

철도차량 내장재용 복합재료 패널의 차음성능에 관한 연구

A Study on the Sound Insulation Performance of the Composite-Material Panel for Railroad Vehicle

김봉기¹, 김재승², 김현실³, 강현주⁴, 김상렬⁵

Bong-Ki Kim, Jae-Seung Kim, Hyun-Sil Kim, Hyun-Ju Kang, and Sang-Ryul Kim

Keywords : Sound Insulation(차음), Composite-Material Panel(복합재료 패널),
Noise Control(소음제어)

Abstract

Since most of main noise sources of the railroad vehicle are transmitted to the passenger's ear through the vibration of the panel, the sound insulation performance of the panels should be high enough to protect the passenger's ear from the noisy environment. Specifically, the composite materials which are generally used for reducing the weight of the vehicle compartment have the low insulation performance, thus noise control actions should be taken appropriately by considering the insulation performance of the panels. In this study, the insulation performances of the inner/outer panels of the compartment are evaluated. In addition, the contribution of the insulation performance of aluminum door is estimated and compared to those of composite panels. The results can furnish an in-depth understanding of the insulation characteristics of the panel of railroad vehicle.

1. 서론

철도차량의 각종 동력장치, 레일과의 접촉에 의한 진동/소음 및 주행 중 발생하는 공력소음 등은 차량의 외장판, 내장판, 창문 및 문 등을 투과하여 내부소음을 형성한다. 최근 철도 차량의 경량화 추세에 따라 이러한 공기전달 소음(Air-borne noise)의 주요 경로가 되는 차량 내외장재의 소음전달에 대한 관심이 높아지면서 내장재 및 출입문의 높은 차음성능(Insulation performance)이 요구되고 있다. 특히 차량의 경량화를 목적으로 사용되는 복합재료 내장재의 경우, 재료의 질량 감소는 차음성능과는 상충적인 관

계를 갖고 있으므로, 경량화와 차음 성능을 동시에 충족시키기 위해서는 차량의 측면을 구성하는 각종 패널의 차음성능을 평가하고 각 패널의 내부소음 기여도를 분석하는 것이 필요하다고 할 수 있다

본 연구에서는 복합재료로 제작된 다양한 내장판의 차음성능을 측정하고, 내장재로 사용되는 복합재료의 층(ply), 두께, 내부 공기층 및 충전재 등의 영향에 따른 차음 성능을 평가하고 외장재와 결합시 예상되는 차음성능을 분석하고자 한다. 또한 차량 측면의 상당한 부분을 차지하는 알루미늄 Honeycomb door의 차음성능을 측정하고, 복합 내외장판과 결합 시 예상되는 철도차량 측면의 차음성능을 예측함으로써 각각의 기여도를 분석하고자 한다. 본 연구로부터 실제 철도 차량에 있어서 공기기인소음의 주요 전달경로 및 기여도를 분석함으로써 내부소음 저감을 위한 복합 내/외장재의 설계 목표 설정을 위한 체계적인 접근이 가

¹ 정회원, 한국기계연구원 음향그룹
² 비회원, 한국기계연구원 음향그룹
³ 비회원, 한국기계연구원 음향그룹
⁴ 비회원, 한국기계연구원 음향그룹
⁵ 비회원, 한국기계연구원 음향그룹

능하리라 판단된다.

2. 차음성능의 측정과 평가

패널의 차음 성능은 입사되는 음향파위(I_i)에 대한 투과된 파워(I_t)의 비를 나타내는 투과계수(Sound transmission coefficient, τ)로 정의되며, 일반적으로 투과계수에 대한 dB 값으로서 다음과 같은 차음손실(Sound Transmission Loss)이 사용된다[1].

