

엔진 흡기계에 쓰이는 다공형 직조관의 음향 임피던스 측정

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

한국과학기술원 기계공학과 소음 및 진동제어 연구센터(NoViC)

Nihon Sekiso Ind. Co.*, Maruyasu Ind. Co.**

Measurement of acoustic impedance from the transmission coefficients of porous woven hoses in engine intake systems

Chul-Min Park, Jeong-Guon Ih, Yoshio Nakayama*, Senji Kitahara*, Hideo Takao**

NoViC, Dept. of Mech. Eng., KAIST

Nihon Sekiso Ind. Co. (Japan)*, Maruyasu Ind. Co. (Japan)**

e-mail: DyBoon@cais.kaist.ac.kr, ihih@sorak.kaist.ac.kr

요약

내연기관의 흡기 소음을 줄이기 위한 효과적인 소음 제어 요소로서 다공형 직조관(porous woven hose)이 널리 사용된다. 직조관이 사용된 흡기계의 음향 특성을 예측하기 위해서는 직조관의 임피던스(acoustic wall impedance)에 대한 정보를 알아야 한다. 그러나, 높은 저항(resistance), 두께, 곡률, 비균질성 등의 특수한 음향학적/구조적 특성 때문에 직조관의 임피던스를 정확하게 측정하는 것은 쉽지 않다. 본 연구에서는 소음기의 전달손실(transmission loss)을 측정하는데 널리 사용되는 간단한 측정장치를 이용하여 직조관의 임피던스를 측정하였다. 측정된 임피던스에 대해 직조상태를 나타내는 인자와 주파수를 독립변수로 사용하여 curve-fitting을 수행하여, 직조상태가 다른 직조관의 임피던스를 예측하였다. 이렇게 예측된 임피던스로부터 실제 사용되는 범위 내에서 임의의 길이를 가지는, 직조상태가 다른 직조관의 전달 손실을 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.

1. 서론

직조관은 폴리아마이드(polyamide)로 표면 처리된 철사로 틀이 짜여진 나선형 구조에 면사 또는 나이론으로

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[1,2].

직조관의 음향 특성을 예측하기 위해서는 직조관의 임피던스에 대한 정보가 필요하다. 일반적으로 사용되는 임피던스 관(impedance tube)을 이용하여 직조관의 임피던스를 측정하기 위해서는 원반 모양의 평평한 시편으로 직조관을 잘라야 한다. 그러나, 이 경우 직조관의 원형 구조를 지지하는 철사가 절단되고, 따라서 직조관 벽의 특성이 바뀌게 된다. 따라서, 직조관의 임피던스를 측정하기 위해서는 실제 사용되는 상태, 즉 원형관의 형태를 유지한 상태로 측정되어야 한다. 이러한 조건을 만족시키는 기존의 측정 방법에는 동심형 방법으로 측정된 리액턴스와 전달손실로부터 레지스턴스를 측정하는 방법이[3,4] 있지만, 두 개의 실험장치를 필요로 하기 때문에 측정이 복잡하고 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 보다 간단한 실험장치를 이용하여, 자동차 흡기 소음에서 주로 문제가 되는 저주파 영역 내에서 기존의 방법에 비해 확장된 주파수 범위와 짧은 길이의 직조관, 그리고 유동이 없는 조건에서 유효한 임피던스 측정 방법에 대해 연구하였다.

2. 본론

2.1 음압전달계수를 이용한 직조관의 임피던스 측정

그림 1은 유동이 없는 경우에 강제력을 가진 관 A와 B가 직조관에 연결된 덕트계의 음장을 나타낸다. 평면파로 전파하는 주파수 범위에서의 음장은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_p(z) = P_p^+ \exp(-jk_z z) + P_p^- \exp(jk_z z), \quad (1)$$

$$u_p(z) = \frac{1}{\rho_0 c_0} \frac{k_z}{k_0} \{P_p^+ \exp(-jk_z z) - P_p^- \exp(jk_z z)\}, \quad (2)$$

$$P_p(0) = P_A^+ + P_A^-, \quad u_p(0) = S(P_A^+ - P_A^-) / (\rho_0 c_0 S_p), \quad (3, 4)$$

