

고속철도 자갈도상궤도의 진동특성과 인자와의 상관관계 분석

Analysis on the Correlation between the Vibration Characteristics of the Ballast Track and the Parameters in High-Speed Railway Lines

김만철¹⁾
Kim, Man-Cheol

ABSTRACT

In this paper, the correlation between the vibration characteristics of the track components and the parameters affecting the vibration is analysed. To do it, the accelerations of each track component such as rails, sleepers and ballast are measured in Kyong-Bu high-speed railway lines. The RMS values of the measured data are calculated and the corrugation, the track irregularity and the pad stiffness are considered as the parameters in the viewpoint of track. By using the linear regression, the correlation coefficient is calculated to analyse the relationship. The parameter whose correlation coefficient is more than 0.7 is considered as the major one. Also, the 1/3 Octave analysis is calculated to analyse the dominant frequency band of the vibrations of the track components.

1. 서론

궤도 각 부 즉, 즉 레일과 침목, 도상자갈의 진동은 궤도틀림(track irregularity) 및 전동음(rolling noise), 구조물 소음(structure borne noise) 등과 밀접한 관계를 가지고 있다. 일본 철도기술연구원(RTRI) 및 유럽철도연맹 주관의 연구결과보고서(D-117 Committee of the ORE)에 의하면 도상자갈의 침하는 대체로 다음 식과 같이 도상자갈의 가속도와 침목하면 도상에 작용하는 압력에 영향을 받는 것으로 나타나고 있다.

$$\delta = \beta \times \sigma_b \times a_b \quad (1)$$

여기서 δ	=	도상자갈의 침하
β	=	상수
a_b	=	도상가속도
σ_b	=	침목하면 도상에 작용하는 압력

본 논문은 경부고속철도 풍세교외 4개소에 대해 궤도 각 부의 가속도를 측정하고, 이에 영향을 미치는 인자들에 대한 상관관계(correlation)를 분석하는 것과 주파수분석을 통하여 각 부의 진동속도에 대한 탁월주파수 대역을 분석하여 진동저감 대책 수립을 위한 기초자료를 확보하는 것을 목적으로 하고 있다. 본 논문에서는 궤도 각 부의 진동에 영향을 미치는 인자들로 체결시스템의 패드강성, 궤도틀림, 차량의 주행속도와 레일요철을 고려하였다. 측정개소는 경부고속철도 1단계 구간에 부설된 체결시스템, 노반 및 궤도상태를 고려하여 다음 표와 같이 선정하였다.

¹⁾ 한국철도기술연구원, 궤도토목연구본부 궤도구조연구팀, 정희원
E-mail : kimmc@krri.re.kr
TEL : (031)460-5321 FAX : (031)460-5814

표 1. 진동가속도 측정개소

노반	궤도형식	체결시스템형식	측 정 위 치
교량	자갈궤도	E-Clip	풍세교(103k000 ~ 103k100, T2)
토공	자갈궤도	Fast Clip	약목구간(241k300 ~ 241k400, T1)
	자갈궤도	Fast Clip	설계구간(195k300 ~ 195k400, T2)
교량	자갈궤도	Fast Clip	금곡고가(246k300 ~ 246k400, T1)
	자갈궤도	Fast Clip	주곡고가(197k600 ~ 197k700, T2)

2. 진동가속도 시험

2.1 개요

각 측정위치별로 침목이 도상자갈에 잘 밀착되어 있는 양호한 개소와 뜬침목 개소를 파악하여 진동가속도를 측정하였다. 궤도 각 부의 진동가속도 측정을 위하여 사용한 센서 현황은 표 2와 같다. sampling rate은 2kHz이며 780Hz의 digital filter를 적용하였다. 그림 1은 궤도 각 부의 진동가속도 측정 개요도이다.

궤도 각 부의 진동가속도는 각 측정개소에 대해서 상업운행 속도로 운행하는 KTX를 대상으로 10회 이상 측정하였다. 측정된 데이터를 신뢰성 있게 분석하기 위해서 KTX 주행시 측정된 데이터들의 실효치(RMS, root mean square)와 1/3 옥타브해석을 수행하여 전체 측정 횟수에 대한 평균값으로 분석하였다. 진동가속도는 차륜의 상태 등에 대해서 매우 민감하게 반응하기 때문에 최대값을 측정 결과의 대표값으로 하여 분석하는 것은 적절치 않다.

