

반사파가 존재하는 음향장에서의 소음기의 음향성능 측정 The Acoustic Performance Measurement of Silencers in Reflective Field

이 성 현* · 이 정 권** · 최 원 용***
Seong-Hyun Lee, Jeong-Guon Ih and Won-Yong Choi

Key Words: Silencer (소음기), Transmission loss (전달 손실), Reflection coefficient (반사 계수), Transmission coefficient (전달 계수), 4-pole parameter (4 단자 정수)

ABSTRACT

Silencers are extensively used for reducing noise in an exhaust system of internal combustion engine and fluid machineries. The prediction and measurement of the transmission loss as the acoustic performance of silencers are important in early design stage. In the measurement of transmission loss, the semi-anechoic terminations are generally used for reducing unwanted effects by reflecting wave. However it is very hard to remove reflecting wave perfectly. So the research about the error made by reflecting wave is important. The analysis about errors made by reflections and modification techniques are proposed. For an application example, the diesel particulate filter (DPF) is chosen. The transmission loss of DPF is measured with and without considerations of reflecting wave.

1. 서 론

소음기 (silencer)는 내연기관, 유체기계 및 공조 시스템의 소음을 저감시키기 위하여 널리 사용되고 있으며, 일반적으로 흡음형 소음기 (dissipative silencer)와 반사형 소음기 (reactive silencer)로 나눌 수 있다. 흡음형 소음기는 흡음재의 흡음 성능을 사용한 것으로서, 광대역 주파수 특성을 가지며, 고주파 영역에서 더욱 효과적이고, 주로 팬 소음이나 제트기관의 소음 등에 적합하다. 반사형 소음기는 유동이 흐르는 관의 확장이나 축소로 인하여 발생하는 임피던스 부정합 (mismatching)을 이용하여, 이에 의한 음파의 반사, 간섭작용을 이용하여 소음을 저감시키는 것이다. 소음기의 성능은 음향학적 특성과 기계적 특성으로 나눌 수 있다. 음향학적 성능으로는 소음기 자체의 음향 성능만을 나타내는 전달 손실 (transmission loss)과 소음기 및 소음원 (noise source) 그리고 미관에서의 방사 특성을 모두 포함하는 삽입 손실 (insertion loss) 등으로 나눌 수 있다. 기계적 성능으로는 소음기 전·후의 압력차이를 의미하는 배압 (back pressure)

이 있다.

전달 손실은 소음기에 입사된 PWL (Sound Power Level)에서 하단 측에 전달된 PWL을 뺀 값이며, 이론식들은 대부분 이 값을 예측하게 되므로, 예측치와 실측치의 비교에 유용하다. 이 값은 단지 소음기만의 음향성능만 고려하게 되므로, 음원 및 출구에서의 방사 임피던스 등은 무시되어, 실제 장착상태에서의 음향 특성과는 다르게 될 수 있고, 상단 및 하단에서의 입사파와 반사파를 구분하여야 하므로, 번거로운 작업을 수반하게 된다. 전달손실을 측정하는 방법으로는 반사 계수를 측정하는 방법과 4 단자 정수를 측정하는 방법이 있다.

본 연구에서는 반사파가 크게 발생하는 덕트 시스템 등에서 전달손실을 측정할 때 발생하는 오차에 대한 연구를 수행하고 이를 보정할 수 있는 기법을 제안하고자 한다.

2. 전달 손실 측정 방법

2.1 반사 계수 이용법

그림 1은 소음기 요소의 전달 손실 측정시의 입사파, 반사파, 전달파 및 반사계수 등을 보이고 있다. A_1, B_1, A_2, B_2 는 각각 상단에서의 입사파, 반사파, 하단에서의 입사파, 반사파를 의미한다. 또한, R_u, R_d 는 상단과 하단에서의 반사계수를 의미하며, 다음과 같이 정의 된다:

