400 km/h 고속철도 환경소음저감을 위한 선로 변 벽체 상단장치개발에 관한 연구

A Study on the Device Installed on the Barrier for The Environmental Noise Reduction in 400 km/h High Speed Railway

장강석^{*} · 김영찬 · 서효선 · 최찬용^{*} · 박준홍^{**}

Kang Seok Jang[†] · Young Chan Kim · Hyo Sun Seo · Chan Young Choi^{*} · Jun Hong Park^{**}

유니슨테크놀로지(주) · *한국철도기술연구원 · **한양대학교 기계공학부

Unison Technology Co., Ltd · *Korea Railway Research Institute

**Department of Mechanical Engineering, Hanyang University

(Received November 21, 2017; Revised December 8, 2017; Accepted December 12, 2017)

Abstract : Recently, the speed of high-speed railway has been rapidly increase 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. In order to operate the high-speed railway in accordance with the design speed, noise reduction technology should be developed to meet the noise characteristics of high-speed railway. And it is important to develop the prediction technology by grasping the noise radiation characteristics. In order to meet these requirements, in recent years, infra-research for 400 km/h high speed railway has been conducted. Reliable noise prediction and noise reduction techniques have been developed through this study. This paper is concerned with wind pressure safety and noise performance evaluation of the newly developed 400 km/h noise reduction device. The wind pressure safety and The noise performance of the developed device was confirmed by this paper.

Key Words : 400 km/h High Speed Railway, Noise Reduction Performance, Wind Pressure Safety

요약 : 고속열차의 설계 및 운행기술이 발전하면서 고속철도의 운행속도가 빠르게 증속되고 있다. 반면 증속 시 발생하는 소음으로 인해 고속철도 연변의 주거지역 등에서는 많은 소음문제가 발생하고 있으며, 고속철도 소음에 대한 민원도 지속적인 증가추세에 있다. 향후 고속철도가 원활히 설계속도대로 운행되기 위해서는 고속철도의 방사소음특성에 적합한 소음예측 기술 및 저감기술이 개발되어야 한다. 이와 같은 요구에 부합하기 위해, 400 km/h 고속철도 인프라 연구가 수년에 걸쳐 진행되었다. 이 연구를 통해 신뢰성을 갖는 고속철도 소음예측평가 기술이 개발되었고, 현재 소음저감기술의 단점을 극복하기 위한 핵심방음장치가 개발되었다. 본 연구의 궁극적인 목적은 고속철도 환경소음을 줄이기 위해 개발된 선로 변 벽체 상단에 설치되는 상단장치의 소음성능평가 및 풍압안전성 검증에 관한 것이다.

주제어 : 400 km/h 고속철도, 소음저감성능, 풍압안전성

1. 서론

국내에서 철도환경소음에 대한 연구는 1990년대부터 시작하여 간헐적으로 수행되었으며, 한국철도기술연구원을 중심으로 정부와 호남고속철도 그리고 원주강릉선 개통을 앞두고 활발한 연구가 수행되고 있다. 환경소음과 관련해서도 다수의 연구가 진행되어왔으며, 대표적으로 고속철도 소음 저감 기술 개발(1997~1998),¹⁾ 철도소음진동의 효율적 저감 방안 연구(1997~2000),²⁾ 고속철도 400 km/h 운행을 위한 환경소음 저감 핵심기술 개발(2010~2015),³⁾ 철도 소음/진동 저감기술개발(2012~2018) 등이 있다. 한편, 고속철도를 안전하면서도 보다 빠르게 하는 것이 전 세계적인 목표이며 Fig. 1과 같이 중국에서는 상업운행속도 394 km/h를 자랑한 바 있다. 국내에서도 400 km/h급 고속철도 차량인 HEMU-430X와 400 km/h 운행을 위한 인프라 시험선로가 호남고속철도 구간에 구축되어 있고, 현재도 시험운전을 진행하고 있다. 반면 열차의 속도가 증속될수록 환경소음은 크게 발

생하게 되며, 300 km/h에서 400 km/h로 증속되는데 약 6~7 dB의 소음이 증가되는 것으로 알려져 있다.⁴⁾

그러나 고속철도 속도증가 추세에 따라 높아지는 환경소음을 저감하기 위해서는 저소음차량을 개발하여 문제를 해결하는 데는 한계가 있으며, 기존 선로 변 벽체(방음벽 포함)의 높이를 증가시켜 소음문제를 해결하는 것도 여러 가지 제약사항으로 인해 쉽지만은 않다. 고속철도 속도증가

Fig. 1. Development of high-speed railway.

