

헬름홀츠 공명기의 흡음성능에 관한 연구

A Study on the Acoustic Absorption Performance of a Helmholtz Resonator

송 화 영* · 이 동 훈†

Hwa-Young Song and Dong-Hoon Lee

(2007년 10월 11일 접수 ; 2007년 12월 26일 심사완료)

Key Words : Absorption Coefficient(흡음계수), Acoustic Impedance(음향임피던스), Helmholtz Resonator(헬름홀츠 공명기), Low Frequency Noise(저주파수 소음), Perforated Plate(다공판), Transfer Matrix Method(전달행렬법)

ABSTRACT

A helmholtz resonator has been widely used for the purpose of suppressing the low frequency noises propagated from various heat and fluid machineries. However, the conventional resonator has demerits that the effective absorption bandwidth is narrow and the absorption performance is not so outstanding in the only limited configurations of neck and cavity as well. In order to overcome these problems, in this paper, a resonator with perforated neck is proposed. The absorption performances of the resonator are measured by two-microphone method and estimated by transfer matrix method. The measured values of normal absorption coefficients agree well with the estimated values. By introducing the perforated plates at the neck of a resonator, it is shown that the absorption performance have been significantly improved.

1. 서 론

헬름홀츠 공명기는 각종 열유체 기기류에서 발생하는 불연속 저주파수 소음을 흡음할 목적으로 널리 사용되어 왔다^(1,2). 그러나 헬름홀츠 공명기는 소음을 흡음시키는 주파수 대역폭이 좁다는 단점과 공동(cavity)과 목(neck)의 제한된 구성만으로는 필요한 수준의 흡음성능을 확보하지 못한다는 단점 때문에 용도에 많은 제약을 받고 있다. 따라서 공동과 목의 다양한 구성을 통하여 흡음 대역폭을 확장함과 동시에 우수한 흡음성능을 갖는 공명기의 설계에 대한 연구가 필요하다.

공명기의 설계와 관련하여 지금까지 발표된 연구의 예를 들면, 공명기의 목을 테이퍼 형태로 하여 흡음성능을 향상시킨 연구⁽³⁾, 다수의 헬름홀츠 공명기가 배열된 패널 형태의 흡음시스템을 이용하여 흡음성능을 향상시킨 연구⁽⁴⁾ 그리고 유연한 다공성 스크린을 공명기에 설치하여 흡음성능을 향상시킨 연구⁽⁵⁾ 등이 있다. 공동의 체적이 일정한 상태에서 종래의 공명기의 흡음성능은 목의 크기와 형상에 좌우됨을 고려해볼 때, 목을 테이퍼 형태로 하여 흡음성능을 향상시킨 Tang의 연구⁽³⁾는 매우 흥미로운 연구결과로 사료된다. Tang은 목의 안쪽 방향으로 테이퍼를 갖도록 하여 테이퍼 정도에 따른 흡음계수와 공명주파수를 측정하여 이론 해석으로 구한 공명주파수와 비교 고찰한 바 있다. 그러나 Tang의 연구 결과에서는 목을 테이퍼로 하여 흡음계수를 향상시키는 하였으나, 탁월한 성능 향상을 보여주지는

† 교신저자: 정희원 서울산업대학교 기계공학과/에너지환경대학원
E-mail : ldh@snu.ac.kr
Tel : (02)970-6331, Fax : (02)949-1458

* 정희원 서울산업대학교 에너지환경대학원 에너지시스템공학과

못하였다. 더욱이 공동의 목을 경사진 테이퍼로 한 공명기는 제작의 용이성이라든가 비용 그리고 다수의 공명기를 제작하는 관점에서 보면 실용적이라 할 수 없다.

이 연구에서는 종래의 공명기에서 흔히 볼 수 있는 단일 구멍의 목 대신에 크기가 작은 구멍이 다수 뚫린 다공판을 부착함으로써 흡음성능이 월등하게 향상된 헬름홀츠 공명기를 소개하고자 한다. 다공판이 부착된 공명기의 흡음성능을 파악하기 위하여 다공판의 공극률과 부착위치, 공동의 지름에 대한 길이의 비, 다공판의 개수 그리고 공극률이 서로 다른 다공판의 배치순서 등의 변화에 따른 흡음계수를 측정하고 계산결과와 비교 토의하였다. 흡음계수의 측정은 두 개의 마이크로폰간의 전달함수를 측정하여 구하였으며, 계산은 Lee와 Kwon⁽⁶⁾에 의하여 계산의 편리성이 확인된 전달행렬법을 이용하였다.

2. 계산모델

2.1 전기음향등가회로법

이 연구의 헬름홀츠 공명기는 Fig. 1에 도시된 바와 같이 일정크기의 공동과 목의 역할을 하는 다공판으로 구성되고, 이에 대한 흡음계수는 전기음향등가회로법을 이용하여 각 음향요소에 대한 표면음향 임피던스를 순차적으로 합산함으로써 구할 수 있다.

