

# 궤도 유지보수를 위한 트립진전 예측 및 일정최적화

## Track Deterioration Prediction and Scheduling for Preventive Maintenance of Railroad

김대영\*      이성근\*\*      이기우\*\*\*      우병구\*\*\*\*      이성욱\*\*\*\*\*      김기동\*\*\*\*\*  
Kim, Dae-Young   Lee, Seong-Geun   Lee, Ki-Woo   Woo, Byoung-Koo   Lee, Sung-Uk   Kim, Ki-Dong

### ABSTRACT

In the track geometry such as rails, sleepers, ballasts and fastener, track deterioration occurs by repetitive train weight and the high-speed railway takes a trend faster than normal. Track deterioration of over threshold value harms ride comfort and furthermore affect in trains safety seriously. An organic and systematic track maintenance system is very important because a trend of the track deterioration effects on track life-cycle and running safety. Also costs of the railway track permanent way and its maintenance are extremely large, forming a significant part of the total infrastructure expenditure. Therefor reasonable and efficient track maintenance has to be planed on a budget. It is required to carry out not only corrective maintenance but preventive maintenance for the track maintenance. In order to perform maintenance jobs in the boundary of the machines and resources given regarding the type and amount jobs, it is necessary to determine feasible or optimal scheduling considering the priority

In this study, the system organization and required functions for the development of track maintenance system supported track deterioration prediction and optimal scheduling are proposed.

### 1. 서 론

궤도 선로에서 궤도는 레일, 침목, 도상, 체결구 등으로 이뤄진 탄성 구조체로 열차의 운행으로 인하여 점진적인 궤도트립이 발생하게 된다. 기준치 이상의 궤도트립(deterioration)은 승차감을 악화시키고 열차운행안전에도 영향을 미치므로, 유기적이고 체계적인 궤도 유지관리가 중요하다.

궤도 유지관리는 문제가 발생한 이후에 보수를 시행하는 사후보수(corrective maintenance)와 예측을 통해 보수를 시행하는 예방보수(preventive maintenance)가 필요하며, 비용(cost) 측면에서도 큰 비중을 차지하고 있으므로 제한된 예산범위 내에서 합리적이고 효율적인 궤도 유지관리 방안이 도출되어야 한다. 이러한 작업들을 수행하기 위하여 궤도의 트립진전을 예측하고, 필요한 궤도보수 작업 종류와 일정을 주어진 물적·인적 자원의 범위 내에서 우선순위를 감안한 실행 가능한(feasible) 최적화된 일정계획(scheduling) 수립이 필요하다.

\* 강원대학교 산업공학과 박사과정, 비회원

E-mail : jerome@kangwon.ac.kr, TEL : (033)250-6280 FAX : (033)255-6281

\*\* (주)인포미아

\*\*\*\* 한국철도공사 철도연구원

\*\*\*\*\* 한국철도공사 대전지사 시설팀장, 공학박사

\*\*\*\*\* 강원대학교 산업공학과 교수

+ 본 논문은 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행하고 있는 2007년도 미래철도기술개발사업(06 고속철도 III-1)의 지원으로 이루어졌습니다.

## 1.1 연구개발의 중요성

궤도 유지관리의 특성상 유지보수의 적정한 시기를 놓치고 문제 개소가 발생한 이후에 보수를 시행하는 사후보수의 경우 많은 추가 비용을 수반하게 된다. 또한, 사후보수는 보수가 필요한 다른 개소들의 유지보수 우선순위를 뒤로 밀리게 하면서 잠재적으로 보수비용이 크게 증가하는 효과(snowball effect)를 유발한다. 이미 유럽 및 일본과 같은 철도 선진국에서는 전체 궤도 유지관리를 위해 사후보수의 개념에서 탈피하여 예방보수의 개념에 입각한 유지관리 시스템을 개발하였다.

유럽의 경우, 1991년부터 8년간 국제철도연맹(International Union of Railways)산하의 유럽철도연구원(European Rail Research Institute)주도로 24개국 철도운영기관들의 지원 하에 궤도 유지관리시스템(Ecotrack) 프로젝트가 수행되었다.<sup>1)</sup> 개발완료 후 약 3년간의 현장적용기간을 통해 Ecotrack의 시스템 커스터마이징을 수행하여 신뢰성과 완성도를 높였다. 현재 네덜란드 소재의 ARCADIS사에서 판매하고 있는데 시스템 라이선스, 커스터마이징 그리고 사용자 교육 등을 수요자가 일괄구매토록 함으로써 개발이익을 환수할 수 있는 체계를 구축하였다.<sup>2)</sup>

국내의 궤도 유지관리는 검측차와 같은 검측장비들을 이용해 취득된 궤도검측 데이터들이 관리기준을 초과하는 경우 해당 개소에 대해 보수를 실시하는 사후보수에 의존하고 있다. 경제적인 측면과 기술적인 측면을 고려했을 때, 한정된 예산 내에서 전체 궤도에 대한 최적의 유지보수 방안 도출을 위해서는 체계적이고 진보된 형태의 예방보수개념의 궤도 유지관리 시스템 개발이 절실하다.

아래의 [도표 1]은 이 연구가 가지는 기술적, 경제·산업적, 사회·문화적 측면에서의 의의를 나타내고 있다.

