Multiple Tie Tamper의 투입주기평가에 관한 연구
A Study on the Operation Frequencies of the Multiple Tie Tamper

오 지 택*
Oh, Ji-Taek

Abstract

This paper estabilsh the systematical scheme that evaluates the operation frequencies of the MTT(Multiple Tie Tamper). An evaluation of the operation frequencies, covering 4 different permanent ways that are Kyungbu, Homan, Jungang and Youngdong, has been carried out using real track irregularities. The deterioration rate of track irregularities used to evaluate rational operation frequencies of MTT in a block of railway track. Furthermore, this paper provides the scheme that prevents damage due to excess using of MTT and to promote efficiency of MTT application.

1. 서론

궤도의 유지보수는 작업의 목적에 따라 크게 정정(correction)작업과 갱환(replacement)작업으로 구분할 수 있다. 최근의 기계화된 유지보수에서 정정작업은 1종기계작업단에 의해 수행되며 핵심장비는 MTT(Multiple Tie Tamper)가 된다. 또한, 도상자갈에 대한 갱환작업은 2종기계작업단에 의해 이루어지며 Ballast Cleaner가 주요 장비가 된다. 이러한 기계화유지보수장비 중 MTT는 유도상궤도에서 보수기준을 초과하는 궤도틀림을 나타내는 구간에서의 궤도틀림 정정작업을 수행하게 된다. 유도상궤도는 누적되는 열차통과톤수 및 궤도결함에 의한 충격효과 등에 따라 점진적인 소성변형이 발생하며, 이에 따른 궤도틀림의 정정작업은 피할 수 없는 것이 된다. 이러한 궤도의 기하학적 변형을 바로잡기 위하여 MTT가 사용되어진다. 그러나, MTT에 의한 유도상궤도의 정정작업은 궤도의 주 구성재인 자갈의 파쇄를 야기시키며, 경우에 따라서는 열차의 통과에 의한 것보다 더 큰 손상을 끼치는 해로운 요소가 될 수 있다. 이러한 MTT의 투입주기 평가는 동일한 열차통과톤수와 인접한 구간일지라도 서로 다른 궤도손상율을 갖는 궤도에 있어서 실질적인 궤도상태에 따라 적정 투입주기의 평가가 우선되어야 할 것이다.

본 연구에서는 이 MTT의 투입주기에 대한 체계적인 평가방안을 수립하고 그에 따른 실질적인 MTT의 작업주기를 경부선, 호남선, 중앙선 및 영동선 전 구간에 대해서 산출하였다. 궤도의 손상율에 따른 구간별 적정 MTT투입주기 평가를 통하여 MTT과다 투입에 따른 궤도손상을 방지하며, MTT의 효율적인 활용에 대한 방안을 제시하였다.

* 정회원 · 한국철도기술연구원 선임연구원 · 공학박사 · 031-461-8531(교159) (E-mail: jtoh@krri.re.kr)

2. 궤도유지보수기준

현행 국철의 궤도정비기준 중 고저틀림에 해당하는 면마춤은 표 1과 같은 궤도틀림의 최대값에 의하여 규정되어 있다. 궤도검측차(EM-120)에 의하여 검측된 궤도틀림의 최대값을 이용한 정비기준은 궤도구간에서의 향후 궤도틀림진행을 예측하는데 어려움이 있으며, 사후유지보수(Breakdown Maintenance, BM)에 적절한 방식이라 할 수 있다.

표 1. 국철 궤도의 정비기준 (단위:mm)

구분	본선	측선
궤간	+10 -2	+10 -2
수평	7	9
면마춤	직선(레일길이10m에 대하여) 7 곡선(레이길이 2m에 대하여)3	직선(레일길이 10m에 대하여) 9 곡선(레일길이 2m에 대하여)4
줄마춤	레일길이 10m에 대하여 7mm	레일길이 10m에 대하여 9mm

