

다수의 마이크를 이용한 관내 음향 변수의 직접 측정법

°장승호*, 이정권*

(Multiple Microphone Technique for a Direct Measurement of In-duct Acoustical Parameters)

(Seung-Ho Jang, Jeong-Guon Ih)

ABSTRACT

Nowadays, the two microphone method is accepted as the standard as specified in ASTM E1050-90 for measuring in-duct acoustic properties. However, research results on using the least square method with multiple measurement points and broadband excitation have been reported for enhancing the frequency response of the two microphone method. In this paper, the effects of varying the relative measurement positions on errors in the estimation of the acoustic quantities is studied for the multiple microphone method. Both of the theoretical and experimental results show that, among every possible sensor positioning configurations, the equidistant positioning of sensors yields the smallest error within the effective measurement frequency range. In addition, it is noted that the measurement accuracy can be increased and the effective frequency range can be widened by increasing the number of equidistant sensors. Measurement examples are shown and the results support the findings.

1. 서론

덕트 내 음향 변수의 측정에는 정재파비 방법 (standing wave ratio method)과 2-마이크로폰 법이 널리 이용되어 지며 이들 방법들은 각각 ASTM C384-90a⁽¹⁾와 E1050-90⁽²⁾으로 규격화되어 있다. 정재파비 방법은 덕트 내를 움직이는 탐촉자에 의해 정재파비를 알아낸 후 임피던스를 결정하는 방법으로서, 순음 (pure tone)에 대하여 수많은 측정을 하여야 하므로 많은 시간과 노력을 요하는 방법이다. 반면, 2-마이크로폰 법은 광대역 음원으로 가진된 음장 내의 두 고정된 위치에서 측정된 음압을 이용하기 때문에, 음향학적 인자를 모든 관심 주파수에 대하여 동시에 결정할 수 있으므로 정재파비 방법보다 매우 빠른 측정이 가능하다. 그러나 광대역 가진을 이용할 경우 모든 관심 주파수 영역에서 같은 정확도를 갖는 한 쌍의 측정 위치를 정하는 것은 불가능하다.⁽³⁻⁹⁾

Fujimori 등⁽¹⁰⁾은 많은 노력을 요하는 정재파비 방법의 단점을 개선하기 위하여, 다수의 측정점을 이용하는 최소자승법 (least square method)을 제안하였고, Pope⁽¹¹⁾는 광대역 음원과 두 측정점을

이용할 경우에 최소자승법이 2-마이크로폰 법과 동등함을 언급하였다. Chu⁽³⁾는 광대역 가진 시에 최소자승법을 이용하면 2-마이크로폰 법보다 더 정확한 측정이 가능하다는 것을 보였다. 그러나 광대역 가진을 하는 최소자승법에 대한 연구들에서 쓰인 측정 위치들의 선정은 다소 임의적이었으며 이에 관한 해석적 연구가 수행되지 않았다. Jones와 Parrott⁽¹²⁾은 순음 가진 음원과 덕트 내를 움직일 수 있는 탐촉자를 이용하는 최소자승법에서, 반파장 내에 2개의 측정점을 두면 재현성 있는 측정을 하는데 충분하지만, 균일한 간격으로 위치한 측정점을 더하면 더욱 작은 오차의 결과를 얻게 됨을 실험을 통해 보였다.

본 논문에서는 광대역 가진과 고정된 측정점들을 이용하는 최소자승법 (Multiple Microphone 방법)에서 측정점들의 상대적인 위치에 따른 입력 오차에 대한 결과의 민감성을 살펴 보았다. 이러한 연구로부터 오차를 최소화하는 측정점을 선택하고, 이를 실험적으로 입증하였다.

