

단위 구조 변경에 의한 알루미늄 압출재의 차음성능 개선

Improvement Method of the Sound Insulation Performance of Aluminium Extruded Panels by the Unit Structure Modification

이현우* 김석현† 김정태** 송달호***
Lee, Hyunwoo Kim, Seockhyun Kim, Jeong-tae Song, Dalho

ABSTRACT

In a high speed train, aluminium extruded panel is widely used in floor, side wall and roof structures for high bending stiffness and weight reduction. However, with some inevitable reasons, aluminium extruded panel shows inferior sound insulation performance compared with the flat panel having same weight. Especially, occurrence of local resonance modes in the particular frequency band, is one of the main reason in the deterioration of the sound insulation performance. Local resonance modes are generated in the structure which consists of periodic unit structure, such as the aluminium extruded panel. The local resonance frequency is determined by the specification of the unit structure. In this study, we predict the local resonance frequency band on the aluminium extruded panel used for the high speed train, and investigate how the design modification in the unit structure influences the local resonance frequency band and panel bending stiffness. The purpose of the study is to provide the design information for the effective unit structure in order to improve the sound insulation performance of the aluminium extruded panel.

1. 서 론

고속철도 차량에서는 높은 굽힘 강성과 경량화를 위하여 알루미늄 압출재가 바닥, 측면, 천정의 다층재에 가장 중요한 요소로 사용된다. 그러나 몇 가지 불가피한 특성 때문에, 알루미늄 압출재는 동일한 중량을 가지는 평판에 비해 불리한 차음성능을 보인다.[1] 굽힘강성의 현저한 증가로 인한 임계주파수의 큰 하락, 반복되는 주름 단위 구조의 국부적 공진, 코어부의 공명 효과 등 등가 평판에서 나타나지 않는 물리적 현상이 발생한다. 특히, 주기적인 단위구조에 의해 발생하는 국부공진모드는 특정 주파수대역에서 투과손실을 급격히 떨어뜨리는 중요한 요인이다.[3] 국부공진모드는 압출재나 주름강판과 같이 주기적으로 반복되는 구조에서 발생되는데, 그 출현 주파수대역은 판재의 전체적인 크기나 경계조건에는 거의 영향을 받지 않고, 단위 구조의 제원으로만 결정된다.[5] 본 연구에서는 고속철도 차량에 사용되는 알루미늄 압출재를 대상으로, 국부 공진이 차음 성능을 어느 정도 저하시키는가, 이로 인한 차음성능의 악화를 개선할 수 있는 방안을 제시하고자 한다. 이를 위하여 국부 공진 주파수의 출현 대역을 해석적으로 예측하고, 단위 구조의 변경과 댐핑 처리를 통하여 투과손실의 하락 폭을 완화시키는 방안을 검토한다.

† 책임저자 : 김석현
E-mail : seock@kangwon.ac.kr
TEL : (033)252-2595 FAX : (033)257-4190
* 정회원, 경희대, 강원대학교, 산업기술연구소, 연구원
** 정회원, 홍익대학교, 기계시스템디자인공학부, 교수
*** 정회원, 우송대학교, 철도대학 철도건설환경공학과, 교수

2. 압출재의 차음성능 해석 모델

Fig. 1과 같은 알루미늄 압출재는 미시적으로는 투과손실을 계산하기 어려운 구조이나, 거시적으로 직방성 판재임을 감안하여, 무한 직방성판재의 투과손실 예측 모델을 이용할 수 있다. Cremer와 Heckl의 무한 직방성 판재 이론[4]에 근거하면, 판재의 음향임피던스는 직방성 판재의 운동방정식으로부터 입사각 θ , ϕ 의 함수로 다음과 같이 결정된다.

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

여기에서 m 은 판재의 면밀도(surface density), η 는 구조 감쇠, c 는 공기 중 음속이다. f_{c1} , f_{c2} 는 직방성 판재의 두 개의 임계주파수이며, 일치효과로 투과손실이 크게 저하되는 주파수를 의미한다.