먼저, Fig. 1에 도시된 길이 l_c 인 공동에 대한 특성 임피던스 Z_c 는 하류측이 단단한 강체로 막혀 있으므로 질량속도 $v_{n+1} = 0$ 이 되기 때문에 다음과 같은

$$Z_c = -j Y \cot kl \quad (1)$$

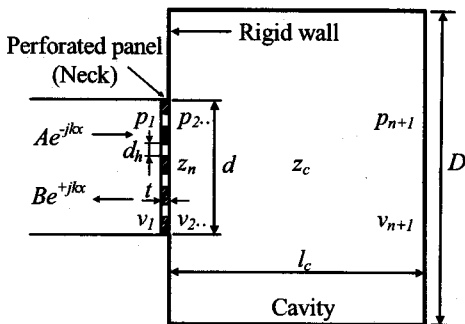
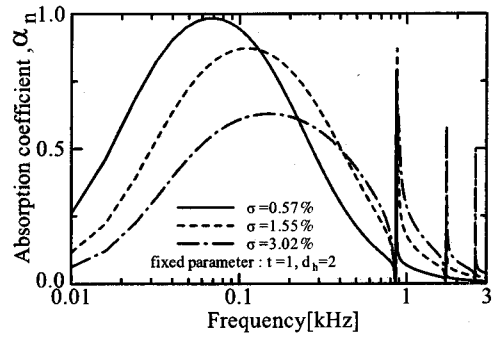


Fig. 1 Configuration of the Helmholtz resonator with perforated neck

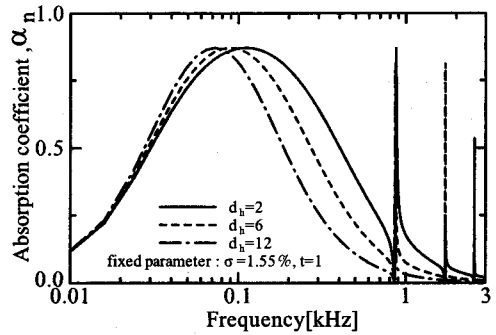
식으로 표현된다.

또한, 다공판에 대한 특성임피던스 Z_n 는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있으며, 이 연구에서는 Rao와 Munjal의 임피던스 모델을 수정하여 사용하였다^(7,8).

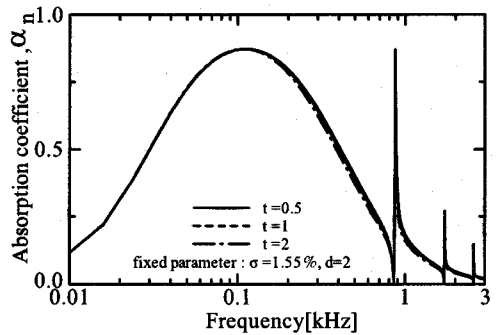
$$Z_n = (7.337 \times 10^{-3})/\sigma + j(3.33675 \times 10^{-5} f (1 + 51t)(1 + 204d_h))/\sigma \quad (2)$$



(a)



(b)



(c)

Fig. 2 Effect of the various parameter of the perforated neck on the absorption performance of a resonator

식 (1)과 식 (2)에서 Y 는 $Y=a/S$ 로서 판의 특성 임피던스를 나타내며, 여기서 S 는 공동의 단면적, a 는 음속을 의미한다. 또한 k 는 파수, $j = \sqrt{-1}$, σ 는 공극률, f 는 주파수 (Hz), t 는 다공판의 두께(m) 그리고 d_h 는 구멍지름 (m)을 뜻한다.

그러므로 공동의 특성임피던스 Z_c 와 다공판의 특성임피던스 Z_n 의 합인 공명기의 총괄표면음향임피던스 ζ 는 식 (3)과 같이 표현되고, 이를 식 (4)에 대입함으로써 수직입사 흡음계수가 구해진다.

$$\zeta = Z_c + Z_n \tag{3}$$

$$\alpha_n = \frac{4Re(\zeta)}{[1 + Re(\zeta)]^2 + [Im(\zeta)]^2} \tag{4}$$

이상에서 언급한 전기음향등가회로법을 이용하여 단일 공동과 목으로 구성된 공명기의 다공판 제원, 즉 공극률, 판 두께, 구멍지름을 변화시키면서 구한 흡음계수에 대한 계산 결과는 Fig. 2와 같다. 먼저 Fig. 2(a)는 공극률에 따른 흡음계수의 계산결과로서 공극률이 감소할수록 흡음계수의 피크값은 점차 증가하면서 공명주파수는 저주파수 대역으로 이동하는 것을 보여주고 있다. Fig. 2(b)는 공극률이 일정한 조건에서 지름 12 mm 구멍을 하나 뚫은 경우, 지름 6 mm 구멍을 2개 뚫은 경우 그리고 지름 2 mm 구멍을 19개 뚫은 경우에 대하여 각각 흡음계수를 계산하여 비교한 결과이다. 결과에서 보듯이 흡음계수의 피크값은 구멍지름에 관계없이 일정함을 알 수 있다. 다만, 같은 공극률을 가지며 구멍지름이 작은 여러 개의 구멍을 뚫을수록 공명주파수가 고주파수 대역으로 이동하면서 흡음대역폭이 넓어지는 흡음특성을 나타낸다. 이는 음향임피던스의 증가에 의한 것으로 사료되며 이에 대해서는 향후 연구가 더 필요하다고 판단된다. Fig. 2(c)와 같이 다공판의 두께를 변화시킨 경우에는 흡음계수의 변화가 거의 없는 것으로 확인되었다.

