Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 29, No. 2, 2018, pp. 163~169
DOI: https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.2.163

KHNES
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

음향 임피던스 측정을 위한 이중 마이크로폰 기법에 대한 고찰

서성현†

국립한밭대학교 기계공학과

Note on the Two-Microphone Methods for the Measurement of Acoustic Impedance

SEONGHYEON SEO†

Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, 125 Dongseo-daero, Yuseong-gu, Daejeon 34158, Korea

†Corresponding author : shseo@hanbat.ac.kr

Received 28 March, 2018
Revised 11 April, 2018
Accepted 30 April, 2018

Abstract >> The present article discusses about the measurement techniques of acoustic impedance that becomes one of the important acoustic characteristics of various boundaries found inside of propulsion systems. Acoustic characteristics including acoustic impedance and reflection coefficient can be often assessed and estimated by use of the two-microphone method. Theoretical expressions of acoustic impedance and reflection coefficient measured in an impedance tube are presented for both cases with mean flow and without flow, and the practical application of the method through calibration is also provided. The acoustic impedance and the reflection coefficient are related with axial locations of microphones, thermodynamic characteristics of gas inside, and the transfer function between the pressure wave measurements at multiple locations.

Key words : Acoustic impedance(음향 임피던스), Two-microphone(이중 마이크로폰), Reflection coefficient(반사계수), Experimental techniques(실험 기법), System development(시스템 개발)

1. 서 론

석탄 가스화 복합발전 시스템의 가스터빈 연소기, 합성연료를 활용하는 연소기, 연료전지 공기 흡입시스템 등의 개발 과정에서 각 시스템 내부 음향 특성 중의 하나인 음향 임피던스(acoustic impedance)는 매우 유용하게 활용되는 설계 정보이다[1-3]. 본 이유로 추진시스템 내부에 존재하는 다양한 음향 경계에서 음향 임피던스, 반사계수(reflection coefficient) 등을 정확하게 파악하기 위한 연구가 지속적으로 진행되어 왔다. 석탄에서 추출한 기체 연료를 연소시켜서 동력을 생산하는 가스터빈시스템 연소기를 고려해보면 분사기 헤드, 출구 노즐, 연소실 라이너 등의 형상 구조와 유동 특성에 따라 그 음향 특성이 다양하다. 기존 연소장치에 비해 상대적으로 음향 에너지 소산 경로가 한정된 현대 고성능 연소기에서 자주 발생하

2018 The Korean Hydrogen and New Energy Society. All rights reserved.

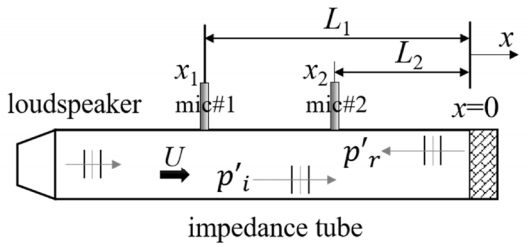

Fig. 1. Schematic diagram for the two-microphone method and its notation for the theoretical analysis

는 연소 불안정 현상 이해를 위하여 추진 시스템 내부에 존재하는 다양한 유동 경계에서 음향 에너지 소산 특성을 파악하고자 하는 연구가 활발하게 진행되고 있다[4].

음향특성 파악을 위해서는 압력파와 입자 속도에 대한 관계를 규명하는 것이 기초가 된다. 언급한 것과 같이 이는 음향 임피던스라고 하는 물리량으로 규정되며, 실험 방법으로 임피던스 측정법은 음향 압력과 음향 속도 가운데에서 어떤 물리량 신호를 직접 계측할 것인가에 따라 차이가 있다. 음향 속도는 음향 압력 기울기에 비례한다는 사실을 활용하여, 속도 측정에 비하여 상대적으로 용이한 음향 압력 측정을 두 곳 이상에서 실시하여 음향 속도를 간접적으로 도출하는 방법이 활용되고 있다. 본 방법이 1970년대부터 연구 및 활용되어온 이중 마이크로폰 계측 기법(two-microphone method)이다[5-13].

