

틸팅열차 측면재의 차음 전략

Sound Insulation Strategy of the Side Panels in a Tilting Train

김 석 현* 서 태 건**
Kim, Seockhyun Seo, Taegun

Abstract

In an express tilting train, side wall insulating the noise from the exterior sound source consists of two parts. One is the layered composite panel including aluminum honeycomb, glass wool and nomex honeycomb. The other is the double glazed window. In this study, sound insulation performance of the two parts is investigated by mass law and experiment. Based on ASTM E2249-02, the intensity sound transmission loss (TL) is measured on the specimens of the two parts. Mass law deviation (MLD) is considered in order to compare the sound insulation performance in respect of weight. Contribution of each part to the sound insulation is analyzed and the sound insulation strategy for the interior noise reduction is investigated.

키워드 : 이중 유리창, 허니콤 복합 판재, 인텐시티 음투과손실, 질량법칙
Keywords : *Double glazed window, Honeycomb composite panels, Intensity sound transmission loss, Mass Law Deviation*

1. 서론

강원 및 충청의 산악 지역을 통과하는 기존의 철도 노선에는 곡선 구간이 많아 운행 속도의 제약을 받는다. 이러한 문제를 해결하고자 한국형 복합소재 틸팅 열차(한빛200)가 개발되어 10만km 시험 검증을 마쳤고, 2007년 8월부터 2단계 후속 사업인, '한국형 복합소재 틸팅열차 실용화 사업'을 통해 신뢰성 검증과 유지 보수성 확보를 위한 연구가 지속적으로 수행 중에 있다[1]. 한국형 틸팅 열차에는 복합소재를 이용한 차체 경량화 기술을 적용하여 기존의 강재 차체 대비 약 40%의 중량

을 절감시켜 직선부에서는 최고 속도 180km/h급의 준고속으로 운행이 가능해졌다. 또한 곡선 구간을 감지하여 좌우로 기울기를 자동으로 조절하는 틸팅기구를 적용함으로써 제한 속도를 높이고 승차감을 향상시켰다. 이러한 틸팅열차가 정상 주행할 때, Fig.1 과 같이 다양한 외부 소음원으로부터 소음이 실내로 전달되는데, 음향과위 중 상당 부분이 바닥, 측면 및 천정을 둘러싸고 있는 차음재에 의하여 차단되고 일부가 투과되어 실내 소음을 결정하게 된다. 차음재의 차음성능을 결정하는 가장 중요한 인자는 단위면적당 무게인 면밀도 이므로, 차체의 경량화는 일반적으로 차음 성능의 저하를 가져온다. 따라서 실내 정숙성을 위해서는 중량 감소가 가져오는 차음성능 상의 문제점이 반드시 검토하여야 한다. 본 연구에서는 한국형 틸팅열차의 측면 차음재의 차음설계 전략을 검토한다. 열차의 측면은 알루미늄 허니콤 적층재와 이중 유리창의 두

* 강원대학교 기계메카트로닉스공학과 교수, 공학박사, 교신저자
** 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스 공학과 석사과정

부분으로 구성된다. 이 두 부분을 통하여 외부의 소음이 실내로 투과 전달된다. 특히 터널 통과시 많은 량의 음향 파워가 측면재를 투과하면서 실내 소음의 상승을 가져온다. 차음 전략상 두 부분으로 구성된 측면재에서는 어느 한 부분의 차음성능이 아주 낮으면 다른 부분을 아무리 강화시켜도 측면재 전체의 차음성능을 올리는 데에 한계가 있다. 본 연구에서는 측면을 구성하는 허니콤 복합 적층재와 2중 유리창의 투과손실을 중량 측면에서 비교함으로써, 틸팅열차의 차음 문제점을 종합적으로 진단한다. 측면 두 부분의 시편을 제작하여 ASTM E2249-02[2]에 근거한 인텐시티 투과손실(Intensity transmission loss)을 측정하고 질량법칙(Mass law) 계산치와 비교 분석한다. 분석결과에 근거하여 향후 개발되는 철도차량 측면 차음 설계 방향을 수립하는 데에 본 연구의 목적이 있다.

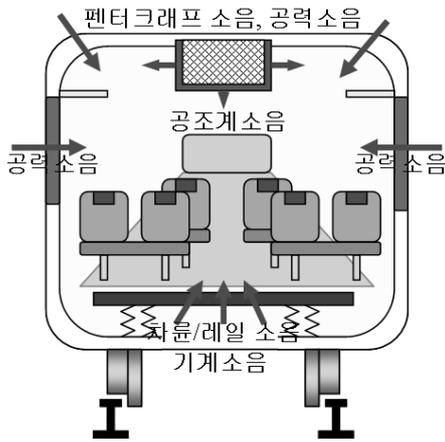


Fig.1 Noise transmission path in an express train.