2. 이론

2.1. 최소자승법

*한국과학기술원 기계공학과 소음진동제어연구센터

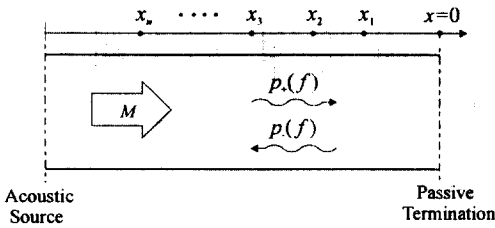


Fig. 1. Sound field in the acoustic duct with mean flow.

유동이 있는 끝은 덕트 내의 음장은 Fig. 1과 같이 표현할 수 있다. 한쪽 끝은 음원으로, 다른 쪽 끝은 수동 종단으로 구성되어 있다. 평면파 성분을 고려하면 덕트 내 음장은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P(x, f) = P_+(f) \exp(i\Gamma_+ x) + P_-(f) \exp(i\Gamma_- x). \quad (1)$$

여기서 $P(x, f)$ 는 위치 x 에서의 음압의 푸리에 변환, P_+ 와 P_- 는 각각 입사파와 반사파의 푸리에 변환을 나타낸다. Γ_+ 와 Γ_- 는 입사파와 반사파의 평면파 전달 상수로서

$$\Gamma_+ = -(k - i\delta)/(1 + M), \quad \Gamma_- = (k - i\delta)/(1 - M) \quad (2)$$

으로 정의된다. 여기서 k 는 파수, M 은 Mach 수, δ 는 감쇠를 나타내는 항으로서 다음과 같이 열점성과 난류에 의한 효과를 모두 포함한다.^(9,13)

$$\delta = \delta_v + \delta_r. \quad (3)$$

식 (1)에서 위치 x_j 에서 측정되는 음압 P_j 로부터 다음과 같은 과결정 선형식 (overdetermined linear matrix)을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b}. \quad (4)$$

여기서,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \exp(i\Gamma_+ x_1) & \exp(i\Gamma_- x_1) \\ \exp(i\Gamma_+ x_2) & \exp(i\Gamma_- x_2) \\ \vdots & \vdots \\ \exp(i\Gamma_+ x_n) & \exp(i\Gamma_- x_n) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{Bmatrix} P_+(f) \\ P_-(f) \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{Bmatrix} P_1(f) \\ P_2(f) \\ \vdots \\ P_n(f) \end{Bmatrix} \quad (5)$$

이다. 식 (4)의 최소자승해는 Moor-Penrose 일반 역행렬 \mathbf{A}^+ (generalized inverse)를 이용하여

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}^+ \mathbf{b} = (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \mathbf{b} \quad (6)$$

와 같이 구할 수 있다. 여기서 \mathbf{A}^H 는 \mathbf{A} 의 Hermitian 행렬을 의미한다. 식 (6)은 식 (4)의 최적 근사해임이 알려져 있다.⁽¹⁴⁾ 식 (6)에 Cramer의 법칙을 적용하면, $x=0$ 위치에서의 복소 반사 계수 (complex pressure reflection coefficient) $R(f)$ 는

$$R(f) = \frac{P_-(f)}{P_+(f)} = \frac{\det \begin{bmatrix} \sum_j \exp[i(\Gamma_+ - \Gamma_+^*) x_j] & \sum_j P_j \exp(-i\Gamma_+^* x_j) \\ \sum_j \exp[i(\Gamma_+ - \Gamma_-^*) x_j] & \sum_j P_j \exp(-i\Gamma_-^* x_j) \end{bmatrix}}{\det \begin{bmatrix} \sum_j P_j \exp(-i\Gamma_+^* x_j) & \sum_j \exp[i(\Gamma_- - \Gamma_+^*) x_j] \\ \sum_j P_j \exp(-i\Gamma_-^* x_j) & \sum_j \exp[i(\Gamma_- - \Gamma_-^*) x_j] \end{bmatrix}} \quad (7)$$

으로 구해진다. 여기서 $\det[\]$ 는 행렬의 determinant를 (*)는 켈레 복소수 (complex conjugate)를 의미한다. 한편, $x=0$ 위치에서의 음향 임피던스는

$$\frac{Z(f)}{\rho_0 c_0} = \frac{1 + R(f)}{1 - R(f)} \quad (8)$$

으로 얻어진다. 유동이 없는 경우, 식 (7)은 기존의 연구들^(10,11)에서 얻어진 반사 계수의 식과 같게 된다.

