

스마트 폼을 이용한 덕트 내의 음향 인텐시티 제어

°한 제 현*, 강 연 준**

Sound Intensity Control in a Duct Using Smart Foam

°Je Heon Han* and Yeon June Kang**

ABSTRACT

The smart foam that is first proposed by Fuller⁽²⁾ is not applicable to active noise control in a duct having flow. Thus, this paper presents the ring-type smart foam as an alternative. The ring-type smart foam consists of polyurethane acoustic foam of lining shape and PVDF film embedded along the mid-surface of the foam lining. A feedforward adaptive filtered-x LMS controller is used to minimize the signal from the error microphone. To enlarge quiet sound region, two error microphones are used to update system modeling filter (SIMO method). Sound intensity control using the ring-type smart foam is also discussed

1. 서론

요즘의 기계 발전의 방향은 효율만 중요시 했던 추세에서 소음이나 환경 문제에도 큰 비중을 두는 쪽으로 바뀌어 가고 있다. 자동차나 에어컨 등 우리 주변의 많은 기계에는 덕트 요소를 포함하고 있으며 그로 인해 덕트 내의 소음제어도 중요한 문제로 부각되고 있다. 기존의 덕트 내의 소음 제어 방법으로는 공명기나 흡음재를 이용한 방법을 들 수 있다. 그러나 이러한 방법들은 제어 가능한 주파수 영역이 고정되거나 고주파 영역에만 국한된다는 단점이 있다.⁽¹⁾

본 논문에서는 이러한 단점을 보완하는 스마트 폼(smart foam)에 대해 논의하겠다.⁽²⁾ 스마트

폼은 고주파 영역에서 탄성 다공성 물질을 이용한 수동 소음제어와 저주파 영역에서 PVDF film 을 이용한 능동 소음제어를 결합시킨 형태이다. Filterd-x LMS algorithm을 적용하여 한 점에서 음압 제어를 수행하고 오차 마이크로폰의 개수를 늘려 소음제어 영역을 넓혔다. 그리고 단면을 통과하는 음향 에너지를 표시하는 인텐시티 제어의 가능성에 대해 살펴보겠다.

2. 환형 스마트 폼의 구조

능동소음제어의 2차 제어 음원으로 대개 스피커를 이용한다. 스피커를 이용할 때에는 덕트 내의 모양을 변형하거나 덕트의 일부분을 스피커를 장착하기 위한 공간으로 확보해야 하는 제약이 따른다. 그래서 Fuller가 제안한 스마트 폼(이하 플러그 타입의 스마트 폼이라 명칭함)을 이용하여 이러한 제약을 극복하고자 하였다. (Fig.1 참조)

* 서울대학교 기계항공공학부 석사과정

** 서울대학교 기계항공공학부 부교수

그러나 플러그 타입의 스마트 폼은 덕트에 장착했을 경우 단면을 가로막는 형상이 되어 실제 유동이 있는 덕트 내에서 적용이 불가능 해진다.

이러한 제약들을 극복하기 위해 환형 스마트 폼을 제안하였다. 환형 스마트 폼은 라이닝 모양의 탄성 다공성 폼에 PVDF 필름을 삽입한 형태이다. (Fig. 2 참조) PVDF 액추에이터는 PVDF 필름의 윗면과 아랫면에 서로 다른 극으로 연결된 형태로 제작하였으며 환형 스마트 폼의 장착으로 인한 음장 변화를 최소화 하기 위해 환형 스마트 폼의 내경을 덕트의 내경과 같게 직경 10cm 폭 4cm로 제작하여 홀더에 장착하였다. (Fig. 3 참조)

