

차량의 동적 특성 분석을 통한 궤도틀림 식별

An Identification of Track Irregularity by Analyzing Dynamic Characteristics of a Train

김성용† 박은천*
Sung-Yong Kim Eunchum Park

ABSTRACT

In this study, to grasp the stability of train and to identify the track irregularity, the algorithm was proposed. As the track deformation occur due to running train, the dynamic characteristics of train show non-linearity. The representative transfer functions of wheel to car response were calculated from the frequency response functions which were estimated from measured triaxial accelerations. The measured acceleration responses were compared with the estimated responses from filtered acceleration outputs. This result could show the non-linearity of train system at the location of track deformed. The proposed algorithm was verified by matching with the site investigation.

1. 서 론

열차 운행으로 인한 반복하중은 궤도 형식의 종류에 따라 다르기는 하나 크고 작은 변형을 유발하여 승차감 및 열차 안정성에 악영향을 끼친다. 특히 자갈도상의 경우에는 MTT작업 후에 불과 몇 대의 열차 통과만으로 궤도 선형이 틀려진다. 따라서, 승객에게 안전하고 편안한 서비스를 제공하기 위해서는 궤도 틀림을 조기에 발견하고 틀려진 선로를 정정할 필요가 있다. 이러한 궤도 틀림 개소는 유지 보수자가 검측기로 검측하여 찾아내거나 인력 검측 또는 육안으로 판별하여 궤도 틀림개소를 인식해 내고 있으나, 각 방법들이 가진 한계 즉, 운행 열차가 주행 중 일으키는 동적의 틀림 대신 정적인 틀림만 검측해 넘으로서 열차의 주행 안정성이나 승차감을 예측하지 못하고 측정하는데 시간이 많이 소요되는 등의 단점을 갖고 있다.

따라서, 본 연구에서는 주행중 궤도 선형 틀림개소를 식별해 내고 열차의 안정성을 파악하기 위해 차량에 진동가속도계를 설치하였으며, 동적 틀림개소를 파악하기 위한 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘을 통하여 파악된 동적 틀림개소는 현장 조사를 통하여 유효성을 확인하였다.

2. 시스템 설치

열차의 진동가속도치는 속도에 따라 진폭과 시스템의 비선형성이 달라지므로 최대한 등속에서 진동가속도 측정을 필요로 한다. 따라서, 김포공항 ~ 인천공항간 약 40km구간을 도중에 정차하지 않고 시속 80km/h ~ 110km/h로 운행하는 공항철도 직통열차에 진동가속도계와 타코메타를 설치하였다. 시스템 구조 및 설치위치는 다음과 같다.

† 정회원, 코레일공항철도(주), 시설팀, 차장
E-mail : kimsy888@empal.com
TEL : (032)745-7124 FAX : (032)745-7365
* 비회원, 한국유지관리(주), 부설기업연구소, 주임

2.1 시스템 구조 및 설치위치

진동가속도계는 그림 1에서 보듯 차량 제일 앞(반대로 달릴 경우 제일 뒤) 좌우측의 윤축, 대차, 차체에 상하방향 및 좌우방향 진동가속도를 측정할 수 있도록 설치하였고, 타코 센서는 차량의 좌측 대차 위에 설치하였다. Data logger는 그림 2 및 3과 같이 차량 내에 설치하여 무선으로 데이터를 객실에 있는 측정자에게 송출할 수 있도록 구성하였다.

