

흡음재가 조합된 헬름홀츠 공명기의 흡음성능

Sound Absorption Performance of a Helmholtz Resonator combined with Porous Materials

이영철[†] · 이선기* · 송화영** · 이동훈***

Young-Chul Lee, Sun-Ki Lee, Hwa-Young Song, Dong-Hoon Lee

Key Words : Absorption Coefficient(흡음계수), Helmholtz Resonator(헬름홀츠 공명기), Perforated Panel(다공패널), Resonance type Absorber(공명형 소음기), Transfer Matrix Method(전달행렬법)

ABSTRACT

The helmholtz resonator with the perforated neck has demerits that the absorption performance is not so outstanding in an anti-resonance frequency and high frequency bandwidth. In order to overcome these problems, in the paper, a resonator combined with porous material is proposed. The absorption performances of resonators are measured by two-microphone method and estimated by transfer matrix method. The experimentally measured values of normal absorption coefficients agree well with the corresponding values from the transfer matrix method. Because of the porous material, it is shown that the absorption performance have been significantly improved in the anti-resonance frequency and high frequency bandwidth.

1. 서 론

각종 열유체 기기류에서 발생하는 불연속 저주파수 소음을 흡음할 목적으로 헬름홀츠 공명기가 널리 사용되어 왔다^(1,2). 그러나 헬름홀츠 공명기는 소음을 흡음시키는 주파수 대역폭이 좁다는 단점과 대상음이 저주파수에 가까울수록 부피가 큰 공동을 필요로 하는 단점 때문에 용도에 많은 제약을 받고 있다. 따라서 최근에는 이러한 단점들을 보완하기 위해 흡음대역폭을 확장함과 동시에 작은 공동의 부피로 흡음성능을 향상시키기 위한 많은 연구들이 진행되고 있다.⁽³⁻⁷⁾

이와 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. 그리고 본 저자들에 의해서 종래의 공명기에서 흔히 볼 수 있는 단일 구멍의 목 대신에 크기가 작은 구멍이 다수 뚫린 다공판을 부착함으로써 공명주파수가 저주파수대역으로 이동하면서 흡음대역폭이 상당히 확장되는 흡음성능을 가지는 헬름홀츠 공명기에 대해서도 연구된 바 있다. 그러나 본 저자들에 의해서 연구된 헬름홀츠 공명기는 반공명주파수대역과 고주파수대역에서는 흡음성능이 저하되는 흡음특성을 보여주었다.^(6,7)

따라서 본 연구에서는 다공판이 부착된 헬름홀츠 공명기의 반공명주파수대역과 고주파수대역에서의 흡음성능을 개선시킬 목적으로 다공성 흡음재가 조합된 헬름홀츠 공명기의 흡음성능과 흡음특성에 대하여 고찰하고 흡음성능 향상을 위한 제반 설계인자를 파악하고자 한다. 이를 위해 공명기의 공동내에 설치한 흡음재의 위치 변화에 따른 흡음성능과 공명기의 목부에 설치한 흡음재의 위치 변화에 따른 흡음성능을 서로 비교하였으며, 목부에 다중 공동을 가지는 공명기에 대하여서도 흡음재의 배열에 따른 흡음성능을 측정하였다. 흡음계수의 측정은 두 개의 마이크로폰간의 전달함수를 측정하여 구하였으며, 계산은 Lee와 Kwon⁽⁸⁾에 의해 제안된 전달행렬법을 이용하였다.

† 서울산업대학교 에너지환경대학원 나노IT공학과
E-mail : hysong@snut.ac.kr
Tel : (02) 970-6331, Fax : (02)979-7331

* 서울산업대학교 에너지환경대학원 나노IT공학과

** 서울산업대학교 에너지환경대학원 에너지시스템공학과

*** 서울산업대학교 기계공학과/에너지환경대학원

2. 계산모델

일차원 음향계를 구성하는 각 음향요소의 특성은 Fig. 1에 도시된 바와 같이 전달행렬 요소인 4단자 정수로 표현할 수 있다.

