

고속철도 차량 벽면의 투과손실값 예측

Transmission Loss Prediction of the High Speed Railway's Wall Section

김관주[†] · 박진규^{*}

Kwanju Kim · Jinkyu Park

Abstract

The purpose of this study is to calculate transmission loss of the high speed railway's wall section accurately. Transmission loss measurement of ideal case i.e. the wall in the laboratory condition was carried out in first, which results were compared with those by statistical energy method. Transmission loss values of high speed railway calculated out by experimental method are compared with those from closed form solution. Commercial statistical energy analysis was also used to predict the outside pressure level using those measured transmission loss values. Simple SEA model could estimate reasonable exterior sound pressure level.

Keywords : Transmission Loss(투과손실), Sound Pressure Level(음압레벨), Sound Power Level(음향파워레벨), Statistical Energy Analysis(통계적 에너지 해석)

1. 서론

본 연구는 시제품으로 존재하는 고속철도 차량의 실차량 벽면의 투과손실 값을 정확히 예측할 수 있는 방법에 대해서 알아보았다. 시편의 정확한 투과 손실 값을 예측하기 위해서는 우선 ISO에서 정하는 잔향실 - 잔향실 방법, 혹은 2 마이크로폰을 시험편 전, 후에 쌍으로 배치한 ASTM E1050을 들 수 있겠다[1]. 그러나, 이 방법은 철도 차량 각 부품에 대해서는 적용 가능하겠으나, 조립 차량 전체에 대해서는 적용이 쉽지 않다[2]. 철도 차량의 경우, 실내-실외 공간을 각각 잔향 공간과 자유 공간으로 가정하여 벽체의 투과손실 값을 계산하였다. 그 예측 결과는 고속철도과제 1단계에서 개발된 투과손실 계산 프로그램인 T-LOSS 결과와 비교하였다[2.3]. 측정실험의 신빙성을 높이기 위하여 잔향 공간 - 잔향 공간으로의 가정이 가능한 일반 강의 실-벽체-강의실에 대한 실험을 통하여 측정 기법에 대한 신뢰도를 확인할 수 있었다. 실차량 철도차량 벽체의 투과손실값 계산의 경우는 음원의 크기는 소음원이 발생하는 내부에서의 측정된 음압을 이용하여 계산하였으며, 투과손실

값은 실험에 의한 측정값을 적용하였다. 그리하여, 실험과 해석에 의한 음압레벨과 투과된 파워를 비교하였다. 이로써 고속철도 차량의 차음재 관련 설계지원 자료를 마련하였다.

2. 벽면의 투과손실 측정 실험

2.1 벽면의 투과손실 측정 흐름

본 연구에서의 벽면 투과손실 값에 대한 실험과 해석은 다음과 같은 흐름도를 가지고 있다.

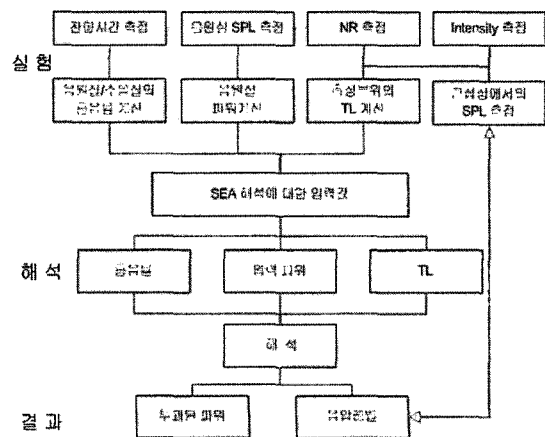


Fig. 1. Flow chart of calculating transmission loss of experiment and analysis for the railway

[†] 책임저자 : 회원, 홍익대학교, 기계시스템디자인공학과 교수
E-mail : kwanju@hongik.ac.kr
TEL : (02)320-1643 FAX : (02)320-1113
^{*} 홍익대학교, 기계공학과 대학원

