

틸팅열차용 화이버 다층재의 차음성능 해석

Transmission Loss Analysis of the Fiber Sandwich Panels for a Tilting Train

김석현*
Kim, Seockhyun

백인수**
Paek, Insu

김재철***
Kim, Jaecheol

ABSTRACT

This paper investigates the sound insulation performance of the fiber sandwich panels for a tilting train. Due to the high strength and low mass, fiber sandwich panels are widely used for aircraft structures, railway vehicle structures. These fiber sandwich panels show orthotropic behavior because of the fiber's structural characteristics. This orthotropy often reduces the critical frequency and makes negative effect on the sound insulation performance. In this study, transmission loss of the fiber panels is analyzed based on the equivalent orthotropic plate model. An analysis program is developed to calculate the transmission loss of the fiber sandwich panels. Using the program, the coincidence frequency ranges and their effects on the transmission loss are investigated.

1. 서 론

화이버 복합 다층재는 중량대비 높은 강도를 가지므로, 항공기나 철도 차량, 자동차 등 수송기계의 경량화에 널리 사용된다. 국내에서는 현재 기존 철도 노선에서 최고 시속 180km 로 달릴 수 있는 틸팅열차가 개발되어 시운전하에 있다. 속도향상을 위해서는 차체의 경량화가 필수적인데, 이를 위하여 화이버 복합재를 사용하는 '일체형 복합재 철도차량 차체 제작 기술' 개발에 박차를 가하고 있다. 이 기술은 기존의 철도차량에 비해 차체 강도가 향상되고 무게를 40%정도 경량화 할 수 있어 동일한 출력으로 열차의 속도를 높일 수 있다. 본 논문은 틸팅열차에 사용되는 화이버 다층재의 차음성능을 검토한다. 화이버 다층재는 화이버의 구조적 특성상 직방성을 가진다. 이 구조는 중량당 매우 높은 휨 하중을 지지하는 장점 때문에 차체 경량화를 위하여 사용된다. 그러나 차음성능 측면에서는 일치현상이나 국부 공진 때문에 동일한 질량을 갖는 등가 평판보다 불리한 것으로 알려져 있다[1,2,3]. 본 연구에서는 무한 직방성 판재 이론[4]에 근거하여 화이버재의 투과손실을 예측한다. 해석 결과는 기존의 실험결과[5]와 비교하여 신뢰도를 검증한다. 해석을 통하여 화이버 다층재의 차음성능을 설계단계에서 예측하고 문제점의 보완 대책에 필요한 정보를 구하는 데에 연구의 목적이 있다.

2. 직방성 판재의 차음성능

Fig.1의 거시 직방성 판재에 대하여 Cremer와 Heckl에 의한 등가 직방성 모델 (Equivalent orthotropic model)[4]을 적용하면, 다음과 같이 B_x, B_y 두 개의 주 굽힘 강성에 의하여 패널내의 굽힘 파에 의한 수직변위를 구할 수가 있다.

* 강원대학교, 기계·메카트로닉스 공학부, 정희원

E-mail : seock@kangwon.ac.kr

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

** 강원대학교, 기계·메카트로닉스 공학부

*** 한국철도기술연구원, 정희원

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

평면 조화입사파 $p = P e^{j(\omega t - k_x x - k_y y)}$ 에 의한 응답은 $w = w_0 e^{j(\omega t - k_x x - k_y y)}$ 의 형태로 결정되는데, 각 방향의 파수(wave number)는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = (\omega/c)^2 \quad (2)$$

$$k_x = k \sin\theta \cos\phi, \quad k_y = k \sin\theta \sin\phi, \quad k_z = k \cos\theta \quad (3,4,5)$$

여기서, 입사각 θ, ϕ 는 Fig.1에서 입사파가 z축 및 x축과 이루는 입사각을 의미한다. 식(1)로부터 패널 음향임피던스를 다음과 같이 입사각 θ, ϕ 의 함수로 결정할 수 있다.