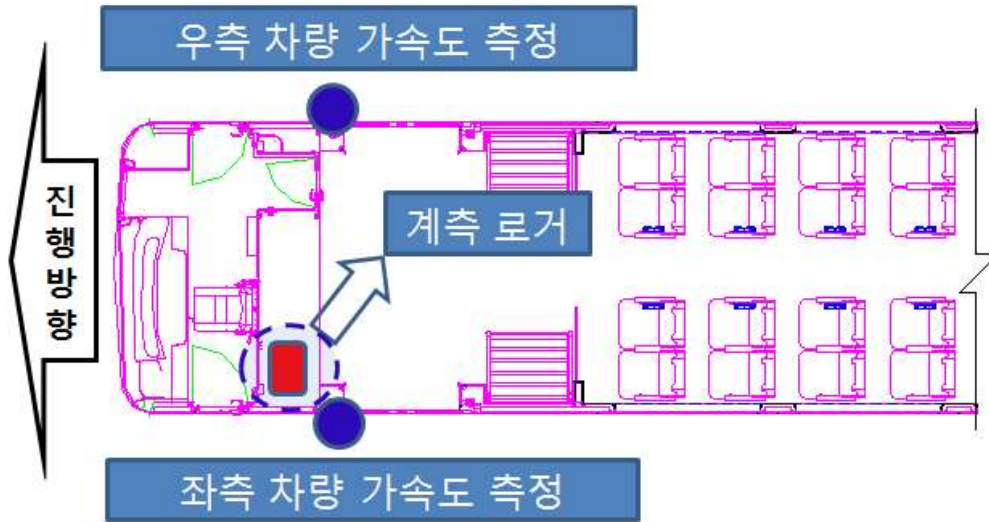


그림 1. 시스템 설치 위치

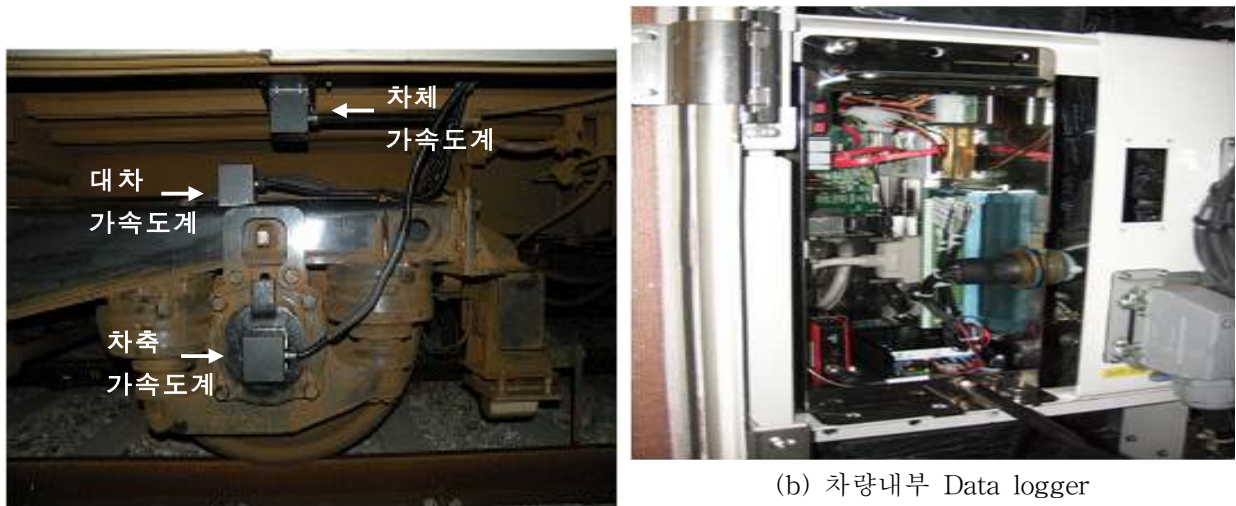


그림 2. 진동가속도계 및 Data logger 설치 사진

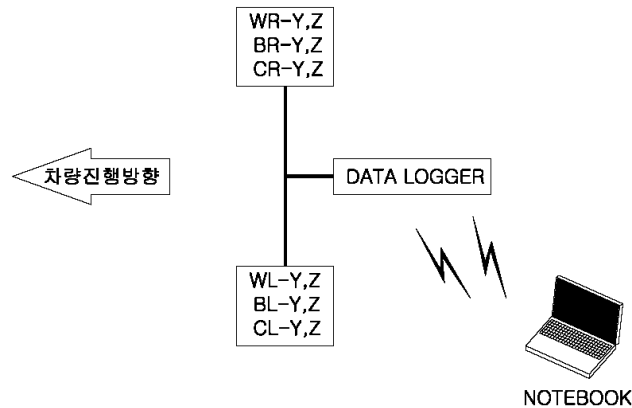


그림 3. 시스템 개념도

2.2 시스템 특성

본 시스템은 연구목적이 아닌 실제 운행 차량에 시스템을 설치하고 활용하기 위한 목적이므로 몇 가지 사용자 편의성을 고려하여 시스템을 설계하였다.

Data logger내에 램 디스크를 장착하고, 열차가 달림으로서 타코미터로부터 연속된 신호가 있으면 자동으로 데이터가 저장되고 저장된 데이터는 계측자가 언제든지 Down load를 받도록 설계되었으며, 일정기간동안(램 디스크 용량상 약 5일) Down load를 받지 않으면 오래된 Data부터 지워나가는 방법으로 설계되었다.

Download는 열차가 정지해 있을 동안 유효반경 약 30m이내에서 받을 수 있도록 무선모뎀을 사용하였고 시스템은 운행이 종료되어 열차가 주박 후 열차의 주 전원을 내리면 같이 꺼지고 주 전원을 올리면 자동으로 켜지도록 구성함으로써 사용자 편의성을 높였다.

3. 열차의 전달함수법을 이용한 궤도틀림의 산출 방법

이론적으로 정상(Steady State)상태 진동응답을 보이는 열차에서 계측되는 진동가속도의 입력과 응답 사이에는 서로 선형성을 가진다. 하지만 실제 열차의 거동은 속도에 의존한 MIMO(Multi Input Multi Output) System이며 특히, 레일 선형 틀림등 이상개소에서의 열차 진동가속도 응답은 신호의 비선형성을 가진다. 이때, 신호의 비선형성 정도는 계측데이터의 Coherence Function으로 찾을 수 있으며, 입력과 출력의 Coherence 정도에 따라 이상개소 즉, 레일 선형 틀림 개소로 판별할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 정상적인 열차의 진동 시스템으로 차체에 계측된 입력과 차체에 계측된 출력 사이의 등가 선형화된 모델을 찾은 후, 이 때 구조물별 레일하부조건과 동특성이 반영이 되므로 구조물별 분리하기 위하여 전체 대역폭에서 선형화된 열차의 진동 모델을 입출력 모두 CWAPSD를 예측하여 대표 전달함수를 구하였고, 이를 이용하여 산출한 예측신호와 실제 계측신호의 coherence function을 비교하여 비선형성의 정도로 궤도틀림개소를 추정하였다.

3.1 데이터 수집 및 처리

데이터는 운측, 대차, 차체에서 1000Hz로 각각 왼쪽, 오른쪽 그리고 상하방향 진동과 좌우방향 진동 가속도 데이터를 수집하였다. 그리고 타코미터의 데이터는 1Hz로 펄스 카운트 데이터를 수집하여 속도와 거리를 환산하였다. 이때 환산된 거리데이터를 이용하여 10m간격으로 구간을 나누고, moving queue block을 사용하여 가속도 데이터를 주파수응답에서 해상도를 높였다. 즉, 1000Hz샘플링의 경우 60km/hr주행시 약 300이상의 데이터가 queue로 누적된다. 이때, queue블럭 사이즈는 8192샘플로 지정하였으며 이때 주파수 해상도는 1000/8192, 약 0.122Hz의 주파수 해상도를 가지게 된다.