* 한국과학기술원 기계공학과 박사과정
E-mail : irony00@kaist.ac.kr
Tel : (042) 869-3075, Fax : (042) 869-8220
** 한국과학기술원 기계공학과 교수
*** 현대자동차

$$R_u = \frac{B_1}{A_1}, \quad R_d = \frac{B_2}{A_2}. \quad (2.1.a,b)$$

Chung & Blazer [1]는 상단과 하단의 반사계수, 그리고 상단과 하단간의 주파수 응답함수 (H_{AB})를 측정하여 다음과 같은 관계를 이용하여 전달함수를 측정하는 방법을 제안한 바 있다:

$$TL_{AB} = 10 \log_{10} (W_i/W_r) = 10 \log_{10} \frac{S_u |A_1|^2}{S_d |A_2|^2} \quad (2.2.a)$$

$$= 10 \log_{10} \left(\frac{S_u |P_A|^2 |1+R_u|^2}{S_d |1+R_u|^2 |P_B|^2} \right) \quad (2.2.b)$$

$$= 20 \log_{10} \left| \frac{1+R_u}{1+R_d} \right| - 20 \log_{10} \left| \frac{P_B}{P_A} \right| + 10 \log_{10} \left(\frac{S_u}{S_d} \right) \quad (2.2.c)$$

여기서, S_u , S_d 는 상단과 하단의 관의 면적이며, P_B/P_A 는 상단과 하단의 주파수 응답함수, H_{AB} 를 의미한다.

반사파가 존재하지 않는 경우에는 식 2.2 를 이용하여 측정이 가능하다. 반사파가 없는 경우의 소음기 요소의 이론적인 반사 계수 및 전달 계수를 R_0 , T_0 라 하면 다음과 같이 정의할 수 있다:

$$R_0 = \frac{\text{reflected pressure}}{\text{incident pressure}} = \frac{D_1}{C_1}, \quad (2.3.a)$$

$$T_0 = \frac{\text{transmitted pressure}}{\text{incident pressure}} = \frac{C_2}{C_1}. \quad (2.3.b)$$

반사파가 존재하는 경우, 소음기 요소의 상단과 하단의 반사파 (reflected wave) 및 전달파 (transmitted wave)는 다음과 같이 왜곡되게 된다:

$$D_1' = R_0 C_1 + T_0 D_2 = R_0 C_1 + T_0 R_1 C_2, \quad (2.4.a)$$

$$C_2' = T_0 C_1 + R_0 D_2 = T_0 C_1 + R_0 R_1 C_2. \quad (2.4.b)$$

측정되는 반사 계수 및 전달 계수는 R_1 , T_1 으로 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$R_1 = \frac{D_1'}{C_1} = R_0 + T_0 T_1 R_1, \quad (2.5.a)$$

$$T_1 = \frac{C_2'}{C_1} = \frac{T_0}{1 - R_0 R_1}. \quad (2.5.b)$$

이러한 관계로부터 이론적인 전달 계수 T_0 와 측정되는 전달계수 T_1 간에는 다음과 같은 관계가 성립하게 된다:

$$T_0 = \frac{(1 - R_1 R_0) T_1}{1 - T_1^2 R_0^2}. \quad (2.6)$$

한편, 직관에서의 이론적 전달행렬을 이용하면, 측정되는 A-B 사이의 전달 손실과 C-D 사이의 전달 손실이 같다.

2.2 4 단자 정수 이용법

소음기 요소의 4 단자 정수는 두 개의 음원 방법 (two source method)으로 측정 가능하다 [2]. 그림 2 는 4 단자 정수 측정을 위한 시험 장치를 보이고 있다. 순방향 (forward), 역방향 (backward) 두 경우의 마이크로폰 사이의 주파수 응답 함수를 측정하여 A-B 사이의 4 단자 정수를 측정하게 된다:

$$\begin{bmatrix} P_A \\ U_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_B \\ U_B \end{bmatrix}. \quad (2.7)$$

이를 풀어서 정리하면 다음과 같다:

$$\begin{bmatrix} A_1 + B_1 \\ \frac{S_u}{\rho_o c_o} (A_1 - B_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 + B_2 \\ \frac{S_d}{\rho_o c_o} (A_2 - B_2) \end{bmatrix}. \quad (2.8)$$

위의 관계로부터 전달 계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다 [3]:

$$\frac{1}{T_1} = \frac{A_1}{A_2} = \frac{1}{2} \left(T_{11} + T_{12} \frac{S_d}{\rho_o c_o} + T_{21} \frac{\rho_o c_o}{S_u} + T_{22} \frac{\rho_o c_o}{S_u} \frac{S_d}{\rho_o c_o} \right) + \frac{1}{2} \frac{B_2}{A_2} \left(T_{11} - T_{12} \frac{S_d}{\rho_o c_o} + T_{21} \frac{\rho_o c_o}{S_u} - T_{22} \frac{\rho_o c_o}{S_u} \frac{S_d}{\rho_o c_o} \right) \quad (2.9)$$

한편, 소음기 하단에 반사파가 존재하지 않는 경우, 즉 이론적인 전달 계수는 다음과 같다:

$$\frac{1}{T_0} = \frac{A_1}{A_2} = \frac{1}{2} \left(T_{11} + T_{12} \frac{S_d}{\rho_o c_o} + T_{21} \frac{\rho_o c_o}{S_u} + T_{22} \frac{\rho_o c_o}{S_u} \frac{S_d}{\rho_o c_o} \right). \quad (2.10)$$

2.1 절 에서와 마찬가지로 전달 손실에 반사파가 미치는 영향을 고려할 수 있게 된다.

