

타워형 에어컨 송풍기 소음의 능동제어

Active Control of Noise from Fan Blowers in Tower-type Air Conditioners

류 경 완* · 홍 진 숙† · 정 의 봉**

Kyungwan Ryu, Chinsuk Hong and Wei Bong Jeong

(Received October 27, 2016 ; Revised December 19, 2016 ; Accepted December 19, 2016)

Key Words : Active Noise Control(능동소음제어), FXLMS(filtered-x least mean square), Fan Blower Noise(팬 블로어 소음), Reference Signal(참조신호), Error Signal(오차신호)

ABSTRACT

This paper investigates active noise control of tower-type air conditioners using the filtered-x least mean square (FXLMS) algorithm to reduce fan blower noise transmission. Firstly, the main components required for the active control system including the error sensor, the control speaker and the reference sensors are selected. Since the noise could significantly reduce if the reference signal includes every frequency response information, a various reference signals from accelerometers and a microphone are used. Secondly, the controller based on the FXLMS algorithm with a single-channel reference signal is implemented. Then, the control performance is examined experimentally for the different reference signals. It is found that the accelerometer signal well possesses the motor vibration related noise and a microphone signal could includes global noise. When using the reference signal with a microphone located near the motor and the fan blower, the active control system reduces the noise globally, except for several peaks.

1. 서 론

과학기술은 인간에게 좀 더 편리한 생활을 누릴 수 있도록 발전하여왔고 그로 인해 인간의 삶은 과거에 비하여 매우 윤택해졌다. 하지만 그러한 기술의 발달은 환경오염이라는 부작용을 야기하여 역으로 인간을 위협하고 있다. 그래서 최근에는 green technology라는 환경 친화적 기술을 도입하여 자연과의 조화를 이룰 수 있는 방법을 모색하고 있고 그 결과 유형(有形)의 환경오염에 대해서는 많은 개선

이 이루어져왔다⁽¹⁾. 하지만 소음 공해와 같은 무형(無形)의 환경오염에 대해서는 아직까지 그 방안이 미비한 것이 사실이다. 특히 실내에서 발생하는 생활 소음은 인간의 스트레스를 유발하여 정신건강을 해치고 편안한 휴식을 방해하기 때문에 그 대책이 매우 시급하다⁽²⁾.

실내에서 발생하는 소음의 원인은 외부로부터의 충격 소음, 건물 구조 진동 소음 등 여러 가지가 있지만 주로 모터를 동반하는 가전 기기에 의한 소음이 인간의 스트레스를 유발하고 휴식을 방해하는 가장 주된 요인이라 할 수 있다. 그중에서도 냉난방기

† Corresponding Author; Member, School of Mechanical Engineering, Ulsan College
Email : cshong@uc.ac.kr

* Member, School of Mechanical Engineering, Graduate School of Pusan National University

** Member, School of Mechanical Engineering, Pusan National University

‡ Recommended by Editor Gi-Woo Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

의 소음은 모터와 팬에 의한 소음과 공기 마찰음이 동시에 발생하기 때문에 인간에게 끼치는 영향이 더욱 크다³⁾.

이러한 소음을 줄이기 위한 방법으로 과거에는 주로 흡·차음재를 이용하는 수동적 방법(passive control)을 사용하여왔으나 500 Hz 미만의 저주파 소음에 대해서는 냉난방기의 구조적인 한계와 저주파수의 특성으로 인해 그 감소 정도가 비교적 낮은 편이었다⁴⁾. 하지만 최근 DSP(digital signal processor)의 발달로 인해 신호처리의 방법으로 소음을 제어하는 능동소음제어(active noise control)에 대한 연구가 많은 분야에서 활발히 진행되고 있으며 능동소음제어는 수동적 방법과는 달리 저주파 소음 제어에 탁월한 효과가 있고 공간의 제약이 없어 앞으로 수동적 방법과 병행되어 사용될 경우 고주파와 저주파 소음에 대한 효과적인 소음 제어가 가능하다⁵⁾.

