Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., 26(3) : 331~339, 2016
http://dx.doi.org/10.5050/KSNVE.2016.26.3.331

한국소음진동공학회논문집 제 26 권 제 3 호, pp. 331~339, 2016
ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

고밀도 폴리에스터 흡음재를 이용한 이중층 흡음시스템의 음향특성 및 흡음성능 향상 방안에 관한 연구

A Study on the Acoustic Characteristics and Absorption Performance Improvement Method of Double Layered Sound Absorption System Using High Density Polyester Absorbing Materials

윤 제 원*·장 강 석*·조 용 성**
Je-Won Yoon, Kang-Seok Jang and Yong-Thung Cho

(Received April 15, 2016 ; Revised May 3, 2016 ; Accepted May 3, 2016)

Key Words : Characteristic Impedance(특성임피던스), Propagation Constant(전파상수), Airflow Resistivity(유동저항), Impedance Tube(임피던스관), Four Pole Parameter(사단자정수)

ABSTRACT

To improve the acoustic performance of sound absorbing materials, the thickness of the material should be increased or the sound absorbing material having an irregular surface shape should be used. In this study, the acoustic characteristics and methods to improve the acoustic performance of a sound absorbing system equipped with double layered polyester sound absorbing materials were investigated. The numerical model was set up and the results obtained from the model were compared with the actual measurement data. And, strategies to improve the acoustic performance of sound absorbing systems with double layered sound absorbing materials made of polyester with different configuration were shown. So, this study is expected to be usefully used at sites that require high acoustic absorption performance with minimal installation thickness to reduce sounds reflection in narrow spaces such as interior of subway tunnels or in noise barriers installed adjacent to rails.

기 호 설 명

α : 흡음률
K_c : 전파상수
R : 반사계수
ρ : 공기 밀도
ρ_m : 흡음재 밀도
Z_c : 특성임피던스

1. 서 론

도로 및 철도에서 발생하는 소음을 저감시키기 위해 사용하는 흡음형 방음벽, 또는 설비에서 발생하는 소음을 저감시키기 위해 사용하는 소음기에는 다공성 흡음재를 많이 사용하고 있다. 이러한 다공성 흡음재는 흡음률이 높을수록 소음저감효과가 우수하다. 흡음재의 흡음률을 높이는 방법은 Fig. 1과 같이 흡음재의 두께를 두껍게 하거나, 흡음표면을 요철형태로 제

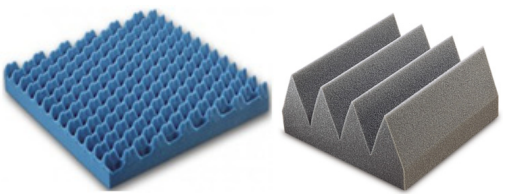
† Corresponding Author; Member, Unison Technology, Co., Ltd.
E-mail: jwyoon@unisontg.com
* Unison Technology, Co., Ltd.
** Department of Mechanical Engineering, Kongju National University

‡ Recommended by Editor Myung Jun Kim
ⓒ The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

작하여 흡음되는 표면적을 증가시키는 것이 일반적인 방법이다. 그러나, 흡음재의 두께를 두껍게 설치하면 방음판의 두께가 두꺼워지고, 소음기의 경우에는 스플리터(splitter)의 두께가 두꺼워짐으로 인해 전체적인 제품의 부피 증가를 초래하게 되고, 이로 인한 제작비용이 증가하게 되는 단점이 있다.

이중층을 구성하는 방안은 다공판 시스템을 이용한 연구가 있었으며[1,2], 또한 이중층 부직포를 이용한 흡음성능에 관한 연구가 있었다[3]. 그러나, 상기 연구들에서도 이중층 또는 다중층 흡음시스템을 이용해 흡음성능을 향상시켰으나, 이를 위해서는 일정 간격 이상의 공기층을 구성하거나 흡음재의 두께를 증가시켜야만 흡음성능이 향상되는 문제가 있었다.

따라서, 이 논문에서는 흡음재의 두께를 크게 증가시키지 않고도 흡음성능을 향상시킬 수 있는 방법을 제안하고자 고밀도 폴리에스터 흡음재를 이용한 이중층으로 구성된 흡음시스템의 음향특성 연구를 수행하였다. 이를 위해 우선, 이중층으로 구성된 흡음시스템의 흡음성능 예측을 위한 계산모델을 수립하고, 이 모델을 통하여 구한 흡음률과 실험결과와의 비교를 통하여 계산모델의 타당성을 검증하였다. 그리고, 다양한 이중층 구성방법에 따른 흡음률을 예측하여 흡음성능 향상 방안을 제시하였다.



