

원거리 소음 제거를 위한 능동방음막 구현 (Implementation of Active Noise Curtains for Long Distance Noise)

남현도* · 권 혁

(Hyun - Do Nam · Hyok Kwon)

요 약

본 논문에서는 공간 외부의 원거리에 위치하는 소음원에 의하여, 창문 등을 통해 실내 공간에 소음이 전파될 때, 능동소음제어 기법을 이용하여 이를 제어하는 능동 방음막 (active noise curtain)을 구현하였다. 적응필터 알고리즘으로 다중채널 LMS 알고리즘을 사용하는 기법과 소음원이 원거리에 있을 때는 소음의 특성이 평면파에 가깝다는 가정 하에 제어용 스피커 수만큼의 단일채널 LMS 알고리즘을 사용하는 기법을 제시하였으며 적응필터의 안정도를 향상시키기 위하여 IIR 필터의 안정도를 향상시키는 안정화 기법을 제안하였다.

TMS320VC33 DSP보드를 이용하여 제안된 기법을 정현파 소음 및 도로 소음에 대해 실험을 수행한 결과 MCLMS를 사용한 경우와 유사하거나 다소 나은 결과를 보였으며 제안한 기법이 실제 적용 시에는 제어용 스피커와 마이크로폰을 일체형으로 제작이 가능하여 하드웨어 실현에 유리하고 설치비도 절약되리라 예상된다.

Abstract

In this paper, implementation of active noise curtains using multiple channel adaptive filters is presented. The same numbers of single channel LMS algorithms as control loudspeakers is used instead of a multi-channel LMS algorithm to reduce the computational burden of adaptive filter algorithms.

In general, a multi-channel LMS algorithm is usually used in active noise control system, but this algorithm has much more computational complexity. The single channel control techniques have less amount of DSP calculation, compared to multiple channel control techniques. A stabilizing procedure for adaptive IIR filters is also proposed to improve the stability of recursive LMS algorithms.

Both experimental results of two control techniques using TMS320VC33 digital signal processor show the similar noise reduction, but the single channel control techniques are more efficient in practical active noise curtain applications

Key words : active noise control, active noise curtain, adaptive filter, digital signal processors

1. 서 론

과학기술의 발달은 산업의 발전과 더불어 인간의 생활을 윤택하게 하였으나, 환경오염과 같은 문제점이 대두되었다. 소음은 산업현장뿐 아니라 가정과 같은 인간 실생활에 밀접한 영향을 미치고 있다.

* 주저자 : 단국대학교 전기전자컴퓨터공학부 교수

Tel : 709-2574 Fax : 795-8771

E-mail : hdnam@dgu.edu

접수일자 : 2003년 10월 8일

1차심사 : 2003년 10월 10일

심사완료 : 2003년 11월 26일

특히 아파트 등의 보급으로 주거생활이 집적화되고 자동차의 보급으로 창문 등을 통해 전파되는 외부 소음이 문제가 되고 있다. 외부에서 전파되는 소음을 감쇄시키는 기법으로는 흡음재나 방음재를 이용한 수동소음제어 기법과 중첩의 원리를 이용한 능동소음 제어기법(Active Noise Control; ANC)가 있는데, 수동소음제어 기법은 저주파 소음에 대해서는 소음 감쇄 효과가 떨어지므로 능동소음제어기법이 활발히 연구되고 있다[1].

능동소음제어는 소음파를 평면파로 취급할 수 있는 1차원 음향 공간에서의 문제[2]와 평면파로 취급할 수 없는 3차원 음향 공간에서의 문제[3-5]로 나눌 수 있는데, 공간의 소음 제어를 위한 적응 필터 알고리즘으로는 다중채널 LMS(Least Mean Squares) 알고리즘이 주로 이용되고 있으며, 내부에서 발생한 소음을 대상으로 하는 공간 소음 제어[3]와 외부에서 전파되는 소음을 차단하는 능동방음벽[4,5]에 대한 연구가 발표되고 있다.

본 논문에서는 도로에 면한 고층 건물이나 도로에서 약간 떨어진 거리에 위치한 사무실 등 소음원이 원거리에 있을 때는 창문을 통해 들어오는 소음의 특성이 평면파에 가깝다고 가정하고 다중채널 LMS 대신 여러 개의 단일 채널 LMS 알고리즘을 사용하여 소음을 차단하는 능동방음막을 제안하였다.

