

# 중소규모 공장에 설치된 송풍기의 소음 감소를 위한 능동소음제어

오원근\*

<sup>1</sup>순천대학교 멀티미디어공학과

## Active Noise Control of Blower Fan Noise at the Small-medium Size Factories

Wongun Oh<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Multimedia Engineering, Suncheon National University

**요약** 산업 현장에서 발생하는 소음은 작업자의 건강과 작업 효율에도 영향을 줄 뿐 아니라, 주변의 주거지역의 소음 민원의 원인이 된다. 본 논문에서는 중소규모 공장에서 많이 사용되는 송풍기에서 발생하는 소음을 3차원 공간에서 능동소음제어기(ANC)를 이용하여 저감하는 기술 개발을 위한 기초 연구를 수행하였다. 이를 위해 ANC의 설정과 결과 데이터를 용이하게 파악할 수 있는 시뮬레이터 프로그램을 Labview를 이용하여 작성하여 음압레벨, 스펙트럼, 등가소음도 등의 데이터를 비교하였다. 소음 데이터는 현재 중소규모 공장에서 운전 중인 터보팬 송풍기에서 발생하는 소음을 기기 주변 17개의 위치에서 녹음하여 사용하였다. 모의실험 결과 17 지점 모두 500Hz 이하 저주파 대역에서 파워 스펙트럼이 최대 40dB 줄었으며 등가소음레벨이 평균 12.6dB 감쇄되는 결과를 보였다.

**Abstract** The noise produced in a factory is a cause of the noise complaint of the surrounding residential areas. In addition, it affects the work efficiency and health of workers. This paper presents the results of a basic study to reduce the noise generated from the blower, which is often used in the factory of a small and medium scale, using an active noise controller (ANC) in three-dimensional space. For this purpose, the simulator program, which can compare various parameters of the original noise and controlled noise, such as sound pressure levels, power spectra, and equivalent noise levels, was developed. The noise data was recorded at 17 points around a turbo fan blower currently being operated in a small-medium size factory. The simulation results showed that the power spectrum was reduced by a maximum of 40dB in the low frequency band and the average equivalent noise level attenuation was 12.6dB.

**Key Words** : Active Noise Control, Blower, Fan Noise, Noise, Simulator

### 1. 서론

산업 현장에서 발생하는 소음은 작업자의 건강과 작업 효율에도 영향을 줄 뿐 아니라, 현장 주변의 주거지역의 소음 민원의 원인이 된다. 이러한 소음의 발생 원인은 다양하며, 그 중 하나가 공장에서 사용하는 모터 및 송풍기에서 발생하는 소음이다. 이러한 설비소음을 제어하는 방식에는 덕트, 챔버, 소음기, 흡음재 등을 사용하는 수동형 소음 제어 방식이 일반적으로 사용되고 있다. 그러나 이 방식은 공장 환경에 따라 설치 위치나 크기의 제한 등

으로 인해 사용에 제약이 있을 수 있으며, 설치 및 유지보수에 경비가 많이 소요되기 때문에 중소규모 공장에서 쉽게 적용하기 힘들 수 있다. 또한 수동형 소음 제어 방식의 소음 감쇄 성능은 500Hz 이하의 주파수 대역에서는 효과가 떨어지며, 저역으로 갈수록 흡음기의 크기나 흡음재의 두께가 두꺼워지는 단점이 있다[1].

이러한 단점을 가진 수동 제어 방식의 대안으로 제기되는 것이 능동소음제어(ANC; Active Noise Control) 기술이다[2]. ANC는 원소음과 위상이 180도 반대가 되는 역소음(anti-noise)을 발생시켜 이를 스피커로 확장하여

\*Corresponding Author : Wongun Oh(Suncheon National Univ.)