$$P_p(L) = P_B^+ + P_B^-, \quad u_p(L) = S(P_B^+ - P_B^-) / (\rho_0 c_0 S_p), \quad (5, 6)$$

$$\frac{Z_n}{\rho_0 c_0} = j \frac{k_0 r_i J_0(k_r r_i)}{k_r r_i J_1(k_r r_i)}, \quad (7)$$

$$(k_r)^2 = k_0^2 - (k_z)^2. \quad (8)$$

여기서, ρ_0 는 매질의 밀도, c_0 는 음속, k_z 와 k_r 은 직조관내의 축방향 및 반경방향 복소전파상수, $k_0 = \omega/c_0$, ω 는 각 주파수, S 는 관 A와 B의 단면적, $S_p = \pi r_i^2$, Z_n 은 직조관 내벽의 임피던스, r_i 는 직조관의 내경, $P_p(z)$ 와 $u_p(z)$ 는 좌표 z 에서 직조관내의 음압과 입자속도, 윗첨자 '+'와 '-'는 각각 입사파와 반사파를 의미하며, P_A^+ 와 P_B^+ 는 A와 B면에서의 입사되는 음압과 반사되는 음압이다.

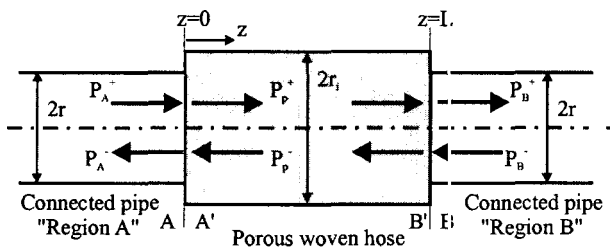


그림 1. 직조관이 포함된 덕트계의 음장.

또한, 짧은 길이의 직조관에서 방사 임피던스의 영향을 무시한다면, 직조관의 임피던스 Z_p 는 내벽의 수직 임피던스 Z_n 을 이용하여 다음이 나타낼 수 있다[3,4].

$$\beta \equiv \frac{Z_p}{\rho_0 c_0} \approx \frac{2r_o}{r_i + r_o} \frac{Z_n}{\rho_0 c_0}. \quad (9)$$

전달행렬을 이용하여 직조관 양단의 음압과 입자속도 사이의 관계를 표현하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} P_p \\ u_p S_p \end{bmatrix}_{z=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_p \\ u_p S_p \end{bmatrix}_{z=L}. \quad (10)$$

여기서,

$$T_{11} = T_{22} = \cos(k_z L), \quad (11a)$$

$$T_{12} = j\rho_0 c_0 k_0 \sin(k_z L) / (k_z S_p), \quad (11b)$$

$$T_{21} = jk_z S_p \sin(k_z L) / (\rho_0 c_0 k_0), \quad (11c)$$

이다.

음압전달계수 τ 는 입사되는 음압과 투과되는 음압의 비로 정의되면, 직조관의 경우 식 (11)을 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{\tau} = \frac{P_A^+}{P_B^+} = f\left(k_z, L, k_0, \frac{P_B^-}{P_B^+}\right), \quad (12)$$

$$f\left(k_z, L, k_0, \frac{P_B^-}{P_B^+}\right) = \frac{1}{2} \left\{ \begin{aligned} & \left[T_{11} + T_{12} \frac{S}{\rho_0 c_0} + T_{21} \frac{\rho_0 c_0}{S} + T_{22} \right] \\ & + \frac{P_B^-}{P_B^+} \left[T_{11} - T_{12} \frac{S}{\rho_0 c_0} + T_{21} \frac{\rho_0 c_0}{S} - T_{22} \right] \end{aligned} \right\}. \quad (13)$$

여기서, 영역 B에서 반사되는 음파가 없다면, 즉, $P_B^-/P_B^+ = 0$ 이라면, 식 (13)으로부터 직조관의 전달손실 TL을 얻을 수 있다.

$$TL = 20 \log_{10} \left| f\left(k_z, L, k_0, \frac{P_B^-}{P_B^+} = 0\right) \right|. \quad (14)$$

