

# 압전 지능구조물의 원리와 소음제어에의 응용

김 재 환  
(인하대학교 기계공학과)

## 1. 머리말

이 글은 소음 진동 분야에 종사하는 분들에게 압전형 지능구조물을 소개하면서 소음 분야의 응용에 및 활용 가능성 그리고 앞으로의 과제들을 알리고자 한다. 지능구조물이란 감지기(sensor)와 가진기(actuator) 그리고 제어기(control logic)가 구조물에 합해져서 능동적인 기능을 갖고 있는 것으로서 주위 환경의 변화를 감지하여 이에 대처하는 거동을 하는 구조물이다. 예를 들어, 기계적인 지능구조물은 그 위치나 속도 또는 구조물의 강성도나 감쇠 성질을 변화시키는 구조물이다. 따라서 이러한 적응력을 갖춘 구조물은 많은 공학 분야에 큰 영향을 주고 있으며 소음 제어 분야에 있어서도 큰 기대가 된다.

## 2. 압전 지능재료

지능구조물에 쓰이는 지능재료(smart materials)에는 여러 가지가 있겠지만 압전재료(piezoelectric materials)가 많이 쓰인다.

압전재료는 큐리(Curie) 형제가 1880년에 압전 현상을 발견한 이후 한참동안 실용화되지 못했으나 세계 제 1차 대전을 거치면서 잠수함의 위치를 발견하기 위한 음파탐지기의 재료로 쓰이면서 실용적인 연구가 시작되었다. 처음에는 수정결정(quartz crystal)에서 시작하였으나 Rochelle salt를 비롯하여 백여 가지의 강유전성 물질(ferroelectric material)이 발견되었으며 1947년에 베륨 티탄산염( $BaTiO_3$ )이 발견되면서 대부분의 세라믹 형태의 압전재료들이 이것으로 치환되게 되었다.

이 물질은 곧이어 압전효과가 매우 크며 압전세라믹이라고 불리는 PZT(lead zirconate titanate)의 개발로 이어지게 되었다. 압전세라믹은 전기적 기계적

결합성이 매우 좋고 전기적인 안정성과 사용온도가 높은 장점이 있기 때문에 취성이 있는 단점에도 불구하고 많이 사용되어 오고 있다.

또 다른 압전재료로서 1924년에 개발된 폴리머 계통이 있었는데 한동안 관심을 끌지 못하다가 1969년 가와이에 의해 PVDF(polyvinylidene fluoride)가 개발되면서 새로운 전기가 마련되었다. 이 PVDF는 유연성이 있고

가벼우며 음향 임피던스가 낮은 반면에 전기적인 안정성이 나쁘고 사용 온도가 비교적 낮다.

이러한 압전세라믹 그리고 압전폴리머의 개발은 1970년대 까지 폭넓은 압전재료의 연구 및 응용을 불러 일으켰다. 예를 들면 전화기의 송수신기, 로봇 센서와 같은 전기 기계적 감지기나 가진기, 의료 영상, 비파괴 검사 등에 쓰이는 초음파 변환기, Surface Acoustic Wave(SAW)장치, Sonar 등 응용 분야는 매우 넓어졌다.

마침내 1980년대에 들어와서는 지능구조물까지 압전 재료가 이용되게 되었고 지능구조물의 기술을 발전시키는데 이바지하게 되었다. 압전재료가 이렇게 지능구조물에 많이 쓰이는 것은 압전재료에는 직접적인 효과(재료에 기계적인 변형이 주어지면 이에 해당하는 전기적 신호가 발생하는 것)와 반대적인 효과(재료에 전기장이 걸리면 기계적인 변형이 생성되는 것)가 있으며 그 응답속도가 매우 빠르기 때문이다.

## 3. 압전형 지능구조물

압전형 지능구조물이란 압전 감지기와 작동기 그리고 적절한 제어기가 구조물에 합해진 시스템으로서 구조물의 거동을 관측하여 설계된 목적을 위해 변화해 가는 구조물이다. 따라서 지능구조물이 구성되기 위해서는 세가지 요소 즉, 작동기, 가진기, 그

리고 제어기가 필수적이며 매우 중요하다.