Tel: +82-61-750-3832 email: owg@suncheon.ac.kr

Received April 7, 2014

Revised June 2, 2014

Accepted July 10, 2014

원 소음과 합성함으로써 소음을 제거하는 원리로 동작한다. 이는 500Hz 이하의 대역에서 소음을 줄이는데 효과적으로 적용될 수 있는 것으로 알려져 있다. 이 기술은 1930년대 특허가 출원된 이후로 기술적인 한계로 인해 오랫동안 응용 되지 못하고 있었으나, 최근 DSP기술의 발달과 함께 활발하게 연구되고 있는 추세이다[3,4].

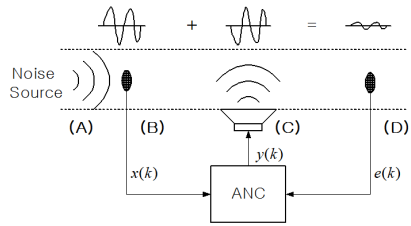
현재 ANC기술은 주로 2차원 평면파에 응용되고 있으며, 3차원 공간에 응용한 연구는 많지 않은 편이다. 3차원 공간에 ANC가 적용된 연구로는 밀폐된 공간[5,6], 잔향이 있는 공간[7], 냉각 팬[8]에 대한 연구가 있으나, 스피커 상호간의 간섭으로 인해 제어 지점 이외의 소음 레벨이 증가하는 문제[9]와 다채널 제어로 인한 복잡한 알고리즘 등으로 인해 실용화에 어려움이 많은 상황이다.

이러한 점을 고려하여 본 논문에서는 중소규모 공장에서 많이 사용되는 송풍기에서 발생하는 소음을 3차원 공간에서 ANC를 이용하여 저감하는 기술 개발을 위한 기초 연구를 수행하였다. 이를 위해 ANC 제어기의 설정과 결과 데이터를 용이하게 파악할 수 있는 시뮬레이터 프로그램을 작성하여 음압레벨, 스펙트럼, 소음도 등의 데이터를 비교하였다. 소음 데이터는 현재 중소규모 공장에서 운전 중인 터보팬 송풍기에서 발생하는 소음을 기기 주변 17개의 녹음점에서 녹음하여 사용하였다. 모의실험 결과 소음 제어 위치에 따라 등가소음레벨  $L_{eq}$ 가 평균 12.6dB 감소됨을 확인하였다.

본 논문의 구성은 2장에서는 ANC개요, 3장에서는 송풍기의 소음 특성, 4장에서는 시뮬레이터와 분석, 그리고 결론으로 이루어져 있다.

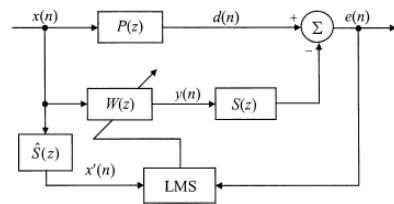
## 2. 능동소음제어(ANC)

ANC는 마이크로 입력 받은 소음과 위상이 반대인 소음을 생성하고, 이를 합성함으로써 소음을 저감시키는 원리로 동작한다. Fig. 1은 이의 개념도를 나타낸 것이다. 여기에서 (A)는 원소음, (B)는 입력 마이크, (C)는 역 위상 소음 출력 스피커, 그리고 (D)는 저감된 소음을 측정하기 위한 error 마이크이다. ANC제어기는 디지털 필터로 구성되며, 적응(adaptive) 알고리즘을 이용해 역 위상 신호를 생성한다. 제어 알고리즘은 여러 가지 방법이 제안되어 있으나, 가장 대표적으로 사용되는 것은 FxLMS(filtered-x least mean square)알고리즘이다[2].



[Fig. 1] The structure of Active Noise Control systems

FxLMS 알고리즘의 블록선도는 Fig. 2와 같다.



