

복심곡선 레일이상마모 발생 저감 사례

The Reduction Case of Occurrence of Abnormal Wearing of Rail in Compound Curve Part

김완솔*
Kim, Wan-Sool

ABSTRACT

Rail provides running tract for train and broadly and widely conveys the weight of the train exerted from the train wheels that the rail directly supports onto the cross tie and roadbed, and supports the cross-sectional pressure exerted by centrifugal force at curvatures. That is, stationary rail provides surface on which dynamic train runs and guarantees cross-sectional resistance to enable the vertical snake motion of the train wheels as well as to maintain lateral force at curvatures.

Rail provides running surface on which train wheels can run smoothly, and secures vertical and lateral force. However, it undergoes continuous destructive reactions (wearing and damages) and abrasion of the cladding by the train wheels. It is obvious that wearing will result when two metal parts act against each other. However, occurrence of abnormal wearing such as rapid wearing of the rail side due to complex generation of various mechanisms at the contact surface between the rail and train wheel flange.

It is not easy to simply examine the causes of occurrence of abnormal wearing of rail and train wheel flange. Although countless number of academicians and specialists are conducting researches on abnormal wearing of rail and vertical wearing of train wheels, I believe it is too early to argue on pros and cons due to insufficiency of officially verified information on the issue.

This review will be focusing on the examples of repairs that reduced the generation of abnormal wearing of rail by reviewing and improving characteristics of wearing and slack, speed of the train and cant as well as status of lubricator by choosing the compound curves present in the section between the Anguk ~ Jongno3-ga Stations of the Route No. 3 among the compound curve tracks of the Seoul Metro Routes No. 3 & 4 at which abnormal wearing is generated continuously.

I. 서론

Rail은 차량의 운행로를 제공하고 차륜으로부터 직접 지지한 차량의 중량을 침목·도상으로 넓게 분포 되도록 전달시키고 또한 곡선부에서는 원심력에 의한 횡압을 지켜준다 즉 정적인 Rail은 동적 차량의 주행면의 제공과 차륜의 수직력(垂直力, vertical), 사행동(蛇行動, hunting, snake motion) 및 곡선면에서의 수평력(水平力, lateral force)을 유지할 수 있도록 횡저항(橫抵抗)을 보장하여 주고 있다.

Rail은 차륜에 원활한 주행면을 제공하고, 수직력과 수평력을 확보해준다. 그러나 차륜에 의해 끊임 없이 파괴작용(마모 및 훼손) 및 피복(被複)을 받고 있다. 물론 두 금속 물질이 서로 맞물려 작용할 때 마모가 발생됨은 당연한 것이다. 그러나 급격한 Rail 측마모 등 이상마모 발생이다. Rail과 차륜 Flange 사이의 접촉면에서 여러 가지 Mechanism이 복합적으로 생성되면서 발생된다. Rail과 차륜 Flange 이상마모 발생 원인을 간단히 규명하기 쉽지 않다. Rail/차륜에서 Rail이상마모와 차륜수직마모에 관하여 수 많은 학자 및 전문가들이 연구 중이나 아직 공식 검증된 자료가 부족하여 갑론을박 하기에는 시기상조라 생각된다.

본 검토는 서울메트로 3, 4호선 복심곡선 선로중 이상마모가 꾸준히 발생하는 3호선 안국~종로3가역간의 복심곡선을 선정, 마모 특성과 Slack, 열차속도와 Cant, 도유기 상태등을 검토 개선함으로써 Rail이상마모 발생을 저감시킨 보수 사례이다

* 정회원·서울메트로 기술연구센터 철도토목차장
E-mail : dhfnfs2003@yahoo.co.kr
TEL : (02)520-5985 FAX : (02)520-5969

II. 현황

2.1 선로현황

문화의 발달과 경제활동의 증가로 항공 및 선박, 육상등 여러분야에서 수송수요가 끝없이 증가하고 교통육구 또한 다양한 형태로 나타난다, 육상도시철도 분야에서도 이 수요와 육구충족을 위해 도시철도를 건설하고 있다. 그에 따른 도시철도 건설시 수송수요 및 수송육구가 밀집된 도시중심을 통과하도록 선로를 계획하고 건설해야 된다, 그로인한 선형은 도로를 따라 Building숲 사이로 연결되고 있다.

