

철도 전동 소음의 관점에서 해석한 국내 철도의 진동 특성 비교 Comparison of track vibration characteristics for domestic railway tracks in the aspect of rolling noise

유정수[†], 장승호*
Jungsoo Ryue[†], Seungho Jang*

Key Words : rolling noise (전동 소음), rail vibration (레일 진동), rail mobility (레일 모빌리티), decay rate (감쇠율)

ABSTRACT

The important source of noise from railways is rolling noise caused by wheel and rail vibrations induced by acoustic roughness at the wheel-rail contact. The main contributors for rolling noise are the sleepers, rail and wheels. In order to analyze and predict rolling noise, it is necessary to understand the vibrating behaviors of railway tracks, as well as the wheels. In the present paper, theoretical modelings of the railway track are reviewed in terms of the rolling noise, and they are applied for the three representative types of domestic railway tracks operated: the conventional ballasted track, KTX ballasted track and KTX concrete track. The characteristics of waves propagating along rails were investigated and compared between the tracks. The tracks were modeled as discretely supported Timoshenko beams and compared in terms of the averaged squared amplitude of velocity which is directly related to the sound radiation from the rails.

1. 서론

철도 차량이 궤도 위를 주행할 때 발생하는 전동 소음(rolling noise)은 주행시 차륜(wheel)과 레일(rail)의 수직방향 거칠기(roughness)에 의해 차륜과 레일이 진동하면서 발생한다. 자갈 도상 궤도의 경우, 전동 소음에 기여하는 주요 소음원으로는 침목, 레일, 그리고 차륜을 들 수 있다. 주파수 대역 별로는, 대략 300~400 Hz 이하의 주파수 대역에서는 침목이, 약 400~2000 Hz 까지는 레일이, 그리고 약 2000 Hz 이상에서는 차륜이 주요 소음원으로 알려져 있다^(1,2). 본 연구에서는 철도 전동 소음 해석을 위해 필요한 이론적 궤도 모델링에 대해 간략히 소개하고, 이를 이용해 세 가지 형태의 국내 궤도에 대해 진동을 해석하여 레일에서 방사되는 소음의 관점에서 그 결과를 비교하였다. 해석에 이용한 국내 궤도는 ‘기존선 자갈 도상 궤도(conventional ballasted track)’, ‘KTX 자갈 도상 궤도(KTX

ballasted track)’ , 그리고 ‘KTX 콘크리트 도상 궤도(KTX concrete track)’ 이다.

2. 궤도 모델링

본 연구에서 해석하고자 하는 자갈 도상 궤도의 경우에는 침목과 도상을 해석에 포함시키기 위해 2단 이산 지지 궤도로 가정하였으며, 콘크리트 도상 궤도의 경우에는 레일과 레일패드만으로 구성된 1단 이산 지지 궤도로 모델링하고 콘크리트 도상은 강체로 가정하였다^(3,4). 해석에 사용한 궤도의 물성치는 표 1 그리고 표 2에 각각 정리하였다.

레일의 수직 방향 변위 $u(x)$ 를 Timoshenko 보에 존재하는 네 파동의 합으로 표현하면

$$u(x) = \sum_{n=1}^4 A_n e^{-ik_n x} \quad (1)$$

이며 침목 설치 간격을 주기로 일정하게 반복되는 구간의 두 경계 지점 $x=0$ 과 $x=d$ 에 대해 표현하면

$$\vec{u}_a \equiv \vec{u}(0) = \mathbf{BA} \quad , \quad \vec{u}_b \equiv \vec{u}(d) = \mathbf{CB}^{-1}\vec{u}_a \quad (2)$$

[†] 교신저자; 정회원, 울산대학교
E-mail : jsryue@ulsan.ac.kr
Tel : 052-259-2168, Fax : 052-259-2677
* 한국철도기술연구원 에코시스템연구실

Table 1 Properties of the conventional ballasted track and KTX ballasted track

Items	Properties	conventional	KTX
Rail	Vertical bending stiffness (MNm ²)	4.32	6.42
	Shear stiffness (MN)	510	615
	Mass per unit length (kg/m)	50	60.3
	Rotational inertia (kgm)	0.206	0.24
	Damping loss factor	0.02	0.02
	Shear coefficient	0.34	0.34
Railpad	Vertical stiffness (MN/m)	200	100
	Damping loss factor	0.24	0.14
Sleeper	Mass (kg)	103	140
	Sleeper spacing (m)	0.689	0.6
Ballast	Stiffness (MN/m)	80	50
	Damping loss factor	0.4	0.5

