

압전선트 회로를 이용한 지능패널의 광대역 소음저감에 관한 연구

Broadband Noise Reduction of Smart Panels using Piezoelectric Shunt Circuits

정영채*, 김재환**, 이중근***, 하성호****

Young-Che Jung, Jaehwan Kim, Joong-Kuen Lee and Sung-Ho Ha

Key Words : Smart Panels(지능패널), Piezoelectric Shunt Damping(압전 선트 감쇠), Negative Capacitor Converter(부 캐패시터 컨버터), Transmission Loss(투과손실)

ABSTRACT

In this paper, broadband shunt technique for increasing transmission loss is experimentally investigated. Piezoelectric shunt damping is studied using resonant shunt circuit and negative capacitor shunt circuit. A resonant shunt circuit is implemented by using a resistor and inductor. Negative Capacitor shunt damping is similar in nature to resonant shunt damping techniques, as a single piezoelectric material is used to dampen multi-mode. Performance of both methods is experimentally studied for noise reduction. This is based upon SAE J1400 test method and a transmission loss measurement system is provided for it. This paper will present the test setup for transmission loss measurement and the tuning procedure of shunt circuits. Finally the results of sound transmission tests will be shown.

1. 서론

보다 안락한 생활환경에 대한 요구가 증가함에 있어서 소음이 중요한 환경문제로 대두 되고있다. 소음제어에는 크게 수동적 방법(passive method)과 능동적 방법(active method)으로 대별 할 수 있다. 수동적 방법은 방음, 흡음재의 부착이나 구조물의 설계를 바꾸는 방법 등이 있으며, 이는 중, 고주파영역에서 좋은 소음 저감성능을 갖는다. 하지만 질량의 증가와 설계변경의 한계로 인한 제약성이 있다. 또한 능동적 방법은 부가적 음원을 동원하여 소음 음장을 상쇄하거나 억제하는 방법과, 소음원의 진동을 직접 제어하여 진동에 의한 소음을 저감 시키는 방법이 있다⁽¹⁻³⁾. 하지만 능동제어를 위하여 부가적으로 많은 장비와 비용이 들어가며 시스템이 복잡해지는 단점이 있다.

이를 해결하기 위한 방법으로 압전재료를 이용한 새로운 개념의 수동적 방법이 활발히 연구 중이다. 저감하고자 하는 주파수에 전기적 회로를 튜닝하여 압전재료가 붙어있는 구조물에 연결하여 에너지 소산에 의한 소음 진동의 감쇠효과를 얻는 것이다. 또한 하나의 공진 모드에 대하여 독립된 회로를 사용하였던 방법과 다르게 차단 회로를 이용한 다중 모드 감쇠가

연구 되어져 왔다⁽⁴⁾.

본 논문에서는 부 임피던스 컨버터(negative impedance converter)⁽⁵⁻⁶⁾ 종류의 하나인 부 캐패시턴스 컨버터(negative capacitor shunt)을 이용하여 다중 모드의 진동 소음 저감성능을 검증하고자 한다. 부 캐패시턴스 컨버터 방법은 회로내의 부하저항에서 열에너지로 소산되는 관점에서 공진선트(resonant shunt)와 유사하며 특정 주파수의 튜닝 없이 다중 모드 감쇠가 이루어지는 장점이 있다. 또한 반잔향실(semi-reverberation chamber)과 반무향실(semi-anechoic chamber)로 구성된 음향투과손실 측정장치와 SAE J1400 방법론⁽⁸⁾을 이용하여 투과손실을 측정함으로써 소음저감 성능을 평가한다.

2. 압전감쇠

압전재료는 기계적 변형을 전기에너지로 전환시키거나 전기에너지를 가함으로써 기계적 변형을 얻어낼 수 있다. 압전감쇠는 전자의 원리를 이용한다. 구조물의 기계적 변형으로부터 압전재료에 저장된 전기에너지는 회로에 연결된 부하 저항을 지나게 되고 이때 전기에너지는 열에너지로 소산되게 된다⁽⁹⁾. 결국, 진동이나 음향에 의해 발생된 구조물의 변형에너지가 구조물에 부착되어있는 압전재료에 의해 전기에너지로 전환하게 된다. 전환된 전기에너지는 션트회로(shunt circuit)의 저항을 통과하면서 열에너지로 소산됨으로써 구조물의 진동에 의해 전달되는 소음 진동을 저감하게 되는 것이다. 이때 부하 저항에서 가장 큰 에너지를 소산 시키도록 유도하기 위하여 회로 내의 소자를