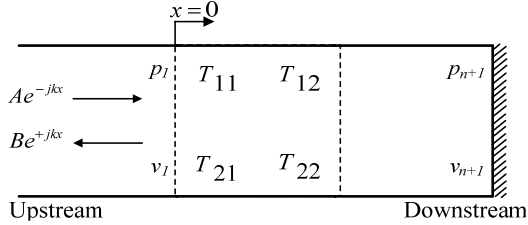


Fig. 1 Four-pole parameters of an acoustic system

Fig. 1과 같이 요소 1부터 요소 n+1개로 구성되어 있는 음향요소에 대한 4단자 정수는 음향요소의 상류측과 하류측의 음압 p 와 질량속도 v 를 이용하여 다음과 같은 전달행렬 $[T]$ 의 형태로 쓸 수 있다.

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

Fig. 1에서 음향요소 상류측에서의 입사음과 반사음의 음압진폭을 각각 A 와 B 라 할 때, 음향계의 상류측과 하류측에서의 음압과 질량속도의 관계는 각각 다음식과 같다.

$$A + B = p_1 = T_{11}p_{n+1} + T_{12}v_{n+1} \quad (2a)$$

$$(A - B)/Y = v_1 = T_{21}p_{n+1} + T_{22}v_{n+1} \quad (2b)$$

식 (2)에서 Y 는 $Y = a/S$ 로서 S 는 입사음의 단면적, a 는 음속을 나타낸다. 그리고 하류측은 단단한 강체로 막혀 있으므로 질량속도 $v_{n+1} = 0$ 이므로, 압력반사계수 $R = B/A$ 는 다음과 같은 전달행렬요소로 표현된다.

$$R = \frac{T_{11} - YT_{21}}{T_{11} - YT_{21}} \quad (3)$$

수직입사인 경우 반사계수와 표면음향임피던스 ζ 는 다음의 식 (4)와 같은 관계를 가지며, 이를 식 (5)에 대입함으로써 수직입사 흡음계수 α_n 을 구할 수 있다.

$$\zeta = Y_1 \frac{1+R}{1-R} \quad (4)$$

$$\alpha_n = \frac{4Re(\zeta)}{[1+Re(\zeta)]^2 + [Im(\zeta)]^2} \quad (5)$$

한편 공명형 흡음기는 Fig. 2에 도시된 바와 같이 공동과 목 그리고 흡음재로 구성되어 있으며, 본 연구에서의 공동은 반경방향으로의 크기조절이 가능한 끝단이 막힌 직관으로 구성되어 있으며, 목에는 다공판을 설치하였다.

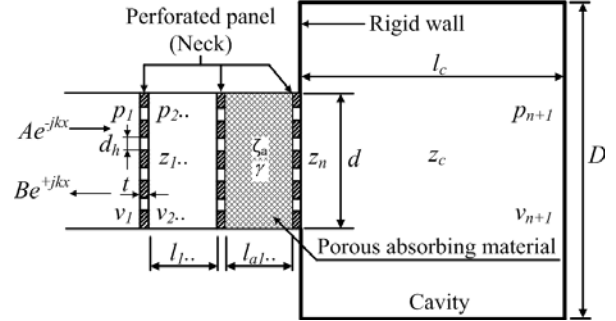


Fig. 2 Sound field representations for resonance type absorber

Fig. 2에 도시된 공동의 목부에 설치된 다공판에 대한 전달행렬 $[P]$ 를 구하면 다음식과 같다.

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_{1,2...n} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (6)에서 Z 는 다공판의 특성임피던스로서 본 연구에서는 Rao와 Munjal의 임피던스 모델을 수정하여 사용하였다.^(9,10)

$$Z = (7.337 \times 10^{-3})/\sigma + j(2.2245 \times 10^{-5} f(1+51t)(1+204d_h))/\sigma \quad (7)$$

식 (7)에서 σ 는 공극율, f 는 주파수(Hz), t 는 다공판의 두께(m), d_h 는 구멍지름(m)을 나타낸다. 또한 Fig. 2에 도시된 길이 l 인 공동 또는 직관에 대한 전달행렬 $[S]$ 는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos kl & (jY)\sin kl \\ (j/Y)\sin kl & \cos kl \end{bmatrix} \quad (8)$$

그리고 Fig. 2에 도시된 흡음재에 대한 전달행렬 $[A]$ 를 구하면 다음식과 같다.

