

고속선 궤도틀림진전예측에 관한 연구

A Study on High Speed Railway Track Deterioration Prediction

심윤섭† 김기동* 이성욱** 우병구** 이기우**
Yun-Seop Shim Ki-Dong Kim Sung-Uk Lee Byoung-Koo Woo Ki-Woo Lee

ABSTRACT

Present maintenance of a high speed railway is after the fact maintenance that executes a task when measured value goes over threshold value except some planned maintenance.

It is difficult from efficient management of maintenance human resource and equipment commitment because it is difficult to predict quantity of maintenance targets. Corrective maintenance is pushed back on the repair priority of other target to need repair and it is exceeded repair cost potentially.

For safety and dependable track management because track deterioration prediction is linked directly with track's life and safety of train service, it is very important that track management be based on preventive maintenance.

In this study, we propose statistics model of track quality to use track inspection data and forecast model for track deterioration prediction.

Keyword: high speed railway, track deterioration prediction, forecasting, maintenance

1. 서론

현재의 고속선 궤도 유지보수의 보수 대상선정은 검측된 각 검측항목의 값을 토대로 일정 한계치를 벗어난 구간을 보수대상으로 결정하거나 전체적인 검측 값들의 추세를 사람이 판단하여 주관적인 기준에 의한 의사결정을 통해 보수대상이 산정된다. 또한 사후 보수의 성향이 강해 궤도의 상태가 임계치에 도달했을 경우에만 보수를 시행하기 때문에 보수대상이 보수 투입 용량을 초과했을 시 문제의 소지가 다분하며 효율적인 보수가 어렵다. 때문에 궤도의 상태를 검측하여 그 값이 임계치에 도달하면 즉시 보수작업을 투입하는 사후보수 개념에서 궤도의 상태추이를 항상 모니터링하고 있다가 전체적인 계획에 의해 유지보수를 수행하는 사전 예방 개념으로의 전환이 필요하다.

본 논문에서는 궤도 품질 평가 및 궤도 틀림진전예측에 대한 연구에 대해 알아보고 궤도 틀림진전예측의 방법론을 제시하고 실제 검측데이터의 일부를 이용한 예측 모형에 대한 적합도 평가 실험 및 분석을 하고 결론 및 추후 연구방향을 제시한다.

2. 관련연구현황

- † 비회원, 강원대학교, 산업공학과, 연구원
E-mail : cion226@hanmail.net
TEL : (033)250-6280 FAX : (033)255-6281
- * 비회원, 강원대학교, 산업공학과, 정교수
- ** 정회원, 철도공사, 선로관리팀, 팀장
- ** 정회원, 철도공사, 기술연구팀, 차장
- ** 비회원, 유니드테크놀러지스, M&S TFT, 수석연구원

일본 RTRI의 Miwa[10]는 궤도를 특정구간으로 나누어 그 구간의 실제 궤도틀림데이터를 지수평활법으로 각 구간에 축적된 데이터를 이용하여 진진율을 예측하였다.

