한국철도학회논문집
제7권 제4호 2004년 ▌ pp.291-295

고속철도 궤도검측 자료 분석기법에 관한 연구

A Study of Analysis Method for the Track Geometry Measuring Data on High Speed Railway

강기동[1]
Kee-Dong Kang

Abstract

The Track geometry measuring on High-speed railway is the most important subject for the track construction and track maintenance work. Also the measuring accuracy is so significant part because it provides principle data for the maintenance plan and the assesment of working quality and can control the train speed limitation. From this point of view, it is very important to verify for the track recording coach(EM120) in KNR. According to the result of spectrum analysis, the noise near 1m waveband was found on the track recording data from EM120. So, New filter has been applied to remove the noise form track recording data. and it makes possible to acquire resembling result to real track geometry.

Keywords : Track recording coach(궤도검측차), Spectrum analysis(스펙트럼분석), Track geometry recording(궤도검측)

1. 서 론

궤도검측차를 이용한 궤도검측의 경우 실제 궤도선형을 완벽하게 재현해 낼 수 없으며 이 때의 검측결과는 검측차량 및 검측센서의 특성, 검측속도 등 여러 요인의 영향을 받아 실제와는 다르게 나타난다. 그러므로 궤도틀림의 정확한 상태를 파악하기 위해서는 검측결과로 얻어지는 자료를 정확히 이해하고 분석하는 것이 필요하다. 특히, 고속철도 궤도틀림은 매우 작은 허용한도를 가지고 있을 뿐만 아니라 검측데이타는 장파장 분석 및 궤도품질지수 산출 등에 활용하고 있어 검측오차는 궤도선형상태를 진단하고 적절한 조치를 내리는데 매우 중요한 영향을 주게 된다.본 연구에서는 고속철도 시험선구간의 검측자료분석을 통하여 1m 부근의 단파장 궤도틀림치에 발생하는 Noise를 발견하고 이를 제거하기 위한 새로운 Filter를 적용하여 그동안 일반철도에서 사용하고 있는 철도청 검측차의 검측자료가 실제 궤도상태에 가까운 값을 나타낼 수 있도록 하였다. 따라서 경부고속철도에서는 이러한 새로운 Filter를 적용하여 궤도검측을 실시한 후 이로부터 궤도틀림현상을 분석하고 그 결과를 활용하여 성공적인 시험운행을 실시한 바 있으며 현재 300km/h의 속도로 상업운행을 하고 있다. 또한, 향후 고속차량의 주행특성 예측 및 유지보수작업 계획수립 등 궤도유지관리 분야에 확대 적용할 수 있도록 검측프로그램의 개발 및 응용분야에 대한 연구[2]를 수행하고 있다.

2. 궤도검측의 이론

2.1 궤도틀림 측정원리

검측차를 이용한 궤도틀림 측정의 기본원리는 각 측정장치(a, b, c)에서 인지된 변위량을 이용하여 다음의 식에 의해 산출되어진다.

$$h_b = b - \frac{a+c}{2} \quad (1)$$

1 정회원, 철도청 고속철도 자문관

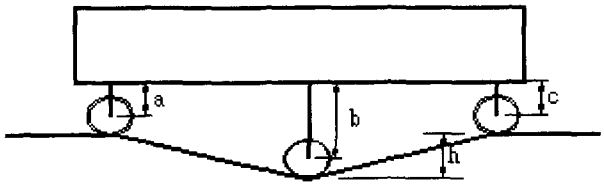


Fig. 1. Principle Drawing of Track Geometry Recording

여기에서 h_b = 측정치
a = 후방 차륜의 위치
b = 측정트로리의 위치
c = 전방 차륜의 위치

이 방식에 의한 측정데이터는 아래 그림 2의 경우와 같이 한 개의 고저틀림이 있는 경우 검측차가 레일 위를 주행하면서 5m간격으로 전후 측정차륜의 위치와 중앙 측정 차륜의 위치에 의해서 측정되는 종거값이 차트에 기록 되어지는 현식으로 실제 선형과는 상이한 파형으로 그래프에 표시된다. 그림 2에서와 같이 실제선형에서의 하나의 고저틀림이 기록 파형에서는 −,+,−로 반전되며 나타나는 바와 같이 궤도의 기하학적 형상은 검측에 의해 완벽히 재현되지 않으므로 이 측정데이터가 궤도의 실제형상을 어떻게 표현하는지에 대해서 이해하는 것이 궤도선형 검측자료를 분석하고 관리하는데 필요하다.

