

수동/능동적 방법을 혼용한 압전지능패널의 광대역 전달 소음저감성능

이 중 근* · 박 우 철**

Transmitted Noise Reduction of Piezoelectric Smart Panels using Passive/Active Method in Wide Range Frequency

Joong Kuen Lee* and Woo Chul Park**

요약 압전재료를 이용한 지능패널의 전달음 저감성능을 실험적으로 연구하였다. 제안된 압전지능패널은 압전 감지기와 작동기가 부착되어 있는 주구조물에 흡음재가 한 측면에 부착된 구조이다. 이는 저주파에서 능동적 방법과 고주파에서 수동적방법을 혼용한 개념이다. 이 개념을 증명하기 위하여 음향실험을 수행하였다. 음향실험을 위하여 음향터널을 설계, 제작하여 음향특성을 실험하였다. 음향 특성실험을 통하여 800 Hz까지 평면파특성을 나타내었다. 단일패널에 흡음재를 부착한 지능패널은 첫번째 공진주파수영역을 제외한 중주파수영역에서 뚜렷한 소음저감성능을 나타내었다. 첫번째 공진주파수에 대하여 반전회로를 이용한 능동제어를 수행하여 약 10 dB소음저감은 이루었다. 또한, 공기층을 갖는 이중지능패널에 대한 실험을 통하여 공진주파수에서 뿐만 아니라 넓은 영역에서 좋은 소음저감성능을 보였다. 수동적 방법과 능동적 방법을 혼용한 압전지능패널은 넓은 주파수 영역에서의 소음저감대책으로 유망한 기술이다.

Abstract In this paper, the transmitted noise reduction performance of piezoelectric smart panels is experimentally studied. The proposed piezoelectric smart panels are comprised of plate structure on which piezoelectric sensor/actuators are bonded and sound absorbing material is provided. It is a combination of passive and active approaches utilizing a passive effect at high frequencies and an active effect at low frequencies. To prove the concept of piezoelectric smart panels, an acoustic measurement experiment is performed. An acoustic tunnel is designed and its acoustic characteristics are tested. Below 800Hz, the tunnel exhibits a plane wave guide characteristics. When an absorbing material is bonded on a single plate, a remarkable transmitted noise reduction in mid frequency range is observed except the first resonance frequency. By enabling the active control of single smart panel with negative feedback control, about 10dB noise reduction is achieved at the resonance frequencies. The double smart panel got 4dB at the first resonance frequency and has more potential to reduce the transmitted noise in a wide range frequency. Piezoelectric smart panels incorporating passive absorbing material and active piezoelectric devices is a promising technology for noise reduction in a wide range frequency.

Key Words : Piezoelectric smart panels, Sound absorbing material, Wide range noise reduction.

1. 서 론

산업이 발전하고 삶의 질이 향상되면서 주변 환경과 편의에 대한 관심이 높아지게 되었다. 소외된 분야로 취급되던 환경 문제, 특히 각종 소음과 구조물의 진동에 수반되는 문제들이 공학에서 주 관심 분야로 대두되었다. 최근 구조물 및 시스템의 소형화, 경량화 추세에 따

라 구조물의 진동과 이에 따른 소음 문제가 많이 발생되고 있다. 이러한 구조물의 진동에 의한 소음을 해석하고 이를 효율적으로 억제하는 것이 공학분야에서 매우 중요한 위치를 차지하게 되었다. 구조물의 진동에 의해 발생하는 소음의 억제를 위해서 일반적으로 사용하는 방법은 크게 수동적인 방법(passive control)과 능동적인 방법(active control)으로 나눌 수 있다. 수동적인 방법은 구조물에 질량이나 강성을 추가하는 방법으로, 고주파 영역에서는 효과적이거나 낮은 주파수 영역에서는 시스템이 커지고 무거워지는 단점이 있다. 이에 반해, 능

*주)NSV 기술연구소 책임연구원

**삼척대학교 자동차공학과

본 논문은 수동적방법과 능동적방법을 혼용한 차음패널에 대한 연구결과이다. 그 핵심 내용은 압전재료에 부이득을 피먹임하는 제어방법에 흡음재료를 부가하여 넓은 주파수에서 소음저감을 이루는 것이다. 이 연구결과는 경제적이며 고성능의 패널개발에 활용될 계획이다. (Tel: 032-816-7992)