본 연구에서는 MTT의 투입주기평가를 위하여 현행 궤도틀림의 정비기준치와 대등한 수준의 궤도틀림 표준편차(Standard Deviation, SD)를 설정하였다. 이는 궤도틀림의 진행을 예측하기 위해서는 표준편차이력(History of Standard Devation)에 의한 궤도품질평가방식이 현행 궤도틀림에 측방법중 가장 적절한 것으로 간주되기 때문이다. 궤도틀림은 랜덤하게 분포하는 것으로 관찰되어 Gaussian(normal) 정규분포시스템으로 표현할 수 있는 것으로 알려져 있다. 궤도틀림의 평균값은 승차품질에 영향을 끼치는 것이 별로 없기 때문에 평균화에 의해 제거하고 이 평균값에 대한 궤도틀림의 분산정도를 나타내는 표준편차가 열차의 승차감 및 궤도충격효과를 지배하는 요소로 간주할 수 있다. 그림 1은 전형적인 정규분포곡선을 나타낸다. 궤도틀림분포는 궤도틀림의 평균값으로부터 정규분포곡선을 통하여 이해할 수 있다. 즉, 궤도틀림자료의 64~65%가 1×SD범위내에 분포하며, 약 95%의 궤도틀림이 2×SD범위내에 분포함을 의미한다. 궤도틀림의 표준편차는 궤도틀림의 분산정도를 나타내는 값이나, 궤도와 같이 유사한 평균치를 갖는 대상에 있어서는 평가기준으로 활용할 수 있다. 표 2는 표준편차로 표현된 현행 국철의 궤도정비기준과 동등한 수준의 궤도정비기준치를 나타낸다.

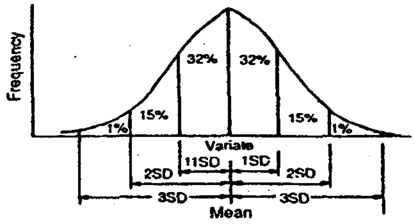


그림 1. 정규분포곡선

표 2. 궤도틀림의 표준편차 정비 기준

	본선		표준편차 대역	궤도틀림의 포함확률(%)	7mm 대응 SD
	궤도틀림	표준편차			
면마춤	직선 (10m당) 7mm	직선부 3.5mm	1× σ	68.3	7
			2× σ	95.4	3.5
			3× σ	99.7	2.3

3. 궤도손상진행모델

궤도의 유지보수작업은 궤도의 상황에 따라 수시보수(BM) 및 예방보수(PM)가 적용되어야 한다. MTT 및 Ballast Cleaner와 같은 장비에 의한 기계보수작업은 대규모로 집중적인 형태로 충분한 차단시간을 확보할 경우 작업의 효율은 월등히 높아질 수 있다. 이러한 기계작업의 집중화를

위해서는 중장기 투입계획의 수립이 필수적이며, 이를 위해서는 궤도의 손상에 대한 예측이 선행되어야 한다. 궤도의 손상은 열차의 축중, 속도, 침목의 유형, 도상자갈의 강도 및 노반조건 등과 같은 매우 많은 요소들이 복합적으로 작용하여 발생하게 된다.

3.1 Bi-linear궤도손상모델

본 연구에서는 단지 기계보수작업의 시점을 예측하기 위한 궤도손상진행모델을 매우 단순하게 수립하였다. 모델은 대상궤도를 하나의 변수로 간주하고 년간 누적통과톤수에 따른 응답(궤도틀림 표준편차의 변화율)만을 고려하였다. 궤도의 손상진행예측모델이 연구의 대상이 될 경우는 궤도의 구성요소와 제반 변수들이 각각 고려되어 상세한 민감도를 분석하여야 하나, 이는 향후의 심도깊은 연구를 통하여 수행하여야 할 것이다.

본 연구에서는 영국의 BR에서 수행한 유도상궤도에서의 궤도품질변화에 대한 그림 2와 같은 실험결과 중 도상자갈의 열차통과톤수에 따른 변화경향을 참조하여 그림 3과 같은 Bi-linear 궤도손상모델을 수립하였다. 그림 3에서 초반손상율은 MTT작업 후 2개월 또는 2 MGT(2×10^6톤) 통과기간까지의 궤도틀림 표준편차의 진행율을 의미하며, 후반손상율은 그 이후부터 재 MTT작업시까지의 손상진행율을 나타낸다.