도표 1. 연구개발의 의의

분야	연구 내용
기술적 측면	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 선로보수에 대한 의사결정 객관화</li> <li>2. 궤도구성품 상태 평가 및 예측 기술의 고도화</li> <li>3. 궤도틀림 실시간 감시시스템 기술개발</li> <li>4. 검측데이터관리시스템 기술개발</li> <li>5. 궤도틀림 진전예측시스템 기술개발</li> <li>6. 궤도 유지보수 작업일정 최적화시스템 기술개발</li> <li>7. 웹기반 협업지원시스템 기술개발</li> <li>8. 시스템 통합 및 패키징 기술개발</li> </ol>
경제·산업적 측면	<ol style="list-style-type: none"> <li>9. 예방보수개념의 궤도 유지관리 시스템 실용화로 고속선 유지보수 효율성 향상</li> <li>10. 고속선 선로관리의 안정성(stability)을 확보하여 고속선로의 수송율과 정시성의 극대화</li> <li>11. 국외 철도시장 진출 시 시장 경쟁력 강화</li> </ol>
사회·문화적 측면	<ol style="list-style-type: none"> <li>12. 고속철도의 대외적 이미지 향상</li> <li>13. 고품질의 고속철도 여객서비스 제공</li> </ol>

## 1.2 연구개발의 목표 및 내용

이 연구는 궤도 유지보수를 위하여 예방보수개념을 기반으로 국내 고속선 운영환경에 적합한 요소기술으로써 틀림진전예측 모델 및 유지보수 작업일정최적화 기능을 개발하는 것으로 [도표 2]에 나타내고 있다.

도표 2. 연구목표 및 내용

연구목표	주요연구내용
검측데이터 관리	<ul style="list-style-type: none"> <li>검측데이터 변환/가공 표준화 기술 개발</li> <li>궤도 유지보수이력 기초 데이터 수집</li> <li>검측데이터 관리 모듈 개발</li> <li>검측데이터와 궤도 유지보수이력 데이터 통합관리 및 매핑모듈 개발</li> <li>검측데이터 관리 데이터베이스 설계 및 구축</li> </ul>
궤도틀림진전 예측	<ul style="list-style-type: none"> <li>궤도틀림진전예측 통계모델링 및 시스템</li> </ul>
궤도유지보수작업 일정최적화 알고리즘 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>궤도 유지보수 관련 리소스 관리 모듈 개발</li> <li>궤도 유지보수작업 일정최적화 알고리즘 개발</li> </ul>

## 2. 관련 연구현황

### 2.1 철도 선진국의 유지보수 관련 시스템 모델 분석

각 철도 선진국에서는 자국 내의 궤도 유지관리의 특성에 부합되는 독자적인 궤도 유지관리 의사결정 시스템을 구축하고 활용하고 있다. 그 현황을 요약하면 [도표 3]과 같다.

도표 3. 철도 선진국의 유지보수 관련 시스템

국가	유지보수 관련시스템	주요 기능
일본	MicroLABOCS	<ul style="list-style-type: none"> <li>궤도 유지관리를 목적으로 한 데이터 처리</li> <li>20m현, 40m현 파형계산</li> <li>MTT작업을 위한 10현 복원파형 변화</li> </ul>
프랑스	TIMON	<ul style="list-style-type: none"> <li>궤도보수 작업이력</li> <li>각 구간별 궤도의 구성요소 및 궤도검측데이터를 종합 분석하여 보수작업일정 제시</li> </ul>
이탈리아	RAMSYS	<ul style="list-style-type: none"> <li>최적계획수립과 작업 스케줄링 기능</li> <li>유지보수 정책 결정</li> <li>외부시스템과의 호환성; ERP, GIS 등</li> </ul>
독일	REIHPLAN Plus	<ul style="list-style-type: none"> <li>작업필요지역 추출</li> <li>작업종류 관련 정보</li> <li>차단시간 관련 정보</li> </ul>

국외의 경우, 일본은 검측데이터를 쉽게 가공처리할 수 있는 MicroLABOCS을 활용한 궤도관리 시스템을 개발하여 궤도유지보수에 이용하고 있다. 프랑스의 VIGIE는 Oracle 데이터베이스와 연동하고 있으며, 문서보관 및 신규 계획 시공자료를 운용하는데 있어 결정적인 획을 그은 시스템이다. 또한 사용이 간편하여 짧은 시간 내에 사용교육이 가능하다. 독일의 REIHPLAN Plus는 자원의 재분배와 논리적 체계에 따라, 궤도 유지관리 작업의 효율적인 선정을 목적으로 하고 있고, 자원의 할당을 그래픽 인터페이스로 작업할 수 있게 한다.

국내의 경우, 한국철도기술연구원(2005)은 궤도유지보수 작업일정 모형의 범위를 도상자갈 다짐작업의 한 개의 작업과 일부의 제약사항만을 고려하였다. 그리고 CPLEX 분지-절단 알고리즘(Branch and Cut)을 이용한 작업 일정최적화 모듈을 문제 규모 100%의 실제문제에 적용한 결과 많은 수행시간(6시간)이 소요되어 수행도 향상을 위한 추가적인 연구가 필요하다.

### 2.2 궤도틀림 진전예측

궤도 유지관리시스템의 요소기술 중에서 가장 중요한 기술은 궤도틀림의 진전을 예측하는 것이다. 열

차의 안정적인 주행과 승차감에 가장 큰 영향을 주며 성능을 대표하는 인자가 궤도의 선형이라고 할 수 있으며 이 선형의 불규칙도가 궤도틀림이다. 궤도의 선형을 나타내는 궤간(Gauge), 고저(Level), 방향(Alignment), 수평(Superelevation) 등의 측정치는 열차의 반복적인 통과에 의해 점진적인 소성변형 즉, 궤도틀림이 발생한다.

ERRI D71위원회(1970)<sup>3)</sup>는 실험을 통하여 주기하중재하시의 침하량에 대한 궤도의 열화모델을 제시하였다. Sato(1994)<sup>4)</sup>는 궤도 검측차의 10m 현 면틀림 데이터를 25m 구간으로 나누어 2년간 분석하여 100일간의 궤도틀림 진전을 예측할 수 있는 모델을 제시하고 동일한 수의 차량이 지나가는 궤도파괴계수를 정의하였다.

