

# 허니콤재의 투과손실 저하 인자에 대한 고찰

## Considerations on the Factors Reducing the Sound Transmission Loss of the Honeycomb Panels

김석현\*                      이현우\*\*                      김정태\*\*\*  
Kim, Seockhyun              Lee, Hyunwoo              Kim, Jungtae

---

### ABSTRACT

In a high speed train, multi-layered panels for floor, side wall and roof are important sound insulating part. As these multi-layered panels require high bending strength vs. weight, corrugated steels or aluminium honeycomb panel are generally used. However, with some inevitable factors, these panels show lower sound insulation performance than that of the plate with the same weight. Transmission loss(TL) often severely decreases in a particular frequency range because of the decrease of the critical frequency, occurrence of local resonance modes and cavity resonance modes, which are not shown in a plate. In this study, frequency range and cause of the TL drop are investigated on the corrugated and honeycomb panels.

---

## 1. 서 론

고속철도 차량에서 바닥, 측면, 천정의 다층재는 외부로부터의 소음을 차단하는 중요한 차음재이다. 이러한 적층재는 중량 대비 높은 굽힘 강도를 필요로 하므로, 주름강판이나 알루미늄 허니콤재를 사용하게 된다. 그러나 허니콤 구조는 굽힘 강성의 획기적 증가에도 불구하고, 몇 가지 불가피한 특성 때문에 동일한 중량을 갖는 평판에 비해 불리한 차음성능을 보일 수가 있다[1]. 즉, 굽힘강성의 큰 증가로 인한 임계주파수의 하락[2], 주기적 구조의 국부진동 모드의 증가[3]. 그리고 코어부 음향공명 효과 등, 평판에서는 발생하지 않는 불가피한 현상으로 특정 주파수 대역에서 투과손실이 급격히 하락할 수 있다. 본 연구에서는 고속철도 차량에서 사용되는 주름 및 허니콤재를 대상으로 발생 주파수 대역을 검토하고, 차음성능의 저하를 예방하는 방법에 대하여 검토한다.

## 2. 직방성 판재의 차음성능

### 2.1 등가 등방성 모델

허니콤재는 직방성 판재이나 동일한 면밀도를 갖는 등가 등방성재의 질량법칙 모델을 적용해볼 수 있다. 그러나 일치현상이 발생하는 주파수 대역에서는 질량법칙 예측치보다 투과손실이 크게 감소한다. 이에 따라 Cremer는 일치효과를 고려한 다음의 필드입사음 투과손실 예측식을 제시하였다[4].

---

\* 저자1 소속, 강원대학교, 메카트로닉스전공, 정희원

E-mail : seock@kangwon.ac.kr

TEL : (033)250-6372 FAX : (033)257-4190

\*\* 강원대학교 대학원 메카트로닉스 전공 석사과정

\*\*\* 홍익대학교 기계시스템디자인공학부, 정희원

$$TL(dB) = 20\log_{10}\left(\frac{m\pi f}{\rho c}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{2\eta f}{f_c}\right) - 5 \quad (1)$$

여기서,  $m$ 은 패널의 면밀도,  $\rho$  는 공기의 밀도,  $c$ 는 공기중의 음속이다. 또한,  $f_c$ 는 임계주파수,  $\eta$ 는 구조손실계수이다.

## 2.2 등가 직방성 모델

Fig.1과 같은 허니콤 판재는 거시적으로 직방성을 보인다. Cremer와 Heckl의 무한 직방성 판재 이론 [5]에 근거하면, 패널 임피던스를 다음과 같이 입사각  $\theta, \phi$ 의 함수로 결정할 수 있다.

$$Z = \frac{P}{j\omega w} = j\omega m \left[ 1 - \left[ \frac{f}{f_{c1}} \cos^2\phi + \frac{f}{f_{c2}} \sin^2\phi \right]^2 \sin^4\theta (1 + j\eta) \right] \quad (2)$$

여기서,  $m$ 은 패널의 면밀도 (surface density),  $\eta$ 는 구조감쇠치,  $c$ 는 공기중 음속이며,  $f_{c1}, f_{c2}$ 는 일치현상(coincidence)이 발생하는 임계주파수이다. 식(2)를 사용하여 입사 및 투과음사이의 파워 비인 투과손실계수를  $\theta, \phi$ 의 함수로 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\tau_{\theta\phi} = \left| 1 + \frac{Z \cos\theta}{2\rho c} \right|^{-2} \quad (3)$$