표 2. 측정 가속도 현황

구 분	사 양
레일 수직방향	Model-353B03, sensitivity-10mv/g, capacity-500g Measuring frequency range-1 ~ 7,000Hz, Type-ICP type
레일 횡방향	Model-353B31, sensitivity-50mv/g, capacity-100g Measuring frequency range-1 ~ 5,000Hz, Type-ICP type
침목	Model-352A78, sensitivity-100mv/g, capacity-50g Measuring frequency range-5 ~ 15,000Hz, Type-ICP type
도상자갈	Model-393A03, sensitivity-1000mv/g, capacity-5g Measuring frequency range-0.5 ~ 2,000Hz, Type-ICP type
노반/슬라브/라이닝	Model-393B05, sensitivity-10v/g, capacity-0.5g Measuring frequency range-0.7 ~ 450Hz, Type-ICP type

2.2 궤도 각 부 진동가속도에 영향을 미치는 인자

가. 체결시스템 패드강성

각 측정개소에서 부설된 체결시스템의 패드를 샘플로하여 KR 성능시방서 기준에 따라 패드의 강성을 측정하였다. 그림 2는 각 샘플에 대한 패드강성을 나타낸 것이다.

각 체결시스템 신재의 패드강성은 E-clip 패드인 경우 93.3kN/mm로 Fast clip 패드인 경우 107.3kN/mm로 나타났는데 비해서 현장에 부설된 체결시스템의 패드강성은 200kN/mm에서 300kN/mm 사이로 측정되었다.

