

# 철도차량에서 사용하는 부유상구조의 진동절연특성에 관한 연구

## Study on the Vibration Reduction Characteristics of Floating Floors Used in Railway Vehicles

우관제\*      박희준\*\*  
Woo, Kwanje, Park, Heejun

---

### ABSTRACT

In this paper vibration reduction characteristics of floating floors used in railway vehicles are studied. Vibration reduction characteristics are compared through a series of tests for elastically-coupled floor and rigidly-coupled floor. It was found that elastically-coupled floor has larger vibration reduction amount than rigidly-coupled floor. Around the fundamental natural frequency, however, elastic floor has poor vibration reduction effect than rigid floor. Measures to reduce structure-borne noise are also discussed based on the test results. Structure-borne noise for running railway vehicles cannot be reduced by an effort to deviate resonance between natural frequency of floors and major exciting forces. Instead, reducing vibration level of top floor and using covers which have low sound radiation coefficient will be effective for reducing structure-borne noise.

---

### 1. 서론

튼바닥구조는 건축물에서 층간 충격소음을 줄이기 위해서 많이 사용하고 있는 방법으로 건축분야에서는 많은 연구가 이루어지고 있으나<sup>(1)</sup>, 철도차량분야에서는 해외에서만 활발하게 연구가 이루어지고 있을 뿐<sup>(2, 3)</sup>, 국내에서는 연구결과를 찾기 힘들다. 철도차량에서는 이를 부유상구조(浮游床構造 floating floor)라 부르고 있으며 주행중인 열차의 실내소음과 진동을 줄이기 위해 활용하고 있다.

철도차량의 실내소음은 소음원으로 부터 발생하는 소음이 공기를 통해 전달되는 공기기인소음과 진동원으로 부터 발생하는 진동이 구조물을 가진시켜 이것이 소음으로 변환되는 구조기인 소음으로 나눌 수 있다. 공기기인소음은 실내를 소음원으로 부터 차폐시킴으로서 실내로 전달되는 소음을 줄일 수 있지만 구조기인소음은 진동원으로 부터 실내를 진동절연을 시켜야 소음을 줄일 수 있다. 주행중인 철도차량은 차륜-레일의 접촉에 의해 발생하는 진동과 견인전동기 및 드라이브기어의 진동이 대차를 통해 차체로 전달된다. 대차와 차체는 2차 현수장치, 각종 댐퍼류, 센터 피봇 (혹은 트렉션 암) 및 앤티롤바 등에 의해 기계적으로 연결된다. 특히 센터피봇은 철도차량의 바닥구조의 중간부분에 위치하므로 이를 통해 전달되는 가진력은 바닥구조를 쉽게 가진하여 이것이 실내소음을 증가시키게 된다. 상구조가 가진되면서 발생하는 실내소음은 철도차량이 개활지를 달릴 때 실내소음의 수준을 결정하는 요인이 되며 이를 적극적으로 줄이기 위해서는 대차로부터 바닥

---

\* (주)로템 기술연구소 응용기술연구팀 수석연구원, 정회원  
E-mail : wookj@rotem.co.kr  
TEL : (031)460-1290 FAX : (031)460-1799  
\*\* (주)로템 기술연구소 응용기술연구팀, 연구원, 비회원

구조로 전달되는 진동을 절연해야 한다.

본 연구에서는 언더프레임(하판)과 플로어(상판)를 탄성요소로 절연시킨 연성구조물과 각목으로 강결합한 강성구조물의 진동절연특성을 시험으로 비교하였다.

## 2. 본문

부유상구조의 일차적인 목적은 상판과 하판의 진동차이를 크게 하는데 있다. 이와 동시에 상하판 전체의 소음투과손실치는 같은 무게의 단일상구조보다 커야하며 상판에서 방사되는 소음이 적어야 한다.

철도차량에서 사용하는 부유상구조는 구조체의 한 부분으로 차체를 구성하는 언더프레임(하판)과 승객하중을 받치고 있는 플로어(상판) 및 상판과 하판을 연결하는 탄성요소로 구성된다. 여기서 탄성요소는 일반적으로 러버를 사용하는데 러버의 강성은 상판과 하판의 진동절연을 위해 낮으면 낮을수록 좋지만, 승객하중에 의해 처지는 양이 너무 크면 승객에게 불쾌감을 주므로 너무 낮지 않도록 해야 한다.

