

# 헬름홀쯔 공명기에서 외부로의 누출 External Leakage on Helmholtz Resonators

이 일 재†  
Iljae Lee

(Received May 27, 2013 ; Revised June 27, 2013 ; Accepted July 11, 2013)

**Key Words** : Leakage(누출), Helmholtz Resonator(헬름홀쯔 공명기), Transmission Loss(투과손실)

## ABSTRACT

The effect of external leakage on the acoustic performance of Helmholtz resonators is experimentally and numerically investigated. The transmission loss of the Helmholtz resonator with a circular perforated hole is measured by using an impedance tube setup. The experimental results are then compared with one-dimensional analytical and three-dimensional numerical results. As the size of the hole increases, the peak of the transmission loss shifts to higher frequency, especially for the holes on the cavity. While the transmission loss is almost independent of the location of the hole on the cavity, the impact of the hole location on the neck on the transmission loss is not negligible. The results show that one-dimensional analytical method can predict the overall trends, whereas three-dimensional numerical method is necessary for more accurate predictions.

## 1. 서 론

헬름홀쯔 공명기(Helmholtz resonator)는 저주파에서 좋은 소음저감 성능으로 다양한 분야에서 사용되고 있으며, 이에 대한 연구도 다양하고 심도 있게 진행되어 왔다. 이 중에서 헬름홀쯔 공명기의 기본 구성 요소인 공동(cavity)과 목(neck)의 형상이 소음저감 성능에 미치는 영향에 대한 연구가 주를 이루고 있다<sup>(1-7)</sup>. 또한 소음저감 성능을 향상시키기 위해서 복수의 공명기를 사용한 연구도 진행되어 왔다<sup>(8,9)</sup>.

이러한 연구에서 공명기는 일반적으로 강체로 이루어지고 완전한 기밀이 되어 있다고 가정한다. 하지만 배기계에서 응축수의 배출이나 불량한 용접 등

에 의하여 누출(leakage)이 발생할 수 있다. 또한 공동이 목뿐만 아니라 다른 경로를 통해서 주덕트(main duct) 등 다른 부분과 연결되어 있을 수 있기 때문에 누출에 대한 영향을 파악할 필요성이 있다.

누출이 소음기의 성능에 미치는 영향에 대한 연구는 비교적 최근에 시작되었다. 엔진 배기계 머플러에 존재하는 헬름홀쯔 공명기에 대한 연구가 수행되었는데, 5% 미만의 적은 누출이 소음저감 성능을 상당히 저해한다는 실험결과를 보여주고 있다<sup>(10)</sup>. 해석적인 방법은 제시하지 않았지만, 적은 양의 누출에도 공진주파수가 이동하여 나타난 결과로 추정된다. 이후 누출에 대한 체계적인 연구가 진행되었는데, 임피던스튜브를 사용한 실험과 3차원 수치적인 방법을 이용하여 헬름홀쯔 공명기에서 누출의 영향을 보여주고 있다<sup>(11,12)</sup>.

† Corresponding Author ; Member, Department of Mechanical Engineering, Chonbuk National University  
E-mail : leeij@jbnu.ac.kr  
Tel : +82-63-270-2319, Fax : +82-63-270-2315

‡ Recommended by Editor Myung Jun Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

두 연구 모두 투과손실(transmission loss)을 사용하여 헬름홀쯔 공명기의 내부에 존재하는 격벽에서 누출의 영향에 대한 연구를 수행하였으며, 그 결과는 모두 누출의 양이 증가할수록 공진주파수가 고주파로 이동하고 투과손실의 최대값은 감소하는 경향을 보여 주었다. 하지만 이러한 내부의 유출은 그 주위의 환경에 따라서 영향을 받기 때문에 누출의 순수한 영향을 보여주기 못했다.

최근에는 확장관(expansion chamber), 헬름홀쯔 공명기, 1/4파장관(quarter wave resonator)에서 외부로의 누출이 투과손실에 미치는 영향에 대한 연구가 진행되었다<sup>(13)</sup>. 확장관에서는 저주파수 영역에서 누출의 영향이 큰 것으로 나타났고, 1/4파장관에서는 누출의 위치에 따라서 그 특성이 달라지는 것으로 나타났다. 헬름홀쯔 공명기에 대한 연구에서는 공진주파수의 이동과 저주파수에서 투과손실이 증가한다는 결과를 보여 준다. 하지만 누출이 공동에만 한정되었고 1차원 해석방법만을 사용하여 그 정확도에 대한 평가가 필요하다.