* 인하대학교 기계공학과 대학원
E-mail : young036@hotmail.com
Tel : (032) 872-7925, Fax : (032) 872-7925
** 인하대학교 기계공학과
*** ㈜넥시즈
**** ㈜넥시즈

최적화하는 과정이 필요하다. 이와 같은 파라미터를 정하기 위하여 압전구조물과 회로를 전기적 임피던스 해석을 통하여 모델링하여 부하저항에서 가장 큰 에너지가 소산되도록 하는 방법을 사용하였다⁽¹⁰⁾.

(1) 압전 패널

압전 패널은 알루미늄 판에 압전재료가 부착된 형태의 지능 구조물을 말한다. Fig.1 은 실험에 사용된 압전 패널의 개념도를 나타낸다. 패널에 연결된 션트회로는 전기적 에너지를 열에너지로 소산시키는 일종의 흡진기 역할을 하게 된다. 또한 압전재료의 위치는 구조물의 변형이 가장 잘 전달될 수 있는 위치에 부착되어야 하며 이는 상용 FEM 프로그램(NASTRAN)과 모드 실험을 이용하여 가장 변위가 크게 일어나는 곳을 찾아내어 적용한다.

(2) 압전 구조물의 전기적 모델링

압전재료의 모델링은 공진과 비공진 상태에 따라 다르며 압전감쇠는 압전재료의 공진을 이용하므로 공진 모델링을 사용하여 등가의 전기회로로 표현한다. 본 논문에서는 공진 모델링 중에 반다이크 모델(Van dyke Model)을 사용하여 압전구조물을 모델링한다. 반다이크 모델에 필요한 계수는 구조물과 결합된 압전재료의 전기적 임피던스를 임피던스 분석기(Impedance Analyzer, HP4192A)로 측정하여 임피던스 정보를 압전재료 전용해석 프로그램인 PRAP (Piezoelectric Resonance Analysis Program)에 입력하여 구한다. 압전구조물과 션트 회로의 전기적 모델링은 Fig.2 처럼 나타내게 된다. Fig.2 와 같은 등가의 회로를 각각의 임피던스로 표현하면 다음과 같다.

$$Z_1(s) = m_{eq}s + \frac{k_{eq}}{s} + c_{eq} = j\omega L_{eq} + \frac{1}{j\omega C_{eq}} + R_{eq} \quad (1)$$

$$Z_2(s) = \frac{k_0}{s} = \frac{1}{j\omega C_0}$$

Z_1 은 1 차 시스템의 임피던스이며 Z_2 와 Z_3 이 병렬로 연결되어 각각 압전재료와 션트 회로의 임피던스를 나타낸다. 따라서 전체 시스템의 총 임피던스는 다음과 같이 나타낸다.

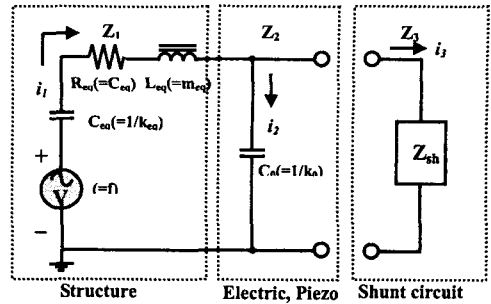


Fig.2 Electrical analog circuit of MCK system with piezoelectric element and shunt circuit

$$Z = Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} \quad (2)$$

$$T_r = \left| \frac{v}{F} \right| = \left| \frac{I}{V} \right| = \frac{1}{|Z|} = \left| \gamma \right| = \left| \frac{Z_2 + Z_3}{Z_1(Z_2 + Z_3) + Z_2 Z_3} \right| \quad (3)$$

1 차 시스템에서의 전달함수는 식(3)과 같이 입력 힘에 대한 속도로 나타낼 수 있으며 이는 힘과 전압사이의 상사법칙에 의해 전기적 임피던스의 역수인 어드미턴스(Admittance)로 표현할 수 있다.

