

피에조 세라믹을 이용한 유연한 평판의 능동진동제어

^o박수홍, 김홍섭, 홍진석, 오재웅

Active Vibration Control of Flexible Plate using Piezo Ceramic

^oSoo-Hong Park, Heung-Seob Kim, Jin-Seok Hong, Jae-Eung Oh

ABSTRACT

This paper presents the active control of a flexible plate vibration. The plate was excited by white noise point force and the control was performed by one or two piezo ceramic actuator bonded to the surface of the plate. An adaptive controller based on *filtered-x or multiple filtered-x LMS* algorithm was used and the controller was defined by minimizing the square of the response of error sensor. In the experiment, PZT sensor was used as an error sensor while white noise was applied as a disturbance. In the case of *multiple channel control*, more than 22 dB of vibration reduction was achieved. Results indicate that the vibration of a flexible plate could be controlled effectively when the piezo ceramic actuator was used with *multiple filtered-x LMS* algorithm.

1. 서론

구조물에 대한 저주파의 진동은 운송수단, 가전제품, 군용장비, 항공장비와 같은 많은 종류의 경량 유연 구조물에 있어서 지속적인 문제점으로 부각되어 왔다. 이런 바람직하지 않는 진동을 제어하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있는데 구조물에 감쇠를 증가시키고 질량이나 강성을 추가하는 기존의 수동적 방법은 제어 효율이나 가격 면에서 단점을 갖게 되므로 이에 대한 능동진동제어(Active Vibration Control)방법이 최근 활발히 연구되고 있다.^[1]

또한 능동 진동 제어를 효과적으로 수행하기 위해서는 적절한 가진 시스템이 선정되어야 하는데 기존의 점 가진 시스템의 형태는 높은 감쇠율을 가지고 있으나 지지부에 대한 반작용력을 받는 등의 결점을 가지고 있다.

이러한 이유로 최근 압전세라믹이라 불리는 PZT(lead zirconate titanate)와 폴리머 계통의 압전 필름인 PVDF(polyvinylidene fluoride)와 같은 압전재료들이 분포 특성, 가격, 효율, 부피 등의 측면에서 기존의 가진 시스템에 비하여 중요한 장점을 가지고 있어 더욱 현실적인 가진기로서 연구되고 있다.^[2]

한편, 최근에 능동 제어로 구조물의 비선형성에 주목한 뉴럴이나 퍼지등의 알고리즘을 이용한 지능형 제어나 고속의 신호 처리 보드를 사용하고 최소 평균 자승(LMS)알고리즘을 이용한 제어가 연구되고 있다.^{[3][4][5]} 본 논문에서의 최소 평균 자승 알고리즘을 이용한 능동 제어는 외란 입력에 의해 생성된 출력을 없애기 위하여 부차적인 제어력을 추가하는 방식이다.^[6] Gibbs와 Fuller가 PZT를 이용하고 최소 평균 자승(LMS) 알고리즘을 사용하여 정현파 외란 입력이 가해질 때의 유연한 빔의 진동 파워 흐름의 능동 제어를 실험적으로 연구하였다.^[7] GU 등은 압전 작동기와 PVDF 모달센서를 이용한 평판 진동의 능동제어 실험을 수행하였다. 단순 지지된 평판에 2개의 압전작동기와 성형된 PVDF 모달센서

오재웅 : 한양대학교 자동차공학과

박수홍, 홍진석, 김홍섭 : 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

가 부착되었다. 다입력/다출력 *filtered-x LMS* 알고리즘에 기반을 둔 2채널 적응제어기가 사용되었다. 비교를 위해 오차 센서로 가속도계를 사용하여 비교실험을 행한 결과 가속도계 같은 점-센서 보다 PVDF 모달센서가 구조 모드를 제어할 때 보다 우위에 있음을 보였다.^[8] Koshigoe 등은 평판의 진동제어를 위해 압전가진기가 부착된 평판의 운동방정식을 유도하였다.^[9] 국내에서도 최근에 유연한 구조물의 능동 제어에 대한 연구가 진행 중인데 적응 제어 알고리즘을 이용한 실시간 제어에 대한 연구는 기타의 능동 진동 제어 연구 사례에 비해 적은 편이다.