### 3.1 작동기

지능구조물의 작동기는 구조물에 분포되어서 구조물을 조절할 수 있는 힘을 낼 수 있어야 한다. 이상적인 작동기는 전기적 신호를 바로 구조물의 변위로 바꿀 수 있어야 한다. 작동기의 주요 작동기구는 작동변형(actuator strain)에 기인한다. 작동변형이란 조절할 수 있는 것으로서 외부 하중에 의해 생기는 것이 아니다. 작동변형은 여러가지에 의해 생성될 수 있는데 전기신호에 의해 발생하는 것에는 압전효과, electrostriction, magnetostriction 등이 있다. 표 1은 이 현상들을 나타내는 재료들의 성질들을 나타내고 있다. 첫번째와 두번째는 압전효과를 갖는 재료이고 세번째는 전기장이 작용하면 전기 dipole에 의해 변형이 발생하는 electrostrictor이고 네번째는 자기장이 작용할 때 자기 dipole에 의해 변형이 발생하는 magnetostrictor이다. 생성될 수 있는 최대변형(단위:  $\mu$  strain)은 PZT로는 1000, PVDF는 700 PMN은 1000 그리고 Terfenol은 약 2000정도이다. 가진주파수의 대역을 보면 압전재료 및 electrostrictive재료는 가청주파수 이상도 포함할 수 있게 높은 반면에 Terfenol은 중간의 값을 갖는다.

따라서 변형발생률과 가진주파수 대역을 종합적으로 보았을 때 압전 재료 특히 PZT가 이상적인 작동기에 가장 적합하다.

### 3.2 감지기

지능구조물에 쓰이는 감지기는 구조물의 모재에 박히거나 붙어서 구조물의 변위 혹은 기계적인 물성치, 예를 들면 강성도를 측정하여 전기적인 신호로 바꾸어 주어야 한다. 압전재료는 전기적 신호와 기계적 변위간의 변형이 매우 정확하고 선형적이며 빠르기 때문에 지능구조물의 감지기에 아주 적합하다.

### 3.3 감지기와 작동기의 합성

압전형 변환기는 감지기 및 가진기의 역할을 한 소자에서 감당할 수 있다. 이 경우에 압전소자는 기계적 변위와 전기적 신호를 변환시켜 주는 일반화된 변환기로 간주되고 동시에 가진과 감지를 하는 기술을 통하여 감지기와 가진기의 역할을 하게 된다.

또한 각각 다른 감지기와 가진기를 사용할 수 있는데, 이 때에 가진기 및 감지기의 갯수, 위치 등이 중요한 변수가 된다. 일반적으로 압전형 가진기는 여러 형태의 가진, 예를 들면 힘, 모멘트 그리고 변형률 등 만들어 낼 수 있으며 압전 감지기는 변위, 속도, 가속도, 기울기, 각속도, 각가속도, 변형률 등의 형태를 감지할 수 있기 때문에 구조물을 원하는대로 제어하기 위해서는 이러한 감지기의 출력 형태와 가진기의 입력 형태를 적절히 선택해야 한다.

### 3.4 제어기

압전형 지능구조물은 고도의 분산된 제어 기능을 요구한다. 이러한 제어기능은 국부적 제어, 광역 제어 그리고 고도의 인지기능의 세단계로 구별할 수 있다.

국부제어의 목적은 감쇠력을 증가시키거나 에너지를 흡수하고 변위를 최소화하는 것이며 광역제어는 구조물의 안정, 형상의 조정, 그리고 외란의 배제 등이 목적이다. 고도의 인지 단계에까지 지능구조물이 발전한다면, 시스템 규명, 부품 파손의 검진 및 파손된 부분의 복구 및 학습 능력 등이 그 목적이 될 것이다. 국부제어의 주요 관건은 수많은 압전가진기와 감지기가 구조물에 분포되어 있을 때 어떻게 가장 좋은 성능의 제어를 설계하느냐는 것이다. 이것은 다수의 가진기와 감지기를 광역의 제어를 하기 전에 국부적인 단계의 제어를 구조물에 도입시키는 것이 바람직하다는 것이다.