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

여기서, m 은 패널의 면밀도 (surface density), η 는 구조감쇠치, c 는 공기중 음속이며, 일치현상 (coincidence)이 발생하는 임계주파수는 다음의 두 식으로 주어진다.

$$f_{c1} = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{B_y}}, \quad f_{c2} = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{B_x}} \quad (7,8)$$

식(6)을 사용하여 입사 및 투과음사이의 파워비인 투과손실계수를 θ, ϕ 의 함수로 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\tau_{\theta\phi} = \left| 1 + \frac{Z \cos\theta}{2\rho c} \right|^{-2} \quad (9)$$

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

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

$$TL_R = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\tau_R} \right) \quad (11)$$

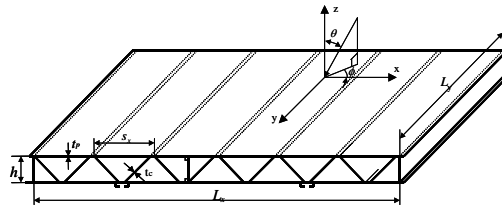


Fig. 1 Coordinate system of orthotropic panel.

3. 화이버 허니콤재의 투과손실

3.1 시편의 제원

해석을 위한 화이버 허니콤재의 제원으로 Rajaram[5]의 실험 모델을 검토한다. 이 시편은 카본 화이버 표피에 Fig.2와 같이 노맥스 코어가 합쳐진 다층재이다. 각 부분의 제원은 Table 1과 같다.

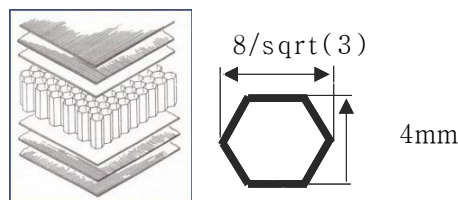


Fig.2 Honeycomb and dimension of Nomax core.

Table 1 Specification of Carbon Fiber Skin and Nomex Core[5]

equivalent surface density	core thickness(t_c)	core height(h)	core density(ρ_c)	cell size(c)	skin density(ρ_{sk})	skin thickness(t_{sk})
7.79kg/m ²	1 mm	9.6 mm	144kg/m ³	4 mm	1600kg/m ³	0.3 mm

투과손실 측정에 사용된 시편의 크기는 1.067 m × 1.067 m 로, 화이버 다층재의 등가 면밀도는 다음과 같이 계산된다.

Skin의 질량 : $1600 \times 1.067 \times 1.067 \times 0.0003 \times 2 = 1.09$ kg

셀의 질량 : $144 \times 0.0096 \times 6 \times (0.001 \times 0.004 / \sqrt{3}) = 0.192$ g (안치수 이용)

셀의 개수 : $1.067 \times 1.067 / ((0.001 + 0.008 / \sqrt{3}) \times (0.001 + 0.004)) = 40524$ (벽두께 0.001m 이용)

