

투과손실을 이용한 틸팅차량의 실내소음 예측

Prediction of Interior Noise for Tilting Train by using Transmission Loss

김재철†
Jae-Chul Kim

Abstract

In this paper, we describe the analysis of interior noise for tilting train that is being developed in Korea. Tilting train is made of composite material to reduce the car body's weight and attached a self-steering system on bogie to improve curving performance. However, the acoustic performance (Transmission Loss) of such material is worse than the materials of conventional train, such as aluminum, steel and so on. Therefore, we measure the transmission loss of side wall / floor of tiling train and predict the interior noise for tilting train using its measuring results.

Keywords : Tilting Train, Railway Noise, Transmission Loss, Composite Material
틸팅차량, 철도소음, 투과손실, 복합재

1. 서론

산업 발달과 함께 인적, 물적 자원의 신속한 수송이 점차 요구되면서, 철도차량의 경우에도 타 교통수단과의 경쟁력 확보를 위해서 속도향상에 많은 투자를 하였다. 그 결과 2004년 4월 300km/h급 고속철도차량인 KTX가 개통되었다. 그러나 KTX는 특정지역에 한정되어 운행되고 있기 때문에 지역 간의 불균형을 초래하고 기존선과 연계운행 시 철도의 효율성이 저하되고 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해서 기존선의 속도향상이 절실히 요구되고 있어 현재 180km/h급 차량을 개발하고 있다. 이 차량은 곡선이 많은 국내의 선로조건을 고려하여 틸팅시스템(Tilting System)을 적용하여 곡선부에서 20~30%의 속도와 승차감을 향상시켰을 뿐만 아니라 대차에 자기조향장치(Self-Steering System)를 부착하여 곡선부에서 차륜과 레일의 마모 및 스킨소음을 저감시킬 수 있을 것으로 기대되고 있다. 또한 복합소재를 이용하여 차체를 제작하였기 때문에 기존차량에 비해서 30% 이상의 경량화를 통해 에너지 절감과 궤도의 부담력을 감소

시키기 때문에 차량의 실내소음을 증가시키는 커다란 요인이 된다. 이와 함께 동력방식이 전동차와 동일한 분산식으로 기존 차량(새마을, 무궁화등)의 동력방식(집중식)과는 다르기 때문에 차량하부의 모터소음이 차량에 유입되어 실내소음에 영향을 미친다.

따라서 본 연구에서는 현재 시험운행 중인 180km/h급 틸팅차량(Tilting Train eXpress : TTX)의 차체의 투과손실을 측정하여 차음성능을 확인하였고, 틸팅차량을 모델링한 후 이 투과손실의 측정값을 이용하여 실내소음을 예측하였다.

2. 틸팅차량의 차체구조 및 투과손실 측정결과

2.1 틸팅차량의 차체 구조

틸팅차량은 차체를 경량화하기 위해서 그림 1(a)과 같이 Carbon/epoxy사이에 Honeycomb알루미늄을 삽입한 복합재에 내장재를 부착하였다. 그리고 차체바닥은 그림 1(b)와 같이 하부에서 발생하는 소음/진동을 저감시키기 위해서 주름판넬사이에 방진용 고무와 Glass wool를 삽입하였다.

† 책임저자 : 회원, 한국철도기술연구원, 철도시스템안전연구본부
E-mail : jckim@krri.re.kr
TEL : (031)460-5206 FAX : (031)460-5279

