

# o-F M 알고리즘을 이용한 외팔보의 능동 진동 제어 성능에 관한 연구 tud on the Performance of ctive Vi ration ontrol at antilevered eam

\*양인형<sup>1</sup>, 권오철<sup>2</sup>, 이해진<sup>2</sup>, 이정윤<sup>3</sup>, #오재응<sup>4</sup>

\*I. H. Yang<sup>1</sup>, O. C. Kwon<sup>2</sup>, H. J. Lee<sup>2</sup>, J. Y. Lee<sup>3</sup>, #J. E. Oh(jeoh@hanyang.ac.kr)<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 한양대학교 기계공학부, <sup>2</sup> 한양대학교 기계공학과, <sup>3</sup> 경기대학교 기계시스템디자인공학부, <sup>4</sup> 한양대학교 기계공학부

Key words : Active Vibration Control, Correlation FXLMS Algorithm, Secondary-Path Transfer Function

## 1. 서론

Filtered-x LMS (FXLMS) 알고리즘이 진동소음의 제어에 많이 적용되고 있다. 특히 FXLMS 알고리즘을 이용한 외팔보의 능동진동제어에 관한 연구는 오랜 기간 수행되어 왔다. 그러나 FXLMS 알고리즘은 수렴계수가 고정되어 있기 때문에 이 수렴계수가 작은 값일 때는 안정성은 보장할 수 있지만 수렴속도가 저하되고, 큰 값일 경우에는 수렴속도는 향상되지만 안정성이 저하되어 임의의 조건에서 발산할 가능성이 높아지는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하고 제어성능을 향상시키기 위해 새로운 적응제어기법인 Correlation FXLMS (Co-FXLMS) 알고리즘이 능동소음제어에 적용되었다. 하지만 능동진동제어에 대해서는 Co-FXLMS 알고리즘이 적용된 예가 없다. 따라서 본 연구에서는 외팔보를 이용하여 Co-FXLMS 알고리즘이 능동소음제어 뿐만 아니라 능동진동제어에서도 적용 가능함을 실험적으로 검증하고자 한다.

## 2. o-F M 알고리즘

앞먹임 FXLMS 알고리즘의 알고리즘은 다음과 같다.

$$x(n+1) = x(n) + \mu \hat{x}'(n) \quad (1)$$

$\mu$ 는 수렴계수이며, 적응필터  $\hat{x}'(n)$ 가 안정적으로 수렴하려면  $\mu$ 는 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

$$0 < \mu < \frac{2}{x}, \quad x = E[x^2(n)] \quad (2)$$

식(1)에 나타나 있듯이 FXLMS 알고리즘의 적응과정에서 수렴시간과 안정성은  $\mu$ 와  $\hat{x}'(n)$ 에 의존한다. 또한 FXLMS 알고리즘에서는 고정된 수렴계수를 사용하므로 참조신호의 파워가 시간에 따라 변하는 경우 정상적인 제어 성능을 나타내지 못한다. 따라서 이러한 점을 보완하기 위해 부가경로가 보상된 참조신호  $x'(n)$ 의 파워에 대해 수렴계수를 정규화하였다.

$$\mu(n) = \frac{\alpha}{\hat{x}'_x}, \quad (0 < \alpha < 2) \quad (3)$$

여기서,  $\alpha$ 는 정규화된 수렴계수이고,  $\hat{x}'_x$ 는  $x'(n)$ 의 파워에 대한 추정치이다.  $\hat{x}'_x$ 를 추정하는 가장 간단한 방법은  $x'^2(n)$ 에 대한 running-average 필터를 사용하는 것이다. 만약 running-average 필터의 차수가 적응 필터의 차수와 같다면 즉,  $L=M$  이면 다음과 같다.

$$\hat{x}'_x = \frac{1^T(n) \hat{x}'(n)}{L} \quad (4)$$

식(4)를 식(3)에 대입하면 다음과 같다.

$$\mu(n) = \frac{\alpha}{1^T(n) \hat{x}'(n)} \quad (5)$$

식(5)에서 수렴계수는  $\hat{x}'(n)=0$  일 경우 적응필터  $\hat{x}'(n)$ 가 발산하므로 미소량  $\delta$ 를 식(5)의 분모에 더해준 다음과 같다.

$$\mu(n) = \frac{\alpha}{\delta + 1^T(n) \hat{x}'(n)} \quad (6)$$

적응필터  $\hat{x}'(n)$ 의 계수 벡터인  $\hat{x}(n)$ 이 최적의 계수 벡터  $x^*(n)$ 로 수렴하면 오차신호  $d(n)$ 과 부가경로가 보상된 참조신호  $x'(n)$ 의 상호상관  $\hat{x}'_x(n)$ 은 0이 된다는 것이 Co-FXLMS 알고리즘의 기본 개념이며 식(6)의 수렴계수를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mu(n) = \frac{\alpha}{\delta + 1^T(n) \hat{x}'(n)} \quad (7)$$

$$\hat{x}(n) = \lambda \hat{x}(n-1) + (1-\lambda)x'(n) \quad (8)$$

여기서,  $\lambda$ 는 상수이고  $\lambda$ 은 0에서 1 사이의 상수이다. 그러므로 Co-FXLMS 알고리즘은 다음과 같다.

