

궤도측정을 위한 계측시스템의 기술동향 및 구성방안

한영재*, 김종영*, 서승일*, 김석원*, 강운석*
*한국철도기술연구원

Technical Trend of Measuring System for Track Inspection

Young-Jae Han*, Jong-Young Kim*, Sung-Il Seo*, Seog-Won Kim*, Yun-Suk Kang*
*Korea Railroad Research Institute

Abstract - 현재 한국형 고속전철은 시운전 시험 중에 있으며, 차량 내에 상시 계측시스템이 구성되어 있어서 차량의 전기장치 신호나 기계장치 신호를 획득하여 주행 및 제동에 관한 성능 및 특성을 분석하고 파악할 수 있다. 하지만 차량의 안전성, 승객의 승차감 확보와 궤도의 빠른 유지보수를 위해 궤도를 전문적으로 감시하고 검측하는 시스템은 구축되어 있지 않다. 그러므로 고속전철 차량에 설치되어 고속주행 중에 궤도를 종합적이고 효율적으로 측정하는 전문적인 계측시스템을 구성할 필요가 있다. 따라서 궤도틀림의 검측방법과 검측기구 및 그 원리를 이해하고 선진국의 궤도 검측기술을 파악하여 보았다.

1. 서 론

최근들어 경부고속전철이 2004년 4월부터 개통되어 상업 운행 중에 있으며, 국내의 최첨단 기술로 이루어낸 한국형 고속전철이 2002년 8월부터 시운전 시험 중에 있다. 이러한 고속철도의 비약적인 발전을 통해 국내의 철도산업은 바야흐로 르네상스 시대를 맞이하게 되었다. 따라서 열차의 주행속도, 승차감, 환경친화성 등 쾌적한 고속철도를 구현하기 위하여 다방면에서 끊임없는 요구가 이어지고 있다. 마찬가지로 궤도에 관해서도 차량의 흔들림을 억제하고 효율적인 선로 보수를 위해 항상 새로운 지식이 요구되고 있다.

열차를 지지하고 원활하게 유도하는 궤도는 하부로 전달되는 하중을 완화하여 구조물을 보호한다. 또한 열차의 주행 안전성 및 승차감은 궤도의 성능에 따라 직접적인 영향을 받으며, 대부분의 환경소음 및 진동은 궤도의 틀림에 의해 발생된다고 할 수 있다.

200km/h 이상을 상용하는 고속선의 궤도는 그 고속성에서 궤도틀림의 진행이 기존선의 궤도와 비교하여 현저하게 크며, 궤도틀림의 변화가 열차동요 등의 변화에 크게 영향을 미친다. 또한 열차가 고속으로 주행하는 경우에서는 주행안전성 및 재료파괴에 영향을 미치는 단과장 및 중과장은 물론 승차감에 영향을 미치는 장과장의 궤도틀림이 많이 발생한다. 따라서 궤도 검측차량이나 검측기구를 이용하여 일정한 주기로 궤도를 검측함으로써 궤도틀림, 동요치, 소음치, 축상 가속도 등의 데이터를 수집하고 그 수치를 분석하여 궤도를 보수해야 한다.

본 논문에서는 궤도틀림을 검측함에 있어서 관성법이나 차분법을 이용한 검측방법과 자이로스코프 및 위치검출소자(이하 PSD)와 같은 검측기구에 대하여 알아보았다. 또한 일본의 궤도틀림 검측기술 동향에 대해 살펴 보았다.

2. 본 론

2.1 궤도틀림

궤도틀림의 종류에는 궤간틀림, 수평틀림, 면(고저)틀림, 줄(방향)틀림, 평면성틀림, 복합틀림과 같이 크게 6개 항목으로 크게 나눌 수 있으며, 그림 1과 같다.

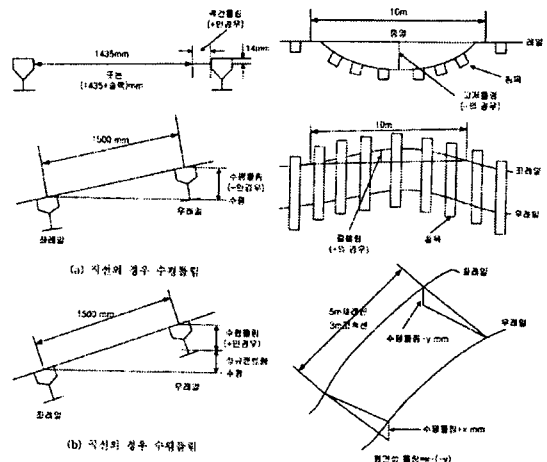


그림 1. 궤도틀림의 종류

궤간틀림은 좌우 레일 간격의 틀림, 즉 정규 궤간의 기본 치수인 1,455mm에 대한 틀림량이며, 곡선부에서는 설정 슬랙(slack)량을 기본 치수에 더한 것에 대한 틀림량을 말한다. 일반적으로 레일 마모, 레일 체결장치의 밀어낸 등으로 인해 확대되며, 간혹 레일 플래이트, 침목의 직각 틀림 등으로 인해 축소되는 경우도 있다.

