흡음재가 조합된 헬름홀츠 공명기의 흡음성능에 관한 연구

A Study on the Sound Absorption Performance of a Helmholtz Resonator Combined with Porous Materials

이 동 훈† · 송 화 영*

Dong-Hoon Lee and Hwa-Young Song

(2009년 4월 8일 접수 ; 2009년 5월 6일 심사완료)

Key Words : Absorption Coefficient(흡음계수), Helmholtz Resonator(헬름홀츠 공명기), Perforated Panel(다공 패널), 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 부착함으로서 공명주파수가 저주파수대역으로 이동하면서 흡음대역폭이 상당히 확장되는 흡음성능을 가지는 헬름홀츠 공명기에 대해서도 연구된 바 있다. 그러나 본 저자들에 의해서 연구된 헬름홀츠 공명기는 반공명주파수(anti-resonance frequency)와 고주파수대역에서는 흡음성능이 저하되는 흡음특성을 보여주었다[6,7].

따라서 이 연구에서는 다공판이 부착된 헬름홀츠 공명기의 반공명주파수대역과 고주파수대역에서의 흡음성능을 개선시킬 목적으로 다공성 흡음재가 조합된 헬름홀츠 공명기의 흡음성능과 흡음특성에 대

† 교신저자; 정회원, 서울산업대학교 기계공학과/에너지환경대학원
E-mail : Ldh@snut.ac.kr
Tel : (02) 970-6331, Fax : (02)979-7331
* 서울산업대학교 에너지환경대학원 에너지시스템공학과

하여 고찰하고 흡음성능 향상을 위한 제반 설계인자를 파악하고자 한다. 흡음계수의 측정은 두 개의 마이크로폰간의 전달함수를 측정하여 구하였으며, 계산은 Lee와 Kwon[8]에 의해 제안된 전달행렬법을 이용하였다.

2. 계산모델

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

Fig. 1과 같이 요소 1부터 요소 n+1개로 구성되어 있는 음향요소에 대한 4단자 정수는 음향요소의 상류측과 하류측의 음압 p와 질량속도 v를 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 A와 B라 할 때, 음향계의 상류측과 하류측에서의 음압과 질량속도의 관계는 각각 다음식과 같다.

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

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

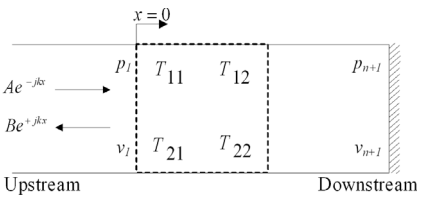

Fig. 1 Four-pole parameters of an acoustic system

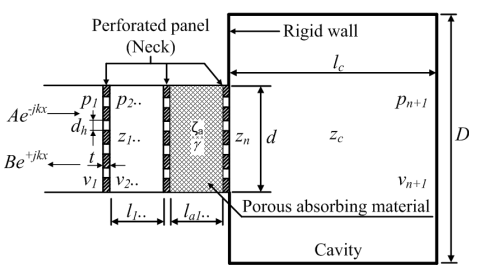

Fig. 2 Sound field representations for a resonator

식 (2)에서 Y는 $Y=a/S$로서 S는 입사음의 단면적, a는 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 ζ는 다음의 식 (4)와 같은 관계를 가지며, 이를 식 (5)에 대입함으로서 수직입사 흡음계수 α_n을 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 공명기는 Fig. 2에 도시된 바와 같이 입구관, 공동과 목 그리고 흡음재로 구성되어 있으며, 이 연구에서의 공동은 반경방향으로의 크기조절이 가능한 끝단이 막힌 직관으로 구성되어 있으며, 목에는 다공판을 설치하였다.

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

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (6)에서 Z는 다공판의 특성임피던스로서 이 연구에서는 Rao와 Munjal의 임피던스 모델을 수정하여 사용하였다[9,10].

$$Z=(7.337\times10^{-3})/\sigma + j(2.2245\times10^{-5}f(1+51t)(1+204d_h))/\sigma \quad (7)$$

식 (7)에서 σ는 공극률, f는 주파수(Hz), t는 다공판의 두께(m), d_h는 구멍지름(m)을 나타낸다. 또한 Fig. 2에 도시된 길이 l인 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 γ는 전파상수, l_a는 흡음재 두께(m), ζ_a는 흡음재의 특성임피던스로서 이 연구에서는 다음에 제시된 Delany & Bazley의 경험식을 사용하였다[11].

