

# 가속도/감속도 변화율에 따른 레일마모 현상에 관한 연구

## A Study of Rail Wear by Change of Acceleration and Deceleration

하관용<sup>†</sup> · 김희식<sup>\*</sup>  
Kwan Yong Ha · Hiesik Kim

**Abstract** In this paper, operation mode of train was divided into powering, coasting, and braking and rail wear phenomenon has been done comparative analysis by each section. Data of train velocity is transferred to acceleration and deceleration from ATO Logging data. Amount of rail wear has been done comparative analysis by traction force of acceleration and braking force of deceleration and a plan for management of track irregularity is come up with by the result of the analysis.

**Keywords** : ATO (Automatic Train Operation System), Traction, Braking, Acceleration/Deceleration, Corrugation, Rail wear

**요 지** 본 논문에서는 도시철도 차량의 운전모드에 의한 레일마모 현상을 역행, 타행, 제동 세구간 별로 나누어 레일마모 현상을 비교 분석하였고, 또한 ATO 로깅데이터에서 실제 운행한 속도데이터를 가속도와 감속도 데이터로 변환하여 열차의 가속도의 견인력과 감속도의 제동력에 의해 발생하는 레일마모량을 비교 분석한 결과로 통해 궤도 관리에 적용할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

**주 요 어** : 열차운행자동제어장치, 견인력, 제동력, 가속도/감속도, 파상마모, 레일마모

### 1. 서 론

도시철도차량에는 열차운행자동제어장치가 도입되어 무인 및 자동운전이 가능하다. 열차운행자동제어장치에는 PID 제어기법이 적용되어 목표속도가 주어지고 목표속도와 실제 속도간의 오차에 비례,미분,적분계수를 보상하여 열차에 필요한 역행,타행,제동모드로 제어를 한다[1]. 열차자동운전시 차륜과 레일간 접촉면에서의 여러가지 메카니즘에 의해 복합적으로 레일마모가 발생한다. 그 중에서 미끄럼과 구름에 의한 레일마모가 주요 요인으로 작용되고 있다[4].

특히, 레일 미끄럼마모는 승강장과 곡선부에서 많이 발생되며, 승강장은 열차의 제동력으로 인한 미끄럼마모가 발생되며, 곡선구간에서는 차륜에 걸리는 하중이 증가하여 상대적으로 접촉면에 발생하는 미끄럼 속도와 내,외측,레일간의 거리 차로 인한 요인으로 볼 수 있다. 열차는 여러 가지 선로

의 조건, 차량의 특성, 운전시적의 단축을 위한 속도제어, 승차감 향상 등 많은 것을 고려하면서 자동운전을 한다. 이러한 여러 가지 조건을 만족하면서 열차의 운전모드가 결정되는데 열차 제동시 제동력에 의해 차륜과 레일간의 미끄럼 발생정도가 심하게 발생되고, 역행시에는 견인력으로 인해 미끄럼이 발생된다. 즉, 열차자동운전제어장치에 의해 PID제어기법이 적용되면서 선로에 나타나는 레일마모 현상은 역행시 가속도 성분과 제동시 감속도성분이 미끄럼 마모에 주요 요인으로 알려져 왔다. 하지만 궤도의 성능향상과 열차의 속도증가에 따른 열차의 안전성과 승객의 승차감을 향상시키기 위해 궤도틀림의 파장을 고려한 적절한 파장별 궤도선형 관리에 대한 연구가 많이 이루어지고 있으나 레일마모에 동적 주요인인 열차의 운행형태, 즉, 열차운전모드에 의한 레일마모 연구가 절실히 필요한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 도시철도 차량의 운전모드에 의한 레일마모 현상을 역행, 타행, 제동 세구간 별로 나누어 레일마모 발생량을 비교 분석하였고 또한, ATO 로깅데이터에서 실제 운행한 속도데이터를 가속도로 산출하여 열차의 가속도의 견인력과 감속

