

환형 스마트 폼을 이용한 덕트 내부의 능동 소음 제어 및 상쇄 경로 최적화

Active Noise Control in the Duct Using the Ring-type Smart Foam and the Optimization of a Cancellation Path

한 제 현* · 강 연 준†

Je Heon Han and Yeon June Kang

(2003년 12월 20일 접수 : 2003년 5월 26일 심사완료)

Key Words : Active Noise Control(능동소음제어), Smart Foam(스마트 폼), Cancellation Path(상쇄경로)

ABSTRACT

This paper presents a method for active noise control (ANC) in a duct by using a ring-type smart foam. The ring-type smart foam consists of an elastic porous material of lining shape and a PVDF film embedded in the material. The PVDF element acts as a secondary sound source to reduce the noise. Active noise control using a ring-type smart foam is only effective locally because of the way to excite radially. To enlarge the quiet zone, the duct is lined with additional acoustic foam between the smart foam and the error microphone. When cancellation path is optimized by the LMS/RLS algorithm, the computation power is reduced while control performance is maintained. The filtered-x LMS algorithm is used to minimize the error signal.

1. 서 론

소음 제어 방식은 크게 수동 소음 제어와 능동 소음 제어로 나뉜다. 공명기나 흡/차음재 등을 이용하는 수동 소음 제어는 비용이 저렴하고 일단 설치하면 유지비도 거의 없는 장점이 있으나 저주파 대역에서 성능이 떨어지는 단점이 있다.⁽¹⁾ 능동 소음 제어는 수동 소음 제어의 저주파 대역에서의 취약점을 보완해 줄 수 있지만 비싼 초기 설치비와 유지비가 요구되는 단점을 갖는다.

능동 소음제어에서 보통 2차 음원으로 스피커가 널리 쓰인다. 그러나 스피커를 장착하기 위한 공간을 따로 마련해야 하는 단점 때문에 본 논문에서는 덕트

내 능동 소음 제어를 위해 탄성 다공성 물질에 PVDF필름을 삽입하여 만든 환형 스마트 폼을 이용하였다. 기존의 연구⁽²⁾에는 오차 마이크로 폰에서 측정되는 신호의 최소화만을 목표로 했기 때문에 다른 위치에서의 음장의 변화를 고려하지 않았다.

본 논문에서는 능동소음제어 후 오차 마이크로 폰 이외의 다른 위치에서의 음장의 변화를 살펴본 후 환형 스마트 폼의 가진 방식에 의한 반경 방향의 음장의 변화를 최소화하여 음장을 단순화 시켜 전체적으로 능동 소음 제어 효과가 일어나도록 하였다. 또 능동 소음 제어가 요구되는 연산을 최소화하기 위해 상쇄 경로의 FIR(finite impulse response) 필터 계수를 LMS(least mean square)/RLS(recursive least square) 알고리즘^(5, 8)을 사용하여 최적화 하여 구하였다. 시스템 적응 알고리즘으로는 Filtered-x LMS 알고리즘을 사용하였고 실험은 한 쪽은 닫히고 한 쪽은 열린 덕트와 한쪽은 닫히고 한 쪽은 무향 처리된 덕트에서 수행되었다.

† 책임저자, 정회원, 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : yeonjune@snu.ac.kr

Tel : (02) 880-1691, Fax : (02) 883-1513

* 현대/기아자동차 연구개발본부 기능시험 3팀

2. 환형 스마트 폼

스마트 폼은 탄성 다공성 물질에 PVDF 필름을 삽입한 형태이다. 탄성 다공성 물질부에서는 수동 소음 제어를, PVDF 필름부에서는 전압에 의해 가진된 소리에 의한 능동 소음 제어를 담당하게 된다. Fuller가 제안한 형태의 스마트 폼⁽³⁾을 덕트에 장착할 경우 단면을 가로 막고 있는 형상이 되기 때문에 실제 유동이 존재하는 덕트에서 이용 할 수 없게 된다.(Fig. 1 참조)

이러한 단점을 극복하기 위해 Fig. 2와 같이 폭 4 cm, 내경 10 cm, 두께 1.2 cm의 환형 폼에 두께 28 μm 의 PVDF 필름을 삽입하여 2차 음원으로 사용하였다. PVDF 필름의 윗면과 아랫면에 각기 다른 전극을 연결하여 소음의 방사가 일어나도록 하였다.⁽²⁾

스마트 폼은 저주파보다 고주파에서 가진 성능이 더 좋기 때문에⁽¹⁾ 저주파 영역에서 큰 소음이 발생하는 환경에서 사용하기 위해서는 보다 큰 곡률반경을 갖는 스마트 폼을 제작하여 사용하는 것이 필요하다. 또 작은 곡률 반경일 때는 주파수에 따라 음압의 크기가 극심하게 다르기 때문에 소음원이 대역주파수일 때에는 능동 소음 제어가 불가능 하였다. 대역주파수의 능동 소음 제어를 위해서는 곡률 반경이 큰 스마트 폼을 제작하는 작업이 필요하다 생각된다.(Fig. 3 참조)

