

# 궤도 유지보수 주기 예측을 위한 구간 특성에 따른 궤도틀림 표준편차 진전정도 분석

## Study for Progress Rate of Standard Deviation of Irregularity Based on Track Properties for the Railway Track Maintenance Cycle Analysis

정민철<sup>1)</sup>      김정훈<sup>2)</sup>      이지하<sup>3)</sup>      강윤석<sup>4)</sup>      공정식<sup>5)\*</sup>  
Jeong, Min Chul      Kim, Jung Hoon      Lee, Jee Ha      Kang, Yun Suk      Kong, Jung Sik

### Abstract

The irregularity of railway track affects not only the comfort of ride such as noise or vibration but also the safety of train operation. For this reason, it is an interesting research area to design a reliable and sustainable railway track system and to analyze the train movement mechanism based on systematic approaches considering reasons of track irregularity possible in a specific local environment. Irregularity data inspected by EM-120, an railway inspection system in Korea includes unavoidable incomplete and erratic information, so it is encountered lots of problem to analyse those data without appropriate pre-data-refining processes. In this research, for the efficient management and maintenance of railway system, progress rate of standard deviation of irregularity is quantified. During the computation, some important components of railways such as rail joint, ballast, roadbed, and fastener have been considered. Probabilistic distributions of irregularity growth with respect to time are computed to predict the remaining service life of railway track and to be adapted for the safety assessment

**Keywords** : Irregularity data, Railway track, Railway track components, Life cycle assessment, Maintenance cycle analysis, Probabilistic evaluation, Regression analysis

### 1. 서론

궤도틀림은 열차의 주행안전 및 승차감에 미치는 영향이 크고, 소음·진동의 주요원인으로 작용한다. 이에 현장에서 발생하는 궤도의 틀림을 체계적으로 분석하고 이를 저감할 수 있도록 차량운행 조건과 선로선형 및 궤도구조를 설계하는 것은 중요하다(서사범, 2006a). 과거에는 생애주기에 기반을 둔 유지관리 계획에 대한 인식이 부족하였기 때문에 검측 데이터의 축적은 이루어졌으나 검측 데이터를 이용한 구성품의 수명예측 및 유지보수 시나리오 선정 등 의사결정 지원을 위한 자료로는 활용하지 못하였다. 유럽의 경우 1980년대부터 철도기관과 EU 주도 연구 사업을 통해 궤도관리에 생애주기분석기법의 적용을 시도하였고(이지하, 2008), 현재는 Ecotrack 개발을 통해 최적화된 궤도 관리를 수행하고 있다(Landolt

and Briner, 1998). 궤도 틀림 진전예측과 관련해서는 국외의 경우 궤도 틀림의 지수평활법을 이용하여 진전율을 예측하는 연구와(Akihito Kawaguchi, et al, 2005), 궤도 틀림진전 예측을 위한 예측모델 비교(G. M. Shafiullah et al, 2010) 등의 연구가 진행되었고, 국내에서는 궤도 틀림진전을 선형모형으로 가정하여 틀림 진전 예측을 수행하는 연구(김대영 등, 2008) 등이 진행되었다. 한편 현재 국내에서 EM-120에 의해 검측한 틀림 데이터는 매우 불규칙적인 형태를 나타내며 데이터 분석 시 다양한 문제점을 가지고 있다(고려대학교, 2010). 따라서 축적된 검측 데이터의 문제점을 파악하여 궤도 성능 분석 적용을 위한 데이터 정제 과정이 선행되어야 하며, 정제된 데이터로부터 선로의 건전도 평가 방법을 정립하고 잔존 수명을 예측하여 효율적 유지관리를 실현할 수 있는 기법의 개발이 필요하다. 또한 검측된 틀림 데이터를 체계적

1) 학생회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 석·박사통합과정  
2) 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 연구교수  
3) 정회원, 한국철도기술연구원 신교통연구본부 선임연구원  
4) 정회원, 한국철도기술연구원 고속철도연구본부 책임연구원  
5) 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 교수, 교신저자

\* Corresponding author : jskong@korea.ac.kr 02-3290-3741

• 본 논문에 대한 토의를 2012년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2012년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

으로 분석하고, 이를 통해 궤도의 상태 및 성능을 적절하게 평가하며, 고속 철도 선로의 구성 요소와 구간 및 환경 특성 등을 고려한 상관관계 분석 등을 통하여 검측 자료의 가치 및 신뢰성을 높일 수 있는 방안이 요구되고 있다.

본 연구에서는 궤도의 효율적인 유지관리를 위해 검측된 틀림데이터의 문제점을 분석하고, 이를 토대로 효율적인 처리 기법을 개발하며, 정제된 데이터를 기반으로 선로를 구성하고 있는 이음매, 도상, 구조물의 노반, 체결구 등 구간 특성 영향인자 등을 고려하여 레일 궤도 틀림의 진전 정도를 정량화 하였다. 또한 축적된 검측 데이터로부터 궤도의 건전도를 평가할 수 있는 방법을 제안하고 생애주기를 예측하였으며, 효율적 유지관리를 실현하기 위해 검측 데이터의 확률론적 수명 산정 기법 개발을 위한 구간 특성에 따른 틀림량 증가정도(mm/day)의 확률적 분석을 수행하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 열차의 운동 특성과 궤도틀림의 검측

궤도틀림은 열차가 주행하는 서로 평행한 두 개의 레일이 열차의 반복운동 또는 다른 요인에 의해 상하 또는 좌우로 원래 위치에서 소정의 변위가 발생하는 것을 의미한다. 국내 고속철도 궤도 검측의 경우 오스트리아에서 개발된 EM-120(Fig. 1)을 이용하여 월 1회 25cm 간격으로 좌·우측 면틀림, 좌·우측 줄틀림, 비틀림, 궤간틀림 등 총 6가지 궤도틀림과 캔트를 측정하고 있다.

