

지하철 마모 데이터 회귀분석을 통한 궤도 수명 평가

Evaluation of the Railroad Track Life Cycle Based on the Metro Rail Wear Data Regression Analysis

정민철¹⁾

Jeong, Min Chul

김정훈²⁾

Kim, Jung Hoon

이지하³⁾

Lee, Jee Ha

강윤석⁴⁾

Kang, Yun Suk

공정식^{5)*}

Kong, Jung Sik

Abstract

The wear of railway track affects loss of rough ride, noise or vibration of train and traveling safety. Moreover as the track is worn away, this promotes destruction of structural mechanism of rail track which can bring about increasing of rail track maintenance cost drastically. For this reason, it is very important and interested research subject to design railway track structure and to analyse train movement mechanism based on systematic analysis of the reasons causing rail wear possible in real field. In this research, for the efficient maintenance, Life Cycle Performance of rail track and maintenance characteristics are computed considering some track components such as track type, contracting type, sleeper type and roadbed type. Time - Wear probabilistic distribution relationship as well as multiple regression analysis based on time, curvature and wear data are computed to predict the service life remainder of railway track and to be adapted to safety assessment.

Keywords : Wear data, Railway track, Railway track components, Life Cycle Assessment, LCP, Probabilistic Evaluation, Multiple regression analysis

1. 서론

최근 지하철 노선 및 차량운행횟수의 증가로 인하여 궤도의 손상이 심해지고 보수주기가 짧아짐에 따라 과거와 같은 잦은 인력투입에 의한 궤도보수가 불가능해지고 종래의 유지보수방식을 탈피한 궤도유지관리의 현대화에 관한 필요성이 대두되고 있다. (서사범, 2006) 철도의 불안정한 운행 및 승차감 저하를 야기하는 주요 원인으로 여러 종류의 레일 마모를 꼽을 수 있다. 레일에는 차륜에 의한 윤중, 역행 또는 제동에 의해 생기는 접선력, 곡선통과에 수반되는 횡압, 좌우 차륜의 주행로 차이에 의한 윤축의 비틀림에 기인하는 접선력 등의 외력이 작용하며, 이들의 외력이 기상 및 도유로 대표되는 운할 조건 등과 복잡하게 영향을 주어 레일두부면 및 궤간 내측면이 마모된다. (한국철도기술연구원, 1997) 레일마모는 열차의 주행안전 및 승차감에 미치는 영향이 크고, 소음진동의 주요원인으로 작용한다. 또한 레일마모가 발생할 경우 궤도구조의 파괴를 촉진시킴으로써 차량 및 궤도유지보수비를 크게 증가시킨다. (최정흠 등, 2003) 따라서 현장에

서 발생하는 마모 원인을 체계적으로 분석함으로써 마모를 저감할 수 있도록 차량운행 조건과 선로선형 및 궤도구조를 설계하는 것은 중요한 과제이다.

본 연구에서는 궤도의 효율적인 유지관리를 위해 궤도를 구성하고 있는 레일, 체결구, 침목, 도상 등의 요소를 고려하여 레일 궤도의 생애주기 거동 및 유지관리 특성을 분석하였다. 또한 축적된 진단/검측 데이터로부터 궤도 구성품의 건전도를 평가할 수 있는 방법을 정립하고 잔존수명을 예측하여 효율적 유지관리를 실현할 수 있는 기법 개발을 위하여 지하철 레일단면마모데이터를 이용한 구간 특성에 따른 시간-마모량의 확률적 분포 변화와 다중회귀 분석을 수행하였다.

2. 본론

2.1 데이터 측정 및 관리

서울 지하철 마모데이터의 경우 Fig. 1과 같이 하나의 측정 지점에 대하여 레일의 마모 데이터 측정 지점마다

1) 학생회원, 고려대학교 석박사통합과정 중 박사과정

2) 학생회원, 고려대학교 석박사통합과정 중 박사과정

3) 한국철도기술연구원 선임연구원

4) 한국철도기술연구원 선임연구원

5) 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 부교수

* Corresponding author : hoyo21@korea.ac.kr 02-3290-3741

• 본 논문에 대한 토의를 2010년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2010년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

총 6개의 측마모 및 직마모량과 게이지에 의해 측정된 게이지 마모량을 포함 총 7개의 마모 데이터를 포함하고 있으며 1m 간격으로 측정하였다. 일반적으로 레일마모는 차륜에 의한 윤증, 역행 또는 제동에 의해 생기는 접선력(마찰)과 곡선 통과시 발생하는 횡압, 좌우 차륜의 주행로 차이에 의한 차륜의 이동거리 불균형 등의 외력에 의하여 레일 두부면 및 측면에 발생한다. (I.Povilaitiene, 2006) 특히, 곡선외측 레일에서는 열차운행 조건 및 환경적 조건에 따라 차륜 구름 접촉 불균형에 의해 국부적으로 이상마모가 발생한다. 이러한 레일 이상마모를 관리하기 위해서 레일에서 측정된 마모 데이터들의 집중 관리가 요구되고 있다.

서울 메트로에서는 궤도 검측차에 장착한 레일 마모 검사장치를 이용하여 4회/년 레일 마모검사를 시행하고 있다. (서울메트로, 2007) 검사장치를 통해 얻어지는 마모량 측정치는 Fig. 2와 같은 형태로 저장된다.

Fig. 2는 2006년 2회차에 측정된 레일마모량으로서 1호선 하선에서 측정된 데이터임을 알 수 있다. 기록지에서 Line은 현재 측정된 위치를 기록한 것이고, Left/Right Rail에는 좌우 레일의 종류를 기록하였다. KP는 측정위치로서 위의 Fig. 2에서와 같이 매 1m 마다 마모데이터를 측정하여 관리하고 있다. Left/Right rail에서 각각 7개의 측정점에서 마모량을 검측하고 있고, 각 측정점의 위치는 Fig. 1에 보이는 바와 같다. 모든 측정점들이 레일 마모의 관리에 사용되는 것은 아니다. 레일의 유지보수에 주로 영향을 미치는 것은 측마모로서 C0점에서 측정되는 데이터를 이용하게 된다. 만약 관리자에 의해 직마모의