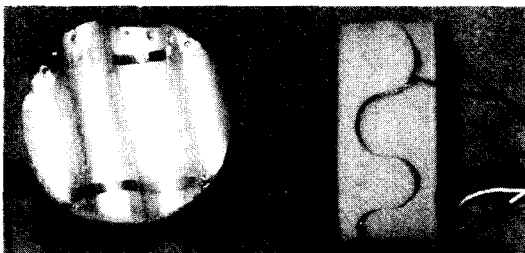


Fig. 1 The smart foam proposed by fuller

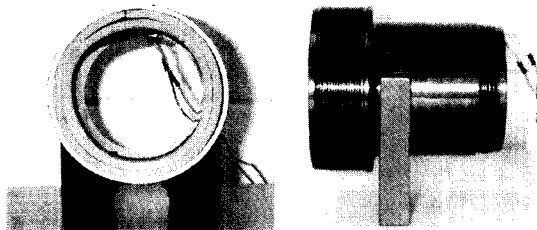


Fig. 2 Ring-type smart foam and holder

3. 실험 장치 및 과정

3.1 실험 I

Fig. 4와 같이 덕트의 한 쪽은 닫히고 다른 한 쪽은 열린 상태이다. 덕트의 내경은 10 cm이고 첫번째 차단 주파수는 약 2000 Hz이다. Brüel & Kjaer사의 임피던스 튜브를 기초로 하여 추가적으로 덕트를 장착하였다. 주소음원으로 임피던스 튜브의 스피커를 이용하였고 주소음원에서 스마트 폼까지의 거리를 1 m, 스마트 폼에서 덕트 끝까지의 길이를 1 m 10 cm로 하였고 오차마이크로 폰은 덕트의 끝 쪽에 장착하였다. dSPACE사의 ds1103 보드를 PC에 장착하여 제어 과정을 수행하였다.

3.2 실험 II

실험 II-1에서는 덕트 내부의 음장을 측정하기 위한 장소를 확보하기 위해 실험 I의 구성에서 오차 마이크로 폰을 덕트 위로 옮겼다. 그리고 Fig. 5와 같이 덕트 끝 쪽에 길이 60 cm의 무향단을 설치하여 무향 효과 및 탐지 마이크로 폰에 대한 지지대 역할을 하도록 하였다. 무향단의 앞쪽을 좌표의 기준으로 하여

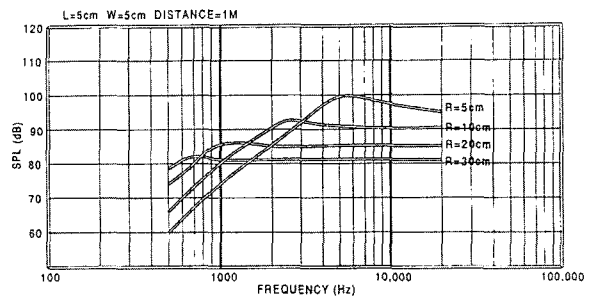


Fig. 3 SPL according to the curvature of piezoelectric polymer film⁽⁴⁾

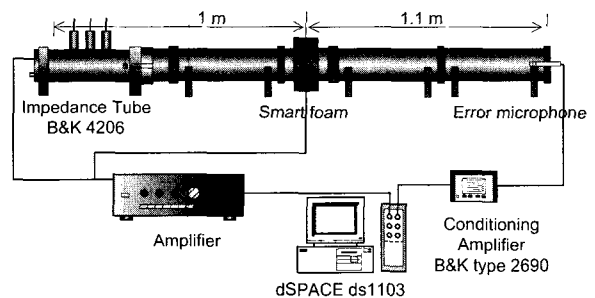


Fig. 4 Experimental setup I

탐지마이크로 폰을 이동하며 덕트 내부의 음장 변화를 측정하였다.

실험 II-2에서는 $x=20\text{ cm}$ 에 위치한 탐지 마이크로 폰을 오차 마이크로 폰으로 삼아 소음 제어 한 후에 수렴 계수를 0으로 놓아 제어 상태를 유지한 후 탐지 마이크로 폰을 이동하며 덕트 내부의 음장 변화를 측정하였다.

3.3 실험 III

실험 II에서 오차 마이크로 폰 지점 이외에서는 대체적으로 음압이 증가함을 확인 할 수 있다. 소음 제어 구역을 넓히기 위해 실험 III-1에서는 오차 마이크로 폰의 개수를 2개로 늘리고 소음제어 한 후 덕트 내부의 음장 변화를 측정하였다. 실험 III-2에서는 환형 스마트 폼의 가진 방식에 의한 반경 방향으로의 모드에 의한 영향을 최소화 하고자 스마트 폼을 앞부분에 위치시키고 그 뒤에 덕트 벽면에 두께 1 cm의 폼을 라이닝시켜 소음 제어 한 후 탐지 마이크로 폰을 이용하여 덕트 내부의 음장 변화를 측정하였다.