동적인 방법은 제어기와 작동기를 이용하여 음장을 억제하는 방법으로 저주파 영역에서 매우 큰 효력을 발휘한다. 능동소음제어 기법에는 스피커 등의 부가적인 음원을 이용하여 음장을 억제하는 방법(active noise control)과 소음의 원인이 되는 구조물에 직접 제어 입력을 인가함으로써 구조물의 거동을 제어하여 음장을 억제하는 방법(active structural acoustic control) 등이 있다[1]. 근래 능동제어의 일환으로 구조물의 기능을 향상시키고 기대하지 않았던 외란에 안정적인 작동을 유지하도록 구조물에 지능성(intelligence)을 부여하고자 하는 시도가 매우 활발히 진행되고 있다. 지능구조물은 주변 환경의 변화를 감지하고 이에 대처하는데 필요한 응답을 하는 구조물로서 응용분야는 매우 넓고 그 영향은 매우 크며 특히 소음저감 분야에 많은 관심이 모아지고 있다[2-4].

본 연구는 지능구조물을 이용하여 소음원의 전달 경로를 차단하는 압전지능패널에 대한 연구를 수행하였다. 압전지능패널은 광대역 소음저감을 위하여 수동적 방법과 능동적 방법이 통합된 구조를 이루고 있다. 이는 일종의 차음재 개념으로 압전재료를 부착한 평판에 흡음재를 부가한 형태로 흡음제에 의한 고주파 영역에서 수동적 소음 저감과 저주파의 특정 주파수, 즉 구조물의 공진주파수에서의 능동제어를 구현할 수 있다. 이러한 압전지능패널의 차음 성능을 확인하기 위하여 실제 흡음특성을 측정하는 인피던스 관을 응용한 실험용 음향터널을 제작하고 음향터널의 유향 성능을 평가하였다[5]. 평판 구조물에서의 음향 제어를 위하여 방사 음향에 가장 영향이 큰 첫번째 공진 주파수와 비공진 주파수를 제어 대상으로 정하였다. 제어입력은 감지기에서 받은 신호를 적절한 부 이득(negative feedback gain)을 거쳐 작동기에 인가 하였다[6].

2. 압전지능패널

2.1. 압전지능패널

패널의 일반적인 차음 특성은 주파수에 따라서 세 영역으로 나눌 수 있다[7]. 첫번째 패널 구조물의 공진이 발생하는 저주파영역을 강성 외존구역(stiffness-controlled region)이라고 한다. 이 구역에서는 공진현상이 발생하면 투과손실이 저하되어 기의 0에 가깝게 되어 입사된 음파는 거의 모두 투과된다. 이 영역에서는 재료에 감쇠를 증가시키면 투과손실의 깊은 골을 줄여서 차음 성능을 향상시킬 수 있다. 그러나 감쇠를 증가시키기 위하여 점탄성 재료를 사용하게 되면 중량이 증가하여 패널이

무거워지는 단점이 있으나 압전 구조물의 능동감쇠나 압전감쇠를 사용한다면 경량화하면서도 투과손실의 저하를 공진주파수에서 막을 수 있는 장점이 있다. 강성의존지역을 지나면 질량 외존지역이 된다. 이 주파수대역에서는 패널의 밀도 또는 주파수가 2배 증가함에 따라 투과손실은 6배가 증가하게 된다. 그러나 질량법칙은 실질적으로 적용할 수 있는 주파수영역에 한계를 가지고 있다. 저주파영역에서는 차음벽의 강성과 고유 진동 때문에 질량법칙을 만족하지 못하나 흡음제 등을 사용하면 중 주파수대역에서는 효과적으로 투과손실을 높일 수 있다. 또한 질량을 높이는 방법에 한계가 있으므로 공기 층을 이용하는 이중패널을 이용하기도 한다. 이중 패널은 두 패널에 의한 질량효과와 중간층을 구성하는 공기에 의한 완충 등에 의해서 기대이상의 효과를 얻을 수 있다[8]. 세번째로 질량 외존영역을 지나면 한계 주파수영역(critical-frequency region)이 된다. 이 영역의 일치주파수(coincidence frequency)에서는 차음벽의 투과손실이 강성 외존지역의 공진점에서 발생하는 현상과 같이 감소하는 현상이 발생한다. 평면 입사파와 굴곡 진동을 수반하는 굽힘파(bending wave)가 일치되어 공진현상과 같이 작용하기 때문이다. 이를 일치효과(coincidence effect)라 한다. 일치효과를 일으키는 한계 주파수는 차음벽의 두께와 반비례하는 관계로 두께가 두꺼워지면 한계주파수가 중저주파영역까지 낮아져 이 주파수 대역에서의 투과손실을 저하시키기도 한다. 압전지능패널은 수동적인 방법으로 고주파 영역에서 흡음재를 이용하여 소음을 저감시킬 수 있고 능동적인 방법으로 저주파 영역, 특히 공진 주파수에서 압전 작동기와 압전 감지기를 이용하여 소음을 저감시킬 수 있다.

