

구조 진동 시스템을 이용한 흡차음재 음향 성능 실험시 공기 층 삽입의 효과

신재성* · 강연준** · 성명호*** · 김현석***

The Effect of Air gap Insertion in Test Acoustic Performance of Sound Barrier using Structural Vibration System

Sihn Jaeseong, Yeon June Kang, Myung-Ho Sung and Hyun-Suk Kim

Key Words : Structural Vibration System(구조 진동 시스템), Transmission Loss(투과 손실), Air Gap(공기 층), Transfer Matrix(전달 행렬), Structure-borne-noise(구조 기인 소음)

Abstract

In this paper, it is presented that the effect of air gap insertion in testing the transmission loss of sound barrier using structural vibration system. In this study, we use the APAMAT based on the structure-borne-noise. The measured results show that air gap insertion improves transmission loss as results of test based on the air-borne-noise. The measured results are compared with the predicted transmission loss using the transfer matrix method. The predicted results were found to be in reasonable agreement with measured results.

기호설명

- u_x : x-displacement component for solid phase
- u_y : y-displacement component for solid phase
- U_x : x-displacement component for fluid phase
- U_y : y-displacement component for fluid phase
- s : force per unit material area acting on the fluid component of porous material
- τ_{xy} : shear force acting on the solid phase
- p : acoustic pressure
- v_y : normal velocity
- θ : incidence angle
- τ : power transmission coefficient

1. 서론

수동 소음 제어 기술로 많이 이용되는 흡차음재는 차음 성능을 극대화하기 위하여 흡음재와 차음재의 다양한 조합으로 구성된 다중 층 구조(multi-layered system) 형태로 사용된다. 다중 층 구조의 조합을 달리하면, 주파수에 따른 차음 성능도 다양하게 변화한다. 따라서 제어하고자 하는 소음에 적합한 성능을 가지도록 최적화된 다중 층 구조의 조합을 찾기 위해서는, 흡차음재의 투과손실에 대한 예측이 실제적으로 매우 중요하다.

흡차음재의 투과 손실을 측정하기 위하여 일반적으로 사용되는 방법에는 잔향실 법(two room method)과 인텐시티 법(intensity method)이 있다. 두 방법 모두 음원용 잔향실로부터의 공기 기인 소음을 이용하여 흡차음재의 투과 손실을 측정한다. 잔향실 법이나 인텐시티 법을 이용하여 흡차음재의 투과 손실을 측정할 때, 흡차음재의 다중 층 구조에 공기 층을 삽입할 경우, 전체적으로 차음 성능이 향상됨을 확인할 수 있다.

이 논문에서는 잔향실 법이나 인텐시티 법과는 달리 구조 기인 소음을 이용하는, APAMAT 을 이

* 서울대학교 기계항공공학부

** 서울대학교 기계항공공학부 부교수

*** 현대자동차

용한 다중 층 구조 흡차음재의 음향 성능 실험에 대하여 다루었다. APAMAT 을 이용한 실험에서 공기 층의 삽입이 흡차음재의 차음 성능에 미치는 영향을 밝히고, 공기 기인 소음을 이용한 실험 결과와 비교하였다. 또한, 전달 행렬법^[2]을 이용하여 예측한 결과와 실험 결과를 비교하였다.

2. APAMAT 의 구조와 실험 방법

APAMAT 은 크게 나누어 수음용 잔향실, 소음을 발생시키기 위한 가진부, 그리고 실험용 시편 홀더로 구성되어 있다. 수음용 잔향실에는 음압을 측정하기 위한 마이크로폰이 장치되어 있으며, 가진부는 베이스 플레이트(base plate)와 베이스 플레이트를 가진 시키기 위한 쇄구슬과 로울러로 이루어져 있다. 시편 홀더는 베이스 플레이트 바로 윗면에 위치하고 있으며, 840mm × 840mm 의 시편이 필요하다. 이 중에서 실제 실험되는 부분은 시편 중앙의 640mm × 640mm 이다.