<sup>†</sup> 책임저자 : 회원, 서울시립대학교, 전자전기컴퓨터공학부 박사과정  
E-mail : drha@uos.ac.kr

TEL : (02)2210-2569 FAX : (02)2210-4431

<sup>\*</sup> 비회원, 서울시립대학교, 전자전기컴퓨터공학부 교수

도의 제동력에 의해 발생하는 레일마모 상관관계를 분석한 결과를 궤도관리에 적용할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

## 2. 열차 운전 모드 및 레일마모 해석

### 2.1 열차운전모드 이론

도시철도 전동열차는 자동운전을 위해 열차의 주행 속도에 대한 유연한 가감속제어, 목표속도에 대한 정 주행, 승강장 내 정차 지점에서의 정밀 정위치 정차 등으로 역간 자동운전을 하고 있다. Fig. 1은 역간거리에 따른 전동열차의 자동운행곡선을 나타낸 것이며, 주행패턴 구간을 Powering, Coasting, Braking 구간으로 분류할 수 있다[7].

열차의 운동은 궤도를 따라 가해진 힘에 의해 움직이는 하나의 질점의 운동을 한다면, Newton의 운동방정식에 의해 식 (1)의 미분방정식과 같이 나타 낼 수 있다.

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = \dot{x}$$

$$M\ddot{x}(t) = F(t) - R_e(v(t)) - G(x(t)) \quad (1)$$

$t$ 는 시간,  $x(t)$ 는 열차의 위치,  $v(t)$ 는 열차의 속도,  $M$ 은 열차의 질량,  $F(t)$ 는 열차에 가해진 힘의 성분,  $R_e(v(t))$ 는 주행저항 그리고  $G(x(t))$ 는 구배저항을 나타낸다. 열차에 가

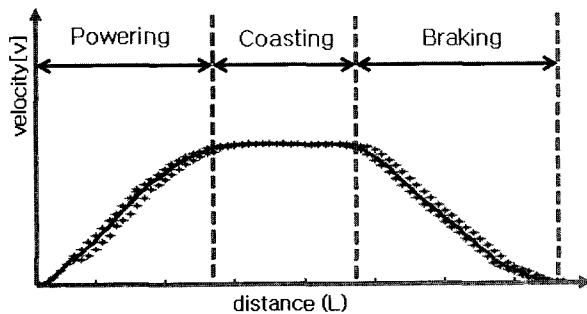


Fig. 1. A Powering-Coasting-Braking Mode

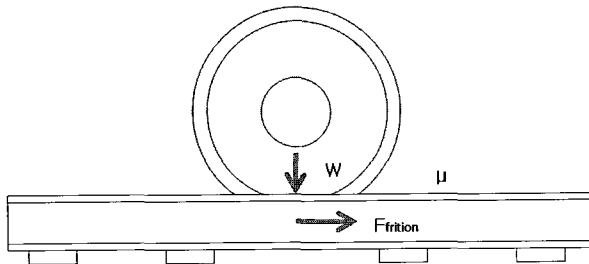


Fig 2. Adhesive Force between Wheel and Rail

해진 힘  $F$ 의 경우,  $F(t) > 0$  인 경우는 열차에 힘이 가해져 가속하는 경우이고  $F(t) < 0$  인 경우는 제동에 의해 열차가 감속하는 경우이다. 열차가 가속되려면 열차에 견인력이 발생되어야 하고 열차가 감속하게 하려면 제동력이 작용해야 된다. 열차에 작용하는 가속도와 견인력, 감속도와 제동력은 열차의 진행방향에 대해 Newton의 운동방정식을 적용하면 식 (2)와 식 (3)과 같은 식을 얻을 수 있다[8-9].

$$F_{powering} = ma + R + mgsin\theta \quad (2)$$

$$F_{braking} = -ma - R - mgsin\theta \quad (3)$$

### 2.2 차륜과 레일간의 미끄럼 마모 해석

열차가 고정된 역간거리를 자동운전모드로 반복 운행한다면 레일에 물리적인 힘이 미치는 요인으로는 열차의 가감속도, 열차의 하중, 열차저항, 차륜과 레일간 마찰계수 등 이다. Fig. 2와 같이 차륜과 레일간의 미끄럼이 발생하지 않고 제동력을 전달하려면  $F_{friction} \leq \mu W$ 의 조건이 필요하다.  $F_{friction}$ ,  $\mu$ ,  $W$ 은 각각 마찰력, 마찰계수, 윤중이다. 여기에서 윤중( $W$ )은 차량의 중력에 기인하는 힘과 동적인 변동을 합한 힘이다.

