

철도차량용 주름판재의 차음성능

Sound Insulation Performance of Corrugated Panels for Rail Way Vehicles

김 석 현* 박 정 모**

Kim, Seock-Hyun Park, Jung-Mo

Abstract

Sound insulation performance is investigated on the corrugated panel used for a rail way vehicle. Random incidence sound transmission loss is calculated by using the equivalent orthotropic plate model. Analysis results on several kinds of corrugated panels are in good agreement with the measured data. The analysis method is applied to predict the sound transmission loss of the corrugated panel used for Korean high speed train.

키워드 : 주름판재, 음투과손실, 한국형 고속철도차량

Keywords : *corrugated panels, sound transmission loss, Korean high speed train*

1. 서론

철도차량은 엔진 및 구동장치, 차륜 및 레일, 공조계, 팬터그래프, 각종 전기 및 기계장치, 공력소음등 많은 내/외부의 소음 및 진동원을 가지고 있다. 기밀성이 양호한 경우, 소음/진동원에서 발생한 소음은 바닥, 측면 및 천정의 판재를 통하여 실내로 투과되거나 결합부를 통하여 구조 진동으로 실내로 전달된다. 객차 및 동력차의 실내는 충분한 차음을 위하여 흡/차음재로 구성된 다층 판재로 소음원과 격리되어 있다.

이 경우, 진동/소음원으로부터의 소음을 얼마나 차단하는가를 표시하는 차음성능치로는 판재의 음향투과손실(sound transmission loss)이 사용된다. 특히, 객실을 둘러싸고 있는 다층 흡/차음재의 투과손실은 외부로부터의 소음수준이 주어질 때, 실내 소음의 수준을 결정하는 매우 중요한 인자가

된다. 바닥재는 충분한 하중을 지지하면서 레일소음을 효과적으로 차단하기 위하여 주름강판(corrugated steel panel)을 포함하는 다층 구조로 되어 있다. 한국형 고속전철(TGV-K)에 사용되는 바닥재에서는 충분한 굽힘 강성을 갖도록 요철형으로 된 주름 강판(corrugated steel panel)을 사용한다. 그러나 주름강판이 외부로부터의 소음을 차단하는데 있어서는 동일한 중량의 등가 평판에 비해서 불리한 측면도 있다.[1] 본 논문에서는 주름판재의 투과손실 특성을 체계적으로 고찰함으로써, 차음성능을 지배하는 설계인자의 효과를 규명하고, 차음에 유리한 주름판재를 설계하는데 필요한 정보를 제공하는 것을 연구의 목표로 한다. 이를 위하여, 기존의 실험치와의 비교가 가능한 몇 가지 주름 판재를 대상으로, 투과손실을 비교 분석하였다.

* 강원대학교 정밀기계공학과 교수

** 일본도시가스공업 연구원

2. 이론적 고찰

2.1 주름판재의 투과손실

Heckl의 직방성 무한 평판모델에 근거하면, 주름판재는 거시적으로 직방성을 가지므로, 판재내의 굽힘파의 운동은 B_x, B_y 두 개의 주 굽힘 강성에 의하여 다음 식으로 기술된다.[2]

$$(1-j\eta) \left[B_x \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2(B_x B_y)^{1/2} \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + B_y \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right] + m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = p \quad (1)$$

여기서, η 는 판재의 구조 손실계수(structural loss factor), w 는 판재 수직 변위, m 은 판재의 면밀도(surface density), 그리고 p 는 입사 음압을 의미한다. 그림 1에서와 같이 입사각은 θ, ϕ 두 개의 변수로 표시되는데, 특히 ϕ 는 주름축에 대한 입사각을 의미하는데, 측정치와 해석치와의 차이에 영향을 크게 주는 인자이다.

