

다중채널 LMS 알고리즘을 이용한 능동방음벽 구현

(Implementation of Active Noise Barriers Using Multiple Channel LMS Algorithms)

남현도* · 서성대

(Hyun - Do Nam · Sung - Dae Seo)

요 약

본 논문에서는 외부에 위치하는 소음원에 의하여, 창문 등과 같이 부분적인 개구부를 가지는 실내 공간에 소음이 전파될 때, 적응필터를 이용하여 이를 제어하는 능동 방음벽을 구현하였다.

적응필터의 수렴성을 증가시키기 위하여 다중채널 leaky LMS 알고리즘을 사용하였으며 창문 등의 개구부를 통하여 들어오는 소음을 제거하기 위하여 새로운 형태의 능동방음벽을 제안하였다.

기존의 ANC 기법을 이용한 기법과 제안한 기법을 TMS320C33 DSP를 이용한 실험을 통해 비교 분석하였다. 오차 마이크로폰의 위치에서는 ANB가 다소 좋은 결과를 얻었으나 두 경우 모두 비교적 좋은 결과를 얻을 수 있었지만, 전체 위치에서 소음의 감쇄를 소음계를 이용해 측정한 결과 ANB가 훨씬 좋은 결과를 보였다. ANC의 경우 보일러 소음의 경우는 평균적으로 차이가 거의 없었으며 위치에 따라서는 증가하는 곳도 있었으나, ANB의 경우는 단일 소음 및 보일러 소음 모두 증가하는 곳은 한 곳도 없었으며 평균적으로도 ANC의 경우보다 훨씬 좋은 결과를 보였다.

Abstract

In this paper, implementation of active noise barriers(ANB) to attenuate exterior noise which is propagated through open windows is presented. The leaky multiple channel LMS algorithms are used for adaptive filters to improve the convergence property, and a new type of the active noise barrier is proposed.

The attenuation effects of conventional active noise control(ANC) systems using leaky multiple channel LMS algorithms and the proposed system are compared by experiments using a TMS320C33 digital signal processor.

Noise attenuation levels at the points of error microphones are similar for both systems, but average noise attenuation effects of the proposed system for an entire space of an experimental enclosure are much better than conventional ANC systems.

Key Words : active noise barrier, adaptive filter, multi-channel LMS algorithm, digital signal processor

* 주저자 : 단국대학교 전기전자컴퓨터공학부 교수

Tel : 02-709-2574, Fax : 02-795-8771

E-mail : hdnam@dgu.edu

접수일자 : 2003년 8월 5일

1차심사 : 2003년 8월 8일

심사완료 : 2003년 9월 18일

조명 · 전기설비학의논문지 제17권 제6호, 2003년 11월

1. 서 론

소음을 제어하는 기법으로는 흡음재나 방음재를 이용한 수동소음제어 기법과 중첩의 원리를 이용한 능동소음제어 기법인 ANC(Active Noise Control)

다중채널 LMS 알고리즘을 이용한 능동방음벽 구현

가 있는데, 수동소음제어 기법은 파장이 짧은 고주파 소음에 대해서는 좋은 효과가 있으나, 500Hz 미만의 저주파 소음에 대해서는 소음 감쇄 효과가 떨어진다[1].

능동소음제어는 소음파를 평면파로 취급할 수 있는 1차원 음향 공간에서의 문제[2]와 평면파로 취급할 수 없는 3차원 음향 공간에서의 문제[3,4]로 나눌 수 있는데, 최근에는 DSP 기술의 발달로 공장, 사무실 및 자동차와 비행기의 내부에서와 같이 3차원 음향공간에서의 능동소음제어 문제가 활발히 연구되고 있다. ANC를 이용하여 공간을 제어할 경우, 소음을 선택적으로 제어할 수 있는 장점이 있으나 마이크로폰이 있는 곳에서는 소음이 줄어드나 그 외의 공간은 별로 효과가 없거나 오히려 소음이 늘어나는 문제가 있어 외부 소음의 전파 경로를 능동적으로 차단하여 전체 공간의 소음을 줄이는 능동 방음벽(Active Noise Barrier; ANB)에 관한 연구가 이루어지고 있다[5,6].

