한국소음진동공학회 2001년도 춘계학술대회논문집, pp. 127~132.

압전재료에 따른 지능패널의 전달소음저감성능

°이 중근*, 김 재환**

Transmitted sound reduction performance of smart panels with different piezoelectric materials through piezo-damping

°Joong-Kuen Lee* and Jae-Hwan Kim**

ABSTRACT

In this paper, transmitted sound reduction performance of smart panels is studied according to different piezoelectric materials with piezoelectric shunt damping. Peizo-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. After shunting elements are connected to the equivalent circuit, the shunt parameters are optimally searched based on the criterion of maximizing the dissipated energy at the shunt circuit.

Transmitted sound reduction performance is compared according to different piezoelectric materials with peizo-damping. Two piezoelectric materials are selected: PZT-5 and QuickPack IDE actuator. When resonant shunt circuit is considered, the use of PZT-5 exhibited the good sound reduction performance.

Key word : Piezo-damping, Resonant circuit, Smart panel, Transmitted sound reduction,

1. 서론

편안함과 안락함을 추구하는 현대인에게 생활환경주변에서 발생하는 각종 진동 및 소음에 대한 대책이 공학적 측면에서 큰 문제로 대두되고 있다. 이러한 진동 및 소음에 대한 대책으로 여러가지 방법이 있으나 소형· 경량이며, 우수한 성능을 발휘할 수 있는 방법의 개발에 많은 관심이 집중되고 있다. 이러한 방법의 일환으로 압전재료를 이용하는 수동감쇠에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[1-2].

수동감쇠에서 압전재료는 진동 구조물의 기계적 에너지를 외부의 회로에 의해서 주울 열에 의해 소산되는 전기에너지로 변환시키는 변환기 역할을 수행한다. 현실적으로 일상적인 상태에서 작은 변환기 역할을 수행하는 압전재료를 통해 얻을 수 있는 진동 및 소음 저감성능이 중요하다. 압전감쇠의 기본적 개념은 흔히 션트회로라고 하는 인덕터 또는 저항, 저항과 인덕터를 함께 이용하는 수동전기회로를 연결한 압전재료에 의해서 얻어지는 진동억제이다. 이러한 압전감쇠의 성능을 좌우하는 션트 파라메터 튜닝에 대한 연구가 많은 연구자에 의해서 진행되고 있다. Hagood 와 Flotow 는 전기회로를 연결한 압전재료에 의한 기계적에너지의 소산 가능성을 연구하였다[3]. 그들은 선택한 모드에 대하여 기계진동흡진기에 상사하는 방법으로 구조물의 공진에 션트회로의 전기적 공진을 최적으로 맞추는 방법으로 션트회로의 파라메터를 튜닝하였다. 그러나 이러한 방법은 응용장치로 이용되는 압전 지능구조물에 대한 모델링에 적용되는 션트 파라메터를 기계적 개념으로 최적설계하기에는 너무 복잡할 뿐만 아니라 다중모드에 적용하기에 문제점을 가지고 있다. 그러므로 새로운 압전 션트파라메터 튜닝방법을 제안하였다[4]. 이 방법은 시스템의 공진근처에서 전기적 등가모델로 쉽게 변환되어지는 전기적 임피던스를 측정하는데 기초를 두고 있다. 등가회로에 션트회로를 연결한 후 션트회로에서 소산에너지가 최대가 되는 파라메터 튜닝에 의하여 최적 설계를 한다. 압전구조물의 모델링에 있어서 전기적 임

* : 인하대학교 기계공학과 박사 후 과정

** : 인하대학교 기계공학과

피던스를 이용하는 방법의 장점은 임의의 구조물에 대한 임피던스를 측정하면 등가의 전기적 임피던스모델로 쉽게 모델링할 수 있으며 자연스럽게 등가모델의 파라메터를 추출할 수 있고 더나아가, 다중모드 튜닝에 용이하게 적용할 수 도 있다.

본 논문에서는 압전감쇠를 이용하여 압전재료에 따른 진동 및 소음저감성능에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 압전재료의 압전감쇠능에 매우 중요한 특성인 전기기계결합계수가 다른 두 종류의 압전재료에 따른 전달소음저감성능을 비교하였다.

