400 km/h급 고속철도의 소음저감을 위해 방음벽 상부에 설치하는 소음저감장치 개발에 관한 연구

A Study on the Development of a Noise Reduction Device Installed at the Top of Noise Barrier for the 400 km/h Class High-speed Railroad

윤 제 원†·김 영 찬*·장 강 석*·홍 병 국*·엄 기 영**
Je-Won Yoon, Young-Chan Kim, Kang-Seok Jang, Byung-Kook Hong
and Ki-Young Eum

(Received June 24, 2013 ; Revised August 22, 2013 ; Accepted August 22, 2013)

Key Words : Noise Reduction Device(소음저감장치), High-speed Railroad(고속철도), HEMU(해무)

ABSTRACT

The purpose of this study is to develop a noise reduction device installed at the top of noise barrier for further decreasing of noise level of 400 km/h class high-speed railroad. For this, the frequency spectrum of 400 km/h class high-speed railroad was analyzed through the field noise test, and the tuning frequency was determined to design a noise reduction device. The noise reduction device was designed to have noise reduction performance of at least 3 dB(A) using the prediction method(2D BEM) and through the laboratory test with the prototype. Finally, the outdoor test showed that this device could decrease noise level of 400 km/h class high-speed railroad even more than 3 dB(A).

1. 서 론

‘전국 반나절 생활권’이 가능하게 한 고속철도는 빠르고 편리한 대중교통 수단이다. 이러한 고속철도를 안전하면서도 보다 빠르게 운행하는 것이 세계 여러 나라의 개발목표이며, 중국에서는 350 km/h를 넘나드는 상업운행 속도를 자랑한 바 있고 국내에서도 400 km/h급 차세대 고속철도 차량(HEMU-430X) 개발 사업을 추진하여 현재 시험 운전 중에 있다.

그러나, 열차의 증속운전은 높은 소음을 유발⁽¹⁾하게 되는데, 증속에 따른 환경소음저감을 위해서는

저소음차량을 개발하는 것이 가장 바람직하나 이 방법에는 한계가 있으므로, 일반적으로 방음벽 높이를 증가시키게 된다. 그러나, 방음벽 높이를 증가시키게 되면 구조물 하중설계에 큰 부담을 주게 되고 열차 승객들의 가시권 또한 심각하게 침해를 받게 된다.

따라서, 증속에 따른 방음벽 높이 증가를 최소화하기 위한 대안으로 궤도에 설치하여 반사음을 저감시키기 위한 흡음블럭 또는 방음벽 상부에 설치하여 회절음을 저감시키기 위한 방음벽 상단용 소음저감 장치의 설치가 제안⁽²⁾되고 있다.

이 연구의 목적은 400 km/h급 고속철도의 소음저감을 위해 방음벽 상단에 설치하는 소음저감장치를

† Corresponding Author ; Member, Unison Technology Co., Ltd.
E-mail : jwyoona@unison.co.kr

Tel : +82-41-577-3457, Fax : +82-41-577-3458

* Unison Technology Co., Ltd.

** Korea Railroad Research Institute

A part of this paper was presented at the KSNVE 2013 Annual Spring Conference

‡ Recommended by Editor Myung Jun Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

Fig. 1 Development of high-speed railroad

개발하기 위함이다. 이를 위해 우선 현장 측정을 통해 400 km/h급 고속철도(HEMU)의 주파수특성을 분석하고, 소음저감장치의 설계를 위한 튜닝주파수를 결정하였다. 그리고, 해석적 기법(BEM) 및 시작품 제작을 통한 실내시험을 수행하여 3 dB(A) 이상의 소음저감효과가 있는 소음저감장치를 설계하였다.

마지막으로, 소음저감장치 시작품을 제작하여 옥외시험실에서의 성능시험을 수행하였으며, 고속철도의 주파수특성을 반영한 소음저감장치 설치 전후의 감음량을 평가하였다.