적용필터의 구성을 위한 적응 알고리즘으로는 계산량의 문제 때문에 Least Mean Square(LMS) 알고리즘[7]이 많이 쓰이고 있으나 수렴 속도가 느리며, 수렴을 빠르게 하기 위해 수렴계수를 크게 하면 발산하는 경향이 있다.

본 논문에서는 공간 외부에 위치하는 소음원에 의하여, 창문 등과 같이 부분적인 개구부를 가지는 실내 공간에 소음이 전파될 때, 능동소음제어 기법을 이용하여 이를 제어하는 능동 방음벽을 다중채널 FXLMS(Filtered-x LMS) 알고리즘을 이용하여 구현한다. FXLMS 알고리즘의 수렴을 좋게 하기 위하여 leaky LMS 알고리즘을 이용하며 제어용 스피커를 창문 옆 부분에 배치하는 새로운 형태의 능동방음벽을 구현하였다. 기존의 ANC 기법을 이용한 기법과 제안한 기법을 TMS320C33 DSP를 이용한 실험을 통해 비교 분석한다.

2. 능동 방음벽

흡음재, 방음재 등을 사용한 과거의 수동적 소음 제거 기법은 저주파 대역의 소음을 감소시킴에 있어, 파장이 길어지는 만큼 더 두꺼운 재질의 재료를 필

요하게 되어 비용이 증가하고 공간적인 문제가 있어 능동소음제어 기법의 필요성이 제기되고 있다.

ANC 기법을 사용한 능동소음 제어기법은 소음원 내부에 있거나 외부에 있거나 상관없이 소음을 선택적으로 제어할 수 있는 장점이 있으나 마이크로폰이 있는 곳에서는 소음이 줄어드나 그 외의 공간은 별로 효과가 없거나 오히려 소음이 늘어나는 문제가 있으며 사무실 등의 공간 전체를 제어하고 싶을 때는 마이크로폰 및 제어 스피커의 숫자를 늘려야 하므로 계산량이 지나치게 많아 실현이 어렵다.

소음원이 제어하고자 하는 공간의 외부에 존재할 때, 외부 소음의 전파 경로인 창문 등과 같은 개구부를 능동적으로 차단하여 전체 공간의 소음을 줄이는 능동 방음벽을 이용하면 마이크로폰 및 제어 스피커의 숫자를 줄여도 전체의 소음 감쇄가 가능하다.

능동 방음벽은 소음센서(마이크로폰)를 이용하여 외부의 소음을 감지한 후, 적용필터를 통해 내부의 소음을 감쇄시키는 2차음원을 내보내 소음을 상쇄시키는 방법이다[5,6]. 오차센서(마이크로폰)를 이용해 잔존 소음을 측정하여 잔존 소음을 최소화할 수 있게 적응 필터를 업데이트 시킨다. 그림 1에서와 같이 1차 소음원에서 발생한 소음을 소음센서로 측정해 적용필터와 제어스피커를 통해 방음벽 주위의 소음을 감쇄시켜 능동 방음벽을 형성하는 모습을 보이고 있다. 소음센서 및 제어스피커의 수가 많을수록 소음실내에 소음 감쇄지역(quiet zone)은 커지게 된다.

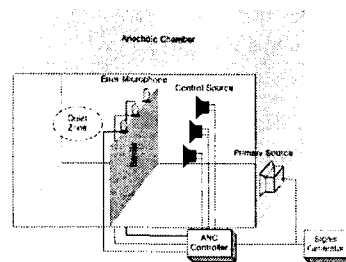


그림 1. 능동 방음벽
Fig. 1. Active noise barrier

3. 적응필터 알고리즘

적용필터의 블록선도는 그림 2와 같다[1,8].

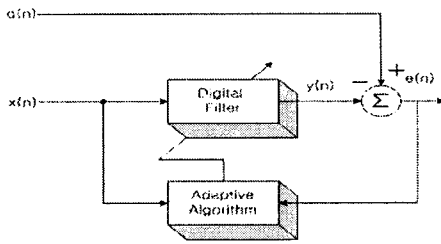


그림 2. 적응필터 기본 구조
Fig. 2. Block diagram of adaptive filters

3.1 LMS 알고리즘

능동소음제어를 위한 적응필터 알고리즘으로는 실시간 처리를 요하고 계산량이 적으면서도 비교적 우수한 성능을 가지는 LMS 알고리즘을 많이 사용한다.

