

# 궤도검측데이터를 활용한 궤도품질지수 산출 방법론 고찰

## Introduction of Track Quality Index(TQI) Methods using Track Induction Data

김남홍†      이승열\*      원용환\*\*      김관형\*\*\*      이성욱\*\*\*\*  
Kim, Nam-Hong   Lee, Syeung-Yeol   Won, Yong-Hoan   Kim, Kwan-Hyung   Lee, Sung-Uk

### ABSTRACT

In order to forecast the progress of the track irregularity, we should observe the long-term track quality and divide a track into some separated divisions which have homogeneous property. For this, we define the division of track which has homogeneous property as a 'Segment' and manage the 'TQI(Track Quality Index)' using track induction data based on each segment.

In this study, we introduce some methods of estimating track quality and figure out the TQIs of sample section using new FRA TQI method. In addition, we conducted a basic study of the forecasting model for the progress of track irregularity by analyzing track maintenance data.

Keywords : track irregularity, TQI(Track Quality Index), forecasting model

## 1. 서 론

궤도틀림의 진전을 예측하기 위해서는 궤도의 속성이나 특성별로 동질성이 확보될 수 있도록 각각의 구간별로 분할하여 장기적인 궤도품질 상태를 관찰하여야 한다. 이를 위하여 궤도의 동질성이 확보된 분할구간을 각각의 '세그먼트(Segment)'로 정의하고, 이 세그먼트 단위의 검측데이터를 활용하여 '궤도품질지수(TQI;Track Quality Index)'를 관리하게 된다.

본 연구에서는 궤도의 틀림진전을 예측하기 위해 사용되는 궤도품질지수 평가방법들에 대해 소개하고, 그 중 미연방철도국(FRA;Federal Railroad Administration)에서 제안한 궤도 길이기반 품질평가 방법론을 활용하여 샘플구간의 궤도품질지수(TQI)를 산출하였다. 또한, 세그먼트별 궤도품질지수 값에 대한 시계열 분석(Time Series Analysis)을 통해 해당 구간의 보수이력데이터와 비교하여 궤도틀림 진전예측 모델 제시에 대한 기초연구를 수행하였다.

## 2. 궤도품질평가 방법론

### 2.1 궤도품질평가 방법

궤도의 품질은 궤도틀림의 분석을 통하여 평가할 수 있으며, 궤도의 품질을 점수화(Scoring) 할 수 있는 방법에는 다음과 같은 평가방법들이 있다[1].

#### (1) Peak Value 방법

† 책임저자 : 비회원, 코레일 연구원 기술연구팀 주임

E-mail : knh12345@korail.com

TEL : (042)609-4930 FAX : (02)361-8200 (내선:3704)

\* 비회원, 코레일 연구원 기술연구팀 대리, musiclee@korail.com

\*\* 비회원, 코레일 연구원 기술연구팀 시설파트장, wonselue@empal.com

\*\*\* 정회원, 코레일 연구원 기술연구팀장, 기술사, bacd@dreamwiz.com

\*\*\*\* 정회원, 코레일 대전지사 시설팀장, 공학박사·기술사, ksleesu5802@hanmail.net

- 검측된 궤도틀림 자료의 중거를 직접적으로 보수기준으로 활용하는 방법
- (2) P Value 방법
  - 검측된 궤도틀림자료 중 3mm를 초과한 부분의 비율(%)을 궤도틀림지수(P)로 관리하는 방법
- (3) 표준편차 방법
  - 궤도틀림의 분포를 정규분포로 간주하고 궤도틀림의 평균값에 대한 분산정도를 평가하는 방법

## 2.2 궤도 길이기반 품질평가 방법

앞서 2.1절에 언급된 궤도품질평가 방법들 외에, 미연방철도국(FRA)에서는 궤도의 실측길이를 활용하여 궤도품질을 평가하는 방법을 제안하였다[2, 3]. 기본개념은 일정한 주기별로 측정되는 궤도검측데이터(track geometry data, track induction data)를 이용하여 궤도 세그먼트의 이론상 길이에 대한 실측길이의 비(ratio)로 궤도의 상태를 평가하는 것이다.

아래의 그림 1에 보인 것과 같이, 세그먼트 1, 2, 3의 양 끝단 사이의 거리는 서로 같지만 각각을 계측하여 그 길이를 비교하면 표면이 거칠거나 울퉁이 많을수록 즉, 궤도틀림이 많을수록 총 실측길이는 더 길어지게 된다.