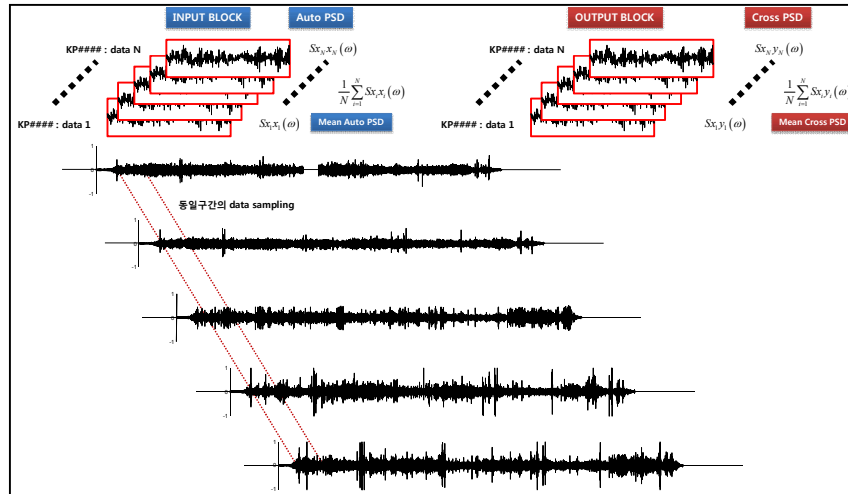


그림.4 대표전달함수 산정과정

3.2 주파수 응답함수 특성

주파수 응답함수를 산정하는 방법은 입력과 응답의 계측데이터로부터 Power Spectral Density를 구하고, 그 스펙트럼 사이의 관계식으로부터 Frequency Response Function을 산정한다. 이상개소 산출 알고리즘에서는 이 주파수응답함수의 정확도가 매우 중요하며 각 KP마다의 Reference FRF의 신뢰성이 이상개소 산출 알고리즘의 핵심적인 요소라 할 수 있다. 주파수응답함수는 차축에 계측된 입력과 차체에 계측된 출력간의 관계로 기본적으로 다음 두 식에 의해 나타낼 수 있다.

$$H_1(f) = \frac{S_{xy}(f)}{S_{xx}(f)} = \frac{H(f)}{1 + \frac{S_{mm}(f)}{S_{uu}(f)}} \quad (\text{식3.1})$$

$$H_2(f) = \frac{S_{yy}(f)}{S_{xy}(f)} = \frac{H(f)}{1 + \frac{S_{nn}(f)}{S_{vv}(f)}} \quad (\text{식3.2})$$

여기서, $H(f)$ 는 오차가 포함되지 않은 참값의 주파수응답함수이고, $H(f) = \frac{\mathcal{L}(v)}{\mathcal{L}(u)}$, u 와 v 는 오차가 포함되지 않은 참값의 시스템 입력과 응답, x 와 y 는 측정된(오차가 포함된) 입력과 응답, m 과 n 는 입력과 출력의 계측 노이즈, $S_{uu}(f), S_{vv}(f), S_{xx}(f), S_{yy}(f), S_{mm}(f), S_{nn}(f)$ 는 PSD (Power Spectral Density) 함수이고, $S_{xy}(f), S_{yx}(f)$ 는 CSD (Cross-Spectral Density) 함수이다.

$H_1(f)$ 는 입력노이즈가 적을 때 정확한 값을 주며, 응답의 노이즈에 덜 민감하다. 반면에 $H_2(f)$ 는 출력노이즈가 적을 때 상대적으로 정확한 값을 주며, 입력의 노이즈에 덜 민감하다. 일반적으로 출력 노이즈가 많은 경우가 대부분이므로 $H_1(f)$ 를 주로 사용한다.

참값의 전달함수를 예측하여 KP별 Reference FRF를 추정하기 위해서는 동일 조건에서 반복수행하여 얻은 계측데이터를 Ensemble Averaging을 수행하여야 한다. 하지만 열차의 주행 특성상 매번 동일한 구간에서 같은 조건의 강제진동의 입력이 존재하지 않기 때문에 계측신호가 일정(stationary)하다고 볼 수 없다. 따라서 식 3.3 와 같이 5개의 동일구간 주행 데이터의 입력값의 PSD의 합과 CSD의 합의 비로 reference FRF를 예측하였다.

$$H_k(f) = \frac{\sum_{i=1}^{N_k} S_{xy}(f)_i}{\sum_{i=1}^{N_k} S_{xx}(f)_i} \quad (\text{식3.3})$$

3.2 Coherence Weighting을 이용한 Averaging

케도의 구조물별 대표 전달함수의 정확도를 높이기 위해서 많은 양의 노이즈에 대한 주파수 영역에 대한 분석이 필요하다. 또한 과도응답이 발생하여 전달함수 예측이 어려운 진동특성을 최소화해야한다. 이를 위해서는 반복적으로 재현되는 샘플의 Power Spectral Density를 누적하고 또한 각 샘플간의 Cross Spectral Density를 누적하는 과정을 수행하여 Coherence Function 추정한다. Coherence Function은 Stationary한 두 신호 $x(t)$ 와 $y(t)$ 에 대해서 다음 식3.4와 같이 표현된다.

$$\gamma_{xy}(\omega) = \frac{S_{xy}(\omega)}{[S_{xx}(\omega)S_{yy}(\omega)]^{1/2}} \quad (\text{식3.4})$$

Coherence는 두 신호의 서로 다른 주파수성분의 correlation 정도를 나타낸다. 평균하는 과정에 있어서 correlate정도가 높은 주파수에 그렇지 않는 주파수보다 높은 가중치를 부여해야한다. 이러한 과정은 순차적으로 최근에 평균화된 PSD와 현재 계측된 PSD를 추가하여 평균화 작업을 하는데 있어서 coherence weighting을 수행한다. 따라서 i 번째 샘플에서 ensemble average를 수행하는 식은 다음과 같고, CWAPSD(Coherence Weighting Averaged Power Spectral Density)로 표현한다.

$$S_{\underline{x}}(\omega, i) = \frac{i-1}{i} S_{\underline{x}}(\omega, i-1) + \frac{1}{i} \gamma(\omega, i) S_x(\omega, i) \quad (\text{식3.5})$$

$$S_{\underline{n}}(\omega) = \frac{i-1}{i} S_{\underline{n}}(\omega, i-1) + \frac{1}{i} (1 - \gamma(\omega, i)) S_x(\omega, i) \quad (\text{식3.6})$$

여기서, $S_{\underline{x}}(\omega, i)$ 와 $S_{\underline{n}}(\omega, i)$ 는 각각 i 번째 신호와 노이즈를 분리한 평균 Power Spectral Density이다.

