한국소음진동공학회 2014년 추계학술대회

소형 잔향실의 확산 음장 보정 계수 측정 연구

The Study on Correction Factor of a Small Scale Reverberation Chamber to Estimate Transmission Loss

김태민† · 김다래‡ · 김정태*

Tae Min Kim, Da Rae Kim and Jeung Tae Kim

Key Words : Transmission Loss(투과 손실), Diffuse Sound Field(확산 음장), Reverberation Time(잔향 시간), Reverberation Chamber(잔향실), Mass Law(질량법칙).

ABSTRACT

Transmission loss of specimen is calculated by measuring energy of incident and transmission and using reverberant room of large size. But normal measurement of transmission loss has trouble because it is actually demanded that large area and specimen of certain size is satisfied with condition of diffused sound field. Especially, in case of mechanical component, interested frequency band is mid-frequency band between 500 ~ 2k Hz, and it is used to be available to minimize a reverberation chamber under conditions satisfying acoustic one because production of specimen for transmission loss measurement has limit. But, as in semi-reverberation room, it is difficult to satisfy condition of diffuse sound field and modification factor is applied to complement that. Correction factor when measuring transmission loss using semi-reverberation chamber is required accuracy because it works as main factor determining reliability of reuslts on transmission loss. In this study, it is analyzed that an effect on correction factor based on varying materials and sizes of specimens in order to deduction of it. Also It is confirmed that applied by elicited correction factor with actual railway vehicle's floor has reliability.

기 호 설 명

V : 수음실의 체적
S : 수음실의 표면적
α_r : 시편의 흡음률
s : 시편의 면적
T : 시편부착 후 잔향시간
T_0 : 시편부착 전 잔향시간
$\overline{\alpha_0}$: 수음실 흡음률
L_{p1} : 음원실 음압
L_{p2} : 수음실 음압
α_2 : 수음실의 흡음력
C_f : 필드 입사음에 대한 보정값
R_f : 필드 입사음에 대한 차음 이론값
C_d : 랜덤 입사음에 대한 보정값
R_d : 랜덤 입사음에 대한 차음 이론값
TL_{field} : 필드 입사음에 대한 실험결과
$TL_{diffuse}$: 랜덤 입사음에 대한 실험결과

† 교신저자 ; 정회원, 홍익대학교 음향진동실험실
E-mail : ktaemin@mail.hongik.ac.kr
Tel : 02-320-1438, Fax : 02-320-1113
‡ 발표자 ; 홍익대학교 음향진동실험실
* 홍익대학교 기계·시스템디자인공학과

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 350 km 로 주행 시 개활지에서 71 dB(A), 터널 통과 시 75 dB(A)인데 이는 미국의 American Public Transit Association이 제시한 시속 300 km 주행 시 개활지에서는 70 dB(A), 터널 통과 시 80 dB(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 10 dB 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 차체의 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 자연히 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 하기 위해서도 공간과 비용의 문제가 발생한다. ISO에서는 차음 성능을 측정하는 잔향실의 체적을 50 m^3 이상으로 설계할 것을 권장하고, 시편크기가 8.5 ~12 m^2 으로 규정하고 있어 차음재 개발에 상당히 비효율적이다. 따라서 본 연구에서는 철도차량 구조물의 투과손실 측정을 위하여 철도차량 바닥재 시편을 기준으로 하부 음원실과 상부 수음실로 이루어진 간이 혹은 소형 잔향실을 구성하여 차음성능을 측정하였다.[4,5]

잔향실은 소리가 외부로 유출입이 없도록 설계되어야 하며 음향학적으로 잔향실이 갖추어야할 가장 큰 조건은 확산음장을 만족해야한다는 것이다. 확산음장이란 음향에너지가 공간적으로 균일하게 분포되어 있는 음장을 말하며, 일반적으로 높은 모드 밀도음장에서 수많은 반사파들의 중첩에 의하여 형성된다. 확산음장은 불규칙한 벽에서 여러 번 반사됨으로서 형성 가능하다. 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 투과손실 측정 시 확산 음장 조건으로 가정할 수 있도록 보정하는 보정계수를 도출하였으며 기준이 되는 시편의 재료 및 크기에 따른 영향을 실험적, 해석적으로 분석하였다.

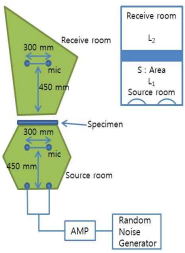
2. 소형잔향실을 이용한 투과손실

2.1 소형잔향실을 이용한 투과손실 측정방법

(1) 소형 잔향실의 구성 및 음향 특성

그림 1은 본 연구에서 투과손실을 측정하기 위해 사용된 소형 잔향실을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 소형잔향실은 음원실과 수음실이 상하로 위치하고 있으며 하부에 위치하는 음원실에는 음원 발생장치(스피커)가 설치되어 있다. 투과손실 측정 시 음원실 바닥에 서로 다른 위치로 설치되어 있는 두 개의 스피커가 음원을 발생시키도록 되어 있다. 음원실과 수음실의 소음을 측정하기 위해 각 공간 안에 센서 회전 장치를 설치하여 방향성을 고려하여 내부 소음을 측정 할 수 있도록 구성되어 있다.