2.2 두 개의 실내공간에 대한 투과손실 측정

모의 실험으로 두 개의 방 벽면의 투과 손실을 계산하였다. 해당 모델은 Fig. 2에 나타내었으며, 두 가지 실험 방법을 고안하였다. 첫 번째로 전체 벽면을 동일한 재질로 가정하여, 투과 손실 값을 측정하였으며, 두 번째로는 Intensity probe를 이용하여 이중의 차음재에 대한 개별 투과손실 값을 측정한 후 투과손실을 계산하였다. 첫 번째 방법의 경우 음원실과 수음실의 음압 평균값이 측정되었으며 이 방법은 SEA 해석에서의 세부 시스템에 대한 가정과 유사하다.

실험에 사용된 분석기는 B&K 시스템을 사용하였으며, 마이크론의 경우는 Rion 제품과 B&K 제품을 사용하였다. 음원실에서의 음향 가진은 무지향성 스피커(Nor 223)를 배치하여 100 Hz~5 kHz 대역에서 백색 잡음(White Noise)으로 가진하였다.

2.2.1 동일한 재질로 가정한 경우 벽면의 투과손실 측정

이 방법의 경우 음원실과 수음실은 확산음장으로 가정하였으며, 음원실과 벽면 그리고 수음실에 대한 세부 시스템의 에너지를 E_1 , E_2 그리고 E_3 로 지정하였다. 벽면에 의한 음향 파워의 흐름은 연성손실계수 η_{13} 로 표현되며, 투과손실 값에 대해서는 식 (1)과 같이 계산된다.

$$TL = NR + 10 \log \left(\frac{\pi A \cdot c}{12 \omega \eta_3 V_3} \right) \quad (1)$$

여기서, NR(Noise reduction)은 음원실과 수음실의 음압 레벨 차이를 나타내며, η_3 와 V_3 는 수음실의 내부 손실계수와 전체 부피 그리고 A는 벽면의 전체 면적을 나타낸다.

실험은 가장 먼저 잔향시간을 이용한 음향 공간의 내부 손실계수를 측정하였으며, 두 번째로 음원실과 수음실의 평균된 음압을 임의의 6개 지점에서 측정하여 벽면의 투과손실 값을 계산하였다. 두 개의 실내공간에 대한 투과 손실 값은 Fig. 3에 나타내었다.

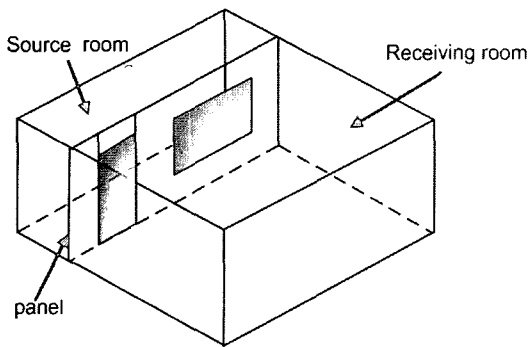


Fig. 2. Description of the lecture rooms

2.2.2 각 구성 부품에 대한 투과손실 측정

두 개의 실내 공간 사이 벽면은 Fig. 2에 나타난 것과 같이 중앙 유리창, 상단 유리창, 출입문 그리고 벽면으로 구성되어 있다. 이 경우에 대한 실험 방법은 음원실에서 음향 가진이 될 때 Intensity probe를 이용하여 각각의 재질에 대하여 투과되는 파워를 측정하여 투과손실 값을 예측하는 방법이다. 각각의 구성요소에 입사되는 파워와 투과되는 파워의 관계는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta W_t = \tau [\Delta W_{in}] \quad (2)$$

여기서, 투과된 음향 파워는 음향세기 측정에 의해서, 입사되는 파워는 음원실을 잔향 공간으로 가정하여 계산하였다. 먼저 중앙 유리창에 대해 실험을 진행하였으며, 제원은 Table 1에 나타내었다.

