

# 복수조화음에 대한 덕트계의 능동소음제어 Active noise control for harmonic sound in a Duct stem

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

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

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

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

## 1. 서론

Filtered-x LMS (FXLMS) 알고리즘이 진동소음의 제어에 많이 적용되고 있다. 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. 그러므로 이러한 단점을 보완하고 제어성능을 향상시킬 수 있는 새로운 적응제어기법인 Correlation FXLMS (Co-FXLMS) 알고리즘을 유도하여 덕트계의 복수 조화음에 대해 능동소음제어의 가능성을 제시하였다.

## 2. Co-FXLMS 알고리즘

앞먹임 FXLMS 알고리즘의 알고리즘은 다음과 같다.

$$x(n+1) = x(n) + \mu e'(n) \quad (1)$$

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

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

식(1)에 나타나 있듯이 FXLMS 알고리즘의 적응과정에서 수렴시간과 안정성은  $\mu$  와  $\lambda$  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.

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

여기서,  $\alpha$  는 정규화된 수렴계수이고,  $\hat{\lambda}_x$  는  $x'(n)$  의 파워에 대한 추정치이다.  $\hat{\lambda}_x$  을 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.

$$\hat{\lambda}_x = \frac{1}{L} \sum_{n=0}^{L-1} x'^2(n) \quad (4)$$

식(4)를 식(3)에 대입하면 다음과 같다.

$$\mu(n) = \frac{\alpha}{\delta + \frac{1}{L} \sum_{n=0}^{L-1} x'^2(n)} \quad (5)$$

식(5)에서 수렴계수는  $\lambda = 0$  일 경우 적응필터  $\hat{h}(z)$  가 발산하므로 미소량  $\delta$  를 식(5)의 분모에 더해주면 다음과 같다.

$$\mu(n) = \frac{\alpha}{\delta + \frac{1}{L} \sum_{n=0}^{L-1} x'^2(n)} \quad (6)$$

적응필터  $\hat{h}(z)$  의 계수 벡터인  $\mathbf{h}(n)$  이 최적의 계수 벡터로 수렴하면 오차신호  $e(n)$  과 부가경로가 보상된 참조신호  $x'(n)$  의 상호상관  $\lambda_{x'e}$  은 0 이 된다는 것이 Co-FXLMS 알고리즘의 기본 개념이며 식(6)의 수렴계수를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mu(n) = \frac{\lambda_{x'e}}{\delta + \frac{1}{L} \sum_{n=0}^{L-1} x'^2(n)} \quad (7)$$

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

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

$$x'(n+1) = \lambda x'(n) + \frac{1}{L} \sum_{n=0}^{L-1} x'^2(n) \quad (9)$$

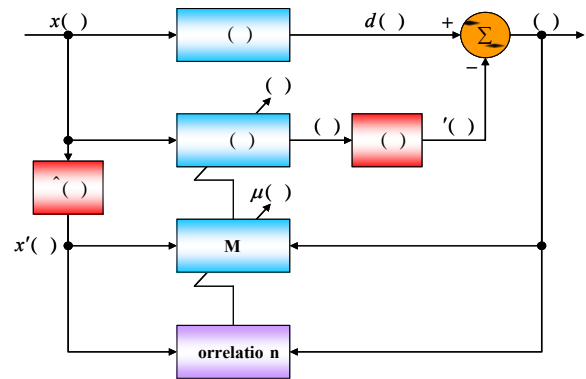


Fig. 1 Block diagram of Co-FXLMS algorithm

## 3. 제어계의 구성

### 3.1 덕트계의 설계 및 제작

덕트에 설치할 제어스피커의 위치를 선정하기 위해 음향해석 패키지인 SYSNOISE 를 이용하여 덕트의 음향모드 해석을 수행하였고, 이를 통해 안티노드 지점을 조사하였다. 해석을 위한 모델로는 노드 수 12221 개, 사각형 요소 수 10000 개를 사용하였다.

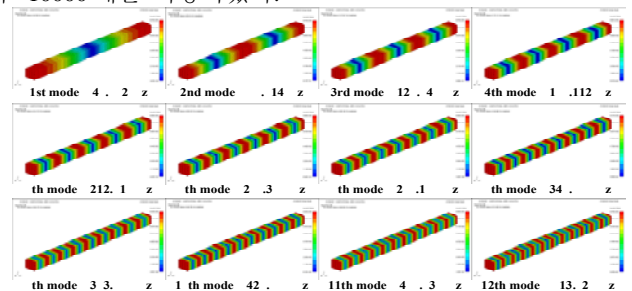


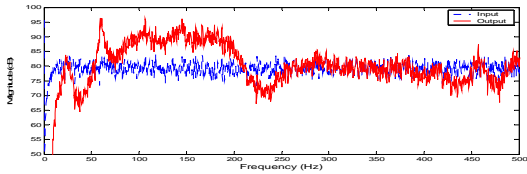
Fig. 2 Analysis result of an acoustic mode of the duct stem using OI

제어스피커는 소음원과 가까우면서도 안티노드가 있는 지점에 설치되어야 능동소음제어 시 높은 제어효율을 보장할 수 있다. 따라서 각각의 모드에서 소음원과 가까우면서도 안티노드가 있는 지점들의 평균적인 지점을 조사할 필요가 있다. 그 결과, 소음원스피커에서 약 1.3m 인 지점이 가장 적합하다고 판단되었다. 따라서 이 결과를 바탕으로 제어스피커박스를 제작 및 설치하였으며 다음과 같다.

