

# 경부고속선 자갈궤도의 진동에 영향을 미치는 인자에 대한 분석

## Analysis on Factors Affecting the Vibration of the Ballast Track in Kyeong-Bu High Speed Line

김만철†  
Man-Cheol Kim

**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 Kyeong-Bu high-speed line. The RMS values of the measured data are calculated and the pad stiffness, the longitudinal irregularity, running velocity and the corrugation, are considered as the parameters in the viewpoint of track. By using the linear regression, the correlation coefficient is calculated to analyse the relationship. Also, the 1/3 Octave analysis is calculated to analyse the dominant frequency band of the vibrations of the track components.

**Keywords** : ballasted track, Vibration, RMS, correlation coefficient, 1/3 Octave

**요 지** 본 논문에서는 궤도 각 부의 가속도 특성과 가속도에 영향을 미치는 인자들과의 상관관계를 분석하였다. 이를 위해서 경부고속철도 자갈궤도에 대해서 레일, 침목, 자갈도상의 진동가속도를 측정하였다. 측정된 가속도에 대해서 실효치(RMS)를 분석하였으며 궤도의 진동에 영향을 미치는 매개요소로 패드강성, 고저틀림, 주행속도 및 요철을 고려하였다. 진동가속도와 매개요소들과의 상관관계 분석을 위해서 선형회귀식을 적용하였으며, 이를 통해서 상관계수를 도출하였다. 또한 가속도의 주파수 특성을 분석하기 위하여 1/3 옥타브 해석을 실시하였다.

**주 요 어** : 자갈도상궤도, 진동, 실효치, 상관계수, 1/3 옥타브

### 1. 서 론

궤도 각 부 즉, 레일과 침목, 도상자갈의 진동은 궤도틀림(track irregularity) 및 전동음(rolling noise), 구조물 소음(structure borne noise) 등과 밀접한 관계를 가지고 있다. Sato(1997)의 궤도파괴이론에 따르면 열차의 반복재하에 의한 도상자갈의 침하는 도상입자간의 간격이 좁아지면서 발생하는 초기 침하와 도상입자가 측면으로 이동하면서 발생하는 유동과정에 의한 침하로 구분하고 있다(그림 1). 초기침하는 압밀에 의한 것으로 가능한 한 빨리 끝날 수 있도록 다짐작업을 수행하여야 한다. 유동과정에 의한 침하는 열차주행에 의한 궤도파괴와 직접적인 관련이 있으며, 대체로 그

림 1과 같이 도상자갈의 가속도와 침목하면에서 도상에 작용하는 압력에 비례하는 것으로 나타나고 있다.

본 논문에서는 경부고속철도 풍세교외 4개소에 대해 상기와 같이 궤도파괴에 직접적으로 영향을 미치는 도상자갈의 가속도 및 레일과 침목의 가속도를 측정하고, 이에 영향을 미치는 인자들에 대한 상관관계(correlation)를 분석하므로써 궤도 설계 및 유지보수에 활용할 수 있는 결과를 도출하고자 하였다. 또한 주파수해석을 통하여 궤도 각 부의 진동속도에 대한 탁월주파수 대역을 분석하여 진동저감 대책 수립을 위한 기초자료를 확보하는 것을 연구목적으로 하였다.

본 논문에서는 궤도 각 부의 진동에 영향을 미치는 인자들로 체결시스템의 패드강성, 고저틀림, 차량의 주행속도와 레일요철을 고려하였다. 측정개소는 경부고속철도 1단계 구간에 부설된 체결시스템, 노반 및 궤도 상태를 고려하여 표 1과 같이 선정하였다.

† 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원, 궤도토목연구본부 궤도구조연구팀 책임연구원  
E-mail : kimmc@krii.re.kr  
TEL : (031)460-5321 FAX : (031)460-5814

Table 1. Measured Locations for Vibration Acceleration

노반	궤도형식	체결시스템형식	측정위치
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)

Table 2. Accelerometers

구분	사양
레일	Model-353B03, sensitivity-10mv/g, capacity-500g Measuring frequency range-1~7,000Hz, 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

## 2. 진동가속도 측정

### 2.1 개요

각 측정개소별로 침목의 도상자갈에 대한 밀착 상태를 파악하여 양호 구간과 뜬침목 구간에서 각각 진동가속도를 측정하였다. 궤도 각 부의 진동가속도 측정을 위하여 사용한 센서 현황은 표 2와 같다. sampling rate은 2kHz이다. 그림 2와 3은 궤도 각 부의 진동가속도 측정개요도 및 현장 측정사진이다.

궤도 각 부의 진동가속도는 각 개소에 대해서 상업운행 속도로 운행하는 KTX를 대상으로 10회 이상 측정하였다. KTX 주행시 각각 측정된 데이터들에 대한 실효치(RMS, root mean square)와 1/3 옥타브해석 결과를 전체 측정 횟수에 대한 평균값으로 하여 분석하였다. 진동가속도는 차륜의 상태 등에 대해서 매우 민감하게 반응하기 때문에 최대값을 측정 결과의 대표값으로 하는 것보다는 실효치 및 1/3 옥타브 해석결과의 평균값으로 하는 것이 더욱 신뢰성 있는 분석이라 판단된다.

### 2.2 궤도 각 부 진동가속도에 영향을 미치는 인자

#### 2.2.1 체결시스템 패드강성

각 개소에 부설된 체결시스템의 패드를 샘플링하여 KR 성능시방서 기준(2002)에 따라 측정된 패드강성을 그림 4에 나타내었다.

