

## 능동 소음 제어 통풍관의 개발

하상모\*, 박승규\*\*, 안호균\*\*, 윤태성\*\*  
 \*,\*\*창원대학교 전기공학과

### Development of active noise control ventilation tube

Sang Mo Ha\*, Seung Kyu Park\*\*, Tae Sung Yoon\*\*, Ho Kyun Ahn\*\*  
 \*,\*\*Dept. of Electrical Eng. Changwon National Univ.

**Abstract** - 소음은 환경 오염원의 하나로서 사람에게 육체적, 정신적 피해를 발생시킨다. 이에 소음 제어 기술의 필요성이 증대하였고, 그 중에서 제어가 까다롭고 고비용을 요구하는 저주파 소음 제어 기술의 개발이 확대되고 있다. 따라서 본 연구에서는 저주파의 주기적인 특성을 가지는 1차원 평면파 소음에 대한 능동 제어를 위해 기존의 적응 피드포워드 방법의 단점을 보완하는 적응 피드백 방법을 이용한 능동 소음 제어 시스템을 구성하고 능동 소음 제어 실험을 수행하였다. 이를 위해 소음원과 제어 음원을 가지는 덕트 형상의 실험 장치를 구성하였다. 제어기 설계를 위해 전파 소음을 예측하는 선형 예측법을 적용한 적응 디지털 필터를 구성하였으며 적응 알고리즘으로 Filtered-X LMS 알고리즘을 이용하였다. 제어기는 제어 알고리즘을 프로그램화하여 DSP에 입력함으로써 구성하였다.

실험에 사용된 소음은 500[Hz] 이하의 단일 주파수의 정현파 소음을 사용하였으며, 실험결과 음압 감소의 효과를 볼 수 있었다. 능동 소음 제어의 기술을 개발하여 하드웨어(덕트)의 모양 및 구조, 제어기의 종류 및 처리 속도, 주파수나 크기와 같은 특성이 급격히 변하는 소음의 경우에 능동적으로 소음을 제어할 수 있으며, 저주파 소음을 발생시키는 관형 연소기와 같은 장치 및 여러 분야에 응용이 가능하도록 하였다.

## 1. 서 론

능동소음제어(Active Noise Control)[1]란 종래의 흡음이나 차음 등의 원리에 기초를 두어 소음을 제어하는 수동 소음제거 기술과는 달리, 소음과 동일 진폭을 가지며 위상이 역위상이 되는 인공적인 2차음을 스피커로 방사시켜 소음 레벨을 감소시키는 기술을 말한다. ANC에서 가장 중요한 것은 소음과 진폭이 같은 역위상의 신호를 발생시키는 것으로, 아날로그 기술에서는 곤란하였지만 디지털 필터 기술의 발달로 가능하게 되었으며, 수동 소음 대책에서 성능이 떨어진 500Hz 이하의 주파수 대역의 소음을 제거하는데 효과가 있다. ANC 방법으로는 Feedforward 제어, Feedback 제어, 적응 예측 제어 방법[5]이 있으며 Feedforward 제어방식은 실용화가 행해지고 있는 방법으로, 소음원의 신호와 상관이 있는 신호를 소음원의 근방에 설치된 센서로 검출할 수 있을 경우에 매우 효과적인 방법이다.

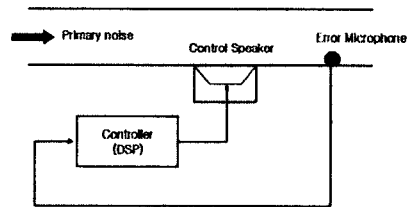
Feedback 제어방법은 안정한 제어를 실현하기 위하여 밀폐형 이어폰 등과 같은 국소 공간내에서의 제어와 덕트내의 음장 제어에 응용된다.