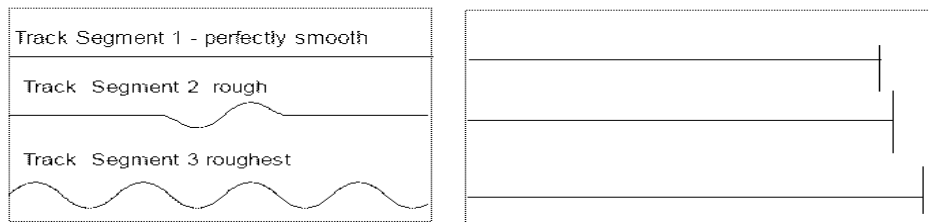


그림 1. 궤도 길이기반 TQI 접근법

이러한 방법을 이용하여 절대적인 값이 아닌 상대적인 값으로써 궤도품질 상태를 비교할 수 있다. FRA에서는 세그먼트 길이의 단위를 528ft (1/10 mile ≒ 160.9m)로 정하고, 다음과 같은 간단한 삼각형 공식을 이용하여 각 측정 부분에서의 길이의 합으로 총 실측길이를 계산하였다.

$$L_s = \sum_{i=1}^n \sqrt{(y_{i+1} - y_i)^2 + (x_{i+1} - x_i)^2} \quad (1)$$

여기서,  $L_s$ 는 총 실측길이,  $\Delta y$ 는 두 점 사이의 이론치와 실측치 차이,  $\Delta x$ 는 측정간격(두 점 사이의 거리)을 나타낸다.

각각의 세그먼트에 대한 총 실측길이가 구해지면 이론상 길이와의 차이를 구해 궤도의 틀림 정보를 얻을 수 있으며, 이러한 정보는 선로의 구간별 궤도품질을 평가하는데 활용된다. 다음은 FRA에서 정의한 궤도품질지수(TQI) 산출식이다.

$$TQI = \left( \frac{L_s}{L_0} - 1 \right) \times 10^6 \quad (2)$$

여기서,  $L_0$ 는 세그먼트의 이론상 길이를 나타낸다.

이상의 궤도 길이기반 품질평가 방법에서 알 수 있듯이, TQI는 궤도의 품질상태가 좋을수록 즉, 궤도틀림 감소와 양이 적을수록 또는 계산된 실측길이가 짧을수록 작은 값을 갖게 되며, 이에 반해 궤도의 품질상태가 나쁘면 상대적으로 높은 TQI값을 갖게 된다.

## 3. 궤도품질지수(TQI) 산출 및 분석

### 3.1 Segment 정의 및 분류

궤도의 틀림 진전을 예측하기 위해서는 구성품의 종류, 구조물의 유무, 도상종류 등 궤도의 속성이나 특성별로 동질성(Homogeneity)이 확보될 수 있도록 궤도를 분할(Segmentation)하여 이에 대한 장기적인 품질

상태가 관찰되어야 한다. 이러한 궤도의 동질성이 확보된 각각의 분할 구간을 하나의 세그먼트(Segment)라 정의하며[4], 세그먼트 단위로 궤도품질을 측정하고 관리하여 틀림진전 상황을 예측하게 된다.

궤도검측데이터를 활용하여 경부고속선의 궤도품질 특성을 파악하기 위해 고속선 일부를 샘플구간으로 선정하였다. TQI 분석에 사용된 구간은 구조물 특성 및 도상종류에 따라 Case-1, 2, 3으로 분류하였으며, 각각의 세부특성별로 세그먼트를 구분하여 TQI 산출 및 분석을 수행하였다. 샘플구간은 토공부, 교량부, 접속부, 자갈도상 터널, 콘크리트도상 터널 등의 궤도특성을 포함하고 있으며, 품질평가 단위가 되는 각각의 세그먼트 길이는 75~100m 사이의 값을 갖는다.

### 3.2 TQI 산출 및 분석

#### (1) Case 1

Case 1은 경부고속선 상행(T2) 182.100~184.544km 구간으로 토공과 교량구간의 구조물 특성을 갖는 연속된 구간이다. 2008년 1월부터 11월까지의 월 단위로 측정된 면틀림 검측데이터에 대하여 궤도 길이 기반 품질평가 방법론을 활용하여 각각의 세그먼트에 대한 TQI를 산출하였고, 그 결과를 그림 2에 보였다. TQI 산출 결과, 토공구간에 비해 교량(Segment 5, 15~18, 24)과 교량접속부에서 상대적으로 높은 TQI분포를 보였으며, 작업이력이 존재한 구간(Segment 5, 6, 11, 15, 16, 20, 22, 23, 24, 25)에서 검측일별 TQI의 변화가 관찰되었다.