음향 인텐시티 측정을 통하여 소음원이 원 거리에 있을 때는 소음의 특성이 평면파에 가깝다는 사실을 확인하였으며, 적응필터의 안정도를 향상시키기 위하여 IIR 필터의 안정도를 향상시키는 안정화 기법[6]을 제안하고, 다중채널 LMS 알고리즘을 사용한 기법과 실험을 통하여 비교하였다.

2. 능동 방음막

능동방음벽[5]은 외부에서 전파되는 소음을 안정적으로 제어할 수 있는 장점이 있으나 실제 적용시에는 오차 마이크로폰을 실내 여러 곳에 설치하여야 하므로 설치비가 많이 들고 다중채널 LMS 알고리즘을 사용하므로 계산량이 많아 고성능의 DSP를 사용하여야 하므로 비용이 많이 드는 단점이 있다.

본 논문에서 제안하는 능동방음막은 소음을 평면파

로 가정하였으므로 제어용 스피커가 전체 오차의 합을 최소화하는 것이 아니라 스피커 바로 앞에 쌍으로 설치된 오차만 최소화하므로 단일채널 LMS 알고리즘을 사용할 수 있고, 제어용 스피커와 마이크로폰을 일체형으로 제작이 가능하므로 실내 여러 곳에 마이크로폰을 설치하는 능동방음벽과 달리 별도의 실내 배선이 필요 없어 설치가 용이하고 비용이 적게 드는 장점이 있다.

2.1 원거리 소음의 특성 해석

건물의 창문 등을 통해 원거리에서 전파되는 소음이 평면파에 가까운가를 검증하기 위하여 도로에 인접한 6층 건물의 창문을 열고 소음 특성을 분석하였다. 정확한 분석을 위해서는 격자 모양으로 배열된 array 마이크로폰들을 입체적으로 배치, 동시에 측정하면서 여러 차례에 걸친 실험을 하고, 또 이렇게 측정된 방대한 양의 데이터를 분석, 처리하여야 하나 본 논문에서는 간단하면서도 경제적으로 확인하기 위한 방법으로 음향 인텐시티 측정을 통하여 개괄적인 측정과 분석을 실시하였다[7].

음향 인텐시티의 측정은 B&K의 음향 분석 시스템을 이용하여 정방형 나무틀에 실로 가로와 세로의 크기가 18[cm]인 16개의 구간격자 모양으로 측정지점을 미리 표시하고, 20[Hz]~4[kHz]까지의 범위에서 1/3 옥타브 밴드의 중심 주파수에 대하여 측정하였다. 그림 1은 실제 측정 사진이다.

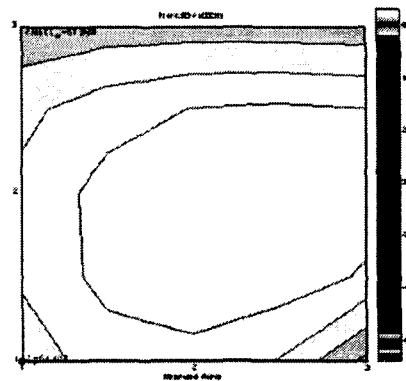


그림 1. 원거리 소음의 음향 인텐시티 측정 결과
Fig. 1. Sound intensity of long distance noise

원거리 소음 제거를 위한 능동방음막 구현

능동소음제어의 주요 대상이 되는 200[Hz]의 중심 주파수 밴드에 대하여 측정된 결과를 그림 1에 보였다. 음향 인텐시티는 좌측에 등고선 형태로 나타내었다.

소음이 평면과라면 측정된 모든 지점에서 음향 인텐시티의 값이 같은 값을 나타내어야 하나 중심부와 가장자리가 3[dB] 정도의 차이를 나타내고 있어 평면과에 비교적 가깝다는 것을 확인할 수 있었다. 가운데를 중심으로 하여 구면과 형태를 나타낸 것은 소음이 평면과의 형태로 창문으로 진행해 오더라도 창문에 의해 회절 및 반사되어 가장자리의 음향 인텐시티가 감소되는 것으로 추정되며 등고선도가 다소 한쪽으로 치우친 것은 소음원이 우측으로 치우쳐 있다는 것을 반영하는 것으로 보이며, 이는 6층 창문에서 바라본 도로 면의 방향과도 일치한다.