식 (1)에 임의의 복소 상수를 곱하여도 유도되는 복소 반사 계수 R 은 바뀌지 않으므로, 식 (7)의 P_j 대신에 전달 함수 $H_j(f)$, 즉 $P_j(f)/P_{ref}(f)$ 를 치환할 수 있다. 이 때 기준 신호 $P_{ref}(f)$ 는 모든 측정에서 동일한 신호로서, 음원의 입력 전압이나 한 위치에 고정된 마이크로폰으로부터의 음압이 될 수 있다. 관 내 두 지점만의 전달 함수 $H_{12}(f) [=P_2(f)/P_1(f)]$ 를 이용하고 감쇠 효과를 무시하는 경우에는 식 (7)은 ASTM E1050-90⁽²⁾에 보여진 반사 계수 식과 동등하다.

2.2. 측정오차에 대한 방법의 민감성

식 (4)에서 입력항 \mathbf{b} 는 측정 시 항상 오차를 수반하게 되며, \mathbf{A} 가 특이계(singular system)에 가까워지면 해 \mathbf{x} 는 큰 오차를 수반하게 된다. \mathbf{A} 와 \mathbf{A}^+ 의 특이값 분리 (singular value decomposition)는 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{A} = \mathbf{U} \mathbf{\Lambda} \mathbf{V}^H, \quad \mathbf{A}^+ = \mathbf{V} \mathbf{\Lambda}^{-1} \mathbf{U}^H. \quad (9)$$

여기서 $\mathbf{\Lambda}$ 와 $\mathbf{\Lambda}^{-1}$ 은 각각 $n \times 2$ 와 $2 \times n$ 의 대각 행렬들 (real diagonal matrices)이며 그 요소들은 각각 특이값들 (singular values)과 그 역수들이다. 또한 \mathbf{U} 와 \mathbf{V} 는 $n \times n$

와 2x2 unitary 행렬이다. 식 (4)로부터 다음의 관계를 얻을 수 있다.

$$\tilde{\mathbf{b}} = \mathbf{b} + \mathbf{m} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{m} = \mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}}. \quad (10)$$

여기서 \mathbf{m} 은 \mathbf{b} 의 측정 오차이며, (\sim) 는 추정 값 (estimated value)을 나타낸다. 따라서 \mathbf{x} 의 추정 오차는

$$\tilde{\mathbf{x}} - \mathbf{x} = \mathbf{A}^+ \mathbf{m} \quad (11)$$

으로 표현된다. 추정 오차의 크기를 제공한 것의 예측값 (expected value)은

$$E\left[\|\tilde{\mathbf{x}} - \mathbf{x}\|^2\right] = E\left[\text{Tr}\left(\left(\mathbf{A}^{-1}\right)^T \mathbf{A}^{-1} \mathbf{U}^H \mathbf{m} \mathbf{m}^H \mathbf{U}\right)\right] \quad (12)$$

이다. 여기서 $E[\]$ 와 $\text{Tr}(\)$ 는 각각 예측값과 행렬의 trace 값을 의미한다. 만일 측정 오차 \mathbf{m} 을 분산 σ^2 인 서로 연관되지 않은 백색 잡음 (uncorrelated white noise)이라고 가정하면 $E[\mathbf{m}\mathbf{m}^H] = \sigma^2 \mathbf{I}$ 이다. 이때 \mathbf{I} 는 identity matrix이다. 따라서 식 (12)는

$$E\left[\|\tilde{\mathbf{x}} - \mathbf{x}\|^2\right] = \sigma^2 \text{Tr}\left(\left(\mathbf{A}^{-1}\right)^T \mathbf{A}^{-1}\right) = \sigma^2 SF^2 \quad (13)$$

이 된다. 여기서 SF는 특이성 인자 (singularity factor)로서

$$SF = \sqrt{\sum_j \Lambda_j^{-2}} \quad (14)$$

로 정의된다.^(15,16) 결국 추정 오차를 작게 하기 위해서는 SF를 최소화 시켜야 한다. 이러한 방법으로 측정 오차에 대한 방법의 민감성은 SF를 이용하여 구할 수 있다.