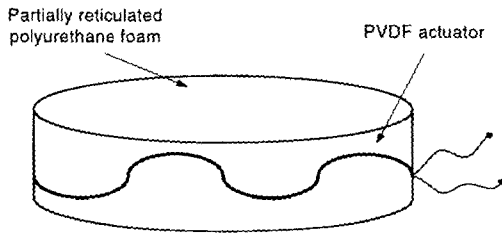


Fig. 1 The smart foam proposed by Fuller

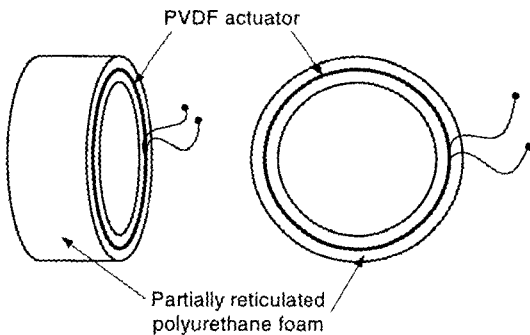


Fig. 2 The ring-type smart foam

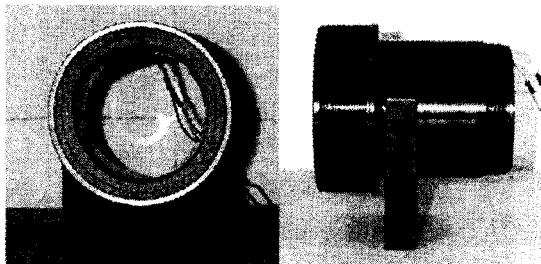


Fig. 3 A holder of ring-type smart foam

3. 실험 장치 구성 및 과정

3.1 오차 마이크로 폰의 음압만 고려한 실험

전체적인 실험 장치 구성은 B&K Type 4206 임피던스 측정 튜브에 동일한 직경을 갖는 여러 튜브를 플라스틱 너트를 이용하여 서로 연결시킨 형태이다. (Fig. 4 참조) 덕트의 한쪽 단은 소음원이 되는 스피커가 달려 있어 막혀(closed) 있고, 다른 쪽 단은 열린(Open) 형태이며 덕트의 첫번째 고차모드에 대한 차단 주파수는 약 1600Hz이다. 주소음 발생용 스피커와 제어 음원 사이의 거리를 1m 10cm, 오차 마이크로폰과 제어 음원 사이의 거리를 약 1m 로 하였다.

실험에서의 제어 효과의 결과는 제어하기 전의 오차 마이크로폰의 파워 스펙트럼과 제어한 후의 오차 마이크로 폰의 파워 스펙트럼을 비교하였다.

덕트 내부의 소음 제어를 위해 Filterd-x LMS 알고리즘을 이용한 적응 제어 방법을 적용하였다. 제어 과정은 PC에 장착된 dSPACE사의 ds1103 보드를 사용하여 수행되었다. 탐지 마이크로폰은 사용하지 않았으며 기준 신호는 제어 주파수 영역을 발생시키기 위해 사용된 신호를 PC로부터 직접 받아 사용하였다. Filterd-x LMS 알고리즘을 구현하기 위해선 제어 신호와 오차 마이크로폰에서 측정되는 제어음 신호 사이의 관계를 나타내는 상쇄 경로 (Cancellation Path)를 먼저 구해야 한다. 이의 추정은 LMS 방법을 이용하여 off-line 상에서 추정하였다.⁽³⁾

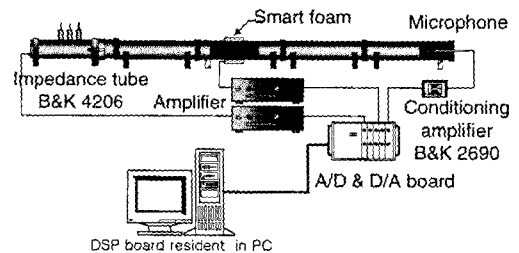


Fig. 4 Experimental setup I

3.2 관 내부의 전반적 음압을 측정할 실험

전반적인 실험 장치는 앞의 실험을 (Fig. 4) 기본으로 하여 오차 마이크로 폰의 위치를 변화시켰고 무향 끝단(Anechoic terminator)을 설치한 형태이다. (Fig.5 참조) 덕트의 전반적인 음압을 측정하기 위해 탐지 마이크로 폰을 무향 끝단의 앞부분을 X 좌표의 기준으로 삼아 덕트의 길이 반대 방향으로 이동하며 측정하였다. 이렇게 되면 기존의 오차 마이크로 폰의 위치와 탐지 마이크로 폰의 위치가 겹치게 되므로 오차마이크로 폰의 위치를 덕트 위에 측정용 구멍으로 옮겨야 한다. 그러나 음압 제어 실험 시 좋은 결과를 얻기 위해선 오차 마이크로 폰의 위치를 주소음의 크기가 가장 큰 위치에 위치시켜야 하므로 고정된 측정용 구멍의 위치로는 좋은 결과를 얻을 수 없을 수도 있다. 따라서 주소음의 크기의 변화를 최소로 해주며 탐지 마이크로 폰의 지지대 역할을 해주는 무향 끝단을 설치하였다.