서울Metro도 이 경우에 해당되며 밀집된 수송수요를 충족시키기 위해 1, 2, 3, 4호선 도심도로를 통과한다 도심도로를 따라 철도 건설시 지형적인 영향으로 부득이한 선로선형을 결정해야 하는 경우가 있다.

그림1과 같이 3호선 안국~종로3가간 돈화문앞 지상에서 90도로 교차되니 선형 결정시 부득이하게 복심곡선으로 건설하게 되었다. 복심곡선은 곡선중심 방향은 같으나 곡선반경의 크기가 서로 다른 두개의 곡선으로 이어진다. 도시철도 건설규칙에서는 두개의 곡선이 인접되는 경우 Cant 체감후 20m이상의 직선을 삽입하도록 규정하고 있으나 지형상 부득이 복심곡선으로 건설되었다



그림1 안국~종로3가역간 노선도

2.2 안국~종로3가간 복심곡선 특성

안국~종로3가간 복심곡선 특성은 역간거리 1,040m중에서 반경200m인 급곡선의 길이가 423m로 41%를 차지하고 구배특성은 5% ~ 16%의 불규칙한 경사로 연결되었으며 구배 변환점은 7개소나 된다. 복심곡선 형태는 그림2와 같이 곡선반경이 다른 R_1 곡선과 R_2 의 두곡선으로 이루어졌다.

곡선크기는 상선쪽은 R_1 이 200.35m로 R_2 188.225m보다 다소 크고, 하선쪽에서는 199.225m와 199.355m로 거의 비슷하다

직선과 곡선을 연결해주는 완화곡선 길이는 상선에서 BTC와 BCC거리는 42m이고 ECC와 ETC사이는 59m이다. 하선 쪽에서는 BTC와 BCC사이는 65m이고 ECC와 ETC거리는 57m이다. 열차가 진입하는 곡선시점 보다 곡선을 빠져나가는 종점부에서 완화곡선 길이가 짧다. 또한 Cant 변화도 종점부에서 빠르다. 그로인한 곡선 종점부에서 궤도 부담력이 커 이상마모 현상이 나타나는 특성이 있다

2.3 선로상태

그림2는 상선측 복심곡선 선로도로서 종로3가역에서 R_2 곡선과의 거리는 365m이다. 그 사이에 12%, 16% 및 13%의 상구배 3개소가 있다. R_2 곡선은 18k822지점에서 시작되고, 반경은 188.225m 이다. 곡선거리 212m 이고, 곡선내에 10%과 14%의 2개소의 상구배가 있다

곡선 R_1 은 18k610지점에서 시작되고 반경은 200.35m이다. 곡선거리는 211m이며, 곡선내에 9%의 상구배 1개소가 있다.

곡선연장 423m 사이에 반경이 다른2개의 복심곡선과 10%를 비롯하여 14%, 9%등 3개소의 구배변환점이 곡선상에 부설되어 Rail에 부담이 가중되었다.

하선측 곡선시점은 그림3과 같이 18k410 지점으로 안국역 출발 27m지점에서 BTC가 시작되며 ETC는 18k840지점으로 연장은 430m로 상선보다 7m 길다.

R_1 과 R_2 두 곡선 또한 구배상에 위치하며 10%, 15%, 10%의 하구배로 이어지는 3개소의 구배변환점이 있다.상하선 모두 부득이한 선형을 갖인 취약곡선이다.