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y \cosh(\gamma l_a) & (Y \zeta_a) \sinh(\gamma l_a) \\ (Y/\zeta_a) \sinh(\gamma l_a) & Y \cosh(\gamma l_a) \end{bmatrix} \quad (9)$$

식 (9)에서 γ 는 전파상수, l_a 는 흡음재 두께(m), ζ_a 는 흡음재의 특성임피던스로서 본 연구에서는 다음에 제시된 Delany & Bazley의 경험식을 사용하였다.

$$\zeta_a = 1 + 9.08 \left(\frac{f}{\Omega} \right)^{-0.75} - 11.9j \left(\frac{f}{\Omega} \right)^{-0.73} \quad (10a)$$

$$\gamma = 10.3 \frac{\omega}{c} \left(\frac{f}{\Omega} \right)^{-0.59} + j \frac{\omega}{c} \left[1 + 10.8 \left(\frac{f}{\Omega} \right)^{-0.7} \right] \quad (10b)$$

식 (10)에서 Ω 는 유동저항(g/cm^3sec), ω 는 각주파수(rad/s), c 는 음속(m/s)을 나타낸다.

3. 실험

Fig. 3은 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도로서 지름 $d = \phi 70mm$, 길이 $l = 300mm$ 인 임피던스관 끝에 공명형 흡음기가 설치되어 있다. 흡음기의 목에는 다공판을 설치하였으며, 다공판의 제원은 공극율 $\sigma = 1.55\%$, 두께 $t = 1mm$ 그리고 지름 $d = 2mm$ 이다. 공동의 길이 l_c 는 $200mm$ 이고, 지름 D 는 각각 $\phi 70, \phi 180mm$ 로 변화시켰다. 흡음재는 지름이 $70mm$ 이고, 두께 $l_a = 70, 100mm$, 유동저항 $\Omega = 7.152g/cm^3sec$ 인 시료를 사용하였다. 또한, 다공판과 다공판 사이의 공동 길이는 $l_{1..} = 70mm$ 이다. 그리고 공동의 외벽은 강체로 구성되어 있으며, 흡음계수는 두 지점에 설치된 마이크로폰간의 전달함수를 측정하여 구하였다.

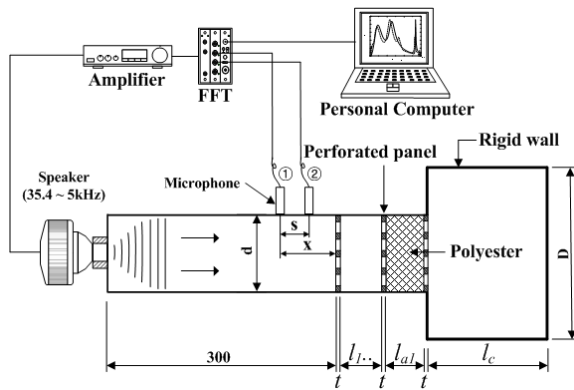


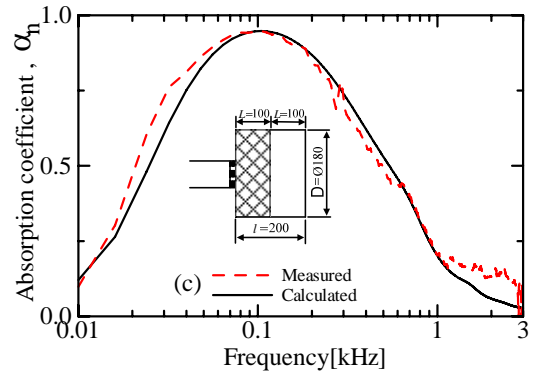
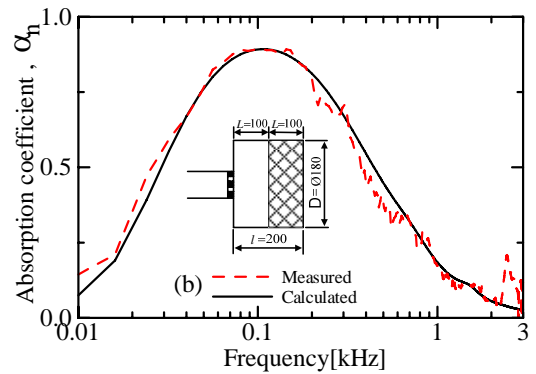
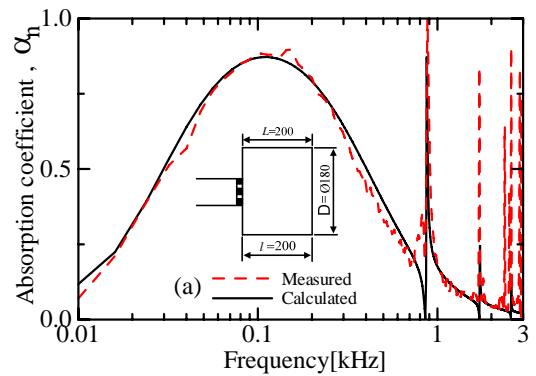
Fig. 3 Experimental setup for sound absorption coefficient measurement