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

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

식 (10)에서 Ω는 유동저항(g/cm^{3}sec), ω는 각주파수(rad/s), c는 음속(m/s)을 나타낸다.

3. 실 험

Fig. 3은 이 연구에 사용된 실험장치의 개략도로서 지름 $d=\phi 70$ mm, 길이 $l=300$ mm인 임피던스 관 끝에 공명기가 설치되어 있다. 공명기의 목 경계에는 다공판을 설치하였으며, 다공판의 제원은 공극율 $\sigma=1.55$ %, 두께 $t=1$ mm 그리고 지름 $d=2$ mm이다. 공동의 길이 l_c는 200 mm이고, 지름 D는 각각 $\phi 70$, $\phi 130$, $\phi 180$ mm로 변화시켰다. 흡음재는 지름이 $\varnothing 70$ mm이고, 두께 $l_a=100$ mm, 유동저항 $\Omega=7.152$ g/cm^{3}sec인 시료를 사용하였다. 또한, 다공판과 다공판 사이의 작은 공동의 길이는 $l_1=70$ mm이다. 그리고 공동의 외벽은 강체로 구성되어 있으 흡음계수는 두 지점에 설치된 마이크로폰간의 전달

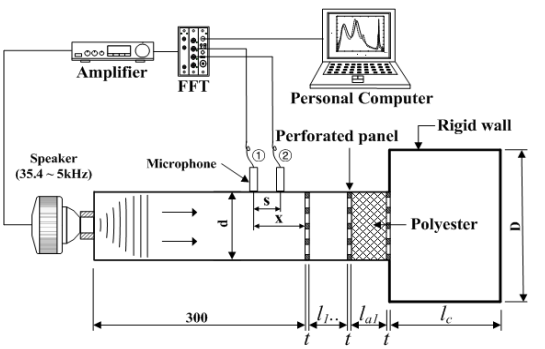

Fig. 3 Experimental setup for sound absorption coefficient measurement

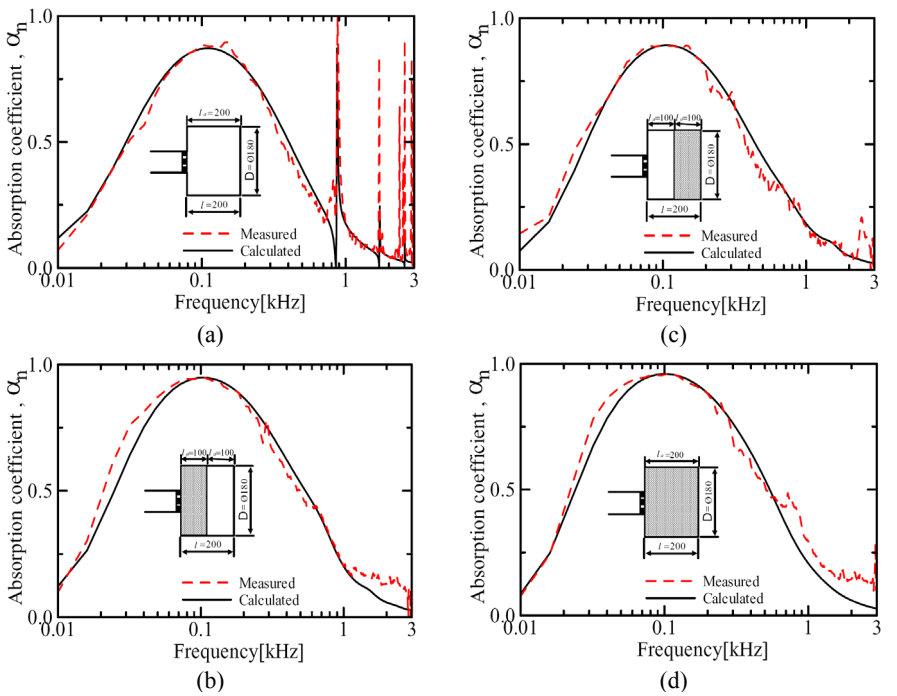

Fig. 4 Effect of the array of porous absorbing material in the cavity on the sound absorption of a resonator

