고속철도용 방음시설 보완을 위한 소음저감장치의 현장적용에 관한 연구

A Study on the Field Application of the Noise Reduction Device to Supplement the Soundproofing Facility for High Speed Railway

조영규^{1,*} · 장강석² · 정찬묵³ · 어성욱³

Young Geu Cho^{1,*} · Kang Seok Jang² · Chan Mook Jung³ · Seong Wook Oa³

¹한국철도시설공단 · ²유니슨테크놀로지(주) · ³우송대학교

¹Korea Rail Network Authority · ²Unison Technology Co., Ltd · ³Woosong University

(Received February 13, 2019; Revised April 2, 2019; Accepted April 5, 2019)

Abstract : Recently, the speed of high-speed railway has been rapidly increased with the development of high-speed train design and operating technology. This causes a lot of complaints related the environmental noise in residential areas near the high-speed railway. Also the civil complaints about environmental noise of high-speed railway are also increasing continuously. In this study, we was surveyed the current state of soundproofing facilities for high-speed railway and general railway in Korea, and conducted long-term monitoring of the noise reduction device installed to supplement soundproofing facilities. And in order to evaluate the field application performance through long-term monitoring, domestic and overseas evaluation methods were analyzed. Through such research, we have presented the two types method to verify the performance of the newly developed noise reduction device. One is to evaluate before and after installation, and the other is the evaluation method which measures installed and not installed site at the same time. The results of monitoring using these evaluation methods according to the season for 5 years, it has been confirmed that performance of the noise reduction device is consistently above 3 dB.

Key Words : High speed railway, Environmental noise, Noise reduction device, Noise reduction performance

요약 : 고속열차의 설계 및 운행기술이 발전하면서 고속철도의 운행속도가 빠르게 증속되고 있다. 반면 증속 시 발생하는 소음으로 인해 고속철도 주변의 주거지역에서는 많은 소음문제가 발생하고 있으며, 고속철도 소음에 대한 민원도 지속적인 증가추세에 있다. 본 연구에서는 국내 고속철도 및 일반철도에 대한 방음시설 현황을 조사하고, 방음시설 성능보완을 위해 설치된 소음저감장치에 대한 장기모니터링을 수행하였다. 또한 소음저감장치의 현장적용성능을 평가하기 위한 국내외 평가 방법을 분석하였다. 이와 같이 평가방법에 대한 조사 후 두 가지 평가방법을 제시하였다. 첫 번째 평가방법은 설치 전과 설치 후에 측정하여 평가방법이고, 다른 하나는 설치와 미설치 구간을 동시에 측정하여 평가하는 방법으로 장기모니터링에 적합한 평가방법이다. 한편 이 두 가지 평가방법을 이용하여 소음저감장치에 대한 성능을 분석한 결과, 개발된 소음저감장치는 5년 동안 시기나 날씨에 관계없이 지속적으로 3 dB 이상의 소음저감이 되는 것을 검증하였다.

주제어 : 고속철도, 환경소음, 방음시설, 소음저감성능

1. 서론

고속철도를 안전하면서도 보다 빠르게 하는 것이 전 세계적인 목표이며 프랑스와 독일 등 유럽에서는 350 km/h 그리고 중국에서는 상업운행속도 394 km/h를 자랑한 바 있다. 국내에서도 400 km/h급 고속철도 차량인 HEMU-430X이 개발되어 400 km/h 이상의 속도로 시험주행에 성공하였으며, 400 km/h 운행을 위한 인프라 시험선로도 호남고속철도 구간에 구축되어 시험 중에 있다. 반면 고속열차의 속도가 증속될수록 환경소음도 속도에 따라 커지게 되는데 일반적으로 300 km/h에서 400 km/h로 증속되는데 약 6~7 dB의 소음이 증가되는 것으로 알려져 있으며,¹⁾ HEMU 430X의 경우 기존 300 km/h 열차인 KTX나 KTX-산천보다는 5~6 dB 환경소음이 높아지는 것으로 운행선로에서의 시험결과 나타났다. 이에 반해 환경소음이 커지는 것에 대응하기 위해 저소음차량 등 차량을 개발하여 문제를 해결하는 데는

한계가 있으며, 기존 선로 변 벽체(방음벽 포함)의 높이를 증가시켜 소음문제를 해결하는 것도 여러 가지 제약사항으로 인해 쉽지않은 않다. 실제로 경부고속철도와 호남고속철도에 이어 원주강릉선이 개통한 이후 철도와 관련한 환경소음관련 민원이 빠르게 증가하고 있는 추세이다. 한편 고속철도의 속도증가 추세에 따른 소음증가에 대처하기 위해 1990년대 후반부터 정부기관과 관련 연구원을 중심으로 환경소음과 관련한 연구가 수행되어져 왔으며, 고속전철 소음저감 기술개발(1997~1998)²⁾, 철도소음진동의 효율적 저감방안 연구(1997~2000)³⁾, 고속철도 400 km/h 운행을 위한 환경소음 저감 핵심기술 개발(2010~2015)⁴⁾ 그리고 호남고속철도 테스트베드를 활용한 인프라 통합모니터링 시스템 구축 및 소음저감장치 고도화 등(2016~2018)⁵⁾이 있다. 그러나 최근까지도 고속철도 소음을 저감하기 위한 방음시설로 사용된 것은 수음점에서 음원으로의 가시선을 직접 차단하여 감음효과를 보는 방음벽이 대부분이다.⁶⁾ 일반적으로