3. 궤도틀림 자료의 분석

궤도검측기록의 분석은 검측항목별로 Transfer Function과 Power Spectrum의 분석을 통하여 검측치가 실제 궤도틀림에 기인된 것인지 검측차의 특성에서 기인된 것인지를 판단하고 이 결과를 Filtering 처리하여 실제 궤도틀림치를 출력하여 분석하는 방법으로 수행된다.

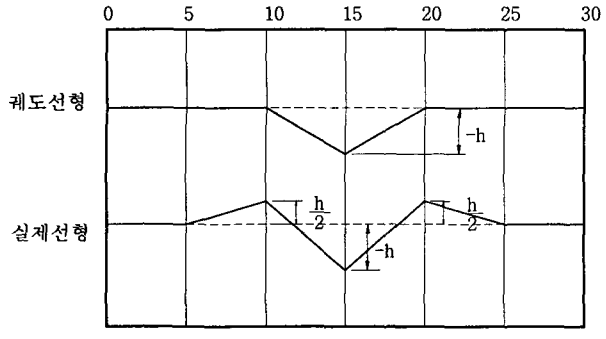


Fig. 2. Comparison between real geometry and recording data

3.1 Transfer Function

궤도검측자료를 분석하기 위하여 검측차에 의해 얻어진 검측값을 실제 궤도 절대틀림값과 비교 분석하거나 검측결과의 신뢰도를 확보하기 위하여 서로 다른 검측 System의 검측결과를 비교하기 위하여 Transfer Function(1)을 사용하며 다음 식 (1)과 같이 Fourier transform에 의한 실제 틀림값과 검측값의 비로서 표현한다.

$$H(v)=Y(v)/X(v) \tag{2}$$

여기서
- v 공간 주파수($v=1/\lambda$)
- Y 검측값의 Fourier transform
- X 실제값의 Fourier transform.

궤도 검측차에 의해 검측되는 모든 항목은 Transfer Function이 있고 여기에는 실제 결함부분과 가상의 결함부분을 포함하고 있다. 실제로 EM 120 검측차의 예를 들면, 고저와 방향의 검측을 위해 10m 현의 대칭 종거를 이용하며 검측된 종거값(y)와 궤도의 위치(x)의 결함간의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$y(z) = x(z) - 1/2[x(z+c) + x(z-c)] \tag{3}$$

여기서
c : 측정현의 1/2에 해당하는 값.
위 식을 Fourier 변환하면

$$Y(\nu) = X(\nu) - \left\{\frac{1}{2}[\, e^{j2\pi\nu c} + e^{-j2\pi\nu c}]\right\} \tag{4}$$

$$Y(\nu) = X(\nu)[1 - \cos(2\pi\nu c)] \tag{5}$$

그러므로 EM-120의 경우 방향 및 고저에 대한 Transfer Function은

$$H(\nu) = Y(\nu)/X(\nu) = [1 - \cos(2\pi\nu c)] \tag{6}$$

로 나타낼 수 있다.

이와 같이 EM-120 검측차의 검측특성은 식 (5)를 통해 실제 궤도결함과 검측결과의 이론적인 관계를 알 수 있으며 검측된 데이터의 왜곡된 부분과 검측현의 길이에 따라 검측 가능한 파역 역시 알 수 있다. 그러므로 Transfer Function은 검측에 사용되는 검측차의 특성을 파악하고 다른 검측시스템으로 검측한 결과와의 비교 등에 사용된다.

