

환형 스마트 폼을 이용한 관 내부의 소음제어

°한 제 헌*, 김 표 재**, 강 연 준***

Noise Control in a Duct Using Ring-type Smart Foam

°Je-Heon Han*, Pyo-Jae Kim**, Yeon-Jun Kang***

ABSTRACT

Conventional smart foam is not applicable to active noise control in a duct having flow. Thus, this paper presents a ring-type smart foam as an alternative. The ring-type smart foam consists of polyurethane acoustic foam of lining shape and PVDF film embedded in the foam. The embedded PVDF element acts as an actuator to reduce noise at lower frequencies and the foam absorbs noise at higher frequencies. A feedforward adaptive filtered-x LMS controller is used to minimize the signal from the error microphone. Experiments are executed to reduce broadband and tonal noise.

1. 서론

요즘의 자동차, 에어컨 등 우리 주위의 많은 기계의 발전 방향은 성능 향상 뿐만 아니라 소음 저감의 측면도 매우 중요시 되고 있다. 여러 기계에 사용되고 있는 덕트 내부의 소음 문제도 이러한 추세에 따라 중요한 문제로 부각되고 있다. 기존의 덕트 내의 소음 저감 방법으로는 흡음재나 공명기의 적용 등을 들 수 있다. 그러나 이러한 방법은 흡음재의 경우 약 500 Hz 이하의 저주파 영역에서는 성능이 크게 제한을 받으며 공명기의 경

우는 제어 가능한 주파수 대역이 제한을 받는 단점이 있다.⁽¹⁾ 이에 따라 새로운 개념의 소음제어 방법인 능동소음제어(Active Noise Control, ANC)에 대한 연구가 요구되었다. 그로 인해 여러 제어 알고리즘이 개발되었고^{(2),(3)} 초고속 Digital Signal Processor (DSP)의 등장으로 이를 실제에 적용할 수 있게 되었다.

본 논문에서는 Fuller에 의해 제안된 smart foam을^{(4),(5)} 실제 유동이 있는 덕트 내에서도 적용이 가능하게 변형한 환형 스마트 폼 (ring-type smart foam) 을 이용하여 덕트 내의 능동소음제어에 적용하여 보았다. 능동 소음 제어를 위해 Filterd-x LMS 방법을 적용 하였으며 환형 스마트 폼을 투과한 소음의 음압을 내부 임의의 위치

* 서울대학교 대학원 기계항공공학부

** 서울대학교 대학원 기계항공공학부

*** 정희원, 서울대학교 기계항공공학부 부교수

에서 감소시켜 보았다. 단일 주파수 평면과 소음과 대역의 평면과 소음을 대상으로 하여 환형 스마트 폼의 덕트 내부 소음 제어 성능을 살펴 보았다.

2. 환형 스마트 폼의 구조

탄성 다공성 물질을 이용한 수동 소음 제어는 저주파 영역에 있어서 성능이 떨어지는 단점을 가지고 있다. 이를 극복하기 위해서 능동 소음 제어 방법이 고려되었다. 능동 소음 제어를 위해서 제어 음원이 필요하며 대개 스피커를 이용한다. 그러나 덕트 내에 스피커를 설치하기 위해서는 덕트 내의 모양을 변경하거나 덕트의 일부분을 스피커를 장착하기 위한 공간으로 확보 해야 하는 제약이 따른다.

그래서 Fuller가 제안한 스마트 폼을 이용하여 이러한 제약을 극복하고자 하였다. 그러나 Fuller가 제작한 모양의 스마트 폼(Fig 1)은 덕트의 단면을 가로 막는 형상이기 때문에 실제 유동이 있는 덕트 내에서 이용할 수 없다. 이러한 점을 극복하기 위해 본 논문에서는 라이닝 모양의 탄성 다공성 폼에 PVDF 액츄에이터를 삽입한 환형 모양의 스마트 폼을 제작하여 실제 유동이 있는 덕트 내에서도 이용할 수 있게 하였다.(Fig 2)

환형 스마트 폼으로 인한 덕트 내의 단면 변화와 이로 인한 음장의 변화를 작게 하기 위하여 환형 스마트 폼을 덕트의 외경과 같게 내부 직경 10 cm, 폭 4 cm로 제작하여 홀더에 장착 하였다.(Fig 3) PVDF 액츄에이터의 형상은 PVDF 필름의 윗면과 아래면을 서로 다른 극으로 연결한 형태로 제작하였다.