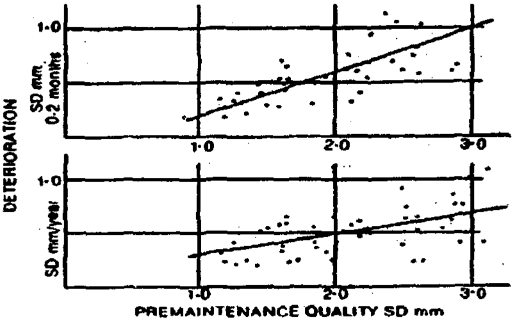


그림 2. 영국 BR의 실험결과

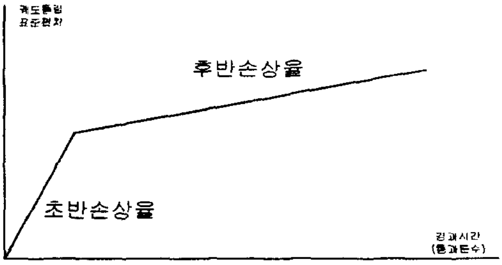


그림 3. Bi-linear궤도손상모델

그림 3과 같은 Bi-linear궤도손상모델에서 초반손상율의 산출을 위하여 경부선, 호남선, 중앙선 및 영동선 4개 선로를 총 355개 구간으로 분할하여 '97부터 '98년사이에 검측된 궤도틀림자료의 표준편차이력을 분석하였다. 그림 4부터 7은 각 선로의 임의 구간에서 초반손상율 추출을 위한 궤도틀림 이력분석을 나타낸다.

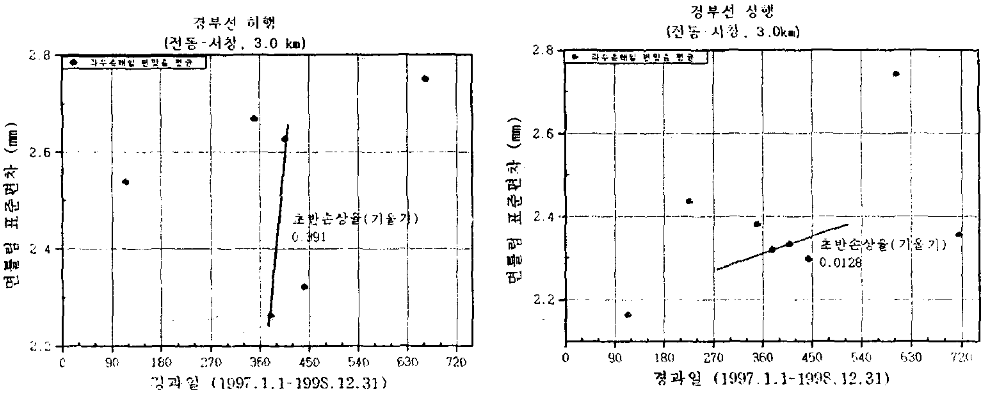
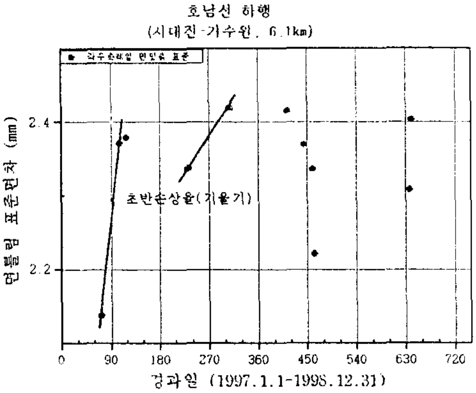


그림 4. 경부선 전동-서창 구간에 대한 궤도틀림진행



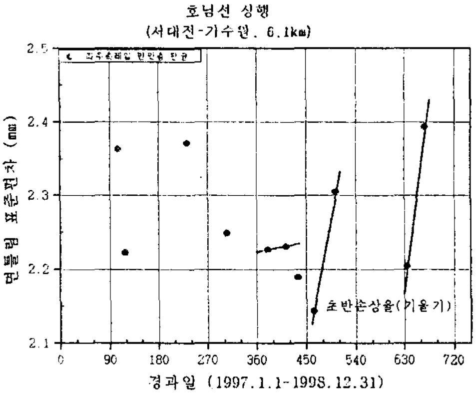
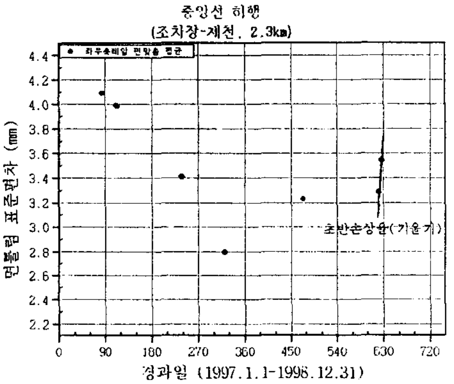