본 연구에서는 다음과 같이 입사각을  $0^\circ \sim 78^\circ$  범위로 하여 필드입사음 투과계수 및 투과손실을 계산하였다.

$$\tau_R = \frac{2}{\pi} \int_0^{\phi_{\text{lim}}} \left[ 2 \int_0^{\theta_{\text{lim}}} \tau_{\theta\phi} \cos\theta \sin\theta d\theta \right] d\phi, \quad TL_R = 10\log_{10}\left(\frac{1}{\tau_R}\right) \quad (4,5)$$

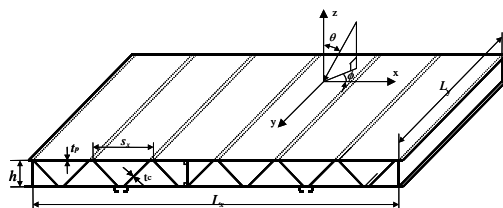


Fig. 1 Coordinate system of orthotropic panel.

## 3. 허니콤재의 투과손실

여기서는 고속철도 차량용 바닥재에 사용되는 주름강판 및 알루미늄 허니콤재의 투과손실을 검토한다. 측정치로는 선행 연구결과[1] 및 Alstom사의 제공치를 사용한다. Fig.2 (a)는 알루미늄 허니콤을 포함하는 바닥재이고, (b)는 TGV-K의 바닥재 구조이다. 두 경우 모두, 주름강판 및 알루미늄 허니콤재가 가장 중요한 하중지지 요소인 동시에 차음 요소가 된다. Fig.3은 두 바닥재의 투과손실 측정치와 알루미늄 허니콤재만의 투과손실 측정치를 비교한 결과이다. 알루미늄 허니콤재의 경우, 600Hz부터 투과손실이 감소하여 1000Hz 대역에서 현저히 낮은 차음성능을 보인다. 이 때문에 합판 등 내장재가 장착된 후에도 1000Hz 부근에서는 여전히 낮은 투과손실을 보인다. TGV-K 바닥재의 경우에는 이보다 높은 2000Hz 부근에서 투과손실이 떨어지고 있다. 이와 같이 특정 주파수 대역에서의 차음성능의 급락은 실내소음 레벨을 증가시키게 되므로 사전에 이를 예측하고 대책을 강구할 필요가 있다. 동일한 면밀도를 갖는 등가평판에 비해서 어느 정도의 차음성능을 갖는지를 파악하기 위해서 Fig. 4에서 질량법칙 예측치와 측정치를 비교한다. TGV-K 바닥재와 알루미늄 허니콤재 모두 저주파수 대역에서는 질량법칙의 예측치가 측정치에 근접한다. 그러나 각각 2000Hz와 1000Hz 부근에서 측정치는 10dB~15dB 정도 떨어진다. 식 (5)의 직방성 판재 이론에 따르면, 허니콤재의 급힘 강성이 현저히 증가하면서 임계주파수가 사용 주파수대역으로 떨어지면, 투과손실이 급락한다. 그러나 Luo의 등가평판 이론[6]에 따라 허니콤재의 임계주파수를 산정해보면, 100Hz~200Hz의 저주파수 대역에서 발생한다. 따라서 이러한 급락은 일치효과 이외의 다른 요인에 기인하는 것으로 보이며 이에 대한 검토가 필요하다.

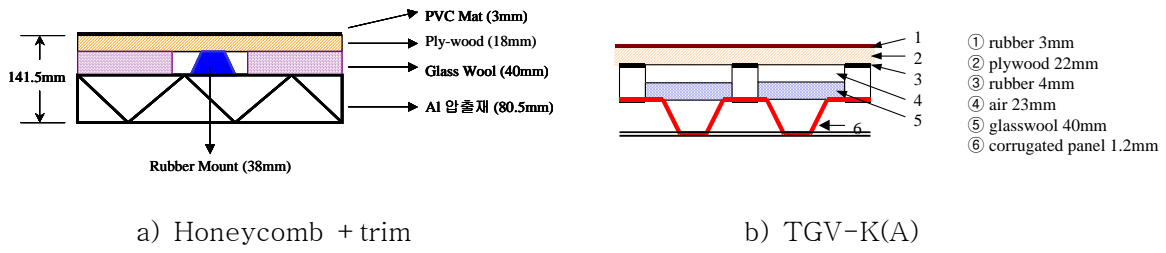


Fig.2 Floor structures for high speed trains.