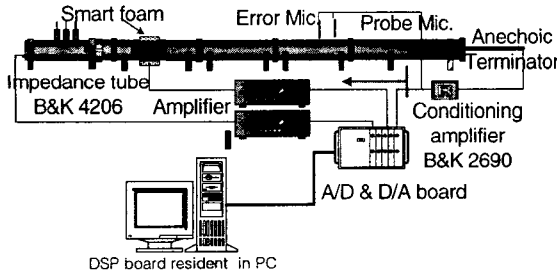


Fig. 5 Experimental setup II

4. 실험 결과 및 분석

4.1 실험 I의 결과

4.1.1 단일 주파수 소음 제어

환형 스마트 폼을 이용한 능동 소음 제어의 경우 수동 소음 제어 보다 저주파와 고주파 영역 모두 약 15~45dB 정도의 소음 감소 효과가 있음을 알 수 있다. (Fig. 6 참조) 이 같은 좋은 결과가 나

온 것은 주소음 신호가 단일 주파수 이므로 적응 필터를 통하여 주소음 신호를 충분히 예측 가능하였기 때문이다. 시스템 모델링 필터 $W(z)$ 에는 300차, 상쇄 경로 필터 $C(z)$ 에는 50차의 FIR 필터가 사용되었으며 시스템 모델링 필터는 식 (1)을 이용하여 갱신 하였다.⁽³⁾

$$W(n+1) = W(n) - u \Delta W(n) \cong W(n) - 2ueF \quad (1)$$

(μ :수렴계수, F :필터된 기준신호, e : 오차신호)

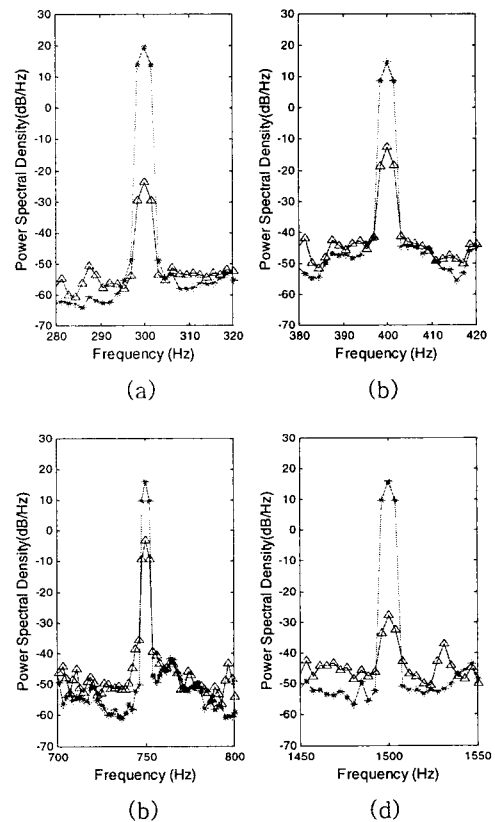


Fig. 6 Tonal control results with ring-type smart foam at (a) 300 Hz, (b) 400 Hz, (c) 750 Hz, (d) 1500 Hz (*: passive control Δ : passive- active control)