이 논문에서는 실내용 타워형 에어컨의 송풍과정에서 발생하는 소음을 능동제어하여 에어컨의 소음원 수준을 감소시키는데 목적을 두고 있다. 이를 위해 제어대상을 분석하여 참조신호와 제어스피커를 선정하고 적합한 제어기를 설계하여 능동제어시스템을 구현하고자 한다. 참조신호는 제어스피커에 의한 오염이 없는 가속도계 신호를 이용하는 경우와 참조신호의 보정⁶⁾이 필요한 마이크로폰을 이용하는 경우를 고려하였다. 제어스피커는 제어대상 소음의 주파수 범위 내의 출력 성능을 고려하여 스피커를 선정하였다. 제어기는 FXLMS 알고리즘을 기반으로 하여 구현하였고 그 성능을 확인하였다. 그리고 참조신호의 위치와 종류에 따른 제어성능을 고찰하였다.

2. 신호처리 알고리즘

이 절에서는 능동제어시스템의 구현 및 작동에서 사용되는 신호처리 기법을 간단히 정리하였다. 능동제어시스템의 구현을 위해서는 전달경로의 모델링이 필요하다. 해당 전달경로의 입력신호와 외란신호를 이용하여 LMS(least mean square) 알고리즘으로 전달함수를 모델링하였다. 능동제어기는 전달경로들의 모델링을 통해 얻은 전달함수를 조합하여 FXLMS(filtered-x LMS) 알고리즘으로 구현하였다.

2.1 LMS 알고리즘

LMS 알고리즘은 Fig. 1과 같은 블록선도에서 오차신호의 파워를 최소화시키는 방법을 말한다⁷⁾. 여기서 $x(n)$ 은 입력신호이고 $y(n)$ 은 필터의 출력신호이다. 그리고 $d(n)$ 은 외란이며 제어되어야 할 신호이다. 또한 $e(n)$ 은 오차신호가 된다. $\tilde{w}(n)$ 은 FIR필터의 계수이며 차수가 1일 경우 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\tilde{w}(n) = [w_0(n) \ w_1(n) \ w_2(n) \ \dots \ w_{I-1}(n)]^T \quad (1)$$

LMS 알고리즘은 오차신호의 파워를 최소화 시키는 방향으로 FIR필터의 계수 $\tilde{w}(n)$ 을 갱신(update)하고, 결국 FIR 필터 $\tilde{w}(n)$ 의 출력 $y(n)$ 은 $d(n)$ 에 근사하게 되어 $e(n)$ 은 0으로 수렴하게 된다. 따라서 오차신호가 0으로 수렴한다면 $\tilde{w}(n)$ 은 $d(n)$ 을 출력하는 임의의 시스템을 모델링했다고 할 수 있다. 그러므로 LMS 알고리즘은 주로 오차경로를 모델링하는데 이용되며 이 논문에서도 오차경로를 모델링하는데 LMS 알고리즘을 이용하였다.

필터계수를 갱신할 때 쓰이는 알고리즘은 steepest descent 법⁸⁾이며 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$\tilde{w}(n+1) = \tilde{w}(n) - \mu \frac{\partial J}{\partial w(n)} \quad (2)$$

여기서 μ 는 수렴계수이고 J 는 시스템의 비용함수이다. $J = e^2(n)$ 이고, $e(n) = d(n) - \tilde{x}^T(n)\tilde{w}(n)$ 이다. 여기서

$$\tilde{x}(n) = [x(n) \ x(n-1) \ \dots \ x(n-I+1)]^T \quad (3)$$

이다. 따라서 $\partial J / \partial w = \partial e^2(n) / \partial w = -2x(n)e(n)$ 이 된다. 그러므로 식 (2)를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\tilde{w}(n+1) = \tilde{w}(n) + 2\mu \tilde{x}(n)e(n) \quad (4)$$

