

주파수영역 전달함수를 이용한 궤도틀림 식별

Identification of Track Irregularity by Frequency-Domain Transfer Function

김재천[†] · 권순정* · 윤경림** · 이형진*** · 김만철**** · 신수봉*****

Jae-Cheon Kim · Soon-Jung Kwon · Jinglin Yin · Hyeung-Jin Lee · Man-Cheol Kim · Soobong Shin

Abstract An algorithm for identifying track irregularities along the railway is presented. A baseline frequency-domain transfer function based on the equivalent SISO(Single Input Single Output) model is defined at the intact condition between the measured track geometry of the ground displacement and the acceleration measured at a location in a train. The pre-defined transfer function at the intact condition is used inversely to predict track geometry in time with the currently measured acceleration at the same location in a train. The predicted track geometry is compared in time with that of the baseline values at the intact condition. The difference between them is calculated as an error in time and used to identify the track irregularities. An irregularity index is proposed as the ratio between the moving variance of the error at the current inspection and that at the intact condition. A 3D numerical simulation study has been carried out with a train model to verify the validity of the presented algorithm. In the analysis for the simulation, the track geometry has been considered as the displacement boundary condition varying in time.

Keywords : frequency-domain transfer function, equivalent SISO model, track irregularities, irregularity index

요 지 본 연구에서는 대차에서 측정한 가속도 데이터를 사용하여 궤도틀림을 식별하기 위한 알고리즘을 제안하였다. 등가 SISO 모델에 의한 정상궤도틀림 상태에서의 대차진동과 궤도틀림과의 주파수영역 전달함수를 정의하고, 이를 역으로 이용하여 대차에서 측정한 가속도 데이터로 궤도틀림을 예측하였다. 예측된 값과 기준값과의 잔차의 분산 비로 정의되는 틀림지수를 사용하여 궤도틀림의 이상을 분석하였다. 궤도틀림을 시간에 따라 변하는 변위 경계조건으로 고려하여 3차원 수치예제를 수행하였으며, 제안된 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

주 요 어 : 주파수영역 전달함수, 등가 SISO 모델, 궤도틀림, 틀림지수

1. 서 론

궤도틀림(track irregularity)이란 열차의 반복운행 또는 다른 요인에 의해 궤도가 변형하여 열차 주행 면에 부정합이 생기는 것으로 열차 운행 시 진동을 유발시켜 안정성 및 승차감에 큰 영향을 미친다. 특히, 최근 열차의 고속화로 인해 궤도변형이 급속하게 진행되고 있으며 이러한 궤도틀림

의 진전은 최악의 경우 열차의 탈선으로 인한 대형사고를 유발할 수 있다. 따라서 궤도구조의 유지·보수를 위한 궤도검측 기술의 중요성이 대두되고 있다.

통상 궤도틀림의 측정은 그 목적에 맞게 구성된 검측차량을 통해 관찰하게 된다. 그러나 검측차량에 의한 직접적인 궤도틀림 판정은 사회적 비용이나 운행의 어려움 등으로 그 정확도에 비해 사용이 제한적일 수밖에 없다.

지금까지 대차진동과 궤도틀림에 관한 연구를 분류하면 크게 검측기술에 관한 것과 궤도틀림 식별에 관한 것으로 구분할 수 있다. 검측차량에 의한 검측기술의 개발에 관한 연구결과들 중 Yazawa[11]는 200km/h가 넘는 고속에서도 가능한 검측기술을 개발하여 이를 고속전철 신간선에 적용하였다. Ono 등[8]은 시속 275km로 달릴 수 있는 종합 검측차량에 의해 측정된 수치에 비대칭좌표법(asymmetrical

[†] 책임저자 : 정회원, 인하대학교 토목공학과, 박사과정

* 정회원, 코레일 연구원, 차장

** 정회원, 인하대학교 토목공학과, 석사

*** 정회원, 창원대학교 토목공학과, 교수

**** 정회원, 한국철도기술연구원 차륜궤도연구실, 책임연구원

***** 교신저자 : 정회원, 인하대학교 토목공학과, 교수

E-mail : sbshin@inha.ac.kr

TEL : (032) 860-7552 FAX : (032) 873-7560

coordinate method)을 결합하여 사용하였다. 실험에서는 비교적 만족스러운 결과를 얻었지만 검측과정에서의 많은 제약과 차축(axle) 하중이 작은 경우 사용이 불가능한 문제점이 있었다. 궤도틀림 식별에 관한 연구 중 Kawasaki 등[6]은 시간영역 알고리즘인 ARX 기법을 사용하여 실제 차량에서 가속도를 측정해서 궤도틀림을 추정하였다.