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

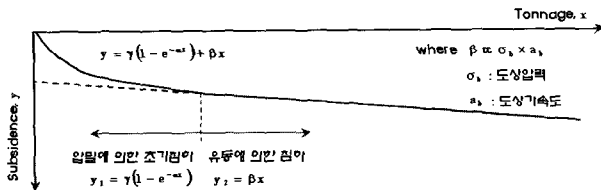


Figure 1. Dr. Sato's Track Deterioration Model

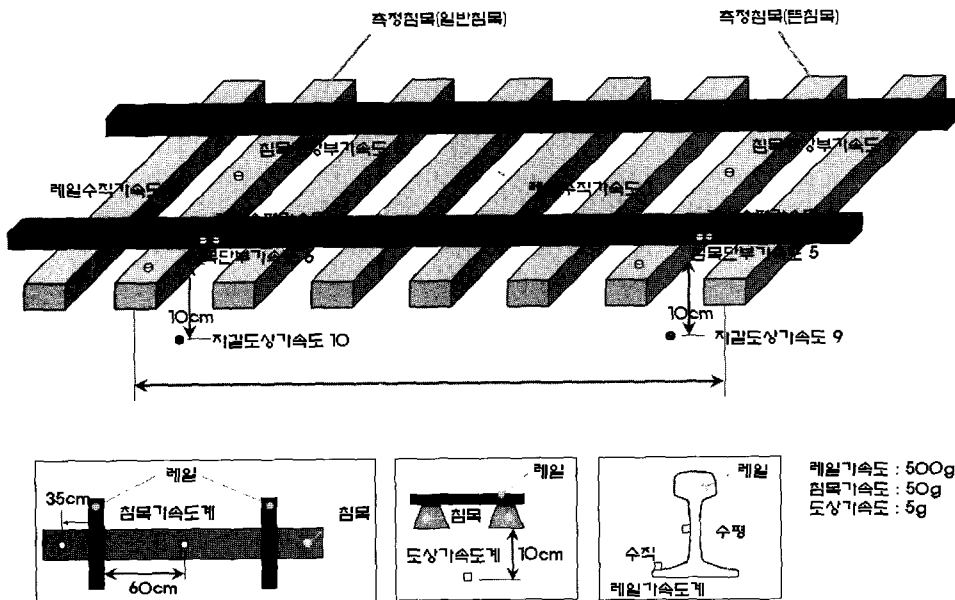


Figure 2. Schematic Drawing for Measurement of Track Components

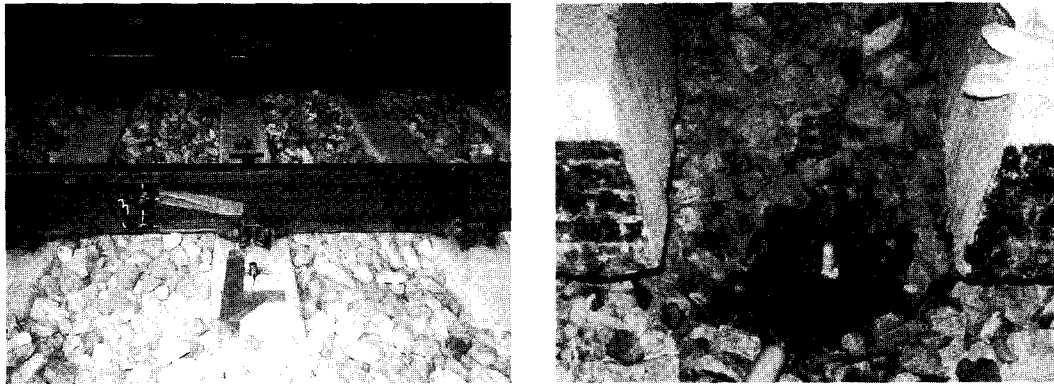


Figure 3. Measurement of Acceleration at Track Components and Roadbed

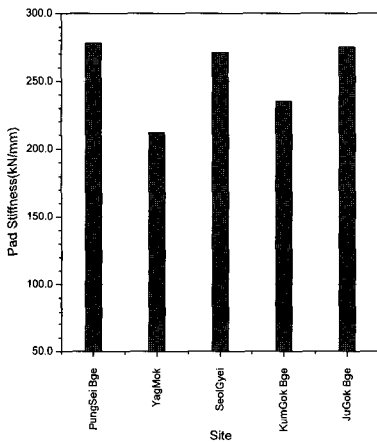


Figure 4. Pad Stiffness

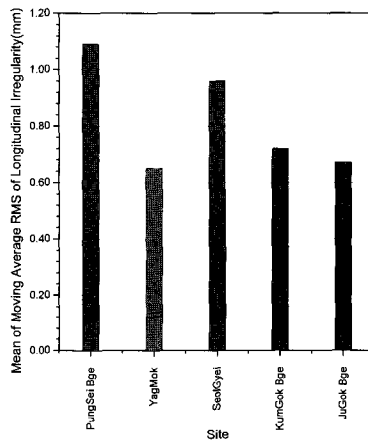


Figure 5. Average of Moving Average RMS of Longitudinal Irregularity

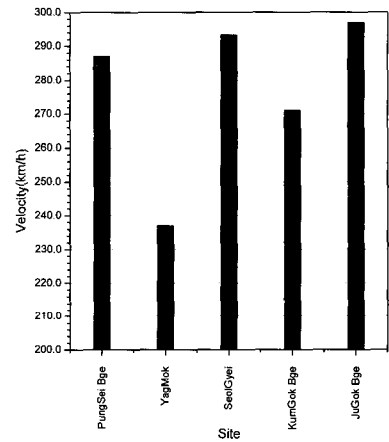


Figure 6. Running Speed

### 2.2.2 고저틀림

각 측정지점을 중심으로 좌·우 150m씩 총 300m 길이에 대해서 궤도틀림 데이터에서 연직가속도와 가장 직접적인 관계가 있는 고저틀림(longitudinal irregularity)을 고려하였다. 고저틀림을 정량화하기 위하여 식(2)에 윈도우 길이 L을 200m로 하고, 이를 0.25m씩 이동시키면서 이동 평균 실효치(moving average RMS)를 계산하였다. 개소별 대표값으로 이들 이동 평균 실효치의 평균값을 적용하였다(그림 5).

$$RMS(x,L) = \left( \frac{1}{L} \int_{x-\frac{L}{2}}^{x+\frac{L}{2}} y^2(x) dx \right)^{1/2} \quad (2)$$

### 2.2.3 주행속도

각 개소별로 10회 이상 진동가속도를 측정하였으며, 주행속도의 평균값을 그 개소의 대표값으로 하여 그림 6에 나타내었다. 약목구간에서는 평균 237km/h, 그 외 개소에서는 270~300km/h로 나타났다.

Table 3. Wavelengths and Window Lengths

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

### 2.2.4 레일요철

각 개소에 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 track(2003)에서 제시하고 있는 파장대역별로 고저틀림과 같이 이동 평균 실효치를 이용하여 정량화 하였다(그림 7). 각각의 파장대역 및 윈도우 길이는 표 3과 같다. 특정 파장대역 ( $\lambda_1, \lambda_2$ )에 대한 실효치는 먼저 원형 데이터를 특정 파장대역에 대해 필터링한 후 식 (2)를 적용하여 계산할 수 있다.

