

평판에서 방사되는 소음의 능동구조소음제어를 위한 변환기의 위치결정

The Determination of Transducer Locations for Active Structural Acoustic Control of the Radiated Sound from Vibrating Plate

김 흥 섭† · 홍 진 석* · 이 충 휘** · 오 재 응***

Heung-Seob Kim, Jin-Seok Hong, Choong-Hwi Lee and Jae-Eung Oh

(2002년 4월 12일 접수 ; 2002년 8월 9일 심사완료)

Key Words : Active Structural Acoustic Control(능동구조소음제어), Radiated Sound(방사소음), Acoustic Prediction Filter(음향 예측 필터), Piezo-ceramic Actuator (피에조세라믹 가진기)

ABSTRACT

In this paper, through the study on locations of structural transducers for active control of the radiated sound from the vibrating plate, the active structural acoustic control (ASAC) system is proposed. And, for the evaluation of the proposed location, the experiment of the active structural acoustic control is implemented using the multi-channel filtered-x LMS algorithm and an additional filter (Acoustic Prediction Filter) to estimate the radiated sound using the acceleration signals of the plate. The structural transducers are piezoceramic actuator (PZT) and accelerometer. PZT is used as an actuator to reduce the vibration and the radiated sound. To maximize the control performance, each PZT actuator is located at the position that has the largest control sensitivity of the plate bending moment in the direction of x and y coordinates and the optimal PZT location is validated experimentally. Also, to find the acoustic prediction filter accurately, two accelerometers are located at the positions that have the largest radiation efficiencies of the plate, and the proposed locations are validated by simulation using the Rayleigh integral. The multi-channel filtered-x LMS algorithm is introduced to control a complex 2-D structural vibration mode. Finding the locations of structural transducers for active structural acoustic control of the radiated sound, the active structural acoustic control (ASAC) system can be presented and validated by experiments using a real time control system.

기호설명

d : 원하는 응답
 e : 오차 신호

† 책임저자, 정회원, 인제대학교 기계자동차공학부
Email : mechhsk@ijnc.inje.ac.kr
Tel: 055-320-3748, Fax:055-324-1723
* 한양대학교 대학원 정밀공학과
** 한양대학교 대학원 자동차공학과
*** 정회원, 한양대학교 기계공학부

J : 제어시스템의 목적함수
 S : 출력 y 에서 오차 e 까지의 부가경로
 U : 진동-음향 경로의 가중벡터
 V_a : PZT 가진기에 가해지는 전압
 W : 가중 필터
 w : 평판의 두께 방향의 변위
 w_n : 평판의 모드형 함수
 X : 입력신호의 벡터
 x : 평판의 좌표
 y : (1) 출력신호, (2) 평판의 좌표
 μ : 수렴계수

1. 서 론

최근 구조물의 진동으로부터 방사되는 소음은 많은 산업 응용분야에서 발생하는 끊임없는 문제로서 소음 흡진동 분야에서 중요한 문제의 하나로 대두되고 있다. 이러한 방사소음을 저감하는 방법에는 수동적인 방법과 능동적인 방법이 있다. 수동적인 방법은 소음 발생원의 저소음화를 위해 제진 시스템을 설계하거나 소음흡진동의 전달경로를 차단하기 위해 흡차음재 및 방진재를 사용하는 것이다. 하지만 이 방법은 시스템의 질량과 부피를 증가시키고 500 Hz이하의 저주파 영역에서는 소음 저감 효과가 급격히 떨어지는 문제점을 가지고 있다.⁽¹⁾ 따라서 새로운 소음 저감 방법이 요구되면서, 소음 저감의 가능성을 보여주는 능동제어(active control)의 실용화에 관한 연구가 1980년대 들어 고속 디지털신호처리(DSP) 프로세서의 발달과 함께 본격적으로 추진되었다.⁽²⁾