[Fig. 2] The structure of FxLMS algorithm

여기에서  $x(n)$ 은 마이크로 입력된 원 소음 신호,  $d(n)$ 은 역 위상 소음 출력 스피커 위치에서의 소음 신호, 그리고  $y(n)$ 은 스피커를 통해서 나오는 역위상 소음 신호이다. 또한  $P(z)$ 는 입력 마이크와 스피커간의 전달 함수이며,  $W(z)$ 는 FIR 구조의 적응 필터, 그리고  $S(z)$ 는 앰프, 스피커 등과 같은 전기음향기기의 전달함수를 의미하는 이차경로(secondary path)이다.  $\hat{S}(z)$ 는  $S(z)$ 의 모델 전달함수이며, 이차 경로의 영향을 상쇄하기 위한 것이다.

FxLMS의 알고리즘은 steepest descent algorithm에 기반을 둔 것으로써 그 동작은 다음과 같이 유도된다. 먼저 시간  $n$ 에서 오차신호  $e(n)$ 은 다음 식과 같다.

$$e(n) = d(n) - s(n) * y(n) = d(n) - s(n) * [\mathbf{w}^T(n) \mathbf{x}(n)] \quad (1)$$

여기에서  $\mathbf{w}(n)$ 는 적응 필터  $W(z)$ 의 계수이며, 시간  $n$ 에서의 자승 오차  $e^2(n)$ 을 최소화 시키도록 다음과 같이 업데이트 된다.

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) - \frac{\mu}{2} \nabla e^2(k) \quad (2)$$

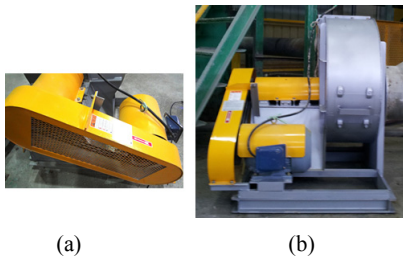
여기에서  $\nabla e^2(k)$ 는 평균자승오차 기울기(gradient)의 순간 예측값이다. 최종적인 업데이트 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{w}(n+1) &= \mathbf{w}(n) - \mu \mathbf{x}'(n)e(n) \\ &= \mathbf{w}(n) - \mu [\hat{\mathbf{s}}(n) * \mathbf{x}(n)]e(n) \end{aligned} \quad (3)$$

### 3. 송풍기의 소음 분석

#### 3.1 송풍기의 구조와 특징

사용된 송풍기는 비료 원료를 생산하는 중소규모 공장에서 원료의 세척 및 건조를 위해 현재 사용되고 있는 것으로써 크기는 가로 890mm, 세로 1047mm, 높이 1210mm 이다. 모터 용량은 7.5kw, 송풍부는 풍량 120CMM, 정압 160 mmAq인 터보팬(turbo fan) 타입으로써 모터와 팬은 v벨트로 연결되어 구동된다[Fig. 3].

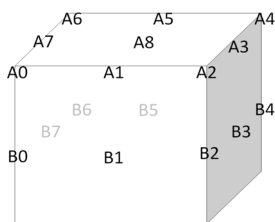


[Fig. 3] The blower (a)side view (b)front view

이러한 송풍기의 소음을 줄이기 위한 전통적인 방법으로는 흡음재를 사용한 차폐 구조물을 생각할 수 있다. 그러나 현장 환경 및 송풍기의 특성상 원활한 공기 흡입을 위해서 소음 차폐를 위한 밀폐형 구조물의 설치가 어렵기 때문에 ANC의 적용을 고려하였다.

#### 3.2 송풍기의 음향 방사 특성 분석

송풍기의 정상 운전 시 발생하는 소음을 Fig. 4와 같이 상단 및 측면의 17개의 지점에서 1m 거리에서 녹음하였다. 그림에서 A1과 B1이 송풍기 정면 방향을 의미한다.