그림 5는 동일구간 반복 계측데이터를 통해 CWAPSD를 구한결과이며 Ensemble Average결과와 단일 계측 PSD를 비교하였다. 노이즈에 대한 성분이 분리되는 경향을 볼 수 있으며, 과도응답에 의한 성분또한 제거되는 경향을 볼 수 있다.

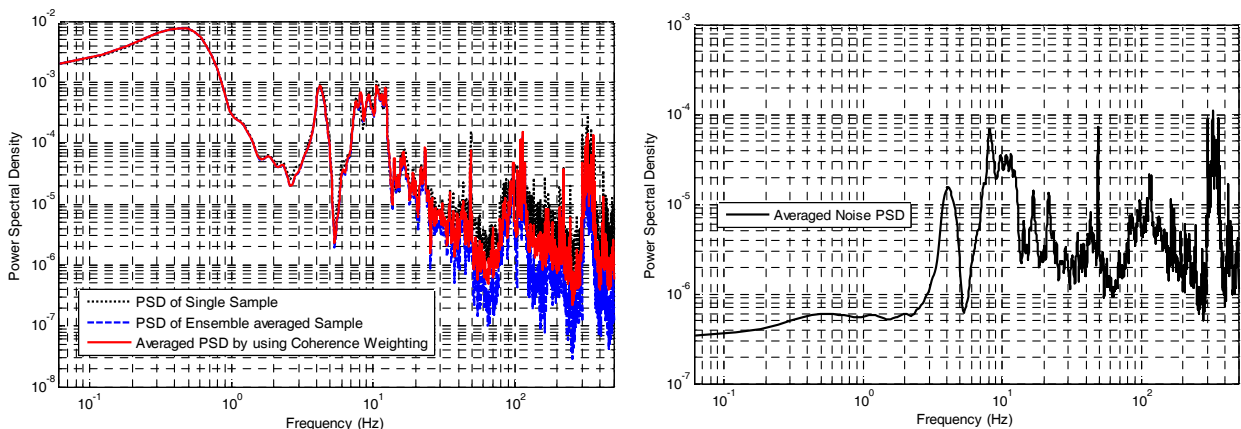


그림 5. 반복계측된 데이터의 Coherence Weighting된 각각의 신호와 노이즈의 PSD

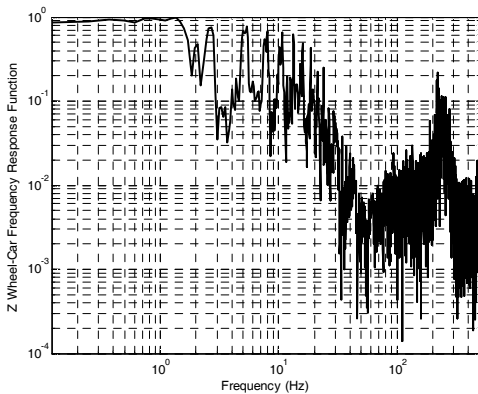
앞에서 설명한 바와 같이 김포공항-인천공항 구간 총 약38km 구간에서 10m간격으로 KP 블록수를 지정하여 3789개의 평균 FRF를 구하였으며, 차축, 대차, 차체 각각 오른쪽과 왼쪽의 계측값에 대해 한 개소 KP 당 12개의 FRF가 존재하기 때문에 총 3789x12개의 Reference FRF를 추정하였다. 한편, Reference FRF로부터 시스템의 참값의 전달함수를 예측해야하며, 전달함수는 다음 식3.7과 같다.

$$H(i\omega) = \frac{V(s)}{U(s)} = [C(sI - A_c)^{-1}B + D] \quad (\text{식3.7})$$

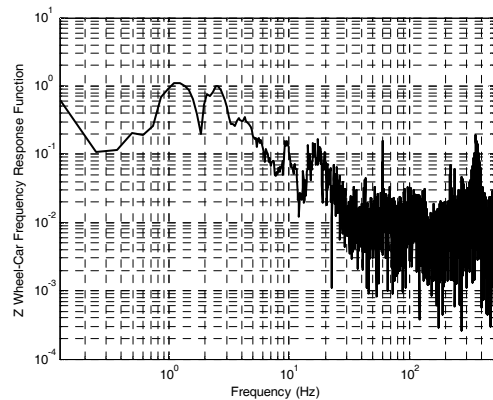
여기서, s 는 Laplace 변수 ($s = i\omega$)이고, A_c, B, C, D 은 각각 시스템 상태 매트릭스, 입력매트릭스, 출력매트릭스, 전송매트릭스이다.

Reference 전달함수를 구하기 위해 5개의 동일 구간 데이터의 최적화된 FRF를 기준으로 참값의 전달함수를 예측하였다. 여기서 coherence function으로 구한 관심 대역의 주파수영역에서의 가중치를 두어 조건부 최소자승법(least square method)를 사용하여 시스템의 전달함수를 추정하였다. 이때, 전달함수의 차수는 60차로 적합하였고, 구속조건은 시스템 안정조건, 최소위상, FRF가 SISO가 되도록 적합하였다. 따라서 시스템 전달함수는 61개의 Numerator와 61개의 Denominator를 가지며 60개의 상태가 존재하게 된다.