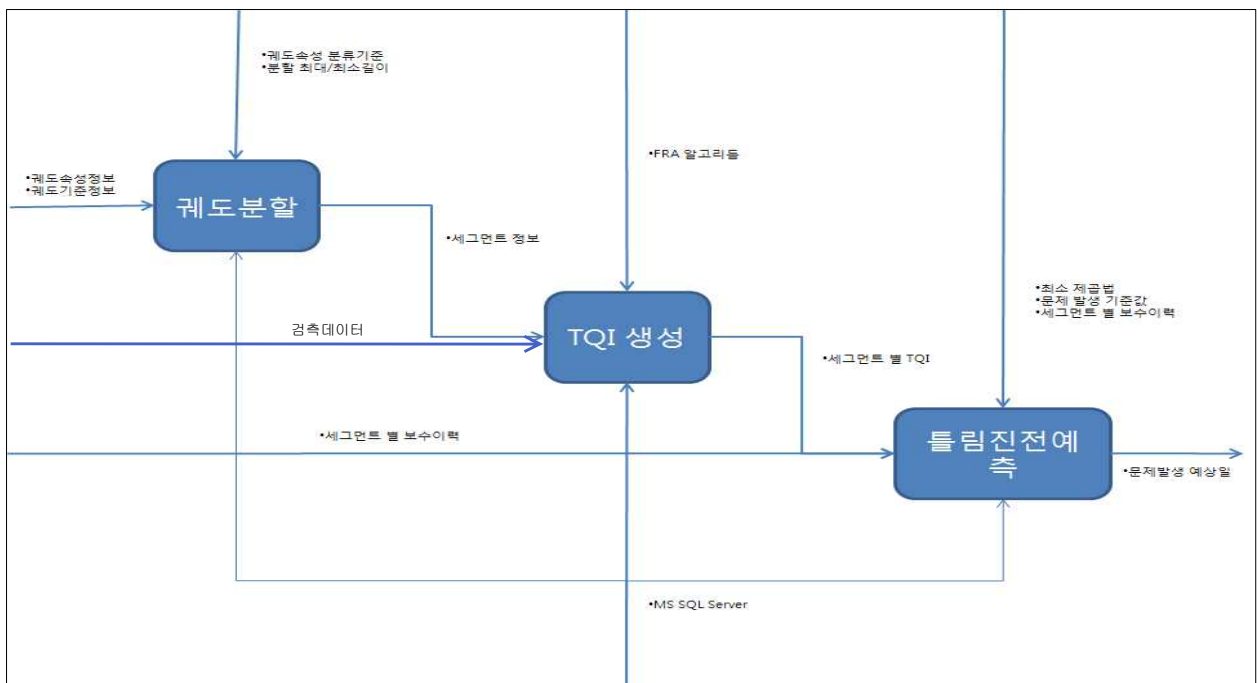
한국철도기술연구원 오지택[6]은 궤도의 손상모델을 bi-linear 모형으로 가정하고 궤도 틀림진전을 예측하였다. 궤도파괴에 영향을 미치는 변수들의 영향을 포괄적으로 단순화하여 MTT의 투입주기평가를 편리하게 하기위한 목적으로 예측을 수행하였다. 통과 톤수 2백만 톤을 기준으로 초기변화와 후기변화로 구분하였으며, 각 구간을 linear로 가정하였다.

김대영[5]과 김남홍[4]은 궤도 틀림진전을 선형모형으로 가정하고 세그먼트 단위로 틀림진전을 예측하는 연구를 하였다.

3. 궤도틀림진전예측 방법론

3.1 궤도 틀림진전예측의 프로세스

다음 [그림 1]은 틀림진전예측의 전체적인 프로세스를 설명한 그림이다.



[그림 1] IDEFO를 이용한 궤도틀림진전예측 프로세스

궤도의 틀림 진전을 예측하기 위해서는 궤도의 침목 종류, 궤도 종류, 구배정도, 교량 유무 등 궤도 구성품의 각종 특징을 반영하여, 궤도의 동질성이 확보될 수 있도록 분할하여 장기적인 궤도품질상태를 관찰하여야 한다. 궤도를 분할한 이유는 현재 궤도 검측차량에서 제공되는 검측 데이터는 25cm단위로 출력되기 때문에 이를 토대로 궤도의 틀림을 관리하면 300km의 구간을 관리하기에는 데이터가 너무 방대해져 효율적이지 못하다. 때문에 궤도의 동질성이 보장된 하나의 관리 단위로 지정하여 관리하려 한다[5].

세그먼트 단위로 측정된 검측데이터를 FRA 알고리즘과 표준편차를 통해 생성된 TQI들을 기존에 수행된 보수일자에 의해 분할된 각각의 기존 데이터 set을 대상으로 예측을 수행한다. 각 set에 속한 데이터를 선형으로 가정하고, 최소 제공법을 이용하여 선형식의 파라미터를 예측하게 된다. 예측된 TQI의 값이 기준값을 넘을 경우 넘는 시점을 세그먼트에 대한 문제예상일로 산출된다.

3.2 산정된 TQI에 의한 예측 방법론 제시

현재 예측을 위해 설정되는 모형에는 예측될 변수가 하나 또는 그 이상의 변수들과 인과관계를 갖는다고 가정하는 인과모형(causal model)과 미래의 예측값은 예측 대상이 되고 있는 변수의 과거의 자료나 오차에만 의존된다고 가정하는 시계열(time series model)이 있다.

현재 고속철의 상황은 각 궤도틀림의 요인에 대한 충분한 연구와 실험데이터가 이루어지지 않은 상황 이여서 인과 모형을 적용하기 부적합하다. 또한 두 달에 3번 정도의 검측이 이루어지고 있으며 궤도구 간에 따라 차이는 있지만 대부분 5개월 이내에 보수가 이루어지고 있다. 현재 예측이 이루어지는 기간 이 보수가 이뤄지고 다음번 보수가 이뤄지는 기간이기 때문에 보통 한 보수기간내의 자료는 4~5개정도 가 보통이다. 이는 많은 자료가 필요한 대부분의 시계열 모형을 적용하기에는 문제가 있다. 또한 두 개 의 추세가 존재하는 bi-linear 모형을 적용하기도 보수기간 동안의 모수의 수가 적다.

