

## 도시철도에서 열차 가감속이 레일마모에 미치는 영향 분석

## The Analysis of the Effect of Acceleration and Deceleration of a Train on the Rail Wear in Urban Railway

남진근\*<sup>†</sup>, 김광은\*, 이연근\*, 민병협\*, 정성현\*\*Jin-Geun Nam<sup>†</sup>, Kwang-Eun Kim\*, Yeon-Geun Lee\*, Byeong-Hyeob Min\*, Sung-Hyun Chung\*\*

**Abstract** The track alignment of Seoul Metro, an urban railway, was constructed unavoidably into curves by the portion of 43.5% of main line sections due to the regional conditions such as the geography and structures of the urban area. The curves are one of three main weak points of track, in which the track irregularity and rail wear have occurred substantially, it has caused frequent track maintenance and so much maintenance costs. Consequently, the minimization of rail wear progression is being pushed ahead. The heat treated rail and lubrication as a minimization plan of rail wear have been installed and operating. Thus, as a result of the pattern analysis of rail wear in this paper according to the change of structures(radius of curve and track gradient) and acceleration/deceleration of a train based on the rail wear data, it could be found that the acceleration/deceleration of a train have a great effect on the rail wear.

**Keywords** : Rail wear, Gradient, Train Speed, Radius of curve, Heat treated rail

**초 록** 본 논문의 목적은 도시철도 서울메트로(지하철 1~4호선)의 궤도선형은 도심지역의 지형과 구조물 등 지역여건 때문에 부득이하게 본선구간 43.5%가 곡선으로 건설되었다. 곡선부는 궤도시설의 3대 취약부로 궤도틀림과 레일마모가 많이 발생되고 빈번한 보수작업과 유지보수비용이 많이 소요되어 레일마모 진행 최소화를 추진하고 있다. 현재 레일마모 최소화 방안의 일환으로 열처리레일과 레일도유기를 설치 운영하고 있다. 본 논문에서는 레일 측마모 데이터를 기초자료로 구조물(곡선반경, 기울기) 변화와 열차 가감속에 따른 레일마모 패턴을 분석한 결과 열차 가감속이 레일마모에 미치는 영향이 많은 것을 알 수 있었다.

**주요어** : 레일마모, 선로기울기, 열차속도, 곡선반경, 열처리레일

## 1. 서론

## 1.1 연구배경 및 목적

레일은 차륜과의 마찰에 의해 마모가 발생하며, 레일마모는 열차의 주행안전과 승차감에 미치는 영향이 크고, 소음·진동의 주요원인으로 작용한다. 또한 레일마모가 발생할 경우 궤도구조의 파괴를 촉진시킴으로써 차량 및 궤도 유지보수비를 크게 증가시킨다. 레일마모는 선로선형, 열차운행, 궤도구조, 열차속도, 차륜과 레일담면 등 매우 많은 인자에 의하여 영향을 받고, 또한 복잡한 기구(Mechanism)에 의하여 발생특성 및 진전속도가 달라지게 된다.

레일마모에 대해 그 동안 헤르츠(Hertz)의 탄성이론, 레일-차륜 사이의 접촉응력 해석에서

† 교신저자: 서울메트로 시설처 궤도관리팀(jk1000@seoulmetro.co.kr)

\* 서울메트로 시설처 궤도관리팀

\*\* 서울메트로 궤도사업소

구름마찰과 피로파괴 연관관계 연구, 레일-차륜의 접촉거동 해석에서 유한요소해석 등이 실험적으로 진행되었다.