Figure 1은 지능패널의 개략도를 나타내고 있다. 수동적 개념으로 중, 고주파영역의 소음저감을 위하여 알루미늄 평판에 흡음재를 부착하고 저주파영역에서는 압전 작동기와 감지기를 사용한다. 복잡한 제어기 대신에 압전 감지기의 신호를 반전(negative feedback)하여 압전 가진기에 부여하는 제어기를 사용하였다.

2.2. 압전지능패널의 설계

앞에서 제안한 지능패널의 소음저감성능을 증명하기 위하여 압전단일패널, 압전지능패널 그리고 압전이중패널을 제작하였다. 기본 평판은 두께 0.8 mm, 단면 340 mm×340 mm의 알루미늄판을 사용하고 우측 상단과 중앙 부위에 압전소자를 부착한 구조로 되어있다. 이를 압전단일패널이라 하고 이에 흡음재를 부착한 지능패널은 가로, 세로 각각 300 mm이고 두께가 15 mm인 폴리우레탄폼(polyurethane foam, 밀도 100 kg/m³, 한국켈

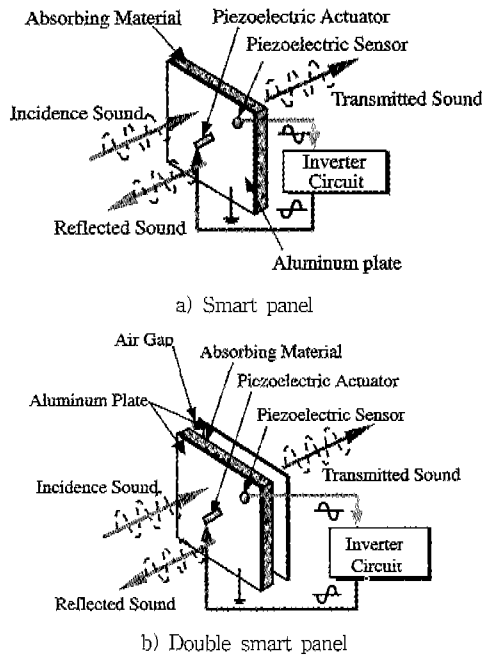


Figure 1. Schematic diagram of proposed piezoelectric smart panels.

저 사)을 부착하여 제작하였다.

실험에 사용된 압전소자로 작동기는 가로, 세로가 각각 60 mm, 25 mm이고 두께는 1 mm이다. 감지기는 직경이 25 mm이고 두께가 1 mm인 원판형을 사용하였다. 압전 작동기의 부착위치는 일반적인 평판의 방사음향이 가장 큰 (1,1)모드와 (1,3)모드에 중점을 두어 모달 감도가 가장 큰 가운데 지점에 위치시켰고 압전 감지기는 여러 모드를 고려하여 우측 상단에 위치시켰다. 이중패널은 지능패널과 기본 평판사이에 10 mm 두께의 공기층을 만든 것으로 앞의 경우와 동일조건이나 지능패널에만 압전소자를 부착하고 다른 쪽에는 압전소자가 부착되지 않은 알루미늄판을 사용하여 공기층을 만든 구조이다.

감지기의 신호를 반전 회로(Inverter circuit)를 통하여 적절한 부 이득값(negative gain)을 얻고, 다시 진압 증폭기(voltage amplifier)를 거쳐 압전 작동기에 인가하여 제어할 수 행 하였다.

3. 음향 실험 장치

압전지능패널의 소음저감성능을 확인하기 위해서는 넓은 주파수영역에서 측정할 수 있어야 한다.

일반적으로 부과손실의 측정은 두 관향실 사이에 패널을 놓고 측정하는 ASTM E90을 기준으로 사용하나

이러한 장치를 제작하는데 비용이 많이 드는 관계로 간단하게 측정할 수 있는 장치를 고안하였다.

Figure 2에 제작하고자 하는 음향터널의 개념을 나타내었다. 그림에서와 같이 스피커에서 발생하는 음원이 음향터널을 통하여 시편을 가진하게 되며 투과된 음원을 마이크로폰을 사용하여 음압으로 측정하는 시스템이다. 음향터널의 기본요건은 ASTM의 규격에 준하여 설계하였다[5]. Figure 3 a) 는 실제 제작하여 음향터널에 부착한 패널의 사진이다.