2.2 전달행렬법

앞서 기술한 바와 같이 단일 공동과 목을 가진 공명기에 대해서는 전기음향등가회로법을 이용하여 흡음계수를 간단히 구할 수 있으나, 음향요소가 다수개가 되면 전기음향등가회로법보다는 전달행렬법이 더 효과적이다⁽⁶⁾.

일반적으로 일차원 음향계 요소의 전달행렬 표현에 대한 개략도는 Fig. 3에 도시한 바와 같다.

Fig. 3에서 상류지점 r 과 하류지점 $r+1$ 에서의 음압 p 와 질량속도 v 를 이용하여 단위 전달행렬을 표현하면 다음식과 같다.

$$\begin{bmatrix} p_r \\ v_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} \\ E_{21} & E_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{r+1} \\ v_{r+1} \end{bmatrix} \tag{5}$$

식 (5)에서 E_{11} , E_{12} , E_{21} 및 E_{22} 는 4단자 정수(또는 전달행렬요소)이다.

이 연구의 공명기는 Fig. 4에 도시된 바와 같이 일정 크기의 공동과 직관 그리고 목의 역할을 하는 다수개의 다공판으로 구성된다.

먼저 Fig. 4에 도시된 길이 l_c 인 공동 또는 직관에 대한 전달행렬 $[S]$ 를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos kl_c & (jY)\sin kl_c \\ (j/Y)\sin kl_c & \cos kl_c \end{bmatrix} \tag{6}$$

그리고 다공판의 전달행렬 $[P]$ 는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_{1,2,\dots,n} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{7}$$

식 (7)은 판의 두께가 파장에 비하여 매우 얇아 다공판 양측 사이의 질량속도에 대한 위상차를 무시할 수 있다는 가정을 전제로 하고 있다. 식 (7)에서

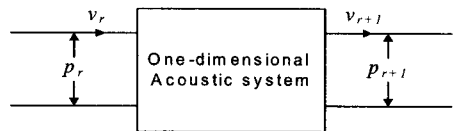


Fig. 3 Four-pole parameters of an acoustic element

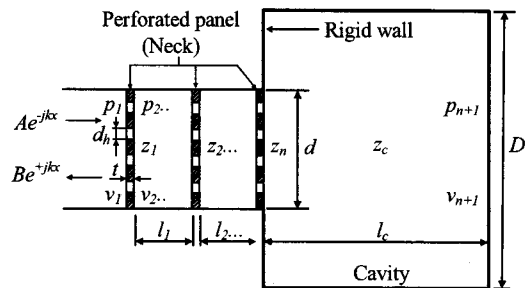


Fig. 4 Configuration of the Helmholtz resonator with multiple perforated necks

$Z_{1,2,...n}$ 는 다공판의 특성임피던스로서 식 (2)의 임피던스 모델을 사용하였다.

한편 Fig. 4와 같이 공명기가 다수개의 다공판과 직판으로 구성된다면 공명기의 총괄전달행렬 $[T]$ 는 다음 식에서와 같이 다공판과 직판에 대한 단위 전달행렬을 각각 곱함으로써 구할 수 있다.

$$[T] = [P]_1[S]_1 \cdots [P]_n[S]_n \quad (8)$$

또한 상류측 음향요소 1에 대한 상태변수(음압과 질량속도)는 총괄전달행렬과 하류측 음향요소 $n+1$ 에 대한 상태변수에 의하여 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ v_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{n+1} \\ v_{n+1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Fig. 4에서 상류측 음향요소에서의 입사음과 반사음의 음압진폭을 각각 A 와 B 라 할 때, 음향계의 상류측과 하류측에서의 음압과 질량속도의 관계는 다음식과 같다.

$$A + B = p_1 = T_{11}p_{n+1} + T_{12}v_{n+1} \quad (10a)$$

$$(A - B)/Y_1 = v_1 = T_{21}p_{n+1} + T_{22}v_{n+1} \quad (10b)$$

그리고 하류측은 단단한 강체로 막혀 있으므로 질량속도 $v_{n+1} = 0$ 이므로, 압력반사계수 $R = B/A$ 는 다음과 같은 전달행렬요소로 표현된다.

$$R = \frac{T_{11} - Y_1 T_{21}}{T_{11} + Y_1 T_{21}} \quad (11)$$

수직입사인 경우 반사계수와 표면음향임피던스 ζ 는 다음의 관계를 갖는다.

$$\zeta = Y_1 \frac{1+R}{1-R} \quad (12)$$

따라서 총괄표면음향임피던스 ζ 를 식 (4)에 대입함으로써 수직입사 흡음계수 α_n 을 구할 수 있다.

