

틸팅 차량용 적층재의 차음성능 평가

An Estimation of the Sound Insulation Performance of the Multi-layered Panel for a Tilting Train

서태건* 임봉기* 김석현† 김재철**
 Seo, Taegun Lim, Bong-Gi Kim, Seockhyun Kim, Jae-Chul

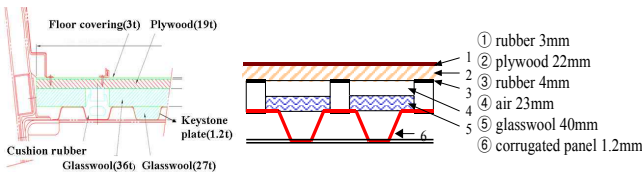
Key Words : 음투과손실(Sound Transmission Loss), 적층재(Multi-layered Panel), 국부공진(Local Resonance)

ABSTRACT

Sound transmission loss (TL) is experimentally investigated on the multi-layered panel used for the floor of a tilting train. Measurement of the intensity transmission loss is performed according to ASTM E 2249-02. The floor structure consists of corrugated steel panel, glass wool, plywood and cover. On the corrugated steel panel, TL drop by local resonance is considered and the TL improvement effect by damping treatment is estimated. Total sound transmission loss of the entire floor structure is obtained and the contribution of each layer is examined.

1. 서론

현재 개발중인 한국형 틸팅열차를 포함하여 대부분의 철도차량의 바닥재는 Fig. 1 a)와 같이 외측 바닥면이 주름강판으로 되어 있는 다층구조이다. 적층재 중에서도 주름강판은 강도와 차음 양면에서 가장 중요한 부분이다. Fig.1에서와 같이 현재 개발 중인 틸팅열차와 고속철도 차량 초기 모델인 TGV-K(A) 모두 1.2mm 두께의 구조용 강판을 사용한다. 최근 고속 철도차량의 경우, 주름강판은 경량화를 위하여 알루미늄 압출재로 대체되고 있으나, 단위 면적당 중량을 줄이면서 굽힘 강도를 크게 높일 수 있기 때문에 철도 차량의 중요한 구조로 사용되고 있다. 적층 상태에서 주름 강판은 차음성능 측면에서 가장 큰 기여도를 보인다.



(a) Tilting train(TTX) (b) TGV-K(A)

Fig.1 Floor structures for railway vehicles.

그러나 큰 차음 기여도를 갖는 주름강판도 동일한 면 밀도를 갖는 등가평판에 비해서는 열악한 차음성능을 보이는 것으로 알려져 있다. 이에 관련하여 Windle과 Lam⁽¹⁾은 주름구조에서 국부 진동모드의 공진이 투과손실을 크게 저하시킬 수 있음을 밝힌 바 있으며, Zheng⁽²⁾은 2중 주름판재와 보강된 주름판재를 사용하여, 투과손실의 급락을 감소시키는 대책을 제시한 바 있다. 본 연구에서는 현재 개발 중인 틸팅차량 적층재를 대상으로 차음성능을 실험적으로 평가하고, 주름강판의 차음특성이 전체 적층재의 차음 성능에 어떠한 영향을 주는지를 검토한다. 차음 성능 평가를 위하여 ASTM E2249-02에 근거하여 인텐시티 투과손실을 측정하였다.

2. 시편제원

시편은 실제와 동일하되, 제작 및 측정 여건을 고려하여 Fig. 2와 같이 두께 1.2mm, 높이 27mm의 주름강판과 19mm 두께의 합판을 연결하는 스티드를 제외한 모든 요소를 고려하여 적층시켰다. Table 1은 각 층의 중질량 및 면밀도 측정결과이다.

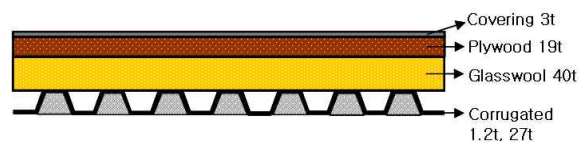


Fig.2 Cross section of the floor multi-layered panel.