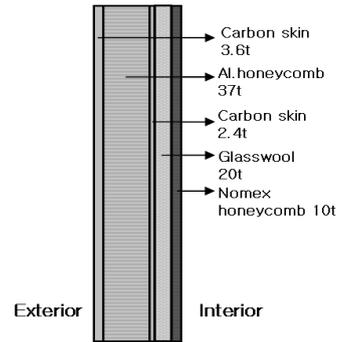
2. 틸팅차량 측면재의 구성

Fig.2 (a)의 틸팅 차량의 측면 복합 적층재는 알루미늄 허니콤 코어(Aluminum honeycomb core) 양면에 CF1263 탄소/에폭시 면재가 접착된 샌드위치 판재를 주 요소로 하고, 알루미늄 허니콤 복합판재와 노멕스 허니콤 (Nomex honeycomb) 판재와의 사이에 유리면(Glass wool)이 삽입된 적층 구조로 되어 있다. 그 상세한 구조는 선행연구[4]에서 검토한 바 있다. 유리창은 Fig. 2 (b)처럼 6mm 두께의 유리창이 7.5mm의 공기층을 사이에 둔 2중 구조로 되어 있다. 공기층 간극 효과를 보기 위하여 13.5mm 공기층을 갖는 2중 유리창의 차음성능도 함께 검토하였다. 차음성능 평가에 필요한 층별 재원은 Table 1에 주어진다. 표에서와 같이 2중 유

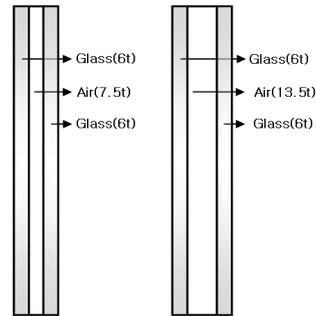
리창은 총 두께가 허니콤 적층재의 1/3이 안되나, 면밀도는 약 2배로 훨씬 무겁다. 본 연구에서는 중량 대비 차음 성능에 초점을 맞추었고, 투과손실 측정치의 평가에 다음의 무한 등방성 판재의 필드 입사음 질량법칙[3]을 사용하였다.

$$TL = 20 \log_{10} (m\omega / 2\rho c) - 5 \quad (dB) \quad (1)$$

여기서, m 은 패널의 면밀도, ω 는 주파수, ρ 와 c 는 공기 밀도 및 음속이다.



(a) Honeycomb composite panel



(b) Double glazed windows

Fig. 2 Side wall structures.

3. 투과손실의 측정

차음성능 평가를 위하여 ASTM E2249-02[2]에 근거하여 인텐시티 투과손실을 측정하였다. 이를 위하여 Fig.3의 음원실과 수음실 사이의 개구부(840mm x 840mm)에 시편을 설치하고, 음원실에서 회전 마이크폰을 사용하여 평균 음압을 측정하였고, 수음실 측에서는 인텐시티 프로브를 사용하여 시편상에서의 평균 인텐시티를 측정함으로써 음투과 손실을 결정하였다.

ASTM E2249-02에 의하면, 측정면상의 M개의

부분 면적 S_{m_k} 에서의 인텐시티 I_k 를 평균하여, 측정 면상의 평균 인텐시티를 식 (2)로 구할 수 있다.

$$\bar{I} = \frac{I_0}{S_m} \sum_{k=1}^M \left[S_{m_k} \left(10^{0.1L_{I_k}} \right) \text{sgn}(I_k) \right] \quad (W/m^2) \quad (2)$$

여기서 I_0 는 국제기준인텐시티 값 $10^{-12}W/m^2$ 을 의미 한다. L_{I_k} 는 부분면적당 인텐시티레벨이고, sgn은 인텐시티 방향을 표시하는 부호이다. 이로부터 측정면에 수직하는 인텐시티 레벨(signed normal sound intensity level)을 식 (3)으로 구할 수 있다.

$$\bar{L}_I = \text{sgn}(I_k) 10 \log \left(\frac{\bar{I}}{I_0} \right) \quad \text{dB} \quad (3)$$

