

소형 잔향실을 이용한 동력 분산형 고속철도 차량의 투과손실 측정 Transmission Loss Estimation of HST using a Small Scale Reverberation Chamber

김태민†·손창훈*·김정태**·김정수***

Kim Tae-Min, Son Chang-hoon, Kim Jeung-Tae, Kim Jung-Soo,

Key Words : Transmission Loss(투과 손실), Honeycomb panel(허니콤재), Revebration time(잔향 시간), High Speed Train(고속 철도 차량), Reverberation Chamber(잔향실).

ABSTRACT

Development of light-weight high speed train (HST) based on distributed motor control with the top speed of 350 km/hr has engendered a need for abatement of the interior noise of the train cabin. The development of noise abatement measures is crucial at the design stage of the train car since the noise transmission characteristics of the car structure directly influences the cabin interior noise. Since the transmission loss measurement using the entire car structure is often not feasible, especially at the initial stages of the train development, investigation of transmission characteristics using small-scale reverberation chamber can furnish useful alternative source of predicting the noise level. In the present study, white noise is generated at source and transmission loss estimated by performing measurement of a specimen in a scaled reverberation chamber. Comparison of measured values with the previously derived numerical values show good agreement in the overall trend but appreciable quantitative differences still remain.

기 호 설 명

V : 수음실의 체적	C_f : 필드 입사음에 대한 보정값
S : 수음실의 표면적	R_f : 필드 입사음에 대한 차음 이론값
α_r : 시편의 흡음률	C_d : 랜덤 입사음에 대한 보정값
S_s : 시편의 면적	R_d : 랜덤 입사음에 대한 차음 이론값
T : 시편 부착 후 잔향시간	TL_{field} : 필드 입사음에 대한 실험결과
T_0 : 시편 부착 전 잔향시간	$TL_{diffuse}$: 랜덤 입사음에 대한 실험결과
$\bar{\alpha}_0$: 수음실 흡음률	
L_{pl} : 음원실 음압	
L_{pr} : 수음실 음압	
α_2 : 수음실의 흡음력	

1. 서 론

현재 철도 기술은 철도차량의 고속화, 경량화와 함께 승객의 승차감과 쾌적성을 고려한 승객의 편의성 차원에서 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 배치

† 김태민; 홍익대학교 기계공학
E-mail : Wowbranden@hotmail.com
Tel : (02) 320-1113, Fax : (02) 320-1113

* 홍익대학교 기계 시스템 디자인 공학과

** 홍익대학교 기계 시스템 디자인 공학과

*** 홍익대학교 기계 시스템 디자인 공학과

되어 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 차음 성능을 측정하는 잔향실의 체적을 50 m³ 이상으로 설계할 것을 권장하고, 확산판이나 흡음재를 사용하여 잔향시간이 1~2초가 되도록 음향학적 튜닝을 권장하고 있다. 잔향실에서 차음재(알루미늄 압출재)의 투과 손실을 측정하는 방법으로 ISO에서 제안하는 표준 측정법은 잔향실의 크기가 50 m³ 이상이고, 시편크기가 8.5~12 m² 으로 규정하고 있어 차음재 개발에 상당히 비효율적이다. 따라서 철도차량 구조물의 투과손실 측정을 위하여 철도차량 바닥재 시편을 기준으로 하부 음원실과 상부 수음실로 간이 혹은 소형 잔향실을 구성하게 된다.^(4,5) 차음재를 이용한 투과손실은 잔향시간을 이용하게 된다. 잔향시간이란 소음이 60 dB 감소되는데 걸리는 시간으로, 잔향시간을 측정 위하여 잔향실이라는 공간이 필요하게 된다.

잔향실은 소리가 외부로 유출입이 없도록 설계 되어야 하며 음향학적으로 잔향실이 갖추어야할 가장 큰 특징은 확산음장을 만족해야한다는 것이다. 확산음장이란 음향에너지가 공간적으로 균일하게 분포되어 있는 음장을 말하며, 일반적으로 높은 모드밀도음장에서 수많은 반사파들의 중첩에 의하여 형성된다. 확산음장은 불규칙한 벽에서 여러 번 반사되어 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 동력 분산형 고속철도 차량의 바닥재와 벽면의 차체 구조물에 대한 투과손실을 실험적으로 도출하였다. 또한 이 결과를 바탕으로 선행 연구에서 전산해석을 통해 계산한 결과와 비교 분석하여 전산해석 결과의 신뢰성을 검토하였다.

