

소형잔향실을 이용한 고속철도 차량 구조재의 투과손실 연구

A Study to Estimate Transmission Loss of HST using a Small Scale Reverberation Chamber

김태민[†] · 김정태¹

Kim Tae-Min · Kim Jeung-Tae

Abstract The method to reduce interior noise of train was being studied. To improve transmission loss of train is one of the best way to reduce interior noise. But, the estimate to transmission loss requires lots of the commercial costs. In this study, the method to estimate transmission loss of high speed train is proposed using a scale reverberation chamber. The result shows that a transmission loss estimated using small scale reverberation is similar to that using huge reverberation chamber. The transmission loss estimated based on small scale reverberation chamber can be optimal with respect to the commercial coasts.

Keywords : Small reverberation chamber, Transmission loss, Reverberation time

초 록 고속철도 차량의 고속화, 경량화와 더불어 승객의 실내 소음을 줄이기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 고속철도 차량의 실내 소음을 줄이는 방법으로 차량 구조물의 차음 성능을 향상시키는 연구가 중요시 되고 있으나 투과손실 연구는 많은 경제적 비용이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 소형 잔향실을 이용하여 고속철도 차량의 투과손실을 측정할 수 있는 방법을 연구 하였다. 연구 결과 소형 잔향실을 이용한 차음성능 연구가 대형 잔향공간을 이용한 투과손실 결과 대비 신뢰성 있는 결과를 도출 하였다.

주요어 : 소형 잔향실, 투과손실, 잔향시간

1. 서 론

현재 철도 기술은 철도차량의 고속화, 경량화와 함께 승객의 승차감과 쾌적성을 고려한 승객의 편의성 차원에서도 많은 연구가 진행 되고 있다. 우리나라의 고속철도 차량의 실내소음 기준은 시속 350km로 주행 시 개활지에서 71dB(A), 터널 통과 시 75dB(A)인데 이는 미국의 American Public Transit Association이 제시한 시속 300km 주행 시 개활지에서는 70dB(A), 터널 통과 시 80dB(A) 기준에 비해 더 엄격한 수준이다[1].

현재 개발 중인 분산형 차량의 경우 내부 구조물이 기존 차량과는 달리 철에서 알루미늄 재질로 변경되었다. 이를 통해 차량의 경량화에 따른 성능은 향상되었지만 차음 측면에서 보면 경량화 추세가 반드시 좋은 것은 아니다. 철재 구조물이 알루미늄 구조물로 바뀌면서 무게는 약 1/3가량 줄었지만, 질량 법칙이 성립되는 구간에서는 소음 저감 능력이 약 10dB 감소하는 역효과가 나타난다. 이는, 질량 법칙이 성립되는 구간의 차음성능은 질량이 클수록, 주파수가 높아질수록 차음성능이 증가하는 구간이기 때문이다. 이러한 차량의 강도 개선과 차음의 약점을 보완하기 위해서는 차체

의 설계과정부터 많은 연구와 분석이 필요하다[2].

또한 동력 분산형 차량은 각 객차마다 동력원이 분산 배치되어 있기 때문에 차음 성능이 약해진 열차의 실내 소음도는 더욱 커질 것으로 예상된다. 즉, 고속철도 차량의 실내 소음은 열차 실내를 둘러싸고 있는 차체의 차음 성능이 증가하면 자연스럽게 감소하게 됨으로 고속철도 차량의 실내소음 저감을 위해서는 우수한 차음 성능을 가진 열차 차체 구조를 필요로 하게 된다[3].

철도차량의 바닥재 및 벽은 넓은 판재의 적층구조로서 차량 전체를 시험하기에는 현실적으로 한계가 있으며, 시편을 구성하여 규격시험을 하기위해서도 공간과 비용의 문제가 발생한다. ISO에서는 차음성능을 측정하는 잔향실의 체적을 50m³ 이상으로 설계할 것을 권장하고, 시편크기가 8.5~2m²으로 규정하고 있어 차음재 개발에 상당히 비효율적이다. 따라서 본 연구에서는 철도차량 구조물의 투과손실 측정을 위하여 측정하고자 하는 시편을 기준으로 하부 음원실과 상부 수음실로 이루어진 간이 혹은 소형 잔향실을 구성하여 차음성능을 측정하였다[4,5].

