

차음성능 예측시 터널링 효과에 관한 해석적 연구

⁰ 김봉기*, 김재승*, 김현실*, 강현주*, 김상렬*

Tunneling Effect on Sound Transmission Loss Measurement

Bong-Ki Kim, Jae-Seung Kim, Hyun-Sil Kim, Hyun-Ju Kang, and Sang-Ryul Kim

ABSTRACT

This study is aimed to evaluate a tunneling effect in association with the measurement of sound transmission loss. Based on the formulation for sound transmission loss of a finite panel in the presence of tunnel, variations of the sound transmission loss with parameters such as the location of panel and tunnel depth are investigated. It can be seen that differences in the sound transmission loss are quite evident below coincidence frequency and the sound transmission loss greatly depends on panel location in the tunnel. In comparison with the case without a tunnel, maximum difference occurs in the case where the panel is placed on the center of the tunnel and the flushing with the end of the tunnel gives the better estimation of transmission loss.

1. 서 론

일반적으로 판넬의 차음성능은 Fig.1 과 같이 공통벽을 갖는 두개의 잔향실에서 측정된 차음손실(Transmission Loss)로 표현된다. 지금까지 판넬의 차음성능 향상 및 설계변수도출을 위해 잔향실의 차음손실 측정결과를 예측할 수 있는 이론적 모델을 개발하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다.[1-2] 그러나, 잔향실의 소음분포특성, 시편의 크기와 경계

조건, 공통벽의 두께와 시편의 위치, 음원의 위치 등에 따라, 서로 다른 잔향실 간의 재현성(Reproducibility)문제가 발생하고 있으며 이를 이론적 모델에서 충분히 반영하지 못한다면 시험과 이론 예측사이에는 큰 오차가 존재한다. 지금까지 시험실 간의 재현성 문제를 규명하기 위한 많은 round robin 시험이 이루어졌으며[3,4], 결과로부터 최소한 STC (Sound transmission class)로 3dB 이상 차이가 있음을 알 수 있다. 특히, 시험실 간의 편차를 발생시키는 가장 중요한 원인 중에 하

* 한국기계연구원 음향연구그룹

나는 시편설치를 위한 개구부(Open aperture)에 의해 형성된 시편 전후의 터널이라는 것이 실험적으로 입증되었다.[5,6] 즉, 서로 다른 시험실간에는 공통벽의 두께가 다르고, 시편설치를 공통벽에 의해 형성된 터널의 어느 위치에 설치하는가에 따라 동일한 판넬이라도 차음성능이 큰 차이를 갖는다. 그러나, 비록 실험적으로 그 영향이 입증되었지만, 다른 많은 실험적 변수로 인해 정확하게 터널링 효과만을 산출하는 것은 불가능하였다.

본 연구에서는 차음성능 측정시 발생하는 터널링 효과를 분석하고, 터널이 존재할 때 어느 위치에 시편을 설치하고 측정하는 것이 서로 다른 잔향실 간의 재현성을 유지하며, 이론적 모델과 일관성을 보여주는지에 관한 고찰을 목적으로 판넬 전후로 터널이 존재하는 유한판 해석을 시도하고 터널의 깊이와 판넬 위치에 따른 차음성능 변화를 예측하였다.

2. 터널을 고려한 유한판의 차음성능

그림 2로부터 각 영역의 음장은 다음과 같이 표현할 수 있다.

Region I

$$p_I^i(x, y) = e^{ik \cos \theta (x+l_1) + ik \sin \theta y}, \quad (1a)$$

$$p_I^r(x, y) = e^{-ik \cos \theta (x+l_1) + ik \sin \theta y}, \quad (1b)$$

$$p_I^s(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{p}_I^s(\zeta) e^{i\zeta y - ik_x \zeta (x+l_1)} d\zeta. \quad (1c)$$

Region II, III

$$p_{II}(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} (A_n e^{ik_{xn}x} + B_n e^{-ik_{xn}x}) \cos(a_n y), \quad ,$$

$$\text{when } -l_1 \leq x \leq 0 \text{ and } 0 \leq y \leq h, \quad (2a)$$

$$p_{III}(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} (C_n e^{ik_{xn}x} + D_n e^{-ik_{xn}x}) \cos(a_n y), \quad ,$$

$$\text{when } 0 \leq x \leq l_2 \text{ and } 0 \leq y \leq h. \quad (2a)$$

Region IV

$$p_{IV}^i(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{p}_{IV}^i(\zeta) e^{i\zeta y + ik_x \zeta (x-l_2)} d\zeta. \quad (3)$$

한편, 평판의 양 끝단이 단순지지 되어있다고 가정하면, 평판의 변위는 다음과 같다.