이 경우 실험과 질량법칙(mass law)에 대한 값을 비교해 보았다.

다음으로는 유리창 2가지 종류에 대해서 식 (2)를 이용하여 계산된 투과손실 값을 나타내었다.

실험 결과를 살펴보면 벽면의 투과손실 값이 가장 높으며 중앙 유리창, 출입문 그리고 상단 유리창의 순서로 크기가 측정되었다. 이것은 상단 유리창과 출입문으로 소음이 투과되는 주된 경로임을 나타낸다.

이러한 예측 결과에 대하여 벽면 전체의 투과손실 값을 계산하였으며, Fig. 6은 두 실험 결과를 비교하여 나타내었다.

첫번째 방법에 의한 투과손실 계산값이, 두번째 방법에 의한 예측값보다 500 Hz이상 영역에서 2~3 dB 더 크게 측정되었다. 이것은 첫 번째 실험의 경우 음원이 전파되어 수

Table 1. Properties of center glass

size(length×height×thickness)	2×0.885×0.003 m ³
mass per unit area	7.14 kg/m ²

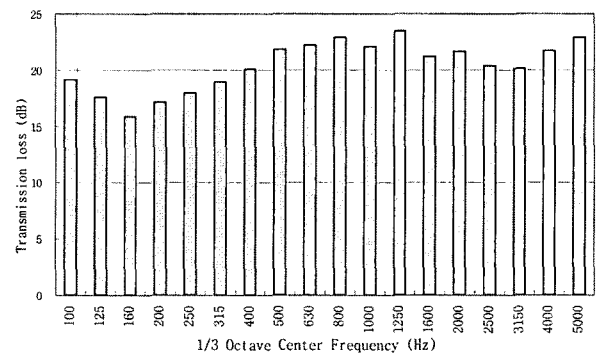


Fig. 3. Transmission loss of the lecture rooms

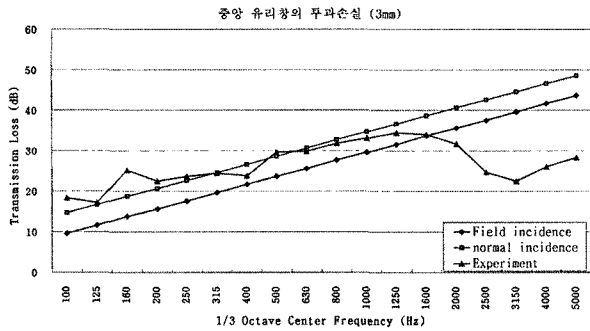


Fig. 4. Comparison Transmission loss values for experimental data and mass law

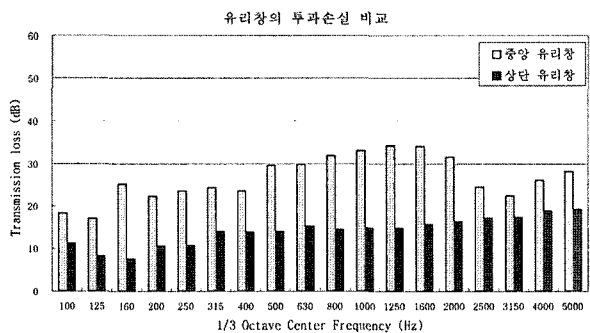


Fig. 5. Transmission loss values of center glass and upper glass

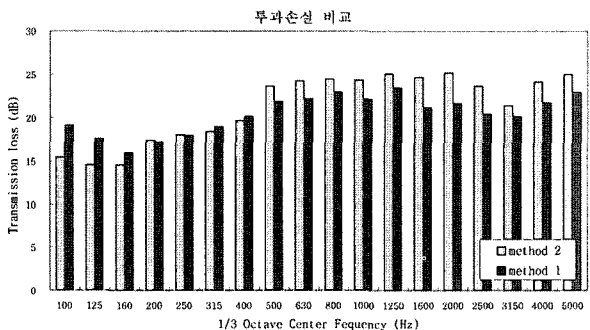


Fig. 6. Comparison of transmission loss by method 1 and method 2

음원으로 유입될 때 벽면에 대해서만 투과되어 전달되지 않고 측정 대상 이외의 경로를 통하여 누설된 음원의 영향으로 인해 두 번째 실험과의 차이를 생각해 볼 수 있다.

