

철도 전동소음 관점의 궤도 진동 특성(I)

유 정 수

(울산대학교 조선해양공학부)

1. 머리말

얼마 전인 2014년 4월 1일은 국내에 고속철도(KTX)가 개통된 지 10주년이 되는 날이었다. 지난 10년간 KTX는 전국을 만나질 생활권으로 변화시키며 한국의 대표적인 친환경 고속 교통수단으로서 자리매김하였다. 최근에는 기존의 300 km/h급 열차보다 주행 속도를 대폭 향상시킨 시속 400 km/h급 고속 열차 개발과 철도 궤도 등의 기반 시설 건설 등이 진행되고 있다.

열차 주행 속도의 증가는 필연적으로 철도 소음 및 지반 진동의 증가를 유발하므로 이에 대한 예측 및 방음, 방진 대책이 함께 검토 수립되어야 한다. 철도 차량 주행 시 발생하는 소음 및 지반 진동에 대한 연구는 철도 산업이 발달한 유럽을 중심으로 오래전부터 활발하게 수행되어 오고 있으며, 국내에서도 학계와 산업계를 중심으로 이에 대한 연구와 기술 개발이 진행되고 있다.

철도 차량이 궤도를 따라 주행할 때 발생하는 소음은 크게 전동소음(rolling noise), 공력소음(flow noise), 동력소음(engine noise)으로 나눌 수 있다. 이 중 공력소음은 차량이 250~300 km/h 이상의 고속으로 주행할 때 주요 소음원으로 작용

하며, 약 250 km/h 이하의 주행 속도 구간에서는 전동소음이 주요하게 발생한다⁽¹⁾. 전동소음은 차량이 레일 위를 주행할 때 차륜(wheel)과 레일의 수직 방향 거칠기 (이하 '음향조도(acoustic roughness)' 라 칭함)에 의해 차륜과 레일이 진동하면서 발생한다. 따라서 전동소음을 저감시키기 위해서는 일차적으로 레일과 차륜의 음향 조도를 낮게 유지하는 것이 필요하다. 유럽의 경우 전동소음의 관점에서 레일과 차륜에 대한 음향 조도 기준을 제정하여 지속적으로 관리, 평가하는 시스템을 갖추고 있는 반면 국내에서는 아직 이에 관한 기준이 마련되어 있지 못하다.

철도 전동소음에서는 침목, 레일, 그리고 차륜이 주요 소음원으로 기여한다. 주파수 대역 별로는, 대략 300~400 Hz 이하의 저주파수 대역에서는 침목 소음이, 약 400~2000 Hz 까지는 레일 소음이, 그리고 약 2000 Hz 이상의 주파수 대역에서는 차륜 소음이 지배적으로 발생한다⁽¹⁾. 이들 소음을 합산한 총합 소음에 있어서는 레일에서 방사되는 소음이 일반적으로 가장 크게 기여한다. 이번 강좌에서는 철도 전동소음의 관점에서 레일 방사 소음을 해석하기 위한 궤도 모델링 방법과 레일 진동 특성에 대해 간략히 소개한다.

* E-mail : jsryue@ulsan.ac.kr / Tel : (052)259-2168

기초강좌

2. 궤도 모델링

철도 전동소음을 해석하기 위해서는 궤도의 동역학적 거동을 해석할 수 있는 궤도 모델의 수립이 필요하다. 궤도의 주요 구성 인자로는 레일, 레일 패드(rail pad), 침목(sleeper), 도상(ballast) 및 기판(substrate)을 들 수 있다(그림 1). 최근에는 기존의 자갈 도상 궤도(ballasted track)에 비해 상대적으로 유지 보수 비용이 저렴한 콘크리트 슬라브 궤도(concrete slab track)의 사용이 증가하고 있으며 국내에서도 고속 철도 신설 구간은 콘크리트 슬라브 궤도를 채택하고 있다. 콘크리트 슬라브

궤도는 침목과 도상 대신 콘크리트 슬라브가 설치되므로 레일, 레일패드 그리고 콘크리트 슬라브로 구성된다. 특히 상대적으로 유연한 구조였던 자갈 도상과 침목을 강성이 큰 콘크리트 슬라브로 대체하였기 때문에 콘크리트 슬라브 궤도에서는 자갈 도상 궤도보다 낮은 강성의 레일 패드를 채택하여 궤도의 강성 문제를 보완한다.