본 연구에서는 실험적으로 유연한 구조물의 진동 제어기로 분포제어기인 PZT를 사용하고 *filtered-x LMS* 알고리즘과 고속의 신호처리보드를 이용하여 백색 잡음 외란 입력을 받는 유연한 평판의 진동을 실시간으로 제어할 수 있는 적응 제어 시스템을 구성하였다. 실험은 평판의 자유단 모서리부분에 수직하게 외력 가진기를 설치하여 가진하고 고정단에서 일정 거리에 PZT 작동기를 설치하고 PZT 작동기와 고정단 사이에 진동 측정점을 설정하고 여기에 PZT 센서(PZT sensor)를 오차센서로 설치한 후 이 위치에서의 진동을 저감시키는 것을 목적으로 하였다. 이 실험을 위해 먼저 평판계(보와 PZT 작동기가 부착된 계)의 전달 함수와 고유진동수를 실험적으로 구하였다. 외력가진기를 백색 잡음으로 가진한 후, 진동 측정점에서 진동을 측정하고 *filtered-x LMS* 또는 *multiple filtered-x LMS* 알고리즘과 고속 신호처리 프로세서(TMS320c30)를 사용한 제어기를 이용하여 진동 변위 측정점에서의 진동을 감소시키는 실험을 수행하였다.

2. 능동 진동 제어 이론

본 연구에서의 평판계(평판에 PZT 작동기가 부착된 계)는 평판의 자유단에 진동 변위 입력원이 있고 다음에 제어를 위한 PZT 작동기가 있으며 진동 변위의 측정을 위한 오차 센서가 그 다음에 위치하는 기준입력→제어기→오차측정의 순으로 배치된 계이다. 이런 계의 오차 센서에서 계측된 신호는 진동원으로 인한, d_k , 그리고 이차 가진원으로 인한, y_k , 두 부분으로 구성된다.

이 신호들은 크기에서 동일하고 위상에서 반대이면 오차 센서에서의 진동은 없어지게 될 것이다.

$$e_k = d_k + y_k \quad (1)$$

여기서, e_k : k번째 오차 신호

d_k : k번째 진동원으로 인한 신호

s_k : k번째 이차 가진원 신호

k 번째에 오차 센서에서 계측된 이차 진동 신호는 k 번째에 제어기에서 보내진 신호는 아니다. 오히려, 제어 신호는 액추에이터의 특성 전달함수 A에 의해 수정되어지고, 액추에이터와 오차 센서사이의 한정된 거리로 인해 n 샘플이 지연되어 진다. 또한, 전체 오차 신호는 오차 센서 전달함수 M에 의해 수정되어 진다. 그러므로 계에 의해 받는 실제적인 오차 신호는 다음과 같다.

$$e_k = (d_k + W_{k-n}^T X_{k-n} A) M \quad (2)$$

여기서, W_{k-n} : k-n번째 가중 계수 벡터

X_{k-n} : k-n번째 기준 입력 신호 벡터

A: 액추에이터 전달함수

M: 오차 센서 전달함수

만약 신호가 정현파면 오차 센서와 제어 액추에이터의 전달 함수는 단순한 이득과 위상 이동으로 생각할 수 있다. 일반적인 광대역 진동의 경우, 그것들은 유한 임펄스 응답 필터로 생각할 수 있다. 식(2)을 단순화하기 위해서 k 번째의 필터링된 진동원 신호 G_k 그리고 필터링된 참조 신호 F_k 는 다음과 같이 정의한다.

$$G_k = d_k M, \quad F_k = X_{k-n} A M \quad (3)$$

순간 오차 신호에 근거한 경사 예측치는 다음과 같다.