3.2 Power Spectrum 분석

주파수영역에서 주기신호는 기본주파수 및 그의 합성된 형태의 성분만을 가지게 되므로 스펙트럼을 살펴보면 불연속적인 선의 형태로 나타나게 된다. 반면에, 비주기신호에서는 주기 또는 기본주파수의 개념이 없어지므로 특정 정현파 주파수 성분이 독립적으로 존재할 수 없게 되고 Fourier transform을 적용하여 얻어지는 스펙트럼은 그 신호가 포함하고 있는 주파수 성분의 크기 분포를 연속적으로 보여주게 된다. 또한 Fourier transform은 주파수영역에서 신호의 스펙트럼 크기 분포를 나타내는 성질이 있고, 이를 적분하면 스펙트럼의 크기가 구해지며 마찬가지로, 주파수영역에서 임의의 신호가 가지고 있는 power 또는 energy의 분포를 나타내는 함수가 있고 이를 적분하여 Power 또는 Energy가 구해진다. 이와 같이 궤도 검측데이터 역시, 넓은 범위의 주파수가 합성된 비주기 파형이며 이 중첩된 합성파형을 Fourier transform 하면 주파수 성분의 Power를 파악할 수 있으며 탁월주파수 영역 및 주요 공간 주파수의 파장을 알 수 있다[2]. 또한 아래 그림 4와 같이 정현파(SIN 곡선)의 데이터가 해당 주파수 이외의 노이즈를 포함 할 경우 노이즈에 대한 주파수 대역 및 노이즈 주파수대의 Power를 알아낼 수 있다.

이러한 분석 방법에 이용하여 고속철도 궤도검측데이터를 주파수분석을 한 결과 다음과 같이 그래프를 얻을 수 있다.

아래 그림 4는 고속철도 시험선 구간의 일부 검측자료를 Spectrum 분석한 그래프로 일반적인 형태는 외국의 검측차의 스펙트럼 분석 결과의 거의 같으나 0.9Hz 부근에서 가장 큰 진폭(Amplitude)을 가지고 있다. 이는 검측데이터에 해당 주파수대의 성분이 가장 많이 포함되어있음을 의미하므로 이에 대한 분석을 통하여 검측결과에 영향을 미치는 파장을 성분을 원인을 규명하는 작업을 수행할 필요가 있다.

0.9Hz의 경우 주파수는 파장의 역수(f=1/λ)이므로 파장(λ) = 1/0.9 = 1.1m이다. 그러므로 이 검측결과는 1m파장에 대한 틀림치가 검측시 가장 많이 검측된 것을 알 수 있으며

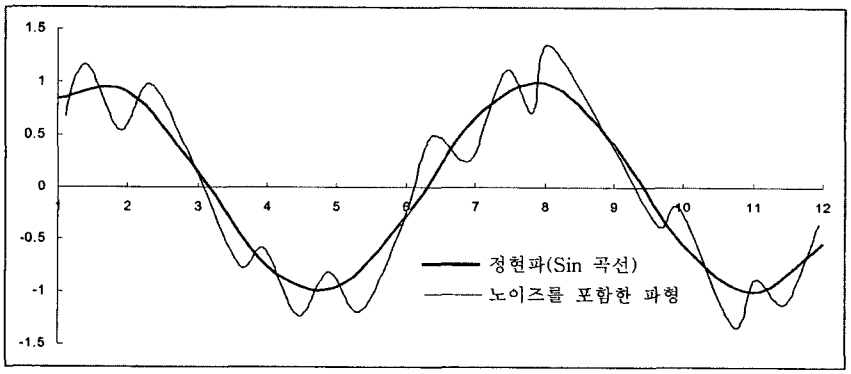
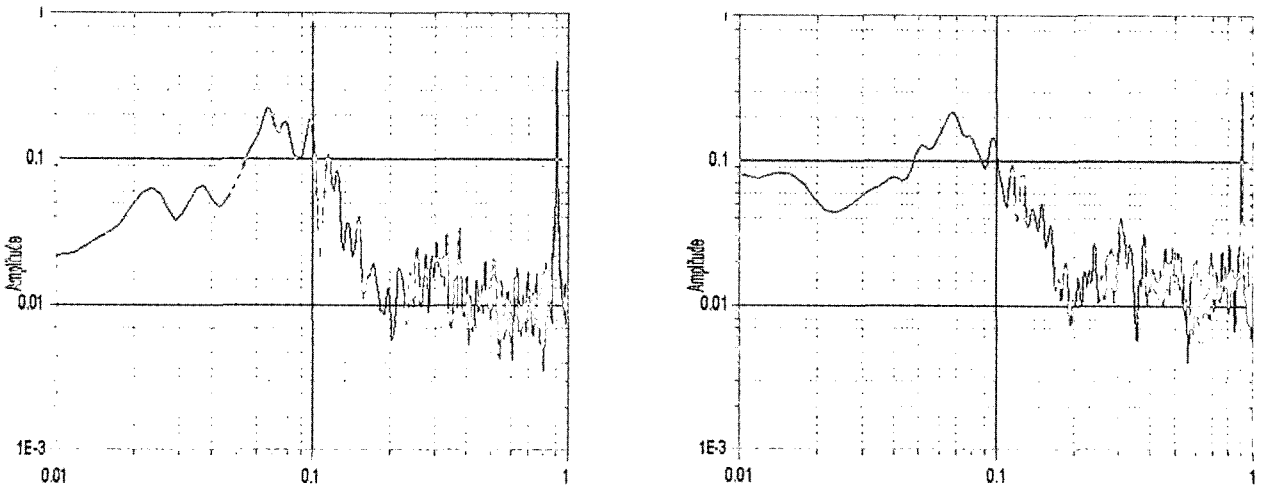