4. 결과 및 고찰

Fig. 4는 공명기의 목부에 공극율이 $\sigma = 1.55\%$ 인 다공판을 설치하고 공동 내부에 배열이 각기 다른 흡음재를 삽입하여 흡음계수를 측정하고 계산한 결과이다. 그림 (a)는 흡음재가 없는 공명기로서 기본공명주파수대역에서 흡음능이 최대가 되는 것을 알 수 있다. 그림 (b)와 (c)는 길이 $l_a = 100mm$ 인 흡음재를 공동의 끝단과 입구측에 각각

삽입하여 흡음계수를 측정된 결과로서 그림 (a)의 결과와 비교해서 흡음대역폭이 다소 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고 그림 (d)는 공동내에 흡음재를 가득 채운 경우로서 그림 (a)의 결과와 비교해서 흡음대역폭과 흡음계수의 피크값이 다소 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 공명기의 목부에 설치된 공극율이 $\sigma = 1.55\%$ 인 다공판 전면에 길이 $l_a = 100mm$ 인 흡음재를 삽입하고 공명기의 공동길이를 반경방향으로 변화시키면서 흡음계수를 측정하고 계산한 결과이다. 결과에서 공동길이가 반경방향으로 커질수록 기본공명주파수가 저파수대역으로 이동하면서 흡음대역폭이 넓어지는 것을 알 수 있다.



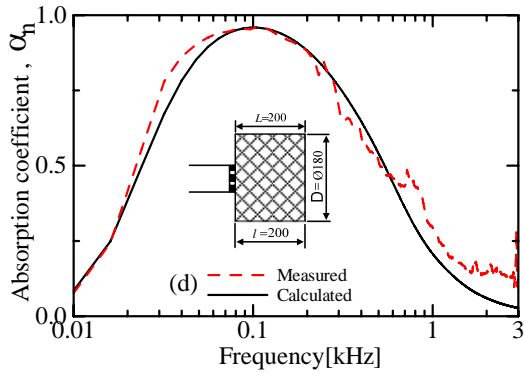


Fig. 4 Effect of the array of porous absorbing material in the cavity on the sound absorption performance of a resonance type absorber

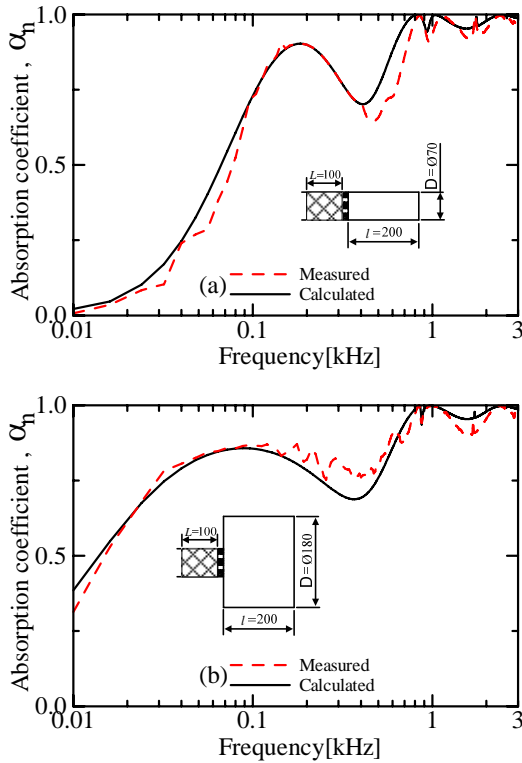


Fig. 5 Effect of the diameter of a cavity on the sound absorption performance of a resonance type absorber

Fig. 6은 공명기의 목부에 길이 $l_a = 100\text{mm}$ 인 흡음재를 삽입하고 목부에 설치된 다공판의 위치를 변화시키면서 흡음계수를 측정하고 계산한 결과이다. 다공판의 공극률은 모두 같은 $\sigma = 1.55\%$ 이다.

