

## 철도 방음벽의 전면 타공과 흡음재에 의한 흡음성능 고찰

### Investigation of Sound Absorbing Characteristics of the Railway Noise Barrier by Changing the Configuration of the Front Perforated Panel and Absorbing Material

김관주\* · 김상헌\* · 박진규\*

Kwanju Kim, Sanghun Kim, Jinkyu Park

**Key Words** : Noise Barrier(방음벽), Absorption coefficient(흡음률), Perforated panel(타공판)

#### ABSTRACT

This study focused on the identification of sound characteristics according to the configuration of sound absorption material and perforated panel dimensions. Noise barriers consist of front perforated panel, sound absorption material and back plate. Noise barriers' acoustic performance should be required to meet the NRC of 0.7. The absorbing performance of the noise barrier relies on the opening ratio of perforated panel and the efficiency of the absorbing material. This study try to find out the possibilities of applications to railway usage.

#### 1. 서 론

국내 철도의 철도변 거주인구는 약 450만명 수준으로 국내철도변의 인구는 수도권 전철 및 철로 주변에 밀집되어 있다. 특히 고속철도 노선의 소음문제는 심각하게 나타나고 있다. 철도 소음은 단위길 이당 소음피해 노출인구가 가장 높은 발생원으로서, 철도소음 60 dB(A) 초과인구를 살펴보면 낮에는 110만명(철도변 인구의 1/4 수준), 야간에는 174만명(철도변 인구의 1/3 수준)으로 많은 인구가 철도 소음에 노출되어 있다. 이러한 소음 피해로 인해 철도 운행속도가 제한되는 등의 사례가 속출되고 있어 향후 철도 방음벽의 도입 등을 통한 방음대책 시행 시에 수혜인구가 높을 것으로 예상된다. [1]

철도 소음의 발생 원인을 살펴보면 철도에서 발

생되는 주요 소음원은 차륜과 레일사이에서 발생하는 전동소음과 차체에서 발생하는 구동장치소음, 높은 운행속도로 인한 차체와 집전장치의 공력소음 및 구조물과 지반을 통하여 전달되는 저주파 소음이 있다. 이 밖에도 팬터그래프와 전차선사이의 집전소음이 있다.

철도차량에 의한 소음원을 상세히 살펴보면 차륜과 레일의 접촉에서 발생하는 전동 소음, 열차에 전력을 공급하는 팬터그래프 시스템에서 발생하는 집전소음, 주행하는 열차의 표면에서 공기역학적 매커니즘에 의해 발생하는 공력소음, 추진장치와 냉방장치 등 보조장치에 의한 보조장치소음, 차량 주행에 따른 진동이 구조물에 전달되어 발생하는 구조물 소음 등으로 구분된다.

이러한 철도소음을 저감하기 위하여 EU에서는 미래소음정책에 관하여 녹색헌장을 선정하여 철도소음에 관한 법률 제정 연구를 수행하고 있으며, ERRI는 특별히 소음진동문제만 취급하는 연구단위를 조직하고 전동음, 혁신적인 연구, 측정기준 등 3가지 중요분야에서 과제를 도출하였다. 국내에서는 철도차량에서 발생하는 소음원의 크기를 제한하는

† 교신저자: 김관주, 홍익대학교  
E-mail : kwanju@hongik.ac.kr  
Tel : 02-320-1643 , Fax : 02-322-7003  
\* 한국산업기술시험원

“철도차량의 소음권고기준 및 검사방법” 규정 시행하고 있다.

본 연구에서는 철도 소음을 저감하기 위하여 소음 발생 전달 경로를 차단함으로써 발생하는 소음이 차단될 수 있는 방음벽에 의한 소음 차단 효과를 높이기 위하여 철도에 적용되는 흡음형 방음벽의 전면부와 내부의 흡음재에 대한 음향학적 성능을 확인하고 향후 철도 방음벽을 설계하는데 활용할 수 있도록 하였다.

