

KHST 차량 벽면의 투과손실값 예측

Transmission Loss Prediction of KHST's Wall Section

김관주* ○윤태중**

Kwanju Kim*, Taejung Yoon**

Key Words : KHST(한국형 고속철도), Transmission Loss(투과손실), Sound Pressure Level (음압레벨), Sound Power Level (음향파워레벨), SEA (통계적 에너지 해석)

ABSTRACT

The purpose of this study is to calculate transmission loss of KHST passenger vehicle's wall section accurately. Typical transmission loss measurement of wall in the laboratory condition was carried out in advance, which is easier than KHST. Transmission loss results were compared with those by statistical acoustic method. Transmission loss values of KHST calculated by experimental method are compared with those from closed form solution.

1. 서론

본 연구는 시제품으로 존재하는 한국형 고속철도 차량(KHST)의 실제 벽면의 투과손실 값을 현실 가능한 방법으로, 정확히 측정할 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. 그러나, 이 방법은 철도 차량 각 부품에 대해서는 적용 가능하겠으나, 조립 차량 전체에 대해서는 적용이 쉽지 않다. 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. 측정실험의 신빙성을 높이기 위하여 잔향 공간 - 잔향 공간으로의 가정이 가능한 일반 강의실-벽체-강의실에 대한 실험을 통하여 측정 기법에 대한 신뢰도를 확인할 수 있었으며, 이로써 KHST 차량의 차음재 관련 설계지원 자료를 마련하였다.

2. 벽면 투과손실 측정 실험

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

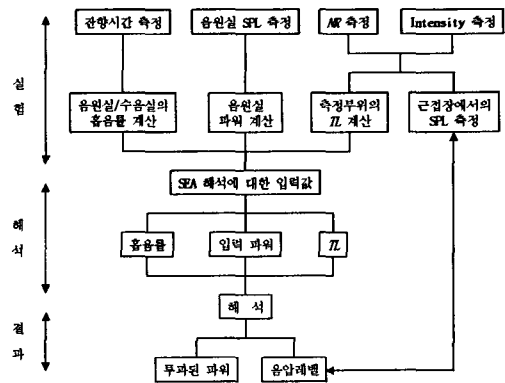


Fig. 1 Flow chart of experiment and analysis

차음이론에서는 여러 종류의 차음재로 구성된 벽면에 대한 소음의 차단 효과를 계산하기 위해서 평균 투과율이란 개념을 이용한다. 평균 투과율 $\bar{\tau}$ 는 다음 식과 같이 계산된다.

$$\bar{\tau} = \frac{\sum S_i \tau_i}{\sum S_i} \quad (1)$$

* 홍익대학교 기계 시스템디자인공학과 교수

** 홍익대학교 기계공학과 대학원

여기서, S_i 는 투과율이 τ_i 인 벽체의 면적을 말한다. 이렇게 구해진 평균 투과율 $\bar{\tau}$ 로부터 산출된 투과손실을 이 벽체의 총합 투과손실이라 하며 다음 식으로 나타낸다.

$$\overline{TL} = 10 \log \frac{1}{\bar{\tau}} \quad [dB] \quad (2)$$

2.1 강의실 예제에 대한 투과손실 측정

모의 실험으로 강의실 벽면의 투과 손실을 계산하였다. 관련 강의실에 대한 모델은 Fig. 2에 나타내었으며, 두 가지 실험 방법을 고안하였다. 첫째로 전체 벽면을 동일한 재질로 가정하여, 투과 손실 값을 측정하였으며, 둘째는 Intensity probe를 이용하여 이중의 차음재에 대한 개별 투과손실 값을 측정 후 식(1)과 식(2)를 참조해 총합 투과손실을 계산하였다. 첫 번째 방법의 경우 음원실과 수음실의 음압 평균 값이 측정되었으며 이 방법은 SEA 해석에서의 세부 시스템에 대한 가정과 유사하다. 실험에 사용된 장비는 B & K의 Pulse 시스템을 이용하였으며, 마이크로폰의 경우는 Rion 제품과 B & K 4189 제품을 이용하였다. 음원실에서의 음향 가진은 무지향성 스피커(Nor 223)을 배치하여 100 Hz ~ 5 kHz 대역에서 랜덤 가진하였다. 강의실의 모델은 Fig. 2에 나타내었다.