능동제어 기법은 능동진동제어(active vibration control : AVC)와 능동소음제어(active noise control : ANC)로 구분되며 주로 진동과 소음이 전파 경로 상에서 제어를 수행한다.^(2~4) 이러한 능동제어 기법은 실제 적용에 많은 제약이 따르며 전역적인 제어 효과를 위해서는 다수의 센서와 가진기가 필요한 단점이 있다. 따라서 소음진동 전파경로에서의 능동제어 기법의 단점을 극복하기 위하여 소음진동원에 직접 제어력을 가하는 방식에 관심이 집중되면서 능동구조소음제어(active structural acoustic control : ASAC) 기법에 대한 연구가 진행되었다. 연구 초기의 능동음향구조제어 기법에서는 오차 신호로 마이크로폰을 이용하여 계측한 신호를 이용하였지만 이 방법은 소음을 저감하려는 위치마다 마이크로폰을 설치해야 하는 단점이 있다.^(5~7) 이 문제를 해결하기 위하여 구조물의 진동을 계측하여 방사소음을 저감하는 방식에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 진동과 그 진동에 의한 방사음 사이를 구조-음향계의 전달함수로 구성하여 방사되는 음압을 예측하고자 하였다.

본 연구에서 방사소음의 저감은 진동 센서와 마이크로폰 사이의 관계에 의해 수행되기 때문에 좋은 제어 성능을 얻기 위해서는 제어기와 오차 센서의 위치 선정은 매우 중요하다. 제어 성능을 최대화하기 위해

제어감도를 이용하여 PZT 제어기의 위치를 결정하였으며 정확한 음향예측 필터를 찾기 위해서 Rayleigh 적분을 이용하여 가속도계의 위치를 결정한 후 가속도계를 통해 계측된 진동신호와 가속도계와 마이크로폰 사이의 전달계인 진동-소음경로 전달함수를 사용하여 방사되는 음압을 예측함으로써 이를 저감시키는 능동구조음향제어계를 구성하고자 하였다.

2. 변환기의 위치 결정

2.1 피에조 가진기(PZT)의 위치 결정

Fig. 1의 피에조 가진기가 부착된 평판에서 각 진동 모드별로 피에조 가진기(PZT)의 제어 감도, 는 식(1)과 같다.^(8,9)

$$S_A = V_a \sum_{n=1}^{\infty} \dot{\eta}_n(t) \int_A \nabla^2 w_n(x, y) dA \quad (1)$$

여기서, V_a 는 피에조 가진기에 걸리는 전압, $w_n(x, y)$ 는 n 차 모드형 함수, η_n 는 n 차 모드 진폭을 나타낸다. 식(1)에서 피에조 가진기의 부착 방향에 따른 각 진동 모드별 제어감도를 조합하여, 각각의 부착방향에 따라 제어 감도를 최대화하는 위치를 구할 수 있는데, Fig. 2는 4변 고정 알루미늄 평판(두께 0.0004 m, 가로 0.39 m, 세로 0.54 m)의 각각 횡·종 방향에 대한 4차 진동 모드까지의 제어감도의 조합을 나타낸다.

Fig. 2에서 각 방향의 제어감도가 최대가 되는 위치를 선정하여 피에조 가진기의 위치를 결정하였는데, 횡방향 진동모드의 제어를 위한 가진기1의 위치는 평