[†] Corresponding author E-mail: jks@unisontg.com Tel: 041-577-3457 Fax: 041-577-3458

에 따른 방음벽 높이 증가를 최소화하기 위한 대안으로 연구단계에서 제안된⁵⁾ 선로 변 방음벽 벽체 상부에 설치하여 회절음을 줄이는 상단장치나 궤도에 설치하여 슬래브 반사 소음을 저감하는 슬래브도상 흡음블럭 개발을 진행하여, 최근 호남고속철도 시험구간에 부설을 완료하였다. 본 연구에서는 400 km/h 고속철도 소음을 줄이기 위해서 개발된 벽체 상단장치에 대해 호남고속철도 운행구간에서 지속적인 모니터링을 통해 소음저감성능을 검증하고, 벽체 상단에 설치됨으로 인해 우려되는 풍압에 대한 예측과 실측하여 검증하였다. 풍압에 대한 예측은 PowerFlow 3.5 c를 이용하였으며, 예측 값을 확인하기 위해 호남고속철도 시험선로에 설치된 벽체 상단시설에 풍압센서를 설치하여 실측을 수행하여 구조안정성을 검증하였다.

2. 고속철도 용 벽체 상단장치개발

400 km/h 고속차량인 HEMU-430X이 경부고속철도에서 시운전 시 125 Hz 주파수대역의 저주파성분 소음과 500~2000 Hz 주파수 대역에서의 소음값이 높은 것으로 분석되었다. 이러한 측정분석결과를 바탕으로 저주파성분 및 고주파 성분의 소음을 모두 저감할 수 있는 상단장치설계에 대한 연구를 수행하였다. 연구를 통해 음의 간섭원리에 근거한 내부격자구조를 이용해 저주파성분을 저감시키고, 400 km/h 고속철도에 소음원에 적합하게 외곽형상 및 회절각을 조절한 상단장치를 개발하였다. 간섭원리에 근거한 내부격자 설계는 Fig. 2와 같이 간섭주파수가 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz에 튜닝되도록 내부구조를 결정하였다.

소음저감장치의 성능검증을 위해 시제품을 제작하기 전 소음해석기법을 이용하여 성능예측을 수행하였다. 해석방법은 2차원 경계요소법(BEM) 중간 간섭법(indirect method)을 이용하였다.⁶⁾ 이때 소음저감장치 설치 전후의 감음량은 옥외 및 현장시험과의 비교평가를 위해 현장여건과 동일하게 설정하였다. 한편 시제품 평가의 경우 소음저감장치 설치 후의 높이가 설치 전에 비해 0.5 m 높아지는데, 이러한 높이 증가에 따른 소음저감효과의 증가현상을 고려해 평가를 해야 한다. 본 연구에서는 높이증가 효과를 고려하기 위해 도로교통연구원⁷⁾에서 연구한 바와 같이, 소음저감장치 설치 후에 대한 예측 및 평가 시에는 일반방음벽의 예측시보다 음

$L_{125\text{Hz}} = 0.68 \text{ m}$, $L_{250\text{Hz}} = 0.34 \text{ m}$, $L_{500\text{Hz}} = 0.17 \text{ m}$, $L_{1000\text{Hz}} = 0.085 \text{ m}$

Fig. 2. Initial shape design using resonance principle.

(a) Initial shape development with simulation

(b) Lab. test & Anechoic lab. test

(c) Certified performance test & Filed test

Fig. 3. The step summary of the process for developing new noise reduction device.

원 및 수음점 높이를 소음저감장치 높이(0.5 m)만큼 높이 가정한 후 예측 및 평가를 수행하여 높이 증가효과를 방지하였다. Fig. 3(a)와 같이 다양한 형상에 대한 시뮬레이션을 통해 Lab. test에 필요한 소음저감장치 내부형상을 도출하였으며, 도출된 내부격자구조 및 외부형상들에 대해 Fig. 3(b)처럼 무향실 실험을 수행하여 가장 효과가 좋은 내부격자구조와 외부형상을 찾아내었다. 최종적으로는 Fig. 3(c)와 같이 선정된 소음저감장치에 대해 성능확인만을 위한 옥외시험 후 상단흡음을 결정하고, 호남고속철도 개통 전 현장 스피커시험을 통해 3.5 dB(A)의 성능을 확인하였다.⁸⁾