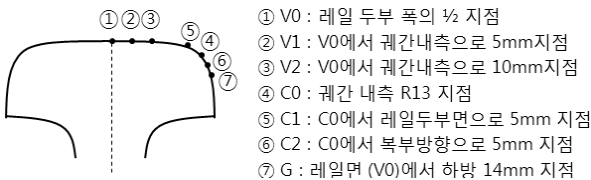


Fig. 1 레일마모측정기의 측정위치

A10		P 106 DN 21		DATA REPORT(LM)																						
1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T						
2	Division office				1호선 하선																Subdivision					
3	Line																				Track					
4	Working bearing																				Sequence					
5	File No.																				Event					
6	Date				2006-05-24																					
7																										
8	Line	Direction	Left Rail	Right Rail	KP	Left rail (mm)										Right rail (mm)										SMSC
9						V0	V1	V2	C2	C0	C1	G	C1	C0	C2	V2	V1	V0								
10	P 106 DN 21		KS-50kgN	KS-50kgN	BK500	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0						
11	P 106 DN 21		KS-50kgN	KS-50kgN	BK499	0.0	0.1	0.2	0.0	0.4	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0						
12	P 106 DN 21		KS-50kgN	KS-50kgN	BK498	2.0	2.0	2.1	0.2	0.1	0.8	0.1	0.5	0.5	0.1	0.3	0.8	0.7	0.6							
13	P 106 DN 21		KS-50kgN	KS-50kgN	BK497	1.1	1.1	1.2	0.7	0.1	0.8	0.3	0.6	1.0	0.2	0.4	1.2	1.0	1.0							
14	P 106 DN 21		KS-50kgN	KS-50kgN	BK496	1.0	1.1	1.1	0.6	0.1	0.9	0.4	0.5	0.6	0.1	0.4	1.1	1.0	0.9							
15	P 106 DN 21		KS-50kgN	KS-50kgN	BK495	1.1	1.3	1.3	0.4	1.0	1.5	0.2	0.4	0.5	0.3	0.5	1.0	1.1	0.9							
16	P 106 DN 21		KS-50kgN	KS-50kgN	BK494	1.1	1.2	1.4	0.9	1.4	1.8	0.3	0.4	0.7	0.3	0.6	1.2	1.2	1.2							
17	P 106 DN 21		KS-50kgN	KS-50kgN	BK493	1.1	1.2	1.3	0.6	1.3	1.7	0.5	0.4	0.8	0.2	0.5	1.3	1.3	1.4							
18	P 106 DN 21		KS-50kgN	KS-50kgN	BK492	1.1	1.2	1.2	0.6	1.4	1.5	0.4	0.8	0.2	0.7	1.3	1.2	1.3								
19	P 106 DN 21		KS-50kgN	KS-50kgN	BK491	1.1	1.2	1.2	1.0	0.7	1.2	0.5	0.3	1.0	0.0	0.5	1.2	1.3								
20	P 106 DN 21		KS-50kgN	KS-50kgN	BK490	0.4	0.5	0.4	0.5	0.2	0.6	0.5	0.4	1.1	0.0	0.5	1.4	1.2	1.3							
21	P 106 DN 21		KS-50kgN	KS-50kgN	BK489	0.8	0.9	0.9	0.6	0.3	0.8	0.5	0.5	1.0	0.1	0.3	1.4	1.1	1.2							
22	P 106 DN 21		KS-50kgN	KS-50kgN	BK488	0.3	0.4	0.4	0.5	0.1	0.5	0.5	0.5	1.0	0.1	0.1	1.4	1.2	1.2							
23	P 106 DN 21		KS-50kgN	KS-50kgN	BK487	0.6	0.7	0.8	0.5	0.3	0.7	0.5	0.6	1.1	0.2	0.0	1.4	1.2	1.3							
24	P 106 DN 21		KS-50kgN	KS-50kgN	BK486	0.9	1.0	1.0	0.4	0.4	0.9	0.4	0.5	1.3	0.4	0.2	1.6	1.4	1.4							
25	P 106 DN 21		KS-50kgN	KS-50kgN	BK485	0.9	1.0	1.1	0.3	0.2	0.8	0.4	0.4	1.2	0.3	0.0	1.5	1.4	1.3							
26	P 106 DN 21		KS-50kgN	KS-50kgN	BK484	0.0	0.1	0.2	0.3	0.0	0.4	0.5	0.4	1.3	0.4	0.2	1.5	1.3	1.3							
27	P 106 DN 21		KS-50kgN	KS-50kgN	BK483	0.9	0.9	1.1	0.6	0.5	0.8	0.6	0.4	1.3	0.4	0.2	1.6	1.4	1.4							
28	P 106 DN 21		KS-50kgN	KS-50kgN	BK482	0.6	0.7	0.8	0.3	0.1	0.6	0.6	0.4	1.2	0.3	0.0	1.5	1.4	1.3							
29	P 106 DN 21		KS-50kgN	KS-50kgN	BK481	0.6	0.7	0.8	0.7	0.3	0.6	0.6	0.4	1.1	0.2	0.1	1.4	1.3	1.3							
30	P 106 DN 21		KS-50kgN	KS-50kgN	BK480	0.6	0.8	0.9	0.7	0.4	0.6	0.7	0.3	1.2	0.4	0.3	1.6	1.4	1.4							
31	P 106 DN 21		KS-50kgN	KS-50kgN	BK479	0.3	0.3	0.5	0.5	0.2	0.4	0.7	0.3	1.2	0.4	0.3	1.5	1.3	1.4							

Fig. 2 레일마모량 측정기록 예(2006년 2회차)

관리가 필요하다고 판단될 경우 V0점에서 측정되는 데이터를 직마모량 데이터로 판단하여 사용할 수 있다. (건설교통부, 2005) 따라서 본 연구에서는 C0점과 V0점의 측정값을 철도설계인자(곡률반경, 캔트, 슬랙 등)와 궤도의 구성품(체결구, 도상 등)에 따라 분류하여 시간에 따른 진전효과를 정의하고자 한다.

2.2 레일 마모량 분석을 위한 대상구간 선정

지하철의 급곡선부에서 레일 마모가 급속히 진행되어 레일 교체비용과 레일 교환 주기가 빨라짐에 따라 궤도 유지관리비용이 증가한다. 본 연구에서는 시간에 따른 마모량 변화를 산출하기 위한 데이터로 다른 노선에 비해 곡선 구간이 많은 지하철 2호선의 마모데이터를 이용하였다. 이 데이터는 궤도 검측차에 장착한 레일마모검사장치를 이용하여 4회/년 레일 마모검사를 통해 얻은 것이다. 본 연구를 위해 받은 마모데이터는 지하철 1~4호선의 2005년 1회차 ~ 2006년 2회차로서 총 6회 검측한 데이터이다. 선로 보수 작업의 데이터는 2005년 9월 1일 ~ 2008년 9월 30일까지의 데이터다. 따라서 해석 데이터는 유지보수 여부를 판단할 수 있는 기간의 데이터인 2005년 3회차 ~ 2006년 2회차까지 총 4회 검측한 지하철 마모데이터를 이용하였다. 이 기간 동안 레일교체 등 마모량의 시간에 따른 변화에 영향을 줄 수 있을만한 유지보수 이력이 없는 구간을 선정하여 시간에 따른 마모 변화를 산출하였다.

