

다공성 재료의 물리적 성질 추정 방법에 대한 연구

A Study on Estimation Method for Physical Properties of Sound Absorbing Materials

김윤재† · 강연준* · 김정수**
Yoon Jae Kim, Yeon June Kang and Jung Soo Kim

Key Words : Porous Material(다공성 재료), Absorption Coefficient(흡음률), Surface Impedance(표면 임피던스), Impedance Tube(임피던스 튜브), Estimation(추정), Transfer Matrix Method(전달행렬법).

ABSTRACT

The acoustical performance of porous materials is determined by their seven or more macroscopic physical properties. However, it is not easy to measure all these properties in many cases. Furthermore, the measurement is compels engineers to spend much times. The effect of each property on the normal incidence absorption coefficient and normalized surface impedance was studied to estimate the properties of porous materials by numerical method. According to the investigation, Properties of porous materials are divided into several groups and estimated by each group. This paper is focused on the estimation procedure of porous materials by the numerical method.

1. 서론

복잡한 구조를 가진 구조물에 다공성 재료를 소음제어의 수단으로써 사용할 경우 흔히 해석적인 방법이 사용된다. 그러나 대상물을 시뮬레이션하여 구조물 내부의 음향학적 특성을 살펴볼 경우에 다공성 재료의 물리적 성질에 대한 정보가 필요하다. 그러나 대부분의 경우 실험을 통하여 얻어진 재료의 물리적 성질들은 측정시간이 길뿐만 아니라 많은 경우에 있어서 그 신뢰성 또한 상당히 낮은 경우가 많다. Panneton과 Atalla¹⁾는 Champux-Allard 모델을 이용하여 다공성 재료를 음향학적으로 모델링한 후 유체상의 물리적 성질들을 수치적 방법을 통하여 추정하였다. 또한 Kin Hong²⁾은 음향재료를 Biot 이론을 이용하여 모델링 후 탄성포음의 유체상과 고체상의 물리적 성질들을 추정하였다. 그러나 앞의 두 수치적 방법을 통하여 다공성 재료의 물리적 성질들을 추정하였을 경우, 계산시간이 긴 단점이 있다.

수치적인 방법을 통하여 물리적 성질을 추정하는데 소요되는 시간을 단축하기 위하여 다공성 재료의 임피던스 튜브³⁾에서 측정한 수직입사 흡음률에 대한 각 물리적 성질들의 영향을 파악하여 물리적 성질들의 그룹을 나누고 각 그룹별로 물리적 성질들을 추정하였다.

2. 다공성 재료의 음향학적 모델링

2.1 등가유체를 이용한 모델링

림프포음이나 강제포음의 경우, 고체상과 유체상의 벌크상수 값의 큰 차이로 인하여 고체와 유체상의 연성이 아주 약하게 된다. 이러한 경우, 고체상의 물리적 성질들이 다공성 재료의 음향학적 성능에 미치는 영향은 무시하고 유체상의 물리적 성질들만을 고려하여 음향학적으로 등가인 특성을 가지는 등가유체로 가정할 수 있다.

Johson⁴⁾과 Champux-Allard^{5), 6)}는 다공성 재료에서 발생하는 점성 효과와 열효과를 고려하여 식 (1), (2)와 같은 주파수에 따른 동위틀 림도와 동압축도를 구하였다.

$$\alpha(\omega) = \alpha_{\infty} \left[1 + \frac{\sigma \phi}{j \omega \rho_0 \alpha_{\infty}} \sqrt{1 + \frac{4j \alpha_{\infty}^2 \eta \omega}{\sigma^2 \Lambda^2 \phi^2}} \right] \quad (1)$$

$$\beta(\omega) = \gamma - \frac{\gamma - 1}{1 + \frac{8\eta}{j \Lambda' N_{pr} \omega \rho_0} \sqrt{1 + j \rho_0 \frac{\omega N_{pr} \Lambda'}{16\eta}}} \quad (2)$$

여기서, σ 는 유동저항계수, ρ_0 는 공기의 밀도, α_{∞} 는 뒤틀림도, ϕ 는 공극률, N_{pr} 은 Prandtle 수, η 는 유체의 점성, γ 는 비열, Λ 와 Λ' 은 점성특성 길이와 열특성 길이를 말한다.