부유상구조는 기저고유진동수가 상하판의 질량과 러버요소의 강성으로 결정되는 질량-스프링 시스템으로 간단히 모델링할 수 있다. 이 기저고유진동수 아래에서는 상하판이 거의 동일위상(in-phase)으로 움직이므로 진동절연효과는 없고 소음투과손실률에도 큰 증가는 없다. 고유진동수 부근에서는 단일상구조 보다 좋지 않은 소음진동성능을 가지게 된다. 고유진동수 이상에서는 상하판이 반대위상(out-of-phase)으로 운동하며 상판으로 전달되는 에너지량이 줄어들게 된다. 부유상구조 사이에 흡음재질이 없다 하더라도 이중벽의 고유진동수 이상에서는 동일질량을 갖는 단일벽 보다 높은 소음투과손실률을 갖는다. 그러나 실제로 상하판은 연성을 가진 구조물이기 때문에 부유상구조는 관심있는 주파수 영역에서 무수히 많은 진동 모우드를 가지는 연속체 모델이 되며 상구조를 설계할 때에는 많은 주의를 기울여야 한다.

철도차량에서 사용하는 바닥구조를 묘사하기 위해 아래 그림 1과 같은 모형을 만들어 시험을 수행하였다. 하판은 진동차의 언더프레임을 묘사하기 위해 2mm 두께의 스테인레스 스틸 평판을 사용하였고, 상판은 바닥구조와 유사한 10mm 두께의 목재합판을 사용하였다. 부유상구조의 진동절연효과를 보기 위해 상판과 하판은 철도차량에서 실제로 사용하는 러버요소로 진동절연 시켰으며, 단일상구조와 유사한 효과를 내기 위해 러버요소 대신에 상판과 하판을 각목으로 연결한 모형에 대해서도 진동시험을 수행하였다.



그림 1. 시험에 사용한 하판과 러버 (좌), 상판의 가속도 측정점 (우)

진동시험은 대차로부터의 가진을 묘사하기 위해 하판중앙 부근에서 가진기를 사용해서 가진하였다. 또한 상판에 15개의 가속도계를 무작위로 설치하여 각 가속도계에서 나온 진동신호를 평균하여 상판의 평균적인 가속도 크기를 결정하였다.

### 3. 시험결과

시험모델은 연속체인 상판과 하판이 러버 또는 각목으로 연결된 구조이다. 진동절연특성을 살펴보기 위해 가진점에서부터 상판의 가속도 측정점까지의 진동전달함수를 측정하였다. 그림 2에 나타난 진동전달함수를 비교하면 철도차량에서 중요한 주파수 대역인 수십Hz에서 2000Hz 정도의 범위에서 전반적으로 러버 연결구조(러버1)가 각목 연결구조(각목)보다 진동전달함수의 크기가 작음을 알 수 있다. 이는 대차로부터의 동일한 가진력이 가해진다고 하더라도 상판 진동의 크기가 작으므로 상판진동에 의한 실내소음의 크기가 작아짐을 의미한다. 그러나 러버 연결구조라 하더라도 상판-러버-하판의 고유진동수에 해당하는 250Hz 부근에서는 러버 연결구조의 주파수전달함수가 각목 연결구조의 진동전달함수보다 크기가 커짐을 알 수 있다.

러버의 강성을 크게 하여(러버2) 상하판 사이 연결부의 강성변화에 따른 진동절연특성을 살펴보았다. 저주파에서 고유진동수 부근까지는 강성이 변하더라도 주파수 응답의 크기에는 별 차이가 없지만, 고유진동수 이상의 고주파에서는 강성이 낮아질수록 주파수 응답의 크기가 작아짐을 알 수 있다. 이는 질량-스프링계의 1차원 모델에 대한 주파수응답과 잘 맞는 결과로서 (그림 3 참조), 상하판 사이의 강성이 낮으면 낮을수록 동일한 가진력에 대해 상판의 진동이 작아지고 결국 상판에서 방사되는 구조기인소음의 크기가 작아짐을 의미하는 것이다. 그러나 전술하였듯이 구조기인소음의 저감을 위해 상하판 사이의 강성을 무조건 작게 할 수는 없는 것이고, 강성의 크기는 승객하중에 의한 처짐, 상판 이음매의 내구성 및 진동절연특성을 고려하여 신중히 결정해야 할 것이다.