2. 계측 방법

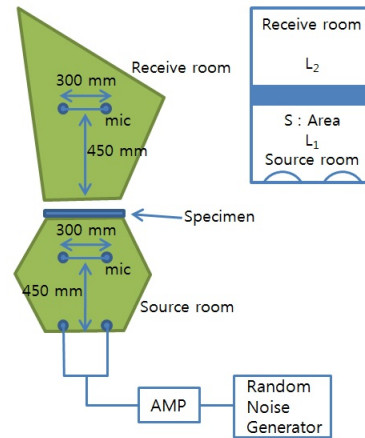
2.1 소형 잔향실의 구성 및 음향 특성

본 연구에서 사용한 소형 잔향실은 구조물(음원실, 수음실, 지지 구조물), 음원 발생 장치, 센서 회전 장치, 음원실 승

강 장치와 시스템 제어 장치로 구성 되어 있으며 그림 1에 나타나 있다.



(a) Scaled Reverberation Chamber



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

Fig. 1 Scaled Reverberation Chamber

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 안에 분포되어 있는 확산음장을 일정간격 떨어진 곳에서 소음도를 측정할 수 있도록 설계되어 있다. 소형 잔향실의 재원은 표 1에, 소형 잔향실의 측정 특성은 표 2에 나타나 있다.

Table 1. Specifications of Scaled Reverberation Chamber

	음원실	수음실
제 원	Steel 4.5t, 우레탄 코팅	Steel 4.5t, 우레탄 코팅
표 면 적	2.75 m ²	4.3 m ²
부 피	0.37 m ³	0.62 m ³

Table 2. Measurement Characteristics of Scaled Reverberation Chamber

구분	시스템 특성		권장 특성
시료면적	최소	0.5	<ul style="list-style-type: none"> • 시편 - 가로 : 1,500 mm - 세로 : 1,200 mm • 측정주파수 : 200 Hz 이상 1/3 옥타브 밴드
	최대	2.0	
사용 주파수	1k Hz 이상 평가시	오차 범위 1.0 dBA 이하	
	250 Hz 이상 평가시	오차 범위 2.0 dBA 이하	
	125 Hz 이상 평가시	오차 범위 3.0 dBA 이하	

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

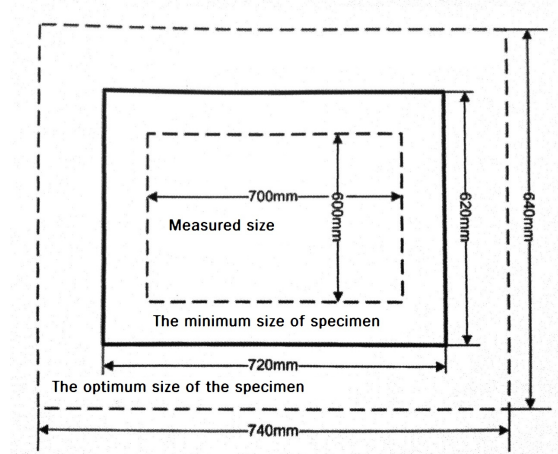


Fig. 2 Range of Specimen Size

2.2 고속철도 차량의 투과손실 계측

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 수음실에서 1/3 대역의 백색 잡음을 발생시켜 B&K 사의 microphone(4189A, 4190)과 신호 분석 툴인 PULSE 이용하여 잔향실에서의 1/3 옥타브 밴드의 잔향시간을 측정하였다.⁽⁷⁾

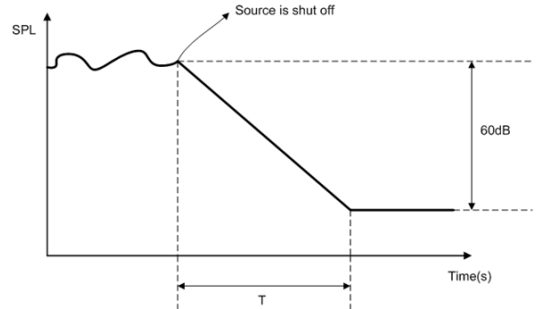


Fig. 3 Reverberation Time

소형 잔향실을 이용한 투과손실량 측정은 음원실과 수음실의 주파수별 잔향시간과 음압을 측정하여 계산하게 된다. 그림 4는 소형 잔향실을 이용한 잔향시간 측정 플로우 차트를 보여 준다.