$$u(y) = \sum_{m=1}^{\infty} E_m \sin(a_m y), \text{ where } a_m = \frac{m\pi}{h}. \quad (4)$$

따라서, 터널 양쪽의 음장에 의해 가진되는 판넬의 진동변위는 다음과 같다.

$$\rho_s \sum_{m=1}^{\infty} (\omega_m^2 - \omega^2) E_m \sin(a_m y) = \sum_{n=0}^{\infty} (A_n + B_n - C_n - D_n) \cos(a_n y). \quad (5)$$

여기서 $\omega_m = \sqrt{D/\rho_s} a_m^2$ 이며, $D, \rho_s, E, \eta, t, \nu$ 는 각각 bending stiffness, 면밀도, Young's modulus, loss factor, 두께, Poisson's ratio 를 의미한다. 각각의 경계면에서의 음압과 입자 속도에 대한 경계조건을 적용하면 입력음향 파워와 투과된 음향파워를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Pi_i = \frac{h}{2\rho c} \cos \theta, \quad (6a)$$

$$\Pi_t = \frac{h}{2\rho\omega} \operatorname{Re} \left[\sum_{n=0}^L \varepsilon_n k_{xn}^* (C_n + D_n)(C_n - D_n)^* \right]. \quad (6b)$$

따라서 전달손실은 $\tau(\theta) = \Pi_t / \Pi_i$ 이므로, 음파의 입사각도에 따른 평균투과손실은 다음

과 같다.

$$TL = 20 \log_{10}(1/\tau_{avg}). \quad (7)$$

여기서,

$$\tau_{avg} = \int_0^{\theta_{lim}} \tau(\theta) \cos \theta d\theta / \int_0^{\theta_{lim}} \cos \theta d\theta \quad (8)$$

이며, θ_{lim} 는 78° 이다.

3. 터널링 효과

본 연구에서는 유한판 해석에 많이 사용되고 있는 9.2mm 두께의 유리판에 대한 해석을 수행하였다.[7] 유리판의 물성은 $\rho t=23 \text{ kg/m}^2$, $\eta=0.002$, $\nu=0.23$ 이며, 높이는 2.4m 이다. 터널링 효과를 고찰하기 위하여 판넬 전후의 터널깊이가(l_1, l_2)가 각각 (0, 0), (0.3, 0.3), (0, 0.6), (0.2, 0.4)m 인 경우에 대한 1/3 octave band 해석을 수행하였다. 그림 3 으로부터 터널이 없는 경우 무한판(infinite plate) 이론과 유사한 해석결과를 보여주고 있고, 일치주파수(Coincidence frequency) 이상에서는 터널 유무에 관계없이 차음성능이 일정함을 알 수 있다. 또한 터널이 없을 때에 비하여 터널이 존재하는 모든 경우 차음손실이 낮게 예측됨을 알 수 있다. 특히, 판넬이 터널의 중심에 위치하는, (l_1, l_2)=(0.3, 0.3)m 인 경우 가장 낮은 차음성능을 보이고 있다. 이러한 결과는 Halliwell[8], Guy[9], Warnock[10]의 시험에서 관찰된 현상과 동일하다.

한편, 판넬의 터널 내 위치에 따른 차음성능 변화를 관찰하기 위하여 그림 4 와 같이

터널 깊이가 0.6m 인 경우에 대하여 판넬의 위치를 이동시키며 터널이 없을 때의 차음손실에 대한 차음성능 변화를 예측하였다. 이때 일치주파수 이하의 1/3octave band 주파수만을 고려하였다. 결과로부터 대부분의 주파수에서 판넬이 터널의 중심에 위치할 경우 가장 낮게 차음손실을 예측함을 알 수 있으며 상대적으로 터널의 양끝 가장자리에 판넬이 있을 경우 터널링 효과에 의한 차음손실 왜곡이 가장 작다.

터널 폭에 따른 차음성능 변화를 관찰하기 위하여 터널 중앙에 판넬이 있을 경우 터널 폭에 따른 차음성능 변화를 그림 5 에 예측하였다. 터널의 폭이 넓어질수록 차음손실이 점점 낮게 예측되며 주파수에 따라 3~7dB 의 변화를 보이고 있음을 알 수 있다. 판넬이 터널의 한 끝에 위치한 그림 6 의 경우는 1~4dB 의 차음손실 변화가 예측되며 중앙에 사편이 있는 경우보다 2~3dB 의 작은 변화폭을 갖고 있다. 따라서, 서로 다른 터널폭을 갖는 잔향실간의 재현성을 줄이기 위해서는 터널의 양 끝에 판넬을 설치하는 것이 바람직하며, 또한 차음성능 예측을 위한 기존의 무한판 해석 이론과 비교할 때 보다 근접된 결과를 얻을 수 있다.

