

# 궤도품질평가를 위한 궤도틀림 지표에 대한 연구

## A Study on the Track Irregularity Index for the Estimation of Track Quality

오 지 택\* · 한 승 용\*\*  
Oh, Ji-Taek · Han, Seung-Young

---

### Abstract

This paper establishes a scheme to estimate track quality using standard deviation and deterioration rate of track irregularities. To provide index of quality, standard deviation and deterioration rate of track irregularities are analyzed. As an index, standard deviation and deterioration rate were applied to decision of corrective maintenance and replacement maintenance, respectively. Further, this paper proposes a basic scheme for a modernization of mechanize track maintenance that using MTT(Multiple Tie Tamper) and Ballast Cleaner.

---

### 1. 서론

본 연구는 궤도정정작업인 1종기계작업(Multiple Tie Tamper, MTT)과 궤도차갈갱환작업인 2종기계작업(Ballast Cleaner)의 작업시기를 결정하기 위한 궤도품질평가 지표의 수립에 대하여 수행하였다. 궤도품질을 평가하기 위한 지표로서 1종기계작업에 대해서는 궤도틀림의 표준편차를, 표준편차의 변화율은 2종기계작업에 대하여 적용가능성을 검토하였다. 궤도틀림을 이용한 궤도품질평가방식은 최대값 방식, P값 방식 및 표준편차 방식과 같이 크게 3가지로 분류할 수 있다. 본 연구에서는 궤도품질을 평가하기 위한 3가지 방식의 간략한 비교와 표준편차 방식에 대한 국외에서의 활용사례 및 기준화를 고찰하였다. 특히, UIC에서 제시하고 있는 유럽 각국의 검측시스템에 대한 환산기준등을 소개하고 향후 국내의 궤도유지보수기준의 표준편차화 및 기준차별화를 위한 방안을 검토하였다. 또한, 궤도틀림 표준편차 및 표준편차 이력을 이용한 국내 기계보선작업의 현대화를 위한 기본체계(안)을 제시하였다.

### 2. 궤도유지보수를 위한 기준

궤도의 유지보수는 열차의 주행안전을 보장하기 위하여 지속적으로 수행되어야 하는 작업으로서 보수기준의 차별화 및 수준에 따라 보수비용이 크게 좌우된다. 표준편차 방식에 있어서는 일본 및 유럽에서의 활용사례를 검토함으로써 향후 국내 보수기준의 개선방향을 제시하였다. 궤도유지보수지표로서 궤도틀림의 활용방식에 대하여 다음과 같이 고찰하였다.

---

\* 정희원 · 한국철도기술연구원 선임연구원 · 공학박사 · 031-461-0234(교265) (E-mail: jtoh@krti.re.kr)  
\*\* 비희원 · 한국철도기술연구원 연구원 · 공학석사 · 031-461-8531(교159) (E-mail: aceno2000@yahoo.co.kr)

## 2.1 궤도품질평가를 위한 3가지 방식

### 1) Peak Value 기준

검측된 궤도틀림자료의 중거를 직접적으로 보수기준으로 활용하는 방식

### 2) P치 기준

검측된 궤도틀림자료 중 3mm를 초과하는 중거의 전체 검측자료 비율(%)

### 3) 표준편차 기준

궤도틀림의 분포를 Gaussian(normal) 분포로 간주하고 궤도틀림의 평균값에 대한 분산정도를 평가하는 방식

## 2.2 표준편차의 기준 활용 사례

최근의 발전된 전산환경은 과거 방대한 궤도검측자료분석의 어려움을 해소시켜 주었다. 궤도검측시스템에서 측정된 궤도틀림자료에 대한 디지털화와 전산프로그램의 개발로 인하여 방대한 선로에 대한 통계처리 및 이력관리가 전산화된 기반하에 매우 용이하게 되었기 때문이다.