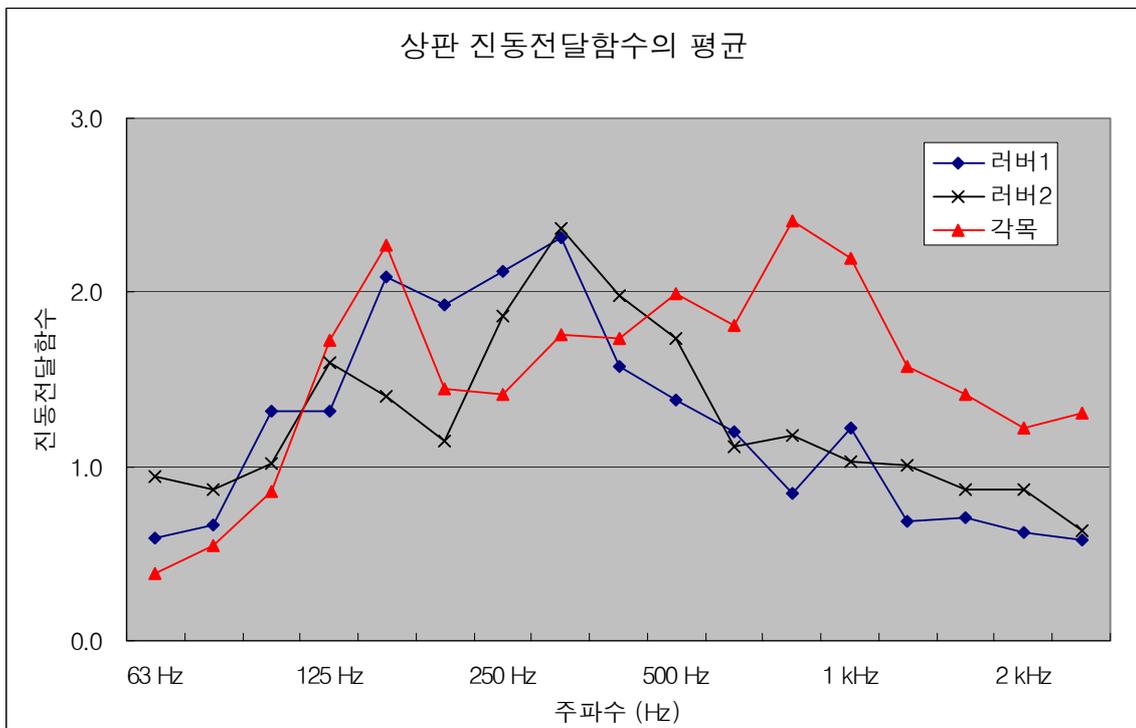


그림 2. 진동전달함수

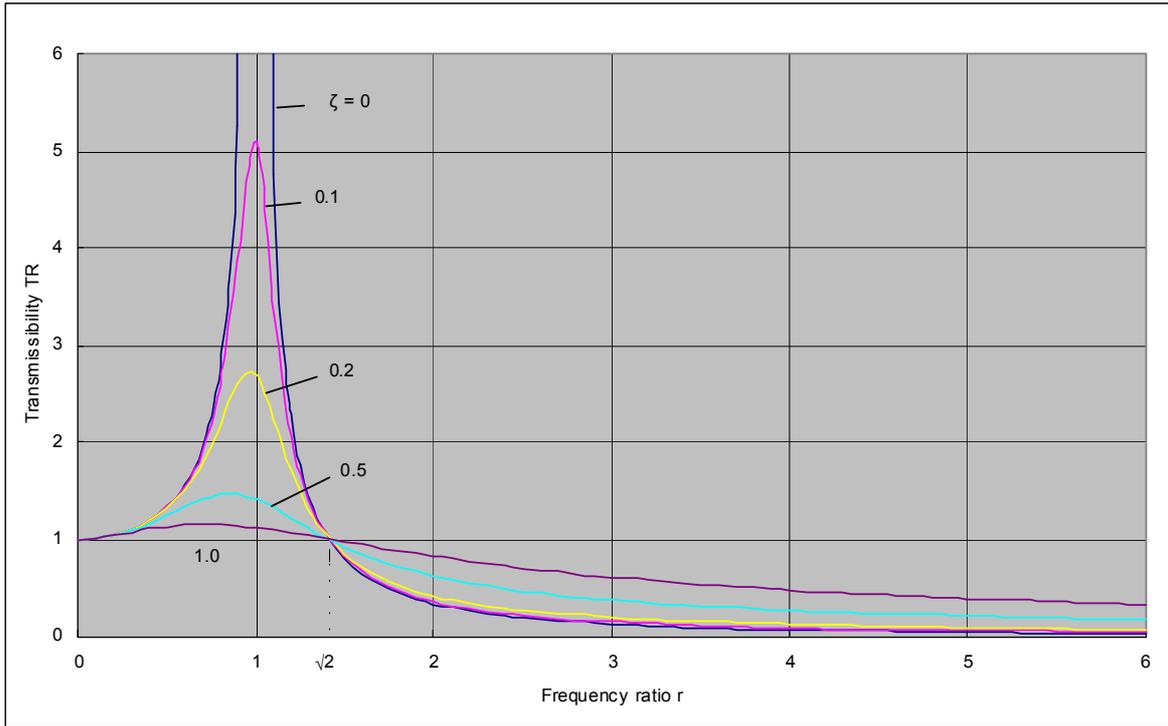


그림 3. 1차원 시스템의 진동전달률

또한 철도차량의 주요 가진원인 차륜/레일접촉력, 견인전동기 및 드라이빙기어의 가진주파수가 저주파에서 2000Hz 부근까지 분포하고 있음을 생각할 때, 리버연결구조의 고유진동수는 필연적으로 가진원에 의해 가진 당하게 되며 이를 상판의 질량이나 리버요소의 강성을 조절해서 공진을 회피할 수는 없는 것이다. 그림 4는 주행중인 열차의 대차부위에서 측정된 음압의 주파수 분포를 보여주고 있다.