LMS 알고리즘은 오차의 자승의 값 $e^2(n)$ 을 최소화 하는 알고리즘으로 최대 경사법에 오차의 제곱의 기대 값, 즉 $E[e^2(n)]$ 대신에 매 순간의 $e^2(n)$ 의 값을 적용하여 유도한 것으로 이를 전개하면 아래와 같다[7].

$$\xi(n) = e^2(n) \quad (1)$$

$$\nabla \xi(n) = 2[\nabla e(n)]e(n) \quad (2)$$

여기서, $e(n) = d(n) - W^T(n)X(n)$ 이므로

$$\nabla e(n) = -X(n) \quad (3)$$

$$\nabla \xi(n) = -2X(n)e(n) \quad (4)$$

$$W(n+1) = W(n) - \frac{\mu}{2} \nabla \xi(n) \quad (5)$$

식(4)를 최대 경사법의 계수 적응식인 식(5)에 적용하면

$$W(n+1) = W(n) + \mu X(n)e(n) \quad (6)$$

식(6)은 일반적인 LMS 알고리즘이다.

3.2 Leaky LMS 알고리즘

일반적인 LMS 알고리즘은 식 (6)의 각 파라미터를 미세 조정함으로써 목표 신호와 선형필터의 출력 사이의 오차를 최소화하는데 생기는 문제를 경감시

키기 위한 기법의 하나로 leaky LMS 알고리즘을 들 수 있다. LMS 알고리즘에서 $e^2(n)$ 의 값을 최소로 하는 업데이트 과정에서 제어음원의 값이 과도하게 커져 알고리즘이 발산할 수가 있는데, 이러한 발산을 방지하기 위하여 출력을 제한할 필요가 있다. 즉, 목적함수를 식(7)과 수정한다[1,7].

$$\xi(n) = e^2(n) + \gamma y^2(n) \quad (7)$$

여기서 γ 는 가중치이다. 식 (7)의 출력 $y(n)$ 은 필터계수 $W(n)$ 으로 대신하여 비슷한 수행결과를 얻을 수 있으므로

$$\xi = e^2(n) + \gamma W^T(n)W(n) \quad (8)$$

이 된다. 이를 미분하여 업데이트 하면 아래와 같다.

$$\nabla \xi = 2[\nabla e(n)]e(n) + 2\gamma W(n) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} W(n+1) &= W(n) + \mu X(n)e(n) - \mu\gamma W(n) \\ &= (1 - \mu\gamma)W(n) + \mu X(n)e(n) \\ &= \nu W(n) + \mu X(n)e(n) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 $\nu \equiv 1 - \mu\gamma$ 이다.

1에 가까운 ν , ($0 < \nu < 1$)를 추가함으로써 필터계수 $W(n)$ 의 발산을 방지하여 과도한 출력을 방지할 수 있다. 그림 3은 leaky LMS 알고리즘과 LMS 알고리즘을 능동방음벽에 적용하여 실험한 결과이다. 실험에서 사용된 24차의 필터계수 중 첫 번째 계수 $w_0(n)$ 의 값을 그래프로 나타낸 것으로 일반적인 LMS 알고리즘은 시간이 흐를수록 불안정하게 발산하는 것에 비해 leaky LMS 알고리즘은 안정하게 수렴하는 것을 볼 수 있다.

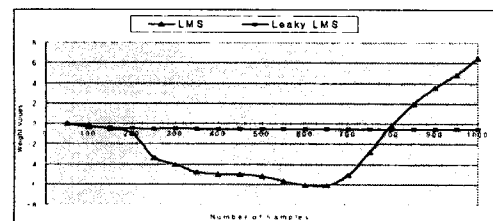


그림 3. Leaky LMS 와 LMS의 수렴특성 비교
Fig. 3. Convergency properties of leaky LMS and LMS

다중채널 LMS 알고리즘을 이용한 능동방음벽 구현

3.3 다중채널 Filtered-X LMS 알고리즘

능동소음제어 시스템은 제어 스피커와 오차 마이크로폰으로 구성되고, 소음원에서 발생한 소음이 오차 마이크로폰에 전달되는 경로를 1차 경로라 하며 제어 스피커와 오차 마이크로폰 사이의 전달 경로를 2차 경로라 한다. 2차 경로 전달함수 S를 추정한 \hat{S} 을 이용하면 그림 4와 같이 다중채널 FXLMS 알고리즘을 적용할 수 있다.