식 (1)을 사용하면, 입사음과 투과음의 파워비인 투과손실계수를 다음과 같이 θ, ϕ 의 함수로 결정할 수 있다.

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

본 연구에서는 입사각 범위를 $0^\circ \sim 90^\circ$ 및 $0^\circ \sim 78^\circ$ 로 하면 랜덤 입사음 투과계수 및 필드 입사음 투과계수를 계산할 수 있으며, 이로부터 투과손실이 결정된다.

$$\tau_{field} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\Phi_{lim}} \left[2 \int_0^{\theta_{lim}} \tau_{\theta\phi} \cos \theta \sin \theta d\theta \right] d\Phi \quad (4)$$

$$TL_{field} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\tau_{field}} \right) \quad (5)$$

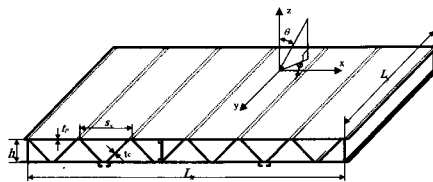


Fig. 1 Coordinate system of orthotropic panel.

3. 압출재의 차음성능 및 차음성능 저해 요인

선행 연구에서 Fig. 2의 철도차량 바닥재를 대상으로 차음성능을 검토한 바 있다. Fig. 3은 압출재만의 투과손실 측정치와 전체 바닥재의 투과손실 측정치를 비교한 결과이다. 압출재의 경우, 600Hz대역부터 투과손실이 하락하여 1000Hz 부근에서는 현저히 낮은 투과손실 값을 보인다. 이 때문에 합판, 유리면 등을 적용한 후에도 이 부근 주파수 대역에서는 여전히 낮은 투과손실을 보인다. 이와 같은 현상의 원인은 압출재 단위구조상에서 발생하는 국부 공진 모드로 확인 되었다.[1] 선행 연구에서 이러한 국부 공진 주파수를 전술한 직방성 판재 모델에 적용함으로써 압출재의 투과손실을 어느 정도 예측할 수 있음을 보였다. Fig. 4는 그 해석 및 측정결과를 비교한다. 국부 공진 주파수 대역을 적절히 적용함으로써 예측치를 측정치에 접근시킬 수 있다. 해석 및 측정 결과는 질량법칙 결과에 비해 1000Hz 이후

에서 15dB 이상의 차음성능이 저하됨을 보인다. Fig. 5는 압출재의 주파수 응답함수로 600Hz 이후 1000Hz에서 가장 크게 발생하는 국부 공진이 차음성능 저하의 원인을 입증한다.

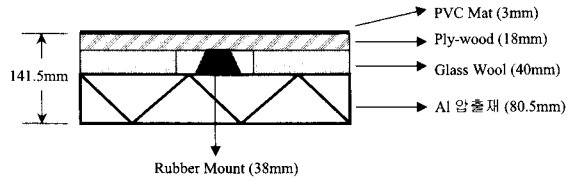


Fig. 2 Floor structure including aluminium extruded panel.

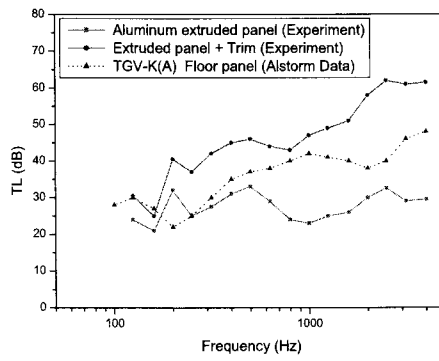


Fig. 3 Transmission loss of the aluminium extruded panel.

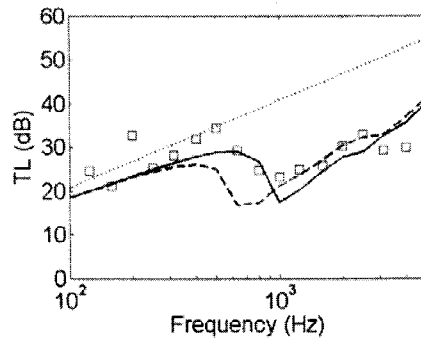


Fig. 4 Sound transmission loss of the extruded panel. \square experiment, $---$: orthotropic model($f_{c1}=600\text{Hz}$, $f_{c2}=750\text{Hz}$), $—$: orthotropic model($f_{c1}=900\text{Hz}$, $f_{c2}=1100\text{Hz}$), \cdots : mass law.