코어의 질량 : 7.78 kg

전체질량 : $7.78 + 1.09 = 8.87$

등가 면밀도 : $8.87 / (1.067 \times 1.067) = 7.79$ kg/m²

3.2 해석결과

전술한 화이버-허니콤 다층재의 투과손실을 질량법칙과 등가 직방성 판재 모델을 사용하여 구하였다. Fig. 3은 실험치와 해석치와의 비교 결과이다. 1000Hz 이후에서 급격한 투과손실의 저하가 발생한다. 이는 일치현상 또는 국부공진에 의한 효과로 보이는데[1,2], 이 주파수 대역의 예측은 허니콤재 구조 데이터의 부족으로 확인이 어려워 1200Hz, 6000Hz 로 가정하여 해석에 사용하였다. 질량법칙은 저주파수대역에서 제한적으로 적합한 예측결과를 주나, 등가 직방성 모델은 실험치에 꽤 근접한 예측 결과를 주고 있다. 직방성 모델에서는 요구되는 2개의 임계주파수 값을 어떻게 설정해 주는지가 매우 중요하다. 시판중인 제품의 실험 데이터를 이용할지, 셀 구조에 대한 구조해석을 통하여 해석적으로 결정할지의 여부는 추후 구체적인 검토가 필요하다. 임계주파수 이후의 차음성능에 영향을 주는 인자로 감쇠치가 중요하다. 감쇠치를 변화시키면서 투과손실의 변화를 구한 결과를 Fig.4에 보인다. 임계주파수 아래에서는 감쇠가 주는 변화가 거의 없으나, 임계주파수 이후에서는 손실계수의 효과가 꽤 발생한다. 손실계수를 10배로 높이면 5dB 이상의 투과손실 향상을 기대할 수 있다.

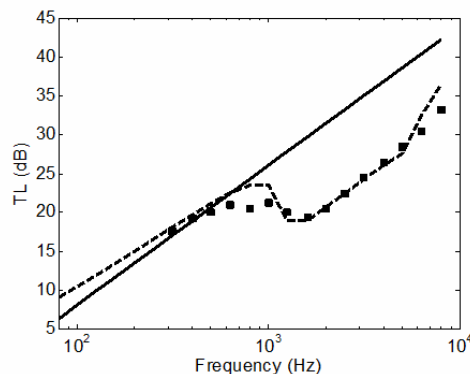


Fig. 3 Transmission loss of fiber-honeycomb panel.

■: Measurement, —: Mass Law, --: Orthotropic model ($f_{c1}=1200$ Hz, $f_{c2}=6000$ Hz).

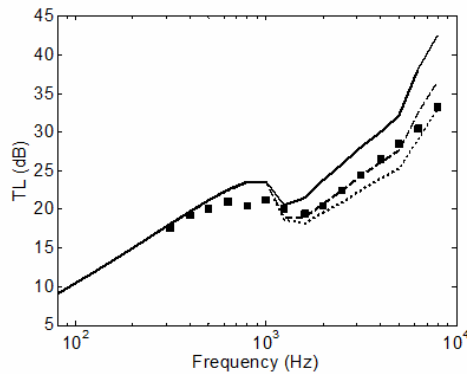


Fig.4 Loss factor effect on TL.

■: Measurement, —: Loss factor=0.05, --: Loss factor=0.01, ...: Loss factor=0.005.
($f_{c1}=1200$ Hz, $f_{c2}=6000$ Hz)

4. 결론

틸팅열차의 경량화를 위하여 사용되는 화이버 허니콤 다층재를 대상으로, 차음성능을 평가하였다. 예측을 위하여, 화이버 다층재와 동일한 면밀도를 갖는 질량법칙 모델과 등가 직방성 평판 모델을 사용하였다. 질량법칙은 임계주파수 훨씬 아래에서는 예측 모델로 사용 가능하다. 그러나 임계주파수 이후에서는 일치효과 때문에 차음성능은 예측치에 비해서 크게 저하되었다. 반면, 적절한 임계주파수 값을 사용할 때, 등가 직방성 모델은 측정치에 가까운 예측결과를 줌으로써, 유용한 예측 모델로서의 가능성을 보여주었다. 향후 빈번히 사용되는 화이버-허니콤 다층재의 임계주파수 값의 결정 방법에 대한 검토가 필요하다.

후 기

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

참고문헌

1. D. A. Bies and C. H. Hansen (1988), Engineering Noise Control. Unwin Hyman Ltd, London.
2. 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.
3. 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.
4. M. Heckl, (1960), "Untersuchungen an Orthotropen Platten. Acoustics", Vol.10, pp.109-115.
5. S. Rajaram, T. Wang, and S. Nutt, "Sound transmission loss of honeycomb sandwich panels", Noise Control Engineering Journal. Vol.54, pp.106-115.