

고속철도의 장파장 궤도틀림 분석에 대한 연구

A Study of the Long Wave Track Defect Analysis for High Speed Railway

강기동¹
Kee-Dong Kang

Abstract

The Study provides the technical background and calculation method for the long wave track defect. On high speed railway, It is necessary to manage the long wave band up to 80m track defect for improving a riding quality. For this reason, Track recording methods for highspeed railway are used 10m and 30m recording bases, these are covered middle wave band and long wave band successfully. Extended base recording data is calculated by geometrical model and this data provides a good result for KTX riding index.

Keywords : Track geometry recording(궤도검측), Long wave track defects(장파장궤도틀림), Track recording coach(궤도검측차)

1. 서론

철도의 연장이 늘어나고 고속화됨에 따라 철도설비를 신속하고 정확하게 점검하고 관리할 수 있는 검측기술의 개발이 열차의 안전과 승차감을 확보하는데 중요한 핵심 기술이 되고 있다.

특히, 궤도 선형검측시 장파장 검측은 고속철도 차량의 승차감을 관리하는 핵심 기술이므로 궤도 검측자료를 통하여 장파장 궤도틀림 분석을 가능하게 하는 것이 고속철도기술에서는 매우 중요한 과제이다. 이 방법에 대하여는 네델란드의 Esveld[1] 와 일본의 Shiina[2]등이 경험적인 기준을 제안하여 고속철도의 궤도유지보수에 적용되어 왔으나, 최근에는 컴퓨터와 소프트웨어기술의 발전으로 해석적인 기법의 적용이 비교적 용이하므로 궤도틀림현상에 대한 다각적인 분석방법이 개발되어 활용되고 있다. 국내에서도 2004년 4월 1일 개통한 고속철도 차량의 300km/h 주행에 따른 안전성과 승차감 확보를 위해 장파장 궤도검측의 분석과 고속차량의 주행특성을 예측하는 등의 기술

을 필요하게 하였다.

따라서 본 연구에서는 고속철도에서 중요시되고 있는 장파장에 대한 검측자료의 분석방법에 대한 연구를 수행하여 유지보수 업무에 활용함으로써 고속열차의 승차감을 향상시키고 효율적인 궤도관리를 할 수 있도록 하였다.

2. 궤도틀림과 검측파장

2.1 궤도틀림의 파장

실제 궤도선형은 아래 Fig. 1에서와 같이 여러 가지 복잡한 파형의 조합이며 각각의 파형들은 그 파장에 따라 궤도 선형 및 승차감에 미치는 영향이 다르게 나타난다. 또한 실제 궤도틀림은 많은 파형과 다양한 진폭을 가지며 복잡한 형태로 검측된다. 이런 파장들은 그 파장의 특성에 맞는 관리가 필요하며 속도별로 승객이 인지할 수 있는 진동영역에 대한 분석과 차량의 고유진동수, 차량의 속도에 따라 공진을 일으키는 파장의 길이 등을 고려한 적절한 파장별 궤도선형 관리가 필요하다.

일반적으로 열차의 속도가 증가될수록 차량의 진동가속에 영향을 주는 파장이 길어지며 고속열차의 경우 30m

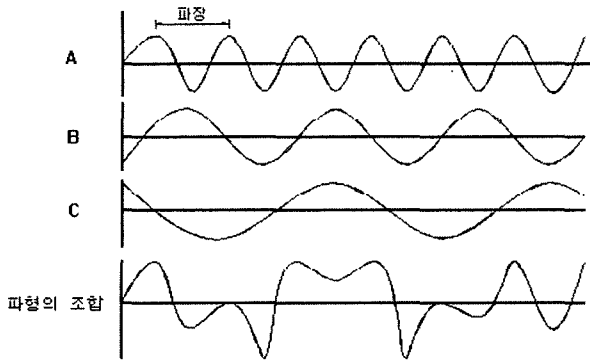


Fig. 1. Compound of waves

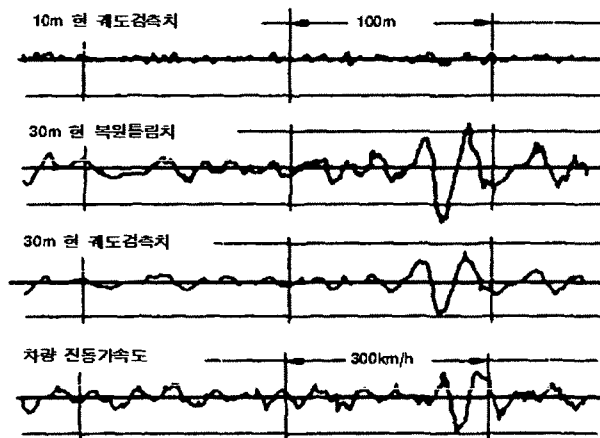


Fig. 2. Comparison track recording data[2]

