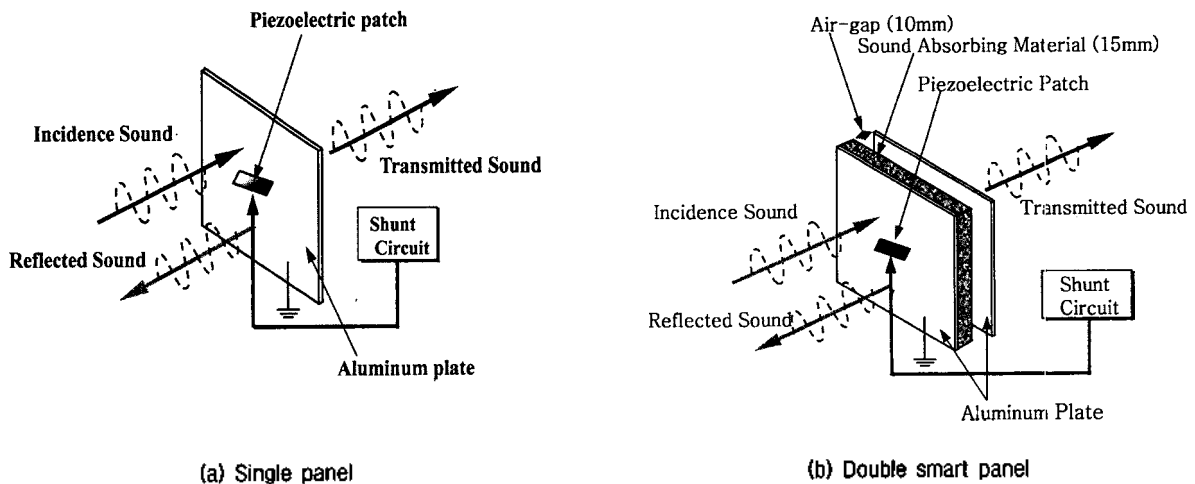


그림 2. 제안된 압전지능패널의 개념도
Fig. 2. Schematic diagram of proposed piezoelectric smart panels.

영역, 특히 공진 주파수에서 압전재료와 셉트회로를 이용하는 압전감쇠를 통하여 소음을 저감시킬 수 있으므로 두 방법을 혼용하면 넓은 주파수 영역에서 소음저감을 이룰 수 있다.

2.2. 압전지능패널의 설계

그림 2에 압전지능패널의 기본개념을 나타내고 있다. 제안한 지능패널의 소음저감 성능을 증명하기 위하여 압전단일패널, 그리고 압전이중패널을 제작하였다. 기본적으로 주구조물은 두께 1.5 mm, 단면 340 mm × 340 mm의 알루미늄 평판을 사용하여 중앙 부위에 압전소자를 부착하고 압전감쇠를 위하여 압전재료와 셉트회로를 연결한 구조로 되어있다. 이를 압전단일패널이라 하며 이에 수동적 특성을 부여한 형태인 이중지능패널은 가로, 세로 각각 300 mm이고 두께가 15 mm인 폴리우레탄 폼 (polyurethane foam)을 단일패널의 압전재료가 부착되지 않은 다른 면에 부착하고 10 mm의 공기 층을 두고 다른 알루미늄 평판을 갖는 형태로 제작하였다.

압전재료는 평판의 첫번째와 대칭모드 (4th)를 고려하여 평판의 중앙에 부착하였다. 셉트회로는 직렬로 연결된 저항과 인덕터로 구성되었으며 공진셉트를 위하여 압전재료에 연결하였다.

III. 압전감쇠

압전감쇠는 에너지 소산 기구이다. 열린 상태의 회로와 연결된 압전재료는 유도된 기계적 변형에너지의 일부를 전기적 에너지로 표면의 전극에 저장하게 되며 전극사이에 저항을 연결할 경우, 저장된 에너지는 회로 내로 흐르게 되어 열로 에너지는 소산된다. 이와 같이 연결된 셉트회로의 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 공진셉트라 한다. 최대 에너지 소산이 시스템의 공진주파수에서 발생하게 하기 위하여 최적의 인덕턴스와 저항을 찾는 것이 중요하다. 본 논문에서는 전기적 임피던스 모델에 기초하여 최대 소산에너지 개념을 적용한 새로운 파라미터 튜닝 방법을 간단히 요약하였다[9].