2. 본 론

2.1 방음벽 상단용 소음저감장치

방음벽 상단용 소음저감장치란 방음벽 상단부로 회절되어 수음점으로 전파되는 소음을 저감시키기 위해 방음벽 상단부에 설치하는 소음저감장치를 의미한다. 소음저감장치의 종류에는 격자구조에 의한 간섭효과를 이용하여 소음을 저감시키는 간섭형과 흡음재에 의한 흡음효과를 이용하여 소음을 저감시키는 흡음형, 그리고 간섭형과 흡음형이 혼합된 조합형, 소음저감장치 구조를 공명기 형태로 제작하여 튜닝주파수 즉 공명주파수에서의 소음저감효과를 얻을 수 있도록 제작한 공명형이 있으며, 국내외 모두 주로 도로에 많이 설치되어 있다. 반면에 소음저감장치의 철도 적용 사례⁽³⁻⁵⁾는 도로에 비해 상대적으로 매우 적은 실정이다.

Table 1 Noise reduction devices installed at the top of noise barrier for the reduction of traffic noise

Domestic (Korea)	
Overseas (Japan)	

2.2 경계요소법(BEM)

파동방정식(wave equation)은 음파의 전파과정을 나타내는 지배방정식으로 주어진 압축성 매질 내의

연속방정식, 운동방정식, 상태방정식으로부터 식 (1)과 같이 얻어진다. 여기서 $p(r,t)$ 는 음압(sound pressure)이고 c 는 매질 내의 음속이다.

$$\nabla^2 p(r,t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} p(r,t) = 0 \quad (1)$$

위 식에서 $p(r,t)$ 는 공간과 시간의 함수로서, 조화함수로 가정하면 $p(r,t) = p(r)e^{i\omega t}$ 이므로 시간항을 소거하여 파동방정식을 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$(\nabla^2 + k^2)p(r) = 0, \quad k = \omega / c \quad (2)$$

위 식을 Helmholtz 방정식이라고 부르며, k 는 파수(wave number)이다. 잘 알려진 기하 형태 및 좌표계에 대해서는 식 (2)의 해를 해석적으로 구할 수 있으나, 임의의 형상에 대해서는 해석적으로 구하기가 매우 어려운 일이므로 Green함수를 도입하여 임의의 위치에서의 음장을 Helmholtz 적분방정식으로 표현한다.

자유음장 Green 함수 $G(r,r_0)$ 는 음원이 r_0 의 위치에 있을 때, 음장 Ω 내부에 있는 임의의 위치 r 에서의 음장 해로서 2차원 음장의 경우 식 (3)과 같이 나타낸다.

$$G(r,r_0) = \frac{1}{4i} \{H_0^{(2)}(k|r_0 - r|)\} \quad (3)$$

여기서 $H_0^{(2)}$ 는 0차 제2종 Hankel 함수이다. 한편 Green 함수 $G(r,r_0)$ 는 2차원 음장 Ω 내에서 다음과 같이 Helmholtz 방정식을 만족하며, δ 는 Delta 함수이다.

$$(\nabla^2 + k^2)G(r,r_0) = -\delta(r-r_0) \quad (4)$$

무한 거리에서의 음압은 식 (5)와 같은 Sommerfeld 방사조건을 만족한다.

$$\lim_{r \rightarrow \infty} r^\epsilon \left(\frac{\partial \phi}{\partial r} - ik\phi \right) = 0 \quad (5)$$

여기서 ϕ 는 음압을 나타내는 함수이고, ϵ 는 1/2(3차원의 경우는 1)의 값을 갖는 계수이다. 확장된 Green의 2차 정리에 의하여 영역 Ω 내에서 해석적