(3) 공진 션트 감쇠 / 부 캐패시터 션트 감쇠

식(3)에서의 전달함수를 최소화 하기 위해서는 션트회로를 적절히 구성하여야 한다. 먼저, 공진회로 션트는 저항과 인덕터로 구성되며, 2 차 시스템의 기계적 동흡진기로 모델링할 수 있다. 여기서 인덕터는 압전 재료 고유의 캐패시턴스(capacitance)를 포함하는 회로에서 구조물의 공진주파수에 가까운 공진을 일으켜 해당 모드에서 보다 많은 전하가 이동할 수 있게 하여 에너지 소산을 도와주게 된다.

$$Z_{res} = R + j\omega L$$

$$Z_{num} = Z_2 + Z_{res} = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C_0} \right) \quad (4)$$

여기서 C_0 는 압전재료의 캐패시턴스를 나타내며, Z_{res} 는 공진션트 회로의 션트 임피던스를 나타낸다. 전달함수의 분자항인 Z_{num} 에서 허수부분(imaginary part)을 0 이 되게 하면 이 회로에 공진이 발생하게 되고 공진주파수에서는 반발적 작용이 서로 상쇄되어 회로내의 전압과 전류 사이의 위상이 0 이 된다. 결국 부하 임피던스에는 오로지 실수부분(real part)만 남아 댐핑(damping)의 역할을 하게된다.

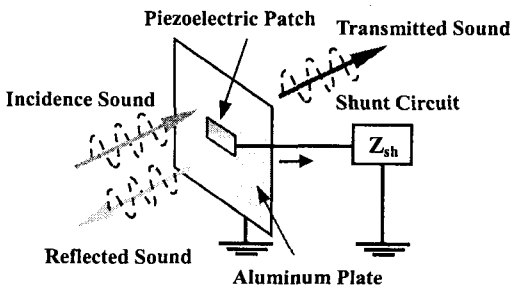


Fig.1 Schematic diagram of piezoelectric structure

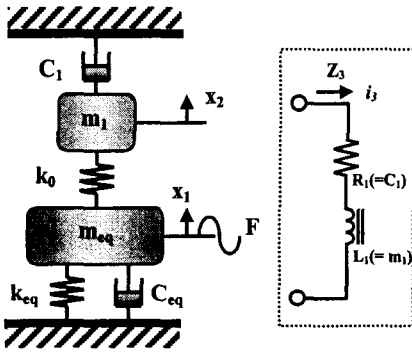


Fig.3 Mechanical model of resonant shunt and resonant shunt Impedance

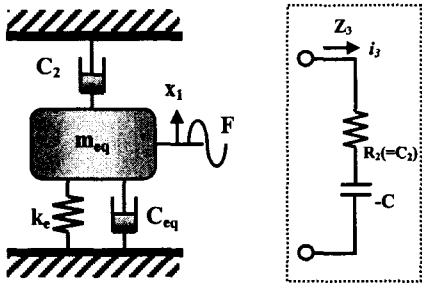


Fig.4 Mechanical model of NC shunt and NC shunt Impedance

같은 개념으로 공진회로의 인덕터 대신 압전재료의 캐패시턴스와 부호가 반대인 캐패시턴스로 셉트회로를 구성하여 같은 댐핑 (damping) 효과를 얻을 수 있다.

$$Z_{ncc} = R - \frac{1}{j\omega C}$$

$$Z_{num} = Z_2 + Z_{ncc} = R + j \left(\frac{1}{\omega C} - \frac{1}{\omega C_0} \right) \quad (5)$$

식(5)에서 Z_{ncc} 는 부 캐패시터 셉트회로의 임피던스를 나타낸다. 만약 압전재료의 캐패시턴스(C_0)와 부 캐패시터 셉트회로의 캐패시턴스(C) 값을 같게 튜닝하면 전달함수의 임피던스에는 실수부분만 남게 되어 같은 댐핑 효과를 얻을 수 있다. 부 캐패시터 셉트는 구조물의 특정 주파수에 튜닝하지 않기 때문에, 구조물의 공진 주파수의 변화에 민감한 공진회로 셉트와는 달리 공진 주파수 변화에 강건하며 다중 모드 감쇠 효과를 얻을 수 있다. 또한 Fig.4 와 같이, 공진회로 셉트의 기계적 모델링과는 달리 스카이 훅 댐퍼 (sky hook damper)를 가진 시스템으로 모델링 된다.