서울 메트로 1~4호선 전 구간에 대하여 내/외선-지상/지하구간-자갈/콘크리트도상으로 분류 조사하였다. 이 중 레일교체 등 마모량의 시간에 따른 진전에 직접적인 영향을 줄 수 있는 유지보수 이력이 있는 구간과 속도 데이터가 불분명한 역사구간은 분석대상에서 제외하였다. 곡률반경 R=500m인 '구로디지털-대림' 및 '대림-신도림' 구간을 제외하고는 조건을 만족하는 분석대상 구간의 수가 비교적 적기 때문에 마모를 고려한 일반화된 수명산정 모델을 제시하기 어려움이 있었다. 보다 정확한 마모량에 따른 생애주기 모델은 현 분석에서 수집된 1년 정도의 자료 이외에 보다 장기간의 마모데이터 사용, 5~8호선 추가자료 이용 등으로 정확도 및 신뢰도를 향상시킬 수 있을 것이다.

2.3 시간에 따른 마모량의 확률적 수명산정

궤도 구성품의 건전도를 평가할 수 있는 초기 단계로 레일 마모에 가장 큰 영향을 미치는 공용년수와 곡률반경을 영향인자로 결정하여 지하철 레일단면마모데이터를 이용한 곡률반경별 시간에 따른 마모량분포 변화를 산출하였다. 마모 데이터의 경우 측정일 2005년 3회차 ~ 2006년 2회차까지 총 4회 검측한 지하철 마모데이터를

이용하였다. 2005년 3회차의 측정일은 2005년 8월 26 일로 이 날짜를 기준일 (0일)로 하여 다른 회차의 일수를 계산하여 시간에 따른 마모량 변화를 알아보았다. 각 회차 포인트는 평균+표준편차, 평균, 평균-표준편차의 값으로 나타내었다. 또한 각 회차의 포인트에 대해서 선형 회귀 추세선을 추가하여 마모의 변화 추이를 알아보았다.

2.3.1 2호선 내선, 지상구간, 자갈도상

Table 1은 2호선 내선, 지상, 자갈도상 구간에 해당하는 샘플구간이다. 곡률반경이 직선인 구간, R=250m의 도유기 설치구간, R=350, 400, 500, 700의 구간을 이용하여 곡률반경에 따른 마모량의 변화에 대해 알아보았다. 곡선방향이 좌측으로 회전하는 좌곡선의 경우 원심력에 의하여 바깥쪽 레일인 오른쪽 레일에 측마모가 더 심하게 나타나고, 곡선방향이 우측으로 회전하는 우곡선의 경우 이와 반대 현상이 나타날 것으로 예상되었다. 따라서 곡선방향에 따른 주마모레일이 매 구간 정의될 필요가 있고, 내선, 지상, 자갈 도상의 특성을 만족하는 샘플구간을 Table 1에 정리하였다.

Fig. 3 ~ Fig. 6은 2호선 내선, 지상구간, 자갈도상에 R = 350인 ‘구의-강변구간’의 완화곡선+원곡선 구간

Table 1 2호선 내선, 지상, 자갈도상 구간

곡률반경	곡선방향	구간명	구간길이	주마모레일
직선	-	구의 - 강변	371m	-
250m	좌곡선	한양대 - 뚝섬	350m	Right
350m	우곡선	구의 - 강변	556m	Left
400m	우곡선	신대방 - 구로디지털	257m	Left
500m	우곡선	구로디지털 - 대림	400m	Left
700m	우곡선	대림 - 신도림	365m	Left

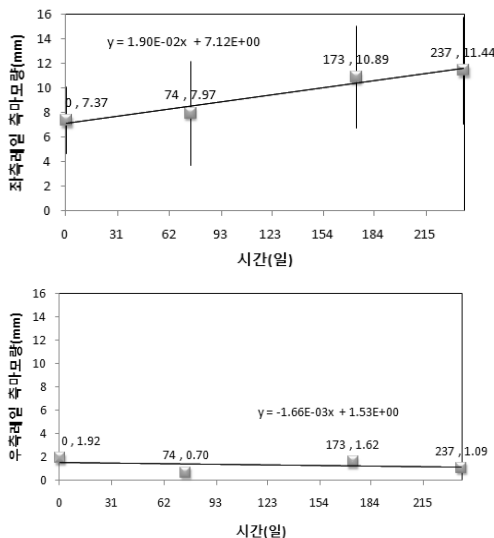


Fig. 3 R=350 m 구간에서 시간에 따른 측마모량의 변화 (완화곡선+원곡선, 556m) (상:좌측마모, 우:우측마모)

과, 원곡선 구간에 대해서 시간에 따른 측마모량의 변화를 분석한 결과이다. 이 구간은 상대적으로 곡률반경이 큰 구간이며, 우곡선 구간이므로 좌측레일이 주마모레일이다. 마모량 그래프에서의 수치 표현을 위해 마모량 변화 곡선에 해당 시간의 마모데이터 평균값을 기입하였으며, 상향 곡선과 하향 곡선은 각각 ‘마모량 평균 + 표준편차’, ‘마모량 - 표준편차’를 나타낸다. Fig. 3에서 나타난 바와 같이 주마모레일인 좌측에서 시간에 따른 마모의 진전이 확실하게 확인되었고, 변화량(기울기)이 1.90E-02 (mm/일)인 선형추세선을 얻을 수 있다. Fig. 4의 원곡선 구간에서는 2.14E-02 (mm/일)로 완화곡선+원곡선 구간보다 더 크게 증가 되는 결과가 나왔다. 곡률반경의 영향을 받지 않는 우측레일의 측마모 변화량은 시간에 따