이론적 궤도 모델링 시, 해석 주파수 대역이 500 Hz 이하인 경우 레일을 단순 Euler-Bernoulli 보로 가정할 수 있으나 레일에 전단 변형이 발생하는 500 Hz 이상에서는 Timoshenko 보 모델이 사용된다. 보 이론의 기본 가정은 단면의 형상이 변형하

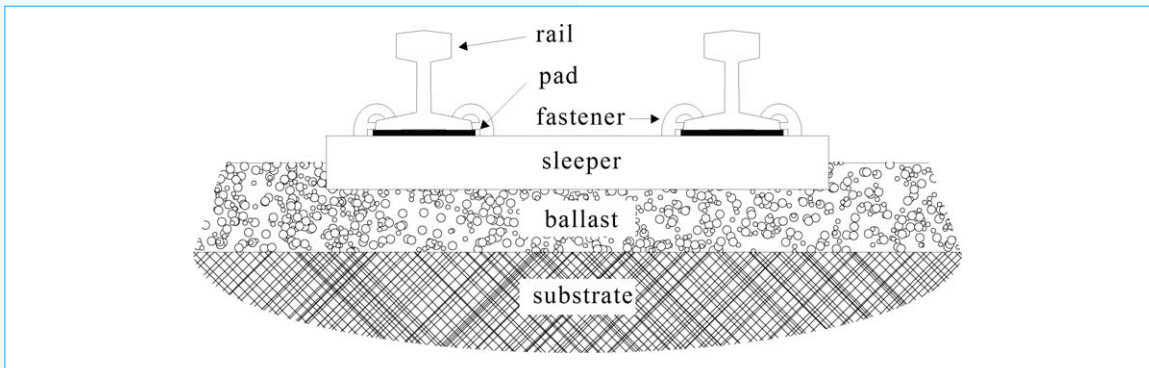


그림 1 자갈 도상 궤도의 구성 예

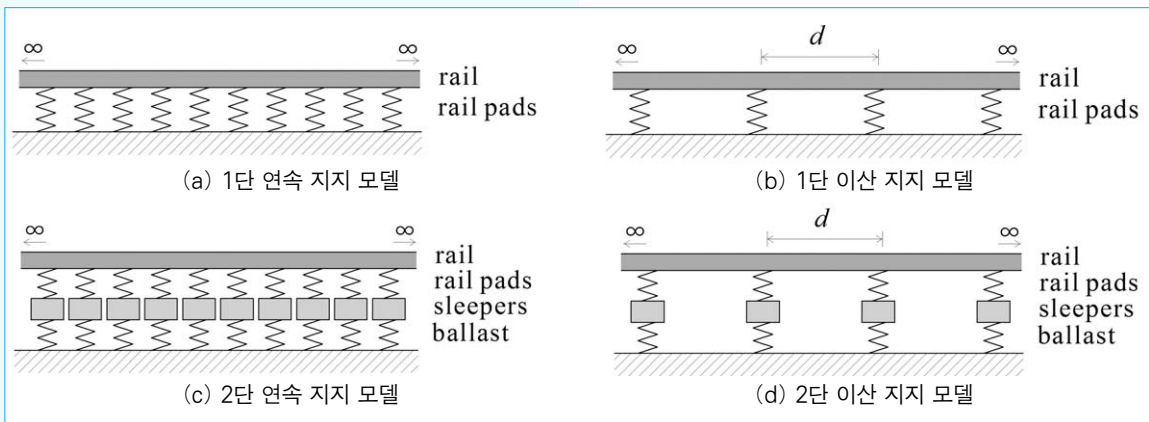


그림 2 전동소음 해석을 위한 이론적 궤도 모델

지 않는다는 것인데 레일의 종류에 따라 다르지만 일반적으로 UIC60 레일의 경우 약 2 kHz 근방에서 단면의 변형이 발생하기 시작하므로 2 kHz 보다 높은 주파수 대역에서는 보 이론에 기반한 모델이 더 이상 유효하지 않다. 일반적으로 레일은 침목 위에 지지되어 있으므로 이산 탄성 지지(discrete elastic support) 구조를 갖는다. 그러나 해석의 편의를 위해 연속 탄성 지지(continuous elastic support) 구조로 가정하여 해석하기도 한다. 이상과 같이 철도 전동소음의 관점에서 사용하는 철도 궤도 모델은 그림 2와 같다⁽²⁾.

