

〈논 문〉

# 스마트 폼을 이용한 덕트 내부의 능동 소음 제어

## Active Noise Control in a Duct Using Smart Foam

김표재\* · 강연준\*\* · 조영만\*\*\*

Pyo Jae Kim, Yeon June Kang and Young Man Cho

(2000년 11월 22일 접수 ; 2001년 5월 11일 심사완료)

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

### ABSTRACT

In this paper is presented passive-active noise control in a duct using a ring-type smart foam. The ring-type smart foam is comprised of a PVDF film embedded in elastic noise control foam of lining shape. The embedded PVDF element acts as an actuator to reduce noise at lower frequencies and the foam absorbs noise at higher frequencies. By implementing an adaptive filtered-x LMS algorithm, experiments are performed to reduce both tonal and broadband noise in a duct with one end closed and the other end open.

### 1. 서 론

각종 기계장치에 부착되어 사용되고 있는 덕트 내부의 소음 문제는 소음에 대한 중요성이 증가 되면서 중요한 문제로 부각되고 있다. 지금까지 덕트 내부의 소음 제어에는 흡음재를 적용하거나 공명기와 같은 장치를 부착하여 해결하여 왔다. 그러나 이러한 방법들은 전자의 경우 감소가 되는 주파수 대역폭은 넓으나 저주파 영역에서 감소의 정도가 낮으며 후자의 경우 제어 가능한 주파수 영역이 제한되는 단점을 가지고 있다.<sup>(1)</sup> 이에 따라 새로운 개념의 소음 제어 방법이 요구되었고, 능동 소음 제어(ANC: Active Noise Control)가 연구되었다. 능동 소음 제어의 기본 원리는 1936년 독일의 Paul Lueg의하여 제안되었으며, 이는 소음에 대하여 크기가 같고 위상차가 180 °가 되는 제어음을 발생시킴으로써 소음을 감소시키는 것을 기본으로 하고 있다. 이를 바탕으로 많은 연구가 진행 되어 왔으며 여러 제어 알고리즘이 제시되었다.<sup>(2,3)</sup> 또한 디지털 신호처리 칩의 등장과 여러 신호처리 기술의 등장으로 이를 실제에 적

용할 수 있게 되었다.

Fuller는 탄성 다공 물질에 PVDF 필름을 삽입하여 제어 음원 역할을 하게 함으로써 탄성 다공 물질의 제한적인 소음 감소 기능을 보완할 수 있도록 한 스마트 폼(smart foam)을 제안하였으며 이를 이용하여 외부로 방사되는 소음을 감소시킬 수 있음을 보여 주었다.<sup>(4,5)</sup>

본 논문에서는 덕트 내부의 소음제어를 위하여 새로운 형상의 스마트 폼을 제안하였다. Fuller에 의해 제안된 스마트 폼과 동일한 형태의 플러그형 스마트 폼(plug-type smart foam)을 덕트 내부에 적용하여 스마트 폼의 소음 제어 가능성을 확인하였다. 그리고 실제 덕트 환경에 적용할 수 있는 환형 스마트 폼(ring-type smart foam)을 제안하여 이를 덕트 내부 소음 제어에 적용하였다. Filterd-x LMS 제어 알고리즘을 구현하여, 단일 및 대역 주파수의 평면파 소음을 덕트 내부의 임의의 위치에서 감소시켰다.

### 2. 스마트 폼의 구조

일반적으로 폼과 같은 탄성 다공 물질은 입사 된 음파의 에너지를 프레임 을 이루고 있는 고체상과 다공 속에 들어 있는 유체(공기)상의 커플링과 관련된 마찰을 통해 소산 시킴으로써 소음을 감소 시킨다.<sup>(6)</sup> 탄성 다공 물질을 이용한 수동 소음 제어는 소음 감소 주파수 대역폭이 넓고 비

\* 서울대학교 대학원 기계항공공학부

\*\* 정회원, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : yeonjune@snu.ac.kr