수평틀림은 궤간의 기본 치수에서의 좌우 레일의 높이 차를 말한다. 궤간의 기본 치수 대신에 좌우 레일의 중심 간격인 1,500mm 사이의 높이를 수평으로 하고 있다. 곡선부에 캔트(cant)가 있을 경우 설정된 캔트량을 더한 것을 기준으로 하여 그 증감량으로 나타낸다. 주로 좌우 레일의 불균등 침하로 인해 발생된다.

면(고저)틀림이란 레일 상면의 길이방향 요철면을 말하며, 일반적으로 길이 10m의 실을 레일 두부 상면에 잡아당겨, 그 중앙부에서의 실과 레일의 수직거리로 면(고저)틀림을 나타낸다. 궤도의 길이 방향의 불균형 침하, 특히 레일 이음부의 침하로 인해 발생하기가 쉽다.

줄(방향)틀림이란 레일 측면의 길이 방향의 요철면을 말하며, 면(고저)틀림과 같이 일반적으로는 10m의 실을 레일 측면에서 잡아당겨 그 중앙부의 실과 레일과의 수평거리를 말한다. 횡압에 의한 궤간의 횡이동, 레일의 편마모 등에 의해 발생한다.

평면성틀림이란 평면에 대한 궤도의 비틀림 상태를 나타내는 것이며, 궤도의 일정 거리에 있는 2점간의 수평틀림의 대수차이로 나타낸다. 또한 복합틀림은 줄과 수평이 역위상으로 복합되어 있는 틀림을 말한다.

2.2 검측방법

레일의 길이방향의 궤도틀림인 줄(방향)틀림, 면(고저)틀림을 검측하는 방법에는 관성측정법과 차분법이 있으며, 검측차량의 차체 동요가 검측된 궤도틀림에 나타

나지 않도록 고안된 방법이다.

2.2.1 관성측정법

관성측정법은 가속도가 변위의 2차 미분이라는 원리를 이용하면서, 가속도를 검출하여 이것을 2회 적분함으로써 궤도틀림을 구하는 것이다. 이 방법은 1대차만으로 검측이 가능하고, 어떠한 차량도 검측차량이 가능하다는 점과 검측 특성을 목적에 따라 비교적 자유롭게 설계할 수 있다는 것이다. 반면에 주행속도가 느린 경우에 검측 정도가 나쁘고, 가속도의 검출이나 적분에 특수한 기술이 필요하다는 것이다.

면(고저)틀림을 검측하는 관성측정법에는 ①축상에 직접 가속도계를 설치하여 검출되는 가속도를 2회 적분하여 레일의 변위를 구하는 가속도계만을 이용하는 방법이 있으며, ②가속도계를 차체에 설치하여 2회 적분으로 차체의 변위를 구하고, 별도의 변위계를 이용하여 차체와 레일의 상대 변위를 구해서 두 변위값을 가산함으로써 레일 변위를 구하는 가속도계와 변위계를 이용하는 방법이 있다. 그러나 줄(방향)틀림에 대해서는 후자의 방법만을 사용할 수 있는데, 이는 전자의 방법에서 주행 차륜 축상의 좌우 변위가 레일의 좌우 변위와 동일하게 움직이지 않기 때문이다. 그림 2에서 (a)는 가속도계만을 이용하는 방법을, (b)는 가속도계와 변위계를 이용하는 방법을 보여주고 있다. 궤도틀림에 생기는 가속도의 크기 a 는 궤도틀림의 진폭 d , 파장 l 및 검측차량의 주행속도 v 에 의해 변화한다.