전달함수는 구조물의 기본적 특성이므로 이론적으로 외력에 의해 변하지 않으며 구조물이 달라질 때만 변화한다. 여기에서 구한 전달함수는 전술한 바와 같이 차량의 특성 뿐만 아니라 궤도 하부구조물과 궤도의 특성이 반영되어 있는데 차량의 특성은 고정된 직통열차 101편성에 대해서만 계측을 실시하였기 때문에 변화가 없다고 보면, 전달함수의 변화는 공항철도 김포공항~인천공항 구간의 노반이나 교량 등 궤도 하부구조물 형식 및 궤도구조에 따라 변하는 것으로 보인다. 물론, 시험열차의 자중이 변하면 변하지만 이를 무시하면 그림 6, 7과 같이 특정 구간별 전달함수를 구할 수 있다.



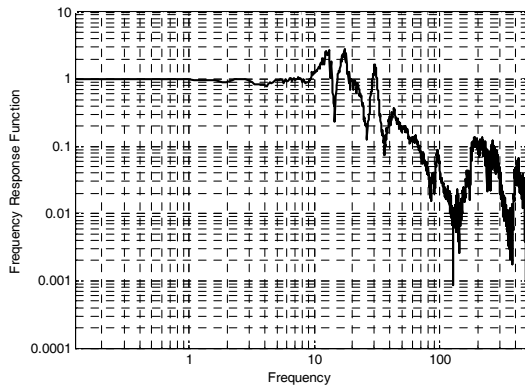
(a) LVT궤도 상하방향



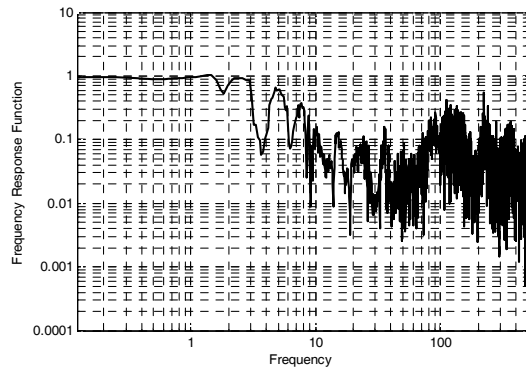
(b) LVT궤도 좌우방향

그림 6. 콘크리트 도상구간 전달함수

그림 7은 자갈도상구간 (계양정거장 이후 : 28km에서 60kg 편단신축, 분기기 33km)까지의 주파수 응답함수의 평균값이다. 차축-대차의 상하방향은 10Hz이상에서 4개의 pole이 관측되었으며 대차-차축의 상하방향은 10Hz이하에서 3개의 pole이 관측되었다.



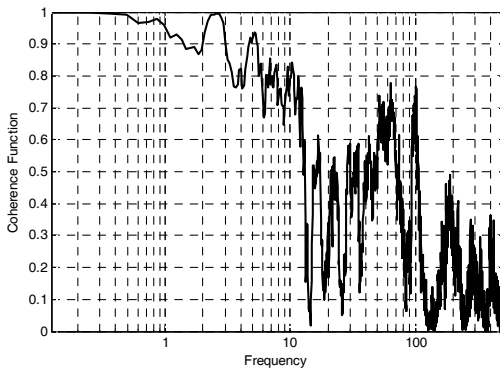
(a) 차축-대차 상하방향



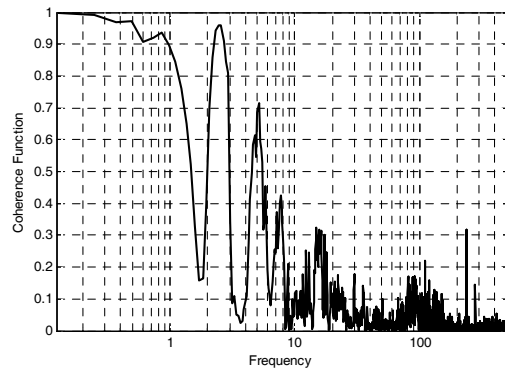
(b) 대차-차체 상하방향

그림 7. 자갈 도상구간 주파수응답함수

그림 8은 자갈 도상구간 주파수응답함수의 coherence function 관측값을 보여준다. 이때의 관측된 coherence는 차축-대차 상하방향의 경우 10Hz 이하에서 0.7이상의 신뢰도를 확보할 수 있으나 pole이 발생하는 부분은 0.5수준으로 관측되었고 zero점은 0.1수준에 그친다. 그리고 대차-차체 상하방향의 경우 10Hz 이하에서 첫 번째 pole은 1Hz 대역폭으로 0.7이상을 확보하고 두 번째 pole은 최대 0.7의 coherence를 가지는 것으로 관측되었다. 하지만 zero점에서 coherence는 0.2이하로 급격히 떨어지는 것을 보아 FRF 곡선에서 10Hz 이하의 응답에서 시스템의 zero점을 예측하지 못함을 알 수 있다. 이것은 차축-대차와 대차-차체간의 interaction의 결과로 zero-pole cancelation에 의한 결과로 사료된다. 하지만 zero-pole cancelation에 의하여 zero점의 예측은 불가능하나 0.7이상을 확보하는 pole이 존재하므로 전달함수 예측이 가능하다.