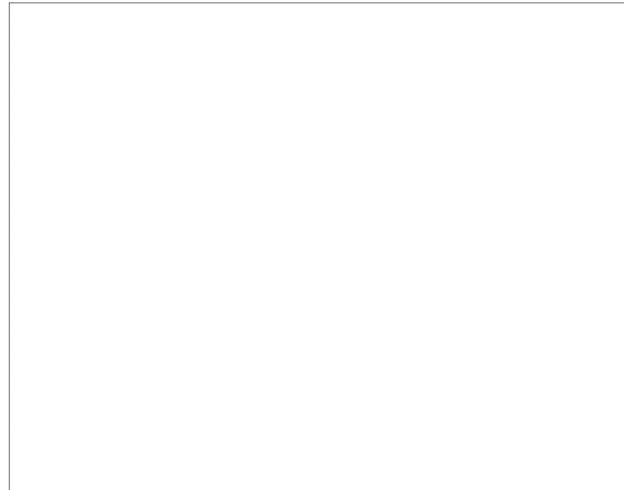


Fig. 3 Transmission loss of floor panels.



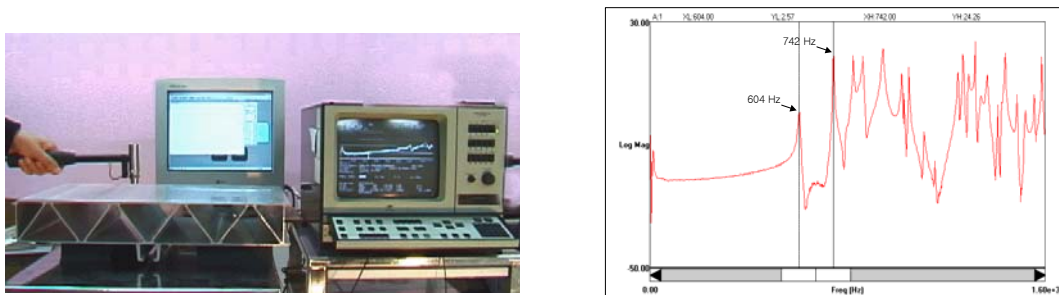
(a) TGV-K floor structure (b) Aluminium honeycomb structure

Fig. 4 Mass law prediction and measured TL.

#### 4. 투과손실 저해 요인

판재를 통한 음의 투과는 입사음이 판재를 진동시켜 반대편으로 방사되는 과정을 거치게 된다. 따라서 판재 진동의 주파수응답 특성은 차음 성능에 영향을 주는 가장 기본적인 특성이다. Fig.5와 같이 충격시험을 통하여 허니콤재의 주파수응답특성을 확인하였다. 600Hz부터 공진 모드가 출현하여 이후 많은 공진 피크가 발생하고 있다. 유한요소해석 결과, 이러한 공진 피크는 Fig. 6과 같이 허니콤재의 단위 구조상에서 발생하는 국부 공진 모드로 확인되었다. 국부공진 모드는 시편의 크기와 경계조건에 영향을 받는 전체 모드(overall mode)와 달리, 허니콤재의 단위 구조의 제원에 의하여 모드 및 주파수대역이 결정된다. TGV-K 바닥재의 주름강판을 대상으로 동일하게 유한요소해석을 수행한 결과, Fig. 7 (a)와 같이 매우 낮은 주파수대역에서는 시편의 크기에 영향을 받는 전체 모드가 발생하였다. 이러한 모드는 합판 등의 내장재가 부착될 때 주파수 대역이 현저히 변한다. 그러나 Fig.7 (b)에서와 같이 2000Hz부터