3. 실험 장치 구성 및 과정

전체적인 실험 장치 구성은 Fig4와 같다. 실험

에 쓰인 덕트는 B&K Type 4206 임피던스 측정 튜브에 동일한 직경을 갖는 여러 튜브를 서로 연결하여 길이를 연장시켰다. 그리고 각각의 연결

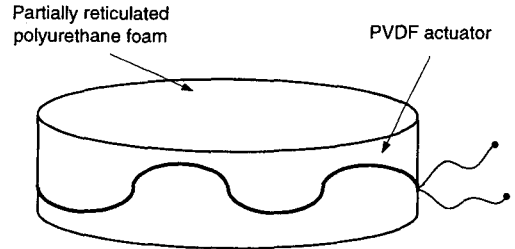


Fig. 1 The smart foam proposed by Fuller

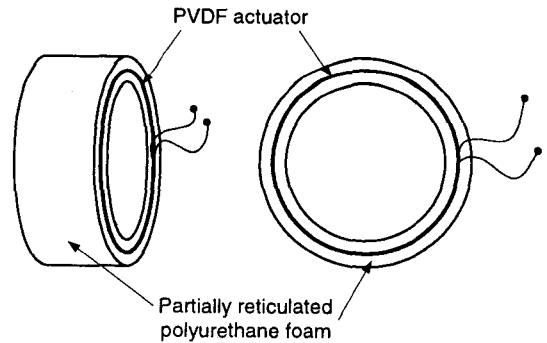


Fig. 2 The ring-type smart foam

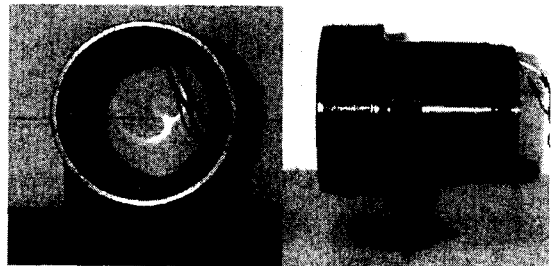


Fig. 3 A holder of ring-type smart foam

부의 음의 누수를 줄이기 위해 플라스틱 너트를 사용하여 결합하였다.

환형 스마트 폼이 장착된 부분엔 관내부의 직경을 동일하게 유지 하여 음장의 변화를 최소로 하기 위해 따로 홀더를 제작하여 장착하였다. (Fig 3 참조) 덕트의 첫번째 고차모드에 대한 차단 주파수(cut-off frequency)는 약 1620 Hz이고 음향학적으로 단단하다고 가정하였다. 덕트의 한쪽 단은 주소음원이 되는 스피커가 달려 있어 막혀(closed) 있고, 다른 쪽 단은 열린(Open) 형태이다. 주소음 발생용 스피커와 제어 음원 사이의 거리를 1m 10cm, 오차 마이크로폰과 제어 음원 사이의 거리를 2m 10 cm로 하였다.

덕트 내부의 소음 제어 실험은 먼저 단일 주파수 소음 제어를 통하여 소음 제어 가능성을 확인한 뒤 실제 소음과 유사한 대역 주파수 소음 제어의 순서로 실시 되었다. 실험에서의 제어 효과의 결과는 제어하기 전의 오차 마이크로폰의 파워 스펙트럼과 제어한 후의 오차 마이크로 폼의 파워 스펙트럼을 비교하였다. 스마트 폼을 장착하기 전의 오차 마이크로폰에서의 주소음의 파워 스펙트럼과 스마트 폼을 장착하나 제어하지 않는 상태의 주소음의 파워 스펙트럼을 비교하면 스마트 폼의 탄성 다공성 물질에 의한 수동 소음 제어 효과를 비교할 수 있겠으나 그런 경우 단면의 변화가 생긴다. 물론 스마트 폼 홀더 길이 만큼의 덕트를 장착하여 전체 길이를 똑같이 맞추면 스마트 폼의 수동 소음 제어 효과를 알아 낼 수 있지만 실험 장치상의 제약으로 본 논문에서는 제어 전후의 효과만 비교하였다.