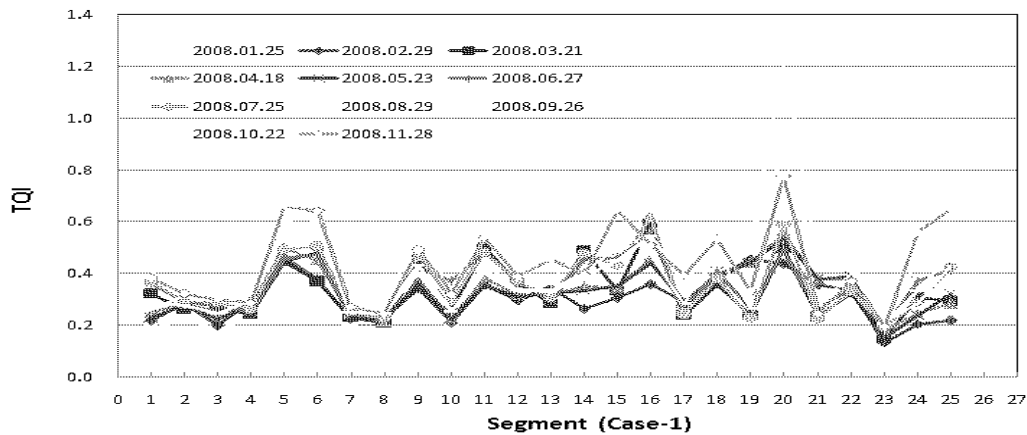


그림 2. TQI 산출 결과 (Case 1)

#### (2) Case 2

Case 2는 자갈도상 터널의 궤도특성을 갖는 부분으로, 경부고속선 T2 184.918~185.918km 구간이다. 월 단위 면틀림 검측데이터로 TQI를 산출해 본 결과, 그림 3에 보이는 것과 같이 보수이력이 존재하는 Segment 9를 제외하고는 전체적으로 0.1~0.4 사이의 낮은 TQI 분포를 보였다.

#### (3) Case 3

Case 3은 경부고속선 T2 206.344~207.077km의 콘크리트도상 터널을 포함한 구간이며, TQI분석 결과는 다음의 그림 4와 같다. 콘크리트도상 터널구간은 0.1~0.2의 매우 낮은 TQI 분포를 보였으나, 도상교결구간(Segment 7)과 터널접속부(Segment 8)는 상대적으로 높은 TQI 분포를 보였고 검측데이터 측정 시기일별로 값의 변화폭이 컸다.

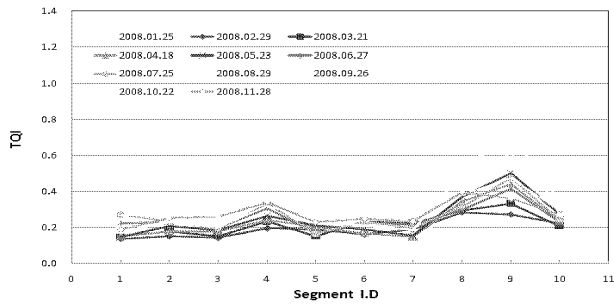


그림 3. TQI 산출 결과 (Case 2)

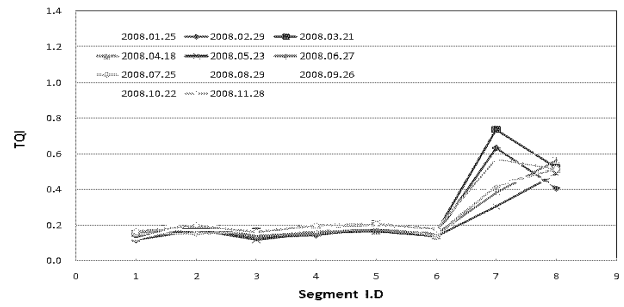


그림 4. TQI 산출 결과 (Case 3)

## 4. 시계열 분석

### 4.1 개요

시계열이란 시간의 흐름에 따라 일정한 간격으로 관측하여 기록된 자료를 말하며, 관측된 과거의 자료를 분석하여 법칙성을 발견하고 이를 모형화하여 추정하는 것을 ‘시계열 분석’이라 한다.