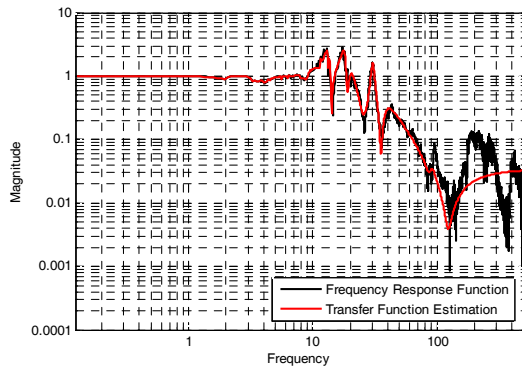
(a) 차축-대차 상하방향



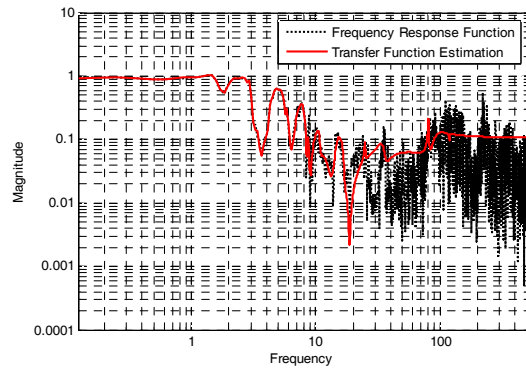
(b) 대차-차체 상하방향

그림 8. 자갈 도상구간 Coherence함수

그림 9직선 자갈 도상구간 상하방향의 운측에서 차량으로 바로 전달되는 전달함수와 운측에서 대차로, 대차에서 차량으로 전달되는 전달함수를 비교하였고, 그림 10~11은 자갈 도상구간 상하방향 진동과 좌우방향 진동의 주파수응답함수 곡선과 이를 선형적합한 전달함수 예측값의 비교를 보여준다. 0.1Hz와 100Hz 구간을 적합하였으며 60차 선형 전달함수로 진폭과 위상을 최소화하는 안정조건으로 적합하였다.

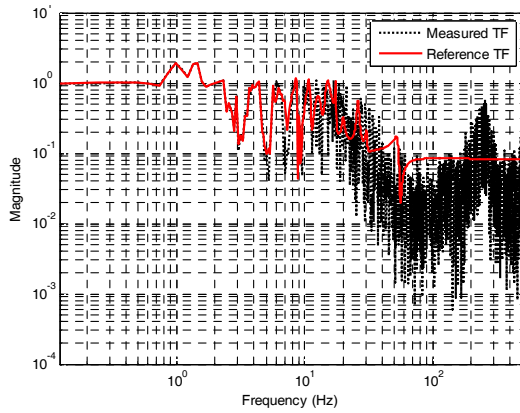


(a) 차축-대차 상하방향

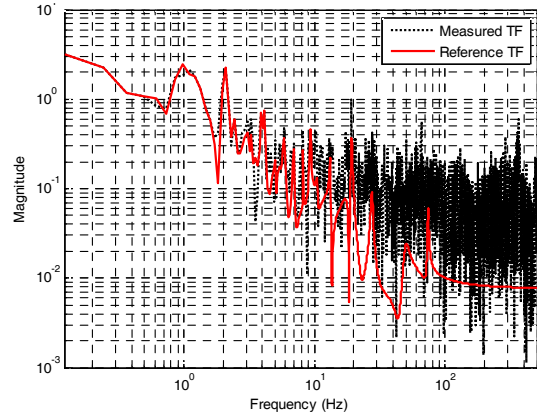


(b) 대차-차체 상하방향

그림 9. 자갈 도상구간 전달함수 예측

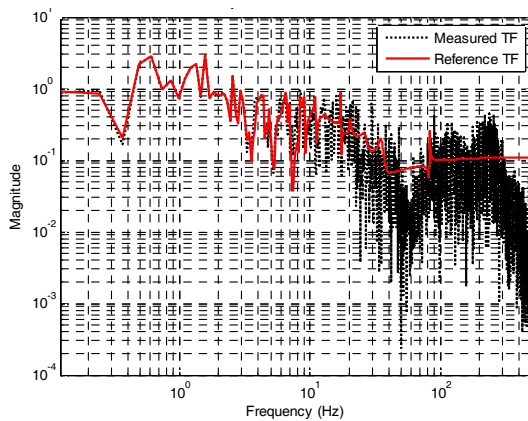


(a) 차축-차체 상하방향

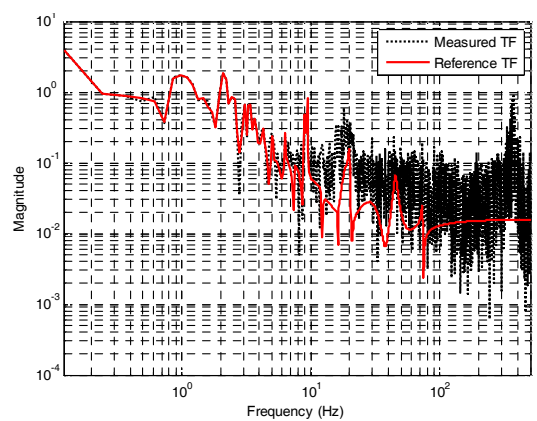


(b) 차축-차체 좌우방향

그림 10. 영종대교 강직결 궤도구간 전달함수 (차축-차체)



(a) 차축-차체 상하방향



(b) 차축-차체 좌우방향

그림 11. 직선 LVT궤도구간 차량 구조체간 전달함수 비교

구조체별 전달함수 비교결과로 열차의 고유진동성분은 3Hz~20Hz 구간에서 발생하며 속도 또는 구조물의 성분들은 전체대역에서 발생하고 100Hz 이상에서 속도성분 그리고 1Hz부근에서 궤도의 직선부 및 곡선부성분이 나타난다.

3.2 이상개소(비선형 개소 또는 퀘도 틀림개소) 산출 알고리즘

퀘도 틀림개소 산출은 구간 매칭된 각각의 절점에서 계측된 moving queue block데이터를 Reference 전달 함수를 시뮬레이션하여 출력의 예측신호를 생성한다. 이때 식3.8과 같이 예측신호와 계측신호의 coherence function을 비교하여 계측신호의 비선형성을 판단하여 퀘도틀림개소를 산출한다.

$$\gamma_{\bar{x}\tilde{x}}^2(k, f) = \frac{|S_{\bar{x}\tilde{x}}(f)|^2}{S_{\bar{x}\bar{x}}(f)S_{\tilde{x}\tilde{x}}(f)} \quad (\text{식3.8})$$

여기서, \bar{x} 는 윤측 계측데이터의 전달함수에 의한 예측신호, \tilde{x} 는 순수 차량의 계측신호이고, k 는 구간 KP를 나타낸다.