3. 실험

Fig. 5는 다공판이 부착된 공명기, 임피던스관 그리고 측정기기의 구성도를 나타낸 것이다. 임피던스관은 지름 $d = \phi 70$ mm이고, 길이 $l = 300$ mm인 아크릴관으로 제작하였다. 임피던스관의 입구측에는

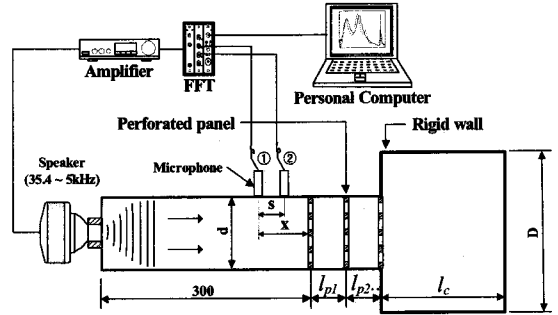


Fig. 5 Experimental setup for sound absorption coefficient measurement

스피커가 부착되어 있으며, 출구측에는 측정하고자 하는 공명기가 설치되어 있다. 이 연구에 사용된 다공판의 제원은 두께 $t=1$ mm 그리고 구멍지름 $d_n = \phi 2$ mm로 일정한 상태에서 공극률 $\sigma=0.57\%$, 1.55% , 3.03% 로 변화시켰다. 그리고 공동의 지름 D 는 각각 $\phi 70$, $\phi 90$, $\phi 130$, $\phi 180$, $\phi 580$ mm로 변화시켰고, 공동 길이 l 은 각각 10, 200, 417, 690 mm로 변화시켰다.

음향신호는 음신호발생기에서 발생되어 증폭기를 거쳐 증폭된 다음에 스피커를 통해 임피던스관에 공급되어 공명기에 입사된다. 다공판 앞에 설치된 두 개의 1/4인치 압력형 마이크로폰으로는 전달함수가 측정된다. 스펙트럼은 주파수 분석기에서 주파수 범위 6400 Hz 그리고 해상도 8 Hz로 하여 분석하였다.

Fig. 5에서 x 는 첫 번째 다공판으로부터 마이크로폰까지의 거리 그리고 s 는 두 마이크로폰간의 간격이다. 이 연구에서는 $x=55$ mm 그리고 $s=20$ mm로 하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 6은 공명기의 공명주파수를 조사할 목적으로 Fig. 6(a)에는 흡음계수의 측정값과 계산값을 그리고 Fig. 6(b)에는 리액턴스(reactance)의 측정값과 계산값을 비교 도시한 것이다. 다공판 공극률 $\sigma=1.55\%$ 이다. 먼저 Fig. 6(a)를 보면 흡음계수의 피크치가 128 Hz, 880 Hz, 1728 Hz 그리고 2584 Hz에서 나타나는 것을 알 수 있다. 이 중에서 128 Hz에 해당하는 피크치는 공명기의 기본공명모드에서의 기본공명주파수이며, 800 Hz 이상에서 나타난 피크치들

은 고차모드(higher-order mode)에서의 공명주파수이다. 이와 일치하는 각각의 공명주파수는 Fig. 6(b)에 도시된 리액턴스의 결과에서도 분명히 확인할 수 있다.

Fig. 7은 공명기의 단면 경계부에 설치된 다공판의 공극률을 변화시키면서 흡음계수를 측정하고 계산한 결과이다. 다공판의 공극률 $\sigma=0.57\%$, 1.55% , 3.02% 이다. 결과에서 공극률이 감소할수록 흡음계수의 피크값은 점차 증가하면서 공명주파수는 저주파수 대역으로 이동하는 특성을 나타낸다. 그리고 측정값과 계산값은 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8은 다공판의 부착 위치를 변화시키면서 흡음계수를 측정하고 계산한 결과이다. 즉 Fig. 8(a)는 공명기의 단면 경계부에 다공판을 설치하였을 때이고, Fig. 8(b)는 단면 경계로부터 100 mm 상류측에 다공판을 설치하였을 때이다. 그리고 Fig. 8(c)는 단면 경계로부터 100 mm 하류측, 즉 공동내부에 다공판을 설치하였을 때이다. 다공판 공극률은 세 경우 모두 같은 $\sigma=1.55\%$ 이다. Fig. 8(a)~(c)의 결과에서 기본공명주파수에 해당하는 흡음계수의 피크값은 다공판의 부착위치와 상관없이 일정하다. 다만 다공판을 단면 경계의 상류측에 설치한 Fig. 8(b)와 비교

하여 Fig. 8(a) 및 Fig. 8(c)의 경우가 흡음대역폭이 다소 증가하고, 공명주파수가 고주파수대역으로 약간 이동하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 9는 다공판 공극률 $\sigma=1.55\%$, 공명기의 공동 체적 $V=2.65 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 으로 고정시킨 상태에서 공