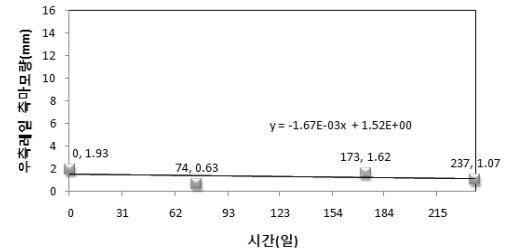
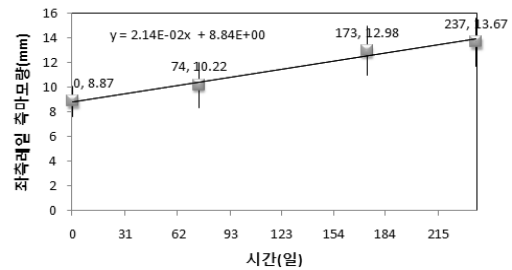


Fig. 4 R=350 m 구간에서 시간에 따른 측마모량의 변화 (원곡선, 416m) (상:좌측마모, 우:우측마모)

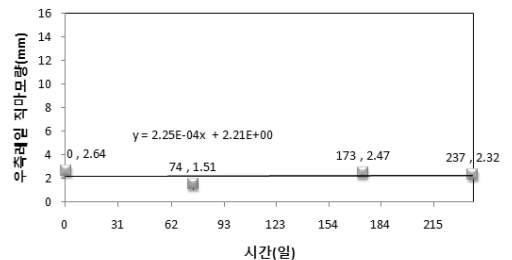
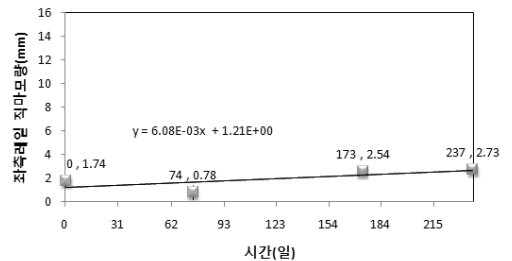


Fig. 5 R=350m 구간에서 시간에 따른 직마모량의 변화 (완화곡선+원곡선, 556m) (상:좌측마모, 우:우측마모)

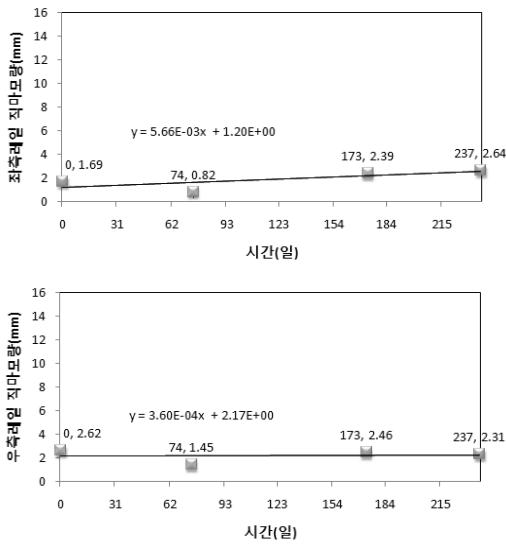


Fig. 6 R=350 m 구간에서 시간에 따른 직마모량의 변화 (왼쪽선, 416 m) (상:좌측마모, 우:우측마모)

른 기울기가 음수값을 보였다. 이는 물리적으로 불가능한 결과이지만, 마모데이터의 오차범위 이내이므로 우측레일의 측마모는 거의 발생하지 않는 것으로 판단된다. 2호선 내선, 지상구간, 자갈도상에 R=350인 구의-강변구간의 완화곡선+원곡선 구간과, 원곡선 구간에 대해서 시간에 따른 직마모량의 변화를 분석하였다.

이 구간은 우곡선 구간이기 때문에 좌측레일이 곡률반경에 의한 직마모의 영향을 받는다. 그리고 곡률반경이 큰 구간으로 좌측레일의 직마모의 변화가 완화곡선+원곡선 구간에서 $6.08E-03$ (mm/일)의 기울기로 시간에 따라 측마모량과 비교해서 작게 증가되는 것으로 분석되었다. 원곡선 구간에서는 $5.66E-03$ (mm/일)로 완화곡선+원곡선 구간과 마찬가지로 측마모량과 비교해 작은 기울기를 나타낸다. 곡선 구간에서 측마모 증가량의 경우와 다르게 직마모증가량은 곡률반경에 크게 영향을 받지 않아 이런 결과가 나온 것으로 보인다. 곡률반경의 영향을 받지 않는 우측레일의 직마모 변화량은 마모데이터의 오차범위 내에서 거의 변화가 없는 것으로 나타났다.

이와 같은 방식으로 샘플구간으로 선정된 2호선 내선, 자갈도상, 지상 구간의 다른 곡률반경 구간에 대해서도 시간에 따른 측마모량 및 직마모량의 변화 분석을 수행하였으며, 그 결과를 Table 5에 정리하였다.

2.3.2 2호선 내선, 지상구간, 콘크리트도상

Table 2는 2호선 내선, 지상, 콘크리트도상 구간에 해당하는 샘플구간이다. 2호선 전 구간에 대하여 조사한 결과 ‘당산-합정’ 구간만 조건을 만족하여 분석대상구간으로 선정하였다. 샘플링된 구간은 좌곡선으로서 주마모레일이 우측인 구간이다.

Table 2 2호선 내선, 지상, 콘크리트도상 구간

곡률반경	곡선방향	구간명	구간길이	주마모레일
627m	좌곡선	당산 - 합정	249m	Right

Table 3 2호선 내선, 지하, 자갈도상 구간

곡률반경	곡선방향	구간명	구간길이	주마모레일
350m	좌곡선	종합운동장 - 삼성	160m	Right
400m	우곡선	방배 - 사당	326m	Left
500m	우곡선	신당 - 상왕실리	400m	Left

Table 4 2호선 내선, 지하, 콘크리트도상 구간

곡률반경	곡선방향	구간명	구간길이	주마모레일
400m	좌곡선	신도림 - 문래	316m	Right

2호선 내선, 지상구간, 콘크리트 도상의 모든 샘플 구간에 대해서 2.3.1과 같은 방식으로 시간에 따른 측마모량 및 직마모량의 변화 분석을 수행하였으며, 그 중 시간 변화에 따른 측마모량과 직마모량의 변화 관계 곡선 분석 결과를 Table 5에 정리하였다.

2.3.3 2호선 내선, 지하구간, 자갈도상

Table 3은 2호선 내선, 지하, 자갈도상 조건을 만족하는 구간이다. 2호선 전 구간에 대하여 조사한 결과 Table 3의 구간만 조건을 만족하여 분석대상구간으로 선정하였다.