적응 예측형 제어방식은 소음원이 다수 존재하고 소음원의 적절한 참조신호를 검출하기 곤란할 때 효과적이며, 공대역 소음제어에 대해서는 해결해야 할 문제점이 많다. Feedforward 제어방식을 이용한 일반적인 ANC에서는 2차음원에서 마이크로폰까지의 2차음장인 전기음향시스템이 존재한다. 이는 오차신호가 제어기의 출력신호가 아니라 2차음장인 전기음향시스템의 출력이므로 이를 제어기의 계수를 적응시키는데 이용하면 제어기는 불안정하게 된다. 이를 해결하기 위하여 Filtered-x LMS 알고리즘[2]이 도입되었다. 본 논문의 목적은 ANC의 효율적인 실제 구현에 관한 연구이다. 기존의 ANC 기법인 Filtered-x LMS 알고리즘[3,4]을 유도하고 이들의 오차계 시간지연과 안정성에 관련된 문제점을 검토, 분석한다. 이를 해결하기 위하여 음향특성을 고려한 효율적인 알고리즘을 유도한다. ANC기의 수렴속도 및 안정성을 향상시키기 위하여 새로운 제어기 적용기법, 즉 필터 계수들 사이에 제한 조건을 고려한 Filterd-x LMS 알고리즘을 제안한다. 본 논문에서 제안한 ANC 기법의 실제 구현 가능성을 검증하기 위하여 실험 장치들을 구성하여 모의실험을 수행하고 분석한다.

## 2. 본 론

### 2.1 능동 소음 제어의 원리

능동 소음 제어 기술의 개념은 입력신호에 이와 동일한 진폭을 갖는 역위상의 스피커 음을 인가하여 음압레벨을 최소화시키는 것으로 그림1에 덕트의 소음제거 예를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 소음원에서 소음을 측정하여 이를 제어기의 입력으로 사용하고 제어기의 출력이 스피커를 구동시킨다. 이 경우 스피커의 출력음은 스피커 위치에서의 소음과 역위상이면서 동일하여야 한다. 오차 마이크로폰은 소음원으로부터의 소음과 스피커로부터의 제2의 음이 완전히 상쇄되지 못하고 남는 오차 성분의 소음을 감지하여 이를 제어기로 궤환시킨다. 이와 같은 능동 소음은 적응 제어를 하게 되는데 이는 시스템의 변화나 제어하고자 하는 매질의 특성 변화에 관계없이 제어가 가능하게 하기 때문이다.



<그림 1> 능동 소음 제어기의 기본 구성도

### 2.2 LMS 알고리즘

LMS(least mean square) 알고리즘은 가장 많이 사용되는 적응 알고리즘으로 오차값의 평균 자승치(MSE)를 최소화하도록  $w(n)$ 을 조정하는 방식을 사용한다. MSE는 다음과 같이 정해진다.

$$e^2(n) = d^2(n) - 2d(n)X(n)W(n) + W^T(n)X(n)X^T(n)W(n)$$

$E[e^2(n)] = E[d^2(n)] - 2E[d(n)X(n)]W(n) + W^T(n)E[X(n)X^T(n)]W(n)$  위 식으로부터 MSE가  $W(n)$ 에 대한 2차 함수의 형태로 되어 있음을 알 수 있으며 따라서 MSE가 최소가 되는  $W(n)$ 이 존재하게 되며 최소값은 하나임을 알 수 있다. 그러나 음향 신호와 같이 신호가 통계적으로 비정상인 경우에는 mean expectation을 정의할 수 없기 때문에 순간 자승 오차의 구배를 추적하여 최소값에 접근하는 steepest descent 방법을 이용한다.

이 방법에 의하면 시간  $n$ 에서의 필터 계수  $W(n)$ 과 시간  $n+1$ 에서의 필터 계수  $W(n+1)$ 의 관계는 다음과 같다.

$$W(n+1) = W(n) - \frac{\mu}{2} \frac{\partial e^2}{\partial W(n)} = W(n) + \mu X(n)e(n)$$

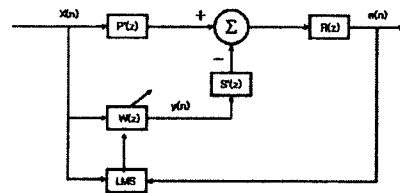
각각의 필터 계수들에 대한 계산식으로 보면 다음과 같이 된다.