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

\*\*\* 서울대학교 기계항공공학부

교적 저렴한 비용으로 원하는 결과를 달성할 수 있어 많이 사용되고 있다. 그러나 수동 소음 제어 방법은 저주파 영역에서의 효과가 떨어지는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 능동 소음 제어 방법이 고려되었다. 능동 소음 제어를 위해서는 제어 음원이 필요하며 보통의 경우에는 스피커가 많이 사용되고 있다. 그러나 스피커의 부착을 위해서는 덕트의 모양을 변경하거나 덕트의 일부분을 스피커를 장착하기 위한 공간으로 확보 해야 하는 제약이 생기게 된다. Fuller는 이러한 문제를 해결하기 위하여 기존의 탄성 다공성 폼에 PVDF 필름을 삽입하여 제어음을 발생시킬 수 있는 스마트 폼을 제안하였다. 삽입된 PVDF 필름은 제어음을 발생시키기 위한 액추에이터 역할을 하게 되며 탄성 다공 물질의 유체상과 고체상에 변형을 가하여 음을 발생시킨다. 따라서 스마트 폼은 기존의 탄성 다공 물질이 갖고 있는 수동 소음 제어의 장점과 능동 소음 제어의 장점 모두를 가지게 된다.

스마트 폼의 덕트 내부 소음 제어 가능성을 검증하기 위해서 Fuller에 의해 제안된 형태의 스마트 폼을 제작하였다. 그러나 Fuller에 의해 제안된 스마트 폼은 덕트의 단면을 가로 막는 형태이므로 실제 유동이 존재하는 덕트의 소음 제어에는 적용이 불가능한 단점을 가지고 있다. 이를 해결하기 위하여 본 논문에서는 라이닝 모양의 탄성 다공성 폼에 PVDF 액추에이터를 삽입한 환형(ring-type) 모양의 스마트 폼을 제안하였다. 앞의 Fuller가 제작한 것과 동일하게 제작된 스마트 폼은 플러그형(plug-type) 스마트 폼이라 하였다.

2.1 플러그형 스마트 폼

Fig. 1은 플러그형 스마트 폼이다. 단면의 지름이 10 cm 이고 폭이 4 cm인 탄성 다공 폴리우레탄 폼에 연속적인 반원 모양의 가공을 하여 그 사이에 PVDF 필름을 장착하였다. 폼의 고체상과 PVDF 필름의 커플링을 보다 크게 하기 위해 반원 모양의 크기는 폼의 두께가 허용할 수 있는 범위 내에서 큰 값으로 정하였고 반지름이 약 1.3 cm 가 되도록 하였다. 액추에이터 구동 시 가해지는 높은 전압에 견딜 수 있도록 균일하게 은(Ag)이 입혀진 두께 28  $\mu$ m의 PVDF 필름을 사용하였다.

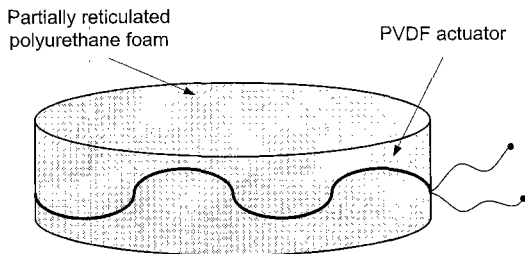


Fig. 1 Plug-type smart foam

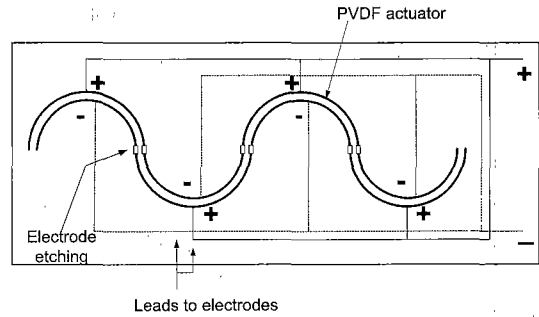


Fig. 2 PVDF actuator configuration

탄성 다공 물질 사이에 삽입된 PVDF 액추에이터의 형상은 Fig. 2와 같은 모양을 적용하였다. 필름의 위 아래면에 입혀진 은을 벗겨내어 전기적으로 절연을 시키면 4개의 서로 다른 독립적인 구조를 갖게 된다. 여기에 이웃 하는 셀(cell)과 반대 방향으로 전압을 가해 주면 쌍극자 형태의 음원 방사 특성을 피하게 되어 음의 상쇄 없이 효율적인 음의 방사가 가능하다. 또한 탄성 다공 물질에 반원 모양의 형태로 장착되어 스피커와 같은 형태의 음의 방사가 가능케 된다.

PVDF 필름과 전선은 전도성을 가지는 구리 테잎을 사용하여 연결 하였으며 전압의 효율적인 전달을 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 단단히 고정시켰다.