$$\hat{\nabla}_k = \frac{\partial e_k^2}{\partial W_k} = 2 e_k F_k \quad (4)$$

여기서, $\hat{\nabla}_k$: 경사 예측치

따라서 수정된 LMS 알고리즘은 다음과 같다.

$$W_{k+1} = W_k - 2\mu e_k F_k \quad (5)$$

여기서, μ 는 수렴계수로 최적한 값은 다음으로 구할수 있다.

$$\mu = \frac{1}{\lambda_{\max}} \text{ or } \mu = \frac{1}{tr[R]} \quad (6)$$

여기서, λ_{\max} : 입력 자기 상관 행렬의
고유치 중 최대값

$R = E[X^T X]$: 입력 자기 상관 행렬
 $tr[R]$: R 의 대각요소의 합

식(5)에서 알고리즘의 가능한 수행의 블록선도는 Fig.1에서 보여 준다. 참조 신호, X_k 는 적용 알고리즘에서 사용되기 전에 액추에이터와 오차 센서 특성 함수의 예측치에서 포함된 n 샘플의 예측치에 의해 지연된다. 그러므로 계산은 필터링된 참조 신호의 예측치에 근거한다.

$$\hat{F}_k = X_{k-\hat{n}} \hat{A} \hat{M} \quad (7)$$

여기서, \hat{F}_k : k 번째 필터링된 참조 신호

$X_{k-\hat{n}}$: $k - \hat{n}$ 번째 기준 입력 벡터

\hat{A} : 예측된 액추에이터 전달함수

\hat{M} : 예측된 에러 센서 전달함수

그러므로 알고리즘의 실제적인 수행은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} W_{k+1} &= W_k - 2\mu e_k \hat{F}_k \\ &= W_k - 2\mu \hat{F}_k (G_k + W_{k-n}^T F_k) \\ &= W_k - 2\mu (\hat{F}_k G_k + \hat{F}_k F_k^T W_{k-n}) \end{aligned} \quad (8)$$

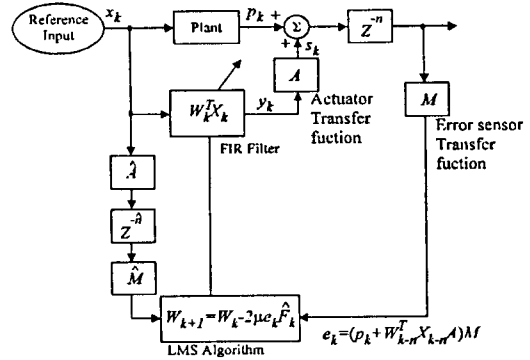


Fig. 1 Block diagram of the *Filtered-x LMS* algorithm used in practical implementation of active vibration control

Multiple Filtered-x LMS algorithm에 사용된 제어 알고리즘은 위의 *Filtered-x LMS* algorithm을 여러개 조합한 아래의 Fig. 2와 같다.

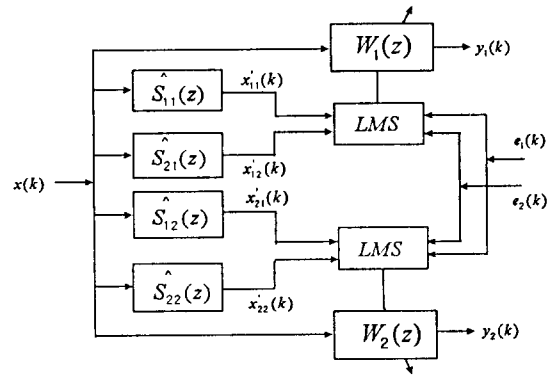


Fig. 2 Block diagram of the *Multiple Filtered-x LMS* algorithm used in practical implementation of active vibration control

3. 능동 진동 제어 실험

3.1 실험 장치 구성

본 연구의 실험 장치 구성도는 Fig.3과 같다. 실험에 사용된 평판계의 제원을 Table 1에 나타냈다. 외력은 B&K 4810 웨이커를 이용하여 평판의 모서리에 수직하게 점 가진을 하였다. 평판에 제어력을 가하기 위해 미국 Piezo Systems Inc. 사의 2-Layer Bending Element가 사용되었

