

# 통과하는 유동이 존재하는 천공요소의 음향 임피던스의 무차원화에 관한 연구

## Non-dimensional Analysis of the Acoustic Impedance of Perforated Elements with Bias Flow

이 성 현\* · 이 정 권\*\* · K. S. Peat\*\*\*

Seong-Hyun Lee · Jeong-Guon Ih · K. S. Peat

**Key Words:** Impedance (임피던스), Perforates (천공요소), Bias Flow (통과하는 유동)

### ABSTRACT

천공 요소는 자동차나 공조기 등의 유체기계의 흡/배기계에 널리 사용된다. 천공요소는 일반적으로 유동과 소음이 동시에 존재하는 환경에서 사용되며, 유동 및 음압 레벨의 변화에 의해서 큰 영향을 받게 된다. 천공요소의 임피던스의 변화는 소음기의 음향학적 특성에 영향을 미치게 되므로, 유동이나 음압 조건이 임피던스에 미치는 영향에 대한 연구가 중요하다. 본 연구에서는 통과하는 유동이 존재하는 천공요소의 임피던스를 실험을 통하여 측정하고, 경계요소법을 사용하여 예측하였다. 측정 및 예측된 임피던스를 무차원화 해석을 수행하여 영향을 미치는 인자들을 분석하였다.

### 1. 서론

천공요소는 자동차의 배기 소음기와 제트 엔진의 내부의 안감 (lining)등으로 널리 사용된다. 이러한 천공요소는 유동과 소음이 동시에 존재하는 환경에서 사용되며, 유동의 특성 및 음압의 크기에 따라서 그 음향학적 특성이 변하게 된다. 천공요소의 음향학적 특성이 그것이 사용된 소음기의 특성에 영향을 미치게 되므로 그에 대한 연구가 중요히 진행되고 있다. 일반적으로 천공요소가 접하는 유동은 스치는 유동 (grazing flow)과 통과하는 유동 (bias flow)의 두 가지로 구분할 수 있다.

Lee 등 [1]은 스치는 유동이 존재하는 천공요소의 음향 임피던스를 여러 인자들을 고려하여 측정하고, 실험 모델을 제안하였다. 임피던스의 실수부와 허수부인 레지스턴스와 리액턴스가 Strouhal 수를 이용하여 무차원화 될 수 있다는 것을 보였다. 특정 Strouhal 수 부근에서 레지스턴스가 0 혹은

음수의 값을 나타내는 경향을 밝힌 바 있다. 유속이 증가함에 따라 레지스턴스가 증가하고 리액턴스는 감소하는 경향을 보였다. Salikuddin 등 [2]은 통과하는 유동이 임피던스에 미치는 영향을 실험을 통하여 측정하였다. 유속이 증가하면 레지스턴스가 증가하고, 리액턴스가 감소하는 경향을 보인 바 있다. 음압의 영향에 대한 많은 실험 결과들이 포함되어 있으나, 임피던스에 영향을 미치는 여러 인자들에 대한 고찰은 부족하다.

본 연구에서는 통과하는 유동이 존재하는 천공요소의 음향 임피던스를 실험 및 경계 요소법을 이용하여 측정, 예측하고, 그 결과를 무차원화 해석을 수행하여 분석하고자 한다.

### 2. 임피던스 측정

그림 1 은 통과하는 유동이 존재하는 천공요소의 음향 임피던스 측정을 위한 실험 장치를 보이고 있다. 유동은 압축기를 이용하여 공급하였으며, 유속은 디지털 유량계를 이용하여 측정하였다. 라우드 스피커를 음원으로 사용하였으며, 끝단에서의 반사파에 의한 신호대 잡음비 (S/N ratio) 감소를 막기 위하여 무반사 종단 (anechoic termination) 을 설치하였다. 실험에 사용된 천공 요소의 인자

\* 한국과학기술원 기계공학과 NOVIC 센터  
음향연구실 박사과정  
E-mail: irony@kaist.ac.kr  
Tel: (042) 869-3075, Fax: (042) 869-8220

