

원형 덕트 내에서 스마트 폼을 이용한 능동 소음 제어

한 제 현*, 김 표 재**, 강 연 준***

Active Noise Control in a Circular Duct Using Smart Foam

Je-Heon Han* , Pyo-Jae Kim** and Yeon June Kang***

Key Words : Active Noise Control (능동 소음 제어), Smart Foam (스마트 폼), Filtered-x LMS Algorithm(최소 자승 오차법)

Abstract

In this paper, it is discussed that active noise control in a circular duct using smart foam. Firstly, it is demonstrated that the potential of the conventional smart foam, proposed by Fuller, for active noise control in a duct. 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 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

1936년 독일의 Paul Lueg 의하여 최초로 제안된 능동 소음 제어 (Active Noise Control: ANC)는 Digital Signal Processor (DSP) 와 새로운 알고리즘의 발전에 힘입어 많은 연구가 이뤄지고 있다. 수동 소음 제어는 흡음재를 이용하는 경우 저주파 영역에서는 우수한 성능을 보이지만 고주파 영역에서는 거의 제어 되지 않는 단점이 있다.⁽¹⁾

본 논문에서는 수동 소음 제어의 단점을 극복하기 위해 능동 소음 제어를 결합 시킨 형태의 스마트 폼을 이용한 능동/수동 소음제어에 대해 논의한다.^{(2),(3)} 먼저 Fuller 가 제안한 형태의 스마트 폼을 제작하여 덕트 내부의 소음제어 가능성을 타진해 본 뒤 기존의 스마트 폼을 변형한 환형 스마트 폼 (ring-type smart foam) 을 제안하여 원형 덕트 내의 소음제어에 적용하였다.

2. 스마트 폼의 구조

2.1 Fuller가 제안한 스마트 폼

Fuller 가 제안한 스마트 폼은 Fig.1 과 같다. 단면의 지름 10 cm, 폭 4 cm 인 탄성 다공성 폴리우레탄 폼에 연속적인 반원 모양의 가공을 하여 그 사이에 PVDF 필름을 장착하였다. 액츄에이터 구동 시 가해지는 높은 전압에 견딜 수 있도록 균일하게 은(Ag)이 입혀진 두께 28 μm 의 PVDF 필름을 사용하였다.

PVDF 필름의 위 아래면에 입혀진 은을 벗겨내어 전기적으로 절연을 시키면 4 개의 서로 다른 독립적인 구조를 갖게 된다. (Fig. 2 참조) 여기에 이웃 하는 셀(cell)과 반대 방향으로 전압을 가해 주면 쌍극자 형태의 음원 방사 특성을 피하게 되어 음의 상쇄 없이 효율적인 음의 방사가 가능해진다.

2.2 환형 스마트 폼

Fuller 의 스마트 폼은 덕트에 장착 시 단면을

* 서울대학교 기계항공 공학부

** 서울대학교 기계항공 공학부

*** 서울대학교 기계항공 공학부 부교수

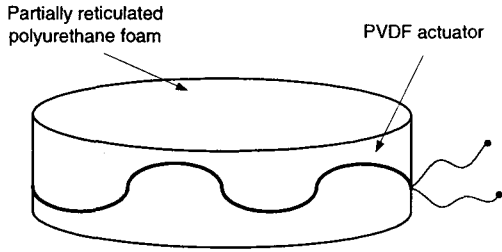


Fig. 1 The smart foam proposed by Fuller

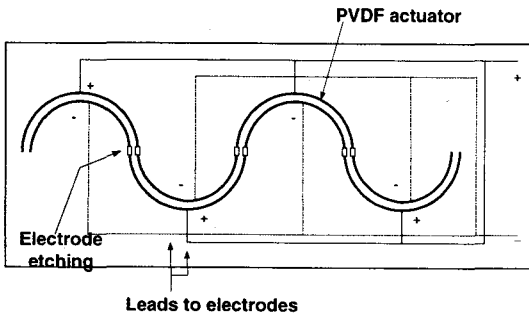


Fig. 2 PVDF actuator configuration

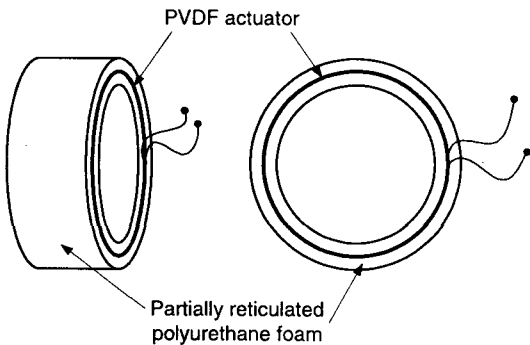


Fig. 3 The ring-type smart foam

가로 막고 있는 형상이기 때문에 실제 유동이 있는 덕트 내부의 소음 제어에는 적용이 불가능하다. 따라서 이 점을 해결하기 위해 라이닝.모양의 탄성 다공성 물질에 PVDF 필름을 삽입한 환형 스마트 폼을 제안하였다. (Fig. 3 참조)

PVDF 필름의 윗면과 아래면에 반대 극을 연결한 형태로 액츄에이터를 구성하였다.

