한국소음진동공학회 2001년도 추계학술대회논문집, pp. 1120~1125

압전 션트를 이용한 패널의 투과소음 저감 성능에 관한 연구

°최 진영 *, 김 재환**, 이 중근***

Performance test for transmitted noise reduction of smart panel using piezoelectric shunt damping

° Jin-Young Choi *, Jae-Hwan Kim**, and Joong-Kuen Lee ***

ABSTRACT

A new concept of piezoelectric smart panels for noise reduction in wide band frequencies is proposed and their possibility is experimentally investigated. Multi-mode damping is studied by using a newly proposed tuning method. The proposed panels are based on passive shunt damping methods. This method is based on electrical impedance model and maximizing the dissipated energy at the shunt circuit. four PZT are attached on smart panel for improving performance of transmission noise reduction. o prove the concept of piezoelectric smart panels, an acoustic measurement experiment was performed. The smart panels exhibit a good noise reduction in middle and high frequency ranges due to the mass effects of absorbing materials or/and the air gap. The use of piezoelectric smart panel renders noise reduction at resonance frequency. Noise reduction at multiple resonance frequencies is experimentally investigaed.

1. 서론

최근 환경과 생활의 편의에 대한 관심이 높아지면서 구조물의 진동 및 이에 의해 발생하는 음장을 억제하는 문제가 공학 분야에서 중요한 문제로 부각되고 있다. 소음 저감에는 수동적 방법(passive method)과 능동적 방법(active method)으로 구분할 수 있다. 수동적 방법은 구조물 형상의 변경이나 흡음재등과 같은 방음재료를 첨가하는 방법을 의미한다. 이러한 방법은 형상의 변경이나 방음재의 부착등에 한계성을 지니고 있으나 중, 고주파수 대역에서의 우수한 저감효과로 인하여 지속적으로 사용되고 있다. 또한 능동적 방법은 스피커 등의 부가적 음원을 이용하여 음장을 억제하는 방법(active noise control)과 소음의 원인이 되는 구조물에 직접 제어입력을 부가함으로써 구조물의 거동을 제어하여 음장을 억제하는 능동구조음향제어(active structural acoustic control)가 있다[1-3].

최근, 지능재료 중 전기장과 변위장에 연계되어 거동하는 압전재료를 이용하여 구조물의 거동을 제어하는 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 압전재료는 감지기와 작동기로 작용하므로 부가적인 작동기와 감지기를 사용하지 않고 직접 구조물에 부착하여 이용할 수 있는 장점을 가지고 있다[4],[5]. 또 압전 지능재료를 이용하여 수동제어가 가능한 새로운 개념의 압전 지능패널을 가지고 저주파영역의 음압을 압전 재료로 단일 모드 수동제어를 하고 고주파영역의 음압을 흡음재를 이용하여 투과소음 저감을 시켰다[6].

따라서 본 논문에서는 이러한 압전 지능패널을 이용하여 투과소음 저감 성능과 다중 모드 수동 감쇠에 대한 가능성을 검증하고, 이를 통해 투과소음 저감 성능을 향상 시키고자 한다. 다중 모드 수동 감쇠 경우 한 개의 압전 재료를 이용하여 다중 모드를 제어한 경우가 있지만[7-8] , 연산 증폭기

* : 인하대학교 대학원

** : 인하대학교 기계공학과

*** : NSV(앤에스브이) 기술연구소

의 수가 많고 각 모드에 따른 션트 회로간에 간섭 현상을 일으키기 때문에 튜닝하는 데 어려움이 있는 단점이 있다. 본 논문에서는 모드에 따라 압전 재료를 각각 이용하여 간섭현상을 없애고 독립적으로 튜닝을 하였다.

