

# 스마트 폼을 이용한 덕트 내 넓은 영역에서의 소음 제어 및 상쇄 경로 최적화 Active noise control in the global region of a duct using smart foam and FIR filter optimization of cancellation path

한재현\* · 강연준\*\*

Je heon Han and Yeon June Kang

**Key Words** : Active Noise Control(능동소음제어), Smart foam(스마트폼), Cancellation path(상쇄경로)

## ABSTRACT

ANC technic can overcome the limited performance of passive noise control at the low frequency range. But it has the local quiet control region in general. In this paper, it is discussed that the global noise control in a circular duct using a ring type smart foam and a porous material. LMS algorithm and RLS algorithm are used to find optimal orders of cancellation path. Experiments are performed to compare the efficiency of RLS algorithm with that of LMS algorithm.

## 기호설명

$W(z)$  : 시스템 모델링 필터

$C(z)$  : 상쇄 경로

## 1. 서 론

최근 기술의 발전이 급속히 이뤄지면서 기계의 단순 효율 뿐 만 아니라 디자인, 환경 및 소음 문제도 큰 고려 대상으로 여겨지고 있다.

이 중 소음 저감을 위한 방법으로 소음원을 제어하는 법, 소음원과 수음부 사이를 제어하는 법, 수음부를 제어하는 세 가지의 방법이 있다. 소음원을 제어하는 기법은 소음원의 구조나 특성을 변경한다는 등의 어려움이 있고 수음부를 제어하는 방법은 모든 사람이 장비를 착용한다는 등의 불편함이 있기 때문에 많은 경우에 있어서 소음원과 수음부 사이의 제어 기법이 이용되고 있다. 이 방법은 크게 수동 소음 제어

와 능동 소음 제어로 나뉜다.

흡음재나 차음재 등을 이용하는 수동 소음 제어 기법은 일단 설치하면 추가적인 비용이나 유지비는 거의 없지만 저주파 영역에서 성능이 떨어지는 단점을 갖고 있다. 능동 소음 제어 기법은 수동 소음 제어의 저주파 영역에서의 취약점을 보완해 줄 수 있지만 비싼 초기 설치비와 추가 유지비 등의 단점이 있다.

본 논문에서는 Fuller에 의해 제안된 수동 소음 제어와 능동 소음 제어가 혼합된 형태의 스마트 폼(Smart foam)에<sup>(1)</sup> 대해 알아보고 기존의 국부적인 영역에서의 능동 소음 제어 효과의 범위를 넓히기 위해 환형 단성 폼을 이용하여 넓은 영역에서의 덕트 내의 능동/수동 소음 제어에 대해 논하도록 하겠다.

## 2. 실험 장치 및 과정

### 2.1 환형 스마트 폼

많은 능동 소음제어에서 2차 음원으로 스피커를 사용하고 있다. 그러나 덕트 내에 스피커를 장착하기 위해서는 덕트의 형상을 변형시키거나 따로 공간을 마련해야 하는 단점이 있다.

Fuller가 고안한 형태의 스마트 폼을 장착할 경우 덕트의 단면을 가로 막아 덕트의 본 쓰임새를 잃어버리기 때문에 Fig. 1 과 같이 내경 10 cm 폭 4cm의 폴리우레탄 단성 폼에 PVDF 필름을 삽입한 형태의 환형 스마트 폼을<sup>(2)</sup> 홀더

\* 서울대학교 기계 항공 공학부  
E-mail : jeep2000@hanmail.net  
Tel : (02) 880-1677, Fax : (02) 883-1513

\*\* 서울대학교 기계 항공 공학부 부교수

에 장착하여 제어를 위한 2차 음원으로 이용하였다.