그 외 차량진동에 대한 수치해석 및 계측에 대한 논문 및 연구결과들 중 Esveld 등[3]은 차량 모델에 수학적 방법을 결합하여 측정한 수치로부터 전달함수를 추정하였다. 이 방법은 고속의 열차에서도 차체의 가속도, 궤도 틀림, 레일과 차륜 상호작용력을 추정하는 특징이 있다. Foo 등[4]은 모델링과 수치예제에서 궤도결합과 관계되는 요소들을 측정하고 전달함수를 사용하여 이 요소들과 차체의 가속도를 유도하였다. 또한 Castellani[1]는 진동수영역에서의 수학적 모델을 응용하여 차체와 궤도의 상관관계를 체계적으로 분석하였다. 이런 연구를 통하여 차체의 속도가 빨라짐에 따라 가속도가 증가함을 밝혔고, 파장이 긴 결합들이 짧은 파장의 결합들에 비해 차체가속도에 미치는 영향이 더 크다는 것을 알아냈다. 그러나 레일의 변위와 접촉면에서 받는 힘의 대부분은 짧은 파장의 결합으로 인해서 일어난다는 결론을 얻었다. Iwnicki 등[5]은 ANN법(Artificial Neural Network method)로 측정된 데이터로 차체의 운동을 예측하였다. 이 방법의 장점은 측정된 데이터에 대해 빠른 분석을 진행할 수 있고 차체의 운동에 근거하여 궤도를 유지관리 할 수 있다는 점이다. Kogut 등[7]은 실제 차량의 일정한 속도에서의 진동검측을 통하여 궤도의 틀림을 분석하였고, 이 검측 데이터들에 근거한 예측모델을 이용하여 이를 수치적으로 검증하였다.

본 연구에서는 등가 SISO(Single Input Single Output) 모델에 의한 정상궤도틀림 상태에서의 대차진동과 궤도틀림을 나타내는 궤도변형과의 주파수영역(frequency-domain)에서의 전달함수(transfer function)를 수학적으로 정의하였다. 사전 정의된 전달함수의 역 전달함수로 대차에서 계측한 가속도 데이터로 궤도틀림을 예측하고, 예측된 값과 기준값과의 잔차(residual)의 분산(variance) 비인 틀림지수(Track Irregularity Index, TII)를 사용하여 궤도틀림의 이상을 분석하였다. 제안된 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 3차원 차량모델에 대한 수치예제를 수행하였다.

2. 궤도틀림 식별 알고리즘

2.1 등가 SISO 모델에 의한 주파수영역 전달함수

일반적으로 KTX와 같은 일반 차량에 계측센서를 설치할 경우 차량에서 계측한 가속도성분에는 다양한 궤도틀림

에 의한 입력성분들 이외에 연결된 차량에서 전달되는 진동성분이 영향을 미치고 있다.

이와 같이 입력신호와 출력신호 간의 비선형성 및 차량의 복합적인 거동특성을 선형관계로 정의된 SISO(Single Input Single Output) 모델을 적용하기에는 제약이 있다. 또한 MIMO(Multi Input Multi Output) 모델의 적용도 동일한 거동특성 반영의 문제 이외에 출력신호를 계측하는 센서의 수가 증가함으로 인한 수치적 복잡성의 문제가 있다.

따라서 본 연구에서는 복합적인 거동을 충분히 반영할 수는 없지만 MIMO 모델을 대체할 수 있으면서 사용하기 간편한 등가 SISO 모델에 의한 주파수영역 전달함수를 수학적으로 정의하고자 한다.