## 2. 방음벽의 성능 요구조건

국내의 방음벽은 철도 방음벽만을 대상으로 하는 시험규격이 존재하지는 않는다. 지금까지는 일반 방음벽의 기준을 따랐으며, 철도 방음벽의 시험평가를 위한 규격 연구는 현재 진행 중이다. 국내의 철도 방음벽은 환경부에서 고시한 ‘방음시설의 성능 및 설치기준’, 서울특별시 제정된 ‘방음벽 시방 및 성능기준’으로 방음벽을 설치하기 위한 전반적인 지침을 나타내고 있으며, 도로분야는 국토해양부가 고시한 ‘도로공사 표준 시방서’와 한국도로공사가 제시하는 ‘고속도로공사 전문시방서’를 적용하고 있다. KS F 4770 규격에서는 금속재 방음판, 금속재 칼라 방음판, 목재 방음판, 비금속재 칼라 방음판으로 방음벽을 4가지로 구분하여 적용하고 있다.

Table 1 transmission loss and absorption coefficient of the noise barrier

items	performance	standard
Transmission loss	Mean absorption coefficient 70% above (250Hz, 500Hz, 1,000Hz, 2,000Hz)	
Absorption coefficient	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Absorption Coefficient 0.85 or more : 1 class</li> <li>- Absorption Coefficient 0.80 or more 0.80 under : 2 class</li> <li>- Absorption Coefficient 0.75 or more 0.80 under : 3 class</li> <li>- Absorption coefficient 0.70 or more 0.75 under : 4 class</li> </ul>	KS F 2805 KS F 4770-1 KS F 4770-2 KS F 4770-3 KS F 4770-4

방음벽의 성능을 평가할 때에는 비음향학적 성능과 음향학적 성능으로 나누어서 평가하는데 대표적인 음향학적 성능은 투과손실과 흡음률로서 국내 방음벽은 KS 규격의 성능을 따르고 있다. KS 규격에서 나타내는 투과손실과 흡음성능은 Table 1과 같다. 현재 철도에 적용된 대부분의 방음벽도 투과손실과 흡음률은 모두 Table 1에 의한 성능을 따르고 있다.

## 3. 방음벽 내부에 적용되는 흡음재의 흡음 효과

흡음재의 흡음성능은 대표적으로 임피던스 튜브를 사용하여 수직음에 대하여 흡음률을 평가하는 방법과 잔향실에서 난반사음에 대해서 흡음률을 평가하는 방법으로 나뉜다. 본 연구에서는 일반적으로 방음벽에 적용되는 흡음재의 흡음성능을 임피던스 튜브에 의한 수직입사음에 대하여 비교하고자 한다.

### 3.1 임피던스 튜브를 사용한 흡음률 측정

두 개의 마이크로폰을 이용한 흡음률 측정은 튜브의 한 쪽 끝에 스피커로 white noise를 발생시키고 반대편에 측정하고자 하는 시편을 설치한다. 실험 방법은 ISO 10534-2[2]을 따라 수행하였다. 임피던스 튜브 안의 마이크로폰 1번, 2번 위치에서의 음압을 각각  $p_1$ ,  $p_2$ 라 할 때,  $p_1$ ,  $p_2$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_1 = (Ae^{-jkx_1} + Be^{-jkx_1})e^{j\omega t} \quad (1)$$

$$p_2 = (Ae^{-jkx_2} + Be^{-jkx_2})e^{j\omega t} \quad (2)$$

여기서 A, B는 입사파, 반사파의 크기,  $x_1$ ,  $x_2$ 는 마이크로폰 1번, 2번의 위치를 말한다.

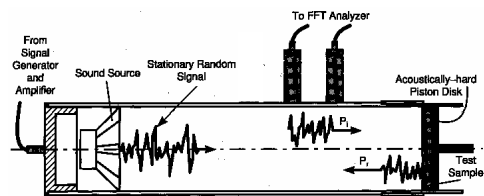


Figure 1 The impedance tube configuration with 2 microphones

$p_1$ 과  $p_2$ 사이의 관계를 전달함수  $H_{21}$ 으로 정의하고 이로부터 입사파의 크기 A와 반사파의 크기 B의 비를 계산할 수 있다.

$$H_{21} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{Ae^{-jkx_2} + Be^{jkx_2}}{Ae^{-jkx_1} + Be^{jkx_1}} \quad (3)$$

전달함수( $H_{21}$ )로부터 반사 계수(R)는

$$R = \frac{H_{21}e^{-jkx_1} - e^{-jkx_2}}{e^{jkx_2} - H_{21}e^{jkx_1}} \quad (4)$$

흡음률( $\alpha$ )과 임피던스(Z)는 다음과 같다.