본 논문에서는 궤도의 품질을 나타내는 TQI 평가점수를 각각의 측정된 검측일별로 나타내어 시계열에 대한 TQI 변화 및 추이를 파악하고자 하였다. 또한, 해당 구간의 탬핑(Tamping) 보수이력 데이터를 분석하여 샘플구간에 대한 궤도품질상태 변화 즉, 트림진전 함수 특성을 파악하였다.

### 4.2 시계열 분석 결과

#### (1) 토공구간 -Case 1

일반 토공구간 중 2008년 1월부터 11월 사이에 보수이력이 존재하지 않았던 세그먼트들 중 대표적으로 Segment 7, 8의 시계열 결과를 그림 5에 나타내었다. 두 개의 세그먼트 모두 시간의 흐름에 따라 궤도품질지수 값이 점차적으로 증가하는 경향을 보였으나, 0.2~0.3의 매우 낮은 TQI 분포를 보이므로 궤도의 품질은 양호한 것으로 판단된다.

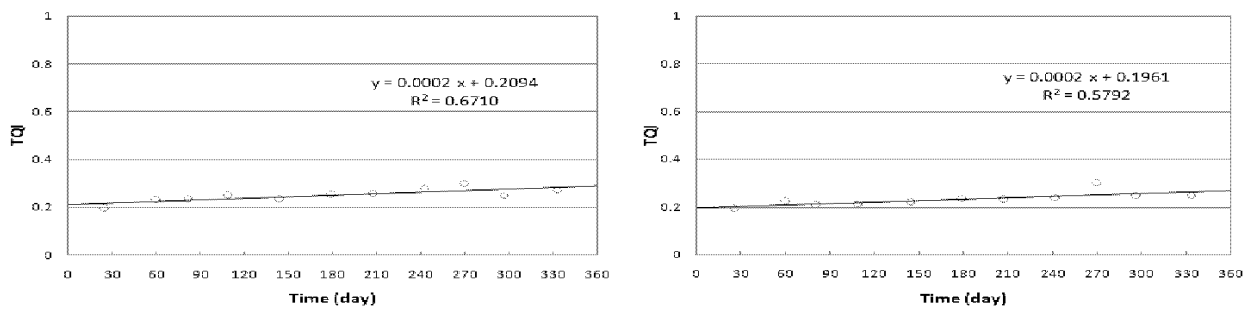


그림 5. 토공구간 시계열 결과(Segment 7, 8) - Case 1

#### (2) 교량구간 및 교량접속구간 -Case 1

교량구간 중 보수이력이 존재하지 않았던 Segment 17, 18에 대한 시계열 결과를 그림 6에 나타내었다. 전체적으로 토공구간 보다는 조금 높은 TQI 분포를 보였으나, 변화기울기는 급격한 것이 아니었고 증가폭도 크지 않았다.