그림 5. 호남선 서대전-가수원 구간에 대한 궤도틀림진행



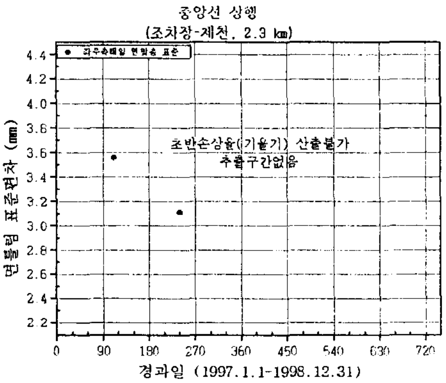


그림 6. 중앙선 조차장-제천 구간에 대한 궤도틀림 진행

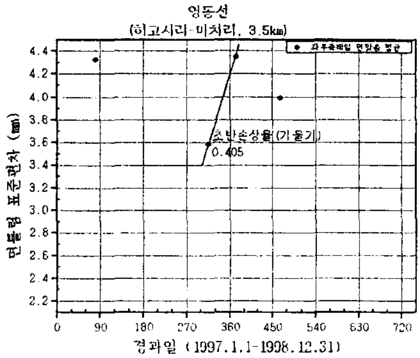


그림 7. 영동선 하고사리-마차리 구간에 대한 궤도틀림 진행

그림 4부터 7에 나타낸 궤도틀림 진행에 대한 이력분석으로부터 각 구간의 초반손상율은 가중산술평균을 통하여 계산하였다. 그림 6에서와 같이 초반손상율을 산출할 수 없는 궤도검측자료 결손구간의 경우는 향후 적절한 기간내에서의 궤도검측이 실시되어 궤도손상율을 추정할 수 있는 자료가 확보되어야 할 것이다.

4. MTT투입주기평가

4.1 MTT작업효과의 평가

본 연구에서 수립한 Bi-linear궤도손상모델과 궤도검측자료의 이력분석을 통하여 MTT의 투입주기를 다음과 같이 평가하였다. 1차적으로 MTT작업에 의해 개선되는 궤도틀림의 표준편차를 평가하기 위하여 영국 BR의 실험결과를 식 (1)과 같이 선형회귀(linear regression)하였다.

$$\Delta\sigma_{MTT} = 0.71\sigma_0 - 0.42 \qquad \text{(영국철도의 경우)} \qquad (1)$$

여기서, σ_0는 MTT작업이 투입되기 전에 검측된 궤도틀림의 표준편차값이며, $\Delta\sigma_{MTT}$는 임의 궤도틀림표준편차 σ_0로 평가된 궤도에 MTT작업을 수행하였을 때 향상되는 SD(표준편차, σ)의 크기를 나타낸다. 식 (1)과 같은 MTT작업에 따른 궤도틀림표준편차의 개선효과를 국내 궤도검측 이력과 보선작업이력간의 관계를 분석한 결과 식 (1)을 국내궤도에 직접적용시킬 경우 MTT작업에 의한 궤도품질향상효과가 지나치게 높게 평가되는 것으로 나타났다. 이러한 불일치를 보완하기 위하여 국내 자료를 토대로 실제 개선량에 대한 정량적인 분석을 수행하였다. 적정 개선효과는 식 (1)에서 구한 궤도틀림 개선량 $\Delta\sigma_{MTT}$을 약 50%수준인 것으로 평가되었다. 이러한 차이는 자갈도상궤도에 대한 수년 또는 수 십년에 걸친 궤도유지보수방식, 열차하중조건 및 기후조건의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 식 (2)는 영국의 실험결과경향을 근거하여 국내 궤도틀림이력과 보선작업이력간의 관계를 토대로 보정한 것이다.

$$\Delta\sigma_{MTT} = 0.355\sigma_0 - 0.21 \qquad \text{(한국철도의 경우)} \qquad (2)$$

본 연구에서는 MTT작업에 의한 표준편차의 개선량을 산출하는데 식 (2)를 사용하였다.