* Corresponding author E-mail: choyk@kr.or.kr Tel: 042-607-3712 Fax: 042-607-3799

철도연변에 인접 설치된 방음벽의 높이는 3~4 m 내외이며, 이와 같은 방음벽의 높이로 철도연변에 인접한 건물에서의 소음저감 범위는 아파트의 경우 4층 정도밖에 되지 않는다. 따라서 그 이상의 높이에서는 소음저감 효과가 미미하며 높은 건물에서 소음저감 효과를 얻기 위해서는 수음지점이 가시선 아래 놓이도록 방음벽의 높이가 높아져야만 한다. 방음벽의 높이가 높아지면 보다 높은 층까지 소음을 줄일 수 있으나 높이가 높아질수록 방음벽 설치로 인해 도시미관을 해치고 경관을 단절시킴으로써 보행자, 운전자에게 폐쇄감, 위압감 등 폐쇄적 이미지를 연상시키게 된다. 이와 같은 고속철도 환경소음문제를 해결하고자 방음시설물을 보완하기 위한 소음저감장치에 대한 연구가 일부 수행된바 있으나 연구단계를 벗어나지 못하였다.^{7,8)} 본 연구에서는 고속철도를 포함한 국내 철도방음시설, 소음관련 민원 및 신설개소 그리고 노후화 정도를 통한 향후 방음벽 교체개소 등 전반적인 방음시설 현황에 대해 실사를 통한 조사를 수행하였다. 한편 1단계 연구를 통해 개발된 400 km/h 고속철도용 방음벽 소음저감장치에 대한 열차풍압과 태풍 등 자연적으로 발생할 수 있는 동하중에 대한 수치해석단계의 구조 안정성 검토는 이미 보고서로 검증되어 있다.⁴⁾ 본 논문은 1단계 연구에 이은 고도화연구에 관한 결과로서 1단계 연구 결과물에 대한 내구성 및 성능을 장기모니터링하여 현장 적용 시 안전성과 성능을 검증하는데 궁극적인 목적이 있다. 한편 1단계 연구기간 중에는 국내에서 개발된 400 km/h 고속차량인 HEMU-430X의 소음특성이 정확하게 파악되지 못해, 속도증속에 따른 일반적 고속철도 소음증가 특성을 이용해 소음저감장치가 튜닝되었다. 반면 본 연구에서는 1단계 연구에서 확보된 국내 400 km/h 고속철도 차량에서 발생하는 소음특성을 고려하여 성능개선을 위한 방법을 연구하고, 호남선 고속철도구간 정읍역 인근에 시험부설하여 성능을 검증하였다. 이와 같은 연구를 통해 개발된 기술은 향후 국내 고속철도가 300 km/h 이상으로 증속할 때 발생할 수 있는 환경민원에 대처하는 크게 기여할 것으로 판단된다.

2. 철도방음시설의 실태 및 현황

철도에서 발생하는 환경소음을 줄이기 위해 사용하는 방음시설은 철도연변에 설치하여 소음을 줄이는 방음벽이 대부분이며, 방음벽의 종류는 알루미늄방음벽, 금속제(갈라)방음벽, 경량콘크리트 방음벽, 플라스틱수지(갈라)방음벽, 투명형방음벽 그리고 목재형방음벽이 있다. 방음벽의 성능을 보완하기 위해 최근 연구되어 고속철도 선로에 적용가능한 방음시설로는 콘크리트 도상에 설치하여 반사소음을 줄이는 콘크리트 도상 흡음블럭과 방음벽이나 선로 벽체 상단에 설치하여 회절되는 소음을 저감할 수 있는 방음벽상단 소음저감장치 등이 있다. 경부고속철도가 2004년 4월 개통된 이래 선로 연변에 설치되어 있는 고속철도 방음

Table 1. The status of domestic soundproofing facilities

Item	High Speed Railway	General Railway	Total
Length (m)	154,759	361,599	516,358

벽은 Table 1에 나타난 바와 같이 2018년까지 고속철도 전용구간에 연장 154,759 m가 설치되었다. 이 밖에 일반철도 구간에는 연장 361,599 m가 설치되어 총 연장 516,358 m에 걸쳐 일반방음벽이 설치되어 있다.

