

가속도 값을 이용한 궤도 불규칙도 검측

Estimation of Rail Irregularities by using Acceleration values

김영모* 박찬경** 최성훈** 김상수** 박춘수**
Kim, Young-Mo Park, Chan-Kyoung Choi, Sung-Hoon Kim, Sang-Soo Park, Choon-Soo

ABSTRACT

Railroad is the major factor of vibration source in railway vehicles, and it must carefully maintained the original condition to secure the safety and good ride comfort of passenger. Measuring the condition of rail irregularities such as surface, alignment, gauge, twist and cant etc is required to maintain the good performance of railroad. Currently, the various rail irregularity measurement systems(EM120, ROGER1000K and the Total Rail Irregularity Measurement system of Korea High Speed Train) are operated in Korea to estimate the rail irregularity. It is hard to verify the correlation of one rail irregularity data of a measurement system with the other, because they have been adopted different rail irregularity estimation methods. The best method securing the reliability of the irregularity data is the direct confirmation on the ground where the measurement system had detected as a fault section, but it is impossible to apply all sections simultaneously due to limitation of time, labor, cost and equipments. There is a method to secure the reliability of the data by using acceleration values. Rail irregularities, the major factor of vibration in railway vehicle, are transmitted to the vehicle acceleration through masses, springs, dampers and joints as the system dynamic formation. In this study, Transition Function has been adopted by using the rail irregularity and the acceleration value regarding as input & output parameters respectively. It has been verified by comparing the analyzed results with real measured irregularity data from the Total Rail Irregularity Measurement system of Korea High Speed Train. Also various methods has been accomplished to verify the correlation between rail irregularities and acceleration values.

1. 서론

궤도는 열차가 달리는 선로로서 차량의 주요 진동 원인의 하나로 승객의 안전과 좋은 승차감을 위해 양호한 상태를 유지해야 한다. 궤도의 유지 보수를 위해 가장 중요한 것은 궤도의 상태를 파악하는 것으로 한국에서는 궤도 불규칙도를 검측하기 위해 EM120, ROGER1000K 그리고 최근에 개발된 한국형 고속열차의 궤도 검측시스템이 사용되고 있다. 현재 많이 사용되는 궤도검측 방법으로 종거법, 관성법 그리고 레이저 및 고속카메라를 이용한 광학적 측정 방법 등이 있으며 각 불규칙도의 종류에 따라 선택적으로 사용된다. 그러나 궤도 검측 시스템을 갖추기 위해선 많은 비용이 들며 생산업체에 따라 각기 다른 이론으로 제품을 생산하여 각 시스템에서 구해진 데이터들의 연관성을 평가하기 어렵다[1].

궤도 불규칙도 데이터의 신뢰성을 확보하기 위한 가장 좋은 방법은 데이터에서 이상으로 여겨지는 지점을 선로에서 직접 육안으로 확인해야 하지만 직접 확인하기엔 시간, 인력, 비용, 장비의 한계가 있다. 이에 대한 해결 방법으로 가속도 값을 이용하는 방법이 있다. 철도 차량의 진동 원인인 궤도 불규칙도는 스프링, 댐퍼, 조인트 등을 거쳐 차량에 전달된다. 이는 일반 기계시스템의 시스템 동역학적 관점으로 접근할 수 있다.

본 연구에서는 입력 값인 궤도 불규칙도와 출력 값인 차량에서 측정한 가속도 값의 상관관계인 전달함수를 1/4 차량 모델링을 이용하여 구하고 임의 지점에서의 궤도 불규칙도를 계산하여 비교 분석하였다. 계산된 궤도 불규칙도 예측 값은 한국형 고속열차의 궤도검측 시스템의 궤도 불규칙도와 비교 분석하여 타당성을 검증하였다.