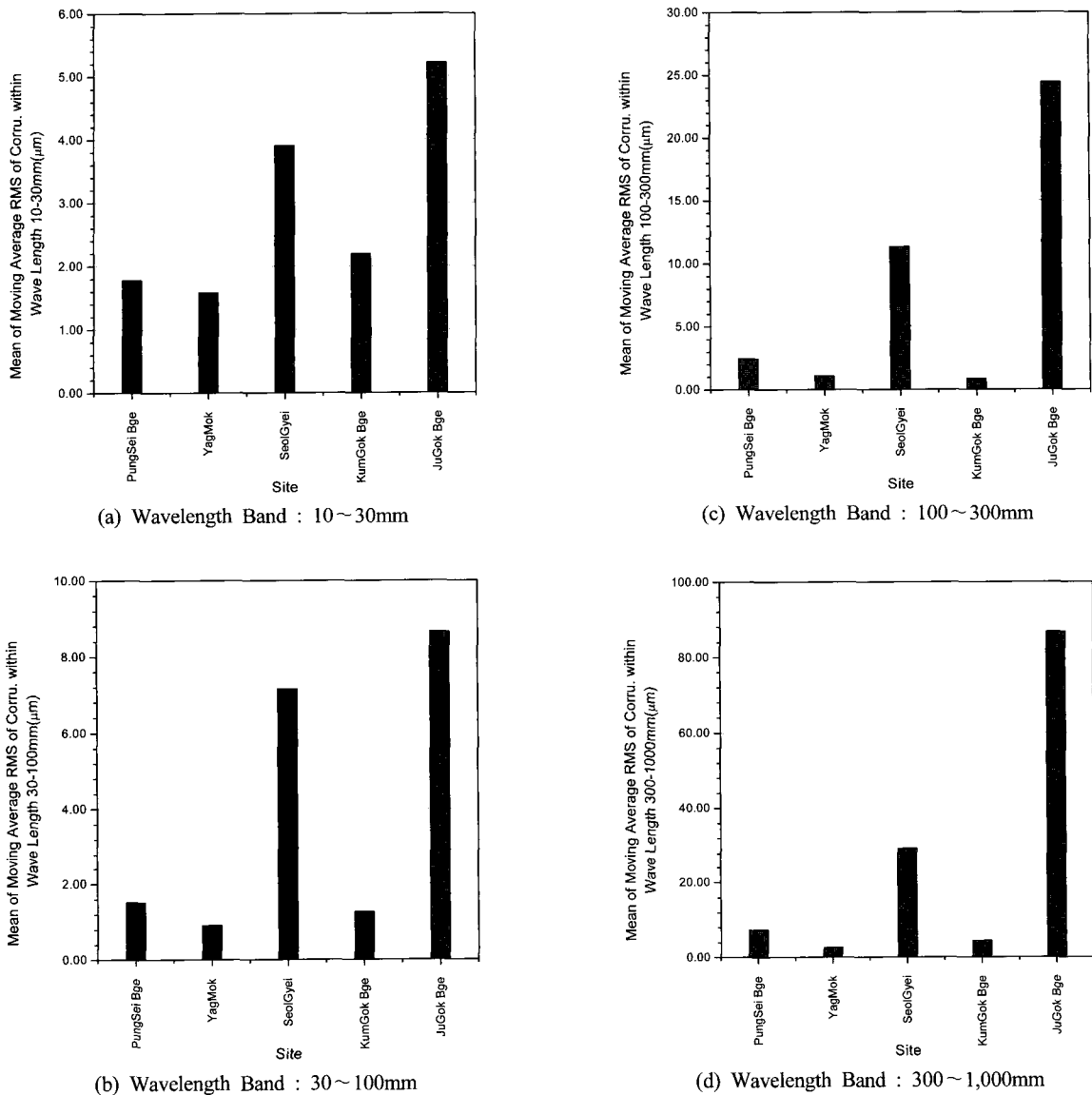


Figure 7. Average of Moving Average RMS of Corrugation

### 2.3 상관계수 분석

#### 2.3.1 개요

궤도 각 부의 진동가속도는 각 개소에 대해서 상업운행 속도로 운행하는 KTX를 대상으로 10회 이상 측정된 데이터들의 실효치를 평균하여 각 개소에 대한 대표값으로 나타내었다(그림 8).

각 가속도 실효치와 이의 영향 인자들과의 상관계수(correlation coefficient, R)(Newland, 1993)를 분석하기 위하여 1차 선형회귀분석을 실시하였다. 상관계수가 1 또는 -1에 가까울수록 두 변수의 연관성이 크다는 것을 의미한다. 민감도(sensitivity)는 1차 선형회귀식의 기울기로 고려할 수 있다. 상관계수는 무차원이기 때문에 인자들과의 상대비교를 하

므로 상관관계가 큰 인자를 찾아내는 것은 의미가 있다. 그림 9와 10은 양호침목과 뜬침목 구간에서의 각 인자들에 대한 1차 선형회귀분석에 의한 상관계수를 정리한 것이다.

#### 2.3.2 레일

그림 8(a)에서 레일 진동가속도 실효치는 양호침목과 뜬침목 구간에서 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 이는 레일의 진동은 침목의 도상자갈에 대한 밀착상태에 영향을 거의 받지 않는다는 것을 의미한다. 그림 9(a)와 10(a)에서 레일의 진동가속도는 레일 표면의 요철, 패드강성, 속도의 순서로 상관관계가 크게 나타났으며, 고저틀립의 상관계수가 가장 작은 것으로 분석되었다. 레일 표면 요철의 파장성분 중 단파장성분