본 논문은 음향 경계가 보이는 음향 임피던스와 반사계수 측정에 있어서 많은 활용도를 갖는 이중 마이크로폰 계측 기법에 대한 분석적 이론에 대한 고찰과 이전 연구 논문에서 많은 수식적 오류가 있는 점을 고려하여 정확하고 일관된 수식 표현을 통해 음향 임피던스 측정시 내부 유동이 존재하지 않는 경우와 존재하는 경우에 대하여 기술하였다. 또한 실험을 통한 두 위치에서의 음향파 측정 값과 음향 임피던스 관계에 대한 이론과 실제 교정 절차에 대해 고찰하고자 한다.

2. 본 론

2.1 주 유동이 없는 환경에서 임피던스

첫 번째로 단면이 완벽한 원형을 갖는 임피던스관 내부를 고려하여 분석적 방법을 통하여 음향 특성을 살펴본다. 실린더 내부에서 축 방향으로 진행하는 음향파의 파장이 파이프 내경 대비 월등히 큰 값을 갖는다면, 파이프 내부에서 전파되는 음향파는 일차원 특성을 지니고 있다고 가정할 수 있다. 이 때 파이프 내부에서 유동은 없으며, 음향파의 감쇄 또한 무시할 만 한 수준이라고 가정한다. 이 같은 가정에서 일차원 파동 방정식을 만족하는 음향파의 해는 식 (1)과 같다. Fig. 1에서와 묘사한 것과 같이 오른쪽을 양의 방향이라고 설정하면, 양의 방향으로 전파되는 입사파와 반대 방향으로 전파되는 반사파는 본 수식과 같이 표현된다[14].

$$p'_i(x,t) = A_i e^{i(\omega t - kx)} = \widehat{A}_i e^{-ikx}$$

$$p'_r(x,t) = A_r e^{i(\omega t + kx)} = \widehat{A}_r e^{ikx} \quad (1)$$

여기서 $\omega = 2\pi f$는 각속도, f는 주파수, $k = \omega/c$는 파수(wave number)이다. 그리고 여기서 c는 음향파 속도를 의미한다. 또한 A_i와 A_r은 각각 입사파와 반사파의 진폭이며, $\widehat{A}_i$와 $\widehat{A}_r$은 각각 시간 항을 포함하여 허수 값을 갖는 진폭을 나타낸다. 섭동하는 입자속도는 양의 방향으로 진행하는 음향파에 대해서는 $p'_i = \rho_0 c u_i$의 관계를 갖고, 음의 방향으로 진행하는 음향파와 $p'_r = -\rho_0 c u_r$의 관계를 갖는다[14]. 본 관계에서 ρ_0는 기체 밀도를 의미한다. 본 관계와 식 (1)을 활용해서 임피던스 축 방향 특정 위치에서의 압력파와 입자속도를 식 (2), (3)과 같이 표현할 수 있다. 임피던스관 내부 축 방향 어느 한 지점에서 시간에 따른 압력파와 입자속도는 다음 식과 같이 각각 표현할 수 있다.

$$p'(x,t) = A_i e^{i(\omega t - kx)} + A_r e^{i(\omega t + kx)} \quad (2)$$

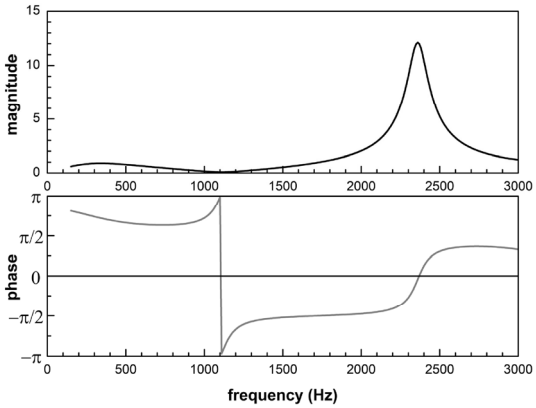

Fig. 2. Example of normalized impedance presented by use of its magnitude and phase for L_1 = 0.125 m, L_2 = 0.025 m

$$u(x,t)=\frac{1}{\rho_0 c}\left(A_i\, e^{i(\omega t-kx)}-A_r\, e^{i(\omega t+kx)}\right) \tag{3}$$

