

폴리에스터 흡음재 흡음특성에의 음향 물성치 영향평가 연구 A Study on the Effect of Acoustic Properties on the Absorption Characteristics of Polyester Fiber Materials

박 헌 진* · 정 명 국** · 심 성 영** · 이 준**

Hern-Jin Park, Myong-Guk Jeong, Sung-Young Shim and Jun Lee

Key Words : Acoustic Property(음향 물성치), Porosity(공극율), Flow Resistivity(유동저항), Tortuosity(뒤틀림율), Viscous Characteristic Length(점성특성길이), Thermal Characteristic Length(열특성길이)

ABSTRACT

Effects of each acoustic property on absorption characteristics of polyester fiber materials has been studied in this paper. It would be impossible for us to measure effects of each acoustic property by experimental method since we cannot make sound-absorbing materials in which only one of the properties is changed. We have adopted a numerical prediction method to carry out parameter studies for each acoustic property. And to get a general behavior of acoustic performance of the materials, the numerical simulation has been repeated to several cases of different bulk density. Finally we have obtained frequency-dependent control factors in the absorption performance which gives us design capability of acoustic absorbing materials.

1. 서 론

일반적으로 자동차 및 건축 분야에서 많이 사용되는 흡음재료에는 유리면이나 펠트(felt)와 같은 섬유재료와 폴리우레탄 폼과 같은 발포재료가 있고, 그 중 섬유재료가 50% 이상을 점유하고 있다. 최근에는 섬유재료 중에서도 환경친화적인 폴리에스터 흡음재가 주목을 이루며, 칩 폼(chip foam)과 같은 재생 흡음재도 실용화되어 있다. 폴리에스터 흡음재는 재활용이 용이하며 비중이 가벼운 특징을 가지고 있고, 기존의 흡음재에 비해 흡음성능이 우수하여 자동차 및 건축용 내장재로 많이 사용되고 있다.

흡음재는 그 성능을 극대화하기 위하여 패넌이나 고무 등의 차음재와 함께 사용되고 있으나, 경량화 문제가 심각히 대두되고 있는 국내외 자동차 내장재 산업 부문에서는 실내소음 성능의 저하 없이 차음재를 흡음재로 바꾸려는 노력이 활발히 진행되고 있는 실정이다. 즉, 차음재를 흡음재로 대체함으로써 발생하는 투과손실의 저하를 극대

화된 흡음율로 보상하여, 실내소음의 저하 없이 차량을 경량화하려는 연구가 진행되고 있는 것이다. 흡음율 극대화와의 임의의 주파수 대역에서 원하는 흡음율을 얻기 위한 연구의 일환으로 본 논문에서는 음향 물성치 변화에 따른 폴리에스터 흡음재의 성능 변화를 살펴보고자 한다.

2. 본 론

2.1 섬유 소재(fibrous material)의 흡음율 예측

일반적으로 많이 사용되는 음향학적 요소들에 대한 전달행렬은 다음과 같다. 여기서, d 는 흡음층의 두께, Z_c 는 특성임피던스, k_c 는 복소 전파상수, j 는 복소수의 허수부이다.

$$T = \begin{vmatrix} \cos k_c d & j \frac{Z_c}{\cos \theta} \sin k_c d \\ j \frac{\cos \theta}{Z_c} \sin k_c d & \cos k_c d \end{vmatrix} \quad (1)$$

여러 층으로 이루어진 흡음 시스템의 전체 전달행렬은 각 층에 대한 전달행렬의 곱으로 식(2)와 같이 표현되고, 식(3)

* 정희원, SK케미칼 환경소재연구소
E-mail : hjpark@skchemicals.com
Tel : (032) 240-8350 Fax : (032) 245-1192

** 정희원, SK케미칼 환경소재연구소

을 만족한다.

