

광대역 전달 소음저감을 위한 지능패널의 개발

°이 중근*, 김 재환**, 정 재천**, 강 영규**

The development of piezoelectric smart panels for wide range transmission noise reduction

°Joong-Kuen Lee*, Jae-Hwan Kim**, Chae-Cheon Cheong** and Young-Kyu Kang**

ABSTRACT

A new concept of piezoelectric smart panels for noise reduction in wide band frequencies is proposed and their possibility is experimentally investigated. The proposed panels are based on active and passive methods. They use piezoelectric smart structure technology for active noise reduction at low band frequencies and passive sound absorbing materials for mid-range of noise frequencies. To 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 large at resonance frequency.

Another concept of smart panel that uses piezoelectric damping is experimentally investigated. Since piezoelectric dampings can reduce vibration and noise at resonance frequencies with simple shunt circuit, they have merits in terms of economy and simplicity. Dissipated energy method(DEM) is adopted to tune the shunt circuit precisely in piezoelectric dampings. Noise reduction at multiple resonance frequencies is demonstrated.

1. 서론

산업 기술의 발달로 제품을 경량화, 소형화함에 따라 소음문제가 많이 발생하고 있으며, 편안함과 안락함을 추구하는 현대인에게 소음은 큰 문제로 대두되어 많은 연구가 진행되고 있다. 소음저감에는 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 제어기와 작동기를 이용하여 음장을 억제하는 방법으로 저주파 대역에서 매우 큰 소음저감 효과가 있다. 이에는 스피커등의 부가적 음원을 이용하는 능동소음제어(active noise control)와 소음의 원인이 되는 구조물에 직접 제어

입력을 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⁾. 그러나 소음을 제어할 수 있는 범위가 구조물의 공진주파수 영역인 저주파로 제한되는 문제가 있다.

따라서 본 논문에서는 이러한 압전 지능재료를 이용하여 수동/능동제어가 가능한 새로운 개념의 압전 지능패널을 제안하고 실험을 통하여 광대역 소음저감 성능의 가능성을 검증하고자 한다.

2. 압전 지능패널

본 연구에서 제안한 압전 지능패널은 수동/능동방법을 혼용한 패널과 압전소자의 수동적 감쇠

* : 인하대학교 대학원

** : 인하대학교 기계공학과

를 이용한 패널로 나눌 수 있다.

2.1 수동/능동방법의 압전 지능패널

넓은 범위의 주파수 대역에서 소음저감 효과를 얻기 위하여 수동적 방법과 능동적 방법을 혼용하였다. 수동적 방법으로 중, 고주파 대역에서 저감 효과가 좋은 흡음재나 공기층을 이용하고 능동적 방법으로 패널에 부착된 압전소자를 사용하여 저주파수 대역 특히 공진주파수에서의 방사 소음저감에 효과적인 능동제어를 수행하는 방식이다. 다시말하면, 저주파 대역에서는 압전 지능구조물의 능동제어방법, 중, 고주파수 대역에서는 흡음재의 수동적 방법을 혼용하여 광대역에서 소음저감을 얻고자 한다. Fig.1은 이러한 압전 지능패널의 개념도를 나타내고 있다.

능동제어에서는 단일 모드에 대하여 감지기의 신호를 적당한 부 이득을 거쳐서 작동기에 추가하는 제어방식을 이용하였다.

2.2 압전감쇠를 이용한 지능패널

압전 지능구조물의 능동적 방법을 사용하기 위해서는 복잡한 제어가 필요하므로 실용화 측면에서 어려움이 있다. 따라서 능동적 제어 대신에 압전감쇠를 이용하여 패널 구조물의 공진주파수에서 소음저감을 이룬다면 경제적이 될 수 있다. 압전감쇠를 이용한 지능패널의 원리는 구조물의 진동에 의한 기계적에너지가 압전재료에 의해 전기적에너지로 변환되어 압전재료에 가해지는 부하임피

던스(load impedance)에 의해서 소산되는 것이다⁽⁶⁾. 즉, 진동하는 구조물의 진동에너지와 음향에너지를, 부하임피던스로 작용하는 선트회로에서 열에너지로 발산시키고 이에 따른 진동 감쇠를 통하여 방사 소음저감을 이루는 것이다.