4.1 궤도손상율의 산출

Bi-linear궤도손상모델의 기본가정에 따라 궤도의 손상진행율은 열차통과톤수 대비 궤도틀림표준편차의 변화율로 정의하였다. 이는 궤도파괴에 영향을 끼치는 많은 매개변수를 포괄적으로 평가하여 단순화하기 위함이다. 즉, 특정 매개변수가 궤도손상에 끼치는 영향을 분석하는 경우가 아니라면 손상진행을 단일입력에 대한 단일출력으로 간략화 하는 것이 MTT의 투입주기 평가측면에서는 합리적일 수 있다. 본 연구에서는 우선적으로 궤도틀림의 표준편차와 기간(열차통과톤수)으로 표현된 초반손상율을 mm/Month 또는 mm/MGT 단위로 평가하였다. 그림 4부터 7과 같이 초반손상율을 산출하고 MTT작업 후 임의시간 t가 경과한 후의 궤도틀림에 대한 표준편차 $\sigma(t)$의 진행추정식을 식 (3)과 같이 제시하였다.

$$\sigma(t) = \theta_i \times t \qquad (t = 0,1,2 \text{ 개월 또는 2 MGT통과시간}) \qquad (3a)$$

$$\sigma(t) = \theta_f \times t \qquad (t = 3,...,12 \text{ 개월 또는 2 MGT통과후시간}) \qquad (3b)$$

여기서 θ_i와 θ_f는 각각 mm/month (mm/MGT)단위를 갖는 초기변화율과 후반변화율을 의미한다. θ_i와 θ_f는 2년간의 궤도틀림분석을 통하여 산출하였다.

4.2 MTT의 투입주기 평가

본 연구에서는 다음과 같은 식 (4)부터 (6)을 사용하여 5년간 투입되어야 하는 MTT작업의 횟수를 산출한 후 산술평균에 의한 년간 MTT투입주기를 평가하였다.

$$SM_0 = SM - \Delta\sigma_{MTT} \tag{4}$$

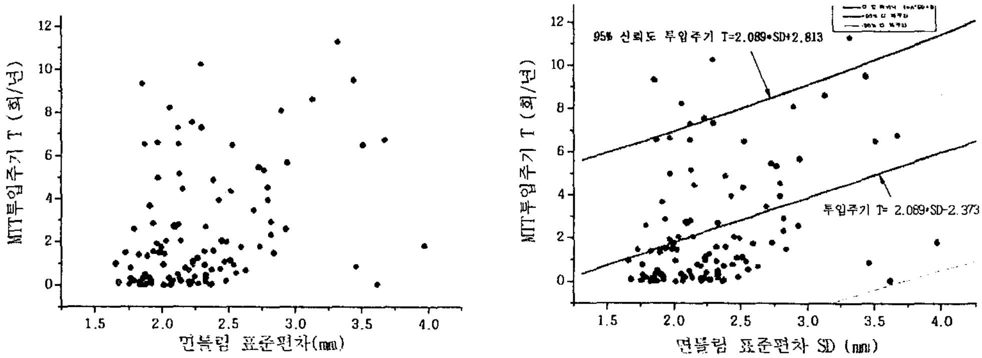
$$\begin{aligned} SD(t+2) &= SM_0 + \sigma(t) \\ &= SM_0 + \theta_i \times 2 + \theta_f \times t \\ &= SM_0 + \theta_i\,(2+0.5t) \qquad (t=1,\ldots,10\text{개월}) \end{aligned} \tag{5}$$

$$\theta_f = 0.5 \times \theta_i \tag{6}$$

식 (4)에서 $\Delta\sigma_{MTT}$ 는 식 (2)이며, SM은 MTT작업 전에 평가된 궤도틀림의 표준편차, SM_0 는 MTT작업 후에 예측된 궤도틀림의 표준편차를 나타낸다. 식 (5)에서 $SD(t+2)$ 는 2개월 이후 또는 2 MGT통과이후의 궤도틀림표준편차의 진행량을, $\sigma(t)$ 는 2개월 이후 또는 2 MGT통과이후 열차통과톤수에 따른 궤도틀림표준편차의 변화를 나타낸다. 식 (6)은 궤도틀림의 표준편차에 대하여 영국철도에서의 실험결과 궤도손상에 대한 후반손상율이 일반적으로 초반손상율의 약 50%가 된다는 결과에 근거하여 설정하였다. 식 (7)은 궤도틀림의 표준편차로 표현된 등가의 정비기준에 도달하기까지의 진행시간을 산출하기 위한 식으로 식 (7)을 만족하는 시간 t+2가 최초 MTT작업 후 재 MTT작업이 수행되어야 하는 시간이 된다.