(a) Absorbing material

(b) Soundproofing panel

Fig. 1 High absorption performance products

2. 본 론

2.1 관련이론

(1) 특성임피던스 및 전파상수

흡음재의 음향특성 평가를 위해서는 특성임피던스 및 전파상수값이 필요한데, 암면과 유리면에 대해서는 Delany와 Bazley가 제안한 모델이 있으며[4], 폴리에스터에 대해서는 Garai와 Pompoli가 제안한 모델이 있다[5]. 각각의 모델에 대한 특성임피던스 및 전파상수를 구하는 식은 식 (1)과 같고 해당 상수는 Table 1과 같다. 또한, 유동저항(σ)은 식 (2)와 같이 구할 수 있다. 식에서, ρ는 공기밀도, c는 음속, ρ_m은 흡음재의 밀도를 의미한다. 또한, 식 (2)의 A와 B는 상수로서 실험적으로 결정된 값이며, 흡음재의 종류에 따라 Table 2와 같은 값을 가진다[5].

$$Z_c = R + jX,\ K_c = \alpha + j\beta \tag{1}$$

$$R = \rho c[1 + C_1(\frac{\rho f}{\sigma})^{-C_2}],\ X = -\rho c[C_3(\frac{\rho f}{\sigma})^{-C_4}]$$
$$\alpha = \frac{w}{c}[C_5(\frac{\rho f}{\sigma})^{-C_6}],\ \beta = \frac{w}{c}[1 + C_7(\frac{\rho f}{\sigma})^{-C_8}]$$
$$\sigma = A\rho_m^B \tag{2}$$

Table 1 Coefficient for the calculation of characteristic impedance and propagation constant

Material type	Rockwool/fiberglass	Polyester
C_1	0.057	0.078
C_2	0.754	0.623
C_3	0.087	0.074
C_4	0.732	0.660
C_5	0.189	0.159
C_6	0.595	0.571
C_7	0.098	0.121
C_8	0.700	0.530

Table 2 Coefficient for the calculation of airflow resistivity

Material type	Rockwool/fiberglass	Polyester
A	2.920	25.989
B	1.530	1.404

(2) 이중층 흡음시스템의 흡음률 예측

공기층이 없는 이중층 흡음시스템에 대한 전달행렬요소를 4단자 정수로 표현하면 식 (3)과 같다[1,6]. 식 (3)에서, 첨자 '1' 및 '2'는 순차적으로 소음원으로부터 가까운 흡음재를 의미하며, 식에서 Z_c는 특성임피던스, K_c는 전파상수, d는 흡음재 두께를 의미한다. 또한, 공기층이 있는 이중층 흡음시스템은 식 (4)로 나타낼 수 있다. 식에서 k는 파수, A_g는 배후공기층 두께를 의미한다. 그리고, 반사율(R) 및 흡음률(α)은 식 (4)를 이용해 식 (5)와 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(K_{c1}d_1) & Z_{c1}\sinh(K_{c1}d_1) \\ \sinh(K_{c1}d_1)/Z_{c1} & \cosh(K_{c1}d_1) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cosh(K_{c2}d_2) & Z_{c2}\sinh(K_{c2}d_2) \\ \sinh(K_{c2}d_2)/Z_{c2} & \cosh(K_{c2}d_2) \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(K_{c1}d_1) & Z_{c1}\sinh(K_{c1}d_1) \\ \sinh(K_{c1}d_1)/Z_{c1} & \cosh(K_{c1}d_1) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cosh(K_{c2}d_2) & Z_{c2}\sinh(K_{c2}d_2) \\ \sinh(K_{c2}d_2)/Z_{c2} & \cosh(K_{c2}d_2) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(kA_g) & j\sin(kA_g) \\ j\sin(kA_g) & \cos(kA_g) \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$R = \frac{T_{11} + T_{12} - T_{21} - T_{22}}{T_{11} + T_{12} + T_{21} + T_{22}}, \ \alpha = 1 - |R|^2 \tag{5}$$

2.2 임피던스관을 이용한 흡음재의 음향특성

(1) 실험방법

흡음률 측정을 위해 임피던스관을 이용한 전달함수법을 이용하였고, 흡음률 실험을 위한 흡음재 조합은 Table 3과 같이 고려하였다. 실험에 사용된 흡음재는 폴리에스터이며, 각각의 밀도 및 두께가 24 K(50 T) 및 100 K(10 T)이다. 그리고, Case01 및 Case03의 경우에는 단일층의 흡음재로 구성하였고, Case02 및 Case04에서는 동일한 흡음재를 이중으로 구성하였다. 마지막으로, Case05 및 Case06에서는 서로 다른 밀도를 갖는 이중층 흡음시스템을 구성하되, Case05의 경우에는 밀도가 높은 흡음재를 스피커 전면으로 향하도록 배치하였고, Case06의 경우에는 Case05와 반대로 흡음재를 배치하였다.