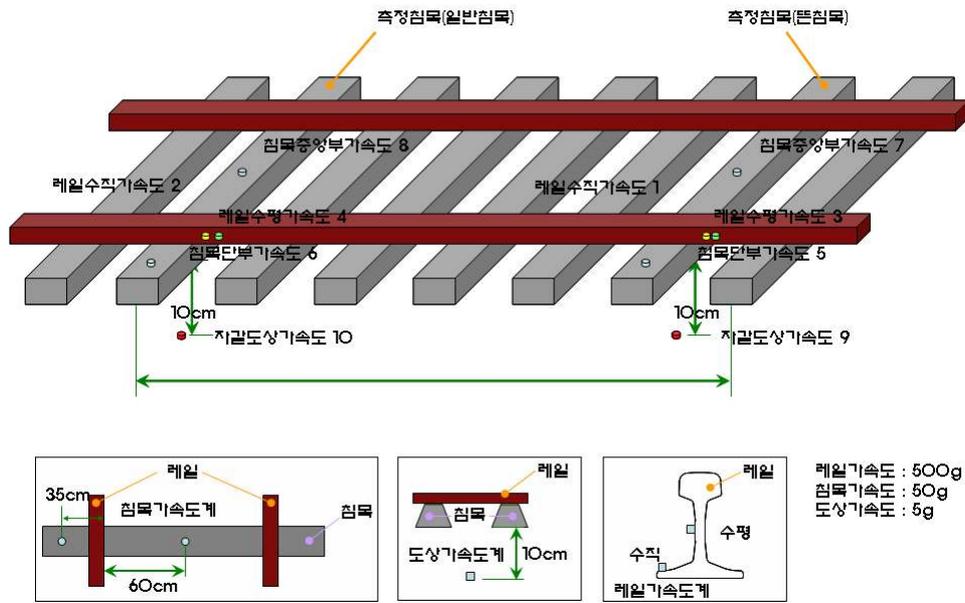


그림 1. 궤도 각 부의 측정 개요도

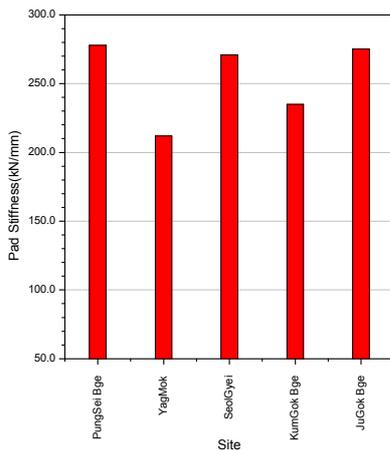


그림 2. 각 측정개소에 대한 패드강성

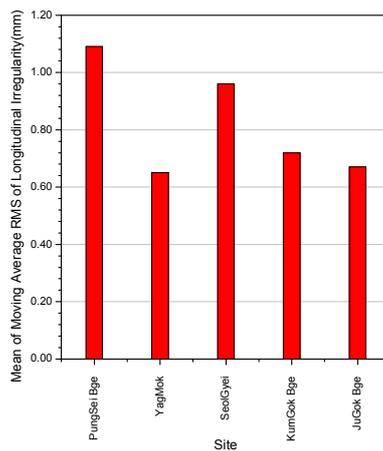


그림 3. 면맞춤의 이동 평균 실효치의 평균값

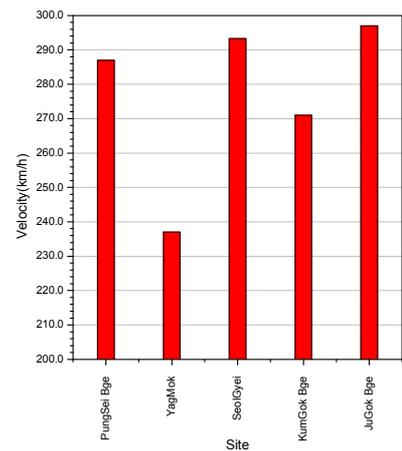


그림 4. 각 측정개소 주행속도

나. 궤도틀림

각 측정지점을 중심으로 좌·우 150m씩 총 300m 길이에 대해 EM120에 의해서 측정된 궤도틀림 데이터 중 연직가속도와 가장 상관관계가 큰 면맞춤(longitudinal irregularity)을 고려하였다. 면맞춤을 정량화 하기 위하여 이동 평균 실효치(moving average RMS)를 계산하였으며, 이동 평균 실효치의 구간 평균값을 구간 대표값으로 하였다(그림 3). 윈도우 길이 L은 200m를 적용하였으며, 이를 0.25m 씩 이동하였다.

다. 주행속도

각 측정개소에 대해서 10회 이상 가속도를 측정하였다. 각각 측정시 차량의 주행속도를 전체 측정횟수에 대한 평균값을 그 개소의 대표값으로 하여 그림 4에 나타내었다. 약목구간에서는 평균 237km/h, 그 외 개소에서는 270~300km/h로 나타났다.

라. 레일요철

각 측정개소에 대해서 측정지점을 중심으로 총 100m 구간에 대해서 레일요철을 측정하였다. 측정장비는 TecnoGamma사의 Techoline을 사용하였다. 레일요철은 EN13231-3 Part3: Acceptance of rail

grinding, milling and planning work in track에서 제시하고 있는 파장대역별로 레도틀립과 같이 이동 평균 실효치를 이용하여 정량화 하였다. 각각의 파장대역 및 윈도우 길이는 다음과 같다.