#### 2.1.1 열차의 운동 특성

주행 안정성 확보 및 차량의 흔들림 억제를 통한 열차



Fig. 1 EM120 track inspection car

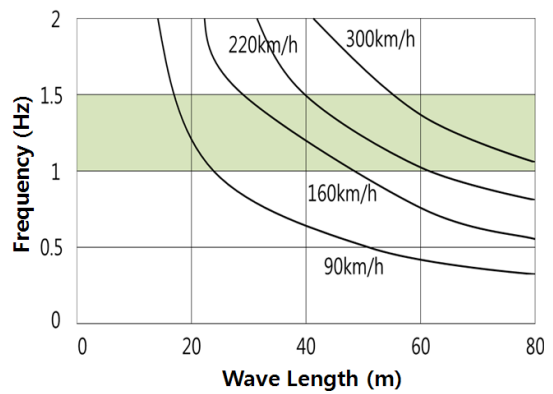


Fig. 2 Frequency-Wave length curve of each rail speed (손기준 등, 1999)

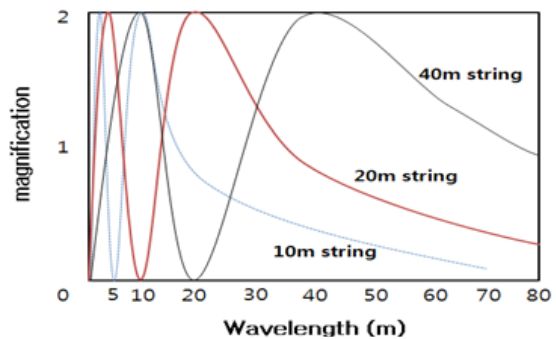


Fig. 3 Wavelength and magnification of each string

의 승차감 향상을 위해서는 해당 고유진동수에相当하는 파장에 착안하여 궤도의 진폭을 조정할 필요가 있다. 철도 차량의 고유진동수는 일반적으로 1.0~1.5Hz 사이에 있다(손기준 등, 1999). Fig. 2는 열차의 속도, 궤도변위의 파장과 차량을 가진하는 주파수의 관계를 보여주며, Fig. 3은 궤도틀림 검측 시 사용하는 중앙중거법의 현 길이와 검측 배율과의 관계를 보여준다. 여기서 일반 철도에서 90km/h의 속도로 달리는 열차의 경우, 차량이 흔들리기 쉬운 주파수에相当하는 파장과 10m 현 중앙중거법에서의 측정배율이 큰 파장이 서로 일치하고 있음을 확인할 수 있다(서사범, 2009). 즉, 현 궤도 검측차에 적용되고 있는 10m 현 중앙중거법은 차량이 흔들리기 쉬운 파장의 궤도변위를 증폭하여 측정하는 방법으로 이해할 수 있으며, 열차의 속도 증가 및 고속철도 궤도의 성능 평가를 위해서는 열차 속도에 따라 검측 데이터를 20~40m 이상의 현 중앙중거로 변환하여 사용할 수 있다.

#### 2.1.2 궤도틀림의 검측

현 국내 궤도틀림의 관리는 철도의 유지보수를 위해

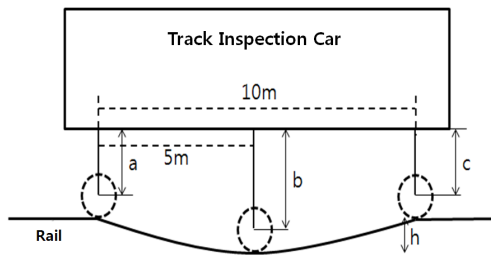


Fig. 4 Basic theory of track inspection

EM-120과 같은 자동화 검측시스템을 도입하여 사용하고 있으며, 이는 10m 현 중앙중거법을 사용하고 있다. Fig. 4는 10m 현 중앙중거법의 측정 원리에 대한 그림이다. 궤도틀림은 각 측정장치(a,b,c)에서 인지된 변위량을 이용하여 식 (1)에 의해 versine 형태로 산출되어진다(강기동, 2004). 이는 면틀림과 줄틀림에서 동일하게 적용된다.

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

여기서,  $h$ 는 검측된 versine,  $a$ 는 후방 차륜의 위치,  $b$ 는 측정 위치,  $c$ 는 전방 차륜의 위치에서의 검측값이다. 하지만 이러한 10m 현 중앙중거법을 이용한 versine 데이터는 궤도의 기하학적 형상을 완벽히 재현하지 못하며, versine과 실제 궤도틀림 사이에는 아래 식 (2)와 같은 선형관계가 성립된다(정우진 등, 2002).

$$y_c = 2h + y_b - y_a \quad (2)$$

여기서,  $y_x$ 는  $x$  지점의 실제 궤도틀림이다. (즉,  $y_a$ 는  $a$  지점의 실제 궤도틀림) 위 식의 적용 가능성 및 타당성 검증에 위해 실제 궤도틀림 데이터를 적용시킨 결과, versine 데이터를 위의 식을 이용하여 실제 궤도 형상으로 복원하는 것은 물리적으로 불가능하였다. 이는 실제 궤도 형상의 복원을 위해 정확한 초기값( $y_0$ )에 대한 정의가 있어야 하며, 이를 산정하더라도 매 위치에서의 오차가 발생하기 때문에 이는 계속적으로 복원되는 궤도 형상 데이터에 누적이 되므로 결과적으로 복원 데이터의 신뢰성에 문제가 생기며, 또한 이를 통해 복원되는 데이터는 누적되는 오차에 의해 결과적으로 발산한다. 때문에 versine 데이터를 실제 궤도 형상으로 복원하여 사용하는 것은 물리적으로 쉽지 않은 과정이다. 또한 versine 데이터는 실

제 궤도 형상을 완전히 구현하지는 못하지만, 궤도의 파형 특성이 충분히 적용되어 있으며, 실질적으로 이를 이용하여 궤도의 상태 평가 또는 틀림의 경향성을 충분히 파악할 수 있기 때문에, 본 연구에서는 EM-120에 의해 10m 현 중앙중거법으로 검측된 경부선 고속철도의 궤도틀림 데이터를 사용하여 궤도의 상태를 평가 및 예측하였다.