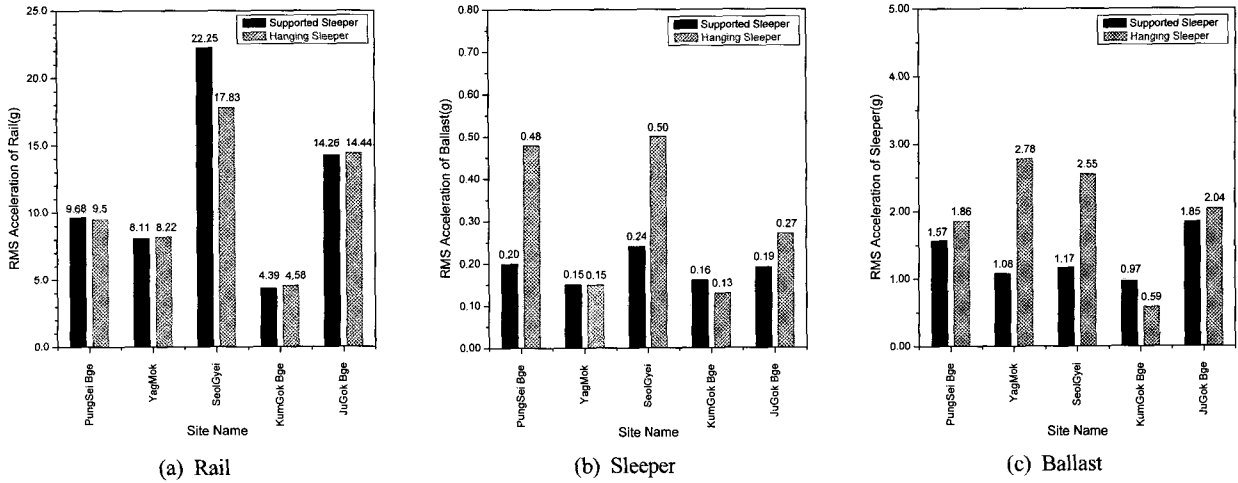


Figure 8. RMS of Vertical Acceleration(g)

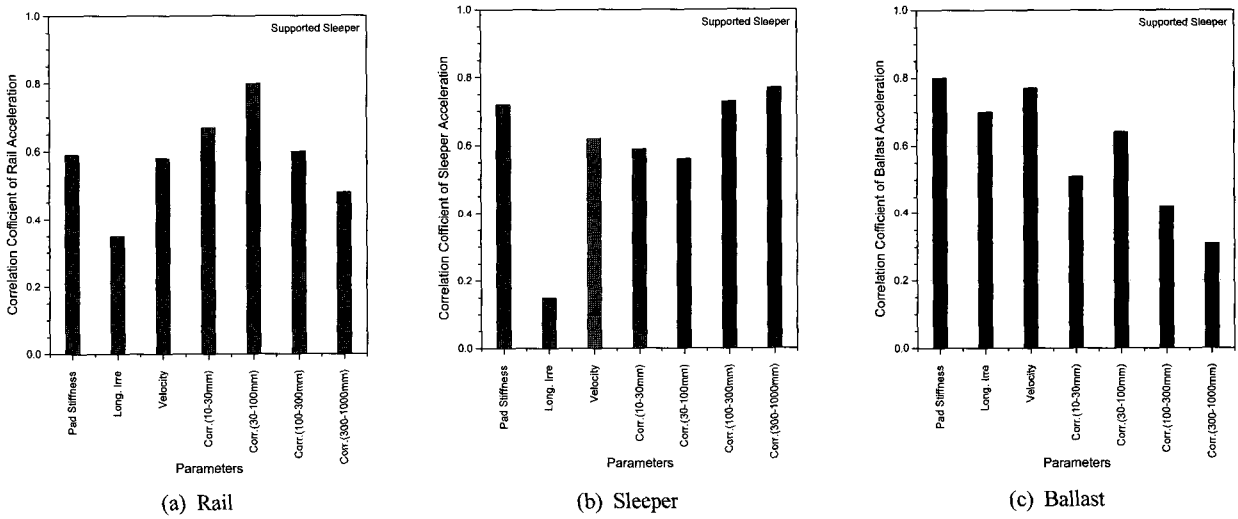


Figure 9. Acceleration RMS Correlation Coefficient of Each Part of Track for Each Affecting Factor in Supported Sleeper Section

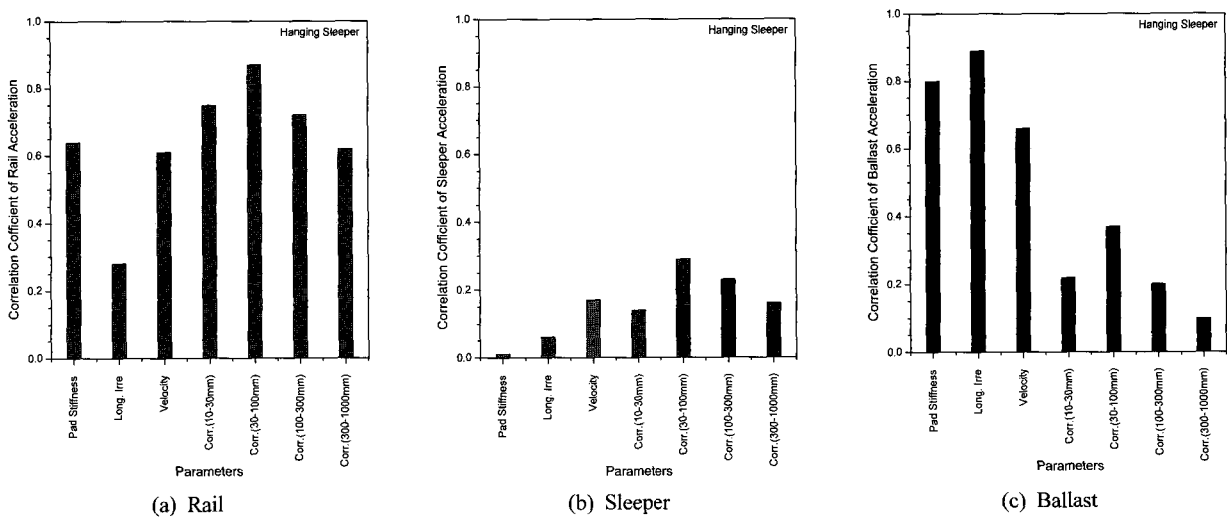


Figure 10. Acceleration RMS Correlation Coefficient of Each Part of Track for Each Affecting Factor in Hanging Sleeper Section

(10~100mm)의 상관관계가 가장 큰 것으로 나타났다. 따라서 레일의 진동 저감을 위해서는 우선적으로 레일 표면의 요철을 양호하게 유지하여야 할 것이다.