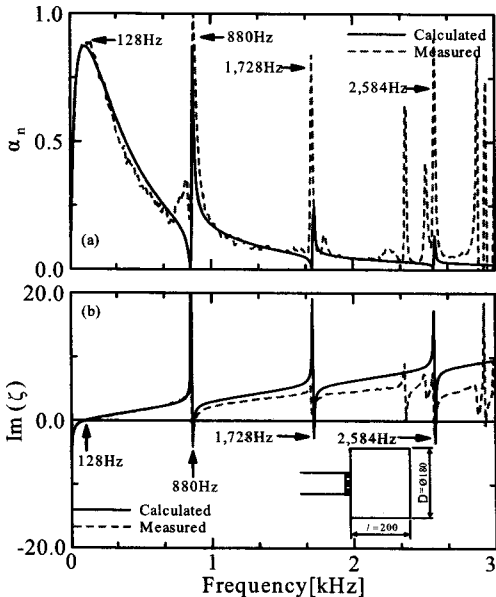
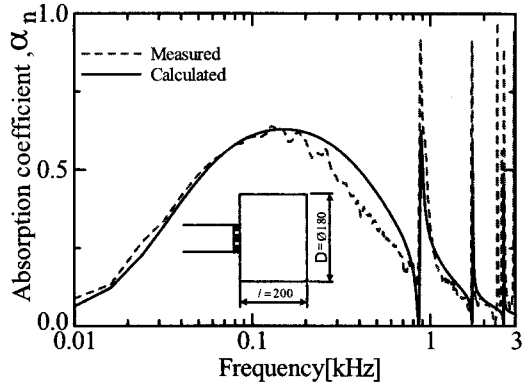
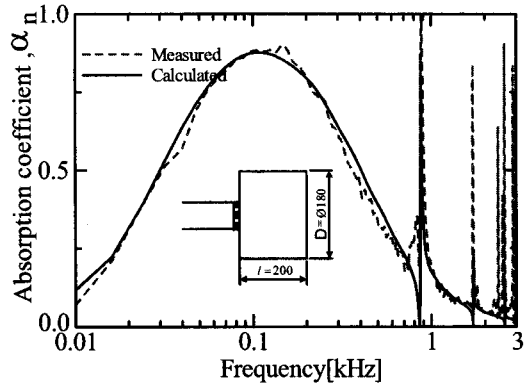


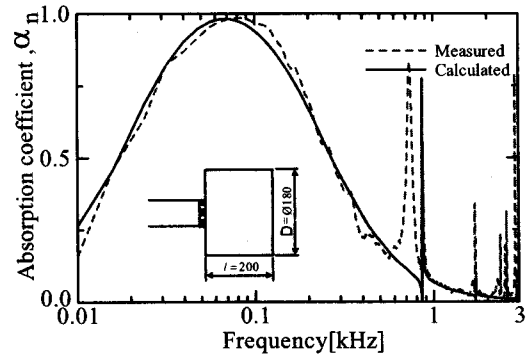
Fig. 6 Comparison of the measured and calculated resonance frequencies in a resonator



(a) $\sigma=3.02\%$



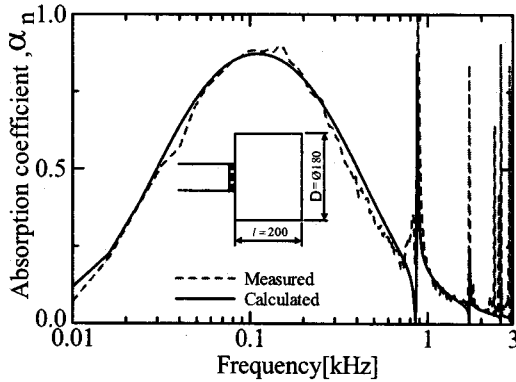
(b) $\sigma=1.55\%$



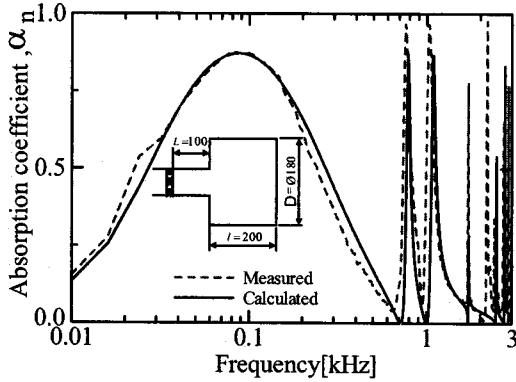
(c) $\sigma=0.57\%$

Fig. 7 Effect of the porosity of the perforated neck on the absorption performance of a resonator

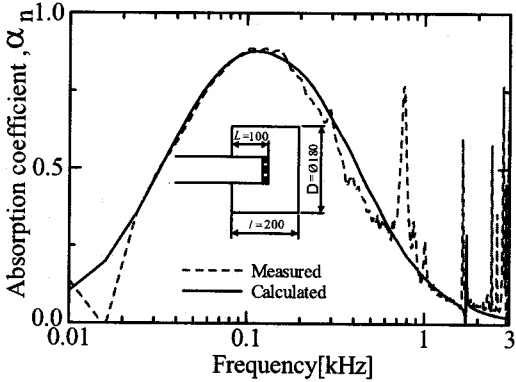
동의 지름에 대한 길이의 비(cavity length-to-diameter ratio)인 l/D 를 9.86, 4.63, 1.54 그리고 0.02로 변화시키면서 흡음계수를 측정하고 계산한 결과이다. 참고로 Fig. 9(b)와 Fig. 9(d)의 결과에서는 공명기 제작의 어려움 때문에 계산결과만을 도시하였다.