## 2.2 검측 데이터 처리 파일럿 개발

본 연구를 위해 확보한 2004년 1월부터 2008년 2월 까지 검측된 궤도틀림 데이터 중 유지보수 이력과 관련된 데이터가 있는 2006년 12월부터 2007년 7월 까지 검측 데이터 분석을 수행하였으며, 그 과정에서 궤도의 생애주기 분석을 위한 데이터 사용에 있어 단순 가공이 불가한 몇 가지 문제점을 발견하였다.

### 2.2.1 검측 데이터 문제점

다음 Fig. 5의 데이터는 검측된 궤도틀림 데이터 중 거리의 1km 단위가 변화하는 지점을 포함하는 데이터이다. 해당 데이터는 2007년 4월 경부선 고속철도 상선의 궤도틀림 검측 데이터이며, 98km998m00cm 부터 99km1m00cm 지

K.P	Longitudinal(L)	Longitudinal(R)	Alignment(L)	Alignment(R)	Tortion	Cant	Guage Irregularity
98,998.00	4.5	5.9	2.9	3.7	1.1	82	4.5
98,998.25	5.2	6.6	2.9	3.2	0.8	81.9	4.6
98,998.50	5.7	6.8	2.9	3.	0.2	82.3	4.6
98,998.75	6.1	7.1	3.4				
98,999.00	6.5	7.3	4.4				
98,999.25	6.7	7.3	4.3	4.4	-0.3	82.3	4.5
98,999.50	6.7	7	4	4.1	-0.9	82.5	4.6
98,999.75	4.8	4.4	4.5	4.8	-0.4	82.3	4.6
981,000.00	6.8	6.4	4.5	4.8	-0.4	82.3	4.6
981,000.20	6.8	6.1	5.1	5.1	-0.6	82.5	4.6
981,000.50	6.6	5.6	5	5.2	-0.4	82.6	4.6
981,000.70	6.4	5.4	5.1	58.2	0	82.4	4.6
981,001.00	6.0	5	5	5	0.3	82.8	4.5
981,001.20	5.7	4.6	5.7	5.4	0.3	82.5	4.4
981,001.50	5.2	4.2	5.6	5.1	0.2	82.7	4.5
981,001.70	5.0	3.6	4.8	4.5	0.6	82.7	4.4
981,002.00	4.6	3.2	4.3	3.7	0.9	82.5	4.3
981,002.20	4.1	3	5.1	4.3	0.3	82.3	4.3
981,002.50	3.7	2.7	5.7	4.5	0.8	82.1	4.4
981,002.70	3.4	2.2	5.2	4.2	0.6	82	4.3
99,0.00	3.1	1.7	4.4	3.4	0.5	82	4.3
99,0.25	2.9	1.7	4.8	3.9	0.5	82	4.3
99,0.50	2.9	1.6	4.5	3.5	0.3	81.8	4.3
99,0.75	2.9	1.5	4.4	3.5	0.1	82.1	4.3
99,1.00	2.9	1.5	3.7	3	-4	82	4.3

Fig. 5 Inspected irregularity dataset in 2007. 04

점까지 25cm 단위로 검측된 틀림 데이터를 보여주고 있다. 해당 데이터에서 킬로미터가 변화하는 지점(98km999m75cm에서 99km로 변화하는 지점) 사이에 데이터 자체 거리 보정을 위하여 추가적인 데이터가 기입되어있는 것을 확인할 수 있으며(981,000.00~ 981,002.70), 이 구간의 데이터를 분석 과정에서 정제하는 경우 1km 단위가 변화하는 지점을 기점으로 하여 틀림 데이터는 급격하게 변화하는 것을 확인할 수 있다. 이는 선로 변에는 10km마다 비컨(beacon)이 설치되어 있어 고속 검측 설비 및 자주식 검측차가 측정을 수행하는 도중에 위치를 인식·보정하며(구분근 등, 2003), 이러한 검측 데이터의 검측 위치 산정 과정에서 발생한 문제로 판단되므로, 추후 이러한 현상과 관련하여 보다 정확한 규명이 필요한 것으로 생각한다.

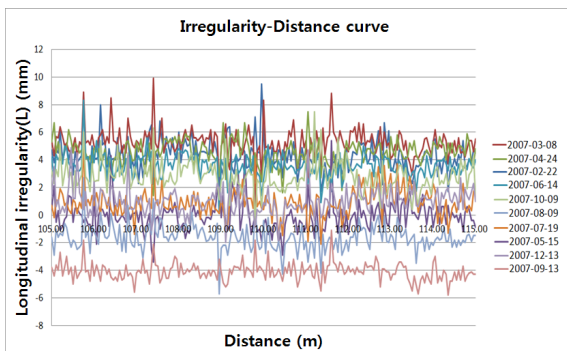
데이터 분석 과정에서 발생하는 또 다른 문제점으로 검측일별 틀림 데이터 기준 지점의 불확실성에 대한 문제가 있다. Fig. 6은 고속철도 경부선 105~115km 구간의 검측일별 거리-면틀림(좌) 곡선이며, (a)는 좌측 면틀림의 크기, (b)는 좌측 면틀림의 100m 평균값 크기를 y축의 값으로 가진다. 여기서 측정 기간별 거리-틀림 곡선의 모형은 유사하지만, 검측일별로 틀림량이 위치하는 구간이 모두 다르다. 즉, 전 구간에 걸쳐 검측되는 틀림데이터는 0 부근에서 +, -로 분포해야 하지만, 2007년 3월 검측된 데이터는 5 부근에서 +, -로 분포하고, 2007년 9월 검측된 데이터는 -4 부근에서 +, -로 분포한다. 이를 통해 시간에 따라 틀림량이 점차적으로 증가 혹은 감소하는 양상을 보이는 것이 아니라, 검측 시기와는 관계 없이 전반적인 거리-틀림의 경향은 유사하지만, 그 시작값(혹은 기준이 되는 값)이 모두 차이를 보이고 있는 문제를 확인할 수 있다.