함수를 측정하여 구하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 4는 크기가 동일한 공명기의 목 경계에 공극율 $\sigma = 1.55$ %인 다공판을 설치한 상태에서 공동내부에 장착된 흡음재의 위치를 각기 다르게 하면서 흡음계수를 측정하고 계산한 결과이다. 그림 (a)는 공동내부에 흡음재가 없는 공명기이며, 그림 (b)와 그림 (c)는 공동의 끝단과 입구측에 길이 $l_a = 100$ mm인 흡음재를 각각 부착한 경우이고 그리고 그림 (d)는 공동내부에 흡음재를 가득 채운 경우이다. 제시된 모든 결과로부터 기본공명주파수에서 흡음계수가 최대로 되고, 또한 공명기내부에 장착된 흡음재로 인하여 약 900 Hz이상에서 발생하는 고차모드에서의 흡음계수 피크치가 소멸됨을 알 수 있다. 흡음재 배열에 따른 흡음성능은 그림 (c)와 같이 공동 끝단에 흡음재를 부착하는 것보다 그림 (b)와 같이 공기층을 두거나 그림 (d)와 같이 흡음재를 가득채운 경우가 흡음성능이 개선되었다. 아울러 측정결과와 계산결과는 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

성능은 유지되나, 흡음재만을 장착한 그림 (a)나 그림 (d)만큼의 흡음성능을 갖지는 않는다. 따라서 모든 주파수대역에서 양호한 흡음성능을 갖도록 하

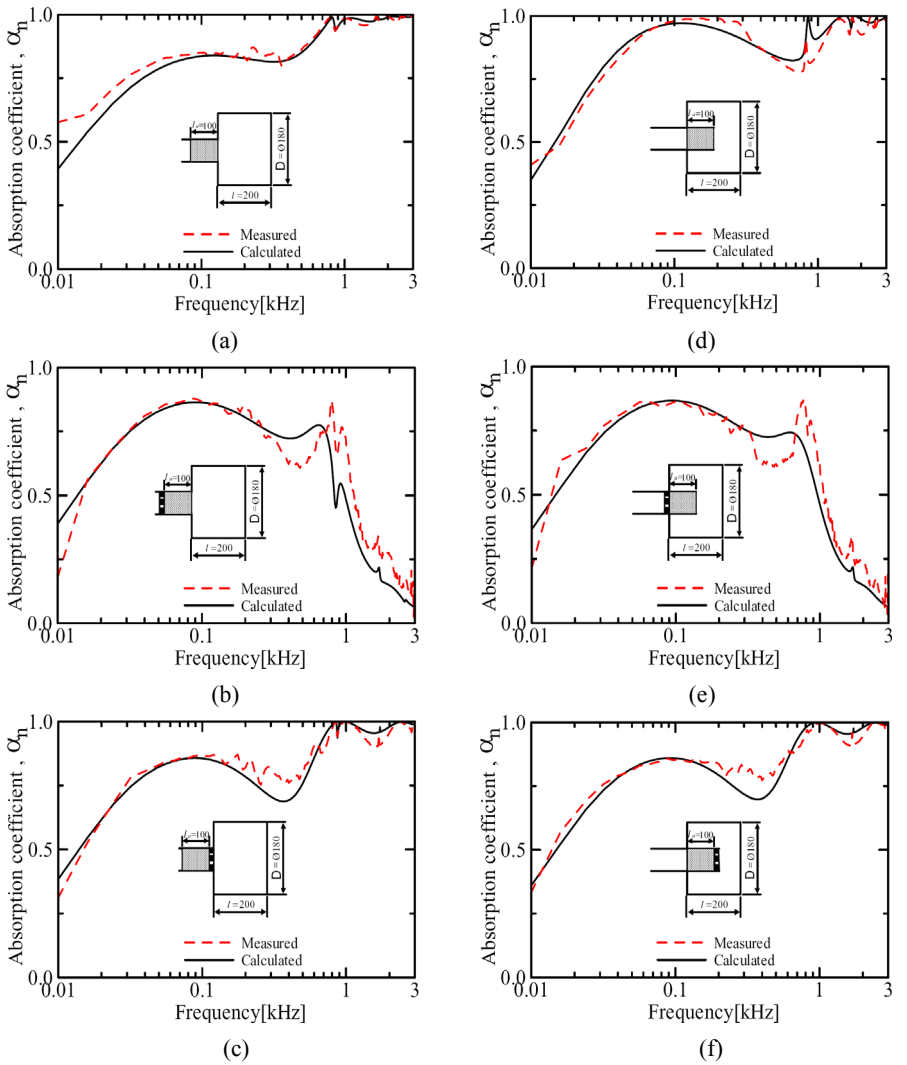

Fig. 5 Effect of the position of the perforated neck on the sound absorption of a resonator