이러한 압전감쇠에 있어서 중요한 것은 선트회로의 튜닝인데, 기존의 방법은 단일 모드인 경우 기계진동흡진기(mechanical vibration absorber)의 설계변수를 구하는 방법과 상사되는 알고리즘을 통하여 선트회로의 인덕턴스(inductance)와 레지스턴스(resistance)를 구하였다⁽⁷⁾. 그러나 이 방법은 임의의 구조물에 대하여 파라미터를 구하는데 정확성이 떨어지며, 여러 모드에 대한 적용이 어려운 단점이 있다.

본 연구에서는, 압전재료와 구조물이 복합된 지능구조물의 전기 임피던스(electric impedance)를 측정하여 압전감쇠의 적용 대상을 보다 정확하게 모델링하고 이로부터 단일 모드 선트회로의 설계변수를 구하는 방법을 이용하였다⁽⁸⁾. 전기 임피던스 모델을 구성하는 파라미터들은 실제 제작된 시스템의 임피던스를 측정하여 적용하므로 기존 방법들에 비하여 정확한 예측이 가능하고 다중모드의 튜닝이 유리한 장점을 가지고 있다.

지능패널과 같이 기계구조물과 전기적 선트회로가 압전재료로 연결된 시스템의 전기적 임피던스 모델링을 위하여 압전재료의 전기 임피던스모델과 기계구조물 시스템의 전기 임피던스를 구하여야 한다. 압전재료의 전기적 임피던스모델은 Mason의 등가회로이론을 기초로한 비공진회로를 이용할 수 있으며⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾, 선트회로와 연결된 압전 지능구조물의 전기적 임피던스모델은 압전재료의 전기적 임피던스모델을 이용하여 Fig.2와 같이 전체 시스템을 전기적 임피던스 회로로 나타낼 수 있다.

이 시스템의 각 노드(node)사이의 임피던스는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_1(s) = \frac{k_{eq}}{s} + c_1 = \frac{k_{eq}}{j\omega} + c_1$$

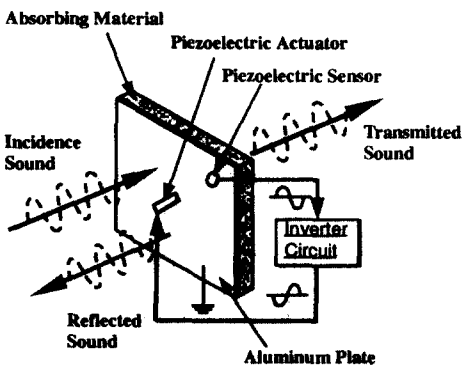


Fig. 1 Proposed smart panel

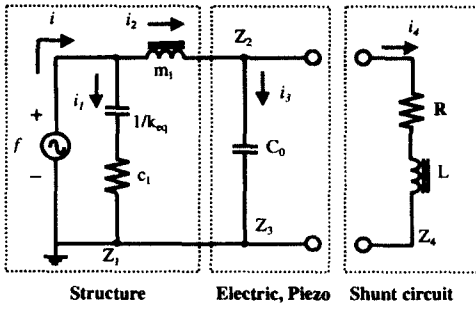


Fig.2 Electrical analog circuit of MCK system with piezoelectric element and resonant shunt.

$$\begin{aligned} Z_2(s) &= m_1 s = j\omega m_1 \\ Z_3(s) &= \frac{1}{sC_0} = \frac{1}{j\omega C_0} \\ Z_4(s) &= Ls + R = j\omega L + R \end{aligned} \quad (1)$$

그리고 전체 시스템의 임피던스는 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

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

또한 시스템의 전달함수는 전기-기계시스템의 상사에 의하여 식(3)과 같다⁽¹¹⁾.

