주름강판의 차음성능 향상 방안

Improvement Strategy of the Sound Insulation Performance of a Corrugated Steel Panel

이현우* 김석현† 김정태** 김재철***
Lee, Hyunwoo Kim, Seockhyun Kim, Jeong-tae Kim, Jae-cheol

ABSTRACT

In a railway vehicle, corrugated steel panel is widely used for the floor panel because of its high bending stiffness and light weight. However, this panel shows lower sound insulation performance than that of the plate with the same weight. Especially, in a particular frequency band, transmission loss (TL) rapidly decreases and it results in the deterioration of TL of the overall floor panel. This study identifies that the remarkable drop in TL is caused from the local resonance of the periodic corrugated structure. This study shows that the frequency band of the TL drop can be controlled by the proper design of the corrugated structure. In addition, improvement effect of TL by attaching foam and glass wool is estimated by experiment. The purpose of the study is to provide the practical information for the improvement of the sound insulation performance of the corrugated steel.

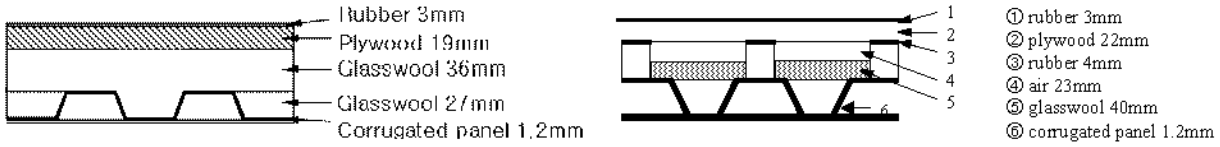
1. 서 론

주름강판은 중량대비 높은 굽힘 강성 때문에 철도차량의 바닥 구조에 널리 사용된다. 그러나 주름강판은 동일한 중량을 가지는 등가 평판에 비해 낮은 차음성능을 보인다.[1~5] 특히, 특정 주파수대역에서는 투과손실이 급격히 감소하여 전체 바닥재의 차음성능이 현저히 저하된다. 본 연구는 이러한 투과손실의 현저한 하락이 주기적인 주름구조의 국부공진에 기인함을 밝힌다. 나아가 주름 단위 구조의 적절한 설계를 통하여 투과손실 하락 대역을 조절할 수 있음을 보인다. 또한, 폼재나 유리면과 같은 다공성재를 적용할 때, 어느 정도의 투과손실 향상효과가 있는지를 실험적으로 평가한다. 주름강판의 차음성능을 향상을 위한 실제적인 정보를 제시하는 데에 본 연구의 목적이 있다.

2. 주름강판의 구조 및 차음성능

현재 개발중인 한국형 틸팅열차와 고속 철도차량인 TGV-K의 바닥재는 Fig. 1과 같이 외측 바닥면이 주름강판으로 되어 있는 다층구조이다. 주름강판은 단위 면적당 중량을 줄이면서 굽힘 강도를 크게 높일 수 있기에 철도 차량의 가장 중요한 구조재로 사용되어 왔다. 다층재 중에서도 가장 바깥쪽의 주름 강판은 차음성능 측면에서 가장 큰 기여도를 보인다. Fig. 2는 틸팅열차 바닥 다층재의 층별 투과손실 곡선을 보인다. 유리면, 커버링, 합판, 주름강판의 순으로 기여도가 크다.

† 책임저자 : 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 교수
E-mail : seock@kangwon.ac.kr
TEL : (033)252-2595 FAX : (033)257-4190
* 정회원, 강원대학교, 산업기술연구소, 연구원
** 정회원, 홍익대학교, 기계시스템디자인공학부, 교수
*** 정회원, 한국철도기술연구원, 선임연구원



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

Fig.1 Floor structures for a railway vehicle.

그러나 이와 같이 가장 큰 차음 기여도를 갖는 주름강판도 동일한 면밀도를 갖는 등가평판에 비해서는 열악한 차음성능을 보인다. Fig.3은 이 두 경우의 투과손실을 비교한다. 저주파 대역에서는 평판의 질량법칙 투과손실에 근접하나 2000Hz 를 전후하여 등가 평판에 비해 투과손실이 급락한다. 소음원의 주파수 특성에 따라, 이와 같은 특정 주파수 대역에서의 차음성능 급락은 차량 실내소음의 증가를 가져올 수 있으므로, 이를 사전에 예측하고 대책을 강구할 필요가 있다.