앞에서 언급한 두 현상은 상당수의 고속선 궤도틀림 데

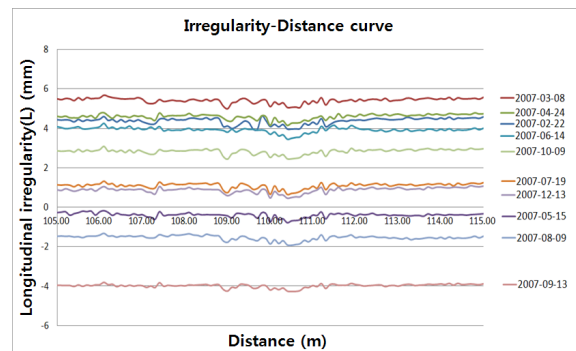
이터에서 빈번하게 검출되고 있으며, 틀림 데이터를 이용한 궤도 생애 주기 분석에 있어 반드시 고려해야 하는 부분으로 판단한다

### 2.2.2 검측 데이터 처리

현행 유지·보수를 위한 궤도의 상태 평가에 있어 틀림 데이터의 값 자체가 사용되는 것이 일반적이다. 현재 사용되는 고속선로의 선형 관리의 경우 내구연한 연장 도모 및 열차운전 안전을 위한 최적의 관리를 위하여 궤도틀림의 관리단계를 준공 기준, 목표 기준, 주의 기준, 보수 기준, 속도제한 기준 등으로 구분하여 각각의 기준에 해당하는 틀림데이터의 값을 기준으로 궤도의 상태를 평가한다(서사범, 2006b). 하지만 현행 선로 관리 기준은 앞에서 언급한 바와 같은 현재 검측되고 있는 틀림 데이터의 1km 거리 보정에 의해 발생하는 검측 오차 등과 관련한 문제점 및 검측 시기마다 동일하지 않은 기준값과 관련한 문제점 등을 전혀 고려하지 못하고 있다. 이러한 검측 데이터의 문제점을 고려한 데이터 분석 방안으로 일정 구간 데이터의 표준편차를 산정하여 궤도의 상태 평가에 사용하는 방법이 있다. 궤도틀림의 표준편차는 실제 현행 선로 관리 기준 중 일부 틀림관련 기준이나 일본, 유럽 등의 선로 관리 기준에서도 궤도의 상태를 평가하는데 사용되는 중요 척도 중 하나이며, (Masashi MIWA, 2002), (Landolt and Briner, 1998), 일반적으로 200m 구간 사이의 검측값들의 표준편차를 구하여 그 표준편차를 대푯값으로 사용하고 있다(한국철도기술연구원, 2006). 200m 구간의 검측값 표준편차를 구간의 대푯값으로 사용하는 경우 현재 궤도틀림 검측 데이터에서 발생하는 1km 간격에서 거리 보정에 의한 틀림 데이터 문제와 검측 시기마다 동일하지 않은 기준값과 관련한 문제 등을 해결할 수 있다.



(a) longitudinal irregularity(L) in 105~115km



(b) 100m mean of longitudinal irregularity(L) in 105~115km

Fig. 6 Irregularity-Distance curve of each inspected date

### 2.3 구간 특성에 따른 궤도틀림 영향 정량화

실제 열차의 승차감은 차량의 흔들림을 가리키며, 흔들림을 나타내는 물리량으로 일반적으로 변위, 속도, 가속도가 이용되지만 승차감의 평가에는 주로 가속도를 이용한다. 이것은 뉴턴 역학의 법칙에 의거하여 차량의 흔들림에 따라서 차내의 승객이 받는 힘은 그 사람의 질량과 가속도의 곱으로 정의할 수 있기 때문이다(서사범, 2009). 차량의 흔들림에 따른 승차감은 승객이 받는 힘에 비례한다고 생각되므로 승차감 향상을 위해 가속도를 감소시킬 필요가 있다. 이러한 가속도의 정도를 평가하기 위한 가장 간단한 방법은 궤도변위의 진폭을 평가지표로 하는 것이다. 앞에서 설명한 바와 같이 일반 철도의 속도대역(90km/hr)에서 10m 현 중앙중거법은 차량이 흔들리기 쉬운 파장의 궤도변위를 증폭하여 출력하는 성질을 갖고 있으므로 궤도변위의 진폭이 큰 지점은 가속도도 큰 지점으로 된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 궤도 변위의 진폭 정도를 정량화하기 위한 데이터로 200m 구간 데이터의 표준편차를 선정하였으며, 이를 기반으로 회귀분석을 통한 시간에 따른 궤도틀림 표준편차의 증가량(mm/day)

을 구하여 궤도의 성능 평가 인자로 사용하였다. 이를 위해 2006년 12월부터 2007년 7월까지의 고속철도 광명-천안 전 구간(20.0km~150.0km)의 틀림 데이터를 사용하였으며, 해당 구간 중 유지보수 이력이 없는 구간을 선정하여 분석을 수행하였다. 선정 구간에서 25cm 간격으로 검측된 좌·우 면틀림 및 좌·우 줄틀림에 대하여 각각 200m 구간에 대한 표준편차를 구하였으며, 초기 검측 시점(2006년 12월 데이터)을 기준으로 시간에 따른 틀림 표준편차의 변화 정도(mm/day)를 종속변수로 사용하여 틀림 영향인자가 궤도의 성능에 미치는 영향을 정량화 하였다. 일부 구간에서는 표준편차의 변화 정도가 0보다 작았으며, 이는 유지보수 이력의 누락, 오차범위 이내에서의 증감 등의 이유로 발생한 것으로 판단하여 데이터 분석과정에서 정제하여 사용하였다. 구조물(노반) 종류, 도상 종류, 체결구 형식, 이음매 유무, 곡률특성 및 운행 속도 등의 구간 영향 인자와 초기 틀림의 표준편차 값 등을 고려하여 분석을 수행하였다.