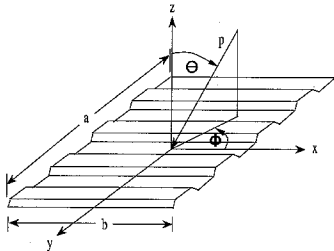


그림 1. 주름 판재의 구조 및 음 입사

주름 판재의 주 굽힘 강성은 그림 2의 여러 설계 변수들에 의하여 지배되는데, 본 연구에서는 다음의 굽힘강성 모델을 사용한다.[3]

$$B_x = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \left[\frac{\sum_n b_n}{L} \right] \quad (2)$$

$$B_y = \frac{Eh}{(1-\mu^2)L} \sum_n b_n \left[z_n^2 + \frac{h^2 + b_n^2}{24} + \frac{h^2 - b_n^2}{24} \cos 2\phi_n \right] \quad (3)$$

여기서, h 는 판재의 두께이고, E, μ 는 탄성계수 및 프와송비이다.

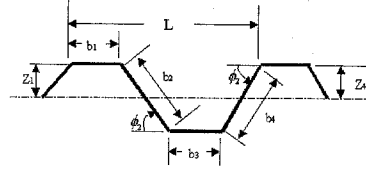


그림2. 주름 판재의 설계 변수

평판상의 음파장과 공기중의 음파장이 같아지는 일치현상(coincidence)이 발생하는 임계주파수(critical frequency)는 다음의 두 식으로 결정된다.[4]

$$f_{c1} = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{B_y}} \quad (4)$$

$$f_{c2} = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{B_x}} \quad (5)$$

여기서, c 는 공기중 음속이다. 판재 속도에 대한 음압비로 정의되는 판재의 음향 임피던스는 식(1)에 식(4),(5)을 사용하여 다음과 같이 θ, ϕ 의 함수로 구할 수 있다.[5]

$$Z = \frac{P}{j\omega w} = j\omega m \left[1 - \left[\frac{f}{f_{c1}} \cos^2 \phi + \frac{f}{f_{c2}} \sin^2 \phi \right]^2 \sin^4 \theta (1+j\eta) \right] \quad (6)$$

식(6)을 사용하면, 입사 및 투과음 사이의 파워 비인 투과손실계수를 θ, ϕ 의 함수로 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\tau_{\theta\phi} = \left| 1 + \frac{Z \cos \theta}{2\rho c} \right|^{-2} \quad (7)$$

측정치에서는 확산음장의 입사환경을 전제로 하므로, 이에 가장 가까운 랜덤 입사음 투과계수 및 투과손실은 다음과 같이 입사각에 대하여 평균치로 구할 수 있다.

$$\tau_R = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \left[2 \int_0^{\pi/2} \tau_{\theta\phi} \cos \theta \sin \theta d\theta \right] d\phi \quad (8)$$

$$TL_R = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\tau_R} \right) \quad (9)$$

식(9)로부터 랜덤 입사음 투과손실을 구하여 실험치와 비교 평가하고 차음성능을 예측하게 된다.

3. 단일주름패널의 음투과손실

투과손실 해석치의 신뢰도를 검증하기 위하여 그림 3에 보이는 Hansen[6]의 주름 판재모델 5종을 대상으로 음 투과손실을 계산하여 Hansen의 실험 결과와 비교하였다. 해석에 사용된 패널은 0.42mm의 동일한 두께를 갖는 구조용 강판으로, 7800 kg/m³의 밀도를 가지나, 주름의 형태에 따라 면 밀도에서는 도표 1에서와 같이 약간의 차이를 보인다. 구조 손실계수로는 Hansen이 실험적으로 구한 $\eta=0.011$ 을 적용하였다. 그림 4에서 Hansen의 측정치는 대/소 2 종류 시편의 투과손실을 제공한다. 큰 시편(large size)은 3.19m x 2.96m이고, 작은 시편(small size)은 1.50m x 1.05m의 크기를 갖는다. 해석은 무한 직방성 패널모델을 사용하므로, 두 결과를 비교함으로써, 투과손실에 대한 패널의 크기효과도 평가할 수 있다. 그림 4에서, 주름 판재 투과손실 측정치는 해석치보다 다소 높은 값을 보인다. 이러한 차이는 판재 시편의 공진 주파수 아래의 저주파수 범위에서 두드러진다. 그 이유는 시편의 유한 크기가 강성을 증가시키고, 공진주파수 아래 강성 지배역의 투과 손실 증가로 이어지기 때문이다. 따라서 그 효과는 작은 시편에서 더욱 크게 나타나는 것을 관찰할 수 있다. 대부분의 모델에서 1차 임계주파수(f_{c1})부근에서 투과손실이 감소하는 것은 측정치나 해석치나 유사하게 나타난다. 이러한 일치효과에 의한 차음성능의 저감은 주름에 굽힘 강성(B_x)이 매우 높아져서, 1차 임계주파수가 저주파수 대역으로 내려오면서 발생된다. 도표 1에서와 같이, 1차 임계주파수는 주름 효과에 의하여, 2차 임계주파수와 비슷한, 수만 Hz의 대역으로부터 수백 Hz대역으로 내려오고, 그 결과 차음 성능이 떨어진다. 또한, 가)의 경우, 측정치에서는 유한시편의 공진에 의한 투과손실 저하가 저주파수 대역에서 나타나고, 고주파수 대역에서는 주름 단위의 국부적 공진에 의한 차음성능 저하가 발생한다. 이러한 공진 효과는 본 연구에서 사용하는 거시 직방성 모델로는 예측이 어려운 특성이다. 그럼에도 불구하고, 주파수 대역에 따른 특성은 해석치와 실험치가 전반적으로 유사한 차음 성능치를 보인다. 주름에 의하여 굽힘 강

