

유연한 다공성 스크린을 가진 헬름홀츠 공명기의 흡음특성 Absorptive Characteristics of a Helmholtz Resonator Damped by a Flexible Porous Screen

김상렬*·김양한**

SangRyul Kim and Yang-Hann Kim

Key Words : Helmholtz Resonator(헬름홀츠 공명기), Absorption Coefficient(흡음률), Porous Screen(다공성 스크린), Resonance Frequency(공명주파수)

ABSTRACT

A Helmholtz resonator is one of noise control elements widely used in many practical applications. The resonator has very high absorption at resonance frequency but the frequency bandwidth is very small. Therefore many kinds of additional resistive screens have been applied to the resonator's neck in order to increase the bandwidth. This paper discusses the absorptive characteristics of a Helmholtz resonator damped by a flexible porous screen in form of wire mesh. First, various experimental results are introduced and studied. Secondly, the effect of the resistive screen is theoretically predicted. It is shown that the distance between the screen and aperture affects on the resonance frequency as well as the absorption of the system.

기호설명

- ρ : 공기의 밀도
- c : 공기에서의 음속
- k : 파수(= ω/c)
- a, l : 공명기 목 단면의 반경과 목의 길이
- a_c, L_c : 실린더형 공동의 반경 및 공동의 깊이
- V : 공명기 공동의 체적(= $\pi a_c^2 L_c$)
- δ_i : 공명기 목에서의 내부 보정길이
- δ_e : 공명기 목에서의 외부 보정길이
- d_v : 공기의 점성경계층두께(viscous boundary layer thickness)
- ζ_s : ρc 로 정규화된 다공성 스크린의 임피던스
($\zeta_s = r_s + j\chi_s$)
- R_f : 다공성 스크린의 유동저항(flow resistance)
- m : 다공성 스크린의 단위면적당 질량
- L_1 : 공동 입구에서 미세철망까지의 거리
- ζ_h : ρc 로 정규화된 공명기의 입구 임피던스
($\zeta_h = \zeta_{neck} + \zeta_c$)
- ζ_{neck} : 공명기 입구 임피던스에서 공명기 목 관련 성분
- ζ_c : 공명기 입구 임피던스에서 공명기 공동 관련 성분 ($\zeta_c = r_c + j\chi_c$)

1. 서론

저주파수 소음제어로 널리 사용되는 헬름홀츠 공명기는 공명주파수 부근에서 매우 높은 흡음성능을 보이거나 공명주파수를 벗어난 주파수영역에서는 그 성능이 현저히 떨어지는 문제점을 가지고 있다.⁽¹⁾ 이러한 헬름홀츠 공명기의 좁은 주파수대역폭을 넓히기 위해서는 공명기 입구에서의 리지스턴스를 증가시켜야 하는데 이는 천이나 철망과 같은 매우 얇은 다공성 스크린을 공명기 입구에 설치하는 방법으로 구현될 수 있다. 이러한 다공성 스크린에 의한 영향은 Ingard와 Lyon⁽²⁾에 의해 이론적으로 연구되었으나 스크린을 강체로 가정함으로써 유연한 스크린에서 발생하는 질량효과를 반영하지 못하였다.

본 논문에서는 유연한 다공성 스크린을 가진 헬름홀츠 공명기의 흡음특성에 대하여 다루고자 한다. 이를 위하여 먼저 공동의 크기보다 매우 얇고 매우 작은 격자구멍을 가진 미세철망(wire mesh)을 다공성 스크린으로 사용하여 실제 공명기에 설치하고, 미세철망의 특성에 따른 공명기의 흡음률 변화를 예측하고자 한다. 또한 유연한 다공성 스크린의 이론모델을 적용하여 흡음률에 미치는 다공성 스크린의 영향을 예측하고 실험결과와 비교해본다. 마지막으로 다공성 스크린의 효과를 적극적으로 활용하여 헬름홀츠 공명기의 흡음특성을 향상시키는 방법에 대하여 생각해 본다.