식 (14)로부터, $\det(\mathbf{A}^H \mathbf{A}) = 0$ 이면 최소 특이값은 0이고, \mathbf{A} 가 특이성을 갖게 됨을 알 수 있다. 감쇠가 무시된다면, 이 특이 조건은

$$\left(\sum_j \exp\left[i\left(\frac{2k}{1-M^2}\right)x_j\right] \right) \left(\sum_j \exp\left[-i\left(\frac{2k}{1-M^2}\right)x_j\right] \right) - n^2 = 0 \quad (15)$$

이다. 이러한 조건이 만족될 때, 해 \mathbf{x} 에는 큰 오차를 수반하게 되고, 식 (15)를 만족하는 0이 아닌 최소 파수는 임계 파수 (critical wave number) k_{cr} 로 정의된다. 특히 $n=2$ 의 경우, 식 (15)는 2-마이크로폰 법에서 잘 알려진 마이크로폰 간의 반파장 제한 (half-wavelength restriction)을 나타내게 된다.

2.3. 최적 측정 위치의 선택

광대역 주파수 영역에서 덕트 내 음향 변수의 측정을 위해서 음원 신호로서는 광대역 소음을, 식 (4)의 입력항 \mathbf{b} 의 요소로서는 측정점 간의 전달 함수 $[H(f) = P(f)/P_{ref}(f)]$ 를 이용하게 된다. Chu⁽³⁾는 유동이 없는 유사한 측정 조건에서 얻어진 결과들을 정재파비 방법과 실험적으로 비교하였다. 그 결과, 다수의 측정점과 광대역 가진을 이용한 최소자승법은 빠른 측정이 가능하지만, 순음 가진을 이용한 측정과 비교하여 다소 정확하지 못하다는 점이 발견되었다. 그의 연구에서 측정 위치의 선정은 실험적으로 결정되었으며, 정확한 측정 결과를 얻기 위해서는 적절한 측정 위치의 선정이 필수적이다. 따라서, 오차 민감성에 기초한 상대적인 측정 위치에 대한 연구가 필요하며, 다음의 논의는 이에 관련한다.

$n=2$ 인 경우는 2-마이크로폰 법과 동일하며, 식 (15)로부터 특이 조건은 다음과 같이 얻어진다.

$$\cos\left(\frac{2kx_{21}}{1-M^2}\right) = 1. \quad (16)$$

여기서 x_{21} 은 측정점 1과 2 사이의 거리이다. 특이점을 피하기 위해서 x_{21} 은 관심 주파수 영역 내에서 다음의 조건을 만족하여야 한다.

$$kx_{21} < \pi(1-M^2). \quad (17)$$

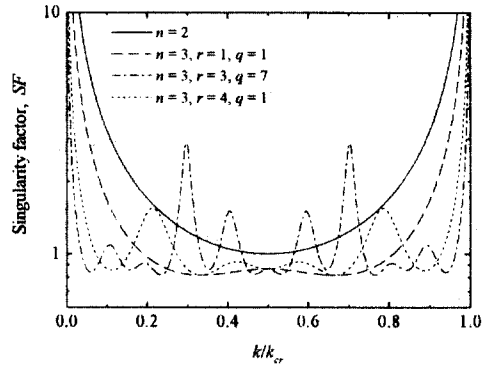


Fig. 2. Singularity factors for various measurement setups using two or three microphones.