2.2 실험실 음향 특성 분석

원거리 소음 제어 실험을 위하여 실제 창문과 유사한 음향 특성을 실험실에서 재현하였다. 실험실의 크기가 작아 소음을 발생하는 스피커를 원거리에 배치할 수가 없어 그림 2와 같은 덕트 형태의 가이드를 설치하였다. 그림 2와 같이 덕트 가이드의 좁은 쪽 면에 스피커를 설치하고 넓은 쪽 면을 실험용 공간의 창문에 붙여 창문을 통하여 전파되는 음향 특성이 평면과에 가까워지도록 설계하였다.

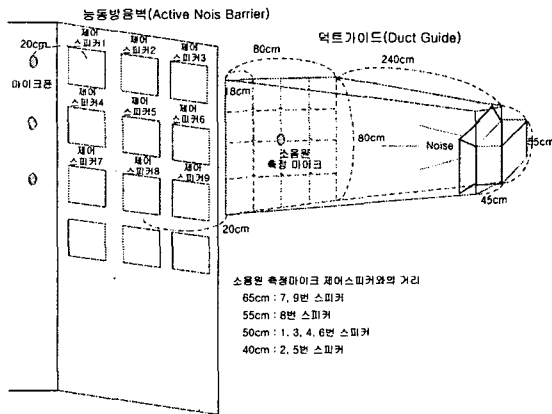


그림 2. 덕트 가이드
Fig. 2. Duct guide

그림 3은 덕트 가이드를 설치한 후 200[Hz] 정현파 소음에 대해 실험용 창문에서 측정된 음향 인텐시티 측정 결과이다. 가로, 세로 각각 4부분으로 나누어 총 16곳에서 측정하였으며, 전 절에서 측정된 실제 창문과 마찬가지로 한 가운데의 소음 레벨이 가장 높았고 가장자리와의 차이는 2[dB] 정도로 실제 창문과 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

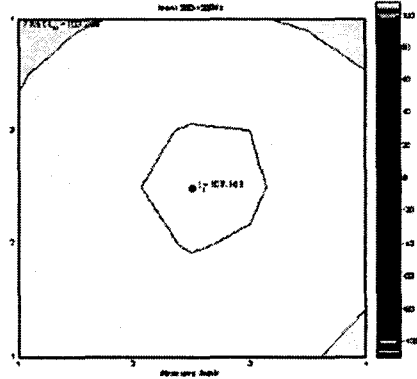


그림 3. 실험실 창문 소음의 음향 인텐시티 측정 결과
Fig. 3. Sound intensity in experimental enclosure

3. 적응필터 알고리즘

적응필터는 음향케환이 존재할 때나 이상적인 필터의 극점이 단위원 근처에 있게 되면 이론적으로 FIR 필터의 차수가 매우 커져야 하므로 IIR 필터가 효과적이나 LMS 알고리즘을 사용하여 IIR 필터를 구현할 경우 안정도가 문제가 된다. 본 논문에서는 안정도를 강화한 IIR 필터 알고리즘[6]을 사용하였다.

3.1 Recursive LMS 알고리즘의 안정화 기법

IIR 필터구조를 이용한 recursive LMS 알고리즘은 Feintuch[8]에 의해서 소개되었으며, 다이어그램은 그림 4와 같다. 여기서 $x(n)$ 과 $y(n)$ 은 각각 기준 입력값과 제어필터의 출력 값이고, $d(n)$ 과 $e(n)$ 은 각각 제어할 하지 않을 때의 소음신호와 제어시의 오차값을 의미하며 전달함수는 (1)식과 같다.

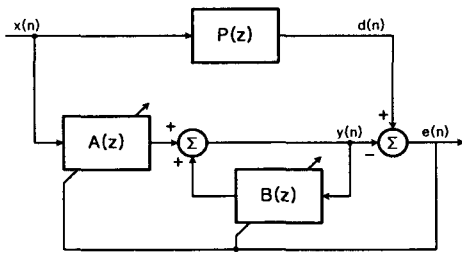


그림 4. IIR LMS 알고리즘 블록 다이어그램
Fig. 4. Block diagram of IIR LMS algorithm

$$H(z) = \frac{a_0(n) + a_1(n)z^{-1} + \dots + a_{L-1}(n)z^{L-1}}{1 - [b_1(n)z^{-1} + \dots + b_{L-1}(n)z^M]} \quad (1)$$

Recursive LMS는 극점이 존재하므로 안정성에 제한이 있으므로 안정되게 수행하기 위해서는 항상 극점이 단위 원 안쪽에 있도록 극점의 위치를 확인하여 조정해야한다.