Fig. 1에서 도시한 내용을 기준으로 임피던스 관 축 방향으로 원점에서 L_1과 L_2거리에 위치한 마이크로폰 #2와 #1에서 각각 측정한 압력변화(p'_2, p'_1)비로 정의되는 y는 식 (2)를 적용해서 아래 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$y\equiv\frac{p'_2}{p'_1}=\frac{\hat{A}_i e^{ikL_2}+\hat{A}_r e^{-ikL_2}}{\hat{A}_i e^{ikL_1}+\hat{A}_r e^{-ikL_1}}$$

$$=\frac{e^{ikL_2}+(\hat{A}_r/\hat{A}_i)e^{-ikL_2}}{e^{ikL_1}+(\hat{A}_r/\hat{A}_i)e^{-ikL_1}} \tag{4}$$

위 수식을 진폭 비($\hat{A}_r/\hat{A}_i$)에 관해서 나타내면 아래 식 (5)와 같이 정리된다.

$$(\hat{A}_r/\hat{A}_i)=\frac{-ye^{ikL_1}+e^{ikL_2}}{ye^{-ikL_1}-e^{-ikL_2}} \tag{5}$$

실제 규명하고자 하는 음향 임피던스 값이 Fig. 1에서와 같이 원점에 위치한 음향 경계에서의 값이라 한다면 음향 임피던스($Z\equiv p'/u$)는 아래의 식 (6)과 같이 표현된다.

$$Z(0)=\frac{p'(x=0)}{u(x=0)}=\rho_0 c\frac{(1+\hat{A}_r/\hat{A}_i)}{(1-\hat{A}_r/\hat{A}_i)} \tag{6}$$

식 (5)를 식 (6)에 삽입해서 정리하면 원점에서의 음향 임피던스 값은 아래 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$Z(0)=-i\rho_0 c\frac{(y\sin(kL_1)-\sin(kL_2))}{(y\cos(kL_1)-\cos(kL_2))} \tag{7}$$

임피던스관 내부에 형성되는 음향파가 축 방향으로만 전달되는 평면파라고 가정하고, 실린더 내부 온도 값과 두 개의 서로 다른 축 방향 위치에 장착한 마이크로폰을 활용하여 측정한 압력변화 값 결과를 적용하면 원점에 위치한 특정 물질 또는 음향 경계의 음향 임피던스 값을 도출해 낼 수 있다. 본 식을 활용하여 측정한 신호 값이 주파수에 따라 변화 없이 동일한 값을 갖는다는 가정 하에 정규화 임피던스를 도출해내면 Fig. 2에 도시한 예와 같다.

실제 계측 과정에서 마이크로폰 측정 데이터 처리는 주파수 영역에서 처리하는 것이 용이하므로 지금까지 언급한 각 마이크로폰에서 측정한 신호 값의 비는 다음과 같이 신호 값을 푸리에 변환한 후 비를 나타내는 전달함수로 식 (8)과 같이 표현할 수 있다[15,16].

$$H_{12}\equiv\frac{\overline{p'_2}}{\overline{p'_1}}=\frac{\overline{p'_2}(\overline{p'_1})^*}{\overline{p'_1}(\overline{p'_1})^*} \tag{8}$$

위 식에서 $\overline{(\,)}$는 괄호 안 값의 푸리에 변환을 의미하며 $(\,)^*$는 괄호 안 허수 켤레 값을 의미한다. 또한 입사파와 반사파에 대해서도 다음 식 (9), (10)에서와 같이 전달함수로 표현할 수 있다.

$$H_i\equiv\frac{\overline{p'_{2i}}}{\overline{p'_{1i}}}=\frac{\overline{\hat{A}_i}\,e^{ikL_2}}{\overline{\hat{A}_i}\,e^{ikL_1}}=e^{ik(L_2-L_1)}=e^{-ikd} \tag{9}$$

여기서 두 개의 마이크로폰 사이 축 방향 간격은 $d=L_1-L_2$에 해당한다.