### 1) 유럽

궤도틀림의 표준편차를 이용한 궤도관리에 있어서는 네덜란드 Delft공대의 C. Esveld교수가 80년대 초반부터 현재까지 십 수년간 광범위한 연구를 수행하여 왔다. 대표적이라 할 수 있는 연구 사례로서 1983년 수행된 ORE D161 과 B12 프로젝트는 유럽 9개국에서의 궤도검측시스템간 상호 비교를 가능하게 한 궤도틀림의 등가표준편차계수를 제안하였다. 이 연구성과는 1995년 철도차량의 동적안전성, 궤도피로 및 승차감에 대한 시험과 인증을 위한 기준 UIC-518 OR로 이어졌다. UIC-518 Code에서는 유럽 10개국 각각의 궤도검측시스템으로부터 구한 궤도틀림표준편차를 환산할 수 있는 계수가 표 1과 같이 제시되었다. 이러한 유럽의 연구성과와 Code화로부터 유럽의 철도는 궤도품질의 평가 및 분석에 대한 연구성과의 상호조화 및 교류가 한층 원활하게 되었다.

표 1. UIC-518 OR Code의 등가표준편차계수

계수 K		
검측차량	연직궤도틀림	종방향궤도틀림
BR (United Kingdom)	1.14	1.20
CFF (Switzerland)	0.91	1.47
CFF/long (Switzerland)	1.25	-
CFR (Romania)	1.40	1.95
CSD	1.52	1.77
DB (Germany)	1.24	1.47
FS (Italy)	1.33	1.72
NS (The Netherlands)	1.00	1.00
PKP (Poland)	0.73	0.71
RENFE (Spain)	0.91	1.47
SNCF (France)	0.91	1.47

$$\sigma_{(other)} = K \cdot \sigma_{(NS\ vehicles)}$$

$$Peak\ value_{(other)} = K \cdot peak\ value_{(NS\ vehicle)}$$

2) 일본

일본의 경우 최근들어 종래의 P값방식에 의한 궤도품질의 평가방식으로부터 궤도틀림의 표준편차에 의한 방식으로 전환하고 있는 추세이다. 1997년 발행된 RTRI의 철도구조물등설계표준·동해설 궤도구조[유도상궤도] (안)에서 제시하고 있는 표준편차의 활용에는 다음과 같다.

유도상궤도에서 열차주행 안전성 및 안정성을 검토하는데 궤도틀림의 진행평가를 위하여 궤도틀림의 표준편차를 이용한 궤도의 열화-복원 모델을 그림 1과 같이 설정하였다.

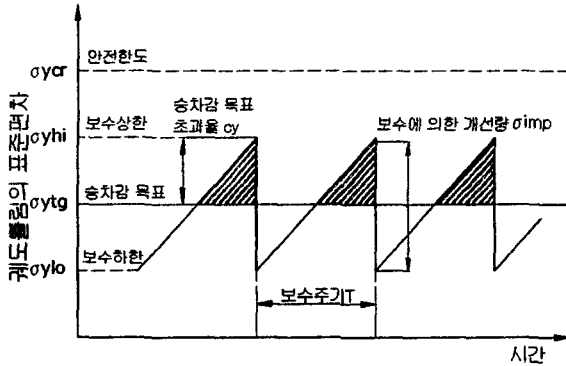


그림 1. 궤도틀림의 열화-복원

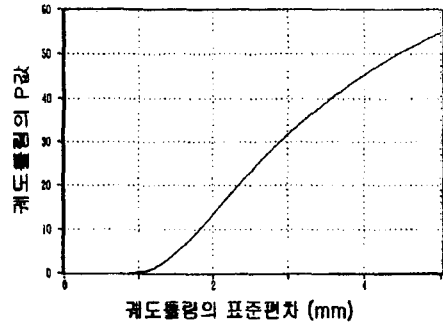


그림 2. 궤도틀림의 표준 편차와 P값의 관계

일본 국철·JR에서는 아직까지 P값을 궤도품을 평가하기 위한 궤도틀림 지표로 사용하고 있으나, P값이 10~50의 범위를 벗어날 경우 품질에 대한 변별력이 낮아지는 단점이 있다. 이러한 단점을 해소하기 위하여 선택한 것이 보다 넓은 범위에 적용가능한 평가지표로서 10m 현 정시 궤도틀림의 표준편차이다. 그림 2는 일본궤도에서의 P값과 10m 현 정시 궤도틀림의 표준편차간의 상관관계를 나타내고 있다.