또한, 배후공기층의 영향에 따른 흡음률 특성을 분석하고자 배후공기층 두께를 각각 25 mm, 50 mm로 변경시켜가며 흡음률 측정을 수행하였다.

(2) 실험결과

Table 3의 흡음재 설치 조건에 따른 흡음률 측정결과를 Fig. 3 ~ Fig. 6에 나타내었다. 우선, Fig. 3에서와 같이 동일한 밀도를 갖는 흡음재의 두께를 2배 증가시키면 흡음률도 증가하는 것을 쉽게 관찰할 수 있다. 그러나, 흡음률을 증가시키기 위해 흡음재의 두께를 2배 증가시키게 되면 공간뿐만 아니라 시공비 및 자재비도 증가하는 단점이 발생한다.

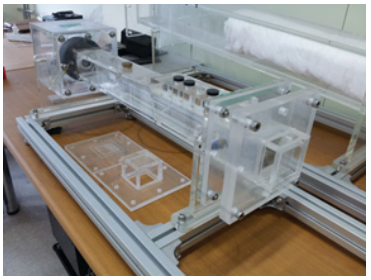
또한, Case01 및 Case03의 경우에 대한 배후공기층 변화에 따른 흡음률 측정결과를 Fig. 4에 나타내었는데, 배후공기층의 두께를 각각 25 mm 및 50 mm로 변경시키는 경우 저주파영역에서의 흡음성능은 개선되지만 고주파영역에서는 오히려 흡음성능이 저하되고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 배후공기층을 형성하기 위한 공간이 추가적으로 필요하게 되고, 흡음재를 공기층을 형성하여 벽체에 고정시키기 위한 별도의 지그도 필요하게 되는 단점이 발생한다.

반면에, CASE05와 같이 흡음재 두께를 크게 변화시키지 않고 서로 다른 밀도를 갖는 이중층 흡음시스템을 구성하여 수행한 흡음률 시험결과를 Fig. 5에 나타내었다. 측정결과 흡음재의 두께를 2배 증가시킨 다른 Case와 비교해 볼 때 전체적으로 흡음성능이 개선되고 있음을 확인할 수 있다. 즉, 이 측정결과는 서로 다른 밀도를 갖는 이중층 흡음시스템을 구성하여 흡음률을 상승시킴으로서, 흡음재의 설치 공간뿐만 아니라 시공 및 자재비가 증가하는 단점을 해결하는 수단으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 그리고, Case05의 경우에 대한 배후공기층 변화에 따른

Table 3 Combination of materials for absorption ratio measurement

Case	Combination of material	Remark
Case01	100 K, 10 T	Single layer
Case02	100 K, 20 T : (100 K + 10 T) + (100 K, 10 T)	Double layer
Case03	24 K, 50 T	Single layer
Case04	24 K, 100 T : (24 K + 50 T) + (24 K, 50 T)	Double layer
Case05	(100 K, 10 T) + (24 K, 50 T)	Double layer
Case06	(24 K, 50 T) + (100 K, 10 T)	Double layer

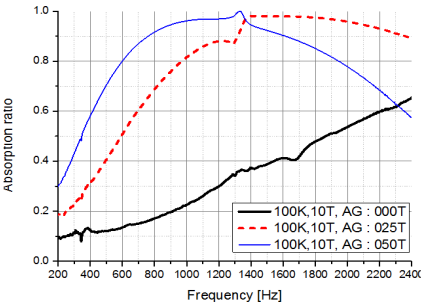
* K : Density of material(kg/m^3)
T : Thickness of material(mm)