### 2.3.3 침목

그림 8(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. 그림 9(b)에서 침목의 가속도는 레일 표면요철의 장파장 성분(100~1,000mm)과 레일 패드의 강성과 상관관계가 큰 것으로 나타났다. 따라서 침목가속도 저감을 위해서는 침목이 도상자갈에 양호하게 밀착되도록 하여야 하며, 장파장 성분의 요철과 패드의 강성을 적절하게 유지하는 것이 필요하다.

### 2.3.4 도상자갈

그림 5에서 고저틀림이 불량한 개소는 풍세교, 설계구간, 금곡고가, 주곡고가, 약목구간의 순으로 나타나고 있다. 그림 8(c)에서 고저틀림이 불량한 개소일수록 뜬침목 구간에서 측정된 도상 가속도가 양호침목 구간의 도상 가속도에 비해서 매우 크게 발생한다는 것을 알 수 있다. 그러나 고저틀림이 양호한 개소에서는 그 차이가 미비한 것으로 나타났다. 그림 9(c)에서와 같이 양호침목 구간에서는 패드강성, 속도, 고저틀림의 순으로 상관관계가 큰 것으로 나타났으나, 뜬침목 구간인 그림 10(c)에서는 고저틀림, 패드강성, 속도의 순으로 상관관계가 큰 것으로 나타났다. 레일 표면 요철과의 상관계수는 레일과 침목에 비해서 작은 것을 또한 알 수 있다. 이는 레일 요철에 의한 영향은 고주파 진동성분이기 때문에 진동이 전파되면서 소멸되는 것으로 이해할 수 있다. 따라서 도상자갈의 진동저감을 위해서는 우선적으로 고저틀림을 양호하게 유지한 상태에서 패드강성과 속도를 적절히 유지하는 것이 필요하다.

## 2.4 1/3 옥타브 분석

궤도 구성품 및 궤도 하부 구조물의 진동은 차량 주행 시 차륜/레일 인터페이스에 의하여 발생하게 된다. 진동의 발생 원인은 크게 규칙적인 경우와 불규칙적인 경우로 나눌 수 있으며, 진동의 발생 원인에 따라 진동 주파수가 달라진다. 규칙적인 경우에는 열차의 대차(bogie)와 차륜이 레일의 특정 점을 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

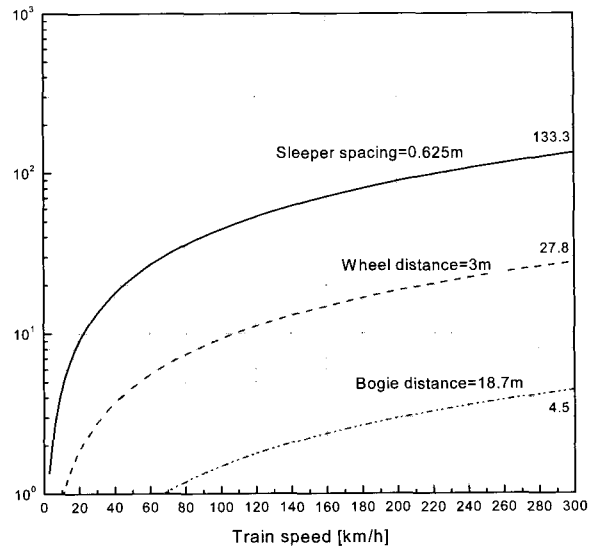


Figure 11. Frequency Component by Causes of Vibration of Track

레일 표면의 요철에 의한 것이 있다. 이들 각 주파수 성분의 크기는 열차 속도에 따라 그림 11과 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.

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 실험치에서 전술한 바와 같이 상업운행 속도로 운행하는 KTX를 대상으로 10회 이상 측정된 데이터들의 PSD를 평균하여 각 개소에 대한 대표값으로 나타내었다(그림 12). 그림 13은 독일 ICE(V=250km/h)에 대한 자갈궤도에서의 도상의 진동속도 1/3 옥타브이다(Leykauf, 2005).

