

엔진 흡기계에 쓰이는 다공형 직조관의 음향특성 측정 및 성능예측

•박철민*, 이정권*, Y. Nakayama**, S. Kitahara**, H. Takao***

Measurement of Acoustic Properties and Prediction of Acoustic Performance of Porous Woven Hoses for Engine Intake Systems

C. -M. Park*, J. -G. Ih*, Y. Nakayama**, S. Kitahara**, H. Takao***

ABSTRACT

The porous woven hose is recently considered as an effective element of automotive intake systems. In order to predict the acoustic performance of an intake system with a porous woven hose, the information on the acoustic wall impedance is required. In this article, a measurement technique that is valid over the low frequency range and without mean flow condition is presented. The measurement is performed in a cylindrical chamber with a concentric layout of the sample and the resistance is estimated from measured reactance and transmission loss data. It is observed that the measured transmission loss for a porous woven hose with an arbitrary length agrees well with the predicted one that uses the estimated impedance for a small sample length.

1. 서론

최근 들어 내연기관의 흡기소음(intake noise)을 줄이기 위해 사용되는 효과적인 소음 제어 요소로서 직조관(porous woven hose)이 사용되고 있다. 직조관은 폴리아미드(polyamide)로 표면처리된 철사로 틀이 짜여진 나선형 구조에 면사 또는 나일론으로 직조하여 만들어지며, 폴리에스터(polyester)로 표면 처리된다. 직조관은 흡기계의 길이에 따른 공명을 피할 수 있다는 소음제어 측면에서의 장점 외에도, 자체가 유연하기 때문에 진동의 차단에도 효과가 있으며, 복잡한 엔진실 내부에서 흡기관이 위치할 수

있는 공간적 제약에 덜 민감하다는 장점들을 가진다[1]. 직조관이 사용된 흡기계의 음향 특성을 예측하기 위해서는 직조관의 임피던스(acoustic wall impedance)에 대한 정보를 알아야 한다. 그러나, 높은 저항(resistance), 두께, 곡률, 비균질성(inhomogeneity) 등의 특수한 음향학적 특성과 구조적 특성 때문에 직조관의 임피던스를 정확하게 측정하는 것은 쉽지 않다.

일반적으로 사용되는 임피던스 관(impedance tube)을 이용하여 직조관의 임피던스를 측정하기 위해서는 원반모양의 평평한 시편으로 직조관을 잘라야 한다. 그러나, 이 경우 직조관의 구조를 지지하는 금속실이 절단되고, 따라서 직조관 벽의 특성이 바뀌게 된다.

* 한국과학기술원 기계공학과 소음진동제어연구센터

** Nihon Sekiso Ind. Co. (Japan)

*** Maruyasu Ind. Co. (Japan)

임피던스 관를 이용하여 평평하게 자른 직조관 시편의 임피던스를 측정하는 많은 실험을 수행하였지만, 재현성이 있는 결과를 얻을 수 없었다. 이것은 직조관의 임피던스를 측정하기 위해서는 실제 사용되는 상태 그대로, 즉 원형관의 형태를 유지한 상태로 측정되어야 한다는 것을 의미한다. 따라서, 본 연구에서는 자동차 흡기 소음에서 주로 문제가 되는 저주파 영역과 짧은 길이의 직조관, 그리고 유동이 없는 조건에서 유효한 임피던스 측정 방법에 대해 연구하였다.

2. 직조관의 임피던스 측정

2.1. 동심형 방법을 이용한 임피던스 측정

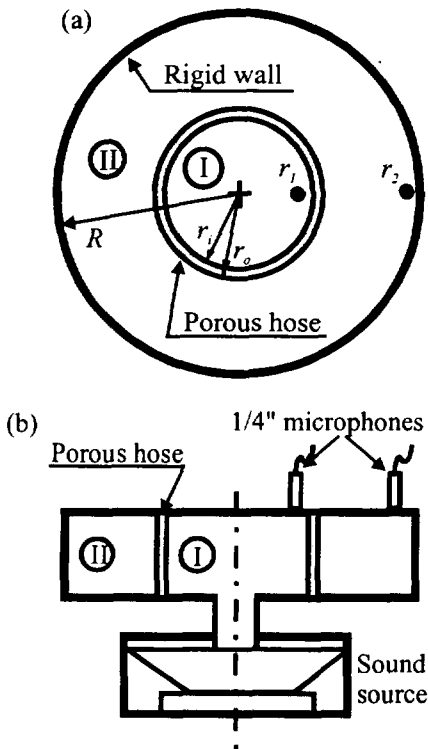


Fig. 1. The experimental apparatus for initial impedance measurement: (a) Top view, (b) side sectional view ($R=50\text{mm}$, $r_i=27.5\text{mm}$, $r_o=30.5\text{mm}$, $r_i=20\text{mm}$, $r_2=45\text{mm}$, height=40mm).