$$STL = 10 \log(1/\tau_{avg}), \tag{1}$$

여기서,

$$\tau_{avg} = \frac{\int_0^{\pi/2} \tau(\phi, \omega) \cos \phi \sin \phi d\phi}{\int_0^{\pi/2} \cos \phi \sin \phi d\phi}, \tag{2}$$

$$\tau(\phi, \omega) \equiv \frac{I_t}{I_i}, \tag{3}$$

여기서, ϕ 는 음파의 입사각을 의미한다. 투과계수는 입사되는 음파의 입사방향에 따라 그 값이 결정되며, 식(2)와 같이 음파가 입사될 수 있는 모든 각을 고려하여 평균한 평균투과계수를 사용한다. 실험적으로 차음성능을 측정하기 위해서는 측정시편에 음파가 가능한 한 모든 입사각으로 투과되도록 Fig. 1과 같이 서로 공통벽을 갖는 두개의 잔향실(Reverberation room)을 사용한다. 잔향실은 음원(Sound source)으로부터의 음향에너지가 가능한 한 감쇠되지 않고 모든 방향으로 균일하게 확산되도록 설계된 방이다. 간단한 해석으로부터 공통벽이 있는 두 개의 잔향실의 감음량(Noise reduction, $L_{p1}-L_{p2}$)을 측정하면 다음과 같이 차음손실을 구할 수 있다[2,3].

$$TL = L_{p1} - L_{p2} + 10 \log_{10}\left(\frac{S}{A}\right), \tag{4}$$

여기서, L_{p1} 은 소음원실의 평균 음압레벨 (dB), L_{p2} 는 수음실의 평균 음압레벨 (dB), S는 패널의 표면적 (m^2), A는 수음실의 실상수 (Room constant, m^3)를 의미한다. 한편, 실상수는 수음실의 흡음성능을 표현하는 지표로서 차음성능 측정시 수음실 흡음특성의 영향을 배제하기 위해 사용되며, 본 시험에 사용

된 시편의 크기는 4.2m by 2.4m 이다.

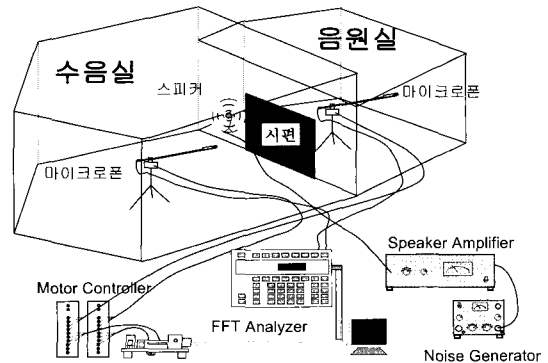


Fig.1 잔향실을 이용한 차음 성능의 측정

3. 복합내장재의 차음 특성

Table 1에 도시한 6종의 복합 내장재에 대하여 차음특성을 측정하였다.

Table 1 복합 내장재 시험편의 종류와 구조.

Type	두께 (mm)	무게 (Kg)	적층구조
MAT/UP (Hand lay-up)	2.45	9.5	Mat 450 (4ply)
Nomex Honeycomb Sandwich	9.80	5.55	#120/#823/core(8.95t)/#823/#120/#110
Glass/Phenol Laminate	3.38	9.5	#650(4ply)/#823(2ply)
Nomex Honeycomb Semi-sandwich (보강부분:11)	2.33	8.65	#650(2ply)/core(부분보강)/#650(2ply)/#823(1ply)
Nomex Honeycomb Double Sandwich	9.83	6.9	#120/#823/core(4.5t)/#823/core(4.5t)/#120/#110
Nomex Honeycomb Sandwich with Damping sheet	11.80	8.1	Rubber(2t)/#120/#823/Core(8.9t)/#823/#120/#110

여기서, 적층구조에서 표시한 숫자는 제작사의 Glass Fabric 고유번호를 의미한다. Nomex

Honeycomb 샌드위치판의 경우 중심재로서 두께 8.95mm인 Honeycomb을 사용하였으며 MAT/UP에 비하여 두꺼우나 무게는 매우 가볍다. Honeycomb 구조가 고가인 점을 고려하여 원가절감 관점에서 패널의 일부분에만 중심재로 Honeycomb을 사용한 Nomex Honeycomb Semi-sandwich판의 경우 Mat/UP와 유사한 두께에 약간 가벼운 특성을 갖고 있다. Nomex Honeycomb Double 샌드위치판의 경우 이중 샌드위치판 구조로 제작되어졌다.

Fig. 2의 측정결과 MAT/UP의 경우 주파수 증가에 따라 6dB/octave로 차음 성능이 증가되는 단순패널의 질량법칙(Mass law)을 만족함을 확인하였다. Nomex Honeycomb 샌드위치판의 경우 2500Hz 부근에서 차음 성능이 급격히 떨어지는 것을 확인할 수 있으며 이는 패널의 일치주파수(Coincidence frequency)에 해당된다. 일치주파수는 공기중 입사하는 입사파의 파장과 시편에서 발생하는 파동의 파장과 일치할 때 차음 성능이 급격히 떨어지는 주파수를 의미하며 굽힘파의 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다[1].