\*\* 한국과학기술원 기계공학과 교수

\*\*\* Professor, AAE Dept., Loughborough univ., UK

들은 다음과 같다:  $5.6 \leq \sigma \leq 19.6\%$ ,  $4 \leq d \leq 9.4 \text{ mm}$ ,  $1 \leq t \leq 5 \text{ mm}$ . 여기서,  $\sigma$  는 천공율,  $d$  는 천공의 지름,  $t$  는 천공의 두께를 의미한다. 또한 음원에 의한 관 내부의 음압은 약 140 dB 이며, 관 내부에서의 마하 수는 0.0065 에서 0.016 까지 이다. 통과하는 유동의 경우 관 내부에서의 마하 수와 천공 내부에서의 마하 수는 다음과 같은 관계를 갖는다:

$$M_{hole} = \frac{1}{\sigma} M_{duct} \quad (1)$$

여기서,  $M_{hole}$  은 천공 내부에서의 마하 수이고,  $M_{duct}$  는 관 내부에서의 마하 수이다. 관의 수직 방향으로 천공 판을 위치시키고, 천공 판의 상류쪽에 1/4" 마이크로폰을 설치하여 임피던스를 측정하였다. 측정의 오차를 줄이기 위하여 3 개의 마이크로폰을 사용하였다. [3] 천공 판의 뒷부분의 음장이 천공 판을 제거한 후에도 변하지 않는다는 가정 하에, 천공이 존재하는 경우의 표면 임피던스와 천공 판을 제거한 후의 표면 임피던스의 차이 값으로부터 천공 판의 임피던스를 구하였다.

무차원화된 두 가지의 인자로 측정된 임피던스를 나타내기 위하여  $x$  축은 Strouhal 수로 표현하였다:

$$St = \frac{t\omega}{U_c} \quad \text{where } U_c = \frac{1}{2} U_{hole}. \quad (2)$$

스치는 유동의 경우에는 지름과 천공을 지나는 평균 유동 값으로 Strouhal 수를 계산하여 무차원화 하였으나, 본 경우에는 두께와 vortice 의 대류 속도 (convection velocity)를 이용하여 무차원화 하였다. 천공의 임피던스가 일반적으로 유동의 속도와 비례하는 관계를 갖기 때문에,  $y$  축은 하나의 천공에 대한 임피던스를 천공을 통과하는 유속의 마하수로 나눈 값을 사용하였다:

$$\frac{(Z_h)_n}{M_{hole}} = \frac{\sigma Z}{\rho_o c_o} \cdot \frac{\sigma}{M_{duct}} \quad (3)$$

여기서,  $\rho_o$  는 매질의 밀도,  $c_o$  는 매질 내부에서의 음파의 속도,  $Z$  는 천공요소의 임피던스,  $Z_h$  는 천공 하나의 임피던스,  $(Z_h)_n$  은 표준화된 (normalized) 천공 하나의 임피던스이다.

그림 2 는 천공율을 변화시키면서 측정된 임피던스를 보이고 있다. 각각의 천공율에 대하여

0.0065, 0.0098, 0.013, 0.016 의 덕트 내 마하 수 조건에서 측정된 결과이다. 마하 수가 0.1 보다 큰 경우, 비선형성이 나타나는 것을 볼 수 있다. 천공율과 유속의 변화와 관계없이 무차원화가 가능함을 보이고 있다. 그림 3 은 지름을 변화시키며 4 가지 유속에 대해서 측정된 임피던스를 보이고 있다 지름의 변화에 따라 기울기가 변하는 양상을 보이고 있다. 그림 4 는 천공의 두께의 변화에 따른 네 가지 유속에서 측정된 임피던스를 보이고 있다. 두께가 5mm 인 경우에 다른 양상을 보이며, 그 외에는 같은 경향을 보이고 있다.