이고 연속적인 두 함수 $p(r)$ 와 $G(r,r_0)$ 에 대하여 식 (6)과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} [p(\nabla^2 + k^2)G - G(\nabla^2 + k^2)p] d\Omega \\ &= \int_{\Gamma + \Gamma_{\infty}} \left(p \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial p}{\partial n} \right) d\Gamma \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)에서 n 은 음장 Ω 의 경계면 Γ 와 Γ_{∞} 의 외부로 향하는 단위법선벡터(unit normal vector)이다. 또한 Sommerfeld 방사조건을 적용하여 식 (6)을 정리하면 식 (7)과 같은 Helmholtz 적분방정식을 얻을 수 있다. 여기서 $r_s(x_s, y_s)$ 는 경계면 Γ 상의 임의의 위치를 나타내는 벡터이다.

$$\begin{aligned} \epsilon(r)p(r) &= G(r,r_0) \\ &+ \int_{\Gamma} \left[p(r_s) \frac{\partial G(r,r_s)}{\partial n(r_s)} - G(r,r_s) \frac{\partial p(r_s)}{\partial n(r_s)} \right] d\Gamma \end{aligned} \quad (7)$$

2.3 소음측정 및 분석결과

(1) 측정개요

400 km/h급 고속철도의 주파수특성 분석을 위해 경부2단계 구간 중 경산시 안촌리 인근(안촌교하) 평지 구간에서 소음측정을 수행하였다. 측정대상은 시험운행중인 400 km/h급 HEMU 열차이며, 측정은 2012년 12월 26일~27일 심야시간대(23시~04시)에 수행하였고, 상향방향으로 주행하는 2대의 차량을 대상으로 하였다. 마이크로폰은 Fig. 2와 같이 측정점과 인접한 선로(상행방향) 중심으로부터 8.4 m 이격된 위치의 3.5 m 높이에 설치하였고, 측정전후 피스톤폰을 이용하여 감도를 확인하였다. 다만, 철도소음 측정을 위해 ISO 3095에서는 주행 노선 중심으로부터 7.5 m 및 25 m 이격된 지점에 마이크로폰을 레일 상부로부터 1.2 m 및 3.5 m 높이에 설치하도록 제안하고 있으나, 당 현장의 접근성을 고려하여 8.4 m 이격거리에서 측정하되 마이크로폰은 ISO 규격에 따라 레일 상부로부터 3.5 m 높이에 설치하였다.

주파수특성은 열차가 통과하는 동안에 소음레벨이 가장 높게 발생하는 시간대에 대해 분석하였다. 참고로, 중앙통제실로부터 통보받은 측정지점에서의 HEMU 차량 운행속도는 약 390 km/h이었다.

Table 2 Measurement information

FFT analyzer	Temperature	Speed of railroad
B&K Pulse	-13℃	HEMU : 380~390 km/h

Table 3 Specification of high-speed railroad

Item	300 km/h class KTX	400 km/h class HEMU
Speed	300 km/h	400 km/h
Power	Concentrated	Distributed
Composition	20 vehicles	6 vehicles
Total length	388 m	149 m
Height of pantograph	5.08 m	5.1 m
Photograph

(a) Time-SPL diagram

(b) Frequency spectrum

Fig. 3 Noise measurement result for HEMU

2.4 소음저감장치 설계 및 성능평가

(1) 설계방법

HEMU 차량에 대한 현장 소음측정결과 125 Hz와 같은 저주파성분의 소음이 비교적 높은 것으로 분석되었으며, 2 kHz를 포함하는 고주파성분의 소음 또한 높은 것으로 분석되었다. 따라서, 소음저감장치는 저주파 및 고주파소음을 모두 저감시킬 수 있어야 하므로, 저주파성분의 소음은 간섭형으로 고려하였고, 고주파성분의 소음은 간섭장치의 외곽 형상을 이용하여 회절각이 크게 형성되도록 고려하였다. 즉, Table 4의 그림과 같이 간섭주파수가 125, 250, 500, 1 kHz에 튜닝되도록 소음저감장치의 내부 구조를 결정하였으며, 소음저감장치의 외형은 회절각이 크게 형성되도록 사각형 모양으로 설계하였고, 크기는 기존의 도로용 소음저감장치와 유사한 너비(W) 0.7 m, 높이(H) 0.5 m로 제작하였다. 참고로, 튜닝주파수에 따른 소음저감장치의 내부 격자 길이(L)는 아래의 식으로 결정하였으며, 식에서 C 는 음속(m/s), f 는 주파수(Hz)를 의미한다.