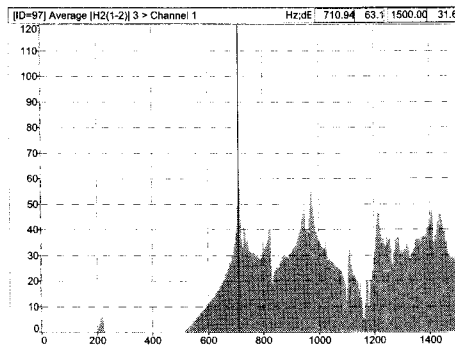


Fig. 5 Frequency response function of the aluminium extruded panel.

600Hz부터 입사음에 의하여 많은 국부 공진 모드가 크게 발생하고 그 결과 반대편으로 많은 음을 방사시킴으로써 차음성능이 현저히 저하된다. 이에 대한 대책으로, 국부공진 주파수대역을 높게 나오도록 단위 구조를 설계하는 것, 댐핑을 증가시켜 공진모드의 과도한 출현을 억제하는 것, 내장재를 효과적으로 사용하여 전체 투과성능을 개선하는 방안 등을 검토한다.

4. 차음성능 개선

Fig. 6은 KTX II 압출재의 단면 구조 및 구조변경 모델이다. Fig. 7의 설계인자를 대상으로 변경효과를 검토한다. 국부공진 주파수를 높이기 위하여, 구조변경 모델에서는 현재보다 스패를 짧게 하였으며, 면밀도가 유지되도록 상/하판의 두께를 약간씩 줄였다. 국부공진 주파수를 높임과 동시에 바닥재의 굽힘 강성을 저하시키지 않도록 하는 것이 매우 중요하다. 이를 확인하기 위하여 515mm x 2000mm 시편을 대상으로 전체 굽힘 및 비틀림 모드도 함께 해석하였다. 이 경우 양 끝단 경계조건은 자유 상태로 하였다. Fig. 8과 Table 1에 해석결과를 보인다. 전체 굽힘 모드 및 비틀림 모드의 진동수는 거의 변화가 없으므로, 구조변경에 의한 굽힘 강성의 저하는 우려되지 않는다. 반면에 상·하판 두께가 0.2mm 얇아졌음에도 스패 감소 효과가 더 커서, 국부 공진주파수의 출현 대역은 현재의 400Hz에서 660Hz로 증가 되었다. 이는 투과손실 하락대역이 높아짐을 의미한다. 높아진 국부공진 주파수를 투과손실 예측 모델에 적용하여 투과손실을 예측한 결과를 Fig. 9에 보인다. 국부공진 주파수대역에서 10dB 정도의 차음성능 개선 효과를 보인다. 이러한 결과는 코어의 단위 구조 제원을 변경시켜 구조의 횡강성을 저하시키지 않으면서 차음에 유리한 방향으로 국부공진 주파수 대역을 조절할 수 있음을 보여준다.

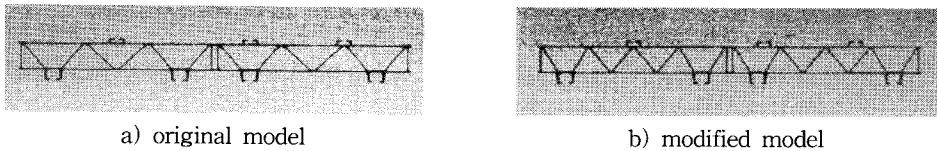


Fig. 6 Extruded panel of KTX II.

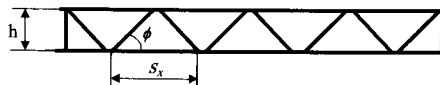


Fig. 7 Design variables for the unit structure modification.