Table 2 Properties of the KTX concrete track

Items	Properties	
Rail	Vertical bending stiffness (MNm ²)	6.42
	Shear stiffness (MN)	615
	Mass per unit length (kg/m)	60.3
	Rotational inertia (kgm)	0.24
	Damping loss factor	0.02
	Shear coefficient	0.34
Railpad	Vertical stiffness (MN/m)	40
	Damping loss factor	0.14

이다. 여기서 $\vec{u}(x) = [u(x) \phi(x) M(x) Q(x)]^T$ 이며 $\mathbf{A} = [A_1 A_2 A_3 A_4]^T$, 행렬 \mathbf{B} 와 \mathbf{C} 는 각각 $x = 0$ 과 $x = d$ 에서 구한 변위(u), 회전각(ϕ), 모멘트(M) 그리고 전단력(Q)을 구성하는 계수항들로 이루어진 4×4 정방 행렬이다. 거리 d 만큼 떨어져 주기적으로 설치된 지지 구조에 발생하는 반력 K 가 $x = d$ 지점에 작용하는 경우 지지점 좌우의 변위 연속 조건과 힘의 평형 조건으로부터

$$\vec{u}_c = \mathbf{DCB}^{-1} \vec{u}_a = e^{-\gamma d} \vec{u}_a \quad (3)$$

가 된다. 따라서 식(3)을 만족하는 전파계수는 식(2)의 고유치 문제를 풀어 구할 수 있다.

레일의 지지점에서 작용하는 반력을 외력으로 간주하면

$$u(x) = F\alpha(x, x') - K \sum_{n=-\infty}^{\infty} \alpha(x, x_n)u(x_n) \quad (4)$$

이 된다. 여기서 $x_n = nd$ 이며 레일을 무한 길이의 보로 가정하여 $n = -\infty, \dots, -1, 0, 1, \dots, \infty$ 로 설정하였다. 가진력에 대한 궤도의 응답을 리셉턴스로 정의하면 식(5)와 같다.

$$\alpha(x, x') = \bar{u}(x, x') / F \quad (5)$$

식(5)를 이용해 레일 지지점 x_m 의 응답을 표현하면

$$u(x_m) = F\alpha(x_m, x') - K \sum_{n=-\infty}^{\infty} \alpha(x_m, x_n)u(x_n) \quad (6)$$

이므로 n 을 유한개의 지지점으로 줄여 근사화하면

$$u(x_m) \approx F\alpha(x_m, x') - K[\alpha(x_m, x_n)] \vec{u}_n \quad (7)$$

으로 쓸 수 있다. 여기서 $[\alpha(x_m, x_n)]$ 는 크기 $1 \times (2N + 1)$ 의 행 벡터(row vector)이며 \vec{u}_n 는 지지점의 변위를 나타내는 열 벡터(column vector)이다. 식(7)을 이용해 지지점의 변위를 구하면

$$\vec{u}_n = F(\mathbf{I} - \mathbf{K}\alpha)^{-1}[\alpha(x_m, x')] \quad (8)$$

와 같다. 여기서 α 는 크기 $(2N + 1) \times (2N + 1)$ 의 리셉턴스 행렬이다. 식(8)은 지지점에서 발생하는 응답이므로 식(9)을 식(4)에 대입하면, 임의점 x 의 응답을 구할 수 있다.

3. 국내 궤도에 대한 진동 해석

3.1 가진점 모빌리티

Fig. 1 에는 가진력이 레일패드 설치 간격의 중앙 ($x' = d/2$)에 작용할 때 위 세 가지 궤도에서 구한 가진점 모빌리티를 비교하여 나타내었다. Fig. 1로부터, 약 100 Hz 이하의 저주파수 대역 모빌리티는 세 궤도 모델 모두 유사함을 알 수 있다. 반면, 기존선 자갈 도상 궤도는 약 400~900 Hz 대역, 고속철도 자갈 도상 궤도는 약 220~350 Hz 대역 그리고 고속철도 콘크리트 도상

궤도는 약 110~220 Hz 대역에서 상대적으로 높은 모빌리티를 가지는 것으로 나타났다.