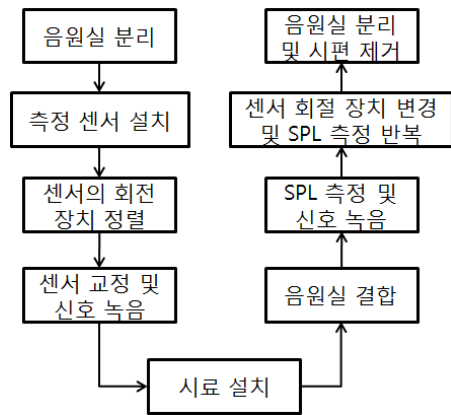


Fig. 4 Experimental Flow Chart

시편의 투과손실량 계산을 위해 먼저 수음실의 흡음률이 필요하다. 잔향실법에 의해서 잔향시간은 1/3대역의 백색잡음을 발생하여 잔향실에서의 1/3옥타브 밴드의 잔향시간으로 측정된 데이터를 이용하여 수음실의 흡음률을 계산하게 된다.

$$\text{수음실 흡음률}(\bar{\alpha}_0) = \frac{0.161 \times V}{S \times T_0}$$

V : 수음실의 체적
S : 수음실의 표면적
T₀ : 시편부착전 측정된 잔향시간

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 식에 의해 계산한다.

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

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

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⁾

$$\text{투과손실}(TL) = L_{\mu} - L_{\rho} + 10 \log(s/a_2)$$

L_{μ} : 음원실 음압
 L_{ρ} : 수음실 음압
 s : 시편의 면적
 a_2 : 수음실의 흡음률

소형 잔향실을 이용한 투과손실 측정은 실제 잔향실을 이용하지 않고 축소 제작 된 잔향실을 사용하기 때문에 보정값이 필요하게 된다. 보정 값은 질량법칙만을 따르는 시편을 통하여 실험값을 구한 후 이론값과의 차이로 정의한다. 다음의 식으로 표현할 수 있다.^(8,9)

$$C_f = \text{실험값} - R_f$$

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

$$C_d = \text{실험값} - R_d$$

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

하나의 기준 시편에 대하여 앞의 두 식에 의해 보정값이 만들어지면 다른 시편에 대하여 동일한 보정값을 사용하게 된다. 이 값은 소형 잔향실의 특성값으로 재질이 바뀌어도 사용이 가능하다. 보정값을 실험 결과에 적용시킬 때에는 다음의 식을 이용한다.

$$\begin{aligned} TL_{field} &= \text{실험값} - C_f \\ TL_{diffuse} &= \text{실험값} - C_d \end{aligned}$$

TL_{field} : 필드 입사음에 대한 실험결과
 $TL_{diffuse}$: 랜덤 입사음에 대한 실험결과

따라서 하나의 실험데이터에 대하여 두 개의 차음값을 구할 수가 있게 된다. 본 연구의 보정값은 선행 연구에서 구한 자료를 활용하였다.⁽⁶⁾

2.3 전산해석을 이용한 동력 분산형 고속철도 차량의 투과손실

본 연구에서는, 선행 연구⁽³⁾에서 음향해석 상용 소프트웨어인 VA ONE을 사용하여 해석한 투과손실 값을 사용하여 본 연구에서 측정된 투과손실과 비교/분석 하였다. 전산해석은 그림 5와 같이 판과 판 사이에 유체가 존재하는 알루미늄 압출재구조의 투과손실을 예측하기 위해 "Diffuse-Field Reciprocity"를 이용하여 고속철도 차량 차체 구조물의 투과손실을 예측하였다. 확산음장 상관관계란 전체 가진에 의한 확산음장에서 구조공진모드는 비례적으로 방사임피던스를 방해하는 것을 의미한다. 구조공진 모드 중 주 굽힘, 주 비틀림, 주 국부 공진모드가 주요 변수로 작용하며 여기서 국부 공진 모드는 시편의 크기에 민감한 전체(global) 공진 모드와는 달리 시편의 길이를 1/2, 1/4로 축소시켜도 큰 변화 없으며, 경계조건에 별로 영향을 받지 않고 오히려 주름부의 주름의 길이, 코어 및 상하판 두께 및 각도에 민감하게 지배되는 주름단위의 굽힘모드를 의미한다.^(10,11) 그림 5는 선행 연구에서 투과손실 예측을 위해 VA ONE에서 모델링 한 바닥재를 보여준다.