한국철도기술연구원의 오지택(2000)<sup>5)</sup>은 궤도의 손상모델을 Bi-linear모델로 가정하고 MTT(multiple tie tamper)의 작업주기를 평가하기 위하여 궤도틀림의 표준편차를 이용하여 진행추정식을 제시하고, 궤도파괴에 영향을 미치는 변수들의 영향을 포괄적으로 단순화하여 MTT의 투입주기평가를 편리하게 하기 위한 목적으로 초기 궤도틀림변화를 직선적으로 보고 Bi-linear모델로 가정하고 2백만 톤을 기준으로 초기변화와 후기변화를 구분하였다.

일본 RTRI의 Miwa(2000)<sup>6)</sup> 등은 궤도를 특정구간(lot, 100m)으로 나누어 그 구간의 실제 궤도틀림데이터를 지수평활법(exponential smoothing method)을 이용하여 각 구간에 축적된 데이터를 이용하여 진전을 예측하였다. Miwa의 예측식은 선로를 100m의 구간으로 나누어 각 구간의 실제의 측정값을 이용하여 확률론적으로 예측식을 만들었다는 특징이 있다.

### 2.3 궤도 유지관리 최적화 모형

궤도 유지보수 작업계획 문제는 일별 차단시간을 고려해서 장비·인력계획을 수립하는 단기계획 모형과 세부 고려사항은 배제하고 거시적인 계획만을 수립하는 중장기계획 모형으로 나뉘볼 수 있다.

단기계획 모형으로는 Higgins(1998)<sup>7)</sup>는 분석시간 48시간 동안의 열차 운행시간을 확보하기 위해 작업 수행 시간의 최소화를 목표로 작업과 인력의 투입 일정을 수립하는 모형을 제시하고, 일부 비선형제약식이 포함되는 정수계획 모형을 타부서치(Tabu search)를 이용해 해를 도출하였다. Lake et al.(2000)<sup>8)</sup> 역시 인력 투입 일정까지 고려한 단기 운영 계획 수립모형을 제시하였다. 그들의 연구에서도 문제의 복잡도 때문에 초기단계 휴리스틱 기법을 이용해 일단의 가능해(feasible solution)를 구한 후 시뮬레이티드 애닐링(simulated annealing)을 이용해 최적해를 탐색하는 과정을 수행하였다.

중장기계획 모형으로는 Rivier(1998)<sup>9)</sup>의 Ecotrack에서 다양한 룰(rule)에 기반을 두어서 예방보수 작업시기를 결정한 후 각 작업의 시간, 공간, 유형에 관한 연관성 분석을 통해 연관성이 높은 작업끼리 묶는 최적화 방식을 적용했다. Miwa(2002)<sup>10)</sup>는 궤도틀림 방지를 위해 MTT작업의 최적 일정계획을 수립할 수 있는 혼합정수계획(Mixed Integer Programming) 모형을 개발하여 단위기간 10일, 분석기간 6개월에 대한 장비할당과 작업일정계획을 수립할 수 있도록 제시하였다. 한편, Budai and Dekker(2004)<sup>11)</sup>는 보수작업으로 인한 궤도점유시간의 단축을 목적으로, 1단계로 주간(또는 월간) 단위의 작업량을 할당한 후, 2단계에서 앞서 할당된 주간(또는 월간)단위의 작업을 열차 차단시간 내에 할당하는 모형을 제시하였다.

## 3. 궤도틀림 진전예측

### 3.1 궤도틀림 진전예측 기능

궤도틀림 진전을 예측하기 위해서는 [그림 1]와 같이 궤도는 침목의 종류, 궤도 종류, 구배정도, 교량 유무 등 궤도 구성품의 각종 특징을 반영하여, 궤도의 동질성이 확보될 수 있도록 분할하여 장기적인 궤도품질상태를 관찰하여야 한다. 이 궤도의 동질성이 확보된 궤도의 분할 구간을 한 세그먼트(segment)라 하며, 이 세그먼트 단위로 측정된 검측데이터를 이용하여 궤도품질지수(TQI: track quality index)를 관리하여, 그 진전 상황을 예측하게 된다. 또한 TQI의 값이 한계값을 넘을 경우 이상세그먼트로 분류되어 이상 유무를 파악, 유지보수가 필요할 경우 보수대상 리스트에 등록된 뒤 보수작업을 수행하게 된다.