$$H_r \equiv \frac{\overline{p'_{2r}}}{\overline{p'_{1r}}} = \frac{\overline{\widehat{A}_r e^{-ikL_2}}}{\overline{\widehat{A}_r e^{-ikL_1}}} = e^{ikd} \tag{10}$$

또한 식 (11)과 같이 반사계수를 정의하면 입사파와 반사파의 허수 값을 갖는 진폭의 푸리에 변환 값의 비는 원점에서의 반사계수와 동일함을 알 수 있다.

$$R_f(0) \equiv \frac{\overline{p'_r}(x=0)}{\overline{p'_i}(x=0)} = \frac{\overline{\widehat{A}_r}}{\overline{\widehat{A}_i}} \tag{11}$$

이와 같이 정의한 전달함수들을 활용해서 원점에서 푸리에 변환에 의한 주파수 영역에서의 반사계수를 표현하면 아래 식 (12)와 같이 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned} R_f(0) &= e^{2ikL_1}\frac{(H_{12}-e^{-ikd})}{(e^{ikd}-H_{12})} \\ &= e^{2ikL_1}\frac{(H_{12}-H_i)}{(H_r-H_{12})} \end{aligned} \tag{12}$$

반사계수를 활용하여 주파수영역에서 음향 임피던스, Z_f를 표현하면 식 (13)과 같이 도출된다.

$$\begin{aligned} Z_f(0) &\equiv \frac{\overline{p'}(x=0)}{\overline{u}(x=0)} = \rho_0 c\frac{(\overline{\widehat{A}_i}+\overline{\widehat{A}_r})}{(\overline{\widehat{A}_i}-\overline{\widehat{A}_r})} \\ &= \rho_0 c\frac{(1+R_f(0))}{(1-R_f(0))} \end{aligned} \tag{13}$$

마이크로폰 사이 간격과 첫 번째 마이크로폰의 축 방향 위치를 확인한 상태에서 마이크로폰 신호 간 전달함수를 구하면 축 방향 원점의 반사계수를 구한 후 식 (13)을 통해 궁극적으로 음향 임피던스를 구해낼 수 있다. 본 식을 반사계수를 대입하면 다음 식 (14)와 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{Z_f(0)}{\rho_0 c} = \frac{e^{ikd}-e^{2ikL_1}e^{-ikd}+(e^{2ikL_1}-1)H_{12}}{e^{ikd}+e^{2ikL_1}e^{-ikd}-(e^{2ikL_1}+1)H_{12}} \tag{14}$$

2.2 주 유동이 존재하는 환경에서 임피던스

두 번째로 임피던스관 내부에 축 방향으로 주 유동(main flow)이 존재하는 경우에는 유동 속도에 의한 파수 변화를 고려해야 한다. 임피던스관 내의 평균 유동속도, U를 고려하면 입사파와 반사파에 대한 파수가 식 (15)에서와 같이 표현된다. 아래 식에서는 유동이 없을 때 즉 유동 속도가 0일 때 음향파의 전파속도 즉 음속을 의미한다[17-20]. 이는 도플러 효과를 감안한 것이라 할 수 있다[21].

$$\begin{aligned} k_i &= \frac{\omega}{c+U} = \frac{k}{1+M} \quad (k=\omega/c) \\ k_r &= \frac{\omega}{c-U} = \frac{k}{1-M} \quad (M=U/c) \end{aligned} \tag{15}$$

위와 같이 평균 유속을 고려한 변형된 파수를 적용하면, 임피던스 관 내부의 입사파와 반사파는 식 (16)과 같이 표현된다.

$$p'_i = A_i e^{i(\omega t - k_i x)},\ p'_r = A_r e^{i(\omega t + k_r x)} \tag{16}$$

그리고 해당하는 입자 속도(particle velocity)는 앞에서 언급한 관계를 동일하게 적용하며, 입자 속도는 압력파가 투과되는 유체의 덩어리 속도이기 때문에 유동 속도의 섭동 값으로 볼 수 있다. 평균 유동속도에 의한 도플러 이동 효과를 고려한 관계식을 활용하여 압력파는 입사파와 반사파의 합으로 식 (17)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} p'(x,t) &= p'_i(x,t)+p'_r(x,t) \\ &= A_i e^{i(\omega t - k_i x)} + A_r e^{i(\omega t + k_r x)} \end{aligned} \tag{17}$$