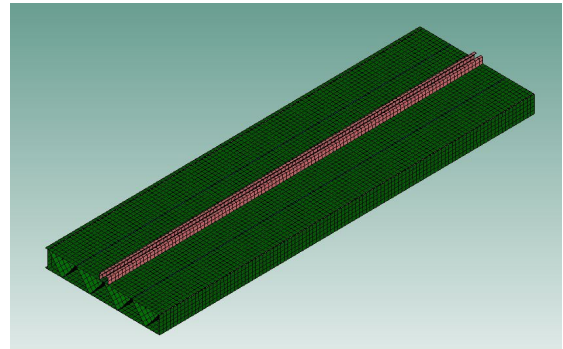


Fig. 5 Floor Panel

그림 6은 선행연구에서 예측한 동력 분산형 고속철도 차량의 투과손실값을 보여준다. 선행 연구에서 해석한 동력 분산형 고속철도 차량의 차음성능은 기존 KTX보다 다소 떨어지는 것으로 해석되었다. 이는 차체 구조물의 재질이 철에서 알루미늄으로 변경 되었기 때문이다.⁽¹²⁾

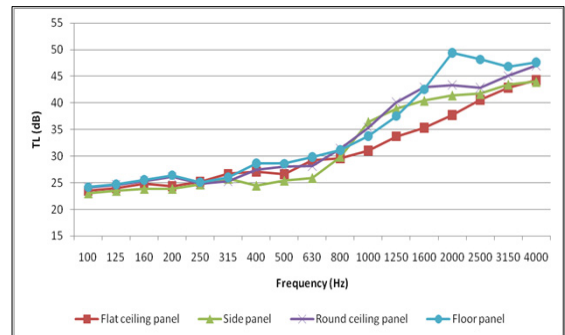
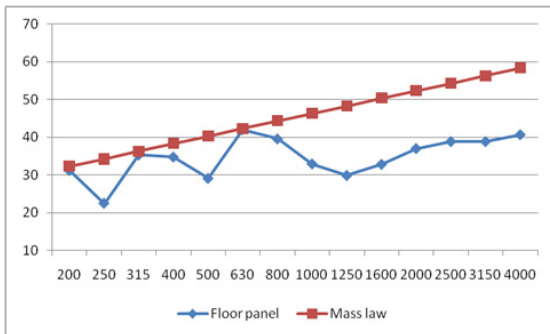


Fig. 6 Transmission Loss

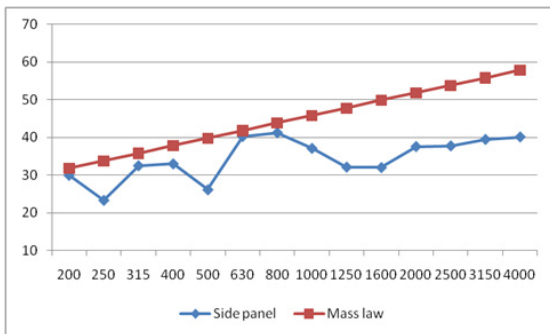
3. 결 과

3.1 동력 분산형 고속철도 차량의 투과손실

소형 잔향실을 이용하여 동력 분산형 고속철도 차량의 바닥과 벽의 차체 구조물에 대한 투과손실을 실험적으로 구하였다. 그림 7은 소형 잔향실을 이용한 동력 분산형 고속철도 차량의 바닥과 벽면의 투과손실을 보여준다.



(a) Transmission Loss of Floor Panel



(b) Transmission Loss of Side Panel

Fig. 7 Experimental Results on Transmission Loss

그림 7에서 볼 수 있듯이 바닥과 벽 차체 구조물의 투과손실이 매우 유사한 것을 확인 할 수 있다. 또한 1000 Hz 대역 이후에서부터는 질량 법칙보다 차이가 큰 실험 결과 나온 것을 확인할 수 있다. 이는 압출재 구조의 국부적 공진 모드 성분에 의한 투과손실 저하에 의한 영향으로 판단된다.