그림 4에서, K는 제어 스피커의 수, M은 오차 마이크로폰의 수이다.

2차 경로 전달 함수 S를 $e(n)$ 에 적용하면

$$e(n) = d(n) - s(n) * [W^T X(n)] \quad (11)$$

여기서 *는 컨볼루션 연산자이다.

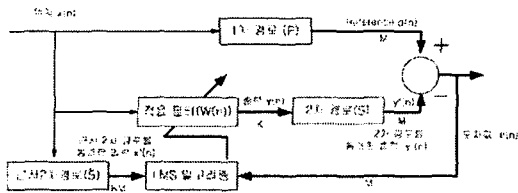


그림 4. 다중채널 FXLMS를 이용한 ANC 시스템
Fig. 4. ANC systems using multi-channel FXLMS

이를 W에 대하여 미분하면,

$$\nabla e(n) = -s(n) * X(n) = -X'(n) \quad (12)$$

여기서 $X'(n) = [x'(n) \dots x'(n-L+1)]^T$, $x'(n) = s(n) * x(n)$ 이다.

식 (12)를 식 (2)에 대입하면 식(13)과 같으므로, FXLMS 알고리즘은 식(14)와 같다.

$$\nabla \xi(n) = -2 X'(n) e(n) \quad (13)$$

$$W(n+1) = W(n) + \mu X'(n) e(n) \quad (14)$$

여기서 $X'(n)$ 을 2차 경로 전달함수 $s(n)$ 대신에 2차 경로 전달함수를 추정한 $\hat{s}(n)$ 를 적용하면 $X'(n) = \hat{s}(n) * X(n)$ 이므로 다중채널 FXLMS 알고리즘은 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$W_k(n+1) = W_k(n) + \mu \sum_{m=1}^M X_{km}(n) e_m(n) \quad (15)$$

4. 실험 및 검토

4.1 전체 시스템 구성

능동 방음벽 실험을 위한 소음실은 그림 5와 같이 가로 3.4[m], 세로 2.1[m], 높이 2.1[m]의 크기로 구성되었으며, 공간 내부의 공명현상을 완화하기 위하여 내벽에 흡음재를 부착하였다. 창문을 통하여 외부의 소음이 내부로 전달되는 것을 방지하기 위하여 기존의 능동방음벽과는 달리 열린 창문의 양쪽 옆 부분에 능동 방음벽을 구성하였다. 소음실 외부에 설치된 마이크로폰을 이용하여 측정된 신호를 적응 필터의 기준신호로 사용하며, 소음 내부에 설치된 4개의 마이크로폰을 이용하여 오차 신호를 측정한다. DSP를 이용한 적응필터가 오차 신호를 최소화하여 소음실 내부의 소음을 감쇄시킨다. 실험 결과 단일 주파수 소음의 경우에는 24차, 보일러 소음의 경우에는 50차의 leaky LMS FIR 필터를 사용하여 좋은 결과를 얻었다.