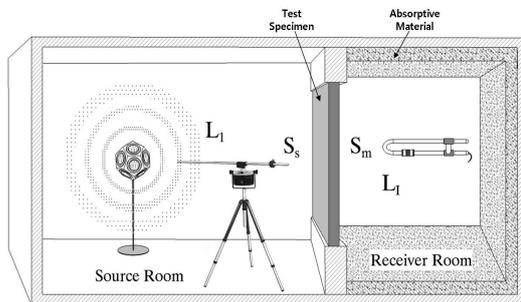
이상의 측정 데이터를 식(4)에 대입하여 인텐시티 투과손실을 결정하였다.

$$TL = \left[L_1 - 6 + 10 \log(S_s) \right] - \left[\bar{L}_I + 10 \log(S_m) \right] \quad (4)$$

여기서, L_1 는 음원실의 평균 음압레벨이고, S_s 는 시편의 면적(m^2)을, S_m 은 측정면의 면적(m^2)이다. Table 2는 잔향실의 제원을 보인다.

Table 1 Specification of the layers of side wall

Layer component specimens (size : 836mm x 836mm)	Mass (kg)	Thickness (mm)	Surface density (kg/m^2)
Aluminum honeycomb	7.24	43.0	10.36
Nomex honeycomb	2.40	10.0	3.43
Glass wool (coated with aluminum film)	0.87	20.0	1.25
Side wall (Al+honeycomb+glass wool+nomex honeycomb)	10.51	73.0	15.04
Double glazed window 1 (19.5t, initial model)	20.89	19.5	29.89
Double glazed window 2 (25.5t, proposed model)	21.25	25.5	30.41



(a) Measurement method



(b) Reverberant room

Fig. 3 Experimental set up for TL measurement.

Table 2 Specification of the reverberant room

Room volume	240.75 m^3
Cut off frequency	100 Hz
Background noise	25 dB(A)
Opening size	840mm × 840 mm

4. 투과손실 측정결과

4.1 측면 허니콤 적층재

틸팅열차 측면 허니콤재의 층별 투과손실과 전체 적층재의 투과손실 측정 결과를 Fig. 4에 보인다. 직선은 전체 측면재의 총 면밀도를 사용하여 구한 필드 입사음 질량법칙 평가치로, 1000Hz에서의 투과손실은 35dB 정도로 나온다. 그러나, 측정 결과는 50dB를 상회하는 매우 높은 투과손실을 보이는데, 총 투과손실은 알미늄 허니콤의 투과손실 32dB에 노멕스 허니콤의 투과손실 25dB를 더한 값에 근접한다.

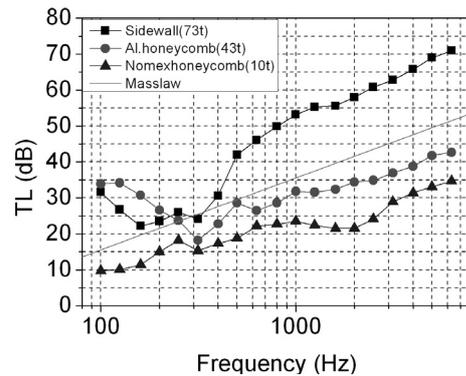


Fig. 4 Transmission loss of the composite part.

이와 같이 큰 투과손실은 두 허니콤재가 유리면 층 만큼의 간극을 두고 적층된 데에 기인하며, 향후 유사한 구조의 차음성능 예측에 참고할 만 하다.

4.2 이중 유리창

한편, 실차에서 유리창은 차음에 취약한 경우가 빈번하다. 특히 이중 유리창의 경우, 이중벽 공진(mass-air-mass resonance) 주파수 대역과 층별로 일치현상이 발생하는 임계주파수에서 차음성능이 현저히 떨어지므로, 이에 대한 면밀한 검토가 필요하다. 일치현상은 공기층 음파의 파장과 판재의 굽힘파 파장이 일치할 때 투과 및 방사가 크게 발생하여 차음성능이 악화되는 현상이다.

유리창을 질량요소로, 사이의 공기층을 스프링 요소로 하여 발생하는 이중벽 공진주파수 f_o 는 다음과 같이 결정된다[5].

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho c^2 (m_1 + m_2)}{d m_1 m_2}} \quad (5)$$

여기서, ρ 와 c 는 공기의 밀도 및 음속이고, m_1, m_2 는 두 유리창의 면밀도를, d 는 공기층의 두께를 의미한다.

또한, 일치현상이 시작되는 임계주파수 f_c 는 식(6)으로 주어진다[3].