으며, 제원을 Table 1에 나타냈다. PZT 작동기의 부착 위치와 에러 측정 위치를 Fig.3에 나타냈다. PZT 작동기와 오차 센서 위치는 제어기의 인과성(causality) 때문에 입력신호에서 거리를 두고 제어기를 배치했다. 즉, 기준 입력 신호가 제어기까지 전파되는 시간보다 DSP에서 제어 알고리즘을 수행한 후 제어 신호를 내보내는 시간이 더 짧아야하며, 이러한 이유로 *filtered-x* LMS알고리즘의 경우 일반적으로 가진기-작동기-에러 센서의 순서로 배치하게된다. 가진 신호는 각각 신호 발생기(function generator), B&K 1405 잡음 발생기(noise generator)로 발생시켰다. 가진 신호와 에러 센서 신호에 200Hz 저주파 통과 필터(lowpass filter)를 걸었다. 제어 신호는 PZT 증폭기(PZT amplifier)에 의해 증폭되었으며 오차 센서 신호는 PZT센서(PZT sensor)를 이용하여 측정되었다. HP 54503A 오실로스코프는 센서 신호의 모니터를 위해 사용되었으며, FFT 분석기(SA390)는 센서 신호의 주파수 분석을 위해 사용되었다. 제어는 TMS320c30 DSP Board가 장착된 486 IBM PC를 이용하여 수행하였다. Fig. 1의 외팔보 계의 모델링에 사용된 FIR(finite impulse response) 계수는 150차이고 샘플링 주파수는 1 kHz인 상태에서 적절한 모델링을 수행할수 있었다. 제어 알고리즘은 어셈블리 언어로 작성됐고 다운로드 프로그램은 C 언어로 작성됐다.

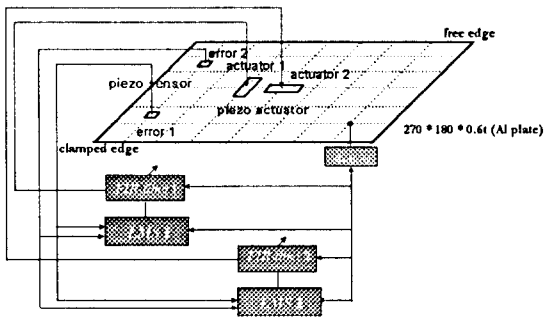


Fig. 3 Experimental apparatus for active vibration control

Table 1 Dimensions of the plate and PZT
(단위 : mm)

Dimensions	Aluminium Plate	PZT
Length	270	3.81
Width	180	12.7
Thickness	0.6	0.508

3.2 실험 방법

실험은 백색 잡음으로 가진할 때 단일채널 제어와 다채널 제어를 수행하여 에러 측정 위치에서 변위를 측정하여 제어 전·후의 결과를 비교하였다.

4. 제어 실험의 결과 및 고찰

알루미늄 평판의 모서리에 부착한 가진기로 백색 잡음 신호를 가하고 오차신호 측정 위치에서 PZT센서를 이용해 변위를 측정하여 구한 계의 전달함수를 Fig. 4에 나타내었다.

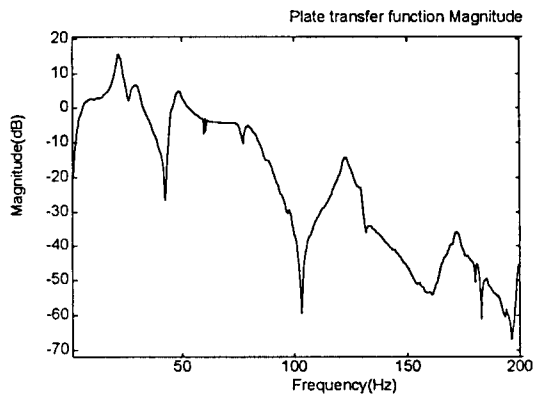


Fig. 4 Transfer function between shaker and error sensor 1

Fig. 5는 알루미늄 평판계의 오차센서 1 과 작동기 1의 조합에 의한 *Filtered-x LMS* 알고리즘에 의한 제어 결과를 오차센서1의 신호를 주파수 분석한 것이다. 실선부분은 제어전을 의미하며, 점선 부분은 제어후를 의미한다. 제어결과