이 연구의 목적은 헬름홀쯔 공명기의 공동과 목에 존재하는 외부로의 누출이 소음저감 성능에 미치는 영향을 연구하는 것이다. 실험적인 방법, 1차원 해석방법, 3차원 수치적 방법을 사용하여 누출의 다양한 위치와 크기에 대한 영향을 파악하고자 하였다. 서론에 이어서 2장에서는 1차원 해석적 방법과 3차원 수치적 방법을 소개하고 3장에서는 실험적 결과와 예측에 의한 결과를 비교하였다. 마지막으로 연구의 결론이 4장에 요약되었다.

## 2. 이 론

Fig. 1은 전형적인 헬름홀쯔 공명기를 보여주고 있다. 공동과 목으로 구성된 공명기는 주덕트와 연결되어 있다. 이 연구에서는 목, 공동, 주덕트 모두 원형 단면적(S)을 갖고 있으며 Fig. 1과 같이 다양한 위치에 원형의 천공이 위치한다. 밀 첨자 *c*와 *n*은 각각 공동(cavity)과 목(neck)을 의미하며, *i*와 *out*은 각각 입구(inlet)와 출구(outlet)를 나타낸다.

### 2.1 일차원 해석적 방법

헬름홀쯔 공명기는 주로 저주파수 영역에서 사용되기 때문에 소음저감 성능을 예측하기 위하여 1차원

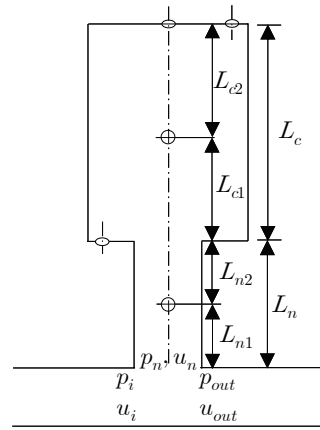


Fig. 1 Schematic of Helmholtz resonator with leakage holes

해석법이 사용될 수 있다. 헬름홀쯔 공명기는 주덕트의 옆(side)에 부착되기 때문에, 입구와 출구의 관계를 나타내는 전달행렬(transfer matrix)은 식 (1)과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} p_i \\ u_i \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_{out} \\ u_{out} \end{Bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{s_n}{s_m} \frac{1}{Z_n} & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_{out} \\ u_{out} \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 밀 첨자 *m*은 주덕트(main duct)를 의미한다. *p*와 *u*는 각각 음압(sound pressure)과 입자속도(particle velocity)를 나타내며, 목에서 임피던스 *Z<sub>n</sub>*은 *p<sub>n</sub>*과 *u<sub>n</sub>*의 비로 정의된다. *Z<sub>n</sub>*은 공명기의 형태와 천공의 위치에 따라서 결정되며, 이를 이용하여 식 (2)와 같이 전달행렬의 원소를 사용하여 투과손실을 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} TL &= 20 \log_{10} \left| \frac{1}{2} \left( T_{11} + \frac{1}{Z_0} T_{12} + Z_0 T_{21} + T_{22} \right) \right| \\ &= 20 \log_{10} \left| \frac{1}{2} \left( 1 + Z_0 \frac{s_n}{s_m} \frac{1}{Z_n} + 1 \right) \right| \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 *Z<sub>0</sub>*은 공기의 특성임피던스이다. 천공의 위치에 따라서 *Z<sub>n</sub>*을 계산방법이 다음에 정리되어 있다.