3. 측정 결과 분석

2 장에서 설명한 전달 손실 측정 방법 및 반사

파에 의하여 발생하는 오차의 영향을 살펴 보기 위한 적용 예제로서 디젤 매연 여과기 (diesel particulate filter, DPF)에 대한 실험 결과 [4]를 이용하였다.

그림 3 은 전달손실을 측정하기 위한 실험 장치와 장비들을 보이고 있다. 사용된 관은 지름 0.14m 의 원형 관이며 관의 직경에 의한 평면파 전파 한계 주파수는 1400Hz 이다. 음압 가진을 위하여 시편의 1.2m 상단에 스피커 (JBL 2020H)를 설치하였으며, 주파수 범위는 50 Hz - 5.5 kHz 이며, sine sweep 방법으로 가진하였다. 상단과 하단에서 반사 계수를 구하는 과정에서 각각 2 개의 마이크로폰을 사용하였다. 실험에 사용된 DPF 는 Corning 사에서 제작된 EX80 이다. 관내에서 전파하는 음파가 관의 끝부분에서 반사되어 돌아오는 경우에 신호 대 잡음 비가 감소하게 되는데 이를 방지하기 위하여 반-무반사 종단 (semi-anechoic termination)을 설치하였다.

그림 4 는 유동이 없는 경우에 반사파가 미치는 영향을 고려하여 측정된 전달 손실을 보이고 있다. 반사계수를 이용하여 측정된 전달손실과 4 단자 정수를 이용하여 측정된 전달손실을 반사파를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대하여 나타내고 있다. 반사파의 영향이 포함된 결과들은 약 250Hz 주기의 변동 (fluctuation)이 포함되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 실험장치에서 DPF 샘플의 하단에 위치한 관의 길이인 0.65m 에 의하여 발생하는 정상파 (standing wave)로 설명할 수 있다. 반사파의 영향이 존재하는 관 내부에서 전달손실 등의 음향 성능을 측정함에 있어서, 반사파에 의한 오차를 보정해 주어야 함을 알 수 있다. 4 단자 정수를 측정하는 방법은 측정이 번거롭다는 단점이 있지만, 전달행렬을 알 수 있으므로 시스템의 해석이 가능하다는 장점이 있고, 반사 계수의 측정을 이용한 방법은 측정이 간단하지만, 단지 전달 계수만을 측정한다는 단점이 있으므로, 두 방법의 장단점을 고려하여 적용할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 반사파가 존재하는 배관 시스템에서 소음기 등의 음향 성능인 전달 손실은 일반적으로 반사 계수를 이용한 측정과 4 단자 정수를 이용한 측정으로 구분할 수 있다. 전달손실을 측정함에 있어서 반사파를 최소화 시키기 위하여 반-무반사 종단 (semi-anechoic termination)을 사용하지만, 반사파의 영향은 존재하게 되며, 소음기 요소의 종류에 따라서 반사파가 큰 오차를 발생시키게 된다. 이론적인 전달 손실, 즉 배관 시스템의 특성에 전혀 무관한 전달 손실의 측정을 위해서는 이러한 왜곡을 보정하여야 한다. 디젤 엔진 자동차에 사용되는 디젤 매연 여과기 (DPF)에 대한 전달 손실을 측정하여 그때 발생하는 반사파에 의한 오차를 살펴 보았으며, 보정을 수행하였다. 전달손실에서 반사파에 의하여 발생하는 오차를 4 단자 정수 측정을 통한 방법 및 반사 계수 측정을 통한 방법 두 가지에 대하여 보정하였으며, 보정을 수행한 후에는 정상파에 의한 오차가 사라지는 것을 보였다.

후 기

본 연구는 BK21 project 의 일부 후원을 받았습니다.