2.3 고속철도 벽면의 투과손실 값 측정

고속철도 객차 벽면의 투과손실에 대한 측정 실험은 두 개의 실내 공간 실험에서 나타내었던 두 번째 방법에 대하여 적용하였다. 이 경우에 대해서 실험에 적용된 측면 상부



Fig. 7. Measurement part of the passenger vehicle

와 측면 하부 그리고 유리창은 Fig. 7과 같다.

음원은 차량 내부에 무지향성 스피커를 이용하여 가급적 음원이 고르게 분포하며, 차량의 대칭면을 피하는 위치를 선정하여 가진하였다.

벽면의 투과손실 계산에서 차량 내부는 완전 잔향 공간, 외부는 자유 음장이라는 가정 하에 실내에서의 공간 평균된 음압과 대상 벽면 바깥 위치에서 음향 Intensity를 측정된 변수값을 이용하여 투과손실 값을 측정하였다. 그리고 측정된 값은 개발된 응용프로그램인 T-LOSS[3]에 의한 예측치와 비교 분석을 수행하였다.

2.3.1 측면재

차량의 벽면은 외부의 레일소음, 기계소음 및 공력소음을 가장 많이 차단하는 중요한 차음재이다. 이 경우 외측의 알루미늄 압출재가 차음에 가장 기여하고, 가운데의 강판, 내측의 허니콤 패널이 2차적으로 차음재 역할을 한다. 실험은 유리창을 중심으로 상부와 하부로 나누어서 진행하였다. 그리고 방사되는 음원은 모든 부분에서 동일한 파워가 입사된다고 가정하였다.

그 결과를 살펴보면 Fig. 8과 같이 실험에 의한 측면 상부와 하부는 비슷한 경향의 투과손실 값을 나타내었다. 그러나 예측치와 비교하였을 경우에는 315 Hz 이하 영역에서는 다소 낮게, 2 kHz 이상 영역에서는 다소 높은 경향을 나타내었다. 이러한 원인은 예측치의 경우 잔향-잔향 조건 가정, 질량 법칙의 한계 등과 측정하는 실제 조건에서 잔향-자유 음장 조건의 가정을 들 수 있다.

2.3.2 유리창

유리창은 차음에 가장 취약한 부분이다. 모델은 내, 외부

의 각각 2겹재로 접착된 구조를 가진다. 유리창 또한 측면재와 같은 방법으로 투과되는 파워를 측정하였으며, 결과는 Fig. 9와 같다.

실험치와 T-LOSS와의 결과를 살펴보면, 유리창의 경우도 전체적인 경향은 벽면과 비슷한 모습을 나타내고 있다.