성이 크게 증가하는 것은 좋으나, 임계주파수가 많이 떨어지는 것은 주름 판재의 차음 설계에 신중히 고려하여야 할 문제이다. 그림 5는 Hansen의 주름 판재와 동일한 면 밀도를 갖는 등가 평판의 투과손실과 주름 판재의 투과손실 해석치의 차이를 주파수 대역별로 구한 결과이다. 차이가 0dB는 주름 판재 모델이 등가 평판과 동일한 차음 성능을 가짐을 의미한다. 모든 주름 판재에서 1차 임계주파수 이후에서 등가 평판보다 약 10dB까지 불리한 차음성능을 보인다. 그림에서 주름이 얇아서 강성증가가 가장 작은 panel-rib 모델이 차음성능 측면에서는 가장 유리한 구조임을 확인할 수 있다.

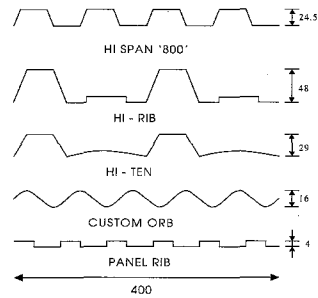
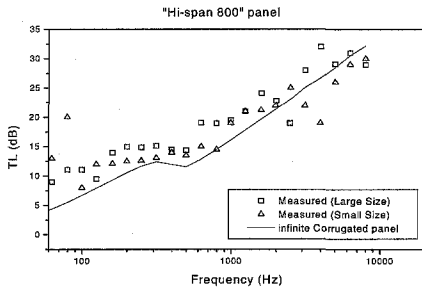


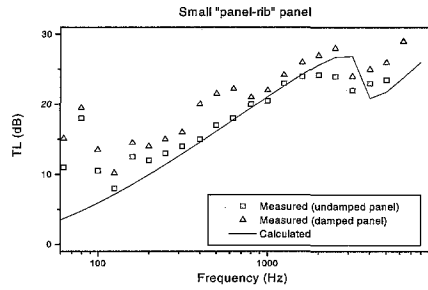
그림 3. Hansen의 주름판재 모델

도표 1. 해석에 사용된 주름패널의 종류와 물성치

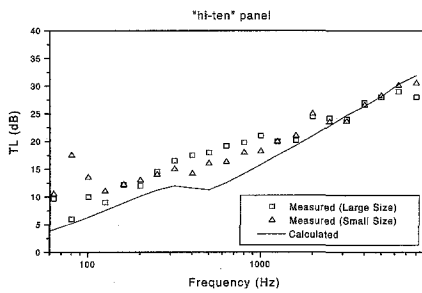
Panel Type	Thickness	Surface Weight kg/m ²	Bending Stiffness kg · m ² · sec ²		Critical Frequencies (Hz)	
			B _x	B _y	f _{c1}	f _{c2}
Hi-Span 800	0.42	4.58	11400	1.76	378	30400
Hi-Rib	0.42	4.82	38000	1.83	212	30600
Hi-Ten	0.42	4.28	10800	1.64	375	60400
Custom Orb	0.42	4.29	3020	1.54	710	31400
Panel Rib	0.42	3.9	95.9	1.48	3800	30600



가) Hi-Span 800 패널의 투과손실



마) Panel-Rib 패널의 투과손실 특성



나) Hi-ten 패널의 투과손실

그림 4. 주름판재의 투과손실.