* 한국철도기술연구원, 차세대고속철도 기술개발 사업단, 비회원
E-mail : ymkim@krii.re.kr

TEL : (031)460-5603 FAX : (031)460-5649

** 한국철도기술연구원, 차세대고속철도 기술개발 사업단, 회원

2. 차량 응답 특성

철도 차량은 진동의 주요 원인인 궤도 위를 주행하며 발생된 진동은 승객의 승차감과 주행 특성을 양호하게 하기 위해 1, 2차 서스펜션을 이용하여 감소된다. 철도 차량의 안전하고 쾌적한 운영을 위해 궤도 변위의 관리를 통한 차량 운동의 억제를 유도해야 한다. 철도 차량의 동역학적 거동 특성의 경우 궤도 변위가 크지 않다면 일반적으로 선형 시스템으로 간주한다. 선형 시스템은 일반적으로 중첩의 원리가 성립되는 시스템이다. 일반적으로 시스템의 입력신호와 출력신호 사이의 응답 특성은 시간영역에서 미분방정식으로 표시된다. 그런데, 미분방정식의 계수가 상수일 경우에 미분방정식은 라플라스 변환으로 쉽게 풀리므로, 이 식의 입력과 출력신호를 라플라스 변환함수로 바꾸고 이 변환함수들 사이의 비를 입출력 응답 특성으로 삼을 수 있다. 이와 같이 시스템의 응답 특성을 입력과 출력의 라플라스 변환의 비로 표시할 때에 나타나는 분수함수를 시스템의 전달함수(transfer function)라고 부른다. 이 전달함수는 라플라스 변환변수 s 의 함수이므로 식 (1)과 같이 표시한다.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

이러한 선형 시스템의 특성은 외부에서 가해진 변위나 힘(입력 신호)의 주파수와 질점의 응답 주파수(출력 신호)가 같아야 하며 입력 신호의 진폭과 출력 신호의 진폭은 비례관계에 있어야 하고 응답 위상은 외력에 대하여 늦게 응답한다. 이러한 선형 시스템의 성질을 이용하여 외부에서 가해지는 입력 신호와 출력 신호의 관계를 전달 함수를 이용하여 구할 수 있다[2].

주파수 응답 함수를 구하면 궤도 변위에 따른 차량의 진동 가속도를 예측할 수 있다. 주파수 응답 함수에 따른 시스템 특성은 이론적으로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$H(f) = \frac{E[Y(f)]}{E[X(f)]} = \frac{E[X^*(f)Y(f)]}{E[X^*(f)X(f)]} = \frac{E[Y^*(f)Y(f)]}{E[Y^*(f)X(f)]} \quad \dots\dots\dots (2)$$

여기서 E 는 기대치를 나타내며 $E[Y(f)], E[X(f)]$ 가 0이므로 켈레 복소수 함수를 곱한다. 실험에서의 주파수 응답 특성은 식 (3), (4), (5)와 같다.

$$H_1(f) = \frac{S_{xy}(f)}{S_{xx}(f)}, H_2(f) = \frac{S_{yy}(f)}{S_{yx}(f)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$|H_3(f)| = \sqrt{\frac{S_{xy}(f)}{S_{xx}(f)}} = \sqrt{|H_1(f)||H_2(f)|} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$H_0(f) = \frac{1}{2}(H_1(f) + H_2(f)) \quad \dots\dots\dots (5)$$

여기서 S_{xx} 는 Blackman-Tukey 방법의 교차 스펙트럼 밀도함수이며, S_{xy} 는 자기 스펙트럼 밀도함수이다. 각 밀도 함수는 식 (6), (7)과 같으며 식 (6)은 양의 실수인 짝수에 적용되며 식 (7)은 복소수 함수에 적용된다.

$$S_{xx}(f) = S_{xx}(-f) \dots\dots\dots (6)$$

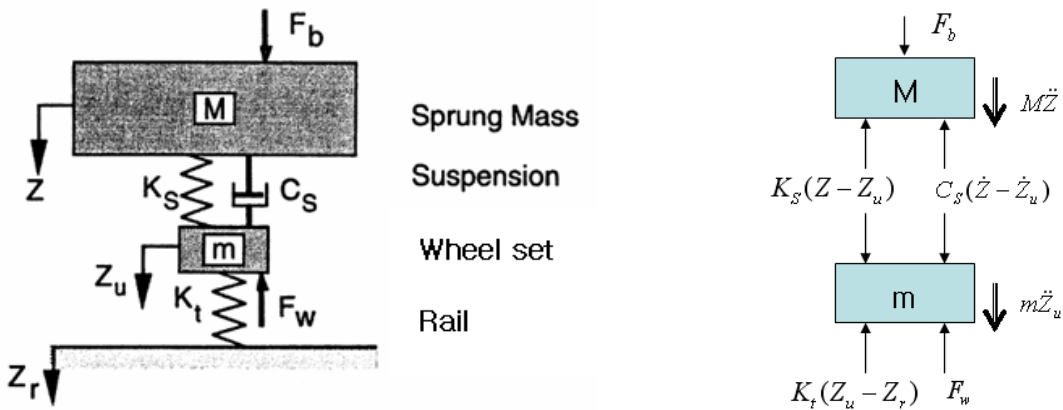
$$S_{xy}(f) = \int R_{xy}(\tau)[\cos 2\pi f\tau - j \sin 2\pi f\tau]d\tau \equiv C_{xy}(f) - j Q_{xy}(f) \dots\dots\dots (7)$$