$$w_k(n+1) = w_k(n) + \mu X(n-k)e(n), \quad k = 0, 1, \dots, L-1$$

위 식은 LMS 알고리즘의 최종 결과이며  $k$ 번째 필터 계수의 조정식이 된다.  $\mu$ 는 수렴 계수, 또는 step size라 하며 적응 알고리즘의 안정성, 즉 수렴 여부를 결정하고 수렴 속도를 결정하는 중요한 요소이며 이 값이 클수록 수렴 시간이 짧아진다. 필터 차수가 클수록, 그리고 입력 신호의 크기가 클수록 수렴 계수는 작은 값을 선택해야 한다.

### 2.2 Filtered - x LMS 알고리즘

filtered - x LMS 알고리즘은 마이크로폰과 스피커에서의 전기적 전달 특성 및 오차 경로에서의 음향 전달 특성을 고려한 능동 소음 제어의 방법이다. 그러나 마이크로폰의 주파수 특성은 비교적 평탄하여 일반적으로 고려하지 않아도 된다.



<그림 2> 오차 경로가 추가된 능동 소음 제어 시스템

위 그림에서  $P'(z)$ 는 참조 마이크로폰에서 제어 스피커까지의 덕트의 음향학적 경로를 나타내고  $W(z)$ 는 제어기로 사용되는 디지털 필터를 나타낸다. 오차 경로는  $R(z)$ 와  $S'(z)$ 의 2개의 전달 경로로 나눌 수 있다.  $S'(z)$ 는 적응 필터의 계산 결과로부터 상쇄점까지의  $R(z)$ 는 상쇄점에서부터 오차 신호가 입력되는 부분까지의 경로의 주파수 응답을 의미한다. 각각 출력부와 입력부의 각종 장비와 부품을 포함한다. 이러한 오차 경로에 의한 위상 및 크기 차이를 보상해 주기 위해 1981년 Widrow는 Filterd - x LMS 방법을 제안하였다. 그림 2로부터

$$S(z) = R(z)S'(z) \\ P(z) = R(z)P'(z)$$

$e(n) = d(n) - s(n)*y(n) = d(n) - S(n)*[W^T(n)X(n)]$   
 $s(n)$ 은  $S(z)$ 의 시간 영역 표현인 충격 응답이며, \*표시는 컨볼루션을 의미한다. 위 식을  $W(n)$ 에 관해 미분하여 오차값의 구배를 구하면

$$\frac{\partial e(n)}{\partial W(n)} = -s(n)*X(n) = -X'(n)$$

$X'(n)$ 은  $[x'(n)x'(n-1) \dots x'(n-L+1)]$ 로 이루어진 벡터이고  $x'(n)=s(n)*x(n)$ 과 같다. LMS 방법의 정으로부터 MSE  $E[e^2(n)]$ 의 순간 구배는  $e^2(n)$ 의 순간 구배와 같고 따라서 다음 식이 만족한다.

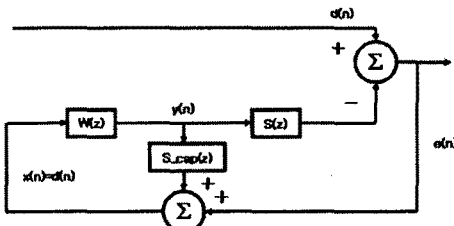
$$\frac{\partial E[e^2(n)]}{\partial W(n)} \approx \frac{\partial e(n)}{\partial W(n)} = 2 \frac{\partial e(n)}{\partial W(n)} e(n) = -2X'(n)e(n)$$

따라서 다음과 같은 filtered - x LMS 알고리즘에 의한 필터 계수 조정식을 구할 수 있다.

$$w_k(n+1) = w_k(n) + \mu x'(n-k)e(n), \quad k = 0, 1, \dots, L-1$$

즉 LMS 알고리즘에서 필터 조정식에 사용된  $X(n)$ 은 여기서 오차 경로로 거친  $X'(n)$ 으로 변환되며 실제 응용에서는 오차 경로를 모델링한 새로운 필터를 구성하여 입력값  $X(n)$ 을 필터링하여  $X'(n)$ 을 구한다. 즉,  $x(n)$ 은 오차 경로  $S(z)$ 를 모델링한  $\hat{S}(z)$ 를 통과한 후 LMS 알고리즘에 사용된다.