이와 같이 레일마모에 대한 수많은 연구가 수행되어 왔지만 대부분의 연구가 마모인자의 개별요소에 대한 원인분석에 집중되었다고 볼 수 있다. 따라서 현장의 복잡한 조건들이 결합되어 나타나는 마모현상을 체계적으로 계측 수행하여 통계적 방법으로 마모요인을 찾는 것도 실제적인 마모대책을 수립하는 측면에서 매우 의미가 크다고 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 서울메트로 1,2,3,4호선의 궤도구조에서 2011년부터 2015년 6월까지 측정한 레일마모 데이터를 토대로 열차속도 가감속이 선로조건(곡선반경, 선로기울기) 변화지점과 정거장 진출입시 레일마모에 미치는 영향 등을 파악 분석하고, 레일마모 저감을 위해 현장 상태에 맞는 방안(시설 설치확대 및 운전습관 개선) 도출에 목적이 있다.

## 1.2 연구내용

철도의 선형은 직선이 최선이지만 서울메트로는 지역 여건, 교통과 균형발전, 운영효율 등으로 곡선부가 많이 삽입되어 건설되었으며, 곡선반경에 따라 필연적으로 캔트와 선로기울기를 주고 열차속도를 제한하고 있다. 이에 따라 곡선부에서 레일마모가 많이 발생하고 유지보수 비용증가 및 승차감에 일부분 영향을 주고 있으므로 레일마모 진행 추이를 통해 궤도파괴 감소, 궤도재료 수명 연장과 승차감 향상 등 레일마모와 관련된 효과적인 유지관리 방향을 제시하고자 하였다.

### 1.2.1 대상구간 및 레일마모 측정

대상구간은 서울메트로 1,2,3,4호선 구간 중 곡선반경 R=600m 이하 282개소를 선정하여 열차속도 가감속이 레일마모에 미치는 영향을 분석하기 위해 곡선 반경별, 곡선과 정거장의 레일마모량을 측정하였으며, 이를 위해 종합검측차 레일마모 Data를 이용하였다. 또한 측정위치는 레일측면 R=13지점을 측정하였으며, 측정간격은 1m로 하고, 자료정리는 레일마모 평균값과 최대값, 레일교체 도래시기 등을 조사하였다.

구분	장비명	측정원리	측정주기	측정범위
내용	종합검측차	레이저를 이용한 비접촉식 레일상태 측정 및 카메라와 컴퓨터 시스템을 이용한 실시간 점검	분기1회	궤도검측, 레일마모(직, 측, 파상), 전차선, 건축한계, 비디오 촬영, 궤도재료 등 측정

Fig. 1 Comprehensive inspection car rail wear measurement

### 1.2.2 내용

서울메트로 1,2,3,4호선은 레일마모 방지를 위해 열처리 레일( $R \leq 400m$ )과 레일도유기( $R \leq 300m$ ) 112대를 설치하여 레일마모 진행 최소화를 추진하고 있다. 본 연구에서는 선로조건(곡선반경, 선로기울기) 변화와 열차속도 가감속에 대한 검토와 곡선별 레일마모 형태 등을 통해 열차속도 가감속과 레일마모와의 상관관계를 분석하고자 하였다.

## 2. 레일마모 이론 및 레일교환 기준

### 2.1 레일마모 정의 및 종류

철도는 차량이 레일 위를 주행하므로 레일은 차량에서 주행에 따른 동적하중을 포함한 차량 중량과 주행에 다른 구동력 또는 점착력을 받는다. 이에 따라 열차주행시 레일면은 강한 마찰로 마모하게 된다. 일반적으로 레일마모는 선로선형, 열차운행, 궤도구조, 열차속도, 차량과 레일담면 등 매우 많은 인자에 의하여 영향을 받고, 또한 복잡한 메커니즘에 의하여 발생 특성 및 진전속도가 달라지게 된다. 레일의 마모는 크게 측마모와 파상마모로 구분할 수 있다.