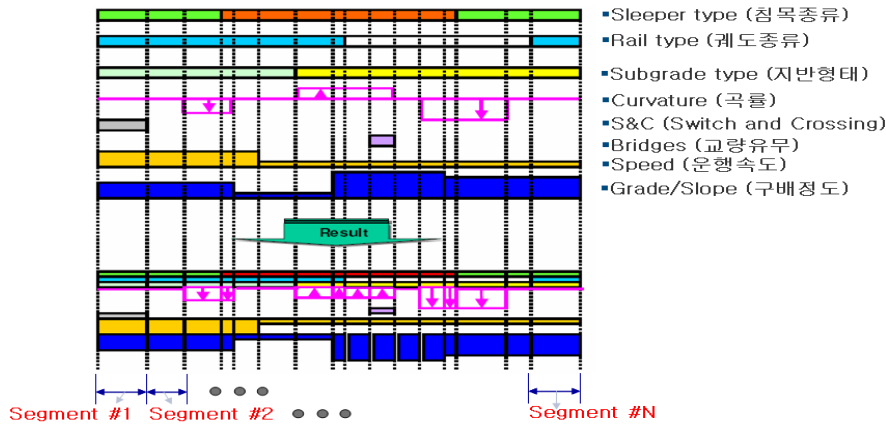


그림 1. 궤도틀림 진전예측을 위한 궤도분할(Segmentation) 기법

궤도틀림은 무작위로 분포하는 것으로 관찰되지만, 시간의 경과에 따라 검측데이터의 궤도틀림 파형을 보면, 직관적으로 그 진전을 파악할 수 있다. 그러나 필요한 전체구간을 해석하고자 한다면 데이터의 양이 방대하여, 전산처리에는 부적합하다. 따라서 통계적인 방법을 이용하여 그 경향을 파악하는 것이 현실적으로 적절하다고 판단된다.<sup>12)</sup> 먼저 궤도틀림 데이터에 대한 분포함수 추정을 하여 적절한 분포시스템을 찾아내고, 그 신뢰도를 추정하여 적절한 대푯값으로 표준편차를 이용하였다. 표준편차를 계산하기 위해서는 구하고자 하는 궤도의 길이를 결정하여야 한다. 너무 짧은 구간에 대한 표준편차 값은 매개변수에 대한 신뢰할 수 있는 충분한 통계적 자료를 제공하지 못한다.

[그림 2]는 다양한 궤도틀림 진행 유형을 나타내고 있으며, [그림 3]은 궤도의 틀림은 관측가능하며 보수작업이 진행될 경우 틀림이 서서히 진행되는 모형을 나타낸 진전모델이다.

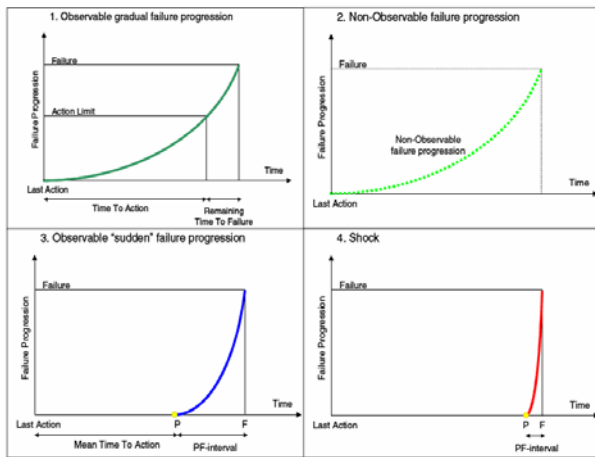


그림 2. 틀림 진행 유형

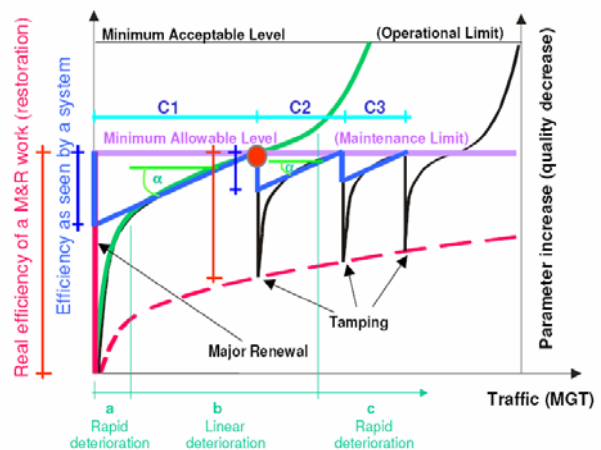


그림 3. 궤도틀림 Generic Model

아래의 [그림 4]에서는 동일한 지점에서 틀림진전이 탬핑 작업정보를 추가할 경우 궤도틀림 진전예측이 달라짐을 알 수 있다. 따라서 궤도틀림 모델을 개발하고 적용하기 위해서는 가능한 모든 데이터를 활용해야만 하며, 이러한 데이터에는 누적통과톤수(accumulated tonnage), 침목의 종류와 연령(ballast type and age), 파상마모(corrugation) 등이 모두 포함되어야 한다.

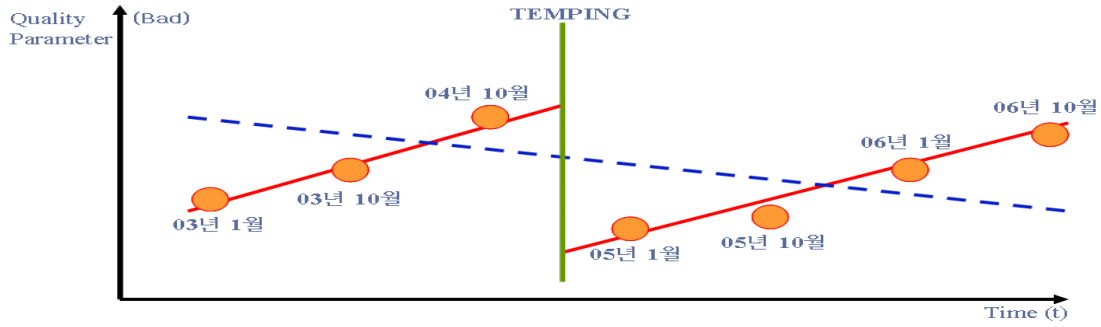


그림 4. 보수작업이력을 고려한 궤도틀림 진전예측

### 3.2 궤도구간별 궤도품질지수

궤도의 틀림을 관리하기 위해서 지속적으로 증가하는 궤도틀림량이 기준 값을 초과하기 이전에 다짐작업이 이루어져야 한다. 이와 같은 다짐작업은 인접구간의 일정과 잘 조정된 상태에서 진행되어야 한다. 일단 다짐작업이 실시되면 해당 구간의 궤도틀림은 MTT 장비의 복원능력에 따라 정상상태로 복원된다. 그러나 일반적으로 그 값이 이상적인 상태로 복원되지 않으며 반대로 다짐작업 횟수의 증가에 따라 복원되는 정도는 감소하게 된다. 해당 구간의 복원능력이 현저하게 저하되기 이전에 자갈치기 작업이 실시되어야 한다. 자갈치기 작업은 심각하게 훼손된 도상자갈을 재생하는 작업이다. 자갈치기 작업이 실시되면 대상 노상의 궤도 틀림은 이상적인 상황인 초기 값으로 재설정된다.