단위 구조상에서 굽힘 변형을 보이는 국부 공진 모드가 출현한다. 이러한 국부 공진모드는 Fig.8과 Fig.9의 2 스패 및 1 스패의 짧은 시편의 경우에도 유사한 주파수를 보이며, 양단의 경계조건의 영향도 미미한 것으로 확인 되었다. 두 가지 시편에 대한 해석결과, 1000Hz 와 2000Hz 부근에서의 투과손실의 심한 저하는 직방성재의 일치효과보다는 국부 공진효과에 기인하는 것으로 판단된다. 입사음에 의하여 많은 국부 공진 모드가 크게 발생하고 그 결과 반대편으로 많은 음을 방사시킴으로써 차음성능이 현저히 훼손된다. 이에 대한 대책으로, 국부공진 주파수대역을 높게 나오도록 단위 구조를 설계하는 것, 효과적으로 댐핑을 증가시켜 공진모드의 과도한 출현을 억제하는 것, 내장재를 효과적으로 사용하여 전체 투과성능을 개선하는 방안 등이 강구된다. 다행스럽게도 Fig.3에서와 같이 합판 등의 내장재 부착에 따라 허니콤재만의 국부공진 효과는 어느 정도 완화되는 것을 볼 수 있다. Fig.10과 Table 1은 허니콤재의 단위 구조를 적절히 설계한다면, 동일한 중량조건하에서도 국부 공진의 주파수 대역을 올릴 수 있음을 보인다.



(a) Impact test (b) Frequency response function

Fig.5 FRF of the aluminium honeycomb panel.

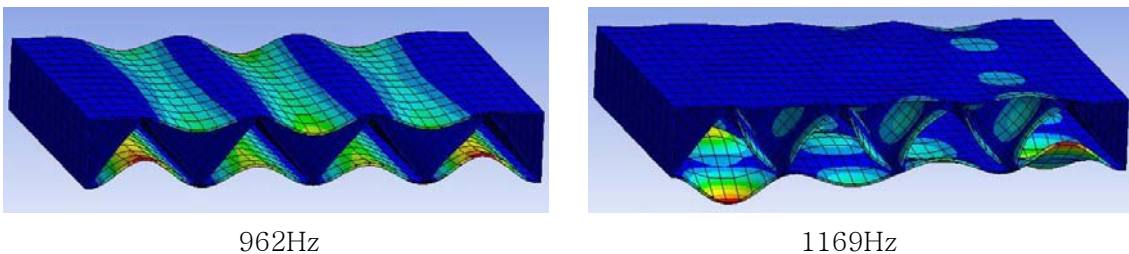


Fig. 6 Local resonance modes of aluminium honeycomb structure.

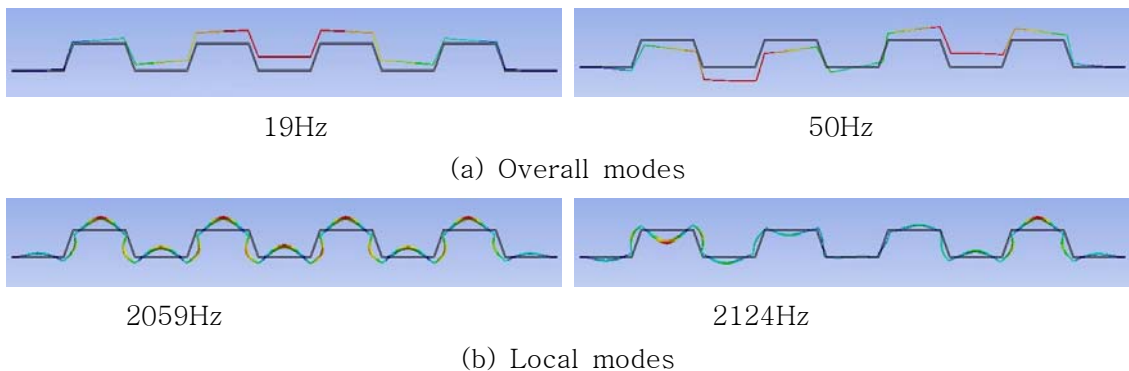
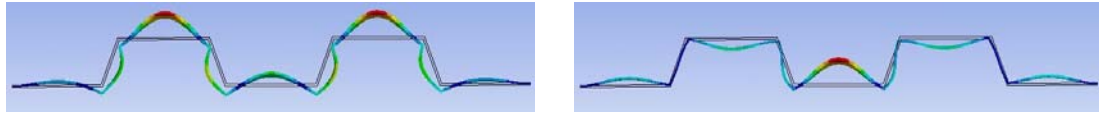
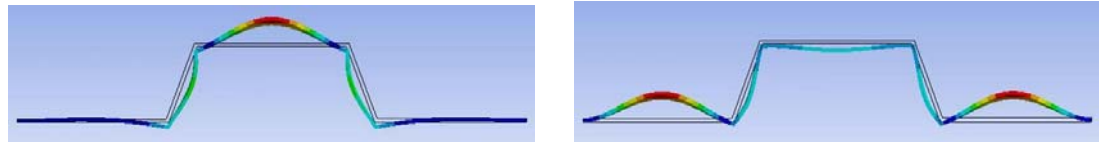