2호선 내선, 지하구간, 자갈도상의 모든 샘플 구간에 대해서 2.3.1과 같은 방식으로 시간에 따른 측마모량 및 직마모량의 변화 분석을 수행하였다. 그 중 400m 곡률반경인 ‘방배-사당’ 구간의 시간 변화에 따른 측마모량과 직마모량 변화 관계 곡선 분석결과를 Table. 5에 정리하였다.

2.3.4 2호선 내선, 지하구간, 콘크리트도상

Table 4는 2호선 내선, 지하, 콘크리트도상 구간에 해당하는 샘플구간이다. 2호선 전 구간에 대하여 조사한 결과 ‘신도림-문래’ 중 상선구간만 조건을 만족하여 분석대상구간으로 선정하였다. 샘플링된 구간은 좌곡선으로서 주마모레일이 우측인 구간이다.

2호선 내선, 지하구간, 콘크리트도상의 샘플 구간인 ‘신도림-문래’ 중 상선 구간에 대해서 2.3.1과 같은 방식으로 시간에 따른 측마모량 및 직마모량의 변화 분석을 수행하였다. 분석결과 중 시간 변화에 따른 측마모량과 직마모량 관계 곡선을 Table. 5에 정리하였다.

2.3.5 곡률반경에 따른 마모량 변화 비교

앞에서 직선, R=250, 350, 400, 500에 대해서 단기간 (237일) 시간 변화에 따른 마모량의 변화를 알아보았다. 2호선 내선 지상, 자갈구간에서 각 곡률반경에 따른 레일

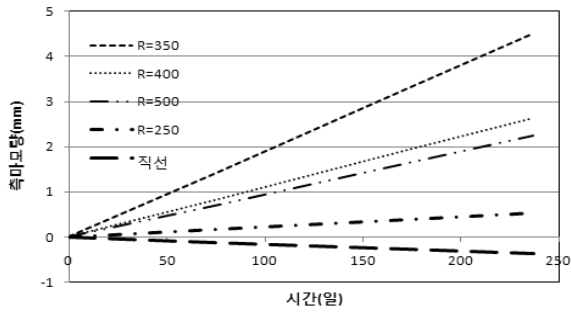


Fig. 7 2호선, 내선, 지상, 자갈도상구간 측마모량 변화

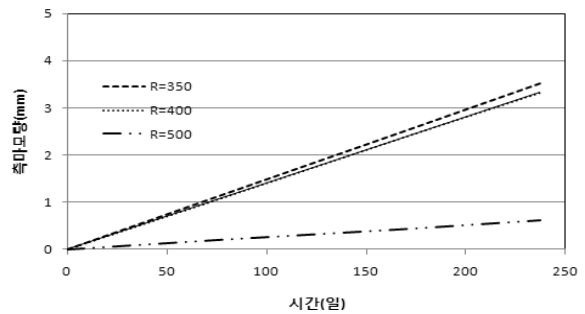


Fig. 9 2호선, 내선, 지하, 자갈도상구간 측마모량 변화

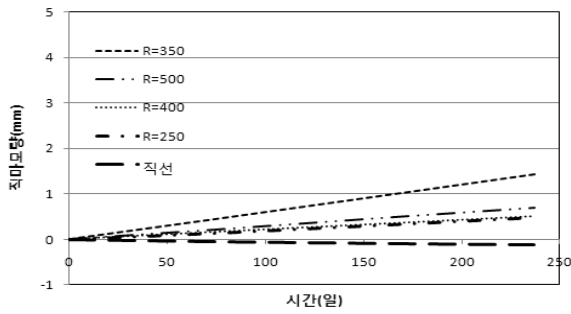


Fig. 8 2호선, 내선, 지상, 자갈도상구간 직마모량 변화

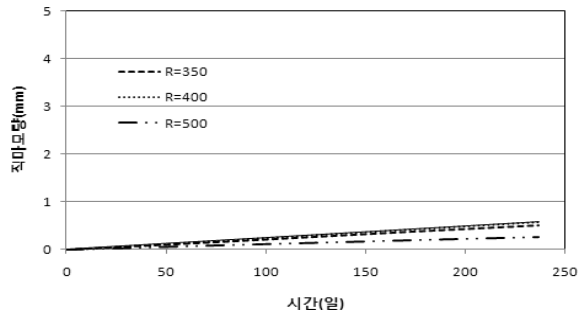


Fig. 10 2호선, 내선, 지하, 자갈도상구간 직마모량 변화

의 마모량 비교를 위해 각 구간에서 곡률반경에 영향을 받는 방향의 레일 마모데이터의 선형 회귀추세선을 한 그래프에 나타내었다. 각 구간의 선형회귀추세선 식에서 0 일 시점에서 마모량을 0으로 하였다. 완화곡선+원곡선 구간에서는 예상 한 바와 같이 직선과 도유기가 설치된 R=250 구간 (곡률반경이 300m 이하인 구간은 도유기가 설치되므로, 마모량의 증가가 비교적 적다.) (지하철 건설본부, 1995) 은 시간에 따라 측마모의 증가가 크지 않아 마모데이터 오차 범위 내에서 변화하고 있다. 직선 구간의 회귀분석 결과 비록 적기는 하나 음의 기울기를 보여주는 구간이 있다. 이는 데이터 오차범위 내의 변동성을 고려할 때 특별한 의미가 없다고 판단되며 보다 신뢰성 높은 마모모델 수립을 위해서는 본 연구에서 사용한 단위기간 보다 긴 기간의 데이터가 필요할 것으로 판단된다. 도유기가 설치되지 않은 구간인 R=350, 400, 500 구간에서는 곡률반경이 작을수록 측마모의 선형회귀 추세선의 기울기가 크다는 것을 알 수 있다. 같은 곡률반경의 지하구간과 비교하여 R=350, 500 지상구간의 측마모량은 더 빨리 증가하는 양상을 보인다. 이는 지상구간의 경우 잦은 온도변화와 대기 노출, 강우 등에 의한 레일 부식 등의 영향으로 마모량 증가 속도가 빠를 것으로 예상되므로 회귀분석 결과는 타당하다고 판단된다. (한국철도기술연구원, 2002)

2호선 내선, 지상, 자갈도상구간의 방법과 같이 지하구간에 대해서도 R=350, 400, 500 에 대해서 시간에 따른 마모량의 변화를 알아보았다. 곡률반경이 작을수록 측

마모의 선형회귀 추세선의 기울기가 크다는 것을 알 수 있다. 지상구간과 마찬가지로 시간에 따른 직마모 변화량은 대체적으로 측마모량과 비교하여 매우 작다는 것을 알 수 있었다.