다짐작업과 다짐작업사이에는 하나의 선형회귀 직선이 만들어지며 고유의 기울기가 생성되는데, 이 기울기는 작업이 진행됨에 따라 각각의 세그먼트마다 여러 개의 기울기 데이터가 발생한다.

틀림 진전예측 프로세스를 나타낸 것이다. 검측장비로부터 입력된 검측 값을 구간별로 특성에 맞추어 궤도품질지수(TQI) 함수를 설정한 뒤, 궤도틀림 진전율을 구하기 위한 선형회귀함수를 설정한다. 설정된 함수는 입력된 검측데이터에 대하여 계산되어지며 기준치보다 크게 나타나는 세그먼트는 이상 세그먼트 리스트에 기록되어 추후 의사결정을 하는데 필요한 정보로 활용된다.

[Track Quality Index]

$$S.D = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_i)^2}$$

$n$  = 검측점 수

$X$  = 검측 값

$i$  = Segment

$j$  = Segment안에 속한 관측지점

각각의 세그먼트에 대하여 표준편차를 계산하고 화면으로 도시한다. 검측데이터의 표준편차를 세그먼트의 파라미터마다 하나의 그래프로 도시하며, 이렇게 계산된 각 세그먼트별 표준편차를 이전의 값과 비교하여 최소자승법(method of least square)을 이용하여 궤도틀림진전패턴에 대한 회귀모형을 개발하였다. 궤도틀림 진전율은 최소자승법을 이용한 선형 회귀식으로 표현되며 절편과 기울기를 가지는 직선으로 그 기울기가 궤도틀림의 진전율을 보여주게 된다. 다짐작업과 다짐작업사이에는 하나의 선형회귀 직선이 만들어지며 고유의 기울기가 생성되는데, 이 기울기는 작업이 진행됨에 따라 각각의 세그먼트마다 여러 개의 기울기 데이터가 발생한다.

궤도 상태 파라미터별 품질지수는 다양하게 발생한다. 그러한 값에 대해서 사용자는 파라미터별 중요도를 달리 적용하여 하나의 종합품질지수(TQI: total quality index)를 생성한다.

[Total Quality Index]

$$\text{Max} \left[ \text{Max} \delta_{x_i - L_i}, \text{Max} \frac{X_i}{L_i} \right]$$

$$\delta_{x_i} = \begin{cases} X_i \geq 0 & \Rightarrow 1 \\ X_i < 0 & \Rightarrow 0 \end{cases}$$

$\delta_{x_i} = X_i$ 가 기준 허용치와의 차가 1이상일 경우 1로 지정

### 3.2 궤도구간별 이상세그먼트 도출

고속선 구간은 세그먼트로 분할되어 관리되며, 모든 세그먼트들은 열차통과 톤수의 누적에 따라 궤도틀림 값이 증가한다. 고속철도 선로 유지보수지침에서는 모든 고속철도 구간의 궤도틀림 값이 특정범위 이하로 유지되도록 정하고 있다.

고속선의 궤도 유지보수 작업계획 수립 기능은 사후보수에 예방보수 개념을 결합하여 모든 세그먼트들의 궤도틀림 값이 고속철도 선로유지보수지침에 의한 보수기준을 충족하면서, 전체적으로는 작업횟수를 최소화하고, 동일/인접 시점에 작업이 집중되지 않도록 함으로써 전체 유지보수 비용을 최소화하는 장기적 예방보수 작업계획의 수립을 지원할 수 있어야 한다.

궤도 유지보수 작업계획 수립을 위해서는 최적 작업계획 수립을 위해 구간별 궤도틀림 상태 및 예측 정보(궤도틀림 진전예측 모듈)와 레일, 체결장치, 침목, 도상 자갈 등과 같은 궤도 재료 수명 정보(검측데이터 관리 모듈) 및 고속철도 선로유지보수지침 중 유지보수 관련 기준 정보가 필요로 요구되어진다.

틀림진전 예측 모듈에서 Output로 제공되는 정보는 이상 세그먼트 리스트이다. 아래의 [그림 5]는 이상세그먼트 생성하는 업무 프로세스를 나타낸다. 틀림진전 예측모듈에서는 검측장비로부터 입력된 데이터를 이용하여 진전예측을 계산하기 위하여 파라미터 그룹으로 정의하여 관리한다.

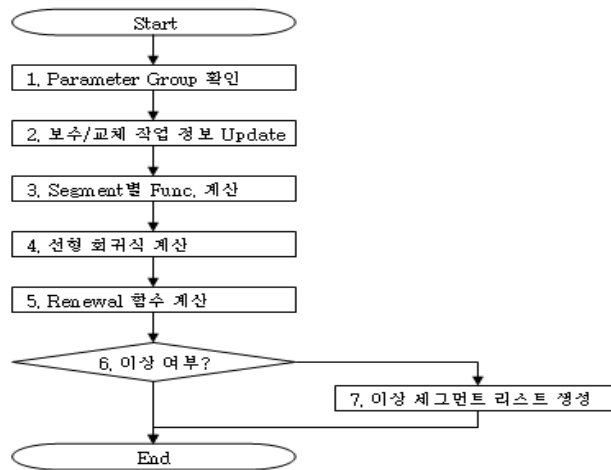


그림 5. 이상 세그먼트 생성 순서도

파라미터 그룹은 검측장비에서 측정되는 각 파라미터별로 사용할 함수 및 궤도품질지수와 그룹별로 파라미터들의 궤도품질지수에 가중치를 적용한 종합품질지수를 정의한다. 이러한 기준정보 정의를 통해서 검측데이터의 진전 예측은 세그먼트별로 진행되며, 각 파라미터는 보수작업 이력정보 및 레일 교체작업 시점을 기준으로 최소자승법을 이용하여 궤도틀림 진전의 선형회귀식과 궤도틀림 보수작업 후의 잔존율을 구할 수 있다. 탬핑작업과 같은 보수작업 정보는 틀림진전의 증가를 안정화시켜주는 효과가 있다.