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

파라미터 튜닝 및 시뮬레이션

압전감쇠는 구조물에 부착된 압전재료의 압전효과를 이용하여 구조물의 진동으로 인한 기계적 에너지를 선트회로의 저항을 통해서 열에너지로 소산시켜서 구조물에 감쇠효과를 주는 것이다. 따라서 구조물에 가해지는 에너지에 대한 선트회로 저항에 의한 손실에너지의 비가 최대가 되게 하는 파라미터를 찾으면 된다. Fig.2 에서 구조물에 가해지는 에너지는,

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

이고, 선트회로에 흐르는 전류는,

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

이다. 그리고 저항에서의 손실에너지는,

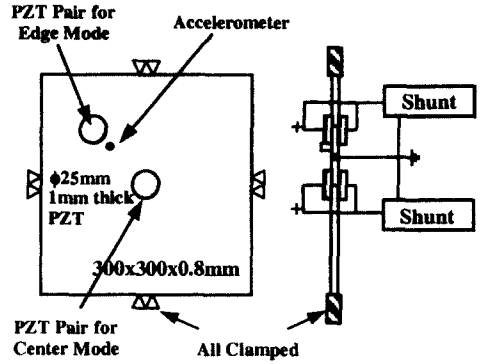


Fig.3 A schematic diagram of smart panel using piezo-damping

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

이므로, 두 에너지의 비는 다음 식과 같다.

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

식(7)은 최적설계를 위한 목적함수로서 선트회로와 관련된 변수를 제외하고는 모두 계산되어지는 값이므로 다음과 같은 식에 의하여 에너지비가 최대가 되는 선트 파라미터들을 결정할 수 있다.

$$\operatorname{Max} \left[\frac{J}{R} \right] \quad (8)$$

최대 손실에너지를 이용하는 방법을 적용하기 위해서는 구조물과 압전재료를 나타내는 전기 임피던스모델의 계수를 구하여야 한다. 그러나 이론적으로는 임의의 형태를 갖는 구조물들에 대하여 계수를 구하기가 쉽지 않다. 따라서, 압전재료의 공진주파수에서 특성을 나타내는 모델을 사용하여 구조물과 압전재료를 나타내고 이 모델에 필요한 계수들은 임피던스 측정실험으로부터 구하였다. 여기에는 Van Dyke 모델과 Complex 모델이 있으며, 이 모델의 계수들은 임피던스 측정기(impedance analyzer)와 압전재료 해석 프로그램(Piezoelectric Re

Table 1 Electric parameters of the smart panel

Mode(Hz)		DEM	
		Van Dyke	Complex
Center 436.7	C_0	$9.708e-9$	$9.708e-9 - j3.641e-11$
	C_1	$2.214e-12$	$1.353e-12 - j5.369e-14$
	R_1	$1.596e6$	
	L_1	$5.999e4$	$8.490e4 - j3.610e3$
Edge 574.1	C_0	$9.614e-9$	$9.614e-9 - j4.216e-11$
	C_1	$2.243e-12$	$2.914e-13 - j7.47e-14$
	R_1	$4.154e6$	
	L_1	$3.430e4$	$2.478e5 + j6.032e4$

Table 2 Optimal parameters of the shunt system

Mode(Hz)		DEM		MVAM
		Van Dyke	Complex	
Center	R_2	896.7	780.0	6957
	L_2	13.66	13.62	13.36
Edge	R_2	716.2	202.7	6178
	L_2	8.01	7.974	7.908

-sonance Analysis Program, PRAP)을 이용하여 구하였다(12).