현의 파장을 선택하여 검측한 결과가 위 Fig. 2와 같이 차량의 진동가속도와 잘 일치하는 현상을 보여주고 있다. 즉 10m 현에 의한 궤도검측결과를 분석한 결과 선로상태가 양호하다고 판단되더라도 해당구간을 주행하는 고속열차의 진동이 크게 발생하는 경우 단파장 및 중파장의 검측결과로는 그 원인을 찾아내기가 매우 어렵다. 그러므로 30m 현의 복원틀림을 계산하여 궤도틀림을 산정하거나 30m 현의 장파장 궤도검측을 통하여 궤도의 상태를 더욱 정확히 판단하고 진단할 수 있다. 복원틀림의 경우 실제의 궤도상태를 보다 정확히 나타내는 방법이나 계산을 위해 복잡한 단계를 거쳐야 하며 장파장 궤도검측은 계산으로 선로의 상태를 비교적 단순하게 파악할 수 있는 유리한 점이 있다.

2.2 파장별 궤도틀림의 영향

고속철도 궤도검측에서 궤도틀림의 파장별 분석은 매우 중요한 과업이다. 궤도틀림의 파장은 Table 1에서와 같이 속도 및 길이별로 소음, 진동, 주행안전성, 승차감 등에 미치

는 영향이 각각 다르다. 소음 및 안전성을 고려할 경우 단파장에 대한 관리가 필요하고 승차감의 확보를 위해서는 장파장에 대한 관리가 필요하다. 이는 궤도검측이 단순히 측정파장의 진폭(최고, 최저치)만을 측정하는 것이 아니고 파의 길이(파장)에 대한 정보를 얻는것도 함께 이루어져야 한다는 것을 뜻하는 것이다. 고속철도의 경우 궤도틀림에 의하여 열차의 진동이 발생하는 경우 단파장 및 중파장에 대한 검측결과로는 궤도의 선형상태를 파악할 수 없으며 열차의 진동을 발생시키는 장파장 궤도틀림은 분석을 통해서 확인이 가능하다. 그러므로 고속철도에서는 고속주행에 따른 승차감을 확보하기 위하여 장파장에 대한 궤도관리를 수행하여야 한다.

열차가 일정한 속도로 선로를 주행하는 경우, 열차의 속도에 따른 궤도틀림 파장과 차량의 진동주파수의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f = v \frac{1}{\lambda} \tag{1}$$

여기서 f : 주파수

v : 초속(300 km/h 일 경우 83.3 m/s)

λ : 파장

고속철도의 경우 객차시 고유 진동주파수가 1~1.5 Hz 범위이므로 이 주파수 영역에서 가장 큰 진동발생이 나타난

Table 1. The influence between velocity and track defect waveband

구 분	60~130km/h	160~240km/h	270~300 km/h
단파장 (mm~1.5m)		소음, 진동 주행안전성	소음, 진동 주행안전성
중파장 (5.0m~20m)	주행 안전성 승차감	주행안전성 승차감	주행안전성
장파장 (30m~100m)		승차감	승차감

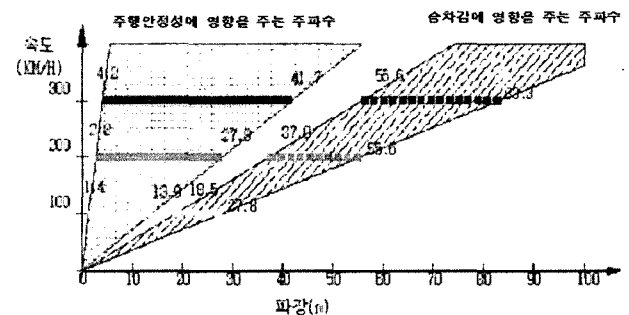


Fig. 3. Important waveband for train velocity[1]

다. 그러므로 열차속도가 300km/h(83 m/s)인 경우 승차감에 영향을 주는 파장을 계산해 보면 약 56~83m를 구할 수 있다. 즉 고속철도와 같이 고속으로 열차가 주행하는 경우 50m 이상의 장파장 궤도틀림이 승차감에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 그러므로 고속철도의 궤도관리를 위하여 이 파역에 대한 검측이 반드시 필요하다. 아래 Fig. 3은 각각의 속도에 따른 궤도틀림파장과 주행안정성이나 승차감에 영향을 주는 차량진동주파수와와의 관계를 나타낸 것이다.