5. 결론

터널을 고려한 유한판의 차음성능을 예측하였다. 해석결과로부터 터널이 존재하면 판

넬의 차음성능이 낮게 예측되며, 기존의 시험 결과와도 정성적으로 일치하고 있음을 알 수 있었다. 특히 판넬이 터널의 중앙에 위치한 경우 차음성능이 가장 낮게 예측되며, 서로 다른 터널 폭을 갖는 잔향실 간의 시험 재현성을 위해서는 판넬을 터널의 양끝단에 설치하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] J. R. Callister, A. R. George, G. E. Freeman, "An empirical scheme to predict the sound transmission loss of single-thickness panels," *J. Sound Vib.* **222**, 145-151 (1999).

[2] 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).

[3] ISO 140-2:1991 "Acoustics-Measurement of sound insulation in buildings and building elements-Part 2: Determination, verification and application of precision data".

[4] B. Rasmussen, "Repeatability and reproducibility of sound insulation measurements," Danish Acoustical Institute Technical report 118 (1984).

[5] T. Kihlman and A. C. Nilsson, "The effects of some laboratory designs and mounting conditions on reduction index measurements," *J. Sound Vib.* **24**, 349-364 (1972).

[6] R. E. Jones, "Inter-comparisons of laboratory determinations of airborne sound transmission loss," *J. Acoust. Soc. Am.* **66**, 148-164 (1979).

[7] E. C. Sewell, "Transmission of reverberant

sound through a single-leaf partition surrounded by an infinite rigid baffle," *J. Sound Vib.* **12**, 21-32 (1970).

[8] R. E. Halliwell and A. C. C. Warnock, "Sound transmission loss: Comparison of conventional techniques with sound intensity techniques," *J. Acoust. Soc. Am.* **77**, 2094-2103 (1985).

[9] R. W. Guy and P. Sauer, "The influence of sills and reveals on sound transmission loss," *Appl. Acoust.* **17**, 453-476 (1984).

[10] A. C. C. Warnock, "Influence of specimen frame on sound transmission loss measurement," *Appl. Acoust.* **15**, 307-314 (1982).

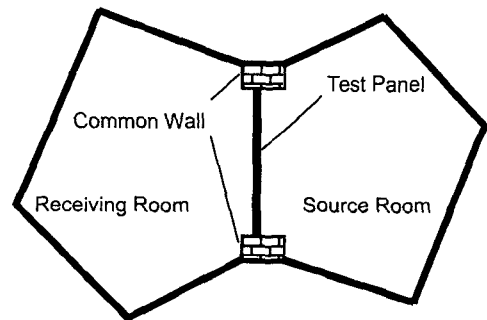


Fig. 1. Schematic representation of two reverberation chambers and test panel in an aperture between common walls.

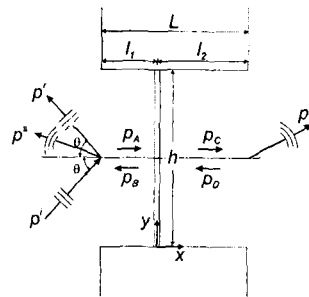


Fig.2. Geometrical model for calculating sound transmission loss and acoustic field generated by plane wave incidence with angle θ .

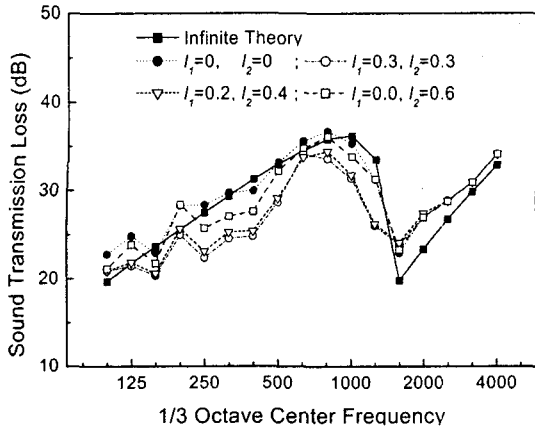


Fig. 3. Transmission loss for a glass panel of 2.4m-height between the cases without tunnel and with tunnel.