식 (1), (2)을 이용하면 다음과 같이 다공성 재료의 특성을 나타내는 주파수에 따른 밀도와 벌크상수를 얻을 수 있다.

$$\rho(\omega) = \alpha(\omega) \rho_0 \quad (3)$$

† 김윤재; 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : 78strepnon@naver.com
Tel : (02) 880-1692, Fax : (02) 888-5950

* 서울대학교 기계항공공학부

** 서울대학교 기계항공공학부

$$K(\omega) = \gamma P_0 / \beta(\omega) \quad (4)$$

또한, 식 (3), (4)를 이용하여 표면임피던스와 수직입사 흡음률을 식 (5), (6) 과 같이 표현할 수 있다.

$$Z_n = -\frac{\sqrt{\rho(\omega)K(\omega)}}{\varphi\rho_0 c} \cot(\omega\sqrt{\rho(\omega)K(\omega)}L), \quad (5)$$

$$\alpha_n = 1 - \left| \frac{Z_n - 1}{Z_n + 1} \right|^2. \quad (6)$$

2.2 Biot 이론을 이용한 모델링

Biot^{7), 8)}은 고체상과 유체상의 응력과 변형을 관계 그리고 미소부피에 작용하는 힘과 그 힘에 의해서 발생하는 운동과의 관계를 이용하여 평형방정식을 유도하고 이를 토대로 다공성 재료의 고체상과 유체상을 통하여 전파되는 음파를 표현하는 다음과 같은 파동방정식을 유도하였다.

$$\nabla[Qe_s + R\epsilon] = -\omega^2(\rho_{12}\mathbf{u} + \rho_{22}\mathbf{U}) - j\omega b(\mathbf{u} - \mathbf{U}) \quad (7)$$

$$N\nabla^2\mathbf{u} + \nabla[(A + N)e_s + Q\epsilon] = -\omega^2(\rho_{11}\mathbf{u} + \rho_{12}\mathbf{U}) + j\omega b(\mathbf{u} - \mathbf{U}) \quad (8)$$

여기서 \mathbf{u} 는 고체상의 변위, \mathbf{U} 는 유체상의 변위, A 는 첫번째 Lamé 상수, Q 와 R 은 고체상의 부피연성계수, N 은 전단상수, ρ_{11} , ρ_{12} , ρ_{22} 는 질량계수이다.

Bolton⁹⁾은 이러한 파동방정식을 이용하여 각 방향 별로 고체상과 유체상의 변위와 속도를 표현하는 식을 구하였다. 이 관계식에 탄성포음의 입사면과 투과면에서 경계조건을 적용하여 다음과 같은 형태의 탄성포음에 대한 전달행렬(2×2)을 구할 수 있다¹⁰⁾. 이 전달행렬을 이용하면 흡음률과 전달손실과 같은 탄성포음의 음향학적 성능을 구할 수 있다. 탄성포음의 전달행렬의 각 항과 유도 과정은 이 논문에서는 생략하도록 한다.

$$\begin{bmatrix} P_i \\ V_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} TM_{11} & TM_{12} \\ TM_{21} & TM_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_t \\ V_t \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$R = \frac{TM_{11} - \rho_0 c TM_{21}}{TM_{11} + \rho_0 c TM_{21}} \quad (10)$$

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (11)$$

3. 물리적 성질이 흡음률에 미치는 영향

3.1 유체상 물리적 성질의 영향

등가유체를 이용한 다공성 재료의 모델링에 있어서 주요한 물리적 성질은 유동저항계수, 뒤틀림도, 공극률 그리고 두 특성길이이다. 등가유체를 표현하는 5 가지 유체상의 물리적 성질을 추정하기 위하여 각 물리적 성질의 값을 변화시켜가면서 수직입사 흡음률의 변화를 관찰하였다.

Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3은 다른 물리적 성질들의 값은 고정시킨 채 유동저항계수 뒤틀림도, 공극률의 값이 변화에 따른 수직입사 흡음률의 변화를 나타낸 것이다.

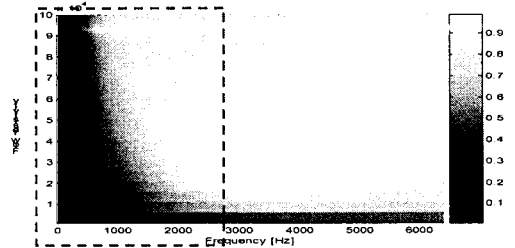


Fig. 1. Effect of Flow resistivity on absorption coefficient (thickness=25mm, bulk density=30 kg/m³, tortuosity=1, porosity=0.90, shape factors=1).

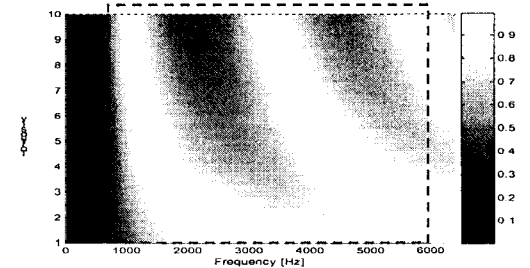


Fig. 2. Effect of tortuosity on absorption coefficient (thickness=25mm, bulk density=30 kg/m³, flow resistivity=20000 MKS Rayls/m, porosity=0.90, shape factors=1).

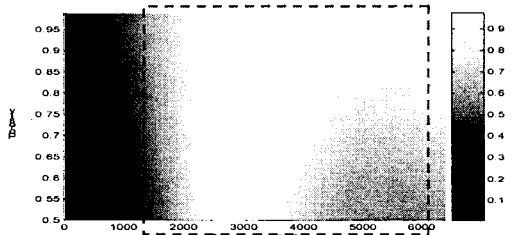


Fig. 3. Effect of porosity on absorption coefficient (thickness=25mm, bulk density=30 kg/m³, flow resistivity=20000 MKS Rayls/m, tortuosity=1, shape factors=1).

3.2 고체상 물리적 성질의 영향

일반적으로 Biot 이론과 등가유체를 이용한 다공성 재료의 모델링을 통하여 이론적으로 흡음률을 추정할 경우, 다공성 물질의 고체상의 공진이 일어나는 주파수 이외의 영역에서는 두 모델링방법에 의해 각각 얻어진 흡음률과 표면임피던스 예측 결과가 아주 근사한 값을 가짐을 Fig. 4와 같이 알 수 있다.

Allard^{5), 11)}는 다공성 재료의 고체상의 공진이 표면임피던스에 미치는 영향을 파악하고, 첫번째 공진이 나타나는 주파수가 다음과 같음을 보였다.

$$f_r = \frac{1}{4L} \sqrt{\text{Re}\left(\frac{K_c}{\rho}\right)} \quad (12)$$

여기서 K_c 는 다공성 재료의 고체상의 벌크상수, ρ 는 재료의 밀도, L 은 재료의 두께이다.

이 공진주파수는 후면을 강체 접촉시킨 다공성 재료의 표면임피던스에서 다공성 재료의 두께가 다공성 재료에 입사되는 파동의 4분의 1 파장이 되는 주파수이다. 이때, E_m , ν , η_{loss} 를 영계수, 포아송 비, 손실계수라 하면

$$E = E_m(1 + \eta_{Loss}) \quad (13)$$

$$K_c = E \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 + 2\nu)} \quad (14)$$

의 관계가 성립한다.