그리고 각 마이크로폰에서의 압력파는 위치 값을 삽입하여 다음 식 (18)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} p'_1 &= A_i e^{i(\omega t + k_i L_1)} + A_r e^{i(\omega t - k_r L_1)} \\ p'_2 &= A_i e^{i(\omega t + k_i L_2)} + A_r e^{i(\omega t - k_r L_2)} \end{aligned} \tag{18}$$

음향파 값을 푸리에 변환을 통해 주파수 영역에서 표현하면 식 (19)와 같다.

$$R_f(0) = e^{i(k_i+k_r)L_1}\frac{(H_{12}-e^{-ik_id})}{(e^{ik_rd}-H_{12})} \tag{19}$$

본 반사계수 관계를 활용하면 임피던스 값도 유사한 방법으로 구할 수 있다. 축방향이 0인 위치에서 음향 임피던스 값을 아래 식 (20)과 같이 전달함수와 평균 유속을 고려한 파수의 관계식으로 구할 수 있다. 본 식을 유동이 존재하지 않는 경우의 식 (14)와 비교하면 임피던스관 내부 유속에 의한 파수 변화가 어떻게 임피던스 표현에 적용되었는지 파악할 수 있다.

$$\frac{Z_f(0)}{\rho_0 c} = \frac{e^{ik_rd}-e^{i(k_i+k_r)L_1}e^{-ik_id}+(e^{i(k_i+k_r)L_1}-1)H_{12}}{e^{ik_rd}+e^{i(k_i+k_r)L_1}e^{-ik_id}-(e^{i(k_i+k_r)L_1}+1)H_{12}} \tag{20}$$

2.3 교정을 통한 임피던스 측정

앞선 두 경우에는 축 방향 서로 다른 위치에서의 압력 값을 활용하여 이론적 반사계수와 임피던스와의 관계를 도출하였다. 계측에 의한 직접적인 음향 임피던스 측정을 위해서는 임피던스를 측정하고자 하는 면(plane)에서 두 가지의 물리량 계측이 필요하다. 하나는 압력이고, 다른 하나는 해당 면에서의 음향 속도이다. 실제로는 해당 면에서 압력과 특히 속도를 측정하는 것이 용이하지 않기 때문에 Fig. 1에 도시한 것과 같이 실린더 파이프 한 쪽 입구에 음향 스피커를 장착하여, 음원을 발생시키며, 원형 실린더 파이프에 축 방향으로 마이크로폰을 두 개 이상을 설치하여, 이로부터 계측한 신호를 활용하여 간접적으로 관심 면에서의 필요 물리량을 도출해내는 방법을 활용한다. 실제 이와 같은 두 개의 마이크로폰을 적용해서 경계 음향 특성을 파악하기 위해서는 교정을 통한 필요 상수 결정 방법이 권장된다.

파동방정식의 해를 따르면 파이프 내부에서 압력과 음향 속도는 두 개의 마이크로폰에서 측정한 신호와 다음 식 (21)과 같은 선형적 관계를 갖는다고 할 수 있다[22].

$$\begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha & \rho_0 c\beta \\ \gamma & \rho_0 c\delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p' \\ u \end{pmatrix} \tag{21}$$

위 관계식에서 α, β, γ, δ는 마이크로폰과 시스템 특성에 의존하는 동일한 물리단위를 갖는 인자들이다. 따라서 각 항의 물리단위를 통일하기 위해 유동 속도에 기체 임피던스를 곱한다. 이와 같은 인자들의 값은 궁극적으로 교정을 통해 결정되는데 그 절차는 다음과 같다.