2. 압전감쇠

압전 감쇠는 에너지 소산 기구이다. 열린 상태의 회로와 연결된 압전 장치는 유도된 기계적 변형에너지의 일부를 전기적 에너지로 저장하고 전극사이에 저항을 연결한 경우에 저장된 에너지는 부하 임피던스에서 열로 에너지를 소산시키기 위하여 회로 내로 흐르게 된다. 즉, 진동하는 구조물의 진동에너지와 음향에너지를, 부하 임피던스로 작용하는 션트 회로에서 열에너지로 발산시키고 이에 따른 진동 감쇠를 통하여 방사 소음 저감을 이루는 것이다. 최대 에너지 소산이 시스템의 공진주파수에서 발생하게 하기 위하여 최적의 인덕턴스와 저항을 찾는 것이 중요하다[9].

본 연구에서는, 압전 재료와 구조물이 복합된 지능구조물의 전기 임피던스(electric impedance)를 측정하여 압전 감쇠의 적용 대상을 보다 정확하게 모델링하고 이로부터 최대 에너지 소산을 이루는 션트 회로의 설계변수를 구하는 방법을 이용하였다[10].

2.1 압전재료의 전기회로 모델

압전 재료는 공진에서 등가의 전기회로 요소(반다이크 모델과 컴플랙스 모델)들로 표현할 수 있다. 션트 회로와 연결된 압전 지능구조물의 전기적 임피던스 모델은 압전 재료와 기계구조물의 전기적 임피던스 모델을 이용하여 Fig.1 와 같이 전체 시스템을 전기적 임피던스 회로로 나타낼 수 있다. 이 시스템의 각 노드(node)사이의 임피던스는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_1(s) = \frac{k_{eq}}{s} + c_1 = \frac{1}{j\omega C_1} + R_1$$
$$Z_2(s) = m_1 s = j\omega L_1$$

$$Z_3(s) = \frac{1}{sC_0} = \frac{1}{j\omega C_0} \qquad (1)$$
$$Z_4(s) = Ls + R = j\omega L + R_2$$

그리고 전체 시스템의 임피던스는 식(2)와 같이 표현 할 수 있다.

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

또한 시스템의 전달함수는 기계 동흡진기의 전달함수 상사에 의하여 다음과 같다.

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

제안된 압전 구조물의 전기적 임피던스 모델을 사용하기 위해서는 반다이크 모델의 계수를 구하여야 한다. 이를 위하여 압전 구조물의 전기적 임피던스를 직접 측정하였다. 반다이크 모델 또는 컴플랙스 모델에 사용되는 계수들은 전기 임피던스 측정기(Impedance Analyzer, HP4192A)와 압전 재료 해석 프로그램(Piezoelectric Resonance Analysis Program, PRAP)을 이용하여 구하였다[11].

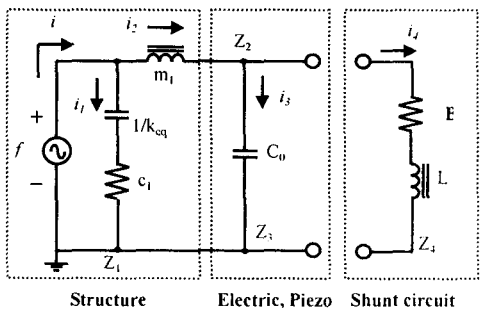

Fig.1 Electrical analog circuit of MCK system with piezoelectric element and resonant shunt.

2.2 파라메터 튜닝

파라메터 튜닝은 압전 감쇠성능을 최대로 하기 위해서는 필수적이다. 공진션트에서 최적 인덕턴스는 구조물의 공진과 션트 회로의 공진주파수가 일치하도록 선정하여야 하며 션트 회로의 최적 저항은 소산에너지가 최대가 되도록 선택하여야 한다. Fig.2 에서 구조물에 가해지는 에너지는,

$$P_{IN} = \frac{1}{2}|I^* \cdot I| = \frac{1}{2}\left|(Z \cdot I) \cdot I^*\right| = \frac{1}{2}|Z||I|^2 \qquad (4)$$

이고, 션트 회로에 흐르는 전류는,

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

이다. 그리고 저항에서의 손실에너지는,

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

이므로, 두 에너지의 비는 다음 식과 같다.