잔향실은 소리가 외부로 유출입이 없도록 설계 되어야 하며 음향학적으로 잔향실이 갖추어야 할 가장 큰 특징은 확산음장을 만족 해야한다는 것이다. 확산음장이란 음향에너지가 공간적으로 균일하게 분포되어 있는 음장을 말하며, 일반적으로 높은 모드밀도음장에서 수많은 반사파들의 중첩에 의하여 형성된다. 확산음장은 불규칙한 벽에서 여러 번 반

[†]교신저자 : 홍익대학교 기계공학과 음향 진동 실험실
E-mail : wowbranden@hotmail.com

¹홍익대학교 기계 시스템 디자인 공학과

사되어 형성 될 수 있다. 즉 벽에서 반사되는 음파의 전파되는 거리가 길수록 음파의 전파되는 거리가 길어져 확산음장과 거의 유사한 거동을 보인다. 그러므로 저주파수의 음파는 동일한 체적의 잔향실에서 고주파의 음파보다 확산음장 특성이 좋지 않다.

본 연구에서는 소형 잔향실을 이용하여 고속철도 차량의 차음 성능을 측정 할 수 있는 방법을 연구 하였으며 이 결과에 대한 신뢰성을 검토 하였다.

2. 본 론

2.1 소형 잔향실의 구성 및 음향 특성

본 연구에서 사용한 소형 잔향실은 구조물(음원실, 수음실, 지지 구조물), 음원 발생 장치, 센서 회전 장치, 음원실 승강 장치와 시스템 제어 장치로 구성 되어 있으며 그림 1에 나타나 있다.

압출재의 투과손실 측정 시 소음이 발생하는 장치로, 음원실 바닥에 두 개의 스피커가 서로 다른 방향을 보면서 설치되어 있다. 음원실과 수음실에는 센서 회전 장치가 설치되어 있어 각 공간 안의 위치 별 소음도를 측정할 수 있도록 설계되어 있다. 소형 잔향실의 재원은 표 1에 나타나 있다.

Table 1. Specifications of scaled reverberation chamber

	Source room	Receiver room
Specification	Steel 4.5t, Urethane	Steel 4.5t, Urethane
Area	2.75 m ²	4.3 m ²
Volume	0.37 m ³	0.62 m ³

실험에 사용되는 시편의 크기는 최소 720×620mm²에서 최대 가로, 세로 +10mm까지 설치 가능하고, 실험 적정 크기는 740×640mm²이다. 그림 2는 사용 가능한 시편의 크기를 나타낸다[6].

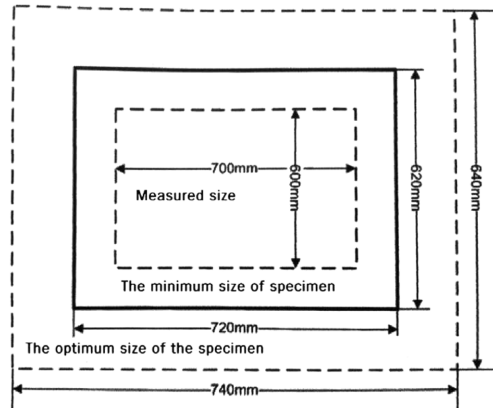


Fig. 2 Range of specimen size

2.2 고속철도 차량의 투과손실 계측

그림 3은 소형 잔향실을 이용한 잔향시간 측정 플로우 차트를 보여 준다. 소형 잔향실을 사용하여 평판의 투과손실을 계산하기 위해서는 우선 수음실의 흡음률 측정 시험이 선행적으로 수행되어야 한다. 이를 위해서 잔향시간을 측정하여 수음실의 흡음률을 계산한다. 잔향시간이란 소음이 60dB 감소되는데 걸리는 시간으로 본 연구에서는 소음실에서 백색 잡음을 발생시켜 B&K 사의 microphone (4189A, 4190) 과 신호 분석 툴인 “PULSE”를 이용하여 수음실에서의 1/3 옥타브 밴드의 잔향시간을 측정하였다[7].