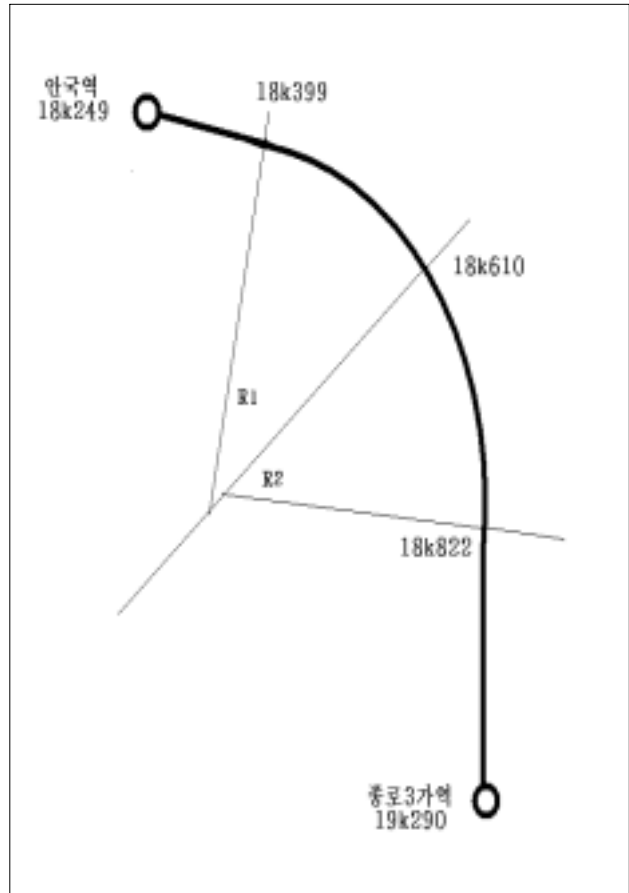


그림2 복심곡선 형태

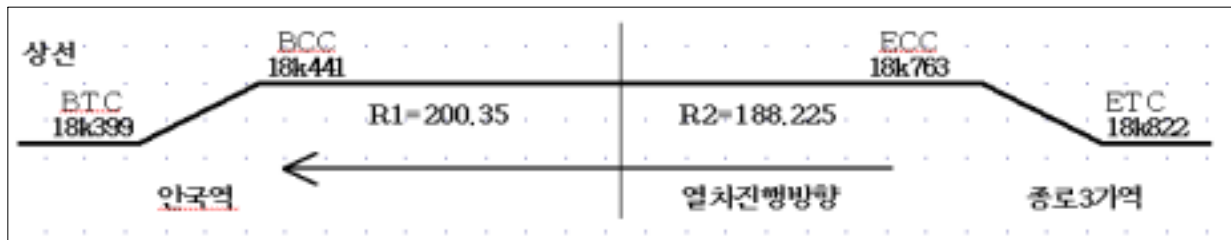


그림3 안국-종로3가간 케도일람도(상선)

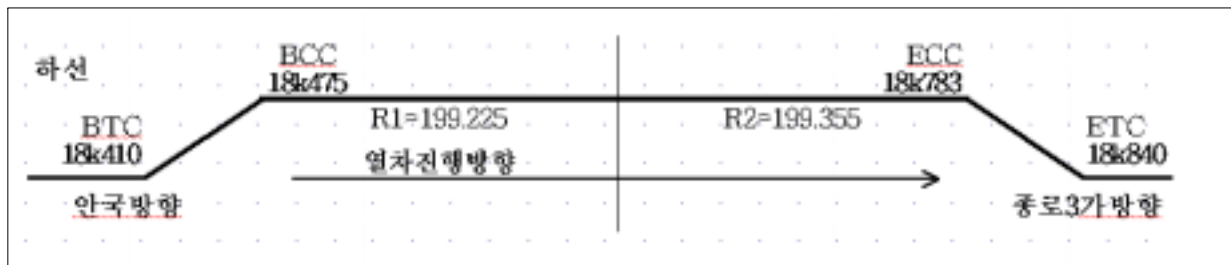


그림4 안국-종로3가간 케도일람도(하선)

2.4 선로제원

서울메트로 3,4호선 건설지에 따르면 3,4호선에 사용되는 Rail은 50kgN형을 전 구간 사용하여 Rail을 중량화하였다. 지하철 시공 상 제한된 Rail반입구를 사용하여 Rail부설현장까지 운반 반입하게 되는 관계로 Rail 1개의 길이를 20m 제품을 사용하였다.