2019년은 경부고속철도 개통 후 15년이 경과하는 시점에 다다르고, 기존 철도인 경부선과 호남선의 경우도 많은 방음벽이 노후로 인해 교체해야 할 시점으로 접어들고 있다. 따라서 노후로 인해 교체해야 할 방음벽은 Table 2와 같이 2019년 연장 5,463 m를 시작으로 매년 증가해 2022년에는 12,000 m 이상을 교체를 필요로 하고 있다. 이 밖에도 호남고속철도, SRT 등에 이어 원주-강릉선이 개통됨으로 인해 환경소음민원이 증가하고 있어 신설해야 할 방음벽의 개소는 조사된 Table 2보다 훨씬 많을 것으로 예상된다.

Table 2. Scheduled to replace old-age soundproof wall in the country

Item	2019 Year	2020 Year	2021 Year	2022 Year
Site	7	15	22	11
Length (m)	5,463	7,320	10,381	12,090

한편 철도소음에 대한 규제는 소음진동규제법 상 2010년 전 까지 야간기준이 65 dB (A)이었으나 현재는 60 dB (A)로 강화되어 있으며, 수송인원 증가에 따른 교통량도 점점 증가추세에 있다. 따라서 철도소음과 관련된 민원에 대응하기 위해 기존 방음벽을 보완했거나 향후 예정인 개소도 Table 3과 같이 지속적으로 증가하고 있다. 향후 300 km/h 고속철도가 350 km/h~400 km/h로 증속하게 되면 3 dB~6 dB 내외의 소음증대가 예상되어 기존 방음벽 설치구간에서도 소음을 초과하는 개소가 상당수 발생할 것으로 보인다. 이로 인해 현재까지의 철도소음민원 개소 및 증설계획은 Table 3과 같이 계획하고 있으나, 고속철도가 증속하거나 교통량이 늘어나게 되면 방음시설을 신설하거나 기존 방음벽의 성능을 보완하여 소음을 낮출 수 있는 추가적인 보완책이 반드시 필요하다.

Table 3. Number of complaints in the soundproof wall installed

Item		2018 Year	2019 Year	2020 Year
General Railway	Site	17	18	21
	Length (m)	3,061	7,345	9,140
High Speed Railway	Site	2	4	2
	Length (m)	134	1,788	500
Total		3,195	9,133	9,640

3. 성능보완용 소음저감장치

3.1. 소음저감장치 재설계 및 성능평가

철도와 관련된 방음시설 상단의 회절효과 감소를 위한 간섭형 소음저감장치나 흡음을 이용한 소음저감기술은 프랑스와 일본에서도 다소 연구된 바는 있다. 국내의 경우도 방음시설 성능보완을 위해 소음저감장치가 도로용으로 개발되어 적용된 사례는 많으나, 일반철도 및 고속철도에 대해서는 방음시설 높이 보완 기술이나 투과손실 향상에 대한 기술이 적용된 사례가 드물다. 한편 방음시설 성능보완을 위한 소음저감장치에 대한 연구는 방음시설 상부에서 회절 되어 다시 전파되어지는 소음을 저감시키기 위한 기술이 주로 사용되고 있다. 방음벽 상단 소음저감 기술은 소음을 저감시키는 원리에 따라 흡음형, 공명형, 간섭형 등으로 크게 구분된다. 이 중 공명형의 경우 제어하고자 하는 공명주파수(f)는 공동부의 길이(L)에 따라 결정되며, 공동부 길이가 $\lambda/4$ 의 홀수에 해당하는 주파수에서 소음레벨은 최소가 된다. 본 연구 1단계 과제에서는 400 km/h 고속운행 시 250 Hz 부근에서 나타나는 공력소음특성이 클 것으로 생각하였다. 따라서 250 Hz가 포함된 500 Hz~2 kHz를 목표주파수를 선정하고 Overall 3 dB 저감을 설계목표로 연구 개발하였으며, 호남고속철도 400 km/h 인프라 테스트베드 내 STA 116k480~880 구간 설치해 성능을 검증한 바 있다.⁴⁾ 반면 1단계 때에는 300 km/h 이상 증속 시 250Hz

주파수대역의 공력소음이 증대될 것으로 예상되어 소음저감 목표대역으로 선정했으나, Fig. 1과 같이 HEMU-430X가 400 km/h 속도로 달릴 때도 500 Hz~2 kHz 주파수대역의 소음이 지배적인 것이 호남고속철도 테스트베드에서 측정된 자료로 확인되었다.

따라서 Fig. 2와 같이 경계요소법 이용한 수치해석을 통해 250 Hz 목표주파수를 없애고 소음저감 성능을 높일 수 있는 설계(안)들을 도출하였으며, 설계(안)도출에 대한 이론적 논리와 실험실 내 관내법 시험을 통한 평가결과는 연구단계에서 논문으로 입증하였다.⁹⁾ 본 연구에서는 도출된

Fig. 1. Noise characteristics of HEMU-430X.

Fig. 2. Performance improvement of noise reduction device.

Fig. 3. Installation location and distance for anechoic room test.