$$T = T_1 T_2 T_3 \cdots T_n \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ v_{1x} \end{bmatrix}_{x=0} = [T] \begin{bmatrix} p_2 \\ v_{2x} \end{bmatrix}_{x=d} \quad (3)$$

위 전달행렬의 각 요소로부터 투과 계수는 다음과 같이 구해지고, 이를 강제 경계조건에 대해서 풀면 식(5)와 같은 반사계수를 얻을 수 있다. 여기서 ρ_0 는 공기의 밀도이고, c 는 공기 중의 음속이다.

$$T = \frac{2e^{jk_d}}{T_{11} + \left(\frac{\cos\theta}{\rho_0 c}\right) T_{12} + \left(\frac{\rho_0 c}{\cos\theta}\right) T_{21} + T_{22}} \quad (4)$$

$$R = \frac{T_{11} - \left(\frac{\rho_0 c}{\cos\theta}\right) T_{21}}{T_{11} + \left(\frac{\rho_0 c}{\cos\theta}\right) T_{21}} \quad (5)$$

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (6)$$

식(1)의 전달행렬을 이용하여 반사계수를 구하기 위해서는 특성 임피던스(Z_c)와 복소 전파상수(k_c)가 필요한데, 공극율이 1에 가까운 섬유 소재의 경우 식(7),(8)과 같이 특성 임피던스와 복소 전파상수를 구할 수 있다. 여기서, ρ 와 K 는 각각 공극 내 유체의 유효밀도(effective density)와 체적 탄성계수(bulk modulus)를 말한다.

$$Z_c = (K\rho)^{1/2} \quad (7)$$

$$k_c = \omega(\rho/K)^{1/2} \quad (8)$$

입사하는 음파에 대해 넓은 주파수 영역에서 섬유사의 움직임이 거의 없다고 볼 수 있는 폴리에스터 흡음재의 경우, 비열비($\gamma = c_p/c_v$), 표준대기압(P_0), 특성길이(characteristic length, Λ, Λ'), 프렌들 수(prandtle number, $B^2 = (\eta\gamma c_v)/\kappa$)로부터 체적 탄성계수(K)를 구할 수 있고, 공극율(Φ), 유동저항(σ), 뒤틀림율(tortuosity, α_∞)로부터 식(10)와 같은 유효밀도(ρ)를 구할 수 있다.

$$K = \frac{\gamma P_0}{\gamma - (\gamma - 1) \left[1 + \frac{8\eta}{j\Lambda^2 B^2 \omega \rho_0} \left(1 + j\rho_0 \frac{\omega B^2 \Lambda^2}{16\eta} \right)^{1/2} \right]^{-1}} \quad (9)$$

$$\rho = \alpha_\infty \rho_0 \left(1 + \frac{\sigma \Phi}{j\omega \rho_0 \alpha_\infty} G_j(\omega) \right) \quad (10)$$

여기서,

$$G_j(\omega) = \left(1 + \frac{4j\alpha_\infty^2 \eta \rho_0 \omega}{\sigma^2 \Lambda^2 \Phi^2} \right)^{1/2} \quad (11)$$

체적 탄성계수(K)에 관한 윗 식은 흡음재 표면에 수직인 공극의 형상이 실린더가 아닌 일반적인 경우로, 원형 단면을 가지는 실린더 형 공극의 체적 탄성계수와 거의 동일하다. 식(9)에 사용된 프렌들 수(B^2)는 섬유 소재의 경우 1이고 [1][2], 특성길이(Λ, Λ')는 공극율(Φ), 유동저항(σ), 뒤틀림율(α_∞ , tortuosity)로부터 아래와 같이 구할 수 있으며, 이 음향 물성치들은 실험적으로 구하거나 몇 가지 경우에 대해서는 이론적으로 구할 수 있다.

$$\Lambda = \frac{1}{c} \left(\frac{8\alpha_\infty \eta}{\Phi \sigma} \right) \quad (12)$$

$$\Lambda' = \frac{1}{c'} \left(\frac{8\alpha_\infty \eta}{\Phi \sigma} \right) \quad (13)$$