좌·우 면틀림과 줄틀림에 대하여 시간에 따른 궤도틀림 표준편차의 진전 정도 분석을 수행하였으며, 분석 데이터 구간 개소와 틀림 진전정도의 확률적 특성을 고려하

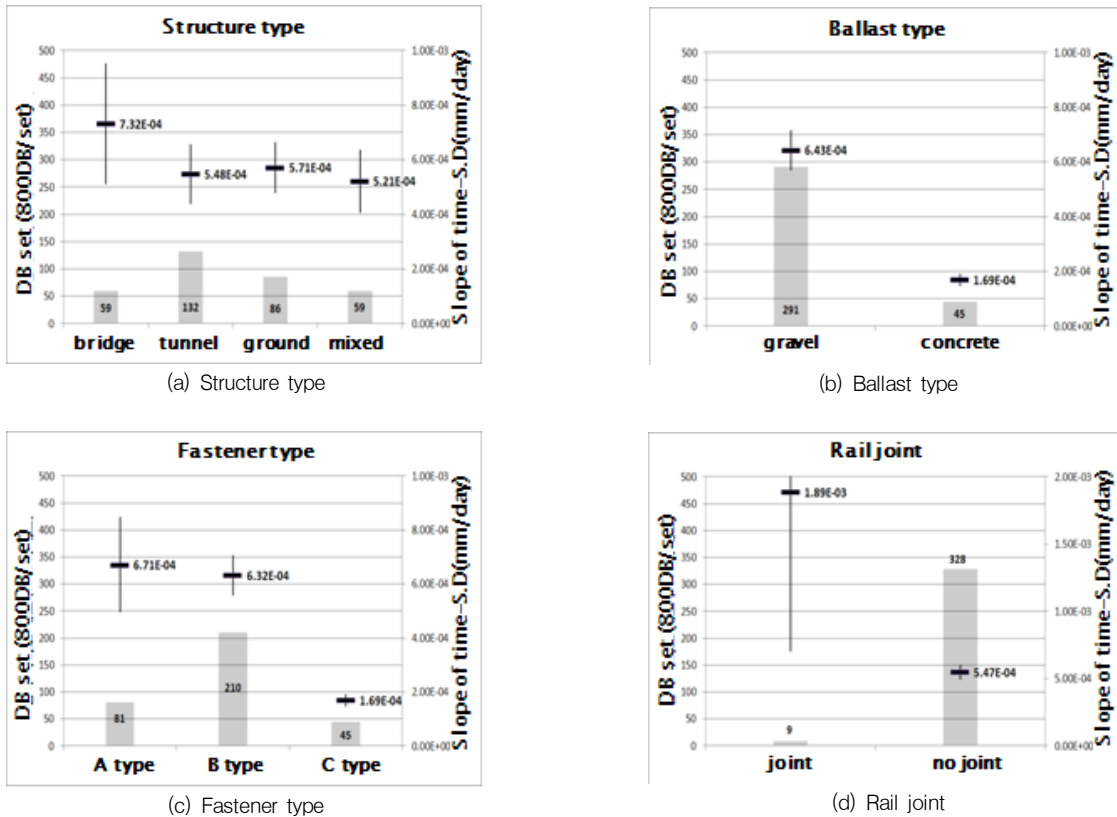
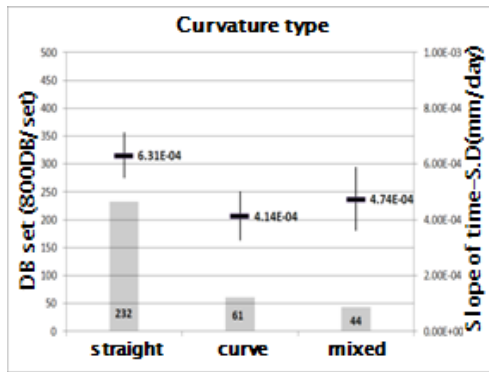
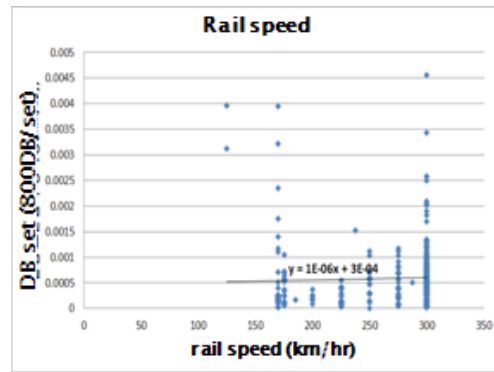


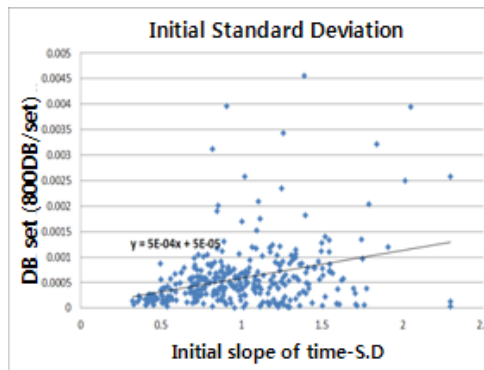
Fig. 7 Example of relation between each factor and slope of Standard Deviation increase (Longitudinal irregularity)



(e) Curvature type



(f) Rail speed



(g) Initial irregularity standard deviation (Initial condition)

Fig. 7 Example of relation between each factor and slope of Standard Deviation increase (Longitudinal irregularity) –continued