다음은 일본에서의 표준편차 활용사례를 나타낸다.

① 허용 고저틀림(면마춤)

▷ 목표보수기준: 목표보수기준은 안전한도와 승차감한도로 차별

- 안전한도 ; 차량의 주행안전성 확보가 목표
- 승차감한도 ; 승객의 승차감 확보가 목표
- 고저틀림의 표준편차와 차량의 연직진동가속도와의 관계에 경험적인 식 (1)을 활용

$$\sigma_{av} = k_v \cdot \sigma_y \cdot V \tag{1}$$

여기서  $\sigma_{av}$ 는 연직진동가속도의 표준편차( $m/s^2$ ),  $k_v$ 는 연직진동가속도에 대한 차량의 동요계수(0.0010~0.0015),  $\sigma_y$ 는 고저틀림의 표준편차(mm) 및 V는 열차속도(km/h)이다.

※ 승차감한도는 승객 만족도에 대응한 값(예 :  $2.5m/s^2$ =만족도 90%,  $2.0m/s^2$ =승객 만족도 95% 등)으로 할 수 있으나, 현재까지도 진동에 대한 승객 만족도의 평가기준이 확립되어 있지 않다.

▷ 고저틀림과 차량연직진동과의 경험적인 관계 식(1)

차종에 따라 동일한 궤도틀림조건에서 차량의 연직진동이 상이하게 발생하므로 차종의 현가장치를 크게 공기 스프링방식과 코일 스프링방식으로 분류하여 코일 스프링방식( $k_v=0.0015$ )의 경우는 공기 스프링방식

( $k_v=0.0010$ )에 비하여 1.5배의 연직진동이 발생하는 것으로 간주하였다. 상기 관계식의 적용 범위에 대해서는 향후의 측정값을 누적분석하여 판단하여야 할 것이다. 화물 열차에 대해서는 차량 구조가 다르므로 상기의 관계식을 적용하는 것은 곤란할 것이다.

② MTT의 보수기준

그림 1에 보인 궤도틀림의 열화-복원 모델에 따라 작업이 수행되며, 궤도의 임의구간에 대한 MTT의 투입 주기는 년 1회로 일정한 것으로 한다. 즉, 궤도틀림을 정정하기 위한 MTT작업은 년 1회 투입되는 것으로 한다는 것이다. 또한, MTT작업 후 궤도틀림의 개선량이라 할 수 있는 고저틀림의 잔존율은 표 2와 같다.

표 2. MTT작업 후 궤도틀림의 잔존율

	장대구간	정척구간
MTT(멀티타임퍼 작업)	0.3 (70%개선)	0.4 (60%개선)

3. 국철 궤도틀림의 표준편차

본 연구에서는 궤도품질평가의 지표로서 궤도틀림의 표준편차를 이용한 궤도유지보수기준체계에 대한 가능성을 검토하였다. 국내 경부선, 호남선, 중앙선 및 영동선에서 검측된 궤도틀림자료에 대한 표준편차를 산출하고, 표준편차의 열차통과톤수에 따른 이력분석을 통하여 현행 유지보수방식의 개선방안을 제시하고자 한다. 앞서 언급하였듯이 궤도틀림의 표준편차를 이용한 궤도품질의 평가방법은 차량의 진동응답 등과 관계되어 궤도유지보수기준의 수립에 매우 광범위하게 활용될 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 단지 열차의 통과톤수와 궤도틀림의 진행만을 검토하였으며, 추후에는 차량의 진동응답과 연계하여 좀더 광범위하고 세분된 연구가 수행되어야 할 것이다. 다음 그림 3부터 6은 경부선 하행 일부구간에서의 궤도틀림 표준편차 변화에 대한 이력을 나타낸다.