2.3.3 벽면 전체

유리창을 포함하고 있는 벽면 전체에서의 투과손실 값을 예측해 보았다. 실험에서 측정된 측면재와 유리창의 평균

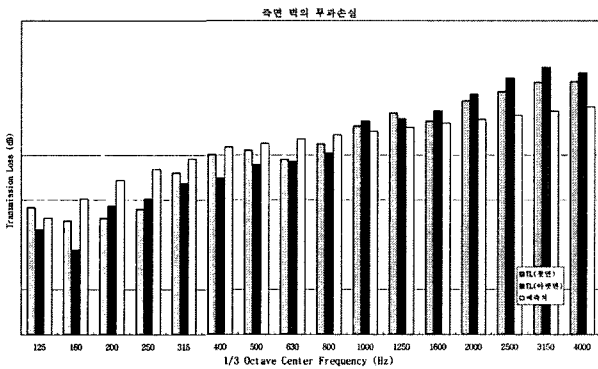


Fig. 8. Comparison of transmission loss magnitude for the side panels

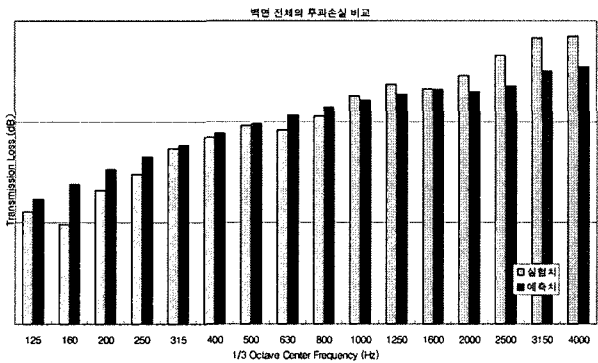


Fig. 9. Comparison of transmission loss magnitude for the glass panels

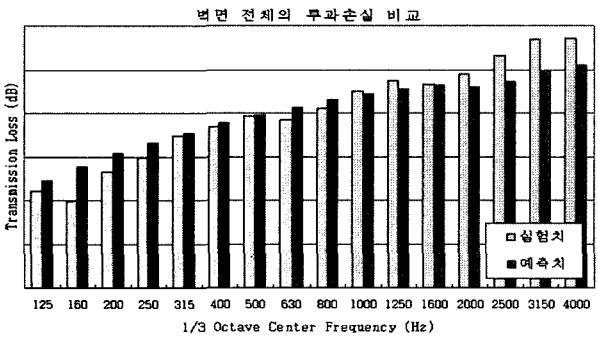


Fig. 10. Comparison Transmission loss of the total side wall

투과율을 구해 전체 투과손실을 계산하였다. 예측치의 경우에는 각각의 투과손실 값을 실험에서의 측정된 면적으로 가정하여 평균 투과율을 얻어 낼 수 있었다.

벽면 전체의 결과는 315 Hz~1.6 kHz에서 투과 손실값이 예측치와 실험치가 잘 일치하는 모습을 볼 수 있다.

3. SEA에 의한 전산해석

본 연구에서는 통계적 에너지 해석 프로그램인 AUTOSEA를 이용하여 모의 실험 및 고속철도 객차의 투과손실 해석 시 적용한 변수 값은 다음과 같다.

- 흡음률은 차량 내부의 잔향시간으로부터 계산
- 음향파워는 차량 내부에서 발생하는 음압으로부터 계산
- 투과손실은 실험으로부터 계산

3.1 두 개의 실내 공간에 의한 해석

두 개의 실내 공간에 대한 해석은 실험에서와 마찬가지로 두가지 방법에 대하여 모델을 다르게 적용하였다.

3.1.1 구조물이 없는 음향 공간 모델

첫 번째 실험의 모델은 두개의 음향 공간과 연결부의 투과 경로만 지정하였다. 이러한 모델의 해석은 Fig. 11의 왼쪽에서 볼 수 있듯이 음원실에 입력되는 음향파워가 실험에 의한 투과손실 값에 의해 수음실로 전달되는 해석이다.

첫 번째 모의 실험 결과의 해석을 살펴보면 음원실에서 투과된 음향 파워는 실험과 해석이 잘 부합되었으며, 수음실에서의 음압 레벨 또한 실험 결과와 일치하는 모습을 나타내었다.