2. 압전 션트 파라메터 튜닝

압전감쇠는 에너지 소산 기구이다. 열린 상태의 회로에 연결된 압전재료는 유도된 기계적 변형에너지의 일부를 전극에 전기적에너지로 저장하게 되며, 전극사이에 저항을 연결할 경우 저장된 에너지는 열로 에너지를 소산 시키기 위하여 회로내로 흐르게 된다.

본 논문에서는 전기적 임피던스 모델에 기초를 둔 새로운 파라메터 튜닝방법을 간단히 요약하였다[4].

a. 압전재료의 전기회로 모델

Fig.1 은 압전 지능패널의 기본개념을 나타내고 있다. 그림에서와 같은 압전재료는 공진에서 등가의 전기회로 요소들로 표현할 수 있다. 압전재료의 기계적인 부분과 전기적인 부분은 서로 변환되는 요소를 갖추고 있다. 압전재료에 대한 등가회로를 논할 때 크게 공진회로와 비공진회로로 구분하는 것이 편리하다.

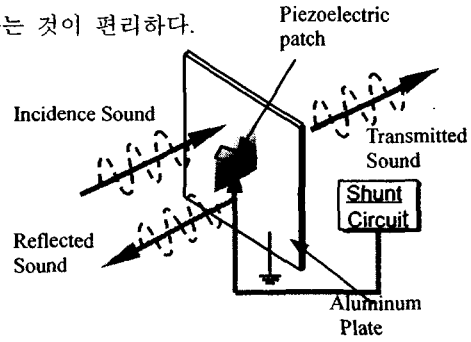


Fig. 1 Schematic diagram of proposed piezoelectric smart panels

공진회로는 반다이크(Van Dyke)모델과 콤플렉스(complex)모델로 나타낼 수 있다. 일반적으로 공진회로에서는 요소들의 전기적 특성으로 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 4 개의 요소로 반다이크 모델을 나타낸다. 반면에 콤플렉스모델은 비공진 회로에 기초를 둔 것이다. 이 모델은 복소수인 3 개의 요소(L_1, R_1, C_1)를 갖는다. 이는 개별적인 6 개의 요소를 나타내며, 무부하 압전소자 공진기의 전기적 특성을 이상적으로 나타낸다. Fig.2 는 제안된 지능구조물에 대하여 반다이크 모델을 이용한 전기 임피던스모델을 나타내고 있다.

시스템을 전기적 임피던스 회로로 표현하면 회로의 각 노드 사이의 전기적 임피던스는

$$
\begin{aligned}
Z_1(s) &= \frac{k_{eq}}{s} + c_1 = \frac{1}{j\omega C_1} + R_1 \\
Z_2(s) &= m_1 s = j\omega L_1 \\
Z_3(s) &= \frac{1}{sC_0} = \frac{1}{j\omega C_0} \\
Z_4(s) &= Ls + R = j\omega L + R_2
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

과 같다.

여기서 L_1, R_1, C_1은 시스템의 강성, 감쇠,질량을 각각 나타낸다. 일반적인 손실이 없으면 Kirchhoff의 전압과 전류법칙을 임피던스회로에 적용하여 전체 전기적 임피던스와 각 지선에서의 전류를 이용하여 압전요소에 입력 전류와 션트회로를 통과하는 전류 사이의 전달함수는 다음과 같이 된다.

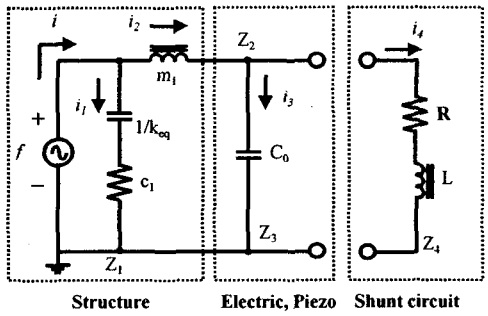


Fig. 2 Electrical analog circuit of MCK system with piezoelectric element and resonant shunt.

$$\frac{I_2}{I} = 1 - \frac{Z}{Z_1} \qquad (2)$$

이 전달함수는 기계진동흡진기의 전달함수와 상사이다. 제안된 압전구조물에 대해 전기적 임피던스 모델을 적용하기 위해서는 반다이크모델의 계수를 구하여야 한다. 이를 위해 구조물의 공진주파수에서 압전구조물의 전기적 임피던스를 직접 측정하였다. 반다이크모델 또는 콤플렉스모델에 사용되는 계수들은 전기 임피던스 측정기 (impedance analyzer, HP4192A)와 압전재료 해석 프로그램(Piezoelectric Resonance Analysis Program, PRAP)을 이용하여 구하였다[5].