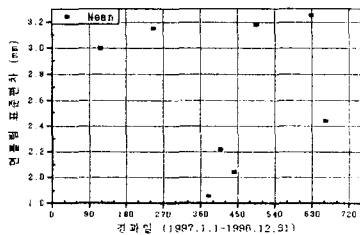


그림 3. 군포-부곡

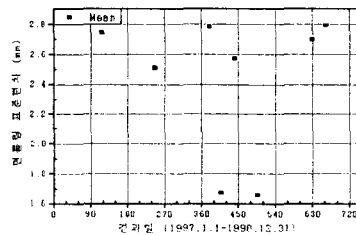


그림 4. 화서-수원

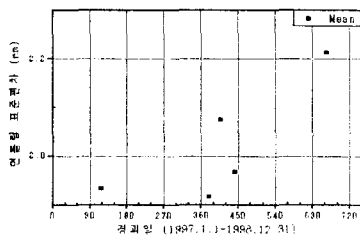


그림 5. 세류-병점

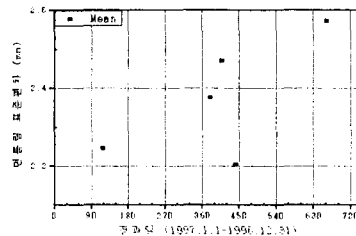


그림 6. 오산-송탄

그림 3부터 6에 보인바와 같이 궤도틀림의 표준편차는 2년의 기간동안 열차통과톤수 및 보수가

력에 의해 매우 큰 폭으로 변동이 발생함을 확인할 수 있다. 이는 궤도의 품질을 평가할 때 궤도 검측횟수와 검측기간이 충분해야 함을 의미하며, 검측시점도 보수작업의 전후로 수행되어야 만이 국내궤도에서의 궤도틀림에 대한 MTT작업 전과 작업 후에 대한 작업효과분석이 정량적으로 가능하게 될 것이다.

#### 4. 궤도품질의 지표

본 연구에서는 궤도품질의 지표로서 궤도틀림의 표준편차와 표준편차의 변화율을 검토하였다. 궤도틀림의 표준편차는 검측시점에서의 궤도 형상에 대한 정보를, 표준편차의 변화율은 궤도의 건전도에 대한 정보를 제공한다. 국철의 궤도정비기준이 최대값 방식을 채택하고 있기 때문에 현행 정비기준 중 고저틀림(면마춤)에 대응하는 등가의 표준편차기준을 설정하여 기계보선작업의 적용에 대한 적절성을 평가하였다. 그림 7부터 9는 기계보선작업계획수립을 위한 궤도틀림 표준편차의 적용개념을 나타낸다. 본 연구에서는 궤도품질의 평가지표로 표준편차와 표준편차의 변화율을 경부선, 호남선, 중앙선 및 영동선 4개 선로를 대상으로 총 355개로 구간분할하여 적용시켜 분석하였다. 분석결과로 각 선로별 각 구간별 MTT투입주기, 궤도초반손상률 및 Ballast Cleaner의 투입시기를 평가하였다.