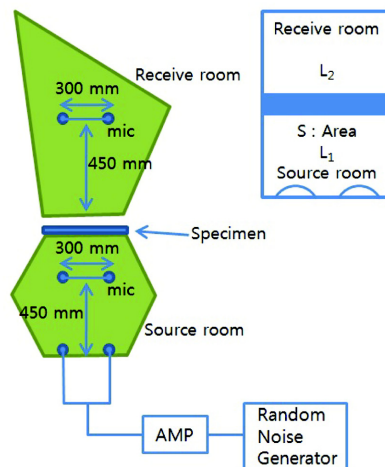
수음실에서 측정 된 1/3옥타브 밴드의 잔향시간을 이용하여 수음실의 흡음률을 계산하게 된다.

$$\text{수음실흡음률}(\bar{\alpha}_0) = \frac{0.161 \times V}{S \times T_0} \quad (1)$$

- V : 수음실의 체적
- S : 수음실의 표면적
- T₀ : 시편부착 전 측정된 잔향시간



(a) Scaled reverberation chamber



(b) Schematic of scaled reverberation chamber with experimental set up

Fig. 1 Scaled reverberation chamber

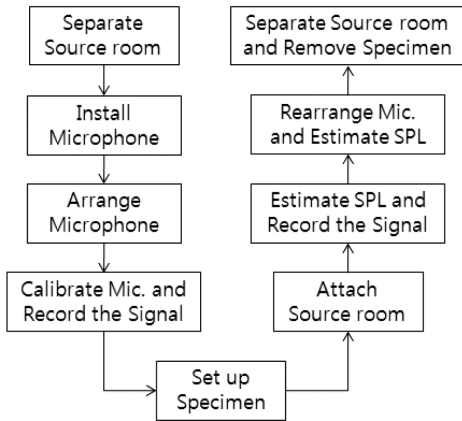


Fig. 3 Experimental flow chart

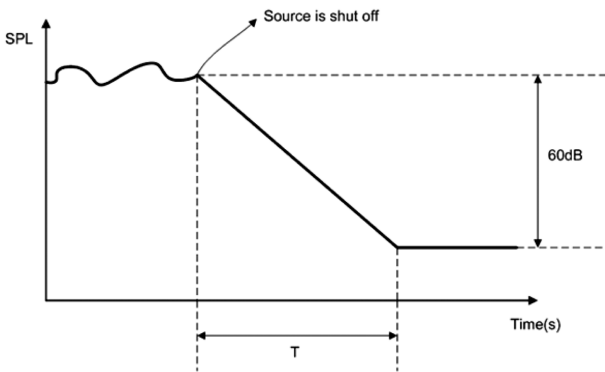


Fig. 4 Reverberation time

시편이 부착되었을 때의 흡음률은 시편이 부착되기 이전의 흡음률과 잔향시간에 의해서 계산한다. 시편 부착 후의 잔향 시간 측정을 위해 시편을 음원실과 수음실 사이에 장착하여 측정한다. 시편 가장자리로 음이 새 수가 있으므로, 최대한 소리가 새는 것을 방지하도록 해야 한다. 잔향실법에 의해서 시편의 흡음률은 다음 식 2에 의해 계산한다.

$$\alpha_r = \frac{0.161V}{S} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) + \bar{\alpha}_0 \quad (2)$$

- S : 시편의 면적
- T : 시편부착 후 잔향시간
- T_0 : 시편부착 전 잔향시간
- $\bar{\alpha}_0$: 수음실 흡음률

소형 잔향실을 이용한 투과손실량 측정은 음원실과 수음실의 주파수별 음압을 측정하여 계산하게 된다. 본 연구에서는 200Hz부터 4000Hz까지 1/3옥타브 밴드로 측정하였고, 20초간 측정된 음압을 평균하여 계산 하였다. 투과손실 값은 수음실과 음원실의 음압과 수음실의 흡음률을 이용하여, 다음 식에 의해 계산한다[6].