- (1) 천공이 공동의 윗면(cavity-top)에 있을 경우 천공이 공동의 윗면에 있을 경우, 식 (3)과 같이 목, 목과 공동 사이의 면적변화, 공동에 대한 전달

행렬을 곱한 결과를 [TA]로 나타낼 수 있다<sup>(13)</sup>.

$$\begin{aligned}
 [TA] &= \begin{bmatrix} \cos kL_n & iZ_0 \sin kL_n \\ i\frac{1}{Z_0} \sin kL_n & \cos kL_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{S_c}{S_n} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \cos kL_c & iZ_0 \sin kL_c \\ i\frac{1}{Z_0} \sin kL_c & \cos kL_c \end{bmatrix} \quad (3) \\
 &= \begin{bmatrix} TA_{11} & TA_{12} \\ TA_{21} & TA_{22} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

여기서  $k$ 는 파수(wave number)를 나타낸다. 공동의 윗면에 위치하는 천공을 포함한 경계조건을 적용하면 식(3)의 원소를 사용하여 식(4)와 같이  $Z_n$ 을 구할 수 있다.

$$Z_n = \frac{TA_{21}Z_h \frac{S_c}{S_h} + TA_{22}}{TA_{11}Z_h \frac{S_c}{S_h} + TA_{12}} \quad (4)$$

여기서 아래 첨자  $h$ 는 천공(hole)을 의미하며,  $Z_h$ 는 천공의 임피던스이다.

(2) 천공이 공동의 몸체(cavity-side)에 있을 경우

천공이 공동의 몸체에 있을 때는 천공의 임피던스가 공동의 중간에 고려되며 그 결과는 식(5)와 같이 나타낼 수 있다<sup>(13)</sup>.

$$\begin{aligned}
 [TB] &= \begin{bmatrix} \cos kL_n & iZ_0 \sin kL_n \\ i\frac{1}{Z_0} \sin kL_n & \cos kL_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{S_c}{S_n} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \cos kL_{c1} & iZ_0 \sin kL_{c1} \\ i\frac{1}{Z_0} \sin kL_{c1} & \cos kL_{c1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{S_h}{S_c} \frac{1}{Z_h} & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \cos kL_{c2} & iZ_0 \sin kL_{c2} \\ i\frac{1}{Z_0} \sin kL_{c2} & \cos kL_{c2} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} TB_{11} & TB_{12} \\ TB_{21} & TB_{22} \end{bmatrix} \quad (5)
 \end{aligned}$$

공동의 윗면에서 입자속도가 0이라는 강체경계조건(rigid boundary)을 적용하면 식(5)의 원소를 이용하여 식(6)과 같이  $Z_n$ 을 구할 수 있다.

$$Z_n = \frac{TB_{21}}{TB_{11}} \quad (6)$$

(3) 천공이 목에 있을 경우

천공이 목에 있을 때는 천공의 임피던스가 목의 중간에 고려되며 그 결과는 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 [TD] &= \begin{bmatrix} \cos kL_{n1} & iZ_0 \sin kL_{n1} \\ i\frac{1}{Z_0} \sin kL_{n1} & \cos kL_{n1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{S_h}{S_n} \frac{1}{Z_h} & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \cos kL_{n2} & iZ_0 \sin kL_{n2} \\ i\frac{1}{Z_0} \sin kL_{n2} & \cos kL_{n2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{S_c}{S_n} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \cos kL_c & iZ_0 \sin kL_c \\ i\frac{1}{Z_0} \sin kL_c & \cos kL_c \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} TD_{11} & TD_{12} \\ TD_{21} & TD_{22} \end{bmatrix} \quad (7)
 \end{aligned}$$

공동의 윗면에서 입자속도가 0이라는 강체경계조건(rigid boundary)을 적용하면 식(7)의 원소를 이용하여 식(8)과 같이  $Z_n$ 을 구할 수 있다.

$$Z_n = \frac{TD_{21}}{TD_{11}} \quad (8)$$

1차원 해석적인 방법을 사용하여 더 정확한 예측을 위해서 목의 물리적 길이에 더하여 식(9)와 같이 길이보정(end correction)을 추가할 수 있다<sup>(5)</sup>.

$$\delta = 0.85 \left( \frac{d_n}{2} \right) \left( 1 - 1.25 \frac{d_n}{d_c} \right) \text{ for } \frac{d_n}{d_c} < 0.4 \quad (9)$$

여기서  $d_n$ 과  $d_c$ 는 목(neck)과 공동(cavity)의 직경을 나타낸다.