$$a = d \cdot (2\pi) \cdot \left(\frac{v}{l}\right)^2$$

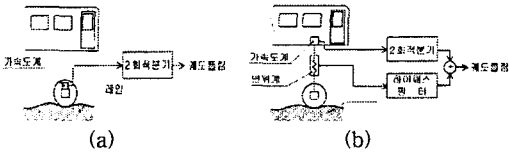


그림 2. 관성측정법의 방법

2.2.2 차분법

차분법은 복수의 지점에서의 레일 변위의 차를 이용하여 궤도틀림을 구하는 방법으로서 정시법이나 편심시법 등이 있다. 이런 방법들은 주행속도가 검측 정도에 그다지 영향을 주지 않고 순수하게 기계적인 방법으로 검측이 가능하다는 점이다. 또한 여러 검측점에서 레일 변위를 검출하기 때문에 대차 간격과 같은 차량 제원에 대하여 검측 특성이 좌우된다. 차분법은 레일 변위를 검출하는 점이 2개 이상이면 가능하지만, 검출점이 3개로 간격이 같을 경우를 정시법(중앙 중거법)이라 하고, 간격이 다를 경우를 편심시법(편심 중거법)라고 한다.

차분법에는 다음의 식과 같이 각각의 검출점에서 검출된 레일 변위량에 대하여 적당한 가중치를 두어 가산하는 것에 의하여 검측차량의 동요에 영향을 받지 않는 값으로 궤도틀림을 검출할 수가 있다.

2.2.3 관성정시법

현재 궤도 검측차량에서는 일반적으로 3개의 측정축을 이용하여 현의 중앙과 레일의 이격을 구하는 정시법이 이용되고 있다. 그러나 이 방법은 검측차량의 차체나 차륜 주변의 구성에 제약이 있으며 고가이다. 또한 현의 중앙 이외의 점과 레일의 변위를 틀림량으로 하는 편심시법을 이용하여 차체나 차륜 주변의 제약은 경감되지만 3개의 측정축이 필요하기 때문에 여전히 고가이다.

한편 관성측정법은 영업 차량에 탑재하는 등 자유롭게 구성할 수 있으며, 저비용으로 제작이 가능하다. 그러나 궤도틀림을 검출할 경우에 가속도계 자체가 갖는 오차와 가속도계 경사에 의한 오차를 고려할 필요가 있으며, 특히 안정적인 2회 적분을 위해 실시하는 고역통과 필터

처리에 의해 얻는 궤도틀림 파형에 비틀림이 발생한다는 결점이 있다. 따라서 이런 결점이 발생하지 않는 방법을 고안하여 관성정시법이 고안되었다. 관성정시법은 관성측정법에 정시법의 특성을 도입하여 2회 적분을 안정화시키는 동시에 출력으로 정시틀림을 얻는 방법이며, 그 원리는 그림 3과 같다.

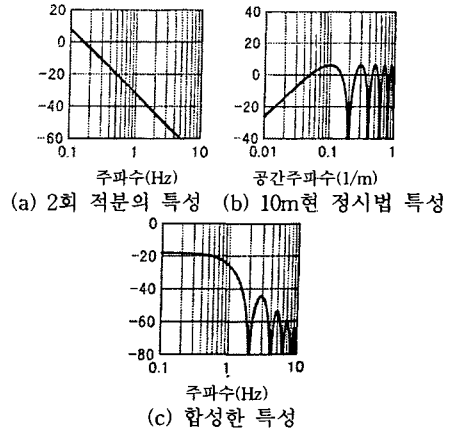


그림 3. 2회 적분과 정시법 특성의 합성

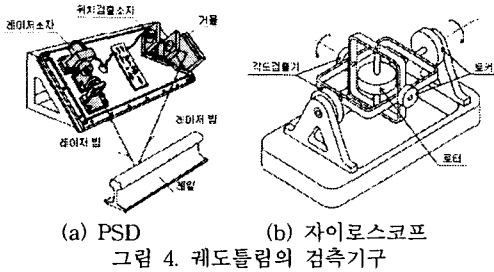
가속도의 2회 적분의 주파수 특성 함수는 주파수 0에서 이득이 무한대가 되어 2회 적분이 불안정해지는 원인이 된다. 한편 정시법의 검측 특성 함수는 저주파에서 감쇠하며, 그 감쇠 기울기는 2회 적분의 저주파역에서의 증가 기울기와 같다. 따라서 양자를 합성한 특성으로 가속도를 처리하면 주파수 0에서의 이득값이 유한해져 안정적 연산이 가능하며, 출력은 정시틀림 파형이 된다.