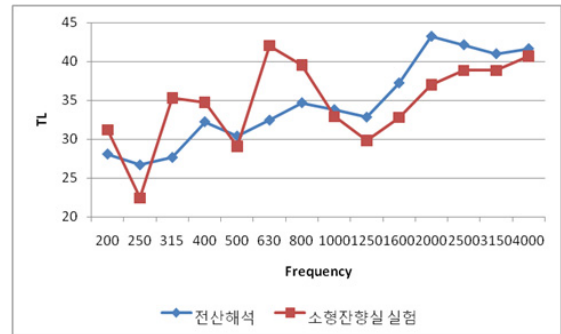
바닥과 벽면의 투과손실이 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz 대역에서 차음 성능이 크게 저하되는 대역을 갖는 것으로 측정되었다. 이는 주로 압출재 구조에 대한 주 굽힘, 주 비틀림, 국부 공진에 대한 차음 성능 저하에 대한 영향으로 판단된다.

또한 벽면과 바닥 구조의 차음성능은 유사한 진동 특성을

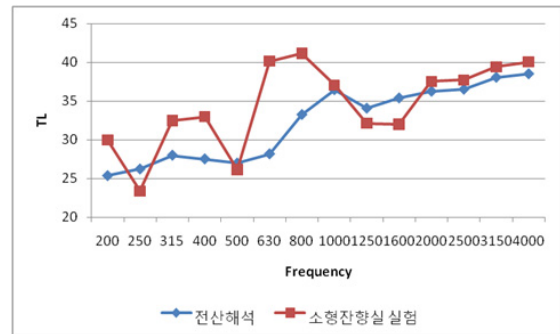
보이는 것을 확인할 수 있지만 투과손실량으로 보았을 때는 바닥의 차음성능이 약 2 dB 높은 것을 확인할 수 있다.

3.2 전산해석 결과와 비교

선행연구⁽³⁾에서 전산해석을 통해 예측한 동일한 압출재 투과손실과 비교하였다. 그림 8은 전산해석 결과와 소형 잔향실을 이용한 동력 분산형 고속철도 차량의 투과손실을 보여준다.



(a) Transmission Loss of Floor Panel



(b) Transmission Loss of Side Panel

Fig. 8 Comparing of Simulation and Experimental Results

전산해석과 소형 잔향실을 이용한 투과손실 결과를 비교해 본 결과, 630 Hz 대역에서 최대 7 dB 차이를 보이지만 전체적으로 매우 유사한 파형을 갖는 것을 볼 수 있다. 따라서 전산해석을 수행하는 단계에서 재질 및 모델을 정확하게 모델링하여 해석한다면 더욱 정확한 해석 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 또한 압출재가 소형 잔향실 실험을 위해 일부 절삭 가공되었기 때문에 다소 차이를 오차를 발생 시킨 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 소형 잔향실을 이용하여 동력 분산형 고속철도 차량의 바닥과 벽면의 차체 구조물에 대한 투과손실을 측정하였다. 해석 결과, 두 시편 모두 주 굽힘, 주 비틀림

모드가 존재하는 저주파 대역에서 투과손실 저하 형상을 확인할 수 있었다. 또한 고주파 영역으로 갈수록 투과손실이 질량 법칙보다 현저히 낮게 측정되었다. 이는 국부공진 모드에 대한 투과손실 저하 현상이 주 원인으로 판단된다.

소형 잔향실을 이용하여 측정된 벽면과 바닥면의 투과손실을 전산해석 결과와 비교해 본 결과, 투과손실량은 최대 7 dB 차이를 보였지만 전산해석결과가 실험결과와 비교하여 매우 유사한 파형을 보이는 것을 확인하였다. 따라서 전산해석을 이용한 투과손실 해석 시 압출재의 재질 및 모델을 조금 더 정밀하게 모델링 한다면 실험결과와 더욱 근사한 결과를 구할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국토해양부 미래철도 기술개발 사업의 차세대 고속철도 기술개발 과제(실내의 소음저감 기술)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.