레일단면에 차륜과 레일간에 발생하는 마모의 주요 원인은 저속에서는 미끄럼 마모에 관련된 윤착마모와 연삭마모이며, 고속에서는 표면 피로와 충격 등에 의한 마모 현상이 큰 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 이 때 양쪽 표면에 있는 원자들이 서로 가까이 접촉하게 될 때 형성되는 강력한 응착력이 기인하는 것으로 알려져 있다. 1946년에 Holm은 마모 부피( $V$ )를 식(4)과 같이 수식화 하였다.  $W$ ,  $\ell$ ,  $H$ ,  $k$ 는 윤중, 미끄럼 거리, 경도, 접촉면의 청정 정도이다.

$$V = \frac{kW\ell}{H} \quad (4)$$

이 식에 대한 실험적인 검증은 Rabinowicz와 Tabor (1951)에 의한 윤착 마모입자 형성에 대한 실험과 Burwell과 Strang (1952)에 의해 접촉면이 윤활되지 않은 상태하에서의 마모현상 연구로 증명하였다[1-4].

## 3. 실험구간의 제원 및 실험 방법

### 3.1 궤도 및 차량의 제원

본 논문에서 실험한 선로구간은 서울지하철 8호선으로 실제 도시철도 차량의 ATO 운행데이터와 레일마모 검측데이터를 수집하였다. 실험 선로구간의 궤도 및 차량 제원은 각각 Table 1, 2와 같다[7].

**Table 1.** Classifying conditions of track

궤도조건	제 원
침목 종류	RC침목(Twin Block)
침목 압축강도(Kg/cm <sup>2</sup> )	350
침목길이(mm)	684 (1 Block)
침목 폭*두께(mm)	254 * 205
침목간격(mm)	625
도상유�효두께(mm)	150
레일규격(Kg/m)	60Kg
레일체결구	PANDROL 형, 스프링 크립
방진시설	방진고무상자, 방진형 탄성패드 레일패드

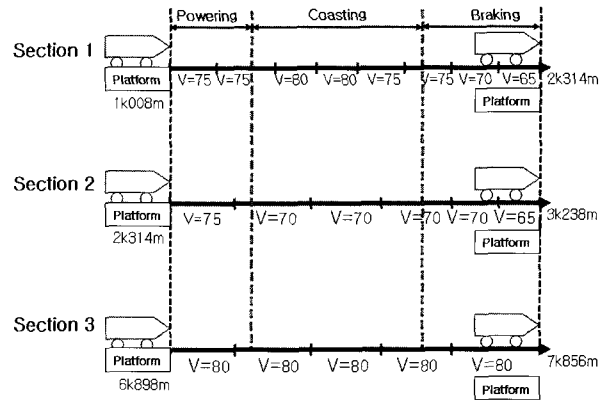
**Table 2.** Classifying conditions of train

구 분	제 원		
속도제어방식	가변전압가변주파수(VVVF) 인버터에 의한 가,감속 제어		
전동차편성	6 량(3M3T), 1량길이: 20m		
자동(톤)	공차	262.5ton	270ton
	만차	462.8ton	430.6ton
하중(최대 승객기준)	운행성능기준	20ton/량	
	기계적 강도 기준	29ton/량	
차륜경	860mm(성능계산820mm)		
주행속도	최고속도	100km/h	
	가 속 도	3.0km/h/s	
	감 속 도	3.5km/h/s(상용),4.5km/h/s(비상)	
	주행저항	$R=1.867+0.0359V+0.000745V^2$	