1차 고유진동수에서 약 17 dB의 진동저감이 이루어 졌다.

Fig. 6은 알루미늄 평판계의 오차센서 2와 작동기 1의 조합에 의한 *Filtered-x LMS* 알고리즘에 의한 제어 결과를 오차센서2의 신호를 주파수 분석한 것이다. 제어결과 1차 고유진동수에서 약 13 dB의 진동저감이 이루어 졌다.

Fig. 7는 알루미늄 평판계의 오차센서 1, 2와 작동기1,2의 조합에 의한 *Multiple Filterd-x LMS* 알고리즘에 의한 제어 결과를 오차센서1의 신호를 주파수 분석한 것이다. 제어결과 1차 고유진동수에서 약 22 dB의 진동저감이 이루어 졌다.

Fig. 8는 알루미늄 평판계의 오차센서 1, 2와 작동기 1,2의 조합에 의한 *Multiple Filterd-x LMS* 알고리즘에 의한 제어 결과를 오차센서2의 신호를 주파수 분석한 것이다. 제어결과 1차 고유진동수에서 약 13 dB의 진동저감이 이루어 졌다.

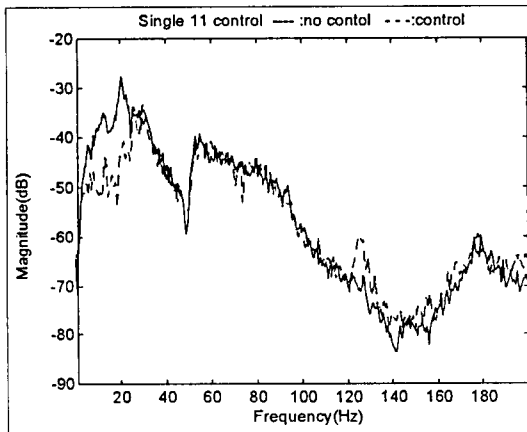


Fig. 5 Control results at error sensor 1 with *Filtered-x LMS* Algorithm

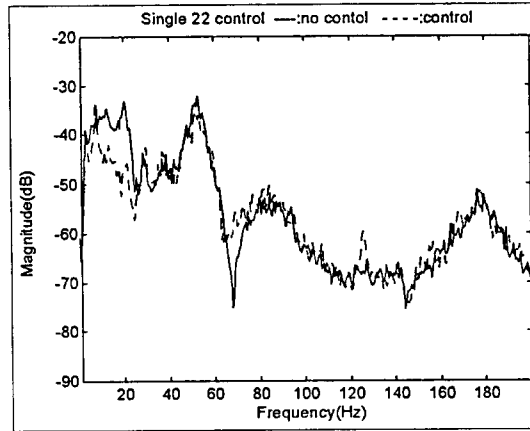


Fig. 6 Control results at error sensor 2 with *Filtered-x LMS* Algorithm

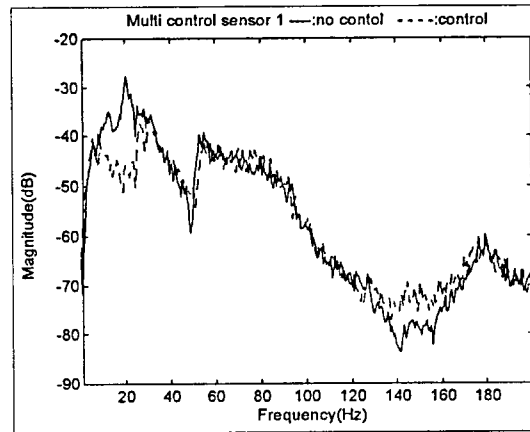


Fig. 7 Control results at error sensor 1 with *Multiple Filterd-x LMS* Algorithm

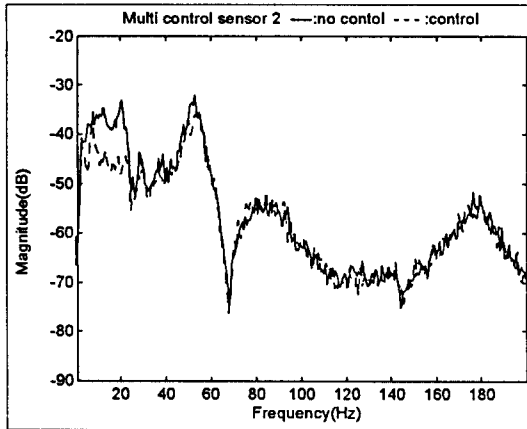


Fig. 8 Control results at error sensor 2 with *Multiple Filtered-x LMS* Algorithm

5. 결 론

이상과 같이 백색 잡음의 외란 입력을 받는 유연한 평판에 피에조 세라믹과 *filtered-x LMS* 또는 *Multiple filtered-x LMS* 알고리즘을 이용하여 실시간 능동 진동 제어를 수행한 결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 단일채널 제어의 경우 1차 고유진동수에서 13 ~ 17 dB 정도의 저감이 가능하였다.

둘째, 다채널 제어의 경우 1차 고유 진동수에서는 13 ~ 22 dB 정도의 진동 저감을 할 수 있었다.

셋째, 단일채널 및 다채널 모두 2차 이상의 고유진동수에서는 진동저감 효과가 미약한데 이것은 오차센서 및 작동기의 위치가 잘못 설정이 된 것으로 사료 된다.

