

# 철도궤도의 동적특성 예측 및 실험적 검증 연구 Prediction of The Rail way Track's Vibration Behavior and Corresponding Experimental Verification

박희준\*·김관주\*\*·김재철\*\*\*·이찬우\*\*\*

Heejun Park, Kwanju Kim, Jeachul Kim, Chanwoo Lee

Key Words : Railway track(철도 궤도), Dynamic behavior(동적특성), Natural frequency(고유진동수), Modal testing(모드실험), FEA(유한요소법), Booming Noise (부밍 소음)

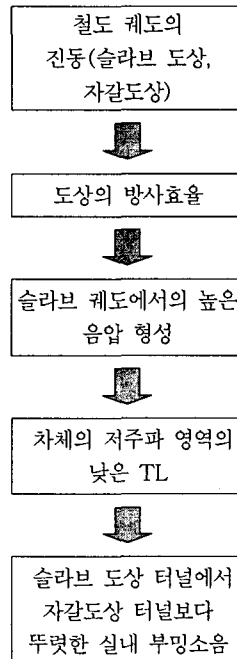
### ABSTRACT

One of commercial rapid transits produces peculiar booming sound when passing through the slab-track tunnel. In order to analyze that tympanic membrane-pressing noise systematically, typical source-transfer path-response analysis was carried out. Considering the octave band of booming noise, work scope was confined to structure-borne noise analysis, especially the dynamic behaviour of railway tracks. Experimental modal analysis of railway tracks, composed of rail, rubber pad, sleeper, ballast, and ground were performed. The results shows that transversal bending modes of the rail are suspicious for the cause of the low band booming noise. Finite element analysis are made use of to match preceding experimental results, and plausible dynamic properties of track components are produced.

### 1. 서 론

철도차량 주행시 발생하는 통상적인 소음의 종류는 일반적으로 차륜과 레일의 접촉에 의한 전동음, 공력소음, 기기동력소음 등으로 구분된다. 본 연구의 목적은 철도차량이 슬라브로 부설된 터널을 통과할 때 차량내부에서 100Hz이하 저주파수 영역의 부밍 소음이 크게 발생하는 현상에 대한 원인을 체계적으로 규명하는 내용이다. 실내에서의 부밍 소음일 발생하는 원인을 생각해보면, 철도 궤도의 진동으로부터 시작하여, 차체의 낮은 투과 손실, 그리고 실내 공간의 음향학적 특성을 고려해야 한다. 그 연구 흐름을 Table 1에 표시하였다. 이를 위한 첫 번째 단계로 본 연구 내용은 자갈도상과 슬라브 도상 등의 철도궤도의 기하학적 형상 및 물성치에 대한 자료를 토대로 유한요소 모델을 만들고, 모드해석을 수행하여, 실제 철도궤도의 진동 측정치와 비교함으로써 그 타당성을 검증 하고자 한다.

Table 1 Flowchart of sound and vibration analysis for identifying booming noise inside the railway car



\* 홍익대학교 기계공학과 대학원  
E-mail : phj185@daum.net  
Tel : (02) 336-1495, Fax : (02) 320-1113  
\*\* 홍익대학교 기계시스템디자인공학과  
\*\*\* 한국철도기술 연구원

## 2. 본 론

### 2.1 철도차량의 실내 소음 측정

#### 가. 측정방법

철도차량의 실내소음측정은 일반객차를 선정하였으며 소음측정용 마이크로폰은 차량의 바닥에서 1.2m 높이에 설치하였다.

#### 나. 측정 및 분석 결과

측정결과 콘크리트 슬라브도상에서 소음레벨이 자갈도상 레도보다 약 5~6dB(A) 정도 높게 측정되었다. (Fig. 1 참조)

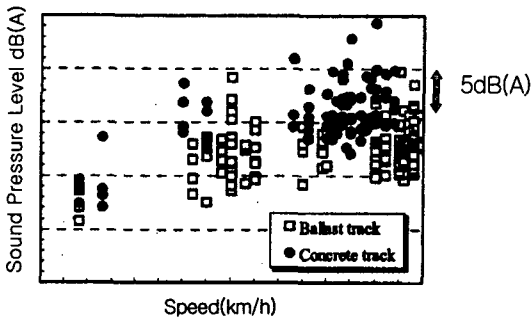


Fig. 1 Comparison of SPL measurement at railway interior location according to different railway track.