3.1. 압전재료의 전기회로 모델

압전재료는 공진에서 등가의 전기회로 요소들로 표현할 수 있다. 공진회로에는 반다이크 (Van Dyke)모델과 복소수 (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 반다이크 모델을 나타낸다. 반면에 복소수 모델은 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 (그림 3)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 각각 나타낸다. 일반적인 손실이 없다고 하면 Kirchhoff의 전압과 전류법칙을 임피던스 회로에 적용하여 전체 시스템의 전기적 임피던스는

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

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

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

이 전달함수는 기계 동흡진기의 전달함수의 상사이다 [6]. 제안된 지능구조물의 전기적 임피던스 모델을 사용하기 위해서는 반다이크 모델의 계수를 구하여야 한다. 이를 위하여 지능구조물의 전기적 임피던스를 직접 측정

하였다.

반다이크 모델 또는 복소수 모델에 사용되는 계수들은 전기 임피던스 측정기 (impedance analyzer, HP4192A)와 압전재료 해석 프로그램 (Piezoelectric Resonance Analysis Program, PRAP)을 이용하여 구하였다[11].

3.2. 파라미터 튜닝

파라미터 튜닝은 압전감쇠 성능을 최대로 하기 위해서는 필수적이다. 공진선트에서 인덕턴스는 구조물의 공진 주파수와 선트회로의 공진주파수가 일치하도록 선정하여야 하며 선트회로의 저항은 소산에너지가 최대가 되도록 선택하여야 한다. 본 논문에서는 일반적으로 사용하는 방법과 같이 도시적으로 전달함수를 튜닝하는 대신에 최대 소산에너지와 연관된 새로운 파라미터 튜닝방법을 적용하였다. 그림 3과 같은 등가 전기적 임피던스 모델에서 외부 가진에 의해 구조물에 유도되는 에너지는

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

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

선트회로 입력전류와 소산에너지는

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

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

이므로, 소산에너지와 입력 에너지의 비는 다음 식과 같다.

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

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

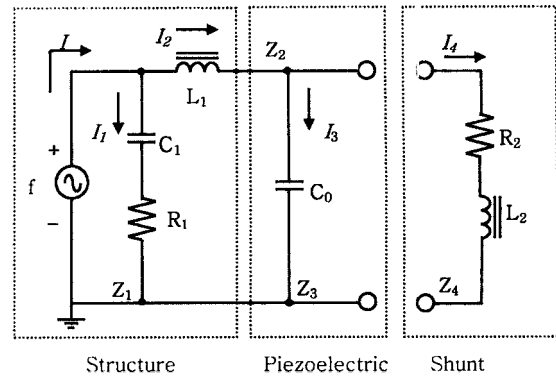


그림 3. 등가 전기회로
Fig. 3. Equivalent electrical circuit.

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

압전기능구조물을 전기적 임피던스 모델로 나타낼 때 모델의 계수는 측정된 전기적 임피던스인 PRAP 프로그램을 이용하여 추출할 수 있으며 소산에너지를 이용한 선트회로의 최적 인덕턴스와 저항을 구하여 구조물의 진동을 감쇠할 수 있다.

IV. 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 진행되어진다 (Standard Recommended Practice for Laboratory Measurement of Airborne Sound Transmission Loss of Building Partitions)[10]. 그러나 이러한 실험장비가 고가인 관계로 간단한 음향터널을 설계, 제작하였다. 음향터널은 340 mm × 340 mm의 사각튜브에 길이가 4m이다. 이것은 같은 길이로 2등분된 상, 하부 터널로 되어 있으며, 터널의 내부는 벽면에서의 반사를 막기 위하여 20 mm 두께의 흡음재를 부착하였으며, 스피커는 상부터널의 끝부분에 설치하고 웨지(wedge)로 제작된 무반사단(anechoic terminator)을 하부터널의 다른 끝에 설치하였다(그림 4). 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. 터

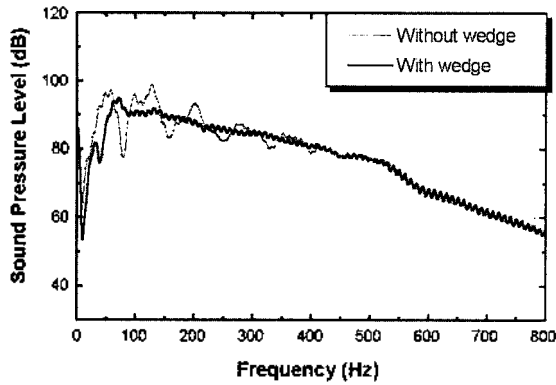


그림 4. 무 반사단의 영향
Fig. 4. Effect of the anechoic terminator.