이에 본 논문에서는 TQI의 추세만을 반영한 최소제곱법을 이용한 선형 추세 예측과 bi-linear 모형과 유사한 log형 추세 예측을 하려한다.

생성된 세그먼트 별 TQI를 보수일자를 기준으로 그 이후 검측된 자료만을 취합하여 다음 식(1)에서 식(3)을 이용하여 추세를 예측할 수 있는 모수를 구한다.

$$\hat{\beta} = \frac{n \left(\sum_{i=1}^n x_i y_i \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)}{n \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \dots\dots\dots(1)$$

$$\hat{\alpha} = \bar{y} - \hat{\beta} \bar{x} \dots\dots\dots(2)$$

$$\hat{y} = \hat{\alpha} + \hat{\beta} x = \bar{y} + \hat{\beta} (x - \bar{x}) \dots\dots\dots(3)$$

단, x_i : i 번째 검측일 - 직전 보수일
 y_i : i 번째 TQI

3.3 통계적 보수기준 제시 절차

보수기준은 보수일정을 결정하는 매우 중요한 요인이다. 보수기준이 엄격하면 궤도에 문제 발생에 대 한 보호는 가능하지만 잦은 보수로 인한 비용 및 궤도의 수명이 단축된다는 단점이 있다. 반대로 보수 기준을 관대하게 산정하면 보수 횟수가 줄어들어 비용과 궤도 수명의 단축은 피할 수 있지만 상대적으로 사고의 위험성이 높아진다. 기존 궤도품질 평가에 대한 연구에서는 각 상황에 맞는 보수기준을 제시 하고 있다. 하지만 기존의 보수기준을 그대로 본 연구에서 사용하는 방법론에 적용하기는 무리가 있으 며 이에 대한 실험 역시 전무한 상태이기에 객관적인 보수기준의 제시가 어렵다. 이에 과거의 보수작업 이 궤도의 상태를 완벽하게 고려하여 이루어졌다는 가정 하에 다음과 같은 보수기준 산정방법을 제안하 려한다.

아래의 식(4)에서 식(8)은 통계적 보수기준 제시에 관한 식이다.

$$\frac{\sum_{i=0}^n D_i}{n} = \text{보수기준} \dots\dots\dots(4)$$

$$\frac{\sum_{i=0}^n D_i}{n} - \sigma = \text{주의기준} \dots\dots\dots(5)$$

$$\frac{\sum_{i=0}^n D_i}{n} + \sigma = \text{긴급 보수기준} \dots\dots\dots(6)$$

$$D_i = \alpha_i + \beta_i x_i \dots\dots\dots(7)$$

$$x_i = MD_i - MD_{i-1} \dots\dots\dots(8)$$

단, α_i = i 번째 예측 Set의 절편

β_i = i 번째 예측 Set의 기울기

σ = D_i 의 표준편차

MD_i = i 번째 예측 Set의 보수일자

예측 set이란 보수가 일어나고 다음 보수가 일어나기 전까지의 TQI들의 집합으로 정의한다. 위 식 (4)는 예측 set마다의 최소제곱법으로 계산된 모수와 직전 예측 set의 보수일자와 해당 예측 set의 보수일자의 차를 이용하여 나온 TQI의 평균을 보수기준으로 정의하고 산정된 보수기준에 표준 편차를 더 하여 긴급 보수기준으로, 표준편차를 감하여 주의 기준을 설정한다.

4. 실험 및 결과 분석

본 장에서는 FRA TQI와 가중 표준편차 TQI를 이용하여 최소제곱법을 이용하여 선형 회귀 추세 및 log형 회귀 추세를 분석하고 전 구간에 대한 예측의 정확도에 대해 평가한다.

4.1 트립진전예측 상관분석

실험 대상은 전 구간 중 보수와 보수 사이 검측 횟수가 3회 이상 10회 이하의 세그먼트를 선택하였다. 트립진전예측을 위해 2007년 1월부터 2010년 2월까지의 고속선 궤도 검측차량인 EM-120에서 제공된 검측데이터를 이용하여 면트립과 줄트립의 표준편차를 이용한 TQI와 면트립을 적용한 FRA TQI를 산출하였으며, 보수 기준은 실제 탬핑 이력을 토대로 적용하였다.