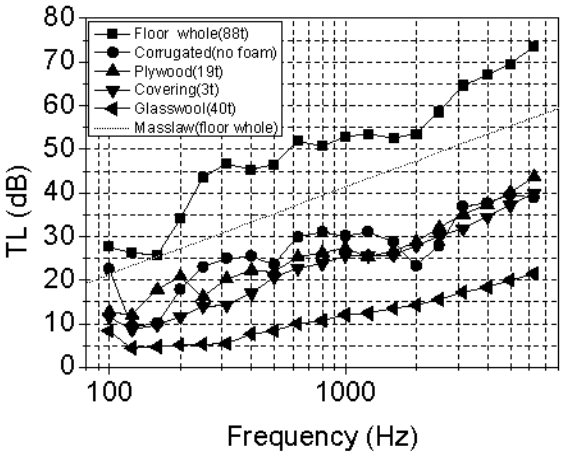


Fig. 2 Comparison of TL of each panel.

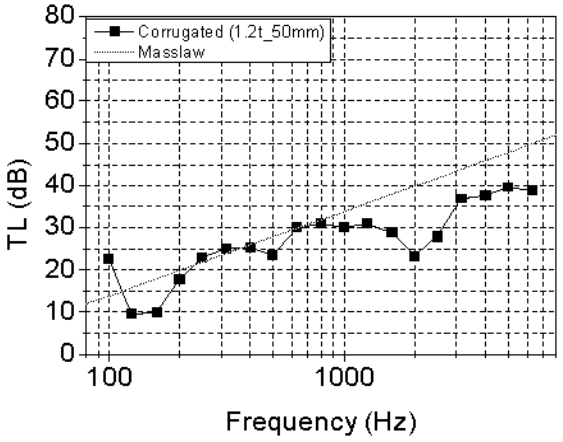
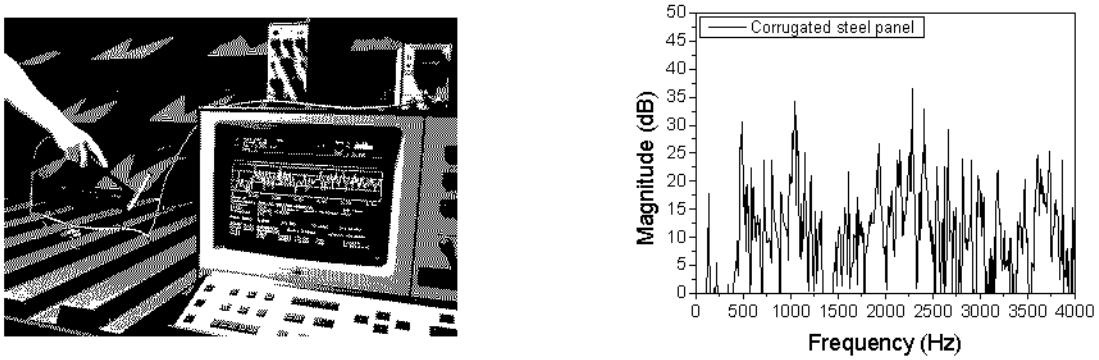


Fig. 3 TL of the corrugated panel and the equivalent flat plate.

3. 차음성능 저해요인

패널을 통한 음의 투과는 입사음이 패널을 진동시켜 반대편으로 방사되는 과정을 거치게 된다. 따라서 패널 진동의 주파수 응답특성은 투과손실에 영향을 주는 기본적인 특성이 된다. 이에 Fig. 4와 같이 충격 가진하에 주름강판의 주파수 응답특성을 확인하였다. 2000Hz 이후의 많은 공진 피크는 투과손실의 저하와 관련성을 갖는다. 유한요소 해석을 수행한 결과, Fig. 5와 같이 2000Hz 이후의 공진 피크는 단위 구조상에서 발생하는 국부공진 모드로 확인되었다. 이러한 국부공진 모드는 시편의 크기와 경계조건에 영향을 받는 전체 모드와는 달리, 주름강판의 단위 구조의 제원에 의하여 모드 및 주파수 대역이 결정된다. 광대역의 입사음에 의하여 국부공진 주파수 대역에서 큰 진동이 발생하고 그 결과 큰 많은 음향 파워가 투과됨으로써 차음성능이 현저히 훼손된다. 이에 대한 대책으로 주름단위 구조를 변경하여 국부공진 주파수 대역을 이동시키는 것, 댐핑을 증가시켜 국부공진모드를 줄이는 것, 내장재를 효과적으로 사용하여 바닥전체의 차음성능을 개선하는 방안 등을 검토하였다.



