

중공 이중판의 차음손실 예측에 있어서 경계손실이 미치는 영향

°이종화*, 이정권**

Effects of Boundary Damping in the Prediction of Sound Insulation Performance of the Double Partition with Air-gap

°Jong-Hwa Lee*, Jeong-Guon Ih*

ABSTRACT

It has been reported that discrepancies exist in the case of double panels with an air layer when the measured sound transmission loss is compared with the calculated values. It has been known that the cause of this discrepancy is in major from the unavoidable dips associated with the double wall resonances. In this work, several correction methods to make up for such resonances are studied. In particular, the 'boundary damping' concept is revisited and its effects are discussed by comparing with measured values. It is shown that the correction methods are necessary for the sound insulation analysis of double partitions with an air layer, in order to ascertain the quantitative correlation between measured and predicted values.

1. 서 론

음향 전달 계수 (sound transmission coefficient, τ)는 환경소음에 대한 대표적 대응책인 차음재의 차음 성능을 나타내는 값으로 차음재에 입사되는 음향 파워와 투과되는 음향 파워의 비 ($\tau = P_{trans}/P_{inc}$)로 정의되고, 일반적으로는 이의 데시벨 (dB) 값인 음향 전달 손실 (sound transmission loss, $TL = -10\log_{10}(\tau)$)로 나타내어진다. 음향 전달 손실은 본래 구획부재의 특성으로써 도입되었고, 차음재의 재질과 두께 등이 정해지면 동일한 값을 나타내도록 정의되었다. 이에 따라 ISO[1]나 ASTM[2]등에는 규격화된 측정방법을 제시하고 있지만, 여러 곳의 실험 장소를 대상으로 한 연속 실험 (round-robin test)의 결과 동일한 시편이라 하더라도 측정 장소에 따라 서로 다른 측정값을 나타냄이 보고되었다. 이러한 측정치의 차이에 대해서는 측정 절차의 규정 제정과 연계되어 1980년대 이후 연구가 진행되어 왔다. 주로 실험적인 방법을 통해 측정 시설[3,4]과 시편의 준비과정, 즉, 시편의 장착이나 시편의 면적[5]에 의한 측정값의 변화를 관찰하였고, 동일한 시편에 대해서도 크게는 10 dB 이상의 차이를 나타냄이

보고되었다. 이러한 차이들은 부재의 특성으로 정의된 전달손실의 개념에 반하는 것으로 원인 분석 및 측정 절차의 보완이 요구되어 왔다.

한편, 판 구조물의 이론적인 차음해석도 여러 측면에서 이루어져 왔는데, 기본적으로 크게 두 가지의 가정에 근거한다. 첫째는 판의 면적이 무한하다는 것인데, 전달 손실은 정의상 부재의 특성에 해당하므로 면적과는 관계없는 값으로 정의되었다. 이는 판의 너비 및 높이가 관심 주파수영역의 파장에 비해서 매우 클 경우에는 유효한 가정이지만, 측정 시에는 10 m²이상의 비교적 큰 면적의 시편이 필요하다[1,2]. 두 번째 가정은 판에 입사하는 음파는 일정 입사각을 갖는 평면파들의 중첩으로 이루어지며, 각각의 음파 에너지는 입사각에 상관없이 동일하다는 것이다. 이는 측정이 이루어지는 실내의 음장이 완전한 잔향장 (diffuse field)일 경우에 타당한 가정이다.

Rayleigh[6]에 의해 판구조물을 통한 음향 투과에 대한 기본적인 공식이 제안된 이후로 수많은 연구자들이 새로운 모델들을 제시하였고, 물리적인 이해를 바탕으로 새로운 소음 저감 기술들이 개발되어져 왔다. Cremer등[7]이 일치 (co-incidence)현상을 발견, 제안한 이후로 단일 판을 통한 소음 전달에