슬라브 도상의 주파수 분석결과 80 Hz 와 250 Hz의 저주파 소음이 크게 측정되었다. (Fig. 2 참조)

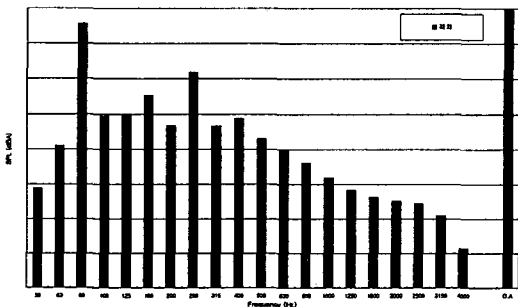


Fig. 2 Typical frequency analysis result of the railway interior SPL running through slab track tunnel

### 2.2 레일의 진동 측정

#### 가. 측정방법

실제 차량이 운행되고 있는 레일의 진동 특성을 파악하기 위하여 실험을 통하여 레일의 FRF를 구하였다. 침목에 의해 0.6m 간격으로 지지되고 있는 레일에 대하여 침목사이의 1/2 위치에서 수직방향과 횡방향으로 가진하고 헤드에서 가속도를 측정하였다. 충격가진과 가속도 측정을 5회 반복하여 평균하였으며 Fig. 3에 각방향에 대한 가진위치와 측정위치를 도시 하였다.

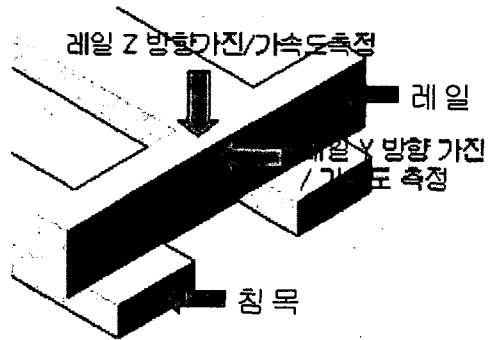


Fig. 3 The impact and measurement points of railway track.

측정에 사용된 장비는 다음과 같다.

#### 사용 장비

FFT analyzer : B&K pulse type 7533

microphone : B&K 3100B

가속도계 : dytran 5858

impact hammer : PCB 8490

#### 나. 측정 및 분석 결과

측정 결과 수직방향보다 횡방향에서의 가속도가 크게 측정되었다. 이것은 횡방향의 강성계수값이 수직(상하) 방향의 강성계수값보다 훨씬 작다는 것을 의미한다. 또한 약 130~150Hz에서 높은 값을 가지는데 이는 이 영역에서 횡방향의 모드가 발생함을 알 수 있다.

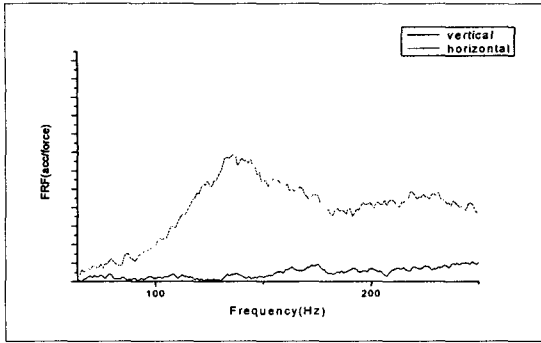


Fig. 4 Comparison of FRF results of vertical direction and horizontal direction in gravel track

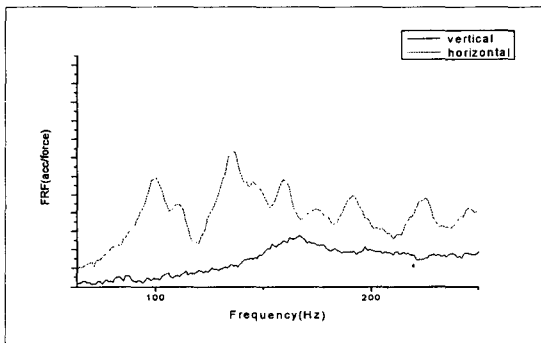


Fig. 5 Comparison of FRF magnitude of vertical direction and horizontal direction in slab track

Fig. 6 에 자갈도상과 슬라브 도상에서 측정한 횡방향 FRF 를 비교하여 나타내었는데, 비교적 비슷한 경향을 나타내지만 슬라브 도상에서 측정한 횡방향 FRF는 약 80 Hz에서 뚜렷한 Peak 가 나타남을 알 수 있다. 따라서 자갈도상의 횡방향모드는 약 140 Hz에서 발생하고 슬라브 도상의 횡방향 모드는 약 80Hz와 약 140 Hz에서 발생함을 알 수 있다.