$$\hat{x}(n+1) = \lambda \hat{x}(n) + \frac{\alpha}{\delta + 1^T(n) \hat{x}'(n)} \hat{x}'(n) \quad (9)$$

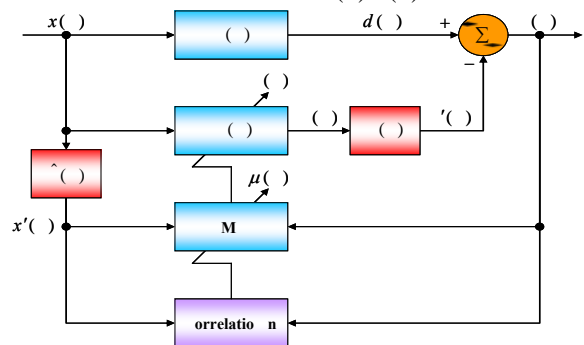


Fig. 1 loc diagram of o-F M algorithm

## 3. 제어계의 구성

### 2.1 오차 센서의 위치 선정

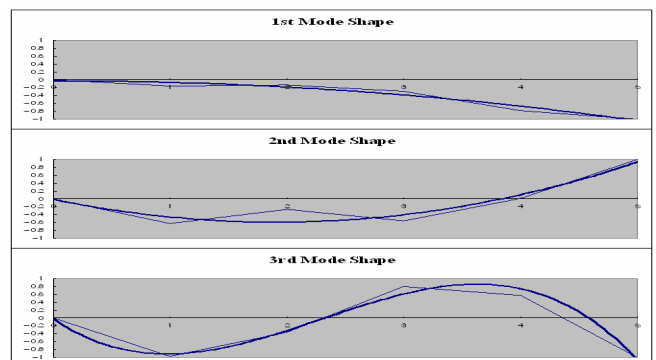


Fig.2 Result of modal testing

외팔보에 설치할 오차 센서는 가속도계를 사용하였다. 또한 가속도계의 설치 위치를 선정하기 위해 모달 테스트

을 통해 모드 형상을 파악 하였다. 이를 통해 노달 포인트 및 최대 변위 지점을 조사하였다.

오차 센서는 노달 포인트를 피하고 최대 변위 지점에 설치하여야 능동진동제어 시 높은 제어 효율을 보장 할 수 있다. 따라서 최대 변위 지점인 외팔보의 끝 단에 오차 센서를 설치 하였다.

외팔보에서 진동의 전파속도는 높은 주파수일수록 빨라지며 DSP 연산 속도에 의해 진동의 전파가 빠를수록 제어 성능을 보장 받기 힘들다. 따라서 제어 성능을 확인 하기 위해 가진기의 최적 동작 범위 중 100Hz 를 제어 대상 주파수 대역으로 선정하였다.

이 결과를 바탕으로 외팔보의 능동진동제어 시스템을 제작 하였으며 다음과 같다.

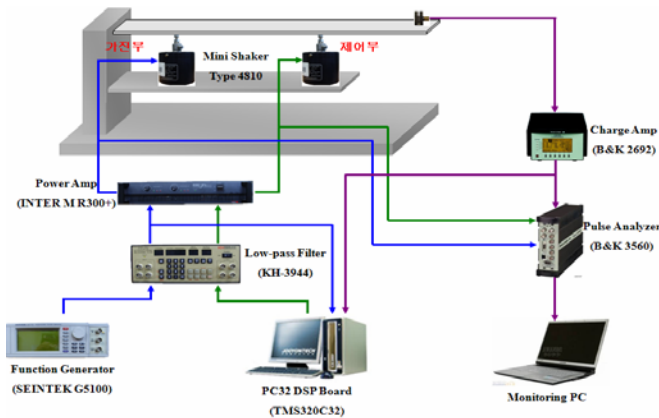


Fig. 3 Active vibration control system of cantilevered beam

2.2 부가경로 전달함수 모델링

외팔보의 능동진동제어 시스템에 Co-FXLMS 알고리즘을 적용하려면 참조신호  $x(n)$  을 부가경로전달함수  $G(z)$  의 응답  $s(n)$  으로 필터링해야 한다. 따라서  $s(n)$  의 추정치인  $\hat{s}(n)$  을 Fig. 4 와 같은 블록선도로 모델링하였다.

