

# 평판에서의 방사소음 저감을 위한 능동구조음향제어

홍진석\* · 오재응\*\* · 이유엽\*\*\* · 신준\*\*\*\*

## Active Structural Acoustic Control for Radiated Sound Reduction in Plate

Jin Seok Hong, Jae-Eung Oh, You Yub Lee, Joon Shin

**Key Words:** Active Structural Acoustic Control(능동구조음향제어), Radiated Sound Reduction(방사소음 저감), Filtered-x LMS algorithm

### Abstract

Active control of sound radiation(using active structural acoustic control) from a vibrating rectangular plate by a steady-state harmonic point force disturbance is experimentally studied. Control structural input are achieved by two piezoceramic actuators bonded to the surface of the panel. Two accelerometers are implemented as error sensors. Estimated radiated sound signals using vibro-acoustic path transfer function are used as error signals. The vibro-acoustic path transfer function represents system between accelerometers and microphones. The control approach are based on a multi-channel filtered-x LMS algorithm. The results demonstrate that attenuation of sound levels of 3dB, 13dB are achieved.

#### 기호설명

- $C$  : finite impulse response filter between actuator  $m$  and error sensor
- $d$  : (1) desired response
- $e$  : error signal
- $J$  : cost function of control system
- $L$  : number of error sensors
- $M$  : number of actuators
- $S$  : secondary path from output  $y$  to error sensor signal  $e$
- $W$  : weight vector
- $X$  : input signal vector

- $y$  : output signal
- $\mu$  : convergence parameter in gradient search algorithm

### 1. 서론

구조물의 진동에 의해 발생하는 음향방사의 문제는 소음·진동분야에서 매우 중요한 관심사로 대두되고 있으며, 진동에 의해 방사되는 소음을 제어하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있다. 이를 위해 지금까지는 구조물에 감쇠를 증가시키고 질량이나 강성을 부가하는 수동적 제어 방법이 많이 사용되어 왔으나 에너지 효율·설치 공간상의 단점이 있다. 한 예로 방사소음을 수동적으로 저감하는 방법에는 각종 흡음재 또는 차음재를 이용하는 방법이 있으나, 일반적으로 500 Hz 이하의 저주파 소음에 대해서는 소음저감이 어렵다. 이러한 수동적 방식의 문제점을 해결하기 위한 대안으로 고속 디지털신호처리(DSP) 프로세서를 이용한 능동소음제어에 대해 연구가 진행되어

\* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과  
 \*\* 한양대학교 공과대학 기계공학부  
 \*\*\* 전남대학교 공과대학 자동차공학부  
 \*\*\*\* 원주대학교 동력기계과

왔다[1]. 진동하는 구조물에 의해 방사되는 소음의 능동제어는 제어력에 따라 2가지 방식으로 분류된다.[2] 첫 번째는 부가음원을 사용한 제어로 지금까지 연구되어온 방식이다. 이 방식은 음원이 복잡하고 평면에 분포되어 있는 경우일 때 전역적인 소음제어를 수행하기 위해 다수의 음향 제어력이 필요한 단점이 있다. 두 번째 방식은 전술한 방식의 단점을 보완하기 위해 제어력을 구조물에 직접가하여 진동분포를 감소 또는 변경시켜 전역적인 소음의 저감을 수행하는 방식이다. 이 방식은 능동구조소음제어(Active Structural Acoustic Control)로 알려져 있으며 능동소음제어(Active Noise Control)와 능동진동제어(Active Vibration Control)의 개념이 모두 포함되어 있다. 능동구조소음제어는 제어에 사용하는 예리신호의 성질에 따라 2가지로 나누어지며, 마이크로폰을 통하여 측정된 방사음압신호를 이용하는 방식과 가속도계등을 통하여 측정된 구조물의 진동신호를 이용하는 방식이 있다. 마이크로폰을 설치하여 방사소음을 줄이는 방식은 소음을 저감시키고자 하는 위치 모두에 마이크로폰을 설치해야 하므로 비용 및 설치상 어려움점등이 있어 이를 극복할 수 있는 구조물의 진동을 계측하여 방사소음을 저감하는 방식에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[3]

본 연구에서 가속도계를 통해 계측된 진동신호와 가속도계와 마이크로폰사이의 전달계인 진동-소음경로 전달함수를 사용하여 방사되는 음압을 예측하고, 이것을 저감시키는 능동구조소음제어계를 구성하고자한다. 평판을 정현파로 가진하여 발생한 방사소음을 가속도계로 계측하고, 이때의 진동신호를 이용하여 방사되는 소음을 저감시키는 실험을 수행하여 방사소음 제어가능성을 알아본다.