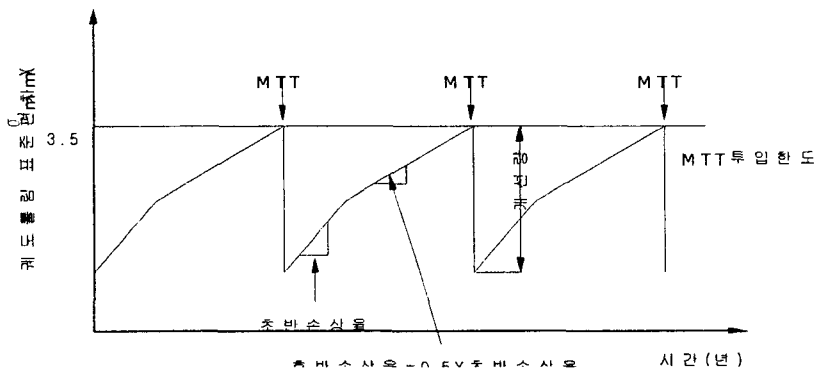


그림 7. 궤도틀림의 진행 및 보수 모델

그림 7은 유도상궤도의 품질에 따른 MTT투입주기 모델을 나타낸다. 본 연구에서는 궤도틀림의 진행을 Bi-linear 모델로 가정하였다. 궤도틀림(면마춤)에 대한 표준편차 3.5mm를 MTT투입한도로 가정하였으며, 궤도틀림의 표준편차이력으로부터 산출한 초반손상률로부터 연간 MTT의 투입횟수를 평가하였다. 그림 8과 9는 궤도품질에 따른 MTT투입횟수의 변화를 나타낸다.

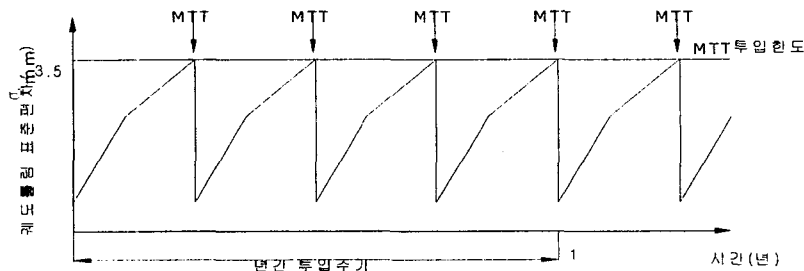


그림 8. 궤도품질악화에 따른 MTT투입주기증가

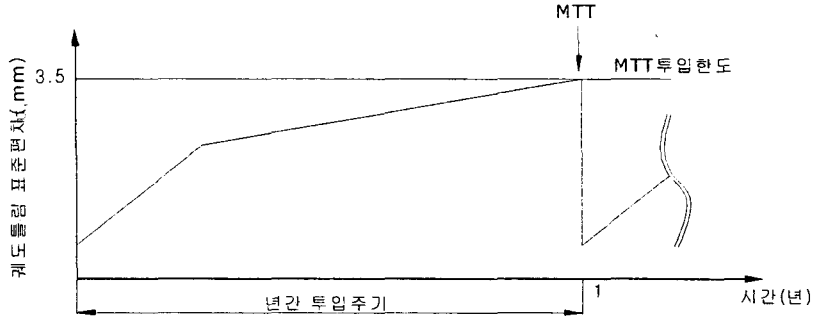


그림 9. 건전한 궤도품질구간에 대한 MTT의 투입주기

그림 8은 연간 MTT작업이 4회 투입되어야 하는 구간에 적용된 손상-보수 모델이며, 그림 9는 연간 1회 MTT작업이 필요한 구간을 나타낸다. 그림 8과 9로부터 본 연구에서 제시하고 있는 궤도품질평가를 위한 표준편차와 표준편차 변화율은 각각 다음과 같은 기계보선작업의 체계개선을 위한 지표로 활용될 수 있을 것이다.

