

구조물에서 방사되는 소음을 저감하기 위한 능동구조음향제어

홍진석* · 오재응†

(2001년 1월 31일 접수, 2001년 6월 19일 심사완료)

Active Structural Acoustic Control for Reduction of Radiated Sound from Structure

Jin-Seok Hong and Jae-Eung Oh

Key Words: Active Structural Acoustic Control(능동구조음향제어), Radiated Sound(방사소음), Filtered-x LMS Algorithm

Abstract

Active control of sound radiation from a vibrating rectangular plate by a steady-state harmonic point force disturbance is experimentally studied. Structural excitation is achieved by two piezoceramic actuators mounted on 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 approach is based on a multi-channel filtered-x LMS algorithm. The results shows that attenuation of sound levels of 11dB, 10dB is achieved.

기호설명

C : 액추에이터와 오차센서사이의 무한임펄스응답필터

d : 원하는 응답

e : 오차신호

J : 제어시스템의 가격함수

L : 오차센서의 개수

M : 가진기의 개수

N_d : 구조센서의 개수

S : 출력 y 에서 오차 e 까지의 부가경로

S_a : 압전세라믹의 제어감도

W : 가중 벡터

X : 입력신호 벡터

x : 평판의 좌표

y : (1) 출력 신호
(2) 평판의 좌표

μ : 수렴계수

U : 진동-음향 경로의 가중 벡터

V_a : PZT가진기에 가해지는 전압

w : 평판의 두께방향 변위

w_n : 평판의 모달 진폭

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

* 회원, 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

† 책임저자, 회원, 한양대학교 공과대학 기계공학부

E-mail : jeoh@ihanyang.ac.kr

TEL : (02)2290-0452 FAX : (02)2299-3153

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 왔다.^(1,2) 진동하는 구조물에 의해 방사되는 소음의 능동제어는 제어력에 따라 2가지 방식으로 분류된다.⁽³⁾ 첫 번째는 부가음원을 사용한 제어로 지금까지 연구되어온 방식이다. 이 방식은 음원이 복잡하고 평면에 분포되어 있는 경우일 때 전역적인 소음제어를 수행하기 위해 다수의 음향제어력이 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 에러신호의 성질에 따라 2가지로 나누어지며, 마이크로폰을 통하여 측정된 방사음압신호를 이용하는 방식⁽⁴⁾과 가속도계등을 통하여 측정된 구조물의 진동신호를 이용하는 방식이 있다. 마이크로폰을 설치하여 방사소음을 줄이는 방식은 소음을 저감시키고자 하는 위치 모두에 마이크로폰을 설치해야 하므로 비용 및 설치상 어려운점 등이 있어 이를 극복할 수 있는 구조물의 진동을 계측하여 방사소음을 저감하는 방식에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽⁵⁾

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

2. 능동구조음향제어

2.1 다채널 filtered-x LMS 알고리즘

L개의 오차센서와 M개의 가진기를 사용한 제어계의 경우 목적함수를 다음과 같이 평균자승오차로 표현할 수 있다.⁽⁶⁾

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

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

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

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.

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

여기서 μ 는 수렴계수이다.

본 연구에 사용된 다채널 filtered-x LMS 알

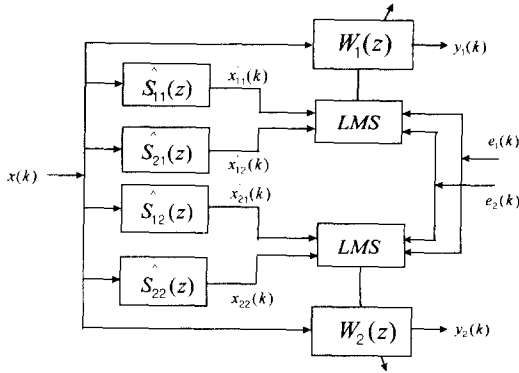


Fig. 1 Block diagram of the multi-channel filtered-x LMS algorithm

고리들은 오차센서와 가진기가 2개이므로 Fig.1과 같다.