환형 스마트 폼으로 인한 덕트 내의 음장 변화를 최소화 하기 위해 환형 스마트 폼의 내경이 덕트의 내경과 같게 되도록 따로 홀더를 제작하여 장착하였다. (Fig. 4 참조)

PVDF 필름과 전선은 전도성을 가지는 구리 태잎을 사용하여 연결 하였으며 전압의 효율적인 전

달을 위하여 전도성 잉크를 발라주었다. 발생된 음이 탄성 다공 물질에 흡수되어 감소되는 것을 방지하고 탄성 다공 물질의 고체상과 PVDF 필름의 커플링이 잘 이루어지도록 하기 위하여 접착제를 이용하여 고정시켰다.

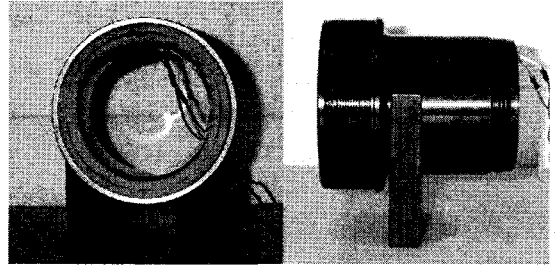


Fig. 4 A holder of ring-type smart foam

3. 실험장치 구성 및 제어 과정

전체적인 실험 장치는 B&K Type 4206 임피던스 튜브와 그것을 연장시킨 튜브, 그리고 스마트 폼과 기타 신호처리장치로 구성되어 있다. (Fig. 5 참조)

환형 스마트 폼을 이용한 소음 제어의 경우에는 관 내경을 동일하게 유지하여 음장의 변화를 최소로 하기 위해 따로 홀더를 제작하여 장착 하였다

덕트의 한쪽 단은 주소음원이 되는 스피커가 달려있는 막힌 상태(closed)이고 다른 쪽은 열린 상태(open) 이다. 덕트의 첫번째 고차 모드에 대한 차단 주파수(cut-off frequency) 는 약 1620Hz 이고 음향학적으로 단단하다고 가정하였다. 따라서 실험은 1600Hz 이하에서 평면파라 가정하고 수행되었다.

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.

덕트 내부의 소음 제어를 위해 Filtered-x LMS 알고리즘을 이용한 적응 제어 방법을 적용하였다. (Fig. 6 참조) 제어 과정은 PC 에 장착된 dSPACE사의 ds1103 보드를 사용하여 수행되었다. 탐지 마이크론은 사용하지 않았으며 기준 신호는 제어 주파수 영역을 발생시키기 위해 사용된 신호를 PC 로부터 직접 받아 사용하였다. Filtered-x LMS 알고리즘을 적용하기 위해서는 제어신호와 오차 마이크론에서 측정되는 신호 사이의 관계인 상

쇄경로를 추정해야 하는데 이는 LMS 방법을 이용하여 off-line 상태에서 추정하였다.⁽⁴⁾

실험을 통해 제어 효과의 결과를 Fuller 가 제안한 스마트 폼을 장착하지 않은 상태에서 오차 마이크로폰에 측정된 음압의 파워 스펙트럼을 측정하여 이를 기준으로, 스마트 폼을 장착하고 제어를 하였을 때와 제어를 하지 않았을 경우의 오차 마이크로폰의 음압 파워 스펙트럼의 변화를 측정하여 비교하였다.

환형 스마트 폼의 경우에는 제어하기 전의 오차 마이크로폰의 파워 스펙트럼과 제어한 후의 오차 마이크로폰의 파워 스펙트럼 만을 비교하였다. 왜냐하면 환형 스마트 폼의 경우 장착하지 않으면 단면의 변화가 생겨 음장의 영향을 주기 때문이다. 물론 환형 스마트 폼 용 홀더 길이 만큼의 추가로 덕트를 장착하여 전체 길이를 똑같이 맞추면 환형 스마트 폼의 수동 소음 제어 효과를 알아 낼 수 있지만 실험 장치상의 제약으로 환형 스마트 폼의 경우에는 제어 전후의 효과만을 비교하였다.

