

점가진력에 의해 방사된 음압을 이용한 다중 적층 흡차음 시스템의 차음 성능 예측

Prediction of Isolation Performance of Multi-Layered Sound Barrier System Using the Sound Pressure Radiated by Point Impact

김 정 수* · 신 재 성** · 강 연 준***

Jung Soo Kim, Jae Seong Sihm and Yeon June Kang

Key word : isolation performance(차음 성능), sound radiation(음향 방사), transmission loss(투과 손실),
APAMAT II

A modeling is developed to predict the isolation performance of sound barrier systems under the sound pressure radiated from excited by point impact. The predicted results are compared with the measured results obtained by using APAMAT II. This instrument provides a combination of structure-borne noise and air-borne noise, which corresponds to rolling noise, by applying the excitation system projected steel balls against the steel sheet.

1. 서 론

흡차음재의 성능을 평가하는데 있어서 차음 성능, 즉 투과 손실 측정이 중요한 역할을 한다. 투과 손실을 측정하는 방법에는 ISO 시험 표준인 잔향실법과 잔향실과 반무향실을 이용하는 인텐시티법 등이 있다.

이러한 방법들을 실제 차량의 차체에 적용할 경우 차체의 진동과 외력에 의한 구조진동에 의

해 방사되는 소음을 해석하기 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 고안된 Rieter사의 APAMAT II는 롤리의 회전력을 이용하여 베이스 플레이트를 때려주는 쇠구슬에 의해 실제 차량의 차체에 작용하는 진동과 외력을 구현할 수 있어서 구조진동 기인 소음을 측정하는 데 아주 유용한 측정 장치이다.

본 논문에서는 APAMAT II에 의해 측정되는 투과 손실이 일반적인 임피던스 튜브를 이용한 투과 손실 측정과는 달리 베이스 플레이트를 투과한 구조 기인 소음이 흡차음재에 어떠한 영향을 미치며, 외력에 의해 발생된 모드 변화에 따라

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

** 서울대학교 기계항공공학부 석사

*** 서울대학교 기계항공공학부 부교수

발생되는 투과 손실에 대하여 예측하고, 측정결과와 이를 예측할 수 있는 모델을 이용한 예측값과 비교하고 이를 행하는데 있어서 고려해야 할 사항들에 고찰해 보았다.

2. APAMAT II를 이용한 측정

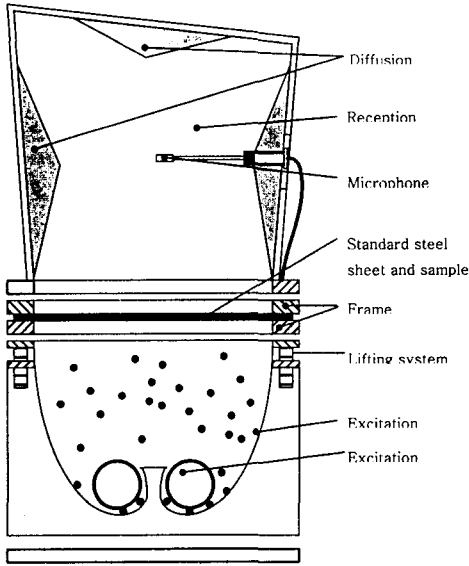


Fig. 1 The structure of APAMAT II

APAMAT II는 수음용 잔향실과 소음을 발생시키는 가진부, 그리고 그 사이에 위치한 두께 0.8mm인 베이스 플레이트, 샘플, 그리고 샘플 홀더가 있으며, 측정되는 시편은 일반적으로 840mm x 840mm의 베이스 플레이트와 시편이 필요하며, 시편의 측정부위는 중앙의 640mm x 640mm이며, 이 부분만 측정에 기여하게 된다.

측정 방법은 가진부에 위치한 1470rpm으로 회전하는 롤러에 의해 튀겨 나온 직경 8mm의 쇠구슬 200개는 베이스 플레이트의 임의의 점을 가진하게 된다. 이때 베이스 플레이트만 가진 하였을 때의 음압 수준($SPL_{\text{base plate}}$)과 시편을 장착

했을 때의 음압 수준($SPL_{\text{base plate+sample}}$)의 차에 의해 나타낼 수 있다

$$\text{차음성능} = SPL_{\text{base plate}} - SPL_{\text{base plate+sample}}$$

3. 차음 성능 예측 모델

3.1 베이스 플레이트에서 방사된 음압 예측

APAMAT II의 경우 쇠구슬이 베이스 플레이트에 부딪히는 점의 위치나 주기가 불규칙하며, 경계면이 고정되어 있는 유한한 평면이다. 따라서 베이스 플레이트를 가진하는 쇠구슬 주기를 가지고 평면에 고르게 외력을 가한다고 가정하고 그 중에서 임의의 한 점에서 모드의 변화에 따른 음압을 예측하였다.