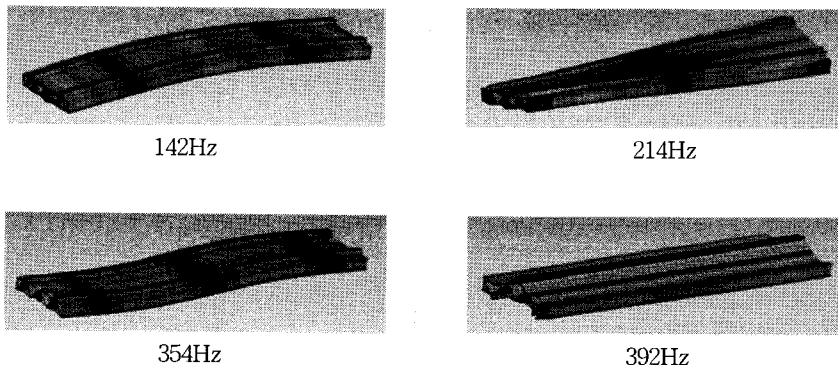


Fig. 8 Resonance modes of KTX II extruded panel.

Table 1 Overall and 1st local resonance frequencies for modified structures

Model		KTX II	KTX II (modified)
Specification			
Height, h(mm)		70	70
Thickness, t (mm)	Plate	2.8	2.6
	Core	2.6	2.6
Surface density (kg/m ²)		34.66	33.95
Spacing, S _x (mm)		166	121.6
Dimension (L _x ×L _z)		515×2000	515×2000
Young' s modulus, E (Gpa)		71.5	71.5
1st frequency (Hz) - bending		142	141
2nd frequency (Hz) - torsion		214	210
3rd frequency (Hz) - bending		354	368
1st local resonance frequency (Hz)		392	660

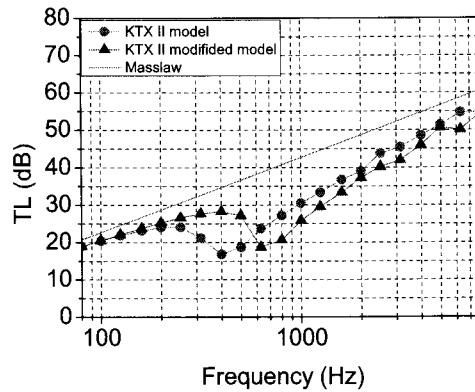


Fig. 9 Comparison of TL

5. 결론

고속철도 차량에 사용되는 알루미늄 압출재를 대상으로 차음성능의 개선 방안을 검토하였다. 압출재는 단위 구조의 주기성 때문에 동일한 면밀도를 갖는 등가 평판에 비해서 열악한 차음성능을 보였다. 그 원인은 단위 구조에서 발생하는 국부 공진 모드이며 그 출현 주파수 대역에서 심각하게 차음성능이 하락하였다. 소음원의 주파수 특성을 감안하여 국부 공진주파수 대역을 조절하는 방안을 제시하였다. KTX II 바닥 압출재를 대상으로, 면밀도를 유지하면서도 스펙을 줄임으로써 국부 공진 주파수 대역을 높일 수 있었다. 그 결과 국부 공진에 의하여 현재 모델의 투과손실이 최대로 하락하는 대역에서 10dB 정도의 차음성능 개선효과를 얻을 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 건설교통평가원이 지원하는 “분산형 차량성능 및 운용 기반기술 개발연구”의 세부과제인 “실내의 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. M. Heckl, (1960), "Untersuchungen an Orthotropen Platten. Acoustics", Vol.10, pp.109-115.
5. Kim, S.H., Jang, H. and Kim,J. (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.
6. Luo, S. and Suhling, J. C. and Laufeberg, T.L. (1995), "Bending and Twisting Tests for Measurement of the Stiffness of Corrugated Board," ASME AMD-Vol. 209, pp.91-109.
7. Kim,W., Kim, J., Kim, G, and Kim, S.H. (2003), "A Study on the Transmission Loss Characteristics of Honeycomb Structures," Transactions of KSNVE, Vol.13, No. 1, pp.19~25.