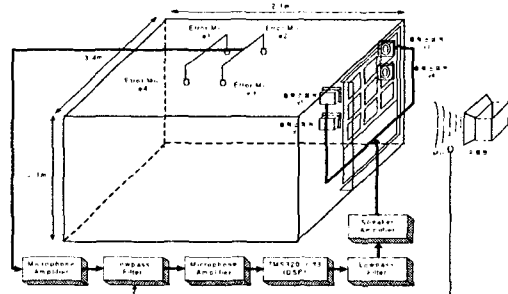


그림 5. 전체 시스템 구성도
Fig. 5. Schematic diagram of experimental systems

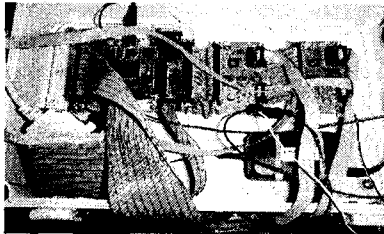
4.2 하드웨어의 구성

하드웨어는 DSP, 마이크로폰 증폭기, LPF(Low Pass Filter), 신호 증폭기(OP Amp), 스피커 증폭기 등으로 구성된다. 능동 소음제어는 실시간 처리를 요하므로 고속의 연산이 가능한 TMS320VC33 DSP 보드[9]를 사용하였다.

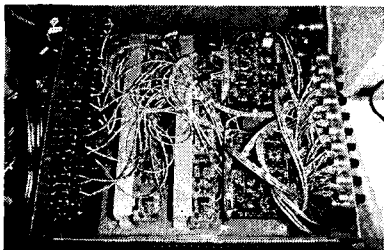
TMS320VC33은 120[MHz] 또는 150[MHz] 클럭으로 동작하여 60MIPS(17[nsec]) 또는 75MIPS

(13[nsec])의 처리 능력을 가진다[10]. 실험에 사용된 DSP 보드는 12bit A/D 24채널, D/A 18채널을 가진다.

마이크로폰 증폭기부는 24채널로 설계하였고, 오차 마이크로폰으로부터 소음 측정시 감도 조절을 위한 프리-앰프(pre-amplifier)와 소음의 크기를 11배 크기로 증폭시킬 수 있는 신호증폭기로 구성되었다. 측정 시에 생기는 고주파 성분과 오차를 제거하기 위하여 차단 주파수 500[Hz]로 하는 4차의 Butterworth filter를 설계하였다. 스피커 증폭기부는 DSP에 D/A 변환기로부터 아날로그 신호로 변환된 제어 음원을 증폭하기 위한 파워-앰프와 LPF로 구성된다. 그림 6에 제작된 DSP 보드 및 power amplifier를 보였다.



(a) DSP board



(b) Power Amplifier

그림 6. DSP 보드 및 power amplifier
Fig. 6. DSP board and power amplifier

4.3 실험결과 및 검토

본 논문에서 제안한 능동방음벽의 성능을 검증하기 위하여 그림 5와 같은 능동방음벽과 그림 7과 같은 일반적인 다채널 능동소음제어 시스템을 실험을 통하여 비교하였다.

두 경우 모두 4×4 leaky LMS 알고리즘을 사용하였으며, 190[Hz] 단일 주파수 소음과 화력발전소 보일러 소음[4]에 대하여 실험을 수행하였다. 두 경우

의 성능을 비교하기 위하여 오차 마이크로폰에서 측정된 잔존 잡음과 그림 8과 같이 40개 위치에서 측정된 제어 전과 제어 후의 소음의 크기를 비교하였다.

오차 마이크로폰의 위치에서는 ANB가 다소 좋은 결과를 얻었으나 ANC, ANB 모두 30-40[dB](단일 소음의 경우) 및 10-20[dB](보일러 소음의 경우)의 소음감쇄를 얻을 수 있었다. ANC의 경우 제어 스피커의 위치를 옮겨 가며 실험을 수행하였으며 최적 위치 추정 알고리즘을 이용해 위치를 추정하면 다소 나은 결과를 얻을 수 있으리라 추정된다. 그림 9 및 그림 10에 보일러 소음의 경우 두 시스템의 제어전 및 제어후의 실험 결과를 보였다.