여기서, Λ' 을 열특성길이(thermal characteristic length), Λ 을 점성특성길이(viscous characteristic length)라고 부르고, η 는 공극 내 유체의 점도(viscosity), c 는 공극의 단면 모양에 관계된 변수로 공극의 모양이 원형일 경우 1.00의 값을 가진다.[3]

2.2 섬유 소재(fibrous material)의 음향 물성치

(1) 공극율(porosity)

공극율(Φ)은 흡음재 전체 체적에 대한 공기의 체적 비이다. 흡음재를 구성하는 섬유사의 체적(V_b)과 섬유사를 둘러싸는 공기의 체적(V_a)을 합하면 전체 체적(V_T)이므로 공극율은 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$\Phi = \frac{V_a}{V_T} = \frac{V_a}{V_a + V_b} \quad (14)$$

섬유사로 구성된 대부분의 흡음재는 1에 가까운 공극율 값을 가진다.[3]

(2) 유동저항(flow resistivity)

유동저항(σ)은 소재의 통기성으로 받아들여지고 있으며, 일정하게 제어되는 공기를 소재에 통과시킬 때 발생하는 소재 전·후의 압력변화를 가지고 아래와 같이 구할 수

있다. 측정 장비는 시편 전·후의 압력 변화와 공기 유량을 측정하도록 구성되어 있는 것이 일반적이다. V 는 단위 면적당 유량(U/S), e 는 시편의 두께를 말하며, 섬유 소재의 경우 대략 5,000에서 100,000 Ns/m^4 사이의 값을 가진다.

$$\sigma = \frac{p_2 - p_1}{Ve} \quad (15)$$

섬유 소재의 유동저항은 섬유사의 반경(R) 및 체적 밀도(bulk density, ρ_1)와 식(16)과 같은 관계를 가지고 있다고 알려져 있다.[4]

$$\sigma R^2 \rho_1^{-1.53} = 0.79 \times 10^{-9} \quad (16)$$

또한, 섬유 굵기의 단위로 쓰이는 Denier와 섬유 반경 R [m]은 식(17)의 관계를 가지고 있다.

$$R = 5.0625 \sqrt{\text{Denier}} \times 10^{-6} \quad (17)$$

따라서, 섬유사의 반경과 체적 밀도를 적절히 조절함으로써, 임의의 유동저항 값을 얻을 수 있다.

(3) 뒤틀림율(tortuosity)

뒤틀림율(α_∞)은 다공성 소재의 유체와 고체부의 내부적 결합구조를 정의하는 것으로써, 도전 유체에 담겨진 소재의 전기저항을 측정함으로써 구할 수 있다. 소재의 길이와 공극의 길이가 동일하다면 뒤틀림율은 1이 되고, 소재의 길이가 복잡하게 구성되어 있거나 기울어져 있으면 뒤틀림율은 1보다 커지게 된다. 만약 섬유 소재의 공극이 실린더 형이고, 공극의 축이 소재 표면과 임의의 각(ψ)을 이룰 경우 아래와 같이 구할 수도 있다.

$$\alpha_\infty = \Phi \frac{r_c}{r_f} \quad (18)$$

$$\alpha_\infty = \Phi \frac{r_c}{r_f} = \frac{1}{\cos^2 \psi} \quad (19)$$

(4) 특성길이(characteristic length)

특성길이는 식(12)와 (13)처럼 음향 물성치들의 관계로부터 얻을 수 있지만, 일반적으로 섬유 소재에 대해서는 아래의 식을 사용하여 구할 수도 있다.[5]

$$\Lambda = \frac{1}{2\pi LR} \quad (20)$$

$$\Lambda' = \frac{1}{\pi LR} = 2\Lambda \quad (21)$$

여기서,

$$L = \frac{\rho_1}{\pi R^2 \rho_m} \quad (22)$$

윗 식에서 R [m]은 섬유사의 반경, L [m]은 흡음재의 단위체적당 사용된 섬유사의 총 길이이고, 식(22)의 ρ_m 은 섬유사의 밀도로서, 고유 물성치이다.