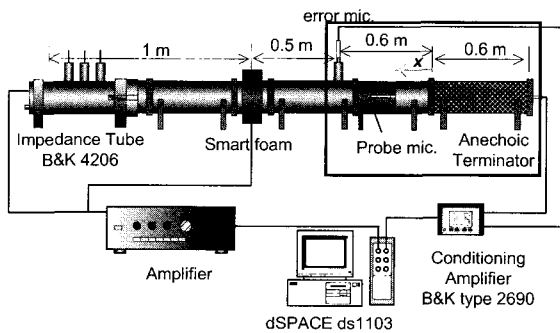


Fig. 5 Experimental setup II

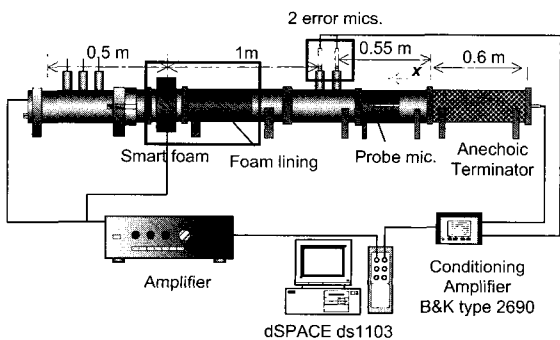


Fig. 6 Experimental setup III

3.4 실험 IV

실험 II, III의 과정은 덕트 내부의 음장은 측정 할 수 있지만 끝이 열린 덕트에서 방사되는 음압은 측정 할 수 없다. 덕트의 소음 제어 후 방사되는 음압의 변화를 측정하기 위해 오차 마이크로 폰을 덕트의 윗부분으로 올리고 덕트의 끝에서 15 cm 떨어진 곳에 3방향으로 각각 마이크로 폰을 설치하여 능동 소음 제어 전/후의 방사 소음의 변화를 각각 측정 하였다. 실험 IV-1에서는 라이닝된 환형 폼 없이 능동 소음 제어하였고 실험 IV-2에서는 스마트 폼의 가진 방식으로 인한 반경 방향의 모드를 최소화하기 위해 두께 1 cm, 길이 40 cm의 폼을 덕트 벽면에 라이닝하여 소음 제어한 후 실험 IV-1의 결과 값과 비교하였다.

4. 상쇄 경로 최적화

Filtered-x LMS 알고리즘의 구현을 위해 2차음원과 오차 마이크로 폰 사이의 전달 함수를 구해야 한다. 이때 연산력의 감소와 능동 소음 제어의 효율을 높이기 위해 최소의 차수로 정확하게 상쇄경로를 구하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 RLS 알고리즘과 LMS 알고리즘을 이용하여 상쇄 경로를 FIR 필터로 모델링 하고 ETFE를 통해 구한 참 전달함수 값과 비교하였다.

4.1 ETFE(empirical transfer-function estimate)

ETFE에서 전달 함수를 구하는데 쓰인 데이터의 개수가 늘어날수록 실제 전달 함수와 가까워진다.⁽⁵⁾ 그래서 50,000개의 충분한 데이터를 이용하여 ETFE를 통해 구한 전달 함수를 참 값이라고 가정하였다. ETFE를 통해 구한 전달 함수에서 노이즈의 영향을

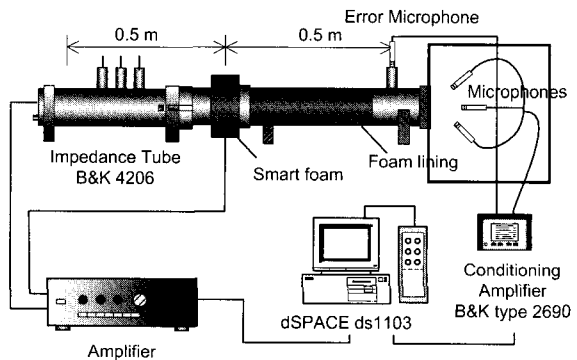


Fig. 7 Experimental setup IV

최소로 하기 위해 50,000개의 데이터를 오버랩하여 여러 창으로 나눠 해닝 창 함수(hanning window)를 씌운 뒤 푸리에 변환을 하였다. 그 후 각각의 창을 평균한 뒤 인접한 주파수에 대하여 평균하여 매끄럽게 되도록 하였다.^(5, 6) 실험 I 구성 상태에서 ETFE 결과와 노이즈의 영향을 최소화한 ETFE의 결과는 Fig. 9와 같다. 스마트 폼은 저주파보다 고주파로 갈수록 가진 성능이 좋아짐을 알 수 있다.

4.2 FIR 필터 계수 최적화

상쇄 경로를 FIR 필터로 모델링하기 위해 LMS 알고리즘과 RLS 알고리즘을 사용하였다. LMS 알고리즘은 보다 수렴속도가 빠른 normalized LMS 알고리즘을 사용하였다.^(7, 8) 실험 I 구성 상태에서 ETFE를 통해 구한 참 전달 함수 값과 LMS/RLS 알고리즘으로 구한 전달 함수 값 사이의 평균 오차를 구하여

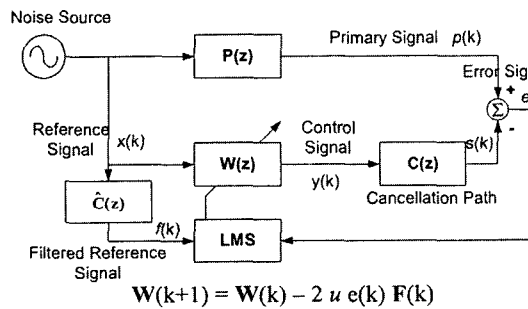


Fig. 8 Block diagram of the filtered-x LMS algorithm (P: plant, C: cancellation path, \hat{C} : estimated cancellation path, W: system modeling filter, u : convergence coefficient)

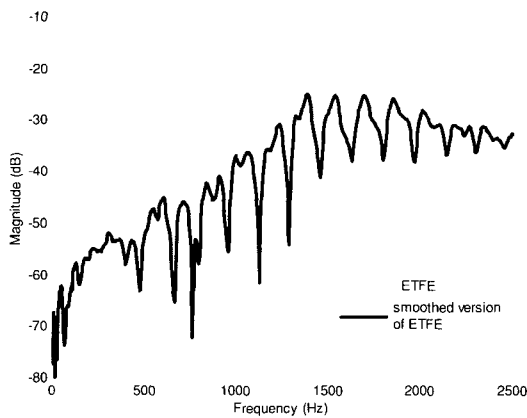


Fig. 9 Transfer function of cancellation path at the experimental setup I

Fig. 10과 같이 필터 계수 차수에 따라 나타내었다.