(a)

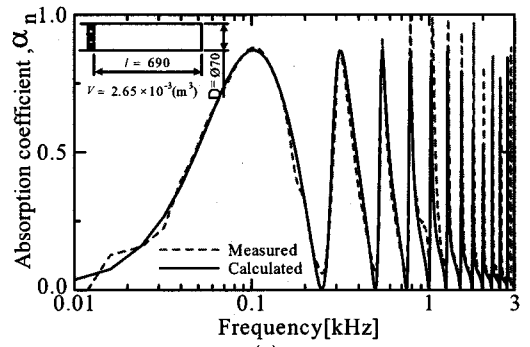


(b)

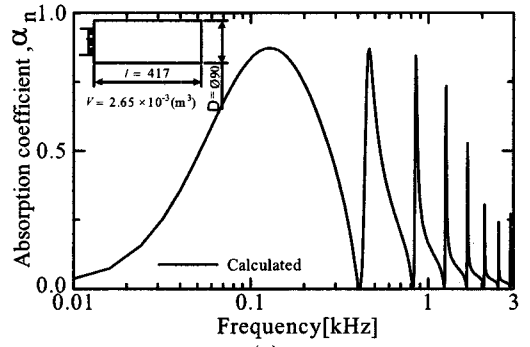


(c)

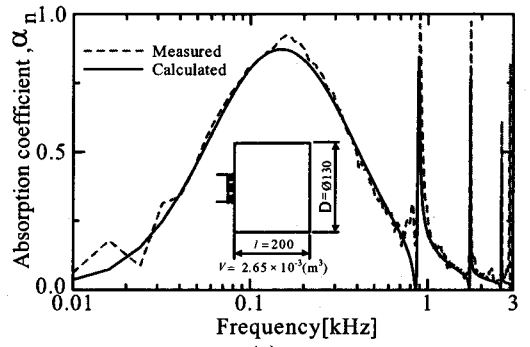
Fig. 8 Effect of the position of the perforated neck on the absorption performance of a resonator



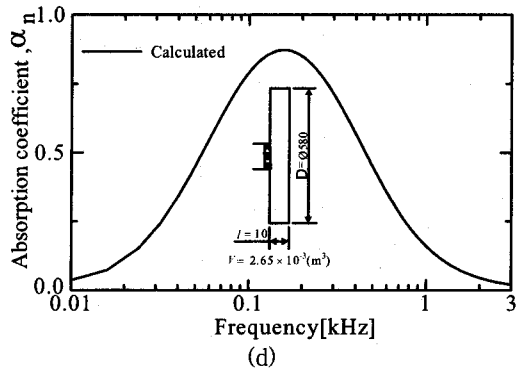
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 9 Effect of the cavity length-to-diameter ratio on the absorption performance of a resonator with a constant cavity volume