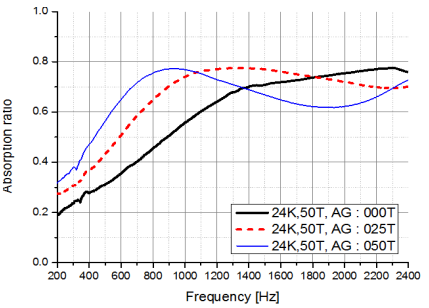
(a) Impedance tube

(b) Test specimen

Fig. 2 Impedance tube and test specimen

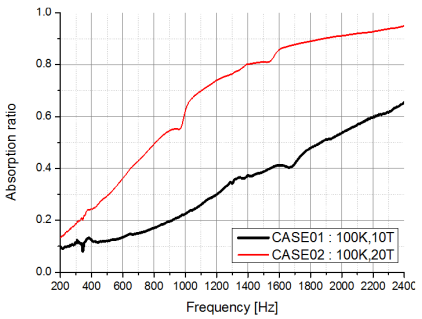


(a) Case01

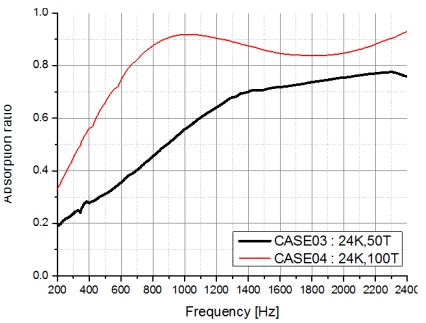


(b) Case03

Fig. 4 Experiment results of absorption ratio according to air gap(air gap : 0 mm, 25 mm, 50 mm)

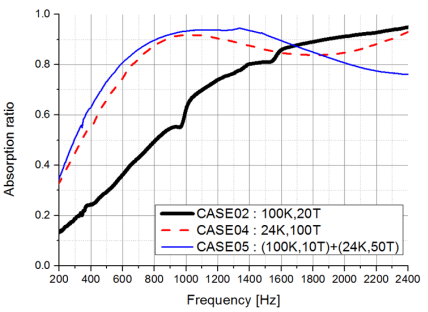


(a) Case01 and Case02

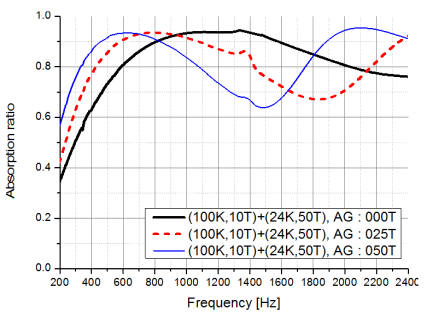


(b) Case03 and Case04

Fig. 3 Experiment results of absorption ratio with rigid back



(a) Case02, Case04 and Case05 with rigid back



(b) Case05 according to air gap
(air gap : 0 mm, 25 mm, 50 mm)

Fig. 5 Experiment results of absorption ratio

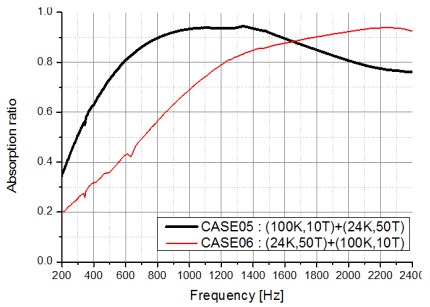


Fig. 6 Experiment results of absorption ratio for double layered system(Case05 and Case06)

흡음률 측정결과를 Fig. 5(b)에 나타내었는데, 배후공기층의 영향으로 저주파에서는 흡음성능이 개선되나 중고주파 영역에서는 오히려 흡음성능이 저하되고 있음을 관찰할 수 있다.

추가적으로, Case05 및 Case06과 같이 서로 다른 밀도의 흡음재를 뒤집어 배치하는 경우에 대한 흡음률 측정을 수행하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 흡음재의 밀도가 높은 것을 스피커 전면에 설치하는 것이 더 높은 흡음성능을 갖는 것으로 분석되었다.

따라서, 이중층 흡음시스템을 현장에 적용하기 위해서는 밀도가 높은 흡음재를 소음원 방향으로 전면 배치하는 것이 바람직한 것으로 분석되었고, 또한 흡음재 내부로 이물질이 침투하는 것을 방지할 수 있어 현장 적용에도 유리할 것으로 판단된다.

2.3 이중층 흡음시스템의 흡음성능 향상방안

고밀도 폴리에스터 흡음재를 이용한 이중층 흡음시스템의 흡음성능 향상방안을 검토하기 위해 전달행렬 요소를 이용한 이론적인 흡음률 평가를 수행하였다. 이때, 흡음재의 특성을 나타내는 특성임피던스 및 전파상수는 2.1절에서 소개한 폴리에스터의 예측모델을 사용하였다.