표 3. 파장대역과 윈도우 길이

파장대역(mm)	10 ~ 30	30 ~ 100	100 ~ 300	300 ~ 1,000
윈도우 길이 L(m)	0.15	0.5	1.5	5

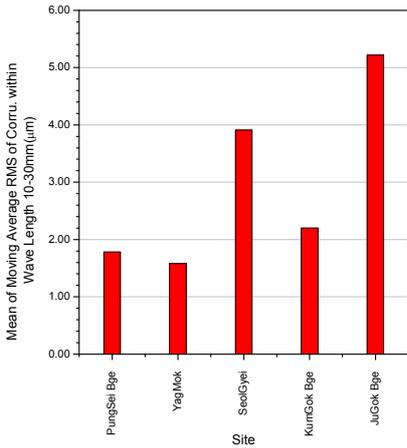


그림 5. 레일요철(10~30μm)의 이동 평균 실효치 평균

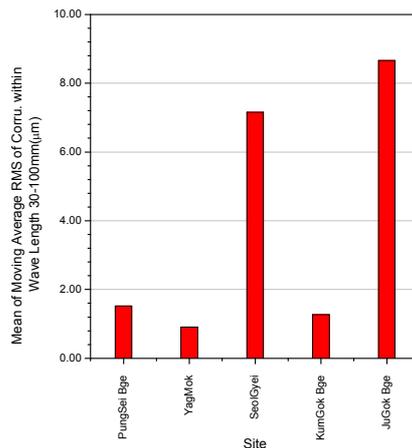


그림 6. 레일요철(30~100μm)의 이동 평균 실효치 평균

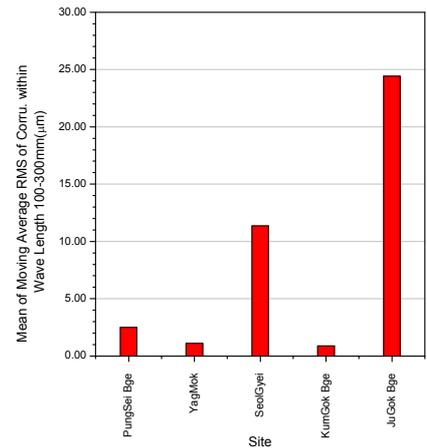


그림 7. 레일요철(100~300μm)의 이동 평균 실효치 평균

2.3 측정결과 및 분석

가. 상관계수

레도 각 부의 진동가속도는 각 측정개소에 대해서 상업운행 속도로 운행하는 KTX를 대상으로 10회 이상 측정된 데이터들의 실효치를 평균하여 각 개소에 대한 대표값으로 나타내었다(그림 9).

각 가속도 실효치와 이의 영향 인자들과의 상관계수(correlation coefficient, R)를 분석하기 위하여 1차 선형회귀분석을 실시하였다. 상관계수 R이 1 또는 -1에 가까울수록 두 변수의 연관성이 크다는 것을 의미한다. 민감도(sensitivity)는 1차 선형회귀식의 기울기로 고려할 수 있다. 상관계수는 무차원이기 때문에 인자들과의 상대비교를 하므로써 상관관계가 큰 인자를 찾아내는 것은 의미가 있다. 그러나 민감도는 인자의 변화량에 대한 가속도 실효치의 변화량으로만 이해되어야 하며 각각의 인자들의 물리량이 서로 다르기 때문에 인자들 간에 상대비교는 의미가 없다. 그림 10과 그림 11은 양호침목과 뜯침목 구간에서의 각 인자들에 대한 1차 선형회귀분석에 의한 상관계수를 정리한 것이다.

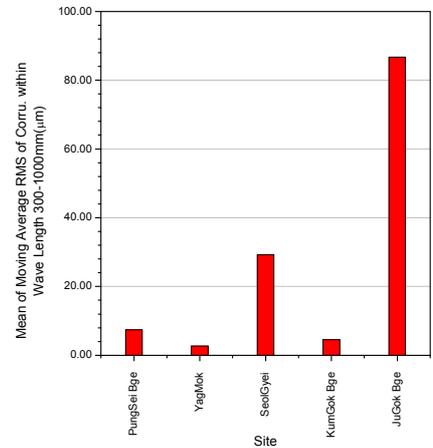
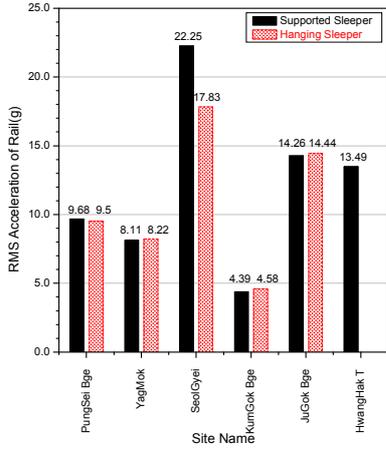


그림 8. 레일요철(300~1,000μm)의 이동 평균 실효치 평균

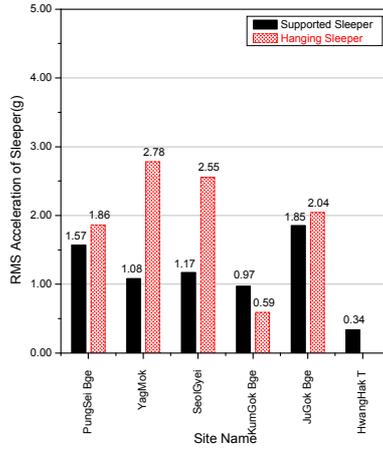
○ 레일

레일의 진동가속도는 레일 표면의 요철, 패드강성, 속도의 순서로 상관관계가 크게 나타났으며, 레도틀립의 상관계수는 가장 작은 것으로 분석되었다. 레일 표면 요철의 파장성분 중 단파장성분의 상관관계가 큰 것으로 나타났다. 그림 9 (a)에서 레일 진동가속도 실효치는 양호침목과 뜯침목 구간에서 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 이는 레일의 진동은 침목의 도상자갈에 대한 밀착상태에 영향을 거의 받지 않는다는 것을 의미한다. 따라서 레일의 진동을 저감을 위해서는 우선적으로 레일 표면의 요철을 양호