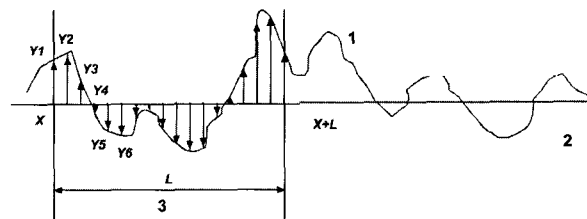
**3.2 실험구간 선정 및 실험 방법**

실험구간은 8호선 하선 암사기점 1km부터 8km까지 레일 연마작업을 시행한 구간으로서 이동 평균 실효값(moving average of rms)이 0.1mm 미만이면서 10m간격 마다 산술평균값이 0.05mm이하 구간을 선정하였다. 이 조건을 만족하는 선로구간은 Fig. 3의 세 선로구간으로 1k008m~2k341m, 2k314m~3k238m, 6k898m~7k856m구간이며, ATC 속도코드는 65~80km/h이고 곡선반경(R)은 1000이상의 선로구간이다.

열차운행곡선 데이터는 열차가 자동운전을 정상적으로 운행하고 정시 도착한 열차에서 데이터를 수집하였다. 수집한 ATO Logging 데이터 항목에서 ATO속도, ATO거리, PSM 검지위치 데이터를 적용하였다. 레일마모데이터는 테크노감마사의 검측장치를 사용하였고, 레일마모 검측은 레이저를 비춘 상태에서 카메라로 촬영한 원시데이터를 공정처리를 거쳐 RMS값과 Peak to Peak값으로 저장된다. 이 검측데이터는 파장길이에 따라 단파(30~100mm), 중파(100~300mm), 장



**Fig. 3.** ATC Speed Code between two station



key : 1 profile, 2 Line of average amplitude, 3 Window  
 출처: prEN 13231-3, september 2003

**Fig. 4.** Moving average RMS values

파(300~1000mm)로 분류 한다.

Fig. 4는 Window Length(L) 형태로 프로파일 y(x)의 진폭에 따른 거리의 순시함수로서 불규칙한 레일마모 깊이에 이동 평균 실효값(moving average of rms)으로서 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$rms(x, L) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{(n-1)}} \quad (5)$$

본 논문에서는 ATO 로깅데이터와 레일 검측데이터에 RMS의 이동 평균값을 단파, 중파, 장파별로 상관관계를 분석하는데 적용하였다[6].

**4. 열차의 운전모드에 의한 레일마모 결과 분석**

**4.1 역간 거리에 따른 레일마모 분석**

Fig. 5는 2006년 11월, Fig. 6은 2007년 2월에 궤도검측 데이터를 역간 거리에 따른 레일 마모량을 8호선 하선 암사기점 1km부터 8km까지에 좌측 레일의 검측 데이터를 선형곡선으로 나타내었다. 실험구간을 Section 1, Section 2, Section 3 세구간을 점선으로 구분 표시하였고, 이 점선 구간을 관찰해보면 좌측보다 우측부근에서 레일마모량이 많이 증가했음을