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

2.2 진동-소음경로의 모델링에 의한 방사음 예측

평판진동에 의한 원거리 방사음압을 예측하기 위해 이산충격응답필터 (discrete impulse response filter)를 사용한다. 평판에 부착된 가속도계 신호를 이산 충격응답필터(진동-음향 경로 필터)로 필터링한 신호로서 방사음압을 예측할 수 있다.

$$y(n) = U^T X(n) = \sum_{l=0}^L U_l x(n-l) \quad (5)$$

$$U = [U_0 U_1 \dots U_L]^T \quad (6)$$

여기서, U 는 각 열이 필터계수인 열벡터이다.

$$X = [x(n) x(n-1) \dots x(n-L)]^T \quad (7)$$

여기서, $X(n)$ 은 입력 필터 벡터이다. 위 수식을 이용하여 센서 출력 $y(n)$ 을 나타내면 다음 식과 같다.

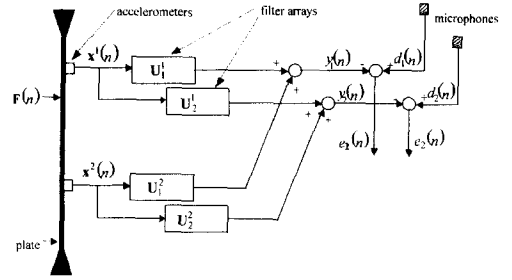


Fig. 2 Vibro-acoustic path configuration applied to a plate

$$y(n) = \sum_{i=1}^{N_s} U^i T X^i(n) \quad (8)$$

여기서, $X^i(n)$ 는 i 번째 샘플된 가속도 신호이고, U^i 는 i 번째 가속도계와 관계있는 FIR필터의 충격응답이다. 식 (8)을 다수의 센서로 확장하면 j 번째 출력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_j(n) = \sum_{i=1}^{N_s} U_j^i T X^i(n) \quad (9)$$

여기서, $U_j^i(n)$ 은 j 번째 필터의 i 번째 충격응답을 나타낸다. 식 (10)에서 $y_j(n)$ 과 예측하고자 하는 방사음 $d_j(n)$ 의 차이가 오차 $e_j(n)$ 이 된다. $e_j(n)$ 최소가 되게 하는 $U_j^i(n)$ 을 찾기 위해 LMS(Least Mean Square) 알고리즘을 이용하면 식 (11)과 같다.

$$e_j(n) = d_j(n) - \sum_{i=1}^{N_s} \left\{ \sum_{p=1}^{N_s-1} U_p^i X^i(n-p) \right\} \quad (10)$$

$$= d_j(n) - \sum_{k=1}^K U_k X_k(n)$$

$$U_k(n+1) = U_k(n) + 2\mu e(n) X_k(n) \quad (11)$$

결국, 진동-음향경로가 모델링 되면 식 (9)에 의해 가속도신호 $X^i(n)$ 로 방사음을 예측할 수 있다. Fig. 2는 진동-음향경로를 모델링하기 위한 구성도를 나타낸다.

2.3 압전가진기 부착위치 선정
평판의 변위가 다음과 같다면

$$w(x, y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} w_n(x, y) x_n(t) \quad (12)$$

압전가진기(PZT)의 제어감도 S_a 는 다음과 같다.⁽⁷⁾

$$S_a = V_a \sum x_n \int_A \nabla^2 w dA \quad (13)$$

여기서, V_a : voltage applied to the PZT actuator
 A : area of plate

식 (13)의 제어감도식을 4변 고정된 평판에 적용하여 4차 모드까지의 제어감도를 고려하여 제어감도가 가장 큰 부위를 압전가진기 부착위치로 Fig. 3과 같이 선정하였다.

