

# 영업차량에서의 궤도비틀림 검측 방안 연구

## Track Irregularity Inspection Method for Commercial Vehicle

이찬우\*  
Lee, Chan-Woo

최은영\*\*  
Choi, Eun-Young

---

### ABSTRACT

The inspection of track irregularity, which is the most important index for the evaluation of the dynamic safety of the rolling stock, is performed by setting up the testing train set. The self-diagnosis for the various rolling stocks and railways can be obtained if it is possible to take the simultaneous inspection of track irregularity for the commercial vehicle while it is running and to build up a dynamic safety evaluation system. It is expected to have some good effects, such as preventing accident with the low dynamic safety, cutting cost for the testing train set, and evaluating the exact influence on the rolling stock and railway.

In this study, inertial measuring method, which allows us to directly measure the track irregularity from the commercial vehicle, will be considered and some overseas cases will be explored as well.

---

#### 1. 서론

철도차량의 주행안전성 평가는 시험차량에 의한 별도의 시험열차 편성에 의해 이루어져 왔다. 이를 실제 영업 차량에서 직접 측정할 수 있다면, 철도차량의 주행안전성에 직접 영향을 주는 선로구축물의 불규칙도를 영업 차량에서 실시간으로 검측하여 차량의 주행안전성 평가시 차량-선로 구축물 특성을 종합 분석할 수 있을 것이다.

따라서 철도차량의 주행안전성 평가시 궤도 불규칙도를 고려한 영업차량에서의 실시간 주행안전성 평가시스템을 구축한다면, 다양한 철도차량 및 철도 노선에서의 차량 주행 동특성을 자가 진단할 수 있어, 영업차량에서의 주행안전성 저하로 인한 사고를 사전 예방할 수 있고, 주행안전성을 현행 방법으로 평가할 시 별도의 시험차량 편성에 따른 비용과 실제 영업차량에서의 주행안전성에 영향을 주는 차량-궤도 인터페이스 문제에 있어서 차량과 궤도에 대한 정확한 영향도 평가를 할 수 없는 단점을 차량과 레일 상호간의 주행안전성에 미치는 영향도 분석 및 주행안전성 평가 방법에 대한 보다 신뢰성 있는 평가시스템을 구축할 수 있을 것이다.

그러기 위해서는 실제 영업차량에서의 궤도 검측 및 분석이 가능해야 할 것이다. 본 연구에서는 영업차량에서 궤도틀림을 직접 측정할 수 있는 방법을 검토하고, 해외 적용 사례를 고찰하였다.

#### 2. 관성측정법에 의한 궤도틀림 검측장치 개요

궤도 검측차에 의한 고저틀림 및 궤간틀림의 검측수법으로 3개의 측정축을 이용해서 양단 2축에 의한 현의 중앙과 레일의 이격을 구하는 정시법이 현재 주류를 이루고 있다. 그러나 이 방법은 현의 중앙에 측정축을 배치해야 하는 점에서 검측차의 차체와 밑부분의 구성에 제약이 있으며, 일반

적인 차량에 비해서 가격이 매우 비싸다. 현의 중앙 이외의 점과 레일의 이격을 틀림량으로 하는 편심시법을 이용하면 차체와 밑부분의 제약이 완화되지만 3개의 측정축이 필요하여 가격은 변하지 않는다.

한편, 가속도의 2회적분이 변위가 되는 것을 기본원리로 하는 관성측정법은 1대차만으로 검측이 가능하다. 따라서 영업차량에 탑재할 수 있으며, 또한 저비용으로 제작 할 수 있는 가능성이 크다. 그러나 관성측정법에는 2회 적분의 안정화를 위해 high-pass 필터 처리에 의해서 얻어진 궤도틀림 파형에 굴곡이 생기는 결점이 있다.

이러한 결점이 생기지 않도록 하는 방법으로서 관성측정법과 정시법의 특성을 조합해서, 관성측정법에 의한 굴곡이 없는 정시법 파형(정시틀림)을 얻는 방법을 제안한다.

본 논문에서는 이론과, 현재 일본에서 사용되는 궤도검측차를 이용하여 얻은 시험결과, 그리고 RTRI에서 시험 제작한 검측장치를 중심으로 시스템 소개를 하고자 한다.