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{12m(1-\nu^2)}{Et^3}} \quad (6)$$

여기서 c 는 공기중 음속, m 은 판재의 면밀도, ν 는 프와송비, E 는 종탄성계수, t 는 판재의 두께를 의미한다. 이중 유리창에 대한 이중벽 공진 주파수와 임계주파수 계산결과는 Table 3과 같다. 13.5mm 공기층의 경우 7.5mm 공기층에서보다 공진 주파수가 더 낮게 나온다. 그 이유는 공기층 간극이 커질수록 스프링 강성이 낮아지기 때문이다. 그러나 유리창의 두께는 모두 동일하므로, 임계주파수는 동일하게 나온다.

Table 3 Mass-air mass resonance and critical frequency of double glazed windows

Model	19.5T (6T+7.5T+6T)	25.5T (6T+13.5T+6T)
f_o	251 Hz	189 Hz
f_c	2340 Hz	2340 Hz

Table 3의 계산결과로부터 2340Hz에서 발생하는 층별 임계주파수 부근에서 투과손실이 크게 하락

할 것으로 예상된다. 또한 저주파수 대역에서는 각각의 이중벽 공진주파수에서 투과손실이 하락하여 질량법칙 평가치보다 낮은 투과손실을 보일 것으로 예상된다.

전술한 시험방법을 통하여 이중 유리창의 투과손실 측정결과를 Fig.5에 보인다. 예상대로 저주파수 대역에서는 각각의 이중벽 공진주파수 대역에서 투과손실의 하락이 관찰된다. 그 하락폭은 공기층의 간극이 커질수록 증가한다. 그러나 300Hz 이상에서는 공기층 간격을 크게 하는 것이 더 높은 투과손실을 가져와 차음에 유리한 것을 알 수 있다. 고속열차의 주요 소음원 주파수 대역을 감안하면 공기층 간격을 가능한 크게 하는 것이 차음성능을 높이는 방안이 된다.

2000Hz 이후에서는 일치효과 때문에 투과손실이 크게 떨어져 질량법칙 대비 15dB 정도 감소하여 차음상 심각한 문제를 발생시킨다. 그 주파수대역은 공기층의 간극에 무관하고 유리창의 두께로에 지배된다. 즉, 식(6)에서 임계주파수는 유리창이 두꺼울수록 아래로 내려오고 얇아지면 위로 올라간다. 따라서 6mm 유리 대신 3mm의 얇은 유리를 접착한 라미네이트 겹층 유리를 사용한다면, 임계주파수를 2배 위로 올릴 수가 있어 1000Hz 이후의 차음성능을 개선시킬 수 있다.

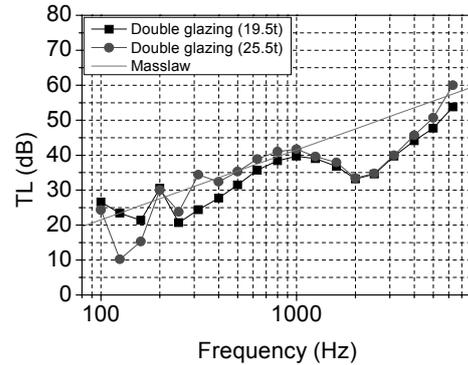


Fig. 5 TL of double glazed windows.

4.3 부분별 차음성능 비교

허니콤 적층재와 이중 유리창의 투과손실을 Fig. 6 a)에서 비교한다. 이중 유리창의 중량은 Table 1에서와 같이 허니콤 적층재의 약 2배나 된다. 따라서 식 (1)의 질량법칙에 따르면 이중 유리창이 6dB 더 높은 투과손실을 보여야한다. 그러나 일부 저주파수 구간을 제외하고는 이중 유리창이 허니콤 적층재에 비해서 상당히 낮은 차음성능을 보인다. 1000Hz에서는 10dB 이상 낮으며, 2000Hz에서는 무려 20dB 정도 허니콤 적층재에 비해 차음성능이 떨어진다. 알미늄 허니콤과 노맥스 허니콤이 20mm의 유리면 층을 사이에 두고 적층된 효과도

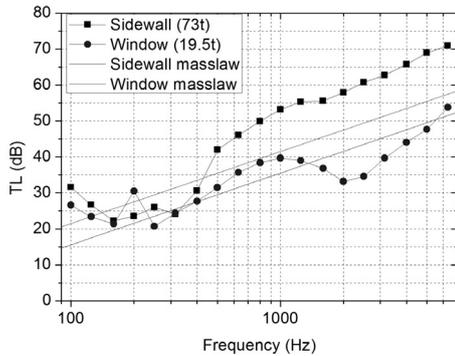
있겠지만, 중요한 원인은 2340Hz에서 발생하는 6mm 두께 유리의 일치효과임을 알 수 있다.