2.3 물성치 변화에 따른 흡음특성 해석

임의의 주파수 영역에서 원하는 흡음 성능을 얻기 위해서는 먼저, 흡음 성능에 대한 주파수 영역별 주요 인자를 알아야 하고, 다음으로 그 인자를 조절할 수 있는 물리적 조건 등을 알아야 한다. 흡음 성능에 대한 각각의 물성치의 영향을 실험적으로 판단하기란 쉽지 않은데, 그 이유는 음향 물성치 중에서 하나만을 변화시킨 시료를 제작하는 것이 불가능하기 때문이다. 이에 대한 대안으로 해석적인 방법을 생각할 수 있으며, 본 논문에서는 Fig. 1과 같은 해석 과정을 거쳐 그 영향을 분석하였다. 해석 과정에서 사용된 Foam-X는 다양한 두께의 단일 흡음재에 대한 표면 임피던스와 체적 밀도를 변수로 사용하여 음향 물성치를 구하는 상용 프로그램이고, Nova는 Foam-X로부터 산출된 음향 물성치를 사용하여, 단일 혹은 다층구조 흡음재의 난입사 흡음율, 수직입사 흡음율 및 투과손실을 구하는 프로그램이다.

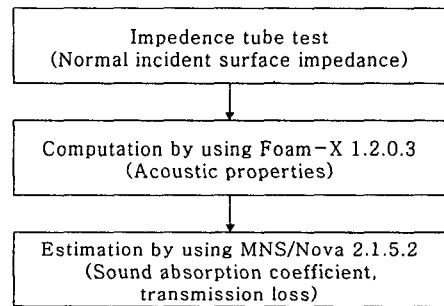


Fig. 1 Numerical prediction procedure

해석과정의 두 번째 단계에서 구해진 음향 물성치를 사용하여 수직입사 흡음율을 역으로 구한 후, 실험치와 비교한 결과, Fig.2와 같이 잘 일치하였다. 이로써, 음향 물성치를 산출하는 과정에서 오류가 발생하지 않는다는 것을 확인할 수 있다.

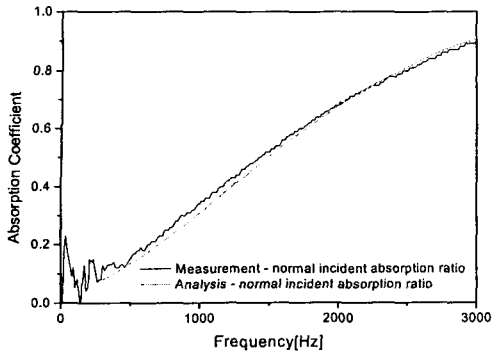


Fig. 2 Comparison between measurement and numerical prediction for normal incident sound absorption coefficient

Table 1의 물성치를 갖는 폴리에스터 흡음재가 음을 투과시키지 않고, 반사시키는 단단한 벽에 부착되어 있을 때, 아래와 같이 음향 물성치를 바꿔가며 1/3 옥타브 밴드의 중심주파수에서 흡음을 변화를 살펴보고, 다른 중량의 흡음재에 대하여 동일한 해석 작업을 반복하여 일반적인 경향을 도출하였다. 입사하는 음파는 난입사 조건이며, 사용된 폴리에스터 흡음재는 다양한 섬유사로 구성되어 있는 자동차 내장재이다.