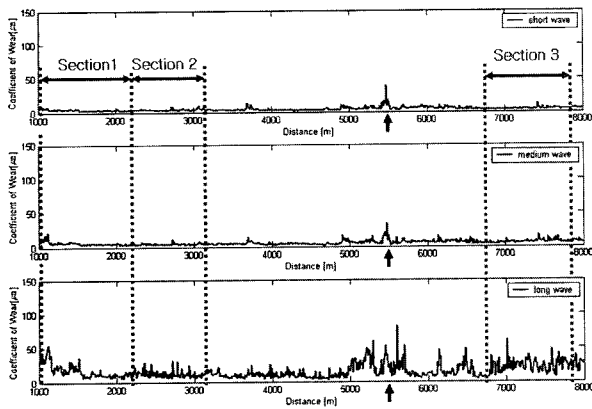


Fig. 5. Amplitude level of rail wear, November 2006

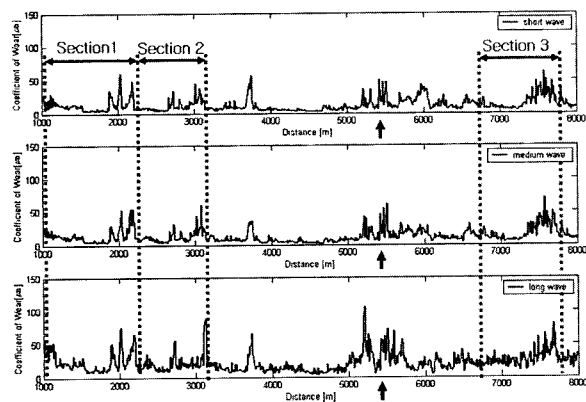


Fig. 6. Amplitude level of rail wear, February 2007

Table 3. Data of rail wear by section

단위: µm

Class		November 2006			February 2007		
		min	max	avr	min	max	avr
Section 1	short	2.3	9.2	8.36	3.8	45.3	13.26
	medium	2.6	19.2	11.86	3.5	65.5	14.25
	long	6.7	56.9	34.91	6.9	68.3	24.48
Section 2	short	2.6	9.5	2.96	4.3	37.9	8.23
	medium	2.6	12.5	3.33	3.8	50.6	9.42
	long	6.4	32.2	9.19	6.5	108.2	15.65
Section 3	short	2.2	12.8	2.74	4.9	50.3	12.28
	medium	3.5	16.5	4.71	4.2	62.4	13.51
	long	9.1	41.9	16.61	9.8	78.9	20.95

알 수 있었다.

Section 구간에서 좌측은 열차의 운행모드가 역행모드 구간이고 우측은 제동모드 구간이며, 특히, 승강장 정차시 제동거리 구간인 2k114m~2k314m, 3k038m~3k 238m, 7k656m~7k856m 부근에서 레일마모량이 다른 선로구간보다 많이 나타나는 현상을 발견할 수 있었다. 그리고 Fig. 4에서 화살표

를 표시한 5k600m 지점은 이동 평균 실효값(moving average of rms)이 0.1mm 이상이고 구간 산술평균값이 0.06mm 이상이므로 실험구간에 포함시키지 않았다.

Table 3은 구간별로 이동 평균 실효값(moving average of rms)을 10m간격마다 산술평균값으로 산출하였고, 이 변환값으로 최대값(max), 최소값(min), 평균값(avr)을 단파, 중파, 장파 별로 나타냈다. Table 3의 Section 1에서 short wave 최소값(min)은 2.3µm에서 3.8µm로 레일마모량이 적게 증가한 반면 최대값(max)은 9.2µm에서 45.3µm로 현격히 증가하였다. 레일마모의 최대값(max)이 대부분 제동모드 구간에서 모두 동일하게 관찰되었다.

#### 4.2 열차의 운전모드에 의한 레일마모 분석

Fig. 6의 선형곡선은 열차의 실제 운행한 ATO속도이며 막대 그래프는 레일마모 검측데이터를 표시한 것이다. Fig. 6의 Section 1,2,3의 공통점을 관찰해 보면 역행구간인 좌측선로에서는 견인력으로 인해 시점 부근에서 레일마모가 나타났으나 전체적으로는 안정적이었고 제동구간인 우측선로에서는 제동력으로 인해 레일마모 발생정도가 전체적으로 심하게 나타났다.

즉, 차륜과 레일간의 레일마모는 견인력보다 제동력이 레일마모의 주 원인임을 알 수가 있었다. 그리고 타행모드구간에서는 고속주행이라도 등가속도(=0)인 영역에서는 마모량이 적게 관찰되었다. Fig. 7(b) February 2007을 보면 타행구간의 중간부근에서 레일마모가 두드러지게 나타나는 현상은 곡선과 구배의 영향으로 인해 발생됨을 확인하였다.

#### 4.3 가속도 및 감속도에 의한 레일마모 분석

Fig. 8은 Fig. 7의 ATO 속도데이터를 가감속도로 산출값을 선형곡선으로 나타내어, 레일마모량과 가감속도의 상관관계를 분석하였다. 역행구간에서는 시점만 제외하곤 가속도 증가에 상관없이 레일마모 발생정도가 안정적이었고 제동구간에서는 열차속도와 감속도 증가에 따라 레일마모 발생정도가 두드러졌다. 감속도 구간에서는 ATO 제동요구가 0~3.5km/h/sec가 명령되나 실제 ATO 감속도는 0~4km/h/sec까지 발생되었다.