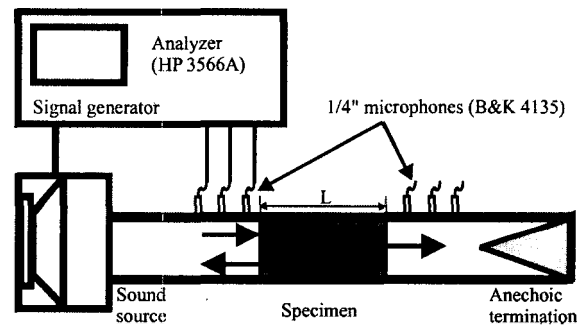


그림 2. 다수의 마이크로폰(microphone)을 이용한 관내 음향인자(in-duct acoustic properties) 측정 장치.

소음기의 전달손실을 측정하기 위해 널리 사용되는 그림 2의 측정장치를 이용하면, τ 와 P_B^-/P_B^+ 등의 관내 음향

인자를 측정할 수 있다. 길이를 바꾸어서 측정된 τ 와 P_B^-/P_B^+ 의 N 개의 데이터

$$\left\{ \tau_i, L_i, \left(\frac{P_B^-}{P_B^+} \right)_i \right\} \quad (i = 1, 2, \dots, N), \quad (15)$$

가 있을 때, 직조관의 비임피던스(normalized impedance, β)는 다음의 목적함수 Φ 가 최소가 되도록 하여 구할 수 있다.

$$\Phi = \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{\tau_i} - F_i \left(\beta; L_i, \frac{P_B^-}{P_B^+} \right) \right)^2, \quad (16)$$

$$F_i \left(\beta; L_i, \frac{P_B^-}{P_B^+} \right) = f \left(k_z, L, k_0, \frac{P_B^-}{P_B^+} \right) = \frac{1}{\tau_i}. \quad (17)$$

여기서, P_B^-/P_B^+ , L 는 독립변수(independent variable)이다. 식 (16)이 최소가 되는 β 를 찾기 위해서, 식 (17)을 $\beta = \beta_0$ 부근에서 테일러 시리즈 전개(Taylor series expansion)를 이용하여 선형화하고, 행렬식으로 표현하면,

$$A \delta = Y, \quad (18)$$

와 같고, 여기서,

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \beta} \\ \vdots \\ \frac{\partial F_N}{\partial \beta} \end{bmatrix}_{\beta=\beta_0}, \quad Y = \begin{bmatrix} \frac{1}{\tau_1} - F_1(\beta_0) \\ \vdots \\ \frac{1}{\tau_N} - F_N(\beta_0) \end{bmatrix}, \quad (19a, 19b)$$

$$\frac{\partial F_i}{\partial \beta} = \frac{\partial F_i}{\partial k_z} \frac{\partial k_z}{\partial k_r} \frac{\partial k_r}{\partial \beta}, \quad \frac{\partial k_z}{\partial k_r} = -\frac{k_r}{k_z}, \quad (19c, 19d)$$

$$\frac{\partial k_r}{\partial \beta} = \frac{r_i + r_o}{2r_o} \frac{jk_r}{k_o r_i} \left\{ 1 + \left(\frac{r_i + r_o}{2r_o} \frac{jk_r \beta}{k_o} \right)^2 \right\}^{-1}, \quad (19e)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_i}{\partial k_z} &= -L \sin(k_z L) \\ &+ \frac{jL}{2} \left\{ \frac{S}{S_p} \frac{k_0}{k_z} \left(1 - \frac{P_B^-}{P_B^+} \right) + \frac{S_p}{S} \frac{k_z}{k_0} \left(1 + \frac{P_B^-}{P_B^+} \right) \right\} \cos(k_z L), \\ &+ \frac{j}{2} \left\{ -\frac{S}{S_p} \frac{k_0}{k_z^2} \left(1 - \frac{P_B^-}{P_B^+} \right) + \frac{S_p}{S} \frac{1}{k_0} \left(1 + \frac{P_B^-}{P_B^+} \right) \right\} \sin(k_z L) \end{aligned} \quad (19f)$$

$$\delta = \beta - \beta_0, \quad (19g)$$

이다. 이때, 식 (18)의 최소자승해는 다음과 같다[5,6].