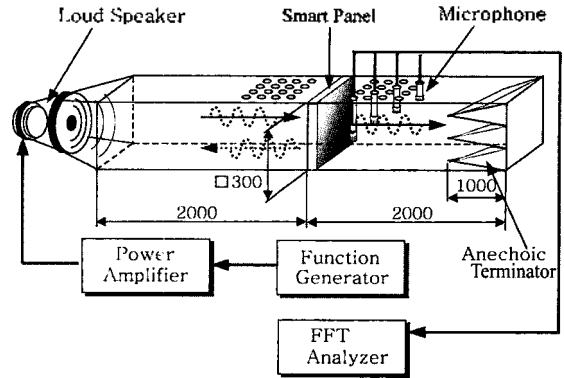


그림 5. 실험장치의 개략도
Fig. 5. Experimental apparatus.

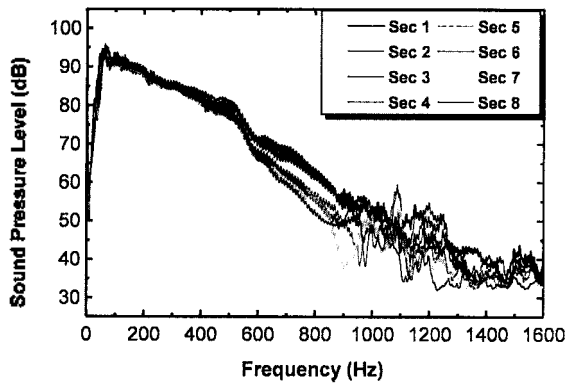


그림 6. 각 단면별 측정 음압
Fig. 6. Measured sound pressure level at each section.

표 1. 음향터널 내에서의 주파수별 음압
Table 1. Sound pressure level in duct according to frequencies.

	단면1	단면2	단면3	단면4	단면5	단면6	단면7	단면8
100Hz	91.8	91.7	91.3	91.5	91.0	91.2	91.1	91.7
500Hz	80.8	79.4	79.2	77.9	77.5	77.0	76.2	77.6
600Hz	70.7	69.9	70.5	69.9	68.1	68.5	65.6	67.2
800Hz	62.7	61.3	63.3	61.7	57.5	56.3	56.0	52.7
900Hz	57.4	55.4	56.1	54.1	49.4	49.9	37.1	49.7

널은 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 그림 5에서와 같이 하부터널의 내부 단면의 대각선으로 설치된 4개의 마이크로폰을 사용하여 음압을 측정하였으며 측정 음압 평균값을 전달음 계산에 이용하였다[12]. 음향터널의 음특성을 확인하기 위하여 단면에 따라 반복적으로 음압 분포를 측정하여, 평면파를 가정할 수 있는 한계주파수를 800 Hz까지로 하였다(그림 6, 표 1). 음향터널의 음특성 실험

을 통하여 저주파수 영역에서 측정된 음압에는 차이가 없었으나 800 Hz 이상에서는 터널의 단면에 따른 압력 차이에 기인한 굴곡현상이 발생하였다.

V. 실험결과 및 논의

5.1. 셉트 파라미터 튜닝

제안한 지능패널들에 대한 압전감쇠를 위한 튜닝 방법으로 본 논문에서 적용한 최대 소산 에너지법은 구조물과 압전재료에 대한 전기적 임피던스 모델의 계수들이 필요하다. 제안한 지능패널은 그림 7에서와 같이 주구조물로 300 mm × 300 mm × 1.5 mm 사각 알루미늄 판과 첫번째 공진주파수에서의 압전감쇠 성능을 고려한 40 mm × 80 mm × 0.8 mm 압전재료 (PZT-5)가 판의 중앙에 부착된 구조이다. 이것을 단일패널이라 하고 이중지능패널은 15 mm 두께의 폴리우레탄 폼이 단일패널의 한 측면에 부착되고 10 mm의 공기층을 두고 다른 알루미늄 평판이 부착된 형태이다. 그림 8은 패널들을 음향터널에 완전히 고정된 후 임피던스 측정기 (HP4192A)를 이용하여 측정된 단일패널과 이중지능패널의 콘덕턴스곡선이다. 콘덕턴스는 임피던스의 역수인 어드미턴스의 실수부이다. 그림에서와 같이 단일패널과 이중지능패널의 첫번째 공진주파수는 각각 140 Hz, 128 Hz에서 발생하였다. 이들 주파수는 강성제어영역에 해당하는 차음특성을 갖으므로 압전감쇠에 의한 소음·진동 저감을 위하여 컴퓨터와 PRAP 프로그램을 이용하여 측정된 어드미턴스에서 등가 전기적 임피던스모델의 계수를 추출하였다. 표 2는 패널들의 첫번째 공진주파수에 대한 추출된 반다이크와 복소수 모델의 계수를 나타낸다. 그림 9는 단일패널과 이중지