Figure 2에 $n=2$ 인 경우에 있어서 측정의 정확도를 SF를 이용하여 나타내었고, 이때 파수는 임계 파수 k_{cr} 즉, $\pi(1-M^2)/x_{21}$ 로 정규화 하였다. $n=2$ 에서 SF는 $k/k_{cr}=0.5$ 일 때 최소이고, $k/k_{cr}=0$ 또는 1에서 ∞ 임을 볼 수 있다. 이것은 정확한 측정을 위한 유효 측정 범위가 $k/k_{cr}=0.5$ 부근의 작은 범위로 제한됨을 의미한다. 2개의 측정점을 이용한 측정에서는 전 주파수 영역에서 같은 정도의 정확도를 얻을 수 없으며, 이는 앞선 연구들의 결과와 일치한다.⁽³⁻⁹⁾

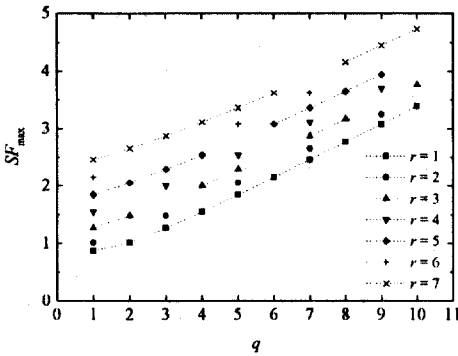


Fig. 3. Comparison of maximum singularity factors varying the sensor spacing in $n=3$ case.

3 개의 측정점을 이용한 경우 ($n=3$), 특이 조건은 식 (15)로부터

$$\cos\left(\frac{2kx_{21}}{1-M^2}\right) + \cos\left(\frac{2kx_{31}}{1-M^2}\right) + \cos\left(\frac{2kx_{32}}{1-M^2}\right) = 3 \quad (18)$$

이다. 여기서, $x_{31}=x_1-x_3$ 이고 $x_{32}=x_2-x_3$ 이다. 식 (18)을 만족하기 위해서는 $kx_{21}/(1-M^2)$ 과 $kx_{31}/(1-M^2)$ 이 모두 π 의 정수배이어야 한다. $x_{32}/x_{21}=q/r$ (r 과 q 는 정수)이고, q/r 이 기약 분수일 때, 임계 파수 k_{cr} 은

$$k_{cr}x_{21} = r\pi(1-M^2) \quad (19)$$

로 주어진다. Figure 2에 세 측정 위치의 몇 가지 경우에 대하여 SF를 보였으며, 파수는 식 (19)의 k_{cr} 로 정규화 하였다. SF의 국소 최대(local maximum)들을 볼 수 있고, $r=1$ 과 $q=1$ 일 때 가장 작은 국소 최대를 가짐을 알 수 있다. 특히 $n=3$, $r=1$, $q=1$ 과 $n=3$, $r=4$, $q=1$ 의 조건을 만족할 때에는 SF가 관심 주파수 영역 내에서 $n=2$ 의 경우보다 작으며, 그 유효 주파수 범위 또한 넓어짐을 알 수 있다. $n=3$ 의 경우 몇 가지 가능한 측정점의 배열에 대하여, 유효 측정 주파수 범위 내의 최대 특이성 인자 SF_{max} 를 Fig. 3에 나타내었다. r 과 q 가 증가할수록 SF_{max} 가 증가하며, $r=1$ 과 $q=1$ 일 때 SF_{max} 가 가장 작게 된다.

4개 이상의 측정점에서는 앞에서와 유사한 과정을 통하여 추정 오차를 최소화할 수 있는 적절한 측정점을 선정할 수 있으며, 균일한 측정 위치의 경우에 다른 측정 위치보다 특이점인 $k/k_{cr}=0$ 및 1 부근을 제외한 전 주파수 영역에서 더 작은 SF를 가지게 되고 측정점의 수가 증가할수록 그 SF 값은 작아지게 된다 (Fig. 4). 2-마이크로폰 법에서 유효 측정 주파수 범위가 $SF < 1.7$ 로 주어짐을 고려한다면, 측정점의 수가 증가할수록 그 유효 측정 주파수 범위가 늘어남을 알 수 있다. 3 개 이상의 측정점이 이용될 경우에 $k/k_{cr}=0.5$ 에서와 같은 정도의 SF를 갖는

유효 측정 주파수 범위는 Table 1의 값을 이용하여 $\Delta\phi < k/k_{cr} < 1 - \Delta\phi$ 로 주어진다.