본 연구에서는 직조관의 임피던스를 측정하기 위해 Fig. 1과 같이 원통형으로 잘린 짧은 길이의 직조관과 이보다 큰 지름을 가지는 원통형 방(cylindrical chamber)을 동심형으로 배치하고, 직조관 시편 안쪽 r_i 과 바깥쪽 r_2 에 마이크로폰(microphone)을 설치하였다[2].

시편의 내외부에 설치된 마이크로 폰 1과 2 사이의 전달 함수(transfer function)를 측정하면, 이로부터 직조관의 음향 임피던스를 다음과 같이 구할 수 있다. 이 때, 첫번째 모드 이하의 저주파에서, 원통형 방 내부에서 반경 방향(radial direction)으로 전파하는 음파만을 고려하였다. 내부에서 음압은 유한한 값을 가지며, 외벽의 강체벽면에서 반경방향 입자 속도는 0이라는 경계조건을 이용하면, 영역 I과 II 안의 임의의 위치 r 에서의 음압 $P_I(r)$ 과 $P_{II}(r)$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_I(r) = AJ_0(kr), \quad (1)$$

$$P_{II}(r) = B \left\{ J_0(kr) - \frac{J_1(kR)}{Y_1(kR)} Y_0(kr) \right\}, \quad (2)$$

여기서 A 와 B 는 음압 진폭을 나타내는 미지의 상수, R 은 강체 벽면까지의 반지름, k 는 전파상수(wave number), 그리고 J_n 과 Y_n 은 제 1종과 제 2종 n 차 베셀 함수(Bessel function)이다. 그리고, 직조관의 임피던스, Z_p 는 식 (3)과 같이 정의된다.

$$\frac{Z_p}{\rho_0 c_0} = \frac{\Delta P}{\rho_0 c_0 u_{avg}} = \frac{P_I(r_i) - P_{II}(r_o)}{\rho_0 c_0 u_{avg}}, \quad (3)$$

여기서 ΔP 는 시편 내외부의 음압 차이이고, u_{avg} 는 시편 내외부 벽면에서의 반경방향 평균 입자 속도 (particle velocity)이며, ρ_0 는 공기의 밀도이고 c_0 는 음속이다. 그리고, r_i 와 r_o 는 시편의 내부 반지름과 외부 반지름이다. 식 (1)과 (2)를 식 (3)에 대입하고,

시편 내외부의 벽면에서 체적 속도 연속성(continuity of volume velocity)의 성질을 이용하면, 식 (4) 를 얻을 수 있다.

$$\frac{Z_p}{\rho_0 c_0} = j \frac{2r_i}{r_i + r_o} \frac{D_1}{D_2}, \quad (4.1)$$

여기서,

$$D_1 = -\{J_0(kr_o)Y_1(kR) - J_1(kR)Y_0(kr_o)\}, \quad (4.2)$$

$$D_2 = J_1(kr_o)Y_1(kR) - J_1(kR)Y_1(kr_o), \quad (4.3)$$

이다.

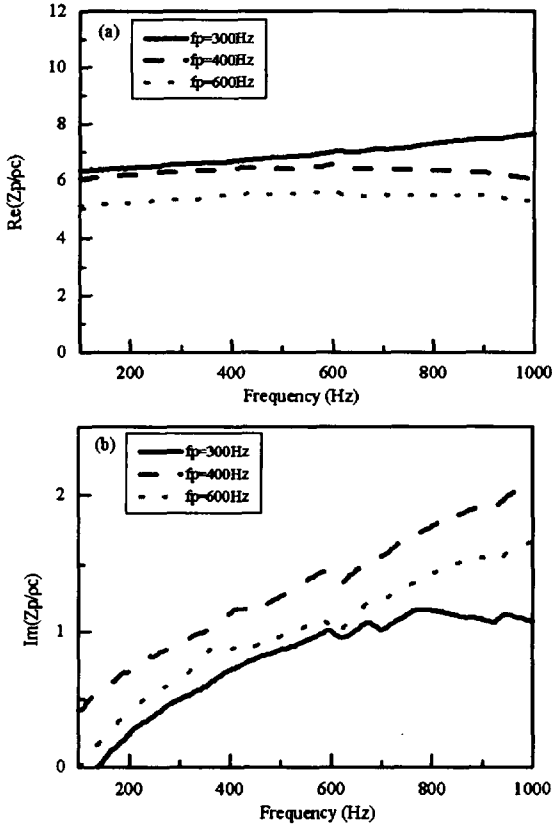


Fig. 2. Acoustic impedance of several porous duct samples measured by using the concentric measurement apparatus in Fig. 1. (a) Resistance, (b) reactance.