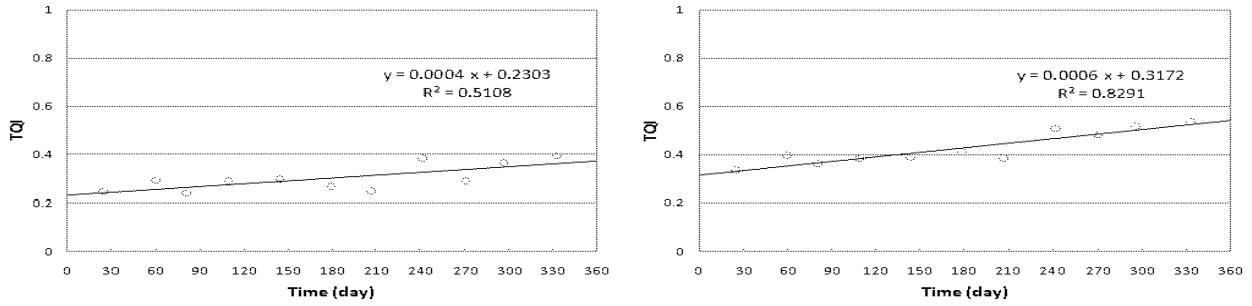


그림 6. 교량구간 시계열 결과(Segment 17, 18) - Case 1

교량접속구간에 해당하는 Segment 23, 25의 시계열 결과를 그림 7에 나타내었다. Segment 23은 2008년 2월 21일의 장비보수작업 이후에 품질지수의 급격한 회복을 보였고 시간의 흐름에 따라 점차적으로 안정화되는 경향을 보였다. 또한, 그림 8의 추세선을 이용한 회귀분석결과에서도 기울기가 매우 낮은 1차 함수 분포를 보였다. 이에 반해 Segment 25는 장비보수작업 직후에 품질지수의 일시적인 회복을 보였으나, 시간이 지날수록 TQI가 점차적으로 증가하는 형태를 보였다. 이에 대한 TQI의 진전형태 즉, 틀림진전은 그림 8의 회귀분석 결과 지수함수 형태의 급격한 증가분포를 보였으며, 추세선을 이용한 함수식과의 결정계수(R<sup>2</sup>, Coefficient of Correlation)도 0.9288로 1에 가까운 높은 상관관계를 보였다.

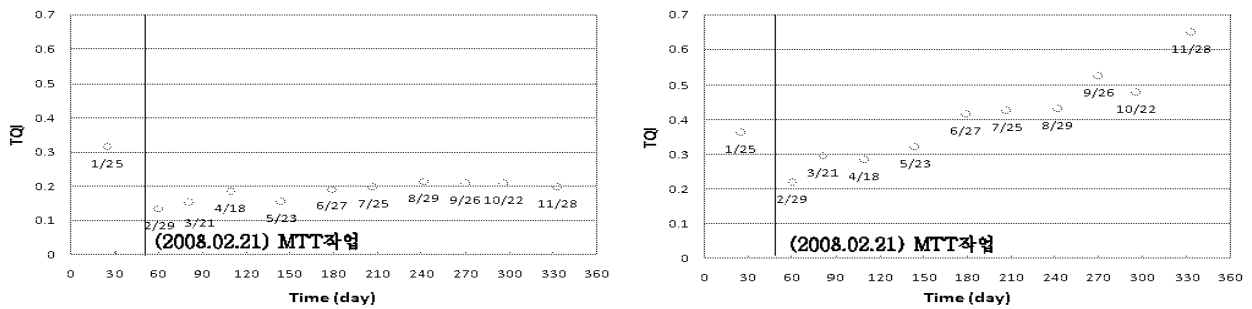


그림 7. 교량접속구간 시계열 결과(Segment 23, 25) - Case 1

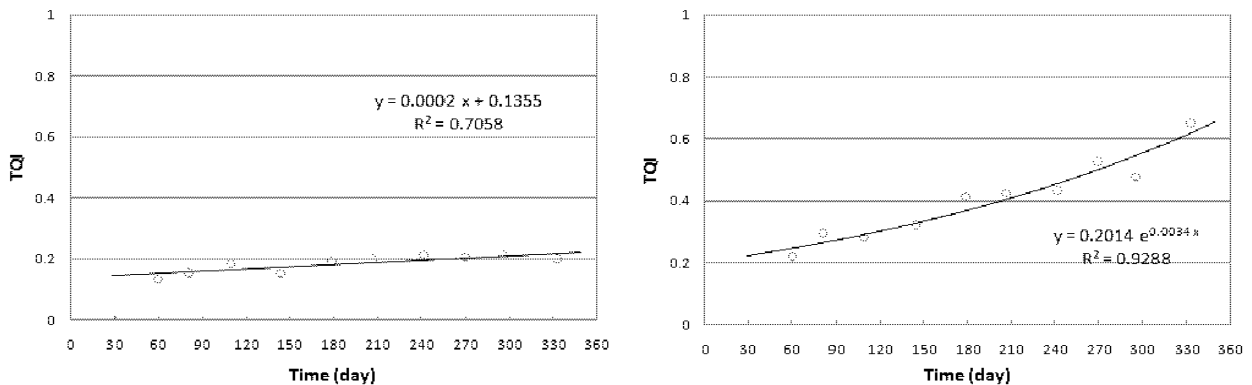


그림 8. 교량접속구간 틀림진전 함수 분석 결과(Segment 23, 25) - Case 1

### (3) 자갈도상 터널 및 접속구간 -Case 2

자갈도상 터널구간에 대한 시계열 분석 결과를 다음의 그림 9에 나타내었다. 분석 결과, Segment 4는 1차 함수 형태의 선형적인 증가분포를 보였으며 추세선을 이용한 함수식과의 결정계수(R<sup>2</sup>)도 0.872로 1에 가까운 상관관계를 보였다. 따라서, 이 구간은 1차 선형함수의 케도틀림진전 모델이 적용 가능하다고 판단되며 TQI의 증가분포 또한 급격한 변화가 아니었으므로 향후, 틀림진전 Forecasting 모델을 참조하

여 예방보수(Preventive Maintenance)에 입각한 작업일정을 계획할 수 있을 것이다. Segment 5의 경우도 마찬가지로 TQI 값에 대한 변화는 크지 않았으며, 1차 함수 형태로 서서히 증가하는 경향을 보였다.