음향터널의 단면은 내부 공간이 일정하고 저주파대역에서 사용 조건을 만족하는 340 mm×340 mm의 정사각형단면으로 제작하였다. 음향터널은 시편을 설치할 수 있게 하기 위하여 정사각단면의 길이 2 m인 상, 하부 터널 두 개를 연결하는 구조이며, 시편들은 상, 하부 터널 사이에 설치되어 4면이 완전 고정 조건을 충족하도록 하였다. 패널이 고정된 하부 터널은 상부 터널과 체결되어 가진된 음압이 외부로 유출되지 않도록 하였다. 또한 음향터널의 경계면이 강제조건을 만족시키기 위하여 두께 4.5 mm의 철판을 용접한 구조로 하였다. 터널 내부에는 내부 표면에서 가진된 음압의 반사에 의한 영향을 줄이기 위하여 20 mm 두께의 흡음재를 부착하였다. 스피커 등 외부로부터의 진동을 절연하기 위하여 구조물을 지지하는 바닥면에 고무 마운트를 설치하였으며, 스피커 등과 연결되는 곳에는 고무패드를 삽입하여 방진하였다. 스피커와 연결되는 부위는 연결판을 사용하여 스피커에서 발생하는 소음원이 짧은 거리에서 평면파가 될 수 있게 하였다. 음향터널의 상, 하부 터널의 상면에 측정용 마이크로폰을 고정할 수 있도록 상, 하부 터널의 길이 방향으로 각각 4개 지점, 단면의 폭 방향으로 4개 지점, 총 32개 지점에 구멍을 가공하였다. Figure 3b)는 음향터널 및 실험장치의 사진이다.

Figure 4은 부 반사단 막음(anechoic terminaor)의 유, 무에 따른 영향을 나타내고 있다. 무 반향 막음을 부착함으로써 저주파 대역에서 터널의 끝에서 반사되는 음을 제거할 수 있다.

스피커에서 발생하는 소음원이 음향터널내부에서 형성하는 음압의 분포를 측정하였다. 음압은 시편을 기준으로 상, 하부 터널의 윗면에 폭 방향으로 4개의 측정지점을 갖는 단면을 각각 4개씩 만들고 60 mm 간격으로 깊이를 조절하여 총128개 지점에서 음압을 측정하였으며, 각 단면에서 측정한 음압을 평균하여 Figure 5에 나타내었다. 측정결과에서 800 Hz이하 주파수에서는 각 단면에서의 음압 분포는 거의 일정하게 나타남을 알 수 있으나 800 Hz 이상에서는 터널의 단면에 따른 압력 차이에 기인한 굴곡현상이 발생하였다.

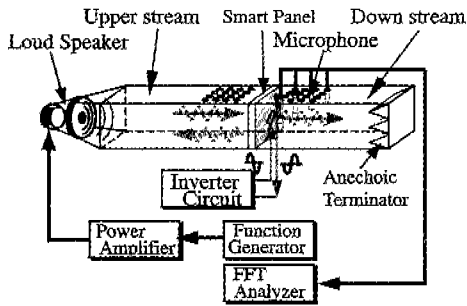
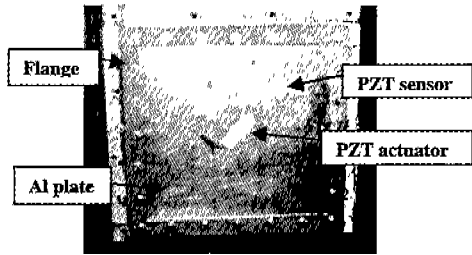
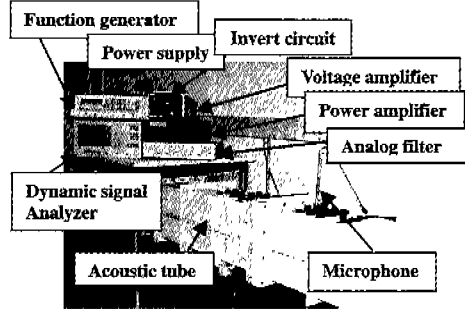


Figure 2. Schematic diagram of experimental apparatus.



a) The smart panel with fixed boundary condition



b) The experimental apparatus

Figure 3. Photograph of the smart panel and experimental apparatus.

