

Co-FXLMS 알고리즘을 이용한 3 차원 밀폐계의 능동소음제어 Active Noise Control in a Three Dimensional Enclosure using Co-FXLMS Algorithm

*이해진¹, 박상길¹, 권오철¹, 이유엽², #오재응³

*H. J. Lee¹, S. G. Park¹, O. C. Kwon¹, Y. Y. Lee², #J. E. Oh(jeoh@hanyang.ac.kr)³

¹ 한양대학교 대학원 기계공학과, ² 호원대학교 기계자동차공학부, ³ 한양대학교 기계공학부,

Key words : Active Noise Control, Correlation FXLMS Algorithm, Three Dimensional Enclosure, 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 3 차원 밀폐계에 적용한 후 능동소음 제어의 가능성을 제시하였다.

2. 이론

2.1 Co-FXLMS 알고리즘

앞먹임 FXLMS 알고리즘의 알고리즘은 다음과 같다.

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu \mathbf{K}'(n)e(n) \quad (1)$$

μ 는 수렴계수이며, 적응필터 $W(z)$ 가 안정적으로 수렴하려면 μ 는 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

$$0 < \mu < \frac{2}{L\hat{P}'_x}, \quad P_x = E[x^2(n)] \quad (2)$$

식(1)에 나타나 있듯이 FXLMS 알고리즘의 적응과정에서 수렴시간과 안정성은 μ 와 $\mathbf{x}'(n)$ 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.

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

여기서, α 는 정규화된 수렴계수이고, \hat{P}'_x 는 $x'(n)$ 의 파워에 대한 추정치이다. \hat{P}'_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.

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

식(4)를 식(3)에 대입하면 다음과 같다.

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

식(5)에서 수렴계수는 $\mathbf{x}'(n) = 0$ 일 경우 적응필터 $W(z)$ 가 발산하므로 미소량 δ 를 식(5)의 분모에 더해주면 다음과 같다.

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

적응필터 $W(z)$ 의 계수 벡터인 $\mathbf{w}(n)$ 이 최적의 계수 벡터 \mathbf{w}^0 로 수렴하면 오차신호 $e(n)$ 과 부가경로가 보상된 참조신호 $x'(n)$ 의 상호관관 $R(n)$ 은 0 이 된다는 것이 Co-FXLMS 알고리즘의 기본 개념이며 식(6)의 수렴계수를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mu(n) = \frac{C}{\delta + \mathbf{x}'^T(n)\mathbf{x}'(n)} R(n) \quad (7)$$

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

여기서, C 는 상수이고 λ 은 0 에서 1 사이의 상수이다. 그러므로 Co-FXLMS 알고리즘은 다음과 같다.

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \frac{CR(n)}{\delta + \mathbf{x}'^T(n)\mathbf{x}'(n)} \mathbf{x}'(n)e(n) \quad (9)$$

3. 3 차원 밀폐계 구성

3.1 오차마이크로폰의 위치선정

밀폐계의 능동소음제어 시스템의 오차 마이크로폰은 대 상 음장의 음향모드를 고려하여 모드 절선(Nodal Line)을 피 해서 설치하였다. 먼저 소스 스피커에서 백색잡음을 발생 시켜 마이크로폰으로 내부 음장을 측정하였으며, 백색잡음 의 소음 레벨은 회전기계의 구동 시 측정값을 근거로 밀폐 계의 전방 1m, 높이 1m 지점에서 오버올 레벨이 약 60dB(A)일 때로 파워앰프를 설정하였다. 밀폐계 내부의 격 자는 10cm 간격으로 밀폐계의 좌·우에 구성하였으며 음향 모드를 찾기 위해 캐비닛 좌·우 측정지점의 SPL(A)를 각 각 평균하여 Fig. 1 과 같이 나타내었다.

Fig. 1 의 피크에 해당하는 81.56Hz, 98.91Hz, 150.78Hz, 204.84Hz, 273.75Hz, 349.53Hz, 402.81Hz, 476.72Hz 에서의 SPL(A)값으로 각각의 등고선을 구한 뒤 이 등고선들을 평 균하여 Fig. 2 와 같이 나타내었다. Fig. 2 에서 캐비닛 좌측은 [20cm, 0cm]와 [20cm, 70cm]에서 SPL(A)가 가장 높게 나타 나 이 지점을 E.M. ①, E.M. ②로 명칭했고, 우측 또한 [40cm, 0cm]와 [50cm, 40cm]에서 SPL(A)가 가장 높게 나타 나 각각 E.M.③, E.M. ④로 명칭 했다.