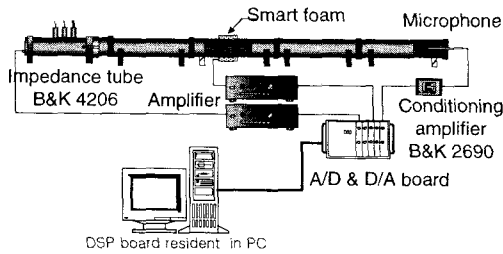


Fig. 5 Experimental setup

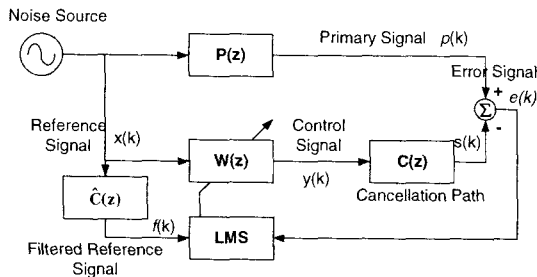


Fig. 6 Block diagram of the filtered-x LMS algorithm

4. 덕트 내부의 소음 제어

4.1 단일 주파수 소음제어

4.1.1 Fuller 가 제안한 스마트 폼

스마트 폼의 소음 감소 성능을 검증해 보기 위

하여 Fuller 가 제시한 것과 똑같이 제작하여 저주파와 고주파 각각의 경우에 대하여 실험을 하였다. 저주파 영역은 300 Hz 와 400 Hz 에서, 고주파 영역은 750 Hz 와 1500 Hz 에서 각각 실험 하였다. 소음 제어 결과는 Fig. 7 과 같다. 단순히 탄성 다공 폼을 이용한 수동 소음 제어의 경우 저주파에서는 그 효과가 거의 없었으며, 고주파 영역의 경우 약 5 dB 정도의 소음 감소를 보이고 있다. 그러나 스마트 폼을 이용한 능동 소음 제어의 경우에는 약 10~ 40 dB 정도의 소음 감소를 보이고 있다. 이를 통하여 스마트 폼을 이용하여 단일 주파수의 소음 제어가 가능함을 확인 할 수 있었다.

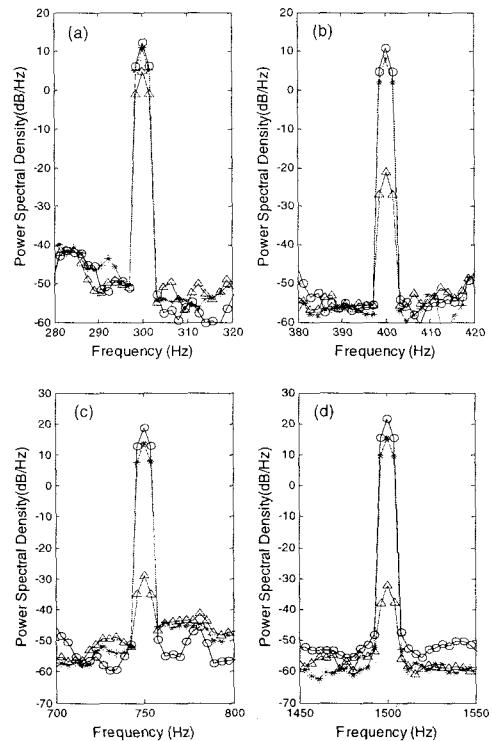


Fig. 7 Tonal control results with Fuller's smart foam at (a) 300 Hz, (b) 400 Hz, (c) 750 Hz, (d) 1500 Hz (o: no control *: passive control △: passive-active control)

4.1.2 환형 스마트 폼

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. 8 참조) 환형 스마트 폼의 저주파 영역에서 가진 효율이 Fuller 의 스마트 폼 보다 좋았기 때문에 저주파 영역에서 좀더 나은

소음 감소 효과를 얻을 수 있었다. 이 같은 좋은 결과가 나온 것은 주소음 신호가 단일 주파수 이므로 적응 필터를 통하여 주소음 신호를 충분히 예측 가능 하였기 때문이다. 시스템 모델링 필터에는 300 차, 상쇄 경로 필터에는 50 차의 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.

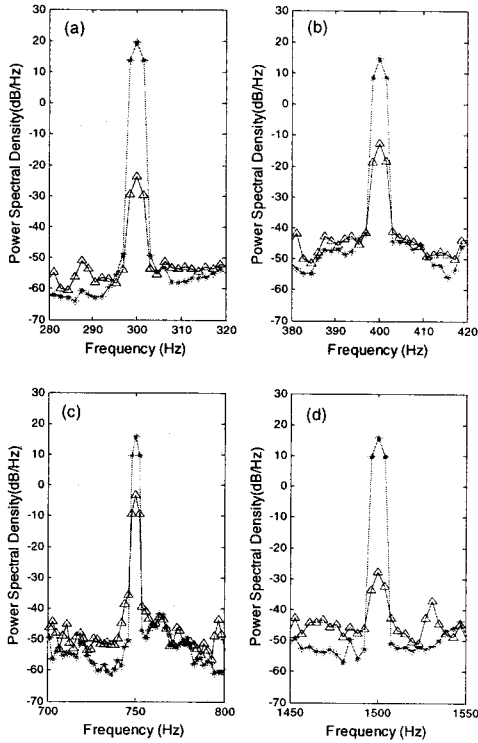


Fig. 8 Tonal control results with ring-type smart foam at (a) 300 Hz, (b) 400 Hz, (c) 750 Hz, (d) 1500 Hz (*: passive control, Δ: passive-active control)