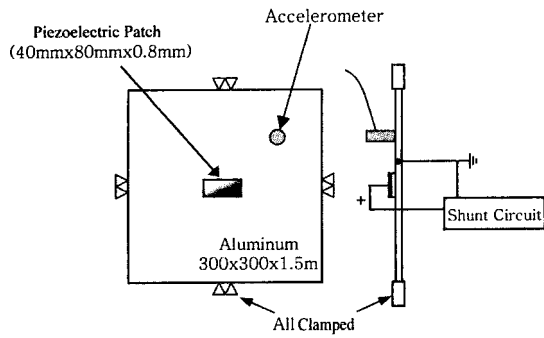


그림 7. 지능패널의 개략도
Fig. 7. A schematic diagram of proposed smart panel.

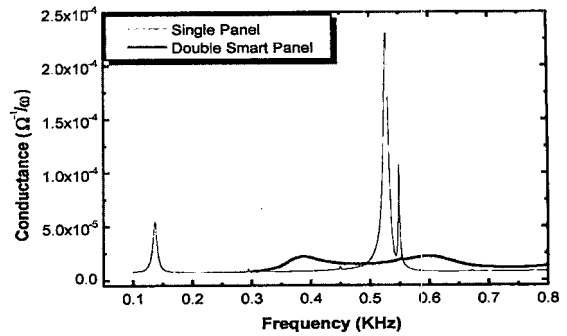
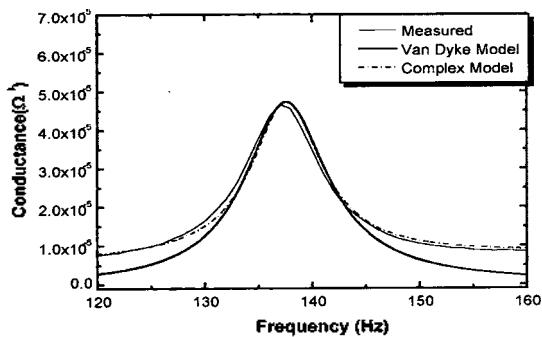
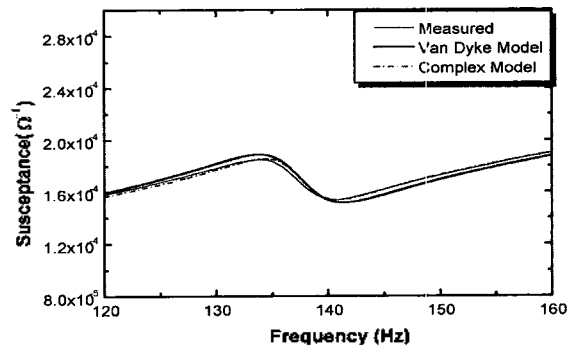


그림 8. 입전지능패널의 측정된 임피던스
Fig. 8. Measured impedance of smart panels.