Table 1, 2는 Fig.3과 같은 시스템에 대하여 PRAP을 이용하여 구한 Van Dyke 모델과 Complex 모델의 전기적 파라미터와 파라미터 튜닝에 의한 선풔회로의 최적의 L, R 을 나타내고 있다. Fig.4, 5는 파라미터 튜닝한 결과를 적용하여 시뮬레이션한 결과를 나타내고 있다.

3. 실험 장치 및 방법

압전 지능패널의 전달 소음저감 성능을 실험하기 위하여 음향 터널을 설계, 제작하였다(13). Fig.6은 제작된 음향 터널을 나타내는 개략도이다. Fig.7은 음향 터널에서의 음향 특성을 나타내는 그림으로 음향 터널의 길이방향의 8개 단면에서 측정된 평균 음압을 나타내고 있다. 실험 결과로부터 본 실험에서는 평면파 특성을 나타내는 800Hz까지 적용하였다. 음향 터널내부에는 반사를 막기 위하여 흡음재를 부착하였으며, 끝 부분에는 무 반향 막음(anechoic terminator)을 설치하여 터널 공진에

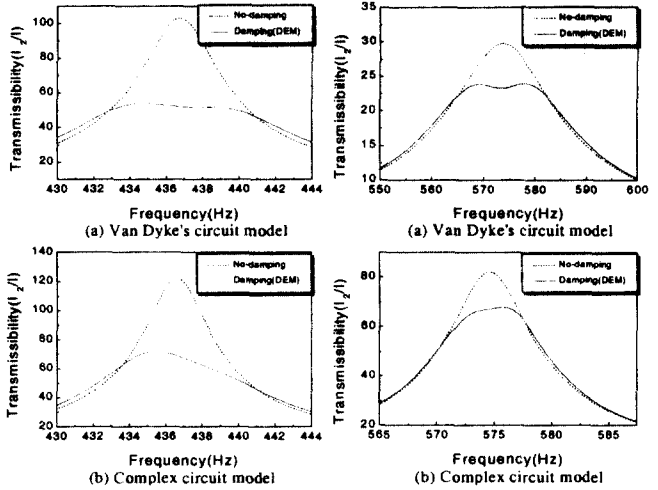


Fig.4 Transmissibility for center mode

Fig.5 Transmissibility for edge mode

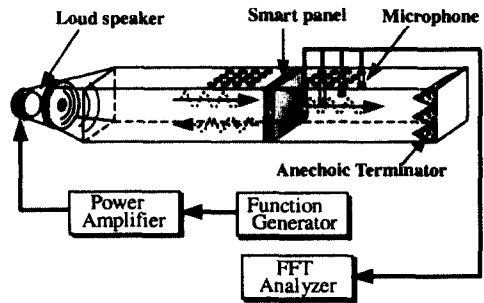


Fig.6 A schematic diagram of the experimental apparatus for the smart panels

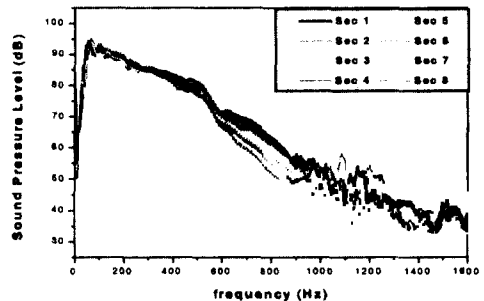


Fig.7 Measured sound pressure at each section

의한 굴곡을 제거하였다.

3.1 수동/능동적 실험 방법

압전 지능패널은 0.8mm 두께의 알루미늄 평판의 중앙부위에 직사각형의 작동기를 부착하고 우측상단에 원형 감지기를 부착하였다. 또한 지능패널에 부착된 흡음재는 15mm 두께의 우레탄 폼을 사용하였으며, 이중 지능패널의 공기층은 10mm 간격을 유지하도록 제작하였다.