(a) Impact test (b) Frequency response function

Fig. 4 FRF of the corrugated steel panel.

2048Hz 2302Hz

(a) 1-span

2060Hz 2193Hz

(b) 2-span

Fig. 5 Local resonance modes of 1-span and 2-span corrugated steel panel.

4. 차음성능 향상 방안

4.1 구조변경 효과

주름강판의 단위구조를 변경하여 국부공진모드 주파수 대역을 사용 주파수 범위 밖으로 이동시키는 방안을 검토하였다. Fig. 6은 주파수 대역을 결정하는 중요한 설계인자 인데, Table 1의 현재 사용중인 주름강판 제원을 기준으로 설계인자를 변경시켰다. 구조변경 모델을 대상으로 유한요소해석을 수행하여 국부 공진 주파수 대역을 예측하고, 주름강판 시편을 제작하여 투과손실의 개선 효과를 확인하였다. Fig.7은 사용한 시편과 유한요소해석으로 구한 1차 국부공진모드를 보이며, 각 주름 모델의 제원 및 해

석결과를 Table 1에 정리한다. 현재 모델과 동일한 두께를 갖는 변경 모델 3,4에서, 면밀도를 거의 변화시키지 않으면서 주름간격만을 변화시킴으로써 국부공진 주파수 대역을 낮추거나 높일 수 있다. 또한 현재 모델과 변경모델 1,2에서 두께가 국부공진주파수 대역에 민감하게 영향을 주는 것을 알 수 있다. 동일한 두께로 제작된 주름강판 모델의 투과손실 측정 결과를 Fig. 8에서 비교한다. 각 모델의 국부공진 주파수 대역이 다르므로, 투과손실이 급락하는 주파수 대역도 다르다. 현 모델에 비해서 변경모델 3은 국부공진 주파수 대역이 높아져 1000Hz~2000Hz 대역에서의 차음성능이 상당히 개선된다. 그러나 변경모델 4는 국부공진 주파수대역이 낮아짐으로써, 오히려 차음성능이 현저히 악화되는 것을 볼 수 있다.