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

식(7)은 최적설계를 위한 목적함수로써 션트 회로와 관련된 변수를 제외하고는 모두 계산되어지는 값이므로 다음과 같은 식에 의하여 에너지비가 최대가 되는 션트 파라메터들을 결정할 수 있다.

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

3. 압전 지능패널

Fig.2 은 압전 지능패널의 기본개념을 나타내고 있다. 제안된 지능패널은 션트 회로가 연결된 압전 재료와 흡음재가 부착된 구조물로 이루어졌다. 흡음재는 중. 고주파수영역에서의 소음 저감을 위하여 알루미늄 평판의 한 쪽면에 부착하였으며, 션트 회로는 저주파수에서의 전달소음제어를 위하여 압전 재료에 연결하였다. 제안한 개념을 증명하기 위하여 지능패널을 제작하였다. 300mm x 300mm x 1.5mm 의 알루미늄 평판을 주구조물로 하여 20mm 두께의 폴리우레탄 폼을 평판에 부착하였다. 첫 번재 모드와 두 번째모드를 고려하여 압전 재료를 판 앞,뒤에 Bimorph 형태로 평판 중앙에 각각 위치하였고,. 션트 회로는 직렬로 연결된 저항과 인덕터로 구성되었으며 공진 션트를 위하여 각각 독립적으로 압전 재료에 연결하였다.

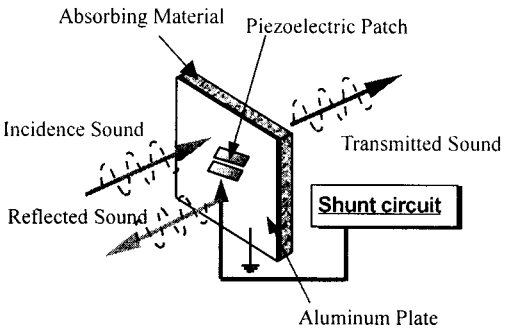

Fig. 2 Schematic diagram of proposed piezoelectric smart

4. 음향 실험 장치

압전 지능패널의 전달 소음 저감 성능을 실험하기 위하여 음향 터널을 설계, 제작하였다[11]. Fig.3 은 제작된 음향 터널을 나타내는 개략도이다. 그림에서와 같이 상하부 터널로 구성된 음향 터널의 길이방향의 8 개 단면에서 측정한 평균 음압을 토대로 본 실험에서는 평면파 특성을 나타내는 800Hz 까지 적용하였다. 음향 터널내부에는 반사를 막기 위하여 흡음재를 부착하였으며, 끝 부분에는 무 반사단(anechoic terminator)을 설치하여 터널 공진에 의한 굴곡을 제거하였다.

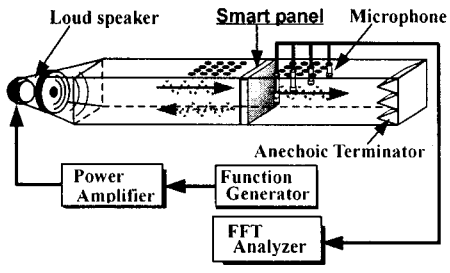

Fig.3 A schematic diagram of the experimental apparatus for the smart panels

5. 실험결과 및 논의

5.1 션트 파라메터 튜닝

제안한 지능패널의 소음 저감 성능을 평가하기 위하여 주구조물인 300mm x 300mm x 1.5mm 사각 알루미늄 판과 50mm x 100mm x 0.8mm 압전 재료(PZT-5)가 판의 중앙에 부착된 구조인 단일패널(single panel)과 20mm 두께의 폴리우레탄 폼을 단일패널의 한 쪽면에 부착한 지능패널(smart panel)을 제작하였다. Fig.4 는 HP4192A 임피던스 측정기를 이용하여 측정한 단일패널과 지능패널의 어드미턴스 곡선이다. 지능 패널의 경우 흡음재의 영향으로 고주파수 영역에서는 공진이 일어나지 않았다. 션트 파라메터 튜닝을 위하여 matlab 과 PRAP 프로그램을 이용하여 측정된 어드미턴스에서 등가 전기적 임피던스모델의 계수를 추출하여 최적의 인덕터 값과 저항 값을 찾았다. Table I 은 단일 패널과 지능 패널의 첫번째 공진주파수에서 추출된 반다이크와 콤플렉스모델의 계수를 나타낸다.