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (5)$$

$$\frac{Z}{\rho c} = \frac{1 + R}{1 - R} \quad (6)$$

각 마이크로폰의 위상 불일치로 인하여 측정된 전달함수는 오차를 갖게 된다. 두 마이크로폰의 위치를 바꾸어서 다른 전달함수를 구하고, 두 개의 전달함수로부터 보정 값을 얻어내서 결과를 얻어야 한다. 두 마이크로폰에서 나온 전달 함수의 결과를 갖고 보정하는 식은 다음과 같다.

$$H_{21} = (H_{21}^O \cdot H_{21}^S)^{1/2} \quad (7)$$

여기서  $H_{21}^O$ 은 원래의 마이크로폰으로 구한 전달 함수이고  $H_{21}^S$ 은 두 마이크로폰의 위치를 바꾸어서 얻어진 전달함수 이다. 식 (7)에서 얻어진 전달 함수를 식 (4)에 적용하여 흡음률을 측정한다.

### 3.2 흡음재의 흡음률 예측

Delany-Bazley는 공극률이 1에 가까운 많은 섬유 재료의 전파 상수와 특성 임피던스를 측정하여 이로부터 이들 인자가 주파수와 재료의 유동 비저항의 함수로 표현될 수 있음을 밝혀냈다. 이로부터 다음과 같은 경험식을 개발하였다.[3]

$$Z_c = \rho c (1 + 0.0571X^{-0.754} - j0.087X^{-0.732}) \quad (8)$$

$$k = \frac{\omega}{c} (1 + 0.0978X^{-0.700} - j0.189X^{-0.595}) \quad (9)$$

여기서  $Z_c$ 는 특성 임피던스이고  $k$ 는 음파 정수,  $\rho$ 는 공기의 밀도,  $w$ 는 각 가속도,  $c$ 는 공기 중의 음속이 된다. 여기서  $X$ 는 무차원 매개 변수로서 다 음과 같이 정의된다.

$$X = \frac{\rho f}{\sigma} \quad (10)$$

$f$ 는 주파수이고  $\sigma$ 가 실험에서 구한 시편의 유동 저항이 된다. 단 Delany-Bazley의 실험식[2]을 사용하기 위해서는  $X$ 의 값이 0.01에서 1 사이에서만 가능하다. 따라서 공기의 밀도가 1.213 kg/m<sup>3</sup>이고 만약에 측정 주파수의 범위가 400 Hz에서 4,500 Hz일 경우 유동저항의 값은 5,459 MKS Rayls에서 48,520 MKS Rayls 사이에 있어야 위의 식을 이용할 수 있다. 특성 임피던스를 구하고 나면 강제벽에 위치한 시편의 경우 다음 식을 이용해서 시편의 표면 임피던스를 구할 수 있다.

$$Z = -jZ_c \cot(k \cdot d) \quad (11)$$

식 (11)의 임피던스 식을 식 (5), 식 (6)에 적용하여 흡음률을 예측하게 된다.

### 3.3 방음벽 적용 흡음재의 흡음률 비교

근래에는 방음벽에 적용되는 흡음재는 합성수지 계열의 흡음재를 많이 적용하고 있다. 본 연구에서도 Table 2, Tabel 3과 같이 합성수지 계열의 흡음재와 가장 흔히 사용되는 PU foam에 대해서 흡음 성능을 예측, 측정하여 비교하였다.