### 2.2 3차원 경계요소법

1차원 해석방법은 단순한 형태의 소음기에 대하여 비교적 간단한 계산으로 천공의 영향을 예측할 수 있다. 특히, 헬름홀츠 공명기가 저주파에서 소음을 저감할 목적으로 사용되는 경우에는 1차원 해석방법의 사용이 가능하다. 하지만 형상이 복잡하거나 정확한 예측을 필요로 하는 상황에서는 3차원 해석을 필요로 한다. 이 연구에서는 3차원 경계요소법(boundary element method)을 사용하였다<sup>(14)</sup>. 수치적분 등 수학적 방법을 사용하여 식(10)과 같이 음압과 입자속도의 관계를 나타내는 행렬을 구할 수

있다.

$$\begin{Bmatrix} p_i \\ p_{out} \\ p_h \\ p_0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_{out} \\ u_h \\ u_0 \end{Bmatrix} \quad (10)$$

여기서 아래첨자  $i, out, h, 0$ 은 각각 입구(inlet), 출구(outlet), 천공(hole), 강체(rigid boundary)를 나타낸다. 천공의 임피던스( $Z_h$ )는 다음 식 (11)과 같이 천공에서의 음압과 입자속도의 관계를 나타낸다.

$$p_h = Z_h u_h \quad (11)$$

식 (11)을 식 (10)에 대입하고, 강체에서 입자속도가 0이라는 경계조건을 적용하면 식 (12)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} p_i \\ p_{out} \\ 0 \\ p_0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} - Z_h & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_{out} \\ u_h \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (12)$$

식 (12)를 정리하면 식 (13)과 같이 입구와 출구에서 음압과 입자속도의 관계를 나타내는 임피던스 행렬을 구할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} p_i \\ p_{out} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} TI_{11} & TI_{12} \\ TI_{21} & TI_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_{out} \end{Bmatrix} \quad (13)$$

여기서

$$\begin{aligned} TI_{11} &= M_{11} - M_{13}(M_{33} - Z_h)^{-1}M_{31} \\ TI_{12} &= M_{12} - M_{13}(M_{33} - Z_h)^{-1}M_{32} \\ TI_{21} &= M_{21} - M_{23}(M_{33} - Z_h)^{-1}M_{31} \\ TI_{22} &= M_{22} - M_{23}(M_{33} - Z_h)^{-1}M_{32} \end{aligned} \quad (14)$$

식 (13)과 (14)로 주어진 임피던스 행렬을 변형하여 전달행렬을 얻을 수 있고, 이를 이용하여 식 (2)와 같이 투과손실을 계산할 수 있다.

### 2.3 천공의 임피던스

다양한 형태의 누출이 존재할 수 있지만, 이 연구에서는 원형의 천공이 누출로 사용되었다. 1차원 해석과 3차원 수치적 방법에서 천공의 음향학적 특성인 임피던스가 사용된다. 천공의 임피던스에 대한 많은 연구가 수행되었는데, 이 연구에서는 식 (15)와

같이 제시된 임피던스를 사용하였다<sup>(15)</sup>.

$$Z_h = \rho_0 \left[ \sqrt{8\nu\omega} \left( 1 + \frac{t}{D_h} \right) + \frac{(\omega D_h)^2}{16c_0} \right] + i \left[ \omega\rho_0 \left( t + \frac{8}{3\pi} D_h \right) + \left( 1 + \frac{t}{D_h} \right) \sqrt{8\nu\omega} \right] \quad (15)$$

여기서  $D_h$ 와  $t$ 는 각각 천공의 직경과 벽의 두께이며,  $\nu$ 는 운동량 점성,  $\omega$ 는 주파수를 나타낸다.

## 3. 결 과

### 3.1 실험장치

소음기의 투과손실을 측정하기 위해서 Fig. 2에 나와 있는 임피던스 튜브를 사용하였다<sup>(16)</sup>. 이 장치는 한 쪽 끝에는 증폭기와 연결된 스피커가 설치되어 랜덤노이즈 발생하는데, 비선형 효과가 나타나지 않도록 관내부에서 소리의 크기를 100 dB 정도로 유지하였다. 측정 대상 공명기의 전과 후에 각각 2개의 마이크로폰이 4 cm 간격으로 장착되어 있다. 마이크로폰에서 얻어진 신호는 신호수집장치(DAQ)를 통해서 디지털 신호로 변환되고, PC에 설치된 LabVIEW 프로그램에 의해서 주파수영역에서 투과손실을 계산한다. 노이즈에 의한 영향을 감소하기 위하여 각 측정대상에 대하여 100회 측정의 평균을 사용하였다. 측정 대상의 후부에서 무반사단(anechoic termination)을 만들기 위하여 흡음재로 채워진 약 4 m 길이의 파이프를 사용하였다.