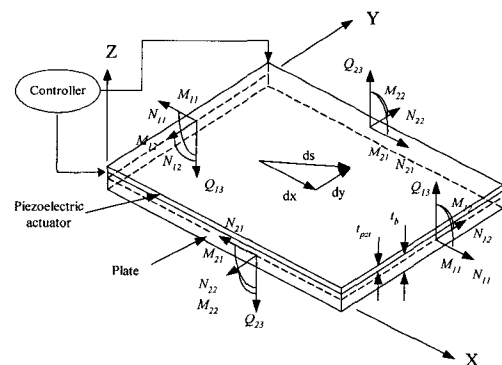


Fig. 1 Plate with the PZT

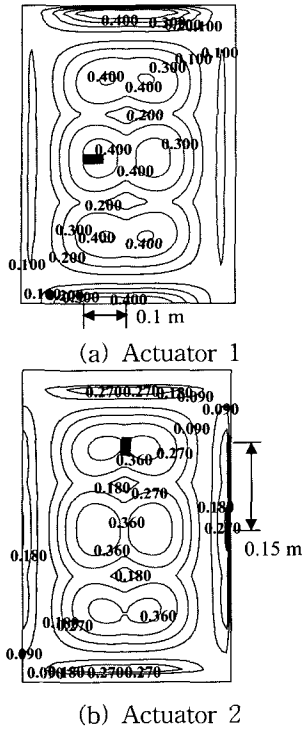


Fig. 2 Locations of the PZT

판의 중심으로부터 왼쪽으로 0.1m 떨어진 위치에, 종방향 진동모드를 제어하기 위한 가진기 2의 위치는 평판의 중심으로부터 위로 0.15m 떨어진 위치에 피에조 가진기의 부착위치를 결정하였다.

2.2 PZT의 최적 부착위치 평가

평판의 제어감도를 이용하여 결정한 피에조 가진기의 위치를 평가하기 위하여 피에조 가진기를 각각 종방향, 횡방향 별로 변경하면서 각각의 위치에서 동일한 크기의 가진력에 대해 가장 큰 진동 변위가 나타나는지 실험하였다.

Fig. 3에 피에조 가진기 부착 위치 변경에 따른 진동 변동을 측정하기 위한 평판의 피에조 가진기 부착 위치 및 가속도계 부착 위치를 나타내었다. 가진 위치는 평판의 횡 종 방향으로 총 8개 지점에 피에조 가진기를 부착하였다. 진동의 변동을 측정하기 위해 가속도계를 사용하여 진동의 변동을 측정하였다. 가속도계 부착 위치는 평판의 정가운데 지점과 대각선 방향의 4개 지점을 선택하였다.

Fig. 4에 실험 장치도를 나타내었다. 500 Hz 미만의 백색 잡음으로 증폭기를 통하여 피에조 가진기를 가

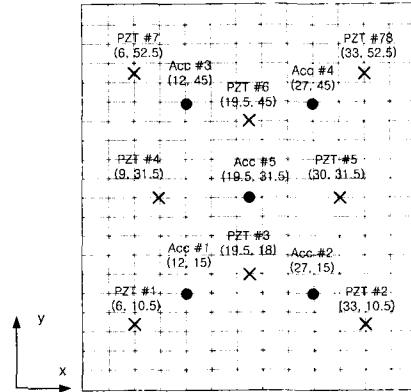


Fig. 3 Locations of the PZT and accelerometers

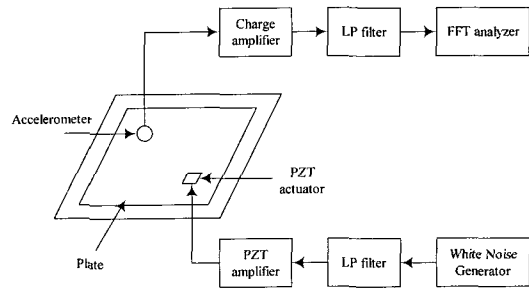


Fig. 4 Experimental setup

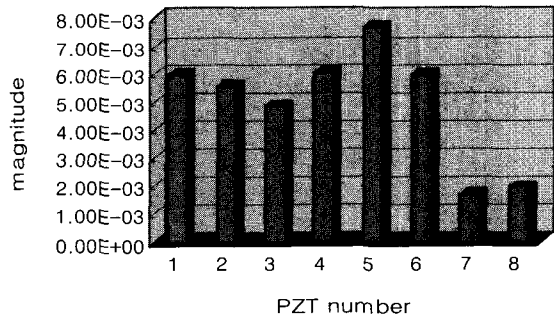


Fig. 5 Comparison of the PZT locations (horizontal direction)

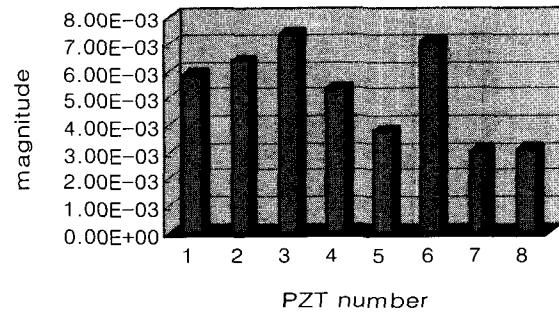


Fig. 6 Comparison of the PZT locations (vertical direction)

진하였고 5개의 가속도계 부착위치에서 진동 주파수를 측정하였다. 500 Hz 저주파 통과필터를 통과한 각각의 가속도신호 중에서 큰 진폭을 가진 순으로 10개를 뽑아서 비교하였다.