2.3.6 구간특성, 도상, 곡률반경에 따른 마모량 비교

Table 5 (a) ~ (d) 에서 앞에서 구한 구간특성, 도상 종류, 곡률반경에 따른 마모량의 회귀분석식을 정리하였다. 콘크리트 도상의 경우 대상 구간의 검측 마모데이터 부족으로 인해 곡률결과는 따른 다양한 회귀분석식이 제시되지 못하고 있다. 반면, 자갈 도상의 경우 확보된 데이터를 바탕으로 시간 변화에 따른 마모량 산정이 가능하며, 이와 동일한 방법으로 추후 추가적인 데이터 확보 시, 콘크리트 도상 구간 또한 마모데이터를 이용하여 보다 정확한 시간 변화에 따른 마모량 산정이 가능할 것으로 기대된다.

2.4 다중 회귀분석 수행

2호선 내선, 자갈도상의 공통된 구간에서 외부 환경의 조건이 다른 지상구간과 지하 구간의 측마모량 및 직마모량에 대하여 다중회귀분석을 수행하였다. 사용된 변수는 곡률반경, 시간(일)이며 종속변수는 측마모량 또는 직마모량이다. 다중 회귀분석 변수 선정시 슬랙, 캔트, 열차의 제한 속도 등은 설계시 곡률반경에 의해 결정되는 설계인자이므로, 곡률반경은 이러한 인자들을 대표한다. (신길

Table 5 구간특성, 도상종류, 곡률반경에 따른 마모량(mm, y)과 시간(일, x) 관계 회귀분석식

(a) 완화곡선+원곡선, 지상구간

구간특성	지상구간(고가)			
도상종류	자갈도상			
레이종류	좌측		우측	
마모종류	측마모	직마모	측마모	직마모
곡률반경	R=350 (우곡선)			
관계식	$y=1.90E-02x + 7.12$	$y=6.08E-03x + 1.21$	$y=-1.66E-03x + 1.53$	$y=2.25E-04x + 2.21$
상관계수	0.974	0.84	X	0.047
곡률반경	R=400 (우곡선)			
관계식	$y=1.11E-02x + 7.26$	$y=2.20E-03x + 2.56$	$y=-4.99E-04x + 1.63$	$y=-3.43E-04x + 2.22$
상관계수	0.936	0.295	X	X
곡률반경	R=500 (우곡선)			
관계식	$y=9.43E-03x + 6.23$	$y=2.95E-03x + 2.68$	$y=-1.83E-05x + 1.64$	$y=1.63E-03x + 3.52$
상관계수	0.963	0.489	X	0.743
도상종류	콘크리트도상 (방진상)			
레이종류	좌측		우측	
마모종류	측마모	직마모	측마모	직마모
곡률반경	R=627 (좌곡선)			
관계식	$y=4.39E-03x + 1.12$	$y=5.49E-03x + 1.12$	$y=-1.65E-04x + 2.61$	$y=-3.91E-04x + 2.36$
상관계수	0.687	0.720	X	X

(b) 완화곡선+원곡선, 지하구간

구간특성	지하구간			
도상종류	자갈도상			
레이종류	좌측		우측	
마모종류	측마모	직마모	측마모	직마모
곡률반경	R=350 (좌곡선)			
관계식	$y=-1.23E-03x + 3.21$	$y=2.30E-04x + 3.30$	$y=1.48E-02x + 2.34$	$y=2.09E-03x + 0.83$
상관계수	X	0.046	0.902	0.979
곡률반경	R=400 (우곡선)			
관계식	$y=1.40E-02x + 4.29$	$y=2.41E-03x + 1.66$	$y=2.42E-03x + 2.69$	$y=2.54E-03x + 3.63$
상관계수	0.917	0.372	X	0.345
곡률반경	R=500 (우곡선)			
관계식	$y=2.58E-03x + 2.88$	$y=1.11E-03x + 9.87$	$y=5.24E-04x + 1.74$	$y=-9.67E-04x + 3.03$
상관계수	0.930	0.596	0.360	X
도상종류	콘크리트도상			
레이종류	좌측		우측	
마모종류	측마모	직마모	측마모	직마모
곡률반경	R=400 (좌곡선), 120m 정도 유지보수 있음			
관계식	$y=-5.63E-04x + 1.23$	$y=1.29E-04x + 1.61$	$y=3.06E-03x + 7.19$	$y=-1.98E-05x + 2.01$
상관계수	X	0.143	0.678	X

(c) 원곡선, 지상구간

구간특성	지상구간(고가)			
도상종류	자갈도상			
레이종류	좌측		우측	
마모종류	측마모	직마모	측마모	직마모
곡률반경	R=350 (우곡선)			
관계식	$y=2.14E-02x + 8.84$	$y=5.66E-03x + 1.20$	$y=-1.67E-03x + 1.52$	$y=3.60E-04x + 2.17$
상관계수	0.990	0.728	X	0.072
곡률반경	R=400 (우곡선)			
관계식	$y=3.06E-02x + 10.3$	$y=8.73E-03x + 2.23$	$y=-4.99E-04x + 1.63$	$y=-2.54E-04x + 2.20$
상관계수	0.886	0.690	X	X
곡률반경	R=500 (우곡선)			
관계식	$y=1.32E-02x + 7.65$	$y=3.67E-03x + 3.01$	$y=-1.45E-04x + 1.40$	$y=1.61E-03x + 3.87$
상관계수	0.974	0.498	X	0.907
도상종류	콘크리트도상 (방진상)			
레이종류	좌측	우측		
마모종류	측마모	직마모	측마모	직마모
곡률반경	R=627 (좌곡선)			
관계식	$y=6.49E-03x + 0.314$	$y=9.11E-03x + 0.434$	$y=3.21E-03x + 6.70$	$y=-1.34E-04x + 2.29$
상관계수	0.847	0.880	0.067	X