곡선반경 600m 미만되는 곡선에는 1개의 길이 20m Rail을 부설하여 이음판을 사용하므로 Rail이음구멍이 유공을 사용하였다

침목 및 도상에 있어서도 도포1과 같이 자갈도상과 목침목으로 부설되었다. 침목의 강도, 구조 및 경제적인 측면에서 PC침목을 사용하는 것이 바람직한 것으로 나타나 있으나 궤도구조상 분기기, 교량부 및 급곡선부에서는 적당하지 않으므로 부득이 목침목을 사용하게 되었다.

급곡선부에서는 궤간에 스톱(Slack)을 설치 하도록 되어 있는데 PC침목의 경우 스톱을 감안한 제작이 어려울 뿐 아니라 열차가 곡선부를 통과 할 때 생기는 원심력 등에 의하여 외측 체결구 부근에 파손의 우려가 있으므로 지하철 3,4호선 궤도 구조기준에서 곡선반경 600m 미만 구간에서는 목침목을 사용하도록 했다

도표1 곡선제원(곡선장, 반경,레일,침목/도상)

상하	곡선명	위치	곡선장	곡선반경	레일종별	침목/도상	비고
상선	R ₁	18k 399 ~ 18k 610	211m	R ₁ =200.35	50kgN	목침목 자갈 도상	
	R ₂	18k 610 ~ 18k 822	212m	R ₂ =188.225			
하선	R ₁	18k 410 ~ 18k 610	200m	R ₁ =199.225	50kgN	목침목 자갈 도상	
	R ₂	18k 610 ~ 18k 840	230m	R ₂ =199.355			

2.5 Cant, Slack, 중앙종거 및 열차속도

당초 건설시 곡선반경이 R≤200m 결정됨에 열차속도를 이에 준하여 40km/h로 제한하고 또한 Cant 및 Slack를 도표2와 같이 C=80mm, S=9mm, 설정하고 중앙종거 M은 상하선 63mm로 통일되었다.

도표2 곡선제원(Cant, Slack, 중앙종거, 열차속도)