Fig. 5와 Fig. 6은 횡 종 방향 별로 8개의 피에조 가진기로 각각 가진 할 때 5개의 가속도계를 통해 들어오는 10개의 주된 주파수 성분의 평균을 나타낸다. Fig. 5에서 횡 방향으로 피에조 가진기를 부착하였을 때 평판을 가장 많이 진동하게 하는 피에조 가진기 부착 위치는 5번과 4번 위치이다. 역시, Fig. 6의 결과를 보면 종 방향으로 피에조 가진기를 부착하였을 때 평판을 가장 많이 진동하게 하는 피에조 가진기 부착 위치는 6번과 3번 위치이다. 횡 방향의 4번 위치와 종 방향의 6번 위치는 앞에서 제안한 최적 부착 위치와 동일한 위치로써 피에조 가진기의 최적 부착 위치를 이론적으로 유도한 결과를 실험에 의해 확인하였다.

2.3 가속도계의 부착 위치 선정

방사음 예측 필터는 구조물에 부착된 가속도계 신호와 공간상에 음압을 예측하고자 하는 지점의 음압 신호를 이용하여 구성된다. 그러므로, 방사되는 음압과의 연관성을 고려하여 가속도계의 부착위치가 정해지면 좀더 정확한 방사음을 예측할 수 있다.

구조물의 진동-소음 연관관계를 나타내는 주요 변수로서 방사효율이 있는데, 방사효율은 진동체 표면이 유체를 향하여 얼마나 효과적으로 에너지를 방사하는가를 나타내는 척도로서 진동하는 평판의 모드와 연관되어 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma_{mn} = \frac{(\text{Sound Power})_{\text{actual}}}{(\text{Sound Power})_{\text{plane}}} = \frac{W}{\rho_0^c \langle v_{mn}^2 \rangle S} \quad (2)$$

여기서, m, n 은 평판의 각 방향 모드를 나타내고, W 는 방사된 음향파위를, ρ_0 는 공기의 밀도, c 는 음속, S 는 진동체의 표면적, $\langle v_{mn}^2 \rangle$ 는 시간-공간 평균 모달 속도를 의미한다. 따라서, 방사효율은 진동체 표면이 피스톤 진동과 같이 일정한 표면속도로써 진동 시 방사된 음향파위와 실제로 방사된 음향파위의 비가 된다. 결국, 구조물의 모드에 따른 방사효율을 고려해 보면 방사효율이 높은 모드에서는 진동에 의해 발생한 진동에너지의 많은 부분이 방사음으로 방사된다는 것을 알 수 있다.

Wallace에 의해 평면구조물이 진동할 때의 방사효율이 다음과 같이 표현될 수 있다는 것이 밝혀져 있다.⁽¹⁰⁾

m, n 이 홀수 일 때

$$\sigma_{mn} \approx \frac{32(ka)^2}{m^2 n^2 \pi^5} \quad (3)$$

m 이 홀수, n 이 짝수 일 때

$$\sigma_{mn} \approx \frac{8(ka)^2}{3m^2 n^2 \pi^5} \quad (4)$$

m, n 이 짝수 일 때

$$\sigma_{mn} \approx \frac{2(ka)^2}{15m^2 n^2 \pi^5} \quad (5)$$

여기서, k 는 파수(wave number)이고 a 는 평판의 한 변의 길이이다.

위의 수식에서 평판의 각 방향 모드가 모두 홀수가 될 때 방사효율이 높으므로 평판의 각 방향의 모드가 모두 홀수인 경우 이들을 동시에 측정할 수 있는 위치에 가속도계를 부착해야 한다. 따라서, 2개의 가속도계를 한 개는 평판의 중앙부위에 부착하였고 다른 하나는 평판의 대각선 방향으로 1/4되는 지점에 부착하였다. 이러한 조건을 만족하는 가속도계 부착 위치를 Fig. 7에 나타내었다.