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

독일 ICE(V=250km/h)에 대한 자갈도상궤도에서의 도상자

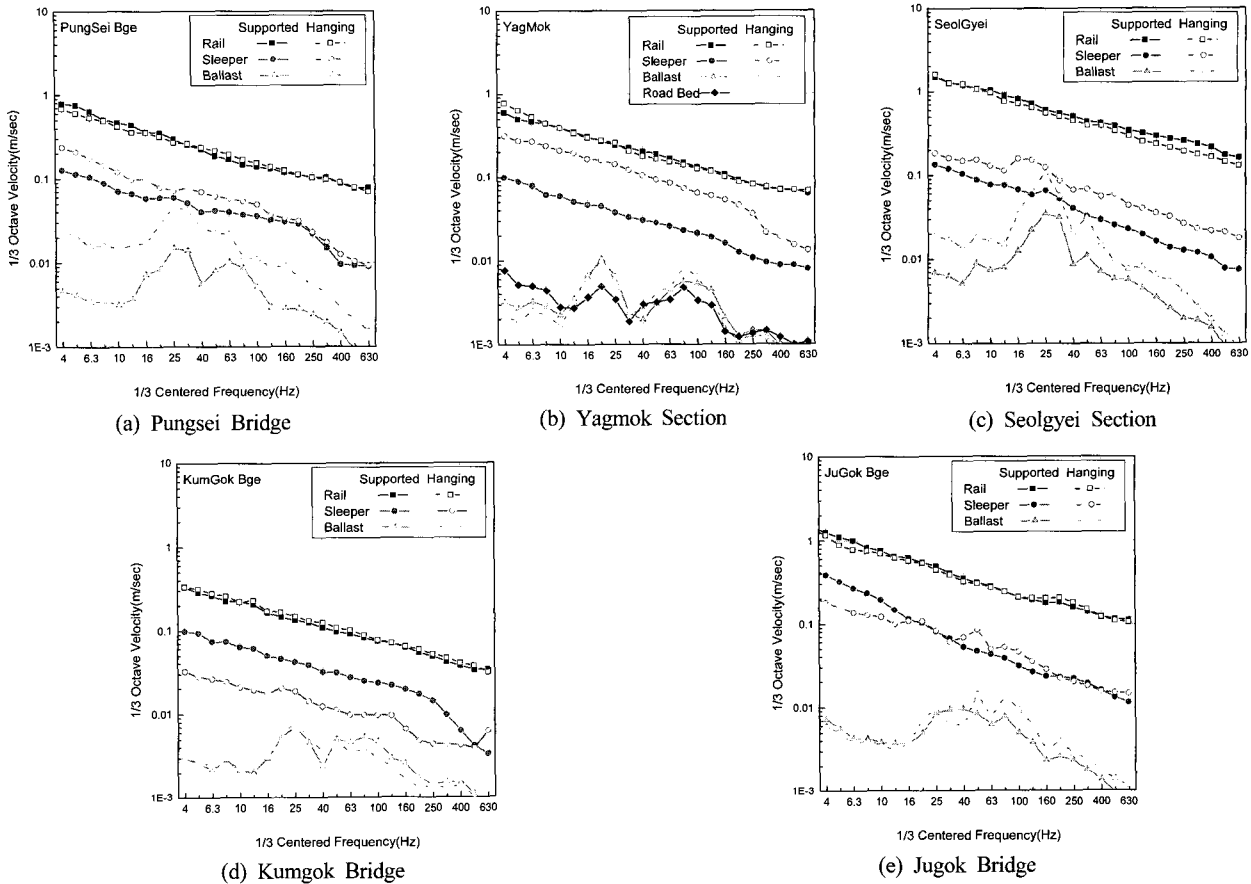


Figure 12. Vibration Speed 1/3 Octave of Each Track Component

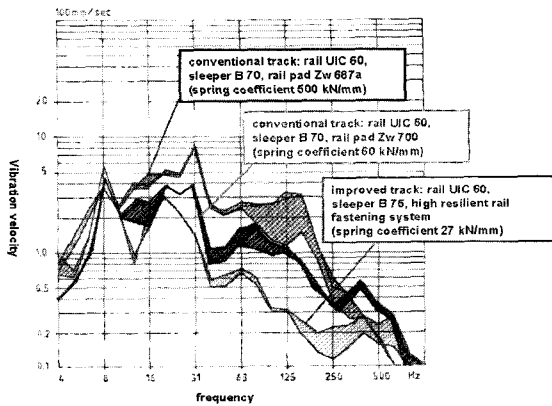


그림 13. Ballast Speed of ICE(V=250km/h) in Germany

갈의 진동속도는 패드강성이 500kN/mm인 경우에는 최대 8mm/sec, 60kN/mm에서는 4mm/sec가 나타났다. 또한 고탄성 패드( $c_f=27\text{kN/mm}$ )를 사용한 경우에는 3mm/sec로 나타났다. 경부고속철도 1단계 구간에서 측정된 도상의 진동속도는 고저틀림이 양호한 구간에서는 8~10mm/sec 정도를 보이고 있으나, 불량한 개소에서는 11mm/sec 이상의 값을 보이고 있다. 독일의 경우 패드강성이 500kN/mm를 적용한 고속

선의 경우 도상자갈의 마모와 같은 열화가 빠르게 진행되어 이의 문제점을 해결하기 위해 고탄성 패드(high resilient pad)를 사용하였다는 점을 향후 설계 및 유지보수 측면에서 고려하여야 할 것이다.

### 3. 결론

궤도 각 부의 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, 고저틀림, 패드강성, 도상자갈, 노반의 종류 등을 고려할 수 있다. 본 연구에서는 경부고속철도 1단계 구간에서 풍세교 외 4개소에서 측정된 궤도 각 부의 가속도를 위의 인자들 중 패드강성, 고저틀림, 차량주행속도와 레일 표면 요철에 대한 상관관계를 분석하였다. 또한 주파수 분석을 통하여 궤도 각 부 특히, 자갈도상에 대한 탁월주파수 대역을 분석하였으며, 이의 결과는 다음과 같다.

· 레일의 진동을 저감을 위해서는 우선적으로 레일 표면의 요

철을 양호하게 유지하여야 함

- 침목가속도 저감을 위해서는 침목이 도상자갈에 양호하게 밀착되도록 하여야 하며, 패드의 강성을 적절하게 유지하는 것이 필요함
- 자갈도상의 진동저감을 위해서는 우선적으로 고저틀림을 양호하게 유지하고 패드강성과 속도를 적절히 관리하여야 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 진동발생요인에서 차량 통과주파수와 잘 일치하고 있음

본 연구결과에서 경부고속철도 1단계 구간에서 자갈궤도 5개소에 대해 측정된 데이터들을 분석한 것이다. 자갈궤도는 특히 측정위치별 균질성을 확보하기 어렵기 때문에 인접구간이라 할지라도 진동결과가 상이할 수 있다. 따라서 향후 추가

적인 측정이 보완되어 본 연구에 대한 신뢰도를 향상시켜야 할 것이다.

### 참고문헌

1. 佐藤吉彦 (1997) 新軌道力學. 鐵道現業社.
2. CEN (2003) EN13231-3 *Railway Applications-Track-Acceptance of works, Part3: Acceptance of rail grinding, milling and planing work in track.*
3. KHRC (2002) *Fastening System Performance Specification.*
4. Leykauf G. (2005) The Journey of Ballastless Track. *European Railway Review*, Issues 3, pp.59~68.
5. Newland, D.E. (1993) *An Introduction to Random Vibrations, Spectral & Wavelet Analysis.* Longman.

(2007년 10월 10일 논문접수, 2007년 10월 17일 심사완료)