압전 지능패널은 아크릴 프레임과 나사를 사용하여 하부 음향 터널에 완전 고정시켰다. 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. 압전재료를 이용한 능동소음제어는 Fig.1 에서와 같이 감지기의 신호를 OP Amp.를 이용한 반전 회로(Inverter circuit)를 통하여 적절한 부 이득값을 얻고, 다시 전압 증폭기(voltage amplifier)를 거쳐 압전 작동기에 인가하여 제어를 수행하였다. 압전 지능패널의 소음저감 성능을 비교하기 위하여 단일 평판, 흡음재가 부착된 지능패널 그리고 공기층을 갖는 이중 지능패널을 차례로 음향 터널에 장착하여 실험을 수행하였다.

3.2 압전감쇠를 이용한 지능패널의 실험 방법

최적값으로 얻어진 인덕턴스는 Table 2 에서 보듯이 현실적으로는 구현할 수 없는 큰 값이기 때문에 가변저항 값에 비례하는 등가의 인덕턴스를 만들어 내는 합성 인덕터(synthetic inductor)를 사용한다⁽⁴⁾. 실험에 사용된 압전 지능패널은 Fig.3 과 같이 제작하였다. 0.8mm 두께의 알루미늄 평판에 각 모드에 대하여 압전감쇠를 부여할 수 있도록 두 개의 원판형 압전소자를 평판의 아래 위에 쌍(pair)으로 붙였다. 경계조건과 가진조건을 만족시키기 위하여 수동/능동적 실험에서 사용한 장치를

이용하였다. 압전 지능패널의 전기적 임피던스 모델의 변수를 결정하기 위하여 HP4192A 임피던스 측정기를 이용하여 전기적 임피던스를 측정하였으며, 지능패널의 주파수 응답곡선에서 얻어진 공진 모드와 일치하는 모드를 목표 모드로 설정하고 목표 모드에 영향을 많이 미치는 압전소자에 선택시켰다.

실험에 사용된 회로는 제어하려는 모드 수량만큼의 공진회로를 구성하여 각각 연결하였다. 그리고 평판에 가속도계를 부착하여 평판의 거동을 감지하여 발생한 신호를 신호분석기를 사용하여 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 수동/능동적 방법을 혼용한 지능패널

Fig.8 은 수동적 방법에 의한 실험 결과로 압전 단일 평판과 지능패널의 소음저감 성능을 나타내고 있다. 압전 단일 평판에 비하여 제안된 지능패널이 음향 터널의 공진주파수 대역을 포함한 넓은 주파수 범위에서 좋은 소음저감 성능을 나타내고 있다. 또한 Fig.9 는 공기층을 갖는 이중 지능패널의 성능실험 결과로 지능패널과 같이 넓은 주파수 범위에서 좋은 저감효과를 나타내고 있다. 그러나 이중 패널의 경우는 중주파수 대역에서 공기층의 맥동등의 영향을 나타내며, 음향 터널의 공진주파수 대역인 650Hz 에서는 공진현상이 발생함을 알 수 있다.

Fig.10 은 지능패널의 첫 번째 공진주파수 88Hz, Fig.11 은 이중 지능패널의 첫번째 공진주파수인 92Hz 에서의 능동제어 실험결과로, 음압, 감지기 신호, 작동기 신호를 시간에 대하여 나타내었다. Fig.12 는 능동제어 실험 결과를 측정한 음압(dB)으로 표기한 것으로 지능패널은 13dB, 이중 지능패널은 6dB 의 음압 감소가 있었다.