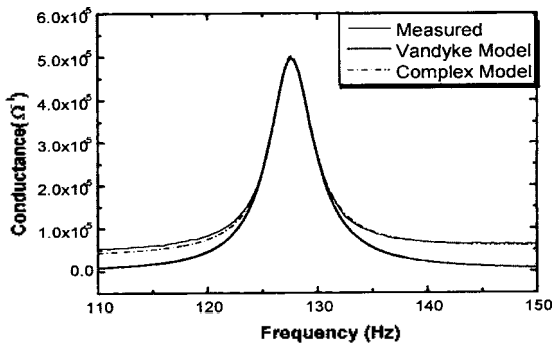


(a) Conductance

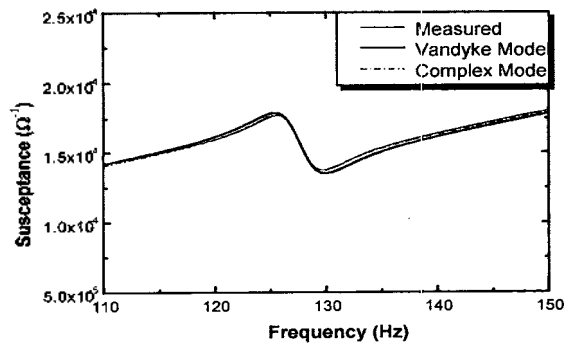


(b) Susceptance

(a) Single panel



(a) Conductance



(b) Susceptance

(b) Double smart panel

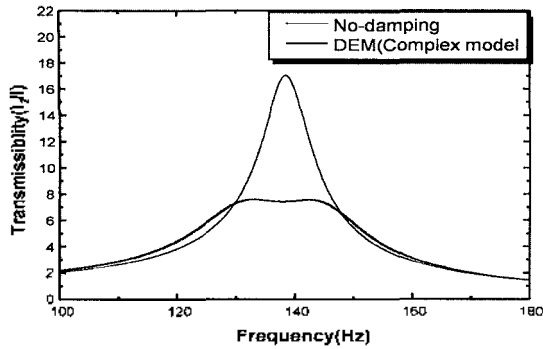
그림 9. Prap을 이용하여 시뮬레이션한 결과

Fig. 9. Simulation result of impedance with PRAP.

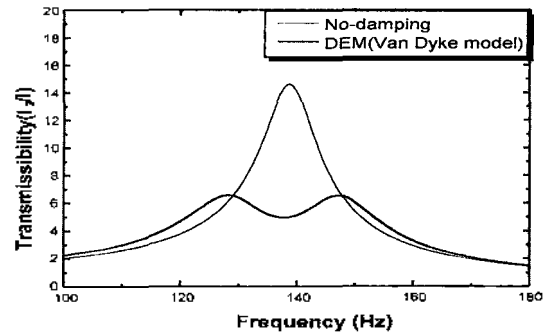
능패널의 첫번째 공진주파수에 대한 시뮬레이션한 어드미턴스와 측정된 어드미턴스를 비교한 결과이다. 그림에서 두 어드미턴스는 공진주파수들에서 매우 일치함을 알 수 있다. 이는 설정된 등가 전기적 모델이 공진주파수 영역에서 패널의 특성을 정확히 나타냄을 증명하는 것이다.

마지막으로, 소산 에너지법을 이용하여 공진회로의 최적의 셉트 파라미터를 구하였다(표 3). 비록 그림 9에서 복소수 모델이 반다이크 모델보다 잘 맞지만, 복소수 모

델에 대한 기계적 상사를 통한 증명이 이루어지지 않은 관계로 반다이크 모델을 최적 파라미터 튜닝에 이용하였다. 셉트회로에 대한 최적 파라미터와 등가 전기적 모델의 계수를 이용하여 단일패널과 이중지능패널에 대한 속도 전달함수를 시뮬레이션하였다(그림 10). 시뮬레이션 결과를 통하여 속도 전달의 크기가 최적 셉트 파라미터의 튜닝에 의해 적절히 감소함을 확인하였다.

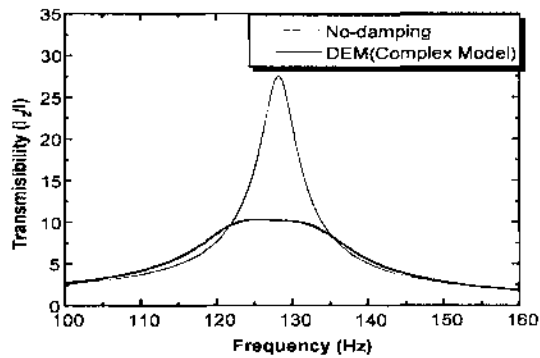


(a) Complex model

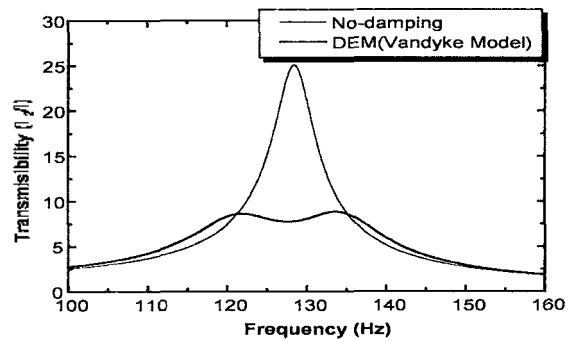


(b) Vandyke model

(a) Single panel



(a) Complex model



(b) Vandyke model

(b) Double smart panel

그림 10. 시뮬레이션한 최적 선틀회로 튜닝 결과

Fig. 10. Simulation result of optimal shunt parameter tuning.