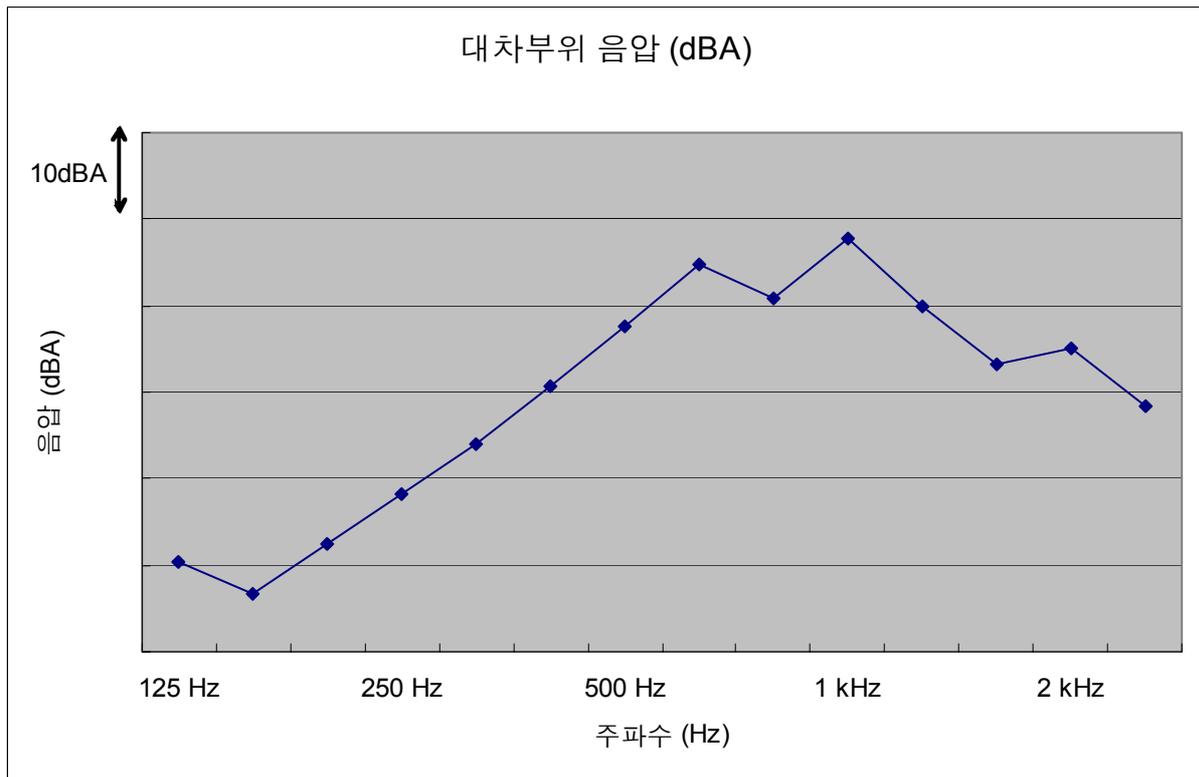


그림 4. 대차부위 음압의 주파수 분포

따라서 상판 가진에 의한 실내소음을 줄이기 위해서는 상판의 댐핑계수를 증가시킴으로써 상판 자체의 응답을 작게 하거나 상판의 방사계수를 줄여야 할 것이다. 이와는 별도로 차륜과 레일의 표면 거칠기를 양호한 상태로 유지하여 차륜과 레일의 접촉에 의한 가진력 자체를 줄이든가, 견인전동기와 드라이빙기어의 진동 저감과 더불어 대차와 차체간 연결부위의 진동절연이 우선되어야 한다.

이와 유사한 시험결과가 외국의 논문에 나타나 있는데 모형과 실제 차량을 이용한 진동시험결과에서<sup>2), 3)</sup> 상구조와 러버요소에 의해 결정되는 고유진동수 주위에서는 상구조의 진동이 오히려 언더프레임의 진동보다 크다는 결과가 나오고 있다. 물론 고유진동수 보다 큰 주파수영역에서는 러버요소에 의한 진동절연효과가 나오고 있다.

#### 4. 결론

러버요소를 사용하는 부유상구조는 500Hz 이상의 주파수 영역에서 효과적인 진동절연특성을 가짐을 해석과 시험으로 확인하였다. 이는 바닥구조의 진동이 실내소음의 증가로 이어지는 구조기인소음을 저감시키기 위해서는 부유상구조가 매우 효과적임을 의미하는 것이다. 그러나 특정 주파수 영역에서는 부유상구조가 오히려 강제결합보다 진동절연특성이 좋지 않은 결과를 보이는데 이는 상판-러버구조-하판의 고유진동수와 가진력과 공진에 기인한 것이다. 차륜/레일 접촉력, 견인전동기와 드라이빙기어의 가진주파수가 저주파에서 2000Hz 정도까지 분포하는 주행중인 철도차량에서 가진력과 부유상구조의 공진은 피할 수 없다. 상판 가진에 의한 실내소음을 줄이기 위해서는 차륜/레일 접촉력과 견인전동기 등 가진력 자체를 줄이든지, 상판의 댐핑을 증가시켜 응답을 작게하고, 방사계수가 낮은 재질로 상판의 표면을 처리해야 할 것이다.

#### 5. 참고문헌

- 1) 김범수 외, 뜬바닥 구조에서 층간차음체의 계면구조 및 단면형상이 충격진동량 저감효과에 미치는 영향, 한국소음진동공학회 2004년 춘계학술대회논문집, pp.296~299
- 2) Nicolas Baron, Some Acoustical Properties of Floating Floors Used on Trains, KTH Aeronautical and Vehicle Engineering
- 3) M. Wollström, Light Weight Floating Floors for Use in Trains, Sixth International Congress on Sound and Vibration