4.2 압전감쇠를 이용한 지능패널

제작한 압전 지능패널의 전기적 임피던스모델에 적용할 변수를 결정하기 위하여 전기적 임피던스

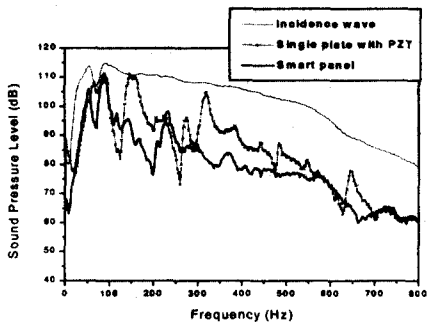


Fig.8 Comparison of measured sound pressure level with passive method (smart panel)

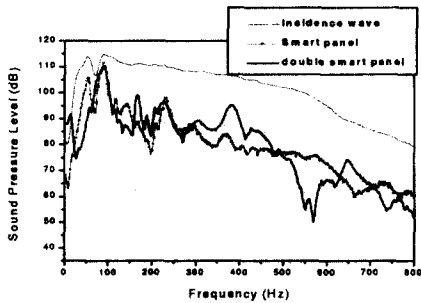


Fig.9 Comparison of measured sound pressure level with passive method (double smart panel)

를 측정하였다. 측정된 임피던스는 Fig.13에 나타낸 것과 같으며 평판의 주파수 응답곡선에서 얻어진 공진 모드와 일치하는 모드, 즉 436.7Hz와 574.1Hz를 목표 모드로 설정하여 중앙의 압전소자로 436.7Hz의 공진을, 그리고 모서리의 압전소자로 574.1Hz의 공진을 선택시켰다.

먼저 436.7Hz의 중앙 모드만을 고려한 압전감쇠 실험결과, 6dB 정도의 감쇠효과를 얻었으며 574.1Hz의 모서리 모드만을 고려한 결과, 10dB 정도의 감쇠효과를 얻을 수 있었다. 두 개 모드를 동시에 고려한 결과, 중앙 모드에서 7dB, 모서리 모드에서 10dB의 감쇠효과를 얻었으며 이들은 각각 Fig.14, 15, 16에 나타내었다.

5. 결론

새로운 개념의 압전 지능패널을 제안하였다. 실험을 통하여 수동/능동적 방법을 혼용한 패널의 경우 수동적 방법으로 중, 고주파영역에서 능동제어 방법에 의해 저주파 공진주파수에서 소음저감

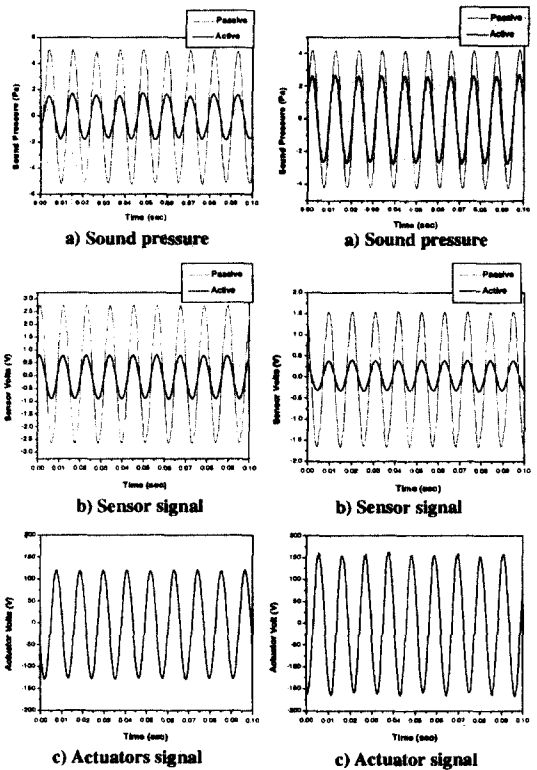


Fig.10 Active control results of smart panel at 88Hz Fig.11 Active control results of double smart panel at 92Hz

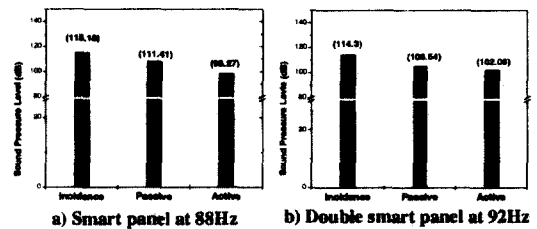


Fig.12 Comparison of sound pressure level with active control

성능을 확인하였다. 또한 간단한 선트회로를 이용하여 목표 모드에서의 압전감쇠에 의한 소음저감 성능을 확인하였다. 따라서, 이러한 지능패널의 개발을 통하여 넓은 주파수 범위에서 소음저감이 가능하며 경제적 측면에서도 큰 절감효과를 얻을 수 있다.