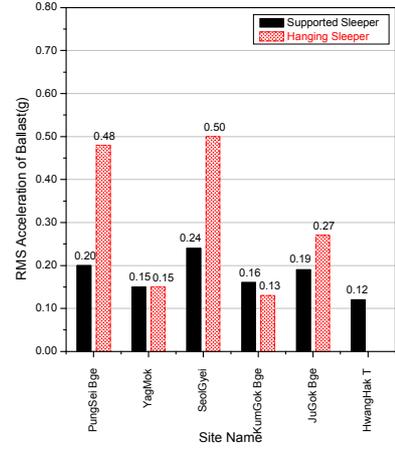
하계 유지하여야 할 것이다.



(a) 레일

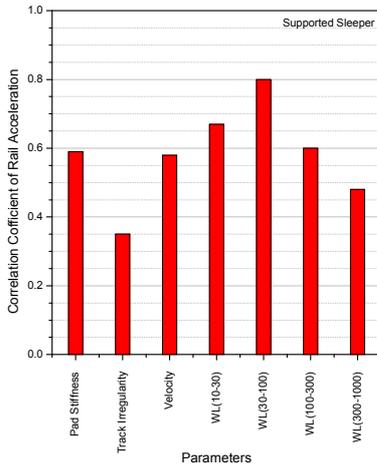


(b) 침목

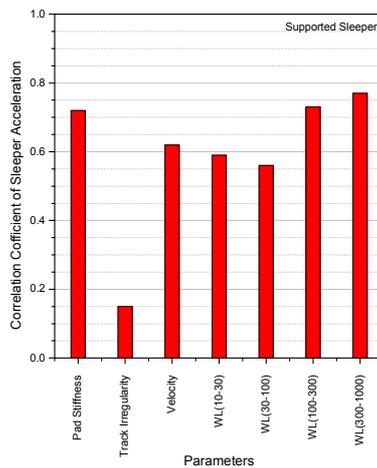


(c) 도상자갈

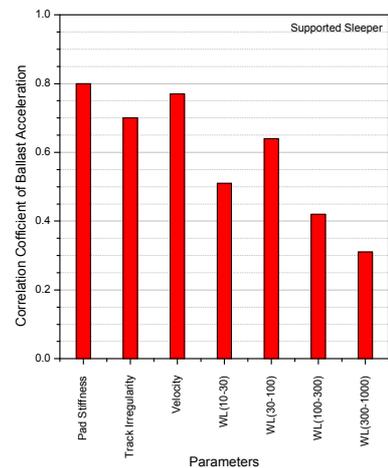
그림 9. 연직가속도의 실효치(g)



(a) 레일

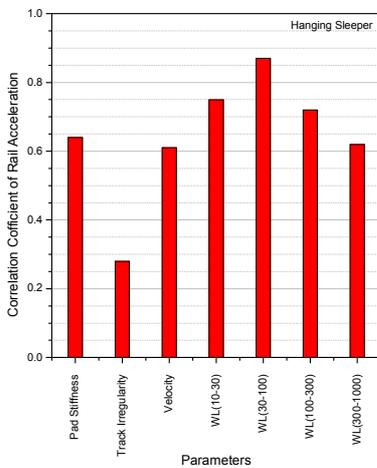


(b) 침목

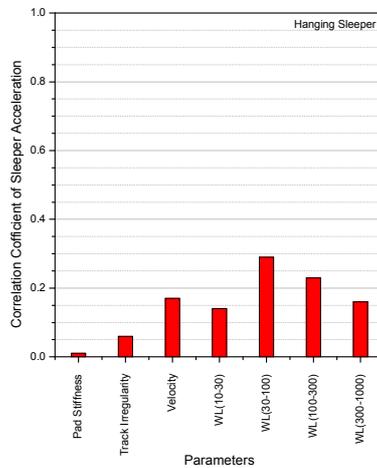


(c) 도상자갈

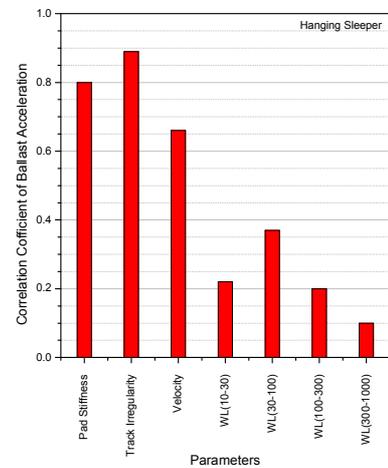
그림 10. 양호침목 구간에서 각 영향인자에 대한 궤도 각 부 가속도 실효치 상관계수