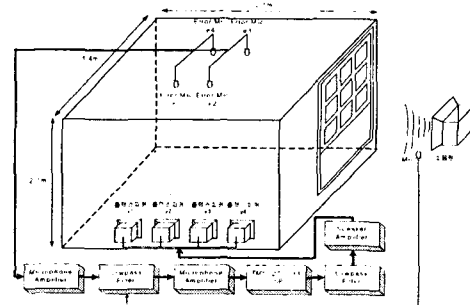


그림 7. 다채널 ANC 시스템의 구성도
Fig. 7. Multi-channel ANC systems

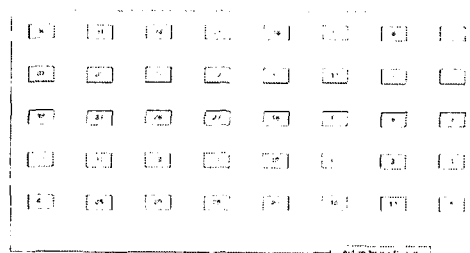
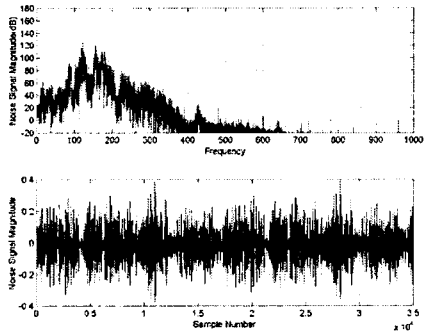


그림 8. 소음의 크기 측정 위치
Fig. 8. Positions of noise measurement

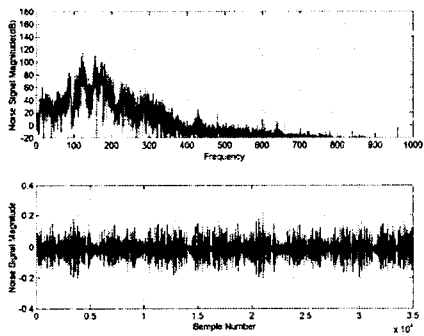
제어 마이크로폰의 위치에서는 ANB가 조금 나은 결과를 보였으나 두 경우 모두 소음이 잘 감쇄됨을 알 수 있었지만 그림 8에서 보인 전체 위치에서 소음의 감쇄를 소음계를 이용해 측정된 결과 ANB가 훨씬 좋은 결과를 보였다. ANC의 경우 단일 주파수 소음의 경우는 평균적으로는 3 [dB] 내외의 감쇄가 있

다중채널 LMS 알고리즘을 이용한 능동방음벽 구현

었으나 위치에 따라서는 최고 10[dB] 정도 소음이 증가하는 곳도 있었으며, 보일러 소음의 경우는 평균적으로 차이가 거의 없었으며 위치에 따라서는 역시 10[dB] 정도 증가하는 곳도 있었다.

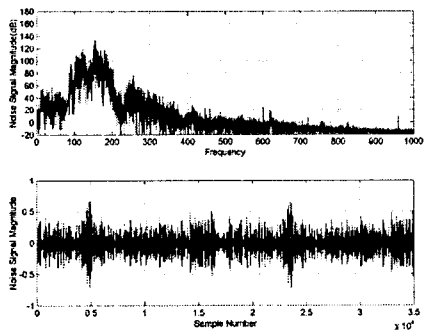


(a) Before control

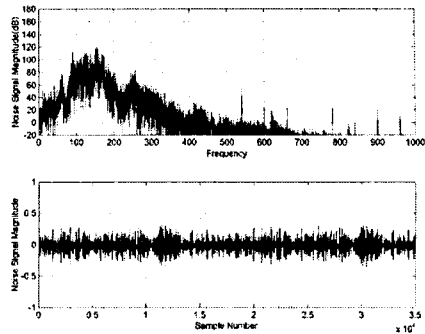


(b) After control

그림 9. Mic #1에서 소음신호 및 스펙트럼(ANC)
Fig. 9. Noise signal and spectrums at mic #1(ANC)

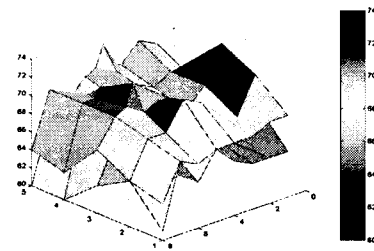


(a) Before control

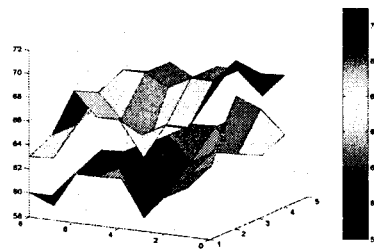


(b) After control

그림 10. Mic #1에서 소음신호 및 스펙트럼(ANB)
Fig. 10. Noise signal and spectrums at mic #1(ANB)