b. 션트 파라미터 튜닝

션트회로 파라메터 튜닝은 압전감쇠성능을 최대로 하기 위해서는 필수적이다. 공진션트에서 최적 인덕턴스는 구조물의 공진과 션트회로의 공진주파수가 일치하도록 결정하여야 하며, 최적 저항은 소산에너지가 최대가 되도록 선택하여야 한다. 일반적으로 사용하는 방법과 같이 도식적으로 전달함수를 튜닝하는 대신에 션트회로에서 에너지를 최대로 소산 시키는 새로운 파라메터 튜닝방법을 적용하였다. Fig. 2 에서와 같이 등가 전기적 임피던스모델에서 외부가진에 의하여 구조물에 유도되는 에너지는

$$P_{IN} = \frac{1}{2}|V \cdot I| = \frac{1}{2}\left|(Z \cdot I) \cdot I^*\right| = \frac{1}{2}|Z||I|^2 \qquad (3)$$

이다. 이 에너지는 연속적으로 생성되므로 이를 션트회로의 입력 에너지라 한다. 공진회로를 통과해서 흐르는 전류가 I_4일 때, 션트회로에서의 소산에너지는 공진회로에 따른 전기적 임피던스와 전압의 항으로 쓸 수 있다.

$$P_D = \frac{1}{2}\mathrm{Re}\left[(Z_4 \cdot I_4) \cdot I_4^*\right] = \frac{1}{2}\mathrm{Re}\left[\frac{Z_3 \cdot Z_4}{(Z_3 + Z_4)} \cdot \frac{(Z_1 - Z)}{Z_1}\right]|I|^2 \qquad (4)$$

이므로, 소산에너지와 입력 에너지의 비는 다음 식과 같다.

$$J = \frac{P_D}{P_{IN}} = \frac{\mathrm{Re}\left[\frac{Z_3 \cdot Z_4}{(Z_3 + Z_4)} \cdot \frac{(Z_1 - Z)}{Z_1}\right]}{|Z|} \qquad (5)$$

튜닝과정에서, 션트 파라메터를 최적상태로 설정함으로 서 에너지 소산을 최대화 할 수 있다. 최대 소산에너지를 최적설계를 위한 목적함수로 정의하고 설계변수로 션트회로의 저항과 인덕턴스로 정한다.

$$\left[L_i^*, R_i^*\right] = \underset{\substack{L \\ R}}{Max}[J] \qquad (6)$$

3. 실험 장치 및 방법

a. 음향실험장치

지능패널의 소음저감성능을 실험하기 위해서는 저주파수에서 고주파 영역까지 전달음을 측정할 수 있어야 한다. 대부분의 패널 재료에서 전달손실은 엄격한 규제하에서 측정된다. 실험과정은 대부분 ASTM 표준 E90 에 따라서 진행되어 진다[6]. 이러한 실험장비가 고가인 관계로 간단한 음향터널을 제작하였다[Fig.3]. 음향터널은 300mm x 300mm 의 사각튜브에 길이가 4m 인 구조물이며 동일한 길이로 2 등분되어있다. 스피커는 상부터널의 끝부분에 설치하고 왜지로 제작된 무 반향 막음(anechoic terminator)을 하부터널의 다른 끝에 설치하였다. 두 단면이 결합되는 지점에 특별히 설계된 플랜지를 설치하여 지능패널을 이 곳에 장착하였다. 지능패널의 4 면은 볼트를 이용하여 체결하고 두 단면사이에서 음압의 누기를 막기 위하여 단단히 결합하였다. 터널은 음향적으로 고체표면을 만들기 위하여 4.5mm 두께의 강철 판으로 제작하였다. 상부와 하부터널의 4 개의 단면에서 음압을 측정하기 위해서 16 개의 구멍을 가공하였다. 단면 별로 반복적으로 음압분포를 측정하여 검증한 결과, 평면파를 가정할 수 있는 한계주파수를 800Hz 까지로 하였다[Fig.4]. 전달음 측정에서 Fig.3 에서와 같이 하부 단면의 대각선으로 설치된 4 개의 마이크로 폰을 사용하였다. 관내소음 측정표준에 의해서 4 개 마이크로 폰의 음압 평균