3. 소음저감성능 및 풍압안전성 평가방법

3.1. 소음저감성능 평가방법

국내외적으로 철도소음을 측정하고 평가하는 방법으로 국제규격인 ISO 3095⁹⁾가 활용되고 있으며, 민원지역에서의 소음한도에 대한 평가방법으로 국내에서는 소음진동공정시험기준¹⁰⁾을 사용하고 있다. 방음시설에 대한 평가를 위해서는 철도소음의 높이별 방사특성을 고려한 평가지점 선

Fig. 4. The noise performance evaluation position.

정이 중요하며, 선로의 궤도, 지형(성토구간, 깎기구간, 둔기구간 등), 측정시기, 계절, 차량종류 등 다양한 환경에 따라 편차를 보일 수 있다. 본 연구에서는 설치/미설치 구간을 동일구간에서 동시에 측정하여 평가분석 하였으며, 차량 종류와 속도대역 별로 구분하고 아래의 측정방법을 사용하였다.

- 1) 측정현장에 관련한 내용작성(목적, 구간, STA, 궤도형식, 노반 현황, 기상조건, 일시 등)
- 2) Fig. 4와 같이 측정위치를 선정함(ISO 3095에서는 이격거리 25 m, 높이 3.5 m 제안)
- 3) 열차 주행 시 열차의 소음도 데이터를 취득(B&K 3560 C), 열차종류, 통과시간 등을 기록.
- 4) 레일 표면의 음향조도를 측정하여 기록(조도에 영향을 주는 레일 유지보수 작업을 수행하지 않았을 경우 측정 시 한 달 이내의 측정값을 취할 수 있음)
- 5) 주파수 분석기로부터 델타값(주파수 분석을 수행하는 시간 간격)은 0.02초로 설정하여 시간 이력 데이터를 저장하고 Fig. 5와 식 (1), (2)를 이용해 $L_{eq,Tp}$, TEL을 산정함.¹¹⁾

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

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

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($20\mu Pa$), $L_{eq,Tp}$: 측정시간 T 내에서 시간에 따라 변화하는 대상음과 동일한 평균 제곱 음압을 갖는 연속 정상음의 음압레벨, $L_{eq,Tp}$: 차량이 임의의 지점에 진입하여 통과하는 시간 T_p 내에서 시간에 따라 변화하는 대상음과 동일한 평균 제곱 음압을 갖는 연속 정상음의 음압레벨이다.

3.2. 풍압안전성 시뮬레이션 및 평가방법

선로 연변에 설치되는 시설의 경우 구조문제가 발생할 경우 상당히 심각한 결과를 초래 할 수 있다. 본 연구에서는 구조안정성을 만족하는 부재치수 산정을 위해 보수적이지만 선로 변 철도방음벽 시설물 설치에 따른 설계하중에 고속열차가 400 km/h로 주행 시 상단장치에 작용하는 풍압을 합산하였다. 설계하중으로 계산한 후 Fig. 6과 같은 상단장치의 구조부재를 선정하였다. 한편 고속열차가 400 km/h로 운행 시의 풍압을 산정하기 위해 풍동실험을 통해 시뮬레이션에 필요한 설계변수를 도출한 후, 수치시뮬레이션을 통해 시험시공구간에 개발된 상단장치를 적용했을 때 상단장치에 작용하는 풍압을 산정하였다.

Fig. 5. Example of time setting for equivalent noise calculation in the train passing time history.

Fig. 6. Devices developed considering design load pressure.

3.2.1. 풍압산정을 위한 시뮬레이션 및 결과

풍압에 대한 시뮬레이션 커널은 2 방정식 RNG 난류 모델과 결합된 Lattice Boltzmann Method (LBM)로 알려진 수치 체계를 기반으로 한 PowerFLOW 3.5c를 이용하였으며, 이 기법을 이용하여 400 km/h 고속철도가 벽체구간을 통과할 때 발생하는 압력변동을 산정하였다. 열차의 모델은 단순화 하여 가정하였고, 전두부의 각도는 45도로 주었다. 방음벽 상단장치의 풍압은 골조물의 면 데이터를 이용하여 3초 동안의 데이터를 평균해 계산하였다. 속도경계층의 분포를 확인한 결과, Fig. 7과 같이 전두부와 후두부에서 압력파가 발생하였다. 이를 통해 열차의 전두부와 후두부가 지나갈 때 상단장치에 가해지는 압력의 크기가 크다는 것을 확인하였다. 상단장치에 가해지는 압력해석 결과, Fig. 8과 같이 상단장치의 하부(point 3)보다 정면부(point 1)에 걸리는 압력이 가장 크고 풍압은 0.0056 kgf/cm²로 나타났다.