### 부록 : 선형회귀분석 결과

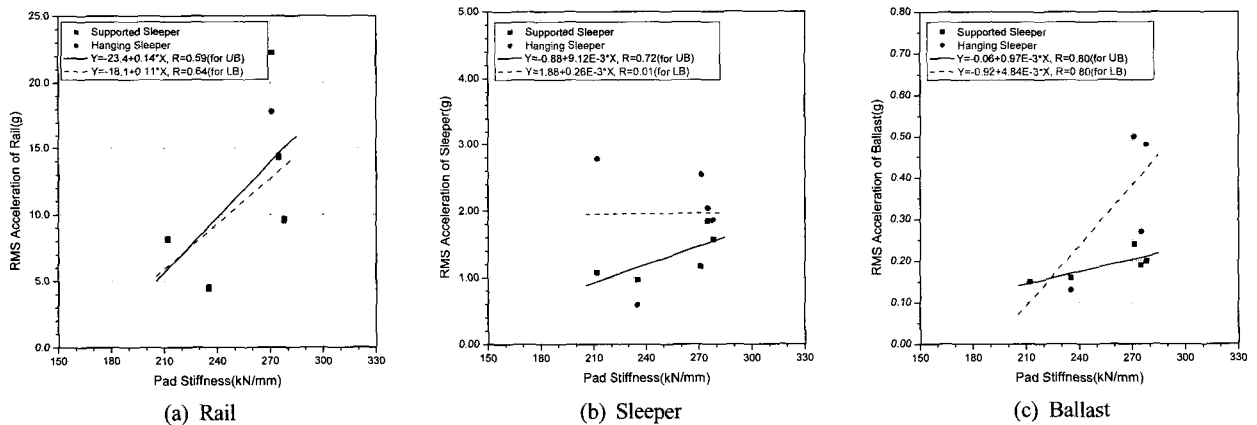


Figure A.1. Frist Linear Regression Analysis on Acceleration RMS of Each Track Component and Pad Stiffness

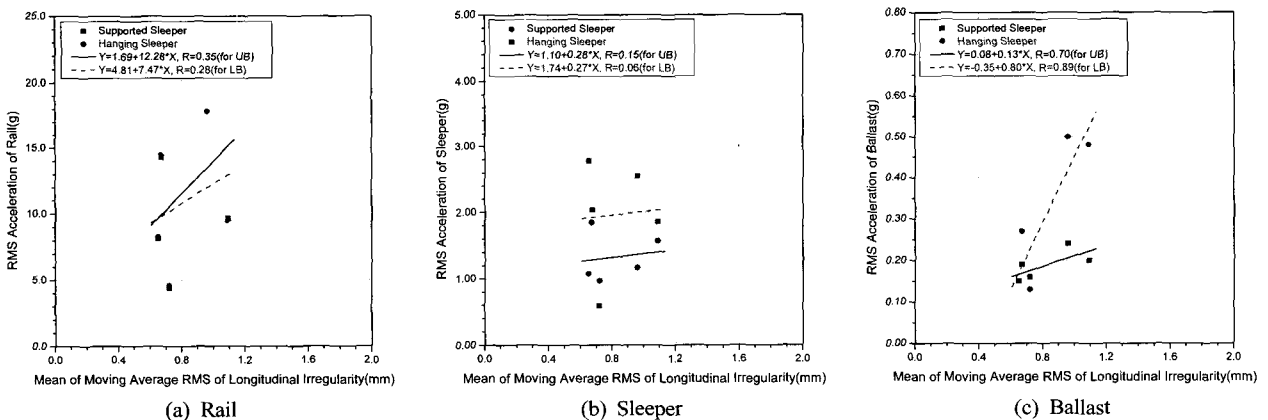


Figure A.2. Frist Linear Regression Analysis on Acceleration RMS of Each Track Component and Longitudinal Irregularity



부록 : 선형회귀분석 결과

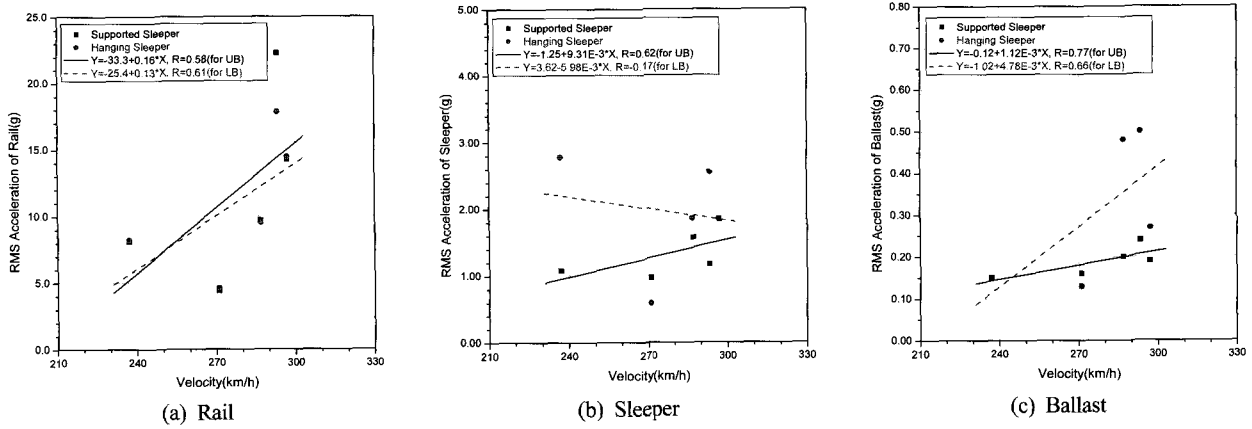


Figure A.3. Frist Linear Regression Analysis on Acceleration RMS of Each Track Component and Running Speed

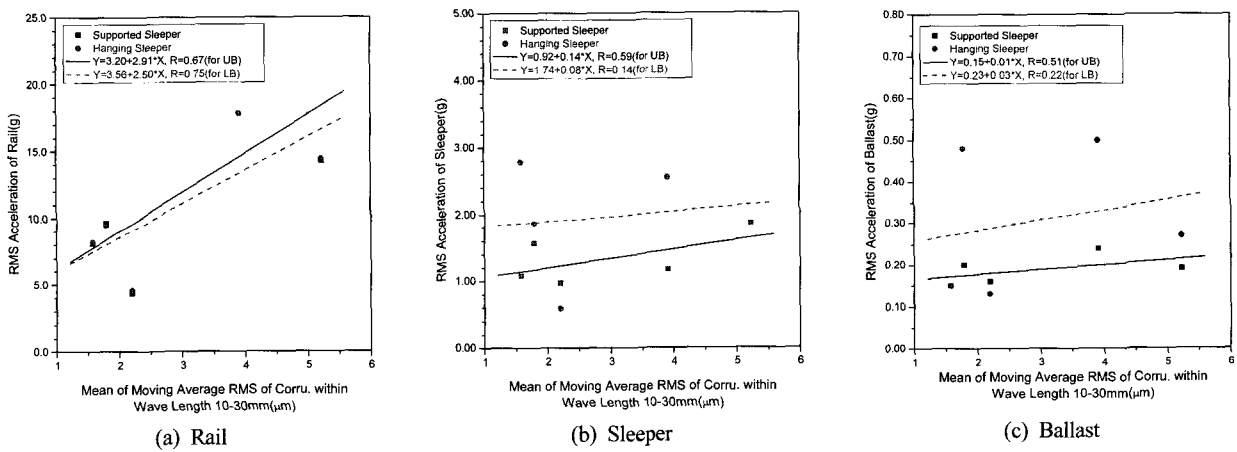


Figure A.4. Frist Linear Regression Analysis on Acceleration RMS of Each Track Component and Corrugation(10~30mm)