Table 2 Figures of tested absorbing materials

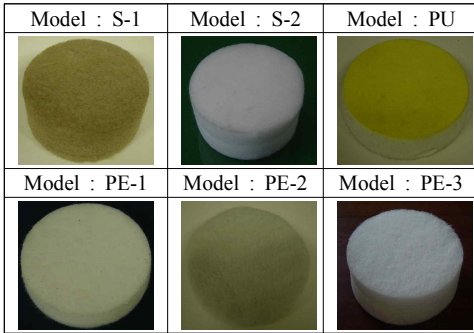


Table 3 Properties of the tested absorbing materials

Model	Material	Thick-ness (mm)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Flow resistivity (Rayls/m)	Porosity
S-1	polyester	40	42.97	4,223	0.9927
S-2	polyester	60	42.97	4,223	0.9927
PU	poly urethan	30	74.1	11,503	0.9752
PE-1	poly ethylene	40	64.06	12,400	0.9907
PE-2	poly ethylene	40	64.78	5,420	0.9812
PE-3	poly ethylene	40	42.81	5,058	0.9909

6개 흡음재에 대한 흡음률 예측과 측정결과는 Figure 2 ~ Figure 7에 나타내었다. 대부분의 흡음 성능 측정 결과 측정대역 전체 평균을 살펴보면 5% 이내의 흡음성능을 가져서 이론과 실험결과가 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다.

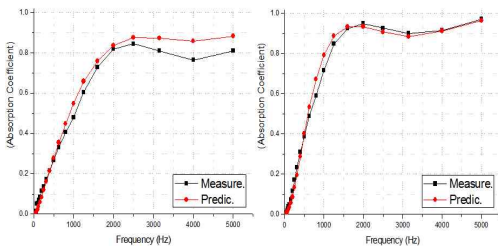


Figure 2 Comparison on performance of S-1      Figure 3 Comparison on performance of S-2

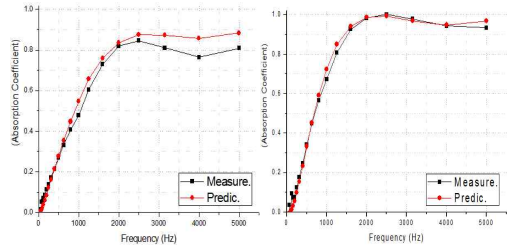


Figure 4 Comparison on performance of PU      Figure 5 Comparison on performance of PE-1

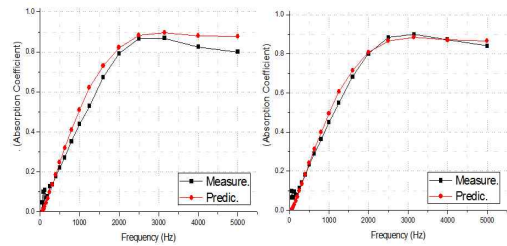


Figure 6 Comparison on performance of PE-2      Figure 7 Comparison on performance of PE-3

일반적으로 방음벽에 적용하는 흡음재는 60 mm 정도를 적용하므로 비교대상인 6개 흡음재를 60 mm로 가정하였을 때에 흡음성능은 Figure 8과 같이 예측된다.

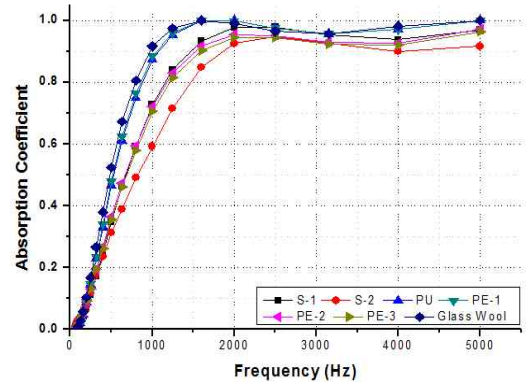


Figure 8 Comparison of prediction result

60 mm의 두께를 갖는 흡음재로서 비교 결과 250 Hz ~ 2,000 Hz 대역의 평균 흡음률은 기존 방음벽에 많이 사용하던 유리섬유가 가장 높게 나왔으며, 다른 흡음재는 0.02 ~ 0.11 낮은 흡음성능을 보이고 있다.