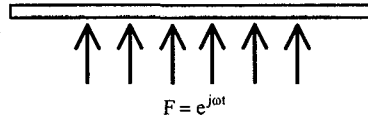


Fig. 2 Force exerted on the base plate

$$[D k_x^4 - \omega^2 m] W_1(k_x) = F \quad (1)$$

$$[P(kx)]_{y=0} = \frac{\pm \omega \rho_0}{\sqrt{k^2 - k_x^2}} v_1(k_x) \quad (2)$$

$$v_1(kx) = j\omega W_1(kx) \quad (3)$$

$$[P(kx)]_{y=0} = \frac{\pm \omega \rho_0}{\sqrt{k^2 - k_x^2}} \left[\frac{F}{D k_x^4 - \omega^2 m} \right] \quad (4)$$

$$k_x = \frac{n \pi}{L} \quad (n = 1, 2, 3 \dots)$$

v_1 는 투과면의 분자 속도, W_1 는 플레이트의 변위, F 는 플레이트에 작용하는 단위 면적 당 힘, P 는 방사된 음압, D 는 플레이트의 굽힘 강성, m_s 는 플레이트의 단위 면적 당 질량, L 은 베이스 플레이트의 한 변의 길이 이며, k_x 는 n

번째 모드에서 발생하는 베이스 플레이트의 굽힘 파동수이며, 이것은 플레이트에 샘플이 부착되어 있을 경우, 투과면과 수평인 방향으로의 파동 수라고 가정하며, 식 (4)으로부터 $SPL_{\text{base plate}}$ 을 예측할 수 있다.

3.2 베이스 플레이트에 탄성 폼이 부착된 경우

시편을 장착했을 때 음압 수준을 예측하기 위해서는 집중하중이 플레이트에 작용할 때 일어나는 음향 방사로부터 Biot 모델을 바탕으로 개발된 탄성 폼(elastic foam)을 포함한 다중 흡차음 시스템의 투과 손실 예측 모델을 보완하였다.

베이스 플레이트에 탄성 폼이 부착된 경우, 경계 조건은 다음과 같다.

$y=0$ 에서

$$u_y = W_1 \quad (5)$$

$$U_y = W_1 \quad (6)$$

$$u_x = \mp \frac{h_p}{2} \frac{dW_1}{dx} \quad (7)$$

$$F - q_p - jk_x \frac{h_p}{2} \tau_{xy} = (Dk_x^4 - \omega^2 m_s) W_1 \quad (8)$$

$y=L$ 에서

$$-hP_2 = s \quad (9)$$

$$-(1-h)P_2 = \sigma_y \quad (10)$$

$$v_y = -\frac{\partial \phi_2}{\partial y} = j\omega(1-h)u_y + j\omega U_y \quad (11)$$

$$\tau_{xy} = 0 \quad (12)$$

탄성 폼에는 고체상과 유체상의 면에 수직인

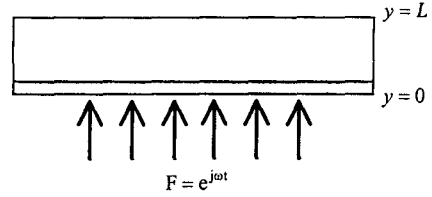


Fig. 3 Force exerted on the base plate lined foam

방향으로의 변위가 존재하는데, 이는 각각 u_y , U_y 로 나타내며, u_x 고체상의 하중이 가해지는 면의 수평 방향으로의 변위이다. h_p 는 플레이트의 두께이며, τ_{xy} 는 전단 응력, q_p 는 탄성 폼에 의해 플레이트에 작용하는 단위 면적당 수직 힘을 나타낸다. 식에 나타난 각 요소들은 [1]에 정리되어 있는 바와 같으며, 양변에 패널이 부착된 폼의 경우도 [1]에 정리되어 있는 바와 같은 경계조건을 이용하여 결과를 유도한다.