광역제어의 문제는 많은 가진기와 감지기를 가진

표 1 작동 변형 재료의 비교

	PZT	PVDF	PMN	TERFENOL
작동기구	압전세라믹	압전필름	Electrostrictor	Magnetostrictor
최대스트레인 ( $\mu$ strain)	1000	700	1000	2000
탄성계수 (Msi)	9	0.3	17	7
주파수대역	높음	높음	높음	중간

구조물의 제어기 구조를 어떻게 만드는가 하는 것이다. 여기에는 모든 감지기 신호가 중앙에 있는 처리기에 보내지는 중앙집중식 제어기가 있을 수 있고 국부 제어 단계와 유사한 분산식 제어기가 있을 수 있다. 이러한 두 방식의 제어기에는 서로 장단점이 있기 때문에 이 두 방식을 복합한 다단계 혹은 계층적 제어기 구조가 바람직하다.

#### 4.4 소음제어

오늘날 인간이 보다 안락한 환경을 요구함에 따라 음향학에서 불필요한 음의 에너지를 감쇠시키거나 흡수하는 공학적인 문제는 그 중요성이 점점 더해가고 있다.

소음의 흡수 기구는 고대 그리스 시대에 벌써 쓰이기 시작했다. 그 당시 야외 극장의 무대 주위에 잘 조율된 병이나 항아리를 배치하여 청중으로 나가는 소리를 여과하는 효과를 얻었다. 근대에 들어서는 소음을 줄이기 위해 다공성 재료나 나무, 모, 천연 고무 등을 이용한 수동형 흡음기가 많이 개발되어 사용되었다. 그러나 이러한 수동식 흡음 방식은 부피가 크고 무게가 무거워지며 흡음 할 수 있는 주파수 대역이 대개 정해져 있는 단점이 있다.

능동적인 소음제어는 수동형 방식을 대체할 수 있기 때문에 많은 관심이 모아지고 있다. 일반적인 능동식 소음제어는 1차 소음원과 별도로 한 개 또는 여러 개의 2차 음원을 설치하여 1차 소음장과 2차 소음장이 간섭을 일으키게 하는 것이다. 이 때 2차 소음원에서는 1차 소음원에서 발생된 에너지를 일부 흡수하게 된다. 1933년에 Lueg가 처음으로 능동 음향 흡수 방식을 제안한 이후로 이러한 시스템의 모델링 및 제어기 설계에 대한 연구가 활발하게 진행되었다. 최근에 들어 고도로 발전된 Digital Signal Processing (DSP) 하드웨어의 개발로 능동소음제어는 관내 소음, 변압기 소음 등 많은 산업 소음제어 문제에 적용되었다. 그러나 음의 전파는 매우 복잡한 현상이기 때문에 넓은 공간과 주파수 대역에서 완전한 소음제어를 하는 것에는 많은 도전이 있다.

소음을 제어하려면 지금까지 언급한 공력소음 뿐만 아니라 구조 소음을 잘 이해해야 한다. 많은 소음문제는 자동차, 비행기 등과 같이 구조물을 통해 발생하거나 전달되는 음에 의해 발생하기 때문이다. 일반적으로 구조물에 장착된 진동원에 의해 구조물이 진동을 할 때 이 진동에 의해 구조물 가까이에서 음압이 발생하여 소음이 발생되기도 하며 외부에서 입사되는 소음이 구조물을 가진시켜서 구조물에서

다시 소음이 복사되기도 한다. 이들 모두 구조물은 소음의 매체가 된다.

구조물에서의 파동은 공기중에서의 음의 전파보다 복잡하다. 근본적으로 음파는 종파 성분인 반면에 구조물에서 전달되는 탄성파는 종파와 횡파 성분이 있어서 이 두 성분들이 모드 변환(mode conversion)이 생기기 때문이다. 많은 구조물에서 큰 소음 에너지를 내는 것은 판재인데 일반적으로 무한한 판재에서는 탄성파에 의해 생성되는 거동이 판의 두께 방향으로 변위를 일으키는 대칭모드(symmetric mode)와 판재의 굽힘 변형을 일으키는 비대칭모드(antisymmetric mode, flexural mode)가 있다. 대칭 모드에 의해서도 음압이 복사될 수 있는데, 임피던스가 높은 물속에서는 이 모드에 의한 복사를 무시할 수 없겠지만 상대적으로 임피던스가 낮은 공기중에서는 대개 무시할 수 있다. 비대칭 또는 굽힘 모드에 의한 음의 복사는 대부분의 소음에너지를 전달하며 소음 문제에 있어서 매우 중요하다. 따라서 판재의 굽힘 모드에 의해 복사되는 소음을 줄이는 것이 구조 소음제어에 있어서 필요하다.