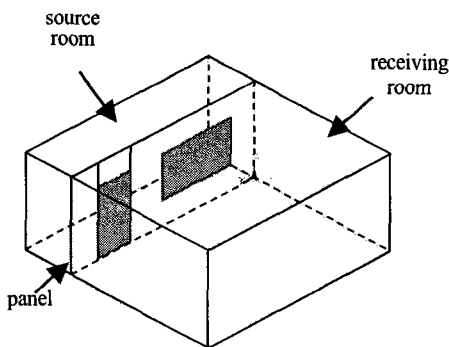


Fig. 2 Description of lecture rooms

(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 대하여서는

다음과 같이 계산된다.

$$TL = NR + 10 \log \left(\frac{\pi A \cdot c}{12 \omega \eta_3 V_3} \right) \quad (3)$$

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

실험은 가장 먼저 잔향시간을 이용한 음향 공간의 내부 손실계수 측정하였으며, 다음으로는 음원실과 수음실의 평균된 음압을 임의의 6개 지점에서 측정하여 벽면의 투과손실 값을 계산하였다. 강의실 예제에 대한 투과 손실 값은 Fig. 3에 나타내었다.

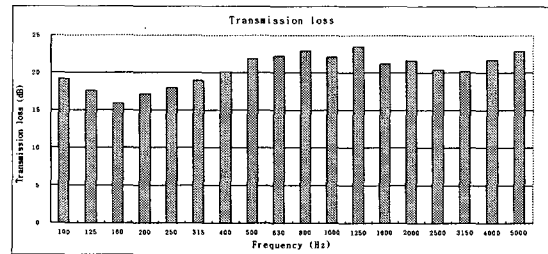


Fig. 3 Transmission loss of lecture room

(2) 각 구성 부품에 대한 투과손실 측정

강의실의 벽면은 Fig. 2에 나타난 것과 같이 중앙 유리창, 상단 유리창, 출입문 그리고 벽면으로 구성 되어 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 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta W_t = \tau [\Delta W_m] \quad (4)$$

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

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

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

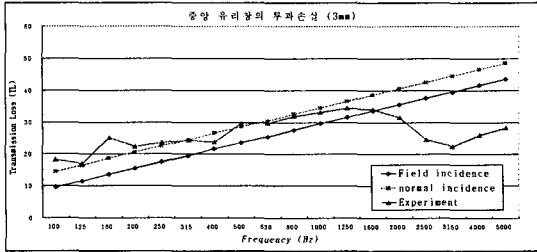


Fig. 4 Comparison Transmission loss values for experimental data and mass law

다음으로는 강의실의 유리창 2가지 종류에 대해서 식(4)를 이용하여 계산된 투과손실 값을 나타내었다.

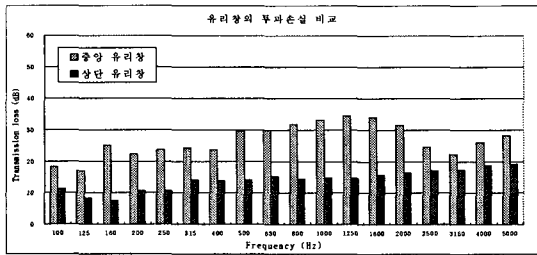


Fig. 5 Transmission loss values of center glass and upper glass

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

이러한 예측 결과에 대하여 식(1)과 식(2)를 적용하여 벽면 전체의 투과손실 값을 계산하였으며, 첫 번째 실험 결과를 다음과 같이 비교하였다.

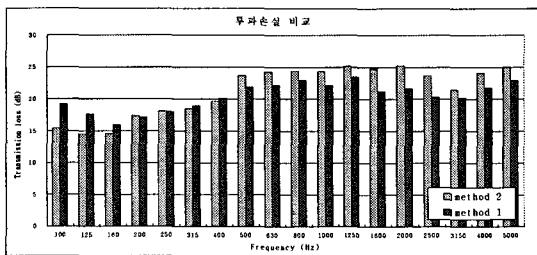


Fig. 6 Comparison of transmission loss by method 1 and method 2

첫 번째 방법에 의한 투과손실 계산값이, 두 번째 방

법에 의한 예측값보다 500 Hz 이상 영역에서 2~3 dB 더 크게 측정되었다. 이것은 첫 번째 실험의 경우 음원이 전파되어 수음실로 유입될 때 벽면에 대해서만 투과되어 전달되지 않고 측정 대상 이외의 경로를 통하여 누설된 음원의 영향으로 인해 두 번째 실험과의 차이를 생각해 볼 수 있다.

2.2 KHST 벽면의 투과손실 값 측정

한국형 고속철도(KHST) 객차(TT4) 벽면의 투과손실에 대한 측정 실험은 모의 실험에서 진행했던 두 번째 방법에 대하여 적용하였다. 이 경우에 대해서 실험에 적용된 측면 상부와 측면 하부 그리고 유리창은 다음과 같다.