참고 문헌

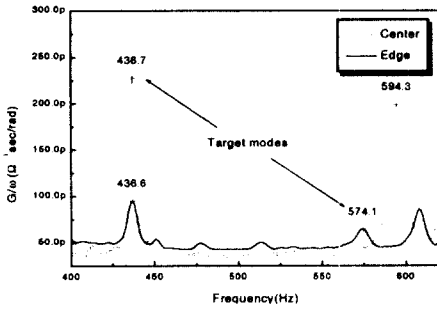


Fig.13 Measured impedance of smart panel; center mode(436.7Hz), edge mode(574.1Hz)

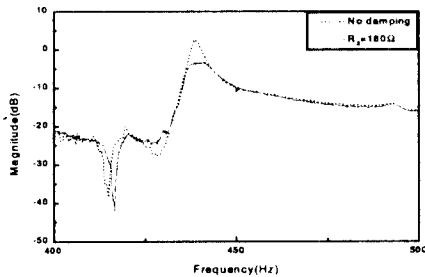


Fig.14 Experimental result for smart panel using PZT damping at the center mode

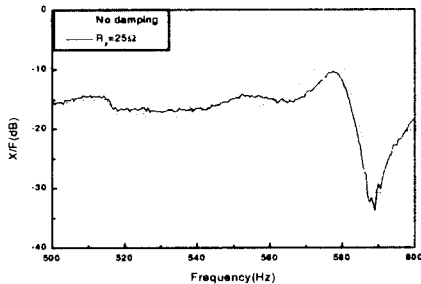


Fig.15 Experimental result for smart panel using PZT damping at the edge mode

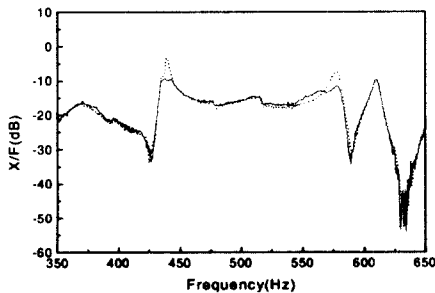


Fig.16 Experimental result for smart panel using PZT damping(both mode)

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. Acoust. 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. H.H. Law, "Characterization of Mechanical Vibration Damping by Piezoelectric Materials", *J. of Sound and Vibration*, Vol. 197(4), pp. 489~513, 1996.
7. J. P. Den Hartog, "Mechanical Vibrations", *McGraw-Hill*, 1956.
8. 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.
9. 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.
10. Y. Ryu, J. Kim, and C. Cheong, "Piezoelectric Shunting Parameter Estimation Using Electrical Impedance Models", *SPIE, Mathematics and control in smart structures*, 2000, (in pressing)
11. Ralph J. Smith, "Circuits, Devices, and Systems", *John Wiley & Sons*, 1966.
12. Eric M. Flint and Craig A. Rogers, "Electro-Dynamic Transduction Equations for Piezoelectric Stack Actuators", *Adaptive Structures and Composite Materials: Analysis and Application*, ASME, AD-Vol. 45/MD-Vol. 54, pp. 201~210, 1994
13. ASTM E1050-86, "Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones, and a digital frequency analysis system"
14. Chen, W.K., "Passive and Active Filters", *New York, John Wiley and Sons, Inc.*, 1986.