### 3. 관성측정법의 이론해석과 정시틀림 검측 방법

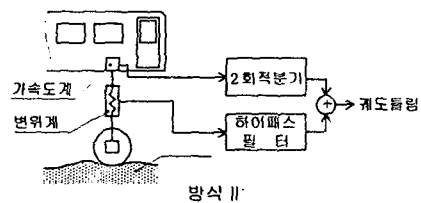
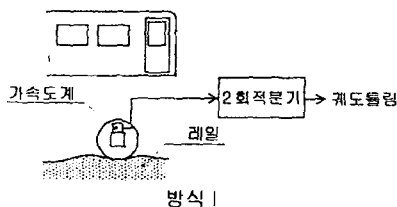
#### 3.1 관성측정법 현황

현재 세계 각국 및 일본에서의 관성측정법 이용 예는 적다. 일본에서는 신간선용 궤도검측 장치인 HISTIM과 부상식 철도의 공기실험선용 가이드웨이 검측차에 처음 적용하였다. 이 궤도틀림 검측법에는 여러 가지 오차요인이 있는데, 여기서 오차요인 및 해결방안을 기술하고, 관성측정법과 정시법의 장점을 적용한 방법에 대한 제안과 이론해석에 대해 기술한다.

#### 3.2 관성측정법의 검측원리와 구성법

차량에서 궤도틀림을 측정하는 검측수법에서 구비해야할 조건은 차량동요에 영향을 받지않는 검측결과를 얻어야 한다는 것이다. 관성측정법은 그 조건을 만족하기 위해서 가속도가 변위의 2차 미분이 된다는 물리법칙을 이용하고, 궤도틀림에 의한 가속도를 검출하여 2회적분하여 변위로서 궤도틀림을 구하는 방법이다. 이 검측법에서는 관성공간을 기준으로 변위를 구하기 때문에 차체동요의 영향을 받지않는다.

가속도를 검출하는 위치에 따라서 2가지 방식으로 분류할 수 있다. 첫 번째는 궤도틀림에 의해서 직접적으로 움직이는 부분인 철도차량의 축상에 가속도계를 부착하여 가속도를 검출하는 방법이고, 두 번째는 궤도틀림에 의해서 직접적으로 움직이지 않는 철도차량의 차체에 가속도계를 부착하여 차체의 가속도를 검출하여 2회적분하여 차체의 변위를 구하고, 차체와 레일간의 상대변위는 변위계로 측정하여 양자를 가산하여 간접적으로 궤도틀림을 구하는 방법이다.



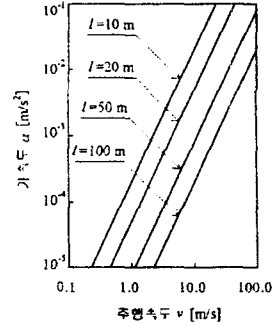
#### 3.3 관성측정법에 대한 오차 발생요인

##### 1) 궤도틀림에 의해서 발생하는 가속도

궤도틀림의 절대파형을 정현파의 형태로 가정하고, 검측차가 일정속도로 주행한다고 가정하면, 다음과 같은 가속도 식을 얻을 수 있다.

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

가속도는 궤도틀림 진폭  $d$ , 파장  $l$  및 주행속도  $v$ 에 따라 변한다. 검측이 필요한 최소 궤도틀림 진폭이 0.5mm라고 가정하면, 검출이 필요한 최소 가속도는 식에 의해 그림과 같다. 이 그림으로부터 검측차의 검측가능 최소 속도를 10m/s로 하고 10m 파장까지의 궤도틀림을 검측한다고 하면 0.02m/s<sup>2</sup> 정도의 가속도를 검출해야 한다.

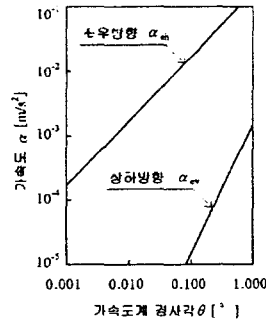
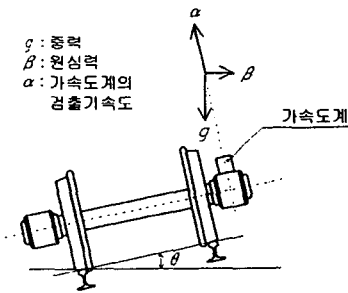


## 2) 가속도계의 오차

가속도계 자체가 갖는 오차는 가속도계의 구조에 따라 다르다. 일반적으로 사용되는 스트레인계형 가속도계의 오차는 전체 스케일의 10<sup>-12</sup> 정도이다. 서보형 가속도계의 오차는 스케일과 관계없이 10<sup>-4</sup>m/s<sup>2</sup> 정도로 상당히 적은 값이다. 앞에서 기술한 것과 같이 가속도 검출에 요구되는 정도를 0.02m/s<sup>2</sup>까지 설정하면 스트레인계형에서는 전체스케일이 2m/s<sup>2</sup> 정도의 가속도계를 이용해야하고, 서보형 가속도계를 이용하는 경우에는 정도에는 문제가 없다. 현실적으로 철도차량에 가속도계를 부착하는 경우, 축상과 같이 스프링작용에 의한 완충작용이 없는 부분에서는 일반적으로 200~300m/s<sup>2</sup> 정도의 최대가속도가 작용하여 오차를 무시할 수 없기 때문에 스트레인계형의 가속도계는 사용할 수가 없다.