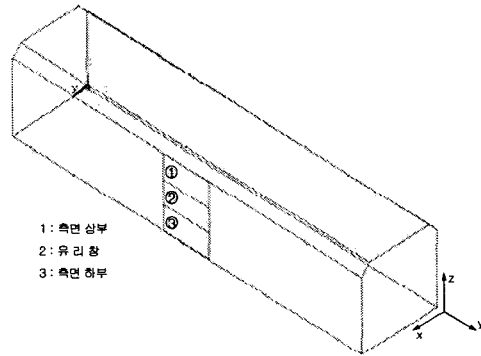


Fig. 7 Measurement part of TT4

소음원은 차량 내부에 무지향성 스피커를 이용하여 가급적 음원이 고르게 분포하며, 차량의 대칭면을 피하는 위치를 선정하여 가진하였다. 벽면의 투과손실 계산은 차량 내부는 완전 잔향 공간, 외부는 자유 음장이라는 가정 하에 실내에서의 공간 평균된 음압과 대상 벽면 바깥 위치에서 음압 Intensity를 측정된 변수값을 이용하여 투과손실 값을 측정하였다. 그리고 측정된 값은 고속철도과제 1단계에서 개발된 응용프로그램인 T-LOSS에 의한 예측치와 비교 분석을 수행하였다.

(1) 측면재

차량의 벽면은 외부의 레일소음, 기계음 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.

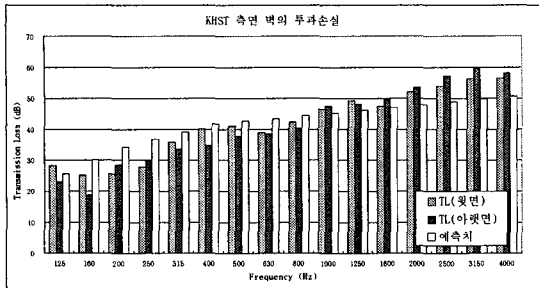


Fig. 8 Comparison of transmission loss magnitude for the side panels

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) 유리창

유리창은 차음에 가장 취약한 부분이다. KHST의 모델은 내/외부의 각각 2겹재로 접착된 구조를 가진다. 유리창 또한 측면재와 같은 방법으로 투과되는 파워를 측정하였으며, 결과는 다음과 같다.

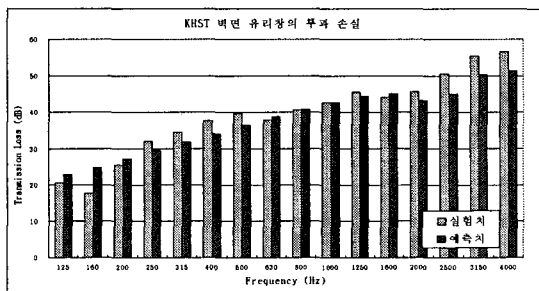


Fig. 9 Comparison of transmission loss magnitude for the glass

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

(3) 벽면 전체

유리창을 포함하고 있는 벽면 전체에서의 투과손

실 값을 예측해 보았다. 실험에서 측정된 측면재와 유리창의 평균 투과율을 구해 전체 투과손실을 계산하였다. 예측치의 경우에는 각각의 투과손실 값을 실험에서의 측정된 면적으로 가정하여 평균 투과율을 얻어 낼 수 있었다.

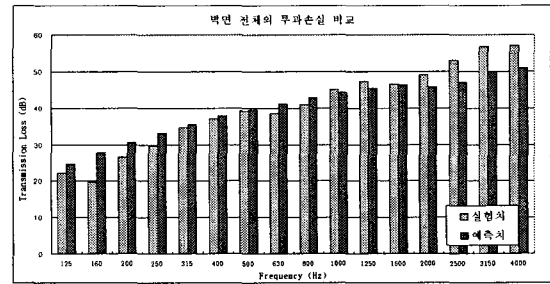


Fig. 10 Comparison Transmission loss of the total side wall

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

3. SEA에 의한 전산 해석

본 연구에서는 통계적 에너지 해석 프로그램인 Autosea2를 이용하였다. 모의 실험 및 TT4 차량의 투과손실 해석시 적용한 변수 값은 다음과 같다. 음원의 크기는 소음원이 발생하는 내부에서의 측정된 음압을 이용하여 계산하였으며, 투과손실 값은 실험에 의한 측정값을 적용하였다. 그리하여, 실험과 해석에 의한 음압레벨과 투과된 파워를 비교하였다.