3.1.2 구조물을 포함한 음향 공간 모델

두 번째 실험의 경우에 대한 해석은 4개의 세부 시스템에 대하여 모델링하였다. Fig. 11의 오른쪽은 음원실과 벽면, 벽면 근접장의 음향 공간 그리고 나머지 수음실 공간으로

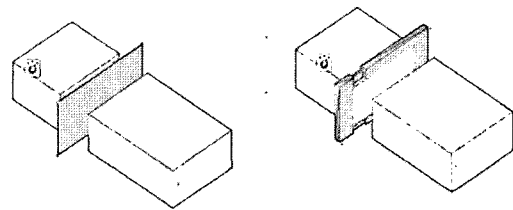


Fig. 11. Two sub-system(left) and Four sub-system(right) model for Autosea acoustic analysis

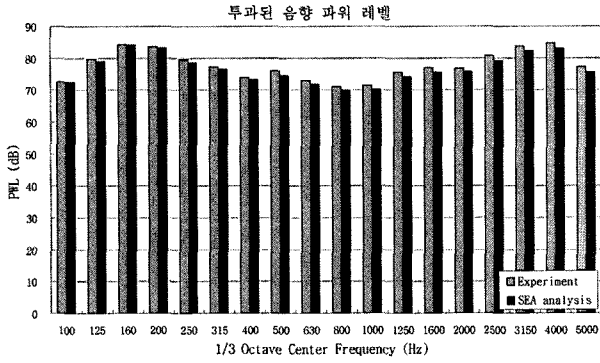


Fig. 12. Comparison transmitted PWL for SEA analysis and experimental data

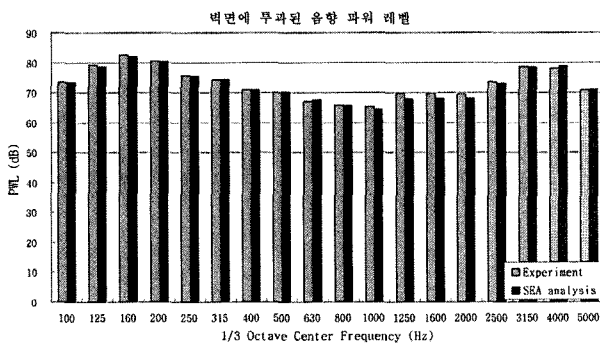


Fig. 13. Comparison transmitted PWL for SEA analysis and experimental data

연성된 경우이다. 실험에 의한 각각의 투과손실 값은 음원 실과 근접장이 벽면에 대해 연성된 조건을 나타낸다. 이 해석의 결과 또한 실험과 잘 부합되며, 벽면에 투과된 음향 파워레벨의 비교는 Fig. 13과 같다.

3.2 고속철도 차량의 내부 소음 해석

고속철도 차량의 해석에서 외부 음향 공간의 경우는 관심 부품의 투과손실 값의 영향을 살펴보기 위하여 실내 공간, 벽면 상부와 하부 그리고 유리창에 대한 근접장 위치 등으로 Fig. 14와 같이 모델링하여 나타내었다.

내부 공간은 차량 공간의 형태에 따라서 다양한 세부 시스템으로 구성되어 있으며, 외부 음향 세부 시스템은 근접 음장과 자유음장 영역으로 구성하여 모델링 하였다. 이러한 세부 시스템 사이에서 패널의 투과손실 값이 나타나고, 투과손실의 영향을 살펴보기 위하여 상대적으로 높은 투과손실을 갖는 천장과 대차 상부는 제외하고, 한쪽 측면벽을 상부 측면벽, 창문 하부 측면벽으로 구성하였다. 실험 조건과 동일하게 측면벽에 음향 가진을 실시하고 그 결과를 비교하였다.