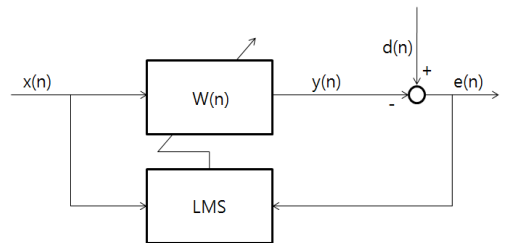


Fig. 1 Block diagram of the LMS algorithm

여기서 μ 는 수렴계수이며 필터의 수렴속도를 결정하게 되고 값이 클수록 빠른 수렴속도를 가진다. 그러나 μ 가 $1/Ix^2$ 를 넘으면 필터는 발산하게 된다⁽⁸⁾. 그러므로 적절한 μ 의 값은 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$0 < \mu < \frac{1}{Ix^2} \tag{5}$$

여기서 I 는 필터길이, \bar{x}^2 은 참조신호의 파워이다.

2.2 FXLMS 알고리즘

능동소음제어에 가장 널리 사용되는 FXLMS 알고리즘의 블록선도는 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 LMS 알고리즘이 오차경로의 전달함수 $c'(n)$ 으로 필터링된 신호를 이용하므로 명명된 알고리즘이다. 블록선도로부터 오차신호 $e(n)$ 은 식(6)과 같다.

$$e(n) = d(n) - c'(n)[\tilde{x}^T(n)\tilde{w}] \tag{6}$$

여기서 $c'(n)$ 은 앞서 설명한 LMS 알고리즘을 이용하여 모델링한 오차경로이다. 블록선도로부터 알 수 있듯이 FXLMS 알고리즘은 LMS 알고리즘에서 단지 오차경로만 추가된 형태이므로 FXLMS 알고리즘 역시 오차신호의 파워를 최소화시키기 위해 계속해서 $\tilde{w}(n)$ 의 필터계수를 갱신하게 되고 결국 $e(n)$ 은 최솟값으로 수렴하게 된다. 필터 계수 갱신은 LMS 알고리즘과 같이 steepest descent 법을 이용하며 $\partial J/\partial \tilde{w} = -c'(n)[2\tilde{x}(n)e(n)]$ 가 되므로 FXLMS 알고리즘은 식(7)과 같이 필터계수를 갱신하게 된다.

$$\tilde{w}(n+1) = \tilde{w}(n) + 2\mu\tilde{r}(n)e(n) \tag{7}$$

여기서 $\tilde{r}(n)$ 은 필터링 된 참조신호로 $\tilde{r}(n) =$

$\tilde{x}(n)c'(n)$ 와 같고 식(8)과 같이 I 개의 요소를 갖는 벡터링 신호이다.

$$\tilde{r}(n) = [r(n) r(n-1) \dots r(n-I+1)]^T \tag{8}$$

그리고 μ 는 수렴계수로서 수렴을 위해 식(5)의 LMS 알고리즘의 수렴계수와는 달리 다음의 범위를 가져야 한다⁽⁹⁾.

$$0 < \mu < \frac{1}{Ir^2} \tag{9}$$

여기서 I 는 필터길이, \bar{r}^2 은 필터링된 참조신호의 파워이다.

3. 능동소음제어시스템 구성

Fig. 3은 가정용 타워형 에어컨의 소음제어를 위한 능동소음제어시스템의 장치 구성도이다. 가정용 타워형 에어컨의 소음 상태를 관측할 오차신호를 얻기 위한 오차신호센서, 제어신호를 발생시킬 제어스피커, 소음원 정보를 획득할 참조신호 센서 및 제어기 구현을 위한 장비가 포함되어 있다.

먼저 오차신호 센서는 타워형 에어컨의 송풍구 중앙에서 음압신호를 측정할 마이크로폰으로 사용하였다. 오차신호를 획득하기 위한 마이크로폰은 B&K Type 4190을 이용하였으며 바람이 나오는 출구에 위치시켜 에어컨이 방출하는 음향 파워를 관측하고 제어기는 이를 최소화 할 수 있도록 하였다.