† 교신저자; 강원대학교 기계메카트로닉스과 교수
 E-mail : seock@kangwon.ac.kr
 Tel : (033)252-2595, Fax : (033) 257-4190

* 강원대학교 대학원 석사과정

** 한국철도기술연구원 선임연구원

Table 1 Specification of the layer

| 구분 | 이름 | 결량 | 두께 | 면밀도 |
|-------|---|-------|------|----------------------|
| | | (kg) | (mm) | (kg/m ²) |
| floor | Keystone plate (no foamed) | 8.45 | 1.2 | 12.09 |
| | Keystone plate (half side foamed) | 8.97 | 1.2 | 12.835 |
| | Keystone plate (both side foamed) | 9.19 | 1.2 | 13.149 |
| | Plywood | 8.07 | 19.0 | 11.547 |
| | Floor covering | 2.14 | 3.0 | 3.062 |
| | Plywood+covering | 10.94 | 22.0 | 15.653 |
| | Glasswool | 0.52 | 20.0 | 0.744 |
| | Floor whole (keystone_half foamed +Glasswool*2+Plywood +covering) | 20.95 | 88.0 | 29.976 |
| | Floor whole (keystone_no foamed +Glass wool*2+Plywood +covering) | 20.04 | 88.0 | 28.688 |

3. 투과손실 평가 방법

차음성능 평가는 국제기준인 ASTM E2249-02⁽³⁾에 근거하여 인텐시티 투과손실을 측정하였다. Fig.3에 보이는 바와 같이 잔향실과 흡음실 사이의 개구부(840mm x 840mm)에 시편을 설치하고 가장자리를 밀폐 처리하였다. 이동 마이크로폰을 사용하여 음원실 확산음장에서의 공간 평균 음압을 구하였고, 스캐닝법을 이용하여 수음실내 시편상의 평균 음향인텐시티를 측정하였다. 인텐시티의 평균화는 다음 식 (1)을 통하여 구할 수 있다.

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

시편의 측정표면에서 부호화된 정규 인텐시티 레벨 (signed normal sound intensity level)을 다음 식 (2)를 통하여 구한다.

$$\bar{L}_{I_n} = \text{sgn}(\bar{I}_n) 10 \log \left(\frac{|\bar{I}_n|}{I_0} \right) \text{dB} \quad (2)$$

측정 데이터를 다음 식(3)에 대입하여 투과손실을 결정한다.

$$TL = [L_n - 6 + 10 \log(S_s)] - [\bar{L}_{I_n} + 10 \log(S_n)] \quad (3)$$

TL : 인텐시티 투과 손실, dB

L_n : 음원실 평균 음압레벨, dB

L_{in} : 측정 면적상에 수직 입사된 면적 평균 음향 인텐시티, W/m²

S_m : 전체 측정 면적, m²

S_s : 시편의 면적, m²

Table 2와 Table 3은 잔향실 제원 및 측정 장비를 보인다.



Fig.3 Measurement system

Table 2 Specification of the reverberant room

| | |
|----------|-----------------------|
| 표면적 | 237.35 m ² |
| 부피 | 240.75 m ³ |
| 컷 오프 주파수 | 100 Hz |
| 벽 두께 | 300 mm |
| 암소음 | 25.7 dB(A) |
| 시편 크기 | 836 × 836 mm |

Table 3 Measurement devices

| Devices | Models |
|--------------------------------------|---|
| Data acquisition and signal analyzer | Pulse (B&K) BE/miras Road Runner (LMS) |
| Signal generator | 35670A (HP) |
| Sound Intensity Microphone | Pair Type 4197 (B&K) |
| Rotating Microphone Boom | Type 3923 (B&K) |
| Microphone | Type 4942, 2669 (B&K) |