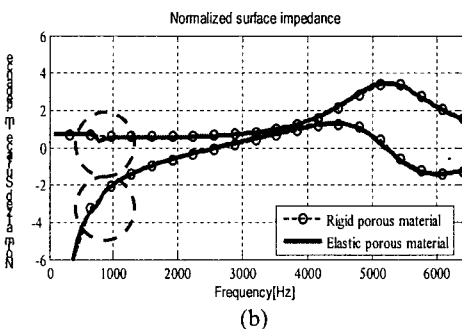
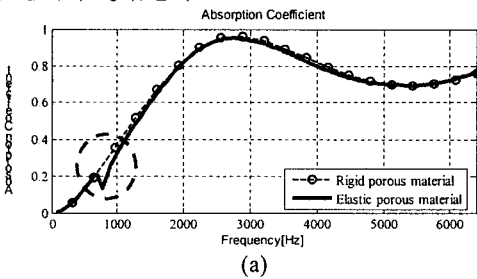


Fig. 4. Comparison of rigid porous material and Elastic porous material : (a) absorption coefficient, (b) normalized surface impedance.

4. 물리적 성질의 추정

4.1 추정 그룹

3.1 절의 내용을 바탕으로 5 가지 유체상의 물리적 성질들을 주파수에 따른 영향력에 따라 3 가지 그룹으로 나누었다. 임피던스에서 측정된 흡음률의 첫번째 최고값이 나타나는 주파수를 기준으로 그 이하의 주파수에서 추정구간을 가지고 유동저항계수를 포함하는 그룹①을 구성하였다. 그리고 첫번째 최고값 이상의 주파수에서 추정구간을 가지는 뒤틀림도와 공극률로 구성된 그룹②, 그리고 전 주파수 영역에서 추정구간을 가지는 형상계수와 차원계수로 이루어진 그룹③을 구성하였다.

수치적으로 각 그룹의 물리적 성질들을 추정하기 위하여 임피던스 튜브에서 측정된 수직입사 흡음률과 이론식을 통하여 얻어진 수직입사 흡음률을 이용하여 식 (15)과 같은 두 흡음률의 오차를 표현하는 목표함수를 구성하였다.

$$\text{Merit function} = \sum |\Phi_{\text{measured}} - \Phi_{\text{predicted}}|^2$$

where $\Phi_{\text{measured}} = \alpha_n$
 $\Phi_{\text{predicted}} = [\bar{g}_1, \bar{g}_2, \bar{g}_3]$ (15)

각 그룹별 추정은 각 그룹을 나눈 순서와 같이 그룹 ①, 그룹②, 그룹③의 순서로 이루어졌다. 그룹별 추정 구간에서 목표함수의 값을 최소로 하는 각 그룹을 구성하는 물리적 성질 값들을 추정하고, 전 주파수 영역에 대한 목표함수의 값이 최소화 될 때까지 추정과정을 반복하였다.

탄성포움의 경우는 위의 5 가지 유체상의 물리적 성질 이외에서 3 가지의 고체상의 물리적 성질이 추가적으로 필요하다.

고체상의 물리적 성질이 공진을 일으키는 공진 주파수를 측정된 흡음률 또는 표면임피던스에서 찾아낼 수 있다면 식(11), (12), (13)의 고체상의 물리적 성질과 공진주파수의 관계를 이용하여 해당 공진주파수에서 공진을 일으키는 고체상 물리적 성질의 조합을 추정하였다.

5. 결론

앞에서 설명한 바와 같이 다공성 재료의 물리적 성질을 추정하기 위하여 각 물리적 성질이 수직입사 흡음률에 미치는 영향을 파악하고 그 영향에 따라 물리적 성질을 몇 개의 그룹으로 나누어 각각의 그룹별로 수치적인 방법을 통하여 물리적 성질 추정을 수행하였다.