3.1 모의 실험에 의한 해석

강의실에 대한 해석은 실험에서와 마찬가지로 두 가지 방법에 대하여 모델을 다르게 적용하였다.

(1) 구조물이 없는 음향 공간 모델

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

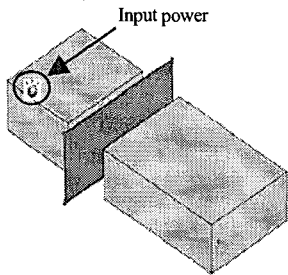


Fig. 11 Two sub-system model for Autosea acoustic analysis

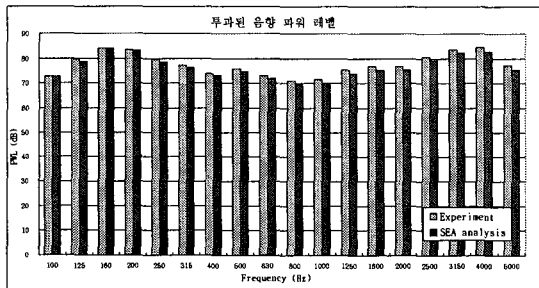


Fig. 12 Comparison transmitted PWL for SEA analysis and experimental data

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

(2) 구조물을 포함한 음향 공간 모델

두 번째 실험의 경우에 대한 해석은 4개의 세부 시스템에 대하여 모델링하였다.

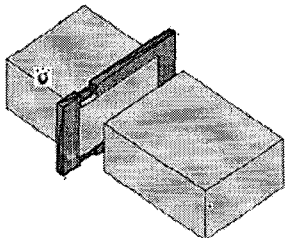


Fig. 13 Four sub-system model for Autosea acoustic analysis

Fig. 13는 음원실과 벽면, 벽면 근접장의 음향 공간 그리고 나머지 수음실 공간으로 연성된 경우이다. 실험에 의한 각각의 투과손실 값은 음원실과 근접

장이 벽면에 대해 연성된 조건을 나타낸다. 이 해석의 결과 또한 실험과 잘 부합되며, 벽면에 투과된 음향 파워레벨의 비교는 다음과 같다.

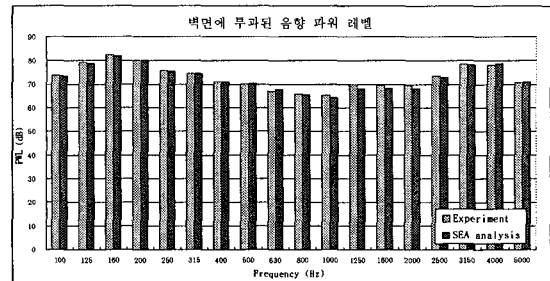


Fig. 14 Comparison transmitted PWL for SEA analysis and experimental data

3.2 KHST 차량의 해석

한국형 고속철도 차량의 해석은 측정부위에 대해서만 해석을 적용하였다. 외부 음향 공간의 경우는 관심 부품의 투과손실 값의 영향을 살펴보기 위하여 벽면 상부와 하부 그리고 유리창에 대한 근접장 위치로 3 개의 세부 시스템을 모델링하였으며, 이 세부 시스템 이후에는 자유 음장 공간을 나타내는 세부 시스템을 설정하였다.

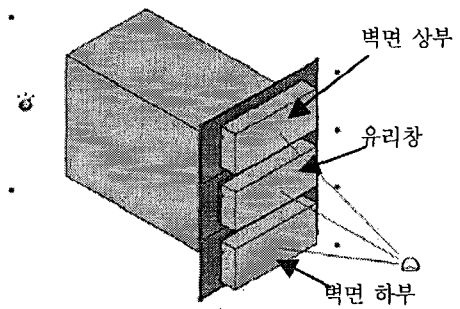


Fig. 15 TT4's model for Autosea acoustic analysis

차량 내부 음향 공간과 외부 음향 공간은 측면벽과 연성되어 있다. 즉, 음향 공간-구조물-음향 공간의 모델로 이루어져 있다. 이러한 구조물-음향의 연성 조건은 구조물의 기하학적 형상, 재료의 특성에 따라 투과 손실 값이 달라지게 된다. 이에 대한 연성 조건은 실험에 의한 투과 손실 값을 적용하여 연성된 상태를 정의한 후 해석을 수행하였다. 해석 결과로 첫 번째 항목으로 차량 내부 음향공간의 음압레벨 평균값을 살펴보았다. 차량 내부 공간의 음압레벨은 Fig. 16에 나타나 있다.