Table 1 Polyester fiber absorbing material's acoustic properties to analyze the effect on absorption characteristic

Acoustic property	Value
Thickness[m]	0.02
Bulk density[kg/m ³]	50
Porosity, ϕ	0.974
Flow resistivity, σ [Ns/m ⁴]	30,819
Tortuosity, α_{∞}	1.0
Viscous characteristic length, Λ [μ m]	60.109
Thermal characteristic length, Λ' [μ m]	417.45

(1) 공극율

0.5에서 0.974까지 0.1 단위로 공극율을 변화시키면서 흡음을 변화를 살펴보고, 아래 Fig.3과 같은 결과를 얻었다. 그래프를 보면, 공극율이 증가할수록 흡음율이 증가한다는 것을 알 수 있고, 특히 1000~3000Hz 구간에서 그 영향이 크다는 사실을 알 수 있다. 3000~5000Hz 구간에

서는 공극율 상승이 흡음을 증가에 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다.

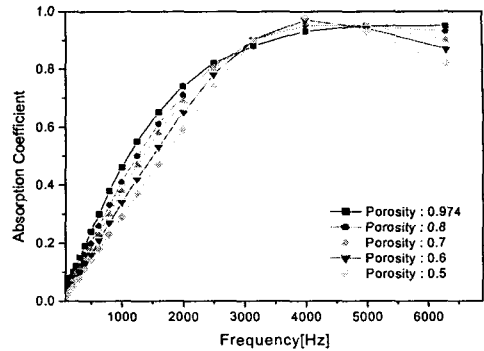


Fig. 3 Effects of porosity on absorption characteristic

(2) 유동저항

30,819~10,000Ns/m⁴ 까지 유동저항 값을 5,000 Ns/m⁴ 단위로 바꿔가며 흡음을 변화를 살펴본 결과, 유동저항 값이 증가할 수록 800Hz 이상의 전 주파수 영역에서 흡음율이 상승한다는 사실을 알 수 있다. 흡음율 증가폭이 커지는 특정 주파수 영역이 존재하지 않으며, 유동저항의 증가량에 따라 흡음율도 일정한 간격으로 증가한다는 것을 알 수 있다. 식(16)에 의하면 폴리에스터 흡음재에 사용된 섬유사의 직경이 작을수록 유동저항 값은 커지게 되고, 흡음율이 좋아지게 된다. 예를 들어, 두께가 20mm이고, 밀도가 50kg/m³ 인 폴리에스터 흡음재가 3 데니어(denier) 직경의 섬유사로만 구성되어 있다면 유동저항은 4,102Ns/m⁴ 이고, 6 데니어(denier)만으로 구성되어 있다면 2,061Ns/m⁴ 의 값을 가지게 되어, 저 데니어를 사용한 흡음재의 성능이 좋을 것임을 예측할 수 있다.

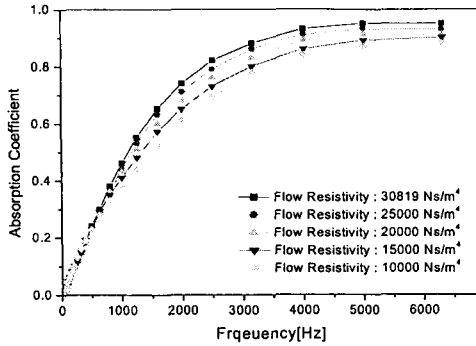


Fig. 4 Effects of flow resistivity on absorption characteristic

(3) 뒤틀림율

1.0에서 4.0까지 뒤틀림율을 변화시키면서, 흡음율 변화를 살펴본 결과, 뒤틀림율이 증가할수록 고주파 구간에서는 흡음특성이 나빠진다는 것을 알 수 있다. 뒤틀림율이 증가할 경우, 시편 배후 면에 공기층을 삽입하고 수직일사 흡음율을 측정할 때와 유사한 현상을 보였다. 즉, 뒤틀림율이 증가할수록 최대 흡음율을 보이는 주파수가 저주파 구간으로 이동하고, 그 이상의 구간에서는 흡음율이 저하되어 골이 생기는 현상을 볼 수 있다. Fig. 6과 같이 뒤틀림율에 의한 중심주파수별 흡음율 변화를 살펴본 결과, 1600Hz 이하의 주파수 영역에서는 뒤틀림율이 증가할수록 흡음율이 상승하고, 2000~4000Hz 구간에서는 뒤틀림율이 증가할수록 흡음율이 감소하는 현상을 보이며, 흡음율을 감소시키는 뒤틀림율 값이 점점 작아지는 결과를 보였다.