적용필터에서 필터계수가 완전히 수렴하기 전에 큰 오차가 발생하여, 소음제어 초기에 극점이 z평면의 단위 원 밖으로 빠져 나가서 발산하는 경우가 많으므로 초기에 필터 계수의 분모항의 업데이트 식에서 극점의 위치를 단위원 쪽으로 조금 옮겨 주는 전처리 과정을 거침으로써 좀 더 안정된 IIR LMS를 적용할 수 있다[6]. 식(1)의 분모 대신에 다음 식을 대입한다.

$$F(z) = 1 + kb_1(n)z^{-1} + \dots + k^M b_M(n)z^{-M}, \quad 0 \leq k \leq 1 \quad (2)$$

IIR LMS의 분모항의 근을 z_1 이라 하면

$$F(z) = 1 + \dots + b_M(n)z_1^{-M} = 0 \quad (3)$$

을 만족시키는 $F(z)$ 의 근은 kz_1 이 된다. 즉,

$$F(kz_1) = 1 + kb_1(n)(kz_1)^{-1} + k^2 b_2(n)(kz_1)^{-2} + \dots + k^M b_M(n)(kz_1)^{-M} = 0 \quad (4)$$

이 된다. 따라서 $1 - B(z)$ 을 전처리 함으로써 극점

을 k 배 만큼 원점 방향으로 조정이 가능하다. 능동 소음제어 시에는 초기에 오차가 커서 극점이 크게 변동될 때에는 k 를 0에 가까운 값으로 정해 원점으로 당겨주며, 정상상태 시에는 k 를 1로하여 원래의 극점값을 주어야한다. 즉,

$$k(n+1) = \lambda k(n) + (1-\lambda), k(0) = 0, 0 \leq \lambda \leq 1 \quad (5)$$

따라서, k 값을 위와 같이 가변 시켜 가면서 IIR 필터의 분모항 $F(z)$ 의 갱신 식을 전처리 함으로써 안정된 소음제어가 가능하다.

3.2 단일채널 LMS를 이용한 제어 알고리즘

본 논문에서는 창문을 통과하는 소음의 특성이 평면파에 가깝다는 가정 하에 각 제어 스피커에서 소음을 단일 채널 LMS 알고리즘에 의해 제어하는 적응필터 기법을 제안한다. 제안된 시스템의 블록선도는 그림 5와 같다.

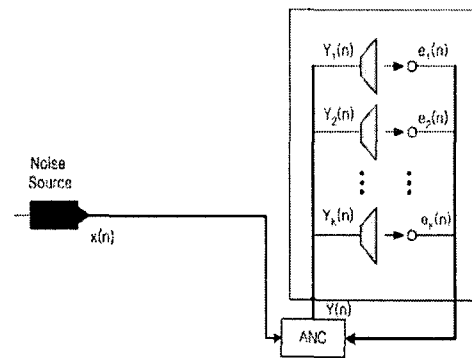


그림 5. 단일채널 적응필터를 이용한 ANC 시스템
Fig. 5. ANC system using single channel adaptive filters

그림 5에서 k 번째 채널의 2차 제어음원 Y_k 는 오차 e_k 에만 영향을 미치므로 단일채널 LMS을 이용하여 갱신할 수 있다.

단일채널 LMS을 이용한 다중 제어스피커 제어 알고리즘은 실제 실현시 계산량을 줄일 수 있으며 수렴 속도도 증가하므로 비용의 절감, 하드웨어의 경량화를 비롯한 여러 가지 효과를 기대할 수 있다.

4. 실험 및 검토

4.1 도로 소음의 분석

능동방음막의 성능을 테스트하기 위하여 단일 주파수 190[Hz]의 정현파와 도로 옆 건물 안에서 측정된 도로 소음을 이용하여 실험을 수행하였다.