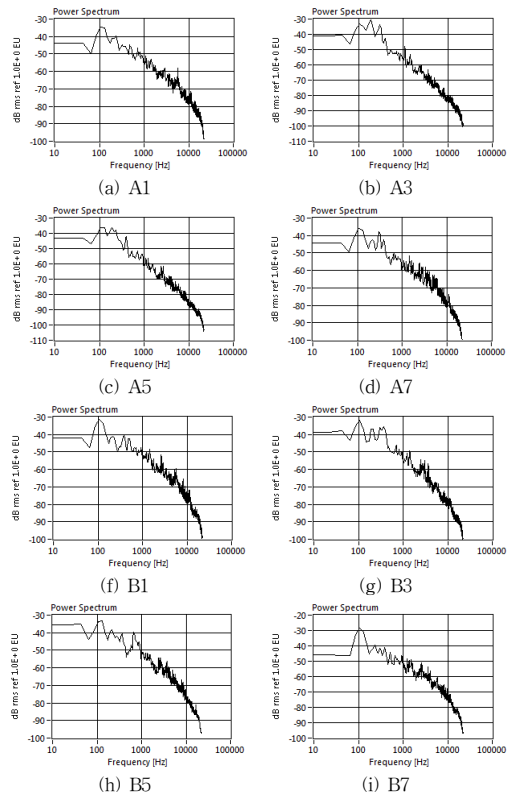


[Fig. 4] The noise recording points

녹음은 보정을 마친 Audix TR-40 무지향성 측정용 콘덴서 마이크를 사용하여 44.1kHz 샘플링율과 16bits 양자화를 사용한 PCM 방식으로 녹음 하였으며, 동시에 음량을 이용하여 음압 레벨(Sound Pressure Level)을 측정하였다. 각 녹음점에서 측정한 A-특성 음압 레벨은 Table 1과 같으며, 측정 위치에 따라 음압 레벨은 71~77dB로 최대 6dB의 편차를 보이고 있다.

[Table 1] The sound pressure level of the recording points

No.	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
SPL (dBA)	74	74	74	74	71	71	74	73	73.6
No.	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	x
SPL (dBA)	75	76	75.5	75	74	74	77	76	x



[Fig. 5] The power spectrum of the noise at the selected points

측정된 소음의 주파수 특성을 파악하기 위해 파워 스펙트럼을 분석하였다. Fig. 5는 대표적인 녹음점 8곳에서 송풍기 소음의 파워 스펙트럼을 나타낸 것으로써, 모든

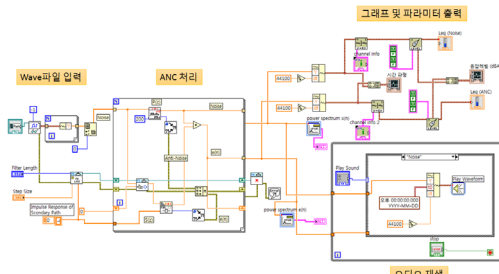
녹음점에서 유사한 스펙트럼 분포를 보이고 있다. 즉, 소음 스펙트럼의 에너지는 100~300Hz에 집중되어 있으며, 500Hz 이상에서는 에너지 분포가 급격히 감소되고 있는 패턴을 가지고 있다.

이와 같이 에너지가 저주파 대역에 집중되어 있기 때문에 500Hz이하의 대역에 대해 소음을 효과적으로 감쇄시키는 것이 중요하며, 그 이상의 대역의 소음을 줄이는 것은 전체 소음 저감에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 이렇게 저음에 에너지가 집중된 송풍기 소음의 스펙트럼 패턴은 500Hz이하 대역 소음에 대해 효과적으로 작용하는 ANC 적용하기에 적합한 것이라 할 수 있다.