2.2 환형 스마트 폼

Fig. 3는 환형 스마트 폼이다. 앞서 제안된 플러그형은 덕트의 단면을 가로 막는 형태로 장착 된다. 따라서 유체의 흐름이 있는 덕트 내부의 적용에는 불가능한 단점이 있다. 일반적으로 덕트 내부에는 흡차음재를 라이닝(lining) 형태로 적용하므로, 라이닝 모양의 폴리우레탄 폼에 PVDF 필름을 삽입한 형태의 환형 스마트 폼을 제안하였

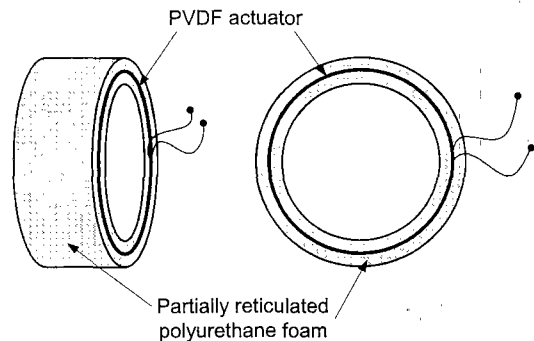


Fig. 3 Ring-type smart foam

다. 스마트 폼으로 인한 단면 변화와 이로 인한 음장의 변화를 작게 하기 위하여 환형 스마트 폼은 내부 직경이 10 cm가 되도록 제작하였으며 폭은 4 cm로 플러그 타입과 동일하게 제작하였다. PVDF 액추에이터의 형상은 두께가 얇기 때문에 플러그 형과 같은 형상을 적용할 수 없다. 따라서 환형 스마트 폼에는 PVDF 필름의 윗면과 아래면을 서로 다른 극으로 연결한 형태의 액추에이터 형상이 적용되었다. 이러한 형상은 단극자 형태의 음의 방사가 가능하게 해준다.

### 3. 실험장치 구성 및 내용

전체적인 실험 장치 구성은 Fig. 4와 같다. 앞서 기술한 형태로 만들어진 두 가지 모양의 스마트 폼을 덕트 내부에 위치시켜 소음 제어를 해보았다. 실험에 사용된 덕트는 B&K 임피던스 측정 튜브(type 4206)를 기본으로 하여 동일한 직경을 가진 여러 개의 튜브를 조합하여 길이를 연장한 직경 10 cm인 원형 덕트이다. 길이의 연장을 위해 사용된 튜브는 매끄럽게 표면이 처리 되어 표면 거칠기로 인한 음장의 변화를 최소화 하였다. 튜브 사이의 연결은 플라스틱 너트를 사용하여 결합함으로써 연결부에서의 음압 누수를 최소화 하였다. 환형 스마트 폼을 이용한 소음 제어 시에는 스마트 폼을 덕트 내부에 장착하기 위하여 특별히 제작된 샘플 홀더를 이용하였으며 샘플 홀더의 내경이 10 cm가 되게 하여 단면 변화로 인한 영향을 최소화 하였다. 샘플 홀더로 인한 길이 변화는 튜브를 적절히 조합하여 덕트의 전체적인 길이가 동일하도록 조절하였다. 덕트의 한쪽 단은 주소음원이 되는 스피커가 달려 있어 막혀(closed) 있고, 다른 쪽 단은 열린(open) 형태이다. 주소음을 발생시키기 위한 스피커는 선형성을 유지하는 범위에서 작동시켰으며 이에 필요한 신호는 PC에서 발생시켰다. 주소음 발생용 스피커로부터 110 cm 떨어진 위치에 제어 음원(스마트 폼)을 장착하였고, 210 cm 떨어진 곳에 오차 마이크로폰을 위치시켰다.

덕트 내부의 소음 제어 실험은 우선 단일 주파수 소음

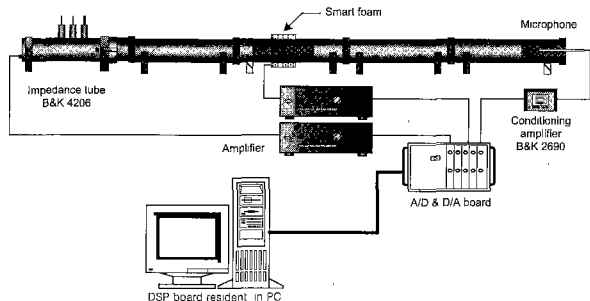


Fig. 4 Experimental setup

제어를 통하여 소음 제어 가능성을 확인하였다. 그러나 대부분의 소음이 여러 주파수가 혼재한 대역 주파수 소음이므로 실질적인 성능 검증을 위하여 대역 주파수 소음 제어도 수행하였다. 각각의 실험에서 제어효과와의 비교는 오차 마이크로폰에서 측정된 음압의 파워 스펙트럼의 변화를 기준으로 하였다. 스마트 폼을 장착하지 않은 상태에서 주소음만 작동하였을 경우 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. 단 환형 스마트 폼의 경우 스마트 폼을 장착하지 않았을 경우에는 단면 변화가 생기므로 제어 전후의 효과만을 고려하였다.