$$S_{xy}(-f) = S_{yx}(f) = S_{xy}^*(f)$$

여기서 $C_{xy}(f)$ 는 동일 스펙트럼 밀도 함수라 불리며 입력과 출력의 위상차가 0도 이고 실수 짝수에 해당된다. 반면에 $Q_{xy}(f)$ 정적 스펙트럼 밀도 함수라 불리며 입력과 출력의 위상차가 90도 이고 실수 홀수에 해당한다 [3].

3. 차량 모델

궤도 불규칙도와 차량 가속도와의 상관관계인 전달 함수를 수학 적으로 계산하기 위해 전체 차량 모델이 아닌 1/4 차량 모델을 그림 (1)과 같이 제시 하였다.



(a) 1/4 vehicle model (b) Free-Body Diagram
그림 1. Quarter Vehicle model

이 모델은 1차원으로 수직 방향의 성분만 고려되었으며 Z_r 은 궤도의 상하 불규칙도의 기준 좌표를 나타낸다. Z_u 는 차축의 기준 좌표계를 나타내며 Z 는 대차의 기준좌표를 나타낸다. 1/4 차량모델을 2차 미분 방정식으로 표현하면 식 (8), (9)와 같다.

$$\sum F_z = -K_s(Z - Z_u) - C_s(\dot{Z} - \dot{Z}_u) + F_b = M\ddot{Z} \dots\dots\dots (8)$$

$$\sum F_{z_u} = K_s(Z - Z_u) + C_s(\dot{Z} - \dot{Z}_u) - K_t(Z_u - Z_r) - F_w = m\ddot{Z}_u \dots\dots\dots (9)$$

위의 식을 다시 쓰면 아래 식 (10), (11)과 같다.

$$M\ddot{Z} + C_s\dot{Z} + K_sZ = C_s\dot{Z}_u + K_sZ_u + F_b \dots\dots\dots (10)$$

$$m\ddot{Z}_u + C_s\dot{Z}_u + (K_s + K_t)Z_u = C_s\dot{Z} + K_sZ + K_tZ_r - F_w \dots\dots\dots (11)$$

궤도 불규칙도 변위에 대한 2차 미분 값인 궤도 가속도와 대차 가속도와의 차량 응답 특성은 식 (12)와 같이 계산된다[4].

$$\frac{\ddot{Z}}{\ddot{Z}_r} = \frac{K_1 K_2 + j(K_1 C w)}{[\chi w^4 - (K_1 + K_2 \chi + K_2) w^2 + K_1 K_2] + j[K_1 C w - (1 + \chi) C w^3]} \dots\dots\dots (12)$$

여기서 $K_1 = \frac{K_t}{M}$, $C = \frac{C_s}{M}$, $K_2 = \frac{K_s}{M}$, $\chi = \frac{m}{M}$ 으로 정의 된다.

궤도 불규칙도는 변위의 값으로 가속도 값으로 변환해 주면 $\ddot{Z}_r(w) \equiv w^2 TF(w) Z_r$ 이기 때문에 간단히 변환해 줄 수 있다.

실제 운행 하고 있는 한국형 고속열차에서 측정된 궤도 상하 불규칙도와 대차에서 얻어진 상하 가속도를 비교하기 위해서 모델에 사용된 질량과 서스펜션 값들은 한국형 고속열차의 차량제원에서 1/4 차량의 값을 환산하여 사용하였다. 표 (1)은 모델링에 사용된 각 물성치를 보여준다.

표 1 1/4 차량 모델에 사용된 물성치

구 분		물 성 치
질 량 (kg)	대차 질량 (M)	3791.95
	차축 질량 (m)	1039.45
스프링 (N/m)	1차 스프링 탄성계수 (K _s)	692560
	차륜 고유 탄성계수 (K _t)	205000
댐 퍼 (N/ms ²)	1차 댐퍼 계수 (C _s)	6110

식 (12)와 표 (1)에 주어진 물성치를 입력하여 계산하여 전달 함수를 구할 수 있다. 이번 연구에 사용된 데이터는 2007년 10월 야간에 이루어진 KP 160~KP 167 구간에서 300km/h의 속도로 등속 운영을 통해 얻어졌다. 그림 (2)은 시험 구간의 궤도 상하 불규칙도를 보여주며 그림 (3)은 상하 대차 가속도를 보여준다.