값을 전달음 계산에 이용하였다. 측정된 자료를 통하여 저주파영역에서는 4 개의 마이크로폰에서의 측정 음압에는 차이가 없었으나 800Hz 이상에서는 굴곡현상이 발생하였다. 이것은 터널의 단면에 따른 압력의 차이에 기인한다.

b. 압전감쇠 성능실험

압전지능패널은 Fig.5 에서와 같이 주구조물인 300mm x 300mm x 1.5mm 사각 알루미늄 판에 압전재료가 판의 중앙에 부착된 구조이다. 본 논문에서는 두 종류의 압전재료(PZT-5 와 QuickPack IDE™)[7]를 이용하였다. Table I 에 압전재료의 특성을 기술하였다. IDE 는 길이 방향에 따라 적층된 형태로 전극이 형성된 구조로 일반적인 압전재료가 d_{31} 방향의 압전효과를 나타내는 형태와 달리 d_{33} 방향으로 보다 큰 힘을 나타낼 수 있다. 이것은 기계-전기결합계수와 변형량을 크게 나타낸다. 실험에 사용된 압전재료는 형상에 제한이 있으므로 압전재료의 크기를 동일하게 적용하지는 못하였다. 패널에 PZT-5 는 중앙에 한 개를 부착하고 IDE 는 양쪽에 2 개씩 bymorph 형태로 부착하였다.

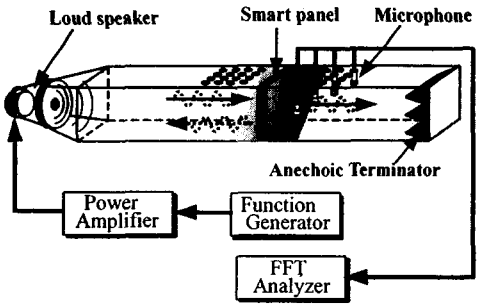


Fig.3 A schematic diagram of the experimental apparatus for the smart panels

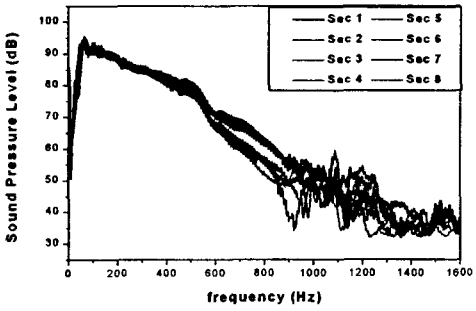


Fig.4 Measured sound pressure at each section

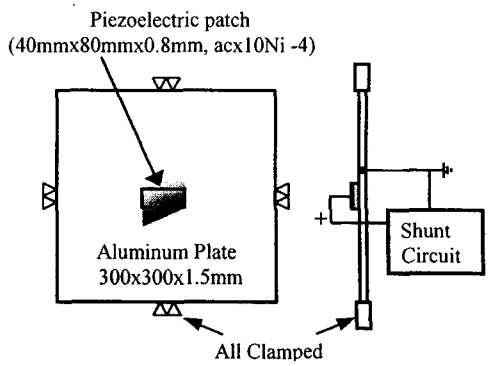


Fig. 5 A schematic diagram of proposed smart panel

Loud Speaker 는 신호 발생기(function generator)로부터 나온 신호를 파워 앰프(power amplifier)를 거쳐 가진하여 음향 평면파가 소음원으로 평판 위에 작용하도록 하였다. 투과 및 방사된 음압은 음향 터널 내부의 마이크로폰을 통하여 나온 신호를 주파수 분석기로 측정하였다. 평판에 가속도계를 부착하여 평판의 거동을 감지하여 발생된 신호를 신호분석기를 사용하여 측정하였다.