Fig. 7. Pressure layer distribution at 400 km/h speed.

Fig. 8. The pressure acting on each point of development device.

Fig. 9. Measurement system for wind pressure analysis.

3.2.2. 풍압안전성 평가방법

설계단계에서 400 km/h 속도의 열차풍압에 대한 구조적 안정성을 구조해석과 유동해석을 통하여 평가하였다. 검증을 위한 측정분석시스템은 Fig. 9와 같이 Accelerometer(속도), Microphone(음압), Strain gage(변위), Wind pressure(풍압) 등을 기록 분석할 수 있는 LMS SCADAS Mobile(벨기에)를 사용하였으며, 풍압센서는 계측범위가 lpsi-6.89kPa, electrical connector-10-32인 PCB 106B52를 사용하였다.

이와 같은 계측시스템을 이용하여 HEMU-430X 운행 시 상단장치에 작용하는 열차풍압을 측정하고 평가를 수행하였다.

4. 평가결과

4.1. 소음저감성능 평가결과

400 km/h 급 고속철도인 HEMU-X 운행 시 Fig. 10과 같이 설치구간과 미설치구간의 동시 현장측정시스템을 구축하고, 2015년 1월부터 2017년 9월까지 소음저감성능을 확인하기 위한 모니터링을 Fig. 10에 나타낸 바와 같이 수행하였다.

성능평가결과 Table 1 및 Fig. 11과 같이 170~414 km/h의 속도대역에 걸쳐서 선로 중앙 25 m (H = 1.2 m, H = 3.5 m)에서 평균소음 저감량은 TEL 3.9 dB(A)로 평가되었다.

Fig. 12와 같이 HEMU-430X의 소음특성은 63~125 Hz와 500~2000 Hz가 지배적인 것으로 평가되었다. 한편, 고속철도가 300 km/h에서 400 km/h 증속 시 약 6~7 dB(A)의 소음이 증가하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 방음벽과 상단장치의 영향을 받지 않는 높이(8.0 m)에서 측정된

Fig. 10. Measurement sight for performance test.

Table 1. Measurement results for performance test

Velocity (Km/h)	Without area (TEL, dB(A))		With area (TEL, dB(A))		Noise reduction [TEL, dB(A)]	
	H=1.2 m	H=3.5 m	H=1.2 m	H=3.5 m	H=1.2 m	H=3.5 m
170	70.6	71.5	65.5	67.2	5.1	4.3
229	74.2	75.9	69.7	72.0	4.5	3.9
248	76.1	78.9	71.6	74.5	4.5	4.4
367	85.8	89.3	81.4	84.2	4.4	5.1
375	85.7	88.8	80.8	83.3	4.9	5.5
385	85.1	88.3	81.0	84.6	4.1	3.7
386	85.7	89.2	81.8	84.8	3.9	4.4
400	85.2	88.6	81.4	84.7	3.8	3.9
414	87.8	92.0	83.5	86.8	4.3	5.2

Fig. 11. The comparison results of train passing time history.

Fig. 12. The noise frequency characteristics at 400 km/h speed.

속도대역 별 총 32개의 측정자료)를 이용하여 Fig. 13과 같은 $y = 79.80458 + 0.06505X$ 의 회귀 식을 얻었으며, 300 km/h에서 400 km/h로 증속할 때 TEL 5~6 dB(A) 정도가 상승하는 것을 확인하였다.

Fig. 13. The noise level per speed range of HEMU-430X, (TEL, O.A. Freq. 31.5~10 kHz).

4.2. 풍압안전성 평가결과

400 km/h 인프라 시험선로가 구축되어 있는 호남선 시험 구간에서 Fig. 14와 같이 풍압센서를 설치하고 HEMU-430X 운행 속도 별로 개발된 상단장치에 작용하는 풍압을 실측하였다.