#### 4. 철도 흡음형 방음벽으로 적용을 위한 전면부 타공과 내부 흡음재의 구성

흡음형 방음벽은 일반적으로 전면부에 타공부를 갖고 내부에 흡음재를 적용하여 구성된다. 소음원으로부터 발생된 음이 흡음재에 바로 전달되는 것이 아닌 전면 타공부에 먼저 도달한 이후에 방음벽의 내부 구성에 따라서 공기층, 흡음재 등과 조합되어 흡음성능을 발휘하게 된다. 본 장에서는 흡음형 방음벽 전면부에 타공부가 구성된 경우 타공부의 음향학적 성능과 흡음재와의 조합에 의한 흡음성능을 확인하고자 한다.

##### 4.1 타공판의 임피던스

타공판에서는 x축과 z축에서의 2차원 평면계로 나타내면 그림 2와 같으며 입사음을  $p_i$ , 반사음을  $p_r$ , 투과음을  $p_t$ 라 하면 식 (12) 및 식 (13)으로 나타낼 수 있다. [4]

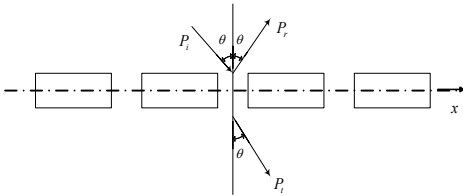


Figure 9 Reflection and Transmission of sound through perforated panel

$$p_a(x, z, t) = p_i e^{j(\omega t - k_x x - k_z z)} + p_r e^{j(\omega t - k_x x + k_z z)} \quad (12)$$

$$p_b(x, z, t) = p_t e^{j(\omega t - k_x x - k_z z)} \quad (13)$$

여기서  $p_a$ 와  $p_b$ 는 타공판 전,후의 입사음과 투과음에 음압을 나타낸다. 타공판 전,후의 입자속도는 식 (14), 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$u_{az} = \frac{\cos\theta}{\rho c} [p_i e^{-j(k_x x + k_z z)} - p_r e^{-j(k_x x - k_z z)}] e^{j\omega t} \quad (14)$$

$$u_{bz} = \frac{\cos\theta}{\rho c} p_t e^{-j(k_x x + k_z z)} e^{j\omega t} \quad (15)$$

Figure 10은 타공판의 형상을 나타내는데 여기서

$r_0$ 는 타공구멍의 반지름,  $S$ 는 타공판의 전체 면적,  $S_p$ 는 타공된 면적을 나타낸다.

전체 면적대비 개구율은 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Omega_s = \frac{S_p}{S} \quad (16)$$

위 식을 통해 타공된 곳에서의 운동방정식을 적용하여 타공판의 임피던스 식을 유도하면 식 (17)과 같다.

$$Z_m = j\omega \rho h' S \quad (17)$$

식 (17)에서  $h'$ 는 타공판의 효과두께로 보정값과 실제 두께의 합으로 구성된다.

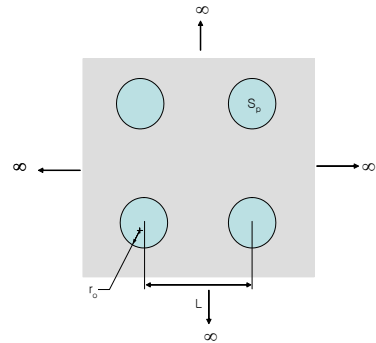


Figure 10 Configuration of perforated panel

##### 4.2 타공판과 흡음재 구성에 따른 흡음률

타공판과 흡음재의 조합에 의한 흡음률을 살펴보기 위하여 타공판의 타공율이 1%에서 30% 증가하면서 나타나는 흡음성능을 확인하였다. 타공판의 타공 지름은 2 mm 이며, 흡음재는 두께 40 mm, 유동저항은 4,223 Rayls/m, 흡음재의 밀도는 42.97 kg/m<sup>3</sup>, 흡음재의 공극률은 0.9927의 폴리에스터 흡음재를 적용하였다.

Figure 11은 앞선 이론식에 의하여 타공판과 흡음재가 조합될 때의 흡음률을 나타내고 있으며, Figure 12는 임피던스 튜브에서 타공판과 흡음재가 조합될 때의 흡음률 측정 결과를 나타내고 있다.