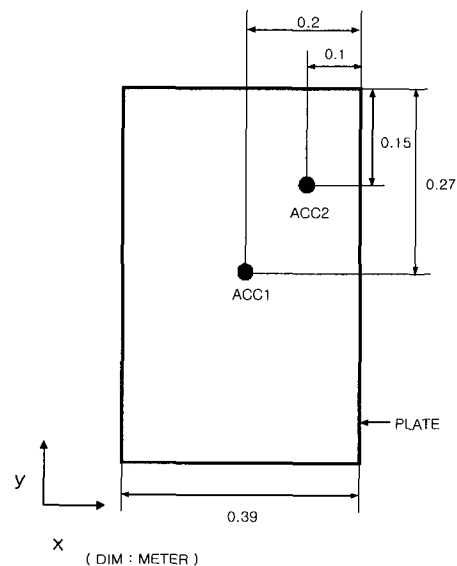


Fig. 7 Locations of the accelerometers

2.4 가속도계의 부착 위치 평가

앞에서 제안한 가속도계의 부착 위치를 평가하기 위하여 Rayleigh 적분식⁽¹¹⁾을 통해 평판 위의 9개 지점의 가속도계로부터 방사 음압을 예측한 것과 제안한 2점의 가속도계로부터의 예측한 음압 그리고, 그 외의 다른 2지점의 가속도계에서 예측한 음압을 비교하였다.

본 연구에서 사용한 4변 고정된 평판의 진동에 의해 방사되는 음압을 예측하기 위해 진동하는 평판의 중앙의 9개 지점(case 1)과 제안한 2지점(case 2) 그리고, 임의의 2지점들(case 3~case 5)의 속도를 측정하여 방사음을 예측하였다.

Fig. 8은 평판의 측정 지점을 나타내고 Fig. 9는 각 측정 지점에 따른 예측 방사음의 분포를 나타내며, Fig. 10은 예측 방사음의 오버올 레벨 값을 나타낸다. 이로부터 제안한 2개 지점의 속도에 의해 예측된 음압이 다른 2개 지점에서 예측된 음압들 보다 9개 지점의 방사음 예측치에 근접함을 알 수 있으며, 제안된 2개 지점이 다른 지점에 비해 예측하기 좋은 위치임을 알 수 있다.