우선, 예측모델의 타당성을 검증하기 위해 단일층 흡음시스템에 대한 흡음률 예측을 수행하여 Fig. 7의 (a)~(b)에 나타내었고, Case01~Case04 모델에 대한 실측값과의 비교 검증을 수행하였다. 또한, 이중층 흡음시스템에 대한 흡음률 예측을 수행하여 Fig. 7의 (c)~(d)에 나타내었으며, 예측 및 실측 시 적용한 흡음재의 배치 방법은 스피커 전면 방향으로 밀도가 높은 것을 배치하는 모델(Case05)과 그 반대의 순서로 배치하는 모델(Case06)에 대해서 평가를 수행하였다. 흡음률 예측결과 측정값 및 계산값이 비교적 잘 일치하는 것으로 분석되었다. 다만, Fig. 7(a)에 나타낸 고밀도 폴리에스터의 경우 측정값과 예측값이 다소간 차이가 발생하는 원인은 고밀도 흡음재(100 K)에 대한 정확한 특성임피던스 및 전파상수 모델이 없어서 일반적인 밀도의 폴리에스터에 대한 예측모델에 적절한 유동저항값(σ)을 적용한 후 예측한 모델의 오차에 기인한 것으로 판단된다.

또한, 배후공기층이 있는 경우에 대해서도 단일층 및 이중층 흡음시스템의 흡음률 예측을 수행하여 측정결과와 비교하였다. Fig. 8의 (a)~(b)는 배후공기층 두께가 50 mm인 단일층 흡음시스템에 대한 측정 및 해석결과를 나타낸 것이고, (c)~(d)는 배후공기층 두께가 25 mm 및 50 mm인 이중층 흡음시스템에 대한 측정 및 해석결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 흡음률 예측결과와 측정결과가 상당히 유사함을 알 수 있다.

이중층 흡음시스템의 음향성능 향상방안을 검토하기 위해 흡음시스템의 조합을 Table 4와 같이 가정하였다. 우선, Case11~Case13에서는 스피커 전면으로 밀도가 높은 흡음재를 설치하되 그 두께를 변화시키는 경우에 대해서 해석을 수행하였다. 그리고, Case14~Case16에서는 스피커 전면으로 밀도가 낮은 흡음재를 설치하되 그 두께를 변화시키는 경우에 대해서 해석을 수행하였다. 그리고, Case11 및 Case17~Case18에서는 스피커 전면으로 밀도가 높은 흡음재를 설치하되 후면 흡음재의 밀도를 변경시키는 경우 대해서 해석을 수행하였다.

우선, Case11~Case13의 경우에 대한 해석결과를 Fig. 9의 (a)에 나타내었는데, 밀도가 높은 흡음재를 전면에 배치하되 그 두께를 증가시키는 경우 오히려 흡음성능이 저하되고 있는 것으로 평가되었다. 따라서, 전면에 설치하는 고밀도 흡음재의 두께를 두껍게 하지 않는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 그리고, Case14~Case16의 경우에 대한 해석결과를 Fig. 9의 (b)에 나타내었는데, 급격한 흡음재 두께의 상승으로 인해 흡음률 또한 상당히 증가하고 있으나 흡음재가 너무 두꺼워지므로 현장에 적용하기에는 경제적으로는 바람직하지 않은 방안이다. 또한, Case11과 Case14를 비교해 보면 스피커 전면으로 밀도가 높은 흡음재가 향하도록 배치하는 Case11의 경우가 더욱 높은 흡음성능을 갖는 것으로 분석되었

으며, 이는 실험결과에서도 확인한 바와 같다. 즉, 밀도가 높은 것을 소음원의 전면으로 배치하는 것이 흡음성능 측면에서 유리함을 알 수 있다. 그리고, Case11 및 Case17 ~ Case18의 경우에 대한 해석결과를 Fig. 9의 (c)에 나타내었는데, 후면에 설치되는 흡음재의 밀도가 증가할수록 고주파 영역에서는 흡음률이 약간 상승하나 전체적으로는 흡음률이 오히려 저하되고 있는 것으로 예측되었다.

따라서, 고밀도 폴리에스터 흡음재를 이용한 이중층 흡음시스템의 흡음성능 향상을 위해서는 후면에 설치되는 흡음재에 비해 밀도가 상대적으로 높은 100 K 이상의 흡음재를 소음원의 전면으로 향하도록 배치하되 흡음재 두께는 10 mm가 적당하며, 후면 흡음재의 밀도는 전면의 흡음재 밀도보다도 충분히 낮은 24 K ~ 64 K 범위로 설치하는 것이 바람직할 것으로 예상된다.