Table 4. Reduction performance comparison with 1st stage noise reduction device

Item	Distance 1 m form the specimen					Distance 2 m form the specimen					Distance 3 m form the specimen				
	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5
Modify 1	0,4	1,2	0,2	-1,1	-0,3	0,6	1,5	0,3	0,3	-0,4	1,5	1,3	0,8	0,5	0,1
Modify 2	0,2	0,8	0,5	-0,5	-0,5	1,2	1,5	0,9	1,2	-0,3	1,6	1,3	0,8	1,6	0,8
Modify 3	-0,2	1,2	0,1	-1,3	-0,5	0,7	1,3	0,1	0,1	-0,7	1,4	1,1	0,9	0,1	-0,1

Table 5. The insertion loss difference compared to the case where the opening is clogged

Item	Distance 1 m form the specimen					Distance 2 m form the specimen					Distance 3 m form the specimen				
	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5
Original design	0,1	0,7	2,7	3,1	2,0	0,9	0,9	1,9	2,0	2,4	1,2	1,7	1,8	2,1	1,9
Modify 1	0,3	1,6	3,2	2,5	1,5	2,1	2,4	2,8	3,2	2,1	2,8	3,0	2,6	3,7	2,7
Modify 2	0,4	2,0	2,9	1,9	1,6	2,7	2,4	2,2	2,3	2,0	2,7	3,0	2,7	2,7	2,0
Modify 3	-0,1	1,9	2,8	1,8	1,5	1,6	2,2	2,0	2,1	1,7	2,9	2,8	2,8	2,2	1,8

여러 가지 개선설계(안)에 대해 무향실 시험을 통한 삽입 손실을 평가하여 최종(안)을 도출하고자 하였다. 시험의 종류는 일반방음벽, 원안(1단계), Modify 1~3과 간섭효과를 파악하기 위해 격자구조가 막힌 소음저감장치에 대해서도 실시하였다. 일반방음벽의 높이(H1.2 m)는 소음저감장치를 장착(H0.5 m)한 방음벽(H0.7 m)의 최종 높이(H1.2 m)와 동일하게 Fig. 3과 같이 설치하였다. 시험 전 무향실 환경 평가를 위해 시험편이 설치되지 않은 상태에서 사전측정을 진행하였으며, 완전무향실 바닥에는 합판을 설치하여 Fig. 2와 같이 반무향실 조건으로 구성하였다.

무향실에서의 시험결과를 분석하여 비교평가 한 결과, 개선설계(안) 2가 소음개선 정도가 가장 좋은 것으로 나타났다. 따라서 개선설계(안) 2를 재설계(안)으로 선정하였으며, 원안 대비 개선설계(안)에 대한 자세한 삽입손실 차는 Table 4에 제시하였다.

한편 소음저감장치의 형상효과와 간섭효과를 구분하기 위해 개구부가 없고 형상만 동일한 경우 대비 원안 및 설계(안)들에 대한 삽입손실차이를 평가하였다. 그 결과 개선설계(안) 2의 경우 2~3 m 이격된 거리에서 간섭에 의한 소음저감이 2~3 dB되었으며, 동일한 높이의 일반방음벽 대비 형상효과는 위치에 따라 다르나, 0.1~0.9 dB 내외인 것으로 평가되었다. 이 밖에 자세한 결과는 Table 5에 나타내었다.

3.2. 구조안전성 및 내구성검증

방음시설물의 구조가 취약해 이탈하게 되면 고속철도 운행 시 사고로 이어져 큰 인명피해를 초래할 수 있기 때문에 구조안전성은 고속철도에 있어 매우 중요한 요소이다. 방음시설에 전달되는 동적인 하중은 자연재해인 태풍 및 폭설과 고속철도 운행 시 발생하는 풍압이 있다. 경부고속철도는 풍압규정이 300 kg/cm²로 설계되어 적용되었으나, 현재는 한국철도시설공단 내 철도설계지침 노반편 풍압규정에 의해 방음시설물이 관리되고 있으며 국내 최대풍압이 적용되는 지역에서는 200 kg/cm²의 풍압이 적용되고 있다. 방음벽 상단에 작용하는 풍압은 본 연구의 1단계 연구를 통해 413 km/h로 고속철도가 달릴 때 선로중앙에서 11 m 이격된 높이 5 m 방음벽 상단에서 60~70 kg/cm²인 것을 확인하였다. 물론 바람이 거세게 불 때는 고속철도의 속도를 일정속도로 낮추어 운행하는 것이 규정으로 되어 있으나, 본 연구에서는 국내 지역 별 최대풍압인 200 kg/cm² 풍압에 고속철도 진출입 시 풍압을 더한 하중에 견디는 내구성을 갖도록 목표를 설정하였다. 이와 같은 내구성을 갖추기 위해 연구초기에는 유한요소해석을 통해 구조부재 별 기여도를 파악하고, 각 부품의 설치 유무에 따른 변위 및 응력 분포를 확인하여 소음저감장치 및 방음시설과 연결되는 부재치수를 결정하였다. 최종 개발된 소음저감장치에 대한 안전성 검증은 Fig. 4에 나타난 시험과 같은 “방음벽

Fig. 4. Quality Test Method and Test Scene of Noise Reduction Device.