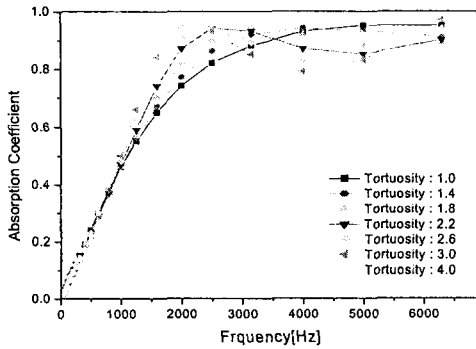


Fig. 5 Effects of tortuosity on absorption characteristic

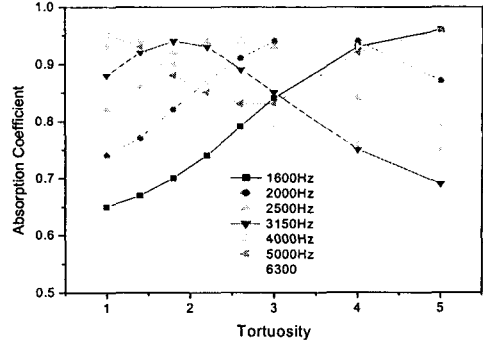


Fig. 6 Evaluations of absorption characteristic by tortuosity change

(4) 특성길이

점성특성길이는 물리적으로 다공성 소재의 공극 중에서 작은 것의 평균 직경을 나타내고, 열특성길이는 큰 것의 평균 직경을 나타내는데, 점성특성길이가 작아질수록 1500~5000Hz구간에서의 흡음율이 증가하고, 열특성길이가 작아질수록 상대적으로 저주파 영역에서의 흡음율이 증가한다는 사실을 Fig. 7와 Fig. 8을 통해서 알 수 있다. 이로써, 흡음율은 특성길이가 작아질수록 증가한다는 것과 두 특성길이의 차이와 무관하다는 사실을 알 수 있다. 식(20)에 의하면 특성길이는 섬유사의 직경에 반비례하는 관계를 가지고 있어, 직경이 작을수록 특성길이는 커지게 되고, 흡음율에 악영향을 미치게 된다. 이것은 사용된 섬유의 직경이 작을수록 유동저항이 증가하여 흡음율이 상승하는 것과는 상반되는 것으로, 직경 변화가 유발하는 유동저항 및 특성길이의 증감이 전체적인 성능 변화에 어떤 영향을 미치는지 고려하여, 적절한 섬유사를 사용하여야 한다는 것을 말한다.