(a) Scaled Reverberation Chamber



(b) Schematic of Scaled Reverberation Chamber with Experimental Set Up

Figure 1 Scaled Reverberation Chamber

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 720×620 mm^2에서 최대 가로, 세로 +10mm까지 설치 가능하고, 실험 적정 크기는 740×640mm^2이다. 그림 2는 사용 가능한 시편의 크기를 나타낸다.(6)

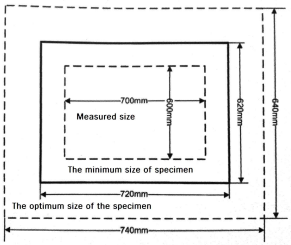


Figure 2 Range of Specimen Size

(2) 고속철도 차량의 투과손실 계측

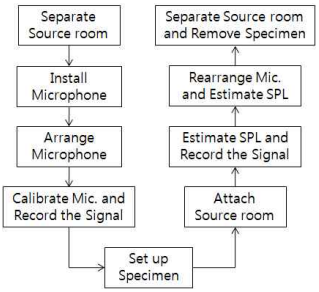


Figure 3 Experimental Flow Chart

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 60 dB 감소되는데 걸리는 시간으로 본 연구에서는 소음실에서 백색 잡음을 발생시켜 B&K 사의 microphone (4189A, 4190)과 신호 분석 툴인 PULSE 이용하여 수음실에서의 1/3 옥타브 밴드의 잔향시간을 측정하였다.(7)

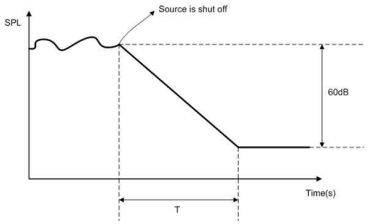


Fig. 4 Reverberation Time

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

$$\text{수음실 흡음률}(\overline{\alpha_0}) = \frac{0.161 \times V}{S \times T_0} \qquad (1)$$

V : 수음실의 체적
S : 수음실의 표면적
T_0 : 시편부착전 측정된 잔향시간

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

$$\alpha_r = \frac{0.161\,V}{s}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right) + \overline{\alpha_0} \qquad (2)$$

s : 시편의 면적
T : 시편부착 후 잔향시간
T_0 : 시편부착 전 잔향시간
$\overline{\alpha_0}$: 수음실 흡음률

소형 잔향실을 이용한 투과손실량 측정은 음원실과 수음실의 주파수별 음압을 측정하여 계산하게 된다. 본 연구에서는 200Hz부터 4000Hz까지 1/3옥타브 밴드로 측정하였고, 20초간 측정한 음압을 평균

하여 계산 하였다. 투과손실 값은 수음실과 음원실의 음압과 수음실의 흡음력을 이용하여, 다음 식에 의해 계산된다.[6]

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

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 소음원의 확산 음장 조건이 불완전할 가능성이 존재한다. 따라서 실험을 통하여 확산 음장 조건을 만족하는 음장 조건 보정값이 필요하게 된다. 보정 값을 이용한 대상 시편의 투과손실은 식 (4)를 이용한다.

$$TL_{diffuse} = \text{실험값} - C_d \quad (4)$$

$TL_{diffuse}$: 랜덤 입사음에 대한 실험결과

2.2 소형잔향실의 보정계수

(1) 소형잔향실의 보정계수 계산

투과손실을 측정하기 위해서는 확산음장 조건이 만족되어야 하지만 잔향공간을 축소하였기 때문에 확산 음장 조건이 불완전하다. 따라서 간단한 평판을 통하여 본 소형잔향실 장치를 이용한 투과손실 측정 후 이론값과 비교하여 보정계수를 구하게 된다. 즉, 보정 값은 질량법칙만을 따르는 시편을 통하여 실험값을 구한 후 이론값과의 차이로 정의되며 다음의 식으로 도출 할 수 있다.[8,9]

$$C_d = \text{실험값} - R_d \quad (5)$$

C_d : 랜덤 입사음에 대한 보정값
R_d : 랜덤 입사음에 대한 차음 이론값

이 값은 소형 잔향실의 특성 값으로 재질이 바뀌어도 사용이 가능하다.