### 3.3 궤도품질지수 생성결과

특정 구간의 검측데이터를 통하여 시간에 따른 검측데이터의 추세를 평가하기 위하여 2006년 2월부터

2006년 10월까지 경부선 상행 대전-시흥구간 101.65200 Km ~ 101.65350 Km 사이의 EM-120으로 측정된 궤도 정보를 off-board로 변환하였고, 이 데이터를 이용하여 궤도구간별 배점인 종합품질지수(TQI)를 구하였다.

궤도틀림 표준편차를 구하기 위하여 다음과 같이 가정하였다.

가정 1. 해당 구간은 동일한 속성을 가지며, 하나의 세그먼트로 정의된다.

가정 2. 해당 기간 중 2번의 다짐작업을 위한 보수작업(MTT)이 진행되었다.

- 1차 보수작업: 2006년 2월 중순

- 2차 보수작업: 2006년 10월 초

가정 3. 2006년 7월 2일, 2006년 10월 18일 검측데이터는 MTT 작업 후 5일내 궤도

검측이 이루어진 구간으로 정의한다.

만약 궤도유지보수작업에 대한 가정을 배제한다면 작업이후 궤도틀림 감소를 파악할 수 없었을 것이다. 하지만 궤도작업에 대하여 함께 표시가 되면서, 작업에 의한 궤도틀림의 복원과 이에 따른 진전율을 나누어 계산할 수 있다. 아래의 [도표 4]는 궤도 구간별 측정데이터를 off board를 이용하여 변환한 값이다.

도표 4. 궤도구간별 검측데이터(2006년 2월 ~ 2006년 10월)

Date	To Loc.	PRL	PRR	GAGE	SUP	ALL	ALR
2006-02-19	101.65325	-4.9	5.6	1.9	-121.4	-3.3	-4.3
2006-02-19	101.65300	-9	5.6	2	-121.8	-2.7	-3.9
2006-02-19	101.65275	-8.9	5.7	2.6	-122	-1.9	-2.7
2006-02-19	101.65250	-9	5.8	2.8	-122.3	-2.6	-2.9
2006-02-19	101.65225	-9	5.9	2.3	-122.9	-2.8	-3.6
2006-02-19	101.65200	-8.9	6	2.1	-123.1	-2.9	-4.3
2006-03-28	101.65325	0.4	1.5	0.3	123	4.2	5.3
2006-03-28	101.65300	0.3	1.3	0.3	122.7	4.3	5.3
2006-03-28	101.65275	0.1	1	-0.1	122.5	4.3	5.1
2006-03-28	101.65250	0.1	1	-0.2	121.9	4.2	5
2006-03-28	101.65225	0.1	1	0.1	122.4	4.5	5.6
중간 생략							
2006-10-18	101.65325	-3	5.6	1.9	-81.6	-6.1	-5.4
2006-10-18	101.65300	-2.4	5.9	2.1	-81.5	-5.5	-4.9
2006-10-18	101.65275	-2	6.1	2	-81.1	-5.7	-5.2
2006-10-18	101.65250	-1.5	6.5	1.8	-81.2	-6	-5.6
2006-10-18	101.65225	-1.2	6.8	1.6	-81.5	-5.5	-5.4
2006-10-18	101.65200	-0.9	6.9	1.4	-81.4	-4.7	-4.7

아래의 [도표 5]은 동일한 세그먼트에서 2006년 2월부터 10월까지 6회 동안 검측된 검측데이터를 파라미터 그룹에 정의된 궤도품질지수 설정을 기준으로 파라미터별 평균, Max, Min.과 표준편차를 구하였다. 또한 계산된 값은 함수의 종류별로 정리하여 파라미터 값들의 변화추세를 이해하기 쉽도록 하였다.

도표 5. 궤도구간별 궤도품질지수 데이터 (2006년 2월 ~ 2006년 10월)

Date	Func	PRL	PRR	GAGE	SUP	ALL	ALR
2006-02-19	Avg.	-8.95	5.77	2.28	-122.25	-2.70	-3.62
2006-10-18	Avg.	-1.83	6.30	1.80	-81.38	-5.58	-5.20
2006-02-19	Max	-8.9	6	2.8	-121.4	-1.9	-2.7
2006-10-18	Max	-0.9	6.9	2.1	-81.1	-4.7	-4.7
2006-02-19	Min	-9	5.6	1.9	-123.1	-3.3	-4.3
2006-10-18	Min	-3	5.6	1.4	-81.6	-6.1	-5.6
2006-02-19	StdDev	0.055	0.163	0.354	0.653	0.460	0.688
2006-10-18	StdDev	0.787	0.518	0.261	0.194	0.500	0.341



아래의 [도표 6]은 위에서 계산된 값 중 표준편차 값을 최소자승법을 이용하여 파라미터별 기울기와 절편을 계산하였다.