Fig.7 Resonance modes of 4-span corrugated steel panel.



2060Hz 2193Hz  
 Fig. 8 Local resonance modes of 2-span corrugated steel panel.



2048Hz 2302Hz  
 Fig. 9 Local resonance modes of 1-span corrugated steel panel.

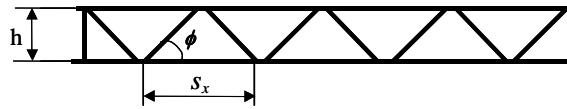


Fig. 10 Design variables of the core structure.

Table 1 1st local resonance frequencies for the modified core structures.

| Parameter                         | Model | core angle          |                   |                   |                   |
|-----------------------------------|-------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                                   |       | $\phi = 45.5^\circ$ | $\phi = 50^\circ$ | $\phi = 55^\circ$ | $\phi = 60^\circ$ |
| Height, h(mm)                     |       | 80.5                | 80.5              | 80.5              | 80.5              |
| Plate Thickness ratio             |       | 1.05                | 1.00              | 0.96              | 0.90              |
| Mass Density (kg/m <sup>2</sup> ) |       | 25.04               | 25.09             | 25.05             | 25.09             |
| Spacing S <sub>x</sub> (mm)       |       | 161                 | 131               | 113               | 93                |
| 1st Local Vibration Frequency(Hz) |       | 393                 | 590               | 655               | 830               |

## 5. 결론

고속열차의 경량화를 위하여 사용되는 알루미늄 허니콤재와 주름강판을 대상으로, 차음성능을 평가하였다. 동일한 면밀도를 갖는 등가평판의 질량법칙 예측치와 측정치를 비교하였다. 질량법칙은 국부 공진 주파수의 출현 대역 아래에서는 의미있는 예측치를 주었으나, 국부 공진주파수 이후의 투과손실 급락은 반영하지 못하였다. 국부 공진에 의한 차음성능의 악화는 합판 등의 내장재 부착으로 다소 완화되었다. 국부공진 주파수대역은 시편의 크기나 지지조건에 영향을 거의 받지 않고, 허니콤재나 주름의 단위 구조의 제원에 의하여 결정되었다. 그 주파수 대역은 단면 구조에 대한 유한요소해석으로 예측 가능하였으며, 동일한 중량하에 국부 공진 주파수대역이 높게 되도록 단위 구조의 설계가 가능하였다.

## 후 기

본 연구는 건설교통평가원이 지원하는 “분산형 차량성능 및 운용 기반기술 개발연구”의 세부과제인 “실내외 소음저감 기술”의 연구비 지원으로 수행되었으며, 건설교통평가원의 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. S. H. Kim et al. (2000), "Sound Transmission Loss of Aluminium Extruded Panels for Railway Vehicles", Transactions of KSNVE, Vol.10(4), pp.662-668.
2. C. H., Hansen (1993), "Sound Transmission of Corrugated Panels", Noise Control Engineering Journal, Vol. 40, pp.187-197.
3. R. M. Windle, and Y. W. Lam (1993), "Prediction of the Sound Reduction of Profiled Metal Cladding. Inter-Noise'93", Vol. 2, pp.999-1002.
4. L. Cremer, M. Heckl, and E. E. Ungar (1988), Structure-Borne Sound, 2nd ed., Springer-Verlag, Berlin.
5. M. Heckl, (1960), "Untersuchungen an Orthotropen Platten. Acoustics", Vol.10, pp.109-115.
6. S. Luo, and J. C. Suhling, and T. L. Lafeberg (1995), "Bending and Twisting Tests for Measurement of the Stiffness of Corrugated Board", ASME AMD-Vol. 209, pp.91-109.