#### 4.1 1종기계작업측면

Bi-linear로 가정한 궤도틀림의 손상진행 예측모델을 통하여 연간 MTT작업에 대한 운용계획을 수립하는데 표준편차는 MTT작업의 투입시기를 결정하는 지표로서 활용이 가능하다. MTT의 투입은 동일한 열차하중을 지지하는 인접한 구간일지라도 각각의 궤도품질에 따라 각각 차별투입되어야 할 것이다. 국내에서는 아직까지 유도상궤도에 대한 MTT의 투입주기 제한과 같은 기준은 없으나, 국내 궤도조건에 부합되는 기준의 설정이 절실하다 할 수 있다. 궤도정정보수를 위해 투입되어야 하는 MTT작업이 일정횟수 이상을 넘게 투입된다면, 궤도의 수명을 감소시키는 역효과가 나타날 수 있다. 이러한 예는 현재 철도선진국인 프랑스에서조차도 1986년 고속선선의 부설후 MTT의 오용에 따른 부작용으로 개통후 불과 5년을 넘기지 못하고 전면 갱환계획을 수립하고 점진적인 갱환작업을 착수하게되는 시행착오에서도 찾아볼 수 있다. 일본의 예로 RTRI가 1997년 제시한 160km/h미만의 일반철도의 유도상궤도 설계표준(안)의 6장 6.2.2.3항기준에 대한 해설에서 연간 MTT의 투입을 1회로 고려하고 있으며, 1997년 2월 RTRI가 발표한 20년간 궤도틀림 및 MTT보수와와의 상관관계분석보고서는 MTT의 투입주기를 연간 0.5회로 평가하여 수행하였다. 이러한 일본의 MTT투입주기 값들은 국내 궤도실정과 잘 맞지 않을 수 있으나, 상대적으로 국내 궤도에서의 현 MTT운용실적과 비교해보면 국내 MTT운용의 적합성에 대한 검토가 과학적으로 수행되어야 할 필요가 있다고 판단된다.

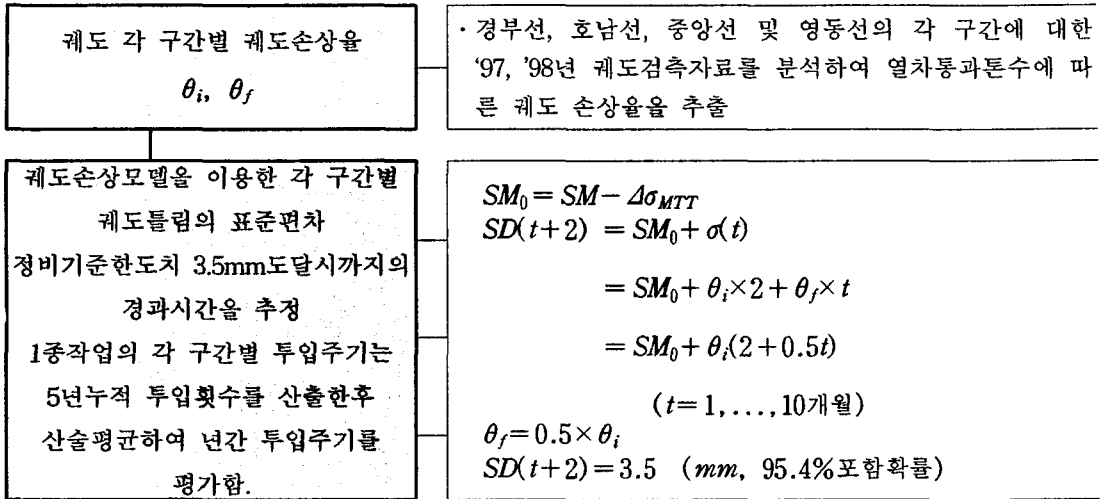
#### 4.2 2종기계작업측면

만약, MTT작업의 투입이 과다하게 평가된다면 일단 유도상궤도가 돌이킬 수 없는 소성변형상태에 도달한 것인가를 검토하여야 한다. 즉, 연간 MTT의 투입횟수가 일정횟수이상 투입되어야 하는 것으로 평가될 경우는 대상 구간에서의 현장조사를 통하여 자갈채취를 통한 세립분 함유량 및 궤도구성품의 이상유무검사 등을 수행하여야 한다. 현행 국철에서의 2종기계작업의 수행여부를 결정하는 지표인 도상자갈세립분 함유량(25%)기준은 실제 궤도 전 구간에 대하여 적용하기가 쉽지 않은 문제점이 있다. 연간 MTT의 투입주기가 일정값 이상으로 평가되는 구간에 대해서는 세립분 평가와 향후 MTT투입비용 대비 2종작업비용에 대한 경제성 분석을 통하여 2종작업의 시행 여부를 결정하는 체계가 합리적이라 판단된다.