$$L = C/4f \quad [\text{m}] \quad (8)$$

Fig. 2 Measurement site and microphone positions

(2) 분석결과

Fig. 3은 400 km/h급 HEMU 차량에 대한 시간이력선도 및 주파수특성을 나타낸 것이다. 우선, 2 kHz 부근에서 피크를 나타내고 있으며, 125 Hz 부근의 저주파성분 또한 비교적 높게 나타나는 것으로 분석되었다. 따라서, 소음저감장치 설계 시 고주파성분 뿐만 아니라 저주파성분의 소음도 저감시켜야 할 것으로 판단된다.

Table 4 The noise reduction device developed in the work

또한, 소음저감장치의 성능검증을 위해 시작품을 제작하기 전 소음해석기법을 이용하여 성능예측을 수행하였다. 해석방법은 2차원 경계요소법(BEM) 중간접법(indirect method)을 이용하였다. 이때 소음저감장치 설치 전후의 감음량은 향후 옥외성능평가 시험과의 비교검토를 위해 현장여건과 동일하게 평가하였다. 해석방법은 140~5,600 Hz까지 10 Hz 간격으로 소음해석을 수행한 후 1/3옥타브밴드로 변환하여 각 위치마다의 소음레벨을 구하였으며, 감음량은 일반방음벽 설치 시와 소음저감장치를 부착한 방음벽 설치 시 동일한 평가지점에서의 소음레벨 차로 계산하였다. 이때, 소음저감장치 설치 후의 높이가 설치 전에 비해 0.5 m 높아지게 되는데, 이러한 높이 증가에 따른 소음저감효과의 증가현상을 방지하기 위해 도로교통연구원⁽⁶⁾에서 연구한 바와 같이, 소음저감장치 설치 후에 대한 예측시에는 일반방음벽의 예측시보다 음원 및 수용점 높이를 소음저감장치 높이(0.5 m)만큼 높여 가정한 후 예측을 수행하여 높이 증가효과를 방지하도록 하였다. 참고로, 소음해석을 위한 소음원·방음벽 및 평가지점에 대한 정보를 Fig. 4에 나타내었다.

또한, 감음량을 구하기 위한 소음원의 주파수특성 보정값은 Table 5와 같이 가정하였는데, 이 값은 향후 스피커음원을 이용한 옥외성능평가 시 소음원에 대한 특성을 현장여건과 유사하게 반영할 수 있도록 하기 위해 사용하였다. 즉, HEMU 차량에 대한 보정값은 측정결과를 이용하여 1kHz를 중심으로 각

Fig. 4 Speaker and microphone positions

주파수에 대한 레벨차를 계산하여 결정하였고, KTX 차량에 대한 보정값은 도로교통연구원에서 제공받은 데이터를 인용하였다. 소음해석을 수행한 후 상기 Table 5에서 제시된 각각의 주파수 보정값을 적용하여 구한 소음저감장치 설치 전후의 감음량을 Table 6에 정리하였는데, 주파수 보정값에 따른 감음량 차이는 거의 없는 것으로 예측되었으며, 두 경우 모두 3 dB(A)의 감음량을 갖는 것으로 분석되었다.

Fig. 5에는 열차 종류별 보정값에 따른 1/3옥타브 밴드별 감음량에 대한 해석결과를 나타낸 것으로, 상호간의 차이는 거의 없는 것으로 평가되었다. 그리고, 튜닝주파수로 설계한 250, 500, 1 kHz에서의 감음량이 다른 주파수에 비해 상대적으로 크게 나타나고 있음을 볼 수 있다.