$$\delta = (A^H A)^{-1} A^H Y, \quad (20)$$

여기서 A^H 는 행렬 A 의 Hermitian matrix이다. 식 (20)과 초기값 $\beta_0^{(1)}$ 으로부터 δ 와 다음 단계의 $\beta_0^{(2)} = \beta_0^{(1)} + \delta$ 를 얻는다. 위의 단계를 δ 가 오차 범위 안에 들어올 때까지 수행하는

간단한 반복법을 이용하면, 식(16)을 최소로 만드는 β , 즉, 직조관의 비임피던스를 얻을 수 있다.

2.2 실험결과

본 연구에서는 그림 2의 측정장치를 이용하여 τ 와 P_B^-/P_B^+ 를 측정하였고, 측정의 정확도를 향상시키기 위해서 Multiple Microphone Method[7]를 적용하였다. 이 때, 음원은 랜덤신호로 가진되는 라우드 스피커를 사용하였고, 관 벽 밀착형으로 장착된 1/4-인치 마이크로폰을 사용하였으며, 마이크로폰에서 나오는 신호를 해석하기 위해서는 신호해석기(Signal Analyzer, HP 3566A)가 사용되었다. 수동 종단으로는 썩기 모양으로 유리 섬유를 채운 1 m 길이의 아크릴 관을 사용하였다. 그림 3은 앞 절에서 설명한 방법으로 50-1500 Hz의 주파수 범위에서 길이 약 300 mm와 393 mm인 시편을 이용하여 측정된 직조관의 임피던스와 이에 대해 직조상태를 나타내는 인자 fp와 주파수를 독립변수로 사용하여 curve-fitting한 임피던스를 보여주고 있다. 임피던스 측정에 사용된 직조관과 직조상태가 다른 직조관의 경우에도 측정된 임피던스에 대해 직조상태를 나타내는 인자 fp와 주파수를 독립변수로 사용하여 curve fitting을 적용하면, 직조상태에 따른 임피던스를 예측할 수 있고, 이렇게 예측된 임피던스를 이용하면 그 음향특성을 예측할 수 있다[4]. 그림 4는 길이 480 mm인 직조관의 예측된 임피던스로부터 계산된 전달손실과 측정된 전달손실을 보여주고 있다. 그림 4에서 볼 수 있듯이, 그림 3의 임피던스 측정에 사용된 직조관과 길이도 다르고, fp로 대표되는 직조상태도 다른 직조관들에서도 측정된 전달손실과 예측한 전달손실이 잘 일치함을 확인할 수 있다.

3. 결론

직조관이 사용된 자동차 흡기계의 음향 특성을 예측하기 위해서는 직조관의 임피던스(acoustic wall impedance)에 대한 정보가 필요하다. 본 연구에서는 소음기의 전달손실을 측정하기 위해 널리 사용되는 측정장치를 이용하여 직조관의 음압 전달 계수와 수동 종단의 반사계수를 측정하였고, 이를 이용하여 직조관의 임피던스를 측정하였다. 측정된 임피던스에 대해 직조상태를 나타내는

인자 fp 와 주파수를 독립변수로 사용하여 curve-fitting을 수행하여, 직조상태가 다른 직조관의 임피던스를 예측하였다. 이렇게 예측된 임피던스로부터 실제 사용되는 범위 내에서 임의의 길이를 가지는 직조상태가 다른 직조관의 전달 손실을 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.

감사의 글

본 연구는 일본 Nihon Sekiso Co. Ind.와 공동연구과제로 수행 되었으며, BK21 프로젝트 및 NRL에서 일부 재정 지원을 받았습니다.