이와 같이 지능패널의 음향실험을 위한 실험 장치를 설계, 제작하였고 음향적 특성을 검증하는 실험을 수행하였다. 그 결과 800 Hz까지는 평면파라는 가정하에 간단하게 마이크로폰으로 투과음 및 반사음을 측정할 수 있음을 확인하였으며 그 이상의 주파수에서는 측면 모드들의 영향에 의하여 단면 한 지점의 음압이 아니라 그 단면에서의 음향 파워를 측정하여야 정확한 음의 투과와 반사를 구할 수 있다.

4. 실험 결과

압전지능패널의 소음저감성능 실험은 제작된 음향터널에 각 패널을 장착하고 수행하였다. 스피커는 신호발

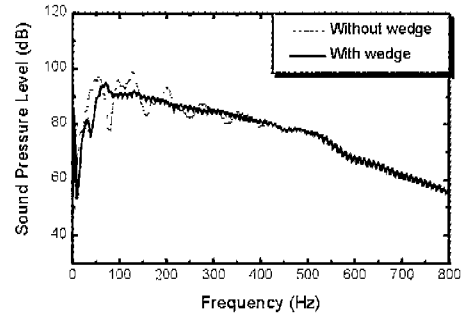


Figure 4. Effect of the anechoic terminator.

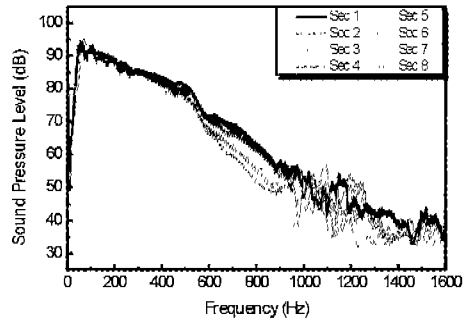


Figure 5. Measured sound pressure level at each section.

생기로부터 나온 신호를 증폭기를 거쳐 발생된 음향 평면파가 소음원으로 평판 위에 작용하도록 하였다. 패널을 투과한 유압은 음향터널 내부에 설치한 마이크로폰을 통하여 나온 신호를 주파수 분석기로 측정하였다. 압전제료를 이용한 소음제어는 감지기의 신호를 OP회로를 이용한 반전회로를 통하여 직렬한 부 이득값을 얻고, 다시 전압 증폭기를 거쳐 압전 작동기에 인가하여 제어를 수행하였다.

4.1. 수동적 방법에 의한 소음저감성능

단일패널과 흡음재가 부착된 지능패널의 주파수 응답을 Figure 6에 나타내었다. 실험 결과 단일패널인 경우, 첫번째 공진 주파수는 86 Hz, 두 번째 공진 주파수는 296 Hz이며 흡음재가 부착된 지능패널인 경우에는 84 Hz와 224 Hz에서 각각 공진주파수가 나타났다. 흡음재료가 부착된 지능패널의 두번째 공진 주파수가 약간 낮아진 것은 흡음재료의 질량효과 때문이다. 단일패널에 흡음재를 부착할 경우 패널의 공진 주파수를 포함한 넓은 주파수 영역에서 음압 감소 효과를 확인할 수 있다. 그러나 저주파 영역인 첫번째 공진주파수에서는 음압 감소 효과가 미미하게 나타났다. 공기층에 의한 소음저감성능을 확인하기 위하여 Figure 2(b)에서와 같이 흡음재가 부착된 지능패널과 단일 평판 사이에 10 mm의

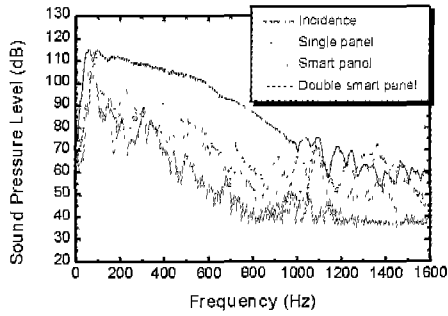


Figure 6. Transmitted sound pressure of smart panels.

공기층을 포함하는 이중페닐을 제작하여 실험하였다. Figure 6에 나타난 것과 같이 첫번째 공진주파수를 포함한 넓은 주파수 범위에서 팔복할 만한 소음 감소 효과를 확인할 수 있었다. 이것은 적절한 공기층을 두어 매질간의 임피던스 차를 이용함으로써 흡음재료의 무게를 변화시키지 않고도 흡음율을 향상시킬 수 있음을 보인 것이다.