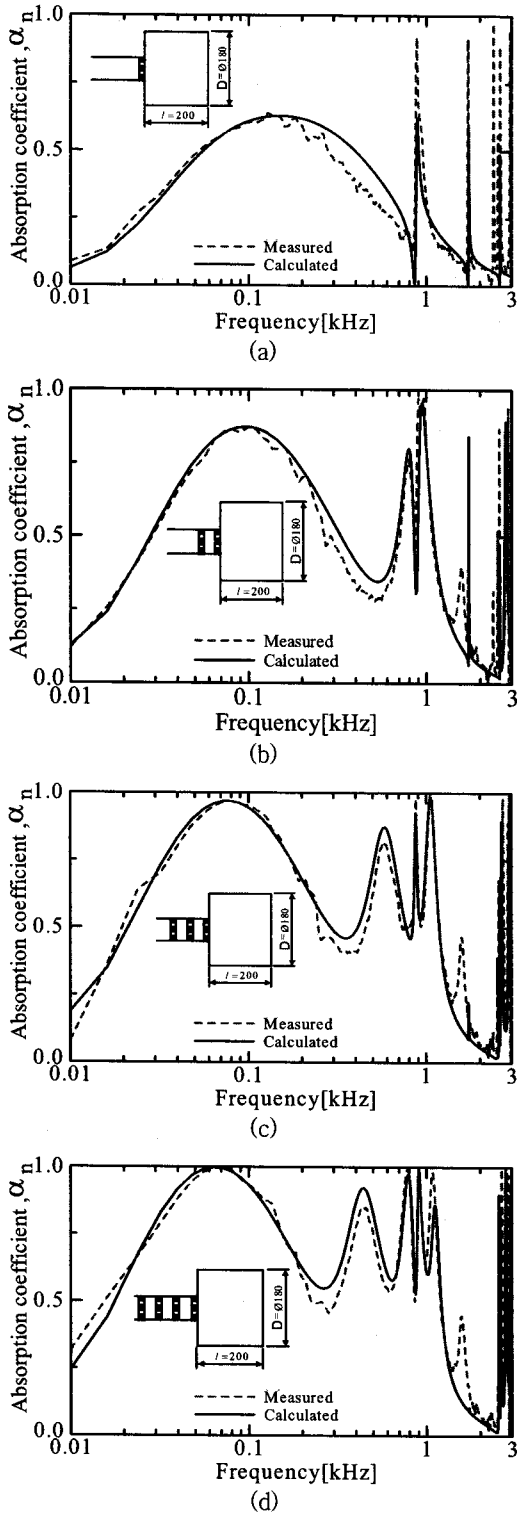


Fig. 10 Effect of the number of perforated neck on the absorption performance of a resonator

Fig. 9(a) ~ (d)의 결과에서 보듯이 기본공명주파수에 해당하는 흡음계수의 피크값은 l/D 의 변화와 관계없이 일정하나, 흡음대역폭은 l/D 가 감소할수록 더 확장된다. 또 l/D 가 감소할수록 기본공명주파수 및 고차모드에 해당하는 공명주파수가 고주파수대역으로 이동하여 발생하다가 Fig. 9(d)와 같이 l/D 가 아주 작아지면 축방향 고차모드에 해당하는 공명주파수는 발생하지 않는다⁽⁹⁾.

이와 같이 l/D 가 감소할수록 흡음대역폭이 더 한층 확장되는 이유는 공명기의 단면 경계부에서의 단면 급확대로 인한 음향임피던스의 부정합(mismatching) 효과에 기인한 것으로 해석할 수 있다. 그러나 Fig. 9(c)와 Fig. 9(d)의 결과에서 보듯이 단면 급확대의 정도, 즉 l/D 가 1이하가 되면 흡음대역폭은 더 이상 확장되지 않는다. 그리고 l/D 가 감소할수록 고차모드에 해당하는 공명주파수가 고주파수대역으로 이동하여 발생하는 이유는 공동길이의 감소 때문이다.

Fig. 10은 공명기의 단면 경계부와 그 상류측으로 다공판을 4중까지 설치하면서 흡음계수를 계산하고 측정된 결과이다. 다공판의 간격은 70 mm이며, 공극률 $\sigma=1.55\%$ 이다. Fig. 10(a) ~ (d)의 결과에서 다공판의 수가 많아질수록 기본공명주파수에서의 흡음계수 피크값은 증가하고, 기본공명주파수가 저주파수대역으로 이동하면서 흡음대역폭도 점차 확장되는 것을 알 수 있다. 또한 공동의 수만큼 흡음계수의 피크치가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 공명기의 단면 경계부와 그 상류측에 공극률이 서로 다른 세 개의 다공판을 공극률이 큰 것부터 작은 순서인 $\sigma_1=3.02\%$, $\sigma_2=1.55\%$, $\sigma_3=0.57\%$ 로 배치하는 경우 그리고 작은 것부터 큰 순서인 $\sigma_1=0.57\%$, $\sigma_2=1.55\%$, $\sigma_3=3.02\%$ 로 배치하는 경우에 대하여 흡음계수를 계산하고 측정된 결과이다. 결과에서 보듯이 하류측으로 갈수록 다공판의 공극률이 점차 작아지는 Fig. 11(a)의 경우가 그 반대인 Fig. 11(b)의 경우보다 흡음성능이 더 우수한 것을 볼 수 있다. 이것은 다공판의 음향임피던스 정합(impedance matching)에 의한 것으로 설명할 수 있다. 즉 다공판의 임피던스는 공극률과 반비례 관계를 가지므로, 공극률의 점진적인 감소는 곧 임피던스의 점진적인 증가를 초래하게 된다. 따라서 Fig. 11(a)와 같은 다공판의 배치는 음파가 다공판을 통과하면서 단계적으로 반사와 투과가 진행됨으로서

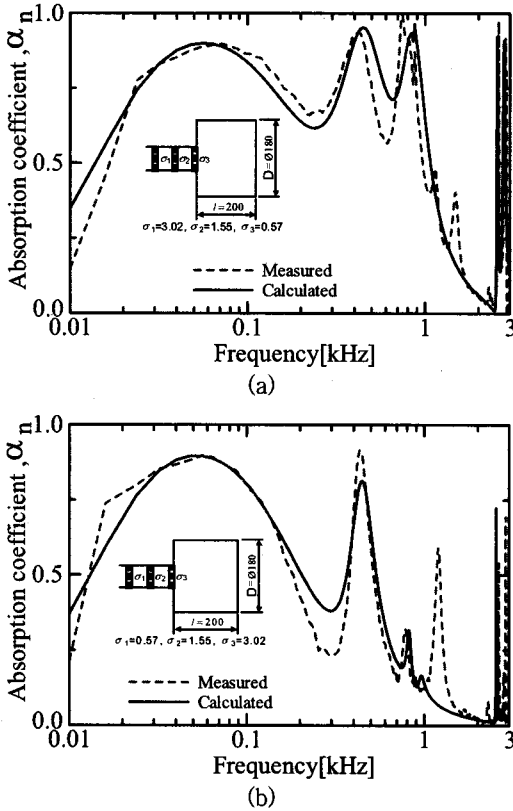


Fig. 11 Effect of the array of the perforated neck with each different porosity on the absorption performance of a resonator