2.3 검측기구

궤도틀림을 검측할 경우 궤도 검측차량에 필요한 검측 기구는 틀림의 종류에 따라 다르다. 먼저 궤간과 줄(방향)틀림에 대한 검측기구로는 측정차륜장치와 광학식 측정장치 그리고 전자식 측정장치 등이 있으며, 레일의 좌우 방향 변위를 검출한다. 측정차륜장치는 측정차륜이 항상 레일 측면에 접촉하여 있을 필요가 있어 강한 힘이 필요하기 때문에 고속주행시의 검측에는 한계가 있다. 광학식 측정장치는 고속선로용 궤도검측을 위해 개발되었으며, 비접촉으로 레일 변위를 검출하지만, 빛을 이용하고 있는 관계로 겨울철의 다설지역에서는 검측이 불가능하다. 전자식 측정장치는 와전류 현상을 응용한 것으로 기후 등의 환경 조건에 강하다. 그러나 자력선이 넓어서 변위의 검출점이 특정될 수 없고, 마모 레일에서는 오차가 생기며, 레일에 근접하게 설치해야 한다.

면(고저)틀림의 검측기구에는 상하 방향 변위의 검출에 주행 차륜을 이용한다. 주행 차륜은 주행중에 항상 레일에 접촉하여 있어 레일의 상하 방향 변위는 주행차륜 축상의 상하 방향 변위로서 검출할 수 있다. 또한 수평틀림의 검측기구에는 레일의 상하 방향 변위의 검출과 수평면의 기준으로 되는 수준기와의 조합으로 구성된다.

비접촉 방식에 의한 횡방향 변위를 측정하는 대표적인 광학식 검측기구로서는 광원으로서 반도체 레이저를 이용하고 카메라로서 경량 소형의 위치검출소자를 이용하는 PSD 방식이 있으며, 그림 4의 (a)와 같다. 또한 궤도 검측차량의 수준기로서 사용되는 자이로스코프 장치에는 기계식과 광학식이 있다. 기계식은 그림 4의 (b)와 같으며, 광학식으로는 레이저 및 화이버 자이로스코프가 있다.



(a) PSD (b) 자이로스코프
그림 4. 궤도틀림의 검측기구

2.4 해외사례

일본의 신칸센에서는 장과장의 궤도틀림에 영향을 받은 승차감을 향상시키고 단과장의 궤도틀림에 기인한 운중 변동을 억제하기 위한 목적으로, 고속주행을 위한 궤도틀림 검측과 관리에서 많은 연구가 이루어지고 있다.

속도와 승차감을 향상시키기 위해서 40m현 정시법으로 차량의 진동과 관련된 장과장의 궤도틀림을 관리하고 있다. 특히 노선 전체에 걸쳐 일률적으로 관리하는 것이 아니라, 연속된 궤도틀림, 줄(방향)틀림과 수평틀림의 중복, 곡선중의 종곡선과 같은 차량의 흔들림이 큰 조건을 갖춘 구간에 대해 중점적으로 관리하고 궤도 검측 데이터를 적절하게 추출하는 방법을 검토하고 있다. 또한 궤도의 줄(방향)틀림보다는 레일의 마모량의 차이로 인해 차량이 좌우로 움직일 수 있으며, 레일과 차륜의 접촉 상태는 차량의 진동과 안정적 고속주행에도 관련된 문제로서 속도와 승차감 향상에 매우 중요하다.

단과장 영역의 궤도틀림에 기인한 운중 변동은 주행 속도의 증가와 함께 증대하므로 적절한 관리가 필요하다. 레일 용접부와 레일 파상 마모 등의 요철은 운중 변동의 원인이 되며, 보수는 레일 삭정에 의한다. 요철 파형은 레일 파상 마모에 대응하는 1.7m현 정시법과 국부적인 패임에 대응하는 6cm현 정시법에 의해 평가되며, 최근에는 30cm현과 3cm현을 이용한 편심시법을 이용한다. 또한 운중 변동 검출에는 차량의 대차 축상에서 측정되는 축상 가속도가 효과적이며, 그림 5와 같이 축상 가속도와 운중 사이에는 매우 유사한 주파수 특성이 있다. 부목이나 레일 용접부에서의 변동과 같은 축상 가속도의 파형 성분은 최근 주목받고 있는 웨이블릿 해석을 실시하여 주파수 대역별로 추출할 수 있다.