도표 6. 세그먼트의 파라미터별 표준편차 값과 진전을

Date	Func.	PRL	PRR	GAGE	PRL		PRR		GAGE	
					기울기	절편	기울기	절편	기울기	절편
2006-02-19	StdDev	0.055	0.163	0.354						
2006-03-28	StdDev	0.276	0.207	0.223						
2006-04-26	StdDev	1.102	0.772	0.299	0.261	-0.206	0.179	0.175	-0.025	0.286
2006-05-21	StdDev	1.106	0.460	0.281						
2006-07-02	StdDev	0.945	0.933	0.200						
2006-07-20	StdDev	0.126	0.293	0.412						
2006-08-23	StdDev	0.891	0.459	0.138	0.185	-0.058	0.192	0.220	-0.102	0.287
2006-09-24	StdDev	0.496	0.677	0.207						
2006-10-18	StdDev	0.787	0.518	0.261						

#### 4. 일정계획

##### 4.1 제약만족기법을 이용한 방법론

제약만족문제(CSP; constraint satisfaction problem)는 제약조건을 주어졌을 때 제약조건사이의 상호 호환성을 유지하는 가능해를 찾는 것을 목적으로 하는 문제이며, 제약만족기법은 CSP의 해를 구하는 데 사용되는 방법의 총칭이다. 제약만족문제는 변수(variable), 변수에 할당 가능한 값의 집합(domain), 그리고 변수간의 관계(제약, constraint)로 정의된다. 계획 문제는 변수와 제약을 이용하여 제약만족문제로 표현된다. 제약만족기법으로는 제약전파(constraint propagation), 변수정렬 (variable ordering), 값정렬(value ordering), 탐색 방법 등을 들 수 있다. 제약전파는 부분해를 이용하여 다른 변수가 가질 수 있는 가능한 값의 집합을 줄여주는 기법이다.<sup>13)</sup>

선로 유지보수 작업계획에 관한 문제도 현실 그대로 수리계획으로 모델링하여 모든 변수와 제약조건을 그대로 반영하는 경우, 문제의 규모가 방대해져 일반적인 수리계획 최적화 해법으로는 적절한 시간 내에 해를 구할 수가 없을 가능성이 크다. 예컨대, 경부고속철도 구간을 200m 구간으로 Lot 관리하여 5년간의 예방보수 일일 작업계획을 2개 분소별로 수립하는 경우, 대략적으로 2,000,000개의 0/1 변수의 조합 문제를 제약을 고려하여 각각 풀어야 하는 방대한 규모의 수리계획 모델이 된다.

따라서 본 연구에서는 최신 최적화 기법인 제약만족기법(Constraint Satisfaction Technology)의 해를 제공하는 ILOG 엔진을 모델링 및 알고리즘의 Backbone으로 활용하여 효율적인 최적 작업계획의 수립하였다.

##### 4.2 레도 유지보수 일정계획 개요

###### (1) 일정계획 수립 단위 및 대상 기간

레도유지보수 작업에 이용되는 자원 중 인적 자원은 사업소별로 이용할 수 있으나 MTT, STT와 같은 장비는 두 개의 사업소에서 공통으로 이용하고 있다. 따라서 인력의 운영을 위한 일정 수립은 사업소 단위로 수립할 수 있지만, 공용 장비의 운영 일정 수립을 위해서는 공통으로 사용하고 있는 사업소를 모두 고려하여 일정을 수립할 필요가 있다.

현재 EM-120을 이용한 검측은 한 달에 한 번 시행된다. 따라서 EM-120의 검측 결과를 주요 정보로 간주한 일정 수립은 한 달에 한 번 시행될 수밖에 없다. 현실적으로 EM-120의 검측 결과가 유효한 날짜(보통 검측 후 15일)가 경과하면 순회 검사, 육안 검사 등의 추가 정보를 이용하여 재 계획을 수립할 필요가 있다.

선로 유지 관리 기준 및 관련 법규 중 유지/보수 이력과 선로 이용 이력을 통해 도출되는 보수 작업에 대한 일정은 중장기 계획을 통해 작업이 수행되어야 할 대략적 시기를 결정할 필요가 있다. 또한, 작업 가능 온도 제약 때문에 교환 작업은 1월 중에 시행하기는 불가능하며 10월전에 시행되어야 한다. 중장기 계획을 통하여 이러한 작업들을 도출하고 개략적인 작업 일정을 수립한다.

## (2) 일정계획 수립 대상 작업 및 자원

시설사업소에서 수행하는 궤도유지보수 관련 작업은 탬핑, 침목교환, 육성 용접, 보호막 관리 등 그 종류가 다양하다. 일정계획 수립 대상 작업은 보수기지 사무소에서 행해지는 모든 종류의 작업이 그 대상으로 설정된다. 다만, 주간 순회, 보호막 관리 등 상시적으로 일정한 패턴에 의해 행해지는 작업은 일정 수립 대상에서 제외될 수 있다.

수행할 작업의 종류 결정을 위한 정보 획득 과정은 크게 3가지 경우로 나눌 수 있다. 그 중 가장 중요한 것이 검측지 정보를 해석하여 작업 종류를 결정하는 것이며, 다른 하나는 순회 점검, 열차 순회 등 검측지 이외의 정보를 통해 작업의 종류를 결정하는 것이다. 마지막으로 관련 법규 및 이력을 통해 파악된 작업 종류이다. 이 중 관련 법규 및 이력을 통해 파악되는 작업의 종류는 법규에 작업의 종류가 명기되어 있기 때문에 일정 최적화 시스템에서 자동 도출이 가능하지만, 그 외의 경우에는 시설사업소에서 작업 종류를 결정할 필요가 있다. 예를 들어 쿡자갈 비산에 의한 레일 흠집 발생의 경우, 검측지 자료로부터 이를 자동 도출할 수 있는 방법은 현재로서는 없다. 이러한 경우 흠집 발생의 정보는 검측지 이외의 방법으로 획득되며 이를 보고 시행되어야 할 작업의 종류를 결정하는 것은 정보 해석의 책임 및 권한이 있는 사업소에서 수행되어야 할 필요가 있다.