Fig. 3. General shape of signal recording data



(a) 궤도검측결과(1)　　(b) 궤도검측결과(2)

Fig. 4. Spectrum analysis of Track recording data

이러한 고주파영역의 주파수 성분은 궤도선형 틀림에 기인하여 검측된 결과로는 보기 어려우며 검측차의 특성 및 기계진동, 전기신호의 노이즈 등의 문제로 나타나는 것으로 판단할 수 있다. 이러한 현상은 일반적인 신호계측시 뿐 아니라 프랑스(Mauzin 검측차)의 경우에도 나타나며 궤도검측시 검측차의 성능에 따라 매우 민감하게 나타나는 현상이다[3].

3.3 새로운 Filter의 적용

노이즈가 포함되어 나타나는 현상은 신호검측시 일반적으로 나타나는 현상이나 검측결과를 정밀하게 분석하기 위해서는 주파수 대역을 설정하여 필요한 정보를 추출하여 분석하게 된다. 궤도검측 역시 이러한 노이즈를 제거하기 위해서는 검측차를 정비하거나 센서의 상태를 확인하는 등의 작업으로 검측정밀도를 향상시켜 보완할 수 있으나 항상 동일한 조건을 유지하기 어려우므로 필요한 주파수 대역의 자료를 추출하기 위하여 필터처리를 통해 이를 해결하는 방법을 사용한다. 즉, 기본 데이터(raw data)를 적절한 영역에서 필터링처리를 함으로써도 검측결과에 불필요하게 나타나는 현상을 제거시킨다. 위 스펙트럼 분석결과에 따라 나타난 고주파 영역 0.9Hz(λ=1m) 부근의 신호는 궤도선형의 문제로 검측된 결과로 보기에는 파장이 너무 짧은 고주파 대역이므로 검측시 발생한 노이즈로 볼 수 있다. 그러므로 이러한 노이즈를 제거하기 위하여 다음 그림과 같이 2m 이하 구간의 Smoothing Filter를 사용하였다.

EM-120에 의하여 0.25cm간격으로 검측된 Raw data는 아래 그림 5와 같이 매우 불규칙적인 형태로 나타나며 앞서 설명한 바와 같이 이러한 값들은 궤도선형틀림에 기인한 데이터가 아닌 Noise에 해당되므로 다음의 식 (7)과 같이 2m 구간의 산술평균값을 구하여 노이즈를 제거할 수 있다.

$$X_{filter1.00} = \frac{X_{0.00}+X_{0.25}+X_{0.50}+X_{0.75}+X_{1.00}+X_{1.25}+X_{1.50}+X_{1.75}+X_{2.00}}{9} \quad (7)$$

$$X_{filter1.25} = \frac{X_{0.25}+X_{0.50}+X_{0.75}+X_{1.00}+X_{1.25}+X_{1.50}+X_{1.75}+X_{2.00}+X_{2.25}}{9} \quad (8)$$