Fig. 10에서 알 수 있듯이 상쇄경로를 21차로 모델링 하였을 때 오차가 급감하는 것을 확인 할 수 있다. 오차는 필터의 계수 차수의 증가에 따라 점진적으로 줄어드는게 아니라 계단식으로 급감하는 것을 관찰 할 수 있다. LMS 알고리즘의 수렴계수를 줄일 수록 참 전달 함수와 근접하게 되나 수렴 계수가 작아 질수록 수렴 속도는 늦어지기 때문에⁽⁸⁾ 0.01로 너무 줄였을 경우 차수가 80차 이상으로 커지게 되면 상대적으로 수렴 계수에 비해 데이터의 개수가 부족하게 되어 오히려 오차가 커짐을 관찰 할 수 있다.

Fig. 10의 결과를 보면 RLS 알고리즘이나 LMS 알고리즘의 수렴계수가 0.1일 때가 가장 좋은 결과가 나옴을 확인할 수 있다. 그러나 같은 오차 수준이라고 할 지라도 RLS 알고리즘의 수렴속도가 LMS 알고리즘의 수렴속도보다 훨씬 빠르기 때문에⁽⁸⁾ 본 논문에서는 Table 1과 같은 차수로 RLS 알고리즘을

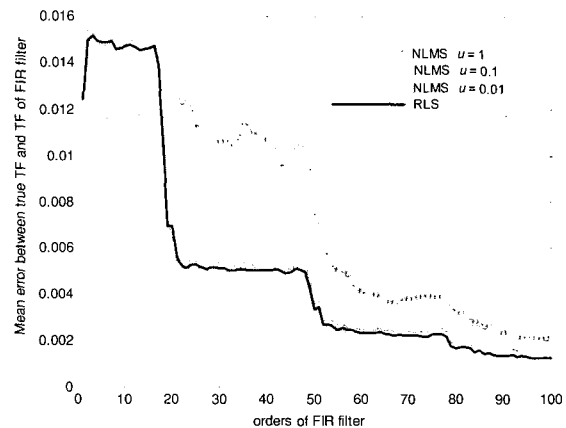


Fig. 10 Transfer function error

Table 1 Optimal orders in each experimental setup

	Orders at 1 st . rapidly decreasing point	Orders at 2 nd . rapidly decreasing point	Orders used in experiment	Mean error at experimental point
Setup I	21	52	22	0.00514
Setup II-1	12	42	13	0.00534
Setup II-2	18	46	49	0.00198
Setup III-1	18	33	20	0.00341
Setup III-2	21	37	22	0.00141
Setup IV-1	15	29	30	0.00267
Setup IV-2	15	31	32	0.00052

통해 얻은 FIR 필터로 상쇄경로를 모델링하여 소음 제어 하였다.

실험 III-1과 III-2, 그리고 IV-1과 IV-2의 차이는 덕트에 탄성 폼으로 만들어진 라이닝이 대어졌다는 점이다. 이 라이닝은 환형 스마트 폼의 반경 방향으로의 가진 방식으로 인해 복잡해진 음장을 준 1차원 음장으로 단순하게 만들어준다. 이로 인해 Fig. 11에서와 같이 전달 함수가 매끈하게 단순화 되어 보다 오차가 적도록 쉽게 모델링 할 수 있게 된다. 그러나 관찰되지 않는 주파수(unobservable frequency/unobservable mode)에서의 곡이 깊어지기 때문에 이를 맞추기 위해 오차가 급격히 줄어들 때의 차수가 2~4개가 늘어나게 된다. 또 흡음재에 의해 어느 정도 흡음이 되기 때문에 전달 함수의 전체적인 크기가 줄어들게 된다.

5. 실험 결과

5.1 실험 I

실험 결과는 Fig. 12와 같다. 300 Hz에서 약 40 dB 정도의 소음 감소 효과가 있음을 알 수 있다. 소음원이 단일 주파수이기 때문에 예측하기 수월하여 좋은