#### 2.1.1 측 마모(Side wear)

레일에는 차량에 의한 윤하중, 역행이나 제동으로 인하여 생기는 접선력, 곡선통과에 수반되는 횡압, 좌우 차량의 주행로 차이로 생기는 윤축의 비틀림에 기인하는 접선력 등의 외력이 작용한다. 이들의 외력이 기상과 도유로 대표되는 윤활 조건 등과 복잡하게 영향을 주어 레일 두부 면과 궤간 내의 측면이 마모한다. 특히 곡선회측 레일에서는 차량 플랜지로부터 레일의 게이지 코너로 횡압을 받으면서 차량의 회전에 수반하여 큰 미끄러짐을 일으키기 때문에 측마모가 발생한다.

#### 2.1.2 파상마모(Corrugation)

레일두부 상면에 어떤 일정한 간격의 요철을 가진 파상으로 마모하는 현상이다. 파상마모는 3~6cm의 단파장과 수십cm의 장파장으로 대별되지만 양자의 외관, 발생, 성장은 다르다. 단파장 파상 마모 레일의 파형 상부는 빛나며 파형 저부는 어두운 색을 나타내고 결도 거칠다.

파상 마모가 진행되면 차량통과에 따른 충격으로 인하여 차량 궤도의 진동, 소음이 크게 되어 승객에게 불쾌감을 준다. 또한 차량 보수에 대하여도 악영향을 줌과 동시에 궤도에도 각부 재료의 마모, 이완이 촉진되어 보수량이 증대하는 외에 재료의 수명도 짧게 된다.

### 2.2 레일마모 메커니즘

레일마모는 레일과 차량간의 접촉시에 발생하는 것으로 레일은 차량으로부터 주행에 수반하는 동적하중을 포함한 차량 중량과 주행에 필요한 구동력 혹은 제동력을 받는다. 한편 차량은 그 반작용을 레일로부터 받으므로 레일과 차량의 재료 및 형상에 따라 다르게 작용하는 힘에 의하여 접촉면에서의 응력의 크기가 달라진다.

마멸이나 접촉피로 등 손상부는 레일두부 주행접촉면에 균일하게 분포되어 있지 않다. 차량 주행의 불안정성 또는 동일한 휠셋 내에서 차륜반경의 심한 차이로 인하여 직선 선로에서도 플랜지 접촉이 발생할 수 있다. 그러나 이는 매우 예외적인 경우이며, 레일에 심한 마멸이나 손상을 일으키지 않는다. 반면에 휠셋의 공격각(Attack angle)에 의한 곡선구간에서의 플랜지 접촉은 빈번히 발생하여 곡선구간에서 바람직하지 않은 게이시측면(Gauge side)에서의 마멸을 발생시킨다. 차륜 플랜지와 레일 게이시측면 사이의 접촉면적은 대부분 주행방향으로 뺀어있는 타원 형태이다.

레일 두부 및 게이시에 나타나는 마멸이나 피로손상은 접촉빈도관련 하중 사이클의 횟수, 접촉응력의 크기, 미세미끄럼(Microslip)과 표면력(Traction)의 크기, 소성유동의 크기 등의 영향을 받는다.

### 2.3 레일마모 교환기준

레일의 내구연한은 훼손, 부식, 마모 등 3요인에 의하여 결정되나, 특수한 경우를 제외하고는 대부분 레일마모에 의하여 교환되고 있으며, 서울메트로 1,2,3,4호선의 레일 교환기준(서울메트로 선로정비규정)은 레일두부 및 레일측면 마모에 따라 다음과 같이 정하고 있다.

Table 1 Track maintenance regulations Article 17 (road and rail wear life)

레일종류	본, 측선	직마모	측마모	비고
60kg 레일	본선	13mm	15mm	
50kg 레일	본선	13mm	15mm	
	측선	15mm	18mm	

## 3. 레일마모 분석

### 3.1 곡선구간 레일마모 분석

#### 3.1.1 곡선구간 상향기울기에 따른 레일마모 형태

□ 상향기울기 ≤ 10%

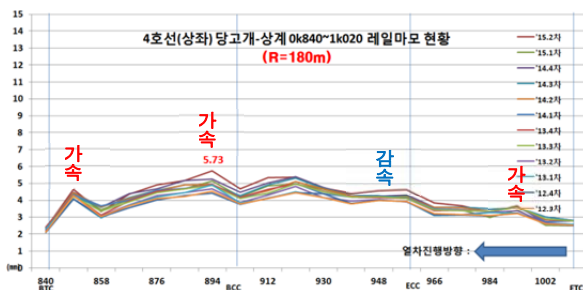


Fig. 2 The rail wear under 10% rising gradient(R=180m)