유한한 판재에서 음의 복사는 일반적으로 modal suppression과 modal restructuring에 의해 제어될 수 있다고 한다. Modal suppression은 유한 판재의 전 굽힘모드에 대해서 진폭을 저감시키는 것으로서 진동에너지를 감쇠시킬 때 가능하다. 예를 들어 감쇠능력이 좋은 고무 등을 판재 표면에 부착하거나 흡진기를 부착하여 구조물의 진동에너지를 흡수하는 수동적인 방식이 이에 해당된다. 이러한 수동적 방법은 대개 한 주파수 또는 좁은 주파수대에서 그 역할을 하게 되며, 구조물이 무거워지고 커지는 단점이 있다. Modal restructuring이란 구조물에서 음의 복사를 일으키는 supersonic wave number 성분을 줄이고 복사를 일으키지 않는 subsonic 성분을 증가시키는 것이다. 이것은 판재에서 발생하는 전체 음압 복사에너지를 감소시키기 보다는 이 에너지를 재분배하여 복사되는 양을 줄이는 것이다. 따라서 이 방식에 의해서 음의 복사에너지가 줄더라도 반대로 에너지 보존에 의해 판재의 지지부에서는 지지력 또는 진동이 커질 수 있다.

압전 지능 구조물의 장점은 여러 연구 결과를 토대로 해서 볼 때 한마디로 modal suppression을 일으키는 능동형 에너지 흡수기와 modal restructuring을 일으키는 두가지 기능을 다 갖고 있다. 압전형 지능구조물에서 modal restructuring이란 압전가진기를 제어기를 통해 가진시켰을 때 음의 복사를

일으키는 특정한 모드를 줄일 수 있다. 압전재료를 이용한 능동감쇠(active damping)는 이미 잘 알려진 사실이다. 압전 지능구조물에서 압전 가진기에 전기를 가했을 때 가진용 앰프로 걸리는 파워는 예를 들면, 능동흡수기(active absorber)에서 발산되는 에너지와 같다고 할 수 있다. 따라서 압전 지능구조물은 소음제어 문제를 근본적으로 해결할 수 있는 능력을 갖고 있다. 뿐만 아니라 공력 소음의 능동제어에서 언급했던 2차 소음원과 에러감지기 등의 설치에 필요한 부차적인 공간을 요구하지도 않는다.

### 5. 압전 지능구조물의 소음제어 응용에

압전 지능구조물의 응용분야는 한 마디로 매우 넓다. 소음제어와 관련해서 보면 능동형 흡음기, 각종 기계의 소음제어, 자동차, 비행기, 건물 등의 실내 소음제어 등이 있다.

첫 번째 예로서 능동형 흡음기를 보면 압전복합재료를 두 층으로 쌓아서 만든 가진기를 이용해서 입사되는 음파로부터 반사되는 것과 투과되는 음파를 완전히 소거할 수 있다는 이론적인 제안이 있었다<sup>(1)</sup>. 그림 1은 1-3 압전 복합재료의 복층 가진기에 입사파  $P_i$ 가 입사되고 가진기층을 전후해서 반사되는 전압  $V_A$ 와  $V_B$ 를 나타내고 있다. 이 가진기를 Mason의 등가회로로 표시하고 반사파와 투과파를 동시에 완전히 소거하기 위한 전압  $V_A$ 와  $V_B$ 를 이론적으로 구하였다. 여기서 두 가진기에 들어가는 전기에너지는 입사되는 음파의 에너지와 크기는 갖고 부호가 반대임을 보였는데 이것은 입사파의 에너지가 두 가진기에 의해 완전히 흡수되었다는 것을 의미한다. 그림 2는 이 증명을 실험적으로 보인 장치로서 입사파가 들어올 때 PVDF로 된 A감지기는 입사파를 감지하고 B감지기는 시간 지연을 두어 반