$$\text{투과손}(TL) = L_{p1} - L_{p2} + 10 \log(S/\alpha_2) \quad (3)$$

- L_{p1} : 음원실 음압
- L_{p2} : 수음실 음압

- S : 시편의 면적
- α_2 : 수음실의 흡음력

소형 잔향실을 이용한 투과손실 측정은 실제 잔향실이 아닌 축소 제작 된 잔향실이기 때문에 보정값이 필요하게 된다. 보정 값을 이용한 대상 시편의 투과손실은 다음의 식을 이용한다.

$$TL_{field} = \text{실험값} - C_f \quad (4)$$

$$TL_{diffuse} = \text{실험값} - C_d \quad (5)$$

TL_{field} : 필드 입사음에 대한 실험결과

$TL_{diffuse}$: 랜덤 입사음에 대한 실험결과

따라서 하나의 실험데이터에 대하여 두 개의 차음값을 구할 수가 있게 된다.

2.3 주파수 극한

밀폐된 공간 내에서 확산음장을 이루기 위한 저주파수 극한은 Scharton이 제안한 다음의 식으로 구할 수 있다[8].

$$F_{low} = \left\{ \frac{c^3 M T_R}{8.8 \pi V} \right\}^{1/2} \cong 485 \left\{ \frac{M}{S \alpha_{sab}} \right\} \quad (6)$$

여기서, T_R 은 잔향시간, V 는 음원실의 부피, S 는 음원실 내부의 면적을 나타내고, α_{sab} 는 Sabine 흡음률을 나타낸다. 또한, M 은 Modal overlap Factor로서 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$M_i = w \eta_i n_i(w) \quad (7)$$

Scharton이 제안한 식에서 안정된 확산음장을 얻기 위해서는 M 은 1/3이상이어야 한다. 이 식에 의하면 같은 면적의 음원실에 대해 흡음률을 높이면 저주파수 한계가 낮아지는 것을 확인할 수 있다. M 을 1/3로 가정하고 음원실의 저주파수 극한을 계산하면 929Hz, 수음실의 경우 저주파수 극한을 계산하면 875Hz를 나타낸다.

2.4 1t 시편을 이용한 소형 잔향실의 보정값 도출

소형 잔향실의 보정값은 1t 시편을 사용하여 도출하였다. 소형잔향실의 음원실과 수음실 사이에 시편을 위치시킨 뒤 음원실에서 화이트 노이즈를 발생시켜 각 공간의 음압을 측정하였다. 그림 5는 위 식(4)와 (5)를 사용한 1t 시편의 투과손실값과 이론값을 보여준다. 여기서 필드 입사음(Field-incidence)에 대한 차음값은 면에 대하여 0~78°의 각도로 입사파가 들어올 때의 투과파의 비율을 평균을 의미하며, 랜덤 입사음(Random-incidence)에 대한 차음값 (dB)은 면에 대하여 0~90°의 각도로 입사파가 들어올 때의 투과파의 비율을 평균한 것을 의미한다.

보정 값은 질량법칙만을 따르는 시편을 통하여 실험값을 구한 후 이론값과의 차이로 정의되며 다음의 식으로 도출 할 수 있다[9,10].