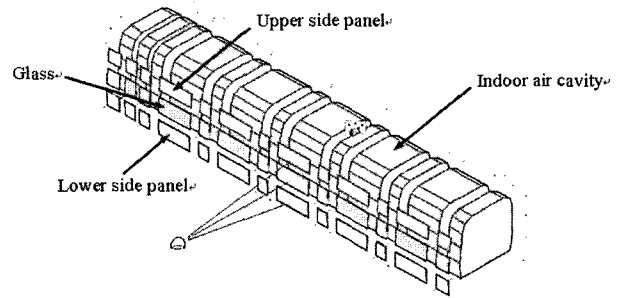


Fig. 14. SEA model of passenger vehicle

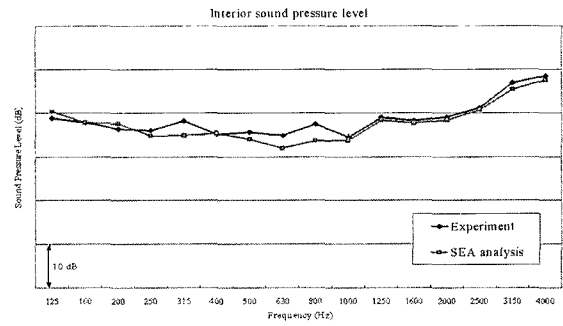


Fig. 15. Interior sound pressure level for SEA analysis and measured sound pressure level

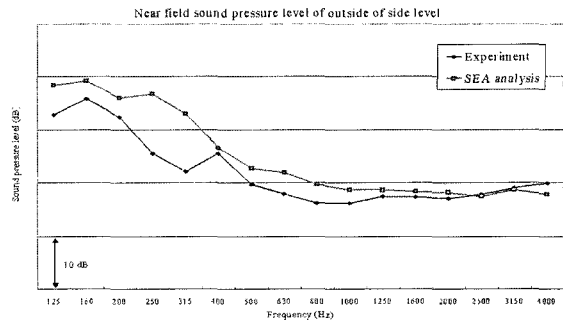


Fig. 16. Sound pressure level close to side panel by experiment and SEA analysis

Fig. 15은 객실 내에서의 SEA 음압 해석 결과와 음압 실험 결과를 비교한 것이다. 비교 결과 각 주파수 별로 3dB 이내의 오차 내에서 일치하는 것을 알 수 있다. Fig. 16에서는 객차의 외부 근접 음장에서 음압에 대해서 실험과 SEA 해석 결과를 비교한 것이다. Fig. 16에서 실험과 해석 결과의 차이는 SEA 해석에서는 공기 전달음만을 고려하였으며, 덕트와 같은 측면 틈새의 경로를 무시했으므로 발생하는 오차로 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 실험과 전산해석을 수행하여 두 개의 실내 공간과 고속철도 벽면의 투과손실 값에 대한 예측을 살펴보았다.

- (1) 두 개의 실내 공간의 경우는 SEA 기법을 이용한 벽면 전체의 투과 손실과 각각의 재질에 대한 투과손실에 대한 예측을 진행하였다. 그 결과 벽면 전체에 대한 측정 은 해당 벽면을 포함해 그 이외의 경로를 통하여 누설된 음원이 포함된 투과손실 계수의 값을 확인 할 수 있었다. 그 반면에 특정 재질에 대한 투과 실험은 측정된 대상의 투과손실을 파악할 수 있는 결과를 얻어 낼 수 있었다.
- (2) 고속철도 차량 벽면의 투과손실 측정 결과 각각의 특정 부위에 대해서는 응용프로그램인 T-LOSS에 의한 예측치와 잘 부합되는 모습을 확인 할 수 있었다. 그러나 공기 전달음과 측면 틈새 경로의 고려로 인하여 외부해석에서는 저주파수 대역에서 오차가 발생되었다.

5. 후기

본 연구는 2003년도 홍익대학교 교내연구비에 의하여 지원되었습니다. 도와주신 관계자에게 감사함을 표시합니다.

참고문헌

1. Fahy, F. J, (2001), "Foundations of Engineering Acoustics" Academic press, chap. 11.
2. 건설교통부, 산업자원부, 과학기술부, (200), "고속전철 기반기술 개발 2단계 1차년도 보고서", 2000, pp.361-364.
3. 김석현, 박정철, 김종년, (2000, 10(4)), "철도차량용 알루미늄 압출재의 투과손실", 한국소음진동공학회, pp.662-668.
4. 최창하, (1996) "작업 환경 소음 방지 대책", 한국소음진동공학회지, 제6권 제5호, pp.535-540.