Table 1 Increase of longitudinal irregularity(L) analysis (mm/day)

factor		mean	S.D	DB(section/200m)	95% C.I
structure	bridge	7.32E-04	8.48E-04	59	5.11~9.53(E-04)
	tunnel	5.48E-04	6.37E-04	132	4.38~6.57(E-04)
	ground	5.71E-04	4.32E-04	86	4.78~6.63(E-04)
	mixed	5.21E-04	4.48E-04	59	4.04~6.38(E-04)
ballast	gravel	6.43E-04	6.27E-04	291	5.71~7.15(E-04)
	concrete	1.69E-04	7.20E-05	45	1.48~1.91(E-04)
fastener	e-clip	6.71E-04	7.98E-04	81	4.95~8.48(E-04)
	fast-clip	6.32E-04	5.49E-04	210	5.57~7.07(E-04)
	Vossloh	1.69E-04	7.20E-05	45	1.48~1.91(E-04)
rail joining	O	1.89E-03	1.57E-03	9	0.70~3.07(E-03)
	X	5.47E-04	5.21E-04	328	4.91~6.04(E-04)
curvature	straight	6.31E-04	6.34E-04	232	5.49~7.13(E-04)
	curve	4.14E-04	3.43E-04	61	3.26~5.02(E-04)
	mixed	4.74E-04	3.77E-04	44	3.59~5.89(E-04)
speed		$y = 1E-06x + 3E-04$ (x:km/hr, y:mm/day)			
initial S.D		$y = 5E-04x + 5E-05$ (x:mm, y:mm/day)			

여 95%신뢰구간을 예측하였다. Fig. 7은 구간 특성에 따른 좌측 면틀림 표준편차의 시간에 따른 진전 정도를 정량화한 분석 결과이며, 그 결과를 Table 1에 정리하였다.

Fig. 7 그래프 중 (a)~(e)의 좌측 y축 값은 분석에 사용된 검측 개소 수를 의미하며, 하나의 개소에서는 해당 200m 구간에서 검측된 데이터(0.25m간격으로 검측된

Table 2 Increase of longitudinal irregularity(R) analysis (mm/day)

factor		mean	S.D	DB(section/200m)	95% C.I
structure	bridge	8.63E-04	9.65E-04	43	0.57~1.16(E-03)
	tunnel	4.42E-04	5.74E-04	112	3.34~5.49(E-04)
	ground	4.58E-04	4.22E-04	60	3.49~5.67(E-04)
	mixed	4.35E-04	3.67E-04	37	3.13~5.58(E-04)
ballast	gravel	2.65E-04	5.33E-04	447	2.15~3.14(E-04)
	concrete	2.54E-04	2.41E-04	45	1.81~3.26(E-04)
fastener	e-clip	7.16E-04	7.34E-04	66	5.35~8.96(E-04)
	fast-clip	4.94E-04	6.15E-04	144	3.93~5.95(E-04)
	Vossloh	2.72E-04	2.39E-04	42	1.97~3.46(E-04)
rail joining	O	1.60E-03	1.05E-03	9	0.81~2.39(E-03)
	X	4.79E-04	5.67E-04	244	4.08~5.51(E-04)
curvature	straight	5.66E-04	6.16E-04	166	4.71~6.60(E-04)
	curve	3.44E-04	3.65E-04	54	2.45~4.44(E-04)
	mixed	4.39E-04	4.50E-04	33	2.80~5.99(E-04)
speed		$y = 1E-06x + 3E-04(x:km/hr, y:mm/day)$			
initial S.D		$y = 5E-04x + 4E-05(x:mm, y:mm/day)$			

Table 3 Increase of alignment irregularity(L) analysis (mm/day)

factor		mean	S.D	DB(section/200m)	95% C.I
structure	bridge	1.09E-03	5.14E-04	164	1.01~1.17(E-03)
	tunnel	8.88E-04	4.94E-04	136	8.05~9.72(E-04)
	ground	9.56E-04	4.98E-04	105	0.86~1.05(E-03)
	mixed	9.67E-04	3.44E-04	85	0.89~1.04(E-03)
ballast	gravel	1.01E-03	4.93E-04	445	0.97~1.06(E-03)
	concrete	7.05E-04	2.74E-04	44	6.22~7.89(E-04)
fastener	e-clip	8.73E-04	5.51E-04	112	7.70~9.77(E-04)
	fast-clip	1.06E-03	4.63E-04	333	1.01~1.11(E-03)
	Vossloh	7.05E-04	2.74E-04	42	6.20~7.91(E-04)
rail joining	O	1.75E-03	9.44E-04	14	1.21~2.29(E-03)
	X	9.62E-04	4.46E-04	477	0.92~1.00(E-03)
curvature	straight	1.03E-03	5.24E-04	348	0.97~1.08(E-03)
	curve	7.84E-04	3.32E-04	85	7.13~8.56(E-04)
	mixed	9.56E-04	3.93E-04	61	0.86~1.06(E-03)
speed		$y = 1E-06x + 3E-04(x:km/hr, y:mm/day)$			
initial S.D		$y = 1E-06x + 3E-04(x:mm, y:mm/day)$			

800개 데이터)의 시간에 따른 표준편차 증가량이 분석된다. 또한 우측 y축 값 및 Fig 7(f)~(g)의 y축 값은 해당 조건에서의 시간에 따른 틀림 표준편차 증가량(mm/day)을 의미하며, 이 값을 통해 궤도의 상태·성능을 예측하고, 구간특성의 궤도틀림 영향 정도를 파악할 수 있다. 동일한 분석 과정을 통해 우측 면틀림과 좌·우측 줄틀림에 대한 분석 결과를 Table 2~4에 정리하였다. 분석 결과를 통해 해석에 적용한 영향 인자 중 이음매의 유무가 궤도

틀림의 진전에 가장 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있으며, 도상의 경우 자갈 도상의 궤도틀림 진전이 콘크리트 도상 궤도보다 월등한 것을 확인할 수 있다. 또한 구조물(노반)의 경우 교량 구조물 노반의 궤도틀림 진전 정도가 다른 구조물 노반보다 크며, 체결구의 경우 C type 구간이 다른 체결구 구간에 비해 틀림 진전정도가 적은 것을 확인할 수 있다. 또한 초기틀림표준편차의 크기가 클수록 면틀림 진전 정도가 심해지는 것을 확인할 수 있