사파에 민감하게 하여 1-3 압전 복합 가진기에 의해 생성된 표면파가 반사파를 소거한다<sup>(2)</sup>. 그림 3은 실험결과로서 (a)는 능동제어로 하기 이전의 반사파이고 (b)는 능동제어에 의해 줄어든 반사파이다. 이어서 (c)는 제어 이전의 투과파이고 (d)는 제어에 의해 흡수되고 남은 투과파이다. 이 연구는 수중에서 행해졌으며 5~11 kHz의 주파수 범위에서 약 35 dB의 반사파 흡수효과를 얻었다. 실제로 이 기술은 잠수함 표면의 무반사 처리에 응용할 수 있다. 이러한 기술을 공력 소음 또는 구조 소음의 제어에 이용할 수 있는지는 검토해 볼 만한 일이다. 왜냐하면 소음 제어의 가장 좋은 방법은 소음 에너지를 효과적으로 흡수하는 것이며 이 것에는 지금 예로 든 기술이 유

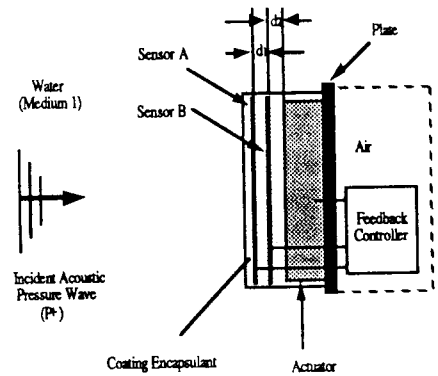


그림 2 개념적인 능동형 흡음 장치

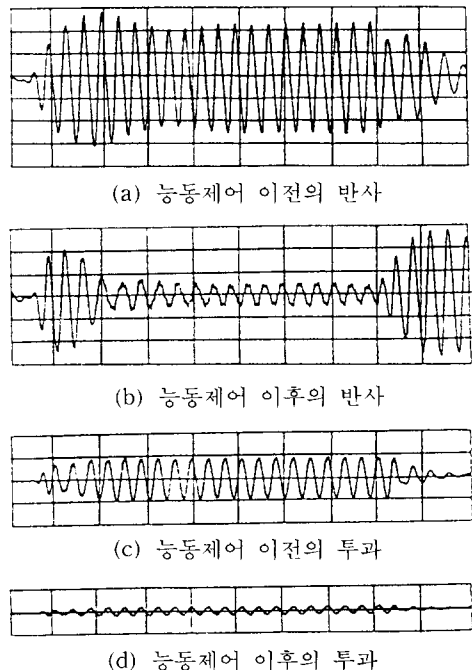


그림 3 복합층 가진기에서의 파형

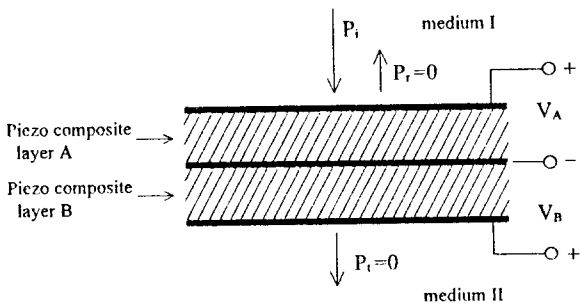


그림 1 복합층 압전 가진기

력하기 때문이다. 가진기의 피복재로는 물과 임피던스가 가까운 재료가 사용되었는데 만약에 공기를 생각한다면 압피턴스 차이가 커서 직접적인 흡음효과는 줄어들지 모르지만, 만약에 넓은 면적을 사용하면 긍정적인 결과를 기대할 수 있을 것이다. 그리고 압전 복합재료의 제작도 많이 발전해서 지금은 사출성형법을 이용해서 큰 패널까지 제작하고 있다(그림 4). 가격면에서도 대량 생산의 시기에 접어들