Table 6. Result of quality test using wind pressure

Item	Elastic deformation		Permanent deformation	
	Guideline	Result	Guideline	Result
displacement	50,0 mm	15,2 mm	8,0 mm	6,8 mm

Note* Loading condition: Applied 360 kg/cm² wind pressure

상부 소음저감장치 품질기준” 절차에¹⁰⁾ 따른 내하중 시험을 통해 이루어졌다. 시험을 통한 내구성검증은 자체시험을 통해 세부결합방법을 결정한 후 한국도로공사 도로교통연구원에서 실시하는 공인시험을 실시해 Table 6과 같이 360 km/cm² 하중에 대한 안정성을 확보하였다.^{4,5)}

4. 테스트베드 성능검증방법

4.1. 성능검증방법

교통소음저감을 위한 방음시설물 성능보완용 소음저감장치에 대한 감음성능 평가방법은 도로용에 실외시험 시험방법 및 평가기준은 한국도로공사 도로교통연구원에서 제시한 것이 있으나, 철도에 대해서는 제시된 방법이 없다. 또한 현장설치를 통한 평가방법은 철도 뿐 아니라 도로에서도 규정된 기준이 없다. 다만 방음시설물 평가를 위해 제시된 규격은 Table 7과 같은 국내외 기준이 있고,^{11,12)} 이를 바탕으로 높이별 수음위치 및 평가방법 제안된 바는 있다.¹³⁾

현장부설 평가의 경우 열차가 운행되지 않을 때 전차선차단 후 1일 2~3시간의 심야작업만 해야 하기 때문에 소음저감장치 설치 후 격자구조를 막고 간섭효과를 없앤 상태까지 측정하는 것이 매우 어려워 무향실 실험결과에 만족해야 했다. 따라서 본 연구에서는 이 같은 국내외 규격을 준용하고 관련기관과 전문가의 기술자문을 거쳐 소음저감장치 높이 보정에 의한 효과를 파악하는 것은 제외하고, 소음저감장치의 삽입손실을 평가를 위한 두 가지 형태의 평가방법을 도출하

였다. 한 가지 형태는 설치 전과 설치 후에 각각 측정한 후 설치 전후의 소음도 차를 산정한 후, 소음저감장치의 영향을 받지 않은 음 전달지점에서 레퍼런스 음을 측정하여 보정하는 평가방법이다. 이 방법은 주변 지형이나 선로조건 등에 대한 영향을 받지 않으나, 열차종류 및 기후 등에 대한 환경조건에 대한 영향을 다소 받을 수 있다. 또 다른 방법은 동일한 높이의 방음시설물이 있는 구간에서 일부구간에는 소음저감장치를 설치하고 일부구간에는 설치하지 않고 동시에 측정하는 방법이다. 이 방법은 열차종류나 기후 등에 대한 환경조건에 의한 영향은 받지 않으나, 앞서의 방법과 달리 지형이나 선로조건에 의한 영향은 다소 있을 수 있다. 본 연구에서는 원안 및 재설계된 소음저감장치를 다른 개소에 설치하고 다른 평가방법을 이용하여 적용성능에 대한 평가를 하였다.

4.1.1. 설치 전/후 평가방법

방음시설에 대한 평가를 위해서는 선로의 궤도, 지형(성토구간, 깎기구간, 둔지구간 등), 측정시기, 계절, 차량종류 등 다양한 환경에 따라 편차를 보일 수 있어, 철도소음의 높이별 방사특성을 고려한 평가위치를 선정하는 것이 매우 중요하다. 설치 전/후를 측정하여 평가하는 방법은 궤도나 지형 등의 영향을 최소화 할 수 있는 방법이나, 측정시기, 계절, 차량에 의한 영향을 받을 수 있어 방음시설물이나 소음저감장치에 의해 전달음이 왜곡되지 않는 위치에 레퍼런스 마이크론을 설치하여 보정하는 방법을 사용하였다. 한편 재설계된 소음저감장치를 설치하고 평가를 수행하였으며, 자세한 평가방법은 다음과 같다.

Table 7. Measurement location and measurement related criteria

Standard	Title	Revision	Authority
KS I ISO 10847	Acoustics-In-situ determination of insertion loss of outdoor noise barriers of all types	2014	KSA
ISO 3095	Railway applications-Acoustics-Measurement of noise emitted by railbound vehicles	2005	ISO
Directive 2001/16/EC	Concerning the technical specification for interoperability relating to subsystem 'rolling stock noise of the trans-European Conventional rail system	2005	EU

Fig. 5. Evaluation location for performance test.