제어스피커는 소음원의 주파수 범위를 고려하여 5 Hz부터 3 kHz까지의 성능이 입증된 BOSS사의 17인치 우퍼용 스피커(모델명 SE12S)를 사용하였다. 에어컨 하단에 있는 뱀에서 발생된 소음은 송풍 경로를 통해 전파되므로 송풍구 도달 전 송풍 경로인 에어컨 측면에 제어 스피커를 설치하였다. 스피커의 성능을 나타내는 스피커의 전달함수와 입출력 간의 상호상관함수를 Fig. 4에 나타내었다. 이들 전달함수와 상호상관함수의 입력은 스피커에 입력되는 전압신호이고 출력은 에어센서에서 측정한 음압신호이다. 측정 결과로부터 이 연구에서의 관심 주파수 대역에서 제어신호를 발생하는데 적절한 특성을 갖고 있다고 판단할 수 있다.

참조신호는 주 소음원으로 추정되는 뱀 모터 주위

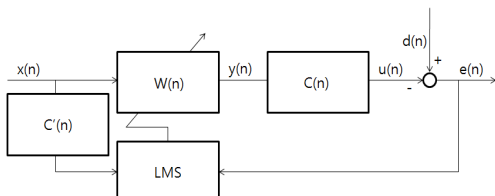


Fig. 2 Block diagram of the FXLMS algorithm

에 가속도계와 마이크로폰을 이용하여 Fig. 3의 좌측 하단에서 보인 바와 같이 취득하였다. 각 센서의 종류와 위치를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에 표시한 ①지점(모터 고정부)과 ②지점(에어콘 내벽)에는 가속도계(B&K Type 4393)를 사용하였고 ③지점(모터 근처 에어콘 내부 공간)에는 마이크로폰(B&K Type 4190)을 사용하였다. ①지점은 모터를 고정시키는 부분으로 모터의 회전과 관련된 신호를 얻을 수 있고 ②지점에서는 에어컨의 내벽 부분으로 에어컨의 전체

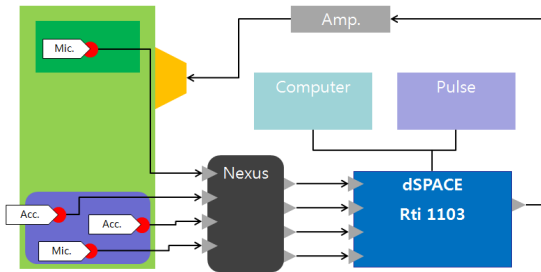
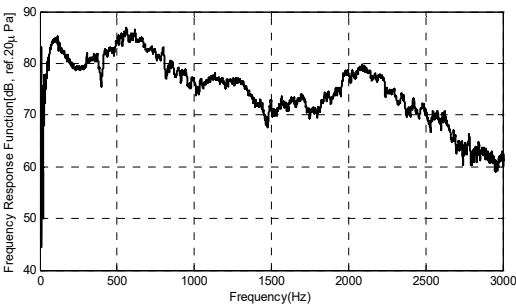
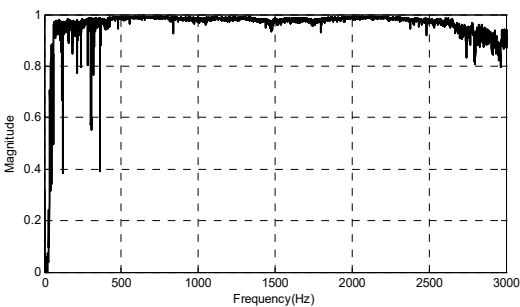


Fig. 3 Schematic representation of active noise control of the air conditioner



(a) Transfer function of the control speaker



(b) Coherence of the control speaker

Fig. 4 Measured characteristics of the control speaker used in this paper: BOSS SE12S

적인 떨림 신호를 얻을 수 있다. 모터 근처 에어컨 내부 공간 내 한 점인 ③지점에는 마이크로폰을 설치함으로써 전반적인 소음정보를 얻을 수 있다.