4. 투과손실 측정결과

Fig. 4는 주름강판과 질량법칙 (동일한 두께의 평판) 투과손실을 비교한다. 200Hz~800Hz 대역에서 두 결과는 근접하나, 100Hz~200Hz 대역과 2000Hz를 전후하여 등가 평판에 비해 투과손실이 급락한다. Fig. 5는 투과손실 측정과 동시에 측정된 판재상 진동 가속도이다. 투과손실이 급락하는 주파수 대역에서 상당히 큰 피크가 집중적으로 발생하여 큰 진동이 투과손실 하락과 직결됨을 알 수 있다. 저주파수 대역의 피크는 1차 모드 이후 저주파수 공진으로 확인 되었다. 그 주파수 대역은 시편의 크기 및 경계조건에 영향을 받으며, 일반적으로 저주파수 대역에서 발생하므로 차음 측면에서 크게 문제되지 않는다. 그러나 2000Hz 전후의 큰 피크는 차음성능에 큰 문제가 될 수 있다. 정밀측정 및 유한요소해석결과 고주파수대역에서의 피크는 국부 모드의 공진에 의한 것으로 확인되었다. 국부진동모드란 주름판재

의 전체적인 변형보다는 주름단위의 국부적인 변형에 지배되는 모드를 의미한다. Fig.6은 유한요소해석으로 구한 1차 국부 진동모드를 보인다. 이후 이러한 국부진동모드가 다수 출현하는데, 해당 주파수 대역에서 음파에 의하여 공진되면서 차음성을 급격히 떨어뜨리게 된다. 소음원 주파수 특성과 관련하여 특정 주파수 대역에서의 차음성 급락은 실내소음의 증가를 초래할 수 있으므로, 이를 사전에 예측하고 대책을 강구할 필요가 있다.

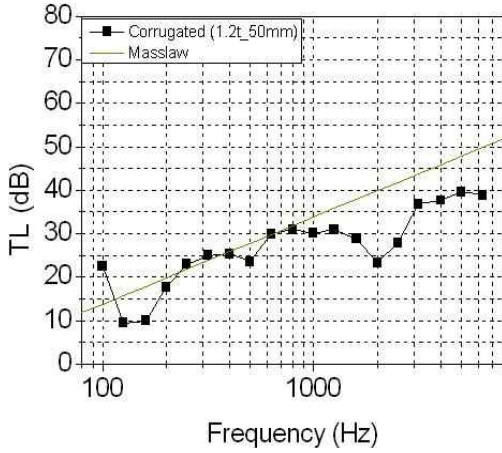


Fig. 4 TL of the corrugated steel panel.

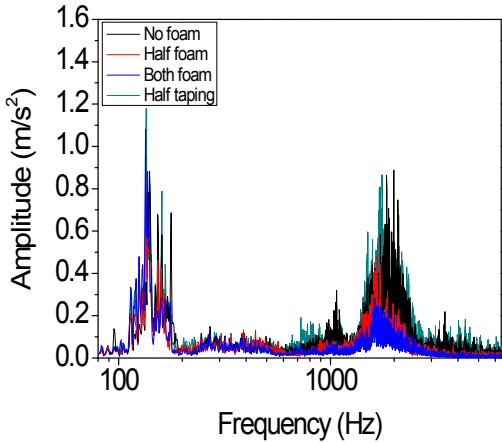


Fig. 5 Vibration spectrum under TL measurement.

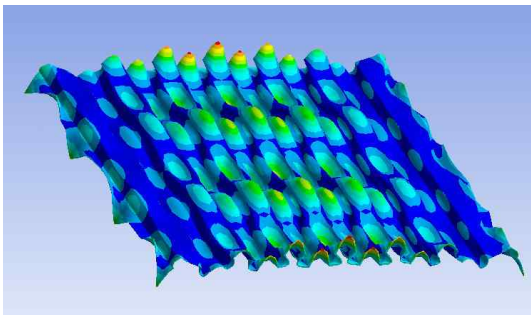


Fig.6 1st local mode (2173Hz)