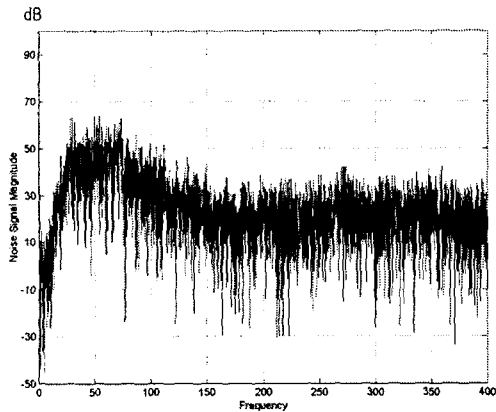


그림 6. 도로 소음의 FFT
Fig. 6. FFT of road noise

도로 소음은 차량의 통행이 많은 10차선 도로 옆에 위치한 건물의 6층 창문을 열고 마이크론을 통해 2000[Hz]의 샘플링으로 측정된 소음으로 주파수 특성은 그림 6과 같다. 400[Hz] 미만의 저주파 구간에서 random noise에 가깝게 주파수 대역이 분산되어 있어 제어가 매우 어려울 것으로 예측된다.

4.2 시스템 구성 및 하드웨어 구성

능동 방음막은 가로 3.4[m], 세로 2.1[m], 높이 2.1[m]의 소음실과 공간 내부의 공명현상을 완화하기 위하여 내벽에 흡음재를 부착하였고, 창문을 통하여 외부의 소음이 내부로 전달되게 능동 방음벽을 구성하였다. 그림 7은 다중채널 LMS 알고리즘을 적용한 경우(실험방법 1)의 시스템 구성도이고, 그림 8은 단일채널 LMS 이용한 다중채널 제어알고리즘을 적용한 경우(실험방법 2)의 시스템 구성도 이다.

실험방법 1과 2는 함수발생기를 통한 단일 주파수 소음(190Hz) 및 도로 소음을 1차 소음원으로 발생시켜 실험을 수행하였다. 실험방법 1은 알고리즘의 계산

량이 많은 관계로 190[Hz]의 단일 주파수의 경우 6개의 제어 스피커와 에러 마이크론을 사용한 24차의 FIR 필터를 사용하였으며, 도로 소음의 경우는 4개의 제어 스피커와 에러 마이크론을 사용한 50차의 FIR 필터를 사용하였다.

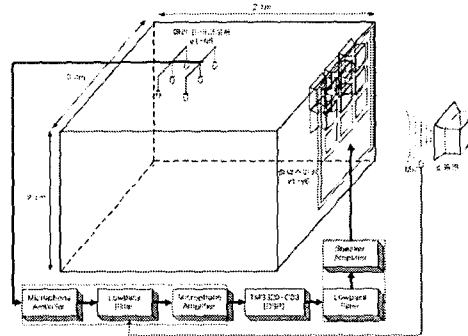


그림 7. 능동 방음막 전체 시스템 구성도(실험방법 1)
Fig. 7. Structure of active noise curtain(Method 1)

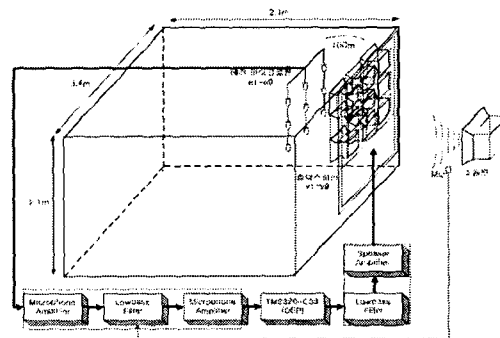


그림 8. 능동 방음막 전체 시스템 구성도(실험방법 2)
Fig. 8. Structure of active noise curtain(Method 2)

실험방법 2는 9개의 제어 스피커와 에러 마이크론을 사용한 24차의 FIR 필터를 적용하였고, 다른 에러 마이크론에 의한 영향을 최소화하기 위해 각 채널의 제어 스피커에 매우 가깝게(10cm) 에러 마이크론을 설치하였다. 그림 9는 능동 방음막의 사진이다.

하드웨어는 크게 DSP, 마이크론 증폭기, low pass filter, 신호 증폭기, 스피커 증폭기 등으로 구성된다. 능동 소음제어는 실시간 처리를 요하므로 고속의 연산이 가능한 DSP TMS320VC33을 사용하였다.