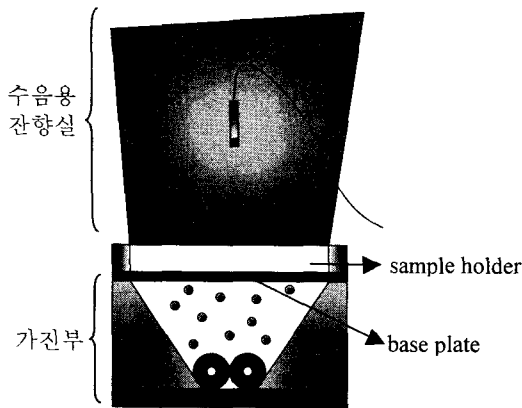


Fig. 1 Structure of APAMAT

APAMAT 은 로울러의 회전력을 이용하여 쇄구슬을 베이스 플레이트에 튀겨줌으로써 구조 진동에 의한 소음을 발생시킨다. 그리고, 시편 홀더 위에 위치한 수음용 잔향실 내부의 마이크로폰으로 이 때의 음압을 측정하는 방식으로 실험이 이루어진다. 입의의 시편에 대한 투과 손실을 측정하려면, 베이스 플레이트만 가진할 때의 음향 에너지를 측정 한 후, 투과 손실 값을 알고자 하는 시편을 시편 홀더에 장치한 후, 같은 작업을 반복하여 이 때의 음향 에너지를 측정한다. 이렇게 측정 한 두 음향 에너지의 차이가 시편의 투과 손실이다.

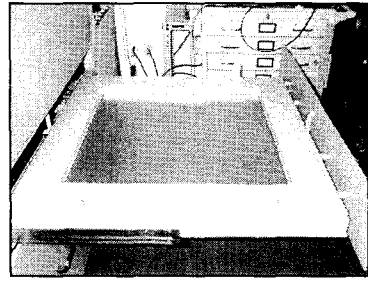


Fig. 2. Sample holder of APAMAT

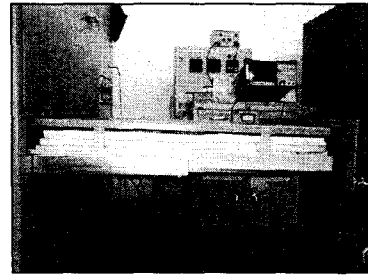


Fig. 3. Sample placed in APAMAT

3. 전달 행렬법

다중 층 구조의 흡차음재는 일반적으로 공기 층, 패널(panel), 막, 탄성 포움(elastic foam), 섬유사 등의 요소들의 조합으로 구성되어 있다. 이러한 다중 층 구조 흡차음재의 음향학적 성능을 예측하는 방법 중의 하나가 전달 행렬법을 이용하는 것이다. 계 전체에 대한 이론적 모델을 구하는 방법은 흡차음재를 이루고 있는 각 요소들의 순서가 바뀌거나 경계 조건이 달라짐에 따라, 다시 모델을 구해야 하는 단점이 있다. 하지만, 전달 행렬법을 이용할 경우, 각 요소들에 대한 전달 행렬만 알고 있으면, 계 전체에 대한 전달행렬을 쉽게 구할 수 있는 장점이 있다.

일반적으로 많이 사용되는 음향학적 요소들에 대한 전달 행렬은 다음과 같이 2×2 의 행렬이다.

$$[T_i] = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \quad (1)$$

탄성 다공성 물질에서는 식(2)와 같은 6×6 의 전달 행렬을 구할 수 있다. 탄성 포움은 경계조건에 매우 민감하므로 양면의 경계조건에 따라 각각의 전달 행렬을 다시 구해야 한다. 포움의 양쪽면이 모두 패널이나 얇은 막에 붙어 있는 경우와 붙어

있지 않은 경우, 앞쪽면만 붙어 있는 경우와 뒤쪽면만 붙어 있는 경우로 나누어 2x2 의 전달 행렬 4 개를 구할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ U_y \\ \sigma_y \\ s \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_I = [C] \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ U_y \\ \sigma_y \\ s \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_T \quad (2)$$

다중 층 구조의 흡차음재에 대한 전체 전달행렬은 식 (3)과 같이 계를 이루고 있는 각층의 전달행렬을 구한 후, 각각의 행렬을 곱함으로써 구해진다.

$$T = T_1 T_2 \cdots T_n \quad (3)$$

이렇게 구한 다중 층 시스템의 전달행렬은 다음의 식을 만족하게 된다. I 와 T 는 각각 입사면과 투과면을 뜻한다.