4.2. 능동적 방법에 의한 소음저감성능

단일페닐에 흡음재료를 부착한 경우 공진 주파수를 제외하고 광대역 주파수 영역에서 소음 저감 효과를 확인할 수 있었다. 그러나 음향 방사는 대부분 첫번째 공

진 주파수인 (1,1) 모드에서 일어나기 때문에 방사되는 소음을 저감시키기 위해서는 공진 주파수에서의 진동 제어가 필수적이다.

본 연구에서는 페닐들의 첫번째 공진주파수에 대한 압전 감지기과 작동기를 이용하여 제어를 수행하였다. 감지기는 여러모드를 고려하여 우측 상단(225 mm, 225 mm)에 부착시켰고, 작동기는 내장 진동 모드의 모달강도가 좋은 평판의 가운데(150 mm, 150 mm)에 부착시켰다.

작동기의 제어 입력은 감지기 신호를 적절한 반전을 거쳐 저주파 대역 통과 필터를 통하여 인가하였다. 제어는 정현파 가진시 단일 모드에서 수행되었고 각 모드에서의 음압, 감지기의 신호, 작동기의 입력 전압을 시간에 따라 나타내었다. Figure 7, 9는 단일페닐과 지능페닐에 대한 실험 결과로 첫번째 공진 주파수에서 마이크로폰에서 측정된 신호를 음압으로 환산하면 수동적인 방법 보다 약 11 dB, 10 dB의 음압이 감소되었다. 또한 비공진 주파수에서의 소음 저감 효과를 알아 보기 위하여 단일페닐과 흡음재가 부착된 지능페닐의 비공진 주파수인 260 Hz와 175 Hz로 가진 하였을 때 제어성능에 대해 실험하였다. Figure 8, 10는 이에 대한 결과를 나타내는 것으로 비공진 주파수인 260 Hz와 175 Hz에서 각각 5 dB와 3 dB의 음압 감소를 확인할 수 있었다.

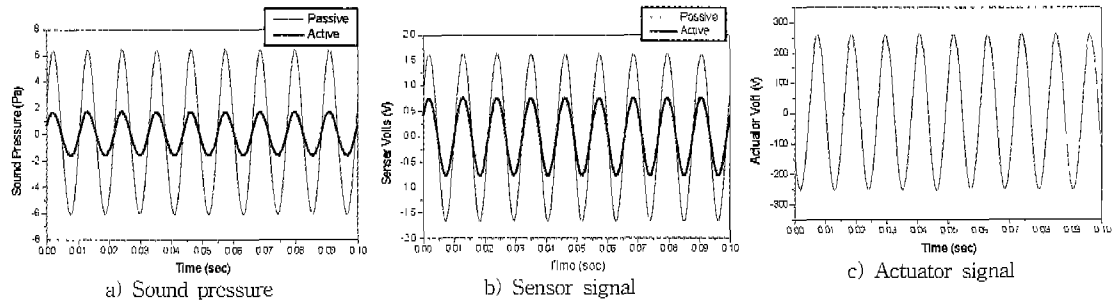


Figure 7. Active control results of single panel at 86 Hz.

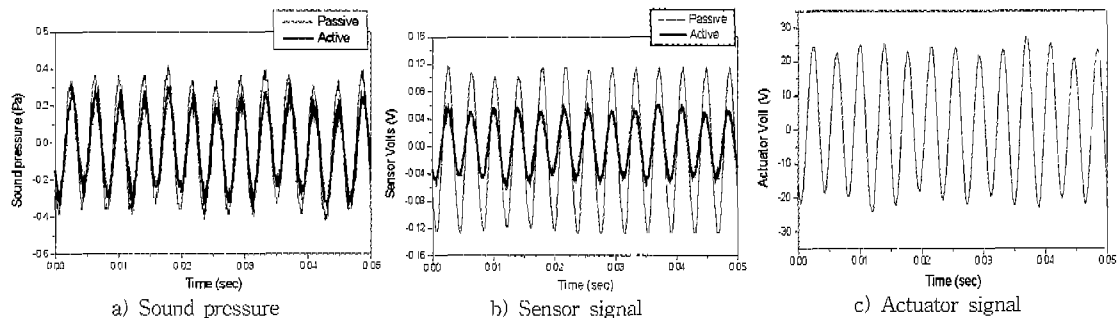


Figure 8. Active control results of single panel at 260 Hz.