MIMO 모델의 주파수영역 전달함수는 식 (1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} H_{11}(f) & H_{12}(f) & \dots & H_{1n}(f) \\ H_{21}(f) & H_{22}(f) & \dots & H_{2n}(f) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n1}(f) & H_{n2}(f) & \dots & H_{nn}(f) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_1(f) \\ D_2(f) \\ \vdots \\ D_n(f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{U}_1(f) \\ \ddot{U}_2(f) \\ \vdots \\ \ddot{U}_n(f) \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 입력성분을 식 (2)와 같이 시간차가 있는 유사함수로 가정하면 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$d_i(t) = d_{i-1}(t - \Delta t) \quad (2)$$

$$D_i(f) = e^{-i\omega\Delta t} D_{i-1}(f) = \hat{H}_{i-1}(f) D_{i-1}(f) \quad (3)$$

따라서 등가 SISO 모델에 의한 주파수영역 전달함수는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \ddot{U}_j(f) &= H_{j1}(f)D_1(f) + H_{j2}(f)D_2(f) \\ &\quad + \dots + H_{jn}(f)D_n(f) \\ &= [H_{j1}(f)\hat{H}_{1i}(f) + H_{j2}(f)\hat{H}_{2i}(f) \\ &\quad + \dots + H_{jn}(f)\hat{H}_{ni}(f)] D_i(f) \\ &= \tilde{H}_{ji}(f) D_i(f) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $D_i(f)$ 는 i 번째 차륜에 가해지는 입력(궤도틀림)값이고, $\ddot{U}_j(f)$ 는 j 번째 대차에서의 가속도 응답이며, $\tilde{H}_{ji}(f)$ 는 이들 간의 상관관계를 나타내는 등가 SISO 모델에 의한 주파수영역 전달함수이다.

복소수함수(complex function)인 전달함수 $\tilde{H}(f)$ 를 구하기 위해서는 식 (5)와 같이 스펙트럼 밀도함수(spectral density function)의 사용이 필요하며, 그래야만 통계적으로 신뢰할 수 있는 신뢰도를 확보할 수 있다.

$$\tilde{H}(f) = S_{D\ddot{U}}(f) / S_{DD}(f) \quad (5)$$

여기서 $S_{D\ddot{U}}(f)$ 와 $S_{DD}(f)$ 는 식 (6)과 식 (7)에서 정의된 교

차스펙트럼(cross spectrum)과 자기스펙트럼(auto spectrum)이다.

$$S_{D\bar{U}}(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \overline{D(f)\bar{U}(f)}/T \quad (6)$$

$$S_{DD}(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \overline{D(f)D(f)}/T \quad (7)$$

여기서 $\bar{D}(f)$ 는 $D(f)$ 의 공액복소수(complex conjugate)다. 일반적으로 전달함수가 신뢰성을 갖기 위해서는 식 (8)에서 정의된 일관성함수(coherence function)가 $\gamma_{D\bar{U}}^2(f) > 0.85$ 의 범위를 만족해야 한다[2].

$$\gamma_{D\bar{U}}^2(f) = \overline{H(f)S_{D\bar{U}}(f)}/S_{DD}(f), \quad 0 \leq \gamma_{D\bar{U}}^2(f) \leq 1 \quad (8)$$

2.2 틀림지수

Sohn and Farrar[10]은 위치가 고정된 구조물에 발생한 손상 전·후에 측정한 거동이력 사이의 잔차에 대한 분산을 사용하여 손상을 확인하는 이론을 개발하였다. 그러나 본 연구는 이동하는 철도차량에서 측정한 데이터로 이상궤도틀림의 발생위치 및 정도를 확인하는 것이기 때문에 Sohn and Farrar[10]의 식을 수정하여 잔차의 분산을 시간에 따라 변화하는 값으로 적용하였다.