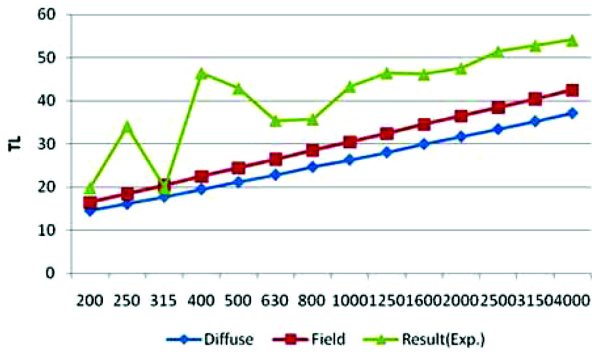


Fig. 5 Transmission loss of plat (1t)

$$C_f = \text{실험값} - R_f \quad (8)$$

C_f : 필드 입사음에 대한 보정값
 R_f : 필드 입사음에 대한 차음 이른값

$$C_d = \text{실험값} - R_d \quad (9)$$

C_d : 필드 입사음에 대한 보정값
 R_d : 필드 입사음에 대한 차음 이른값

하나의 기준 시편에 대하여 앞의 두 식에 의해 보정 값이 만들어지면 다른 시편에 대하여 동일한 보정 값을 사용하게 된다. 이 값은 소형 잔향실의 특성 값으로 재질이 바뀌어도 사용이 가능하다. 표 3은 본 연구에서 사용한 소형 잔향실의 보정 값을 나타낸다.

Table 3 Compensation value of scaled reverberation chamber

Frequency (Hz)	Field (C_f)	Random (C_d)
200	3.23	5.17
250	15.63	17.95
315	-0.65	2.02
400	23.94	26.96
500	18.41	21.72
630	8.96	12.55
800	7.18	11.06
1000	12.87	16.99
1250	14.07	18.42
1600	11.57	16.16
2000	11.03	15.83
2500	13.02	18.01
3150	12.35	17.54
4000	11.57	16.96

2.5 고속철도 차량 구조재에 적용

소형 잔향실을 이용하여 고속철도 차량의 바닥 차체 구조물에 대한 투과손실을 실험적, 해석적으로 측정 하였다. 그림 6은 고속철도 차량 바닥의 투과손실을 보여준다[11-13].

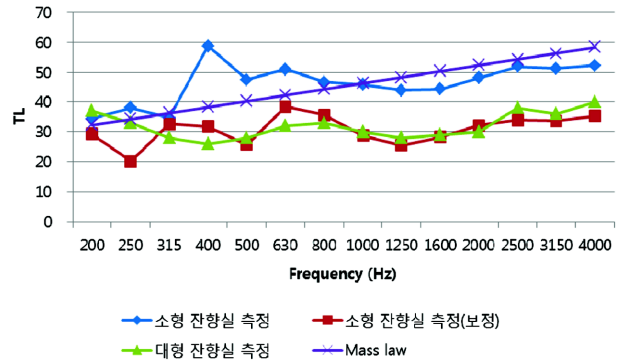


Fig. 6 Transmission loss of HST

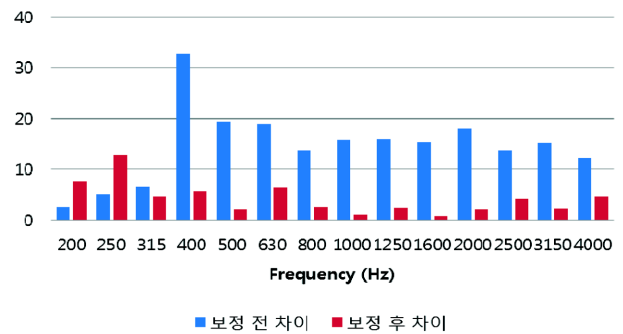


Fig. 7 Comparing of transmission loss of HST

그림에서 볼 수 있듯이, 소형 잔향실을 이용한 고속철도 바닥 구조물에 대한 투과손실량을 2.3장에서 도출한 보정값으로 보정을 하면 대형 잔향실에서 측정한 투과손실량과 매우 유사한 결과를 보이는 것을 확인할 수 있다.