$$\begin{Bmatrix} p \\ v_y \end{Bmatrix}_I = [T] \begin{Bmatrix} p \\ v_y \end{Bmatrix}_T \quad (4)$$

위의 전달행렬의 각 요소로부터 투과 계수는 다음과 같이 된다.

$$T = \frac{2e^{jk_y L}}{T_{11} + \left(\frac{\cos \theta}{\rho c}\right) T_{12} + \left(\frac{\rho c}{\cos \theta}\right) T_{21} + T_{22}} \quad (5)$$

특정한 입사각에 대한 투과 손실은 식 (6)을 통해 구할 수 있다.

$$TL = 10 \log(1/|T|^2) \quad (6)$$

임의의 입사각에 대한 투과 손실을 계산할 때는 식(5)에 나타낸 바와 같이 음압 투과 계수 T 가 입사각과 주파수의 함수이므로, 식 (7)과 같이 정의 되는 파워 투과 계수를 특정 입사각에 대하여 계산한 후, 식(8)을 이용하여 한계각까지 평균을 내는 방법으로 구해낸다.

$$\tau(\theta) = |T(\theta)|^2 \quad (7)$$

$$\bar{\tau} = 2 \int_0^{\theta_{lim}} \tau(\theta) \sin(\theta) \cos(\theta) d\theta \quad (8)$$

여기에서, θ_{lim} 은 한계각으로서, 이 각 이상으로 음파가 입사될 경우 반사파가 존재하지 않는 특성을 가지며, 본 연구에서는 72°를 택하여 계산하였다.

4. 결 과

4.1 공기 층 삽입의 효과

실험은 탄성 포움(elastic foam), 펠트(felt) 등의 흡음재와 철판, 헤비 레이어(heavy layer) 등의 패널로 구성된 다중 층 구조의 흡차음재에 대하여 이루어졌다. 각각의 흡차음재에 대하여 베이스 패널과 흡음재, 패널이 접촉되어 있는 경우(BB)와 흡음재와 베이스 플레이트 사이에 공기 층을 삽입한 경우(UB), 흡음재의 양면에 공기 층이 삽입된 경우(UU)에 대하여 이루어졌다.

탄성 포움은 두께 20 mm, 밀도 80 kg/m³, 유동저항계수 4.3×10⁴ MKS Rayls/m, 공극률 0.92, 벌크영률 5.8×10⁵ Pa, 프아송비 0.15, 손실인자 0.5, 뒤틀림도 1.35 이며, 펠트는 두께 12 mm, 밀도 57.1 kg/m³, 유동저항계수 3.26×10⁴ MKS Rayls/m, 공극률 0.87, 뒤틀림도 4.25 이다. 철판은 두께 1 mm, 밀도 7700 kg/m³, 영률 19.5×10¹⁰ Pa, 프아송비 0.28 이며, 헤비 레이어는 두께 3 mm, 밀도 2090 kg/m³, 영률 0.23×10¹⁰ Pa, 프아송비 0.4 이며, 베이스 플레이트로는 두께 0.8 mm의 철판을 이용하였다.

실험 결과는 Fig. 4 - 6에서 보인 바와 같다. 측정 결과 약 200 Hz 이하에서는 공기 층을 삽입하였을 때, 공기 층을 삽입하지 않은 경우와 비교하여 차음 성능이 다소 떨어졌다. 그러나 그 이상의 주파수 범위에서는 공기 층을 삽입하였을 때, 흡차음재의 투과 손실 특성이 향상됨을 확인할 수 있었다 이러한 결과는 절대적인 값에는 차이가 있지만, 잔향실 법이나 인텐시티 법, 임피던스 튜브를 이용한 관내법에 의한 투과 손실 측정 결과와 비슷한 경향을 보인다.

공기 기인 소음을 이용한 일반적인 흡차음재의 음향 성능 실험에서 다중 층 구조의 흡차음재에 공기 층을 삽입할 경우, 저주파에서는 투과 손실 특성이 감소하나, 고주파에서는 투과 손실 특성이 증가하는 경향을 보인다. Fig. 4 - 6의 실험 결과를 통해 구조 진동 시스템을 이용하여 다중 층 구조로 이루어진 흡차음재의 투과 손실을 측정할 때에도, 공기 층의 삽입이 차음 성능을 향상시킬 수 있었다.