Fig. 8에서 감속도구간을 관찰해 보면 열차속도 40km/h 이상, 감속도 2km/h/sec 이상일때 레일마모 발생이 가장 심하게 증가하였고, 열차속도 40km/h 미만이면 감속도 2km/h/sec 미만에서는 레일마모가 안정적으로 나타났다.

Table 4는 가감속도와 등가속도 구간별로 레일마모량을 수치로 나타내었다. Table 3과 마찬가지로 구간별로 이동 평균 실효값(moving average of rms)을 10m간격으로 산술평균값

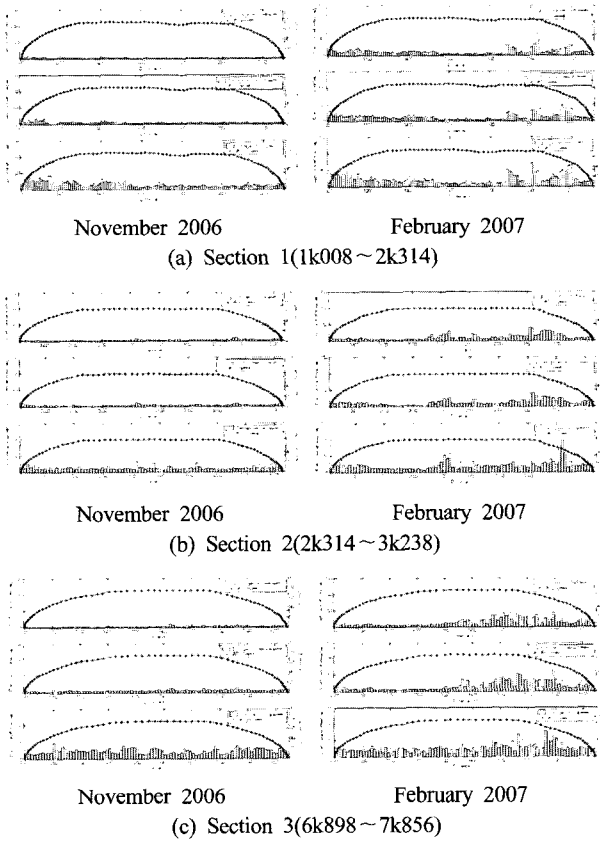


Fig. 7. Relationship between Rail Wear and Train Operating Mode

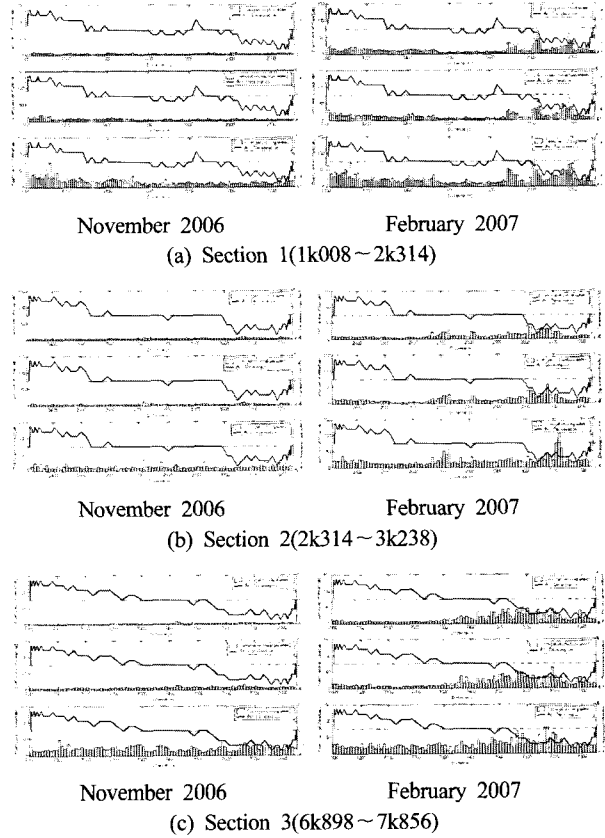


Fig. 8. Relationship between Rail Wear and Acc,Deceleration

Table 4. Data of rail wear by acceleration and deceleration

Class		Powering (Acceleration)	Coasting	Braking (Deceleration)	
Section 1	2006.11	short	5.66	3.90	3.34
		medium	9.32	5.35	3.66
		long	30.76	13.97	12.57
	2007. 2	short	15.27	11.64	15.88
		medium	16.51	11.33	20.55
		long	32.65	19.81	29.24
Section 2	2006.11	short	3.99	3.94	4.93
		medium	5.08	4.55	4.75
		long	14.36	12.37	13.15
	2007. 2	short	6.99	11.55	16.31
		medium	9.68	11.72	20.40
		long	18.53	20.10	30.11
Section 3	2006.11	short	3.13	3.98	4.14
		medium	5.28	7.02	6.85
		long	22.67	21.25	25.27
	2007. 2	short	7.14	20.89	21.20
		medium	7.98	22.64	23.44
		long	23.10	29.22	34.81

으로 산출하였다. 분류기준은 가속도구간은 1초간의 속도차이가 2km/h 이상 증가한 구간까지 감속도구간은 2km/h 이상 감소한 시점부터 타행구간(Coasting)은 1km/h 이하 증가나 감소한 구간이거나 그외 구간으로 분류하였다. Table 4에서 감속도구간이 가속도구간보다 레일마모량 증가가 현저히 증가함을 알 수가 있었다. 또한 승강장에서는 레일마모가 발생하고 난 후 일정시간이 지난 후에는 레일 표면이 더 매끄럽게 되어 레일 마모량이 감소하고 비교적 안정적인 현상을 관찰할 수 있고, 제동구간에서 속도에 따른 레일마모량의 차이는 고속영역의 마모량이 저속영역에 비하여 상대적으로 급격히 커지게 됨을 관찰할 수 있었다.