실험에 사용된 헬름홀츠 공명기는 실제 머플러 등에 사용되는 두께와 유사하도록 2 mm 두께의 강판으로 제작하였다. 공동의 길이( $Lc$ )와 직경( $dc$ )은 각각 10.1 cm와 14.9 cm이며, 목의 길이( $Ln$ )는 10.4 cm이다. 주 덕트의 직경( $dm$ )과 목의 직경( $dn$ )은 공통

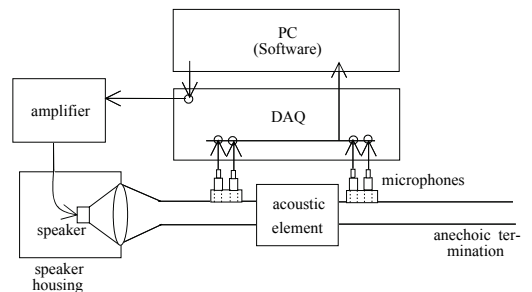


Fig. 2 Schematic of an impedance tube setup

으로 4.8 cm이다. 목에 존재하는 천공에 대하여 upper인 경우  $Ln_2=3.0$  cm, lower인 경우  $Ln_2= 10.0$  cm이다.

### 3.2 실험결과와 예측결과

Fig. 3은 다양한 위치와 크기의 천공을 갖는 헬름홀츠 공명기에 대한 투과손실의 측정값을 보여주고 있다. 천공이 없는 상태에서 공진주파수는 152 Hz이지만, 누출에 의하여 공진주파수는 고주파수 영역으로 이동한다. 같은 크기의 천공이라도 공동에 위치한 경우에 더 많이 이동하여 공동에 직경 10 mm의 천공이 존재하면 공진주파수가 188 Hz까지 증가한다. 이러한 주파수 이동으로 인하여 목표주파수인 152 Hz에서 투과손실이 32 dB에서 4.4 dB까지 떨어진다. 공동에 직경 5 mm의 천공이 존재하는 것은 목에 직경 10 mm의 천공이 존재하는 것과 거의 비슷한 경향을 보이고 있다. 특이한 점은 누출로 인하여 0 Hz에 가까운 초저주파수에서 공진현상으로 인한 피크가 발생하며, 그 높이는 누출의 크기가 클수록 더 높아진다. 이는 헬름홀츠 공명기뿐만 아니라 확장관이나 1/4파장관에서도 나타나는 현상<sup>(13)</sup> 천공은 새로운 목으로 역할을 하며 외부의 공간이 무한히 큰 공동역할을 해서 공진주파수가 0 Hz에 가까운 새로운 헬름홀츠 공명기가 추가된 것으로 해석할 수도 있다.

Fig. 4는 실험을 통해서 공동에 위치한 천공이 투과손실에 미치는 영향을 보여주고 있다. 투과손실은 공동에 존재하는 누출의 크기에만 영향을 받고, 위치에 따른 영향은 거의 없다. 직경이 5 mm인 경우에는 거의 모든 위치에서 168 Hz에 공진주파수가 존재하고, 직경이 10 mm인 세 곳의 위치에서는 188 Hz로 동일한 공진주파수를 보여 준다.

Fig. 5는 천공이 없는 경우와 천공이 공동에 존재하지만 위치와 크기가 다른 경우에 대한 투과손실의 측정값과 1차원 해석적 방법에 의한 예측값을 보여주고 있다. 1차원 예측값은 실험결과와 비슷하게 누출에 의한 공진주파수의 이동을 보여주고 있다. 1차원 해석결과는 0 Hz 근처에서 높은 투과손실을 예측하고 있는데, 천공의 직경이 클수록 더 높아진다. 하지만 실제 측정값은 이러한 높은 값을 보이지 않는데, 이는 실험장치에서 저주파수측 갈수록 측정대상의 후반에서 반사율이 증가하고 파장이