Table 4 Increase of alignment irregularity(R) analysis (mm/day)

factor		mean	S.D	DB(section/200m)	95% C.I
structure	bridge	8.71E-04	4.82E-04	164	7.97~9.45(E-04)
	tunnel	5.57E-04	5.37E-04	134	4.65~6.49(E-04)
	ground	7.47E-04	5.11E-04	102	6.47~8.48(E-04)
	mixed	7.40E-04	3.72E-04	83	6.58~8.21(E-04)
ballast	gravel	7.83E-04	4.98E-04	439	7.36~8.30(E-04)
	concrete	2.48E-04	1.68E-04	43	1.96~2.99(E-04)
fastener	e-clip	7.04E-04	5.72E-04	108	5.95~8.14(E-04)
	fast-clip	8.09E-04	4.70E-04	331	7.58~8.60(E-04)
	Vossloh	2.48E-04	1.68E-04	43	1.96~2.99(E-04)
rail joint	O	1.72E-03	9.31E-04	14	1.19~2.26(E-03)
	X	7.06E-04	4.52E-04	470	6.65~7.47(E-04)
curvature	straight	9.53E-04	4.87E-04	344	0.90~1.00(E-03)
	curve	5.30E-04	3.71E-04	81	4.48~6.12(E-04)
	mixed	7.58E-04	3.41E-04	59	6.70~8.47(E-04)
speed		$y = 1E-06x + 3E-04(x:km/hr, y:mm/day)$			
initial S.D		$y = 1E-06x + 3E-04(x:mm, y:mm/day)$			

으며, 반면 초기틀림표준편차의 크기는 줄뜸 진전에는 영향을 거의 미치지 않는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 이음매의 유무, 도상 종류, 체결구 종류, 구조물(노반) 종류, 곡률 특성, 운행 속도 및 초기틀림 표준편차의 크기 등 구간 특성이 틀림의 진전에 미치는 영향을 정량적으로 확인할 수 있는 기법을 개발하고 분석을 수행하였다.

#### 2.4 영향인자를 고려한 궤도 틀림 진전정도 분석

위의 분석 결과 및 본 연구에서 적용 가능한 데이터의 한계 등을 고려하여 시간에 따른 궤도틀림 표준편차에 영향을 미치는 여러 영향 인자 중 대표적인 범주형 변수 특성의 영향인자로 이음매의 유무, 도상의 종류 그리고 체결구의 종류를 선정하여 틀림 영향인자를 고려한 궤도의 생애주기 분석을 수행하였다. 고속철도 경부선 광명-천안(20.0km~150.0km) 중 유지보수 이력이 없는 전 구간에 대하여 선정 영향인자를 토대로 Table 5와 같이 5가지 케이스로 구분하였다.

Table 5 Classification for track irregularity progress analysis

Case	Rail Joint	Ballast	Fastener
①	O	gravel	A type
②	O	gravel	B type
③	X	concrete	C type
④	X	concrete	A type
⑤	X	concrete	B type

각각의 케이스에 대하여 궤도의 생애주기 분석을 위한 시간에 따른 궤도의 틀림 표준편차 진전 정도에 대한 분석을 수행하였으며, 틀림 진전정도의 확률적 특성과 데이터 구간 개소 등을 고려하여 95%신뢰구간을 예측하고, 그 결과를 Table 6에 정리하였다. 분석 결과 이음매 구간이 포함된 자갈도상·A type 체결구 구간의 면틀림 진전 정도가 다른 구간과 비교하여 가파르게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 이음매가 없는 콘크리트 도상·C type 체결구 구간과 이음매가 없는 자갈도상·B type

Table 6 Track irregularity progress analysis considering factors composing track (mm/day)

Case ①	rail joint, gravel, A type fastener		
DB(section/200m)	mean	stdev	95% C.I
5	2.01E-03	1.37E-03	4.40E-04~3.58E-03
Case ②	rail joint, gravel, B type fastener		
DB(section/200m)	mean	stdev	95% C.I
9	4.84E-04	5.10E-04	9.96E-05~8.69E-04
Case ③	no rail joint, concrete, C type fastener		
DB(section/200m)	mean	stdev	95% C.I
45	2.54E-04	2.41E-04	1.82E-04~3.26E-04
Case ④	no rail joint, gravel, A type fastener		
DB(section/200m)	mean	stdev	95% C.I
108	3.44E-04	5.15E-04	2.46E-04~4.43E-04
Case ⑤	no rail joint, gravel, B type fastener		
DB(section/200m)	mean	stdev	95% C.I
325	2.06E-04	4.69E-04	1.54E-04~2.57E-04



체결구 구간의 뜰림 진전 정도가 다른 구간에 비해 비교적 적은 것을 확인할 수 있으며, 이와 같은 결과는 일반적인 예측 결과와 유사한 경향을 보이므로 분석 결과는 타당하다고 판단된다. 위의 분석을 통하여 다양한 구간 특성을 가진 궤도의 사용 기간이 증감에 따른 뜰림량 표준편차의 변화 정도를 확인할 수 있다. 이를 통해 주어진 구간에서의 궤도뜰림 정도를 예측할 수 있고 이를 기반으로 검측 데이터를 이용한 궤도 수명예측 및 유지보수 시나리오 선정 등 의사결정 지원을 위한 자료로서의 사용이 가능할 것으로 기대한다.

### 3. 결론

본 연구에서는 궤도의 효율적인 유지관리를 위해 검측된 뜰림데이터의 문제점을 분석하고, 이를 토대로 효율적인 처리 기법을 개발하며, 정제된 데이터를 이용해 선로를 구성하고 있는 이음매, 도상, 구조물(노반), 체결구 등의 구간 영향인자 등을 고려한 레일 궤도뜰림 표준편차의 뜰림 진전 정도에 대한 통계 및 확률적 분석을 수행하였다. 2006년 12월부터 2007년 7월 검측된 고속철도 경부선 광명-천안 구간(20.0km~150.0km) 중 유지보수 이력이 없는 전 구간의 데이터를 이용하여 구조물(노반) 종류, 도상 종류, 체결구 형식, 이음매 유무, 곡률특성, 운행속도 등의 뜰림 영향 인자와 초기 뜰림의 표준편차 값을 고려한 구간 특성이 궤도의 성능에 미치는 영향 정량화 기법을 개발하고 분석을 수행하였다. 또한 그 분석 결과를 바탕으로 분석 구간을 구분하고 뜰림 영향인자를 고려한 정량화된 궤도의 생애주기 모델을 도출하였다.