(4) 부 캐패시턴스(negative capacitance) 생성

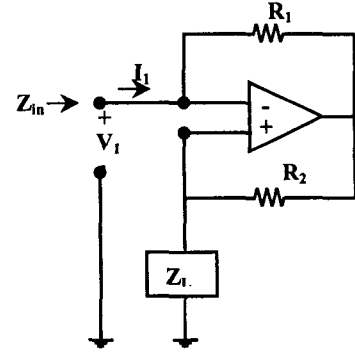


Fig.5 Negative Impedance Converter

부 캐패시터 셉트 회로를 구성하기 위해서는 부 임피던스 컨버터를 이용하여 압전재료의 캐패시턴스와 부호가 반대인 캐패시턴스를 생성할 수 있다.^(6~7) Fig.5 는 부 임피던스 컨버터와 부하 임피던스(Z_L)를 나타낸 그림이다. 각 연결점에 전류 법칙을 적용하면 입력 임피던스(Z_{in})를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Z_{in} = -\frac{R_1}{R_2} Z_L \quad (6)$$

만약 Z_L 이 $1/j\omega C$ 라면, 입력 임피던스는 $-1/j\omega C$ 되어 부 캐패시턴스를 생성 할 수 있고, R_1 과 R_2 의 비에 의해 입력 임피던스를 증폭시킬 수 있다.

3. 파라미터 튜닝

압전 재료와 셉트회로를 이용한 수동감쇠는 구조물에 부착된 압전재료의 압전효과를 이용하여 구조물의 진동으로 인한 기계적 에너지를 셉트회로 내의 저항을 통해서 열에너지로 소산 시켜 구조물에 감쇠효과를 주는 것이다. 최대 손실에너지는 저항에서의 손실에너지를 전기적 임피던스만으로 나타내어 최대 손실에너지를 갖게 하는 파라미터들을 찾는 것이다. Fig.2 에서 구조물에 가해지는 에너지는,

$$P_N = \frac{1}{2} |V \cdot i^*| = \frac{1}{2} |(Z \cdot i) \cdot i^*| = \frac{1}{2} |Z| |i|^2 \quad (7)$$

또한 셉트 회로의 저항으로 흐르는 전류는,

$$i_3 = \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} i \quad (8)$$

이고, 저항에서 소산되는 손실에너지는,

$$\begin{aligned}
 P_D &= \frac{1}{2} |V_{R1} \cdot i_3| \\
 &= \frac{1}{2} |(Re(Z_3) \cdot i_3) \cdot i_3| \\
 &= \frac{1}{2} Re(Z_3) \cdot \left| \left(\frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \right) \right|^2 \cdot |i|^2
 \end{aligned} \tag{9}$$

이다. 따라서 두 에너지의 비는,

$$J = \frac{P_D}{P_{IN}} = \frac{Re(Z_3) \cdot \left| \left(\frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \right) \right|^2}{|Z|} \tag{10}$$

로 나타내어진다. 공진선트 회로와 부 캐패시터 선트회로의 최적 파라미터를 구하기 위한 목적 함수는 손실 에너지의 합이 최대가 되도록 정하여 식(11)과 (12)와 같이 나타낸다. 부 캐패시터 선트회로의 경우 회로의 캐패시터의 값을 압전재료 전용해석 프로그램에서 구한 압전재료의 캐패시턴스 값에 튜닝하기 때문에 손실에너지가 최대가 되도록 저항만을 정한다.

$$[L^*, R^*] = \text{Max}_R \left[\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |J_k| \right] \tag{11}$$

$$[R^*] = \text{Max}_R \left[\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |J_k| \right] \tag{12}$$

4. 실험장치 및 방법

(1) 음향투과손실 실험 장치

Fig.6 은 본 연구에서 제안한 지능패널의 광대역 소음저감 가능성과 성능향상 평가를 위해 사용된 투과손실 측정 장치의 개략도이다. 투과손실 측정 장치는 두 개의 인접한 잔향실과 무향실로 구성되어있고, 잔향실의 한면에 사각구멍을 따내어 지능패널을 설치 할 수 있도록 하였다. 잔향실과 무향실은 각각 확산음장(diffused field)과 자유음장(free field)을 제한된 공간내에 재현하기 위한 것으로, 본 연구에서 제작된 잔향챔버는 크기 제한으로 인해 300 Hz 이상에서 유효하다. 잔향챔버 내부에는 3 개의 음원스피커를 두고 음을 방사하여 지능패널에 난입사파가 되도록 하였다. 압전패널을 통해 투과된 음압레벨(SPL)은 마이크로폰을 사용하여 측정 한다.