즉, 식 (9)와 같이 오차의 영향을 고려하여 추정한 정상궤도틀림과 정식화된 정상궤도틀림 간의 잔차의 분산(σ_u^2)과 오차의 영향을 고려하여 추정한 이상궤도틀림과 정식화된 정상궤도틀림 간의 잔차의 분산(σ_d^2)간의 비를 일정한 구간의 이동창(moving window)으로 나누고, 각 구간별로 평균하여 틀림지수(Track Irregularity Index, TII)를 정의하였다.

$$TII(t_i) = \sum_i^{i+n} (\sigma_d^2/\sigma_u^2)_i \quad (9)$$

3. 수치예제

3.1 해석모델

본 연구에서는 범용구조해석 프로그램인 SAP2000[9]을 이용하여 Fig. 1과 같이 3차원 차량모델을 설정하고 선형 시간이력해석을 수행하였다. 예제에 사용된 차량의 물성치는 김성일[12], Kawasaki[6]의 자료를 참조하여 Table 1에 정리하였으며 감쇠비(damping ratio)는 20%로 가정하였다.

본 예제에서는 횡방향 차량진동을 사용하여 궤도틀림을 추정하였다. 횡방향 궤도틀림을 시간에 따라 변하는 변위 경계조건으로 고려하여 차륜 사이의 간격 및 차량의 속도에 따라 각 차륜별로 입력하여 대차에서의 각 측정점별 가

속도 응답(acceleration response)을 구하였다.

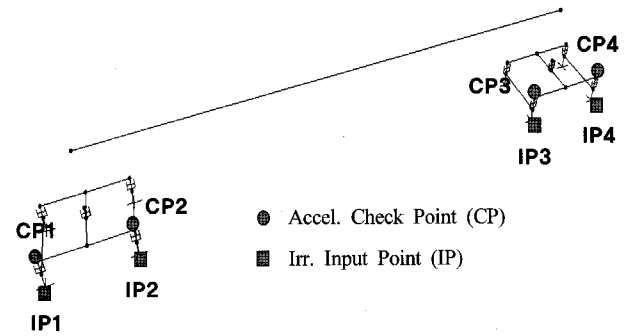


Fig. 1. 3D train model for the simulation study

Table 1. Mechanical properties of the train model

	Car	Bogie	Axle
Mass (kg)	26000	3050	2000
Stiffness (kN/m)	170	11000	-
Damper (kN·sec/m)	0	0	-

3.2 궤도틀림의 정식화

궤도틀림과 대차진동 사이의 전달함수를 결정하기 위해서는 우선 검측차량을 이용하여 정상궤도틀림이 측정되어야 하지만, 실측자료 없이 수치예제를 수행해야 하는 본 연구의 경우에는 이러한 정상궤도틀림을 수식으로 정식화하였다.

일반적으로 침목 간격으로 인한 주기적인 단주기의 궤도틀림 보다는 장주기의 궤도틀림이 차량의 진동 및 이상에 영향을 더 미치는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 UIC code 518[14]에 근거하여 최대크기 3mm 이하가 되도록 조은상[13]에 의해 정리된 PSD(Power Spectrum Density) 함수를 사용하여 총 4km의 구간을 차량이 각각 150, 200, 250 및 300km/h의 속도로 주행하는 각각의 경우에 대해 장주기파가 포함되도록 횡방향 정상궤도틀림을 정식화하였다.

차량의 주행거리에 따른 함수를 속도에 관한 시간의 함수로 바꾸면 정상궤도틀림 $s(t)$ 는 식 (10)과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$s(t) = \sum_{k=1}^N a_k \cos(\Omega_k Vt + \theta_k) \quad (10)$$

여기서 $a_k = 2\sqrt{G_{rr}(\Omega_k)\Delta\Omega}$, $\Delta\Omega = (\Omega_u - \Omega_l)/N$, $\Omega_k = \Omega_l + (k-1/2)\Delta\Omega$ ($k=1,2,3,\dots,N$), θ_k 는 임의로 생성된 위상각, $\Omega_u = 4.0 \text{ cyc./m}$, $\Omega_l = 0.025 \text{ cyc./m}$, V 는 차량의 속도를 나타낸다.