이상개소 산출 알고리즘은 예측신호와 계측신호의 coherence분석으로 비선형 개소(퀘도틀림 개소)를 산출하지만 coherence는 주파수영역의 벡터이기 때문에 관심주파수(f_i , center frequency), 주파수대역(η_i , bandwidth) 그리고 가중치함수(w_i , weighting function)를 도입하여 퀘도틀림 지수값(J)을 생성함으로써 퀘도틀림 개소를 산출하였다. 이 지수값은 구간(KP, 10m간격)에서의 퀘도 틀림지수가 되며, 식3.9와 같이 표현된다.

$$J(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i \frac{1}{\eta_i} \int_{f_i - \eta_i/2}^{f_i + \eta_i/2} \gamma_{\bar{x}\tilde{x}}^2(k, f) df \quad (\text{식3.9})$$

여기서, 퀘도틀림 산출을 위해서는 설계파라미터인 f_i , η_i 그리고 w_i 를 찾아야 하므로, 본 연구에서는 기존에 퀘도 검측기로 검측된 변위데이터를 이용하여 최적화하여 설계파라미터를 찾았다. 정규화된 틀림개소의 오차는 다음 식3.10과 같다.

$$E(k, f_i, \eta_i, w_i) = \| J(k, f_i, \eta_i, w_i) \| - \| \delta(k) \| \quad (\text{식3.10})$$

여기서, $\| \|$ 는 최대값으로 정규화한 norm, $\| \mathbf{x} \| = \mathbf{x} / \max(\mathbf{x})$, $\delta(k)$ 는 각 KP별 누적 퀘도틀림 데이터이다.

최적화 조건은 최소자승법을 이용하여 경계비선형함수 최적화(optimization of constrained nonlinear multivariable function)를 수행하였다.

$$\text{minimize to : } tr\{E^T E\} \quad (\text{식3.11})$$

전체적인 퀘도틀림개수를 예측하는 개념도는 그림 12과 같다.

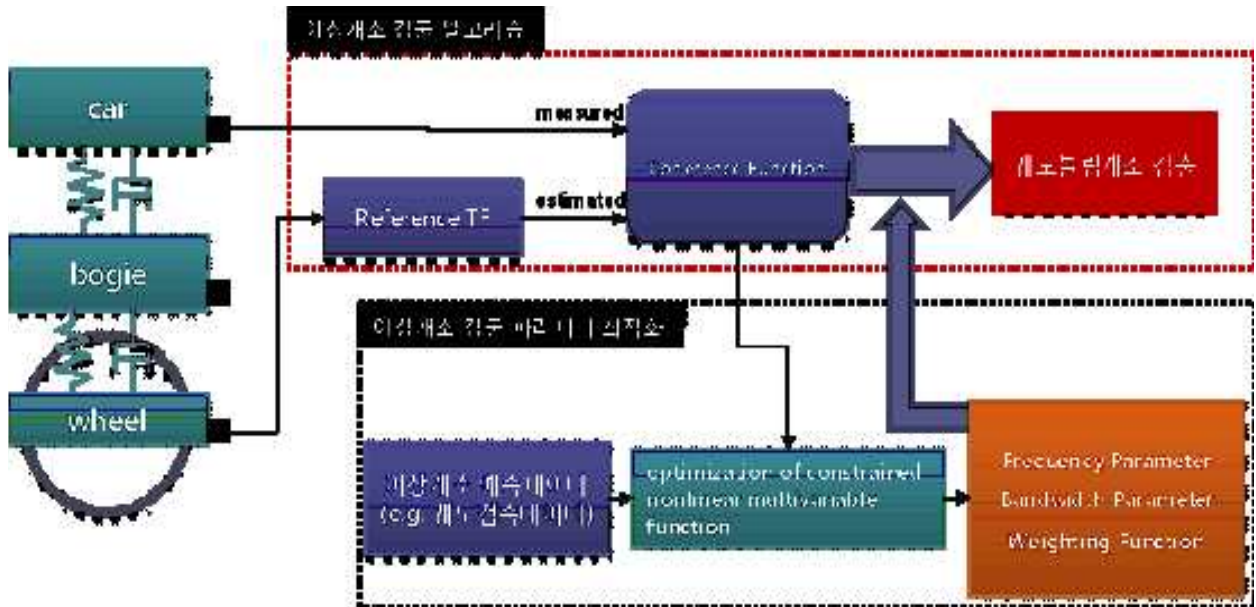


그림 12. 궤도틀림개소 산출 Flow chart

4. 틀림개소 분석결과와 현장 궤도 상태

4.1 정적 검측데이터와 비교

상기의 알고리즘으로 궤도 틀림개소를 분석한 결과와 검측데이터를 비교하였다. 설계파라미터 최적화 결과는 최적화된 파라미터중 가중치가 작고, 육안으로 그 특성이 반영되지 않은 대역폭은 제거하였으며, 특성이 많이 포함된 부분을 구속조건으로 추가하여 반복수행하였다. 그 결과 고정 전달함수로 구조물 특성이 반영된 파라미터는 다음 표와 같으며 궤도틀림지수는 다음 그림12 및 13과 같다.

frequency (Hz)	bandwidth (Hz)	weighting
2	1	2
5	1.5	1
7.5	1.5	0.5

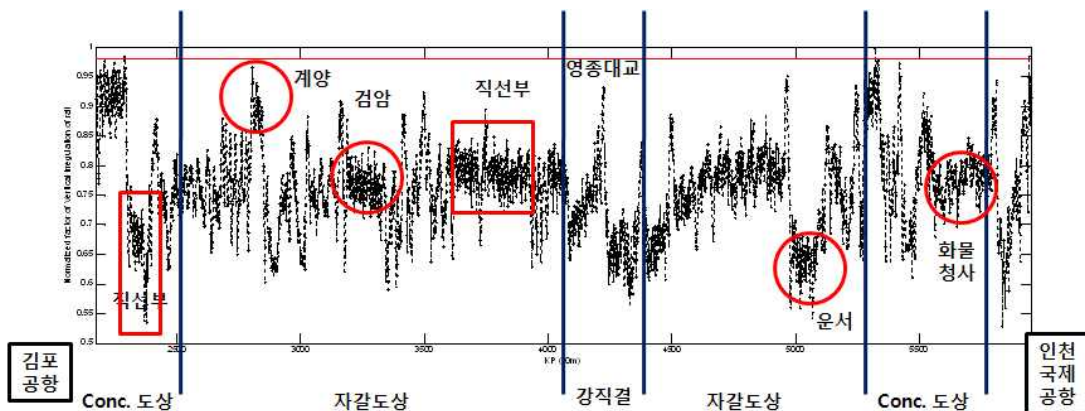


그림 12. 수직 궤도 틀림지수와 구조물 특성 구간 (고정전달함수)