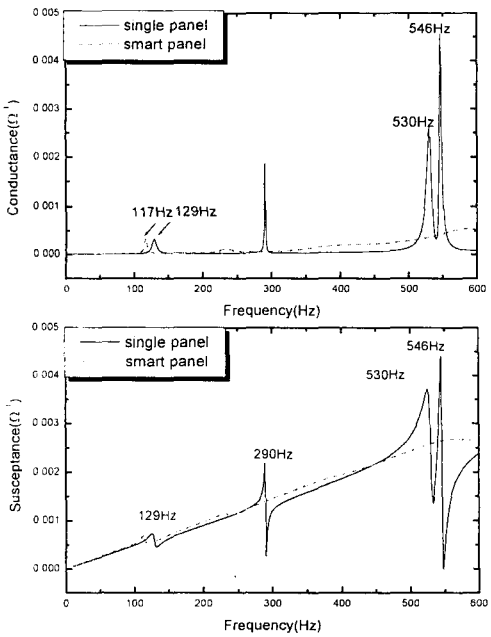

Fig.4 Measured impedance of single panel and smart panel.

Table I. Electrical impedance parameters for the Single panel and smart panel

Freq.(Hz)	Para	Van Dyke	Complex
Single Panel (117Hz)	C_0(F)	7.289e-7	7.3e-7 –j1.584e-8
	C_1	2.415e-8	2.2e-8 +j6.757e-10
	R_1(Ω	3167	
	L_1(H	62.94	68.44 –j6.02
Smart Panel (129Hz)	C_0(F)	7.703e-7	7.7e-7 – j2.154e-8
	C_1	1.984e-8	1.8e-8 + j6.32e-10
	R_1(Ω	3030	
	L_1(H	93.94	103.7 – j7.827

5.2 압전 감쇠

단일패널과 지능패널에 대해 압전 감쇠에 의한 투과소음 저감 성능 실험을 수행하였다. 최적 인덕턴스는 현실적으로 구현이 불가능한 값이므로, 가상 인덕터를 사용하였다 [13] . 단일 패널의 첫 번째 주파수(126Hz)에 해당하는 션트 회로의 인덕터값 L_2=4.9H, 저항값 $R_2 = 230\Omega$을 사용하였고, 지능 패널의 경우는 첫 번째 주파수(117Hz)에 해당하는션트회로의 인덕터값 L_2=5.2H, 저항값 $R_2 = 627\Omega$을 사용하였다. Fig 5 는 단일 패널과 지능 패널에대해 션트를 하지 않았을 경우 음압을 비교하였다. 지능 패널에 경우 고주파수에서 흡음재에 영향으로 음압이 감소하였다.

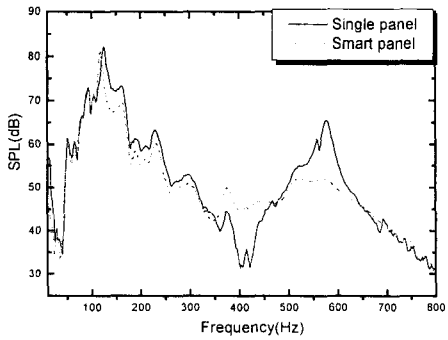

Fig.5 Sound Pressure Level of single panel and smart panel. (no shunt damping

단일 패널에서는 첫 번째 공진 주파수와 두번째 공진 주파수에 해당하는 음압을, 그리고 지능 패널의 경우 첫 번째 주파수의 음압을 10dB 이상 감

소시키는데 목표를 두었다. Fig 6 에서 보듯이 압전 재료를 중앙에 앞,뒤로 4 개를 붙였다. 각각 모드에 따라 압전 재료에 션트 회로를 구성하여 다중 모드 수동감쇠로 투과 소음을 저감 시켰다.