일본의 재래선에서는 마야34형 궤도 검측차량 내에 가속도계, 적분회로, 자이로스코프 장치 등을 설치하고, 차체와 레일간의 변위를 구하여 관성정시법에 의한 궤도틀림 검측의 성능이 입증되었다. 이 방법은 실용성 문제가 없는 정밀도로 실현이 가능하고, 영업 차량에 적용이 가능하며, 저렴한 방법으로 유명하다고 볼 수 있다. 여기서 특징적인 것은 그림 6과 같은 센서 유닛으로 대차틀에 직접 설치되며, 새로운 광학식인 2축 레일 변위계가 사용되었다.

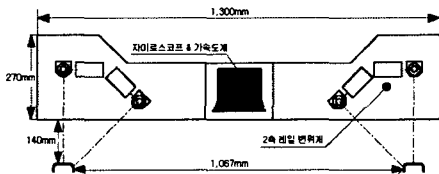


그림 6. 센서 유닛의 구성

자이로스코프는 가속도계 근처에 내장하고 수평틀림 검측에 이용하는 동시에 가속도계의 경사 보정에도 이용된다. 이와 같은 보정으로 저속시의 검측 정밀도에 문제가 있는 관성측정법에서 10km/h대의 저속까지 실용적인 검측 정밀도를 유지할 수 있다.

또한 궤도 검측차량의 속도 향상을 위해 차량의 경량

화가 필요하며, 주행 성능이 낮은 중간대차의 생략이 필요하다. 이에 차분법의 일종인 기존의 3대차 정시법에서 2대차 편심시법으로 전환되었으며, 그 기본 구조는 그림 7과 같다. 또한 궤도 검측차량의 차체 이외에서 기준선을 만들고 소형 경량화를 위하여 PSD를 이용한 레일 변위 검출기를 사용하였다. 그러나 고속 검측이 가능한 2대차 검측시스템은 검출기의 설치 위치 관계상, 측정 프레임의 편칭 진동에 의한 검출기의 상하 움직임으로 검측 오차가 발생할 수가 있다.

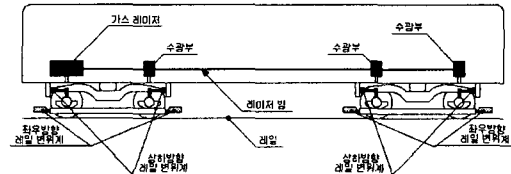


그림 7. 2대차 궤도 검측차량의 구조

신칸센에서는 새로운 닥터 엘로우인 923형 종합 궤도 검측차량이 2001년부터 운행하고 있다. 이 검측차량은 270km/h에서의 검측 주행을 구현하기 위해 2대차 차체를 사용하고 있으며, 차체 구조의 변경에 따라 2.5m현과 17.5m현의 편심시법으로 궤도틀림을 검출한다. 기존의 10m현 정시법에서는 파장 5m의 검측 배율이 0배여서 전혀 궤도틀림 검출이 불가능한데, 이러한 편심시법에서는 최대 2배율로 궤도틀림을 검출할 수 있다.

3. 결 론

본 논문은 궤도 검측차량에서 일반적으로 사용되는 관성법과 차분법, 그리고 궤도틀림을 검출하는 기구에 대하여 알아보았으며, 일본의 궤도틀림의 검측기술을 살펴 보았다. 이에 궤도 검측시 정시법이나 편심시법을 적용할 시에 적당한 현의 길이가 중요하다는 것을 확인하였다. 또한 최근 검측 정밀도 향상을 위해 광학식의 검출 기구가 주로 사용되며, 기후 조건에 따라 광학식과 전자식을 병행한다는 것을 알 수 있었다.

향후에는 이러한 검측기술을 바탕으로 한국형 고속전철 궤도 계측시스템에 적용 가능한 계측방법에 대해 구체적으로 살펴볼 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 失澤英治, 須永陽一, “最速おめざす新幹線軌道管理”, RRR, 2004.
- [2] 森本 勝, “偏心失法による軌道の計測”, 日本鐵道施設協會誌, 2004.
- [3] 竹下邦夫, 失澤英治, “慣性正失法による軌道檢測裝置の開発”, 日本鐵道施設協會誌, Vol.37 No.12, 1999.
- [4] Yazawa Eiji, “Track Inspection Technologies”, Railway Technology Avalanche, No.1, 2003.
- [5] 이찬우, 최은영, “영업차량에서의 궤도비틀림 검측방안 연구”, 한국철도학회 춘계학술대회, 2003.
- [6] 서사범, “궤도장비의 선로관리”, 열과 알, 2000.
- [7] 기존선고속화에 대응한 궤도관리기법개발 및 관리기준정립, 기존선고속화 기술개발사업 연차보고서(2000), 건교부, 산자부, 과기처.