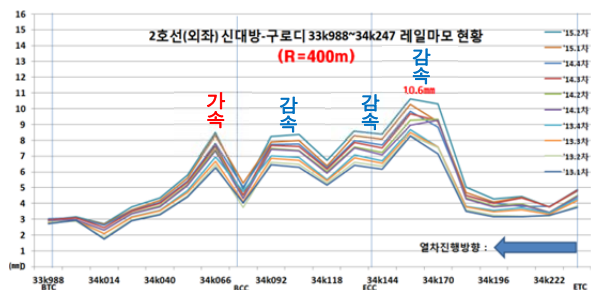


Fig. 3 The rail wear under 10% rising gradient(R=400m)

상향기울기 10%이하인 곡선구간에서 곡선반경 크기에 따라 최대 레일마모 발생 위치가 변하는 것을 Fig. 2, Fig. 3에서 확인할 수 있다.

10%이하인 곡선에서는 구배저항에 따른 열차감속 효과는 크지 않은 것으로 사료되며, 곡선반경(R=180m)에 따른 곡선저항으로 열차가 감속되는 것으로 판단된다.

곡선저항으로 제한속도(서울메트로 운전취급규정, 40km/h)까지 감속됨에 따라 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 곡선 통과시 열차를 급가감속을 하지 않음에 따라 일정한 마모량을 보이고 있다.

하지만 열차 전량이 곡선구간을 모두 통과하기 전에 속도 회복을 위한 가속으로 완화곡선 종점(ETC) 부근에 가속마모 피크(pick)가 한차례 발생한 것으로 사료된다.

Fig. 3은 곡선반경 R=400m인 곡선구간으로 구배저항에 의한 감속효과는 미약하고 제한속도(75km/h)로 주행하기 위해 열차가 곡선 시점에 진입시 급제동하여 제동마모(최대마모량 10.6mm)가 발생한 것으로 판단된다.

그리고 Fig. 2의 반경 R=180m 보다 큰 곡선반경(R=400m)으로 곡선저항에 따른 감속이 되지 않아 원곡선 종점(ECC)까지 제동마모가 발생한 것으로 판단된다.

또한, Fig. 2와 마찬가지로 열차의 곡선통과 직후 회복운전에 따른 가속마모 피크(pick)가 발생한 것으로 보인다.

□ 20%≤상향기울기

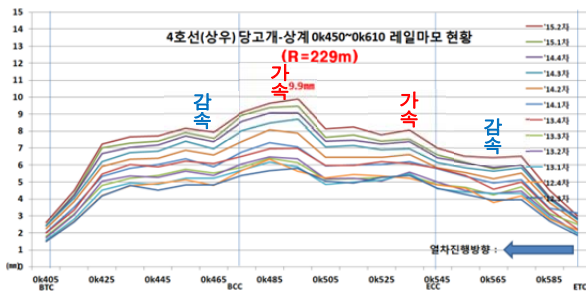


Fig. 4 The rail wear over 20% rising gradient(R=229m)

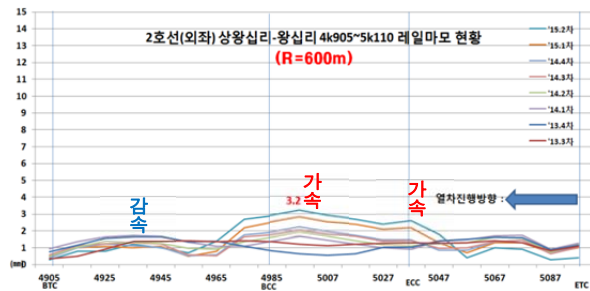


Fig. 5 The rail wear over 20% rising gradient(R=600m)