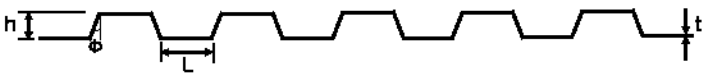
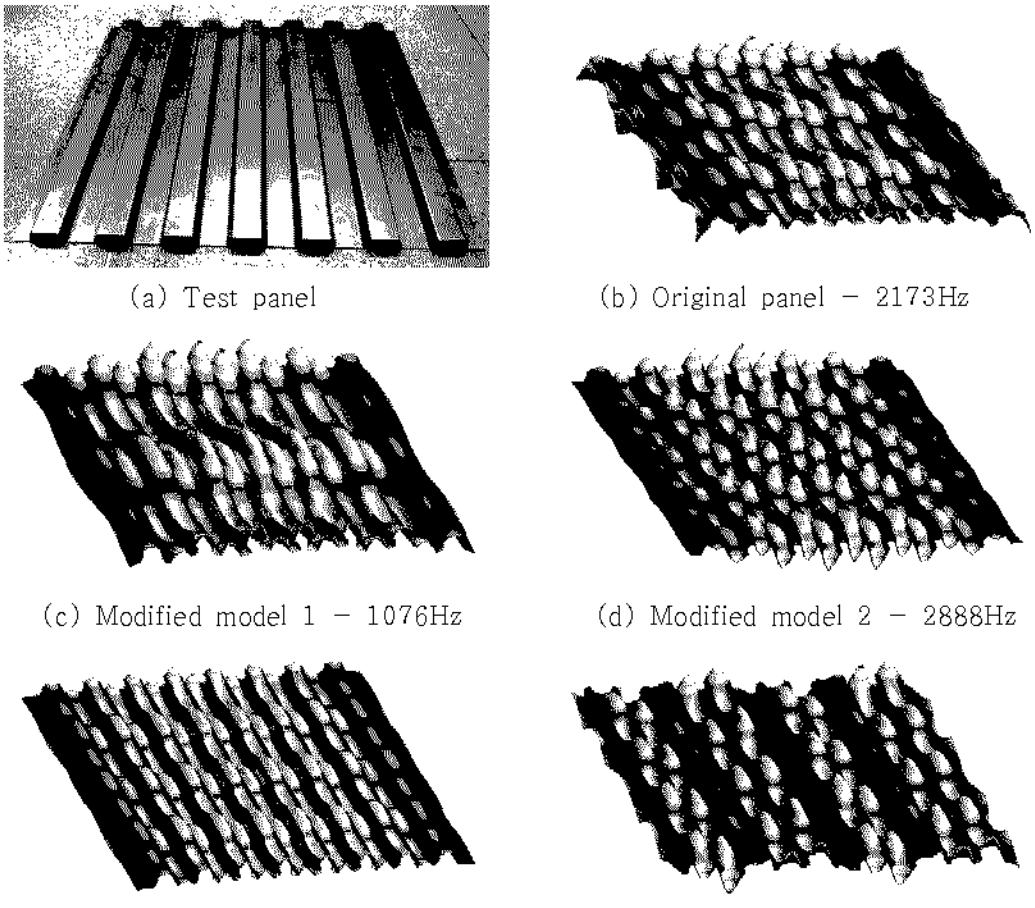


Fig. 6 Design variables of the corrugated structure.

Table 1 Specification of the corrugated steel panel

Young's Modulus (E)	$200\times10^{9}N/m^{2}$
Density (ρ)	$7850kg/m^{3}$
Poisson's ratio (υ)	0.33
Plate height (h)	27mm
Plate thickness (t)	1.2mm
Angle (Φ)	20°
Plate dimension ($L_x\times L_z$)	836mm×836mm



(a) Test panel (b) Original panel – 2173Hz

(c) Modified model 1 – 1076Hz (d) Modified model 2 – 2888Hz

(e) Modified model 3 – 2764Hz (f) Modified model 4 – 1673Hz

Fig. 7 Local resonance frequency of panel models.

Table 2 1st local resonance frequencies of the modified models

Parameter \ Model	Original	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4
Height (mm)	27	27	27	27	27
Plate thickness (mm)	1.2	0.6	1.6	1.2	1.2
Surface density (kg/m^2)	12.39	6.20	16.53	12.83	11.98
L (mm)	50	50	50	40	60
Angle (°)	20	20	20	20	20
1st overall frequency (Hz)	7.76	4.01	10.37	7.62	7.85
1st local resonance frequency (Hz)	2100Hz	1100Hz	2800Hz	2700Hz	1600Hz