그림 7은 대형 잔향실에서 실험적으로 측정한 투과손실량과 소형 잔향실 결과와의 차이를 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 보정 전의 소형 잔향실을 이용한 투과손실 결과는 평균 14dB를 보이는 것을 볼 수 있다. 하지만 보정을 한 소형 잔향실 결과는 대형 잔향실을 이용한 투과손실 결과와 평균 3dB 차이를 보이는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 고속철도 차량의 구조재에 대한 투과손실을 측정 할 경우 소형 잔향실을 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 결 론

본 연구에서는 소형 잔향실을 이용하여 고속철도 차량의 구조물의 투과손실을 측정하는 방법에 대하여 연구하였다. 본 연구에서 사용한 소형 잔향실의 주파수 극한을 계산한 결과 대형 잔향실에 비해 높으며 이는 약 400Hz이다. 따라서 관심 주파수 영역이 이보다 적은 저주파 영역에 있다면 이를 고려한 소형 잔향실을 설계가 필요하다.

또한 소형 잔향실을 이용한 고속철도 투과손실 측정 결과 대형 잔향실을 이용한 측정 결과와 매우 유사한 결과를 도출 할 수 있었다. 따라서 경제적으로 용이한 소형잔향실을 이용하여 고속철도 차량의 투과손실을 측정 할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 홍익대학교 학술 조성비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- [1] K.J. Kim, S.S. Kim, J.K. Park (2008) Research on the Transmission Loss Analysis of the Honeycomb Structure's Floor Section, *Journal of the Korean Society for Railway*, 11(1), pp. 1-6.
- [2] W.K. Kim, J.T. Kim, G.J., Kim, S.H. Kim (2003) A Study on transmission Loss Characteristics of Honeycomb Structure, *Journal of the KSNVE*, 13(1), pp. 19-25.
- [3] T.M. Kim, J.T. Kim, J.S. Kim, S.Y. Kim (2010) Numerical Analysis of Transmission Loss Prediction in High Speed Trains, *Journal of the KSNVE*, 20(8), pp. 703-709.
- [4] Y.-H. Lee, H.-G. Kil, H.-M. Kim, J.-H. Song, S.-Y. Hong, N.-S. Kim, C.-W. Lee (2009) Study on Analysis of Sound Transmission Characteristics of Shipboard Panels Using a Scale Reverberation Chamber, *Proceedings of the KSNVE Annual Fall Conference*, pp. 611-612.
- [5] G.J. Kim, W.K. Kim, T.J. Yoon, J.T. Kim (2003) Calculation of Coupling Loss Factor for Small reverberation Ca bin using Statistical Energy Analysis, *Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference*, pp. 797-801.
- [6] G.J. Kim, S.S. Kim, G.H. Lee (2007) A Study of Transmission loss of Floor panel on HST, Final report.
- [7] B&K, Pulse User Manual.
- [8] J.K. Park (1999) Evaluation Method of the Transmission Loss using Small Reverberation Room, Master Thesis, Hong ik University.
- [9] W.K. Kim, J.T. Kim, S.H. Kim (2002) Evaluation of the Sound Transmission Loss of a Light Weight Honeycomb Structure, *Proceedings of the Korean Society for Railway Annual Spring Conference*, pp. 1316-1320.
- [10] W.K. Kim, J.T. Kim (2001) Evaluation Method of the Transmission Loss for Railway Vehicle Structures, *Proceedings of the Korean Society for Railway Annual Spring Conference*, pp. 155-161.
- [11] S.H. Kim, I.S. Paek, H.W. Lee, J.T. Kim (2008) Prediction Model of the Sound Transmission Loss of Honeycomb Panels for Railway Vehicles, *Journal of the Korean Society for Railway*, 11(5), pp. 465-470.
- [12] S.H. Kim, J.C. Park, J.N. Kim (2000) Sound Transmission Loss of Aluminium Extruded Panels for Railway Vehicle, *Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference*, pp. 662-668.
- [13] T.G. Seo, S.H. Kim, J.T. Kim, D.H. Song (2009) Core Structure Modification for the Control of Local Resonance Frequency band in an Aluminium Extruded Panel, *Proceedings of the Korean Society for Railway Annual Fall Conference*, pp. 1316-1320.

접수일(2011년 1월 27일), 수정일(2011년 2월 18일),
게재확정일(2011년 2월 18일)