최적값으로 얻어진 인덕턴스는 Table II 에서 보듯이 현실적으로는 구현할 수 없는 큰 값이기 때문에 가변저항 값에 비례하는 등가의 인덕턴스를 만들어 내는 합성 인덕터(synthetic inductor)를 사용하였다[8]. 압전지능패널의 전기적 임피던스모델의 변수를 결정하기 위하여 HP4192A 임피던스 측정기를 이용하여 전기적 임피던스를 측정하였으며, 지능패널의 주파수 응답곡선에서 얻어진 공진모드와 일치하는 모드를 목표 모드로 설정하여 압전재료에 션트시켰다

4. 결과 및 고찰

a. 션트 파라메터 튜닝

최대 소산에너지 방법에서는 구조물과 압전재료에 대한 전기적 임피던스모델의 파라메터가 필요하다. Fig.6 은 임피던스 측정기를 이용하여 측정한 PZT 와 IDE 압전재료를 부착한 지능패널의 콘덕턴스를 나타내는 곡선이다. 그림에서 보는 바와 같이 전기적,기계적 noise 때문에 IDE 패널의 첫번

Table I. Material properties of PZT and IDE(typical)

	PZT-5	IDE
PZT size(mm)	40x80x0.8	46x20x0.38
d_{33} (pC/N)	593	550
d_{31} (pC/N)	-274	-285
k_{33}	0.75	0.73
k_{31}	0.39	0.4
S_{33}^{E} ($10^{-12}m^2/N$)	20.8	14.5
S_{11}^{E} ($10^{-12}m^2/N$)	16.4	15.8

Table II. Electrical impedance parameters for the smart panel

Freq.(Hz)	Parameter	Van Dyke	Complex
IDE (544Hz)	C_0(F)	3.58e-9	3.581e-9-j1.253e-10
	C_1(F)	3.345e-11	3.165e-11-j1.336e-12
	R_1(Ω)	6.316e4	
	L_1(H)	2582	2725+j95.87
PZT (538Hz)	C_0(F)	1.952e-7	1.95e-7-j1.03e-8
	C_1(F)	4.471e-9	4.044e-9-j5.504e-10
	R_1(Ω)	1207	
	L_1(H)	20.41	22.15+j2.599

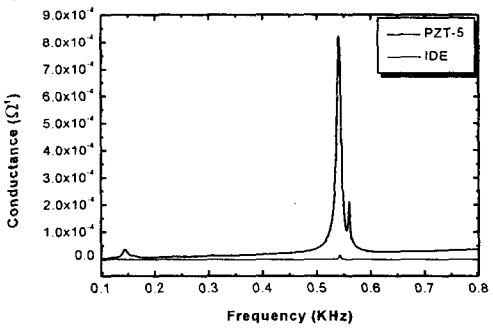


Fig. 6 Measured impedance for smart panels

째 공진주파수는 임피던스곡선에 나타나지 않으므로 각 패널 두번째 공진주파수인 538Hz, 544Hz에 대하여 실험을 수행하였다. 측정된 어드미턴스는 PRAP 프로그램을 이용하여 등가 전기적 임피던스모델의 파라메터를 결정한다. Table II는 패널들의 두번째 공진주파수에서 추출된 반다이크와 콤플렉스모델의 계수들을 나타낸다.

소산 에너지법을 통하여 구한 R-C 회로의 최적 파라메터를 Table III 에 나타내었다.

b. 압전감쇠를 이용한 음향가진실험

압전재료에 따른 소음저감성능을 확인하기 위하여 압전감쇠를 통한 음향가진 실험을 수행하였다. 실험 결과를 Fig. 7, 8 에 나타내었다. 이때 가상인덕터의 인덕턴스는 임피던스 측정기를 이용하여 공진주파수에서 측정하였다[Table III]. 션트회로 파라메터 튜닝결과와 유사한 값을 나타냄을 알수 있다. 결과에서 보는 바와 같이 두번째 공진주파수에서 PZT 패널과 IDE 패널에 대한 음압은 각각 25dB, 4dB, 진동은 25dB, 4dB 가 감소하였다. 실험결과를 통하여 적층된 형태인 IDE 압전재료보다는 압전세라믹(PZT-5)이 보다 좋은 결과를 나타내었다. 이는 압전재료의 성능을 나타내는 각종 물성치들이 규정된 조건에서 측정한 값으로 실제 압전재료를 응용한 실험장치에서는 물성치가 다른 결과를 나타내며, 또한 응용장치의 사용조건에 따른 압전재료 형상등에 따른 영향을 나타내는 결과이다.