3. 레일 진동 특성

레일에서 방사되는 소음은 음향 조도에 의해 레일이 진동하여 발생하므로 레일 소음 저감을 위해서는 레일의 진동 특성을 이해하는 것이 필요하다. 작용 하중에 의해 발생하는 레일의 진동 수준은 가진점 모빌리티로부터, 그리고 레일 진동의 거리에 따른 감쇠 특성은 감쇠율(decay rate)

로부터 파악할 수 있다. 국내 철도 궤도의 진동 특성을 살펴보기 위해, 국내에서 운용 중인 기존 선 자갈 도상 궤도, KTX 자갈 도상 궤도, 그리고 KTX 콘크리트 슬라브 궤도에 대한 레일의 진동 특성 해석 결과를 그림 3에 비교하여 나타내었다. 해석 시 자갈 도상 궤도는 그림 2(d)의 2단 이산 지지 모델을, 콘크리트 슬라브 궤도에는 그림 2(b)의 1단 이산 지지 모델을 적용하였다.

그림 3(a)의 가진점 모빌리티로부터 세 궤도의 진동 특성이 상이함을 알 수 있다. 특히, 약 100~1000 Hz 주파수 대역에서 큰 차이를 보인다. 자갈 도상 궤도는 저주파수 대역에 두 개의 공진이 존재하는데 이들은 각각 도상 위에 놓인 침목과 레일의 공진, 그리고 레일 패드 위에 놓인 레일의 공진에 해당한다. 콘크리트 슬라브 궤도에는 도상이 없으므로 레일 패드와 레일에 의해 하나의 공진만이 발생하는데, 상대적으로 낮은 레일 패드 강성으로 인해 레일의 공진 주파수가 가장 낮게 나타난다. 따라서 자갈 도상 궤도에 비해 콘크리트 슬라브 궤도가 약 100~300 Hz 대역에