덕트 내부의 소음 제어를 위해 Filtered-x LMS 알고리즘을 이용한 적응 제어 방법이 적용되었다. 제어 과정은 PC에 장착된 dSPACE사의 ds1103 보드를 사용하여 수행하였으며, 이를 통하여 실험 데이터의 수집과 주소음 및 제어 신호를 발생시켰다. 탐지 마이크로폰은 사용하지 않았으며 기준 신호는 제어 주파수 영역을 발생시키기 위해 사용된 신호를 PC로부터 직접 받아 사용하였다. Filterd-x LMS 알고리즘을 구현함에 있어서 제어 신호와 오차 마이크로폰에서 측정되는 제어음 신호 사이의 관계 규명이 선행되어야 한다. 이를 상쇄 경로라고 하며 이의 추정은 LMS 방법을 이용하여 off-line상에서 추정하였다.<sup>(3)</sup>

### 4. 플러그형 스마트 폼을 이용한 덕트 내부의 소음 제어

Fuller에 의해 제안된 스마트 폼과 동일한 형태의 스마트 폼을 제작하고 이를 덕트 내부의 소음 제어에 적용하여 보았다. 단일 주파수와 대역 주파수 소음을 발생시키고 오차 마이크로폰 위치에서 소음을 최소화 시킴으로써 스마트 폼의 소음 제어 가능성을 살펴 보았다.

#### 4.1 단일 주파수 소음 제어

스마트 폼의 소음 감소 성능을 검증해 보기 위하여 저주파와 고주파 각각의 경우에 대하여 실험을 하였다. 저주파 영역은 300 Hz와 400 Hz에서, 고주파 영역은 750 Hz와 1500 Hz에서 각각 실험 하였다. Fig. 5는 플러그형 스마트 폼의 단일 주파수에서의 소음 제어 결과를 나타내고 있다. 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 dB정

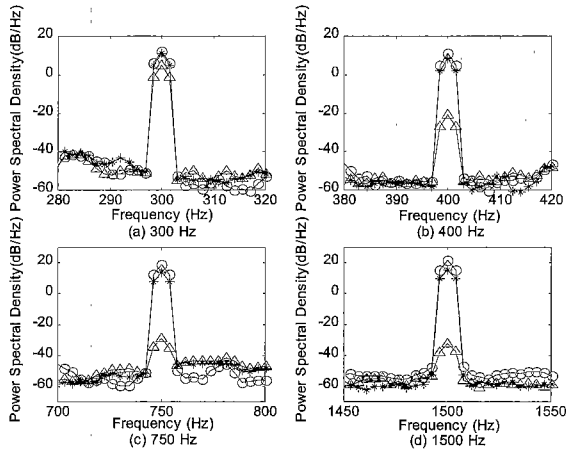


Fig. 5 Tonal control results using plug-type smart foam (o: before control, \*: foam, Δ: after control using smart foam)

도의 소음 감소를 보이고 있다. 이를 통하여 스마트 폼을 이용하여 단일 주파수의 소음 제어가 가능함을 확인 할 수 있었다.

#### 4.2 대역 주파수 소음 제어

중심 주파수가 600 Hz이고 밴드폭이 100 Hz인 대역 소음과 중심 주파수가 900 Hz이고 밴드폭이 200 Hz인 대역 소음을 이용하여 플러그형 스마트 폼의 대역 주파수 소음 제어 성능 검증하여 보았다. 이에 대한 소음 제어 결과는 Fig. 6과 같다. 소음 제어 결과를 살펴보면 관심 주파수 영역을 중심으로 소음감소가 이루어 졌으며 약 10~40 dB 정도의 소음 감소를 보이고 있다. 전체적으로 주소음에 비해 음압이 감소되고 있으며 국부적인 영역에서 약간의 음압 상승이 있으나 상승치가 주소음보다 작으므로 능동 소