상향기울기 20%이상의 곡선구간에서는 선로기울기에 의한 구배저항이 열차속도에 많은 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Fig. 4는 곡선반경이 R=229m로 Fig. 2의 R=180m(제한속도 40km/h)보다 큰 반경의 곡선으로 제한속도가 60km/h(↑20km/h)이고 구배저항도 높아 가속마모가 Fig. 2에 비해 그래프에 잘 나타나 있는 것으로 보인다.

Fig. 5는 제한속도(R=600m, 90km/h)가 Fig. 4에 비해 높아 곡선 진입전 직선구간의 운전속도를 유지하며 급가감속 없이 곡선을 통과한 것으로 사료된다.

이런 일정한 마모량을 보이는 곡선구간은 곡선저항과 구배저항에 따른 감속이 제한속도에 근접하여 균형적인 속도를 유지할 수 있는 궤도 부설환경이라 판단된다.

### 3.1.2 곡선구간 하향기울기에 따른 레일마모 형태

#### □ 하향기울기 ≤ 10%

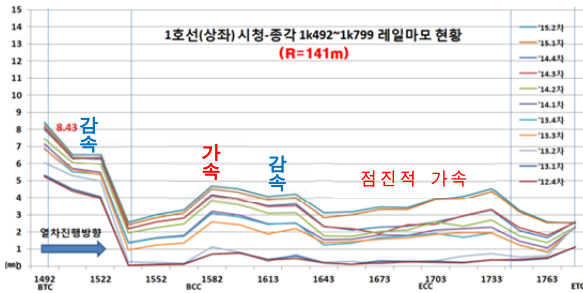


Fig. 6 The rail wear under 10% falling gradient(R=141m)

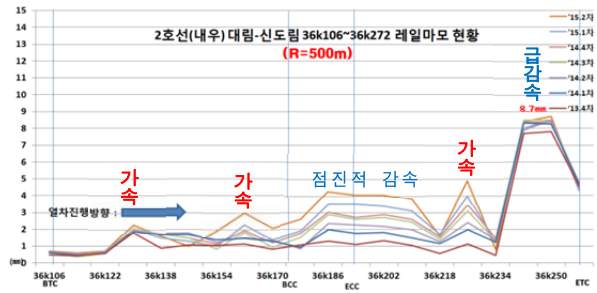


Fig. 7 The rail wear under 10% falling gradient(R=500m)

Fig. 6은 곡선구간 진입 직후 제한속도(35km/h, R=141m)에 따라 급제동하여 완화곡선 시점(BTC)에 최대 마모가 발생하였다. 그리고 곡선구간 통과시 큰 곡선저항으로 속도가 감속되어 일정 속도를 유지하기 위해 가속운전하여 여러 차례 가속마모가 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 7은 곡선반경 R=500m 구간의 마모량 그래프로 제한속도(80km/h)를 유지하기 위해 곡선 진입 이후 두 차례 가속을 진행한 것을 볼 수 있다. 그리고 곡선반경에 비례하여 곡선저항이 크지 않고 하향기울기 10%에 따라 열차속도 증가로 점진적 감속과 완화곡선 중점 부근에서는 급감속으로 제동마모(최대마모량 8.7mm)가 발생한 것으로 판단된다.