면틀림과 줄틀림에 대한 PSD 함수와 캔트와 궤간틀림에

대한 PSD 함수는 각각 식 (11), 식 (12)와 같다.

$$G_{rr}(\Omega) = \frac{A\Omega_2^2(\Omega^2 + \Omega_1^2)}{\Omega^4(\Omega^2 + \Omega_2^2)} \quad (11)$$

$$G_{rr}(\Omega) = \frac{A\Omega_2^2(\Omega^2 + \Omega_1^2)}{(\Omega^2 + \Omega_1^2)(\Omega^2 + \Omega_2^2)} \quad (12)$$

여기서 A 는 roughness parameter, Ω 는 spatial frequency, Ω_1, Ω_2 는 break frequency이다.

또한, UIC code 518(14)에 근거하여 최대크기 3mm를 초과하는 궤도틀림을 이상궤도틀림으로 정의하고, 이상궤도틀림의 크기에 따른 영향을 분석하였다. 이를 위해 식 (13)과 같이 임의로 0.02sec의 구간에 half-sine 곡선의 형태로 발생한 것으로 가정하고 정식화된 정상궤도틀림에 각각 5, 10, 15 및 20mm 크기의 이상틀림을 추가하였다.

$$y^{add} = \alpha \sin(50\pi t), \quad t_1 \leq t \leq t_1 + dt \quad (13)$$

여기서 α 는 이상궤도틀림의 크기이다.

Fig. 2는 차량속도가 300km/h인 경우에 정식화된 정상궤도틀림에 5mm 크기의 이상궤도틀림을 각각 1km 및 3km의 위치에 추가한 예이다.

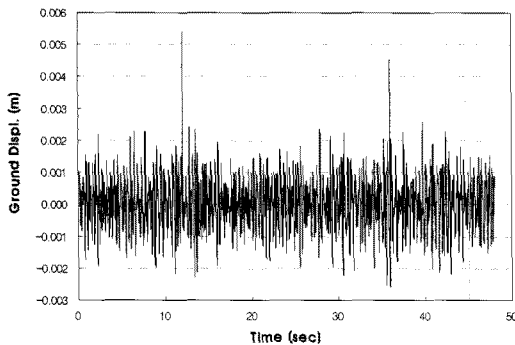
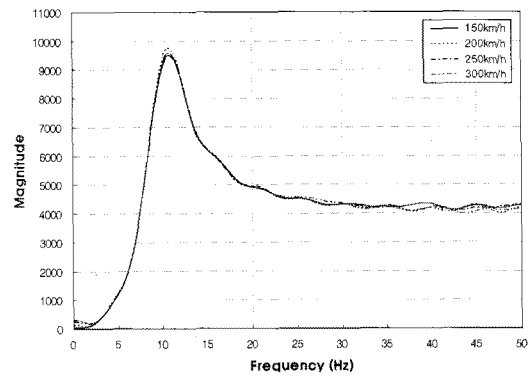


Fig. 2. Baseline track geometry and additional peaks of track irregularity

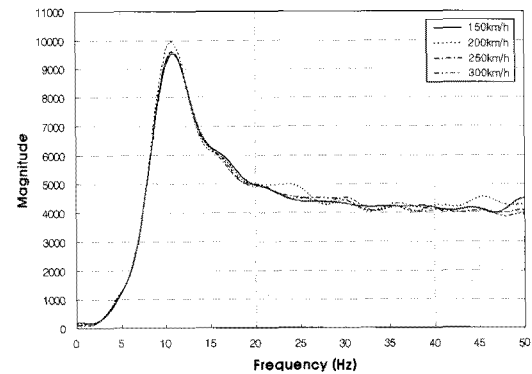
3.3 등가 SISO 모델의 타당성 검증

본 연구에서 제안한 등가 SISO 모델에 의한 주파수영역 전달함수 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 각 위치별로 속도에 따른 전달함수를 비교·검토하였다.

Fig. 1에 표기된 바와 같이 각각 IP1과 IP2에서의 정상궤도틀림 입력에 따른 CP1에서의 가속도 응답 사이의 속도별 전달함수를 비교하여 Fig. 3에 나타냈다. 각 위치별로 속도에 따른 전달함수를 비교·검토한 결과, 대차에서의 전달함수는 위치 및 속도에 무관하게 거의 동일하게 나타났다. 또한 CP2에 대한 결과도 CP1에서와 같이 동일한 양상을 보였다.