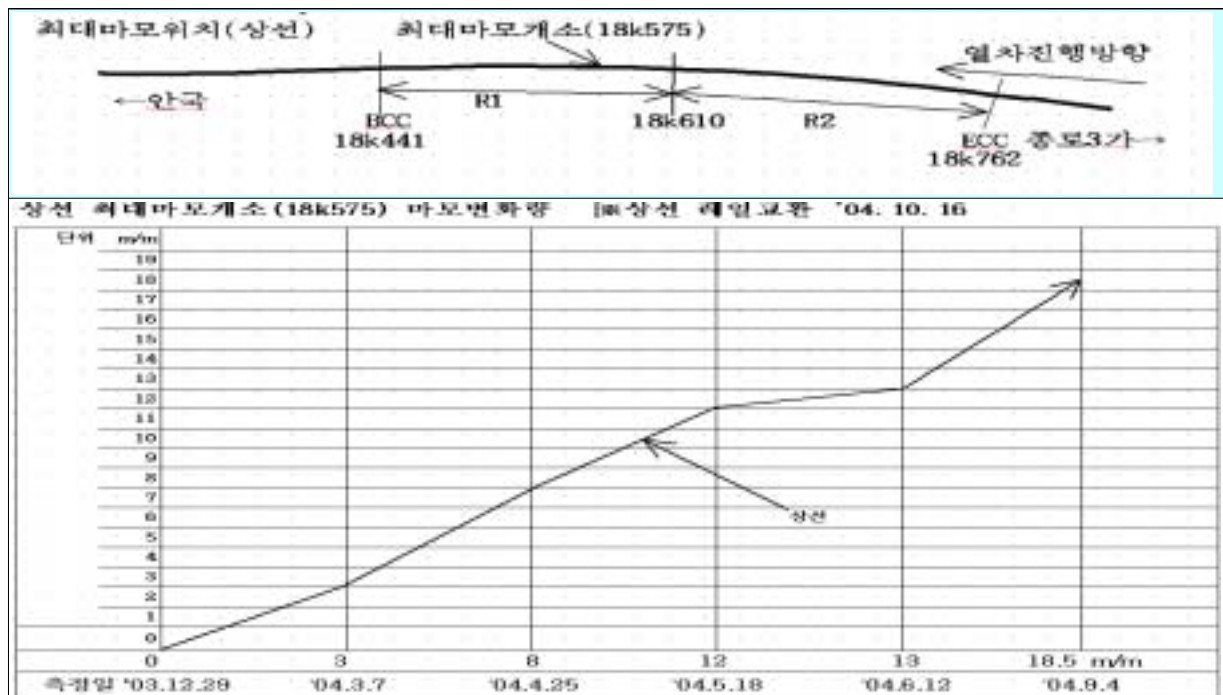
선별	곡선명	위치	Cant	Slack	중앙종거	열차속도	비고
상선	R ₁	18k 399 ~ 18k 610	80mm	9mm	63mm	40km/h	
	R ₂	18k 610 ~ 18k 822	80mm	9mm	63mm	40km/h	
하선	R ₁	18k 410 ~ 18k 610	80mm	9mm	63mm	40km/h	
	R ₂	18k 610 ~ 18k 840	80mm	9mm	63mm	40km/h	

2.6 Rail마모 현황

2.6.1 상선마모 변화량

상선 마모변화는 도표3과 같이 이상마모로 형태로 나타났으며 최대마모개소는 복심곡선 R₁ 18k575 지점에서 발생되었다.