(a) 레일



(b) 침목



(c) 도상자갈

그림 11. 뜬침목 구간에서 각 영향인자에 대한 궤도 각 부 가속도 실효치 상관계수

○ 침목

그림 9 (b)에서 양호침목과 뜬침목구간의 침목 가속도의 차가 매우 크다는 것을 알 수 있다. 이는 침목 가속도는 침목의 도상자갈에 밀착상태에 매우 큰 영향을 받는다는 것을 의미한다. 침목에서는 레일 표면요철의 장파장 성분과 레일 패드의 강성과 상관관계가 큰 것으로 나타났다. 따라서 침목가속도 저감을 위해서는 침목이 도상자갈에 양호하게 밀착되도록 하여야 하며, 패드의 강성을 적절하게 유지하는 것이 필요하다.

○ 도상자갈

도상자갈의 진동은 패드강성, 속도와 궤도틀림과 상관관계가 큰 것으로 나타났다. 레일 표면 요철과의 상관계수는 레일과 침목에 비해서 작은 것으로 나타났다. 이는 레일 요철에 의한 영향은 고주파 진동성분이기 때문에 진동이 전파되면서 소멸되는 것으로 이해할 수 있다. 따라서 도상자갈의 진동저감을 위해서는 패드강성과 속도를 적절히 관리하고 궤도틀림을 양호하게 유지하여야 할 것이다.

나. 1/3옥타브 분석

궤도 구성품 및 궤도 하부 구조물의 진동은 차량 주행 시 차륜/레일 인터페이스에 의하여 발생하게 된다. 진동의 발생원인은 크게 규칙적인 경우와 불규칙적인 경우로 나눌 수 있으며, 진동의 발생 원인에 따라 진동 주파수가 달라진다. 규칙적인 경우로는 열차의 대차(bogie)와 차륜이 레일의 특징점을 통과할 때 반복적으로 발생하는 대차통과(bogie passing)와 차륜통과(wheel passing), 그리고 차륜이 레일 지지점을 통과할 때 발생하는 침목통과(sleeper passing) 등에 의한 것을 고려할 수 있다. 불규칙적인 경우는 바퀴와 레일의 마모 및 레일 표면의 요철에 의한 것이 있다. 이들 각 주파수 성분의 크기는 열차 속도에 따라 그림 12와 같이 나타난다. 240~300km/h의 속도로 주행 할 때 대차 간격 18.7m에 대한 대차통과 주파수는 대략 3.6~4.5Hz, 차륜 간격 3m에 대한 차륜통과 주파수는 22.2~27.8Hz, 침목간격 0.625m에 대한 침목통과 주파수는 약 106.7~138.9Hz의 범위에 있다. 레일표면의 불규칙성에 기인하는 진동은 상대적으로 규칙적인 경우보다 파장이 작기 때문에 고주파 영역에 분포한다.