### 3. 임피던스 예측

Howe [4] 는 통과하는 유동이 존재하는 두께가 없는 무한한 평판 위의 하나의 천공 요소의 임피던스를 Rayleigh Conductivity 를 이용하여 이론적으로 제안한 바 있다. Hughes 와 Dowling [5] 은 Howe 의 이론 모델이 실험값과 유사함을 보였다. 실제적인 적용을 위해서는 두께의 영향을 고려하여야 한다. Jing 과 Sun [6] 은 Howe 가 유도한 지배 방정식을 경계요소법을 이용하여 두께가 있는 천공의 임피던스를 수치적으로 예측하여 실험값과 비교하였다. 하지만 무한한 평판 위의 하나의 천공에 대한 해석이므로 여러 개의 천공이 있는 경우에 대한 적용에 있어서는 한계가 있다. 본 절에서는 천공간의 상호작용을 고려하여 천공 요소의 임피던스를 예측하였다.

그림 5 와 같이 원형 튜브 내부에 두께를 가지는 격벽에 천공요소를 위치시키고, 천공 내부에는 작은 마하 수와 큰 Reynolds 수를 갖는 정상 유동이 존재한다고 가정하였다. 튜브의 입구 및 출구 조건은 균일한 음압 및 속도 조건이라 가정하였다:

$$\begin{aligned} p &= Pe^{j\omega t}, & \text{at inlet surface,} \\ v &= Ve^{j\omega t}, & \text{at outlet surface.} \end{aligned} \quad (4)$$

정상 유동의 마하 수가 작고, 입사 음파의 파장이 천공의 지름에 비하여 매우 크므로 천공 부근의 유동은 비압축성 유동이라 할 수 있다. 점성이나 열전달에 의한 손실은 무시했으며, 점성 효과는

천공의 입구부분에서만 Kutta 조건에 의하여 고려되었다. 따라서 지배 방정식은 비압축성 Euler 식이며, 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$\nabla^2 h = -\nabla \cdot (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{U}_0). \quad (5)$$

여기서,  $\boldsymbol{\omega}$ 는 생성되는 vorticity 의 강도,  $U_0$ 는 평균 유속,  $h$ 는 Bernoulli enthalpy 이다. 평균 유속과 천공의 지름으로 정의되는 Reynolds 수가 크다는 가정 아래 shear layer 가 매우 얇게 형성되게 된다. 불규칙한 vortice 의 강도는 다음과 같다:

$$\boldsymbol{\omega} = \gamma_c \exp\left[j\omega(t-s/U_c)\right] \delta(n_s) \mathbf{k}. \quad (6)$$

식 (5), (6)에서, 축대칭의 Poisson 방정식을 얻을 수 있다:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial h}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 h}{\partial x_1^2} = -\nabla \cdot \left[ \gamma_c U_c \exp\left(-\frac{j\omega s}{U_c}\right) \delta(n_s) \mathbf{n}_s \right]. \quad (7)$$

Half-space Green 함수를 이용하여 식 (7)은 적분식으로 바뀌게 되며, 그림 6 은 적분 면을 나타내고 있다:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} h = & - \int_{x_0} \frac{\partial h}{\partial y} G_h dS - \int_{x_0} h \frac{\partial G_h}{\partial \rho} dS \\ & - \int_{x_1} \left( \frac{\partial h}{\partial y} G_h - h \frac{\partial G_h}{\partial y} \right) dS \quad x_1 < 0, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} h = & \int_{x_0} \frac{\partial h}{\partial y} G_h dS + \int_{x_1} h \frac{\partial G_h}{\partial \rho} dS - \int_{x_2} h \frac{\partial G_h}{\partial y} dS \\ & + \int_{x_2} h \frac{\partial G_h}{\partial \rho} dS + \int_{x_1} \left( \frac{\partial h}{\partial y} G_h - h \frac{\partial G_h}{\partial y} \right) dS \quad (9) \\ & - \int \nabla \cdot \left[ \gamma_c U_c \exp\left(-\frac{j\omega s}{U_c}\right) \delta(n_s) \mathbf{n}_s \right] G_h dV \quad x_1 > 0 \end{aligned}$$

