

흡음을 위한 다공성 물질의 최적형상설계에서 물성치의 영향

이중석[†] · 김윤영* · 강연준**

Effects of Material Properties on Optimal Configuration Design of Absorbing Porous Materials

Joong Seok Lee, Yoon Young Kim and Yeon June Kang

Key Words : Porous Material(다공성 물질), Sound Absorption(흡음), Optimal Configuration(최적형상), Material Property(물성치)

Abstract

This investigation studies the effects of material properties and corresponding propagation wave types on optimal configurations of sound absorbing porous materials in maximizing the absorption performance by topology optimization. The acoustic behavior of porous materials is characterized by their material properties which determine motions of the frame and the air. When the frame has a motion, two types of compressional wave propagate in the porous material. Because each wave in the material make different influence on the absorption performance, it is important to understand the relative contribution of each wave to the sound absorption. The relative contribution of the propagating waves in a porous material is determined by the material properties, therefore, an optimal configuration of a porous material to maximize the absorption performance is apparently affected by the material properties. In fact, virtually different optimal configurations were obtained for absorption coefficient maximization when the topology optimization method developed by the authors was applied to porous materials having different material properties. In this investigation, some preliminary results to explain the findings are presented. Although several factors should be considered, the present investigation is focused on the effects of the material properties and corresponding propagation waves on the optimized configurations.

1. 서론

소음 저감의 목적으로 널리 사용되는 흡음재는 고체상(solid phase, frame)과 유체상(fluid phase, air)의 상호작용으로 음파에너지를 소산시키는 다공성 물질이다. 흡음에 사용되는 다공성 물질은 고체상의 운동 여부에 따라 크게 세가지로 분류할 수 있는데, 고체상의 운동이 없는 경우(rigid porous material), 고체상이 움직이기는 하나 유체상과의

상대적인 운동보다는 전체적으로 강체처럼 움직이는 경우(limp porous material), 마지막으로 유체상과 고체상이 상대적인 운동을 하며 흡음메커니즘에 큰 영향을 끼치는 경우(elastic porous material)가 그것이다. 그러나 흡음을 목적으로 사용되는 여러 가지 다공성 물질들에 대해서 이와 같은 분류가 정확하게 이루어지기 어려운 경우가 많으며, 특히 탄성 다공성 물질(elastic porous material)로 규정된 경우라도 물성치나 관심 주파수 대역에 따라 고체상의 운동이 흡음에 영향을 끼치는 정도는 상이하게 나타날 수 있다.

따라서 같은 목적과 동일한 설계 조건을 고려하더라도 서로 다른 물성치를 가지는 탄성

[†] 서울대 기계항공공학부 멀티스케일설계창의연구단

E-mail : jslee@idealab.snu.ac.kr

TEL : (02)880-1688 FAX : (02)872-5431

* 서울대 기계항공공학부 멀티스케일설계창의연구단

**서울대 기계항공공학부 차세대자동차연구센터

다공성 흡음재의 흡음성능 향상을 보장하는 최적형상은 경우에 따라서 크게 다를 수 있다. 이러한 현상은 최근에 개발된 흡음재의 최적형상설계기법[1]을 이용하여 서로 다른 물성치를 가지는 흡음재들에 대한 최적설계를 수행해보면 확연히 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 탄성 다공성 물질에 대한 Biot의 해석적 이론[2]을 이용하여 흡음재의 고체상과 유체상의 상대적인 운동과 전파하는 파동들의 상대적인 영향을 기술한다. 이를 바탕으로 서로 다른 물성치를 갖는 두 가지의 흡음재에 대한 수치계산을 통해서 물성치가 흡음재의 최적형상에 끼치는 영향을 논의한다.

2. 다공성 물질에 대한 수학적 기술

고체상과 유체상으로 이루어진 다공성 물질내의 파동의 운동을 기술한 Biot의 이론[2]을 바탕으로 탄성 다공성 물질을 전파하는 두 가지의 종파 A, B에 대해서 고체상에 대한 유체상의 속도는 아래와 같은 비율로 표현할 수 있다. 본 연구에서는 횡파는 고려하지 않기로 한다.

$$\phi_{A,B} = \frac{-k_{A,B}^2 P + \omega^2 \rho_{11} + i\omega b}{k_{A,B}^2 Q - \omega^2 \rho_{12} + i\omega b} \quad (1)$$

이 때, $k_{A,B}$ 는 종파 A와 B에 대한 각각의 파수를 나타내고 ω 는 각주파수이다. 나머지 계수들의 정의는 참고문헌 [1-3]에 자세히 기술되어 있다.