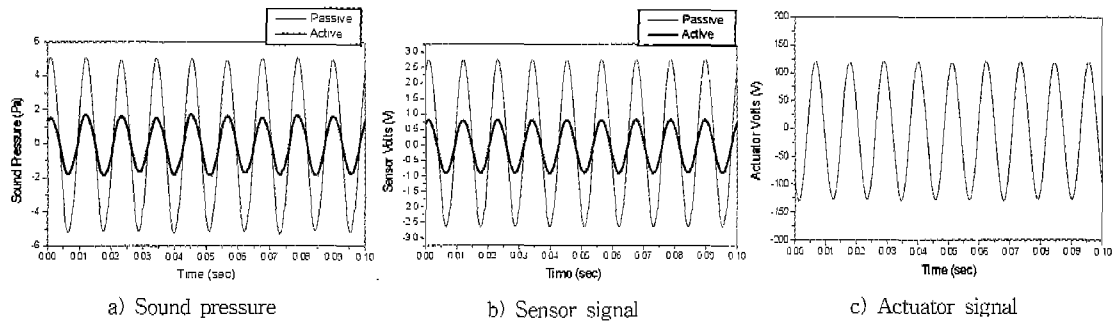


Figure 9. Active control results of smart panel at 84 Hz.

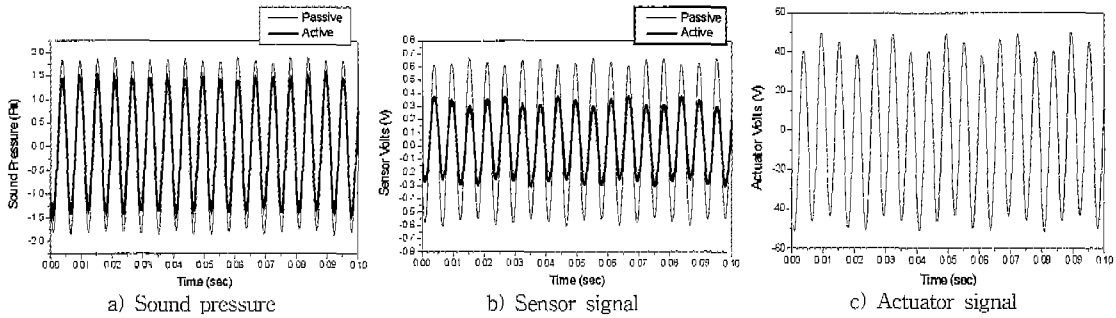


Figure 10. Active control of smart panel 175 Hz.

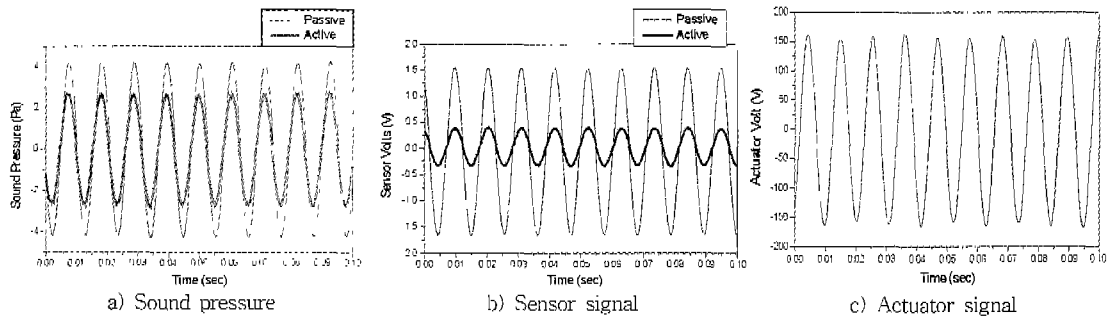


Figure 11. Active control results of double smart panel at 84 Hz.

Figure 11은 공기층을 갖는 이중지능패널의 실험결과를 나타내고 있다. 첫 번째 공진주파수 84 Hz에서의 능동제어 실험결과, 음압은 약 4 dB 정도 감소하였다. 비공진주파수 132 Hz에서 측정된 결과는 Figure 12에 나타내었으며, 측정 음압은 약 1.2 dB의 음압 감소를 보였다. 이와 같이 압전지능패널을 사용할 경우 공진주파수에서도 우수한 소음 저감 효과가 있음을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 광대역 주파수 영역에서 소음 저감을

위하여 압전지능패널을 제안하였으며 소음저감성능을 평가하기 위하여 단일패널, 흡음재가 부착된 지능패널과 공기층을 갖는 이중패널에 대한 실험을 수행하였다.