#### □ 20% ≤ 하향기울기

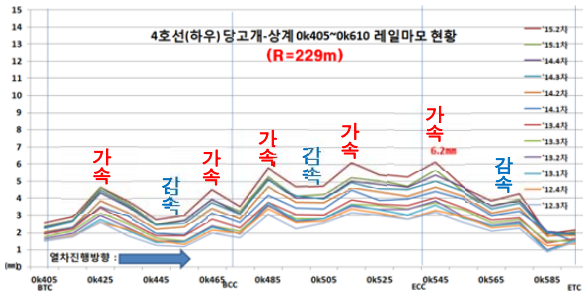


Fig. 8 The rail wear over 20% falling gradient(R=229m)

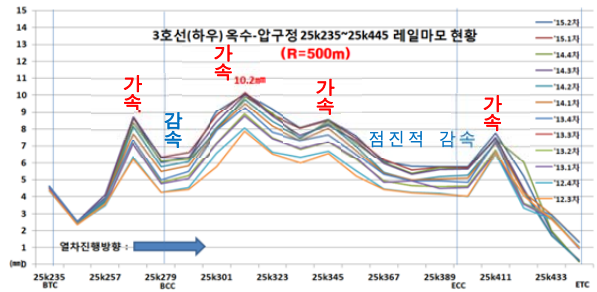


Fig. 9 The rail wear over 20% falling gradient(R=500m)

하향기울기가 20% 이상에서는 중력가속도에 의해 열차가 가속되며 이를 Fig. 8, Fig. 9에서 볼 수 있다.

Fig. 8에서는 곡선반경 R=229m에 의한 곡선저항으로 열차가 감속되지만 반대로 중력가속도로 열차가 가속됨에 따라 2가지 상반된 속도 영향인자로 인해 수차례 가감속 운전을 함으로써 열차속도를 일정하게 유지하였던 것으로 판단된다.

Fig. 9는 하향기울기 20%로 인한 열차 가속, 곡선반경(R=500m)에 따른 낮은 곡선저항 및 높은 제한속도(80km/h)라는 선로 운행조건을 가지고 있다. 이에 따라 속도를 제어하기 위해 급가감속을 실시하여 Fig. 8에 비해 뚜렷한 가속마모와 제동마모를 보이고 있다.

### 3.1.3 역구내 레일마모 형태

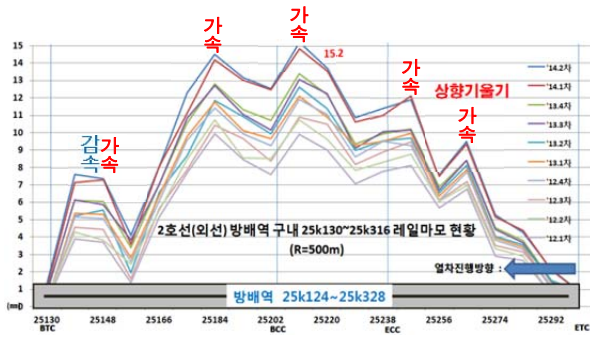


Fig. 10 The rail wear of station yard in 6% rising gradient

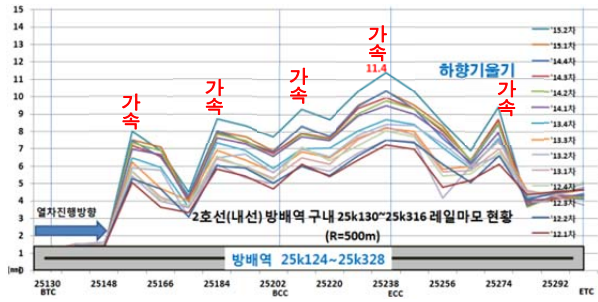


Fig. 11 The Rail wear of station yard in 6% falling gradient

서울메트로 전동차의 편성은 총 10량으로 [TC-M-M'-T-M'-T1-T-M-M'-TC]와 같이 5량(M, M')이 가속 추진을 할 수 있는 구동장치(Motor)가 대차에 구성되어있다.

Fig. 10, Fig. 11의 레일마모 형태를 본다면 열차가 역구내(서울메트로 2호선 방배역 25k124~25k328)에서 승·하차를 완료하고 출발을 위한 가속운전에 따라 그래프에는 5개의 마모 피크(pick)를 보이고 있다.