## 2. 능동구조소음제어 이론

### 2.1 다채널 filtered-X LMS 알고리즘

L개의 오차센서와 M개의 가진기를 사용한 제어계의 경우 목적함수를 다음과 같이 평균자승 오차로 표현할 수 있다[4].

$$J = \sum_{l=1}^L e_l^2(n) \quad (1)$$

여기서  $e_l(n)$ 은 l 번째 오차센서의 신호이다. 이것은 l 번째 오차센서에서 주음원에 의해 발생되는  $d_l(n)$ 과 각 가진기의 출력의 합과의 차로써 이루어진다.

$$e_l(n) = d_l(n) - \sum_{m=0}^M \sum_{j=0}^{l-1} C_{lmj} \sum_{i=0}^{l-1} W_{mi} X(n-i-j) \quad (2)$$

여기서  $C_{lmj}$ 는 가진기 m과 오차센서 l사이의 전달함수를 모델링 하는 j차 유한 임펄스 응답 필터계수이며  $W_{mi}$ 는 가진기 m에 가해지는 i차 필터계수이다.

이때 참조신호  $X(n)$ 이  $d_l(n)$ 과 상관관계가 있다면 주음원에 의한 목적함수 J는 줄여질 수 있다. 따라서, 최대경사법에 의하여 목적함수 J를 최소화하는 수렴계수 변화치는 다음과 같다.

$$\frac{\partial J}{\partial W_{mi}} = 2 \sum_{l=1}^L e_l(n) \frac{\partial e_l(n)}{\partial W_{mi}} \quad (3)$$

따라서, 필터 갱신식은 아래와 같다.

$$W_{mi}(n+1) = W_{mi}(n) - \mu \sum_{l=1}^L e_l(n) \sum_{j=0}^{l-1} C_{lmj} X(n-i-j) \quad (4)$$

여기서  $\mu$ 는 수렴계수이다.

본 연구에 사용된 다채널 filtered-x LMS 알고리즘은 오차센서와 가진기가 2개이므로 Fig.1과 같다.

### 3. 평판 방사소음제어 실험

#### 3.1 실험 장치 및 방법

Fig.3은 본 연구의 실험장치 구성도이다. 외력 가진기로는 웨이커(shaker, B&K Type 4810)를 사용했고, 평판에 제어력을 가하기 위해 피에조세라믹(PZT, PIEZOSYSTEMS T220-A4-301)이 사용되었다. 실험에 사용된 평판의 제원과 PZT의 제원을 Table 3에 나타내었다. 평판의 진동을 측정하기 위해 2개의 가속도계(accelerometer, RION PV-90B)를 사용하였고, 방사음압을 측정하기 위해 2개의 마이크로폰(microphone, B&K Type 4130)을 가속도계와 같은 자리로 10cm 위에 설치하였다.