그림 (a)의 결과는 목부에 흡음재만을 설치하였을 경우로서 입사음의 1/4 파장에 해당하는 고주파수대역에서 흡음성능이 최대가 되는 것을 볼 수 있다. 그림 (b)와 그림

(c)는 목부에 설치된 흡음재의 전면부와 후면부에 다공판을 각각 설치하여 흡음성능을 구한 것으로서 다공판을 흡음재의 전면부에 설치한 그림 (b)의 결과보다 후면부에 설치한 그림 (c)의 결과가 고주파수대역에서 흡음성능이 더 향상되는 것을 알 수 있다.

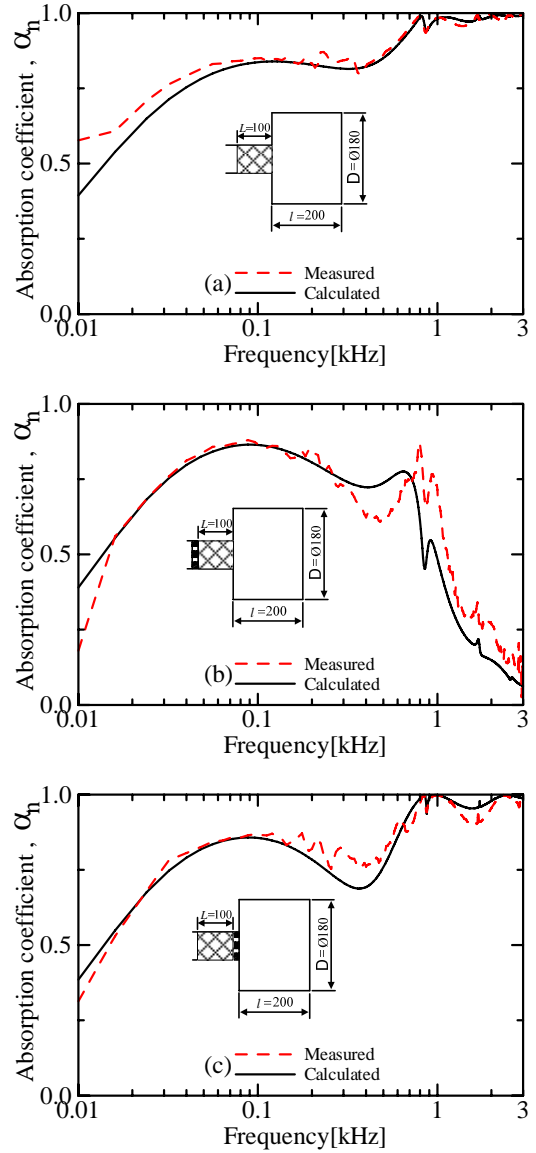


Fig. 6 Effect of the position of the perforated neck on the sound absorption performance of a resonance type absorber

Fig. 7은 공명기의 목부 경계로부터 100mm 하류측, 즉 공동내부로 연장된 관에 길이 $l_a = 100\text{mm}$ 인 흡음재를 삽입하고 목부에 설치된 다공판의 위치를 변화시키면서 흡음계수를 측정하고 계산한 결과이다. 다공판의 공극률은 모두 같은 $\sigma = 1.55\%$ 이다.

그림 (a)의 결과는 흡음재만을 설치하였을 경우로서 입

사음의 1/4 파장에 해당하는 고주파수대역에서 흡음능력이 최대가 되는 것을 알 수 있으며, Fig. 6(a)의 결과와 비교하여 공동내로 연장된 관에 흡음재를 설치한 경우가 기본 공명주파수에 해당하는 흡음계수의 피크값이 더 증가함을 알 수 있다. 그림 (b)와 그림 (c)는 공동내로 연장된 관에 설치한 흡음재의 전면부와 후면부에 다공판을 각각 설치하여 흡음능을 구한 것으로서 다공판을 흡음재의 전면부에 설치한 그림 (b)의 결과보다 후면부에 설치한 그림 (c)의 결과가 고주파수대역에서 흡음능력이 더 향상되는 것을 알 수 있다.