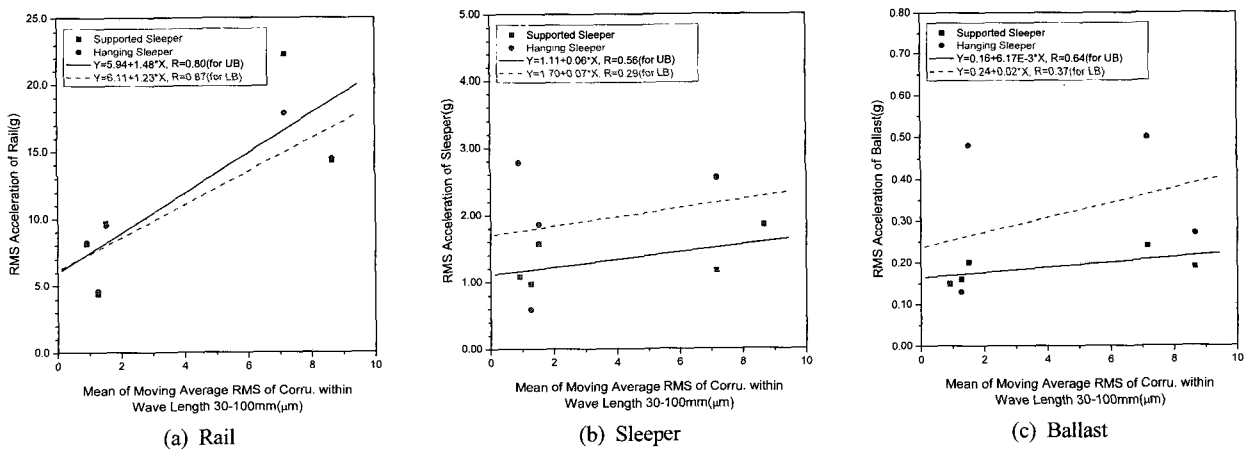
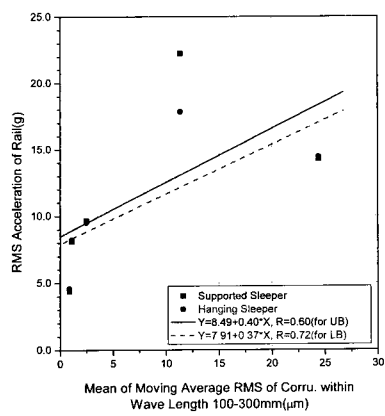
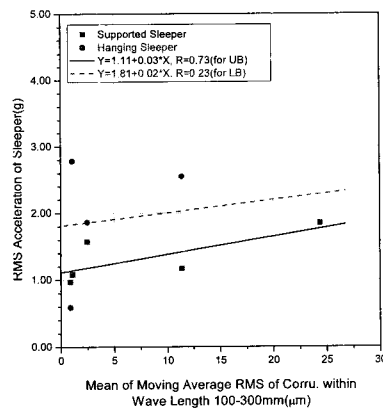


Figure A.5. Frist Linear Regression Analysis on Acceleration RMS of Each Track Component and Corrugation(30~100mm)

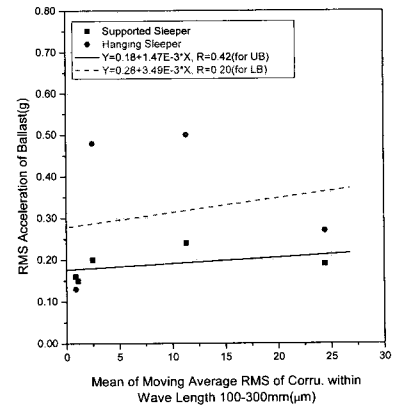
부록 : 선형회귀분석 결과



(a) Rail

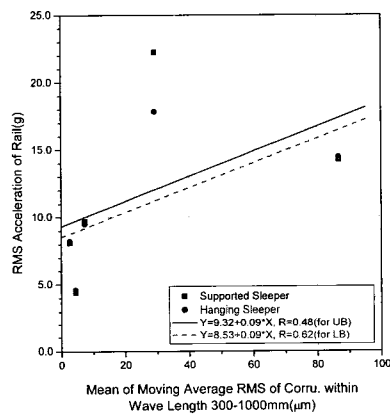


(b) Sleeper

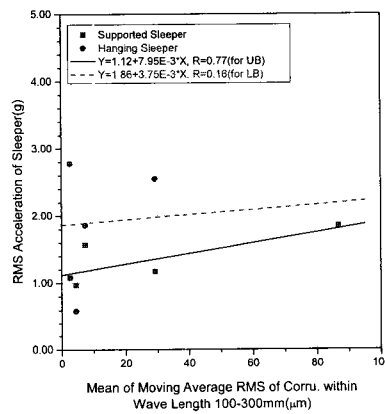


(c) Ballast

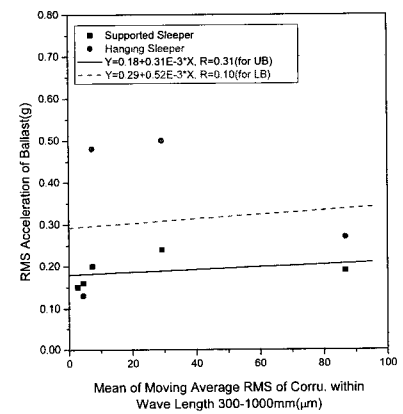
Figure A.6. Frist Linear Regression Analysis on Acceleration RMS of Each Track Component and Corrugation(100~300mm)



(a) Rail



(b) Sleeper



(c) Ballast

Figure A.7. Frist Linear Regression Analysis on Acceleration RMS of Each Track Component and Corrugation(300~1,000mm)