* 정회원, 한국기계연구원 음향연구그룹
E-mail : srkim@kimm.re.kr
Tel : (042) 868-7466, Fax : (042) 868-7440

** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

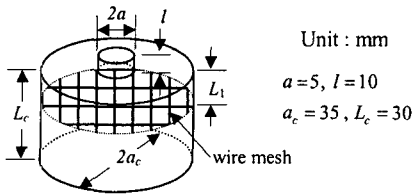


Fig. 1. Helmholtz resonator loaded with a wire mesh

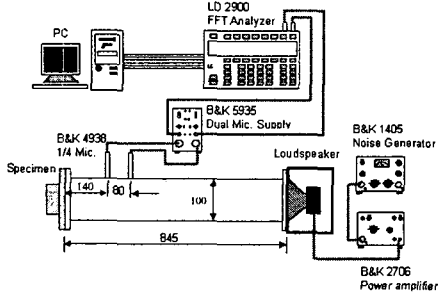


Fig. 2. Experimental setup (unit: mm)

Table 1. Properties of the installed wire mesh.

Name	100Mesh	200Mesh	400Mesh
R_f (ralys)	10.6	16.7	39.6
m (kg/m ²)	0.458	0.247	0.174

2. 다공성스크린에 의한 흡음률변화계측

2.1 실험장치 및 시편

Fig. 1~2는 계측에 사용된 공명기 구조와 계측 장비의 구성도를 보여주고 있다. 시편은 10mm 두께의 알루미늄 패널에 실린더형 목과 공동을 가지는 헬름홀츠 공명기가 삽입되어 있는 구조이며, 공동내부에는 별도의 알루미늄 원형링에 접촉하여 삽입된 미세철망이 있다. Table 1은 사용된 미세철망들의 유동저항과 단위면적당 질량을 보여주고 있다. 실험은 임피던스 튜브를 이용한 전달함수법⁽³⁾에 따라, 미세철망의 종류와 설치위치에 따른 수직입사 흡음률과 표면임피던스를 계측하였다. 이때 시편표면은 1개의 구멍만 존재하는 형태이므로 계측된 표면임피던스는 공명기의 입구 임피던스를 시편표면의 공극률(사각덕트 단면적에 대한 공명기 입구면적의 비)로 나눈 것과 같다.⁽⁴⁾

2.2 실험결과

Fig. 3~4는 미세철망의 설치위치에 따른 수직입사 흡음률과 표면임피던스의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 미세철망의 종류에 관계없이 미세철망의 설치위치가 공동 입구에서 멀어질수록 흡

음률의 피크값은 점차 증가하여 최대값을 가진 후 감소하는 경향을 보이는 반면, 피크폭은 계속적으로 감소하고 있음을 볼 수 있다. 그러나 미세철망의 적절한 선택을 통하여 관심주파수영역에서의 평균흡음률(α_{mean})은 동일하지만 흡음률의 피크값이 더 높게 설계할 수 있음(100mesh와 200mesh의 $L_1=0$ 비교, 관심주파수영역: 250Hz~500Hz)을 확인할 수 있다. 또한 평균흡음률의 최대값도 미세철망에 따라 $L_1=0$ 가 아닌 다른 위치에서 존재할 수 있음(400mesh의 경우 $L_1=2.5$)을 확인할 수 있다. 따라서 일정한 관심주파수영역을 선정할 경우 최적의 미세철망과 설치위치가 존재함을 판단할 수 있다.

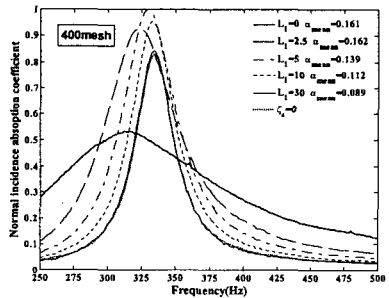
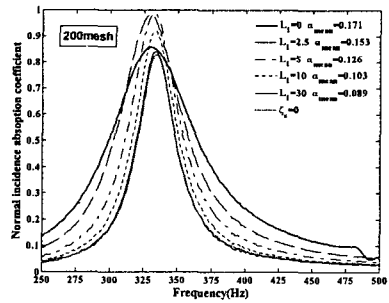
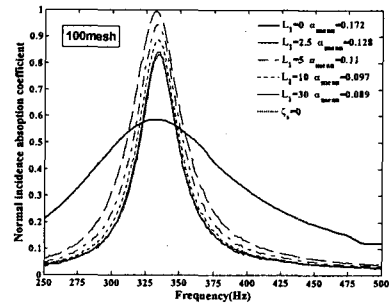


Fig. 3. Normal incidence absorption coefficient of each specimen. The ' $C_s=0$ ' line represents the measured results when the screen is removed and the α_{mean} is the average value of absorption coefficients over the frequency range from 250Hz to 500Hz.