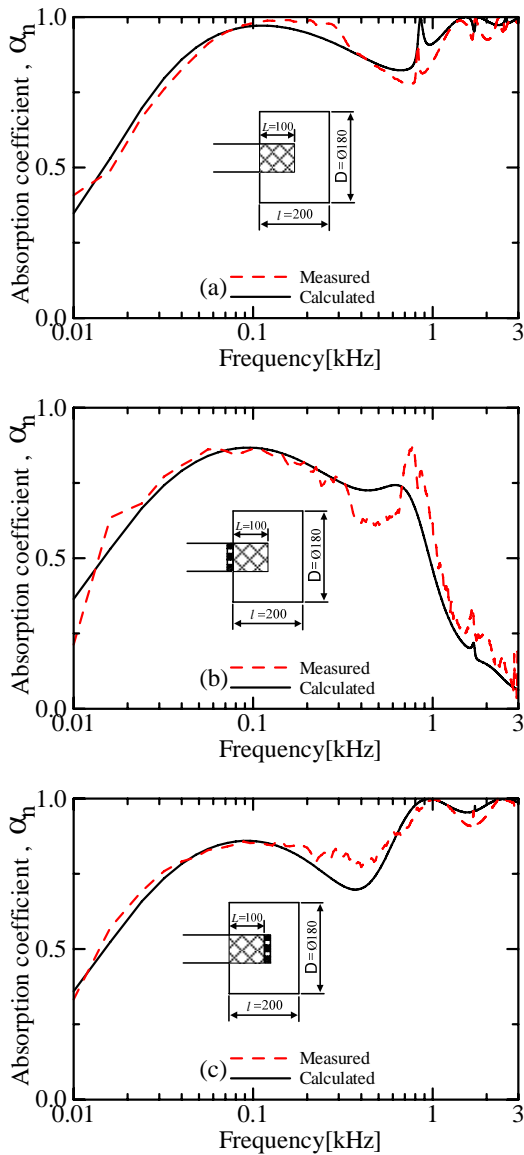
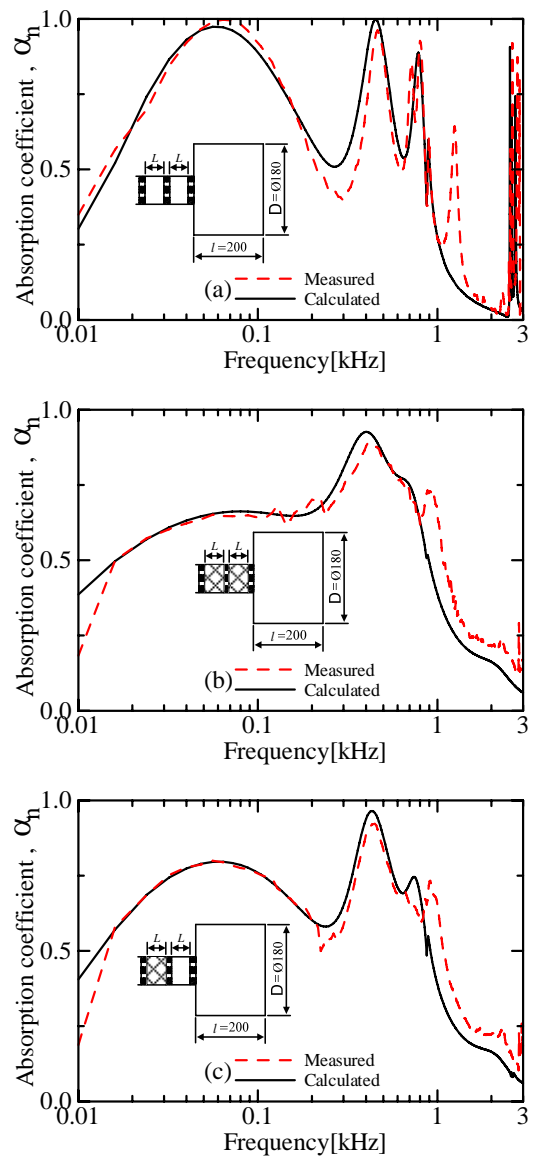


Fig. 7 Effect of the position of the perforated neck installed in the extended tube on the sound absorption performance of a resonance type absorber

Fig. 8은 공극률이 $\sigma = 1.55\%$ 인 다공판을 공명기의 목부에 3중으로 설치하여 흡음재의 배열에 따른 흡음계수의 변화를 측정하고 계산한 결과이다.