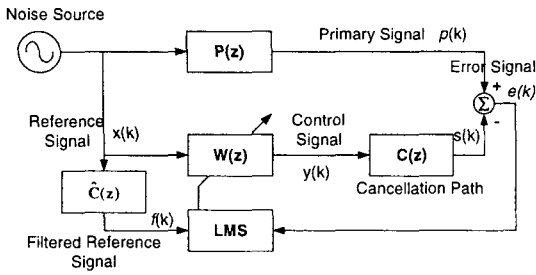


Fig. 7 Block diagram of the filtered-x LMS algorithm

4.1.2 대역 주파수 소음 제어

환형 스마트 폼의 대역 주파수 소음 제어 결과는 Fig. 8과 같다. 관심 주파수 영역을 중심으로 소음감소가 이루어 졌으며 약 10 dB 정도의 소음 감소를 보이고 있다. 관심 주파수 영역이 대역 주파수이기 때문에 이에 대한 예측도 단일 주파수의 경우보다 쉽지 않았다. 그래서 ds1103 보드의 실시간 처리 능력의 한계 치까지 시스템 모델링 필터 $W(z)$ 를 500차, 상쇄 경로 필터 $C(z)$ 는 100차로 FIR 필터의 차수를 늘려 보았으나 단일 주파수의 경우보다 좋지 않은 결과를 보여주고 있다.

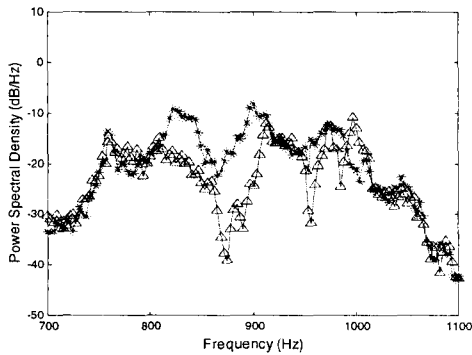


Fig.8 Broadband control results with ring-type smart foam at 800~1000 Hz (*: passive control, Δ : passive-active control)

4.2 실험 II의 결과

4.2.1. SISO (Single Input Single Output)

실험 II에서는 최악의 경우를 다루기 위해 실험 I

에서 가장 좋지 않은 결과가 나왔던 750Hz를 기준 주파수로 다뤘다. 오차 마이크로 폰은 Fig. 5와 같이 무향 끝단의 앞 쪽을 기준으로 $x = 60\text{cm}$ 에 있는 마이크로 폰으로 하였다. Fig. 9에서 보는 것과 같이 약 15dB의 음압 감소가 나타남을 알 수 있다. Fig. 10 는 탐지 마이크로 폰을 이용하여 측정된 위치에 따른 음압의 변화이다. $X=60\text{cm}$ 인 오차 마이크로 폰의 위치만 제외한 영역에서는 오히려 0~5 dB의 음압 상승이 일어나는 것을 관찰 할 수 있다.

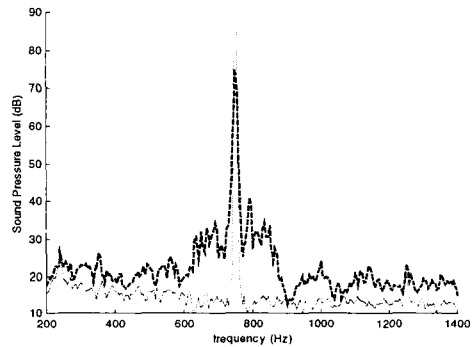


Fig. 9 Sound pressure level at error mic.

(— : passive control, -- : passive-active control)

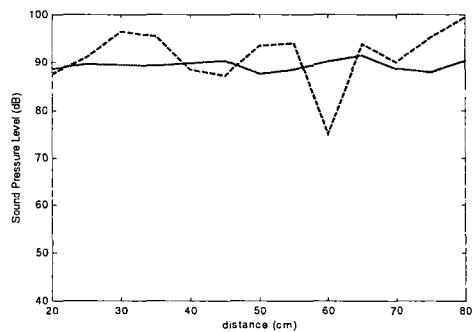


Fig. 10 The spatial distribution of SPL

(— : passive control, -- : passive-active control)