(a) IP1-CP1



(b) IP2-CP1

Fig. 3. Transfer functions for each case in various train velocities

Fig. 4는 전달함수를 이용하여 이상궤도틀림에 의해 발생한 대차에서의 가속도 응답을 역 추정하여 구한 이상궤도틀림을 가정한 이상궤도틀림과 비교한 것이다. 전달함수와 가속도 응답을 사용하여 틀림을 역 추정하게 되면 추정한 이상궤도틀림과 가정한 이상궤도틀림 사이에 다소 차이는 있지만 틀림이 추가된 위치 및 틀림의 크기가 가정한 이상궤도틀림과 거의 정확하게 일치한다.

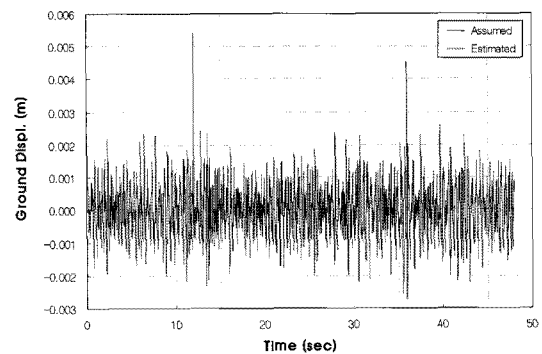


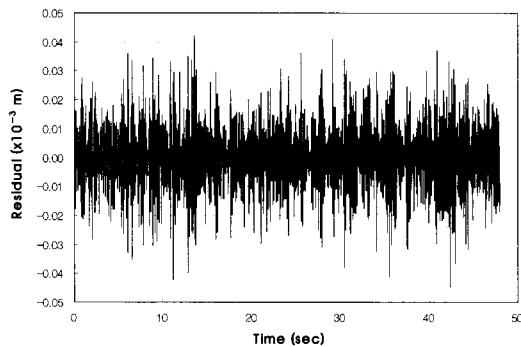
Fig. 4. Comparison between the assumed and the estimated track irregularity

따라서 본 연구에서 제안한 등가 SISO 모델에 의한 주파수영역 전달함수 알고리즘은 타당한 것으로 판단된다.

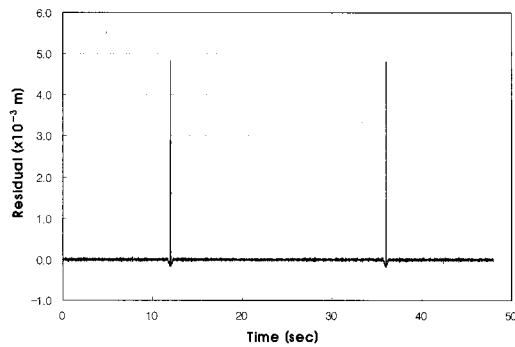
3.4 틀림지수를 이용한 궤도틀림 식별

본 연구에서는 잔차에 의한 틀림지수를 계산하기 위해서 궤도형상의 오차를 고려하여 2%의 임의오차를 궤도틀림에 추가하였다. 또한 시간간격 0.01초, moving window는 1초간, 즉 100개의 계측 시계열 데이터를 사용하여 각각 속도별로 틀림지수를 계산하였다.

Fig. 5(a), (b)는 오차의 영향을 고려하여 추정한 정상궤도틀림과 정식화된 정상궤도틀림 간 잔차와 오차의 영향을 고려하여 추정한 이상궤도틀림과 정식화된 정상궤도틀림 간의 잔차를 각각 나타낸 것이다.