4. 예측 결과와 측정 결과 비교 및 분석

차음 성능 측정에 사용된 재료들의 물성치를 살펴보면, 베이스 플레이트는 두께 0.8mm, 밀도 7700 kg/m^3 , 벌크 영률 $19.5 \times 10^{10} \text{ Pa}$, 프아송 비 0.2, 헤비 레이어는 두께 3mm, 밀도 2200 kg/m^3 , 벌크 영률 $0.23 \times 10^{10} \text{ Pa}$, 폼A, 폼 B는 각각 두께 20mm, 20mm, 밀도 85 kg/m^3 , 70 kg/m^3 , 유동저항계수 64300 MKS Rayls/m, 30000 MKS Rayls/m, 공극률 0.97, 0.97, 프아송비 0.29, 0.21, 손실 인자 0.5, 0.49, 뒤틀림도 1.75, 3.00, 벌크 영률 5.6×10^5 , 4.0×10^5 이다.

결과 예측에 있어서 모드 해석을 통한 투과 손실 예측이 이 논문의 요점이다. 유한한 평판을 가진 하였을 경우 평판에는 모드가 발생하게 되는데, APAMAT II의 경우도 평판을 가진 하였을 경우 모드가 발생한다. 따라서 무한한 평판으로 가정하고 투과 손실을 예측할 수 있지만,

경계면에서 반사되어 오는 굽힘파동을 고려하지 않으므로 측정값에 비해 결과값이 비교적 낮은 음압 수준을 보일 수도 있다. 본 논문에서는 평판이 유한하다고 가정하고 가진에 의해 발생하는 굽힘 파동수를 구하여 각각의 모드에 대해서 음압을 관찰하고, 특정 주파수 대역에서 지배적인 모드를 중심으로 연구를 수행하였다.

우선 APAMAT II의 크기가 640mm×640mm 인 가진부와 경계면이 고정되어 있고 임의의 점을 평판의 중심이라고 가정 하였을 경우, 평판에서

발생하는 굽힘 파동수는 $kx = \frac{n\pi}{L}$ ($n = 1, 2, 3 \dots$)

이다. 이는 n 값에 따라 파동수를 달리하여 평판에서 방사되는 음압을 지배하는 모드를 결정지어 준다. 이때, n 번째 모드가 발생하는 주파수를 컷오프 주파수라고 하며, n 번째 모드에서 방사되는 음압은 그 모드만 지배적이고 그 외에 발생하는 모드들은 크게 영향을 미치지 못하게 된다.(Fig. 4, 6)

이러한 특징을 이용하여, 베이스 플레이트의 음압 수준($SPL_{base\ plate}$)을 예측하고, 식 (5)~(12)에 따라서 구해진 시편을 장착했을 때 음압 수준($SPL_{base\ plate+sample}$)을 예측한 값의 차에 의해 구조 진동 소음에 의한 투과 손실을 예측할 수 있고, 측정값과 예측값을 비교한 그림이 Fig. 5, 7, 8, 9에 있다. 그림에서도 확인 할 수 있듯이 예측값과 측정값이 오차가 발생하는데, 이는 플레이트는 유한하다고 가정 하였을 지라도 포음의 경계조건에서 무한함을 가정하고 있고, APAMAT II의 수음부가 무향 공간에 놓여져 있다고 가정하고 있기 때문이다.

5. 결론

임의의 점가진에 의한 플레이트의 음향 방사에 의한 차음 성능 예측에 있어서, 결과 값을

APAMAT II의 측정값과 비교해 보았다. 앞으로 풀어야 할 과제는 포음도 유한하다는 가정하에 문제의 해결방안을 모색해 보고, 더 정확한 예측 값을 유도 할 수 있는 모델을 제안해야 할 것이다.

참고 문헌

- [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] F.J. Fahy, 1987, *Sound and Structural Vibration : Radiation Transmission and Response*. New York : Academic Press, Inc.
- [3] H. Peng and R. F. Keltie, 1989, Sound radiation from finite plates under the action of multiple random point forces, *J. Acoust. Soc. Am.* 85(1), 57-67
- [4] P. Troccaz, R. Woodcock, and F. Laville, 2000, Acoustic radiation due to the inelastic impact of a sphere on a rectangular plate, *J. Acoust. Soc. Am.* 108(5), 2197-2202
- [5] L. Cremer and M. Heckl, *Structure-Borne Sound : Sound Radiation from Structures*.