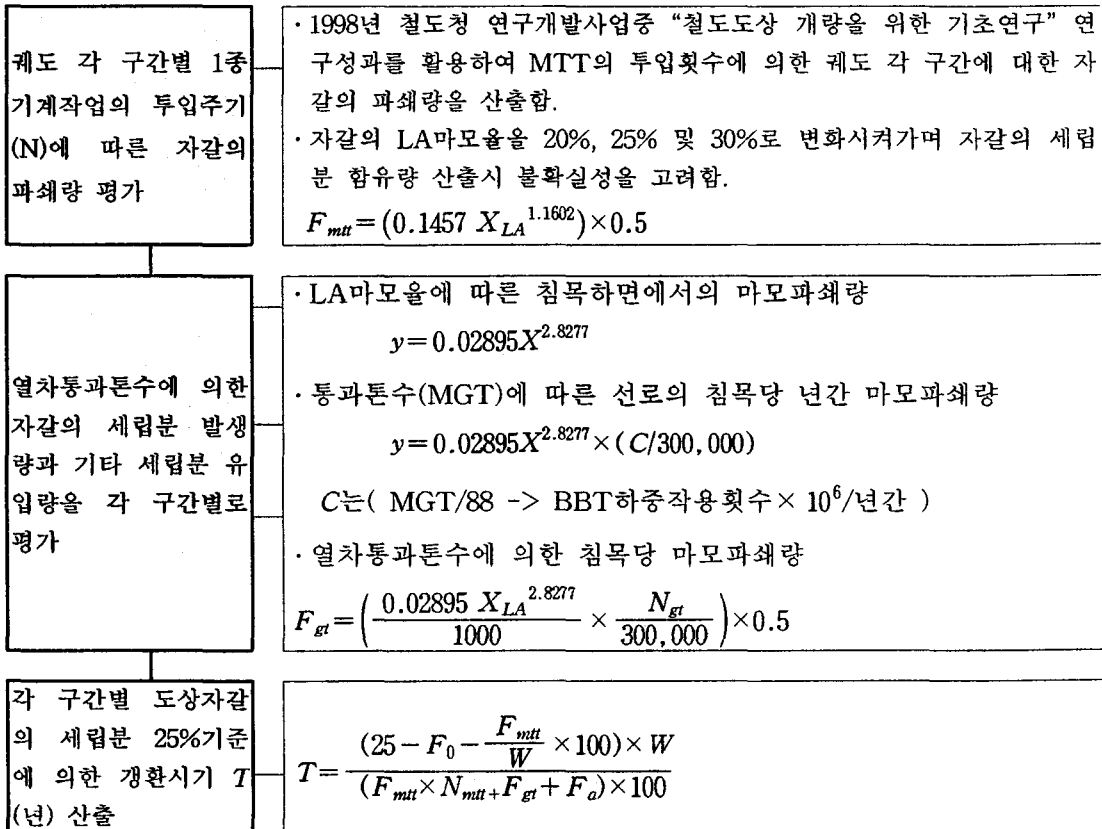
### 5. 궤도품질평가 지표에 의한 기계보선작업의 평가

본 연구에서는 궤도틀림의 표준편차와 표준편차 변화율을 이용하여 1종 및 2종 기계작업 측면에서 궤도품질평가 지표의 활용 예를 제시하였다.