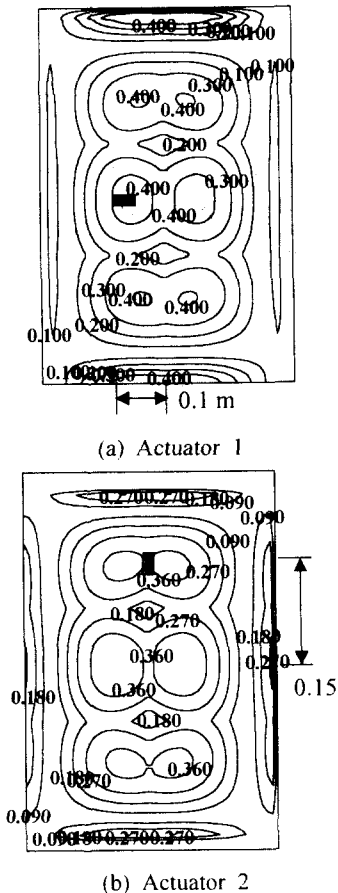


Fig. 3 Optimal locations of piezo actuators

3. 평판 방사소음제어 실험

3.1 실험 장치 및 방법

Fig. 4은 본 연구의 실험장치 구성도이다. 외력 가진기로는 셰이커(shaker, B&K Type 4810)를 사용했고, 평판에 제어력을 가하기 위해 피에조세라믹(PZT, PIEZOSYSTEMS T220-A4-301)이 사용되었다. 실험에 사용된 평판의 재료와 PZT의 재원을 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 40cm 위에 설치하였다.

PZT는 평판에서 제어감도가 좋은 위치로 선정하였다. 외력가진기, PZT, 센서들의 부착위치를 Fig.5에 나타내었다. 외력가진신호는 평판의 고유진동수 중 하나인 188Hz를 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 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.

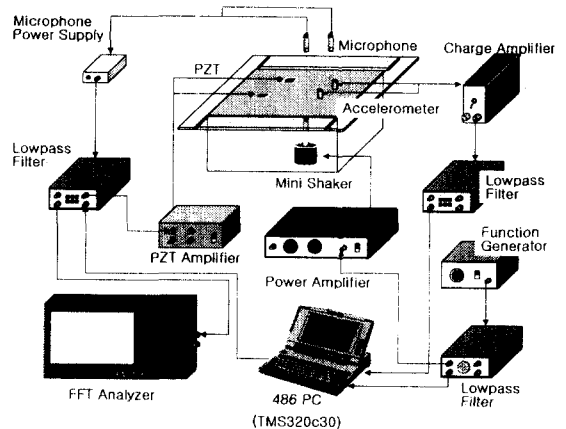


Fig. 4 Experimental setup

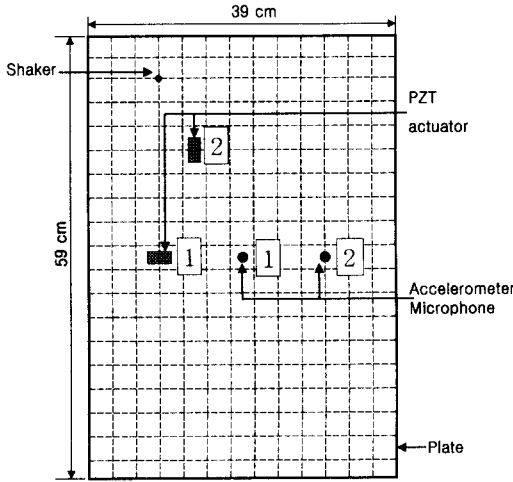


Fig. 5 Plate setup

Table 1 Dimensions of the plate and PZT

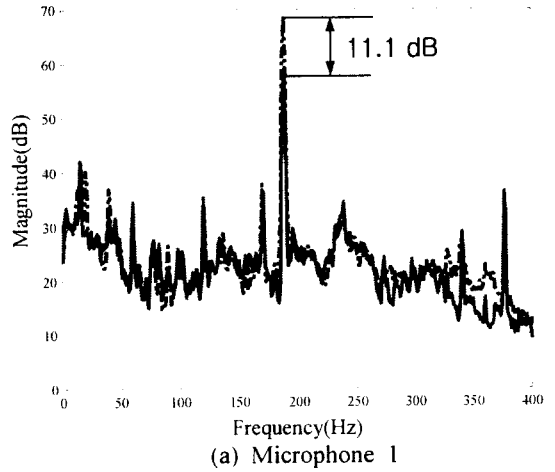
(단위 : m)