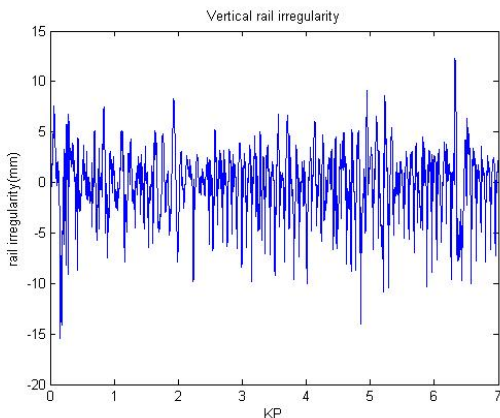


그림 2 상하 궤도 불규칙도

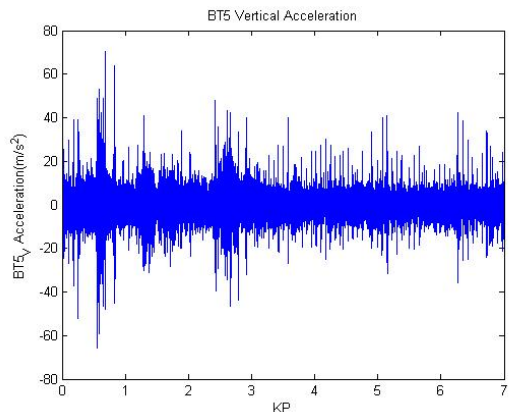


그림 3 상하 대차 가속도

4. 결 과

상하 궤도 불규칙도와 전달 함수를 이용하여 계산된 대차 가속도 값은 그림 (4)와 같으며 그림 (5)에 실제 상하 가속도 값과 비교 하여 보았다. 그림 (5)에서 보듯이 단순화된 1차원 모델임에도 불구하고 한국형 고속열차의 대차에서 얻은 상하 가속도값과 계산된 값의 수치가 잘 일치함을 보여준다.