검증에 사용된 sample A 와 sample B 는 각각 Polyurethane 와 PET 폼으로 흡음재로 가장 흔히 사용되는 대표적인 림프폼과 탄성폼이다. Fig. 9, 10 에서 실선으로 표시된 흡음률은 앞에서 언급한 수치적인 방법을 통하여 추정된 물리적 성질을 이론식에 대입하여 예측된 흡음률이고 원으로 표시된 흡음률은 실험을 통하여 얻어진 흡음률이다. Fig. 9, 10 에서 볼 수 있듯이 추정된 물리적 성질을 이용하여 예측된 흡음률과 실험을 통하여 얻어진 흡음률이 전 측정 주파수에 걸쳐서 상당한 일치율을 보여줌을 볼 수 있다.

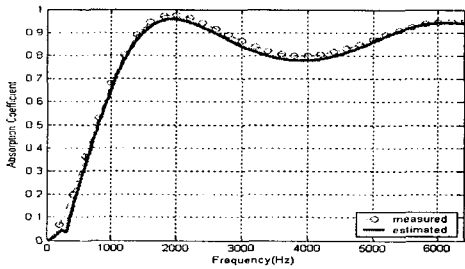


Fig. 9. Normal incidence absorption coefficient of sample B (thickness=25mm, Bulk density=85 kg/m³).

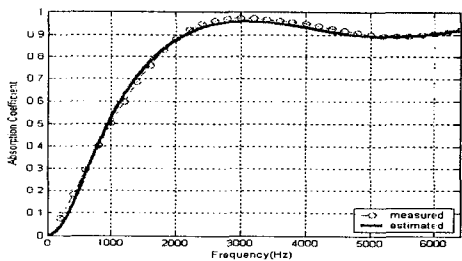


Fig. 10. Normal incidence absorption coefficient of sample A (thickness=30mm, surface density=2000 g/m²)

Table. 1. Estimated properties of sample A.

Thickness (mm)	25
Bulk density (kg/m ³)	85
Properties	Estimated Values
Flow resistivity (MKS Rayls/m)	48000
Tortuosity	1.99
Porosity	0.77
Viscous Char. Length (μm)	87.28
Thermal Char. Length (μm)	90.81
Young's modulus (Pa)	80000
Loss factor	0.09
Poisson's ratio	0.18

Table. 2. Estimated properties of sample B.

Thickness (mm)	30
Surface density (g/m ²)	2000
Properties	Estimated values
Flow resistivity (MKS Rayls/m)	13500
Tortuosity	1.01
Porosity	0.93
Viscous Char. Length (μm)	122
Thermal Char. Length (μm)	125

참고문헌

- (1) Raymond Panneton, 2003, "Validation of the inverse method of acoustic material characterization," SAE Noise and Vibration Conference., 2003-01-1584
- (2) Kin. Hong, 2004, "Inverse material characterization of poroelastic materials," SAE Noise and Vibration Conference., 04ANNUAL-60
- (3) Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, 1998, "Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System," ASTM, E1050-EBGL.
- (4) D. L. Jonhson, 1987, "Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid saturated porous media," J. Fluid Mech., 176, pp. 379-402.
- (5) J. F. Allard, 1993, Propagation of sound in porous media : Modeling Sound Absorbing Materials Elsevier applied science, Elsevier, London and NewYork.
- (6) Y. Champoux, 1991, "Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media," J. Appl. Phys., 70, pp. 1975-1979.
- (7) B. A. Biot, 1956, "Theory of propagation of Elastic Wave in a Fluid-Saturated Porous Solid. I . Low-Frequency range," J. Acoust. Soc. Am., 28 (2), pp. 168-178 .
- (8) B. A. Biot, 1956, "Theory of propagation of Elastic Wave in a Fluid-Saturated Porous Solid. II . High-Frequency range," J. Acoust. Soc. Am., 28 (2), pp. 179-191.
- (9) J. S. Bolton, 1996, "Sound transmission through multi-panel structures lined with elastic porous materials," Journal of Sound and Vibration, 191(3), pp. 317-347.
- (10) Y. J. Kang, 1994, "Studies of sound absorption by and transmission through layers of elastic noise control foams : finite element modeling and effects of anisotropy," Ph. D thesis, Purdue University, America.