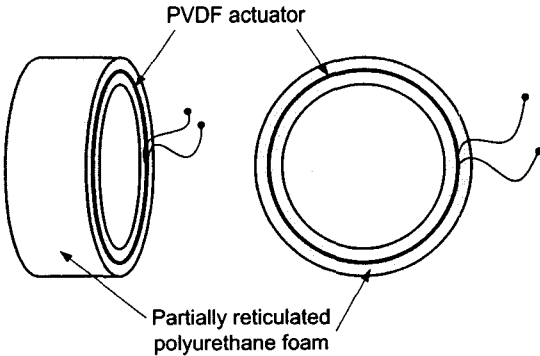


Fig 1. The ring-type smart foam

## 2.2 실험 장치 및 과정

### (1) Closed and Open End

전체적인 실험 장치 구성은 Fig. 2와 같다. B&K 4206 임피던스 튜브를 기본으로 하여 50cm의 추가적인 덕트 4개를 연장하여 주 소음이 있는 쪽은 닫히고 다른 한 쪽은 열린 모양이다. 덕트의 내경은 10cm이고 첫 번째 차단 주파수는 약 1600Hz이다. 덕트 가운데 부분에 환형 스마트 폼을 장착하여 소음 제어하였다.

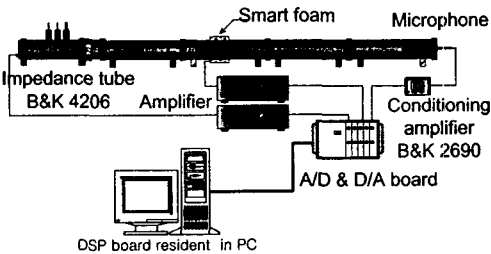


Fig. 2 Experimental setup I

### (2) Closed and Terminational End

#### a) 단일 입력 단일 출력 실험 (SISO)

Fig. 2의 실험으로는 오차 마이크로폰의 음압 변화는 관측할 수 있지만 덕트 내의 음장 변화는 관측하기 어려운 형태이다. 그래서 덕트 끝 부분에 무향 끝 단 (anechoic terminator)를 장착하여 끝 부분에 설치된 오차/탐지 마이크로폰의 지지대 역할 및 지지대에 의한 음장 변화를 최소화 되도록 하였다.

그 후 능동 소음 제어를 수행하여 정상상태에 이르게 되면 수렴 계수를 0으로 놓아 제어 상태를 유지한 뒤 오차 마이크로폰을 이동하여 탐지 마이크로폰으로 이용해 덕트 내부의 음압 분포를 측정하였다.

#### b) 단일 입력 다중 출력 실험 (SIMO)

단일 입력 단일 출력 실험에서 탐지 마이크로 폰을 이용하여 덕트 내의 음압 분포를 측정하면 오차 마이크로 폰 근처를 제외하고는 소음 제어 효과가 거의 없음을 알 수 있었다. 그래서 소음 제어 구역(quiet zone)을 넓히기 위해 두개의 오차 마이크로 폰을 덕트 표면 위에 구멍에 위치시켜 소음 제어를 수행하였다.

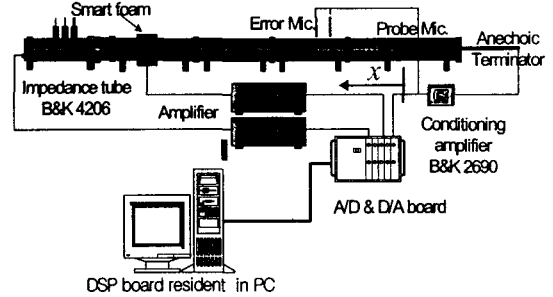


Fig 3. Experimental Setup II

#### c) 환형 탄성 폼을 장착한 단일 입력 다중 출력 실험

위 실험에서 덕트 단면의 중앙 부분에서 측정된 탐지 마이크로 폰의 신호와 덕트 표면 부분에서 측정된 오차 마이크로 폰의 신호를 비교했을 경우 덕트 길이 방향으로 동일한 위치에서도 큰 차이가 생길 때가 있다. 이로 인해 덕트 내 1차원적인(quasi 1-D) 소음 제어 문제가 2차원으로 변해 소음 제어 성능이 떨어지고 소음 제어 구역이 좁혀진다. 이는 환형 스마트 폼의 고유한 가진 방식에 의해 모드가 발생하는 거라 여겨진다. 이런 반경 방향의 가진에 의한 모드의 영향을 최소화 하여 소음 제어 구역을 넓히기 위해 Fig 4.와 같이 길이 1m의 환형 탄성 폼을 장착하여 소음 제어를 수행하였다.