두 신호의 비를 식 (22)와 같이 구하면,

$$y' \equiv \frac{s_2}{s_1} = \frac{\gamma p' + \delta\rho_0 c u}{\alpha p' + \beta\rho_0 c u} = \frac{\gamma Z + \delta\rho_0 c}{\alpha Z + \beta\rho_0 c} \tag{22}$$

위 식을 다시 임피던스에 대해 풀어내면,

$$Z = \rho_0 c\frac{-\beta y' + \delta}{\alpha y' - \gamma} = \rho_0 c\frac{Ay' + B}{y' - y'_0}$$
$$(A = -\beta/\alpha, B = \delta/\alpha, y'_0 = \gamma/\alpha) \tag{23}$$

본 관계식에서 임피던스를 구하기 위해서는 식 (23)의 괄호 안의 세 개의 상수(A, B, y'_0) 값을 결정해야 한다. 이를 위해서는 음향 임피던스 값이 알려진 물질 세 개를 임피던스를 측정하고자 하는 면(reference plane)에 장착한 후 신호를 측정한다.

우선 첫 번째로 어드미턴스(admittance) 값이 0인 즉 임피던스 값이 무한대인 견고한 표면을 갖는 판으로 기준 면을 막는다. 그렇다면 이 조건에서 $y' = y'_0$가 된다. 그런 후 두 개의 서로 다른 알려진 음향 임피던스 (Z_1, Z_2) 값을 갖는 물질을 사용하여 나머지 두 개의 상수 A, B의 값을 식 (24)를 통해 결정한다. 여기에서 y'_1과 y'_2는 각각의 물질을 활용해서 음향 임피던스 계측 교정시 도출한 측정 값을 의미한다.

$$\frac{Z_1}{\rho c}(y'_1 - y'_0) = Ay'_1 + B$$

$$\frac{Z_2}{\rho c}(y'_2 - y'_0) = Ay'_2 + B \quad (24)$$

$$A = \frac{1}{\rho_0 c}\frac{Z_1(y'_1 - y'_0) - Z_2(y'_2 - y'_0)}{(y'_1 - y'_2)}$$

$$B = \frac{1}{\rho_0 c}\frac{Z_2 y'_1(y'_2 - y'_0) - Z_1 y'_2(y'_1 - y'_0)}{(y'_1 - y'_2)}$$

세 개의 알고 있는 임피던스 경계조건을 활용해서 상수를 결정하면, 궁극적으로 아래의 식 (25)를 활용해서 미지의 임피던스 값(Z)을 계측 값(y')으로부터 도출해낼 수 있다.

$$Z = \frac{Z_1(y'_1 - y'_0)(y' - y'_2) - Z_2(y'_2 - y'_0)(y' - y'_1)}{(y'_1 - y'_2)(y' - y'_0)} \quad (25)$$

3. 결 론

특정 형상 또는 물질로 구성되는 추진 시스템 내부 경계의 음향 임피던스 정보는 연소 안정성과 성능 특성 파악을 궁극적인 목적으로 하는 전체 시스템의 음향 특성 파악을 위해 매우 중요한 정보이다. 특히 연소실 내부에서 음향 특성 고려는 음향에너지와 열에너지사이 에너지 교환에 의해 발생하는 고주파 연소불안정 특성 예측을 위해 필수적인 설계 정보가 된다. 본 논문에서는 원형 실린더 내부에서 주유동이 없는 경우와 있는 경우에 대한 음향 임피던스가 이중 마이크로폰 계측 값에 의한 이론적 관계식을 정리하였다. 또한 마이크로폰을 적용해서 실험값을 통하여 음향 임피던스를 도출해낼 때 이상적인 환경을 벗어난 상황에서 교정 방법을 통해 음향 임피던스를 측정하는 방법과 절차에 대해서 명확하게 일관되게 서술하였다. 향후 다양한 형상과 유동 환경을 갖는 경계의 음향 임피던스 측정 과정에서 본 논문을 통해 정립된 결과가 적극적으로 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 저자 소속 기관으로부터 대학회계 연구비를 지원받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