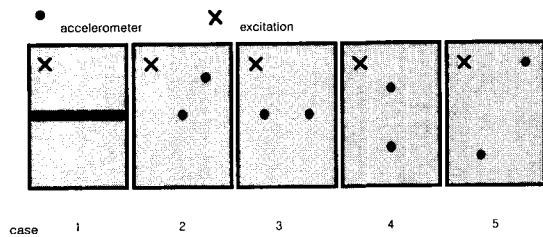


Fig. 8 Positions of the accelerometers

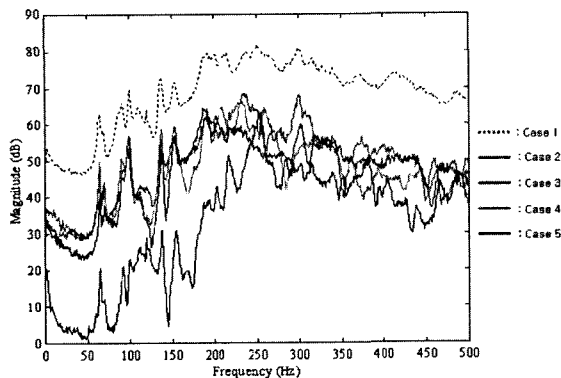


Fig. 9 Estimation of the radiated sound pressure

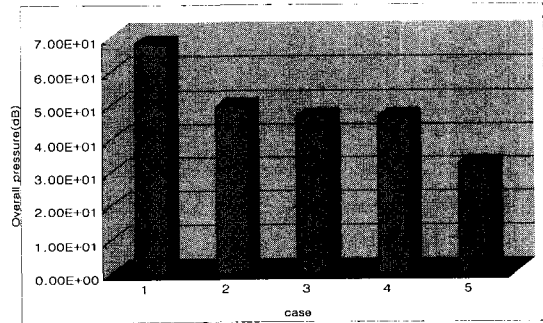


Fig. 10 Estimation of the overall radiated sound pressure

3. 방사음 예측필터를 이용한 방사소음제어⁽¹²⁾

시간영역에서 평판의 진동에 의한 원거리 방사음압을 예측하기 위해 이산 충격응답필터 (discrete impulse response filter)를 사용한다. 원거리 방사음압은 평판에 부착된 가속도계 신호를 이산 충격응답필터(진동-음향 경로 필터)에 통과시킨 신호로서 다음과 같이 예측된다.

$$y(k) = \mathbf{U}^T \mathbf{X}(k) \tag{6}$$

여기서, \mathbf{U} 는 각 열이 N_s 개의 필터계수를 가지는 열 벡터이며 $\mathbf{X}(k)$ 는 k 번째 시간에서 가속도 신호인 입력 열 벡터로써 다음과 같다

$$\mathbf{U} = \begin{Bmatrix} \{U^1\} \\ \vdots \\ \{U^i\} \\ \vdots \\ \{U^{N_s}\} \end{Bmatrix} \tag{7}$$

측정된 음압과 센서의 출력의 차이인 오차를 최소화함으로써 방사음압을 예측하는 필터 \mathbf{U} 를 구할 수 있다. 필터 \mathbf{U} 의 계수를 구하기 위해 LMS알고리즘을 도입한다. 음압과 센서출력의 차이인 오차신호 $e(k)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} e(k) &= d(k) - y(k) = d(k) - \mathbf{X}^T(k) \mathbf{U} \\ &= d(k) - \mathbf{U}^T \mathbf{X}(k) \end{aligned} \tag{8}$$

여기서, $\mathbf{X}(k)$ 와 \mathbf{U} 는 $M = \sum_{i=1}^{N_s} N_i$ 의 요소를 갖고 있으므로 각각 $X_m(k)$, $U_m(k=1, \dots, K)$ 로 나타낼 수 있다.

그러므로 식 (8)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$e(k) = d(k) - \sum_{i=1}^{N_s} U_i x^i(k-i) \quad (9)$$

$$= d(k) - \sum_{m=1}^M U_m X_m(k)$$

최소화 되어야 할 목적함수는 오차신호의 평균자승으로서 다음과 같다.

$$J(U_m) = E\{e^2(k)\}$$

$$= E\{d^2(k) - 2E\{d(k)\mathbf{X}(k)\}\mathbf{U} + \mathbf{U}^T E\{\mathbf{x}(k)\mathbf{X}^T(k)\}\mathbf{U}\} \quad (10)$$

식 (10)은 필터계수 U_m 의 2차 함수 형태이므로 목적함수 $J(U_m)$ 을 U_m 에 대한 미분에 의해 하나의 최적해를 구할 수 있다.

$$\frac{\partial J}{\partial U_m}(U_m) = 2E\left\{e(k) \frac{\partial e(k)}{\partial U_m}\right\} = 2E\{3(k)X_m(k)\} \quad (11)$$

여기서, 목적함수 $J(U_m)$ 를 최소로 하는 필터계수 U_m 을 적응시켜나감으로써 해를 구하기 위해 LMS 알고리즘을 적용하면 다음과 같이 표현된다.

$$U_m(k+1) = U_m(k) + 2\mu e(k)X_m(k) \quad (12)$$

여기서, μ 는 안정성과 수렴속도를 조정하는 수렴계수이다. 방사음 예측필터를 이용한 진동-음향경로의 모델링을 Fig. 11에 나타내었다.