(a) Case without abnormal track irregularity



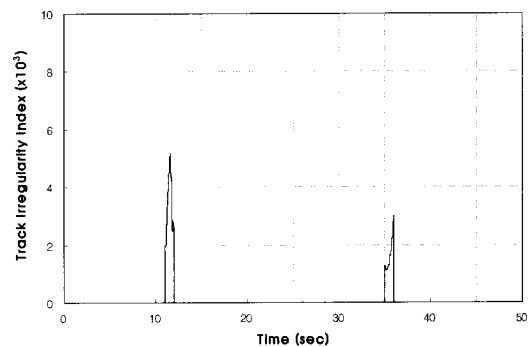
(b) Case with abnormal track irregularity

Fig. 5. Difference between the baseline and the estimated track irregularity

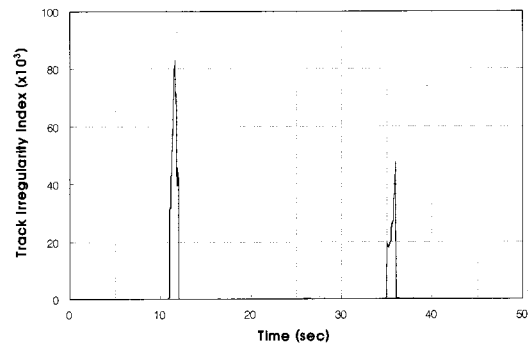
본 연구에서는 차량이 일정구간(4km)을 운행한 경우에 대해 예제를 수행하였기 때문에 Fig. 5(b)에서 보듯이 잔차만으로도 이상궤도틀림의 위치를 명확하게 식별할 수 있다. 하지만 차량의 운행구간이 길어지면 이상궤도틀림의 크기가 상당히 작아 주위의 값들로 인해 궤도틀림의 이상 유무를 식별하기가 곤란할 수 있다.

따라서 이상궤도틀림의 위치 및 크기를 보다 명확하게 식별하기 위해 본 연구에서는 틀림지수를 사용하여 이상궤도틀림을 식별하는 방법을 제안하고자 한다.

차량속도가 300km/h인 경우에 대해, 5mm 및 20mm 크기의 이상궤도틀림에 따른 틀림지수를 Fig. 6에 나타냈다.

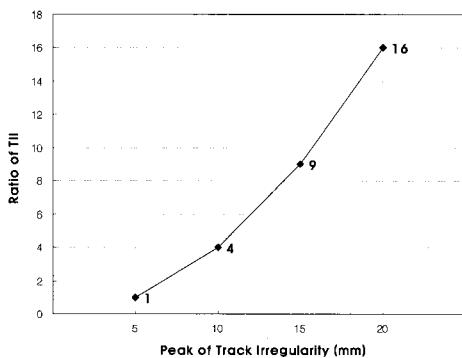


(a) Additional 5mm peak of track irregularity

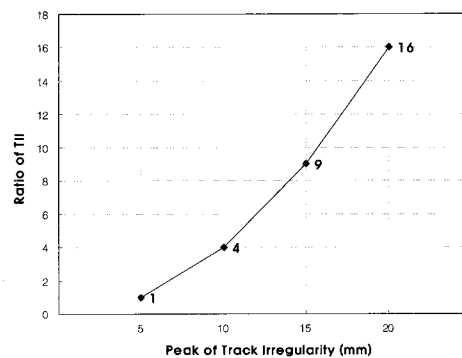


(b) Additional 20mm peak of track irregularity

Fig. 6. Track Irregularity Index at the train velocity of 300km/h



(a) Ratio of TII for the first peak



(b) Ratio of TII for the second peak

Fig. 7. Ratio of TII at the train velocity of 300km/h

Fig. 6에서와 같이 틀림지수를 사용하면 이상궤도틀림의 크기가 절대적으로 커 궤도틀림의 이상 유·무를 보다 명확하게 식별할 수 있다.

Fig. 7은 각 Peak별로 Fig. 6(a)인 5mm의 이상궤도틀림에 대한 틀림지수를 기준으로 각각 5mm, 10mm, 15mm, 20mm의 이상궤도틀림에 따른 틀림지수를 상대적인 크기의 값으로 구하여 나타낸 것이다.