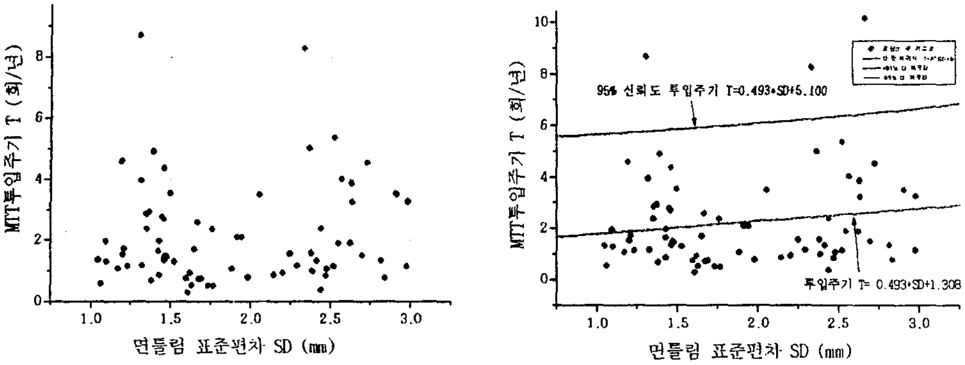
$$SD(t+2) = 3.5 \quad (mm,\ 95.4\%\text{포함확률}) \tag{7}$$

그림 8부터 11은 경부선, 호남선, 중앙선 및 영동선의 총 355개 초반손상율 추출에 성공한 구간에서 평가된 MTT투입주기와 2년간의 평균 궤도틀림 표준편차와의 관계를 나타낸 것이다.