1. A. P. Dowling and S. R. Stow, “Acoustic Analysis of Gas-Turbine Combustors”, Chapter 13, Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 210, 2005, pp. 369-414.
2. H. Jeong, K. Kang, and K. Lee, “A Study on the Combustion Characteristics with Hydrogen Contents of SNG Fuel in Low-Swirl Combustor”, Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 28, No. 2, 2017, pp. 181-189.
3. E. Kim, Y. Lee, and S. Lee, “Design Optimization of Intake Muffler for Fuel Cell Electric Vehicle APU“, Trans. of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 20, No. 5, 2012, pp. 44-52.
4. S. Seo and Y. J. Park, “Current Research Status on Flame Response Characteristics to Flow Disturbances”, J. the Korean Society of Propulsion Engineers, Vol. 18, No. 5, 2014, pp. 87-94.
5. J. P. Dalmont, “Acoustic Impedance Measurement, Part I: A Review”, J. Sound and Vibration, Vol. 243, No. 3, 2001, pp. 427-439.
6. J. P. Dalmont, “Acoustic Impedance Measurement, Part II: A New Calibration Method”, J. Sound and Vibration, Vol. 243, No. 3, 2001, pp. 441-459.
7. ASTM C384-85, Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials by the Impedance Tube Method.
8. H. Boden and M. Abom, “Influence of Errors on the Two-Microphone Method for Measuring Acoustic Properties in Ducts,“ J. the Acoustical Society of America, Vol. 79, No. 2, 1986, pp. 541-549.
9. P. Banks-Lee and H. Peng, “Length Error Analysis for Impedance Tube Measurements”, J. the Acoustical Society of America, Vol. 85, No. 4, 1989, pp. 1769-1772.
10. P. O. A. L. Davies, M. Bhattacharya, and J. L. Bento Coelho, “Measurement of Plane Wave Acoustic Fields in Flow Ducts”, J. Sound and Vibration, Vol. 72, No. 4, 1980, pp. 539-542.
11. Z. Tao and A. Seybert, “A Review of Current Techniques for Measuring Muffler Transmission Loss”, SAE-Paper 2003-01-1653, 2003.
12. H. Utsuno, T. Tanaka, T. Fujikawa, and A.F. Seybert, “Transfer Function Method for Measuring Characteristic Impedance and Propagation Constant of Porous Materials”, J. the

Acoustical Society of America, Vol. 86, No. 2, 1989, pp. 637-643.
13. A. F. Seybert, “Two-Sensor Methods for the Measurement of Sound Intensity and Acoustic Properties in Ducts”, J. the Acoustical Society of America, Vol. 83, No. 6, 1988, pp. 2233-2239.
14. A. P. Dowling and J. E. FFowcs Williams, “Sound and Sources of Sound”, Ellis Horwood Ltd., 1982.
15. W. T. Chu, “Extension of the Two-Microphone Transfer Function Method for Impedance Tube Measurements”, J. the Acoustical Society of America, Vol. 80, No. 1, 1986, pp. 347-348.
16. J. Y. Chung and D. A. Blaser, “Transfer Function Method of Measuring In-Duct Acoustic Properties. I. Theory”, J. the Acoustical Society of America, Vol. 68, No. 3, 1980, pp. 907-913.
17. A. F. Seybert and D. F. Ross, “Experimental Determination of Acoustic Properties Using a Two-Microphone Random-Excitation Technique”, J. the Acoustical Society of America, Vol. 61, No. 5, 1977, pp. 1362-1370.
18. 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. the Acoustical Society of America, Vol. 103, No. 3, 1998, pp. 1520-1526.
19. J. Y. Chung and D. A. Blaser, “Transfer Function Method of Measuring Acoustic Intensity in a Duct System with Flow”, J. the Acoustical Society of America, Vol. 68, No. 6, 1980, pp. 1570-1577.
20. M. L. Munjal and A. G. Doige, “The Two-Microphone Method incorporating the Effects of Mean Flow and Acoustic Damping”, J. Sound and Vibration, Vol. 137, No. 1, 1990, pp. 135-1038.
21. J. P. Johnston and W. E. Schmidt, “Measurement of Acoustic Reflection from an Obstruction in a Pipe with Flow”, J. the Acoustical Society of America, Vol. 63, No. 5, 1978, pp. 1455-1460.
22. V. Gibiat and F. Laloo, “Acoustical Impedance Measurements by the Two-Microphone-Three-Calibration (TMTC) Method”, J. the Acoustical Society of America, Vol. 88, 1990, pp. 2533-2545.