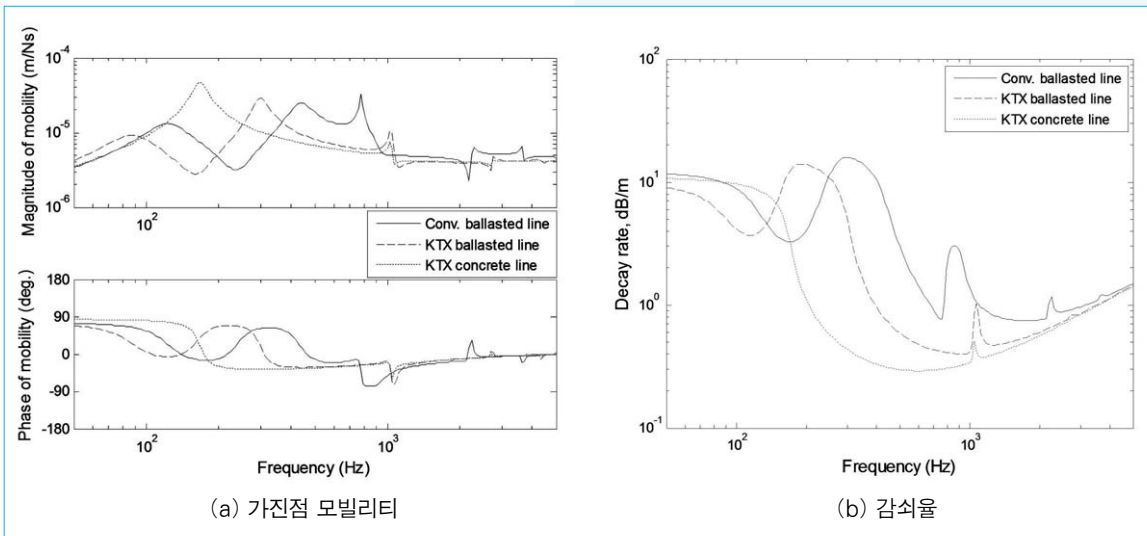


그림 3 국내 철도 궤도의 진동 특성 해석 예

기초강좌

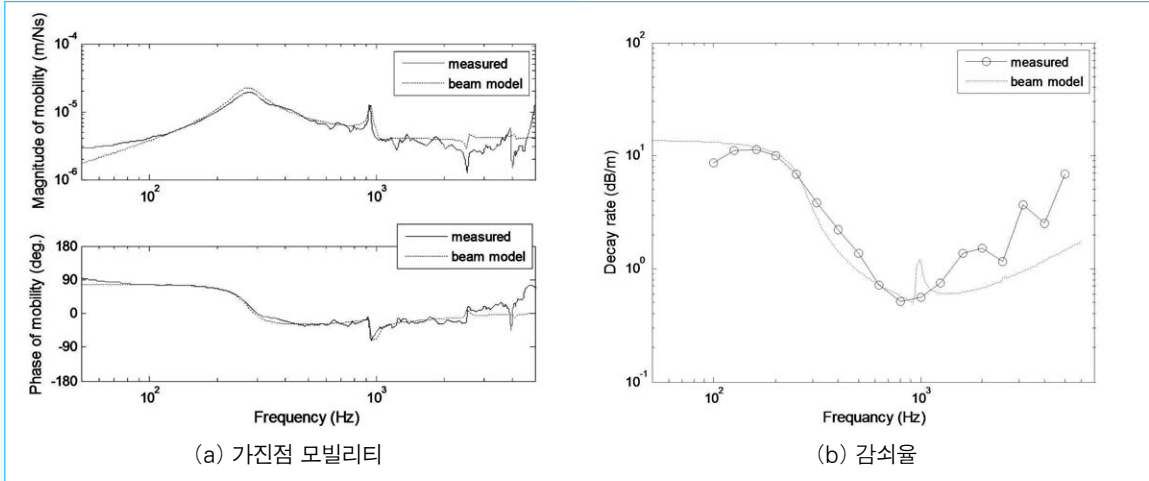


그림 4 KTX 경부선 구간의 콘크리트 슬라브 궤도에 대한 레일 진동 측정치와 이론 해석 결과 비교

서 높은 진동 수준을 갖는다. 또한 레일이 일정 간격으로 이격된 침목에 의해 지지되므로 두 침목 사이에서 'pinned-pinned' 모드의 레일 진동이 발생하는데, 그림 3(a)로부터 침목 간격 $d=0.69$ m의 기존선 자갈 도상 궤도에서는 약 800 Hz에서, $d=0.6$ m의 KTX 궤도에서는 약 1000 Hz에서 pinned-pinned 진동이 발생함을 알 수 있다.

레일 방사 소음은 레일을 따라 진행하는 진동에 의해 발생하므로 거리에 따른 레일 진동의 감쇠 특성은 중요한 파라미터이다. 레일 진동의 거리 감쇠 특성은 감쇠율(dB/m)로 정의할 수 있다. 즉, 감쇠율이 크면 레일 진동이 멀리까지 전파되지 못하므로 레일 소음이 낮아지는 반면 감쇠율이 낮으면 레일 진동이 멀리까지 전파되어 레일이 선음원(line source)으로 작용한다. 따라서 레일 방사 소음을 줄이기 위해서는 감쇠율을 증가시키는 것이 필요하다. 그림 3(b)에는 국내 세 종류 궤도의 감쇠율을 비교하여 나타내었다. 그림 3(b)로부터 기존선 자갈 도상 궤도의 감쇠율이 전반적으로 가장 높고 반면 KTX 콘크리트 슬라브 궤도의 감쇠율이 가장 낮음을 알 수 있다. 그