(2) 음향투과손실 측정 방법

본 연구에서는 SAE J1400 방법론을 이용하여 투과손실을 측정한다. 투과손실은 음원실에서 전체파워와 수음실에서 전체파워의 비로 나타낼 수

있다. 이것을 음압의 차이와 시편의 물성치로 나타내면 다음과 같다.

$$TL = MNR - 10 \log(A/Sa) \tag{13}$$

여기서, MNR 은 음원실과 수음실에서 음압레벨(SPL)차, A 는 시편의 면적, Sa 는 수음실의 전체 흡음률을 나타낸다. 식(12)에서 $10 \log(A/Sa)$ 은 같은 면적의 시편에 대해 항상 일정하기 때문에, 보정계수(Correction Factor)로 대체할 수 있다. 보정계수(CF)를 결정하기 위해 2mm 두께의 알루미늄 판넬을 사용하였고, 질량 법칙에 의해 300Hz~5,000Hz 에서의 투과손실을 식 (14)에 의해 이론적으로 계산한다.

$$TL(\text{reference}) = 20 \log_{10} W + \log_{10} f - 47.2 \tag{14}$$

여기서, $TL(\text{reference})$ 은 2mm 두께 알루미늄 판넬의 이론적 투과손실을, W 는 알루미늄 판넬의 표면 밀도 (kg/m^2), f 는 1/3 옥타브 밴드의 중심주파수를 나타낸다. 먼저 보정계수(CF)를 구하기 위해 2mm 알루미늄 판넬을 부착하고, 300Hz~5,000Hz 주파수 대역의 랜덤 노이즈를 사용하여, 음원실과 수음실의 음압레벨차(MNR)을 측정한다. 계산된 이론적 투과손실($TL_{\text{reference}}$)과 측정된 음압레벨차($MNR_{\text{reference}}$)을 이용하여 각 1/3 옥타브 밴드에 대한 보정계수를 구할 수 있다.

$$CF = MNR(\text{reference}) - TL(\text{reference}) \tag{15}$$

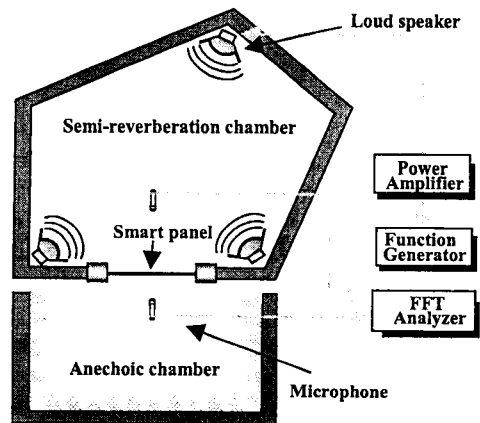


Fig.6 A schematic diagram for Transmission Loss measurement

Table 1. Electrical impedance parameters for the piezoelectric structure

Freq. (Hz)	Para	Van Dyke	Optimization
Resonant Shunt (5 th mode)	C_0 (F)	3.146e-7	$L_1=0.3394$
	C_{eq} (F)	8.105e-9	
	L_{eq} (H)	13.57	$R_1=124$
	R_{co} (ohm)	692.2	
NCC Shunt (5 th mode)	C_0 (F)	3.146e-7	$C=3.89e-7$
	C_{eq} (F)	8.105e-9	
	L_{eq} (H)	13.57	$R=40$
	R_{co} (ohm)	692.2	

결론적으로, 보정계수와 압전패널 시편의 음압레벨차를 측정하여 투과손실을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$TL(unknown) = MNR(unknown) - CF \quad (16)$$