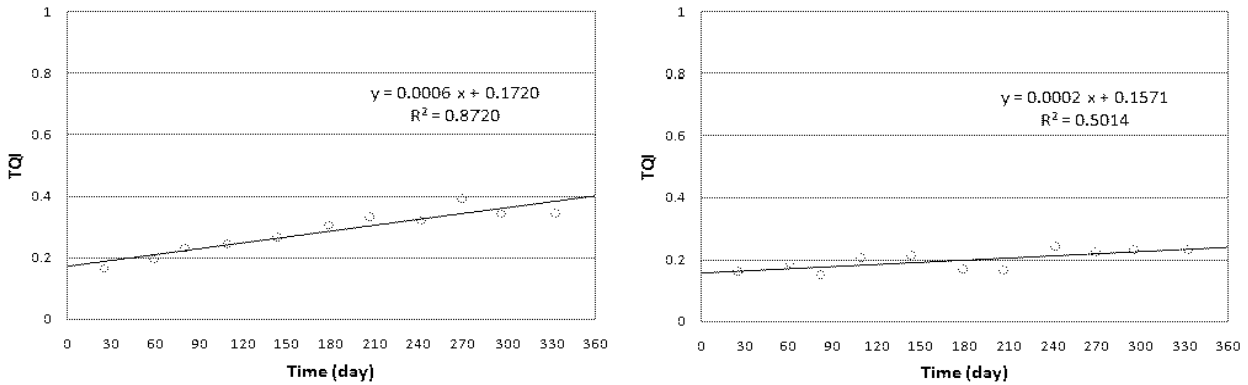


그림 9. 자갈도상 터널구간 틀림진전 함수 분석 결과(Segment 4, 5) - Case 2

자갈도상 터널의 접속구간에 해당하는 Segment 2의 시계열 분석 결과를 그림 10에 나타내었다. 2월 21일에 시행된 장비보수작업 이후에 품질지수가 낮아지는 품질상태 회복의 결과를 보였으며, 이후의 TQI진전은 큰 변화폭 없이 양호한 품질상태를 유지하며 서서히 증가하는 경향을 보였다.

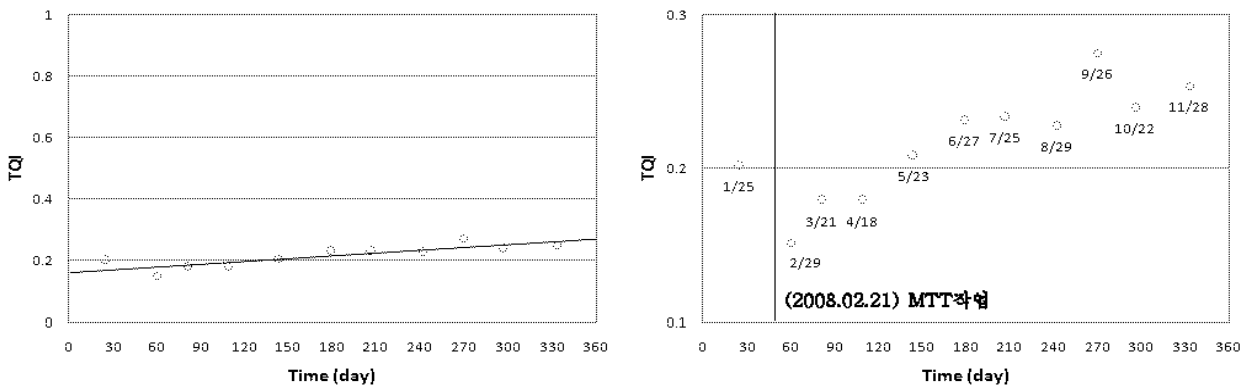


그림 10. 자갈도상 터널의 접속구간 틀림진전 함수 분석 결과(Segment 2) - Case 2

#### (4) 콘크리트도상 터널구간 - Case 3

콘크리트도상 터널구간에 해당하는 Segment 3, 6의 시계열 데이터를 그림 11에 나타내었다. 0.1~0.2 정도의 매우 낮은 TQI 분포를 보임에 따라 궤도틀림이 거의 발생하지 않았음을 확인할 수 있었고, 이 구간은 콘크리트도상으로 구성되어 있으므로 Tamp보수 이력은 존재하지 않는다.