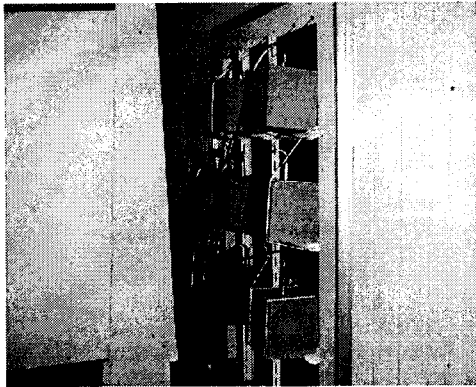


그림 9. 능동 방음막 사진
Fig. 9. Picture of active noise curtains

4.3 실험결과 및 검토

공간로부터 들어오는 소음파가 평면파라 가정하고, 다중채널 LMS 알고리즘(MCLMS)과 본 논문에서 제안한 알고리즘을 이용하여 190[Hz]의 협대역 소음과 화력발전소 보일러 소음 및 도로 소음에 대한 소음제어를 수행하였다.

그림 10, 11는 실험용 공간내의 40개의 지점에서 소음계를 이용하여 제어전 및 제어후의 소음의 감쇄 정도를 표시한 그림이다. 그림에서 보듯이 MCLMS는 평균 10[dB] 내외, 제안한 기법은 평균 12[dB] 내외의 감쇄를 얻을 수 있었다.

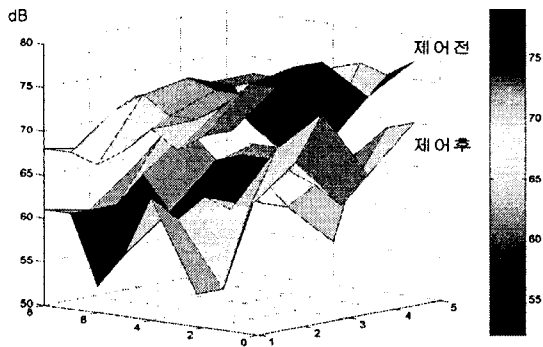


그림 10. 제어전과 제어후의 190 Hz 소음(MCLMS)
Fig. 10. 190 Hz noise before and after control(MCLMS)

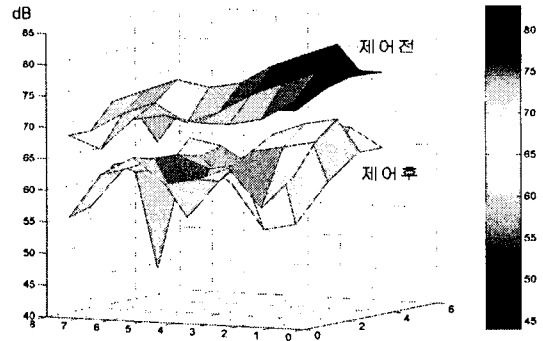


그림 11. 제어전과 제어후의 190 Hz 소음(Proposed)
Fig. 11. 190 Hz noise before and after control(Proposed)

그림 12, 13는 도로 소음에 대해 실험용 공간내의 40개의 지점에서 소음계를 이용하여 제어전 및 제어후의 소음의 감쇄 정도를 표시한 그림이다. 그림에서 보듯이 MCLMS는 평균 4[dB] 내외, 제안한 기법은 평균 5[dB] 내외의 감쇄를 얻을 수 있어 제안된 기법이 다소 나은 결과를 보였다.

제안된 기법을 이용하여 190[Hz]의 정현파 소음, 화력발전소 보일러 소음 및 도로 소음에 대해 실험을 수행한 결과, 190[Hz]의 정현파 소음의 경우는 12[dB] 내외, 화력발전소 보일러 소음의 경우는 8[dB] 내외, 도로 소음의 경우는 5[dB] 내외의 소음 감쇄를 얻을 수 있어 MCLMS를 사용한 경우와 유사하거나 다소 나은 결과를 보였다.

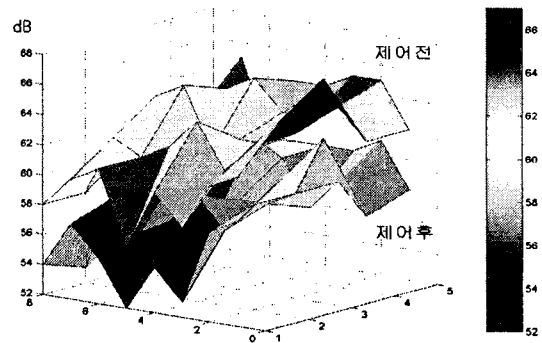


그림 12. 제어전과 제어후의 도로 소음(MCLMS)
Fig. 12. Road noise before and after control(MCLMS)