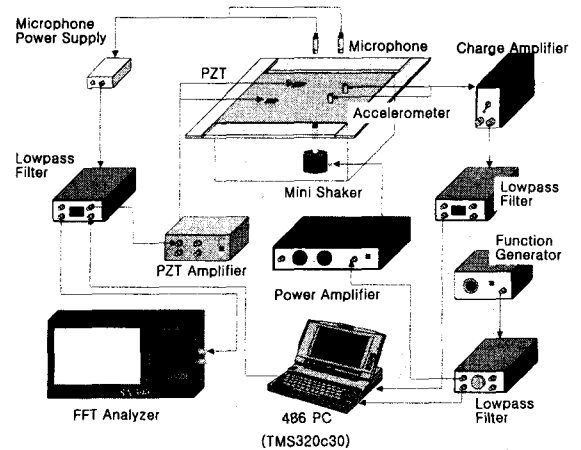


Fig.3 Experimental setup

PZT는 평판에서 제어감도가 좋은 위치로 선정하였다[5]. 외력가진기, PZT, 센서들의 부착 위치를 Fig.4에 나타내었다. 외력가진신호는 평판의 고유진동수인 290Hz를 신호발생기(function generator, LEADER LFG-1300)를 통해 생성하였다. 모든 입·출력신호에 400Hz 저역통과필터(Low pass filter, KRON-HITE 3944)를 걸었다. 제어신호는 피에조세라믹증폭기(PZT amp. 출력  $\pm 170V$ )에 의해 증폭되었으며, 오실로스코프(Oscilloscope, HP54503A)는 센서신호를 모니터링하기 위해 사용되었으며, FFT분석기(FFT analyzer, Scientific Atlanta SA390)는 센서신호의 주파수분석을 위해 사용되었다. 제어는 TMS320C30 DSP 보드(TI)가 내장된 486급 컴퓨터에서 수행하였다. 제어알고리즘은 어셈블리 언어로 작성되었으며

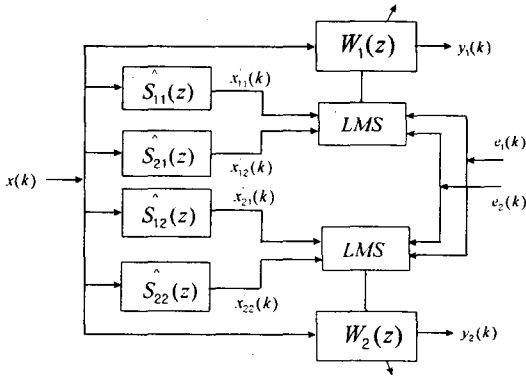


Fig.1 Block diagram of the multi-channel filtered-x LMS algorithm

여기서  $\hat{S}_{rs}(z)$  는  $y_s$ 로 부터 오차센서  $e_r$ 사이의 부가경로 전달함수이다.

#### 2.2 진동-소음경로의 모델링에 의한 능동구조소음 제어

Fig.2 에 본 연구에서 사용한 능동구조소음 제어의 개념도를 나타냈다. 여기서, 진동-소음경로(vibro-acoustic path)는 가속도계와 마이크로폰 사이의 전달함수를 의미하며 FIR filter로 구성된다.

본 알고리즘에서 진동-소음경로는 가속도계를 통해 들어온 진동 신호를 이용하여 방사되는 음압신호를 예측하는데 사용된다.

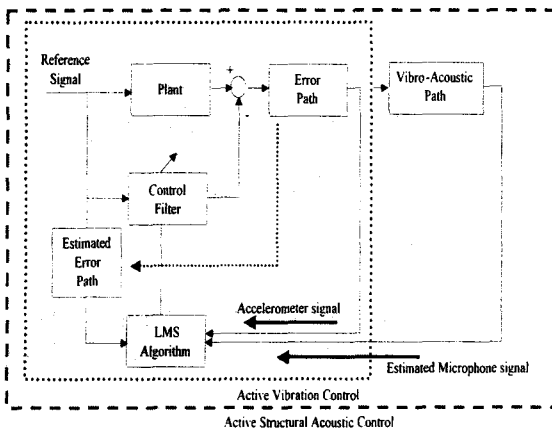


Fig.2 Schematic Diagram of Active Structural Acoustic Control

다운로드 프로그램은 C언어로 작성되었다. 실험은 우선 평판에 백색잡음을 가하여 평판의 고유진동수와 방사음압의 주파수 특성을 알아낸 후, 평판의 고유진동수 중 방사음압에 영향을 미치는 주파수를 찾아내어 가진 주파수로 결정했다. PZT 가진기와 가속도계 사이의 에러경로(error path), 가속도계와 마이크로폰사이의 진동-소음경로를 각각 FIR필터로 모델링한 후 제어를 수행한다.