Table 1. SF가 $k/k_{cr}=0.5$ 에서의 값과 같은 정도의 크기를 갖는 주파수 영역.

n	3	4	5	6	7
$\Delta\phi$	0.23	0.19	0.16	0.14	0.12

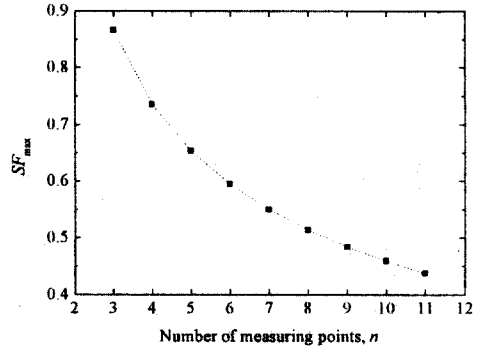


Fig. 4. Maximum singularity factors varying the number of measuring points having the uniform spacing.

3. 실험

앞 절에서의 해석적 결과를 뒷받침하기 위해, 이론 해^(17,18)가 존재하는 배플 없이 자유 공간에 열린 수동 종단의 반사 계수를, 유동이 없는 경우와 Mach 수 0.1의 유동이 있는 경우에 대하여 측정하였다. 내경 40.0 mm의 원형 단면을 갖는 길이 1.02 m의 아크릴 파이프를 이용하였고, 파이프의 내경으로 결정되는 평면파 차단 주파수는 약 5 kHz이다. 파이프의 한쪽 끝에 연결된 음향 드라이버에 정상 상태 랜덤(stationary random) 신호를 보내고, 측정 신호들로부터 스펙트럼을 계산하기 위해 신호 해석기 (HP 35670A)가 이용되었다. 음향 드라이버의 작동 주파수는 0.3~3.2 kHz 이다. 전달 함수의 측정은 센서의 교란으로 인한 유동 소음을 최소화하기 위해 관벽 밀착형으로 장착된 1/4-인치 마이크로폰 (B&K 4135)으로 하였다. 덕트 내 난류에 의한 유동 소음을 제거하기 위해 correlation technique⁽⁷⁾이 사용되었다. 이 방법에서는 기준 마이크로폰의 음압 신호 대신에 음원 (스피커)을 가진하는 입력 신호가 기준 신호로 이용된다. 모든 측정에서 측정 위치 x_1 은 열린 종단으로부터 30.0 mm이다.

배플 없이 열린 종단에서 유동이 없을 때 측정된 반사 계수의 크기를 이론 해⁽¹⁷⁾와 함께 Fig. 5에 보였다. 측정 위치의 간격은 균일하게 57.1 mm이며, 임계 주파수는 3034 Hz ($c=346.5$ m/s)이다. 모든 경우 전달 함수를 계산하기 위해 80 개의 평균이 쓰였다. 모든 측정 결과들에서 3 kHz 부근에 큰 오차가 관찰되어진다. 2 개의 측정점을 이용한 경우 ($n=2$), 1.5~1.8 kHz