## 3) 가속도계 경사에 의한 오차

가속도계가 경사진 경우 가속도계에 작용하는 중력가속도의 성분이 변화하여 가속도 출력의 오차가 된다.



가속도계의 경사에 의한 오차는 좌우방향이 크고, 앞에서 기술한 것과 같이 가속도 검출에 요구되는 정도를 0.02m/s<sup>2</sup> 정도로 한 경우, 상하방향에서는 약 4°의 경사에 해당하고, 좌우방향에서는 약 0.1°의 경사에 해당한다. 따라서, 상하방향의 궤도틀림인 면틀림의 검측에서는 가속도계의 경사를 약 4° 이내로 할 필요가 있고, 좌우방향의 궤도틀림인 줄틀림의 검측에서는 가속도계의 경사를 약 0.1° 이내로 해야 할 필요가 있다.

통상적으로 철도차량은 곡선중에서의 캔트와 수준틀림에 의한 물각이 발생한다. 일반적으로 캔트에서는 약 0.5° 정도, 수준틀림에서는 약 0.1° 정도의 물각이 발생한다. 따라서, 면틀림에 대해서는 거의 실용적인 정도를 달성할 수 있을 것으로 생각되어 지지만, 줄틀림에 대해서는 오차가 커서 실용적이지 않을 것이다. 이에 대한 대처방안으로는 수준면의 기준이 되는 자이로장치를 이용해서 가속도계의 경사를 검측하고 항상 가속도계의 경사에 의한 오차를 보정하는 방법을 고려한다. 이러한 경우 가속도계의 경사를 정확하게 계측하기 위해서는 가속도계와 자이로장치를 일체로 설치

하는 것이 용이하고 적합할 것으로 생각된다.

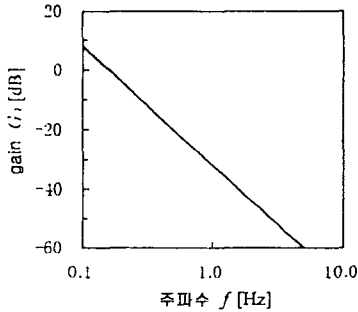
4) 2회적분에 의한 출력파형의 변형

2회 적분의 전달함수( $G^2(s)$ )는  $s$ 를 라플라스 연산자로 하여 다음 식과 같다.

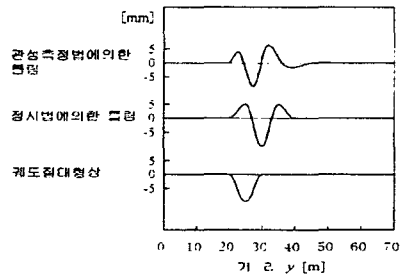
$$G_2(s) = \frac{1}{s^2}$$

일반적으로 가속도계를 이용한 변위계에서는 2회 적분을 하는 경우 완전한 2회적분을 하지 않고, 적분기에 low-cut filter의 특성을 갖도록 한다. 이것은 주파수 0에 대한 게인이 무한대가 되는 것을 방지하여 안정화를 꾀한 것이다. 이러한 방법에 의한 안정화의 경우에는 high-pass filter의 위상특성 때문에 얻어진 틀림의 파형변형이 생긴다. 이러한 파형변형을 파악하기 위해 수치해석을 한 결과는 그림과 같다.

관성측정법에 나타나는 파형변형은 동일 궤도를 검측하여도 검측차의 진행 방향에 따라 파형이 일치하지 않는다. 이러한 원인은 전달함수의 위상이 선형이지 않기 때문이다. 이러한 파형변형을 제거하기 위해서는 안정하게 2회적분을 실행할 수 있으면서 선형위상이 필요하다. 그러나 종래의 단순한 2회 적분에 low-cut filter의 특성을 갖게하는 안정화를 하는 방법으로는 해결할 수 없다.