틀림지수의 절대적인 크기는 Fig. 6과 같이 각 Peak에서 차이를 보이지만, 상대적인 값들은 Fig. 7에서와 같이 같은 비례로 증가하고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 각각의 틀림지수 비에 근호를 취하면 5mm의 이상궤도틀림에 대한 증가 비인 2배, 3배, 4배의 값과 같다. 이는 틀림지수가 이상궤도틀림의 크기가 변화는 양상을 반영하고 있음을 보여준다.

4. 결론

본 연구에서는 대차에서 측정한 가속도 데이터를 사용하여 궤도틀림을 식별하기 위해 등가 SISO 모델에 의한 주파수영역 전달함수를 정의하고 틀림지수를 사용하여 궤도틀림의 이상 유·무를 식별하였다. 제안된 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 3차원 차량모델에 대한 수치예제를 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 각 위치별로 속도에 따른 전달함수를 비교·검토한 결과, 대차에서의 전달함수는 위치 및 속도에 상관없이 거의 동일하게 나타났다. 따라서 본 연구에서 제안한 등가 SISO 모델에 의한 주파수영역 전달함수 알고리즘은 타당한 것으로 판단된다.
2. 궤도틀림의 이상위치 확인을 위하여 통계적 처리를 통해 계산되는 틀림지수를 제안하였다.
3. 틀림지수를 사용한 경우, 이상궤도틀림의 위치를 효과적이고 보다 명확하게 식별할 있으며 이상궤도틀림의 크기가 변화는 양상을 반영하고 있어 틀림지수를 사용한 이상궤도틀림의 식별이 보다 신뢰도가 높다는 것을 확인할 수 있다.
4. 제안된 전달함수 알고리즘을 현장에서 적용하기 위해서는 검측차량을 통해 사전에 기준이 되는 궤도형상의 정보가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 철도종합안전기술개발사업의 연구비지원(과제번호05-철도안전-C04)의 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Castellani, A.(2000), "Vibration generated by rail Vehicles: A mathematical model in the frequency domain," Vehicle System Dynamics, Vol. 34, pp. 153-173.
2. Esveld, C.(1989), Modern railway track, MRT-Productions, W. Germany.
3. Esveld, C. and Kok, A.W.M.(1998), "Interaction between moving vehicles and railway track at high speed," REI/Edition.
4. Foo, E. and Goodall, R.(1998), "Active suspension control strategies for flexible-bodied railway vehicles," UKACC International conference on control, No. 455, pp. 1300-1305.
5. Iwnicki, S.D., Stow, J., and Parkinson, H.(1999), "Assessing railway vehicle derailment potential using neural networks," Conference Transactions 1999-11-Fault Free Infrastructure, Pub Professional Engineering Publications Ltd.
6. Kawasaki, J. and Youcef-Toumi, K.(2002), "Estimation of rail irregularities," Proc. of the American Control Conference, May 8-10, pp. 650-660.
7. Kogut, J.P., Lombaert, G., Francois, S., Degrande, G., Haegeman, W., and Karl, L.(2003), "High speed train induced vibrations: In situ measurements and numerical modeling," Tenth International congress on sound and vibration, 7-10 July, Stocholm, Sweden.
8. Ono, S., Numakura, A., and Odaka, T.(2003), "High-speed track inspection technologies," JE EAST Technical Review, No. 2, pp. -13.
9. SAP2000 User's Manual (1999), Computer and Structures, Inc., Berkeley, CA.
10. Sohn, H. and Farrar, C.R.(2001), "Damage diagnosis using time series analysis of vibration signals," Smart Materials and Structures, No. 10, pp. 1-6.
11. Yazawa, E.(2003), "Track inspection technologies," Railway Technology Avalanche, No. 1, p. 3.
12. 김성일(2000), "고속철도 교량의 교량-열차 상호작용해석," 박사학위논문, 서울대학교.
13. 조은상(2008), "철도교의 차량-교량 상호작용해석을 위한 coupled 정식화," 박사학위논문, 인하대학교.
14. UIC code 518 OR(2005), "Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour-Safety-Track fatigue-Ride quality."

접수일(2009년 2월 27일), 수정일(2009년 4월 29일),
재확정일(2009년 8월 5일)