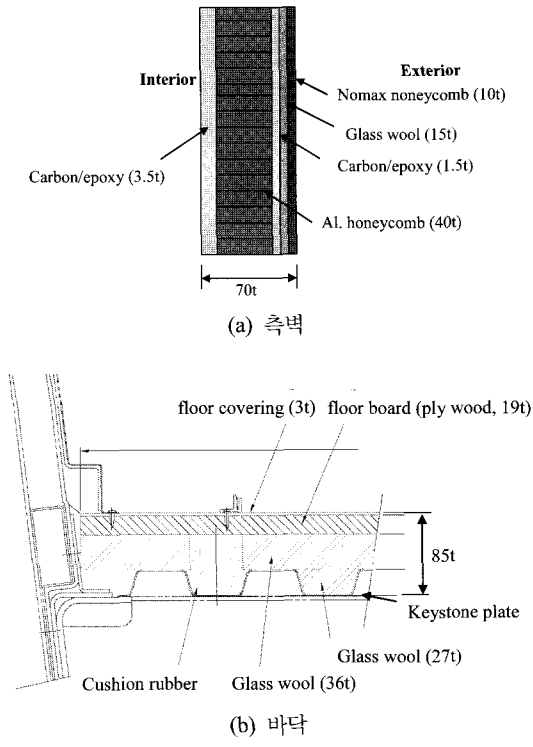


그림 1. 차체 구조

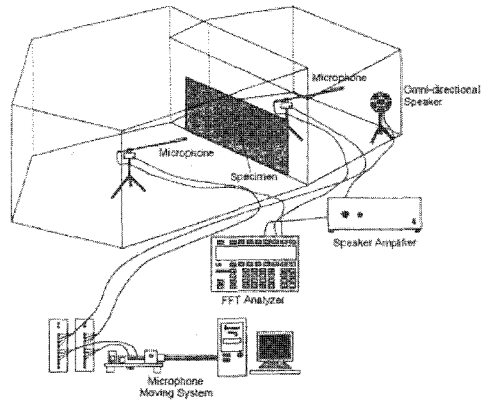


그림 2. 투과손실 측정 시스템

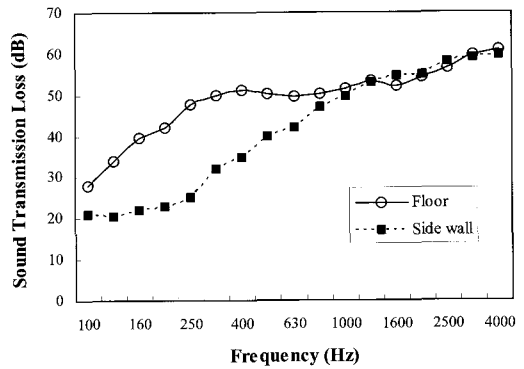


그림 3. 톨링차량의 차체 투과손실 측정결과

2.2 투과손실 측정방법 및 결과

투과손실은 음의 입사조건에 따라서 다르지만, 건축음향설계에 이용되는 경우에는 랜덤입사에 대한 투과손실을 이용하였다. 이러한 경우에 측정방법은 그림 2와 같이 2개의 잔향실 사이에 시험재료(면적: S)을 설치하여 음원실 내의 평균음압 레벨(\bar{L}_1)과 수음실내의 평균음압레벨(\bar{L}_2)을 측정하고, 수음실내(체적: V_2)의 잔향시간(T_2)을 측정하여 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$TL = (\bar{L}_1 - \bar{L}_2) + 10 \log_{10} \left(\frac{S}{A_2} \right) \quad (1)$$

여기서, 수음실내의 흡음력 : $A_2 = \left(\frac{55.3}{c} \right) \left(\frac{V_2}{T_2} \right)$ 이며, S : 시험면의 면적이다.

톨링차량에 대한 차체의 투과손실은 차체측벽 및 바닥으로 구분해서 각각에 대한 시험편(폭1.05m×높이2.4m×4개)을 제작하여 그림 2의 잔향실사이에 설치하여 측정하였다. 측정방법은 KS F 2808, ISO 140-3 및 ASTM E 90-044에 따라 실시되었다. 그림 3은 차체측벽과 바닥의 측정결과로서 각각의 STC(Sound Transmission Class)는 39dB, 52dB로 나타났다.

3. 실내소음 예측 결과 및 검토

3.1 톨링차량의 실내소음 기준

현재 개발 중에 있는 톨링차량은 차체구조설계가 완료된 상태이고 proto type의 차량을 제작 중에 있다. 톨링차량의 소음 기준치는 표 1과 같이 최고속도 180km/h 주행 시 객차의 실내소음은 70dB(A)이하, 운전실은 75dB(A)이하로 규정되어있으며, 터널 통과 시에는 이 기준치에 7dB(A)가 부가된다.

표 1. 톨링차량의 실내소음 기준

주행조건	톨링차량			
		개활지	터널	
180km/h	실외소음	88dB(A)		
	실내소음	객차	70dB(A)	77dB(A)
		운전실	75dB(A)	82dB(A)
정차	실내소음	객차	63dB(A)	

3.2 틸팅차량의 실내소음 예측결과

틸팅차량의 실내소음을 해석하기 위해서 현재 항공기, 자동차 및 선박분야뿐만 아니라 철도차량분야에서도 활발히 적용되고 있는 통계적에너지 해석법(Statistical Energy Analysis :SEA)을 이용하였다[1,2,3].