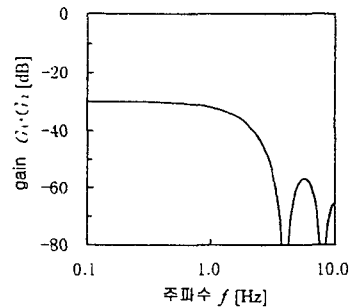
2회 적분의 주파수 전달함수



low-cut filter 특성을 갖는 2회 적분기에 의한 파형변형 (수치해석 결과)

3.4 정시법의 특성에 의한 관성측정법의 안정화

관성측정법에 대한 2회 적분의 안정화는 실제 2회 적분을 실행하는 2회 적분기의 주파수 전달함수에 있어서 전주파수 영역에 걸쳐 게인이 무한대가 되지 않도록 하면 가능하다. 또한 출력에 의한 파형변형을 제거하기 위해서는 선형위상이 되도록 해야한다. 일본의 궤도검측차에서 가장 많이 사용되고있는 검측수법인 정시법의 특성은 선형위상이면서, 저주파수 영역에서 주파수가 낮아짐에 따라 감소하는 특성을 나타낸다. 이러한 감소의 특성은 저주파수 영역에서는 근사적으로 12dB/oct의 기울기를 갖는다. 한편 2회 적분의 특성은 저주파수 영역에서는 주파수가 낮아질수록 커지는 특성을 나타내고, 기울기는 -12dB/oct이다. 따라서 정시법의 특성과 2회 적분의 특성을 합성하면 2회 적분의 불안정성의 원인인 주파수 0에 대해서 게인이 무한대가 되는 것을 방지할 수가 있으며, 정시법의 위상특성은 선형위상이기 때문에 파형변형도 방지할 수 있을 것으로 예상된다. 단, 정시법의 전달함수는 거리파라미터에 대한 함수이고, 2회 적분은 시간파라미터에 대한 함수이기 때문에 두 함수의 합성에는 이러한 점을 고려해야한다.

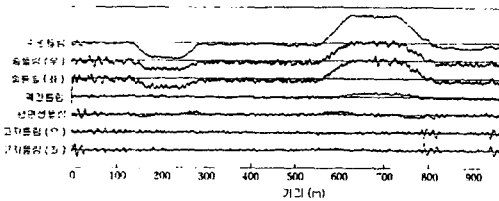


2회 적분과 정시법의 합성특성

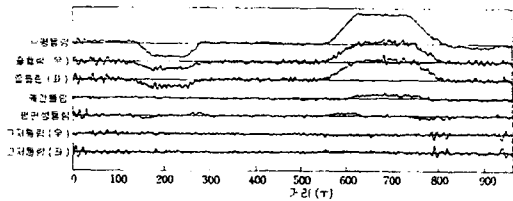
## 4. 일본의 사례

### 4.1 검측

관성 측정 정시법에 의한 궤도틀림 검측이 실현 가능한 것을 검증하기 위해서, 현재 사용중인 궤도검측차를 사용해서 일본에서 현차주행시험을 실시하였다. 이 시험에서는 기존선의 야마34형 궤도검측차(이하 야마차)의 차내에 가속도계, 적분회로, 자이로스코프장치 등을 가설하여 야마차의 변화기 출력을 이용해서 차체-레일간 변위를 구함으로써 일반적인 검측과 관성 측정 정시법에 의한 검측을 동시에 하였다.



(a) 관성 측정 정시법에 의한 궤도틀림



(b) 기존의 3대차 방식에 의한 궤도틀림

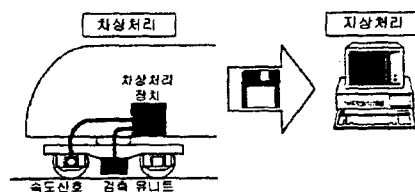
현차 주행시험에서 관성 측정 정시법에 의한 궤도검측결과

가설한 장치의 정도의 관계 때문에 궤간틀림 파형에 약간의 잡음이 보이지만, 양자의 파형은 거의 일치한다. 이와 같이 관성정시법에 의한 궤도틀림 검측은 실용적으로 문제가 없을 만큼의 정도를 갖고 있어 실현가능하며, 저비용의 검측수법으로 유망한 것으로 판단된다.