공진에 의한 투과손실 감소를 방지하기 위하여 주름

강판의 투과손실에 대한 댐핑 효과를 측정하였다. 댐핑 효과를 주기 위하여 Fig. 7과 같이 우레탄 폼재를 충진시켰다. 양 면, 한 면을 각각 충진하고 접착 테이프로 밀착시켰다. 충진량은 Table 1에 주어지며, 테이프만을 부착한 시편도 추가로 검토하였다. Fig. 8은 투과손실 측정결과이다. 1000Hz 아래에서는 댐핑 증가에 따른 영향이 작다. 그러나 1000Hz 이후 차음성은 크게 향상되어, 양면 충진의 경우 2000Hz를 전후하여 약 10dB의 차음성 개선효과를 보인다. Table 1에서와 같이 양면 충진시 8.7% 정도의 중량 증가를 가져오는데, 질량 법칙에 따르면 이 정도의 무게 증가는 차음성을 별로 증가시키지 못한다. 그러나 2000Hz 대역을 전후한 국부 공진대역에서는 폼재의 구속에 의한 댐핑 증가가 기대 이상의 차음성 개선효과를 주고 있다. 한 면만 충진시키는 경우에도 약 5dB 이상의 개선 효과를 보이므로, 폼재를 사용한 댐핑 처리는 주름강판의 차음성을 개선하는 현실적인 방안으로 평가된다. 그러나 테이핑에 의한 댐핑효과는 매우 작아 전체 주파수 대역에서 투과손실에 영향을 주지 못하고 있다. 이러한 댐핑 효과는 투과손실 측정과 동시에 측정한 판재상 가속도 레벨로도 확인되었다. Fig.5에서와 같이 폼재 충진시, 2000Hz를 전후하여 진동레벨이 상당히 저감되는 것을 볼 수 있다.

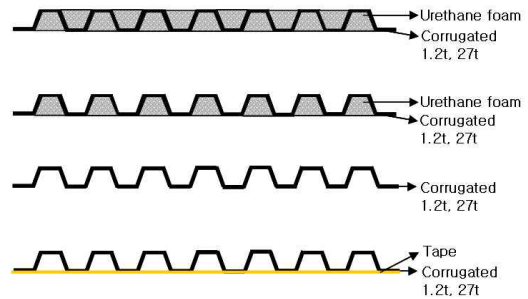


Fig.7 Damping treatment of the corrugated panels.

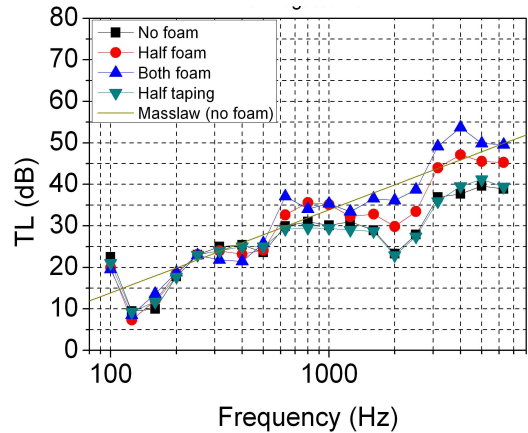


Fig. 8 Effect of the damping treatment on TL.

주름강판 다음으로 차음에 기여하는 합판과 상부 커버의 장착 조건에 따른 차음성능의 변화를 검토하였다. Fig.9에서 1000Hz 아래에서는 질량법칙 예측치와 비슷한 값을 보인다. 그 이후 차음성능이 떨어지는 것은 일치효과에 기인한다. 커버는 합판 면밀도의 1/5 정도이나 기대 이상의 높은 투과손실을 보여 중량대비 차음 성능이 우수하게 나타났다.

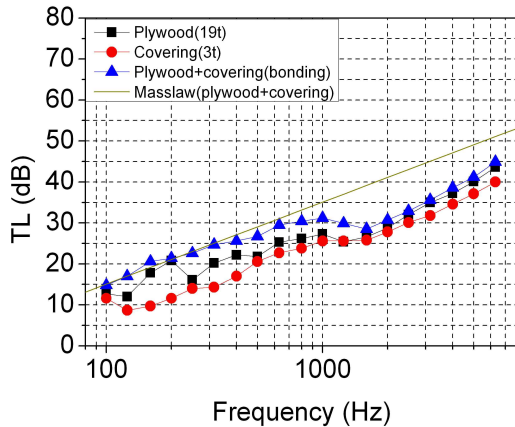


Fig. 9 TL of plywood and cover.