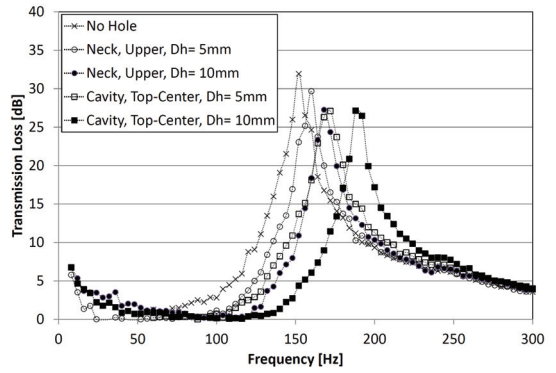


Fig. 3 Measured transmission loss of Helmholtz resonators with a leakage hole

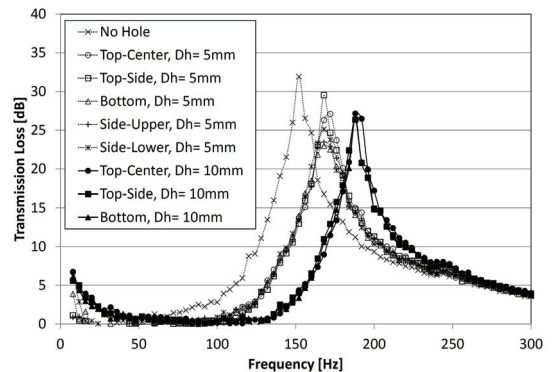


Fig. 4 Measured transmission loss of Helmholtz resonators with a leakage hole on the cavity

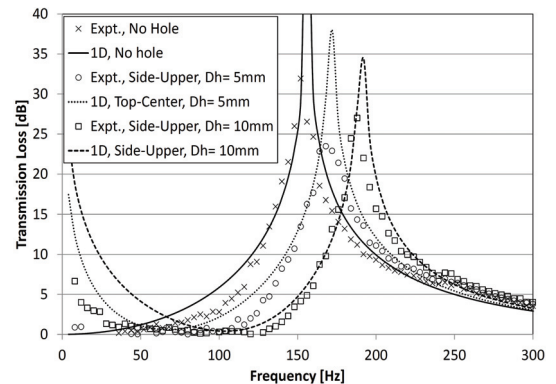


Fig. 5 Comparisons of measured and 1D analytically predicted transmission losses of Helmholtz resonators with a leakage hole on the cavity

길어짐에 따라서 마이크로폰 사이의 거리가 충분하지 못하기<sup>(16)</sup> 때문으로 생각된다.

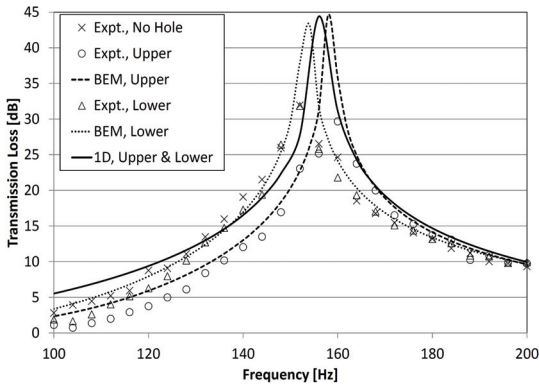


Fig. 6 Comparisons of measured and 1D analytically predicted transmission losses of Helmholtz resonators with a leakage hole on the neck

Fig. 6은 목에 위치한 천공이 투과손실에 미치는 영향을 보여주고 있다. Fig. 4에 나와 있는 바와 같이 공동에서는 천공의 위치에 영향을 받지 않지만, 목에서는 누출의 크기뿐만 아니라 위치에 의해서도 영향을 받는다. 천공이 목의 위쪽에 위치하면 공진 주파수의 이동이 더 크다. 1차원 해석결과는 이러한 목에서 위치에 대한 영향을 보여주지 못하지만, 3차원 BEM을 이용한 해석에서는 Fig. 6과 같이 그 차이를 보여준다. 따라서 목에 천공이 위치할 때 더 정확한 예측을 위해서는 3차원 수치적 방법을 사용할 필요가 있다.

#### 4. 결 론

헬름홀쯔 공명기에서 외부로의 누출이 소음저감 성능에 미치는 영향에 대한 연구를 실시하였다. 공동과 목의 다양한 위치에서 크기가 다른 천공이 투과손실에 미치는 영향을 파악하기 위하여 실험적인 방법과 해석적인 방법을 사용하였다. 1차원의 해석 방법과 3차원 경계요소법을 사용하여 예측된 결과를 임피던스튜브를 이용하여 측정된 투과손실과 비교하였다.