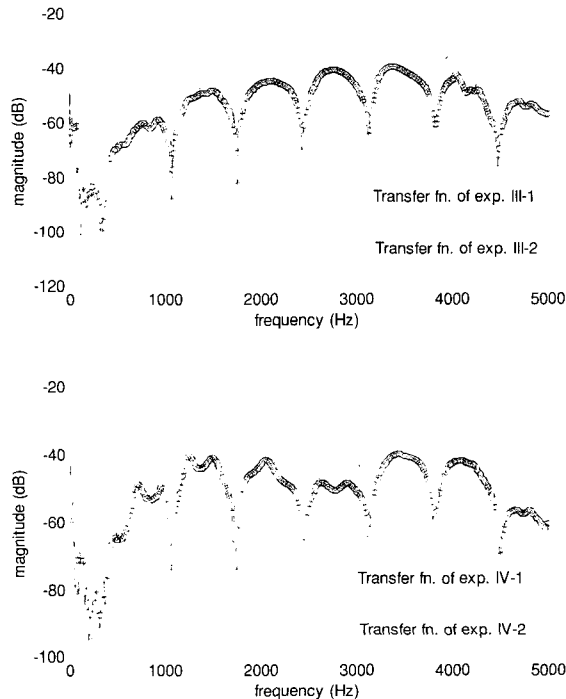


Fig. 11 Transfer function of cancellation path

실험 결과가 나옴을 알 수 있다. Fig. 10에서 두번째로 급격하게 평균 오차가 줄어드는 차수는 52차이지만 22차로 실험을 수행하여도 충분히 좋은 결과를 얻음을 확인 할 수 있었다.

Fig. 13은 500 Hz에서 덕트의 끝 쪽 부근에서 음압의 크기가 최대인 지점에 오차 마이크로 폰을 위치시킨 결과와 음압의 크기가 최소인 지점에 위치시킨 결과를 나타낸 것이다. 능동 소음 제어 전의 음압 레벨 값만 5 dB 정도 다를 뿐 능동 소음 제어 후의 음압 레벨은 거의 비슷한 것을 보아 능동 소음 제어의 성능에 크게 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

실험 I의 전달함수에서(Fig. 9 참조) 760 Hz 부근에서 급격히 크기가 감소하는 것을 보아 이 주파수가

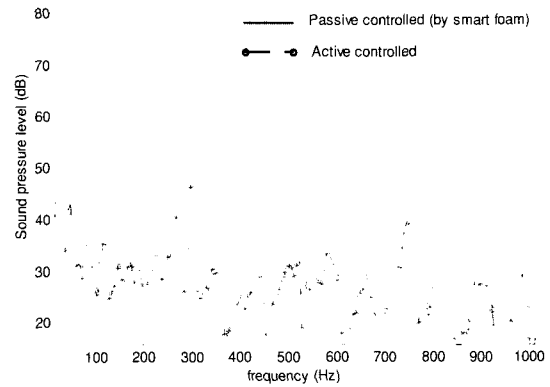
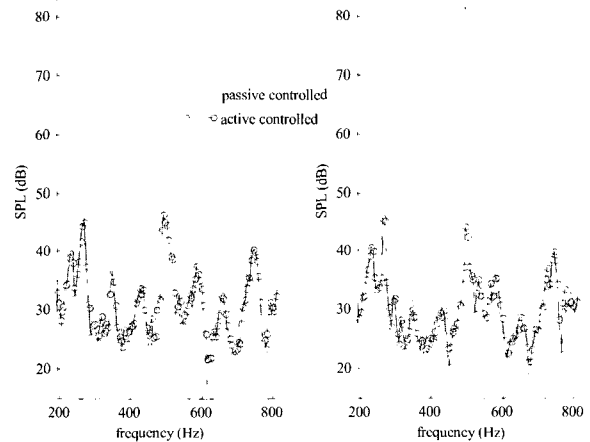


Fig. 12 Tonal control result at 300 Hz



(a) Maximum SNR point (b) Minimum SNR point

Fig. 13 Tonal control results at 500 Hz

오차 마이크로 폰의 위치에서 잡히지 않음을 알 수 있다. Fig. 14는 주소음이 760 Hz일 때의 실험 결과를 나타낸 것이다. 능동 소음 제어가 전혀 되지 않고 있음을 알 수 있다. 760 Hz의 세배인 2280 Hz에서 크게 소음이 증가하였고 다른 주파수 영역의 소음도 크게 발생함을 확인 할 수 있다. 능동 소음 제어 시 오차 마이크로 폰에서 관측되지 않는 주파수 영역에서는 매우 성능이 떨어짐을 알 수 있다.

5.2 실험 II

실험 II-1의 결과는 Fig. 15와 Fig. 16과 같다. Fig. 15(a)는 상쇄경로를 두번째 평균오차가 급감하는 지점인 42차로 모델링 하였을 때의 결과이고 (b)는 13

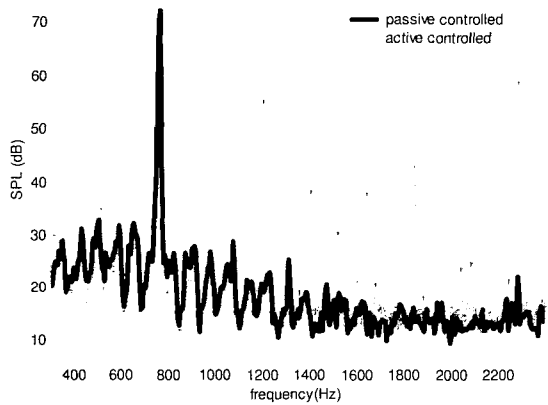
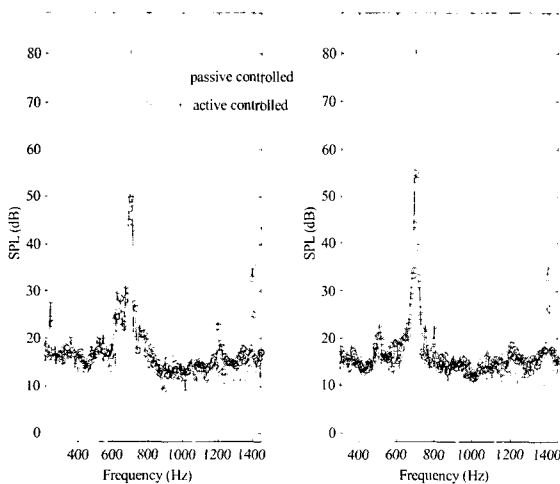