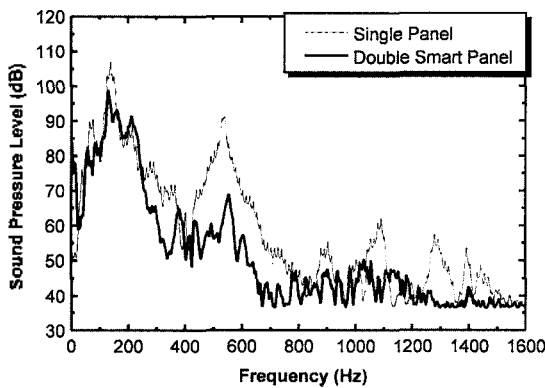


그림 11. 지능패널의 전달음 실험결과

Fig. 11. Transmitted sound pressure of smart panels with no piezo-damping.

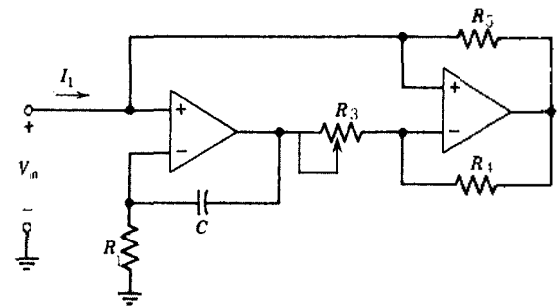


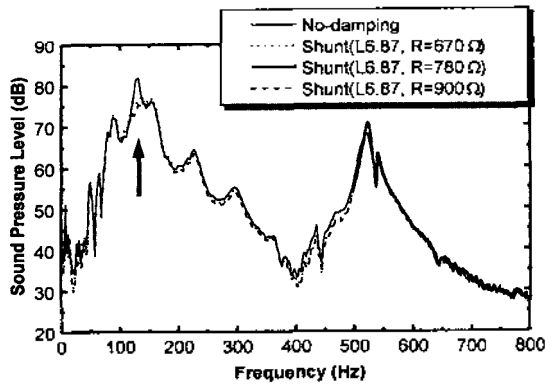
그림 12. 가상 인덕터의 회로도

Fig. 12. A schematic diagram of synthetic inductor.

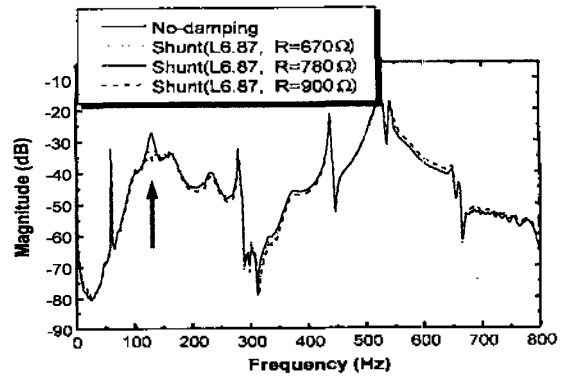
5.2. 수동적 특성에 의한 소음저감 성능

패널의 압전감쇠를 실험하기 전에 단일패널과 흡음재와 공기 층을 갖는 이중지능패널에 대한 전달음 실험을 수행하였다 (그림 11). 단일패널에서 첫번째와 대칭모드의 공진주파수는 각각 140 Hz와 548 Hz에서 발생하였으며 이중지능패널은 질량효과등에 의해서 첫번째 공진주파수는 각각 128 Hz에 나타났다. 전달음 실험을 통하여

흡음재와 공기 층을 추가함으로써 첫번째 공진주파수를 비롯하여 질량제어영역에 해당하는 넓은 주파수 영역에서의 큰 소음저감 효과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 저주파수영역에서의 보다 좋은 소음저감을 위하여 전달음 실험에서 발생한 첫번째 공진주파수에 대하여 압전감쇠를 부과하였다.