① 측정환경에 대해 기록을 한다.(목적, 구간, STA, 궤도 형식, 노반 현황, 기상조건, 일시 등)

② Fig. 5와 같이 측정위치에서 레퍼런스 마이크로폰의 위치는 방음시설보다 1.5 m 이상 높은 위치에 설치하고, 측정 지점은 선로중앙에서 25 m 떨어진 지점에서 높이 1.2 m와 3.5 m 두 지점을 모두 선정하였다(측정지점은 ISO 3095에서는 이격거리 25 m, 높이 3.5 m를 제안하고 있고, 환경부 고시의 소음진동공정시험기준 중 철도소음한도 측정 방법에서는 지면으로부터 높이 1.2 m~1.5 m 지점에서 측정할 것을 규정하고 있음).

③ 열차 주행 시 열차의 소음도 데이터를 취득하고 열차 종류와 통과시간 등을 기록한다.

④ 레일 표면의 음향조도를 측정하여 기록(조도에 영향을 주는 레일 유지보수 작업을 수행하지 않았을 경우 측정 시 한 달 이내의 측정값을 취할 수 있음)한 후 필요시 보정한다.

⑤ 주파수 분석기로부터 델타 값(주파수 분석을 수행하는 시간 간격)은 0.02초로 설정하여 시간 이력 데이터를 저장하고 Fig. 6과 식 (1), (2)를 이용해 L_{max} , L_{eq, T_p} , TEL, SEL을 산정한다.

$$L_{eq, T} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt \right) dB \quad (\text{식 1})$$

$$L_{eq, T_p} (TEL) = 10 \log \left[\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt \right] dB \quad (\text{식 2})$$

여기서 $T : t_2 - t_1$, T_p : 측정통과시간 간격, t_1 : 차량 진입시간 t_2 : 차량 통과시간, $p(t)$: 순간음압, p_0 : 기준 음압($20 \mu Pa$)

Fig. 6. Example of time setting range in time history for L_{eq} calculation.

Fig. 7. Performance test position and test scene before and after installation.

⑥ 설치 전/후에 대한 TEL의 차를 산정하고 레퍼런스 마이크로폰에서 분석된 설치 전/후차를 보정하여 소음저감장치의 저감량을 평가한다.

4.1.2. 설치/미설치구간 동시측정 평가방법

장기모니터링을 위해서는 측정시기, 계절 및 차종에 대한 오차를 최소화해야만 한다. 이를 위해 설치/미설치 구간을 동시에 측정하여 평가를 하는 것이 좋다. 장기모니터링 평가방법으로 동시측정 방법을 선택했으나, 동시측정 방법은 선로의 궤도나 지형 등에 대한 오차가 있을 수 있다. 이와 같은 오차를 줄이기 위해 설치/미설치 구간을 인접되게 하고, 동일한 곡선도 및 지형 그리고 레일이음매나 분기기가 없는 곳을 선정하였다. 한편 장기모니터링을 통한 상대비교를 위해 레퍼런스 마이크로폰을 두어 선로조건, 차종별, 시기별에 따른 발생소음특성을 파악하여 보정하였다. 측정된 자료에 대한 분석은 설치 전/후 평가방법과 동일하나, 설치된 곳과 미설치된 곳을 선정하는데 있어 동일한 환경조건을 갖는 개소를 선정해야하고, 설치/미설치 구간을 동시에 측정한 자료로 평가하는데 차이가 있다.

5. 성능검증결과

5.1. 설치 전/후 성능검증결과

설치 전/후 성능평가를 위해서는 설치 전 측정을 수행 후 그 장소에 설치를 하고 설치 후 측정해야 한다. 본 연구에서는 재설계된 소음저감장치에 대해 설치 전/후 측정을 수행 해 현장적용성능을 검증하였다. 이를 위해 재설계된 소음저감장치를 호남고속철도 테스트베드 구간에 2017년 12월~2018년 2월까지 현장부설을 하였으며, 위치는 전라북도 정읍시 상평동에 인접한 호남고속철도 STA.132k990~133k340, L=350 m, T1(하)로 정하였다. 한편 소음저감장치를 설치하기 전인 11월 2일에 설치 전 측정을 하였으며, 설치 후 측정은 설치가 완료된 직후인 2월 27일에 진행하였다. 평가위치는 Fig. 5에서 제시된 선로에서 25 m 떨어진 지점을 포함하여 Fig. 7과 같이 선로중심에서 25 m 이격된 지점의 1.2 m와 3.5 m 높이를 추가로 선정하였다.

설치 전/후 고속열차가 200 km/h 이상으로 운행 시 기준 음원(Reference microphone)의 변동 폭이 적은 고속철도 차량 10대를 평균하여 삼입손실을 비교한 결과, 25 m 이격된

Table 8. Insertion loss of noise reduction device before/after installation

Item	25 m distance form track	
	H=1,2 m	H=3,5 m
Insertion loss(dB)	3,9	4,3

*Reference Reports No. of NKM-17-0210

Fig. 8. Noise level spectrum according to time history before/after installation.

Fig. 9. Comparison of frequency spectrum with and without noise reduction device.