참조 신호가 소음원의 정보를 얼마나 잘 담고 있는가를 평가하기 위해 참조 신호와 오차 신호사이의 상호상관함수(coherence function)를 측정하였다. Fig. 6에는 참조 신호별로 오차 신호 사이의 상호상관함수를 보이고 있다. 이들 상호상관함수가 주파수 대역 별로 다소 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. ①지점의 가속도계 참조 신호는 모터 회전주파수 (motor shaft frequency: MSR)의 조화성분에서 뚜렷한 상관관계를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 150 Hz에서 200 Hz 사이와 260 Hz에서 300 Hz 사이 주파수 대역에서는 상관관계가 매우 약하게 나타났다. ②지점의 가속도계 참조신호는 블로어 날개 통과 주파수(blade passage frequency: BPF, MSR* 날개수)에서 뚜렷한 상관관계를 보이고 있다. 이 경우는 ①지점의 신호와 달리 150 Hz에서 200 Hz 사이의 주파수 대역에서는 상관관계가 뚜렷하게 보이고 있다. 하지만 260 Hz에서 300 Hz 사이 주파수 대역에서는 여전히 상관관계가 매우 약하다. ③지점의 마이크로폰 참조신호 역시 260 Hz에서 300 Hz 사이 주파수 대역에서는 여전히 상관관계가 매우 약하지만 모터축 회전에서 높은 상관관계를 보이고 있고 아울러 150 Hz에서 200 Hz 사이의 주파수 대역에서는 상관관계가 뚜렷하게 보이고 있다. 그리고 세 경우 모두 300 Hz에서 350 Hz 사이의 상관관계와 600 Hz 근처의 상관관계의 특성이 비교할 만한 대상으로 차이를 보이고 있다.

제어기는 2절에서 설명한 FXLMS 알고리즘을 기반으로 Programmable DSP 장비인 dSPACE RTI-1103 모듈을 이용하여 구현하였다. 제어기 프로그램은 Fig. 7에서 보인 바와 같이 Mathworks사의 Simulink를 기반으로 작성하였고 실험 시 실시간 제어를 위해서는 C언어로 변환하여 RTI-1103 모듈에 탑재하여 구동하였다. Fig. 7의 FXLMS 모듈의 구현 내용을 살펴보면 앞서 설명한 에러 신호와 참조 신호는 FXLMS 모듈의 입력 신호로 연결하였음을 알 수 있다. 특히 참조 신호 3가지의 특성과 그 성능에 미치는 영향을 보기 위해 Fig. 7의 ADC02 부분에 각각을 연결하여 참조 신호를 변경해 가면서 성능의 변화를 관찰하였다.

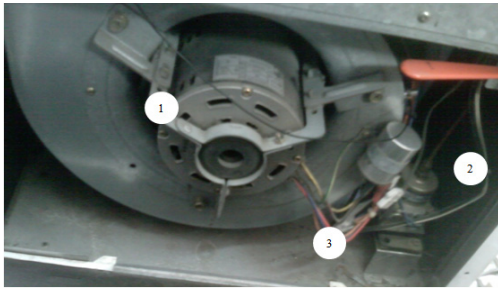
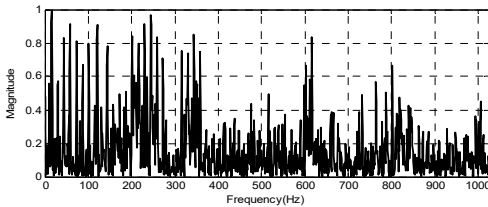


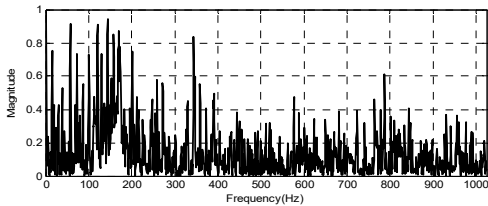
Fig. 5 Location of the reference sensors: ① and ② are accelerometers, and ③ is a microphone