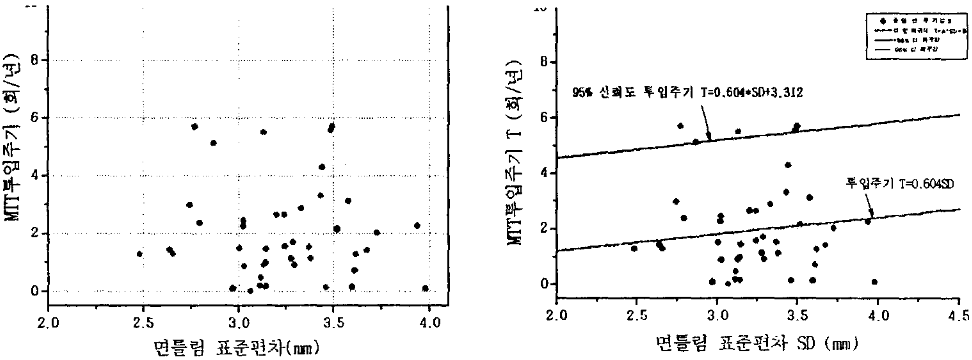
(a) MTT투입주기 분포 (b) 투입주기추정 선형회귀식

그림 9. 경부선(상/하행) MTT 투입주기 분포



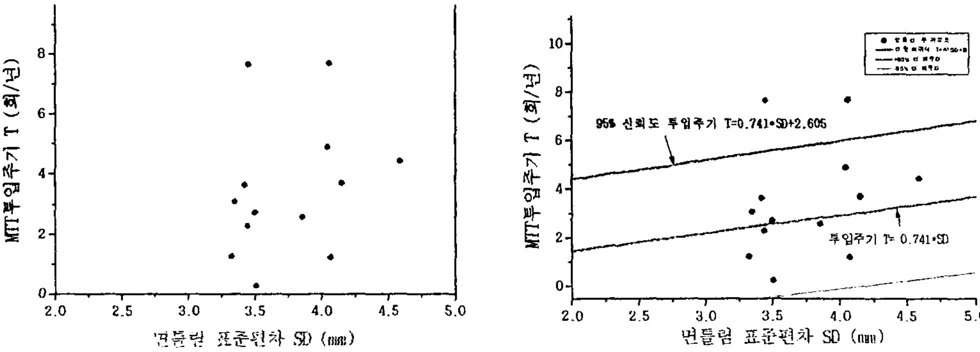
(a) MTT투입주기 분포 (b) 투입주기추정 선형회귀식

그림 10. 호남선(상/하행) MTT 투입주기 분포



(a) MTT투입주기 분포 (b) 투입주기추정 선형회귀식

그림 11. 중앙선(상/하행) MTT 투입주기 분포



(a) MTT투입주기 분포 (b) 투입주기추정 선형회귀식

그림 12. 영동선(상/하행) MTT 투입주기 분포

5. MTT작업효율향상방안

MTT작업은 궤도틀림의 정정효과가 있으나 적정 투입주기이상의 과도한 투입은 오히려 건전한 도상자갈의 파쇄를 야기하여 유도상궤도의 장점인 풍부한 탄성을 감소시키는 역효과가 날 수 있다. 따라서 MTT에 의한 궤도정정작업은 최소한도로 수행하며 궤도틀림을 보수기준 이내로 유지하는 것이 가장 바람직하다 할 수 있다. 본 연구에서는 국내에서의 MTT작업효율향상을 위한 장

비조합방안에 대한 일본의 사례를 검토하였다. 향후 실질적인 작업효율향상효과에 대한 장기적인 신힘적 검증을 수반한다면 1종기계작업에 대한 경제성 및 작업품질에 대한 향상을 기대할 수 있을 것이다.

5.1 레일삭정

다음은 일본 RTRI에서의 레일삭정작업과 1종 기계작업과의 조합운영에 따른 효과를 분석한 사례 중 일부를 나타낸다. 선로의 차량 및 운전조건은 통근전차만 : 축중 120kN, 속도 : 120km/h, 통과톤수 : 30MGT/년 및 차량동요계수 : k_v=0.0010이다. 표 3은 장비조합경우를 나타낸다.

표 3. 장비조합의 경우

경우	내용
No. 1	MTT만
No. 2	MTT+레일삭정(5년주기)
No. 3	MTT+레일삭정(3년주기)

표 4. 보수비용비(比)의 산출결과

조건	MTT	레일삭정	계
No.1	18회/20년	0회/20년	18
No.2	9	4	13*
No.3	8	7	15
작업별 비용비	1	1	

* No. 2의 보수비용= (MTT 9회×1 + 레일삭정 4회× + 도상갱환 0회×5) = 13

또한 궤도구조조건은 50N 장대레일, PC 3호 5형, 침목 본수 39본/25m (0.64m간격) 및 도상두께 250mm인 보통노반이다. 기타조건은 궤도틀림표준편차에 의한 보수레벨 :초기치 σ_{y0} = 2.0mm, 상한치 $\sigma_{y,hi}$ = 3.5mm 등 이다. 표 4와 같이 MTT와 레일삭정작업의 조합에 의한 20년간의 보수비용 분석결과 MTT보수만으로 장기간 경과한다면 안정된 궤도상태의 유지가 곤란하다. 또 적절한 주기의 레일삭정은 궤도틀림진행 제어책을 강구한다면 MTT의 보수횟수가 매우 적게 된다.

◎ 작업종별마다 작업단가비를 가정하여 보수비용을 구한 결과 MTT만의 보수체계보다도 레일삭정을 조합시키는 방법이 전체 보수비용이 적게 된다.

6. 결론

본 연구에서의 MTT투입주기평가에 관한 연구결과로부터 도출한 결론을 정리하면 다음과 같다.

1) MTT의 투입주기평가를 위해서는 궤도틀림의 이력분석을 통한 궤도손상진행예측모델의 수립이 전제되어야 한다.
2) 예방유지보수체계의 구축을 위해서는 현행 최대값방식의 궤도정비기준은 궤도틀림의 표준편차를 이용한 차등기준으로의 재 설정이 바람직하다.
3) MTT투입주기평가의 신뢰도를 향상시키기 위해서는 향후 본 연구에서 제시한 궤도손상진행예측모델이 좀더 세분화되어 궤도 각 구성요소별 영향이 분석되어야 할 필요가 있다.
3) MTT의 과도한 투입은 오히려 궤도파손을 야기시킬 수 있으며, 과도한 투입주기가 산출된 구간에 있어서는 갱환작업과의 비용평가를 통하여 근본적인 개량이 계획되어져야 할 것이다.
4) 궤도유지보수방식의 개선과 궤도기술개발의 기반으로서 궤도검측자료의 축적 및 이력분석은 보선작업이력과 함께 전산화기반하에 중요하게 관리되어야 한다.

7. 참고문헌

1) 오지택 등(1999), **보선작업의 기계화 및 현대화 계획수립을 위한 연구**, 연구보고서, KRRI 연구 99-21, 한국철도기술연구원