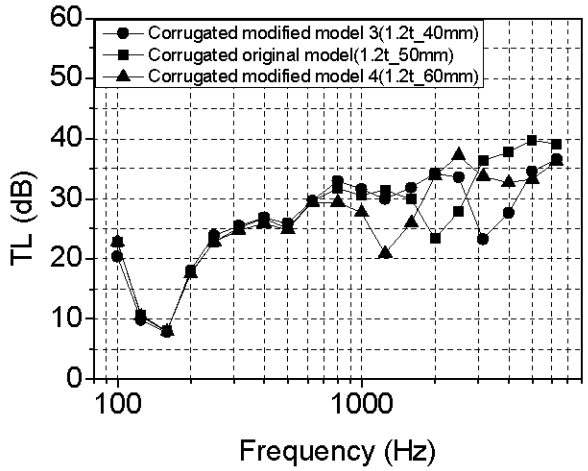


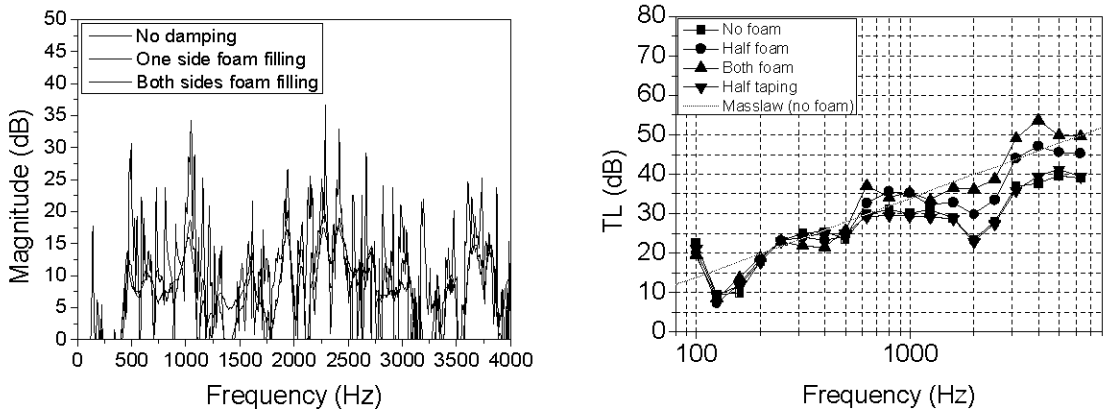
Fig. 8 TL of modified models.

4.2 댐핑효과

주름강판의 구조변경을 통한 차음성능 개선효과는 국부공진 주파수를 전후해서 한정되어 나타난다. 우레탄 폼재 또는 유리면 같은 다공성재 충진 방법은 패널의 댐핑의 증가로 공진 피크 레벨을 감소, 국부공진 주파수 대역을 전후하여 보다 넓은 대역에서의 차음성능 개선 효과를 기대할 수 있다.[5] Table 3은 폼재 충진을 전후한 면밀도의 변화를 보이며, Fig. 9 (a)는 폼재 충진 전후의 주파수 응답함수를 비교한 결과이다. 6% 충진으로 충진 전에 비해서 주요 국부공진 모드에서 약 10dB~15dB 정도의 피크 레벨이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 구조손실계수 5~6배 증가에 해당한다. 투과손실을 측정 결과, Fig. 9 (b)에서와 같이 국부공진주파수 대역을 전후하여 상당히 넓은 주파수대역에서 차음성능이 크게 향상되는 것을 알 수 있다.

Table 3 Surface density of the foamed panel

	Surface density(kg/m^2)	Increase (%)
No foam	12.09	-
1 side foamed	12.84	6.2
2 side foamed	13.16	8.8



(a) FRF of corrugated foamed panels (b) TL of corrugated foamed panels

Fig. 9 Effect of the foam filling.

5. 결 론

철도차량의 경량화를 위하여 사용되는 주름강판을 대상으로 차음성능 향상방안을 검토하였다. 투과손실 예측에는 주름강판과 동일한 면밀도를 가지는 등가평판의 질량법칙 모델을 사용하였다. 등가평판에 비해서 주름 강판은 국부공진 출현 대역에서 차음성능이 현저히 저하되었다. 차음성능 향상을 위해 주름 단위의 구조를 변경시키고 국부공진모드 대역과 투과손실을 검토한 결과, 차음성능 향상에 유리한 구조 설계가 가능하다는 것을 확인하였다. 폼재 충진으로 구조손실계수를 증가시키는 경우, 국부공진 주파수 대역을 중심으로 넓은 범위에서 차음성능을 향상시킬 수 있음을 검증하였다.

후기

본 연구는 건설교통평가원이 지원하는 “한국형 틸팅열차 안정화기술 연구”의 위탁과제인 “한국형 틸팅열차의 차음성능 향상방안에 대한 연구”의 연구비 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드린다.

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 Caldding. Inter-Noise'93", Vol. 2, pp.999-1002.
4. S.H., Kim, H. Jang, and J. Kim, (2001), "Characteristics of Local Vibration Modes of the Aluminum Extruded Panels for Rail Road Vehicles", Journal of the Korean Society for Railway, Vol.4(3), pp87-93.
5. S.H.,Kim, I.S., Paek, H.W. LEE, and J.T. Kim, (2008), "Prediction Model of the Sound Transmission Loss of Honeycomb Panels for Railway Vehicles", Journal of the Korean Society for Railway, Vol.11(5), pp.465-470.