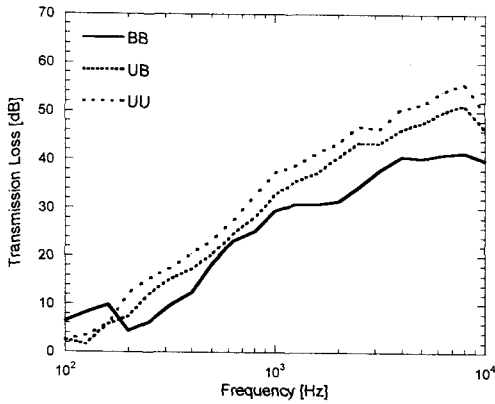


Fig. 4 Measured transmission loss of [base plate + foam + steel 1t]

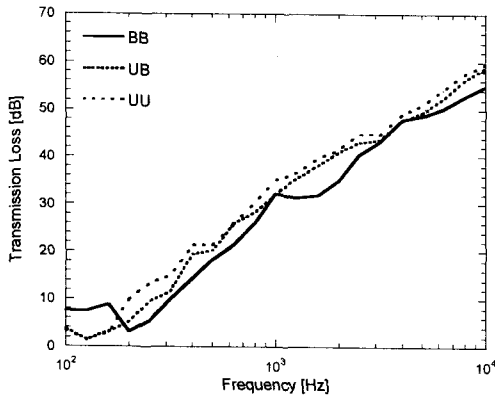


Fig. 5 Measured transmission loss of [base plate + foam + heavy layer 3t]

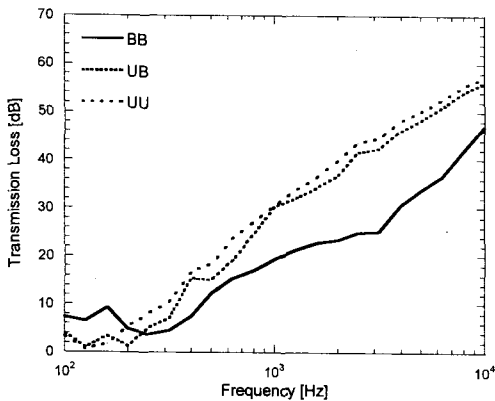


Fig. 6 Measured transmission loss of [base plate + felt + heavy layer 3t]

4.2 전달 행렬을 이용한 투과 손실 예측

APAMAT 을 이용한 실험 결과를 전달 행렬을 이용하여 예측하고, 측정 결과와 비교하였다. 전달 행렬을 이용하여 흡차음재의 투과 손실을 예측하는 방법은 공기 기인 소음을 가정하지만, APAMAT 의 경우 베이스 패널의 진동에 의한 구조 기인 소음을 이용하므로, 보정 과정이 필요하다. Fig. 7 - 9 에 보인 예측 결과는 전달 행렬법으로 공기 기인 소음을 이용한 경우에 대하여 투과 손실을 예측한 후, APAMAT 의 특성을 고려하여 보정해준 결과들이다.

전달 행렬법의 경우 시편이 무한하다는 가정 하에 공기 기인 소음에 의한 음향 에너지의 투과 손실을 구하는 반면, APAMAT 을 이용한 실험에서는 실제 시편은 유한하며, 베이스 플레이트의 가진에 의한 구조 기인 소음을 이용하므로 두 결과의 전체적인 경향은 비슷하지만 다소 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 전달 행렬을 이용한 예측 결과와 APAMAT 을 이용한 실험 결과의 가장 큰 차이점은 공진(resonance) 현상이다. 전달 행렬을 이용하여 예측한 결과에서는 약 200 Hz 부근에서 공진 현상이 나타나지만, APAMAT 실험 결과에서는 이와 같은 공진 현상을 발견할 수 없었다. 또한, APAMAT 을 이용하여 실험을 할 때에 측정하고자 하는 시편은 Fig. 3 과 같이 베이스 플레이트 위에 차곡차곡 쌓아가므로, 다중 층 구조에 순수한 공기 층을 삽입하는 것은 실제로 불가능하다. 따라서, 패널과 포음이 물리적으로 완전하게 분리되어 있지 않으므로, 베이스 플레이트로부터 전달되는 진동을 무시할 수 없다. 전달행렬을 이용한 예측에서는 이를 고려하지 않았으므로, 두 결과 사이에는 이로 인한 차이가 존재할 것이다.