지금까지의 평가결과에 의하면 고밀도 폴리에스터 흡음재를 이용해 이중층 흡음시스템을 구성하면 흡음률이 상승함을 확인하였다. 따라서, 실제 현장에의 적용성 검토를 위해 KS F 2805 규격에 따라 잔향실에서 흡음률 측정을 수행하였다.

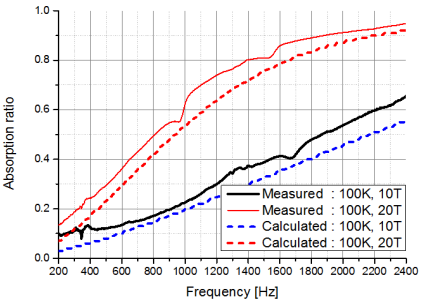
시험체는 Table 5와 같이 폴리에스터 및 유리면 단품(Case21, Case23)과, 각각의 흡음재 상부에 고밀도

Table 4 Combination of double layered polyester absorbing material

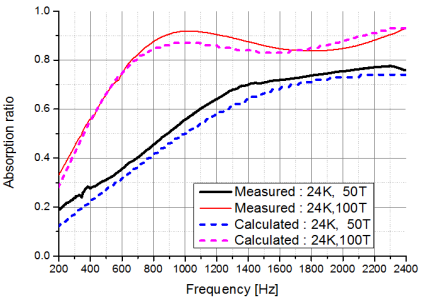
Case	Front absorbing material	Back absorbing material
Case11	100 K, 10 T	24 K, 50 T
Case12	100 K, 20 T	
Case13	100 K, 30 T	
Case14	24 K, 50 T	100 K, 10 T
Case15	24 K, 100 T	
Case16	24 K, 150 T	
Case11	100 K, 10 T	24 K, 50 T
Case17		64 K, 50 T
Case18		128 K, 50 T

Table 5 Combination of absorbing materials and NRC measurement results in reverberation room

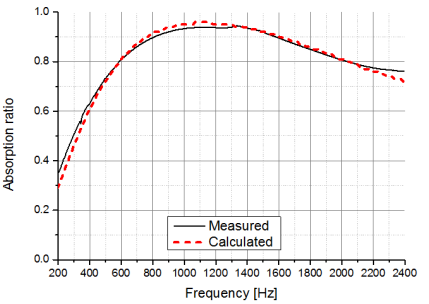
Case	Combination of absorbing material	NRC
Case21	Polyester : single, 24 K, 50 T	0.63
Case22	Polyester : double, (100 K, 10 T) + (24 K, 50 T)	0.87
Case23	Fiberglass : single, 32 K, 50 T	0.82
Case24	Polyester + fiberglass : double, (100 K, 10 T) + (32 K, 50 T)	0.90



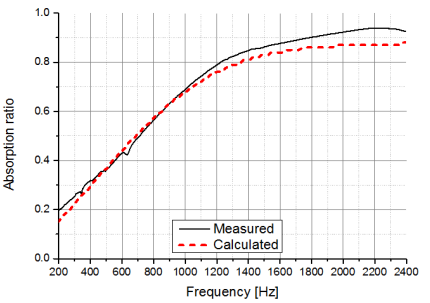
(a) Case01 and Case02



(b) Case03 and Case04

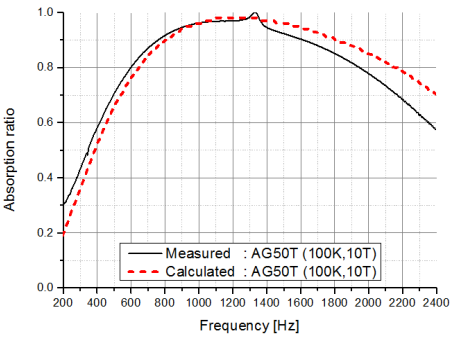


(c) Case05

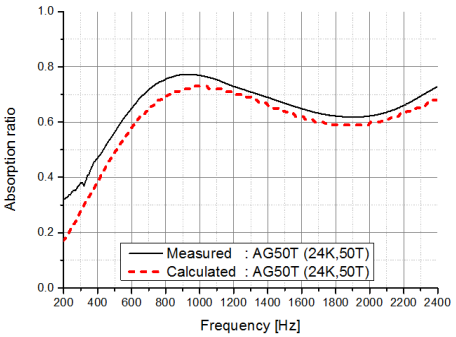


(d) Case06

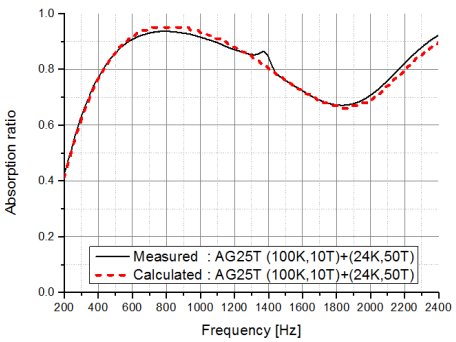
Fig. 7 Comparison of measured and calculated absorption ratios without air gap