4.2 대역주파수 소음 제어

4.2.1 Fuller가 제안한 스마트 폼

대역 주파수 소음 제어 성능 검증에는 550~650Hz 인 대역소음과 800~1000 Hz 인 대역소음을 이용하였다. 이에 대한 소음 제어 결과는 Fig. 9 와 같다. 실험 결과를 살펴보면 관심 주파수 영역을 중심으로 소음감소가 이루어 졌으며 약 10 dB 에서 50 dB 정도의 감소를 보임을 알 수 있다.

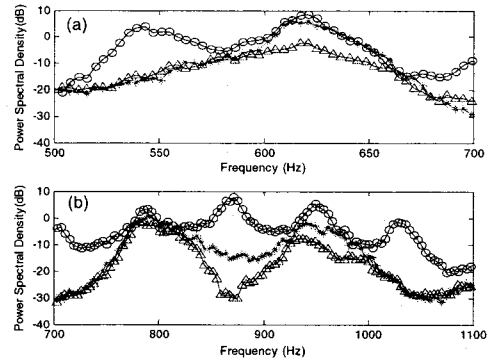


Fig. 9 Broadband control results with Fuller's smart foam at (a) 550~650 Hz, (b) 800~1000Hz (o: no control, *: passive control, Δ: passive-active control)

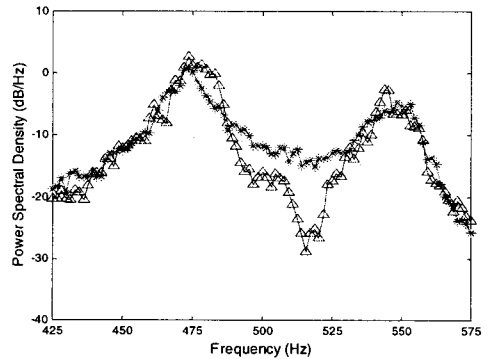


Fig. 10 Broadband control results with ring-type smart foam at 450~550 Hz (*: passive control, Δ: passive-active control)

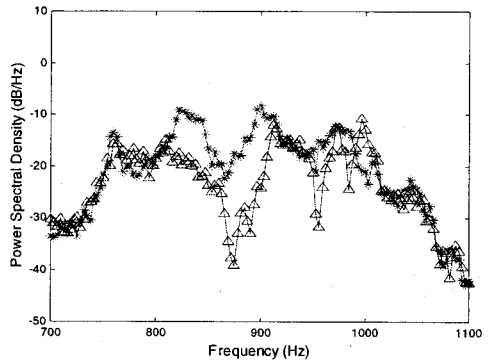


Fig. 11 Broadband control results with ring-type smart foam at 800~1000 Hz (*: passive control, Δ: passive-active control)

4.2.2 환형 스마트 폼

환형 스마트 폼의 대역 주파수 소음 제어 성능 검증에는 450~550Hz 인 대역소음과 800~1000 Hz

인 대역 소음이 이용되었다. 이에 대한 소음 제어 결과는 Fig. 10,11 과 같다. 관심 주파수 영역을 중심으로 소음감소가 이루어 졌으며 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 500 차, 상쇄 경로 필터 $C(z)$ 는 100 차로 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. 이는 시스템 추정이 완벽하게 이뤄 지지 않았기 때문이라 생각되는데 대역주파수 소음제어에서 보다 성능 향상을 위해서는 필터의 차수를 조정하거나 on-line 상으로 상황에 맞게 상쇄경로를 실시간으로 갱신할 수 있는 방법에 대한 고려가 필요하다.⁽⁵⁾

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. 먼저 Fuller 가 제안한 스마트 폼을 덕트에 장착하여 스마트 폼의 덕트 내부 소음제어의 가능성을 확인하였다. 그러나 Fuller 가 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 dB 이상의 성능 향상을 보이고 있으며 대역 주파수의 경우도 약 10 dB 이상의 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.

참고문헌

(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) 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.

(4) Guigou, C., and Fuller, C. R., 1998, "Adaptive feed forward and feedback method for active/passive sound radiation control using smart foam," *Journal of the Acoustical Society of America* 104 (1), pp. 226-231.

(5) Eriksson, L. J., and Allie, M. C., 1989, "The use random noise for on-line transducer modeling in an adaptive active attenuation system," *Journal of the Acoustical Society of America* 85, pp. 797-802.