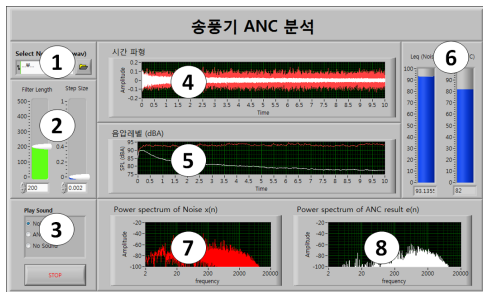
## 4. 송풍기의 능동소음제어 시뮬레이션

### 4.1 능동소음제어 시뮬레이터

앞에서 언급한 송풍기에 대해 능동소음제어기를 적용하였을 때 그 성능을 평가, 분석하기 위한 시뮬레이터 프로그램을 작성하였다. 프로그램은 Labview 2012를 이용하여 작성하였으며, 녹음된 소음 파일을 이용하여 능동소음제어를 적용하고 그 결과를 분석할 수 있도록 구성되어 있다. Fig. 6은 완성된 시뮬레이터의 Labview 블록 다이어그램과 사용자 인터페이스 화면을 나타낸 것이다.



(a)



(b)

[Fig. 6] ANC simulator for the blower (a) Labview block diagram (b) User interface

시뮬레이션 프로그램은 소음 파일 입력부, FxLMS 알고리즘을 이용한 ANC처리부, 음압 변화와 스펙트럼 변화를 출력하는 그래프 및 파라미터 출력부, 그리고 제어 전후의 소음을 비교해서 청취할 수 있도록 하기 위한 오디오 재생부로 구성되어 있다.

사용자 GUI는 원소음과 제어된 소음에 대한 시간 그래프, 파워 스펙트럼 그래프,  $L_{eq}$  값 등으로 구성되어 있으며, 각 부분의 상세한 의미는 다음과 같다.

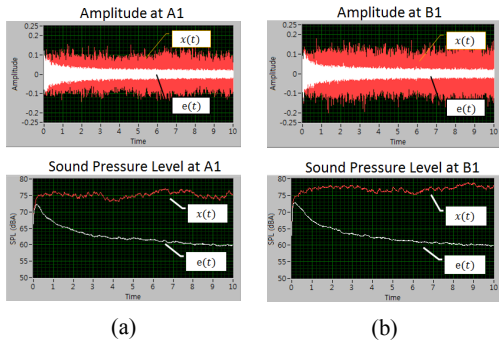
- ① wav파일 선택 창
- ② FxLMS 제어기의 필터 차수 N과 적응 계수  $\mu$
- ③ 소음 재생 여부 선택(원소음, 제어 후 소음, 무음)
- ④ 원소음과 제어된 소음의 시간 그래프
- ⑤ 원소음과 제어된 소음의 음압레벨 그래프
- ⑥ 원소음과 제어된 소음의  $L_{eq}$  값
- ⑦ 원소음의 파워 스펙트럼 그래프
- ⑧ 제어된 소음의 파워 스펙트럼 그래프

### 4.2 시뮬레이션 결과

개발된 시뮬레이터를 이용하여 송풍기 주변 17개의 녹음점에서 녹음한 소음에 대해서 ANC적용 전후를 비교하였다. 10초 길이의 녹음된 소음에 대해서 FxLMS 알고리즘을 적용하였으며, 제어기로 사용된 필터의 차수와 스텝크기(step size)는 각각  $N=200$ ,  $\mu=0.0025$ 의 값을 사용하였다.

#### 4.2.1 음압 및 음압레벨 변화

Fig. 7은 송풍기의 정면 방향 A1과 B1 위치에서 측정된 소음에 대해서 능동소음제어를 적용하기 전후의 시간 파형의 변화와 A-특성 음압레벨의 변화를 보인 것이다. (a)는 A1 녹음점이며 제어가 시작된 직후 소음이 급격하게 줄어드는 것을 시간 그래프에서 확인할 수 있으며, 음압레벨은 75dBA에서 약 1.5초 후에는 64dBA로 감쇄되고 10초 후에는 58dB로 줄어들어 약 16dB의 소음 감쇄 효과를 보이는 것으로 확인되었다. (b)는 B1 녹음점에서의 제어 결과를 보인 것으로써, 1.5초 후에 약 10dB, 그리고 10초 후에는 17dB의 음압 레벨 변화를 나타내었다. 다른 15개의 녹음점에서도 이와 유사한 소음 감소 결과를 보이는 것을 확인할 수 있었다.