4. 결과 및 고찰

압전패널을 이용한 압전감쇠 실험을 수행하였다. 식(8)에서 설명한 목적 함수는 MATLAB의 Optimization Toolbox를 이용하여 회로를 구성하는 파라미터의 값을 최적화 하였다. 최적화된 회로의 파라미터 값은 Table 1에서 나타내고 있다. Fig.7은 5th 모드에서의 공진 회로와 부 캐패시터 선트회로를 사용한 선트의 성능비교를 위하여 전기회로 해석프로그램(PSPICE)으로 시뮬레이션한 결과이며 전기적 어드미턴스를 이용하여 전달 함수를 나타낸다. Fig.8은 공진선트 회로와 최적 파라미터를 사용하여 가속도계로 진동의 감쇠효과를, 실험한 결과이며, 한 모드에서 약 20dB의 감쇠를 보였다. Fig.9와 Fig.10은 부 캐패시터 선트회로의 튜닝 캐패시턴스와 튜닝 저항의 값의 변화에 따른 영향을 보여준다. 각 공진 주파수에서의 압전재료의 캐패시턴스 값보다

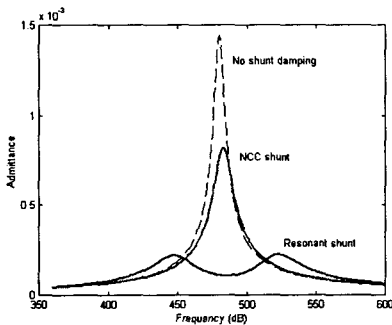


Fig.7 Comparison with Resonant and NCC shunt Performance

튜닝 캐패시턴스 값이 적을 때, 부 임피던스 컨버터가 불안정하게 되어 교란이 발생하게 된다. 또한 최적 저항의 값보다 회로의 내부저항이 크기 때문에 감쇠효과가 저감되는 것을 보여준다. 부 캐패시터 컨버터 회로를 이용한 실험에서는 각 모드에서 최대 9 dB, 7 dB, 3 dB, 3 dB의 감쇠 효과를 보였다.

본 연구에서는 음향투과손실 측정장치를 이용하여 부 캐패시터 선트방법의 소음저감 성능을 수행하였으며, Fig.11은 그 결과를 보여주고 있다. 각 중심주파수에서 4-2 dB의 투과손실을 보이며 전 주파수 구간에 대해서 1.1 dB의 저감성능을 보인다.

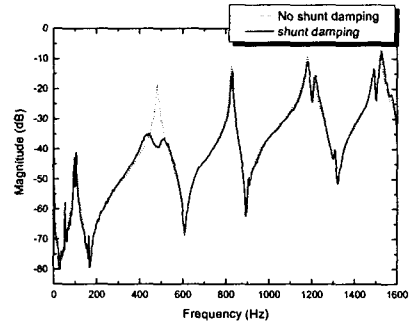


Fig.8 Measurement of Acceleration (Resonant shunt)

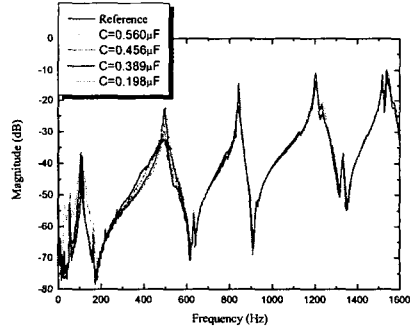


Fig.9 Measurement of Acceleration (NCC shunt)

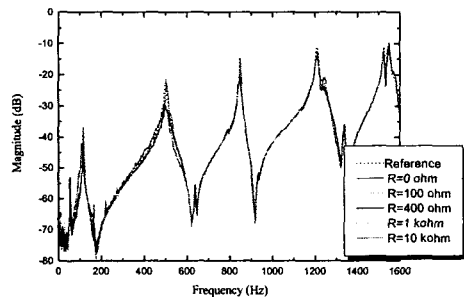


Fig.10 Measurement of Acceleration (NCC shunt)

참고문헌

(1) 김재환, 1996, "압전 지능 구조물의 원리와 소음제어에의 응용", 한국소음진동공학회지, Vol.6, No.3, pp. 267~ 273.

(2) V.V. Varadan, X. Bao and V.K. Varadan, 1995, "Smart wall paper for noise suppression," *proc of North America Conf. On Smart Structures and Materials(SPIE)*, Vol. 2443, San Diego, California USA

(3) R.L. Clark and C.R. Fuller, 1992, "Experiments on active control of structurally radiated sound using multiple piezoceramic actuators," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 91, No. 6, pp. 3313~3320.