흡음성능이 우수하게 된다. 그러나 Fig. 11(b)의 경우는 첫 번째 다공판의 공극률이 너무 작아 음파의 입사단계부터 큰 음향임피던스를 맞이하기 때문에 고주파수 입사음의 대부분은 단계적으로 다공판을 통과하기보다는 첫 번째 다공판에서 상류측으로 되 반사되므로써 고주파수대역에서의 흡음성능은 감소하게 된다.

5. 결 론

이 연구는 종래의 공명기에서 종종 볼 수 있는 단일 구멍의 목 대신에 크기가 작은 구멍이 다수 뚫린 다공판을 부착한 헬름홀츠 공명기의 흡음성능에 관한 연구결과로서, 연구내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 다공판을 부착한 헬름홀츠 공명기는 다공판의 수가 많아질수록 기본공명주파수에서의 흡음계수 피크값은 증가하고, 공명주파수가 저주파수대역으로

이동하면서 흡음대역폭이 점차 확장된다. 또 공동의 수만큼 흡음계수의 피크치가 발생하였다.

(2) 공동의 지름에 대한 길이의 비인 l/D 가 감소할수록 공명기의 단면 경계부에서의 단면 급확대로 인한 음향임피던스의 부정합(mismatching) 효과 때문에 흡음대역폭은 점차 확장되지만, l/D 가 1이하가 되면 흡음대역폭은 더 이상 확장되지 않는다.

(3) 공명기의 흡음성능은 공극률이 서로 다른 다공판의 적절한 배치를 통해서도 얻을 수 있다. 즉 다공판을 다수 설치할 때는 음파가 입사되는 상류측에서 하류측 방향으로 음향임피던스가 정합(matching)이 되도록 다공판을 설치하면 공명기의 흡음성능은 크게 향상된다.

(4) 공명기에 부착된 다공판의 위치는 공명기의 단면 경계부 또는 단면 경계부의 하류측인 공동의 내부에 부착할 때가 단면 경계부의 상류측에 부착할 때보다 흡음대역폭이 약간 더 확장된다. 그러나 기본공명주파수에 해당하는 흡음계수의 피크값은 다공판의 부착위치와 상관없이 일정하였다.

(5) 공명기에 부착된 다공판의 공극률이 감소할수록 흡음계수의 피크값은 증가하며, 공명주파수는 저주파수대역으로 이동하였다. 그리고 전달행렬법을 이용하여 구한 계산값은 측정값과 잘 일치하였다.

참 고 문 헌

- (1) Blackman, A. W., 1960, "Effect of Nonlinear Losses on the Design of Absorbers for Combustion Instabilities", ARS Journal, pp. 1022~1028.
- (2) Youn, J. W., Jeong, G. C. and Kwon, Y. P., 1995, "Fan Noise Reduction by a Helmholtz Resonator", Proceeding of the SAREK Annual Summer Conference, pp. 233~237.
- (3) Tang, S. K., 2005, "On the Helmholtz Resonators with Tapered Necks", Journal of Sound and Vibration Vol. 279, pp.1085~1096.
- (4) Kim, S. R. and Kim, Y. H., 2005, "A Helmholtz Resonator Array Panel for Low Frequency Sound Absorption", Transactions of the Korea Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 8, pp. 924~930.
- (5) Kim, S. R. and Kim, Y. H., 2005, "Absorptive

Characteristics of a Helmholtz Resonator Damped by a Flexible Porous Screen”, Proceeding of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 865~868.

(6) Lee, D. H. and Kwon, Y. P., 2004, “Estimation of the Absorption Performance of Multiple Layer Perforated Plate Systems by Transfer Matrix Method”, Journal of Sound and Vibration, Vol. 278, pp. 847~860.

(7) Lee, D. H., Seo, S. W., Hong, B. K. and Song, H. Y., 2005, “A Study on the Improvement of

Acoustic Absorption of Multiple Layer Perforated Panel Systems”, Transactions of the Korea Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 5, pp. 571~577.

(8) Munjal, M. L. 1987, Acoustics of Ducts and Mufflers, Wiley, New York, p. 150(Chapter 3).

(9) Dickey, N. S. and Selamet, A., 1996, “Helmholtz Resonators: One-dimensional Limit for Small Cavity Length-to-diameter Ratios”, Journal of Sound and Vibration, Vol. 195, No. 3, pp. 512~517.