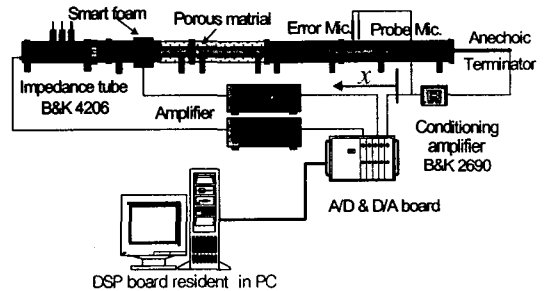


Fig. 4 Experimental setup III

## 3. 상쇄 경로 계수 차수 최적화

본 실험의 전체적인 흐름을 Fig. 5와 같이 블록 선도로 나타내었다. 시스템 모델링 필터  $W$ 의 계수는 Filtered-x

LMS<sup>(3)</sup> 알고리즘을 이용하여 실시간으로 갱신하였고 이를 위해 제어 신호와 오차 마이크로 폰 간의 전달 함수인 상쇄 경로를 실험하기 전에 미리 계산하여 시간에 따라 변하지 않는다고 가정하여 사용하였다. 그렇기 때문에 상쇄 경로를 될 수 있는 한 적은 계수 차수로 정확하게 구현하는 것이 계산량 감소 및 소음 제어 성능 증대에 큰 영향을 끼친다.

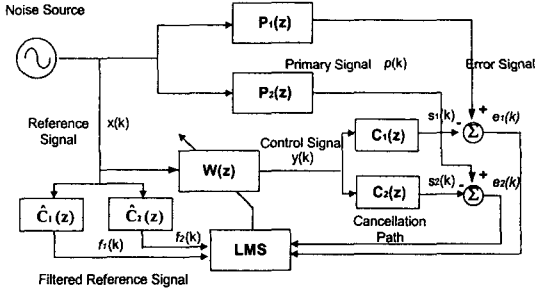


Fig. 5 Block diagram of Filtered-x LMS algorithm

### 3.1 상호 관계 방법 (Correlation method)

상쇄경로의 전달 함수를 상호 관계 방법<sup>(4)</sup>을 이용하여 구한 것을 참 값으로 가정하여 상쇄 경로의 FIR 필터 차수를 변화시키면서 구한 값을 비교하면서 최적의 차수를 구하도록 하였다. 그러나 이 방법은 단일 주파수에서만 전달 함수를 구하는 것이 가능하기 때문에 정확한 비교가 어려웠다.

### 3.2 ETFE (Empirical Transfer Fn. estimate)

ETFE에서는 전달 함수를 구하는데 쓰인 데이터의 개수가 늘어 날수록 실제 전달 함수와의 차이가 줄어들기 때문에<sup>(5)</sup> 25000개의 충분한 양의 데이터를 이용하여 예측하였다.

ETFE를 이용하여 구한 전달 함수에서 노이즈의 영향을 최소로 하기 위해 해닝 창 함수 (Hanning Window Function)를 씌우고 여러 창으로 나눈 뒤 오버랩을 하고 각각의 나눠진 창과 인접한 주파수에 대해서 평균하였다.<sup>(4),(5)</sup>

구한 전달 함수를 보면 (Fig. 6 참조) 200Hz 이하에서 불안정한 모양을 관찰 할 수 있다. 이는 덕트 외벽에 붙어서 진동하는 환형 스마트 폼의 가진 방식 때문에 덕트 위에 구멍을 통해 설치되어 있는 오차마이크로 폰에 진동이 전달 되어 측정되었기 때문이다.

### 3.3 상쇄 경로 예측

ETFE를 이용하여 구한 상쇄경로의 전달 함수를 참 값으로 가정하여 FIR 필터 차수를 변화시키면서 구한 전달 함수를 비교하면서 최적의 차수를 구하도록 하였다. FIR 필터의 계수는 LMS 알고리즘과 RLS 알고리즘을 이용해 구하여 각각의 전달 함수를 비교하였다.