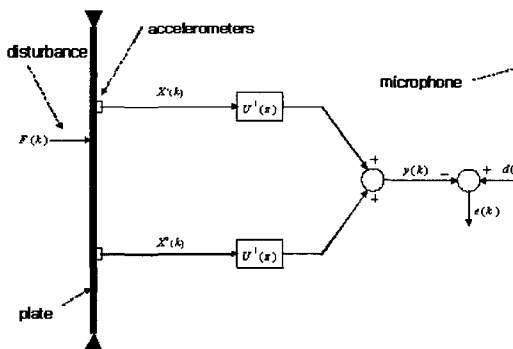


Fig. 11 Configuration of vibro-acoustic modeling using the acoustic prediction filter

4. 능동구조소음향제어 실험결과

4.1 실험장치 및 방법

외력 가진기로는 셰이커(shaker, B&K Type 4810)를 사용했고, 평판에 제어력을 가하기 위해 피에조 세라믹(PZT, PIEZOSYSTEMS T220-A4-301)이 사용되었다. 실험에 사용된 평판과 PZT의 제원을 Table 1에 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 자리에 30 cm 위에 설치하였다.

외력 가진기, PZT, 센서들의 부착위치를 Fig. 12에 나타내었다. 외력 가진 신호는 평판의 고유진동수 중 하나인 195 Hz를 신호발생기 (function generator, LEADER LFG-1300)를 통해 생성하였다. 모든 입·출력신호는 500 Hz 저역통과필터(low pass filter, KRON-HITE 3944)를 통과하였고 걸었다. 제어신호는 피에조 세라믹 증폭기(PZT amp. 출력 170 V)에 의해 증폭되었으며, 오실로스코프 (oscilloscope,

Table 1 Dimensions of the plate and PZT

Dimension	Aluminum plate	PZT
Length	0.59 m	0.0381 m
Width	0.39 m	0.0127 m
Thickness	0.0004 m	0.000508 m

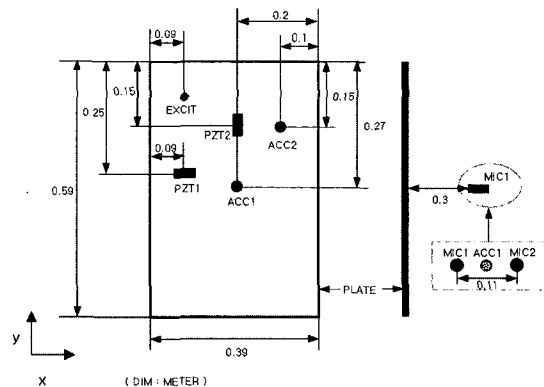


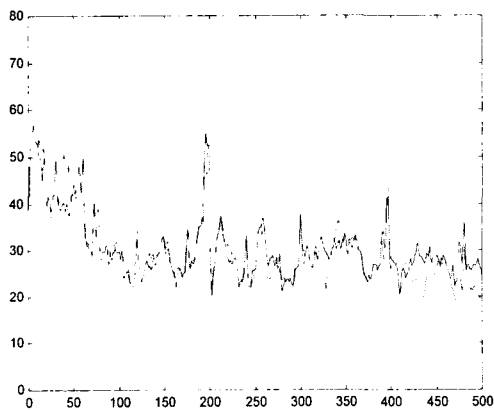
Fig. 12 Schematic diagram of the plate

HP54503A)는 센서신호를 모니터링하기 위해 사용되었다. 또한, FFT분석기 (FFT analyzer, scientific atlanta SA390)는 센서신호의 주파수분석을 위해 사용되었다. 제어는 TMS320C30 DSP보드(TI)가 내장된 486급 컴퓨터에서 수행하였다

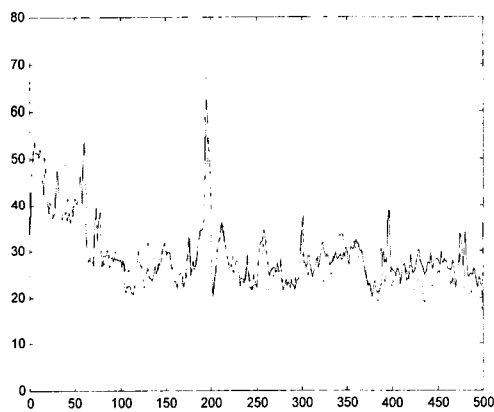
4.2 결과 및 고찰

가진 주파수는 평판의 공진주파수중에서 다른 공진 주파수보다 방사 음압에 대한 기여도가 큰 195 Hz를 가진 주파수로 선정하였다.