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

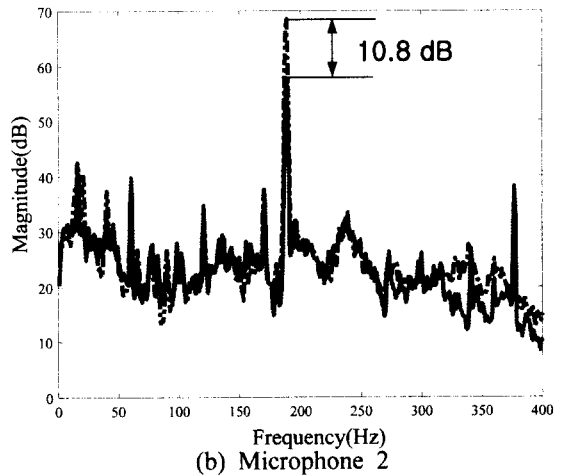
제어알고리즘은 어셈블리 언어로 작성되었으며 다운로드 프로그램은 C언어로 작성되었다. 실험은 우선 평판에 백색잡음을 가하여 평판의 고유진동수와 방사되는 음압의 주파수특성을 알아낸 후, 평판의 고유진동수 중 방사음압에 영향을 미치는 주파수를 찾아내어 가진 주파수로 결정했다. PZT가진기와 가속도계 사이의 예러경로, 가속도계와 마이크로폰사이의 진동-소음경로를 각각 FIR필터로 모델링한 후 제어를 수행하였다.

3.2 결과 및 고찰

백색잡음으로 가진하였을 때 마이크로폰에 측정된 방사소음 중 188Hz가 진동·소음 모두에서 진폭이 크고 기여도가 높은 주파수이었기 때문에 가진주파수로 선정하였다. Fig. 6에 188Hz 정현파로 가진할 때 방사음압의 저감결과를 나타내었다. 결과로부터 각 마이크로폰에서 방사음압이 저감됨을 알 수 있다.



(a) Microphone 1



(b) Microphone 2

Fig. 6 Control results (sinusoidal 188Hz)
(- - - : without control, — : with control)

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 제어 결과를 보면 제어 전과 비교하여 1번 마이크로폰에서 11dB 저감되었고, 2번 마이크로폰에서 10dB 저감되었다.

후 기

이 논문은 2000년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-2000-041-E00070)

참고문헌

- (1) 박수홍, 김홍섭, 홍진석, 오재웅, 1997, "Filtered-x LMS 알고리즘을 이용한 유연한 외팔보의 능동진동제어," 한국정밀공학회 논문집, 제14권, 제3호, pp. 107~113.
- (2) 김홍섭, 홍진석, 오재웅, 1997, "덕트에서 온라인 적응 알고리즘을 이용한 능동소음 제어," 대한기계학회 논문집, 제21권 제8호, pp. 1332~1338.
- (3) Fuller, Elliott, Nelson, 1996, Active Control of Vibration, ACADEMIC PRESS.
- (4) 홍진석, 박수홍, 김홍섭, 오재웅, 정진태, 2000, "다채널제어 알고리즘을 이용한 음향가진된 밀폐계 평판의 능동진동제어," 대한기계학회 논문집, A권 제24권 제6호, pp. 1390~1397.
- (5) Robert L. Clark and Chris R. Fuller, 1992, "Experiments on active control of structurally radiated sound using multiple piezoceramic actuators," J. Acoust. Soc. Am., 97(6), pp. 3313~3320
- (6) Sen M. Kuo, Dennis R. Morgan. Active Noise Control Systems, John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- (7) 박수홍, 1998, "다채널 능동제어기법에 의한 밀폐계 평판의 외부 방사소음저감," 공학박사학위논문, 한양대학교.