Fig. 14 Tonal control result at 760 Hz(the worst case)



(a)42 order-FIR filter (b) 13 order-FIR filter

Fig. 15 Tonal control results at 700 Hz

차로 모델링 했을 때의 결과이다. 700 Hz에서 각각 30.8 dB, 26.3 dB의 소음 감소가 일어남을 알 수 있다. 약 4.5 dB의 성능 차이가 있긴 하지만 13차로 모델링 하여도 충분히 좋은 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 16을 보면 오차 마이크로 폰에서 약 30 dB의 소음 저감 효과가 있다 하더라도 오차 마이크로 폰 위치에서의 국부적인 소음 제어이지 전체적으로 소음이 감소되고 있다고는 할 수 없음을 알 수 있다. 또 오차 마이크로 폰에서 측정된 값과 오차 마이크로 폰의 위치인 $x = 55 \text{ cm}$ 일 때의 탐지 마이크로 폰에서 측정된 음압의 크기가 전혀 다름을 알 수 있다. 무향단을 덕트 끝에 달았기 때문에 능동 소음 제어하기 전에는 거의 크기가 일정한 평면파라고 할 수 있지만 소음 제어 후에는 위치에 따라 음압의 크기가 심하게 변화하고 있음을 알 수 있다. 이는 스마트 폼의 반경 방향으로의 가진 방식으로 인한 모드 발생과 스마트

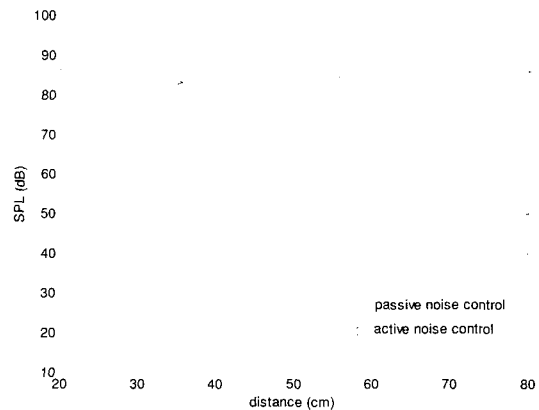


Fig. 16 Spatial distribution of SPL at 700 Hz

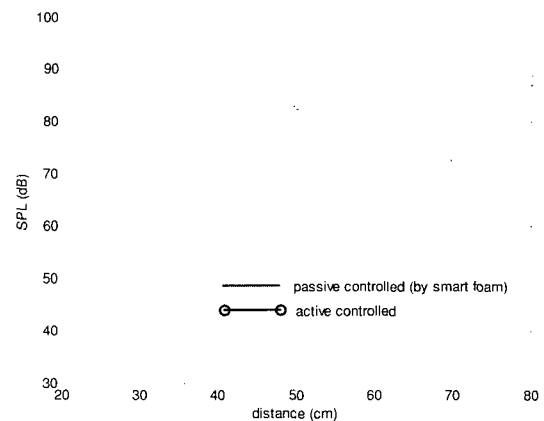


Fig. 17 Spatial distribution of SPL at 500 Hz

폼에 의한 음향 캐환 때문이라 여겨진다.

실험 II-2의 결과는 Fig. 17과 같다. 주 소음은 500 Hz이고 오차 신호로 삼은 $x = 20$ cm일 때는 40 dB 이상의 소음 저감 효과가 있지만 $x = 35, 70$ cm인 구

역을 제외하고는 오히려 음압이 증가함을 관찰 할 수 있다. 이는 실험 II-1의 결과와 마찬가지로 스마트 폼의 가진 방식에 의해서 평면파 성분 이외의 다른 소음이 발생한 것이라 생각된다.