## 5. 결론

본 논문에서는 도시철도 전동열차 가속도의 견인력과 감속도의 제동력에 의해 나타나는 레일마모 현상을 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫 번째는 열차의 운전모드에 의한 레일마모는 역행운전, 타행운전, 제동운전으로 분류하여 분석한 결과 가속도구간보다 감속도구간에서 레일 마모량이 급격히 발생됨을 관찰할

수 있었고, 두 번째는 제동운전구간에서 전동열차 속도가 고속상태이면서 감속도 변화율에 따라 레일마모 발생량이 비례적으로 증가하였다. 세 번째는 전동열차의 주행속도가 고속주행이라도 감속도성분이 없거나 1km/h/sec이하인 조건에서는 레일마모량의 증가폭이 다른 구간보다 상대적으로 적었다. 향후 검측데이터와 열차의 운전모드에 상관관계 분석데이터를 열차 운전제어에 적용하여 궤도 유지보수 비용의 절감 등을 기대할 수 있는 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. Gilbert Strang, "Linear Algebra and Its Applications, Third edition", p.153-162.
2. Archard J. F., (1953), "Contact and rubbing of flat surfaces", Journal of Applied Physics, Vol.24, pp.981-986.
3. Bolton P. J., Clayton P., (1984), "Rolling Sliding wear damage in rail and tire steel", Wear, Vol.93, pp.145-160.
4. 최정훈, 문태선, 김기환, 한동철(2004), "고속철도 차량의 차륜과 레일간의 마모 예측, 철도학회논문집
5. A. C. Fischer-Cripps, 1999, "The Hertzian contact surface", Journal of Material science 34. pp.130-135.
6. Rail Corrugation, Rail profile Measurement system. Manual, TECNOGAMMA CO.
7. 서울특별시 지하철 8호선 전동차 운용교범 편람, 2000.
8. H.S.Hwang, 1994, "Control Strategy for Optimal Compromise between Trip Time and Energy Consumption in a High Speed Railway", IEEE Trans. on System Man and Cybernetics, Part A; System and Humans, Vol.28, Issue 6, Nov, 1994.
9. P.G. Howlett and P.J. Pudney, "Energy-Efficient Train Control", Springer, 1995, pp.1-21.

(2007년 9월 5일 논문접수, 2007년 10월 14일 심사완료)