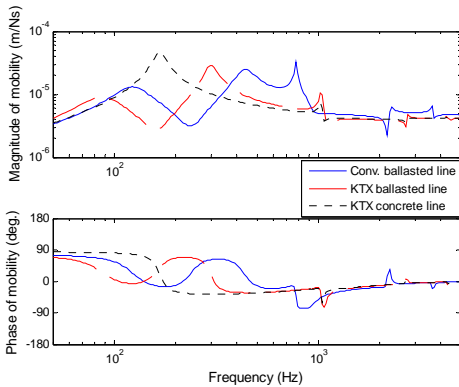


Fig. 1. Drive point mobilities predicted from the three different types of Korean railway tracks shown in Tables 6.1~6.3 for excitations applied at mid-span ($x' = d/2$).

3.2 감쇠율

Fig. 2 에는 세 가지 궤도 모델에 전파되는 파동의 감쇠율을 비교하여 나타내었다. 기존선 자갈 도상 궤도의 경우, 통과 영역은 약 120~270 Hz 이며, 차단 영역은 약 270~450 Hz 가 된다. 또한 이산 지지 구조에 의한 pinned-pinned 주파수 부근에서 차단 영역이 발생함을 알 수 있다. 고속철도 자갈 도상 궤도의 경우에는 기존선 자갈 도상에 비해 레일패드와 도상의 강성이 낮기 때문에 통과 영역 및 차단 영역의 주파수 범위가 약 90~170 Hz 와 170~300 Hz 로 낮아졌다. 그리고 이산 지지에 의한 발생하는 차단 대역에서 기존선 자갈 도상 철도에 비해 감쇠율이 낮아진 것은 고속철도 자갈 도상 궤도에 사용되는 레일패드의 강성이 낮아졌기 때문이다. 고속철도 콘크리트 도상 궤도는 1 단 지지 구조를 가지며, cut-on 주파수는 약 170 Hz 이다. 따라서 170Hz 이하의 주파수 대역에서는 감쇠율이 큰 반면 그보다 높은 주파수 대역에서는 감쇠율이 낮아지는 것을 알 수 있다.

위 세 궤도 모델을 비교해 보면 약 170 Hz 보다 높은 주파수 대역에서 고속철도 콘크리트 도상 궤도의 감쇠율이 가장 낮게 나타났다. 따라서, 이 주파수 대역에서는 고속철도 콘크리트 도상 궤도에서 레일의 진동이 궤도를 따라 멀리까지 전파됨을 알 수 있다. 세 궤도 모델 모두 고주파수로 갈수록 레일의 감쇠율로 수렴한다.

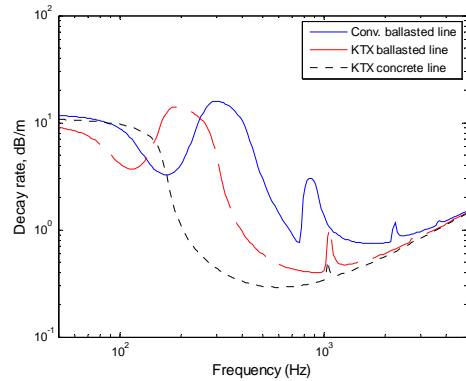


Fig. 2. Decay rates predicted from the three different types of Korean railway tracks.

3.3 평균진동속도

위 세 가지 궤도 모델이 궤도 방사 소음의 측면에서 어떤 차이를 보이는지 대략적으로 살펴보기 위해 가진점의 위치를 $0 \leq x' \leq d$ 범위에서 변화시켜가면서 일정 구간 ($-20m \leq x \leq 20m$)에 대해 평균한 궤도의 진동을 계산하였다.

시간과 공간($-L \leq x < L$)에 대해 평균된 레일의 속도 제곱은 식(9)로 정의된다.

$$\langle \overline{v^2} \rangle = \frac{1}{2L} \int_{-L}^L \frac{1}{2} |v(x, x')|^2 dx \quad (9)$$

식(9)는 가진점의 위치 x' 을 변수로 가지므로 가진점 모빌리티의 제곱으로 나누어 무차원화하고, 그 값을 여러 개의 가진점 위치에 대해 평균한 결과를 Fig. 3 에 나타내었다. Fig.3 을 통해 고속철도 콘크리트 궤도의 평균 진동 수준이 약 170 Hz 이상 대역에서 가장 높게 나타남을 알 수 있다. 반면 약 170 Hz 이하의 저주파수 대역에서는 세 궤도 모델이 유사한 진동 수준을 나타낸다. 따라서, 방사 소음의 측면에서 고속철도 콘크리트 궤도가 상대적으로 높은 소음을 유발할 것으로 예상된다.