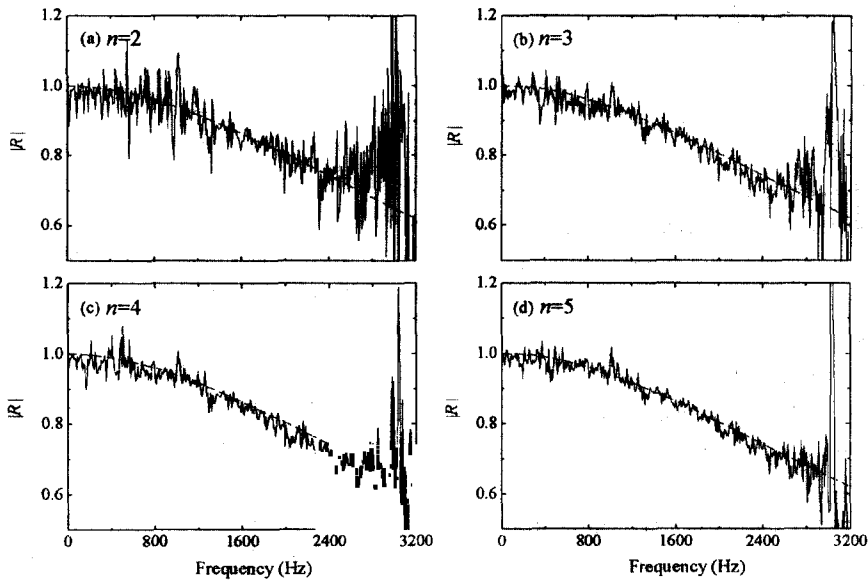


Fig. 5. Comparison of the magnitudes of the pressure reflection coefficient of an unflanged open pipe without mean flow. —, measured by using the equidistant measuring points; ---, theory (Ref. 17).

를 제외한 주파수 영역에서 비교적 큰 오차를 보인다. 3 개의 측정점을 이용한 경우 ($n=3$), 관심 주파수 영역에서 $n=2$ 의 경우보다 작은 오차를 보이지만, 저주파수 대역과 임계 주파수 부근에서 오차가 비교적 큼을 볼 수 있다. 측정점의 수를 늘릴수록 3 kHz 부근을 제외하고는 더 정확한 측정 결과를 보인다.

유동이 있는 ($M=0.1$) 배플 없이 열린 종단의 측정 결과도 이론 해⁽¹⁸⁾와 함께 비교되었으며, 유동이 없는 경우와 유사하게 측정점의 수가 증가할수록 유효 측정 주파수 범위가 증가하였고 그 주파수 영역에서 오차가 더 작아짐이 관찰되어 졌다.

4. 응용 예제

본 방법을 이용하여 덕트 내 스피커 음원의 음원 임피던스 (source impedance)를 측정하고 (Fig. 6(a)), 이로부터 단순팽창형 소음기의 삽입 손실 (insertion loss)을 예측하였다.⁽¹⁹⁾ Figure 6(b)에서 그 예측값과 측정값이 대부분의 주파수에서 비교적 잘 일치하고 있음이 관찰된다.

5. 결론

다수의 측정점과 광대역 가진의 최소자승법을 이용하여 관 내 음향 변수를 측정하는 경우, 상대적인 측정 위치에 따른 오차에 대해서 고찰하였다. 측정 오차에 대한 방법의 민감성을 특이성 인자를 이용하여 나타내었으며, 측정 위치를 등간격으로 하는 경우에 유효 측정 주파수 범위에서 가장 작은 SF_{max} 값을 범을 보였다.

또한 측정점의 개수를 증가시킬 수록 유효 주파수 범위가 넓어지며, 그 유효 주파수 범위 내의 모든 주파수에서 특이성 인자값이 작아지게 됨을 보였다. 따라서 다수의, 등간격으로 위치시킨 측정 센서를 이용하는 본 측정법은 2-마이크로폰 법의 단점을 극복하는 하나의 대안이 될 수 있을 것으로 여겨지며, 흡배기계 시스템의 음향 변수에 대한 직접 측정에 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