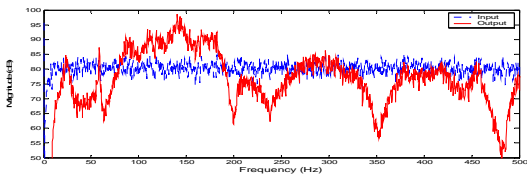
제어대상 주파수대역을 선정하기 위하여 주음향경로 및 부가음향경로의 입·출력 신호에 대한 기여도(Coherence Function) 및 입·출력 각각의 파워스펙트럼(Power Spectrum)

을 측정하고 고찰하였다. 기여도를 나타낸 결과 주음향경로 및 부가음향경로의 입·출력 신호에 대한 기여도는 80 Hz ~ 500 Hz 에서 높게 나타났다. 80 Hz 이하의 대역에서 기여도가 낮은 이유는 스피커의 저주파 특성이 좋지 않기 때문이며, 이 결과로부터 능동소음제어 시스템의 가제어성이 보장되는 신뢰성 구간은 80 Hz ~ 500 Hz 임을 알 수 있다.

주음향경로 및 부가음향경로의 입·출력 신호에 대한 파워스펙트럼은 다음과 같다.



(a) Primary acoustic path from source speaker to error microphone



(b) Secondary acoustic path from control speaker to error microphone

Fig. 3 Power spectrum of the acoustic path

측정 결과, 100 Hz ~ 180 Hz 에서 오차마이크로폰의 가관측성이 보장되는 것을 알 수 있었다. 이 결과로부터 능동소음제어 시스템의 가제어성 및 가관측성이 보장되는 신뢰성 구간은 100 Hz ~ 180 Hz 임을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 제안한 Co-FXLMS 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 기존에 프로토타입으로 제작된 덕트를 이용하여 제어대상 주파수를 100 Hz + 140 Hz, 100 Hz + 180 Hz, 140Hz + 180 Hz, 100Hz + 140Hz + 180Hz 로 선정하였다.

2.2 부가경로 전달함수 모델링

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

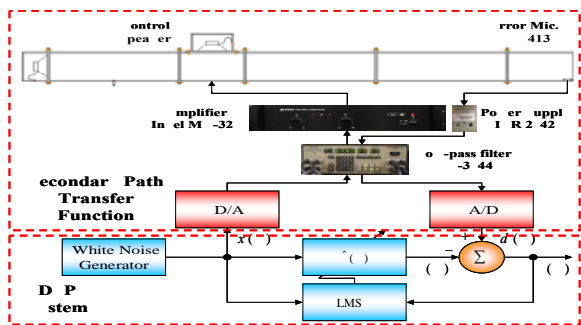


Fig. 4 Experimental setup for off-line secondary path modeling

4. 실험결과

제안된 Co-FXLMS 알고리즘의 제어성능을 확인하기 위하여 능동소음제어를 수행하였다. 그리고 Co-FXLMS 알고리즘에 의한 소음저감성능을 확인하기 위하여 오차신호를 파워스펙트럼으로 나타내었으며, 피크 레벨(Peak Level) 및 오버올 레벨(Overall level)의 변화를 정리하여 표로 나타내었다. 참고로 실험실의 암소음은 오버올 레벨 42.1 dB(A)이다.

실험에서 사용된 참조신호는 100 Hz, 140 Hz, 180 Hz 의

단일조화음의 주파수성분을 혼합한 후 잡음을 첨가한 복수조화음이다. 재생된 소음의 오버올 레벨은 약 60.3 dB(A)가 되도록 파워앰프를 조절하였고 Co-FXLMS 알고리즘의 필터차수는 100 차로 하였으며, 샘플링 주파수는 4096 Hz 로 설정하였다. 또한 능동소음제어의 재현성을 위해 부가경로 모델링 시 사용하는 LMS 알고리즘의 필터차수 및 샘플링 주파수도 이와 같게 설정하였다. 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 ANC for noise 1

Frequency [Hz]	Without ANC [dB(A)]	With ANC [dB(A)]	Attenuation [dB(A)]
100	54.3	18.9	-35.4
140	53.7	50.6	-3.1
180	61.8	31.7	-30.1
Overall	63.3	53.4	-9.9

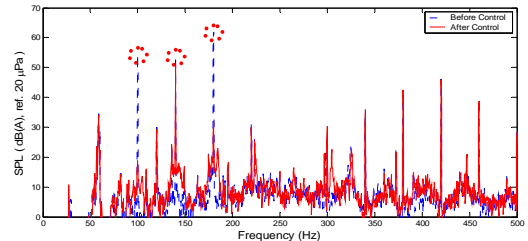


Fig. 5 Experimental results of ANC for noise 1

각 주파수성분별로 피크 레벨 및 오버올 레벨에서 소음의 저감량을 살펴보면, 오버올 레벨이 100 Hz + 140 Hz 에서 6.2 dB(A), 100 Hz + 180 Hz 에서 6.9 dB(A), 140 Hz + 180 Hz 에서 15.2 dB(A) 저감된 것을 확인 할 수 있었다. 따라서 두 개의 단일조화음이 혼합된 경우에는 140 Hz + 180 Hz 인 경우 가장 많이 저감되어 소음의 파장이 비슷한 음들이 혼합되어 있을 때 제어성능이 향상됨을 알 수 있었다. 또한 세 개의 단일조화음과 잡음이 섞여 있는 복수조화음의 경우 오버올 레벨이 9.9 dB(A) 저감되었음을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 Co-FXLMS 알고리즘을 유도하고 덕트에 적용하여 능동소음제어 실험을 수행하였다. 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. Co-FXLMS 알고리즘은 복수조화음에 대해 피크주파수와 오버올에서 소음저감 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. Widrow, B. and Stearns, S. D., "Adaptive Signal Processing," Prentice-Hall, Englewood Cliffs. N.J., 1985.