3. 장파장 궤도 틀림

3.1. 검측배율에 대한 검토[3]

일반적인 궤도검측에서 각각의 검측차는 고유의 측정현을 가지고 있다. 이러한 측정현의 길이는 검측차의 검측특성 즉, 검측배율이 정하여지며 이에 따라 검측 파장에 대하여 측정되는 진폭이 달라지게 된다. 각 측정현에 대한 파장별 검측배율을 확인하기 위해서는 궤도 검측차에 의해 검측되는 검측결과가 실제 궤도선형을 어떻게 반영하고 있는지를 분석하여야 한다. 현재 철도청에서 사용되고 있는 EM-120 검측차와 같이 10m현의 대칭 증거값을 취하는 검측방식일 경우 검측값과 실제 궤도틀림의 관계는 아래 식과 같이 표현할 수 있다.

$$y(z) = x(z) - 1/2[x(z+c) + x(z-c)] \quad (2)$$

여기서

$y(z)$: 검측 값

$x(z)$: 중앙 검측센서에서 측정된 실제 값

$x(z+c)$: 전방 검측센서에서 측정된 실제 값

$x(z-c)$: 후방검측센서에서 측정된 실제 값

c : 측정현의 1/2에 해당하는 값.

위 식 (2)를 주파수 영역으로 Fourier 변환하면

$$Y(\nu) = X(\nu)[1 - \cos(2\pi\nu c)] \quad (3)$$

여기서

ν : 공간주파수 (파장의 역수)

와 같이 나타 낼 수 있다. 이 식에서 검측배율은 검측값/실제값으로 검측배율을 구하는 공식은 다음과 같다.

$$H(\nu) = Y(\nu)/X(\nu) = [1 - \cos(2\pi\nu c)] \quad (4)$$

위 공식을 이용하여 파장 80m의 실제 궤도틀림치가 발생한 경우 10m 측정현으로 측정된 검측배율을 계산해 보면

$H(\nu) = [1 - \cos(2\pi\nu c)] = [1 - \cos(2\pi \frac{c}{\lambda})] = [1 - \cos(2\pi \frac{10}{2 \times 80})] = 0.076$ 으로 계산된다. 즉 80m 파장의 궤도틀림이 10mm 발생한 경우 10m 현에 의한 검측값은 0.76mm로 거의 검측이 되지 않음을 알 수 있다.

그러므로 장파장 궤도틀림을 충분히 검측하기 위해서는 측정현의 길이를 적절히 선택하여 검측하는 것이 중요하다. Fig. 5.는 식 4을 이용하여 여러 가지 측정현으로 검측을 하였을 경우 나타나는 검측배율(Transfer Function)을 나타낸다. Fig. 5.에서 보여지는 바와 같이 25m 이상의 파역에서는 중파장 현인 10m현으로 검측할 경우, 검측배율이 현격히 감소되어 궤도틀림의 약 50 %정도만 측정이 가능하므로 25m 이상의 장파장 파역에 대한 궤도틀림관리는 30m 혹은 40m 현을 사용하는 것이 유용하다. 그러나 40m 현에 의한 검측의 경우 승차감 및 안정성과 관련되는 17.5m~27.5m 영역의 파장에 대한 검측비율이 급격히 떨어지며 20m파역에서는 검측이 되지 않는 결점이 있음을 확인할 수 있다. 그러므로 검측배율의 영향과 차량 및 승차감을 고려할 경우 가장 넓은 파역의 관리가 가능한 장파장 측정현으로 30m를 사용하여 검측하는 것이 가장 적절한 것으로 판단된다. 또한, 프랑스 국철(SNCF)의 경우에도 30m 현에 의한 장파장 관리를 시행하고 있다.