우선 3 개의 압전 재료를 가지고서 첫 번째 주파수(126Hz)의 음압을 줄였다. 그리고 나머지 1 개의 압전 재료를 이용하여 두 번째 주파수(580Hz)의 음압을 줄였다. 각각 압전 재료에 원하는 주파수에 맞춰 션트를 시켰기 때문에 서로 간섭현상 없이 순수하게 튜닝 할 수 있었다.

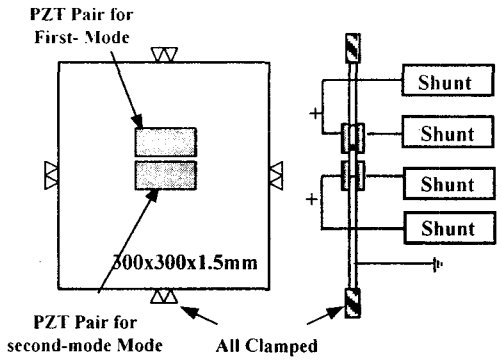

Fig.6 A schematic diagram of smart panel using piezo-damping

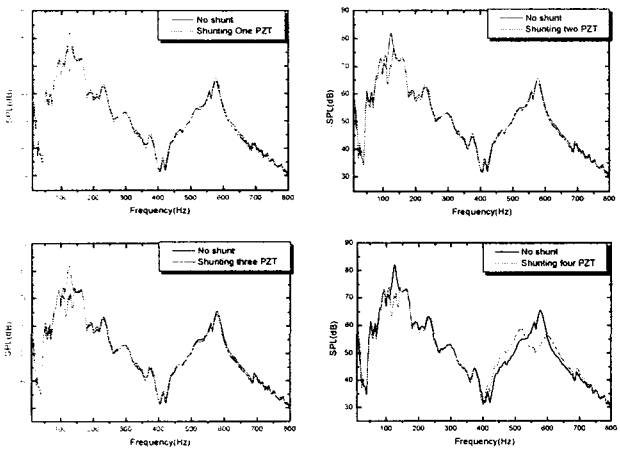

Fig.7 Experimental result for single panel using PZT damping(both mode)

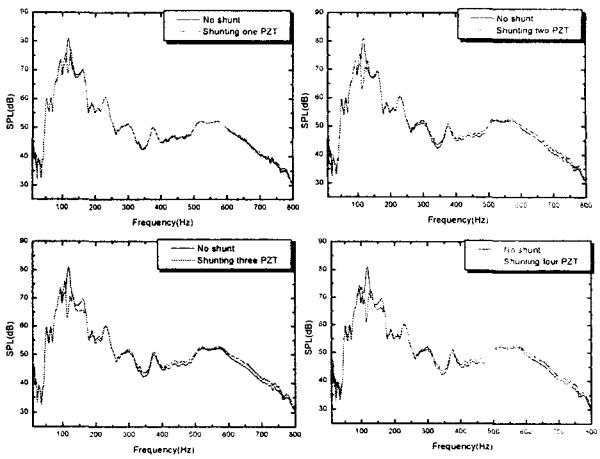

Fig.8 Experimental result for smart panel using PZT damping

Fig.7 을 보면 126Hz 를 튜닝한 후 양 옆에 나타나는 최대 음압을 각각 튜닝하였다. 첫 번째 주파수의 음압은 16dB 감소를 보였고 두 번째 주파수의 음압은 12dB 감소를 보였다.

또 지능 패널은 고주파영역에서는 흡음재의 영향으로 음압이 감소하였기 때문에 첫 번째 주파수의 음압만을 감소시키는데 목표를 두었다. Fig.8 에서 지능 패널에 붙어있는 4 개의 압전 재료를 션트시켰을 때 19dB 의 감소를 보였다.

6. 결론

광대역에서의 전달 소음 저감을 위해서 압전 감쇠와 흡음재의 특성을 갖는 압전 지능패널을 제안하고 실험적 연구를 수행하였다. 전달 소음 저감을 향상시키기 위해 4 개의 압전 재료를 이용하여 다중 모드로 음압을 감소시켰다. 션트 회로의 파라메터 튜닝은 전기적 임피던스 모델과 최대 소산에너지에 연관된 새로운 파라메터 튜닝 방법을 이용하였다.