그림 7 은 천공율을 변화시키며 예측한 임피던스를 무차원화 변수를 이용하여 나타낸 것이다. 레지스턴스는 같은 값을 갖으며, 리액턴스는 천공율의 증가에 따라 감소하게 된다. 그림 8 은 지름과 유속을 변화시키면서 예측한 임피던스를 보이고 있다. 레지스턴스는 같은 값을, 리액턴스는 지름의 증가에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다. 그림 9 는 두께, 유속의 변화를 고려하여 예측한 임피던스를 나타낸 것이다. 레지스턴스는 변화없으며, 리액턴스는 두께의 증가에 따라 감소하게 된다.

## 4. 결론

실험을 통하여 측정된 천공요소의 임피던스와 경계요소법을 이용하여 예측한 천공요소의 임피던스를 영향을 미치는 인자들을 이용하여 무차원화 해석을 수행하였다. 두 경우 모두 레지스턴스는 인자들의 변화에 관계없이 같은 값을 갖으며, 리액턴스는 천공율, 지름, 두께 등의 변화에 따라 기울기가 변하는 것을 볼 수 있다. 스치는 유동이 존재하는 천공요소의 임피던스 연구 [1]에서 나타났던 특정 Strouhal 수에서 레지스턴스가 0 부근의 값을 갖는 경향이 나타나는 것을 볼 수 있다. 실험값과 예측값을 비교하여 보면, 레지스턴스는 비슷한 크기의 값을 갖는 것에 비해, 리액턴스는 실험값이 예측값에 비하여 절반 정도의 크기를 갖는다. 이에 대한 분석은 추후에 이루어져야 할 것이다. 본 연구에서는 통과하는 유동이 존재하는 천공요소의 임피던스를 측정 및 예측을 통하여 얻고 그 결과를 무차원화 해석을 수행함으로써 임피던스에 영향을 미치는 인자들을 분석하였다.

## 후 기

본 연구는 BK21 Project 및 NRL 의 일부 지원을 받았습니니다.

## 참 고 문 헌

- (1) S.-H. Lee and J.-G. Ih, "Empirical model of the acoustic impedance of a circular orifice in grazing mean flow," *J. Acoust. Soc. Am.* **114**, 98-113 (2003).
- (2) M. Salijuddin, A. A. Syed and P. Mungur, "Acoustic characteristics of perforated sheets with throughflow in a high intensity noise environment," *J. Sound. Vib.* **169**, 145-177 (1994).
- (3) S.-H. Jang and J.-G. Ih, "On the multiple microphone method for measuring in-duct acoustic properties in the presence of mean flow," *J. Acoust. Soc. Am.* **103**, 1520-1526 (1998).
- (4) M. S. Howe, "On the theory of unsteady high Reynolds number flow through a circular aperture," *Proc R. Soc. Lond. A* **366**, 205-223 (1979).
- (5) I. J. Hughes and A. P. Dowling, "The absorption of sound by perforated linings," *J. Fluid Mech.* **218**, 299-335 (1990).
- (6) X. Jing and X. Sun, "Effect of plate thickness on impedance of perforated plates with bias flow," *AIAA J.* **38**, 1573-1578 (2000).