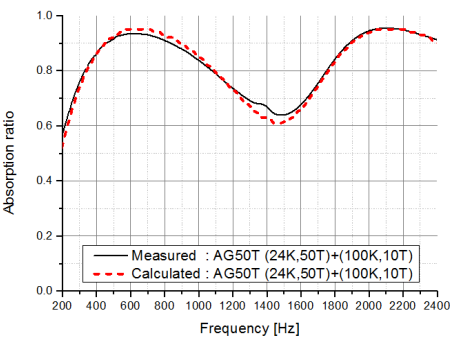
(a) Case01(AG : 50 mm)



(b) Case03(AG : 50 mm)



(c) Case05(AG : 25 mm)

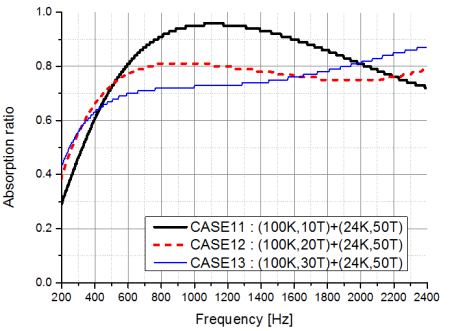


(d) Case05(AG : 50 mm)

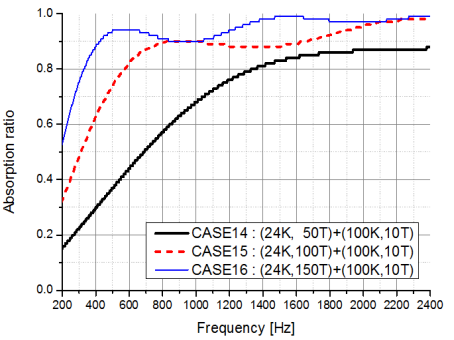
Fig. 8 Comparison of measured and calculated absorption ratio with air gap

폴리에스터 흡음재를 적층하는 형태(Case22, Case24)로 구성하였으며, 감음계수(NRC) 측정결과도 함께 표에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 단품으로 구성한 폴리에스터 및 유리면 흡음재보다 고밀도 폴리에스터 흡음재를 적층한 이중층 흡음시스템의 감음계수 값이 상당히 개선되었고, Fig. 10(a)에서 보는 바와 같이 특히 폴리에스터의 흡음률이 전 주파대역에 걸쳐 크게 개선되었음을 확인할 수 있다.

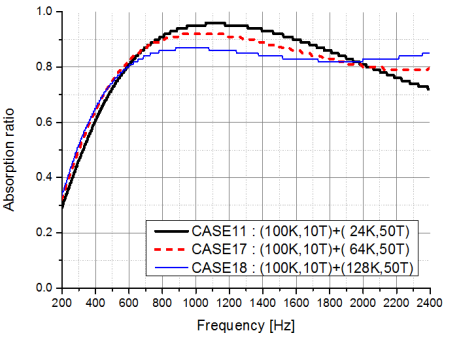
이러한 평가결과는 좁은 공간에서 반사음의 영향이



(a) Case11 ~ Case13

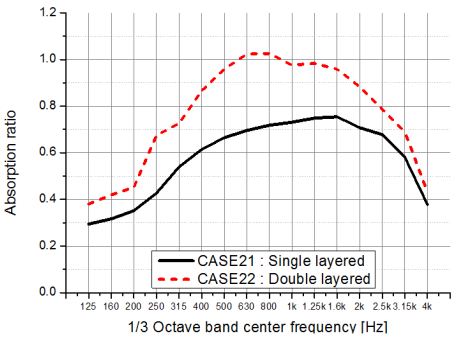


(b) Case14 ~ Case16

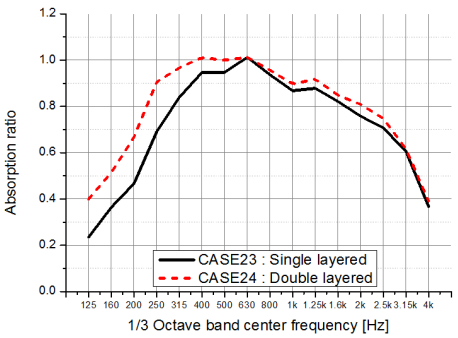


(c) Case11, Case17 ~ Case18

Fig. 9 Sound absorption prediction of system with double layered sound absorption polyester