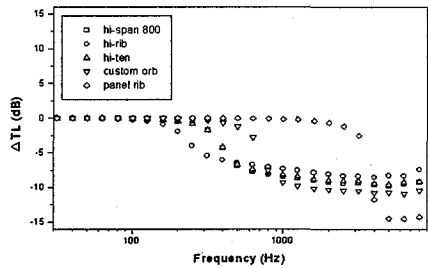
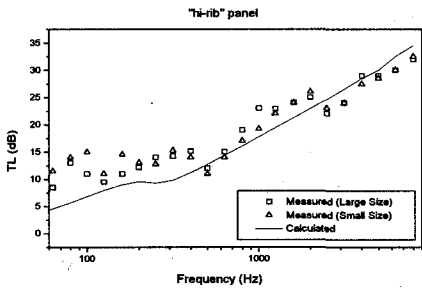
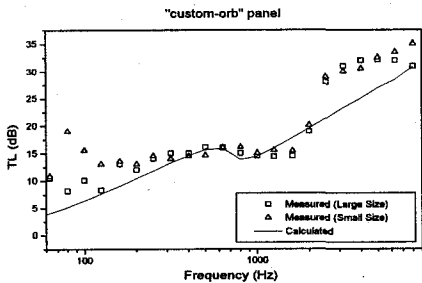


그림 5. 주름판재와 등가평판의 투과손실 비교.



다) Hi-rib 패널의 투과손실



라) Custom-Orb 패널의 투과손실 특성

4. 한국형 고속전철 주름 판재의 차음성능

전술한 해석 방법에 근거하여 한국형 고속전철 (TGV-K) 바닥재 주름강판의 차음성능을 평가하였다. 그림 6은 한국형 고속철도 차량 객실 바닥재의 단면 구조를 보인다. 가장 바깥쪽에 1.2mm두께의 구조용 강판으로 된 주름 판재가 바닥의 하중 지지 및 차음 기능을 동시에 수행한다. 도표 2는 바닥 주름판 재의 물성치를 보인다.[7] 그림 7은 1.2mm두께 주름강판의 랜덤 입사음 투과 손실해석 결과이다. 굵은 점선은 동일한 두께에 동일 재질(동일밀도)을 갖는 평판의 투과손실이고, 가는 점선은 주름 판재와 동일한 두께 및 동일한 면 밀도를 갖는 등가 평판의 투과손실을 표시한다. 가는 점선으로 표시된 등가평판과 비교할 때, 1차 임계주파수 200Hz대역 아래에서는 대동한 투과손실을 보이나, 그 이상에서는 등가 평판(가는 점선)에 비해서, 주름 판재가 10dB정도 낮은 투과손실을 보인다. 한편, 주름 판재는 내부적인 구조 감쇠와 코팅 및 접착층의 댐핑효과에 의하여 구조손실계수를 가지며 투과손실에 영향을 준다.

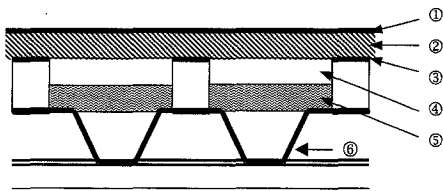
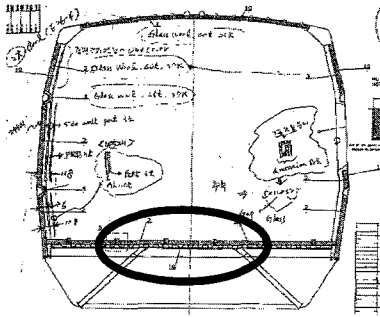


그림 6. 철도차량 바닥재용 다층 주름판재.