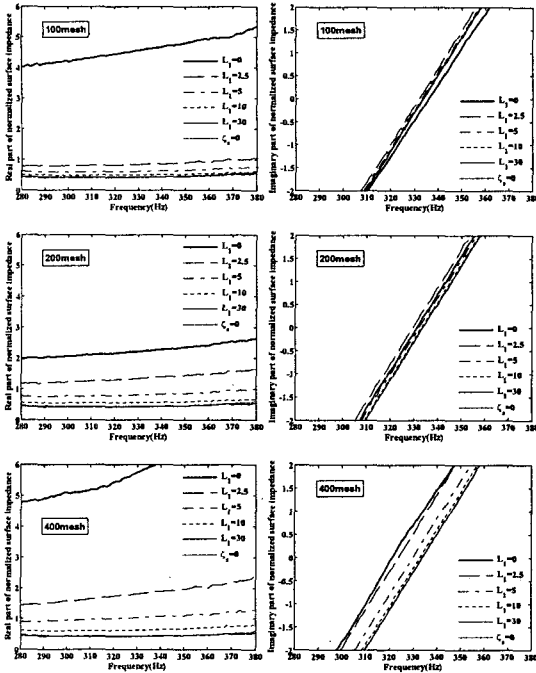


Fig. 4. Measured surface impedance of each specimen. The ' $\zeta_s=0$ ' line is the result when the screen is removed.

표면임피던스의 실수부인 리지스턴스는 미세철망이 공동 입구에서 멀어짐에 따라 점차 줄어들어 공동의 뒷벽($L_1=30$)에 위치한 경우 미세철망이 제거된 경우($\zeta_s=0$)와 일치하는 것을 볼 수 있다. 표면임피던스의 허수부인 리액턴스도 철망의 위치에 따라 변화하는데 표면임피던스의 허수부가 0가 되는 공명주파수는 400Mesh의 경우 최대 13Hz까지 변화하고 있다.

3. 다공성 스크린 영향의 이론적 고찰

3.1 해석시스템의 정의

Fig. 1과 같은 실린더 형태의 목과 공동을 가진 헬름홀츠공명기에 유연한 다공성 스크린이 삽입된 경우를 생각해보자. 여기서 공명기의 모든 표면은 강체이며 크기는 파장에 비하여 매우 작다고 가정한다. 또한 다공성 스크린의 두께는 공동의 길이에 비하여 매우 작아서 무시할 수 있다고 하자.

3.2 공명기의 입구 임피던스

Fig. 1의 공명기 입구에서의 입구 임피던스 ζ_h 를 목과 관련된 임피던스 ζ_{neck} 와 공동과 관련된 임피던스 ζ_c 로 나누고, 외부 보정길이 δ_c 는 ζ_{neck} 에,

내부 보정길이 δ_s 는 ζ_c 에 포함하여 표현하면 다음과 같다. (1,2,5)

$$\zeta_h = \zeta_{neck} + \zeta_c \quad (1)$$

$$\zeta_{neck} = kd_v \left\{ 2 + \frac{l}{a} \right\} + jk \left\{ l + \delta_c + d_v \left(2 + \frac{l}{a} \right) \right\} \quad (2)$$

$$\zeta_c = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{k}{\gamma_n} \cdot \frac{4J_1^2(\beta_n a)}{(\beta_n a_c)^2 J_0^2(\beta_n a_c)} \cdot G_n \quad (3a)$$

$$G_n = \frac{\zeta_s \frac{\gamma_n}{k} \sin(\gamma_n L_2) \cos(\gamma_n L_1) - j \cos(\gamma_n L_c)}{\sin(\gamma_n L_c) + j \zeta_s \frac{\gamma_n}{k} \sin(\gamma_n L_1) \sin(\gamma_n L_2)} \quad (3b)$$

여기서 $\gamma_n = -j\sqrt{\beta_n^2 - k^2}$ 이고 J_0 와 J_1 는 각각 0차와 1차의 제1종 베셀함수이며 β_n 은 $J_1(\beta_n a_c) = 0$ 의 근으로부터 결정된다. $L_2 = L_c - L_1$ 이다.