기 위해서는 그림 (d)와 같이 공동내부의 연장관에 흡음재를 설치하는 것이 권장된다.

Fig. 6은 공극률 $\sigma = 1.55$ %인 다공판을 공명기의 입구관과 목 경계에 3중으로 설치한 상태에서 흡음재 배열을 다르게 하면서 흡음계수를 측정하고 계산한 결과이다. 그림 (a)의 결과는 흡음재를 설치하지 않은 경우로서, 공동의 공명주파수와 일치하는 세 개의 주파수대역에서 흡음성능의 피크치를 나타내는 반면에, 반공명주파수대역에서의 흡음성능은 감소하였다.

그리고 그림 (b)는 입구관에 위치한 두개의 작은 공동에 흡음재를 가득 채운 경우로서 그림 (a)의 결과와 비교하여 기본공명주파수에 해당하는 흡음계수의 피크값은 감소하였으나, 약 200 Hz 이상의 반공명주파수대역에서의 흡음계수는 증가하였다. 그리고 그림 (c)와 그림 (d)의 결과는 흡음재를 하나의 작은 공동에만 설치한 경우로서 그림 (b)에서와 같이 반공명주파수 대역에서 흡음성능이 향상되었다.

이와 같이 다공판과 공동만으로 구성된 공명기에서 나타나는 반공명주파수대역에서의 흡음성능 감

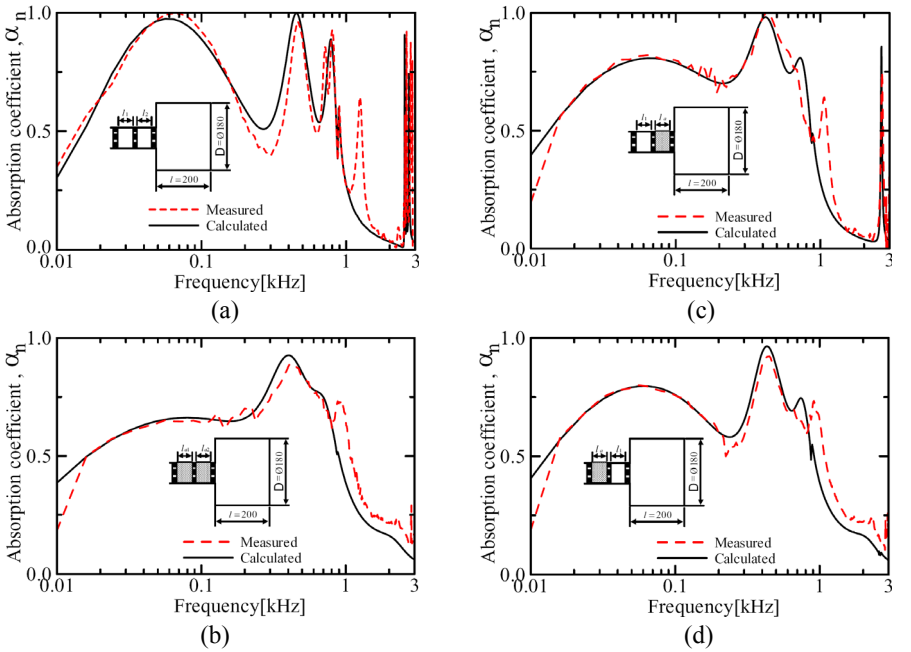

Fig. 6 Effect of the array of porous absorbing material on the sound absorption of a resonator with multiple layer perforated neck