천공의 크기가 증가함에 따라서 공진주파수가 고주파수 영역으로 이동하는데, 그 정도는 천공의 크기와 위치에 따라서 달라진다. 또한 천공의 존재는 0 Hz에 가까운 아주 낮은 주파수에 새로운 공진현상이 발생하는데, 이는 아주 큰 공동(외부 공기)와 작은 목(천공)을 갖는 또 하나의 헬름홀쯔 공명기가

존재하는 것으로 생각할 수도 있다. 이러한 추정을 뒷받침할 검증이 추후 필요하다.

천공의 크기가 증가할수록 공진주파수는 더 고주파수영역으로 이동한다. 또한 같은 크기라도 공동에 존재하는 천공이 목에 존재하는 것에 비하여 더 큰 영향을 미친다. 공동에 존재하는 같은 크기의 천공은 그 위치가 변하여도 거의 동일한 효과를 보여준다. 하지만 목에 존재하는 천공은 공동에 가까우면 그 영향이 조금 더 커지는 것을 확인할 수 있다.

1차원 해석방법을 이용하여 간단하게 천공의 효과에 대하여 계산을 할 수 있어서 효율적이다. 하지만 목에 천공이 존재하는 경우 위치에 의한 영향에 대하여 정확한 예측을 위해서는 3차원 해석방법을 사용할 필요가 있다.

#### 후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2010-0025498).

#### References

- (1) Ingard, U., 1953, On the Theory and Design of Acoustic Resonators, Journal of Acoustical Society of America, Vol. 25, No. 6, pp. 1037~1061.
- (2) Chanaud, R. C., 1994, Effects of Geometry on the Resonance Frequency of Helmholtz Resonators, Journal of Sound and Vibration, Vol. 178, No. 3, pp. 337~348.
- (3) Haa, S. T. and Kim, Y.-H., 1994, The Limitation and Applicability of Helmholtz Resonator, Regarding as Equivalent Single-degree of Vibration System, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 4, No. 2, pp. 209~219.
- (4) 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.
- (5) Selamet, A., Radavich, P. M., Dickey, N. S. and Novak, J. M., 1997, Circular Concentric Helmholtz Resonator, Journal of Acoustical Society of America, Vol. 101, No. 1, pp. 41~51.

- (6) Selamet, A. and Ji, Z. L., 2000, Circular Asymmetric Helmholtz Resonators, *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 107, No. 5, pp. 2360~2369.
- (7) Song, H.-Y. and Lee, D.-H., 2008, A Study on the Acoustic Absorption Performance of a Helmholtz Resonator, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 18, No. 1, pp. 71~79.
- (8) 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.
- (9) Xu, M. B., Selamet, A. and Kim, H., 2010, Dual Chamber Resonator, *Applied Acoustics*, Vol. 21, pp. 822~829.
- (10) Bemman, Y., Frei, T., Jones, C. and Keck, M., 2005, Passive Exhaust Systems with Cylinder Deactivation, SAE 2005-01-2351.
- (11) Selamet, A., Kim, H. and Huff, N. T., 2009, Leakage Effect in Helmholtz Resonators, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 126, No. 3, pp. 1142~1150.
- (12) Lee, I.-J., 2009, Effect of Leakage on the Noise Reduction of Helmholtz Resonator, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 19, No. 6, pp. 634~640.
- (13) Lee, I. J., Jeon, K. and Park, J., 2013, The Effect of Leakage on the Acoustic Performance of Reactive Silencers, *Applied Acoustics*, Vol. 74, No. 4, pp. 479~484.
- (14) Ji, Z. L., Ma, Q. and Zhang, Z., 1994, Application of the Boundary Element Method to Predicting Acoustic Performance of Expansion Chamber Mufflers with Mean Flow, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 173, No. 1, pp. 57~71.
- (15) Beranek, L. L. and Ver, I. L., 1992, *Noise and Vibration Control Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- (16) ASTM E1050-98, 1998, Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System, American Society for Testing and Materials, pp. 951~961.



**Iljae Lee** received his Ph.D. from the Department of Mechanical Engineering at Ohio State University. He is currently an assistant professor at Chonbuk National University. His research interests are in automotive NVH.