레일패드의 강성 변화에 따른 레일 평균 진동 속도의 변화 경향을 살펴보기 위해 Table1 의 기존선 자갈 도상 궤도에 대해 레일패드 강성을 200 MN/m, 100 MN/m, 그리고 40 MN/m 로 변화시켜가면서 해석을 수행하고 그 결과를 Fig. 4 에 비교하여 나타내었다. Fig. 4 의 결과를 보면, 레일패드의 강성이 낮아지면서 특정 주파수 대역에서 레일의 평균 진동 속도가 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 2 에 보인 감쇠율 변화로 설명

할 수 있다. 즉, Fig. 9 에 나타난 것과 같이 레일 패드의 강성이 낮아지면 레일의 감쇠율이 낮아져 레일 진동은 더 멀리까지 전파하고, 따라서 레일의 평균 진동 속도가 증가하는 것이다

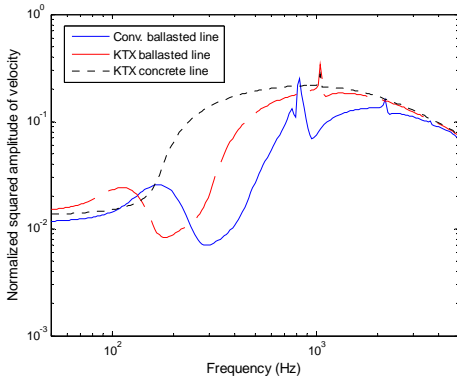


Fig. 3. Normalized squared amplitudes of velocity predicted from the three different types of Korean railway tracks.

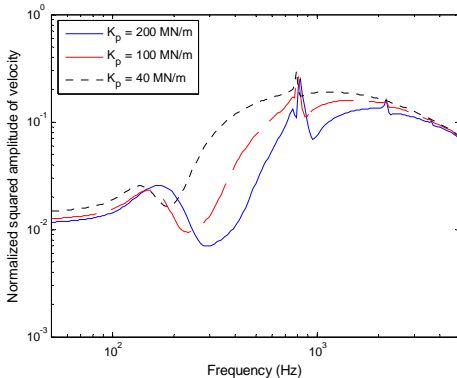


Fig. 4. Comparison of normalized squared velocity calculated for the conventional ballasted track in Table 1 with three different railpad stiffnesses.

3. 결론

본 논문에서는 궤도 진동 소음 해석을 위해 필요한 이론적 궤도 모델링에 대해 간략히 소개하고, 이를 이용해 국내의 ‘기존선 자갈 도상 궤도’, ‘KTX 자갈 도상 궤도’, 그리고 ‘KTX 콘크리트 도상 궤도’ 대해 진동을 해석하고 그 결과를 비교하였다. 본 해석을 통해 방사 소음의 측면에서 고속철도 콘크리트 궤도가 상대적으로 높은 소음을 유발할 것으로 예상되었다. 더욱이 콘크리트 도상 궤도는 침묵에 의한 소음 방사가 고려되지 않기 때문에 500 Hz 이하 주파수 대역

에서도 레일이 주요 소음원으로 작용할 가능성이 있다.

이러한 현상에 대한 보다 정확한 이해를 위해서는 고속철도 콘크리트 도상 궤도에 대해 경계 요소 모델을 적용한 방사 소음 해석을 수행하고 저주파수 대역의 소음 수준에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] D.J. Thompson, P. Fodiman and H. Mahe (1996) Experimental validation of the TWINS prediction program, Part 2: results, *Journal of Sound and Vibration*, 193, pp. 137-147.
- [2] D.J. Thompson (2009) *Railway Noise and Vibration: Mechanisms, Modelling and Means of Control*, Elsevier Ltd..
- [3] D.J. Thompson (1993) Wheel-rail noise generation. Par III: Rail vibration, *Journal of Sound and Vibration*, 161, pp. 421-446.
- [4] K. Knothe and S.L. Grassie (1993) Modelling of railway track and vehicle/track interaction at high frequencies, *Vehicle System Dynamics*, 22, pp. 209-262.