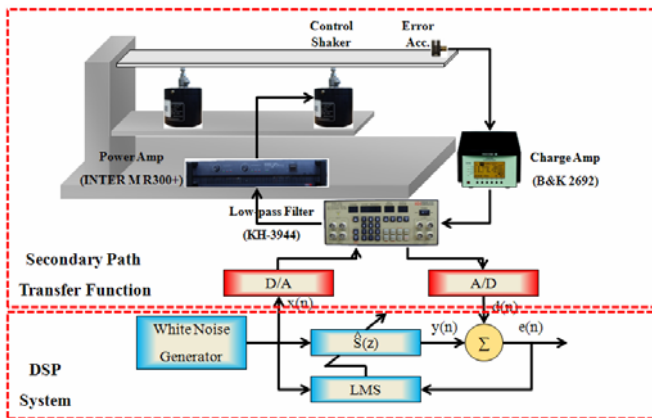


Fig. 4 Experimental setup for off-line secondary-path modeling

4. 실험결과

제안된 Co-FXLMS 알고리즘의 제어성능을 확인하기 위하여 능동진동제어를 수행하였다. 그리고 Co-FXLMS 알고리즘에 의한 진동저감성능을 확인하기 위하여 오차신호를 파워스펙트럼으로 나타내었으며, 피크 레벨(Peak Level) 및 오버올 레벨(Overall level)의 변화를 정리하여 표로 나타내었다.

실험에서 사용된 참조신호는 100 Hz 의 단일조화가진이다. Co-FXLMS 알고리즘의 필터차수는 100 차로 하였으며, 샘플링 주파수는 4096 Hz 로 설정하였다. 또한 능동진동제어의 재현성을 위해 부가경로 모델링 시 사용하는 LMS 알고리즘의 필터차수 및 샘플링 주파수도 이와 같게 설정하

였다. 기타 Co-FXLMS 알고리즘의 제어인자 값과 결과를 아래의 표에 정리하였다.

Table 1 Parameters of Co-FXLMS algorithm for experiment

C	B	f
0.000001	0.000000001	0.7

Table 2 Experimental results of V for 1 z

Frequency z	without V d	with V d	Attenuation d
100	-44.6	-52.3	-7.7
overall	-43.1	-48.1	-5

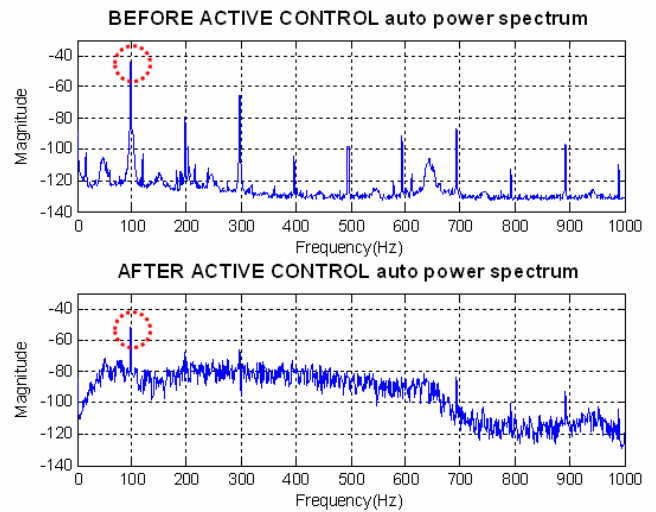


Fig. 4 Experimental results of V for 1 z

각 주파수성분별로 피크 레벨 및 오버올 레벨에서 진동의 저감량을 살펴보면, 오버올 레벨이 100 Hz 에서 5 dB(A), 피크 레벨이 7.7dB(A) 저감된 것을 확인 할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 유도된 Co-FXLMS 알고리즘을 이용하여 외팔보의 능동진동제어에 적용하고 실험을 수행하였다. 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 외팔보에서 Co-FXLMS 알고리즘은 피크주파수와 오버올에서 진동저감 효과가 있음을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. Kuo, S. M., Morgan, D. R., "Active Noise Control Systems, Algorithms and DSP implementations," John Wiley & Sons, New York, 1996.
2. Nelson, P. A. and Elliot, S. J., "Active Control of Sound," Academic Press, San Diego, 1992
3. Lee, H. J., Kwon, O. C., Lee, J. Y., Oh, J. E., "Performance Improvement of Active Noise Control Using Co-FXLMS Algorithm," Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, 2007.
4. Fuller, C. R., Elliott, S. J. and Nelson, P. A., "Active Control of Vibration," Academic Press, San Diego, 1996
5. Widrow, B. and Stearns, S. D., "Adaptive Signal Processing," Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1985.
6. 홍진석, "Filtered-x LMS 알고리즘을 이용한 유연한 보의 능동 진동 제어", 한양대학교 석사 학위 논문, 1996