(2) 기준 시편의 투과손실

본 연구에서는 소형잔향실의 보정계수를 도출하기 위하여 5가지 시편을 선정하여 보정계수를 도출하였으며 이 중 가장 단단한 재질인 3t 철판과 가장 연한 재질의 알루미늄 1t를 기준으로 하여 보정계수를 분석하였다. 보정계수 측정 실험에서는 소형 잔향실의 극한 주파수를 고려하여 500 Hz 이후부터 분석을 수행 하였다.[3]

Table 2. Spe

	Steel			Al	
두께 [mm]	1	1.6	3	1	2
면밀도 [kg/m^2]	7.8	12.48	23.4	2.7	5.4

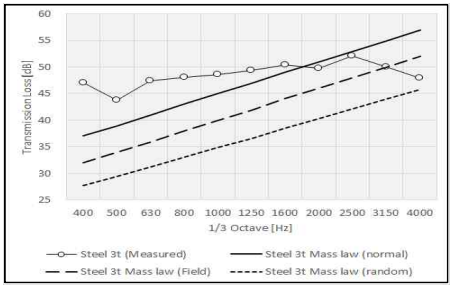


Figure 5 Transmission loss 측정결과 : Steel, t = 3 mm

그림 5와 같이 소형잔향실을 이용한 투과손실 측정 결과는 이론적인 질량 법칙과는 차이가 존재한다. 특히 본 연구에서 사용된 소형잔향실의 경우 음원실 하부에 위치한 스피커의 음원이 직접 시편에 입사되는 직접음 형태의 수직파가 형상을 많이 미치는 것으로 판단되며 그림과 같이 측정된 투과손실 결과가 수직입사음에 의한 질량법칙과 유사한 것을 확인 할 수 있다. 보정계수는 식 5를 통해 구할 수 있으며 각 시편에 대한 보정계수를 도출 하였다.

(3) 보정계수 도출

본 연구에서 대상으로 한 시편에 대해 보정계수를 정리하였다. 그림 6과 같이 보정값에 다음 식을 사용하여 정리하였다.

$$R_d = 20\log(k) \quad (6)$$

그림 6은 각 시편에 대한 보정계수를 나타낸다.

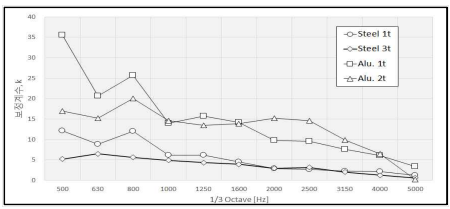
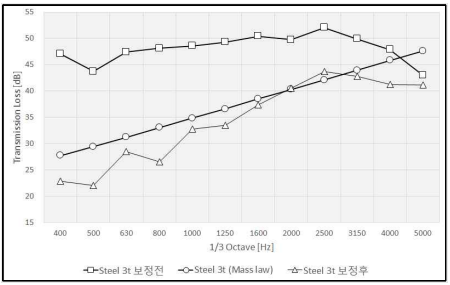
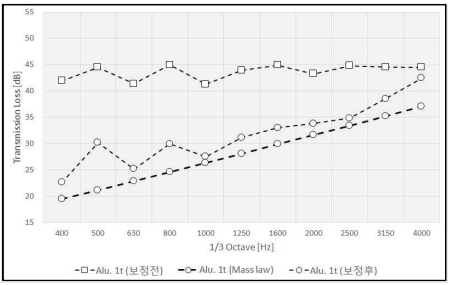


Figure 6 시편 종류에 따른 보정계수 k

그림에서 확인 할 수 있듯이 각 재료에 따라 저주파에서는 상이한 것을 확인 할 수 있으나 고주파로 갈수록 보정계수가 유사해짐을 확인 할 수 있다.



(a) Steel : t = 3 mm



(b) Aluminium : t = 1 mm

Figure 7 보정계수를 통한 투과손실 보정(그래프표식)

그림 7은 보정계수를 변경하여 투과손실을 계산한 결과를 나타낸다. 그림 7-(a)는 알루미늄 1 mm 시편을 이용한 보정계수를 사용하여 철 3 mm 시편의 투과손실 결과를 나타낸다. 반면 7-(b)는 철 3 mm 시편을 이용한 보정계수를 사용하여 알루미늄 1 mm 시편의 투과손실 결과를 나타낸다. 일반적으로 보정계수의 실험은 시편의 재질이 rigid한 ????

2.3 소형잔향실을 이용한 투과손실 측정

도출된 보정계수를 사용하여 실제 고속철도 차량의 바닥재 시편의 투과손실을 측정 후 보정작업을 수행하였다. 그림 8은 국내 운행 중인 고속철도 차량의 바닥재 해석 모델을 나타낸다. 바닥재 시편의 전산해석은 통계적 에너지 해석기법 상용소프트웨어인 VA ONE을 통하여 예측하였다.