4. 검측데이타 분석 및 처리 예

여기서는 앞서 설명한 궤도검측자료 분석방법에 의하여 EM-120 검측차로 실시한 시험선구간 궤도검측결과를 3개월의 시간차를 주고 비교분석하여 보았다. 일반적으로 사용하는 검측자료를 출력하여 보면 아래 그림과 같이 일부 구간에서 검측데이타가 매우 복잡한 파형을 나타내며 특수한 경우, 궤도검측결과의 분석이 어려울 정도의 복잡한 파형이 출력된 예를 볼 수 있다(그림 6). 그러나 동일구간에 대하여 3개월 후에 실시한 궤도검측결과는 이러한 불규칙한 현상(Noise)들이 많이 줄어들었음을 알 수 있다(그림 7).

위의 두 검측결과만으로는 실제 궤도의 선형이 얼마만큼 변화했는지를 정확히 알 수가 없다. 즉 검측결과 그래프만을 고려 할 경우 선로의 상태가 양호해 진 것으로 판단되나 그림 6과 같이 복잡한 형태를 가진 파형의 경우 궤도선형에 대한 정확한 분석을 수행하기 어렵다. 그러므로 분석을 위하

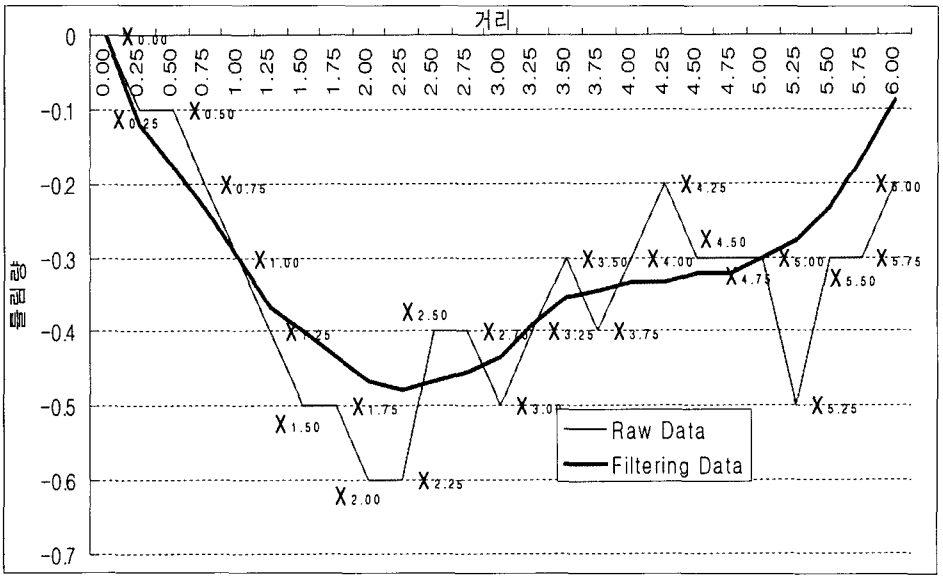


Fig. 5. Application example of Smoothing Filter

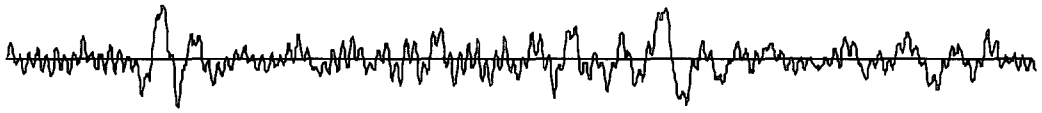


Fig. 6. Track recording data

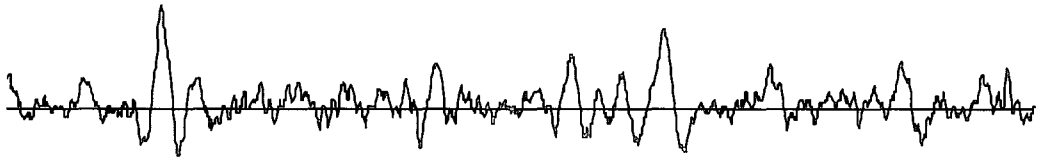


Fig. 7. Track recording data after 3 months

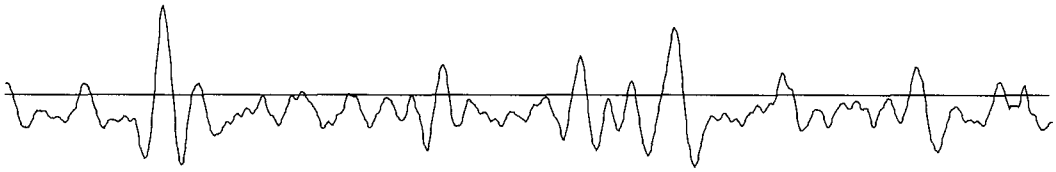


Fig. 8. Filtered track recording data

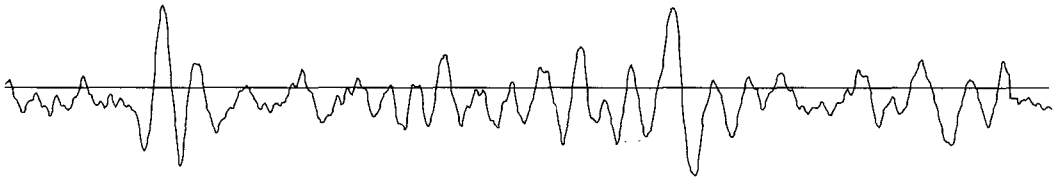


Fig. 9. Filtered track recording data after 3 months

여 그래프에 나타난 파형의 성분에 대한 스펙트럼분석을 수행하고 이에 따른 적절한 필터링을 사용하여 Noise를 제거하여 실제 궤도의 틀림에 기인한 검측치를 얻는 작업을 수행해야 한다. 즉, 이 구간의 검측결과로 나타난 파형의 주파수 성분을 분석할 필요가 있다. 아래 그림 8, 9는 새로운 필터를 적용하여 구한 새로운 선형검측 결과를 보여준다.