역구내 기울기는 차량해결을 하지않는 전동차 전용선 본선인 경우 철도건설규칙에 따라 10% 이하로 규정되어있어 Fig.10, Fig. 11의 정거장은 각각 상·하향기울기 6%로 건설되었다.

열차가 역구내 진입에 따른 제동시 열차 10량 모두가 제동함에 따라 제동마모는 역구내 전 구간에 일정한 마모량을 보이는 것으로 추정된다.

하지만 Fig. 10, Fig. 11와 같이 5개의 뚜렷한 마모 피크를 보이는 것으로 보아 제동마모 보다는 출발에 따른 열차 가속이 마모를 급진전시키는 것으로 판단된다.

### 3.2 선로기울기별 곡선구간 최대 레일마모량 발생위치

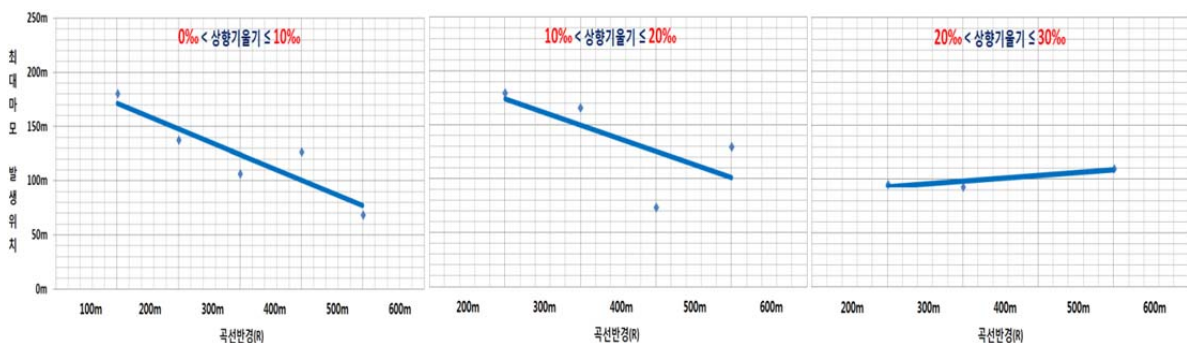


Fig. 12 The position of maximum rail wear from begin of transition curve in rising gradient

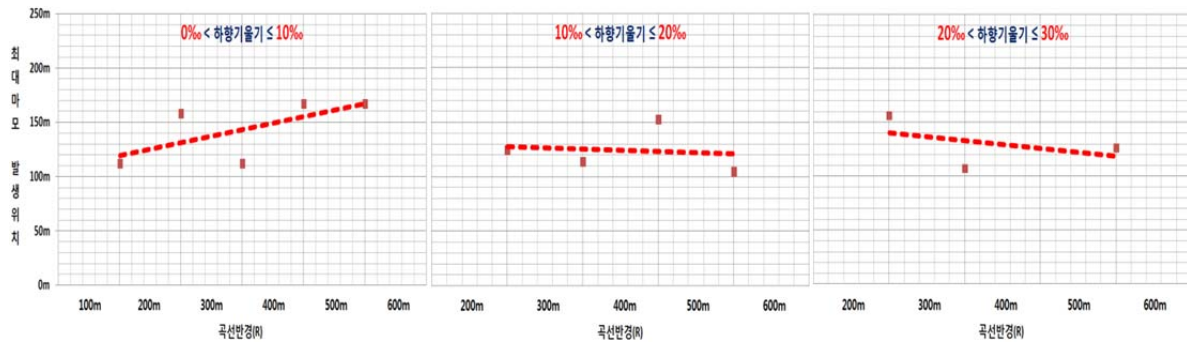


Fig. 13 The position of maximum rail wear from begin of transition curve in falling gradient

상향, 하향기울기에 따라 곡선구간 최대 레일마모량 발생위치를 곡선시점 기준 거리를 계산하여 Fig. 12, Fig. 13과 같은 추세선 그래프를 도출하였다.