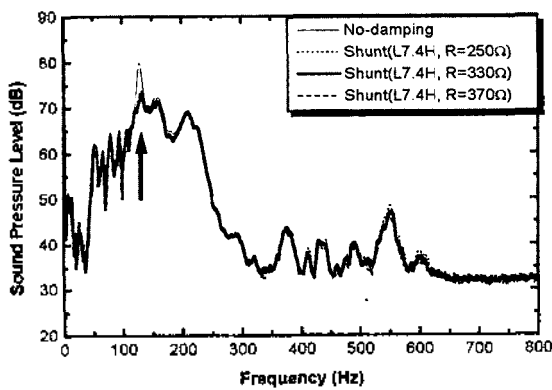
(a) Sound pressure level



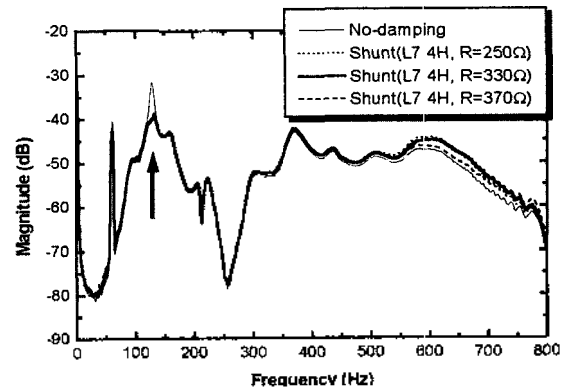
(b) Vibration magnitude

그림 13. 압전감쇠에 따른 압전단일패널의 첫 번째 공진 주파수에 대한 실험결과 (140 Hz)

Fig. 13. Experimental results of single panel with piezo-damping 1st resonance (140 Hz).



(a) Sound pressure level



(b) Vibration magnitude

그림 14. 압전감쇠에 따른 압전이중패널의 첫 번째 공진 주파수에 대한 실험 결과 (128 Hz)

Fig. 14. Experimental results of double smart panel with piezo-damping for 1st resonance (128 Hz).

5.3. 압전감쇠에 의한 소음저감 성능

압전지능 패널의 공진주파수에서의 소음저감 성능을 증명하기 위하여 강성제어영역에 해당하는 첫번째 공진 주파수에 대한 음향실험을 수행하였다. 그림 11에서 압전감쇠를 부과하지 않은 상태에서 수행한 전달음 실험을 통하여 확인한 단일패널과 이중지능패널의 첫번째 공진 주파수인 140 Hz, 128 Hz에 대한 압전감쇠에 의한 소음저

표 2. 압전지능패널의 전기적 임피던스계수

Table 2. Electrical impedance parameters for the smart panels.

Freq. (Hz)	Parameter	Van Dyke	Complex
Single Panel (140Hz)	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
Double Smart Panel (128Hz)	C ₀ (F)	1956e-7	1956e-7 - j5.532e-9
	C ₁ (F)	2.449e-9	2.029e-9 + j1.34e-11
	R ₁ (Ω)	2.018e4	
	L ₁ (H)	634.6	765.4 - j32.37

감 성능 실험을 하였다. 표 3에서 최적화를 통하여 얻은 최적 인덕턴스는 현실적으로 구현이 불가능한 값이므로, 가상 인덕터를 사용하였다[13]. 그림 12는 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[7]. 가상 인덕터의 인덕턴스는 임피던스 측정기를 이용하여 공진주파수에서 측정하였다(표 3). 표 3에서 측정된 선트회로 파라미터와 최적화를 통해 얻은 선트회로 파라미터 값이 유사한 값을 나타냄을 알 수 있다. 압전감쇠를 부과한 상태에서의 음향실험을 통하여, 단일패널과 이중지능패널의 첫번째 공진주파수에서 음압은 8 dB, 6 dB, 진동은 각 8 dB가 감소하였다(그림 13, 14). 이러한 실험을 통하여 압전감쇠에 의한 공진주파수에서의 소음·진동저감 성능을 확인하였다.

표 3. 최대소산에너지법을 이용한 섀트회로의 최적 파라미터
Table 3. Optimal parameters of the shunt circuit (DEM method).