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{D}} \quad (5)$$

여기서, c 는 공기중 음속, m 은 시편의 면밀도, D 는 굽힘강성을 의미한다. 따라서, 시편의 굽힘강성이 증가할 수록 일치주파수는 낮아지며, 이로 인해 시편의 차음 성능이 급격히 감소할 수 있다. Nomex Honeycomb Semi-sandwich의 경우는 Honeycomb 구조가 없는 부분이 샌드위치 부분보다 많은 면적을 차지하고 있으며, Nomex Honeycomb 샌드위치판과는 달리 관심 주파수 영역 내에 일치주파수가 발생하지 않아 보다 높은 차음 성능을 보이고 있다. Nomex Honeycomb Double 샌드위치판의 경우는 샌드위치판과 유사하게 일치주파수가 발생함을 확인할 수 있으며, Nomex Honeycomb 샌드위치판에 비해 면밀도가 높아 차음 성능이 보다 큰 것을 볼 수 있다. Nomex Honeycomb 샌드위치판에 차음 성능 향상을 목적으로 두께 2mm인 damping sheet를 부착한 경우 면밀도의 증가 및 damping의 증가로 인해 관심 주파수 영역에서 일치주파수를 볼 수 없으며 높은 차음 성능을 얻을 수 있었다. 측정된 결과로부터 복합내장재는 대부분 질량법칙을 만족하고 있으며 면밀도의 증가로부터 차음 성능의 향상을 기대할 수 있고, 샌드위치판에 의한

강성증가는 일치주파수로 인해 차음 성능을 크게 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

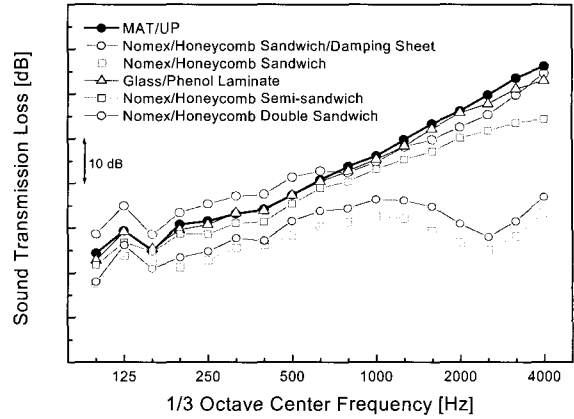


Fig.2 복합내장재 시험편의 차음 성능 측정결과.

4. 내외장 복합 패널의 차음 성능

외장판과 내장판의 차음 성능을 각각 비교하기 위하여 Table 2와 같이 steel plate(3t)에 glass wool(50t, 140 kg/m³)이 부착된 외장판의 차음 성능을 측정하고, 복합내장판의 차음 성능과 비교하였다.

Table 2 철도차량 내외장재 시험편의 종류와 구조.

Type	두께 (mm)	무게 (Kg)	적층구조	비고
외장판	53	71.5	Steel Plate(3t)+50t Glass Wool	
외장판/50t airgap/Glass-Phenol Laminate	106	71.5+8.5	Steel Plate(3t)+50t Glass Wool+50t Airgap+#650(4 ply)/#823(1ply)	
외장판/50t airgap/Nomex Honeycomb Semi-sandwich	114.9	71.5+7.7	Steel Plate(3t)+ 50t Glass Wool+50t Airgap+#650(2ply)/core(부분보강)/#650(2ply)/#823(1ply)	
외장판/50t airgap/Nomex Honeycomb Sandwich	114.9	71.5+5.5	Steel Plate(3t)+50t Glass Wool+50t Airgap+#120/#823/core(8.9t)/#823/#120/#110	

시편(980mm*2400mm)의 무게는 71.5kg으로 측정되었으며 내장재의 무게가 5.5kg~10kg인 것을 고려하면 7~14배 이상의 면밀도를 갖는 패널로서, 차음성능이 복합재 내장판에 비해 매우 높으리라 예상 할 수 있다. Fig. 3은 예측된 외장판의 차음성능 결과이며, 비교를 위해 내장판중 차음성능이 가장 높은 MAT/UP의 측정결과와 비교하였다.