3.3 다공성 스크린의 영향

식(1)~(3)에서 스크린 임피던스 ζ_s 가 공동관련 임피던스 ζ_c 에만 포함되어 있으므로 다공성 스크린은 공동관련 임피던스만을 변화시킬 것이다. 이러한 임피던스 변화는 3개의 성분으로 나누어 생각할 수 있는데 다음과 같다.

$$\zeta_c = \zeta_{c,p} + \zeta_{c,s} + \zeta_{c,\delta} \quad (4a)$$

$$\zeta_{c,p} = \frac{a^2}{a_c^2} \cdot \frac{\zeta_s \sin(kL_2) \cos(kL_1) - j \cos(kL_c)}{\sin(kL_c) + j \zeta_s \sin(kL_1) \sin(kL_2)} \quad (4b)$$

$$\zeta_{c,s} = \sum_{n=1}^{\infty} F_n \cdot \frac{\zeta_s \sin(\gamma_n L_2) \sin[\gamma_n (L_c + L_1)]}{\Delta} \quad (4c)$$

$$\zeta_{c,\delta} = -j \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k}{\gamma_n} \cdot \frac{F_n}{2\Delta} \times \left\{ \zeta_s^2 \frac{\gamma_n^2}{k^2} \sin^2(\gamma_n L_2) \sin(2\gamma_n L_1) + \sin(2\gamma_n L) \right\} \quad (4d)$$

$$\Delta = \sin^2(\gamma_n L) + \zeta_s^2 \frac{\gamma_n^2}{k^2} \sin^2(\gamma_n L_1) \sin^2(\gamma_n L_2) \quad (4e)$$

$$F_n = \frac{4J_1^2(\beta_n a)}{(\beta_n a_c)^2 J_0^2(\beta_n a_c)} \quad (4f)$$

여기서 $\zeta_{c,p}$ 는 공동내의 평면파성분($n=0$)을, $\zeta_{c,s}$ 는 스크린의 위치에 따라 추가되는 유효 임피던스를, $\zeta_{c,\delta}$ 는 내부 보정길이와 관련된 임피던스 성분 $jk\delta_s$ 을 나타내게 된다. 이는 $\zeta_s=0$ 인 경우 $\zeta_{c,s}$ 는 0이 되고 $\zeta_{c,p}$ 와 $\zeta_{c,\delta}$ 는 각각 유한길이 공동에서의 공동임피던스와 내부 보정길이성분⁽⁶⁾과 동일하게 된다는 사실에서 유추할 수 있다.

한편 스크린 임피던스 ζ_s 는 스크린이 유연하고 순수 저항성 스크린(purely resistive screen)이라고 하면 다음과 같이 표현할 수 있다.⁽⁷⁾

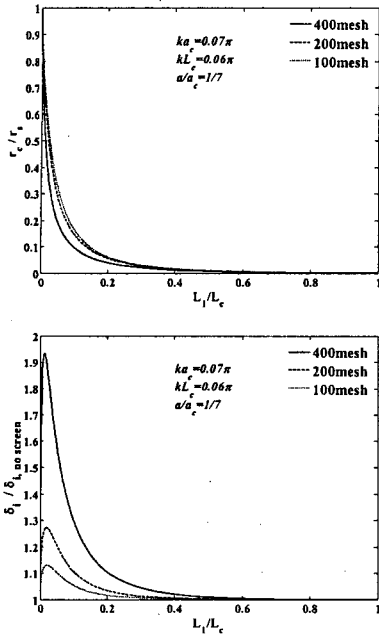


Fig. 5. Resistance r_c of the cavity-related impedance ζ_c and inner end correction δ_i as a function of the distance L_1 of the screen from the aperture. The $\delta_{i,\text{no screen}}$ is the inner end correction of the case without the screen.