- (① rubber:3mm, ② plywood:22mm,
- ③ rubber4mm, ④ air:23mm,
- ⑤glassfiber:40mm ⑥ steel:1.2mm)

도표 2 TGV-K 주름 판재의 특성치

Materials	Young's Modulus (N/m ²)	Surface Weight kg/m ²	Bending Stiffness (N · m)		Critical Frequency (Hz)	
			B_x	B_y	f_{c1}	f_{c2}
Corrugated steel 1.2mm	210×10^9	9.36	32.6	84184	194	9862.3

그림 8은 손실계수에 따른 주름패널의 투과손실의 변화를 보인다. 1차 임계주파수 아래의 저주파수 영역에서는 감쇠인자의 영향이 거의 관찰되지 않으며, 임계주파수 이후에서는 손실계수의 증가에 따라 투과손실도 증가하나 그 변화율은 비교적 작다.

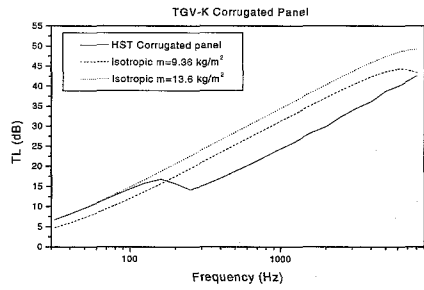


그림7. 한국형 고속전철 주름강판의 투과손실

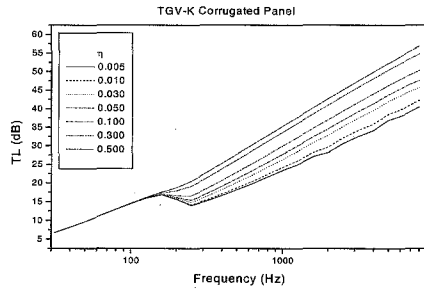


그림 8. 투과손실에 대한 손실계수 효과

5. 결론 및 토론

등가 무한 직방성 평판 모델에 근거하여 주름강판의 차음성능을 해석하고 기존의 실험치와 비교하였다. 해석치는 측정치에 근사한 경향을 보였으며, 주름에 의한 굽힘 강성의 증가가 차음성능을 감소시키는 것을 확인하였다. 주름의 깊이가 작은 panel-rib형의 주름이 굽힘 강성의 증가는 작으나 차음성능 면에서는 유리한 것으로 나타났다. 한국형 고속철도 차량(TGV-K)에 사용되는 주름 강판의 경우, 동일한 면 밀도를 갖는 등가 평판에 비해 1차 임계주파수 200Hz이후에서 약 10dB정도 차음성능이 떨어지는 것으로 평가된다. 판재의 뎀핑 증가는 1차 임계주파수 아래에서는 효과가 거의 없으나, 그 이상 주파수 대역에서의 차음성능은 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- [1] 김석현,박정철,김종년,“철도 차량용 알루미늄 압출재의 투과손실”,한국소음진동공학회지 제10권 4호, pp662-668, 2000.
- [2] Heckl, M., “Untersuchungen an Orthotropen Platten. Acoustics“, Vol.10, pp.109-115, 1960.
- [3] P.C.Cloarec, S.Pauzin, D.Biron, M.Haddar and M.A.Hamdi, “Contribution to the Study of Sound Transmission and Radiation of Corrugated Steel Structures,” Journal of Sound and Vibration, Vol.157, pp. 515-530, 1978.
- [4] F.Fahy, Sound and Structural Vibration, Academic Press, 1985.
- [5] L.L.Beranek, Noise and Vibration Control Engineering, John Wiley and Sons, Inc. 1992.
- [6] C.H.Hansen),“Sound Transmission Loss of Corrugated Panels”, Noise Control Engineering, Vol. 40, pp.187-197, 1992.
- [7] 박철휘, 김석현 외, “진동소음 해석 및 저감기술개발”, G7고속전철 기반기술 개발 사업 1차년도 보고서, 1997.
- [8] 김석현,박정모,“철도 차량용 주름 패널의 차음 성능”,한국철도학회 추계학술회의 논문집, 1998.