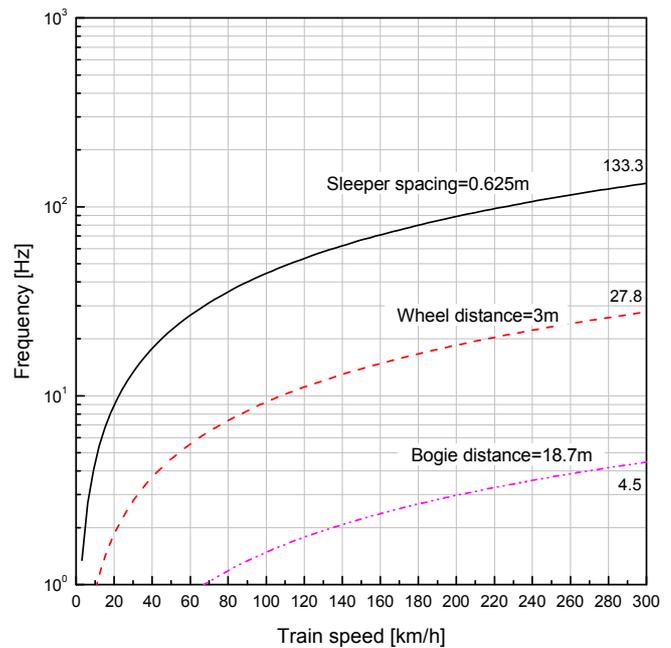


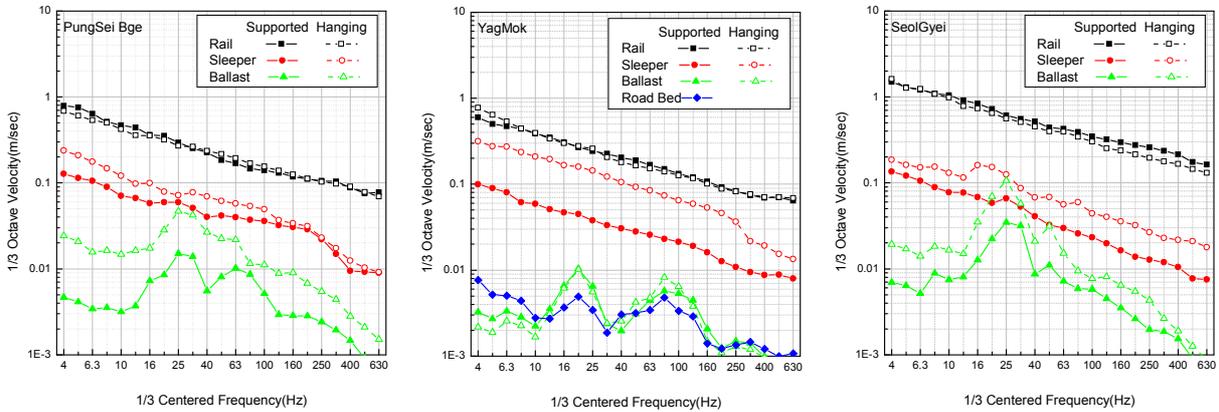
그림 12. 궤도의 진동원인에 따른 주파수 성분

궤도 각 부의 주파수 특성을 분석하기 위하여 가속도에 대한 PSD(power spectrum density)를 속도에 대한 PSD로 변환하여 1/3 옥타브해석을 수행하였다. 1/3 옥타브해석에서는 실효치에서 전술한 바와 같이 상업운행 속도로 운행하는 KTX를 대상으로 10회 이상 측정된 데이터들의 PSD를 평균하여 각 개소에 대한 대표값으로 나타내었다(그림 13). 그림 14는 독일 ICE(V=250km/h)에 대한 자갈 궤도에서의 도상의 진동속도 1/3 옥타브이다.

레일과 침목의 진동에서는 탁월주파수 대역이 분명하게 나타나지 않고 있다. 그러나 도상에서는 탁월주파수 대역이 중심주파수 20~25Hz 대역과 63~80Hz 대역에서 나타났으며, 이 중 20~25Hz 대역은 궤도의 진동발생요인에서 차륜통과주파수와 잘 일치하고 있다. 궤도틀림이 상대적으로 크게 발생한 개소인 풍세교량과 설계구간에서는 궤도틀림이 작게 발생한 개소인 약목, 금곡고가와 주곡고가에 비해서 뜬침목에서의 도상진동이 양호침목에 비해 매우 크게 발생하는 것으로 나타났다. 궤도틀림이 양호한 개소에서는 이의 차이가 거의 나타나지 않았다.

독일 ICE(V=250km/h)에 대한 자갈도상궤도에서의 도상자갈의 진동속도는 패드강성이 500kN/mm인 경우에는 최대 8mm/sec, 60kN/mm에서는 4mm/sec가 나타났다. 또한 고탄성 패드($c_f=27kN/mm$)를