그림 (a)의 결과는 흡음재를 설치하지 않은 경우로서 공동의 공명주파수와 일치하는 세 개의 공명주파수대역에서 흡음능력의 피크치를 나타낸다. 그리고 그림 (b)는 목부에 위치한 두개의 공동에 흡음재를 가득 채운 경우로서 그림 (a)의 결과와 비교하여 공명주파수에 해당하는 흡음계수의 피크값은 저감되었지만, 반공명주파수에 해당하는 흡음계수의 값은 증가되었음을 알 수 있다. 그리고 그림 (c)와 그림 (d)의 결과처럼 흡음재를 하나의 공동에만 채워도 그림 (b)의 결과에 가까운 흡음능을 나타낸다.



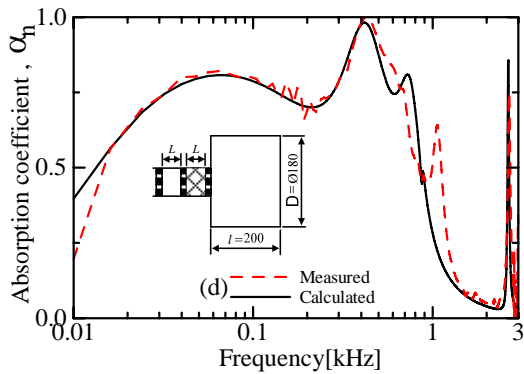


Fig. 8 Effect of the array of porous absorbing material on the sound absorption performance of a resonance type absorber with multiple layer perforated neck

5. 결론

본 연구에서는 흡음재가 조합된 공명형 흡음기의 흡음성과 관련 있는 주요 설계인자를 조사할 목적으로 흡음계수를 측정하여 계산결과와 비교하였다. 흡음계수의 계산은 전달행렬법을 이용하여 간편하게 구할 수 있었으며 측정결과와 매우 잘 일치하였다.

흡음재는 공명기의 공동내부에 설치하는 것보다 목부에 설치하였을 때 흡음성능이 좋아짐을 알 수 있었다. 그리고 흡음재가 조합된 공명기의 공동길이가 반경반향으로 커질수록 저주파수대역에서 흡음대역폭이 넓어짐을 확인할 수 있었다. 또한, 공명기 목부에 설치한 흡음재는 다공판의 후면부에 설치하는 것보다 전면부에 설치할 때에 고주파수대역에서 흡음성능이 더 향상됨을 알 수 있었다.

그리고 목부에 다수개의 공동을 가지는 공명기의 경우 반공명주파수대역에서 흡음성능을 향상시키기 위해 흡음재를 다공판 사이에 모두 설치하는 것보다 하나의 공동에만 설치하더라도 흡음성능이 향상됨을 확인하였다.

참고 문헌

- (1) Blackman, A.W., 1960, "Effect of Nonlinear Losses on the Design of Absorbers for Combustion Instabilities," ARS Journal, pp1022~1028.
- (2) 윤제원, 정갑철, 권영필, 1995, "Helmholtz 공명기를 이용한 Fan 소음저감", 하계학술대회발표논문집, 공기조화냉동공학회, 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) 김상렬, 김양한, 2005, "저주파수 흡음을 위한 헬름홀츠 공명기 배열형 패널", 한국소음진동공학회 논문집, 제15권, 제8호, pp.924-930.
- (5) 김상렬, 김양한, 2005, "유연한 다공성 스크린을 가진 헬름홀츠 공명기의 흡음특성", 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, pp.865-868.
- (6) 송화영, 이영철, 이선기, 이동훈, 2007, "공명형 흡음기의 설계인자에 관한 연구", 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집
- (7) 송화영, 이동훈, 2008, "헬름홀츠 공명기의 흡음성능에 관한 연구", 한국소음진동공학회논문집, 제18권 제1호, pp.71-79
- (8) 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.
- (9) 이동훈, 서성원, 홍병국, 송화영, 2005, "다중 다공판 시스템의 흡음성능 향상에 관한 연구", 한국소음진동공학회 논문집, 제15권 제5호, pp.571~577
- (10) M.L. Munjal, 1987, Acoustics of Ducts and Mufflers, Wiley, New York, pp. 150(Chapter 3).