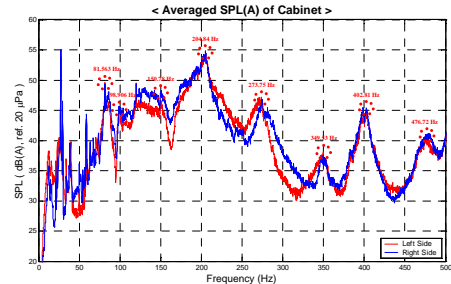


Fig. 1 Averaged SPL(A) of cabinet – left & right side

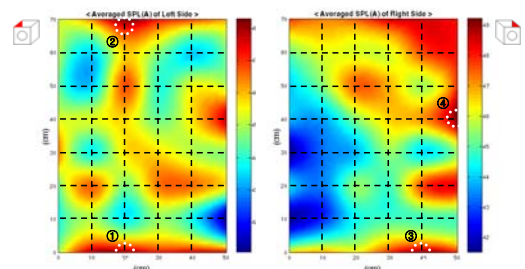


Fig. 2 Averaged SPL(A) contour of cabinet

3.3 제어스피커의 위치선정

밀폐계의 능동소음제어 시스템의 액추에이터인 제어스피커의 장착 위치를 선정하기 위해서 소스스피커에서 미리 녹음된 회전 기계의 소음을 발생시켜 마이크로폰으로 내부 음장을 측정하였다. 3.2 에서와 같은 조건으로 실험하였고, 캐비닛 좌·우 측정지점의 SPL(A)를 각각 평균하여 Fig. 3 과 같이 나타내었다.

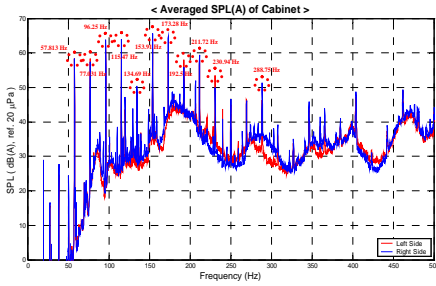


Fig. 3 Averaged SPL(A) of cabinet – left & right side

피크에 해당하는 57.81Hz, 77.03Hz, 96.25Hz, 115.47Hz, 134.69Hz, 153.91Hz, 173.28Hz, 192.50Hz, 211.72Hz, 230.94Hz, 288.75Hz 에서의 SPL(A)을 캐비닛 좌·우의 등고선으로 나타냈으며, 이 등고선들을 평균하여 Fig. 4 에서 같이 제어스피커의 위치를 선정하였다. 캐비닛 좌측은 [10cm, 0cm]와 [40cm, 0cm]에서 SPL(A)가 가장 높게 나타나 이 지점을 C.S. ①과 C.S. ②로 명칭했고, 우측 또한 [30cm, 0cm]와 [10cm, 70cm]에서 SPL(A)이 가장 높게 나타나 이 지점을 각각 C.S. ③과 C.S. ④로 명칭 했다.

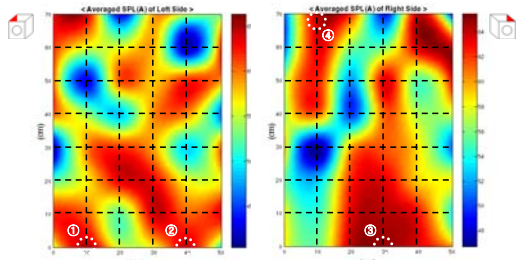


Fig. 4 Averaged SPL(A) contour of cabinet

4.3 차원 밀폐계의 능동소음 제어

100 Hz 와 150 Hz 근방의 대역이 음향 모드와 회전 기계의 소음의 피크에서 공통적으로 나타났다. 따라서 밀폐계 회전기계에 대한 제어 가능성을 확인하기 위해 우선 100 Hz 에 대해서 3 차원 밀폐계의 능동소음제어를 수행하였다. 실험은 총 60 가지의 조합으로 수행하였으며, 그 중 가장 소음 저감량이 많으면서 제현이 가능한 실험 조합을 찾았다. 능동소음제어 시스템을 구성한 후에 각각의 제어스피커와 오차마이크로폰에 대해 부가경로 모델링을 수행하였다. 그리고 Fig. 5 와 같이 3 차원 밀폐계의 능동소음제어를 수행하였다.