변수 사이의 관계를 분석하는 수단의 하나인 회귀분석은 회귀모형을 설정한 후 실제로 관측된 표본을 대상으로 회귀모형의 계수를 추정하여 변수 사이의 관계를 나타내 주는 선형 회귀식을 도출하는 과정을 거친다. 결정계수는 이와 같이 표본관측으로 추정된 회귀선이 실제로 관측된 표본을 어느 정도 설명해 주고 있는가, 즉 회귀선이 실제 관측치를 어느 정도 대표하여 그 적합성(goodness of fit)을 보여주고 있는가를 측정하는 계수로 나타낸 것인데, 이 값은 0과 1사이의 값을 가진다. 이러한 결정계수는 두 변수 사이의 상관관계의 정도를 나타내는 상관계수(correlation coefficient, 일반적으로 r로 나타냄)를 제곱한 것과 같으며, 따라서 R^2 (R-Squared)로 표시한다. $R^2 = 1$ 일 경우 모든 표본 관측치가 추정된 회귀선 상에만 있다는 것을 의미하며 따라서 추정된 회귀선이 변수 사이의 관계를 완전히 설명해 주고 있음을 의미한다. 반면, $R^2 = 0$ 일 경우에는 추정된 회귀선이 변수 사이의 관계를 전혀 설명해 주지 못함을 의미한다[11].

$$R^2 = \frac{(n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i)^2}{(n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2)(n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2)} \dots\dots\dots(9)$$

위의 (식 9)은 선형 회귀모형에서 결정계수를 계산하는 공식이다. 위 공식을 이용하여 다음 [표 1]은 면트립과 줄트립을 고려하여 산출한 2007년 1월부터 2010년 2월까지의 FRA TQI와 표준편차 TQI를 이용한 선형 추세와 log 추세의 결정계수를 세그먼트 별 평균으로 정리해 놓았다.

[표 1] 틀림진전예측 결정계수

Segment Code	FRA TQI		면틀림 표준편차 TQI		줄틀림 표준편차 TQI	
	선형	log형	선형	log형	선형	log형
	결정계수	결정계수	결정계수	결정계수	결정계수	결정계수
S-H1T1-0000000001	0.13675	0.10552	0.00489	0.00003	0.07819	0.03491
S-H1T1-0000000002	0.14095	0.10842	0.10459	0.02267	0.80101	0.77188
S-H1T1-0000000003	0.15183	0.14608	0.18882	0.04000	0.37373	0.38279
S-H1T1-0000000004	0.07844	0.08755	0.71016	0.69790	0.07939	0.10219
S-H1T1-0000000005	0.00000	0.01486	0.53358	0.24964	0.40393	0.39109
중간 생략						
S-H1T1-0000003230	0.51057	0.49017	0.58102	0.58499	0.27534	0.17813
S-H1T1-0000003231	0.46116	0.48273	0.60151	0.58883	0.44119	0.32225
S-H1T1-0000003232	0.39331	0.42205	0.33570	0.38233	0.46872	0.34428
S-H1T1-0000003233	0.39665	0.36178	0.39304	0.32497	0.46777	0.34255
S-H1T1-0000003234	0.59119	0.47104	0.68170	0.64923	0.18886	0.17544
평균	0.41261	0.39534	0.45680	0.43902	0.42950	0.41440

고속선 궤도의 틀림진전은 면틀림 표준편차로 산출된 TQI의 추세가 적합도가 전체적으로 높다고 볼 수 있다. 또한 선형과 log형의 추세에서는 선형이 log형보다 조금 더 높은 적합도를 보이고 있다.

또한 선형 결정계수가 log형 결정계수보다 높은 예측 set을 대상으로 비율을 보면 평균 1.467배가 높고 log형 결정계수가 선형 결정계수보다 높은 예측 set의 경우 log형의 경우가 1.442배 더 높은 것으로 나타났다.

전체 예측 set의 비율 역시 선형의 적합도가 높은 set은 56%, log형의 적합도가 높은 set은 44%로 선형 추세를 따르는 경우가 더 많은 것으로 나타났다. 그러나 예측 set 안의 검측 데이터의 개수가 적어질수록 선형의 적합도가 높은 set의 비율은 줄고, log형의 적합도가 높은 set은 높아지는 결과가 나타났다. 이는 궤도의 초기 틀림진전이 후반기의 모수가 많아짐에 따라 추세에 미치는 영향이 줄어든다고 볼 수 있다.

4.2 보수기준 제안

통계적 보수 기준을 산출하기 위해 4.1절에서 사용된 데이터 중 기울기가 양수이고 보수주기가 100일 이하인 예측 set을 이용하여 해당 set의 보수일과 직전 보수일과의 차를 변수 x 로 설정한 후 예상 TQI를 산정하였다.