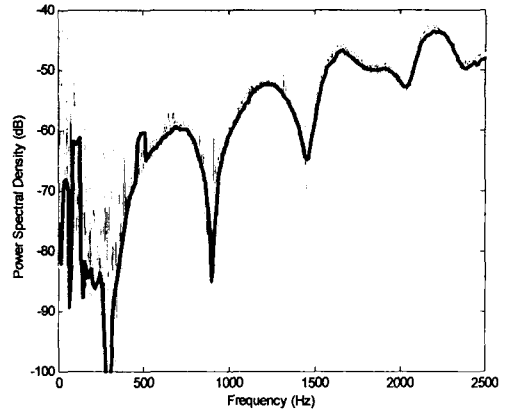


Fig. 6 Transfer function of cancellation path ( ···· : ETFE , — : the smoothed version of ETFE)

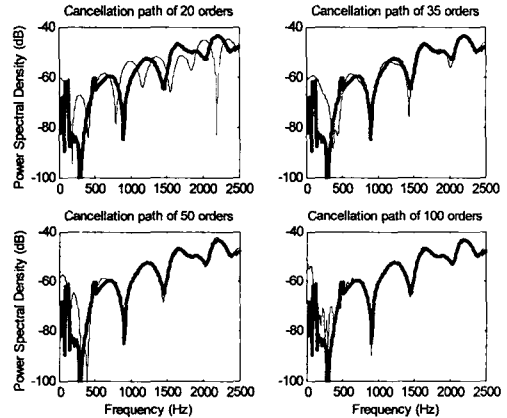


Fig.7 Cancellation path modeling using LMS algorithm ( — : FIR filter modeling, ···· : True transfer function )

Fig. 7을 보면 LMS 알고리즘을 이용해 구한 FIR 필터의 전달 함수는 차수가 35차 이상이 되어야 비로소 실제 전달 함수와 비슷해짐을 알 수 있다. Fig. 7과 Fig. 8을 비교해보면 RLS 알고리즘을 이용해 구한 FIR 필터의 전달 함수는 차수가 30차 만 되어도 LMS 알고리즘의 35차의 계수를 이용해 구한 전달 함수보다 500 Hz 이하의 저주파 영역에서 훨씬 더 정확함을 알 수 있다.

물론 LMS 알고리즘으로 수렴계수를 매우 작게 하고 데이터 받는 시간을 늘려 더 많은 데이터를 받는다면 RLS 알고리즘의 결과와 비슷하게 나올 수도 있겠지만 일반적으로 RLS 알고리즘이 LMS 알고리즘보다 수렴속도가 빠르기 때문에<sup>(6)</sup> 상쇄 경로는 FIR 필터 계수 30차에 RLS 알고리즘을 적용하여 예측하였다.

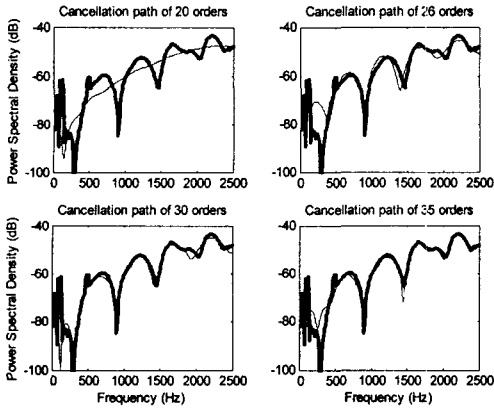


Fig.8 Cancellation path modeling using RLS algorithm (—: FIR filter modeling, - - -: True transfer function )

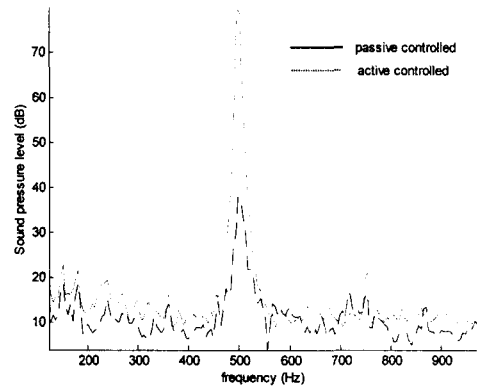


Fig. 10 Sound pressure level at the error microphone (x = 20 cm)

## 4. 실험 결과 및 분석

### 4.1 Closed and Open End

실험 결과는 Fig.9 와 10 과 같다. 40~50dB 의 소음 저감 효과를 보이고 있으며 사인 성분이 거의 소거된 결과를 관찰 할 수 있다.