(d) 원곡선, 지하구간

구간특성	지하구간			
도상종류	자갈도상			
레이종류	좌측		우측	
마모종류	측마모	직마모	측마모	직마모
곡률반경	R=350 (좌곡선)			
관계식	$y=-1.23E-03x + 3.21$	$y=2.30E-04x + 3.30$	$y=1.48E-02x + 2.34$	$y=2.09E-03x + 0.83$
상관계수	X	0.046	0.929	0.979
곡률반경	R=400 (우곡선)			
관계식	$y=1.99E-02x + 5.59$	$y=1.23E-03x + 3.20$	$y=3.26E-03x + 1.61$	$y=4.12E-03x + 4.07$
상관계수	0.974	0.613	0.424	0.503
곡률반경	R=500 (우곡선)			
관계식	$y=7.89E-03x + 4.66$	$y=2.91E-03x + 3.58$	$y=1.20E-03x + 1.57$	$y=-6.21E-04x + 3.43$
상관계수	0.963	0.766	0.421	X
도상종류	콘크리트도상 (방진상)			
레이종류	좌측	우측		
마모종류	측마모	직마모	측마모	직마모
곡률반경	R=400 (좌곡선), 120m 정도 유지보수 있음			
관계식	$y=-5.86E-04x + 1.31$	$y=1.43E-04x + 1.88$	$y=3.58E-03x + 9.49$	$y=2.46E-05x + 2.25$
상관계수	X	0.090	0.715	0.022

철 등, 2007) 특히 회귀분석 결과 도유기가 설치되지 않은 일반적인 구간의 경우 곡률반경이 작아질수록 제한속도가 감소하더라도 레일 마모가 증가하므로, 곡률반경이 제한 속도에 비하여 레일마모에 보다 큰 영향을 미치는 주요 인자임을 판단할 수 있다. 또한 레일의 공용년수는 누적통과톤수나 열차의 운행 횟수 등을 반영하는 변수이며, 순환선인 2호선의 경우 구간별 누적통과톤수나 열차의 운행횟수는 공용년수와 비례한다. 회귀분석을 통해 3차원 그래프에 곡률반경과 시간에 따른 마모량의 다중회귀식을 표현하였다. 데이터 분산 정도를 나타내기 위해 회귀분석 표본점에 대해 마모량 실검측치를 원형 점으로 함께 나타내었으며 선형 평면이 다중회귀분석식을 나타낸다. 회귀분석 결과로부터 시간에 따른 지하 마모량 검측데이터의 변동성이 지상 구간보다 작은 것으로 나타나 합리적인 결과라 판단된다.

2.4.1 측마모량에 대한 다중회귀분석
지상구간의 다중선형회귀분석식은 아래와 같다.

$$z = 11.1267 - 0.0126x + 0.0181y \quad (1)$$

여기서, x : 곡률반경 ($x > 300$), (m)
 y : 시간(일)
 z : 마모량 (mm)

위의 회귀 분석식을 통하여 레일 궤도의 곡률반경이 감소하거나 (단, 단 도유기 미설치구간인 $x > 300$ 구간) 사용 기간이 증가함에 따라 레일의 측마모량이 증가함을 확인할 수 있다. 다중회귀식의 타당성을 보기위해 구한 다중회귀식의 값과 데이터 값의 최대 편차는 10.68 이다. 지하구간의 다중선형회귀분석식은 아래와 같다.

$$z = 7.4965 - 0.0095x + 0.0084y \quad (2)$$

마찬가지로 위의 회귀 분석식을 통해 레일 궤도의 곡률반경이 감소하거나, 사용 기간이 증가함에 따라 레일의 측마모량이 증가함을 확인할 수 있다. 지하구간에서는 측

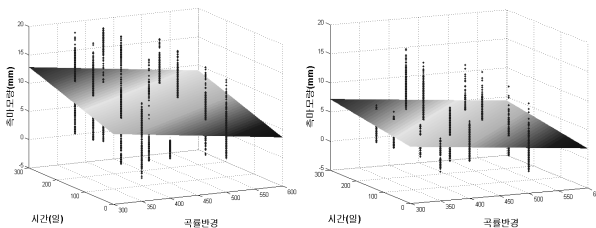


Fig. 11 측마모량의 다중선형회귀분석 (좌:지상, 우:지하)
(x축 : 곡률반경, y축 : 시간(일), z축 : 측마모량(mm))

마모 변화량에 곡률반경과 시간이 서로 유사한 정도의 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 다중회귀식의 값과 데이터의 값의 최대 편차는 10.40 이다. 지상구간의 다중선형회귀식의 시간 상수 0.0181(mm/일) 과 지하구간의 시간 상수 0.0084(mm/일) 을 비교해보면 동일한 곡률반경 조건에서 지상구간의 측마모량이 지하구간의 측마모량보다 크다는 것을 확인할 수 있다.

2.4.2 직마모량에 대한 다중회귀분석
지상구간의 다중선형회귀분석식은 아래와 같다.

$$z = -1.0218 + 0.0071x + 0.0044y \quad (3)$$

위의 회귀 분석식을 통하여 레일 궤도의 곡률반경 변화와 사용 기간이 증감에 따른 레일 직마모량의 변화를 확인할 수 있다. 이 식을 통하여 동일한 곡률반경에서 궤도의 사용 기간에 따른 궤도의 직마모량 변화를 확인할 수 있다. 다중회귀식의 타당성을 보기위해 다중회귀식의 값과 데이터의 값의 최대 편차는 5.59 이다. 곡률반경이 클수록 직마모량이 증가하는 결과가 나왔는데 분석결과 마모율의 시간에 따른 변화는 매우 적어 마모측정 시스템이 가지는 오차범위를 벗어나지 못하므로, 직선구간에서 비교적 짧은 시간(237일) 동안 누적된 직마모량 예측 모델 수립은 큰 의미가 없다고 판단된다. 지하구간의 다중선형회귀분석식은 아래와 같다.

$$z = 5.4302 - 0.0084x + 0.0017y \quad (4)$$

마찬가지로 위의 회귀 분석식을 통하여 레일 궤도의 곡률반경 변화와, 사용 기간이 증감에 따른 레일의 직마모량 변화를 확인할 수 있다. 이 식을 통하여 동일한 곡률반경에서 궤도의 사용 기간에 따른 궤도의 직마모량 변화를 확인할 수 있다. 다중회귀식의 값과 데이터의 값의 최대 편차는 5.10이다. 지상구간의 다중선형회귀식의 시간 상수 0.0044(mm/일)와 지하구간의 0.0017(mm/일)을 비교해보면 지상구간의 직마모량이 지하구간보다 크다는 것을 확인할 수 있다.