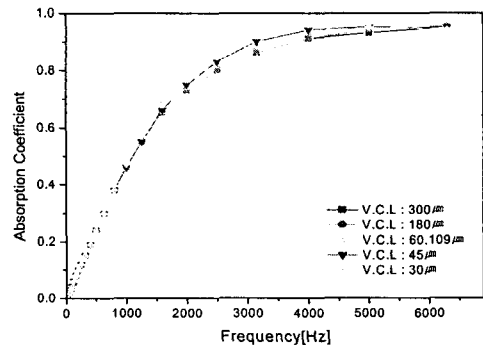


Fig. 7 Effects of viscous characteristic length on absorption characteristic

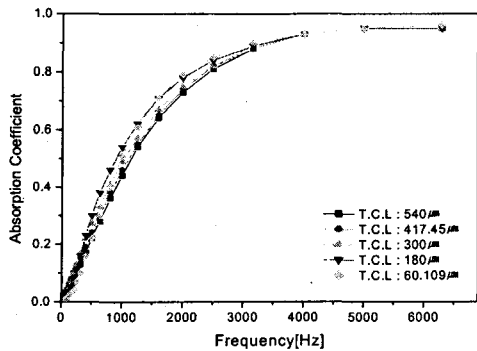


Fig. 8 Effects of thermal characteristic length on absorption characteristic

(5) 두께

대상 폴리에스터 흡음재의 밀도와 음향 물성치를 고정하고, 두께를 5mm 단위로 바뀌가며 흡음을 변화를 살펴본다. 음향 물성치에 의한 것보다 흡음을 변화폭이 크고, 전 주파수 영역에서 성능이 향상된다는 것을 알 수 있다. 밀도와 음향 물성치가 동일할 경우, 두꺼운 소재의 흡음율이 좋다는 것과, 두께가 성능 향상에 기여할 중요한 변수라는 사실을 알 수 있다.

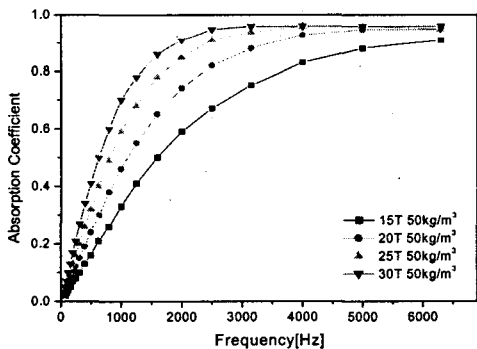


Fig. 9 Effects of thickness on absorption characteristic

(6) 중량

두께와 음향 물성치를 고정하고, 밀도를 증가시킬 경우, 밀도 증가에 의한 흡음을 상승이 없다는 것을 Fig. 10를 통해 알 수 있다. 이 결과는 밀도가 증가할수록 흡음 성능이 좋아지는 일반적인 경향과 다른데, 그 이유는 밀도 증가에 의해 발생하는 음향 물성치 변화를 무시하였기 때문이다. 체적 밀도의 증가에 의해서 흡음율이 상승하는 것이 아니라, 밀도 변화가 유발하는 음향 물성치의 변화에 의해 흡

음율이 바뀌는 것임을 알 수 있고, 밀도를 증가시켜도 기대치만큼 흡음율이 상승하지 않을 수 있다는 것을 예측할 수 있다.

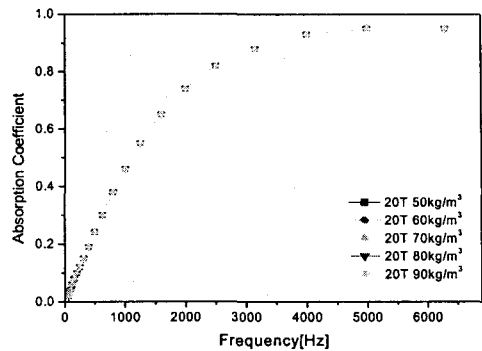


Fig. 10 Effects of bulk density on absorption characteristic

실제로 고밀도 흡음재보다 동일 두께인 저밀도 흡음재의 성능이 좋게 나오는 경우를 Fig. 11에서 확인할 수 있다. A type과 B type은 사용된 섬유사 및 직경 등이 서로 다른 흡음재이며, 각각의 음향 물성치는 Table 2와 같다. Fig. 11을 통해서 동등 이상의 성능을 유지한 상태로 흡음재를 경량화 시킬 수 있다는 것을 알 수 있다.