* 한국과학기술원 기계공학과 소음 및 진동 제어 연구센터

대한 일반적인 물리적 개념들이 제시 되어져 왔다. 각각의 판은 그 질량과 관성에 따른 임계 주파수 (critical frequency)를 가지고 있으며, 이는 음향 투과에 있어서 가장 중요한 요소로 인식되어 진다. 이를 바탕으로 다양한 구성의 판 구조물에 대한 차음성능 해석이 이루어져 왔다. 하지만, 일반적으로 위의 가정들은 실제로는 있을 수 없는 이상적인 조건이고, 따라서, 실제 측정이 이루어지는 물리적인 상황을 고려하기가 어렵다. 이러한 이유로 복잡한 구성의 적층판 뿐 만 아니라 단판의 경우에도 예측치가 실제 측정치와 정량적으로 일치하지 않게 된다. 이를 극복하기 위해 다양한 형태의 보정 이론이 제시되었는데, 가장 보편적인 방법은 입사 제한각 (limit angle, θ_{lim}) 개념[8]이라 할 수 있다. 이는 판에 입사되는 음파중에서 그 입사각이 일정한 제한각을 넘어서는 성분들은 판의 응답에 큰 기여를 하지 않는다는 주장으로 실제 음장의 비 확산성을 고려하고자 하는 이론이다. 제한각의 조절을 통해 비교적 만족할 만한 결과를 얻을 수 있지만, 연구자에 따라 θ_{lim} 의 값이 큰 편차를 보이고 있으며[9], 다중판에 있어서는 예측 결과가 θ_{lim} 값에 상당히 민감함이 보고되었다. 특히, 중공 이중판의 경우에는 'mass-spring-mass' 공진 현상으로 인해 제한각 이론이 적용되지 않게 된다. 이러한 공진 주파수는 다음과 같이 입사각 θ 에 대한 함수로 주어지는데,

$$f_{0,\theta} = \frac{1}{2\pi \cos\theta} \left(\frac{\rho_0 c_0^2 m_1 + m_2}{d m_1 m_2} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

여기서 ρ_0 , c_0 각각 공기의 밀도와 음속을 의미하고, d 는 공기층의 두께를 나타내며, $m_{1,2}$ 는 각 판의 면 밀도를 의미한다. 이때 입사각이 0인 경우, 즉, 수직 입사의 경우를 일반적으로 mass-spring-mass 공진이라 부르며, f_0 로 표현한다.

본 연구에서는 중공 이중판의 차음해석에 있어서 이러한 특정 주파수 성분에 의한 예측 이론상의 오류를 극복하고자 하는 개념들을 살펴 보고, 그 중 경계 손실 (boundary damping)이 차음특성 예측 결과에 미치는 영향을 고찰해 보고자 한다.

2. 중공 이중판의 차음 특성

중간층이 공기층인 중공 이중판에 있어서 입사

각 θ 의 입사 음압, p_i 에 대한 투과 음압, p_t 의 진폭비는 다음과 같이 구해진다. [9]

$$\frac{p_t}{p_i} = \frac{2j(\rho_0 c_0 \sec\theta)^2 \sin(kd \cos\theta)}{Z_{11} Z_{22} \sin^2(kd \cos\theta) + (\rho_0 c_0 \sec\theta)^2}. \quad (2)$$

여기서 k 는 파수를 의미하고, d 는 공기층의 두께를 나타낸다. Z_{11} 과 Z_{22} 는 각 판의 임피던스를 의미하며 다음과 같이 기계적 임피던스, $Z_{1,2}$ 로 주어진다[9].

$$Z_{1,2} = Z_{1,2} + \rho_0 c_0 \sec\theta [1 - j \cot(kd \cos\theta)]. \quad (3)$$

이로부터 평균 투과계수, τ 와 전달손실은 다음과 같이 정의된다.

$$\tau = \frac{\int_0^{\theta_{lim}} |p_t/p_i|^2 \cos\theta \sin\theta d\theta}{\int_0^{\theta_{lim}} \cos\theta \sin\theta d\theta}, \quad (4)$$

$$TL = -10 \log_{10}(\tau) \text{ (dB)}. \quad (5)$$

그림 2는 중공 이중판의 전달 손실의 예측치를 보여주고 있는데, 계산에 사용된 제한각에 따라 그 특성이 다름을 볼 수 있다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 mass-spring-mass 공진에 의한 영향으로 제한각을 사용함으로 해서 그 이상의 입사각으로 입사되는 음파에 의해 발생하는 공진이 인위적으로 제거됨으로 해서 서로 다른 특성을 보이게 된다. 그림 3은 입사각에 따른 전달 손실의 변화를 나타내고 있는데, 식 (1)로 주어지는 공진 주파수에서 dip이 발생함을 볼 수 있다. 이를 극복하고자 Kang 등 [10]은 입사 음파에 대한 방향성 가중함수를 도입하여 입사 음장의 비 잔향성을 설명하였고, 하지만, 여전히 mass-spring-mass 공진 주파수 영역에서는 실제 측정치와 차이를 나타내고 있다. 이는 이중판의 차음 해석시 mass-spring-mass 공진주파수에서는 그림 3과 같이 이론적으로 차음성능은 0이 되지만, 실제 측정치에서는 감쇠의 영향으로 일정한 값을 갖기 때문이다. 이러한 감쇠의 영향으로는 공기층에서의 흡음과 함께 유한한 시편 경계면에서의 감쇠효과가 있는데, 특히, 유한한 시편에 의해 판의 감쇠계수가 변하게 되고, 이에 따른 차음성능의 변화는 이미 실험적으로 고찰된 바 있다. 이에 대해 Utley와 Fletcher[5]는 경계 손실 (boundary damping) 개념을 도입하여 판의 손실 계수를 내부 손실과 함께 경계 조건에 따른 부가적인 손실을 고려한 총 손실 계수 (total loss factor)로 하여 판의 차음성