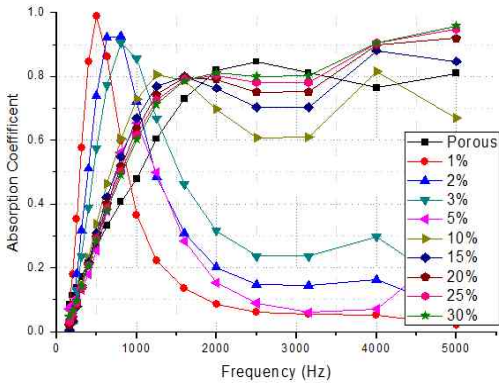


Figure 11 absorption coefficient prediction result of perforated panel and absorbing material

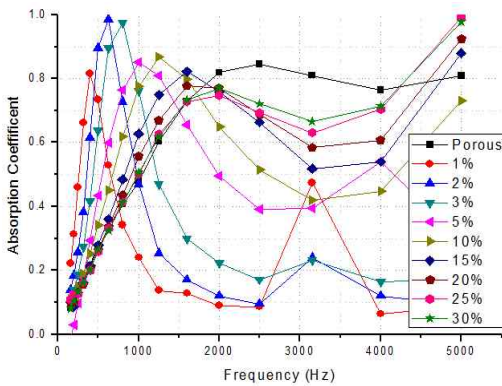


Figure 12 Absorption coefficient experimental result of perforated panel and absorbing material

타공판의 타공면적에 따라서 음향학적으로 흡음률의 많은 변화를 일으킨다. 타공판의 개구율이 5% 미만인 경우에는 헬리몰츠 공명기와 같은 특성을 나타내며 흡음재의 적용과 무관하게 후면에 공기층만을 형성하여도 특정 주파수 대역의 흡음성능을 나타낸다. 방음벽의 전면에는 250 Hz 대역에서 2,000 Hz 대역에 대해서 흡음성능을 확보해야 하므로 타공면적이 작은 타공판은 방음벽으로서의 흡음성능을 발휘할 수 없으며, 타공면적이 20% 이상이어야 흡음재에 의한 흡음성능이 나타나는 것을 알 수 있다. 실험과 예측 결과를 비교해보면 타공율이 5% 미만인 경우에는 흡음성능이 실험과 예측이 유사하게 나타났지만 타공율이 5% 이상인 경우에는 0.1 이상의 흡음률 차이를 보이고 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 철도 분야의 방음벽을 적용하기 위하여 흡음형 방음벽을 대상으로 적용되는 일반적인 흡음재의 흡음성능을 실험과 예측을 통하여 비교하였고, 흡음형 방음벽이 전면부에 타공부를 가지므로 타공판과 흡음재가 조합될 경우 전면부에 타공면적의 비율에 따라서 변화되는 흡음성능을 비교하였다. 그 결과 전면부의 타공율이 20% 이상 확보되어야 후면부에 흡음재에 의한 흡음성능이 발휘됨을 알 수 있었다. 본 연구에서는 흡음성능에 대한 결과를 수직음에 대해서만 한정하여 예측 및 시험하였으므로 향후에는 실제 현장에 적용 가능한 환경을 고려한 흡음성능의 예측과 측정을 실시하는 연구가 필요할 것이다. 또한 철도 방음벽으로서의 갖추어야 할 음향학적 성능을 고려하여 철도 방음벽의 음향학적 최적 설계가 가능한 내부 레이어 구성 및 흡음재의 적용에 관련된 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 후 기

본 과제는 2013년도 한국연구재단의 일반연구자 지원사업의 지원을 받았다. 관계자에게 감사드린다.

## 참 고 문 헌

- (1) 이재원, 서충열, 외, 소음환경영향평가 개선에 관한 연구(II): 철도소음 예측을 중심으로, 2009, 국립환경과학원
- (2) ISO 10534-2, Acoustics Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tube Part 2: Transfer-function Method
- (3) Jung H. I., Kim. G. J., Park J. K., and Kim S. H., Finite element analysis of acoustic behavior absorbent materials with experimental verification, 2003, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 874~878
- (4) F. J. Fahy, D. G. Ramble, J. G. Walker, 1995, "Development of a Novel Modular Form of Sound Absorbent Facing for Traffic Noise Barriers", Applied Acoustics. 44, pp. 39-51