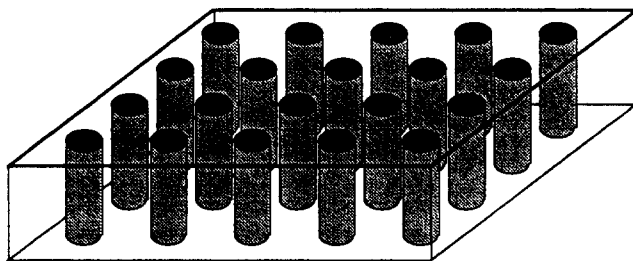
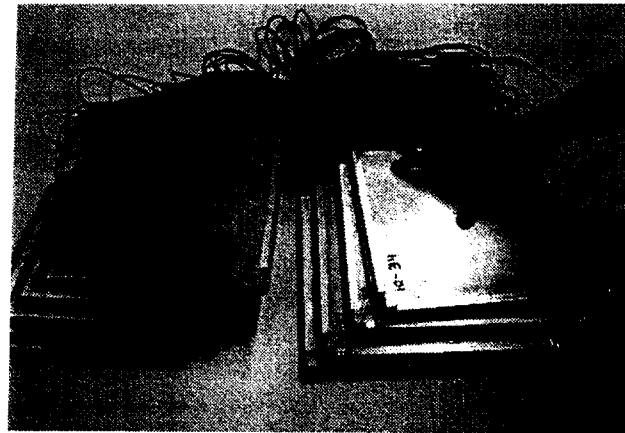


그림 4 사출성형에 의해 제작된 1-3 PZT/Polymer 복합재료로 만든 가진기

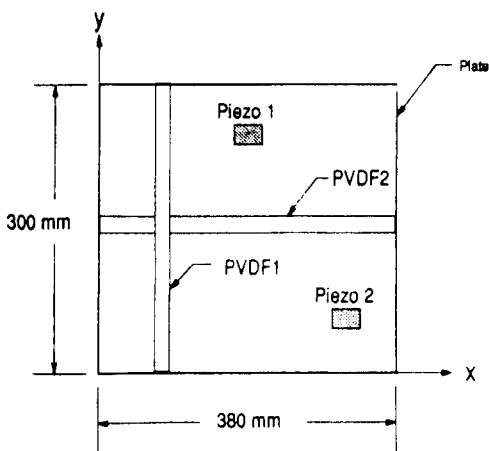


그림 5 복사음의 능동제어를 위한 압전기능 판재

면 경쟁력이 생길 것이다.

두 번째 예로서 실내의 벽이나 항공기의 내벽을 이루는 판재를 능동적인 제어를 통해서 복사되는 소음을 감소시키는 것이다<sup>(3)</sup>. 그림 5와 같이 평판에 두 개의 PVDF 감지기를 설치하여 진동을 감지하게 했고 외부의 가진원은 예를 들어 항공기 프로펠러의 회전으로 인한 진동에 해당하는 주파수로 가진하는 전자기 가진기를 사용하였다. 제어기는 능동형 LMS 이론이 사용되었고 원거리에서 복사되는 소음의 감소를 목표로 한다. 한 개 또는 두 개의 압전 세라믹 가진기를 사용하여 능동제어를 한 결과 약 30 dB의 복사음압 감소를 얻었다. 그림 6은 복사되는 소음의 형태를 나타낸다.

세 번째 예로서는 그림 7과 같이 상자안에 있는 음원에서 소음이 발생할 때 판재에 원판형 압전세라믹의 가진기와 감지기가 설치된 판재를 설치하여 내