통계적에너지해석법은 구조물을 다수의 하부시스템으로 분할하여 각 하부시스템에 대한 파워 평형관계를 기초로 하여 고주파 영역에서도 진동/소음을 동시에 해석할 수 있다. 즉 그림 4와 같이 각 하부시스템에 입력되는 파워는 시스템 내에서 손실되는 파워와 다른 하부시스템에 전달되는 파워의 합이 동일하다는 평형방정식을 세워 입력파워, 각 하부시스템의 내부손실계수 및 하부시스템간의 결합손실계수 등을 이용하여 각 하부시스템에 대한 에너지를 계산한 후 소음/진동을 계산한다.

본 연구에서는 통계적에너지해석법의 상용소프트웨어인 AutoSEA를 이용하여 해석을 수행하였으며, 틸팅차량의 모델링은 그림 5와 같이 벽면, 바닥, 창문, 출입문을 90개의 하부시스템과 음향공간에 해당하는 객실을 2개의 하부시스템으로 분할하여 각각의 하부시스템의 에너지로부터 실내소음을 계산 하였다.

실내소음 계산 시 각 하부시스템의 내부손실계수와 하부시스템간의 결합손실계수는 AutoSEA에서 제공되는 값을 이용하였으며, 입력파워는 차량의 소음원에 대한 측정 음압을 이용하였다.

일반적으로 180Km/h주행 시 차륜과 레일에 의한 전동음이 차량의 주 소음원이므로 본 연구에서는 KTX 차량이 200Km/h로 주행 시 측정된 차량 하부소음의 결과를 소음원으로 이용하였다. 그림 6은 200Km/h로 주행 시 KTX 차량의 하부소음의 측정결과를 나타내고 있다.

틸팅차량의 객차에 대한 실내소음을 예측하기 위해서는 하부소음이외에도 모터와 차륜/레일의 접촉에 의해서 전달되는 진동의 측정결과도 필요하다. 그러나 KTX와 틸팅차량은 동력방식이 다르기 때문에 이러한 진동측정결과를 얻을 수 없기 때문에 하부소음만을 이용하여 실내소음을 예측하였다. 그림 7은 KTX차량이 200Km/h로 주행 시 측정된 하부소음을 소음원으로 설정한 후 투과손실의 측정값을 이용하여 계산한 틸팅차량의 실내소음 예측결과로서 약 66dB(A)정도로 나타났다.

이 계산과정에서 투과손실의 측정값과 차량의 실내 및 실외 음향에너지의 관계는 식 (2)와 같다.