(4) S.Y. Wu, March 1999, "Multiple PZT transducer implemented with multiple-mode piezoelectric shunt for passive vibration damping," *Proceeding SPIE: Smart Structures and Materials 1999: Passive Damping and Isolation*, Vol. 3672, pp. 112~122.

(5) K. Soundararajan and K. Ramakrishna, March 20, 1975, "Nonideal Negative Resistors and Capacitors Using an Operational Amplifier", *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, September 1975, pp. 760~763.

(6) A.I Larky, "Negative-Impedance Converters," *IRE Transactions on Circuit Theory*, September, pp. 124~131.

(7) S.Behrens, A.J.Fleming, S.O.R. Moheimani, "New Method for Multiple-mode Shunt Damping of Structural vibration using a Single Piezoelectric Transducer,"

(8) SAE Standards, Document Number J1400 1990. Laboratory measurements of the airborne sound barrier performance of automotive materials and assemblies.

(9) N. W. Hagood, A. von Flotow, 1991, "Damping of Structural Vibrations with Piezoelectric Materials and Passive Electrical Networks", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 146, No. 2, pp. 243~268.

(10) J. Kim, Y.-H. Ryu and S.-B. Choi, 2000, "New Shunting Parameter Tuning Method for Piezoelectric damping Based on Measured Electrical Impedance," *Smart Materials and Structures*, Vol. 9, No. 6, pp. 868~877.

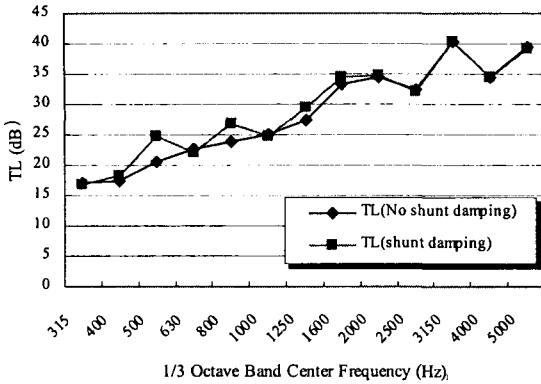


Fig.11 Measurement of Transmission Loss (NCC shunt)

5. 결론

압전감쇠 효과를 이용한 광대역에서의 소음감쇠에 관한 실험을 수행하였다. 투과손실을 향상시키기 위하여 기존의 모드의 개수만큼 압전재료를 붙이던 방법과 달리 한 개의 압전재료를 이용하여 여러 모드의 진동과 소음을 감쇠시키는 부 캐패시터 압전감쇠법으로 실험하였다. 본 실험에서는 셉트 회로의 파라미터 튜닝은 전기적 임피던스 모델과 최대 소산에너지에 연관된 새로운 파라미터 튜닝 방법을 이용하였다.

실험 결과 부 캐패시터 컨버터를 이용한 셉트는 특정한 모드의 튜닝이 필요 없이 다중모드에서의 감쇠효과를 얻을 수 있으므로, 주위환경의 변화에 강건한 장점이 있다. 그러나, 공진 셉트 회로를 이용한 방법보다 하나의 모드에 대하여 감쇠 효과가 작게 나타났다. 이는 셉트회로의 내부저항의 영향으로 최적 저항 값보다 크게 튜닝 되기 때문이다.

또한, 투과손실 측정의 결과 하나의 압전재료와 회로를 이용하여 다중 모드의 공진 주파수에 대해 4.2dB 투과소음을 줄였다. 따라서 기존 중주파수에 대해서 흡음재를 썼던 것과 비교하여 중량이나 크기에 대하여 훨씬 시스템에 주는 영향이 적으므로 경량의 구조물과 유연한 구조물의 진동 소음을 줄이는데 매우 좋은 효과를 발휘할 수 있다. 또한 본 연구에서 제안된 전기적 임피던스 방법과 최대 에너지 소산법으로 회로의 파라미터를 최적화하는 것은 다른 방법에 비해 실제 시스템에 적용하기 유용하다. 따라서 압전 감쇠를 이용하여 다중모드의 진동 소음을 줄이는 방법은 그 적용 범위가 넓고 파급효과 또한 큰 기술이라 할 수 있다.

후 기

본 연구는 학진진흥재단의 지원(KRF-2003-041-D20031)에 의해 수행되었음.