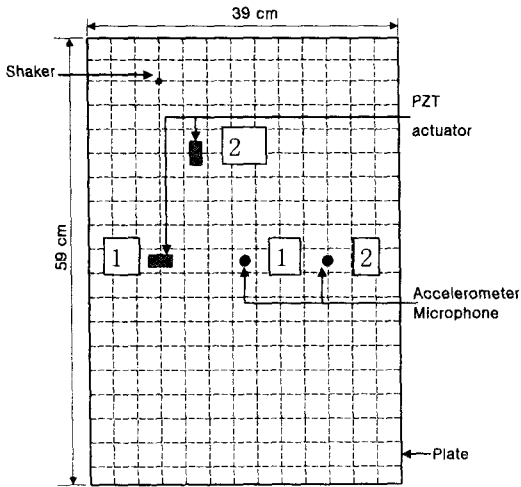


Fig.4 Plate setup

Table 3 Dimensions of the plate and PZT

(단위 : m)

Dimensions	Aluminium Plate	PZT
Length	0.59	0.0381
Width	0.39	0.0127
Thickness	0.0004	0.000508

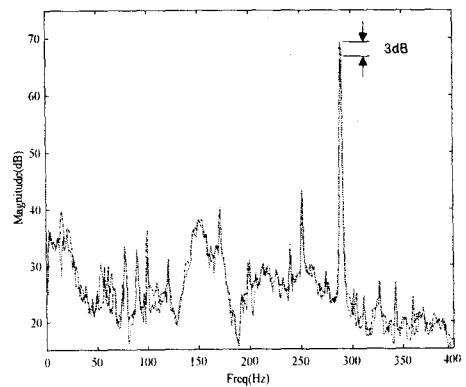
### 3.2 결과 및 고찰

백색잡음 가진을 하였을 때 마이크로폰에 측정된 방사소음 중 290Hz가 진동·소음 모두에서 진폭이 크고 기여도가 높은 주파수이므로 가진주파수로 선정하였다. Fig.5에 290Hz 정현파로 가진할 때 방사음압의 저감결과를 나타내었다. 결과로부터 각 마이크로폰에서의 방사음압이 저감됨을 알 수 있다.

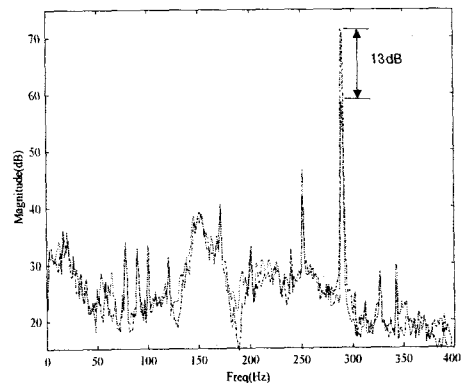
### 4. 결론

본 연구를 통하여 구조물의 진동에 의해 발생한 방사소음을 저감시키기 위해 진동센서와 진동가진기를 사용하는 능동구조소음제어가 가능함을 알 수 있었으며 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1. 다채널 filtered-X LMS 알고리즘과 진동-소음 경로 모델링을 통해 진동신호의 계측에 의한 방사소음제어 알고리즘을 구성하였다.
2. 구조물의 진동에 의해 발생한 방사소음을 저감시키기 위해 마이크로폰이 아닌 가속도계를 사용한 능동구조소음제어계를 구성하였다.
3. 정현파가진에 의한 방사음 제어결과 3dB, 13dB의 저감효과를 얻을 수 있었다.



(a) microphone 1.



(b) microphone 2.

Fig.5 Control results (sinusoidal 290Hz)

(--- : without control, — : with control)

## 참고문헌

- [1] C.R. Fuller, "Experiments on reduction of aircraft interior noise using active control of fuselage vibration", J. Acoust. Soc. Am., 78(S1), S79
- [2] Fuller, Elliott, Nelson. Active Control of Vibration, ACADEMIC PRESS, 1996
- [3] Robert L. Clark and Chris R. Fuller, "Experiments on active control of structurally radiated sound using multiple piezoceramic actuators" J. Acoust. Soc. Am., 97(6), 1992, pp.3313~3320
- [4] Sen M. Kuo, Dennis R. Morgan. Active Noise Control Systems, John Wiley & Sons, Inc., 1996
- [5] 박수홍, "다채널 능동제어기법에 의한 밀폐계 평판의 외부 방사소음저감", 공학박사 학위논문, 한양대학교, 1998