능을 해석하였다. 이때 각각의 경계 조건, 혹은 시편마다 총 손실 계수를 실험적으로 구해야 하는 어려움이 따르고, 이에 대해 Kang등[10]은 다음과 같은 유효질량, m' 을 제시하였다.

$$m' = m(1 - j\eta_b). \quad (6)$$

여기서 m 은 각 판의 면밀도를 의미하고, η_b 는 경계 손실을 나타내는데 주파수에 대한 함수로 주어진다. 일반적으로 부가적인 감쇠항은 강성 (stiffness) 항에 포함되어 총 손실 계수 (total loss factor)로 나타내어지는 것이 일반적이지만, 차음이 이루어지는 과정이 주로 구조물의 질량에 의해 지배되기 때문에 위와 같은 유효질량의 개념이 보다 물리적이라 할 수 있다. Kang등[10]은 실제 장착된 시편에 대해 측정된 총 감쇠 계수의 주파수 특성[11]을 근거로 다음과 같은 주파수 함수를 가정하였다.

$$\eta_b = \eta_0 \sqrt{f_0/f}. \quad (7)$$

여기서 η_0 는 경계손실의 손실계수를 의미하고, f_0 는 식 (1)에서 주어지는 mass-spring-mass 공진 주파수에서 입사각이 0일 때를 나타낸다. η_0 의 값은 일반적으로 10^{-1} 이상의 값으로 가정되는데, 이는 실제 시편의 총 손실 계수는 내부 손실 계수 (internal loss factor)보다 매우 큰 값을 갖기 때문이다. 그림 4는 η_0 의 값에 따른 전달 손실 예측치와 측정치를 비교한 것인데, 값이 커질수록 실제 측정치에 보다 근접함을 볼 수 있다. 이는 실제 장착된 시편은 유한한 경계에 의해 비교적 많은 양의 에너지가 손실되고 있음을 의미하고, 전체적으로는 유효한 질량이 증가한 것과 같은 결과를 나타낸다. 즉, 일반적인 무한판 이론에 의한 예측치는 차음성능을 과소평가 하게 됨을 의미하고, 별도의 보정항이 추가 되어야만 실제 측정치와 근사한 결과를 얻을 수 있음을 말한다. 하지만, 식 (7)에서 주어진 주파수 특성은 비록 실제 측정치의 특성을 근거로 하였다고는 하나 임의의 함수일 뿐 물리적, 혹은 해석적으로 검증된 것은 아니다. 또한, 가정된 η_0 의 값이 일반적인 총 손실 계수의 크기인 10^{-2} 보다 매우 커야만 만족할 만한 결과가 나오는 것을 고려하면 유효 질량 개념의 물리적 타당성을 찾기는 어렵다. 하지만, 이미 보고된 바[4,5,10,11]와 같이 이러한 보정항이 없을 경우에는 그림 2와 같이 전혀 다른 값이 예측되기 때문에 기술된 방법 혹은 그 외의

다른 개념의 보정법에 대한 연구가 필요하다.

3. 결론

본 연구에서는 중공 이중판의 차음성능 예측 시 발생하는 측정치와의 오차를 줄이기 위한 몇가지 보정항에 대해 알아보았다. 특히, 판의 유한한 경계에 의해 발생하는 부가적인 에너지 손실을 고려하기 위한 경계 손실 개념을 살펴보고, 그에 따른 예측치의 변화를 알아보았다. 측정치와의 비교 결과를 통해 일반적인 무한판 이론에 의한 예측치는 실제 차음성능을 과소평가하고 있음을 보였고, 중공 이중판의 차음해석에 보정항이 반드시 포함되어야 함을 알 수 있었다. 비록 계수를 정하는데 있어서 약간의 임의성이 포함되지만, 적절한 가정을 통해 정량적인 특성을 측정치와 근사하게 예측할 수 있었으며, 경계 손실 개념을 이용하여 중공 이중판의 주요한 특성인 mass-spring-mass 공진 현상을 적절히 고려할 수 있음을 확인하였다.