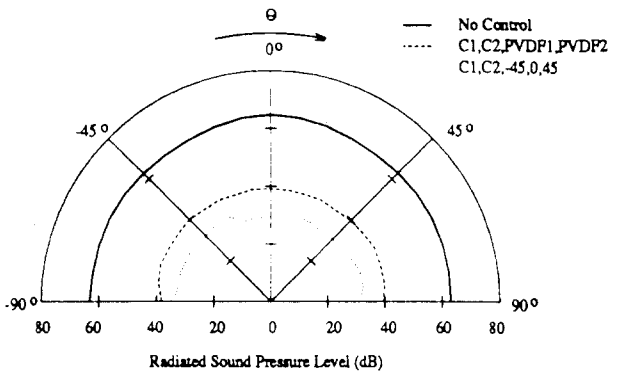


그림 6 두개의 압전감지기와 가진기를 사용했을 때의 음압분포

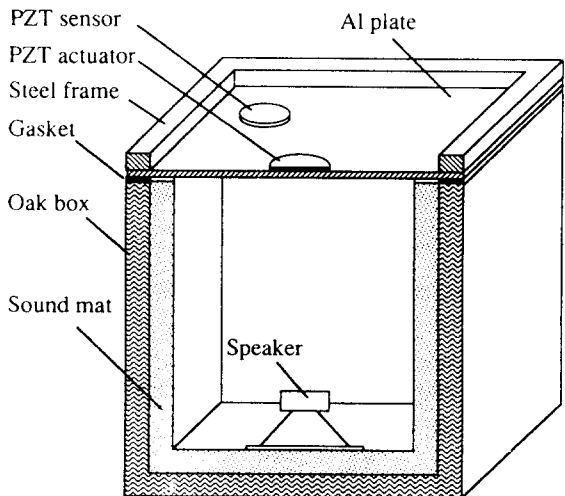


그림 7 판재를 이용한 음향상자의 복사음제어

부 소음의 복사를 제어하는 것이다<sup>(4)</sup>. 두 번째 예와 마찬가지로 반무향실에서 실험을 행하였다. 능동제어기를 사용하여 실험을 수행한 결과 그림 8과 같이 15~20 dB의 복사음 감소를 얻었다.

네 번째 예는 평판에 압전가진기와 감지기가 설치되고 제어기를 통하여 구조물에서 복사되는 소음을 제어함에 있어서 제어기와 감지기의 최적설계이다<sup>(5,6)</sup>. 감지기가 구조물과 접합되서 진동 및 소음제어에 많이 이용되었지만 감지기와 가진기에 의한 크기 및 위치에 대한 연구가 많지 않았다. 적절한 제어기와 아울러 이들에 대한 최적화가 이루어진다면 더욱 좋은 결과를 얻을 수 있다. 최적화 설계를 수행한 결과 구조물과의 공진 주파수에서는 약 60~70 dB, 비공진 주파수에서는 약 20~30 dB의 이론적인 감소를 얻었다<sup>(6)</sup>. 다른 한 최적설계의 예를 보면 그림 9와

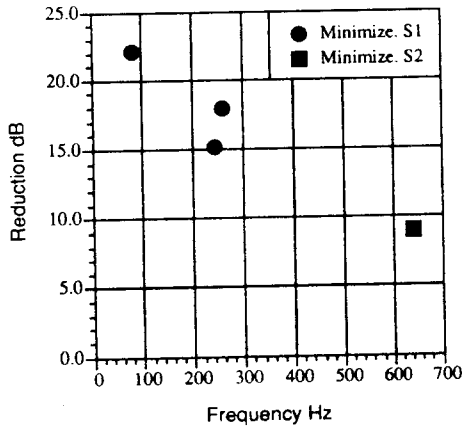


그림 8 능동제어에의 전체적인 소음감소

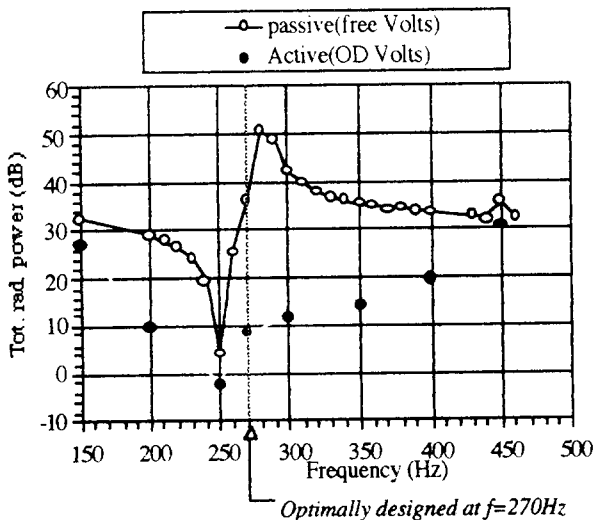


그림 9 여러 주파수에서의 최적설계 결과의 강건성

같이 가진기의 전압을 변화시킴으로써 200~400 Hz 범위에서 15 dB이상의 소음 감소를 얻을 수 있음을 보였다.

이상의 네 가지 응용예는 압전 지능구조물을 소음 분야에 응용할 수 있는 가능성을 보여 줄 뿐만 아니라 이론과 실험간의 좋은 일치를 보여 주고 있다. 물론, 이 기술의 제한성 또는 상업적인 제품에의 구현 가능성 등은 보다 많은 실험적 연구를 통해서 밝혀져야 할 것이다.