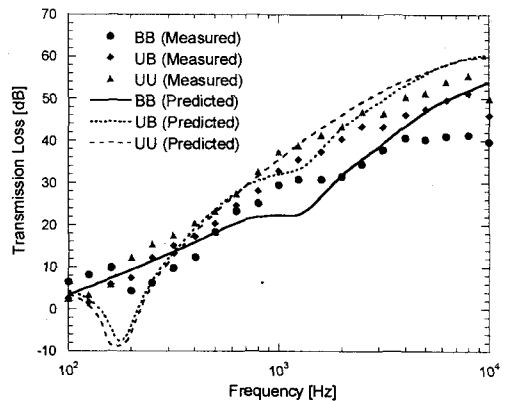


Fig. 7 Predicted transmission loss of [base plate + foam + steel 1t]

참고문헌

- (1) J. S. Bolton, N.-M. Shiau, and Y. J. Kang, 1996, Sound Transmission through multi-panel structures lined with elastic porous materials, *Journal of Sound and Vibration* 191(3), 317-347
- (2) 이승엽, 김진섭, 강연준, 1999, 전달행렬법에 의한 다중 흡음시스템의 물리적 성질의 추출과 투과 손실의 예측, 한국소음진동공학회, 1999년도 춘계학술대회논문집, 698-702
- (3) H.Y. Lai, S. Katragadda, J.S. Bolton, and J.H. Alexnader, 1997, Layered Fibrous Treatments for a Sound Absorption and Sound Transmission Society of *Automotive Engineers* 972064
- (4) F.J. Fahy, 1987, *Sound and Structural Vibration: Radiation Transmission and Response*. New York: Academic Press, Inc.

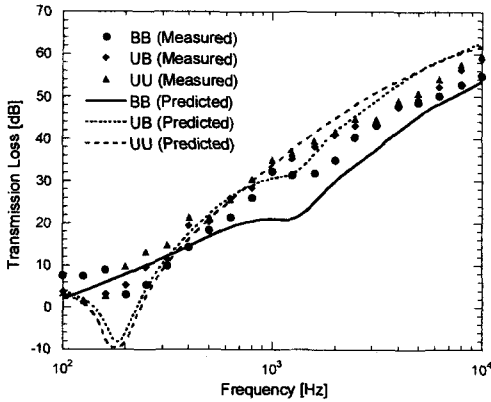


Fig. 8 Predicted transmission loss of [base plate + foam + heavy layer 3t]

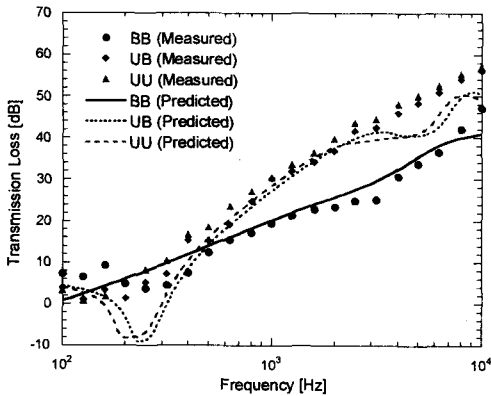


Fig. 9 Predicted transmission loss of [base plate + felt + heavy layer 3t]

5. 결론

구조 진동 시스템을 이용한 APAMAT 으로 흡차음재의 투과 손실을 측정할 때에도 다중 층 구조에 공기 층을 삽입할 경우 투과 손실 특성이 향상됨을 알았다. 이러한 결과는 잔향실 법이나 인텐시티 법으로 측정된 결과와 그 경향이 비슷하며, 전달 행렬을 이용한 예측 결과와의 비교를 통해서도 확인할 수 있었다. 그러나, 공기 기인 소음을 이용하는 일반적인 방법과 달리, 구조 기인 소음을 이용하는 기본적인 시스템의 특성으로 인한 차이도 확인되었다.

구조 진동 시스템을 이용한 다중 층 구조 흡차음재의 음향학적 성능을 정확하게 예측하기 위해서는, 구조 진동에 대한 탄성 포음과 펠트의 거동에 대한 해석이 필요하다.