각 파동이 다공성 물질을 전파할 때 고체상과 유체상에 대한 특성 임피던스는 다음과 같이 표현된다. 하첨자 1과 2는 각각 고체상과 유체상을 나타낸다.

$$Z_1^{A,B} = (P + Q\phi_{A,B}) \frac{k_{A,B}}{\omega} \quad (2a)$$

$$Z_2^{A,B} = (R + Q/\phi_{A,B}) \frac{k_{A,B}}{h\omega} \quad (2b)$$

식(1,2)을 이용하여 강체벽에 의해 지지되고 있는 유한한 길이 l 을 가진 탄성 다공성 물질의 표면의 고체상과 유체상의 속도 비는 다음의 식(3)과 같이 유도해낼 수 있다 [4].

$$r_{v12} = - \frac{\{Z_1^B - (1-h)Z_2^B\phi_B\} \tan k_A l - \{Z_1^A - (1-h)Z_2^A\phi_A\} \tan k_B l}{\phi_A \{Z_1^B - (1-h)Z_2^B\phi_B\} \tan k_A l - \phi_B \{Z_1^A - (1-h)Z_2^A\phi_A\} \tan k_B l} \quad (3)$$

서로 다른 물성치를 가지는 두 가지 탄성 흡음재에 대해서 식(3)의 절대값을 계산하여 Fig. 1에 도시하였다. 흡음재 1의 경우, 고려한 주파수 대역에서 $|r_{v12}|$ 은 다양한 값을 갖는다. 반면에 흡음

재 2에서는 400 Hz 근방을 제외하고는 0에 가까운 값을 갖는다. 이는 넓은 주파수 대역에서 고체상의 운동이 발생하는 흡음재 1과는 달리, 흡음재 2에서는 고체상의 운동이 400 Hz 근방을 제외하고는 유체상의 운동에 비해서 무시할 수 있음을 의미한다.

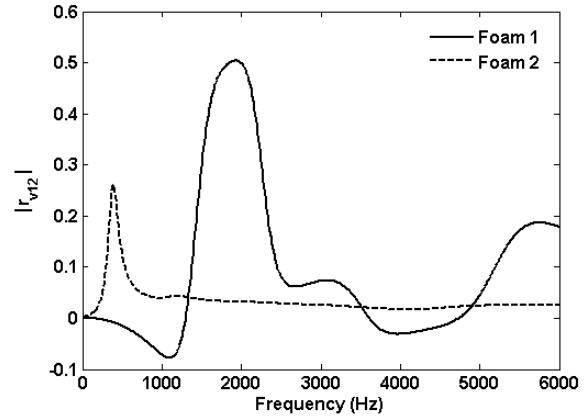


Fig. 1 Absolute value of the ratio of the velocities at the surface, of the frame and the air. The foams are 0.030 m long.

흡음재 2의 경우 400 Hz 근방에서 발생하는 피크는 고체상의 1/4 파장-공진주파수(a quarter wavelength resonant frequency)에 해당한다. 이 값은 다음의 식(4)와 같이 정의되므로 공진주파수의 값은 고체상의 밀도가 클수록, 강성이 약할수록 낮아진다.

$$f_r = \frac{1}{4l} \sqrt{\frac{\text{Re}\{P\}}{\rho_1}} \quad (4)$$

흡음재 2에서는 Fig. 1과 같이 낮은 주파수에서 고체상의 1/4 파장-공진이 일어나고 주파수가 증가할수록 고체상의 공진에 의한 영향이 급격하게 감소하므로 결국 관심주파수 대역에서의 고체상의 영향은 유체상의 영향에 비해서 무시할 수 있게 된다. 반면에 흡음재 1에서는 이 값이 약 2,000 Hz 이므로 관심 주파수 영역에서 고체상의 운동이 중요한 역할을 하게 된다.

결과적으로 고체상의 운동이 중요한 역할을 하는 흡음재 1과 같은 경우에는 흡음 성능을 향상시키기 위해서는 흡음재의 형상(shape)을 설계하는 것이 중요하고, 고체상의 역할이 저주파수 대역을 제외하고는 무시할만한 수준의 흡음재 2와 같은 경우 형상의 설계가 큰 효과를 발휘하지 않을 수 있다. 실제로 위상최적설계를 수행한 결과 흡음재 1의 경우 2차원의 형상(shape)이 설계된 반면, 흡음재 2에 대해서는 1차원의 배열(sequence)이 최적설계 되었다.

3. 결 론

고체상과 유체상으로 이루어진 다공성 물질인 흡음재의 최적형상이 물성치에 따라서 달라질 수 있음을 고체상의 상대적인 운동을 통해서 기술하는 방법을 알아보고 실제로 서로 다른 물성치를 가지는 두 가지의 흡음재에 대한 비교를 통해서 이러한 접근을 검증해보았다. 현재 이에 대한 보다 광범위한 연구가 진행 중이다.

후 기

본 연구는 서울대학교 정밀기계설계공동연구소를 통해 체결된 창의적연구진흥사업(한국과학재단, 과제번호 2008-011)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Lee, J. S., Kim, Y. Y., Kim, J. S. and Kang, Y. J., 2008, "Two-dimensional poroelastic acoustical foam shape design for absorption coefficient maximization by topology optimization method," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 123, No. 4, pp. 2094~2106.
- (2) Biot, M. A., 1956, "Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 28, No. 2, pp. 168~178.
- (3) Allard, J. F., 1993, "Propagation of Sound in Porous Media: Modeling Sound Absorbing Materials," Elsevier Science, New York.
- (4) Allard, J. F., Aknine, A. and Depollier, C., 1986, "Acoustical properties of partially reticulated foams with high and medium flow resistance," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 79, No. 6, pp. 1734-1740.