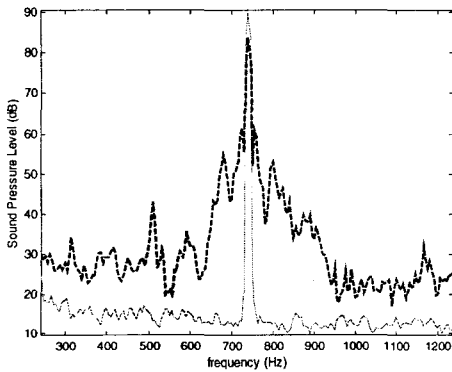
4.2.2. SIMO (Single Input Multi Output)

앞의 실험의 결과와 같이 한 개의 오차 신호만

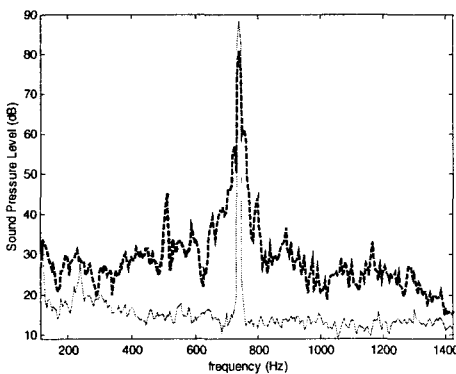
잡았을 경우에는 오차 마이크로 폰의 위치만 제외하고 오히려 음압이 늘어남을 관찰 할 수 있었다. 그래서 오차 마이크로 폰을 $x=60, 65\text{cm}$ 지점의 두개를 설치하여 MIMO 기법⁽⁴⁾을 이용하여 식 (2) 로 시스템 모델링 계수를 갱신 하였다.

$$W(n+1) \cong W(n) - 2u (e_1 F_1 + e_2 F_2) \quad (2)$$

Fig. 11의 결과와 같이 오차 마이크로 폰에서는 각각 약 5~6dB 정도밖에 소음 감소가 일어나지 않지만 Fig. 12에서 보는 대로 한 개의 오차 신호만을 이용했을 경우보다 폭 넓게 음압 감소가 일어남을 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 11 Sound pressure level at error mic. (a: $x= 60\text{cm}$, b: $x= 65\text{cm}$, — : passive control, -- : passive-active control)

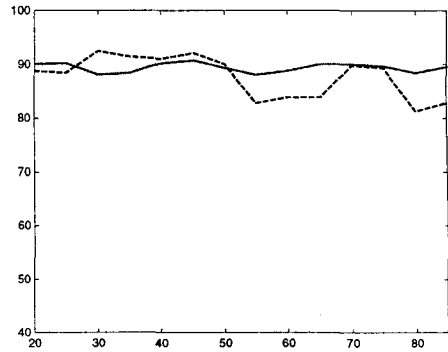


Fig. 12 The spatial distribution of SPL (— : passive control, -- : passive-active control)

4.3 음향 인텐시티

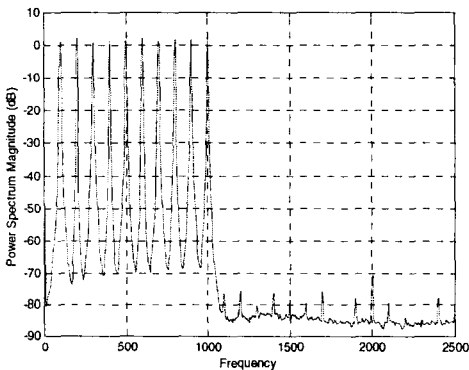
실험 II의 5cm 떨어진 두 개의 오차 마이크로 폰의 신호로부터 식 (3)을 이용하여 단면을 통과하는 에너지 벡터량인 인텐시티를 계산 할 수 있다. 그러면 6~7dB의 음향 인텐시티의 감소를 얻을 수 있다. 그러나 $x=60,65\text{cm}$ 의 오차 신호와 탐지 마이크로 폰을 이용하여 측정된 60, 65cm 의 음압이 무려 3~6dB나 다르게 측정되었다. 이는 탐지 마이크로 폰의 존재로 인한 음장 변화 효과나 완벽하지 못한 무향 환경의 영향도 있겠지만 환경 스마트 폼의 가진 방식에 의한 반경 방향으로의 고차 모드의 발생이 주요 원인이라 여겨진다. 따라서 이 두 오차 신호를 기초로 하여 계산된 덕트 길이 방향으로의 인텐시티는 정확한 값이라 할 수 없으며 반경 방향으로의 고차모드를 처리 하는 게 현재 인텐시티 제어의 중요한 점이다.