넷째, PZT 작동기와 *Multiple filtered-x LMS* 알고리즘으로 구성된 적응 제어 시스템을 이용하여 유연 구조물의 저주파 진동을 효과적으로 저감 할 수 있었다.

향후, 평판의 능동 진동 제어 시뮬레이션에 의한 작동기 및 오차센서의 최적위치에 대한 연구가 기대된다.

1. A. Bas and S. Poh, "Performance of an active control system with piezoelectric actuators", *Journal of Sound & Vibration*, No.2, pp.327~343, 1988
2. Warren P. Mason, "Piezoelectricity, its history and applications", *J. Acoust. Soc. Am*, Vol.70(6), 1981
3. 신 준, "자기조정 학습계수 알고리즘을 이용한 소음 진동의 능동제어", 한양대학교 박사학위 논문, 1994
4. 김홍섭, "자동차 실내 엔진 소음의 능동제어에 관한 연구", 한양대학교 석사학위 논문, 1992
5. J. S. Vipperman, R. A. Burdisso and C. R. Fuller, "Active control of broadband structural vibration using the LMS adaptive algorithm", *Journal of Sound and Vibration*, Vol.166(2), pp.283-299, 1993
6. Bernard Widrow and Samuel D. Stearns, *Adaptive signal processing*, Prentice-Hall, 1985
7. Gary P. Gibbs and Chris R. Fuller, "Experiments on active control of vibrational power flow using piezoceramic actuators and sensors", AIAA, Paper 90-1132, pp. 2331-2339, 1990
8. V.V. Varadan, V.K. Varadan, X.Q. Bao, J.-H. Jeng and C.-C. Sung, "Active control of bending and torsional modes in truss structures", *Journal of Sound and Vibration*, Vol.167(2), pp.263-275, 1993
9. S. Koshigoe, J.W. Murdock, "A unified analysis of both active and passive damping for a plate with piezoelectric transducers", *J. Acoust. Soc. Am*, Vol. 93(1), 1993