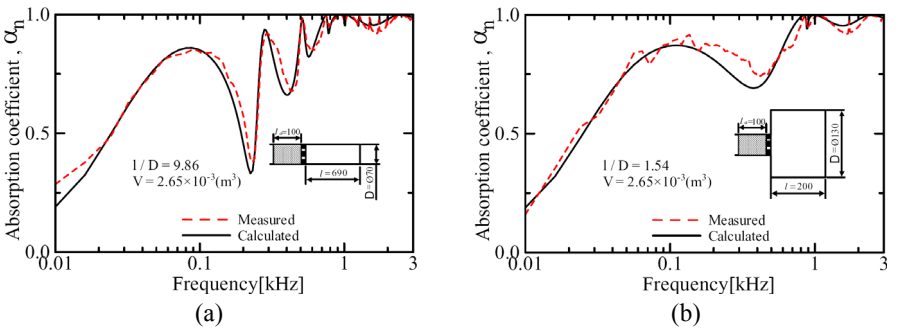

Fig. 7 Effect of the cavity length-to-diameter ratio on the sound absorption performance of a resonator with a constant cavity volume

소는 작은 공동 어느 한곳에 흡음재를 충진함으로서 흡음성능을 향상시킬 수 있었다. Fig. 7은 공명기의 목 경계에 설치된 공극률 $\sigma = 1.55$ %인 다공판의 상류측에 길이 $l_a = 100$ mm인 흡음재를 부착하고 공명기의 공동체적을 $V = 2.65 \times 10^{-3}$ m^{3}으로 고정시킨 상태에서 공동의 지름에 대한 길이의 비(cavity length-to-diameter ratio)인 l/D을 각각 9.86과 1.54로 변화시키면서 흡음계수를 측정하고 계산한 결과이다. 결과에서 기본공명주파수에 해당하는 흡음계수의 피크값은 l/D의 변화에 관계없이 일정하나, 그림 (a)의 결과에서는 약 200 Hz 이상의 주파수대역에서의 흡음계수 값이 감소와 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 공동형태를 반지름 방향으로 증가시킨 그림 (b)의 결과에서는 이러한 경향을 보이지 않고 전반적으로 흡음계수가 증가하는 경향을 나타내었다. 따라서 같은 체적의 공명기에서는 가급적 공동을 길이방향으로 확장하기 보다는 반경방향으로 확장하는 설계가 권장된다.

5. 결 론

이 연구는 다공성 흡음재가 조합된 헬름홀츠 공명기의 제반 설계인자를 파악할 목적으로 연구하였으며, 주요 연구내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 공명기의 공동내부에 흡음재를 설치하는 것보다 입구관이나 공동내부의 연장관에 흡음재를 설치하였을 때가 반공명주파수대역이나 고주파수대역에서의 흡음성능이 크게 향상되었다. 특히 공동내부의 연장관에 흡음재만을 설치하였을 때가 모든 주파수대역에서 우수한 흡음성능을 나타내었다.

(2) 공명기의 공동체적이 같은 조건이라면, 가급적 공동을 길이방향으로 확장하기 보다는 반경방향으로 확장하는 설계가 흡음성능 측면에서는 유리하였다.

(3) 공명기의 입구관에 다수개의 다공판과 작은 공동을 갖도록 구성한 다중 공동 공명기에서는 반공명주파수대역에서 흡음성능이 감소하게 되는데, 이를 해결하기 위한 방안으로 작은 공동 어느 한곳에라도 흡음재를 부착함으로서 흡음성능이 개선되었다.

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 Autumn Conference, pp. 233~237.

(3) Tang, S. K., 2005, “On the Helmholtz Resonatots 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 Korean 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) Song, H. Y., Lee, Y. C., Lee, S. K. and Lee, D. H., 2007, “A Study on the Design Parameter of a Resonance type Absorber,” Proceeding of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 964~968.

(7) Song, H. Y. and Lee, D. H., 2008, “A Study on the Design Parameter of a Resonance type Absorber,” Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 1, 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) Lee, D. H., Seo, S. W., Hong, B. K. and Song, H. Y., 2005, “A Study on the Improvement of Acoustic Absorber of Multiple Layer Perforated Panel System,” Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 5, pp. 571~577.

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

(11) Delany, M. E. and Bazley, E. N., 1970, “Acoustical Properties of Fibrous Absorbent Materials,” Applied Acoustics, Vol. 3, pp. 105~116.