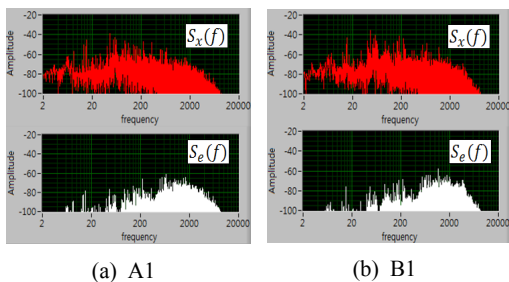


[Fig. 7] The amplitude and SPL graph of the original noise  $x(t)$  and the controlled noise  $e(t)$

#### 4.2.2 파워스펙트럼 변화

주파수 영역의 분석을 위해 원소음의 파워 스펙트럼  $S_x(f)$ 와 제어된 소음의 파워스펙트럼  $S_e(f)$ 를 시뮬레이션으로 비교하였다. Fig. 8은 송풍기의 정면 방향 A1과 B1 위치에서 측정된 소음에 대해서 능동소음제어를 적용하기 전후의 파워 스펙트럼 변화를 보인 것이다.

500Hz이하 대역에서 소음의 에너지는 ANC적용 후에는 주파수에 따라 최고 40dB까지 감쇄된 것을 확인 할 수 있으며, 나머지 15개의 녹음점에서 모두 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 이렇게 저역의 에너지가 감쇄된 것은 주로 저주파 대역의 소음 제어에 효율적인 ANC의 특성을 반영하는 것이며, ANC가 500Hz이하의 소음 에너지가 높은 송풍기의 특성에 유효하게 적용이 가능함을 알 수 있다.

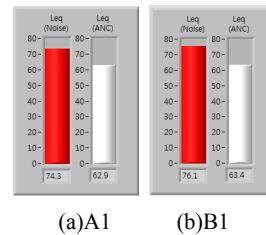


[Fig. 8] The power spectrum of the original noise and the controlled noise

#### 4.2.3 등가소음레벨 $L_{eq}$

송풍기 소음이 환경에 미치는 영향의 변화를 보기 위해서 등가소음레벨의 변화를 계산하였다. 환경소음을 평

가하는 방법에는 등가소음레벨( $L_{eq}$ ; Equivalent Sound Level), 소음통계레벨( $L_N$ ; Percentile Noise Level), NC곡선(Noise Criteria Curves), NR곡선(Noise Rating Curves)과 같은 다양한 파라미터가 제안되어 사용되고 있다. 이 중 등가소음레벨  $L_{eq}$ 는 일반적으로 주관적인 평가와의 잘 부합되며, 이론적 취급이 용이하고 단일 지표로 나타낼 수 있기 때문에 각국에서 널리 사용되고 있으며, 현재 국내의 소음진동관리법 등에서도 사용하는 척도이다. Fig. 9는 A1과 B1 녹음점에서  $L_{eq}$  변화를 보여주는 화면을 보인 것이다.



[Fig. 9]  $L_{eq}$  of the original noise and the controlled noise

표 2는 각 녹음점에서 측정된 원소음과 ANC를 적용한 후의 소음에 대한  $L_{eq}$  값의 변화를 나타낸 것으로 평균 12.6dB의 감소 효과가 있음을 보이고 있다.