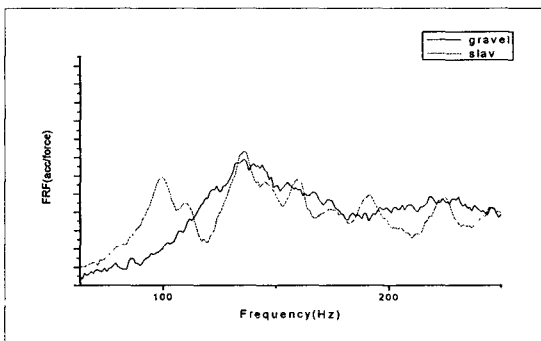


Fig. 6 Comparison of horizontal direction FRF magnitude of gravel and slab track.

### 2.3 철도궤도의 유한요소 모델링

레일은 UIC 60 레일의 형상을 3차원 보(Beam)요소로 모델링하고 침목 위치에서만 지지된 주기지지 조건을 고려하였다. 침목사이 간격은 0.6m 로 하였다. 패드와 발라스트는 병진(X,Y,Z)과 회전방향(RX,RY,RZ)의 자유도 가지는 스프링 요소로 처리하고 콘크리트 침목은 집중질량으로 모델링하였다. (Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9 참조)

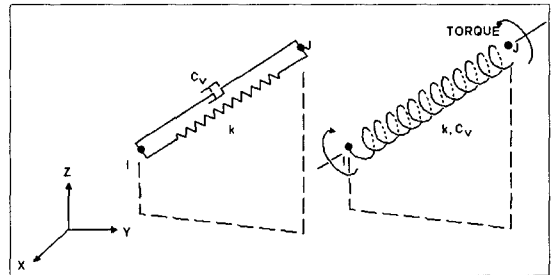


Fig. 7 DOFs' of translational and torsional spring element

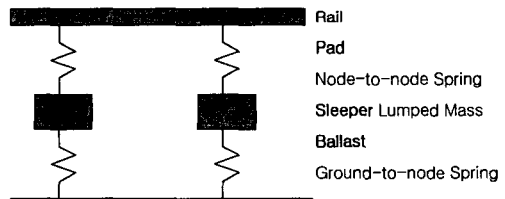


Fig. 8 The simplified model for the vibration interpretation of the railroad track

실제 레일은 침목위치에서 불연속적으로 지지되고 길이가 무한하므로 유한요소를 사용한 모델링이 용이하지 않기 때문에 모델의 양 끝에 대칭 조건을 사용하였다. (Fig. 9 참조)

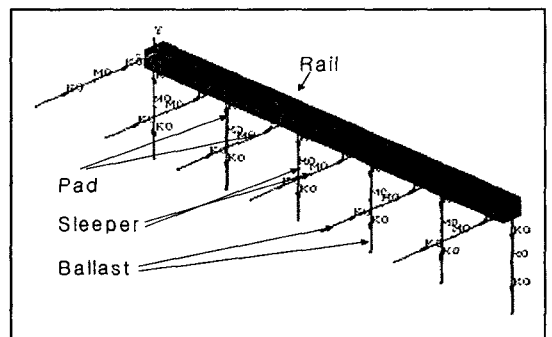


Fig. 9 Boundary conditions and FE model of railway track system

각 지지요소에 대한 입력 자료는 Table 2와 같다. rail의 입력자료는 참고문헌(1)을 참고하였으며, Pad와 Ballast의 Vertical 방향의 Stiffness는 참고문헌(3)을 참고하였다. Lateral 방향의 Stiffness는 2.2의 실제 측정치를 참고로 하여 시행착오법으로 값을 결정하였다.

Table 2 The input data about the railroad track

Rail Stiffness	$2.1 \times 10^{11} N/mm^2$
Rail Density	$7850 kg/m^3$
Sleeper Mass	$300 kg$

(단위:  $kN/mm$ )

		Vertical(Y)	Lateral(Z)
Pad Stiffness	자갈도상	65	20
	슬라브도상	280	150
Ballast Stiffness	자갈도상	40	10
	슬라브도상	180	90

## 2.4 모드해석

### 2.4.1 자유-자유 조건의 레일 모드 해석

먼저 레일 하부 구조물(패드, 침목, 도상)들의 영향을 배제한 레일만의 모드를 해석하였다. 경계조건은 자유-자유 조건으로 하였고, 해석 주파수 영역은 63Hz~250Hz로 설정하였다. 그 결과 127.92Hz에서 Ry 방향 굽힘모드가 발생하였고, 160.57Hz에서 Rz 방향 굽힘모드가 발생하였다.