중량대비 차음성능을 평가하기 위하여 투과손실 측정치에서 질량법칙 계산치를 뺀 질량법칙편차(Mass Law Deviation ; MDL)를 Fig. 6 (b)에 보인다. MDL이 영 이상이면 중량대비 좋은 차음성능을 의미하고 음이면 악화된 차음성능을 의미한다. 허니콤 적층재가 거의 전 영역에서 중량대비 우수한 투과손실을 보이는 반면, 이중 유리창은 전 영역에서 질량법칙 평가치보다 훨씬 낮게 나온다.

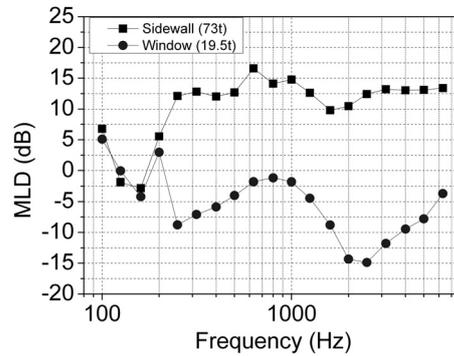
이와 같이 유리창 부분의 투과손실이 크게 떨어지는 것은 허니콤 적층재의 투과손실이 높더라도 측면재 전체의 증가적인 차음성능을 악화시킨다. 즉, 유리창에 대한 차음성능 개선방안이 강구되지 않으면, 전체의 측면재의 차음성능을 향상시키기 어렵다는 것을 의미한다.

그 대책으로 유리창을 겹층의 라미네이트 유리로 대체하여 두께를 반감시켜 임계주파수를 상승시킬 필요가 있다. 임계주파수가 현재보다 크게 상승한다면 질량법칙을 따르는 구간이 확대되어 상당한 차음성능 개선을 기대할 수 있다.

이 경우, 층간의 접착재가 유리창의 뎀핑을 크게 증가시키므로, 일치현상에 의한 하락폭을 줄이는 효과도 가져온다. 또한 측정결과에서도 확인되었지만, 이중 유리창의 공기층 간격이 커지면 투과손실이 전반적으로 향상되는 것으로 알려져 있다[5]. 따라서 실차 적용시 유리창 사이의 공기층 간격을 가용 범위내에서 최대한 크게 만드는 것은 이중 유리창의 투과손실을 높이는데 유리하다.



(a) Transmission loss



(b) Mass law deviation

Fig. 6 Sound insulation performance of side wall and double glazed window.

5. 결론

이중 유리창은 허니콤 적층재의 2배의 중량임에도 불구하고, 차음성능은 크게 떨어지는 것으로 나타났다. 반면 허니콤 적층재는 중량대비 차음성능이 매우 우수한 것으로 확인되었다. 따라서 측면재의 증가적인 차음성능을 높이기 위해서는 무엇보다도 유리창에 대한 차음성능 개선이 우선되어야 한다. 2중 유리창의 차음성능 악화 원인은 일부 저주파수 대역에서는 2중벽 공진효과이며, 심각한 문제가 되는 1000Hz 이후의 하락 원인은 6mm 유리창의 일치효과로 밝혀졌다. 그 방지 대책으로, 각 유리창을 겹층의 라미네이트 유리로 대체하여 두께를 반감시켜야 한다. 이 경우 임계주파수가 2배로 상승하고 뎀핑도 크게 증가되므로 차음성능 향상에 매우 유리하다. 또한 이중 유리창의 실차 적용시 층간 공기층 간격을 최대한 넓게 만드는 것도 차음에 유리하다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원의 위탁과제인 “한국형 틸팅열차의 차음성능 향상방안에 대한 연구”의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] <http://www.hanvit200.com/>
- [2] ASTM E 2249 - 02 : American Standards for Testing and Materials; *Standard Test Method for Laboratory Measurement of Airborne Transmission Loss of Building Partitions and Elements Using Sound Intensity*, American Standard Association, 2003.
- [3] L.L. Beranek and I.L. Ver, *Noise and Vibration Control Engineering*, John Wiley and Sons, Inc, 1992.
- [4] S.H.Kim, T.Seo, "Sound Insulation Performance of Honeycomb Composite Panel for a Tilting Train", *KSME Transactions(A)*, Vol.34(12), pp1931~1936, 2010.
- [5] J.D.Quirt, "Sound Transmission Through Windows I. Single and Double Glazing", *Journal of Acoustical Society of America*, Vol.72(3), pp.834~844, 1982.