$$\zeta_c \rho c = \frac{R_f(\omega m)^2 + j\omega m R_f^2}{R_f^2 + (\omega m)^2} \quad (5)$$

Fig. 5는 다공성 스크린의 위치에 따른 공동 관련 임피던스의 리지스텐스와 내부 보정길이의 변화를 Table 1의 스크린 물성치를 이용하여 계산한 결과를 보여주고 있다. 이 결과는 Fig. 1의 공명기의 경우 343Hz에 해당된다. 그림에서 리지스텐스 r_c 는 다공성 스크린이 공동 입구($L_1=0$)에서 멀어짐에 따라 다공성 스크린의 리지스텐스 r_s 값에서 급격히 감소하여 0의 값으로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 이는 공명기 입구에 다공성 스크린을 설치할 경우 설치위치의 미소변화에도 시스템의 리지스텐스가 매우 민감하게 변화할 수 있음을 나타낸다. 따라서 Fig. 4의 실험결과에서 100mesh보다 200mesh가 더 큰 유동저항을 가짐에도 불구하고, $L_1=0$ 인 경우 더 낮은 리지스텐스가 측정된 원인으로 스크린 설치위치의 미소변화를 추정할 수 있을 것이다.

공명주파수 변화와 관련 있는 내부 보정길이는 다공성 스크린이 공동입구에서 멀어짐에 따라 최대값을 가진 후 점차 줄어들어 다공성 스크린이 없는 경우와 동일한 값으로 된다. 또한 최대값의

크기는 다공성 스크린의 종류에 따라 매우 크게 변화하는데 400Mesh의 경우 $L_1/L_c=0.013$ 에서 다공성 스크린이 없는 경우의 1.94배까지 증가한다. 이러한 원인으로 인하여 앞선 실험결과(Fig. 4)에서 400mesh의 경우가 가장 큰 공명주파수 변화를 보인 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 헬름홀쯔 공명기의 흡음성능을 향상시키기 위하여 설치된 다공성 스크린의 영향을 살펴보았다. 먼저 미세철망이 설치된 실제 공명기에 대한 실험결과로부터 미세철망의 종류와 설치위치에 따른 흡음률의 변화를 관찰하였다. 또한 흡음률 변화의 원인을 확인하기 위하여 미세철망을 유연한 다공성 스크린으로 가정하고 공동에서의 임피던스 변화를 이론적으로 고찰하였다. 흡음률과 관련이 있는 시스템의 리지스텐스는 다공성 스크린이 공동의 입구근처에 설치되었을 때 매우 급격하게 변화하였으며 다공성 스크린은 내부 보정길이를 증가시켜 공명주파수를 낮추는 효과가 있음을 확인하였다.

따라서 적절한 다공성 스크린을 사용하여 관심 주파수 영역에서의 최대 흡음률을 얻을 수 있으나 다공성 스크린 설치 시 각별한 주의가 필요로 한다.

후기

본 논문은 교육인적자원부의 BK21사업에 의한 연구지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- (1) Uno Ingard, 1953, "On the theory and design of acoustic resonators," J. Acoust. Soc. Am., 25, pp. 1037~1061.
- (2) Uno Ingard and Richard H.Lyon, 1953, "The impedance of a resistance loaded Helmholtz resonator," J. Acoust. Soc. Am., 25(5), pp. 854~857.
- (3) ISO 10534-2, 1998, Acoustics-Determination of Sound Absorption coefficient and Impedance in Impedance Tubes, Part 2: Transfer-Function Method.
- (4) C. Zwicker and C. W. Kosten, 1949, Sound absorbing material, Elsevier Publishing Co., Inc., Chap.7.
- (5) L.L. Beranek and I.L. Ver, 1992, Noise and Vibration control engineering, John Wiley & Sons, Inc., Chap. 8
- (6) R. C. Chanaud, 1994, "Effects of geometry on the resonance frequency of Helmholtz resonators," J. of Sound and Vibration, 178, pp. 337~348.
- (7) K. U. Ingard, 1994, Notes on Sound Absorption technology, Noise control foundation, Chap.1.