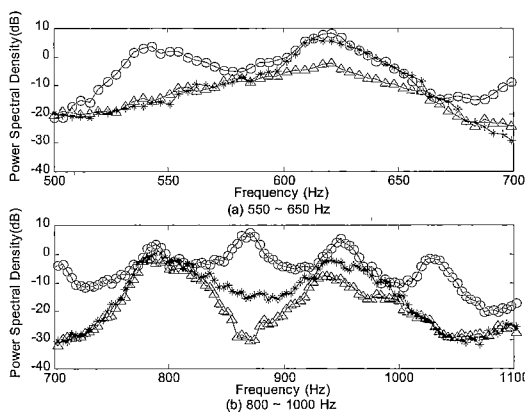


Fig. 6 Broadband control results using plug-type smart foam (o: before control, \*: foam, Δ: after control using smart foam)

음 제어로 인한 성능 감소는 무시할 수 있다고 생각된다. 이상의 결과들을 통하여 스마트 폼을 이용한 덕트 내부 능동 소음제어가 가능함을 확인 할 수 있었다.

#### 5. 환형 스마트 폼을 이용한 덕트 내부의 소음 제어

유동이 존재하는 덕트 내부의 소음 제어를 위하여 제안된 환형 스마트 폼의 소음 제어 성능을 알아보기 위하여 플러그형 스마트 폼과 동일한 조건으로 실험을 수행하였다. 덕트 내부에 환형 공간을 만들기 위하여 특별히 제작된 샘플 홀더가 사용되었으며, 샘플 홀더로 인한 길이 변화는 없도록 하였다. 샘플 홀더만을 장착하여 주소음 신호만을 측정하였을 경우에는 스마트 폼이 위치하는 부분에서 단면 변화가 생기므로 정확한 주소음의 음압 측정이 불가능 하였다. 따라서 환형 스마트 폼의 경우에는 탄성 다공 폼을 이용한 수동 제어와 스마트 폼을 이용한 능동 소음 제어 결과의 비교를 통하여 스마트 폼의 덕트 내부 소음 제어 성능을 확인하여 보았다.

##### 5.1 단일 주파수 소음 제어

Fig. 7은 환형 스마트 폼의 단일 주파수에서의 소음 제어 결과를 보여 주고 있다. 환형 스마트 폼을 이용한 능동 소음 제어의 경우 수동 소음 제어 보다 저주파와 고주파 영역 모두에서 약 20~50 dB정도의 소음 감소 효과가 있음을 보여 주고 있다. 환형 스마트 폼의 경우 제작된 스마트 폼이 플러그형 스마트 폼보다 저주파 영역에서 음의 가진 효율이 좋았기 때문에 저주파 영역에서 더욱 큰 소음 감소 효과를 얻을 수 있었다. 또한 주소음 신호가 단일 주파수이므로 적응 필터를 통하여 충분히 예측 가능하였기 때문에 위와 같은 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 시스템 모

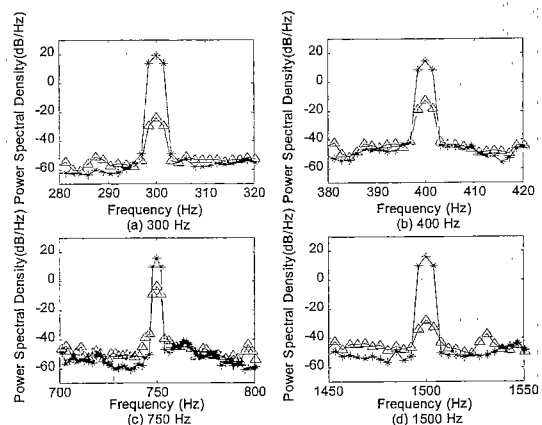


Fig. 7 Tonal control results using ring-type smart foam (\*: foam, Δ: after control using smart foam)

델팅 필터에는 300차, 상쇄 경로 필터에는 50차의 FIR 필터를 사용하였다. 이는 덕트 양단에서의 음의 반사(음향 궤환, acoustic feedback)로 인한 오차 신호의 변화와 제어 입력에 의한 스마트 폼의 임피던스 변화 등으로 인한 영향들이 시스템 모델링 필터에 반영되어 필터의 차수가 보통의 경우보다 큰 값이 필요하게 되었다. 수렴상수는 수렴속도와 안정도를 고려하여 조정하였으며, 일반적으로 수렴계수가 크면 수렴속도가 빨랐으나, 너무 큰 값은 시스템의 불안정을 유발하기도 하였다.