Fig. 13에 능동구조소음제어 전·후의 결과를 나타내었다. 두 개의 마이크로폰에서 각각 7 dB와 6 dB의 저감 효과를 나타내고 전체적으로 약 6 dB의 저감 효과를 나타내고 있다.



(a) Microphone 1



(b) Microphone 2

(---- : before control, ——— : after control)

Fig. 13 Error signals of the ASAC using the acoustic prediction filter (195 Hz)

5. 결론

본 연구에서는 구조물의 진동에 의해 발생한 방사 소음의 능동제어를 위해 구조 변환기의 위치를 결정하여 능동구조음향제어를 수행한 결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 제안된 피에조 가진기의 제어 감도식에 의하여, PZT의 부착위치를 선정할 수 있었고 부착위치가 타당함을 실험적으로 검증할 수 있었다.

(2) 가속도계 부착위치를 평판의 정 중앙과 대각선 길이 방향의 1/4되는 지점의 2군데로 결정할 수 있었으며 Rayleigh 적분식을 이용한 시뮬레이션을 통해 부착위치의 타당성을 입증하였다.

(3) 195 Hz의 정현파 가진에 의한 능동구조 소음제어 실험 결과로부터 1번 마이크로폰에서 7 dB, 2번 마이크로폰에서 6 dB 저감되었음을 확인하였다.

참고 문헌

(1) Fuller, C.R., 1991, "Experiments on Active Control of Sound Radiation From a Panel Using a Piezoceramic Actuator", *Journal of Sound and Vibration*, Vol 150, No. 2, pp. 179~190.

(2) 오재용, 김홍섭, 손동구, 1996, "능동배기소음제어용 능동형 머플러의 개발 동향", *한국소음진동공학회논문집*, 제 5 권, 제 4 호, pp. 468~472.

(3) 강영규, 구근희, 박현철, 2001, "압전 세라믹을 이용한 지능복합적층판의 강제진동의 능동제어", *한국소음진동공학회논문집*, 제 11 권, 제 6 호, pp. 193~199

(4) Kim, H. S., Hong, J. S., and Oh, J. E., 1998, "Active Noise Control with the Active Muffler in Automotive Exhaust Systems", *JSME International, Series C*, Vol. 41, No. 2, pp. 178~183.

(5) Clark R. L. and Fuller, C. R., 1992, "Experiments on Active Control of Structurally Radiated Sound Using Multiple Piezoceramic Actuators" *J. Acoust. Soc. Am.*, 97(6), pp. 3313~3320.

(6) Clark R. L. and Fuller C. R., 1991, "Control of Sound Radiation with Adaptive Structures", *J.*

Intelligent Mater. Systems Structures 2(3), pp. 431~452.

(7) Fuller, C. R., Hansen, C. H. and Snyder, S. D., 1989, "Active Control of Structurally Radiated Noise Using Piezo-ceramic Actuators", *Inter-Noise* 89, pp. 509~511.

(8) Tzou, H. S., 1993, "A New Distributed Sensor and Actuator Theory for Intelligent Shells", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 53, No. 2, pp. 335~349.

(9) Park, S. H., 1998, "Exterior Radiated Noise Reduction of Plate with Multi-channel Active

Control Algorithm", Thesis of Hanyang University.

(10) Wallace, 1972, "Radiation Resistance of a Rectangular Panel", *Journal of the Acoustical Society of America*, No. 51, pp. 946~952.

(11) Kim, H. S., Seo, D. W., Kim, S. H. Oh, J. E., 2000, "Application of Wave-number Sensing Technique for the Prediction of Radiated Sound in the Structural Acoustic System", *JSME International Journal*, Series C, Vol. 43, No. 1, pp. 11~18, (2000.3)

(12) Kuo, S. M., Morgan, D. R., 1996, *Active Noise Control Systems*, John Wiley & Sons, Inc..