필터 처리된 두 검측자료는 거의 동일한 형태와 진폭을 가지는 것을 확인할 수 있으며 궤도틀림의 크기도 앞서 그림 6, 7에서 나타나는 것과는 상이하게 3개월 후의 궤도검측결과가 불량한 것으로 나타났다. 이는 검측자료를 적적히 필터처리 함으로써 실제 궤도의 틀림을 찾아내 당초 출력된 결과와는 달리 이 구간의 궤도의 틀림이 약간씩 진행하고 있음을 나타내는 것이다. 이러한 분석을 통하여 궤도선형 검측자료에서 노이즈를 제거함으로 실제 궤도틀림량을 정확히 검측해 낼 수 있게 하였다.

5. 결 론

고속철도 궤도검측은 공사관리는 물론, 궤도유지관리 측면에서 매우 중요한 과제이며 향후 유지보수시 작업계획수립, 작업량 산출, 열차속도제한등 유지보수시 기본적인 자료로 제공되는 만큼 궤도검측치의 정확성이 매우 중요하다. 이러한 관점에서 국내 검측차(EM-120)의 검측성능과 정확성을 검증하고자 하였다.

이 논문에서는 현재, 철도청에서 일반철도에 사용하고 있는 궤도검측차 EM120의 선형검측자료를 스펙트럼 분석한 결과 프랑스 철도 검측차(Mauzin)의 경우와도 유사한 경향인 파장 1m 부근의 검측치에 Noise가 있는 것을 확인하였으며 이 Noise를 제거하기 위한 새로운 filter를 적용한 결과 실제 궤도틀림치에 더 근접한 검측결과를 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Esveld, C : "Modern Railway Track", MRT - Productions (1989).
2. K. Shiina : "Track Structure and Maintenance of High Speed Railway", (1989)
3. F. Coudert : "Evaluation of the geometric quality of the track", SYSTRA, (2000).