지점에서 높이 1.2 m와 3.5 m에서 Table 8과 같이 소음저감능이 각각 3.9 dB와 4.3 dB로 평가되었다. 열차가 해당 구간을 통과 시 시간이력에 따른 소음도 스펙트럼은 Fig. 8에 나타내었으며, 이를 통해 설치 전/후 소음도의 차이가 확연하게 나타나는 것을 알 수 있었다.

한편 500k~2k Hz 주파수대역의 소음저감을 설계목표로 하였는데 Fig. 9에 나타난 바와 같이 해당 주파수 대역의 소음감소 효과가 뚜렷한 것이 확인되었다.

5.2. 장기모니터링 성능검증결과

2014년에 종료된 400 km/h급 고속철도 인프라 연구에서는 개발된 400 km/h급 고속철도 소음저감용 소음저감장치의 현장적용성능을 평가하기 위해서 호남고속철도 STA. 116 km480~880 하선(T1)에 부설된 테스트베드를 이용하였다. 장기모니터링은 HEMU-430X 열차를 포함해 호남선에서 운용되는 고속철도를 대상으로 속도대역별 열차통과 소음(TEL)을 이용하여 설치구간과 미설치구간의 소음레벨

Fig. 10. Long-term monitoring test location and test scenes.

(a) Sort by train type

(b) Sort by measurement season

Fig. 11. Long-term measurement results by train type and season.

(a) 300 km/h KTX

(b) 300 km/h SRT

(c) 400 km/h HEMU

Fig. 12. The noise level according to the time history for each vehicle type.

차를 Fig. 10과 같이 평가하였다.

본 현장적용성능 평가에서는 설치 후 2년 6개월이 지난 시점부터 2016년 5월~2018년 5월까지 2년간에 걸쳐 소음저감성능에 대해 장기모니터링을 실시하였다. 소음저감성능은 시기 별로 수차례에 걸쳐 차종과 열차속도 별로 반복 측정하였다. 측정된 자료를 분석하고 보정을 통한 평가결과, Fig. 11과 같이 300 km/h~400 km/h 속도대역의 KTX, SRT, HEMU 등 모든 차종에서 3 dB 이상의 소음저감성능을 보였으며, 시기에 따라서도 변동이 없이 성능이 나타나는 것을 확인하였다. 차량종류별 시간이력에 따른 소음레벨선도는 Fig. 12에 나타내었으며, Table 9에서와 같이 소음저감장치 설치 후 5년이 경과한 시점에서도 3 dB 이상

준히 소음저감성능을 갖는 것을 확인하였다.

6. 결론

호남고속철도, 원주강릉고속철도 그리고 SRT 개통 등과 함께 고속철도 열차 운행량이 증가하고 있으며 이로 인해 소음으로 고통 받는 곳이 늘고 있다. 또한 3차 국가철도망 구축계획으로 일반철도 230 km/h 고속화 개량 및 250 km/h 급 고속화 일반철도 신설 계획이 추진되고 있으며, 300 km/h에서 350 km/h 이상의 증속에 대해서도 검토를 하고 있다. 이에 따른 환경소음이 증가할 것으로 예견되고 있는

Table 9. Performance test result of noise reduction device through long-term monitoring

Item		Train type	Velocity [km/h]	Train passing noise level(Tp, [dB(A)])				Insertion loss [IL, dB]	
				without installation		with installation			
				H=1,2 m	H=3,5 m	H=1,2 m	H=3,5 m	H=1,2 m	H=3,5 m
1st	1	San Cheon	266,7	76,1	78,0	72,0	74,4	4,1	3,6
	2	San Cheon	283,5	76,8	78,4	72,5	75,0	4,3	3,4
	3	San Cheon	264,7	73,1	75,4	69,7	72,4	3,4	3,0
	4	San Cheon	288,0	77,9	80,1	74,6	77,1	3,3	3,0
2nd	1	San Cheon	272,7	77,0	72,5	79,0	75,2	4,5	3,8
	2	San Cheon	274,8	79,0	74,5	80,8	77,5	4,5	3,3
3rd	1	SRT	257,1	76,2	77,6	72,6	74,7	3,6	3,0
	2	San Cheon	254,9	80,1	81,1	75,5	77,9	4,6	3,2
	3	SRT	262,8	75,0	76,6	71,2	73,6	3,8	3,0
	4	SRT	292,7	78,0	79,9	73,6	76,3	4,4	3,6
	5	SRT	260,9	74,4	77,1	71,1	73,7	3,3	3,4
	6	San Cheon	248,3	78,0	79,7	74,0	76,4	4,0	3,3
	7	SRT	236,1	73,5	75,4	69,4	71,7	4,1	3,7
	8	San Cheon	246,6	79,1	80,6	74,9	77,0	4,2	3,6
	9	San Cheon	264,7	76,2	77,6	72,4	74,2	3,8	3,4
	10	HEMU	100	66,9	68,8	63,1	65,3	3,8	3,5
	11	HEMU	300	72,5	74,7	69,0	71,4	3,5	3,3
4th	1	KTX	263,1	74,3	75,9	70,1	72,6	4,2	3,3
	2	San Cheon	264,7	76,1	78,2	72,5	75,2	3,6	3,0
	3	SRT	269,7	75,5	78,0	72,1	75,0	3,4	3,0
	4	S.C.	266,7	77,2	79,5	72,7	75,4	4,5	4,1
	5	KTX	297,4	75,9	78,6	72,6	75,2	3,3	3,4
	6	SRT	266,7	74,9	77,9	71,7	74,8	3,2	3,1
	7	KTX	254,0	74,3	76,7	71,2	73,7	3,1	3,0
	8	KTX	254,0	71,0	73,4	68,0	69,9	3,0	3,5
	9	SRT	276,9	74,4	77,3	71,4	74,0	3,0	3,3
	10	SRT	276,9	74,6	77,3	71,6	74,2	3,0	3,1
5th	1	KTX	273,9	73,1	68,7	74,9	70,9	4,4	4,0
	2	San Cheon	276,9	73,2	69,4	75,3	72,2	3,8	3,1
	3	KTX	268,6	73,9	69,6	75,8	72,3	4,3	3,5
	4	SRT	288,0	75,2	70,8	77,2	74,2	4,4	3,0
	5	San Cheon	248,3	75,3	70,9	77,1	73,6	4,4	3,5
	6	KTX	273,9	73,9	69,8	75,3	72,2	4,1	3,1
	7	San Cheon	266,7	77,3	72,9	79,0	75,6	4,4	3,4
	8	KTX	268,6	74,1	70,4	75,8	72,8	3,7	3,0