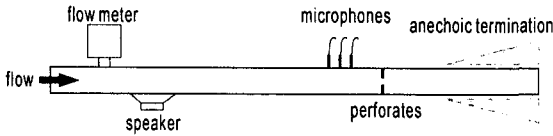


그림 1. 통과하는 유동이 존재하는 경우의 천공요소의 임피던스를 측정하기 위한 실험 장치

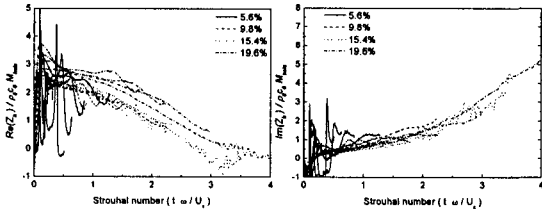


그림 2. 천공율 변화에 따른 임피던스 측정 결과

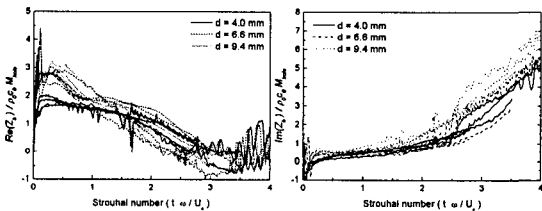


그림 3. 지름의 변화에 따른 임피던스 측정 결과

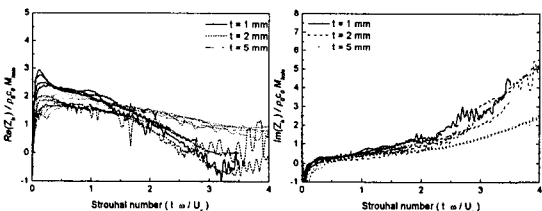


그림 4. 두께의 변화에 따른 임피던스 측정 결과

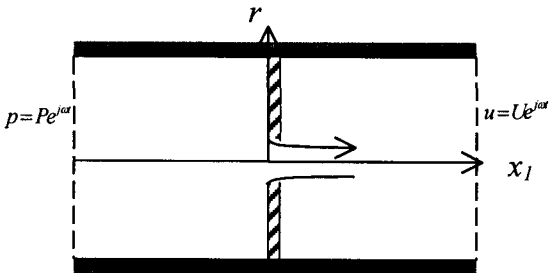


그림 5. 경계요소법에 사용된 튜브 내부의 천공요소 모델

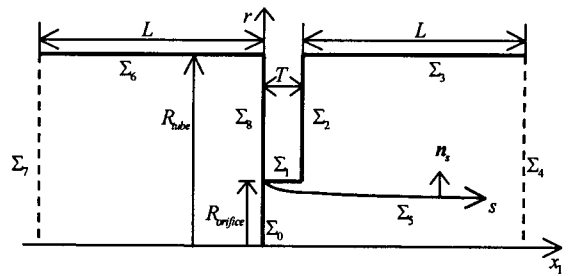


그림 6. 경계요소법에 사용된 적분면

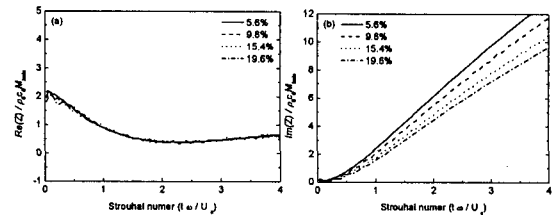


그림 7. 천공율 변화에 따른 임피던스 예측 결과

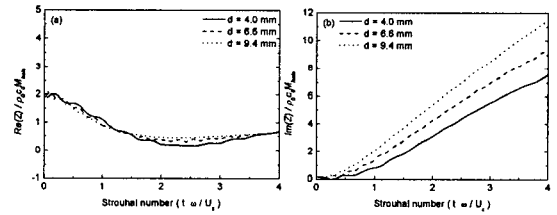


그림 8. 지름의 변화에 따른 임피던스 예측 결과

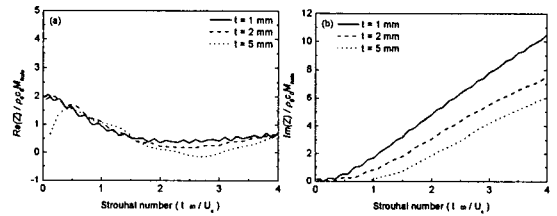


그림 9. 두께의 변화에 따른 임피던스 예측 결과