실험 결과 단일패널에 흡음재를 부착한 지능패널은 고주파 영역에서 확실한 소음저감성능을 확인할 수 있었다. 그러나 저주파 영역인 첫번째 공진 주파수에서는 소음 저감이 크게 발생하지 않았다. 저주파 영역에서의 소음을 저감시키기 위하여 압전 감지기와 작동기를 부착하여 능동소음제어를 수행하였다. 제어 입력은 감지기의 신호에 적절한 부이득을 취하여 작동기에 인가하였으며 제어는 단일 모드에서 수행되었다. 그 결과 공진

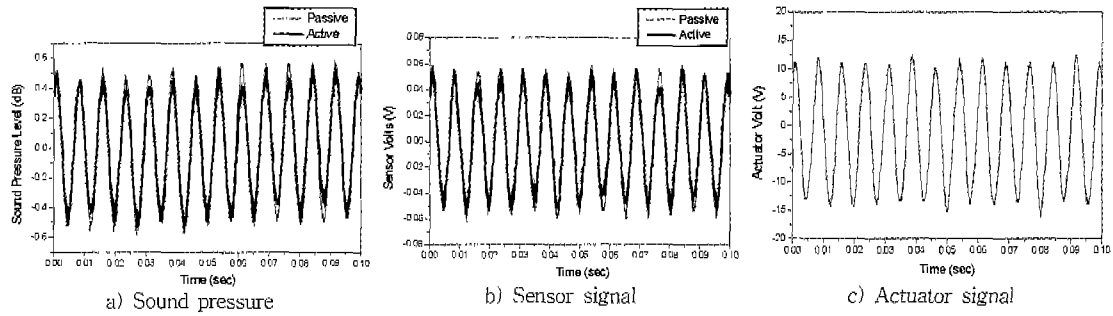


Figure 12. Active control results of double smart panel at 132 Hz.

주파수에서 음압 감소 효과를 확인할 수 있었다.

본 연구의 목적인 광대역에서의 소음저감을 위하여 지능패널을 이용한 능동적 방법에 의한 소음저감성능을 실험을 통해 고찰하였다. 실험 결과 지능패널의 첫번째 공진주파수에서는 약 10 dB, 공기층을 갖는 이중 지능패널의 경우 4 dB의 음압감소를 확인하였다. 이러한 실험을 통하여 고주파 영역에서는 흡음재료를 이용하여 소음이 저감되었고, 구조물과 연계된 공진주파수에서는 압전재료를 이용하여 넓은 주파수영역에서의 소음저감성능을 확인하였다.

앞으로 단일 모드에서 뿐만 아니라 다중 모드에서도 제어가 가능한 강건 제어를 설계한다면 더 많은 소음저감 효과를 전 주파수 영역에서 기대할 수 있을 것이며 또 다른 압전지능패널의 개념으로 압전재료를 부착한 지능구조물의 전기적 특성과 간단한 공진 회로인 선트회로를 이용하는 방법 등에 관한 연구를 진행할 것이다.

참고 문헌

[1] 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), pp.3313~3320, 1992.
 [2] R. L. Clark and C. R. Fuller, "Optimal Placement of Piezoelectric Actuators and Polyvinylidene

Fluoride Error Sensors in Active Structural Acoustic Control Approaches," *J. Acoust. Soc. Am.*, 92 (3), pp.1521~1533, 1992.

- [3] V. V. Varadan, J. Kim, and V. K. Varadan, "Optimal Placement of Piezoelectric Actuators for Active Noise Control," *AIAA J.*, 35 (3), pp. 526~533, 1997.
 [4] B. T. Wang, E. K. Dimitriadis, and C. R. Fuller, "Active Control of Structurally Radiated Noise Using Multiple Piezoelectric Actuators," in *Proceedings of AIAA SDM Conference*, AIAA Paper 90-1172-CP, Long Beach, CA, 1990.
 [5] L. H. Bell and D.H. Bell, *Industrial Noise Control*, Marcel Dekker Inc., 1994, New York.
 [6] B. Im, J. Kim, and J. Lee, "Active Noise Suppression of Smart Panels Including Piezoelectric Device and Absorbing Materials" *SPJIE, Mathematics and control in smart structures*, Vol. 3668, pp. 524~529, 2000.
 [7] J. D. Irwin and E. R. Graf, "Industrial noise and vibration control," Prentice-Hall, 1979, New Jersey.
 [8] L. L. Beranek and G. A. Work, "Sound Transmission through Multiple Structures Containing Flexible Blankets," *J. Acoust. Soc. Am.*, 21(4), pp. 419~427, 1949.