소음저감장치의 성능평가를 위해 임피던스관을 이용하여 튜닝주파수에서의 소음저감현상을 연구⁽⁷⁾한 바 있다. 이렇게 측정 및 해석을 통해 검증된 모델⁽⁸⁾을 근거로 시작품을 제작하여 도로교통연구원의 옥외 시험장에서 성능시험을 수행하였다. 현장에 설치된 소음저감장치는 총 연장이 20 m이며, 소음저감장치 상부에 타공판 설치 전후의 경우에 대한 성능평가를 각각 수행하였다.

마이크로폰 및 음원의 설치위치는 Fig. 4와 같고, 스피커에서 발생시킨 음원신호는 백색잡음으로 하되 소음저감장치 설치 전후에 대한 삽입손실은 Table 5에서 제시된 보정값 중 도로교통연구원에서 제공한 고속철도 보정값(KTX)을 적용하여 평가하였다.

Table 5 Correction values applied to the noise source to test the performance of the noise reduction device

Frequency [Hz]	For KTX (300 km/h)	For HEMU (390 km/h)
200	-13.8	-9.8
250	-10.6	-12.4
315	-9.1	-8.9
400	-9.0	-6.4
500	-7.9	-4.1
630	-5.2	-5.8
800	-3.2	0.8
1k	0.0	0.0
1.25k	1.0	0.2
1.6k	2.2	2.3
2k	4.6	2.7
2.5k	-1.4	0.7
3.15k	-0.9	0.0
4k	0.4	-2.9
5k	-8.2	-5.0

Table 6 The reduction values of noise level for KTX and HEMU obtained by simulation with the correction value

Evaluation point	For KTX (300 km/h)	For HEMU (390 km/h)
①	3.3	3.2
②	3.0	3.0
③	3.0	3.1
④	3.1	3.2
⑤	3.0	3.1
⑥	3.0	3.1
⑦	3.1	3.1
⑧	3.0	3.1
⑨	2.9	3.1
Arithmetic average	3.0	3.1

시험결과 Fig. 6에서 보는 바와 같이 소음저감을 목표로 하는 튜닝주파수인 250, 500, 1 kHz에서의 감음량이 다른 주파수에 비해 상대적으로 크게 발생하였으며, 소음저감장치 외형에 따른 회절경로 증가로 고주파영역에서 더욱 큰 저감성능을 나타내었다.

Fig. 5 Simulation results of noise level difference in the 1/3 octave band center frequency

Table 7 Test facility used in the study

Source part
Receiver part
Noise reduction device

(2) 성능평가

또한, 전체 측정지점에 대한 평균감음량은 타공판 설치 전 3.4 dB(A) 및 타공판 설치 후 3.7 dB(A)이며, 이 결과는 해석결과와도 비교적 유사한 값을 갖는 것으로 분석되었다. 참고로, Fig. 6은 각각의 주파수에 대한 모든 측정점에서의 감음량을 평균하여 그래프로 나타낸 것이다.

추가적으로, 도로교통연구원에서 평가한 방법과 동일하게 Table 5의 HEMU 차량에 대한 주파수 보정값을 이용하여 소음저감장치에 대한 감음량을 평

Table 8 Measured reduction values of noise level using a noise reduction device with and without perforated plate

Measurement point	Without perforated plate	With perforated plate
①	3.0	3.3
②	4.1	4.4
③	2.5	2.8
④	4.0	4.2
⑤	3.8	4.1
⑥	1.9	2.2
⑦	3.6	3.7
⑧	4.3	4.6
⑨	3.5	3.7
Arithmetic average	3.4	3.7

(a) Without perforated plate

(b) With perforated plate

Fig. 6 Measurement results of noise level difference by using KTX correction value

가하여 Fig. 7에 나타내었는데, KTX 보정값에 의한 평가결과와 비교 시 감음량이 0.3 dB 정도 저감될 뿐 주파수별 차이는 거의 없는 것으로 평가되었다.