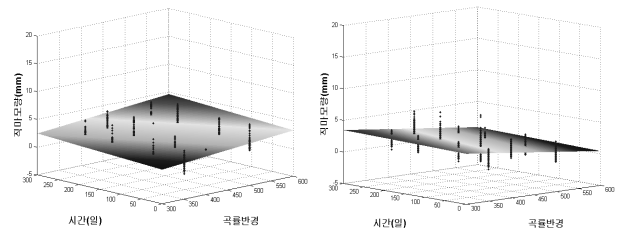


Fig. 12 직마모량의 다중선형회귀분석 (좌:지상, 우:지하)
(x축 : 곡률반경, y축 : 시간(일), z축 : 측마모량(mm))

3. 결론

본 연구에서 궤도 구성품의 건전도 평가를 위해 4회/년 측정되는 지하철 마모데이터 중 2005년 3회차 ~ 2006년 2회차 데이터를 가공하여 시간에 따른 마모량 분포 변화를 산출하였다. 구간 특성에 따른 마모량 산출을 위해 곡률반경, 도상 종류 등에 따른 시간과 마모량 관계의 회귀곡선을 도출하였다. 이를 통해 궤도의 구간특성에 따른 마모량 증가율의 정량적 비교가 가능하다는 결론을 얻었으며, 궤도의 구간 특성을 고려한 마모량 변화 회귀 모델을 도출하였다.

또한 본 연구에서는 지상구간과 지하 구간의 마모량에 대하여 다중회귀분석을 수행하였다. 사용 된 변수는 곡률반경, 시간(일)이며 종속변수는 마모량이며, 3차원 그래프에 곡률반경과 시간에 따른 마모량의 다중회귀식을 표현하였다. 데이터 분산 정도를 나타내기 위하여 회귀분석 표본점에 대해 마모량 실검측치를 원형 점으로 함께 나타내었으며 다중회귀분석식을 선형 평면으로 나타내었다. 분석 결과 지상에서의 마모 증가량이 지하 마모 증가량보다 곡률반경과 시간에 대해서 크다는 것을 알 수 있었으며, 결과적으로 곡률반경, 도상 종류의 구간 특성별 시간에 따른 마모량 변화 관계 곡선을 산출하였다. 이는 추후 일반적인 2호선 내선의 1일 통과톤수를 고려하여 누적통과톤수에 따른 마모량 회귀분석을 통해 순환선인 2호선 이외의 다른 노선에 대한 범용적인 마모량 예측식의 도출이 가능할 것으로 판단된다.

연구에 사용 가능한 데이터의 한계가 있었으나 본 연구를 통하여 곡률반경, 도상 종류 등 주요 인자의 영향을 개별적으로 고려할 수 있는 지하철 레일 마모량 회귀 모델이 제시 될 수 있었다. 하지만 데이터 부족으로 인하여 콘크리트 도상 구간에 대한 회귀분석 결과의 신뢰성이 떨어지며, 통합적인 궤도 유지관리 시스템의 적용을 위해서는 레일의 종류 등 보다 다양한 구간 특성의 적용이 필요할 것으로 판단된다. 특히 지하철의 가속감속이 빈번한 역사 구간 등의 특수 구간 대한 마모데이터 분석이나, 온도강

우량 등의 환경 요인을 고려한 연구가 뒷받침 되는 경우 보다 신뢰성 높은 궤도 유지관리 시스템 적용이 가능할 것이다. 때문에 추후 연구에서 유지관리 등 외부영향을 받지 않은 보다 많은 검측 데이터를 이용할 수 있다면 세부 영향인자까지 고려한 보다 신뢰성 있는 결과 도출이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 과제 (연구과제번호: PK 08001D-3) 및 교육과학기술부 재원으로 시행하는 한국 과학재단의 연구지원프로그램 (연구과제번호:NRF 2009-0081373) 지원을 받았습니다.

참고문헌

1. 건설교통부 철도산업과, “선로정비지침”, 2005.
2. 서사범, “궤도기술의 발달과 경험기술로부터의 탈피”, 한국철도학회지 제 9권 1호, 2006, pp.50-61.
3. 서울메트로 철도 토목팀, “레일 마모관리의 과학적 관리방안 보고”, 2007. 12. pp. 3-6.
4. 서울특별시 지하철건설본부, “레일도유기 설치기준”, 1995, pp.480-483.
5. 신길철, 주봉규, 정성현, “열차운행속도 상승에 따른 레일마모 및 캔트조정 연구”, 한국철도학회 2007년 춘계학술대회논문집, 2007, pp37-44
6. 최정흠, 문태선, 김기환, 한동철, “고속철도 차량의 차륜과 레일간의 마모 예측”, 한국철도학회 2003년도 추계학술대회논문집, 2003, pp.369-376.
7. 한국철도기술연구원, “차륜/레일간 마멸특성 해석”, 1997, pp.60-67.
8. 한국철도기술연구원, “철도 환경기술 개발 : 차세대 철도원천 기술개발사업”, 2002.
9. I. Povilaitiene, "Influence of gauge width on rail side wear on track curves", Journal of civil engineering and management Vol. 7, No. 3, pp.255-260.

(접수일자 : 2010년 1월 6일)
(심사완료일자 : 2010년 3월 16일)

요 지

레일마모는 열차의 주행안전 및 승차감에 미치는 영향이 크고, 소음·진동의 주요원인으로 작용한다. 또한 레일마모가 발생할 경우 궤도구조의 파괴를 촉진시킴으로써 차량 및 궤도유지보수비를 크게 증가시킨다. 따라서 현장에서 발생하는 마모 원인을 체계적으로 분석함으로써 마모를 저감할 수 있도록 차량운행 조건과 선로선형 및 궤도구조를 설계하는 것은 중요한 과제이다. 본 연구에서는 궤도의 효율적인 유지관리를 위해 궤도를 구성하고 있는 레일, 체결구, 침목, 도상 등의 요소를 고려하여 레일 궤도의 생애주기 거동 및 유지관리 특성을 분석하였다. 또한 축적된 진단/검측 데이터로부터 궤도 구성품의 건전도를 평가할 수 있는 방법을 정립하고 잔존수명을 예측하여 효율적 유지관리를 실현할 수 있는 기법 개발을 위하여 지하철 레일단면마모데이터를 이용한 구간 특성에 따른 시간-마모량의 확률적 분포 변화와 다중회귀 분석을 수행하였다.

핵심 용어 : 마모데이터, 지하철 궤도, 궤도구성품, 수명산정, LCP, 확률적 평가, 다중회귀분석