결과로부터 외장판의 차음성능이 내장판에 비하여 17~25dB 정도 높은 것을 알 수 있다. 또한, 차음성능이 매우 낮은 Nomex Honeycomb 샌드위치판이 외장판과 결합될 경우 다른 내장판이 결합된 내외장 복합패널의 차음성능과 유사한 것을 확인 할 수 있다. 이것은, 내장판과 결합된 외장판의 차음성능이 내장판에 비해 매우 높고 중간에 공기층이 추가됨에 따라 내장판 자체의 차음성능이 전체 내외장판의 차음성능에 큰 영향을 주지 않았기 때문이다. 따라서, 내장판과 외장판이 결합된 다중판의 차음성능은 높은 차음손실을 갖는 외장판, 중간재 및 공기층에 의해 결정되어질 가능성이 높으며 상대적으로 낮은 차음성능을 갖는 내장판의 차음성능 향상은 전체 다중판의 차음성능 향상에 기여하는 바가 적으리라 예상된다.

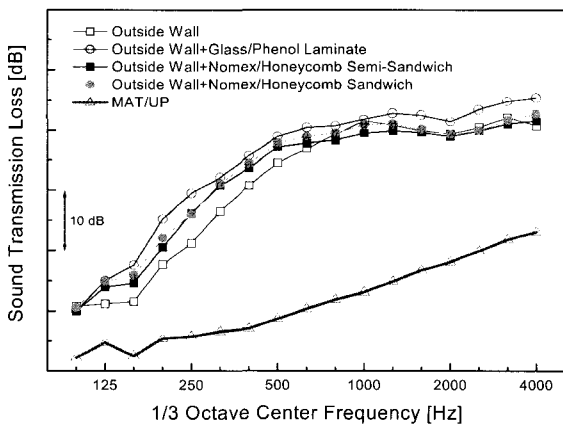


Fig.3 다중 내외장재 시험편의 차음 성능 측정결과.

5. 알루미늄 문의 차음 특성

내외장 복합다중판과 함께 철도차량으로 유입되는 공기기인 소음의 중요한 경로를 차지하는 알루미늄 Honeycomb 문의 차음성능을 평가하였다. 알루미늄 문은 내부에 알루미늄 Honeycomb 구조를 갖고

있으며 양면에 skin재로서 2mm 두께의 알루미늄 판이 양면에 결합되어 있다.

일반적으로 Honeycomb 구조는 이방성의 특성을 갖고 있으며, 이로 인해 차음성능 예측 시 두개 이상의 mass-spring-mass 공진 주파수가 발생한다. mass-spring-mass 공진 주파수는 양면의 skin재가 질량의 역할을, 중심재로 사용되는 알루미늄 Honeycomb이 스프링과 같은 거동을 함으로써 발생한다. 이러한 공진주파수는 알루미늄 문의 차음성능을 저하시키는 주요 원인이라 할 수 있으므로, 차음성능 향상을 위해서는 중심재의 탄성계수를 조절하는 것이 매우 중요한 요소라 할 수 있다. Fig. 4는 Honeycomb의 두께가 각각 20, 30, 38 mm인 경우의 차음성능을 보여주고 있다. Honeycomb의 두께 증가로 인해 고주파의 차음성능은 증가하나 mass-spring-mass 공진 주파수의 변화로 인해 저주파의 차음성능이 떨어지는 것을 볼 수 있다. 결론적으로 중심재의 두께증가에 따라 차음성능에는 큰 변화가 없음을 확인할 수 있다.

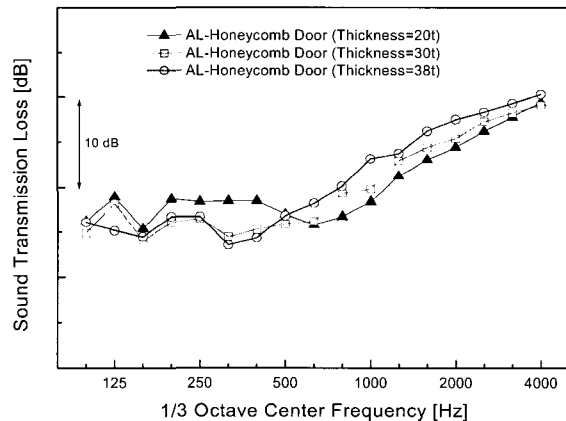


Fig. 4 알루미늄 문의 차음 성능 비교.