참 고 문 헌

- (1) J. Y. Chung and D. A. Blaser, "Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory," J. Acoust. Soc. Am. 68, 907-913 (1980).
- (2) M. L. Munjal and A. G. Doige, "Theory of a two source location method for direct experimental evaluation of the four-pole parameters of an aeroacoustic element," J. Sound Vib. 141, 323-333 (1990).
- (3) C.-M. Park, J.-G. Ih, Y. Nakayama and H. Takao, "Inverse estimation of the acoustic impedance of a porous woven hose from measured transmission coefficients," J. Acoust. Soc. Am. 113, 128-138 (2003).
- (4) 최원용, 디젤 매연여과기 내의 음향전파 해석에 관한 연구, M.S. Thesis, KAIST (2005).

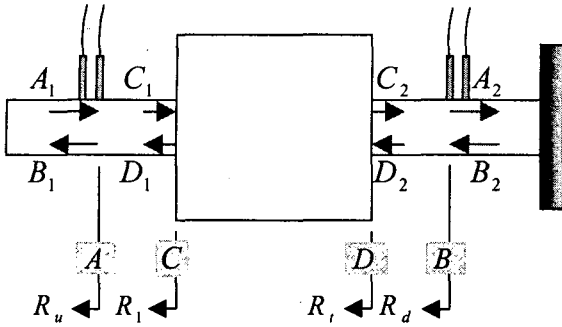


그림 1. 소음기 전달 손실 측정시의 입사파, 반사파, 반사계수

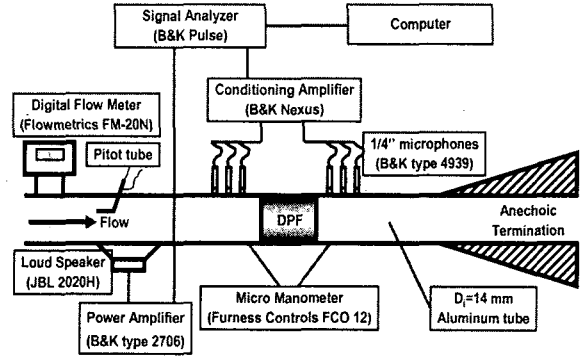
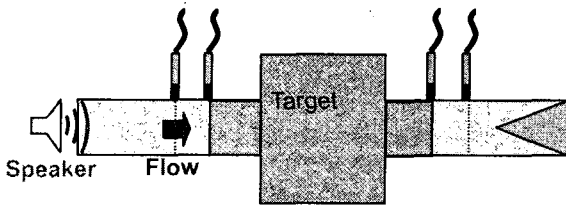
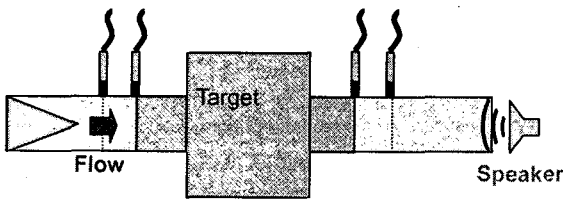


그림 3. DPF 전달 손실 측정을 위한 실험 장치



a) 순방향 (forward) 측정



b) 역방향 (backward) 측정

그림 2. 소음기 요소의 4 단자 정수 측정 방법

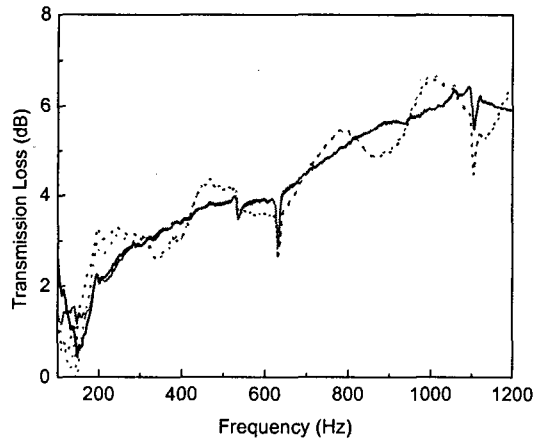


그림 4. 반사파의 영향을 고려하여 측정한 DPF의 전달손실: —, 반사계수를 이용하여 반사파의 영향을 제거한 전달 손실; - - - - -, 반사계수를 이용하여 반사파의 영향을 포함한 전달 손실; — · — · —, 4 단자 정수를 이용하여 반사파의 영향을 제거한 전달 손실; - - - - -, 4 단자 정수를 이용하여 반사파의 영향을 포함한 전달 손실.