[표 2] 예상 TQI 평균 및 표준편차

	선형		Log 형	
	D	δ	D	δ
FRA TQI	1.14570	1.40916	0.69179	0.80888
면틀림 표준편차 TQI	1.73992	1.32501	1.36129	0.75815
줄틀림 표준편차 TQI	1.50345	0.98306	1.14858	0.40665

[표 3] 통계적 보수기준

		주의기준	보수기준	긴급보수기준
선형	FRA TQI	0.00000	1.14570	2.55486
	면틀림 표준편차	0.41492	1.73992	3.06493
	줄틀림 표준편차	0.52039	1.50345	2.48651
log 형	FRA TQI	0.00000	0.69179	1.50066
	면틀림 표준편차	0.60315	1.36129	2.50987
	줄틀림 표준편차	0.74192	1.14858	1.55523

산정된 TQI의 평균을 구해 이를 보수 기준으로 산정한다. 현재 상태에서는 모집단의 통계값을 사용하기 때문에 위험성을 줄일 요량으로 평균에 $-\sigma$ 하여 주의 기준, $+\sigma$ 하여 긴급 보수기준으로 설정한다.

위의 [표 3]에 산출된 예상 TQI의 평균과 표준편차를 이용하여 주의기준, 보수기준, 긴급 보수기준을 제안했다. FRA TQI의 경우 주의기준의 경우 음의 값을 가져서 일괄적으로 0으로 처리한다.

5. 결론 및 추후 연구 방향

현재의 고속선 궤도 유지보수의 보수 대상산정은 검측된 각 검측항목의 값을 토대로 일정 한계치를 벗어난 구간을 보수대상으로 결정하거나 전체적인 검측 값들의 추세를 사람이 판단하여 주관적인 기준에 의한 의사결정을 통해 보수대상이 산정된다.

또한 사후 보수의 성향이 강해 궤도의 상태가 임계치에 도달했을 경우에만 보수를 시행하기 때문에 보수대상이 보수 투입 용량을 초과했을 시 문제의 소지가 다분하며 효율적인 보수가 어렵다.

이에 본 논문에서는 사전 예방 개념에서의 보수기준을 제시했다. 단일 검측항목의 임계치에 의한 보수 대상 산정 외에 궤도 속성에 따라 궤도를 분할하고 궤도의 상태를 대표하는 TQI를 산출하고 기준에 제시되었던 표준편차 TQI와 FRA TQI와의 분석하였다. 그리고 이를 통해 문제 발생일자를 예측하는 프로세스와 그에 대한 예측 모형 및 TQI의 보수 기준을 제시하고 이에 대한 분석을 했다.

추후 연구로는 축적되는 검측이력과 보수이력을 통해 좀 더 안정성 있는 보수기준을 제시하는 연구와 선형과 log형 외의 다른 형태의 예측 모델에 대한 분석 및 궤도 속성에 따라 적합한 예측 모형과 보수 기준에 대한 연구가 필요할 것이다.

참고 문헌

- [1] 강기동 외 (2004), 고속철도 궤도검측 자료 분석기법에 관한 연구, 한국철도학회, Vol.7 No.4, pp.291-295.
- [2] 강기동 외 (2005), 고속철도 궤도품질지수의 보완 계수 산정에 관한 연구, 대한토목학회, Vol.25 No.2, pp.311-316.
- [3] 강기동 (2005), 고속철도의 장파장 궤도틀림 분석에 대한 연구, 한국철도학회, Vol.8 No.2, pp.111-116.
- [4] 김남홍 외 (2009), 궤도검측데이터를 활용한 궤도품질지수 산출 방법론 고찰, 한국철도학회, pp66-72.
- [5] 김대영 외 (2008), 궤도 유지보수를 위한 틀림진전예측 및 일정최적화, 한국철도학회, pp.1346-1357.
- [6] 오지택 외 (2001), 궤도품질평가를 위한 궤도틀림 지표에 대한 연구, 한국철도학회, pp.409-412.
- [7] 한국철도공사 (2008), 고속선 궤도관리 의사결정지원 시스템 개발 : 2차년도 중간보고서.
- [8] 한국철도기술연구원 (2004), 유지보수 성능향상 기술지원 연구.
- [9] Federal Railroad Administration (2005), Development of Objective Track Quality Indices.
- [10] Miwa, M.(2002), Mathematical programming model analysis for the optimal track maintenance schedule, QR of RTRI, pp.131-136.
- [11] <http://enc.daum.net/dic100/contents.do?query1=11XXXX3350>