### 2.3 적응 피드백 능동 소음 제어



〈그림 3〉 선형 예측법의 원리

적응 피드백 능동 소음 제어는 그림 3에 나타난 피드백 능동 소음 제어 시스템에 위상 변형 회로 대신 적응 디지털 필터를 이용한 것이다. 이 경우에는 제어하고자 하는 소음의 신호를 제어 스피커의 전방에서 마이크로폰으로 측정하지 않기 때문에 제어 신호에 의한 음향학적 피드백의 영향은 없게 된다. 하지만 오차 마이크로폰으로 측정된 오차 신호를 이용하여 참조 신호를 예측해야 하기 때문에 이 시스템은 예측 가능한 주기적인 소음에만 유용하다는 한계를 가지고 있다. 본 연구에서는 Kuo 등이 제안한 선형 예측법을 이용하여 참조 신호를 구성하였다.

$S(z)$ 는 오차 경로이고  $\hat{S}(z)$ 는 이를 모델링한 함수이다. 참조신호  $x(n)$ 은 제어하고자 하는 소음 신호인  $d(n)$ 과 같다고 가정하자. 다음 식을 통해 추정된다.

$$x(n) \cong \hat{d}(n) = e(n) + \sum_{k=0}^{L-1} \hat{S}_k y(n-k)$$

선형 예측법을 이용하여 실제 덕트에 적응 피드백 능동 소음 제어 시스템을 구성할 경우에도 오차 경로가 존재하기 때문에 이 영향을 상쇄하기 위해 Filtered - x LMS 알고리즘을 적응 알고리즘으로 이용하였다.

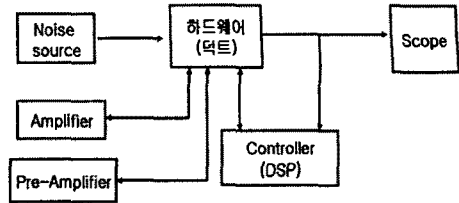
### 2.4 실험 결과

#### 2.4.1 실험 장치 구성

실제 1차원 소음의 제어를 위해 덕트를 설계하였다. 덕트는 단면이 사각형이고 아크릴을 가공하여 제작하였다. 덕트의 길이는 2m로 하였으며 20cm\*20cm 정사각형 모양으로 하였다. 소음원으로 사용되는 스피커는 입구에서 40cm 지점에 놓았으며 제어 스피커는 반대쪽 입구에서 40cm 지점에 설치하였다. 스피커를 효율적으로 장착하기 위해 연결부를 cone 모양으로 하여 점차 내경이 줄어들게 하였다. 입력 신호는 능동 소음 제어의 물리적 한계를 고려하여 500[Hz] 이하의 주파수를 가지는 정현파 신호를 사용하였다. 오차를 검출하는 마이크로폰은 덕트 안쪽에 설치를 하였다.

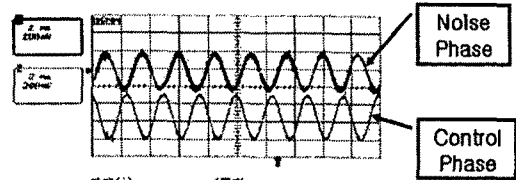
소음원을 구동시키는 파워 앰프, 마이크로폰의 신호를 증폭시키는 프리 앰프(pre-amplifier), 소음을 제어하는 제어기 프로세서(DSP-TMS320C32)는 케이블, 커넥터를 연결을 하여 덕트 외부에 구축을 하였다. 입력값은 A/D 변환기에서 디지털 신호로 변환되어 제어기 프로세서로 입력된다. 디지털 값으로 나오는 제어 신호는 D/A 변환기에서 아날로그 신호로 변환되고 D/A 변환 과정에서 발생하는 랜덤 잡음 성분을 제거하는 재생 필터인 저주파 필터로 통과시켰다.