덕트 내부의 소음 제어를 위해 Filtered-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. Filtered-x LMS 알고리즘을

구현하기 위해서는 제어 신호와 오차 마이크로폰에서 측정되는 제어음 신호 사이의 관계 규명이 선행되어야 한다. 이를 상쇄 경로 (Cancellation Path) 라고 하며 이의 추정엔 LMS 방법을 이용하여 off-line상에서 추정하였다.⁽³⁾

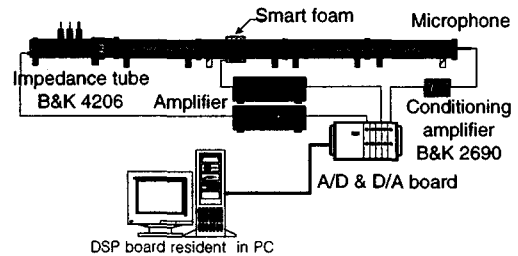


Fig. 4 Experimental setup

4. 덕트 내부의 소음제어

4.1 단일 주파수 소음제어

환형 스마트 폼을 이용한 능동 소음 제어의 경우 수동 소음 제어 보다 저주파와 고주파 영역 모두 약 20~50dB 정도의 소음 감소 효과가 있음을 알 수 있다. (Fig. 5 참조) 이 같은 좋은 결과가 나온 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 사용되었다.

수렴상수는 수렴속도와 안정도를 고려하여 조정하였으며, 일반적으로 수렴계수가 크면 수렴속도가 빨랐으나, 너무 큰 값 ($0.1 < \mu < 1$) 은 시스템의 불안정을 유발하기도 하였다.

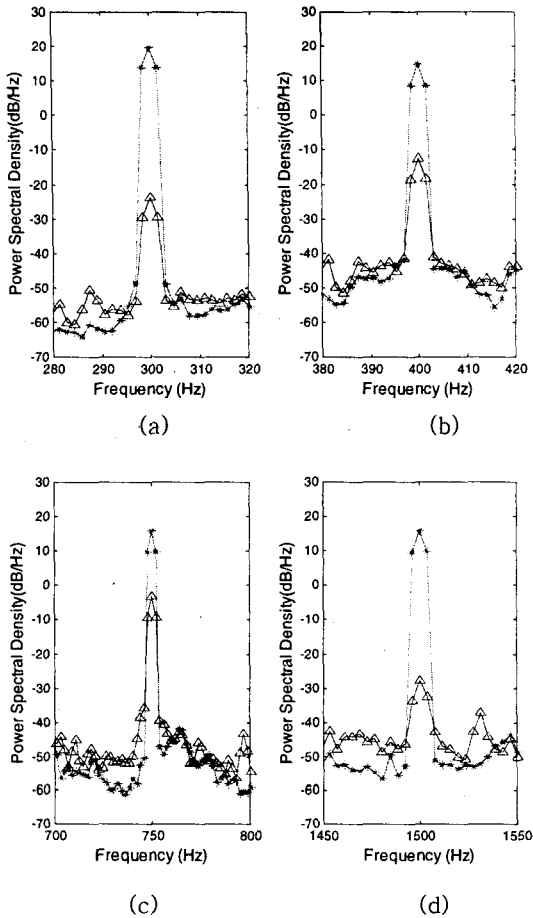


Fig. 5 Tonal control results with ring-type smart foam at (a) 300 Hz, (b) 400 Hz, (c) 750 Hz, (d) 1500 Hz (*: passive control, Δ: passive-active control)