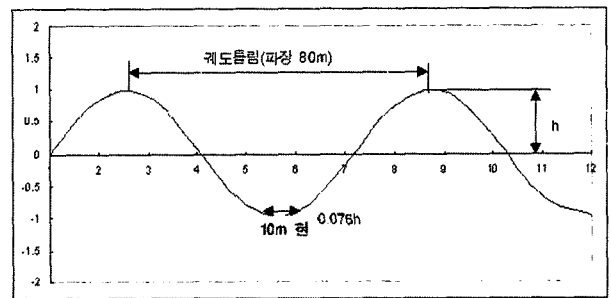


Fig. 4. The principle of track measuring base

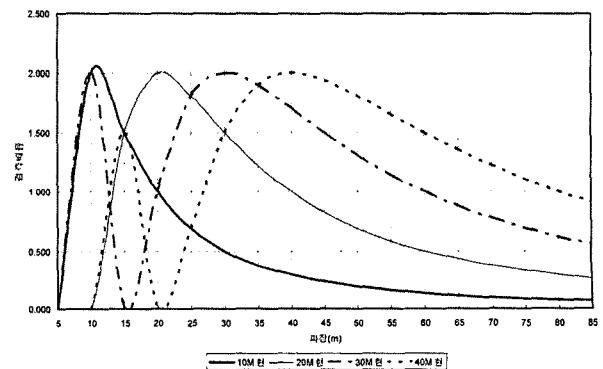


Fig. 5. Transfer function

3.2. 장파장 궤도틀림의 계산

중파장 궤도검측의 경우, 검측차에 부착된 측정센서의 배치에 따라 직접 측정되거나 장파장 궤도검측의 경우는 검측차의 길이에 대한 제한 등으로 필요한 측정현을 확보하기 곤란하므로 중파장으로 측정된 검측자료에 의하여 기하학적인 계산방법을 통하여 산출해 내는 방식을 사용한다. 즉, 장파장에 대한 궤도틀림의 산출은 검측차에 의해 측정된 10m 현에 대한 종거(Versine)값을 이용하여 10m의 정수배(20, 30, 40..)가 되는 현의 종거값을 Fig. 6. 같은 기하학적인 모델에 의하여 산출하여 적용한다.

이러한 기하학적인 궤도틀림검측 개념에 따라 10m현의 궤도검측자료로부터 20m, 30m, 40m현의 종거값을 계산하면 다음과 같다.

$$20\text{m현의 종거 계산 : } X_{20} = X_1 + 2 \cdot X_2 + X_3 \quad (5)$$

$$30\text{m현의 종거 계산 : } X_{30} = X_1 + 2 \cdot X_2 + 3 \cdot X_3 + 2 \cdot X_4 + X_5 \quad (6)$$

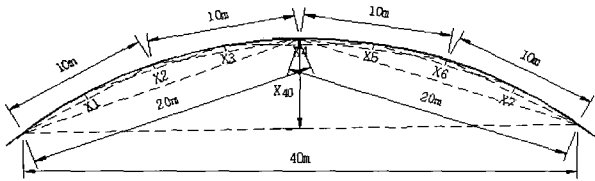


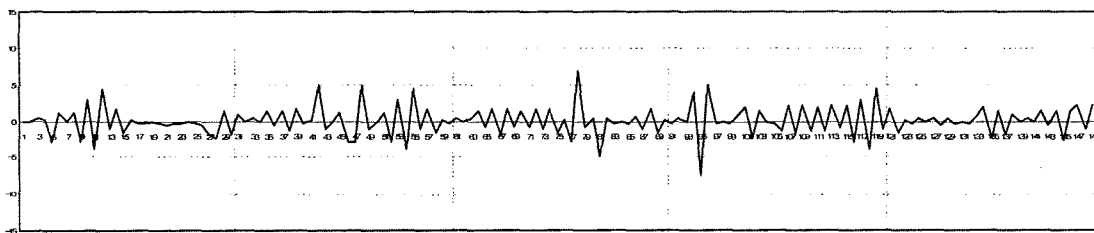
Fig. 6. Extended base calculation model

$$40\text{m현의 종거 계산 : } X_{40} = X_1 + 2 \cdot X_2 + 3 \cdot X_3 + 4 \cdot X_4 + 3 \cdot X_5 + 2 \cdot X_6 + X_7 \quad (7)$$