선로기울기가 20%이하인 경우 Fig. 12에서 상향기울기별 최대 마모량 발생위치는 곡선반경이 작아질수록 곡선시점에서 먼 곳에 위치하는 것을 알 수 있다.

즉, 상향기울기 20%이하인 곡선에서는 선로기울기에 의한 구배저항보다 곡선반경에 의한 곡선저항이 열차속도에 영향을 미쳐 곡선구간 통과시 지속적 가속으로 인해 최대 가속마모량 발생위치가 곡선시점에서 멀어지는 경향을 보이고 것이다.

반면, 상향기울기 20%이상에서는 곡선저항보다 구배저항이 열차속도에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

서울메트로 운전취급규정 곡선의 제한속도에 따라 속도 차이가 있으며 큰 반경의 곡선일 경우 곡선저항은 높지 않으나 높은 구배저항으로 일정한 열차속도(곡선반경 600m이상, 제한속도 90km/h)를 유지하고자 곡선 전구간을 통해 지속적 가속으로 최대마모량 위치가 곡선 시점에서 멀어지는 것으로 판단된다.

그리고 하향기울기일 경우 선로기울기의 열차속도에 대한 영향은 10% 기울기를 기준으로 변하는 것을 Fig. 13의 그래프를 통해 확인할 수 있었다.

하향기울기 10% 이하에서는 곡선반경이 클수록 최대 열차속도를 유지하기 위해 곡선 전구간 가속운전으로 최대 마모위치는 Fig. 13 그래프에서 볼 수 있듯이 곡선시점에서 멀어지고 있으며, 하향기울기 10%이상에서는 곡선저항에 의한 열차감속을 중력가속도가 일정 부분 상쇄하므로 최대 마모량 발생위치가 곡선시점에 가까워지는 것을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구를 통해 열차속도 가감속이 레일마모에 직접적인 영향을 미치는 것을 분석하였고, 현장과 수집된 레일마모 데이터를 곡선반경별, 선로기울기별 상관관계를 비교 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

가) 서울메트로(1~4호선) 열차 운영시스템은 곡선 제한속도에 따라 운영되고 있으며, 구조물(곡선반경, 선로기울기) 변화와 열차의 가속이 이루어진 지점에서 레일마모가 급격하게 진행된 것을 확인하였다



나) 또한, 정거장 진, 출입시 열차속도 제동과 가속에 따라 레일마모가 발생하였으며 감속보다 가속에 의해 마모가 더 많이 발생하였다. 또한, 기관사의 운전습관(급제동, 급가속)이 레일마모와 직접적으로 상관관계가 있음을 확인하였다.

다) 레일마모가 급격하게 진행되는 개소는 열처리레일 확대 및 레일도유기 추가 설치 검토가 필요하였으며, 곡선부와 정거장 진출입에 따른 속도제한 준수와 올바른 운전습관이 필요한 것으로 확인되었다

라) 레일마모를 감소시키기 위한 곡선반경 600m이하 모든 개소는 실제적인 레일마모 데이터를 종합적으로 분석(그래프)하여 관리하는 것이 레일마모 관리에 도움이 될 것으로 사료된다 .

## 참고문헌

[1] SeoulMetro Track Maintenance Regulations

[2] SeoulMetro Driving handling Regulations

[3] Seo Sa-Beom(2012) *Track Engineering(Third Edition)*, BGbookgallery, pp. 244-251 “3.6 Bell curve and slope”

[4] Ministry of Transportation *Railway rules Cookbook*, pp. 66-78 “Article 11 The slope of the line”

[5] Chung Seong-Hyeon *Seoul Subway 1,2,3,4 Line Rail side wear analysis Book*

[6] Kim Kwang-Eun(2013) A Study on Correlation between Adjusting Cant and rail wear Caused by the Application of Track Improvement Work, Master’s degree, Graduate School of Railway, Seoul National University of Science and Technology.