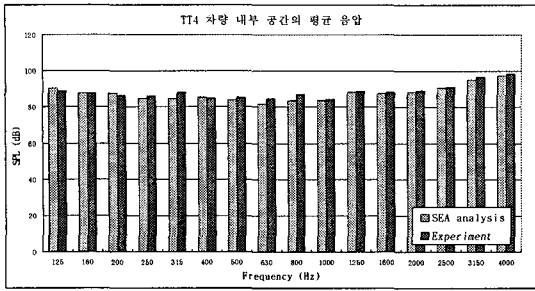


Fig 16. Comparison Interior SPL for SEA analysis and experimental data

결과를 살펴보면 500~800 Hz 영역에서는 약 2~3 dB의 차이를 나타내지만, 1 kHz 이상 영역에서는 실험값과 해석값의 결과가 거의 일치함을 볼 수 있다.

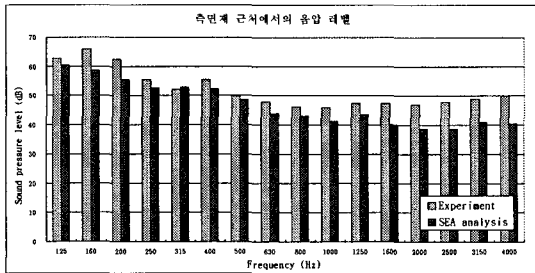


Fig. 17 Comparison of SPL of the side panel by SEA analysis and experiment

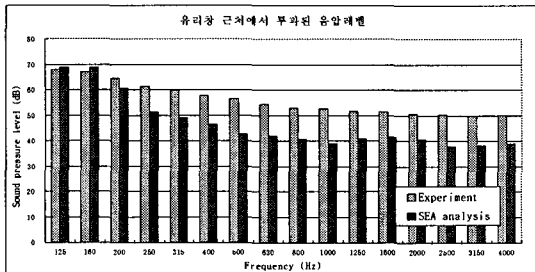


Fig. 18 Comparison of SPL of the glass by SEA analysis and experiment

Autosea를 이용하여 해석한 결과 음압레벨이 실험치에 비해 전체적으로 약 8~9dB 작게 계산됨을 확인 할 수 있다. 즉, 실험에 의해 계산된 파워가 해석에 의한 파워보다 크게 투과된 현상을 알 수 있을 것이다. 이 이유는 SEA 해석에서의 음향공간과 실험에서의 음향공간 간의 다른 점을 고려해 볼 수 있겠다.

4. 결론

본 논문에서는 실험과 전산해석을 수행하여 강의

실과 KHST 벽면의 투과손실 값에 대한 예측을 살펴보았다.

• 모의 실험의 경우는 SEA 기법을 이용한 벽면 전체의 투과 손실과 각각의 재질에 대한 투과손실에 대한 예측을 진행하였다. 그 결과 벽면 전체에 대한 측정은 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.

• KHST 차량 벽면의 투과손실 측정 결과 각각의 특정 부위에 대해서는 고속철도과제 1단계에서 개발된 응용프로그램인 T-LOSS에 의한 예측치와 잘 부합되는 모습을 확인 할 수 있었다. 그러나 Autosea에 의한 전산 해석과는 외부 공간에 대한 자유음장 모델의 차이점으로 예상된다.

후 기

본 연구는 2001년도 건설교통부/과학기술부/산업자원부가 지원하는 “고속전철기술개발사업”의 일환으로 수행된 위탁연구 결과의 일부이며, 도와주신 관계자에게 감사함을 표시합니다.

참 고 문 헌

- (1) F. J. Fahy, 2001, " Foundations of Engineering Acoustics" Academic press, chap. 11
- (2) K. Langhe, 1996, "High Frequency Vibrations : Contributions To Experimental and Computational SEA Parameter Identification Techniques", Ph. D passes, chap. 3
- (3) 김석현, 박정철, 김종년, 2000, 10(4), “철도차량용 알미늄 압출재의 투과손실”, 한국소음진동공학회, pp 662~668
- (4) 최창하, 1996, “작업 환경 소음 방치 대책”, 한국소음진동공학회지, 제6권 제5호, pp. 535~540.
- (5) 차일환, 옥정권, "소음진동공학", 문옥당, pp. 87~98
- (6) 건설교통부, 산업자원부, 과학기술부, 고속전철기반기술 개발 2단계 1차년도 보고서, 2000, pp 361~364