(a) ANC



(b) ANB

그림 11. 제어전과 제어후의 보일러 소음의 크기 비교
Fig. 11. Boiler noise amplitude (before and after control)

ANB의 경우는 단일 소음 및 보일러 소음 모두 증가하는 곳은 한 곳도 없었으며 평균적으로도 ANC의 경우보다 좋은 결과를 보였다. 단일 주파수 소음의 경우는 평균적으로는 8[dB] 내외의 감쇄가 있었

으며, 보일러 소음의 경우에도 평균적으로 5 [dB] 정도 소음이 줄어들었다. 그림 11에 보일러 소음의 경우 두 기법을 이용한 실험 결과를 보였다.

5. 결 론

본 논문에서는 창문 등의 개구부를 통해 전달되는 외부 소음을 다중채널 적응필터를 이용하여 제거하는 능동 방음벽을 구현하였고, 기존의 능동소음제어(ANC) 기법을 이용한 기법과 제안한 능동방음벽(ANB)의 소음감쇄 특성을 실험을 통하여 비교하였다.

적응필터의 수렴성을 증가시키기 위하여 다중채널 leaky LMS 알고리즘을 사용하였으며 창문 등의 개구부를 통하여 들어오는 소음을 제거하기 위하여 새로운 형태의 능동방음벽을 제안하였다.

오차 마이크로폰의 위치에서는 ANB가 다소 좋은 결과를 얻었으나 두 경우 모두 비교적 좋은 결과를 얻을 수 있었지만, 전체 위치에서 소음의 감쇄를 소음계를 이용해 측정한 결과 ANB가 훨씬 좋은 결과를 보였다. ANC의 경우 보일러 소음의 경우는 평균적으로 차이가 거의 없었으며 위치에 따라서는 증가하는 곳도 있었으나, ANB의 경우는 단일 소음 및 보일러 소음 모두 증가하는 곳은 한 곳도 없었으며 평균적으로도 ANC의 경우보다 훨씬 좋은 결과를 보였다.

이 연구는 2002 학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.

References

- (1) S.M. Kuo and D. Morgan, Active Noise Control System, John Wiley and Sons, Inc, New York, 1996.
- (2) P. Lueg, Processing of Silencing Sound Oscillations, U.S. Patent 2,043,416, 1936.
- (3) S.J. Elliott, I.M. Stothers and P.A. Nelson, "A multiple error LMS algorithm and its application to the active control of sound and vibration," IEEE Trans. ASSP, vol.ASSP-35, pp.1432-1434, 1987.
- (4) 남현도, 서성대, 황정현, "협대역 능동소음 제어기법을 이용한 화력발전소 소음제어," 조명·전기설비학회 논문지, 15권, pp.460-466, 2001.
- (5) S. Ise, H. Yano and H. Tachibana, "Application of active control to noise barrier," Proc. of Active Control of Sound and Vibration, Japan, pp.309-315, 1991.
- (6) J. Yang and W.S. Gan, "On the active controlled noise barrier," J. of Sound and Vibration, vol.240, pp.592-597, 2001.
- (7) B. Widrow and S.D. Stearns, Adaptive Signal Processing, Prentice-Hall, EngleWood Cliffs, New Jersey, 1985.
- (8) E.C. Lfeachor and B.W. Jervis, Digital Signal Processing, Addison-Wesley, 1996.
- (9) Texas Instruments, TMS320VC33 Programmer's Guide, 2000.

◇ 저자소개 ◇

남현도 (南炫道)

1956년 3월 27일생. 1979년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1986년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991년-1992년 Visiting fellow, ISVR, Univ. of Southampton, England, 1982년-현재 단국대학교 전기전자컴퓨터공학부 교수. 1998년-현재 단국대학교 부설산업기술연구소장.

서성대 (徐成大)

1960년 2월 25일생. 1987년 2월 단국대학교 전자공학과 졸업. 1998년 2월 단국대학교 산업대학원 메카트로닉스공학과 졸업(석사). 현재 단국대학교 대학원 전기공학과 박사과정.