(a) Case21 and Case22



(b) Case23 and Case24

Fig. 10 Sound absorption ratio of system with single and double layered sound absorption materials measured in the reverberation room

커 높은 흡음성능을 요구하되 흡음재의 설치 두께를 최소화 시켜야 하는 현장 즉, 궤도에 근접하여 설치하는 방음벽 또는 지하철 터널 내부 등에 적용가능할 것으로 판단된다.

3. 결 론

이 논문에서는 고밀도 폴리에스터를 이용한 이중층 흡음시스템의 음향특성 및 흡음성능 향상방안에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위해 이중층 흡음시스템의 계산모델을 수립하였고, 실험결과와의 비교를 통하여 그 타당성을 검증하였다. 그리고, 고밀도 폴리에스터 흡음재를 이용한 이중층 흡음시스템의 흡음성능 향상을 위해 흡음재 설치 방법을 '고밀도 폴리에스터(밀도 100 K 이상, 두께 10 mm) + 일반 폴리에스터(밀도 24 K ~ 64 K)'와 같이 제안하였다. 또한, 잔향실에서 흡음률 측정을 수행하였는데, 고밀도 폴리에스터 흡음재를 단일층 흡음재 상부에 적층한 결과 단일층의 폴리에스터 흡음재(Case21)에 비해 '0.24', 유리면 흡음재(Case23)에 비해 '0.08' 정도 감음계수(NRC) 값이 향상되었고, 이중층 폴리에스터 흡음시스템(Case22)의 경우 감음계수값이 '0.87'로 상당히 높은 것으로 분석되었다. 이러한 평가결과는 좁은 공간에서 반사음의 영향이 커 높은 흡음성능을 요구하되 흡음재의 설치 두께를 최소화 시켜야 하는 현장 즉, 궤도에 근접하여 설치하는 방음벽 또는 지하철 터널 내부 등에 적용 가능할 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 국토교통부 철도기술연구개발사업의 연구비 지원(과제고유번호 : 15RTRP-B072484-03)에 의해 수행되었습니다.

References

(1) Lee, D. H. and Seo, S. W., 2005, A Study on the Improvement of Acoustic Absorption of Multiple Layer Perforated Panel Systems, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 5, pp. 571~577.

(2) Lee, F. C. and Chen, W. H., 2001, Acoustic Transmission Analysis of Multi-layer Absorbers, Journal of Sound and Vibration, Vol. 248, No. 4, pp. 621~634.

(3) Liu, X., Liu, J. and Su, X., 2012, Simulation Model for the Absorption Coefficients of Double Layered Nonwovens, Fibres and Textiles in Eastern Europe, Vol, 20, No. 4(93), pp. 102~107.

(4) Delany, M. E. and Bazley, E. N., 1970, Acoustical Properties of Fibrous Absorbent Materials, Applied Acoustics, Vol. 3, pp. 105~116.

(5) Garai, M. and Pompoli, F., 2005, A Simple Empirical Model of Polyester Fibre Materials for Acoustical Applications, Applied Acoustics, Vol. 66, pp. 1383~1398.

(6) Munjal, M. L., 2014, Acoustics of Ducts and Mufflers, John Wiley & Sons, Inc., New York.

(7) Utsuno, H., Tanaka, T., Fujikawa, T. and Seybert, A. F., 1989, Transfer Function Method for Measuring Characteristic Impedance and Propagation Constant of Porous Materials, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 86, No. 2,

pp. 637~643.

(8) KS F 2805, Measurement of Sound Absorption in a Reverberation Room.

Je-Won Yoon received his B.S. and M.S. degree from Soongsil University. He is currently a Ph.D. student at the Kongju National University. His research interests are environmental noise and vibration control.

Kang-Seok Jang received his B.S., M.S. and Ph.D. degree from Chungnam National University. His research interests are environmental noise and vibration control.

Yong-Thung Cho received his Ph.D. degree from Purdue University. His research interests are beamforming and acoustical holography for sound source visualization. He is currently a professor of Department of Mechanical Engineering at Kongju National University, Korea.