음압 진폭 비 A/B 는 시편의 내외부, r_1 과 r_2 에서 측정된 전달함수, $H_{21}(\omega) = P_{II}(\omega; r_2)/P_I(\omega; r_1)$ 를 이용하여 식 5와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 ω 는 각주파수이다.

$$\frac{A}{B} = \frac{1}{H_{21}} \frac{J_0(kr_2)Y_1(kR) - J_1(kR)Y_0(kr_2)}{J_0(kr_1)Y_1(kR)}. \quad (5)$$

마지막으로 식 (5)를 식 (4)에 대입하면, 시편의 음향 임피던스를 전달함수를 이용하여 표현할 수 있다. 이 식을 이용하면 측정된 전달함수로부터 시편의 임피던스를 얻을 수 있다.

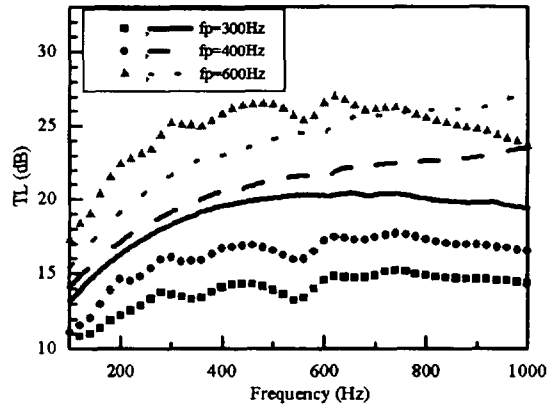


Fig. 3. A comparison of predicted and measured TL ($L=480\text{mm}$). The impedance data in Fig. 2 was used in the calculation: Symbol, measured; lines, predicted.

Fig. 2는 위에서 언급한 방법으로 측정된 3가지 종류의 직조관에 대한 임피던스 측정결과를 보여준다. 직조관은 소위 'porous frequency'라는 인자로 특징지워지며, 이것은 직조관 벽의 흐름저항(flow resistance)과 관계된 인자이다[1]. 실험에 사용된 시편의 porous frequency(f_p)는 300, 400, 600 Hz 이다. Fig. 2의 측정된 임피던스로부터 직조관의 길이가 480mm일 때의 전달손실을 예측하고, 측정된 전달손실과 비교하였다. Fig. 3은 예측한 전달손실과 측정된 전달손실의 비교하여 보여준다. 그림에서

보듯이 측정값과 예측값에 큰 차이가 있는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 차이는 주로 측정된 레지스턴스(resistance)에 포함된 측정된 오차 때문이다.

2.2. 측정된 전달손실과 리액턴스(reactance)를 이용한 레지스턴스(resistance)의 추정

원형관 내에서 음파의 거동은 기본적인 음향학적 가정들을 통해 선형화된 연속 방정식, 운동 방정식, 그리고 에너지 방정식을 따른다. 저주파에서 유효한 간단한 형태의 특성 방정식(eigen equation)을 얻기 위해, 원형 관내의 각도방향 성분을 무시하고, 연속방정식과 운동방정식을 단면에 대해 평균을 취해 주고 정리하면[3], 식 (6)과 같은 저주파에서 유효한 간단한 형태의 특성방정식을 얻을 수 있다. 그리고, 길이 L 인 직조관의 전달손실 TL 은 식 (7)과 같이 표현된다.

$$k = \pm \sqrt{k_0^2 - j \frac{2}{r_i} \frac{k_0}{Z_n / \rho_0 c_0}}, \quad (6)$$

$$TL = 20 \log_{10} \left[\sqrt{\frac{S_0}{S_L}} \left| \cos(kL) + j \frac{1}{2} \left(\frac{k_0}{k} + \frac{k}{k_0} \right) \sin(kL) \right| \right]. \quad (7)$$

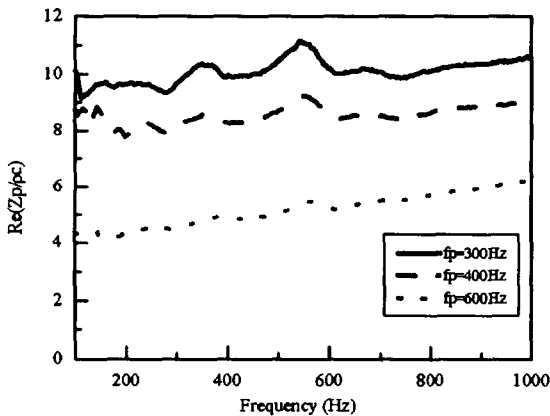


Fig. 4. The resistance estimated from the measured TL ($L=480\text{mm}$) and the measured reactance by the concentric method.