Table 3 Natural frequency and mode shape of rail

Mode	고유진동수	모드형상
1	127.92 Hz	Ry 방향 굽힘
2	160.57 Hz	Rz 방향 굽힘

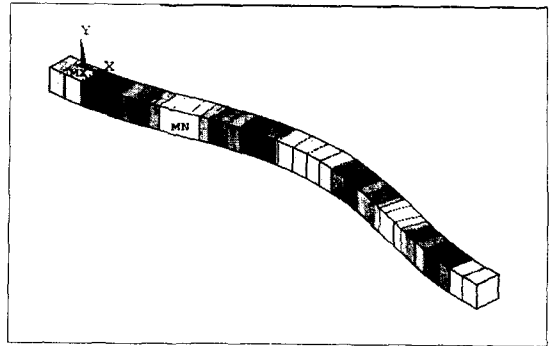


Fig. 10 Typical mode shape of rail itself at 160.57 Hz

### 2.4.2 실제 조건의 레일 모드 해석

자갈도상의 경우 레일하부 구조물(패드, 침목, 도상)들을 포함하여 모드해석을 한 결과를 Table 4에 요약하였다. 여기서 횡방향의 FRF와 관련이 있는 모드는 4번째 모드이다. 따라서 자갈도상의 횡방향 FRF의 130~150 Hz의 높은 가속도의 크기는 이 모드의 영향이 크다고 하겠다.

Table 4 Natural frequency and mode shape of gravel track

Mode	고유진동수	모드형상
1	76.035 Hz	Rz 방향 굽힘
2	85.084 Hz	Rz 방향 굽힘
3	88.119 Hz	Rz 방향 굽힘
4	135.32 Hz	z 방향 스프링 병진
5	155.57 Hz	Ry 방향 굽힘
6	230.69 Hz	Rz 방향 굽힘

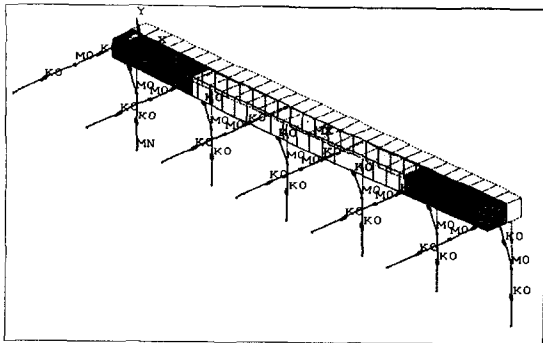


Fig. 11 Mode shape of railway track compose of gravel at 135.32 HZ

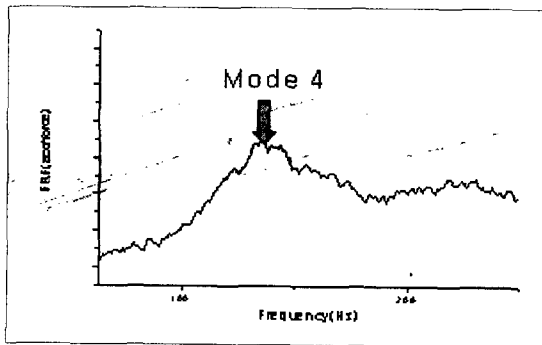


Fig. 12 measured value of gravel track and relation mode

슬라브도상의 경우 레일하부 구조물(패드, 침목, 도상) 들을 포함하여 모드해석을 한 결과를 Table 5 에 요약 하였다. 여기서 횡방향의 FRF와 관련이 있는 모드는 1 번째와 10번째 모드이다. 따라서 슬라브도상의 횡방향 FRF의 80Hz와 140 Hz 의 높은 가속도의 크기는 이 모드 들의 영향으로 큰 값으로 측정됨을 알 수 있다.