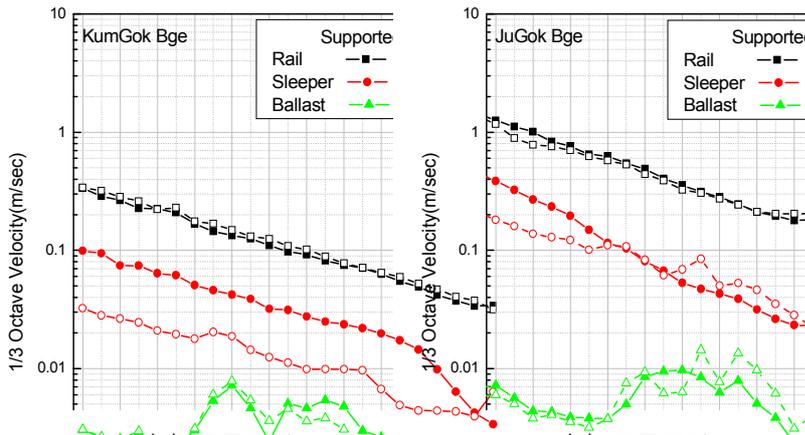
사용한 경우에는 3mm/sec로 나타났다. 경부고속철도 1단계 구간에서 측정된 도상의 진동속도는 궤도 틀림이 양호한 구간에서는 8~10mm/sec 정도를 보이고 있으나, 불량한 개소에서는 11mm/sec 이상의 값을 보이고 있다. 독일의 경우 패드강성이 500kN/mm를 적용한 고속선의 경우 도상자갈의 마모와 같은 열화가 빠르게 진행되어 이의 문제점을 해결하기 위해 고탄성 패드를 사용하였다는 점을 향후 유지 보수 측면에서 고려하여야 할 것이다.



(a) 풍세교

(b) 약목

(c) 설계



(d) 금곡고가

(e) 주곡고가

그림 13. 궤도 각 부 진동속도 1/3 옥타브

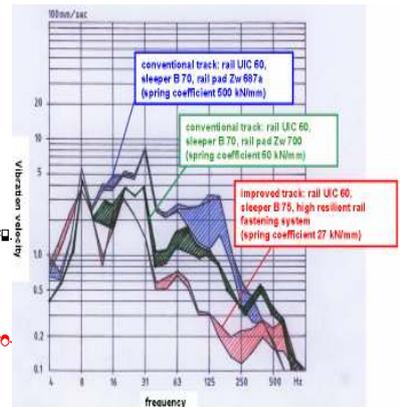


그림 14. 독일 ICE(V=250km/h) 도상자갈 속도

3. 결론

궤도각부의 진동에 영향을 미치는 인자들은 크게 차량에 의한 요인과 궤도에 의한 요인으로 구분할 수 있다. 차량에 의한 요인으로는 축중, 차륜담면 요철, 차량의 주행속도 등을 고려할 수 있고, 궤도에 의한 요인으로는 레일요철, 궤도틀림, 패드강성, 도상자갈, 노반의 종류 등을 고려할 수 있다. 본 보고서에서는 경부고속철도 1단계 구간에서 풍세교 외 4개소에서 측정된 궤도 각 부의 가속도를 위의 인자들 중 패드강성, 궤도틀림, 차량주행속도와 레일 표면 요철에 대한 상관관계를 분석하였다. 또한 주파수 분석을 통하여 궤도 각 부 특히, 자갈도상에 대한 탁월주파수 대역을 분석하였으며, 분석결과는 다음과 같다.

- 레일의 진동을 저감을 위해서는 우선적으로 레일 표면의 요철을 양호하게 유지하여야 함
- 침목가속도 저감을 위해서는 침목이 도상자갈에 양호하게 밀착되도록 하여야 하며, 패드의 강성을 적절하게 유지하는 것이 필요함
- 자갈도상의 진동저감을 위해서는 패드강성과 속도를 적절히 관리하고 궤도틀림을 양호하게 유지하여야 함
- 레일과 침목의 진동에서는 탁월주파수 대역이 분명하게 나타나지 않고 있음. 그러나 도상에서는 탁월주파수 대역이 중심주파수 20~25Hz 대역과 63~80Hz 대역에서 나타났으며, 이중 20~25Hz 대역은 궤도의 진

동발생요인에서 차륜통과주파수와 잘 일치하고 있음

본 연구결과에서 경부고속철도 1단계 구간에서 자갈궤도 5개소에 대해 측정된 데이터들을 분석한 것이다. 자갈궤도는 특히 측정개소에 대한 균질성을 확보하기 어렵기 때문에 인접구간이라 할지라도 진동 결과가 상이할 수 있다. 따라서 향후 추가적인 측정이 보완되어 본 연구에 대한 신뢰도를 향상시켜야 할 것이다.

참고문헌

1. EN13231-3 Railway Applications-Track-Acceptance of works, Part3: Acceptance of rail grinding, milling and planing work in track(2003)
2. Bernhard Lichtberger(2005), "Track Compendium", Eurail Press
3. D.E. Newland(1993), "An Introduction to Random Vibrations, Spectral & Wavelet Analysis", Longman
4. G. Leykauf(2005), "The Journey of Ballastless Track", European Railway Review, Issues 3, pp. 59 ~ 68