#### 5.1 1종기계작업의 투입주기 평가체계



#### 5.2 2종기계작업의 투입주기 평가체계



### 5.3 궤도틀림 지표에 의한 기계보선작업주기(시기)평가

구간	From	TO	From	To	구간 거리	평균 표준 편차	MTT 투입 주기 (회/년)	통과 톤수 (ton)	Ballast Cleaner 투입시기			차단 시간
									LA모듈 도상자갈갱환시기			
									20%	25%	30%	
경부선 하행												
39	신탄진	회덕	152.4	158.0	5.6	2.00	1.76	30,166,637	25.12	20.18	16.68	4.00
40	회덕	조차장	158.0	162.1	4.1	2.60	8.25	30,166,637	6.58	5.11	4.14	4.00
41	조차장	대전	162.1	166.8	4.7	2.79	3.96	30,166,637	12.85	10.10	8.24	4.00
42	대전	세천	166.8	174.2	7.4	2.39	1.60	21,883,006	25.00	21.91	18.20	3.92
43	세천	옥천	174.2	183.3	9.1	2.54	0.93	21,883,006	25.00	25.00	25.00	4.00
44	옥천	이원	183.3	191.6	8.3	2.44	0.77	21,883,006	25.00	25.00	25.00	4.00
호남선 하행												
21	김제	감곡	105.6	112.4	6.8	1.31	8.69	5,329,234	5.14	3.99	3.24	1.83
22	감곡	신태인	112.4	117.9	5.5	1.32	3.97	5,329,234	10.55	8.30	6.79	1.83
23	신태인	초강	117.9	123.5	5.6	1.39	4.92	5,329,234	8.70	6.82	5.56	1.83
24	초강	정읍	123.5	131.4	7.9	1.05	1.36	5,329,234	25.00	20.60	17.27	1.83
25	정읍	천원	131.4	137.4	6.0	1.06	0.58	5,329,234	25.00	25.00	25.00	2.00
26	천원	노령	137.4	141.6	4.2	1.38	0.70	5,329,234	25.00	25.00	25.00	2.00

### 6. 결론

본 연구에서는 궤도유지보수측면에서의 궤도품질평가를 위한 궤도틀림 지표수립에 대한 연구를 수행하였다. 궤도틀림의 표준편차와 표준편차의 변화율을 이용하여 기계보선작업계획의 수립에 활용하는 방안을 제시하였다. 본 연구의 결과로부터 도출한 결론은 다음과 같다.

1) 궤도보수는 크게 정정(correction)과 갱환(replacement)으로 작업성격상 분류할 수 있으며, 궤도틀림의 표준편차는 정정작업인 1종기계작업의 기준으로, 표준편차의 변화율은 갱환작업인 2종기계작업의 기준에 적합한 지표가 될 수 있다.

2) 향후 궤도유지보수조건의 수준향상과 보수자원의 효율적인 운영위하여 선로조건에 따른 보수기준의 차별화 및 재설정이 필요하리라 판단된다.

3) 궤도보수는 열차운행의 안전과 돌이킬 수 없는 궤도파괴로 인한 장기비용의 손실 등을 예방하기 위하여 충분한 작업기반이 확보되어야 한다. 그러나 경부선의 경우는 이미 열차운행 고밀화 등으로 인하여 유지보수를 위한 차단시간확보가 매우 어려운 실정이다. 이러한 실정에서 보수작업의 효율을 향상시키기 위해서는 궤도보수의 대규모 집중작업을 위한 장기계획의 수립과 차단시간 및 차단구간의 조정이 뒷받침 되어야 할 것이다.

4) 또한, 투입횟수에 비례하여 도상자갈의 수명이 감소하는 MTT에 의한 정정작업은 궤도의 품질수준에 따라 적정 작업주기를 평가한 후 운용하여야 할 것이다.

### 7. 참고문헌

- 오지택 등(1999), **보선작업의 기계화 및 현대화 계획수립을 위한 연구**, 연구보고서, KRRI 연구 99-21, 한국철도기술연구원
- UIC(1995), **Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour Safety - Track fatigue - Ride quality**, UIC Code 518 OR 1st Ed.