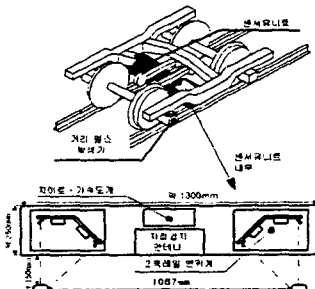
### 4.2 시제품

시제품에 대한 구성 및 장치는 그림과 같으며, 특징적인 것은 센서유니트로서 대차프레임에 직접 부착 가능하도록 하였다. 측상에 중요한 것을 부착하지 않기 때문에 차량의 주행 특성에 영향을 미치지 않으므로 영업차량에 부착 가능성이 크다.

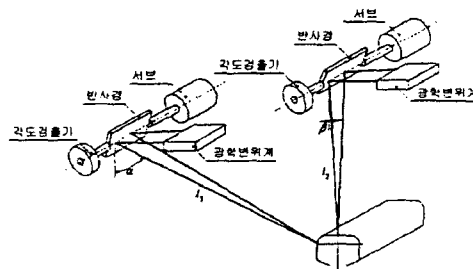
또한 자이로스코프는 가속도계의 근방에 삽입해서 수평틀림의 검측에 이용함과 동시에 가속도계의 경사 보정에도 이용한다.



검측장치의 구성도



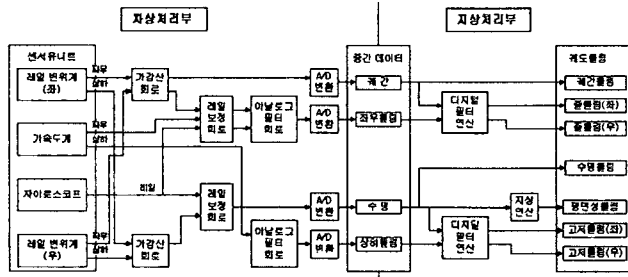
센서 유니트의 구성



2축 레일변위계의 구성

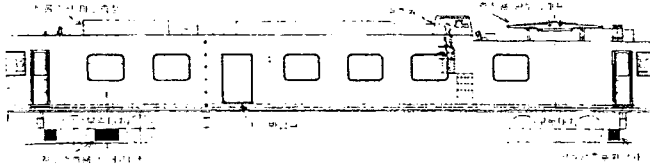
센서유니트의 구성에서 특징적인 것은 새롭게 개발한 2축 레일변위계이다. 이는 저가격으로 제작 가능한 광식 레일 변위계의 구조로 그림과 같다. 변위의 검출은 시판 레일 변위계를 이용하여 서브모터구동의 반사경으로 레일의 담면과 측면의 움직임을 추적하도록 되어있고, 이 레이저 변위계의 출과 반사경의 각도로부터 레일의 상하변위와 좌우변위가 삼각측량의 원리로 얻어진다.

데이터 처리는 차상처리부와 지상처리부로 나누어 다음 그림과 같은 순서로 진행된다.



궤도검측장비의 처리도

그림에 나타낸 처리를 모두 차상에서 하는 본격적인 궤도검측차의 구성도 가능하며, 일본 RTRI에서는 이러한 구성의 예로서 다음 그림과 같은 전기, 신호관계의 검측시스템과 조합한 일량전기차식 종합검측차를 제안하고 있다.



6. 결론

지금까지 궤도 검측 방법의 하나인 영업차에 의한 궤도검측의 실현 방법에 대하여 검토해 보았다. 영업차에 의한 궤도검측을 위해서는 관성측정법을 기초로 정시법의 특성을 이용하면 안정적인 검측이 가능하다.

영업차에 의한 궤도검측은 기존의 궤도 검측차와 같은 고가의 검측차가 아니라 전용 기술자를 필요로 하지 않는, 무인 검측 시스템에 의한 검측의 실현을 목표로 하고 있어 검측 빈도, 노동력 절감 등을 실현할 수 있다.

국내에서도 영업차량에서 궤도틀림을 실측할 수 있는 장치를 자체 개발하여 영업차량에서의 주행안전성 확보 및 차량-궤도 인터페이스 문제를 보다 실증적으로 해결할 수 있도록 하는 기술개발이 필요하다.

참고문헌

1. Kunio Takeshita : A method for track irregularity inspection by asymmetrical chord offset method, Quarterly Report of RTRI, Vol.33, No.2, pp.106-114, 1992
2. Hideyuki Takai, Masao Uchida, Kunio Takeshita, ochi Sunaga : Track maintenance technique for 300km/h class Shinkansen, Quarterly Report of RTRI, Vol.34, No.2, 1993
3. Kunio Takeshita : Track Irregularity Inspection Method by Revenue-earning Train, RTRI Report, Vol.9, No.2, 1995