이유는 KTX 콘크리트 슬라브 궤도에 사용되는 레일 패드의 강성이 자갈 도상 궤도의 레일 패드 강성보다 낮기 때문이다(자갈 도상에 의한 흡음 효과는 레일 소음에 미치는 기여도가 상대적으로 크지 않다.). 그림 3(b)의 감쇠율 특성으로부터 자갈 도상 궤도에 비해 콘크리트 슬라브 궤도의 레일 방사 소음이 더 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 전동소음 관점에서는 높은 강성의 레일 패드를 사용하는 것이 레일 방사 소음을 줄이는데 유리하다. 그러나 레일 패드의 강성이 증가하면 궤도 지지 구조 및 차량으로 전달되는 하중이 증가하므로 궤도와 차량 시스템 전체의 유지 보수 및 안전성 관점에서 함께 평가되어야 할 것으로 판단된다⁹⁾.

그림 3은 궤도의 주요 물성치를 추정하여 계산한 진동 예측치였다. 이와는 반대로 실제 궤도에서 모빌리티와 감쇠율을 측정한다면 그림 2의 궤도 모델을 이용해 궤도에 설치되어 있는 주요 구성 요소의 물성치 값을 추출해 낼 수 있다. 그림 4에는 KTX 경부선 구간의 콘크리트 슬라브 궤도에서 측정한 가진점 모빌리티와 감쇠율을 이론

해석 결과와 비교해 나타내었다. 그림 4의 이론 해석 결과는 궤도 구성 요소의 물성치를 변화시켜가면서 측정치와 유사한 응답이 얻어지도록 한 것이다. 그림 4(a)로부터 레일 진동 이론치가 측정치와 대부분의 주파수 구간에서 잘 일치함을 알 수 있다. 다만 레일의 단면 변형이 발생하여 보 이론이 유효하지 않은 약 2 kHz 이상 주파수 대역에서는 이론 해석 결과와 측정 결과에 다소 차이가 나타난다. 그림 4(b)에서는 감쇠율을 비교하였는데, 보 이론이 유효하지 않은 약 2 kHz 이상의 주파수 대역에서 측정치가 이론 해석 결과보다 다소 높게 나타나고 있지만 전반적으로 측정값과 이론 해석 결과가 유사한 경향을 보이며 잘 일치함을 알 수 있다.

4. 맺음말

이번 강좌에서는 철도 전동소음의 관점에서 이론적 궤도 모델링 및 레일 진동 특성을 살펴보았다. 레일 진동에 관한 주요 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 철도 전동소음을 줄이기 위해서는 기본적으로 레일과 차륜의 음향 조도를 낮게 유지하는 것이 바람직하다.
- 약 2 kHz 이하의 저주파수 대역에서는 보 이론에 기반한 이론 해석 모델이 유효하다.
- 콘크리트 도상 궤도는 자갈 도상 궤도보다 레일 진동의 감쇠율이 낮으며, 그 주된 이유

는 레일 패드의 강성이 낮기 때문이다. 따라서 콘크리트 도상 궤도는 자갈 도상 궤도에 비해 레일 방사 소음이 크게 발생한다(자갈 도상 제거에 따른 흡음 효과 상실은 상대적으로 그 기여도가 크지 않다).

- 전동소음 관점에서는 높은 강성의 레일 패드를 사용하는 것이 유리하지만 레일 패드의 강성이 증가하면 궤도 지지 구조 및 차량으로 전달되는 하중이 증가하므로 궤도와 차량 시스템 전체의 유지 보수 및 안전성 관점과 함께 평가되어야 한다. **KSNVE**

참고 문헌

- (1) Thompson, D. J., 2009, Railway Noise and Vibration: Mechanisms, Modelling and Means of Control, Elsevier Ltd.
- (2) Knothe, K. and Grassie, S. L., 1963, Modelling of railway Rrack and Vehicle/track Interaction at High Frequencies, Vehicle System Dynamics, Vol. 22, pp. 209~262.
- (3) Yang, S.-C., Jang, S.-Y. and Kim, E., 2011, Determination of Upper Limit of Rail Pad Stiffness for Ballasted and Concrete Track of High-speed Railway Considering Running Safety, Journal of Korean Society for Railway, Vol. 14, No. 6, pp. 526~534.