유리면(Glass wool)은 면밀도가 매우 작으나, 강판이나 합판, 허니콤재등과 함께 사용되는 경우의 차음성능 개선효과가 검토해볼 필요가 있다. Fig. 10은 1.2mm의 평강판에 장착(비접착)하는 경우의 차음성능이다. 고주파수대역으로 갈수록 투과손실 증가효과는 더욱 커진다. 40mm 두께의 경우, 1.5kg/m²의 낮은 면밀도에도 불구하고, 2000Hz 대역에서 무려 15dB 이상의 투과손실 증가효과를 가져오는 것은 매우 흥미롭다.

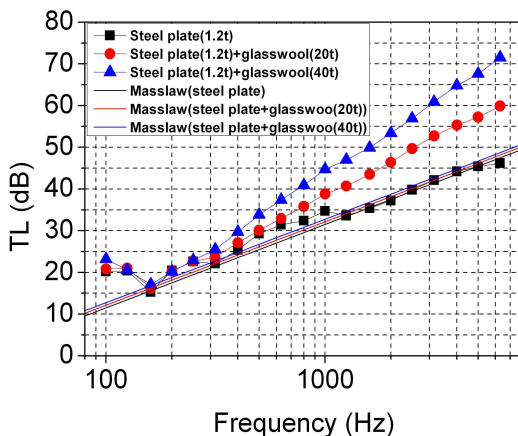


Fig.10 Effect of Glass wool on TL

이상의 층재를 적층한 전체 바닥재의 차음성능을 Fig.11에 보인다. 2000Hz 대역에서 주름강판의 국부공진 때문에 투과손실이 약간 하락하고 있음에도, 동일한 중량을 갖는 단일 평판에 비하여 월등히 높은 투과손실을 보인다. 적층효과로, 전술한 층별 투과손실이 합쳐져 500Hz 이후 50dB 이상의 투과손실을 보인다.

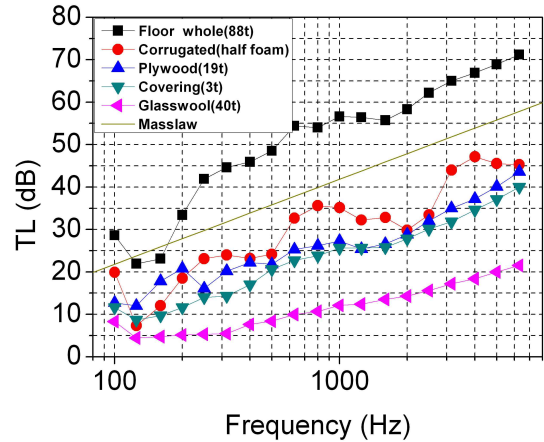


Fig.11 TL of layers used in the tilting train.

5. 결 론

주름강판의 투과손실은 질량법칙을 추종하나, 두 개의 주파수 대역에서 큰 폭으로 떨어지는 현상을 보인다. 130Hz 부근에서 1차 전체 급힘 공진에 의하여 투과손실이 급락한다. 시편이 커지면 이 공진주파수는 훨씬 더 낮은 주파수 대역으로 내려가므로, 실제 상황에서는 문제가 되지 않는다. 그러나 2000Hz 전후에서 국부공진에 의한 투과손실 급락은 철도 차량의 소음특성상 문제가 된다. 이 문제는 폼재로 댐핑을 증가시켜 상당히 개선할 수 있었다. 바닥 커버는 합판에 장착됨으로써 투과손실을 크게 개선시켰고, 유리면도 적층재로 사용됨으로써 중량에 비해 차음성능 향상에 기여하는 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 건설교통평가원이 지원하는 “한국형 틸팅 열차 안정화기술 연구”의 위탁과제인 “한국형 틸팅 열차의 차음성능 향상방안에 대한 연구”의 연구비 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Windle, R. M. and Lam, Y. W., 1993, “Prediction of the Sound Reduction of Profiled Metal Cladding. Inter-Noise'93”, Vol. 2, pp.999-1002.
- (2) Ng, C. F. and Zheng, H., 1998, “Sound Transmission through Double-leaf Corrugated Panel Construction”, Applied Acoustics, Vol. 53, No.1-3, pp.15-34.
- (3) 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 ASTM E 2249 - 02: 2003