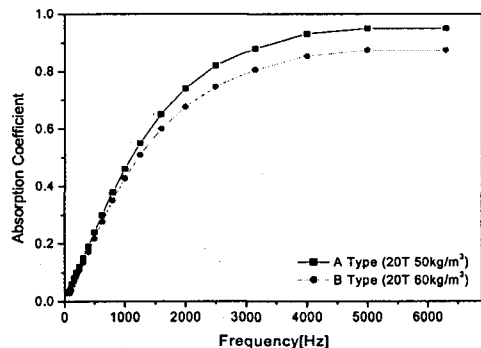


Fig. 11 Performance and weight optimization example of polyester fiber absorbing material

Table 2 Acoustic properties of low and high bulk density absorbing material

Acoustic property	A type	B type
Thickness[m]	0.02	0.02
Bulk density[kg/m ³]	50	60
Porosity, ϕ	0.974	0.99
Flow resistivity, σ [Ns/m ⁴]	30,819	20,262
Tortuosity, α_{∞}	1.0	1.26
VCL, Λ [μ m]	60.109	520.57
TCL, Λ' [μ m]	417.45	520.57

4. 결 론

본 논문에서는 자동차 흡차음 내장재로 적용되는 폴리에스터 흡음재의 성능 극대화 및 임의의 주파수 대역에서 원하는 흡음율을 얻기 위한 연구의 일환으로 음향 물성치 변화에 따른 흡음특성 변화를 살펴보았다. 실험적 방법으로는 불가능하였으나, 해석적 방법을 사용함으로써 음향 물성치 각각의 변화에 따른 흡음특성변화를 볼 수 있었고, 여러 중량에 대해 일련의 해석 작업을 수행하여 일반적인 경향을 도출하는 것이 가능하였으며 Fig. 12와 같은 주파수 영역별 성능영향 인자를 도출하였다.

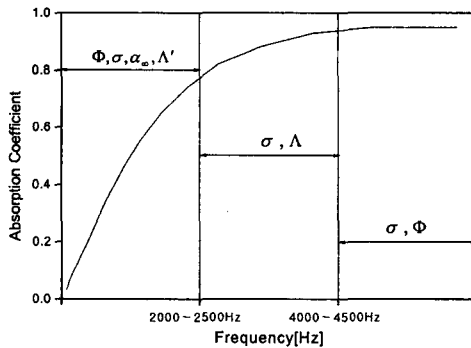


Fig. 12 Absorption performance control factor classified by frequency range

참 고 문 헌

- (1) Attenborough, K., 1983, Acoustical Characteristics of Rigid Fibrous Absorbents and Granular Materials, J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 73, pp. 785~799
- (2) Foam-X Instruction Manual, 2003, Acoustic Property Identification for Foam and Fiber Materials, Mecanum, Canada
- (3) Allard, J. F., 1993, Propagation of Sound in Porous Media : Modeling Sound Absorbing Materials, Elsevier Science Publisher, England
- (4) Bies, D. A. & Hansen, C. H., 1980, Flow Resistance Information for Acoustical Design, Applied Acoustics, Vol. 13, pp. 357~391
- (5) Allard, J. F. & Champoux, Y., 1992, New Empirical Equations for Sound Propagation in Rigid Frame Fibrous Materials, J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 91, pp. 3346~3353
- (6) Johnson, D. L., Koplik, J. & Dashen, R., 1987, Theory of Dynamic Permeability and Tortuosity in Fluid-saturated Porous Media, J. Fluid Mechanics, Vol. 176, pp. 379~402
- (7) Delany, M. E. & Bazley, E. N., 1970, Acoustical Properties of Fibrous Materials, Applied Acoustics, Vol. 3, pp. 105~116
- (8) Biot, M. A., 1956, The Theory of Propagation of Elastic Wave in a Fluid-saturated Porous Solid. I. Low Frequency Range. II. Higher Frequency Range, J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 28, pp. 168~191
- (9) 강연준 등, 1999, 비선형을 고려한 탄성 다공성 재료의 음향학적 모델링, 한국소음진동공학회지, Vol. 9, pp. 1218~1226
- (10) 박철휘 등, 1996, 전달행렬법에 의한 다공질 흡음재의 음향특성 연구, 한국소음진동공학회지, Vol. 5, pp. 635~644