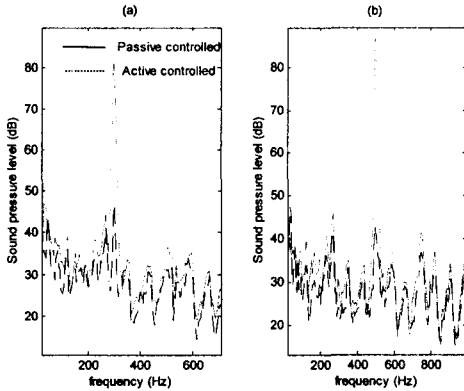


Fig.9 Tonal control result at (a) 300 Hz, (b) 500 Hz

### 4.2 Closed and Terminational End

#### a) 단일 입력 단일 출력 실험 (SISO)

실험 결과는 Fig. 10, 11 과 같다. 오차 마이크론에서는 약 40dB의 소음 저감 효과가 있지만 x = 35 cm, 70cm 인 구역을 제외하고는 오히려 약 5dB의 음압이 증가함을 관찰 할 수 있다. 이는 환형 스마트 폼의 반경 방향으로의 가진 방식으로 인해 덕트의 길이 방향으로의 평면과 이외의 다른 성분의 소음이 발생한거라 생각된다. 이 현상은 다음 실험의 결과에서 보다 확실하게 알 수 있다.

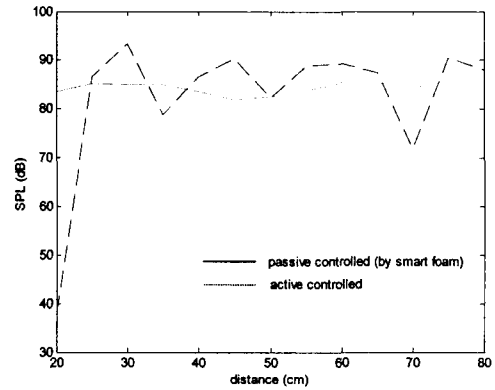


Fig. 11 The spatial distribution of SPL

#### b) 단일 입력 다중 출력 실험 (SIMO)

Fig. 12에서 관찰 할 수 있듯이 덕트 표면에 위치한 오차 마이크론에서 측정된 음압과 주 소음원에서 같은 위치에

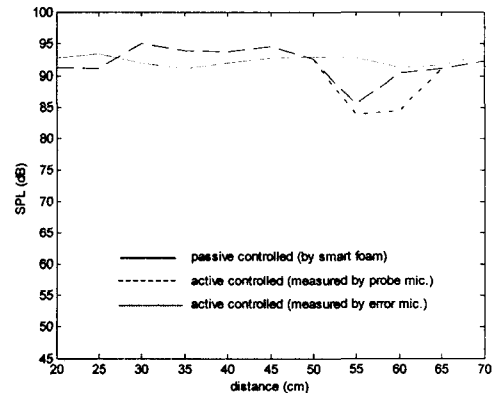


Fig. 12 The spatial distribution of SPL at 750 Hz

있지만 덕트 단면 중앙에 위치한 탐지 마이크로폰에서 측정된 음압이 2~6dB 정도 차이를 확인 할 수 있다. (Fig. 13 참조) 이는 환형 스마트 폼의 가진 방식에 의해 발생한 평면파 이외의 반경 방향으로의 모드에 의한 영향이라 생각되어진다.

단일 입력 단일 출력 실험과 비교하여 오차 마이크로폰에서의 음압 감소는 더 적었지만 오차 마이크로폰 주변에서 더 넓은 제어영역을 얻을 수 있었다.