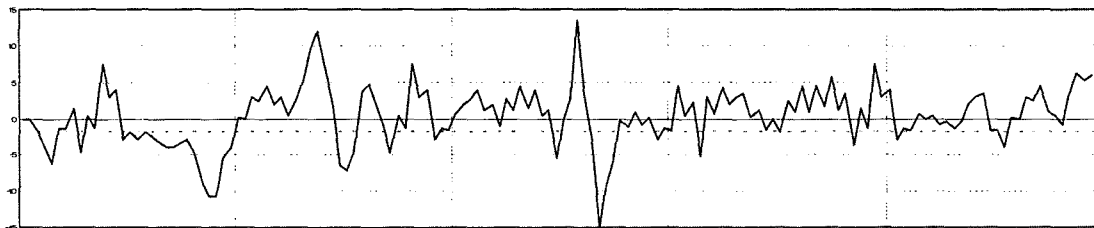
3.3 철도청 검측차(EM120)를 활용한 적용 결과

장파장 궤도틀림의 계산은 검측차 내에서 실시간으로 처리하거나 검측 후 데이터를 분석할 때 계산하여 처리하는 두 가지 방법으로 적용이 가능하다. 먼저 실시간 처리하는 경우 아날로그 신호의 필터링이 필요하며 기존의 검측차 시스템의 변경 및 추가 설치 등에 따른 많은 비용과 시간이 소요된다. 두 번째 방식인 후-처리방식은 검측차로부터 얻어진 데이터를 저장매체에 저장하여 분석용 컴퓨터 시스템에 자료를 입력, 분석하는 방식으로 실시간 처리가 되지 않는 단점이 있으나 별도의 분석시스템만 구비하면 기존 시스템의 변경 및 추가 설치가 필요치 않으며 원하는 방식의 계산 및 분석이 가능하다. 현 시점에서 새로운 고속 검측 시스템을 도입하여 안정화 시킬때까지는 많은 시간과 비용이 소요되므로 우선 철도청에서 보유하고 있는 현재의 검측차인 EM120을 활용하여 장파장 궤도틀림을 계산하고 선형자료를 출력하는 시스템을 구축하는 것이 가장 효율적인 방안이다.

이 방법은 현재 EM120 검측차의 On-Board상에서 20m 파장을 계산하는 방식으로 사용되며 Offboard Analysis System에서 30m 장파장 계산법에 동일하게 사용되었다. 이를 위하여 EM120의 10m현 검측자료를 자동 입력하고 30m 현 계산결과를 종방향축척 10cm/km 횡방향축척 1:1로 연속 출력하는 시스템을 구축하였다. Fig. 7.은 철도청의 EM120



(a)Track Recording Result by 10m Base(Measuring)



(b)Track Recording Result for 30m Base(Calculation)

Fig. 7. Comparison track recording data Between 10m & 30m Base

검측차로부터 검측된 10m현 궤도 틀림치로부터 식 (6)의 계산식을 적용하여 출력한 30m장파장 궤도 검측자료의 일 예이다.

새로 구축된 시스템으로부터 출력된 장파장 궤도틀림 값은 프랑스 고속철도 장파장 궤도 틀림 값과 비교하여 매우 근사한 결과를 보여주고 있으며 300km/h로 운행되는 고속차량(KTX)의 객차 동요현상과도 잘 일치하고 있다. 그러나 궤도관리의 효율성을 높이기 위해서는 실시간으로 궤도의 장파장을 검측 출력 할 수 있는 새로운 고속 검측 시스템의 도입이 필요할 것이다.

4. 결론

지금까지 일반철도에서 중점 관리하여온 중파장 궤도검측만으로는 고속차량의 승차감 관리가 곤란하므로 승차감에 영향을 미치는 객차의 동요와 밀접한 관계가 있는 장파장 궤도 틀림을 검측하는 기술의 도입이 필요하게 되었다.

본 연구에서는 장파장 영역의 궤도틀림을 산정해 낼 수 있는 방안을 기술적인 배경 및 적용방안과 함께 제시하였다.

2004년 4월 1일 개통한 경부고속철도 선로에서 장파장궤도틀림에 대한 검측을 고속철도에 직접 적용할 수 있도록 기하학적인 계산과 분석자료 출력을 위한 전산프로그램을 함께 제시하였다. 또한 종래 사용되고 있는 10m 검측 자료로부터 30m 장파장의 궤도틀림을 분석하여 장파장 궤도틀림 개소를 도출한 결과 고속차량의 동요현상과 잘 일치하고 있음을 확인하였으며 장파장궤도틀림의 보수작업에 활용하고 있다. 따라서 현재 철도청에서 운용하고 있는 궤도검측차는 향후 신행궤도 검측차량이 도입 운용될 때까지 고속차량의 300km/h 주행에 필요한 궤도관리를 충분히 담당할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Esveld, C : "Modern Railway Track", MRT - Productions pp.513-515, 2001.
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.