Table 5 Natural frequency and mode shape of slab railway track

Mode	고유진동수	모드형상
1	82.868	z 방향 스프링 병진
2	85.114	Ry 방향 굽힘
3	102.16	Ry 방향 굽힘
4	116.81	Rz 방향 굽힘
5	118.17	Rz 방향 굽힘
6	121.80	Rz 방향 굽힘
7	125.05	Ry 방향 굽힘
8	134.09	Rz 방향 굽힘
9	134.89	Ry 방향 굽힘
10	137.60	Ry 방향 굽힘
11	151.86	Rz 방향 굽힘
12	162.04	Rz 방향 굽힘

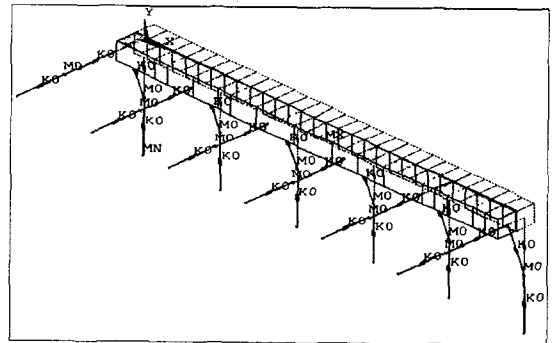


Fig. 13 mode shape of slab track(82.868Hz)

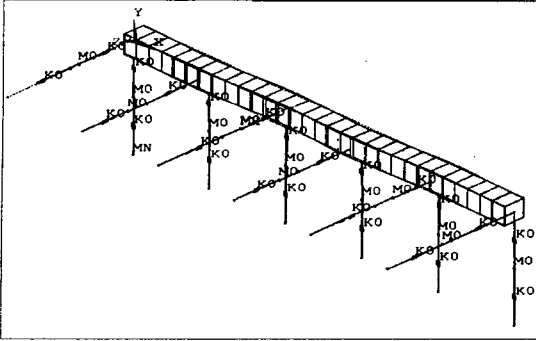


Fig. 14 Mode shape of slab track at 137.60Hz

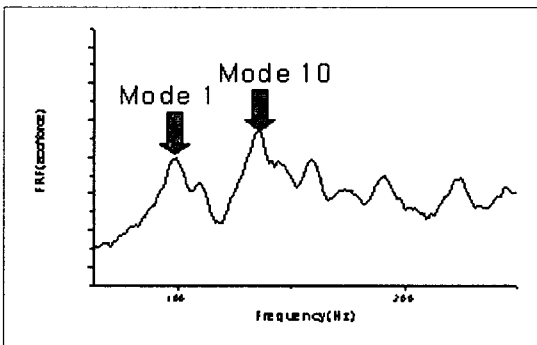


Fig. 15 Measured value of slab track and relation mode

### 3. 결론

본 연구에서는 먼저 충격해머가진 시험에 의한 자갈도상과 슬라브 도상에서 레일의 동특성을 살펴보았다. 그 결과 레일의 진동은 상하 방향보다 횡방향의 진동의 크기가 크게 측정되었으며 따라서 레일에서 방사되는 소음의 주된 원인은 레일의 횡진동이며, 슬라브 궤도와 자갈 궤도의 횡진동을 비교한 결과 슬라브 궤도의 횡진동은 80Hz 영역에서 분명한 Peak를 발견 할 수 있었다. 그리고 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS 6.0을 사용하여 레일의 슬라브 궤도와 자갈 궤도의 경우 각각 횡방향 모드의 고유주파수와 모드형상을 예측하였다. 실제 레일의 레일 단면의 변형이 발생하지만 본 연구에서는 레일의 단면 변형을 고려하지 않은 보(Beam)요소로 레일을 모델링하였기 때문에 고주파 성분의 모드는 해석하지 않았다. 또한 레일은 침목위치에서 패드, 발라스트 등에 의하여 주기적으로 지지되므로 각 요소의 진동특성을 파악하고 정확한 입력 자료를 구하는 것이 필요하다.

### 후 기

본 연구는 한국철도기술연구원의 지원으로 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

- (1) T. X. Wu, and D. J. Thompson, 1999, "A double Timoshenko beam model for vertical vibration analysis of railway track at high frequencies", *Journal of Sound and Vibration*. (1999) 224(2), pp. 329~348.
- (2) Federico Rossi, and Andrea Nicolini, 2003, "A Simple model to predict train-induced vibration: theoretical formulation and experimental validation" *Environmental Impact Assessment Review* 23 (2003) pp. 305~322.
- (3) Coenraad Esveld 저, 서사범 역, 2003, "Modern Railway Track", *열과알*, pp. 461~493.
- (4) 양윤석, 1999, "한국형 고속전철의 진동소음 예측에 관한 연구", *석사학위논문*, 홍익대학교 pp. 6~15, pp. 28~30.