Freq. (Hz)	Parameter	Van Dyke	Complex	Measured
Single Panel (140Hz)	$R_2(\Omega)$	820.97	820.327	780
	$L_2(H)$	6.762	6.7567	6.87
Double Smart Panel (128Hz)	$R_2(\Omega)$	890	889.73	330
	$L_2(H)$	7.9	7.9	7.4

VI. 결론

광대역에서의 전달 소음저감을 위하여 압전감쇠와 수동적 특성을 갖는 압전지능패널을 제안하고 실험적 연구를 수행하였다. 이중지능패널은 중·고주파수 영역에서의 수동적 효과와 저주파수에서의 압전감쇠를 혼용하는 개념이다.

섀트회로의 파라미터 튜닝은 전기적 임피던스 모델과 최대 소산에너지에 연관된 새로운 방법을 이용하였다. 지능패널의 소음저감 성능을 실험하기 위해서 음향터널을 설계, 제작하고 터널에 대한 음향실험을 통하여, 음향터널의 사용 주파수를 평가하였다.

단일패널에 흡음재와 공기 층을 부가한 이중지능패널에 대한 음향실험을 수행하여 첫번째 공진주파수를 제외한 중주파수 영역에서의 현저한 소음저감 효과를 확인하였다. 압전감쇠에 의한 공진주파수에서의 소음저감 성능을 검증하기 위하여 단일패널과 이중지능패널의 첫번째 공진주파수에 대한 음향실험을 수행하여 8 dB, 6 dB의 소음저감 효과를 이루었다. 이러한 실험을 통하여 수동적 방법과 압전감쇠를 이용하는 지능패널의 넓은 영역에서의 소음저감 성능을 확인하였다.

본 논문에서 제안한 파라미터 튜닝방법은 압전재료가 부착된 임의의 구조물에 쉽게 적용할 수 있고 하나 압전 재료로 다중모드 감쇠가 가능한 장점을 가지고 있다. 또한 보다 좋은 소음저감 성능을 얻기 위하여 압전감쇠 효과를 증대시키는 방안에 대한 연구뿐만 아니라 여러 종류의 패널들에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 국제공동연구(과제번호 2006-304-02-2) 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. J. S. Bolton and N.-M. Shiao, "Random incidence transmission loss of lined, finite double panel systems," *12th AIAA Aeroacoustics Conf.*, AIAA-89-1048, San Antonio TX, 1989.
2. L. Berank and G. Work "Sound Transmission through Multiple Structures Containing Flexible Blankets" *The Thirty-Fourth Meeting of the Acoust. Soc. Am*, 1947.
3. C. R. Fuller, "Active Control of Sound Transmission/Radiation from Elastic Plates by Vibration Inputs : I. Analysis," *J. Sound & Vibration*, **136** (1), pp. 1-15, 1990.
4. C. A. Gentry, C. Guigo and C.R. Fuller, "Smart Foam for Applications in Passive-Active Noise Radiation Control," *J. Acoust. Soc. Am*, **101** (4), pp. 1771-1778, 1997.
5. J. Kim, B. Im and J. Lee, "Active Noise Suppression of Smart Panels Including Piezoelectric Device and Absorbing Materials," *on Smart Structures and materials 2000 (SPIE)*, Newport Beach, California, USA, March, vol. **3984**, pp. 94-100, 2000.
6. R. L. Forward, "Electric Damping of Vibrations in Optical Structures," *J. of Applied Optics*, **18**(5), pp. 690-697, 1979.
7. 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. 243-258, 1991.
8. 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.
9. 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.
10. L. H. Bell and D. H. Bell, *Industrial Noise Control*, Marcel Dekker Inc., New York, 1994.
11. PRAP (Piezoelectric Resonance Analysis Program), TASI technical Software, 174 Montreal Street, Kingston, Ontario K7K 3G4, Canada.
12. ISO 7235, Acoustics-Measurement procedures for ducted, silencers insertion loss, flow noise and pressure loss, International Organization for Standardization, 1991.
13. W. K. Chen, *Passive and Active Filters*, New York, John Wiley and Sons, Inc., 1986.

저자 약력

■ 이 중 권 (Joong-Kuen Lee)



1989년 2월: 인하대학교 기계공학과 (공학사)
1994년 8월: 인하대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
2000년 8월: 인하대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
2001년 8월 - 현재: 주)NSV기술 연구소 책임연구원
※ 주관심분야: 구조소음, 지능구조물

● 김 재 환 (Jae-Hwan Kim)

한국음향학회지 제19권 제4호 참조