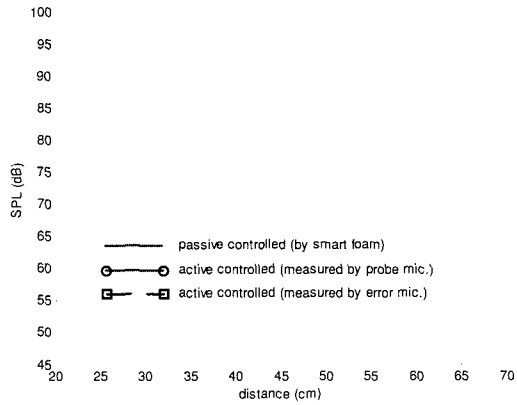


Fig. 18 Spatial distribution of SPL at 750 Hz

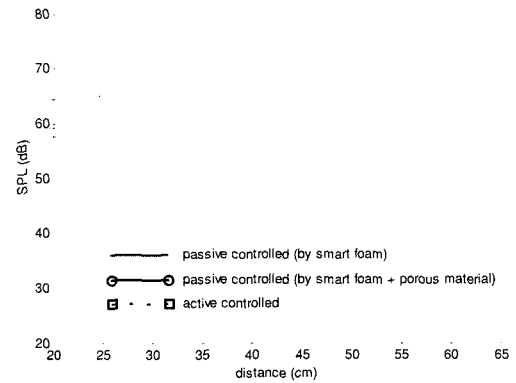
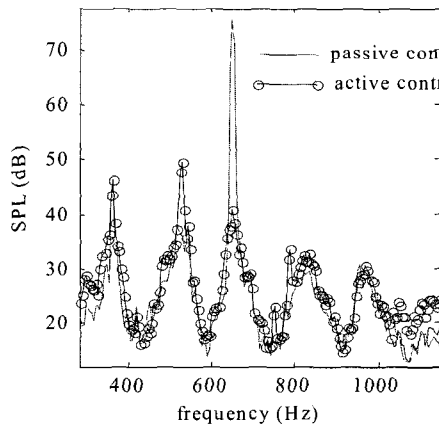
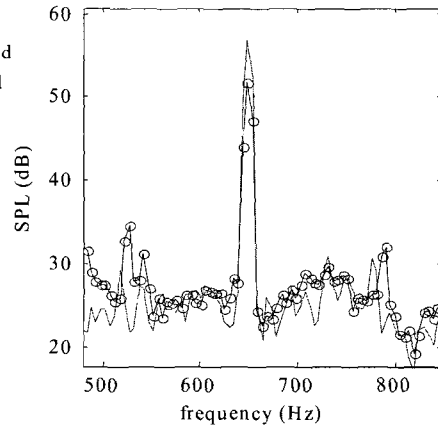


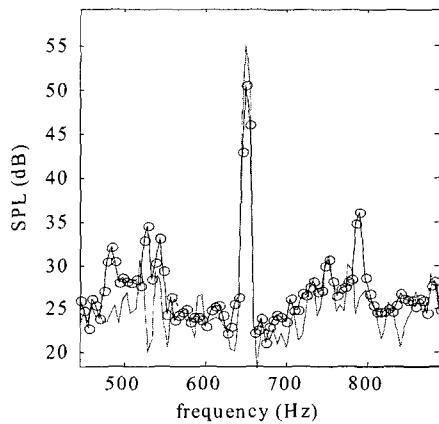
Fig. 19 Spatial distribution of SPL at 700 Hz



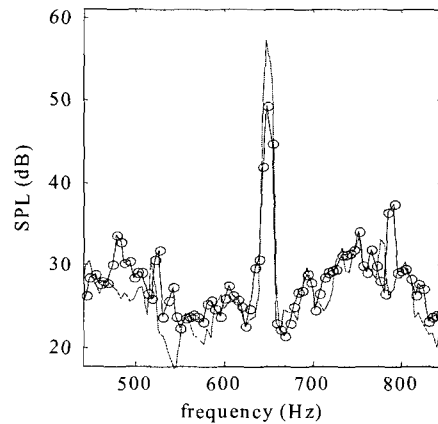
(a) Error mic.



(b) Mic. 1



(c) Mic. 2



(d) Mic. 3

Fig. 20 Tonal control results at 650 Hz

5.3 실험 III

실험 III-1에서는 소음 제어 구역(quiet zone)을 넓히고자 오차 마이크로 폰의 개수를 2개로 늘려 단일 입력 다중 출력(SIMO) 실험을 수행하였다. Fig. 18에서도 볼 수 있듯이 덕트 표면에 위치한 오차 마이크로 폰에서 측정된 음압과 주 소음원에서 같은 거리만큼 떨어져 있지만 덕트 단면 중앙에 위치한 탐지 마이크로 폰에서 측정된 음압이 각각 2dB, 6dB 정도 차이를 알 수 있다. 오차 마이크로 폰 부분에서 소음제어구역이 형성되고 있다. 오차 마이크로 폰의 개수를 늘리는 것이 전체적인 구역의 소음 제어에 큰 효과를 발휘하지 못함을 알 수 있다.

실험 III-2의 결과는 Fig. 19와 같다. 스마트 폼과 오차 마이크로 폰 사이에 라이닝 된 흡음제가 반경

방향으로의 변화를 최소화 시켜주어 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 앞의 실험 II, III-1의 결과와 달리 국부적인 지역에서의 소음제어가 아닌 전체 영역에서 소음제어가 일어남을 알 수 있다.

5.4 실험 IV

덕트 끝이 열려 있을 때의 외부로 방사되는 소음의 변화를 측정하기 위해 Fig. 7과 같이 덕트 외부에 마이크로 폰 3개를 장착하였다. 실험 IV-1의 결과는 Fig. 20과 같다. 오차 마이크로 폰에서는 약 35dB의 소음 감소가 일어나지만 덕트 외부에 위치한 마이크로 폰에서는 각각 5.1dB, 4.7dB, 7.8dB의 소음 감소가 일어남을 알 수 있다.