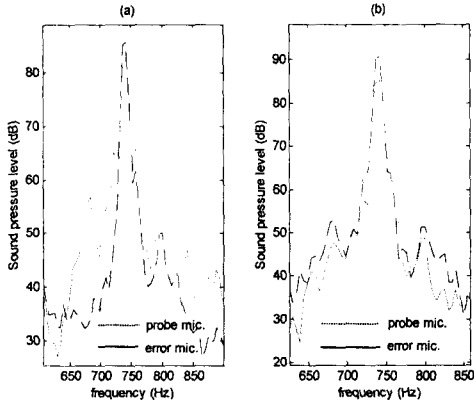


Fig. 13 Sound pressure distribution at the probe mic. and the error mic. (a)  $x=55$  cm (location of error mic.I), (b)  $x=60$  cm (location of error mic.II)

### c) 환형 탄성 폼을 장착한 단일 입력 다중 출력 실험

위의 실험에서 나타난 반경 방향의 음압분포를 최소화 하기 위해서 환형의 탄성 폼 1m 짜리를 스마트 폼과 오차 마이크로 폰 사이에 설치하였다.

실험 결과는 Fig. 14와 같다. 이 실험은 700Hz, 일반적으로 흡음재의 성능이 매우 떨어지는 비교적 저주파수 영역에서 행하여 졌지만 탄성 폼의 길이가 1m로 매우 길기 때문에 탄성 폼에 의해 약 10dB의 음압 감소가 일어남을 관찰 할

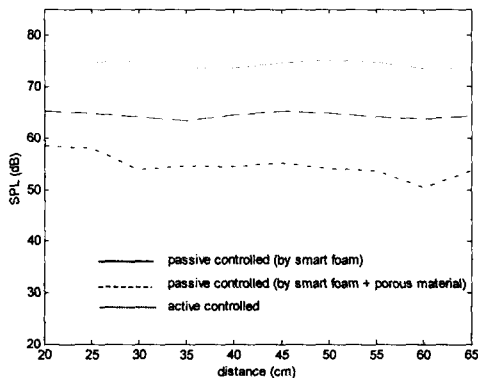


Fig. 14 The spatial distribution of SPL at 700Hz

수 있다. 그리고 능동 소음 제어에 의해 추가적으로 10dB의 음압 감소가 일어남을 확인 할 수 있었다.

그러나 오차 마이크로폰과 탐지 마이크로폰 사이의 음압 차이는 여전히 존재하였으며 1m 짜리 탄성 폼으로 이를 극복하기 보다는 환형 스마트 폼의 구조를 변경한다든가 다른 근본적인 대안이 요구된다. 그리고 위와 같이 전체적으로 음압을 줄일 수 있는 최소의 탄성 폼의 길이에 대한 연구도 요구된다.

## 5. 결론

덕트 내의 능동 소음 제어를 위해 2차 음원으로 환형 스마트 폼을 이용하였다. 그리고 RLS 알고리즘을 적용하여 최소의 차수로 상쇄 경로를 모델링 하였다.

환형 스마트 폼의 덕트 길이 방향으로의 비효율적인 가진 방식으로 인해 덕트 내부의 국부적인 음압 감소 효과만을 얻을 수 있었다. 이를 극복하기 위해 환형 탄성 폼을 부착하여 덕트 내부의 전체적인 음압 감소를 이뤘다. 환형 탄성 폼의 도움 없이 전체적인 음압 감소를 이루기 위해서는 새로운 스마트 폼의 구조가 요구되며 전체적으로 음압을 줄일 수 있는 최소의 탄성 폼의 길이에 대한 연구도 필요하다.

## 참고 문헌

- (1) Gentry, C. A., Guigou, C., and Fuller, C. R., 1997 Smart foam for applications in passive-active noise radiation control, Journal of the Acoustical Society of America 101 (4) pp. 1771-1778
- (2) 김표재, 강연준, 조영만, 2001, "스마트 폼을 이용한 덕트 내부의 능동 소음 제어" 한국 소음진동 공학회지 Vol.11, No3, pp. 422-427
- (3) P.A. Nelson and S.J. Elliott, 1992, Active Control of Sound, Academic Press
- (4) Lennart Ljung, 1999, System Identification Theory for the User, Prentice Hall
- (5) Ronald N. Bracewell, 2000, The Fourier Transform and Its Applications, McGraw Hill
- (6) Simon Haykin, 2002, Adaptive Filter Theory, Prentice Hall