4. 제어 성능 실험 결과

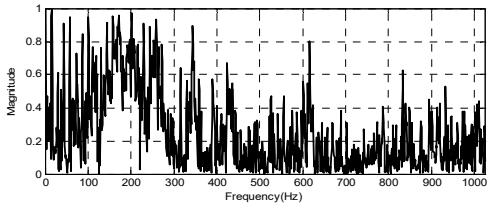
Fig. 10에는 앞 절에서 설명한 FXLMS 알고리즘 기반의 제어기를 이용한 타워형 에어컨의 소음 저감 실험을 수행한 결과를 보이고 있다. 소음 저감 결과는 제어 전 후에 대한 에러 센서의 음압 수준을 비교하여 나타내었다. 이 실험에서는 Fig. 5에서 보인 3 가지 참조 신호를 각각 사용한 제어 성능을 비교하였다. 먼저 Fig. 10(a)는 지점 ①의 가속도계로 부터 참조 신호를 얻어 제어한 결과를 보이고 있다. 제어 전의 음압 수준과 비교한 결과 0 Hz에서 80 Hz까지의 저주파 대역과 200 Hz에서 400 Hz 사이의 주파수 대역에서 크게 감소하였음을 알 수 있다. 또한 100 Hz에서 150 Hz사이의 주파수 대역 소음이 많이 감소하는 것을 볼 수 있다.



(a) Accelerometer at location ①



(b) Accelerometer at location ②



(c) Microphone at location ③

Fig. 10(b)는 지점 ②의 가속도계로 부터 참조 신호를 얻어 제어한 결과로서 50 Hz 부근과 100 Hz부터 200 Hz까지의 피크들이 모두 줄어들었음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 10(a)에서와는 달리 0 Hz에서 80 Hz사이의 소음과 200 Hz에서 400 Hz 사이의 소음은 크게 줄지 않은 것으로 나타난다.

Fig. 10(c)는 지점 ③의 마이크를 참조 신호로 이용한 경우에 대한 결과로 0 Hz에서 400 Hz의 전반적인 소음이 많이 줄어들었음을 알 수 있으며 120 Hz와 180 Hz의 피크는 비교적 많이 줄어들지 않았음을 알 수 있다.

이상에서 보인 제어기의 감소 성능의 특징은 Fig. 6에 보인 오차 신호에 대한 참조 신호의 상호상관함수의 특성과 연관 지어 설명할 수 있다. Fig. 6(a)는 에어컨 모터 부근에 가속도계가 설치되어 모터와 팬에 의한 소음을 잘 나타내고 있는 반면 (b)의 경우에는 에어컨의 내부 케이스 벽면에 부착되었기 때문에 모터와 팬 블로어에 의한 소음보다는 전체적인 울림 현상을 더 잘 반영하고 있다. 그리고 (c)의 경우는 마이크를 이용하여 좀 더 복합적인 소음정보를 가진다. Fig. 10(a)를 다시 보면 0 Hz부터 80 Hz, 100 Hz에서 150 Hz 그리고 200 Hz에서 400 Hz사이의 소음이 크게 개선 된 것을 알 수 있는데 이는 오차 신호에 대한 참조 신호의 상호상관함수 값이 높게 나타나는 대역으로 Fig. 6(a)에서 잘 나타난다. 마찬가지로 Fig. 10(b)에서는 50 Hz부근의 소

Fig. 6 Variation of the coherence functions between reference signals and the error signal with the location of the sensor

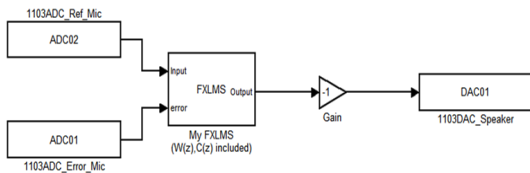


Fig. 7 Block diagram of the active noise controller of FXLMS with the error signal (ADC01) and with a single reference signal (ADC02)

음과 100 Hz에서 200 Hz사이의 소음이 크게 줄었는데 Fig. 6(b)의 상호상관함수를 보면 그 부분의 기여도가 다른 주파수에 비하여 크다는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 10(c)의 마이크로폰을 이용한 경우에는 120 Hz와 180 Hz부근을 제외한 0 Hz에서 400 Hz구간의 전반적인 소음이 줄었음을 알 수 있는데 이러한 결과 역시 Fig. 6(c)의 상호상관함수에서 0 Hz에서 400 Hz사이의 기여도가 상대적으로 커 제어 성능이 높아졌음을 알 수 있다.