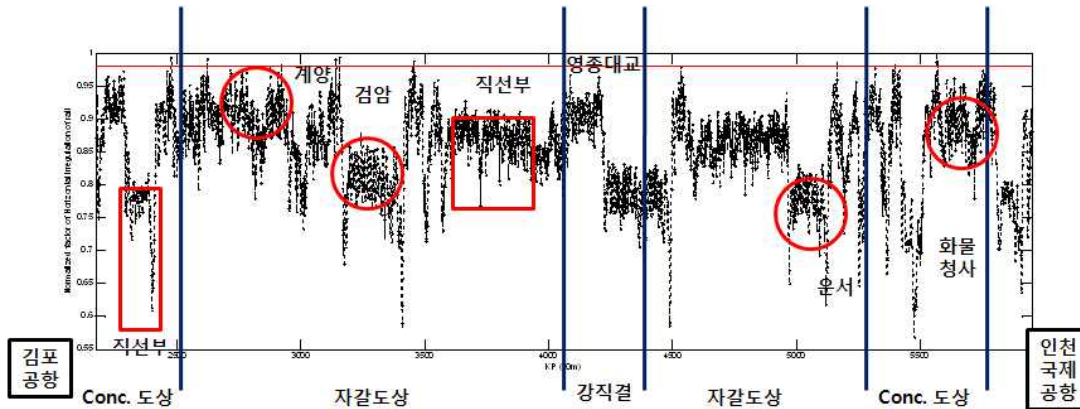


그림 13. 수평 궤도 틀림지수와 구조물 특성 구간 (고정전달함수)

그림 12 및 13에서의 비교결과 비교적 구조물 특성이 반영이 잘되어 나타나며 특히 정거장 부근에서 자갈도상에서 콘크리트도상으로의 변화되는 부분의 특성이 잘 반영되어 나타난다. 한편, 정적 궤도 검측 결과는 궤도의 동적인 사항을 파악해 내지 못하므로 분석결과상 나타난 개소에 대하여 현장 뜯침목 검사 및 육안 검사등을 실시하였다. 하지만 초기 데이터에 의한 틀림치의 초기값에 대한 문제로 상당히 오랜시간 데이터를 누적하여 비교적 선로상태가 양호할 때 초기치의 데이터를 확보하고, 그 후의 궤도틀림이 발생할 때의 결과를 찾아야한다. 본 연구에서는 누적된 가속도 계측데이터와 궤도검측데이터의 궤도변위값을 통해 최적화과정을 거치는 과정에서 노이즈에 대한 민감도 그리고 전달함수를 예측하는 과정에서의 불확도등이 포함되어 궤도틀림데이터와 제안한 알고리즘을 통해 분석된 궤도틀림지수가 신뢰성 있는 정도로 일치되지 않는 것으로 나타났다.

5. 결론

주행중 궤도 선형 틀림개소를 식별해 내고 열차의 안정성을 파악하기 위해 차량에 진동가속도계를 설치하였으며, 동적 틀림개소를 파악하기 위한 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 열차의 진동특성을 분석하고 대표전달특성을 찾는다. 윤축과 대차 및 차체에 부착된 계측데이터를 이용하여 동시계측된 신호중 윤축의 데이터와 전달함수를 이용하여 차체의 Reference 신호를 생성하고 차체에서 계측된 신호와 Coherence 비교를 통하여 열차진동의 비선형성을 규명하였다. 궤도틀림이 발생할 경우 이러한 열차진동의 비선형성이 커지게 되어 역으로 계측데이터를 통하여 열차의 비선형성을 통해 궤도틀림을 산출하였다. 제안된 알고리즘을 통하여 파악된 동적 틀림개소는 실제 동상개소의 발생지점의 조사를 통하여 비교수행을 하였으나 최적화과정에서 노이즈에 대한 민감도와 전달함수 예측에서의 불확도등이 미치는 영향으로 현재로서는 궤도틀림과 신뢰성 있는 정도로 일치하지 않는 결과를 얻었다. 추후 더 많은 데이터의 누적을 통해 궤도틀림에 대한 열차진동특성을 규명하고 최적화된 파라미터 식별을 통해 단순하고 신뢰성있는 궤도틀림 산출 알고리즘이 실제 궤도틀림을 검출 할 수 있을 것이라 사료된다.

참고문헌

1. 함영삼 외, “인천국제공항철도 통근형 차량의 주행안전성 평가,” 한국철도학회 2006년도 추계학술대회논문집, 2006.
2. 김상수, 박춘수, “한국형고속열차 고속 궤도검측시스템,” 한국철도학회논문집, 11권, 2호, pp.115-119, 2008.
3. 허현무, 박준혁, 유원희, 박태원, 양철식 “전동차 차륜담면 마모에 따른 차량 진동 특성 영향 분석,” 한국철도학회논문집, 12권, 2호, pp.230-235, 2009.

4. 김재천, “주파수영역 전달함수를 이용한 궤도틀림 식별”, 한국철도학회 논문집, 제 12권 제4호, pp.506-510
5. 윤경립, “주파수영역 전달함수를 이용한 철도 궤도틀림 식별”, 석사학위논문, 인하대학교 (2008)
6. 건설교통부, 도시철도성능시험에관한기준, 2007.