## 6. 맺 음 말

현재까지 압전 지능구조물을 현상적으로 이룰 수 있는 모든 기술이 개발되지는 못했다. 그렇게 되기 위해서는 다음과 같은 중요한 점들이 많은 연구를 통하여 해결되어야 할 것이다.

가진재료 : 많은 구조 및 소음의 응용에 만족할 만한 제어를 얻기 위해서는 현재보다 3내지 10배 가량의 변형을 낼 수 있는 가진기가 개발되어야 한다. 이를 위해서 압전재료에서는 복합적인 전극을 만들어서 대변형을 만들어 내는 가진기에 대한 연구가 진행되고 있으며 더욱 많은 관심이 요구된다.

감지기의 최적화 : 감지기의 최적설계를 통하여 제어기의 spillover같은 문제를 피하고 구조물의 제어하고자 하는 주파수 대역을 적절히 선택할 수 있어야 한다.

구조물의 제어이론 : 구조물은 분산된 연속체 시스템이므로 이에 대한 알맞는 이론의 개발이 필요하 다.

전자부품이 구조물속에 심어지기 위한 기술들 : 구조물속에 제어기 및 필요한 많은 전자부품들이 심어졌을 때 VLSI가 구조물의 변형과 충격속에서도 그 기능을 할 수 있어야 하며 전력소모로 인해 전자부품에서 발생하는 열에 의해 구조물 재료의 성질이 나빠지지 않아야 한다. 또한 가진기와 감지기가 구조물속에 묻혔을 때 구조물의 강성의 불균일로 인해 구조물이 충격에 약해지지 않아야 한다.

마지막으로 이러한 지능구조물의 제작, 보수 및 신뢰성에 대한 기술이 요망된다.

이러한 압전 지능구조물이 소음제어에 활용되기 위해서는 보다 많은 투자와 연구가 있어야 한다. 압전지능구조물 기술은 미래의 기술이며 21세기를 향한 이 나라의 기술적 경쟁력을 키우는데 반드시 있어야 할 기술이다. 앞으로 사람들은 생활수준이 높아짐에 따라 조용하고 빠른 비행기를 타기 원하고

안락한 자동차 여행을 즐기려 할 것이 당연하기 때문이다. 따라서 이러한 기술에 미진한 국내에서도 빠른 시간내에 소음제어를 위한 압전 지능구조물의 개발·프로그램을 구축하여 집중적 투자와 연구가 요망된다.

### 참고 문헌

- (1) X. Q. Bao, V. K. Varadan, V. V. Varadan, and T. R. Howarth, 1990, "Model of a Bilaminar Actuator for Active Acoustic Control Systems," *J. Acoust. Soc. Am.* 87(3), pp. 1350~1352.
- (2) X. Q. Bao, T. R. Howarth, V. V. Varadan, and V. K. Varadan, 1991, "Active Acoustic Echo Reduction Using Piezoelectric Coating," ADPA/AIAA/ASME/ SPIE Conf. on Active Materials and Adaptive Structures, pp. 553~557.
- (3) R. L. Clark and C. R. Fuller, 1992, "Modal Sensing of Efficient Acoustic Radiators with Polyvinylidene Fluoride Distributed Sensors in Active Structural Acoustic Control Approaches," *J. Acoust. Soc. Am.* 91(6), pp. 3321~3329.
- (4) X. Bao, V. V. Varadan and V. K. Varadan, 1995, "Active Control of Sound Transmission Through a Plate Using a Piezoelectric Actuator and Sensor," *Smart Mater. Struct.*, 4(4), pp. 231~239.
- (5) B. T. Wang, R. A. Burdisso, and C. R. Fuller, 1994, "Optimal Placement of Piezoelectric Actuators for Active Structural Acoustic Control," *J. Intell. Mat. Sys. Str.*, 5(1), pp. 67~77.
- (6) 김재환, 1996, "복수압전가진기의 최적설계를 통한 판구조물의 소음제어," 한국소음진동공학회 1996년도 춘계학술대회 논문집 pp. 263~270.