전체적인 감소 성능은 마이크로폰을 사용한 ③지점의 신호를 참조신호로 사용한 경우가 가장 우수한 것으로 평가할 수 있다. 그러나 120 Hz와 180 Hz부근과 같은 일부 주파수에서는 성능이 좋지 않은 상태를 보이기도 하였다. 이 경우 ②지점의 가속도계

신호를 모두 참조신호로 활용한 다채널 능동제어를 통하여 향후 성능 개선이 가능할 것으로 생각된다.

5. 결 론

이 연구는 타워형 에어컨에서 발생하는 소음을 감소시키기 위해 FXLMS기반의 능동제어기술을 적용한 결과로 능동소음제어를 위해 구성품인 오차 센서, 참조 신호 센서 및 제어음원을 선정하고 제어기를 설계하였으며 최종적으로 실험을 통하여 제어 성능을 확인하였다. 이 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

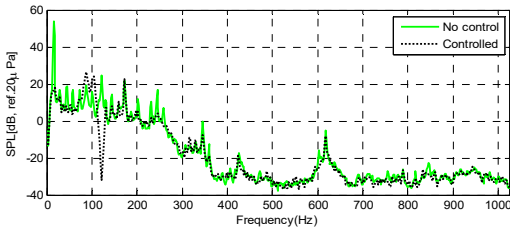
(1) 실제 시스템(이 연구에서는 타워형 에어컨)에 대한 능동소음제어 기술을 적용하여 소음 감소 성능을 확인하기 위해 오차센서의 선정 및 위치 설정, 제어스피커의 성능 검토를 통한 가용 주파수 확인, 참조신호의 선정을 위한 센서 및 위치 선정 등의 면밀한 검토가 요구되었다.

(2) 그리고 참조신호는 제어 대상이 되는 소음원의 특성 정보를 제어기로 제공하여 제어 성능을 향상하도록 하므로 센서의 종류와 위치의 선정의 중요성을 확인하였다. 참조신호를 선정할 때 오차신호와 참조신호 사이의 상호상관함수를 검토하여 참조신호의 적절성을 검토할 수 있음을 확인하였다.

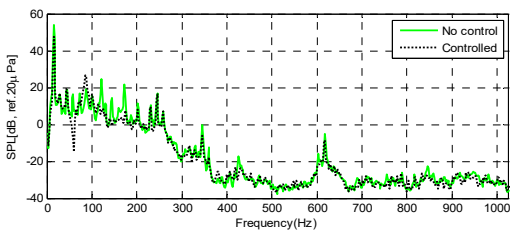
(3) 이 연구에서 선정한 3종의 참조신호를 이용하여 능동제어를 수행한 결과 모터 고정부(①지점)에 설치한 가속도계를 참조센서로 이용한 경우는 100 Hz근처와 170 Hz근처의 피크를 제외한 저주파 대역에서 높은 소음 감소 성능을 보였다. 반면 에어컨 벽면(②지점)에 설치한 가속도계를 참조센서로 이용한 경우는 저주파 대역 성능이 나쁘고 100 Hz근처 피크는 나쁘지만 170 Hz근처 피크는 우수한 제어 성능을 보였다.

(4) 마이크로폰을 사용한 ③지점의 신호를 참조신호를 사용한 경우가 가장 우수한 것으로 평가할 수 있었으나 일부 주파수에서는 성능이 좋지 않은 상태를 보이기도 하였다. 특히 120 Hz와 180 Hz에서의 피크는 성능이 다른 참조신호에 비하여 감소 성능이 낮은 것으로 나타났다.

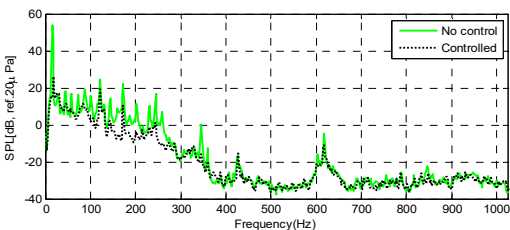
(5) 향후, 관심 주파수 대역 내에서 전반적인 감소 성능을 확보하기 위해 여러 참조신호를 반영한 다채널 FXLMS 제어기에 대한 연구를 수행할 계획이다.