(a) Without perforated plate

(b) With perforated plate

Fig. 7 Measurement results of noise level difference by using HEMU correction value

3. 결 론

(1) 400 km/h급 고속철도(HEMU) 소음측정결과 2 kHz부근에서 피크가 발생하고 있으며, 저주파 영역에서의 소음레벨 또한 높은 것으로 분석되었다.

(2) 소음해석기법(BEM)을 이용하여 저주파 및 고주파성분의 소음이 모두 저감되면서 최소 3.0 dB(A) 이상의 소음이 저감될 수 있도록 소음저감장치를 설계하였다.

(3) 소음저감장치 시작품을 제작하여 옥외시험실에서 소음저감성능을 평가한 결과 비교적 높은 저감량인 3.4 dB(A)을 갖는 것으로 분석되었다.

(4) 모든 측정점에서의 평균값으로 비교해 보면 해석 및 측정결과가 유사한 것으로 분석되었다.

후 기

이 연구는 국토교통과학기술진흥원에서 지원한 400 km/h급 고속철도 인프라 시범적용 기술개발 과

제 중 ‘고속철도 400 km/h 운행을 위한 환경소음저감 핵심기술개발연구’에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Mellet, C., 2006, High Speed Train Noise Emission : Latest Investigation of the Aerodynamic / Rolling Noise Contribution, Journal of Sound and Vibration, Vol. 293, No. 3-5, pp. 535~546.
- (2) Kim, J. T., 2007, Installation Effect on Noise Reducer for Railway Traffic Noise, Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 10, No. 3, pp. 278~283.
- (3) Jung, S. S., 2006, Noise Barrier with Top Cylindrical Tubes, Journal of the Korean Physical Society, Vol. 49, No. 1, pp. 145~149.
- (4) Murata, K., 2006, Noise Reduction Effect of Noise Barrier for Shinkansen based on Y-shaped Structure, QR of RTRI, Vol. 47, No. 3, pp. 162~168.
- (5) Takashi, T., 2010, Shinkansen Noise Reduction by New Wayside Equipment Development, JR East Technical Review, Vol. 16, pp. 60~62.
- (6) Kim, C. H., 2010, A Study on the Test Method for Noise Reduction Devices Installed on the Noise Barriers, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 9, pp. 791~796.
- (7) Yoon, J. W., 2012, TL Performance Test of Interference Type Noise Reducing Device by Using Transfer Function, Proceedings of the Korea Society for Railway Annual Autumn Conference, pp. 1~6.
- (8) Yoon, J. W., 2012, A Study on the Acoustic Performance Prediction and Evaluation of Lattice Type Noise Reducing Device Installed on the Top of Noise Barrier, Inter-noise 2012.
- (9) Kim, C. H., 2011, Performance Evaluation of Noise Reducing Devices Installed on the Top of Highway Noise Barriers, Inter-noise 2011.
- (10) ISO 3095-2005, Railway Application-acoustics -Measurement of Noise Emitted by Railbound Vehicles.

Je-Won Yoon received his B.S. and M.S. degree from Soongsil University. His research interests are environmental noise and vibration control.

Young-Chan Kim received his B.S. and M.S. degree from Pusan University. His research interests are environmental noise and vibration control.

Kang-Seok Jang received his B.S., M.S. and Ph.D. degree from Chungnam National University. His research interests are environmental noise and vibration control.

Byung-Kook Hong received his B.S. and M.S. degree in Seoul National University of Science & Technology. His research interests are environmental noise and vibration control.

Ki-Young Eum received his Ph.D. degree from Seoul National University of Science & Technology. His research interests are environmental noise and vibration control.