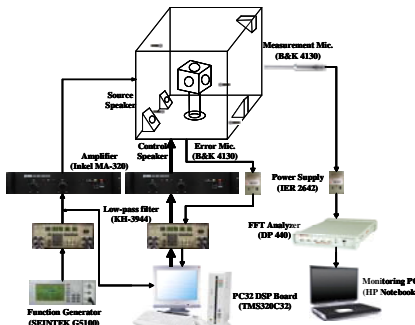


Fig. 5 Experimental setup for multi-channel ANC

밀폐계 전방 1m 와 내부(Mic. ①, Mic. ②, Mic. ③, Mic. ④)에서 제어 전·후의 SPL(A)를 측정된 결과, 제어스피커 ①

②③④와 오차마이크로폰 ③을 사용했을 때 가장 많은 저감량을 보였으며, 이를 Table 1 에 정리하였고 Fig. 6 에 전방 1m 에서 제어 전·후의 SPL(A)를, Fig. 7 에 밀폐계 내부에서 제어 전·후의 SPL(A)를 나타내었다.

Table 1 Results of ANC for 100Hz noise – C.S. 1234 & E.M.3

C.S. ①②③④ E.M. ③	Mic. ①		Mic. ②		Mic. ③		Mic. ④		Front 1m	
	Peak Level	Overall Level	Peak Level	Overall Level	Peak Level	Overall Level	Peak Level	Overall Level	Peak Level	Overall Level
Before Control [dB(A)]	77.1	83.3	75.2	81.4	80.3	82.1	80.3	84.6	56.7	60.1
After Control [dB(A)]	71.6	82.6	66.7	80.2	77.3	80.0	75.9	83.3	44.0	57.6
Attenuation [dB(A)]	-5.5	-0.7	-8.5	-1.2	-3.0	-2.1	-4.4	-1.3	-12.7	-2.5

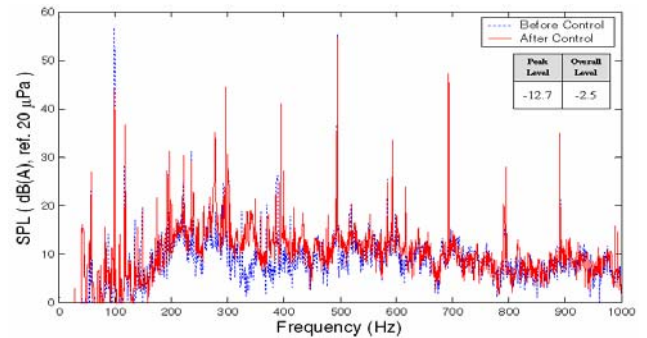


Fig. 6 ANC for 100 Hz (C.S. 1234 & E.M. 3) – Front 1m

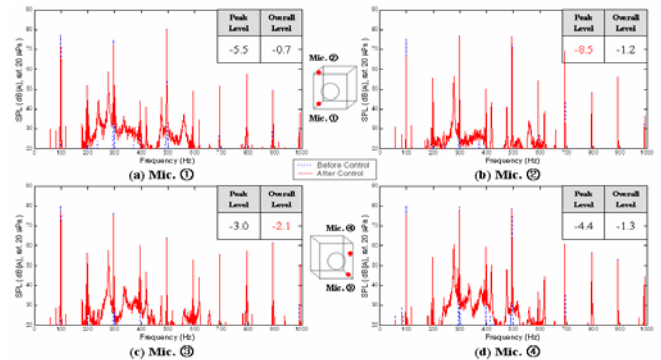


Fig. 7 ANC for 100 Hz (C.S. 1234 & E.M. 3) – Inside

4. 결론

밀폐계의 음향모드와 회전기계의 소음의 피크에서 나타나는 100 Hz 에 대해서 Co-FXLMS 알고리즘을 이용하여 3 차원 능동소음제어를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 100 Hz 음에 대한 제어 결과, 제어스피커 ①②③④와 오차마이크로폰 ③에서 제어했을 때 전방 1m 에서 Overall level 이 2.5 dB(A), Peak level 이 12.7 dB(A)로 가장 많이 저감되었다.

둘째, 3 차원 밀폐계의 능동소음제어 결과를 통해 회전기계의 소음과 같은 일반적인 주기소음에 대한 밀폐계 능동소음제어 가능성을 확인하였다.

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. H. J. Lee, O. C. Kwon, J. Y. Lee, and J. E. Oh, "Performance Improvement of Active Noise Control using Co-FXLMS Algorithm," Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, 2007.