참고문헌

1. H. Lepoutre, A brochure of Westflex Automobile Co., France, 1998.
2. A. Cummings and R. Kirby, "Low-frequency sound transmission in ducts with permeable walls," J. Sound Vib. 226, 237-2521 (1999).
3. J.-G. Ih, C.-M. Park, Y. Nakayama, S. Kitahara and H. Takao, "Measurement of Acoustic Properties of Porous Duct for Engine Intake Systems", Proc. Inter Noise 2000 Conference, August, Nice, France, 2000.
4. C.-M. Park, J.-G. Ih, Y. Nakayama, and S. Kitahara, "Measurement of acoustic impedance and prediction of transmission loss of the porous woven hose in engine intake systems," Submitted to the Applied Acoustics.
5. D. W. Marquardt, "An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters," J. Soc. Indust. Appl. Math., 11, 431-439 (1963).
6. E. Kreyszig, *Advanced Engineering Mathematics* (John Wiley & Sons, New-York, 1988).
7. S.-H. Jang and J.-G. Ih, "On the multiple microphone method for measuring in-duct acoustics properties in the presence of mean flow," J. Acoust. Soc. Am., 103, 1520-1526 (1998).
8. M. L. Munjal, *Acoustics of Ducts and Mufflers* (John Wiley & Sons, New-York, 1987).

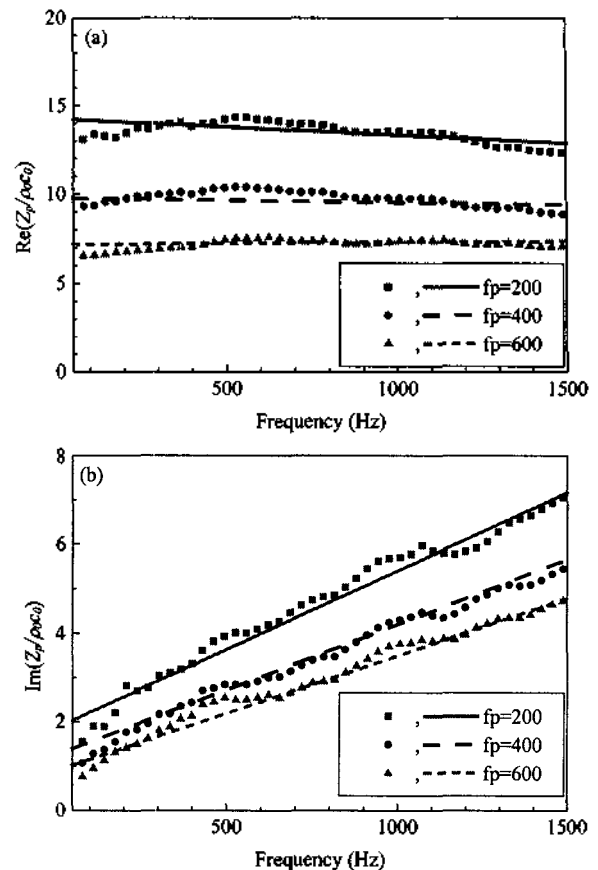


그림 3. 직조관의 직조상태를 나타내는 인자 fp 에 따른 직조관의 임피던스: Symbols, 길이 300 mm와 393 mm인 직조관 시편으로 측정된 직조관의 임피던스; lines, fp 와 주파수를 독립변수로 curve-fitting한 직조관의 임피던스. (a) Resistance, (b) reactance.

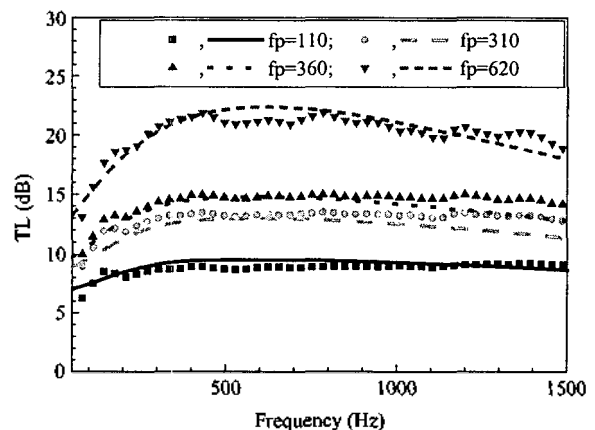


그림 4. 직조관의 직조상태를 나타내는 인자 fp 에 따른 직조관의 전달손실 ($L=480$ mm): Symbols, 측정된 직조관의 전달손실; lines, 예측한 직조관의 전달손실.