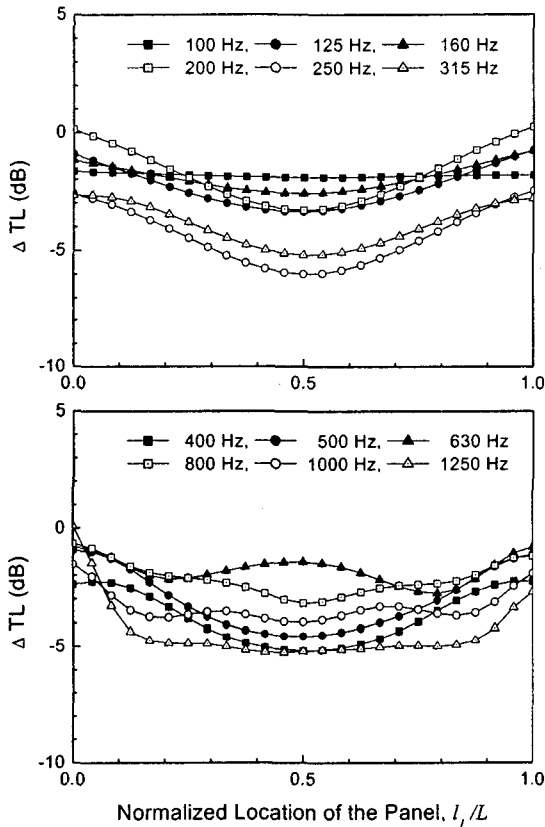


Fig. 4. Transmission loss change along the position of a glass panel of 2.4m-height in the tunnel of 0.6 m-depth.

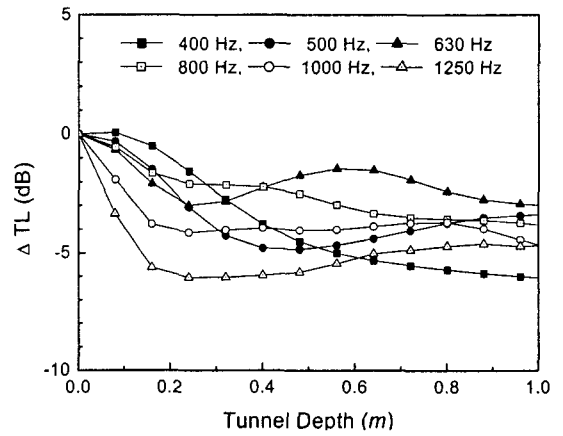
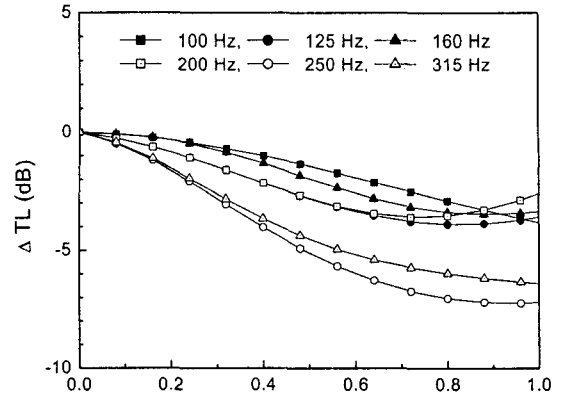


Fig. 5. Transmission loss change of a glass panel of 2.4m-height as increasing the tunnel depth when the panel is located at the center of tunnel.

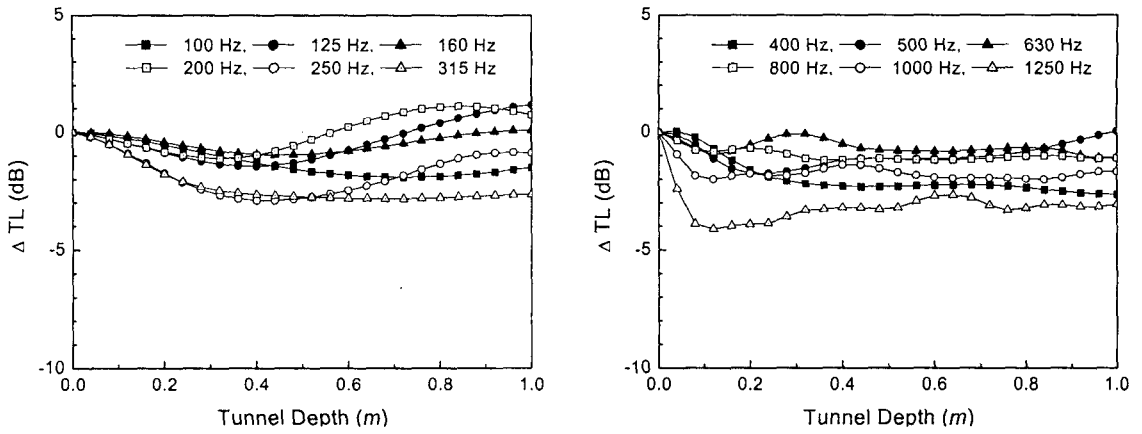


Fig. 6. Transmission loss change of a glass panel of 2.4m-height as increasing the tunnel depth in the case that the panel is flushed with the end of tunnel.