HEMU-430X가 400 km/h 운행 시 Fig. 15와 같이 0.6 kPa의 압력이 측정되었으며, 수치해석을 통해 도출된 0.56 kPa와 유사한 결과를 얻었다. 현재 “철도방음시설물 풍압관련 설계기준(2015)”에서 가장 높은 곳은 여수 및 속초지역에 적용되는 2.0 kPa이고, 설계기준에 열차풍압을 더해 2.6 kPa이다. 실제 태풍 등 큰 풍압이 있을 때는 열차가 속도를 낮추어 운행하기 때문에 태풍 시 열차에서 발생하는 풍압은 크게 문제가 되지 않을 것으로 판단된다.

한편, 도로교통연구원에서 제한하는 “방음벽 상단 소음저감장치 품질기준”에서도 최대등급 하중이 3.4 kPa이다. 본

Fig. 14. Measurement sight for wind pressure.

Fig. 15. The comparison results of wind pressure time history.

Fig. 16. The numerical analysis for structural design.

Fig. 17. Test view of the wind pressure safety.

연구에서는 철도와 도로 모두 적용 가능하도록 3.4 kPa 이상의 하중에 견디는 상단장치를 개발하기 위해 Fig. 16과 같은 시뮬레이션을 통해 구조부재의 치수를 결정하였다.

또한 본 연구에서는 “방음벽 상단 소음저감장치 품질기준”에서 제시하는 시험방법에 따라 Fig. 17과 같은 시험을 실시하였다. 시험결과, 3.6 kPa의 하중에서도 15.2 mm(허용기준 50.0 mm 이하) 처짐을 보여 풍압안전성에 만족하는 것을 시험을 통해 확인하였다.

5. 결론

1) 400 km/h 용 선로 변 벽체 상단장치의 소음저감성능을 호남고속철도 STA. 116k560~780에 부설하고, 다년간 모니터링한 자료를 분석한 결과 설치 전/후 TEL 3.9 dB(A)의 소음저감성능을 갖는 것을 확인하였다.

2) 400 km/h 고속철도 선로 변 벽체(높이 4.5 m)에 설치되는 상단장치에 작용하는 풍압을 RNG 난류 모델과 결합된 Lattice Boltzmann Method (LBM)로 예측하고 실측을 통해 검증한 결과, 상단장치에 600Pa 정도의 풍압이 작용하는 것으로 평가되었다.

3) 본 연구를 통해 HEMU-430X가 300 km/h에서 400 km/h로 속도를 높여 운행할 때 약 TEL 5~6 dB(A)의 소음이 증가하는 것을 확인하였다.

4) 본 연구를 통해 400 km/h 고속철도 소음저감성능 및 풍압에 대한 구조안전성이 검증된 상단장치는 향후 국내외 고속철도 증속 시 효율적인 소음저감대책으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgement

이 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원(17RTRP-C114169-02)에 의해 수행되었습니다.

KSEE

References

1. KRISS-97-110-IR, “Development of High-speed Rails Noise Reduction Technologies,”(1998).
2. KRRI, “A study on the effective reduction methods for railroad noise and vibration,”(2000).
3. UNISON TECH., “Environmental acoustic noise & vibration core technology development for 400km/h high speed railway operation,”(2015).
4. Mellet, C., “High speed train noise emission : Latest investigation of the aerodynamic/rolling noise contribution,” *J. Sound and Vibrat.*, **293**(3~5), 535~546(2006).
5. Kim, J. T., “Installation effect on noise reducer for railway traffic noise,” *J. Korean Soc. Railway*, **10**(1), 145~149(2007).
6. Anon., “SYSNOISE Rev.4.4A Manual,” NTT, Leuven(1992).
7. Kim, C. H., “A study on the test method for noise reduction devices installed on the noise barrier,” *Trans. Korean Soc. Noise & Vibrat. Eng.*, **20**(9), 60~62(2010).
8. Yoon, J.-W., “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,” *The Korean Soc. Noise & Vibrat. Eng.*, **23**(9), 823~830(2013).
9. ISO 3095, “Railway applications - Acoustics - Measurement of noise emitted by railbound vehicles,”(2005).
10. Ministry of Environment No. 2015-85, “Test standard for noise and vibration process,”(2010).
11. Cho, J.-H., “Suggestion of assessment height for noise measurement according to the vertical radiation characteristics of railway noise,” *The Korean Soc. Environ. Impact Asses.*, **23**(1), 29~37(2014).