실험 IV-2의 결과는 Fig. 21과 같다. 라이닝 된 흡

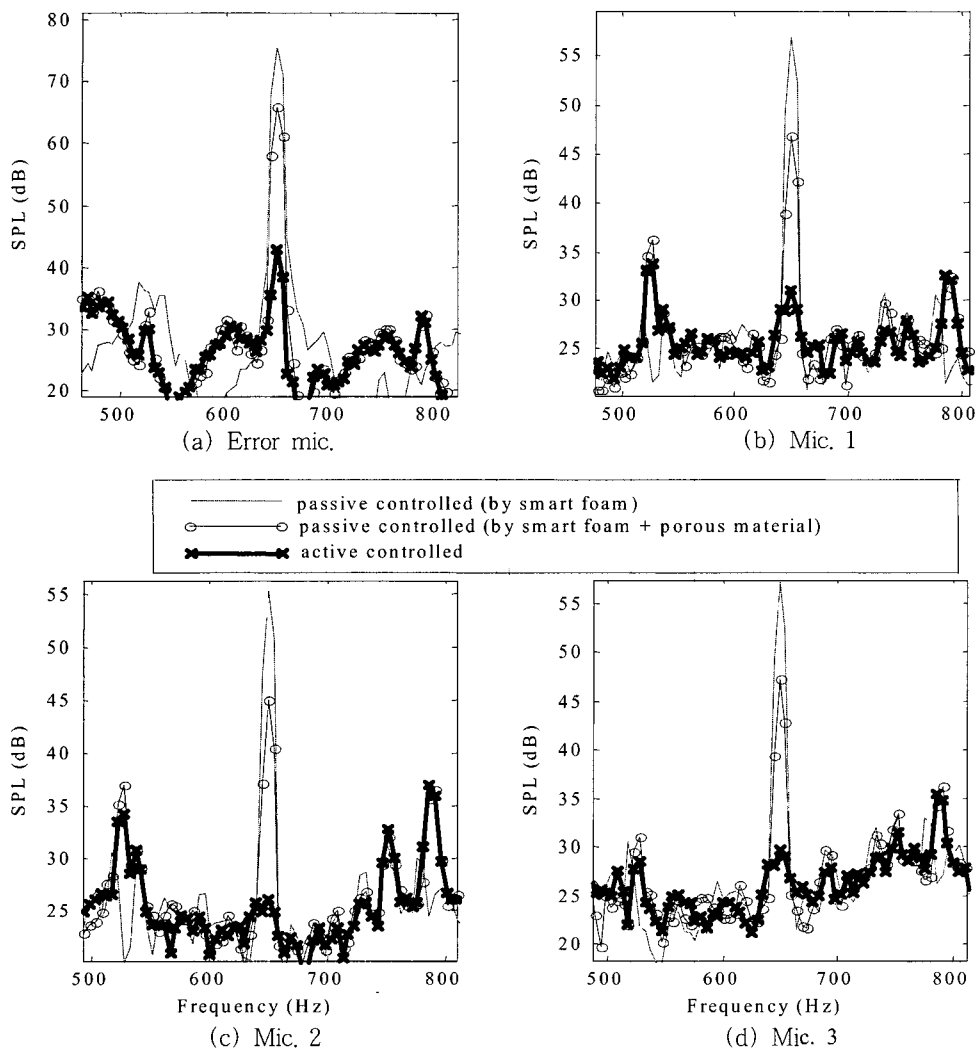


Fig. 21 Tonal control results at 650 Hz

음재에 의해 약 10 dB의 소음 감소가 있고 추가적으로 능동 소음 제어에 의해 모든 위치에서 20 dB 이상의 소음 저감이 일어나고 있다. 역시 흡음재에 의해 반경 방향으로의 가진 방식에 의한 영향이 최소로 되어 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

6. 결 론

덕트 내 능동 소음 제어를 위해 환경 스마트 폼을 장착하여 2차 음원으로 이용하였다. 스마트 폼을 사용할 경우 스피커 장착을 위한 공간을 따로 마련하지 않아도 되고 2차 음원의 무게가 가벼워야만 하는 환경에서도 사용할 수 있다는 장점이 있다.

제어 성능을 유지하면서 연산력을 최소로 하기 위해 상쇄경로를 RLS 알고리즘을 이용하여 구하였다. 상쇄경로 모델링 하는데 이용된 차수에 따라 오차를 계산한 뒤 차수의 증가에 따라 오차가 계단식으로 감소하는 점을 이용하여 동일 오차일 때 최저 차수를 선정하여 상쇄경로를 최적 모델링 하였다.

작동 알고리즘으로는 Filtered-x LMS 알고리즘이 사용되었고 넓은 영역에서 소음 제어 효과를 얻기 위해 덕트에 탄성 폼을 라이닝 시켜 소음 제어 하였다.

후 기

본 연구는 BK21 사업단과 KISTEP의 지원을 받아 이뤄졌으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B. and Sanders, J. V., 1984, Fundamentals of Acoustics, Wiley, New York.
- (2) 김표재, 강연준, 조영만, 2001, "스마트 폼을 이용한 덕트 내부의 능동 소음 제어," 한국소음진동 공학회논문집, 제 11 권, 제 3 호, pp. 422~427.
- (3) 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, Vol. 101, No. 4, pp. 1771~1778.
- (4) Measurement Specialties, Piezoelectric Polymer Speakers, Application Note 1242138.
- (5) Ljung, L., 1999, System Identification Theory for the User, Prentice Hall.
- (6) Ronald, N. Bracewell, 2000, The Fourier Transform and Its Applications, McGraw-Hill.
- (7) Hansen, C. H. and Snyder, S. D., 1997, "Active Control of Noise and Vibration," E & FN Spon, London.
- (8) Simon Haykin, 2002, Adaptive Filter Theory, Prentice Hall.