연구에 사용 가능한 데이터의 한계가 있었으나 본 연구를 통하여 이음매, 도상, 체결구 등 주요 인자의 영향을 개별적으로 고려할 수 있는 궤도뜰림 표준편차의 정량화된 모델을 제시할 수 있었다. 하지만 추후 연구에서는 본 연구에서 고려한 영향 인자 외에도 궤도지지강성, 열차축중 등 궤도 생애주기 분석에 필요한 추가적인 영향인자 적용이 필요하며 이러한 영향 인자에 대한 데이터 확보가 선행되어야 한다. 또한 연구를 위해 확보한 데이터 부족과 부정확한 유지보수 이력 등에 의하여 일부 영향 인자에 대한 분석 결과의 신뢰성은 떨어질 수 있다. 때문에 분석 프로세스에 적용 가능한 검측 데이터와 유지보수 이력의 효율적인 관리가 선행되어야 하며, 이를 기반으로 본 연구에서 제안한 기법을 적용하여 추후 연구에서 유지관리

등의 외부영향을 받지 않은 보다 많은 검측 데이터를 이용할 수 있다면 추가 영향인자까지 고려한 보다 신뢰성 있는 결과 도출이 가능할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부 재원으로 시행하는 연구재단의 연구지원프로그램 (연구과제번호 : NRF 2009-0081373) 지원을 받았습니다.

### 참고문헌

1. 강기동, "고속철도 궤도검측 자료 분석기법에 관한 연구", 한국철도학회논문집, 제7권 4호, 2004, pp.291-295.
2. 고려대학교, "고속철도 궤도 검측 데이터 고급분석기법 및 장대레일 최적 궤도 관리 시스템 개발", 연구재단 2차년도 연구보고서, 2010.
3. 구본근, 서사범, "고속철도 궤도 유지관리 기술의 동향", 대한토목학회지, 제51권 8호, 2003, pp.14-21.
4. 김대영, 이성근, 이기우, 우병구, 이성욱, 김기동, "궤도 유지보수를 위한 뜰림진전 예측 및 일정최적화", 한국철도학회 2008년 춘계학술대회논문집, 2008, pp.1346-1357.
5. 서사범, "궤도기술의 발달과 경험기술로부터의 탈피", 한국철도학회지, 제9권 1호, 2006a, pp.50-61.
6. 서사범, "선로공학", 북켈러리, 2006b.
7. 서사범, "승차감 향상을 위한 궤도 관리", 대한토목학회지, 제57권 9호, 2009, pp.64-69.
8. 손기준, 강기동, "고속철도의 궤도뜰림 분석", 대한토목학회 학술발표회논문집, 1999, pp.279-282.
9. 이지하, "선로구축물에 대한 유럽의 LCC연구동향", 한국철도학회 철도저널, 제11권 2호, 2008, pp.33-34.
10. 정우진, 안규일, "현 방법으로 검측된 궤도뜰림 값의 원형복원에 대한 기초검토", 한국철도학회 추계학술대회논문집, 2002, pp.1086-1093.
11. 한국철도기술연구원, "궤도유지관리 의사결정 지원시스템 개발", 철도유지보수시스템 기술연구사업 연구보고서, 2006.
12. Akihito Kawaguchi, Masashi Miwa and Koichiro Terada, "Actual Data Analysis of Alignment Irregularity Growth and its Prediction Model", QR of RTRI, vol. 46, No. 4, 2005, pp.262-268.
13. G. M. Shafiullah, A. B. M. Shawkat Ali, Adam Thompson and Peter J. Wolfs, "Predicting Vertical Acceleration of Railway Wagons Using Regression Algorithms", IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS, vol. 11, No. 2, 2010, pp.290-299.
14. J. Landolt, O. Briner, "ECOTRACK Decision-support system for permanent way maintenance and renewal User Manual", ERRI(European Rail Research Institute), 1998.
15. Masashi MIWA, "Mathematical Programming Model Analysis for the Optimal Track Maintenance Schedule", Quarterly Report of RTRI, vol. 43, No. 3, 2002, pp.131-136.

---

(접수일자 : 2011년 10월 31일)  
(수정일자 : 2012년 3월 15일)  
(심사완료일자 : 2012년 4월 12일)

---

## 요 지

궤도틀림은 열차의 주행안전 및 승차감에 미치는 영향이 크고, 소음·진동의 주요원인으로 작용한다. 따라서 현장에서 발생하는 궤도의 틀림을 체계적으로 분석함으로써 이를 저감할 수 있도록 차량운행 조건과 선로선형 및 궤도구조를 설계하는 것은 중요한 과제이다. 현재 국내에서 EM-120에 의해 검측된 틀림 데이터는 매우 불규칙적인 형태를 나타내며 데이터 분석 시 다양한 문제점을 가지고 있다. 본 연구에서는 궤도의 효율적인 유지관리를 위해 검측된 틀림데이터의 효율적인 처리 기법을 개발하고, 정제된 데이터를 이용해 선로를 구성하고 있는 이음매, 도상, 노반, 체결구 등의 요소를 고려하여 레일 궤도 틀림의 진전 정도를 정량화 하였다. 또한 축적된 검측 데이터로부터 궤도의 건전도를 평가할 수 있는 방법을 정립하고 잔존수명을 예측하여 효율적 유지관리를 실현하기 위하여 검측 데이터의 확률론적 수명 산정 기법 개발 및 데이터를 이용한 구간 특성에 따른 궤도틀림 표준편차의 틀림 진전 정도에 대한 통계 및 확률적 분석을 수행하였다.

**핵심 용어** : 틀림데이터, 철도궤도, 궤도구성품, 생애주기평가, 유지보수주기분석, 확률적 평가, 회귀분석

---