소음 제어의 결과는 오차 마이크로폰으로 측정하는 신호를 주파수 분석기에 연결하여 오차 신호의 파워 스펙트럼으로 관찰하였으며, 적응 시스템 식별과 소음 제어를 위한 알고리즘은 C언어를 이용하여 프로그램을 작성하였다. 지금까지 기술한 과정을 바탕으로 능동 소음 제어 실험을 반복적으로 진행하였다. 실험 장치 구성은 다음과 같다.

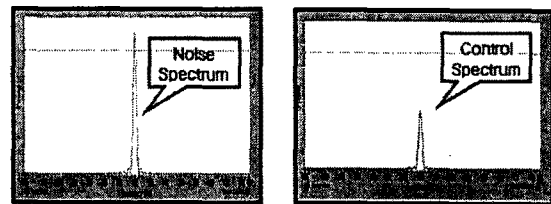


〈그림 4〉 실험 장치 구성도

### 2.3.2 실험 결과



〈그림 5〉 스크린을 통한 실험 결과 출력 파형



〈그림 6〉 스펙트럼 분석기를 통한 출력 스펙트럼

500Hz 미만의 정현파를 입력하여 능동 소음 제어를 실험한 결과 그림4와 같이 입력파형과 같은 크기의 반대 위상이 출력 파형으로 나오므로써 소음 감소의 효과를 확인할 수 있었다. 그리고 스펙트럼 분석기를 이용하여 입력과 출력의 스펙트럼을 분석, 명확히 소음이 감소되는 것을 알 수 있었다.

## 3. 결 론

본 연구에서는 1차원 평면파 형태로 전파되는 소음의 제어를 위해 적응 피드백 알고리즘을 이용한 능동 소음 제어 기법을 적용하여 덕트 내에서의 전파 소음의 능동 소음 제어 실험을 수행하였으며 이러한 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 주기적인 특성을 가지는 저주파의 1차원 소음에 대한 제어를 기존의 피드포워드 방식의 단점을 해결한 적응 피드백 제어 시스템을 구성하였으며 Filterd - x LMS 알고리즘과 선형 예측법 등을 적용한 적응 제어의 실시간 구현을 위해 DSP를 이용하였다.
- 2) 500Hz 이하의 주파수를 가지는 톤 소음에 대한 제어에서 음압이 감소하였으며 연소기의 경우와 같이 제어 음원의 위치가 마이크로폰 반대쪽에 있더라도 선형 예측법을 적용할 수 있음을 확인하였다.
- 3) 제어기가 작동하는 중에 소음원의 주파수와 크기가 급격히 변하더라도 안정한 제어 성능을 나타내었고 능동 소음 제어에 대해 단순히 시뮬레이션을 실시한 것이 아니라 실제 덕트를 제작하여 실험을 수행함으로써 더 좋은 소음 제어의 결과를 이끌어내기 위해 향상된 Filterd - x LMS 알고리즘을 적용시킬 수 있는 기반을 확립하였다.

### 〔참 고 문 헌〕

[1] 박영진, "능동 소음 제어의 기본 이해", 한국소음진동학회지 제5권 제4호, pp.431-439, 1995.  
 [2] Widrow, B., and Stearns, S. D., "Adaptive Signal Processing", Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1985.  
 [3] Widrow, B., Shur, D., and Shaffer, S., "On adaptive inverse control", Proc. 15th Asilomar Conf., pp. 185-189, 1981.  
 [4] Burgess, J. C., "Active adaptive sound control in a duct : A computer simulation", Journal of Acoustical Society of America, 70, pp. 715-726 1981.  
 [5] Kuo, S. M., and Vijayan, D., "Adaptive algorithm and experimental verification of feedback active noise control system", Noise Control Eng. J. 42(2), pp.37-46, 1994.