$$\text{외부음향에너지} = \text{내부소음에너지} \times 10^{\frac{TL}{10}} \quad (2)$$

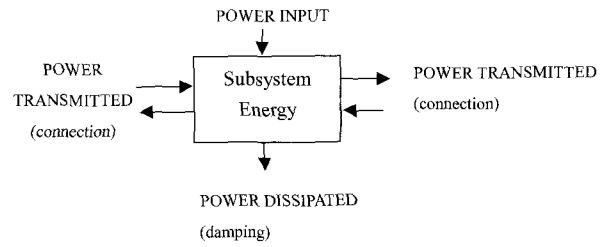


그림 4. 하부시스템에 대한 파워 평형관계

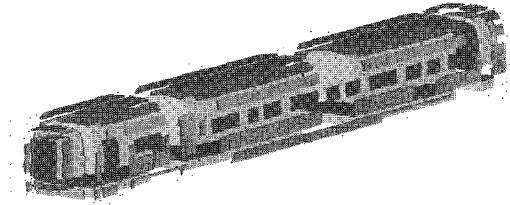


그림 5. 틸팅차량의 해석모델

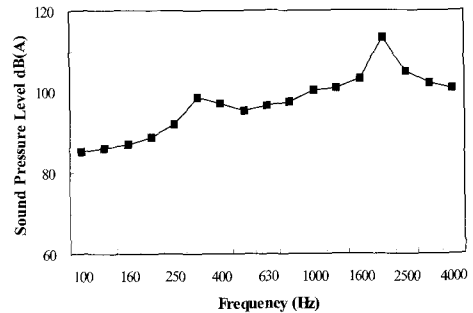


그림 6. KTX차량의 하부소음 측정결과

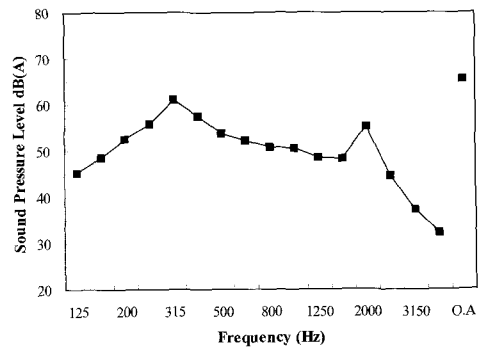


그림 7. 틸팅차량의 실내소음 예측결과

여기서, TL은 각 판넬의 투과손실의 값을 나타낸다.

위의 결과로부터 모터와 차륜/레일의 접촉에 의한 진동을 고려하여도 표 1의 기준치는 만족할 것으로 판단되며, 315Hz 영역과 2000Hz 영역에서의 소음레벨이 높게 나타나는 것은 그림 6의 차량 하부소음의 영향인 것으로 판단된다.

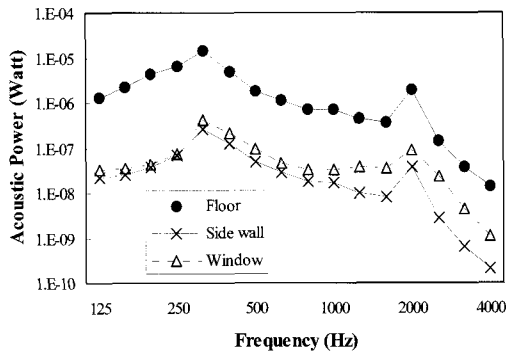


그림 8. 차체 각 부분으로부터 실내에 유입되는 음향파워

본 연구에서 사용된 해석방법은 차량을 다수의 하부시스템으로 모델링한 후, 각 하부시스템의 에너지관계로부터 실내소음을 예측하기 때문에 각 하부시스템에 대한 에너지를 분석하면 차량 실내에 유입되는 소음의 기여도를 파악할 수 있다. 그림 8은 차량 실내에 유입되는 음향파워를 나타내고 있다. 이 결과로부터 차량 실내에 유입되는 에너지의 대부분은 객실 바닥을 통해 전달되고 있음을 알 수 있다. 즉, 차량 하부에서 발생하는 소음은 차체 바닥>창문>측벽 순으로 전달되고 있는 것을 나타내고 있다.

4. 결론

현재 개발 중에 있는 180km/h급 중고속형 틸팅차량에 대한 차체 투과손실 측정 및 실내소음을 예측하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 틸팅차량의 측벽 및 바닥의 투과손실 측정결과 각각에 대한 STC(Sound Transmission Class)는 39dB, 52dB를 나타내고 있다.
- (2) 차체 측벽 및 바닥을 실제 재질과 유사하게 모델링하고, KTX차량이 200km/h로 주행 시 측정된 차량하부의 소음을 소음원으로 적용한 결과 객실 소음은 약 66dB(A)로 나타났다. 이 계산결과에 차량하부 모터의 영향 등을 고려하면 예측결과보다 높아지지만 기준치는 만족할 것으로 생각된다.
- (3) 차체의 각 부분에 대한 기여도를 분석한 결과 실내에 유입되는 소음은 바닥>창문>측벽 순으로 전달된다. 따라서, 차체의 실내소음에 차량 바닥의 영향이 가장 큰 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Lyon. R. H.(1975), "Statistical Energy Analysis of Dynamical Systems Theory and Application," MIT Press.
2. Ulf . Orrenius, (2003), "Development and Validation of an SEA Model of a Metro Rail Car," Proceeding of the Vibro-Acoustic Users Conference, pp.1-7.
3. 김재철, 이찬우(2004.), "통계적 에너지 해석법을 이용한 KTX차량의 실내소음 해석" 한국철도학회춘계학술대회지, pp.75-79.

(2007년 6월 5일 논문접수, 2007년 7월 25일 심사완료)