(a) Reference signal from the accelerometer at ①



(b) Reference signal from the accelerometer at ②



(c) Reference signal from the microphone at ③

Fig. 10 Measured SPL at the error sensor location without control (faint solid) and with FXLMS control (thick dotted) with the reference signal from each of 3 reference sensors

후 기

이 논문은 2015년 울산과학기술대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행됨.

References

(1) Billatos, S. B. and Basaly, N. A., 1997, *Green Technology and Design for the Environment*, Taylor and Francis, Washington, DC.

(2) Windle, R. J., Wood, S., Shanks, N., Perks, P., Conde, G. L., Costa, A. P. C. da, Ingram, C. D. and Lightman, S. L., 1997, Endocrine and Behavioural Responses to Noise Stress: Comparison of Virgin and Lactating Female Rats during Non-disrupted Material Activity, *Journal of Neuroendocrinology*, Vol. 9, No. 6, pp. 407~414.

(3) Blazier, W. E., 1997, RC Mark II: A Refined Procedure for Rating the Noise of Heating, Ventilating, and Air-conditioning (HVAC) Systems in Buildings, *Noise Control Eng. J.*, Vol. 45, No. 6, pp. 243~150.

(4) Kuo, S. M. and Dennis, R. M., 1996, *Active Noise Control Systems: Algorithms and DSP Implementations*, John Wiley & Sons, Inc., New York.

(5) Nelson, P. A. and Elliott, S. J., 1994, *Active Control of Sound*, Academic Press, A Harcourt Science and Technology Company, New York.

(6) Woo, J. H., Kim, I. S., Ih, J. G. and Kim, K. J., 1992, Active Noise Control of the Plane Wave Travelling in a Duct Using Filtered-x LMS Algorithm, *Transactions of the Korean Society Noise and Vibration Engineering*, Vol. 2, No. 2, pp. 107~116.

(7) Elliott, S. J., Stothers, I. M. and Nelson, P. A., 1987, A Multiple Error LMS Algorithm and Its Application to the Active Control of Sound and Vibration, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Vol. ASSP-35, No. 10, pp. 1423~1434.

(8) Elliott, S. J., 2005, *Signal Processing for Active Control*, Academic Press, A Harcourt Science and Technology Company, New York.

(9) Kwon, O. C., Lee, G. T., Park, S. G. and Lee, J. Y., 2008, Performance Improvement of Active Noise

Control Using Co-FXLMS Algorithm, *Transactions of the Korean Society Noise and Vibration Engineering*, Vol. 18, No. 3, pp. 284~292.

(10) Sutton, T. J., 1992, *The Active Control of Random Noise in Automotive Interiors*, Ph.D. Thesis, University of Southampton.



Kyungwan Ryu received B.S. and M.S. degrees from Pusan National University in 2008 and 2010. He has been worked for Samsung Electronics, from 2010. His research interests are in the area of active noise control.



Chinsuk Hong received B.S. in mechanical engineering and an M.S. in dynamic and vibration from Youngnam University, Korea, in 1988 and 1991, respectively. He worked for the Naval System Development center in Agency Defense Development (ADD), Korea, for 12 years from 1991. He then joined the Institute of Sound and Vibration Research (ISVR), University of Southampton, UK, in 2003, to pursue his Ph.D. He received the Ph.D. in sound and vibration, in 2005, He is now with Naval Architecture and Ocean Engineering, Ulsan College from 2009. His research interests include active noise and vibration control, flow-induced noise and underwater shock response analysis.



Weuibong Jeong received B.S. and M.S. degrees from Seoul National University in 1978 and from KAIST in 1980, respectively. He then received his Ph.D. degree from Tokyo Institute of Technology in 1990. Dr. Jeong is currently a professor at the department of mechanical engineering at Pusan National University in Busan, Korea. His research interests are in the area of the measurement and signal processing, finite/boundary element analysis of noise and vibration, fluid-structure interactions and acoustic-structure interactions.