소음 저감 성능 실험을 통하여 단일 패널은 첫 번째 공진주파수와 두 번째 공진 주파수를 고려하여 소음을 감소시켰으며,단일패널에 흡음재를 부착한 경우 즉 지능 패널은 첫 번째와 두 번

째공진 주파수를 제외한 중,고주파수 영역에서의 현저한 소음 저감을 확인하였다.

본 논문에 적용한 파라메터 튜닝방법은 압전 재료가 부착된 임의의 구조물에 쉽게 적용할 수 있다. 투과 소음의 감소를 향상시키기 위해 모드에 따라 션트를 시켰다. 그 결과 투과 소음 저감에 큰 효과가 있음을 확인하였다. 제안한 지능패널은 광대역 소음 저감에 유망한 기술이다.

참고 문헌

1. 김재환, "압전 지능 구조물의 원리와 소음제어에의 응용," 한국소음진동공학회지, Vol.6, No.3, 267- 273,1996
2. V.V. Varadan, X. Bao and V.K. Varadan, "Smart wall paper for noise suppression," *proc of North America Conf. On Smart Structures and Materials*(SPIE), Vol. 2443, San Diego, California USA, 1995.
3. R.L. Clark and C.R. Fuller, "Experiments on active control of structurally radiated sound using multiple piezoceramic actuators," *J. Acost. Soc. Am..*, 91, (6), 3313-3320, 1992.
4. E.F. Crawley and J. de Lues, "Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures," *AIAA J.*, 25 (10), 1373-1385, 1989
5. J. Kim, B. Ko, J. Lee and M. Nam, "Optimal design of Piezoelectric smart structures for active cabin noise control," *5th Annual Symp. On Smart Structures & Materials* (SPIE), Vol.3323, 228-223, San Diego CA, USA, March 1998.
6. 이중근,김재환, "압전 지능패널의 소음저감 성능에 관한 실험적 연구 ,한국음향학회 학술표대회 논문집, 서울대학교, 1999, 제 18 권 제 2(s) 호, pp.393~396.
7. Joseph J. Hollkamp, "Multimodal Passive Vibration Suppression with Piezoelectric Materials and Resonant Shunts", *J. of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 5, pp. 49~57, 1994.
8. S.Y. Wu, "Multiple PZT transducer implemented with multiple-mode piezoelectric shunt for passive vibration damping," Proceeding *SPIE: Smart Structures and Materials 1999: Passive Damping and Isolation* 3672, pp112-122, March 1999
9. 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.
10. J. Kim, Y.-H. Ryu and S.-B. Choi, "New Shunting Parameter Tuning Method for Piezoelectric damping Based on Meassured Electrical Impedance," Smart Materials and Structures, *9(6), 868-877. 2000.*
11. PRAP (Piezoelectric Resonance Analysis Program), TASI technical Software, 174 Montreal Street Kingston, Ontario K7K 3G4, Canada.
12. .L.H. Bell and D.H. Bell, *Industrial Noise Control* (Marcel Dekker Inc., New York, 1994)
13. Chen, W.K., *Passive and Active Filters*, New York, John Wiley and Sons, Inc., 1986.
14. H.H. Law, "Characterization of Mechanical Vibration Damping by Piezoelectric Materials", *J. of Sound and Vibration*, Vol. 197(4), pp.489~513,1996.
15. J. P. Den Hartog, *Mechanical Vibrations*, McGraw-Hill, 1956.
16. Ralph J. Smith, *Circuits, Devices, and Systems*, John Wiley & Sons, 1966.
17. Eric M. Flint and Craig A. Rogers, "Electro-Dynamic Transudation Equations for Piezoelectric Stack Actuators", *Adaptive Structures and Composite Materials: Analysis and Application, ASME*, AD-Vol. 45/MD-Vol. 54, pp. 201~210, 1994
18. ASTM E1050-86, "Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones, and a digital frequency analysis system"