SIMO 방법을 이용하여 간접적으로 인텐시티를 제어하는 방법 이외에 식 (4)의 시간 영역에서의 인텐시티를 오차 신호로 삼아 직접 제어하는 방법도 있겠으나 인텐시티를 목적함수로 삼았을 경우 비선형 시스템이 되어 상해경로를 예측할 수가 없어진다. 또 다른 직접적인 인텐시티 제어 방법인 Filtered-x LMP 방법⁽⁵⁾은 환경 스마트 폼의 비효

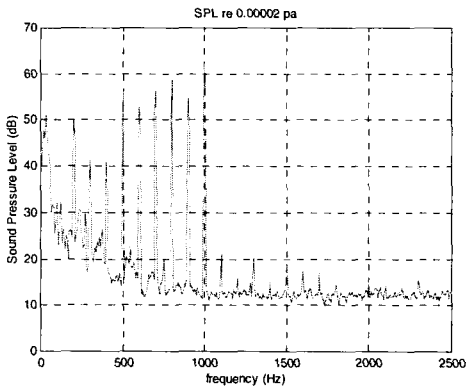
울적인 가진 성능 (Fig. 13 참조)과 반경 방향으로의 고차 모드의 존재 및 주 소음원쪽으로의 음향 변환 현상 때문인지 작동 되지 않았다. 이 밖에 주파수 영역에서의 인텐시티 제어법은 FFT와 IFFT를 연속적으로 거쳐야하는 과정에 의한 많은 연산 시간으로 인해 좋은 결과를 얻을 수 없었다.

$$I(w) = \frac{\text{Im}(P_1 P_2^*)}{2w\rho\Delta r} \quad (\rho: \text{밀도}, \Delta r: \text{마이크로간격}) \quad (3)$$

$$I = -\frac{p_1 + p_2}{2\rho\Delta r} \int (p_1 - p_2) dt \quad (4)$$



(a)



(b)

Fig. 13 excitation performance (a: input signal, b: response of smart foam)

5. 결론

지금까지 덕트 내부의 소음 제어를 위하여 기존

의 탄성 다공 물질을 이용한 수동 소음 제어의 단점을 극복할 수 있는 스마트 폼을 이용한 능동 소음 제어의 가능성에 대하여 살펴 보았다.

플러그 타입 스마트 폼은 덕트 단면을 가로 막는 형상이기 때문에 실제 덕트에 적용이 불가능하였다. 그래서 이를 해결하기 위해 라이닝 모양의 탄성 다공성 폼에 PVDF 액츄에이터를 삽입한 환형 스마트 폼을 제안 하였다. 그리고 단일 주파수 소음과 대역 주파수 소음을 환형 스마트 폼을 이용하여 제어 하였고 오차 마이크로 폰의 개수를 늘려 보다 넓은 영역에서 음압 제어를 수행하였다.

한 단면을 통과하는 에너지 량을 표시하는 인텐시티의 제어는 반경 방향으로의 고차모드의 발생, 음향 변환 현상 및 비효율적인 가진 성능 그리고 비선형 상호 변조 현상등의 원인으로 인해 아직 어려움이 많았다.

이를 극복하기 위해 반경 방향의 고차모드의 제어 및 보다 선형성을 확보하기 위한 스마트 폼의 형상의 변경 등의 노력이 필요하다고 생각된다.

참고 문헌

- (1) Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., and Sanders, J. V., 1984, *Fundamentals of Acoustics*, Wiley, New York.
- (2) 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.
- (3) Nelson, P. A., and Elliott, S. J., 1992, *Active Control of Sound*, Academic, London.
- (4) S.J.Elliott "Filtered reference and filtered error LMS algorithms for adaptive feedforward control" *Mechanical systems and signal processing* (1998) 12(6) 769-781
- (5) S.-W. Kang and Y.-H. Kim "Active intensity control for the reduction of radiated duct noise" *Journal of Sound and Vibration* (1997) 201(5), 595-611