5. 결론

본 논문은 압전재료에 따른 소음저감성능을 비교하였다. 압전감쇠능을 최대로 하기 위한 새로운 튜닝방법을 적용하였다. 이 방법은 전기적 임피던스모델과 션트회로에서 최대로 에너지를 소산시키는 원리이다. 구조물에 부착한 압전재료에서 전기적 임피던스를 측정하여, 시스템의 공진주파수 영역에서 등가전기회로를 구성한다. 시스템의 등가회로에 션트회로를 연결한 후, 션트회로에서 에너지를 최대로 소산시키는 방법으로 최적의 션트파라메터를 찾는다. 제안한 이 방법은 근본적으로 구조물의 전기적, 기계적인 특성을 나타내는 임피던스를 사용하므로 임의의 형상의 압전재료를 사용하는 구조물에 적용하여 보다 정확한 결과를 얻을 수 있다.

압전재료에 따른 소음저감성능을 비교하기 위하여 두 종류의 압전재료(PZT-5, QuickPack IDE)를 부착한 패널들에 대한 음향실험을 수행한 결과 PZT-5 를 부착한 패널이 좋은 결과를 나타내었다.

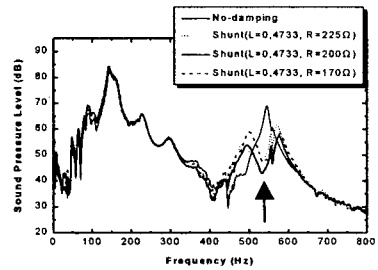
앞으로 보다 좋은 압전감쇠를 얻기 위하여 압전재료의 종류, 형상등에 대하 연구가 진행되어야 할 것이다.

참고 문헌

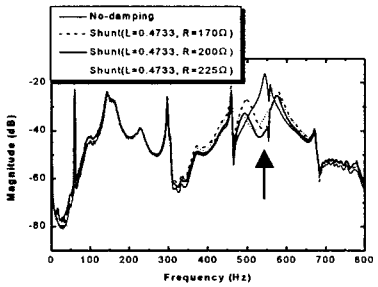
1. Joseph J. Hollkamp, "Multimodal Passive Vibration Suppression with Piezoelectric Materials and Resonant Shunts", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 5, pp. 49~57, 1994.
2. H. H. Law, "Characterization of Mechanical Vibration Damping by Piezoelectric Materials", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 197(4), pp. 489~513, 1996.
3. N. W. Hagood, A. von Flotow, "Damping of Structural Vibrations with Piezoelectric Materials and Passive Electrical Networks", *J. of Sound and Vibration*, Vol. 146(2), pp. 243~268, 1991.
4. 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), 868-877, December 2000.
5. PRAP (Piezoelectric Resonance Analysis Program), TASI technical Software, 174 Montreal, Street, Kingston, Ontario K7K 3G4, Canada
6. ASTM E1050-86, "Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones, and a digital frequency analysis system"
7. S. Yoshikawa, M. Farrell, D. Warkentin, R. Jacques and E. Saarmaa, " Monolithic piezoelectric actuators and vibration dampers with interdigital electrodes" *6th Annual Symp. on Smart Structures and materials* (SPIE), Vol.3668, 578-585, Newport Beach, California, USA, March (1999).
8. Chen, W.K., "Passive and Active Filters", *New York, John Wiley and Sons, Inc.*, 1986.

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

Freq.(Hz)	Parameter	Van Dyke	Complex	Measured
538Hz (PZT)	$R_2(\Omega)$	214.59	214.5	52
	$L_2(H)$	0.458	0.458	0.47
544Hz (IDE)	$R_2(\Omega)$	1.15e3	1.149e3	280
	$L_2(H)$	24.16	24.15	22.23

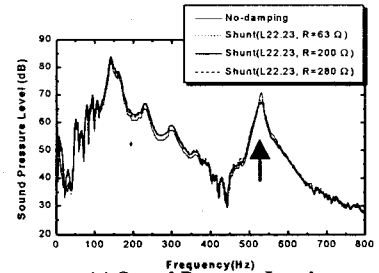


(a) Sound Pressure Level

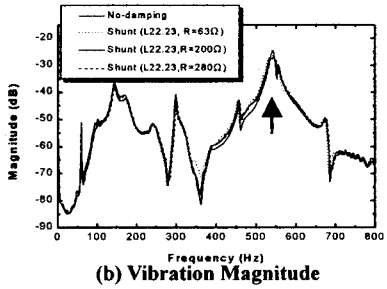


(b)Vibration Magnitude

Fig.7 Experimental result for smart panel with PZT-5



(a) Sound Pressure Level



(b) Vibration Magnitude

Fig.8 Experimental result for smart panel with IDE