원거리 소음 제거를 위한 능동방음막 구현

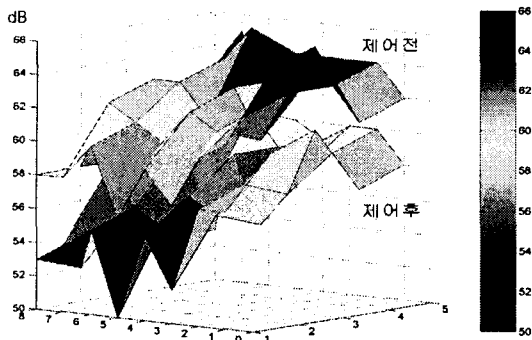


그림 13. 제어전과 제어후의 도로 소음(Proposed)
Fig. 13. Road noise before and after control(Proposed)

본 논문에서 제안하는 능동방음막은 실험시에는 DSP를 이용하였으나 실제 적용시에는 제어용 스피커가 전체 오차의 합을 최소화하는 것이 아니라 스피커 바로 앞에 쌍으로 설치된 오차만 최소화하므로 제어용 스피커와 마이크로폰을 일체형으로 제작이 가능하며, MCLMS를 사용하는 경우와 달리 별도의 실내 배선이 필요 없어 설치가 용이하고 단일채널 LMS 알고리즘을 사용하므로 계산량이 작아 DSP 대신 one chip 마이크로프로세서를 이용할 수 있어 비용이 적게 드는 장점이 있다. MCLMS의 경우에는 창문이나 실내의 구조가 달라지면 전체 시스템을 새로 설계하여야 하나 제안된 기법은 컴포넌트 형태로 제작할 수 있어 이 경우에도 컴포넌트의 수를 늘이거나 줄여서 쉽게 해결할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 창문을 통해 전달되는 외부 소음을 능동소음 제어기법을 이용하여 제거하는 능동 소음막을 구현하였고, 다중채널 LMS 알고리즘을 이용한 기법과 제어 스피커 수만개의 단일채널 LMS 알고리즘을 이용한 기법을 제시하고 실험을 통해 비교하였다.

일반적으로 단일채널 알고리즘을 사용하여 능동 방음벽을 구현할 경우 수렴을 보장할 수 없으나, 소음원이 상대적으로 멀리 존재하여 개구부를 통해 들어오는 소음이 평면파에 가까운 경우에는 안정된 제어가 가능하다고 가정하고 실험을 한 결과 안정된 소음제

어효과를 얻을 수 있었다. 적응필터의 안정도를 향상시키기 위하여 IIR 필터의 안정도를 향상시키는 안정화 기법을 제안하였다.

제안된 기법을 이용하여 190[Hz]의 정현파 소음 및 도로 소음에 대해 실험을 수행한 결과 MCLMS를 사용한 경우와 유사하거나 다소 나은 결과를 보였으며 제안한 기법이 실제 적용시에는 제어용 스피커와 마이크로폰을 일체형으로 제작이 가능하여 하드웨어 실현에 유리하고 설치비도 절약되리라 예상된다.

이 연구는 2003 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] S.K. Tang and J.S.F. Cheng, "On the application of active noise control in an open end rectangular duct with and without flow," Applied Acoustics, vol.53, pp.193-210, 1998.
- [3] S.J. Elliott, C.C. Boucher and P.A. Nelson, "The behavior of a multiple channel active control system," IEEE Trans. Acoust, pp. 1041-1051, 1992.
- [4] J. Yang and W.S. Gan, "On the actively controlled noise barrier," J. of Sound and Vibration Research, vol.240, pp.592-597, 2001.
- [5] 남 현도, 서 성대, "다중채널 LMS 알고리즘을 이용한 능동방음벽 구현," 조명·전기설비학회 논문지 게재 예정, 2003.
- [6] H.D. Nam and K.H. Baek, "Stabilized recursive LMS algorithms for active noise control, InterNoise 2003, pp.467-473, 2003.
- [7] S. Gade, Electrical and Mechanical Measurement Sound Intensity(theory), Bruel & Kjaer, Technical Review, No.3, ISSN 007-2621, 1982.
- [8] P.L. Feintuch, "An adaptive recursive LMS filter," Proc. IEEE, vol.64, no.11, pp.1622-1624, 1976.

◇ 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.

권혁 (權赫)

1974년 10월 3일생, 2001년 단국대학교 전기공학과 졸업, 현재 단국대학교 대학원 전기공학과.