며, 기존 방음시설물의 효과를 보완하기 위한 기술은 반드시 필요할 것으로 판단된다. 이 같은 추세에 부응하기 위해 본 연구에서는 철도 방음시설물 관련 방음벽이 설치된 연장, 신설예정에 따른 설치가 필요한 개소, 노후방음벽 교체 개소 등 방음벽 현황에 대한 조사를 실시하여 결과를 제시하였다. 또한 실질적으로 소음을 저감하기 위해 본 연구 1 단계에서 개발된 소음저감장치에 대해 내구성 및 안전성 등을 장기모니터링 하여 5년이 지난 시점에서도 성능이 유지되는 것을 검증하여 현장이 가능하도록 하였다. 무엇보다

도 본 연구에서는 1단계 연구에서 파악된 400 km/h 고속철도차량인 HEMU- 430X를 포함한 국내 고속철도 소음특성에 적합하게 1단계 소음저감장치를 튜닝하고 호남고속철도에 현장 부설하여 성능을 평가하고 검증을 완료해 상용화할 수 있는 터전을 마련하였다. 따라서 본 연구를 통해 기존방음시설물의 성능을 보완할 수 있는 기술은 향후 국내 외적으로 환경소음 문제를 해결하는데 널리 활용될 것으로 기대된다.

References

1. Thompson, D., *Railway Noise and Vibration: Mechanisms, Modelling and Means of Control*, 1st ed., Oxford Elsevier Ltd., UK, (2009).
2. KRISS, "Development of High-speed Rails Noise Reduction Technologies," KRISS-98-083-IR (1998).
3. KRRI, "A Study on the Effective Reduction Methods for Railroad Noise and Vibration," KRRI-RND-00-41(2000).
4. KAIA, "Environmental acoustic noise & vibration core technology development for 400 km/h high speed railway operation," R&D12PRTD-B056522-04 (2015).
5. KAIA, "Development of integrated monitoring system for infrastructure and improvement of noise-reduction device using test-bed of Honam high speed railway," R&D17RTRP-C114169-02 (2018).
6. Mellet, C., "High speed train noise emission : Latest investigation of the aerodynamic/rolling noise contribution," *J. Sound. Vib.*, **293**(3~5), 535~546(2006).
7. Kim, J. T., "Installation effect on noise reducer for railway traffic noise," *J. Korean Soc. Railw.*, **10**(1), 145~149(2007).
8. Kim, C. H., "A study on the test method for noise reduction devices installed on the noise barrier," *Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng.*, **20**(9), 60~62(2010).
9. Je-Won Yoon, "A study on the development of a noise reduction device installed at the top of noise barrier for the 400km/h class high-speed railroad," *Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng.*, **23**(9), 823~830(2013).
10. Chul-hwan Kim, "Test Method for Evaluating Properties of Materials Used in Noise Reducing Device Installed on the Noise Barriers," *The korean society for noise & vibration engineering, Spring Conference*, 813~814 (2012).
11. ISO 3095, "Railway applications - Acoustics - Measurement of noise emitted by raibound vehicles," (2005).
12. Ministry of Environment No. 2015-85, "Test standard for noise and vibration process," (2010).
13. Jun-Ho Cho, "Suggestion of assessment height for noise measurement according to the vertical radiation characteristics of railway noise," *J. Environ. Impact Assess.*, **23**(1), 29~37(2014).