지금까지 예측된 결과에 의하면 내외장재가 결합된 다중판에 비하여 Fig. 4에 보인 바와 같이 알루미늄 문의 차음성능이 매우 낮기 때문에 문을 통하여 투과되는 성분이 최종적인 차음성능을 저하시키는 역할을 할 것으로 판단된다. 이와 같은 영향은 다음과 같이 각 부분의 투과계수와 면적의 비로써 예측이 가능하다[1].

$$\tau_{resultant} = \frac{\tau_{sidewall} * S_{sidewall} + \tau_{door} * S_{door}}{S_{sidewall} + S_{door}} \quad (6)$$

여기서 $S_{sidewall}$ 는 문을 제외한 측면의 면적, S_{door} 는 문이 차지하는 면적을 의미한다.

한 예로 차량으로부터 전체 side Wall의 면적중 문이 차지하는 면적을 46 % 정도로 추정할 경우 전체 side wall assembly의 차음성능을 Fig. 5에 예측하였다. 또한 비교를 위하여 문의 면적을 23%로 줄였을 경우에 대한 결과도 도시하였다. 문의 면적이 약 23%를 차지할 경우 최종적인 차음 성능은 문과 내외장 다중판 각각의 차음성능 평균값과 유사함을 알 수 있다. Fig. 5로부터 전체적인 side wall의 차음성능이 문의 차음 성능에 크게 의존하는 것을 볼 수 있다.

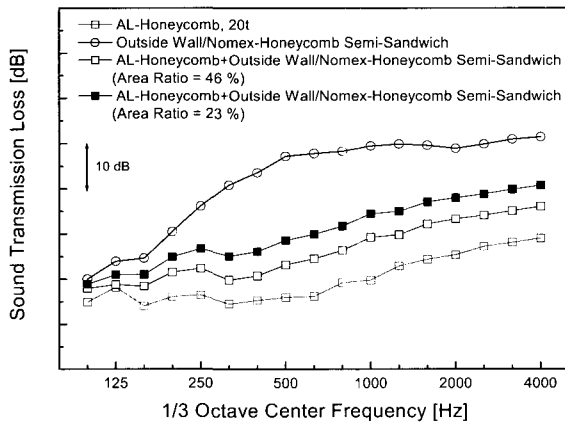


Fig. 5 알루미늄 문을 고려한 side wall assembly의 차음 성능 예측

6. 결 언

본 연구에서 고려된 복합재료 내장재의 차음 성능은 시편의 면밀도에 매우 민감하며, honeycomb에 의한 강성 증가는 시편의 차음 성능을 크게 감소시켰다. 현실적으로 복합내장재의 차음 성능 개선이 철도 차량 내부소음 저감에 기여할 수 있는가를 분석하기 위하여, 외장재 및 알루미늄 문의 차음성능 및 기여도 분석을 수행한 결과, 내외장재가 결합된 다중판은 내장재에 비해 차음성능이 17~25dB 높은 우수한 차음성능을 보였다. 따라서, 높은 차음 성능을 갖는 외장재와 결합되는 내장재의 차음성능 개선이 전체

side wall의 차음성능향상에는 큰 영향이 없음을 알 수 있다. 또한, 알루미늄 문의 차음성능 측정결과 side wall에 비해 차음성능이 크게 떨어짐을 확인하였고, side wall의 면적 중 문이 차지하는 일반적인 면적을 고려할 때 차량의 실내소음 저감을 위해서는 문의 차음 성능을 향상시키는 것이 매우 중요한 요소임을 확인하였다.

참고문헌

1. Leo L Beranek, *Noise and Vibration Control*, Chapter 11, McGraw-Hill(NewYork) 1971
2. ISO 140-3:1995 Acoustics-Measurement of sound insulation in buildings and building elements-Part 2: Laboratory Measurements of Airborne Sound Insulation of Building Elements.
3. ASTM E 413-87:1994 Classification for Rating Sound Insulation.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지역특화 기술개발사업에서 지원하는 “불연성 복합재 내장부품 및 대형부품 개발”의 일부로서 수행되었으며, 주관기관인 (주)한국화이바의 연구비 및 제반지원에 감사드립니다.