5.2 대역 주파수 소음 제어 결과

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 소음을 이용하였다. 이에 대한 소음 제어 결과는 Fig. 8과 같다. 플러그형 스마트 폼의 소음 제어 결과처럼 관심 주파수 영역을 중심으로 소음감소가 이루어 졌으며 약 10~20 dB 정도의 소음 감소를 보이고 있다. 관심 주파수 영역이 대역 주파수이므로 이에 대한 예측은 앞의 단일 주파수의 경우보다 어렵다. 또한 앞서 언급한 음향 궤환과 스마트 폼의 제어 과정 중의 임피던스 변화도 고려되어야 한다. 따라서 이런 것들이 충분히 반영되려면 필터 계수의 차수가 증가하여야 할 것이다. 그러나 ds1103보드의 실시간 처리 능력한계로 인하여 대역 주파수 소음제어에는 시스템 모델링 필터  $W(z)$ 에 500차, 상쇄 경로 필터  $C(z)$ 에는 100차의 FIR 필터를 사용하였다. 이로 인하여 대역 주파수 소음 제어의 결과는 단일 주파수 소음 제어보다 소음 감소폭이 작았다. 국부적인 영역에서는 수동 소음 제어의 경우보다 약간의 음압 상승이 됨을 볼 수 있었다. 그러나 플러

그형 스마트 폼의 실험 결과를 통하여 확인하였듯이 음압의 상승이 주소음의 음압보다 크지 않으며 상승 폭이 전체적인 소음 감소 폭보다 작다.

상쇄 경로 필터의 차수가 부족하였기 때문에 전달 함수의 추정 오차가 발생할 수 있다. 이는 잘못된 시스템 추정을 유발하며 오차가 있는 영역에서의 소음 제어 성능을 감소시키는 원인이 되었다. 따라서 필터의 차수를 조정하거나 on-line상으로 상황에 맞게 실시간으로 보정할 수 있는 방법에 대한 고려가 필요하겠다.<sup>(7)</sup>

6. 결 론

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. 우선 스마트 폼의 소음 제어 가능성을 검증하기 위하여 Fuller에 의해 제안된 스마트 폼을 제작하여 덕트 내부의 소음 제어에 적용하여 보았다. 단일 주파수 소음과 대역 주파수 소음을 스마트 폼을 이용하여 제어 할 수 있다는 사실을 실험을 통하여 확인 할 수 있었다. 그러나 플러그형 스마트 폼은 덕트 단면을 가로 막는 단점을 가지고 있기 때문에 실제 덕트에 적용이 불가능한 단점을 가지고 있다. 따라서 이를 해결하기 위해 라이닝 모양의 탄성 다공성 폼에 PVDF 액추에이터를 삽입한 환형 스마트 폼을 제안 하였으며 이를 이용하여 덕트 내부의 소음 제어를 하였다. 한쪽 단은 막히고 다른 쪽 단은 열린 유한 덕트 내부의 오차 마이크로폰 위치에서 소음 제어를 통하여 스마트 폼을 이용한 덕트 내부의 능동 소음 제어가 저주파 및 고주파 영역에서 가능함을 확인 할 수 있었다. 단일 주파수의 경우 기존 수동 소음 제어의 경우 보다 평균적으로 45 dB이상의 성능 향상을 보이고 있으며 대역 주파수의 경우도 약 10 dB이상의 성능 향상을 보였다.

후 기

본 연구는 교육부 기계분야 BK 21 사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

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) Nelson, P. A., and Elliott, S. J., 1992, "Active Control of Sound, Academic", London.

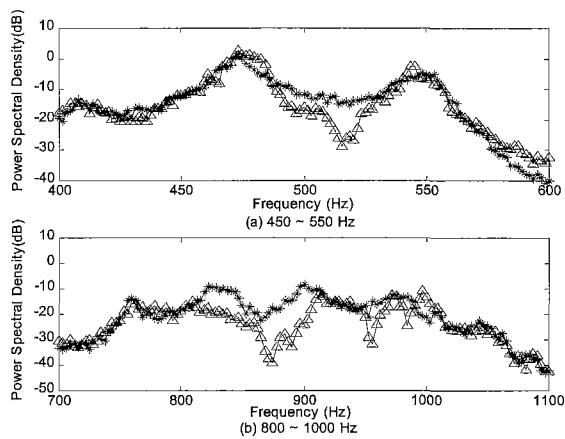


Fig. 8 Broadband control results using ring-type smart foam (\*: foam, Δ: after control using smart foam)

(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.

(6) Kosten, C. W., and Janssen, J. H., "Acoustic Properties of Flexible Porous Materials," Acustica 7, pp. 372~378.

(7) 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.