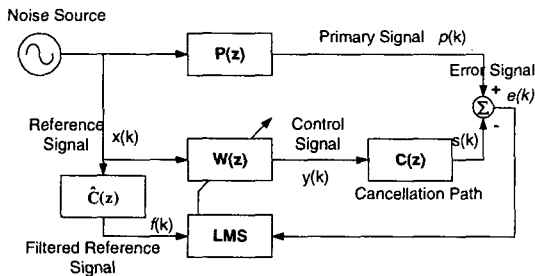


Fig. 6 Block diagram of the filtered-x LMS algorithm

4.2 대역 주파수 소음 제어

환형 스마트 폼의 대역 주파수 소음 제어 성능 검증에는 중심 주파수가 500 Hz이고 밴드폭이 100 Hz인 대역 소음과 중심 주파수가 900 Hz이고 밴드폭이 200 Hz인 대역 소음이 이용되었다. 이에 대한 소음 제어 결과는 Fig. 7, 8과 같다. 관심 주파수 영역을 중심으로 소음감소가 이루어졌으며 약 10 ~ 20 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. 국부적인 영역에서는 수동 소음 제어의 경우보다 약간의 음압 상승이 있음을 볼 수 있었다. 그러나 음압의 상승이 주소음의 음압에 비교하여 작았으며 상승 폭이 전체적인 소음 감소 폭보다 작았다.

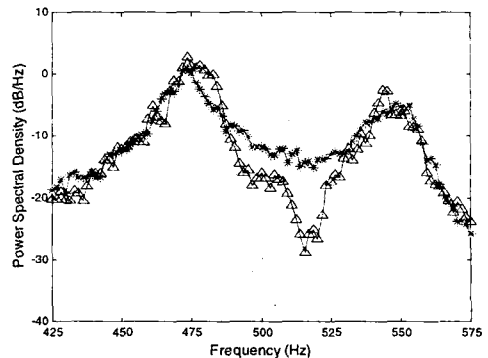


Fig. 7 Broadband control results with ring-type smart foam at 450~550 Hz (*: passive control, Δ: passive-active control)

참고 문헌

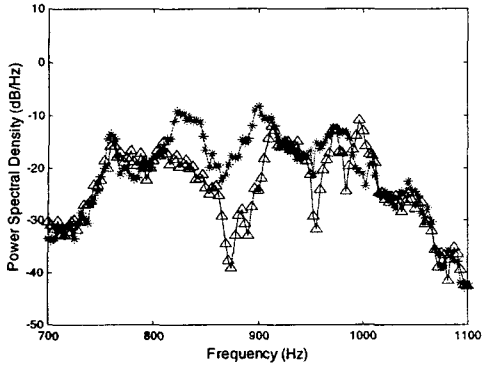


Fig.8 Broadband control results with ring-type smart foam at 800~1000 Hz
(*: passive control, Δ : passive-active control)

5. 결론

지금까지 덕트 내부의 소음 제어를 위하여 기존의 탄성 다공 물질을 이용한 수동 소음 제어의 단점을 극복할 수 있는 스마트 폼을 이용한 능동 소음 제어의 가능성에 대하여 살펴 보았다. Fuller가 제안한 모양의 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 하였다. 단일 주파수의 경우 기존 수동 소음 제어의 경우 보다 평균적으로 45 dB이상의 성능 향상을 보이고 있으며 대역 주파수의 경우도 약 10 dB이상의 성능 향상을 보이고 있다. 따라서 환형 스마트 폼은 덕트 내부의 소음 감소를 위하여 기존의 탄성 다공 물질의 단점을 보완할 수 있는 대안이 될 수 있다고 생각된다.

- (1) Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., and Sanders, J. V., 1984, *Fundamentals of Acoustics*, Wiley, New York.
- (2) Nelson, P. A., and Elliott, S. J., 1992, *Active Control of Sound*, Academic, London.
- (3) Hansen, C. H., and Snyder, S. D., 1997, *Active Control of Noise and Vibration*, E & FN Spon, London.
- (4) 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.
- (5) Guigou, C., and Fuller, C. R., 1998, "Adaptive feedforward and feedback method for active/passive sound radiation control using smart foam," *Journal of the Acoustical Society of America* **104** (1), pp. 226-231.