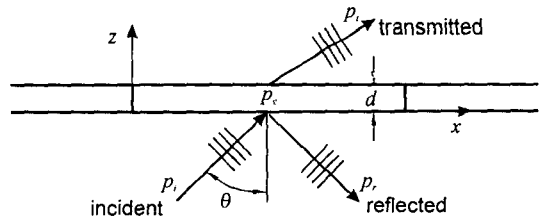


Fig. 1. Schematic diagram of a rectangular double partition with a small air gap in an infinite rigid baffle.

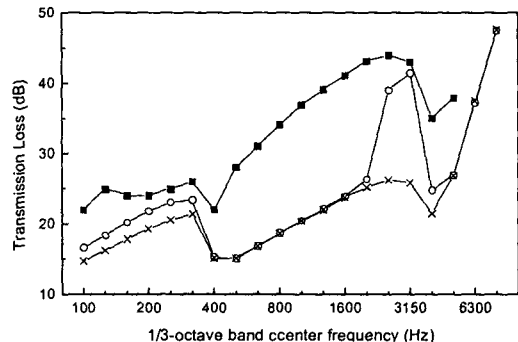


Fig. 2. A comparison between measured and predicted STL for two double-glazed glass windows composed of glass (3 mm), air gap (6 mm), and glass (3 mm). —■—, measured[11]; —○—, $\theta_{lim} = 78^\circ$; —×—, $\theta_{lim} = 90^\circ$.

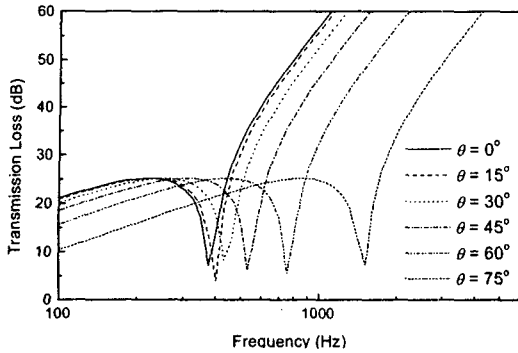


Fig. 3. Change of STL with varying the incidence angle.

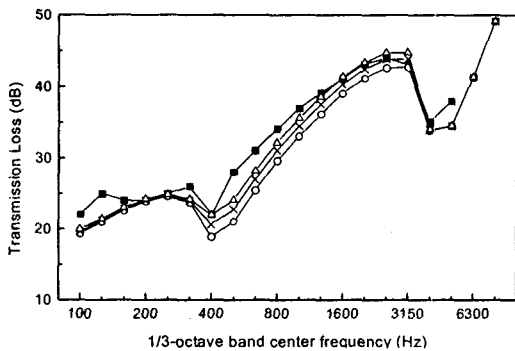


Fig. 4. Change of predicted STL of double panels with varying the boundary loss factor, η_b : \blacksquare , measured[11]; \circ , $\eta_b = 0.1$; \times , $\eta_b = 0.15$; \triangle , $\eta_b = 0.2$.

후 기

본 연구는 NRL 및 BK21 Project의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] Anon., "Laboratory measurement of airborne sound insulation of building elements," ISO 140 (1997).
- [2] Anon., "Standard recommended practice for laboratory measurement of airborne sound transmission loss of building partitions," ASTM E90-97 (1997).
- [3] T. Kihlman and A. C. Nilsson, "The effects of some laboratory designs and mounting conditions on reduction index measurements," J. Sound Vib. **24**(3), 349 - 364 (1972).
- [4] W. A. Utley and G. C. Smith, "The accuracy of

laboratory measurements of transmission loss," J. Sound Vib. **16**(4), 643 - 644 (1971).

[5] W. A. Utley and B. L. Fletcher, "Influence of edge conditions on the sound insulation of windows," Appl. Acoust. **2**, 131 - 136 (1969).

[6] J. W. S. Rayleigh, *The Theory of Sound* vol. II (Dover publication, New York, 1945), Sec. 271.

[7] L. Cremer and M. Heckl, *Structure-borne sound: structural vibrations and sound radiation at audio frequencies*, 2nd ed. (Springer-Verlag, New York, 1988), Sec. 4.4(c)

[8] K. A. Mulholland, H. D. Parbrook, and A. Cummings, "The transmission loss of double panels," J. Sound Vib. **6**(3), 324 - 334 (1967).

[9] F. Fahy, *Sound and Structural Vibration: Radiation, Transmission and Response* (Academic Press, New York, 1985), Sec. 3.4.

[10] H.-J. Kang, J.-G. Ih, J.-S. Kim, and H.-S. Kim, "Prediction of sound transmission loss through multilayered panels by using Gaussian distribution of directional incident energy," J. Acoust. Soc. Am. **107**, 1413-1420 (2000).

[11] J. D. Quirt, "Sound transmission through windows II. Double and triple glazing," J. Acoust. Soc. Am. **74**, 534-542 (1983).