여기서, k 는 축 방향으로 전파되는 복소 전파 상수 (complex propagation constant)이고, $k_0 = \omega/c_0$, S_0 와 S_L 는 $z=0$ 과 $z=L$ 에서의 단면적, 그리고, Z_n 은 수직 임피던스(normal impedance)이다. 마지막으로, 식 (6)을 식 (7)에 대입하면, 전달손실 TL 은 수직 임피던스의 함수로 표현된다. 여기서, 전달손실과 리액턴스(reactance)가 주어진다면, 수직 임피던스의 레지스턴스(resistance)를 구할 수 있다.

또한, 짧은 길이의 직조관에서는 방사 임피던스 (radiation impedance)를 무시할 수 있으므로, 수직 임피던스(normal impedance, Z_n)으로부터 직조관의 임피던스(Z_p)를 식 (8)과 같이 구할 수 있다[4].

$$\frac{Z_n}{\rho_0 c_0} \approx \frac{r_i + r_o}{2r_o} \frac{Z_p}{\rho_0 c_0}. \quad (8)$$

Fig. 4는 식 (6-8)을 이용하여 구한 레지스턴스를 보여주고 있다. 여기서는 길이 480 mm에서 측정된 전달손실 데이터와 2.1절의 방법을 이용해 측정된 Fig. 2(b)의 리액턴스 데이터를 이용해 측정된 Fig. 2(b)의 리액턴스 데이터를 이용하였다. 이렇게 추정된 레지스턴스는 Fig. 2(a)의 동심형 방법으로 측정된 레지스턴스와 큰 차이를 보이고 있음을 관찰할 수

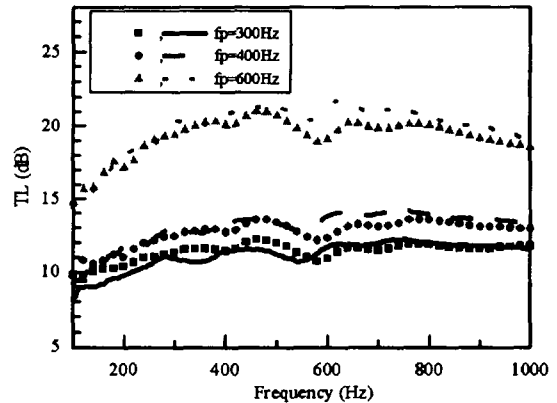


Fig. 5. A comparison of predicted and measured TL ($L=393\text{mm}$). The resistance in Fig. 4 and the reactance in Fig. 2(b) were used in the calculation: Symbol, measured; lines, predicted.

있다. Fig. 5는 길이 393 mm인 직조관의 전달손실을 측정된 결과와 Fig. 2(b)의 리액턴스와 Fig. 4의 추정된 레지스턴스로부터 예측한 전달손실을 비교하여 보여준다. Fig. 3과는 달리, 각각의 시편에 대해 예측한 전달손실과 측정된 전달손실이 잘 일치하고 있음을 관찰할 수 있다.

3. 결론

직조관이 사용된 자동차 흡기계의 음향 특성을 예측하기 위해서는 직조관의 임피던스(acoustic wall impedance)에 대한 정보가 필요하다. 본 연구에서는 짧은 길이를 가지는 원통형의 직조관 시편과 이보다 큰 지름을 가지는 원통형 방(cylindrical chamber)을 동심형으로 배치하여 음향 임피던스를 측정하였다. 그리고, 측정된 레지스턴스(resistance)에 포함된 오차를 줄이기 위해 전달손실과 리액턴스(reactance)로부터 레지스턴스를 추정하였다. 이렇게 추정된 레지스턴스와 측정된 리액턴스로부터 실제 사용되는 범위 내에서 임의의 길이를 가지는 직조관의 전달손실을 예측하였고, 측정된 전달손실과 비교하여, 잘 일치하는 것을 확인하였다. 본 연구에서 제시한 방법은 직조관의 음향 특성을 파악하고, 직조관이 사용된 자동차 흡기계의 음향성능을 예측하는데 유용하게 사용될 수 있다.

참고문헌

- (1) H. Lepoutre, Brochure of the Westaflex automobile company, France, 1998.
- (2) A. Cummings, Personal communication with the authors, 1998.
- (3) V. L. Khitrik, 1996, "Propagation of sound in a cylindrical duct with porous walls," *Acoust. Phys.*, Vol. 42, pp. 646-647.

- (4) A. Cummings, R. Kirby, 1999, "Low-Frequency sound transmission in ducts with permeable walls," *Journal of Sound Vibration*, Vol. 226, pp. 237-251.