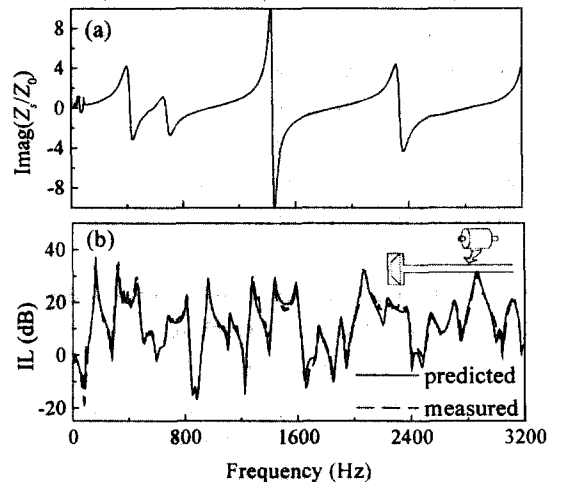


Fig. 6. Application example of the present method. (a) Measured source reactance by using the present method, (b) insertion loss of a simple expansion chamber muffler.

참고문헌

- (1) ASTM C384-90a, 1990, "Standard method for impedance and absorption of acoustical materials by the impedance tube method," American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
- (2) ASTM E1050-90, 1990, "Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones, and a digital frequency analysis method," American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
- (3) W. T. Chu, 1991, "Impedance tube measurements — a comparative study of current practices," *Noise Control Engineering Journal*, Vol. 37, pp. 37-44.
- (4) A. F. Seybert and B. Soenarko, 1981, "Error analysis of spectral estimates with application to the measurement of acoustic parameters using random sound fields in ducts," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 69, pp. 1190-1199.
- (5) J. Y. Chung and D. A. Blaser, 1980, "Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 68, pp. 907-913; "Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. II. Experiment," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 68, pp. 914-921.
- (6) H. Bodén and M. Åbom, 1986, "Influence of errors on the two-microphone method for measuring acoustic properties in ducts," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 79, pp. 541-549.
- (7) M. Åbom and H. Bodén, 1988, "Error analysis of two-microphone measurements in ducts with flow," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 83, pp. 2429-2438.
- (8) H. Hudde and U. Letens, 1984, "Untersuchungen zum Akustischen Messleitungsverfahren mit festen Messorten," *Acustica*, Vol. 56, pp. 258-269.
- (9) M. L. Munjal and A. G. Doige, 1990, "The two-microphone method incorporating the effects of mean flow and acoustic damping," *Journal of Sound Vibration*, Vol. 137, pp. 135-138.
- (10) T. Fujimori, S. Sato and H. Miura, 1984, "An automated measurement system of complex sound pressure reflection coefficients," *Proceedings of Inter Noise 84*, pp. 1009-1014.
- (11) J. Pope, 1986, "Rapid measurement of acoustic impedance using a single microphone in a standing wave tube," *Proceedings of ICA*, Vol. 12, Paper M3-3.
- (12) M. G. Jones and T. L. Parrott, 1989, "Evaluation of a multi-point method for determining acoustic impedance," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 3, pp. 15-35.
- (13) U. Ingard and V. K. Singhal, 1974, "Sound attenuation in turbulent pipe flow," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 55, pp. 535-538.
- (14) G. Golub and C. Van Loan, 1985, *Matrix Computations*, Johns Hopkins University Press, Baltimore, Chap.6, pp. 136-140.
- (15) D. Oh and Y. Park, 1994, "Order reduction based on singular values of modal matrix," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 8, pp. 63-79.
- (16) B.-K. Kim and J.-G. Ih, 1996, "On the reconstruction of vibro-acoustic field over the surface enclosing an interior space using the boundary element method," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 100, 3003-3016.
- (17) H. Levine and J. Schwinger, 1948, "On the radiation of sound from an unflanged circular pipe," *Physics Review* Vol. 73, pp. 383-406.
- (18) R. M. Munt, 1990, "Acoustic transmission properties of a jet pipe with subsonic jet flow: I. The cold jet reflection coefficient," *Journal of Sound and Vibration* Vol. 142, pp. 413-436.
- (19) 장승호, 1997, "덕트 내 단일 연결구를 갖는 소음원의 음향 특성 측정에 관한 연구," 한국과학기술원 기계공학과 석사학위 논문.