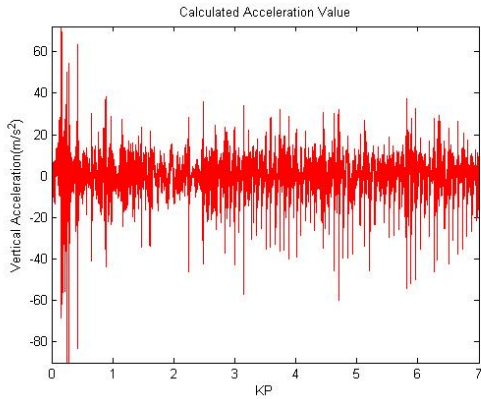


그림 4 계산된 상하 대차 가속도

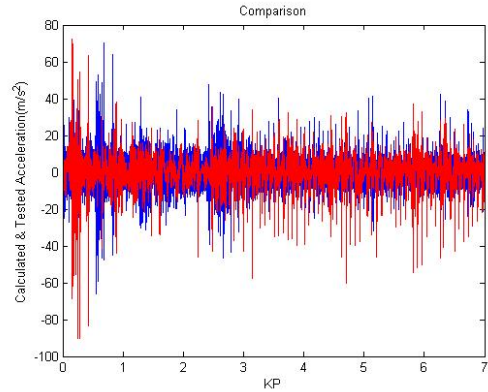


그림 5 가속도 계산값과 실제 값의 비교

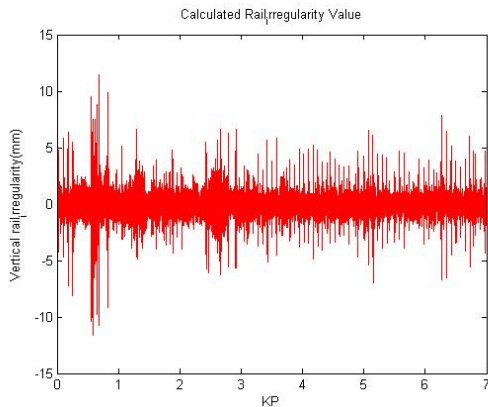


그림 6 계산된 궤도 상하 불규칙도

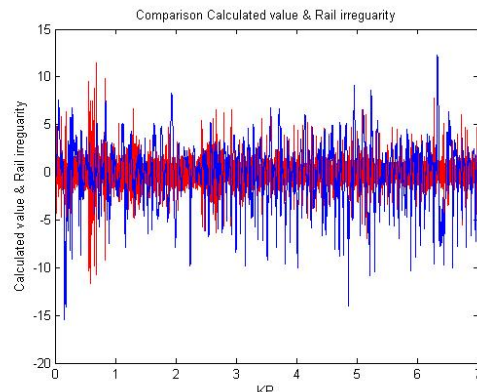


그림 7 궤도 계산값과 실제 값의 비교

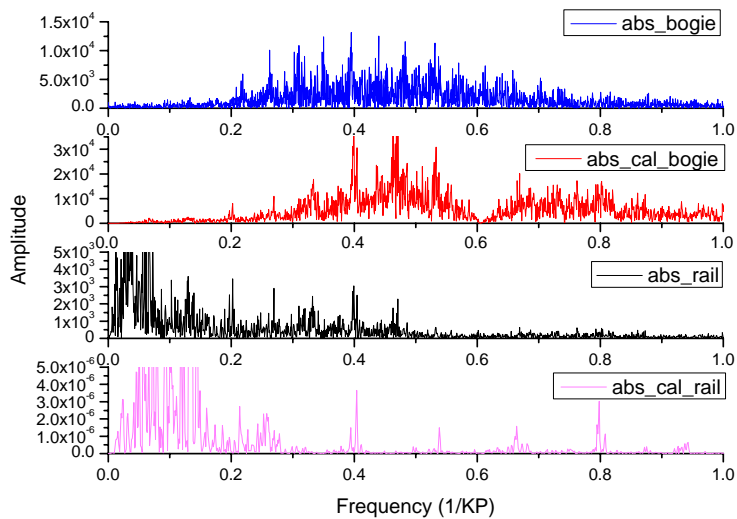


그림 8 주파수 영역 결과 비교 (저 주파수 대역)

또한 상하 가속도 값과 전달 함수를 이용하여 계산된 궤도 상하 불규칙도는 그림 (6)과 같으며 그림 (7)에 실제 궤도불규칙도와 비교했으며 궤도 불규칙도와 계산된 값의 수치가 잘 일치함을 보여준다. 그림 (8)은 궤도 불규칙도와 대차의 상하 가속도 값 그리고 계산된 값들의 FFT값을 주요 관심 주파수 영역대인 저주파 영역을 비교해 보았다. 결과를 살펴보면 0.2 ~ 0.6 (1/KP) 에서 주파수 반응이 거의 일치함을 보여준다.

4. 결 론

간략화 된 1/4 차량 모델 연구와 한국형 고속열차의 시험 결과의 비교 분석을 통해 아래와 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 궤도 불규칙도와 가속도와의 상관관계를 1/4 차량 모델을 통하여 수식적으로 표현하였으며 실제 실험 데이터와 해석 데이터는 간략화된 모델임에도 불구하고 잘 일치함을 보였다.
- (2) 전달 함수를 궤도 데이터와 차량 진동 데이터를 통해 구할 수 있다면 일정한 구간의 차량의 가속도 값이나 궤도 불규칙도 값만 이용해서 차량의 상태 및 궤도의 상태를 예측 할 수 있음을 보였다.
- (3) 차량 모델에서 구한 1차원적인 수식 방법에서 벗어나 다차원 시스템의 전달 함수를 보다 진화된 모델로 구현 한다면 더욱 신뢰성 있는 값을 얻을 수 있을 것이다.
- (4) 현재 등속 운행 시 조건에 한해 수행한 연구는 차후 운행 조건 및 환경의 변화에 따른 예측 방법으로 발전될 것이다.

후 기

본 연구는 차세대 고속철도기술개발사업의 일환으로 이루어 졌으며 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김상수 외 3인, "궤도검측시스템의 현황과 응용" 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, 2007.
2. 서사범, "궤도변위와 차량의 흔들림 및 승차감", 한국철도학회지, 2007.
3. "Modal Analysis: Theory, Measurements and Applications", 한국과학기술원, NOVIC, 1998.
4. 박태원, "차동차 샴시 시스템 개론",아주대학교, 2007
5. 최성률 외 3인, "공학적 문제해결을 위한 MATLAB",도서출판 영일, 1997.
6. Thomass P. Krauss 외 2인 "Signal Processing Tool Box", The Math work Inc.