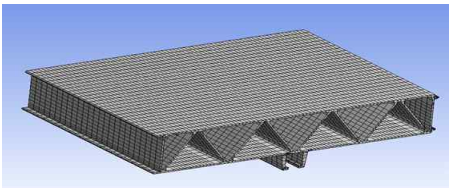


Figure 8 철도 차량의 바닥재 시편 해석 모델

그림 9는 소형잔향실을 이용한 철도 차량의 투과손실 측정 결과와 전산해석을 이용한 투과손실 예측 결과를 나타낸다. 그림에서 확인 할 수 있듯이 전산해석을 이용한 해석 결과와 비교적 유사한 파형을 갖는 것으로 분석되었다.

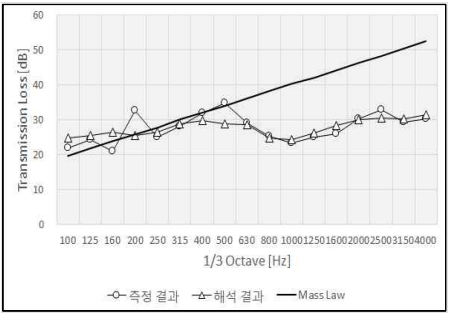


Figure 9 철도 차량 바닥 압출재의 투과손실

결과적으로 소형잔향실을 이용하여 비교적 신뢰성 있는 측정 결과를 얻을 수 있는 것을 확인 할 수 있으며 보정계수를 통하여 확산 음장 조건을 만족하는 것으로 판단된다. 추후 연구를 통해 이론적인 확산 음장 조건 만족 여부 및 전산해석을 이용한 보정계수를 결정하는 시편 재료의 주요 인자 도출 연구를 수행할 예정이다.

3. 결 론

본 연구에서는 소형잔향실을 이용한 투과손실 측정을 위한 기초 연구로서 투과손실 측정 방법을 정리하여 보정계수를 도출 하였다. 잔향실을 이용한 투과손실 측정은 확산음장 조건을 만족하여야 하지

만 소형 잔향실의 경우 확산 음장 조건을 만족하기는 어려움이 존재한다. 따라서 차음성능이 비교적 간단한 단일 시편을 통하여 투과손실 시험을 수행 후 이론값과 비교하여 보정계수를 도출하게 된다.

후 기

본 연구는 한국연구재단 기초연구사업의 “철도소음 예측 및 평가를 위한 상사모델 시험기법 연구(2014045600)”로 수행된 연구 결과의 일부입니다.

참 고 문 헌

(1) Kim, K. J., Kim, S. S., Park, J. K., 2008, "Research on the Transmission Loss Analysis of the Honeycomb Structure's Floor Section”, Journal of the Korea Society for Railway, Vol. 11, No. 1, pp. 1~6.

(2) Kim, W. K., Kim, J. T., Kim, G. J., Kim, S. H., 2003, "A Study on transmission Loss Characteristics of Honeycomb Structure", Journal of the KSNVE, Vol. 13, No. 1, pp. 19~25.

(3) Kim, T. M., Kim, J. T., Kim, J. S., Kim, S. Y., 2010, "Numerical Analysis of Transmission Loss Prediction in High Speed Trains", Journal of the KSNVE, Vol. 20, No. 8, pp. 703~709.

(4) Lee, Y.-H., Kil, H.-G., Kim, H.-M., Song, J.-H., Hong, S.-Y., Kim, N.-S., Lee, C.-W., 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) Kim, G. J., Kim, W. K., Yoon, T. J., Kim, J. T., 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) Kim, G. J., Kim, S. S., Lee, G. H., 2007, "A Study of Transmission loss of Floor panel on HST", Final report

(7) B&K, "Pulse User Manual"

(8) Kim, W. K., Kim, J. T., Kim, S. H., 2002, "Evaluation of the Sound Transmission Loss of a Light Weight Honeycomb Structure", Proceedings of the Korea Society for Railway Annual Spring Conference, pp.1316~1320.

(9) Kim, W. K., Kim, J. T., 2001, "Evaluation Method of the Transmission Loss for Railway Vehicle Structures", Proceedings of the Korea Society for Railway Annual Spring Conference, pp. 155~161.

(10) Kim, S. H., Paek, I. S., Lee, H. W., Kim, J. T., 2008, "Prediction Model of the Sound Transmission Loss of Honeycomb Panels for Railway Vehicles". journal of the Korea Society for Railway, Vol. 11, No. 5, pp. 465~470.

(11) Kim, S. H., Park, J. C., Kim, J. N., 2000, "Sound Transmission Loss of Aluminium Extruded Panels for Railway Vehicle", Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 662~668.

(12) Seo, T. G., Kim, S. H., Kim, J. T., Song D. H., 2009, "Core Structure Modification for the Control of Local Resonance Frequency band in an Aluminium Extruded Panel", Proceedings of the Korea Society for Railway Annual Fall Conference, pp. 1316~1320.