[Table 2] The equivalent sound level  $L_{eq}$

No.	Uncontrolled Noise	Controlled Noise	Diff.
A0	74.1	62.7	11.4
A1	74.3	62.9	11.4
A2	74.2	62.9	11.3
A3	77.8	61.6	16.2
A4	74.6	61.1	13.5
A5	73.7	60.7	13
A6	74.9	62.7	12.2
A7	73.2	62.6	10.6
A8	73.1	61.9	11.2
B0	75.5	63.3	12.2
B1	76.1	63.4	12.7
B2	75.2	63.6	11.6
B3	77.2	62.7	14.5
B4	75.2	63.3	11.9
B5	76.7	63.4	13.3
B6	77.7	64	13.7
B7	77.7	64	13.7
평균	75.4	62.8	12.6

## 5. 결론 및 논의

본 논문에서는 능동소음제어기를 송풍기에 적용하기 위한 모의실험 기반의 기초 연구를 수행하였다. 모의실험을 위해 FxLMS 알고리즘을 Labview로 구현하였으며, 송풍기 주변 17개 지점에서 녹음한 소음 데이터를 사용하여 적용 전후를 비교하였다. 모의실험 결과 17 지점 모두에서 저주파 대역 파워 스펙트럼이 최대 40dB 줄었으며, 등가소음레벨  $L_{eq}$ 의 값이 평균 12.6dB 감소되었음을 확인하였다.

본 논문에서는 녹음된 데이터로 모의실험을 통해 유용성을 확인하였으나, 실제 송풍기에서 능동소음제어기를 적용하기 위해서는 추가 연구의 필요성이 있다. 즉, 실제 송풍기가 위치한 3차원 공간에서 다수의 마이크와 스피커를 사용하는 다중 채널 ANC 알고리즘을 적용하기 위해서는 스피커 출력의 상호 간섭을 해결하기 위한 마이크, 스피커의 적절한 위치에 대한 연구와 FxLMS 이외의 적절한 다채널 알고리즘에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

## References

[1] J. S. Kim, Noise and Vibration Engineering, 4th ed, Sejinsa, 2013.

[2] S. M. Kuo and D. R. Morgan, "Active noise control: a tutorial review," Proc. IEEE, vol. 87, no. 6, pp. 943 - 973, 1999.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/5.763310>

[3] N. George and G. Panda, "Advances in active noise control: A survey, with emphasis on recent nonlinear techniques," Signal Processing, vol. 93, no. 2, pp. 363 - 377, Feb. 2013.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sigpro.2012.08.013>

[4] K. W. Ryu, C. Hong, C. Shin, and W. Jeong, "Active Noise Control of a Colsed Rectangular Cavity Using FxLMS Algorithms," J. of Korean Soc. Noise Vib. Eng., vol. 21, no. 11, pp. 983 - 990, 2011.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5050/KSNVE.2011.21.11.983>

[5] W. Oh, S. Kim, S. Kim, and S. Kim, "Noise Reduction of Blowers using Active Noise Control," Proc. of the KACE Conference, pp. 237 - 240, 2014.

[6] J. Oh, I. H. Yang, J. H. Yoon, J. Jung, and J. W. Lee, "Active Noise Control of 3D Enclosure System using FxLMS Algorithm," Proc. of the KSNVE, 2009, vol. 2, pp.

240 - 241.

[7] M. Miyoshi and Y. Kaneda, "Active Control of Broadband Random Noise in a Reverberant Three-Dimensional Space," Noise Control Eng. J., vol. 36, no. 2, pp. 85 - 90, 1991.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.3397/1.2827783>

[8] K. L. Gee and S. D. Sommerfeldt, "Application of theoretical modeling to multichannel active noise control of cooling fan noise," J. Acoust. Soc. Am., vol. 115, no. 1, pp. 228 - 236, 2004.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1121/1.1631940>

[9] C. Ye, M. Wu, and J. Yang, "Actively created quiet zones by parametric loudspeaker as control sources in the sound field," AIP Conference Proceedings, vol. 367, pp. 367 - 374, 2012.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4749371>

오 원 근(Wongun Oh)

[정회원]



- 1992년 2월 : 한양대학교 대학원 전자통신공학과(정보통신공학석사)
- 1997년 2월 : 한양대학교 대학원 전자통신공학과(정보통신공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 순천대학교 멀티미디어공학과 교수

<관심분야>

음향시스템, 능동소음제어, 디지털신호처리, 원격교육