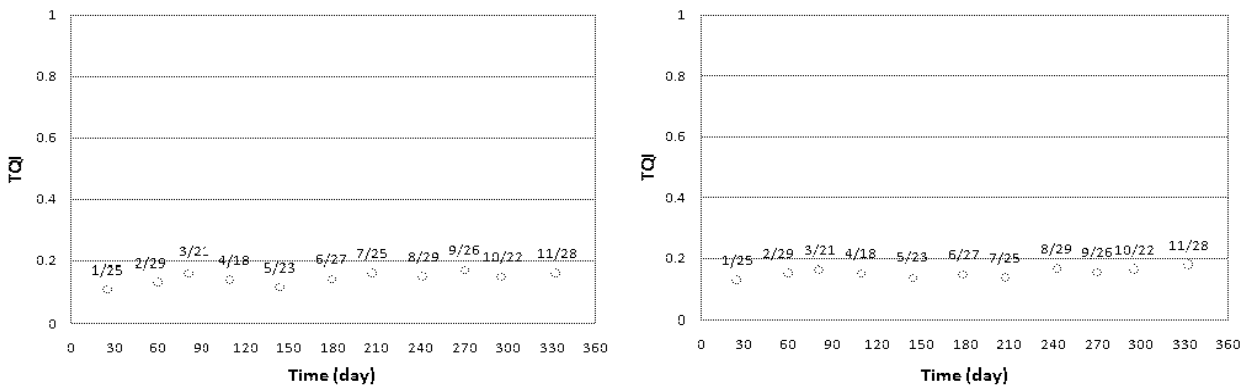


그림 11. 콘크리트도상 터널구간 시계열 결과(Segment 3, 6) - Case 3

## 5. 결 론

경부고속선의 궤도품질 특성을 파악하기 위하여 고속선 일부를 샘플구간으로 선정하여 궤도검측데이터를 활용한 궤도 길이기반 품질평가 방법론에 의거 TQI산출 및 시계열 분석을 수행하였다.

(1) TQI 산출 결과, 교량과 교량접속부의 TQI는 토공구간에 비해 조금 높았고, 자갈도상 및 콘크리트도상 터널구간은 전반적으로 낮은 분포를 보였다. 그러나, 터널의 도상고결구간과 터널접속부는 상대적으로 높은 TQI 분포를 보였으며 검측데이터 측정시기일별로 큰 변화를 보였다.

(2) 궤도특성별로 구분된 샘플구간에 대한 시계열 분석 결과, Tamp보수 이후 TQI값이 작아지는 궤도품질 회복의 결과를 보였으며 트림진전 함수는 시간의 흐름에 따라 TQI값이 점차적으로 증가하는 1차 선형 함수 형태가 대부분이었다.

(3) 본 연구에서 수행한 고속선 샘플구간에 대한 결과만을 가지고 궤도특성별 트림진전 함수를 일반화하기는 어렵다. 향후, 경부고속선 전 구간에 대한 Segment별 TQI를 산출하고 이에 대한 프로그램 모듈을 개발할 예정이며, TQI에 대한 적정 관리기준치를 제시하여 고속선 궤도유지보수 작업일정 스케줄과 연동시킬 계획이다.

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행하고 있는 미래철도기술개발사업(06 고속철도 III-1)의 지원으로 수행되었습니다. 이에 관련기관에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 오지택 (2001), “궤도유지보수를 위한 궤도트림 분석 및 관리 전산시스템의 개발”, 전산구조공학 학술기사 제14권 1호, pp.49~59.
2. 김상수, 김영모, 한영재, 박춘수 (2005), “궤도 검측 시스템의 현황과 응용”, 한국소음진동공학회 2005년도 추계학술대회논문집, pp.139~142.
3. Sung Lee (2005), "Development of Objective Track Quality Indices", Federal Railroad Administration, Research Results, RR 05-01.
4. Stasha Jovanovic (2006), "Railway Track Quality Assessment and Related Decision Making", Delft University of Technology, The Netherlands.