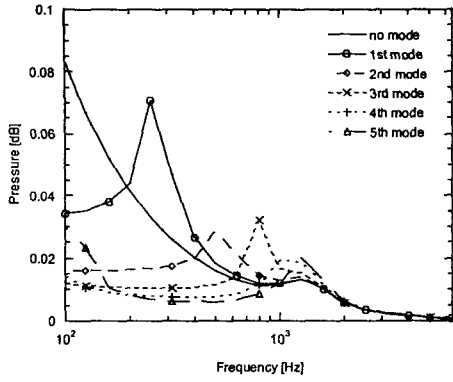


Fig. 4 Pressure amplitude for each mode
(base plate + Foam A)

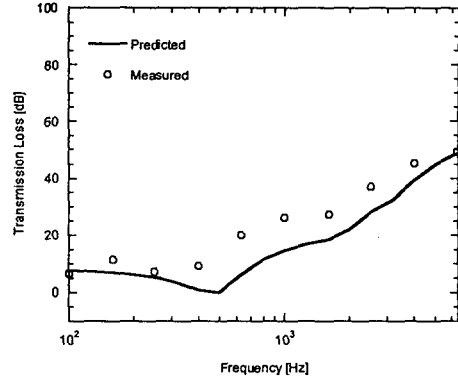


Fig. 7 Measured and Predicted Results
(base plate + Foam A + heavy layer)

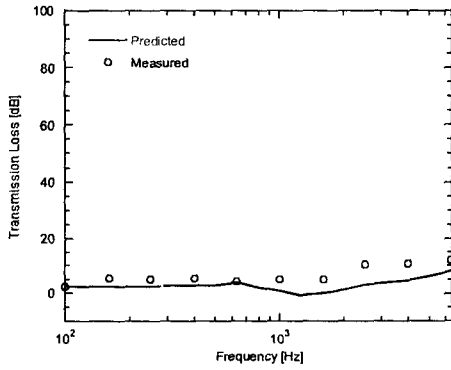


Fig. 5 Measured and Predicted Results
(base plate + Foam A)

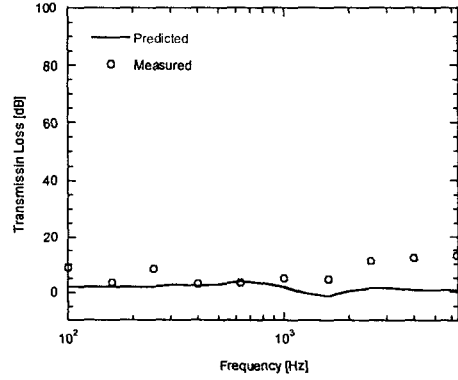


Fig. 8 Measured and Predicted Results
(base plate + Foam B)

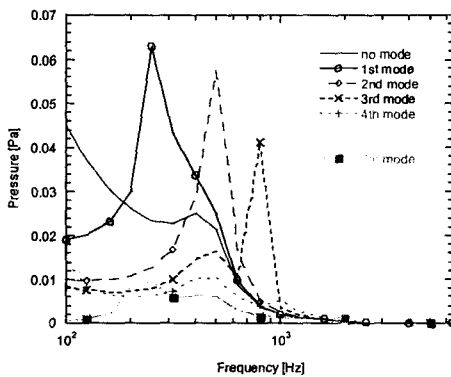


Fig. 6 Pressure amplitude for each mode
(base plate + Foam A + heavy layer)

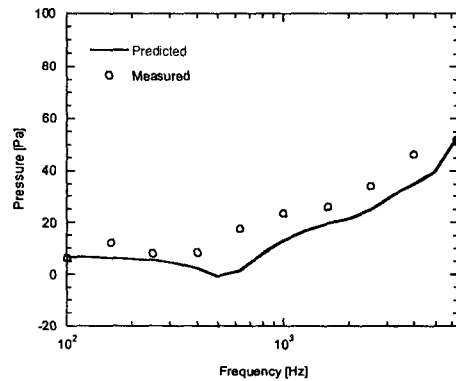


Fig. 9 Measured and Predicted Results
(base plate + Foam B + heavy layer)