궤도유지보수 작업에 이용되는 자원은 탬핑 작업에 인력, MTT, STT가 있고, 육성 용접을 위해서는 용접차와 인력이 필요하다. 일정수립 대상 자원은 자원의 용량에 한계가 있는 모든 자원이 대상이 되어야 하므로 위에서 언급한 모든 자원이 일정 수립대상 자원이 된다.

## 4.3 실험 및 결과

실제 보수대상리스트에 대한 일정계획을 위해 작은 사이즈의 샘플데이터를 생성하고 데이터베이스화의 과정이 필요하다. 샘플데이터의 대상 시설사업소는 광명시설사업소이고, 데이터 개수는 90개이다. 선명은 경부선으로 고정을 하였으며, 긴급도는 AA, A, B, C를 무작위로 생성하였다.

보수작업에 대한 실험은 인적 자원과 장비를 동시에 고려하였고, 궤도틀림의 상태에 따라 긴급도를 부여하였다. 인적 자원을 이용한 작업은 장비작업과 마찬가지로 궤도틀림의 상태에 따라 긴급도가 존재하고, 작업량에 대한 제약과 작업구간의 총 길이에 대한 제약이 있다. 장비작업과 다른 점은 이동시간이 존재하지 않는다는 점인데, 이는 작업투입이전에 작업장에서 대기하고 있다가 작업을 수행하기 때문이다.

일정계획은 목적식의 최대화로 기간의 앞쪽에 할당되었으며 열차 차단시간 제약과 인력작업의 작업량 제약을 만족하는 범위에서 주어진 기간에 할당되었다.

본 실험을 통해서 보수 작업의 기간 및 작업별 일정을 수립하였다. 목적 함수는 주어진 기간 내에 가능한 한 많은 양의 작업을 할당하고, 긴급도가 높은 작업을 기간의 앞쪽에 할당하도록 구성되었다. 또한 주어진 제약식인 열차 차단시간 내 작업수행, 긴급도에 의한 작업종료일 제약, 인력작업량의 제한의 제약식을 만족하는 것을 알 수 있다.

## 5. 결론 및 추후 연구과제

고속선의 궤도유지는 시설비와 유지보수 비용이 크기 때문에 고속철도시설유지관리에 소요되는 비용의 큰 부분을 차지하고 있다. 이러한 비용의 절감은 전반적인 철도시설의 유지관리 효율성에 큰 영향을 준다. 또한 고속선은 고속운행으로 인하여 궤도의 틀림현상이 더욱 가속화되고 있으며, 이로 인한 추가적인 궤도유지보수 비용이 발생하고 있다. 그러므로 예방보수 개념을 반영하여 국내 철도 운영환경에 적합하고, 궤도틀림 진전예측 기술 및 자원과 작업조건에 따른 궤도 유지보수작업 최적화 기술을 구현

한 시스템을 개발하여 최소의 비용으로 사용기간 동안 적절한 품질의 궤도를 유지할 수 있는 저비용 고효율의 궤도유지보수 시스템이 필요하다.

국내의 고속선 환경은 국외의 시스템 개발국에 비하여 궤도의 상태 변동이 심하다. 따라서 유지보수 환경이 변함에 따라 각각의 요구에 대응할 수 있는 기술의 개발 및 시스템 효율성 향상시켜야 한다. 또한 궤도유지보수 시스템과 기존의 ERP와 같은 다른 시스템과 통합하여 전사적인 관점에서 데이터 호환성 및 시스템의 활용도를 최대화할 수 있는 추가적인 연구가 필요하다.

## 참고문헌

- 1) 이희업(2004), “궤도 유지관리 의사결정지원시스템 개발”, 한국철도기술연구원, pp.2, pp.62-63
- 2) Jovanovic, S. and Zaalberg, H., (2000), ECOTRACK: two years of experience", Rail International.
- 3) ERRI D71, "Stresses in the rails, the ballast and in the formation resulting from traffic loads", RP No. 10 "Deformation properties of ballast" Vol.1, (1970), pp.27-31
- 4) Sato Y(1994), "Japanese studies on deterioration of ballasted track" Vehicle System Dynamics Vol24, Swets&Zeitlinger, pp.197-208
- 5) 오지택(2000), “보선작업의 기계화 및 현대화 계획수립을 위한 연구”, 한국철도기술연구원, pp.43-67
- 6) M. Miwa, T. Ishikawa, T. Oyama(2000), "Modeling the Transition Process of Railway Track Irregularity and its Application to the Optimal Decision-Making for Multiple Tie Tamper Operations, Railway Engineering 2000, London 2000.
- 7) Higgins, A.(1998), "Scheduling of railway track maintenance activities and crews", Journal of the Operational Research Society, 49, pp.1026-1033
- 8) Lake, M., Ferreira, L., and Murray, M.(2000), "Minimising costs in scheduling railway track maintenance, Computers in Railways VII, pp.895-902
- 9) Rivier, R. E.(1998), "ECOTRACK: a tool for track maintenance and renewal managers", Computers in Railways VI, pp.733-742
- 10) Miwa, M.(2002), "Mathematical programming model analysis for the optimal track maintenance schedule", QR of RTRI, pp.131-136
- 11) Budai, G. and Dekker, R.(2004), "A dynamic approach for planning preventive railway maintenance activities", Computers in Railways IX, pp.323-332
- 12) 여인호(2006), “유지보수 성능향상 기술연구”, 한국철도기술연구원, pp.94-107
- 13) ILOG(1998), "ILOG Solver 4.3 User Manual", ILOG, pp.29-30