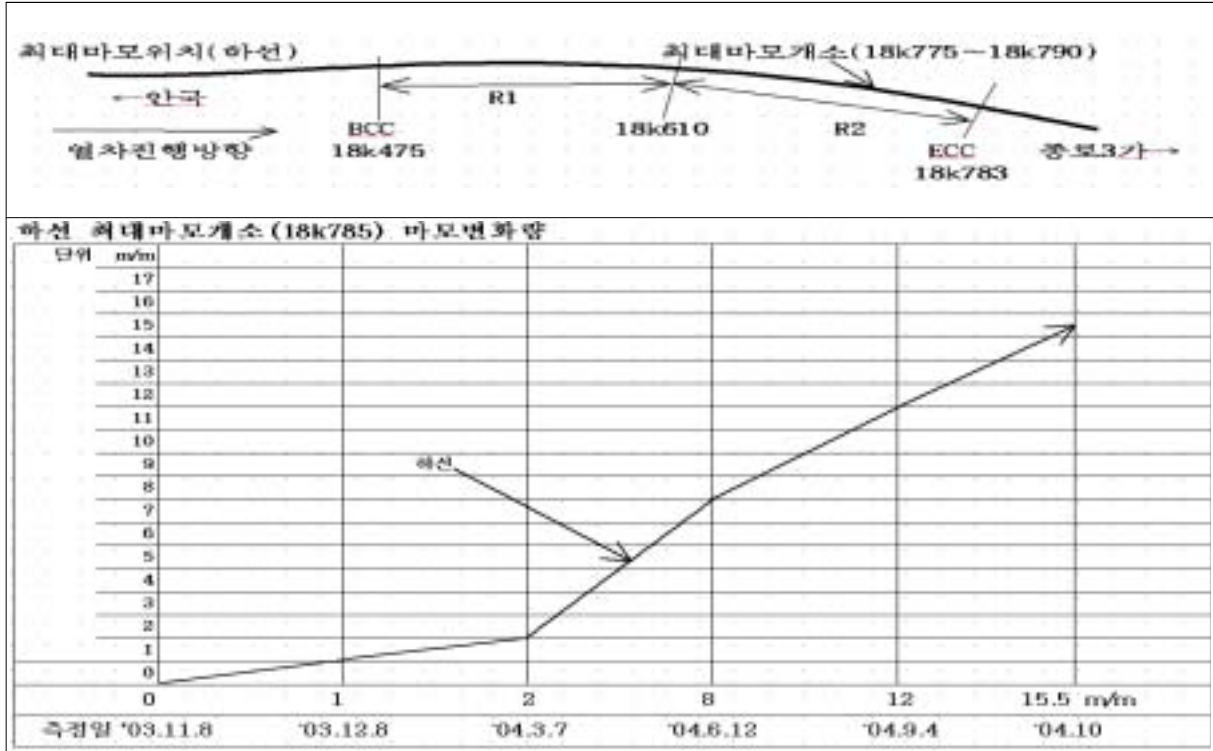
도표3 상선 마모변화량



2.6.2 하선마모 변화량

하선 마모변화는 도표4와 같이 역시 이상마모로 형태로 나타났으며 최대마모개소는 복심곡선 R₂ 18k775 ~ 18k790 지점에서 현저하게 발생되었다.

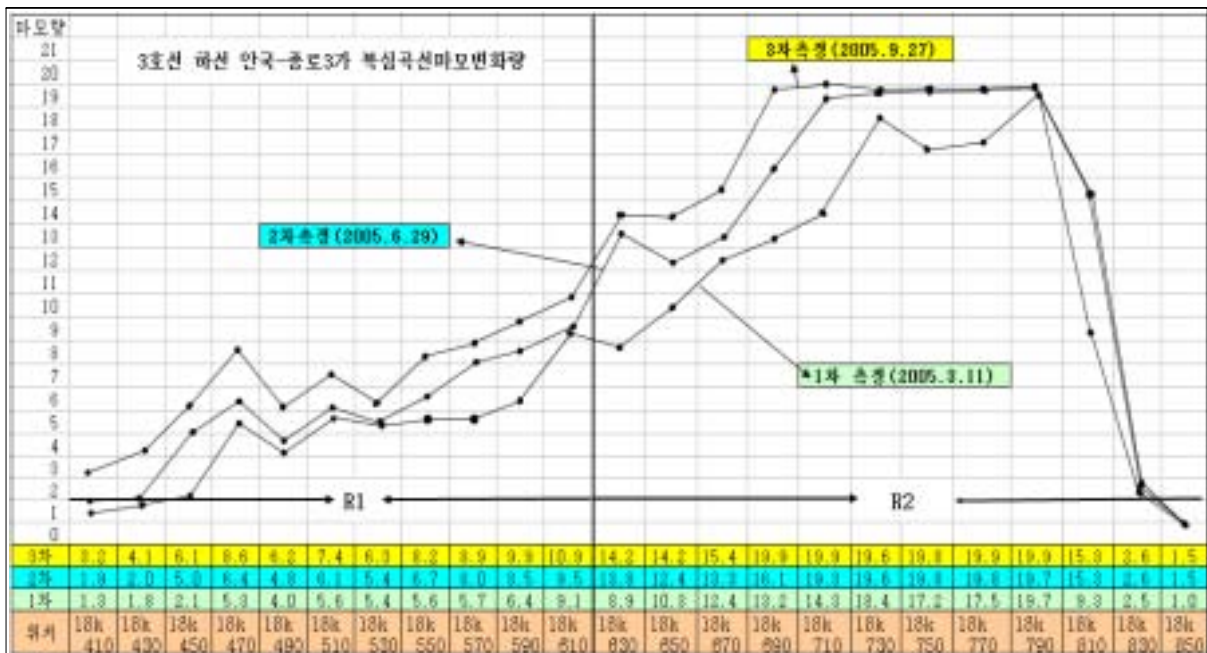
도표4 하선 마모변화량



2.7 Rail마모 변화특성

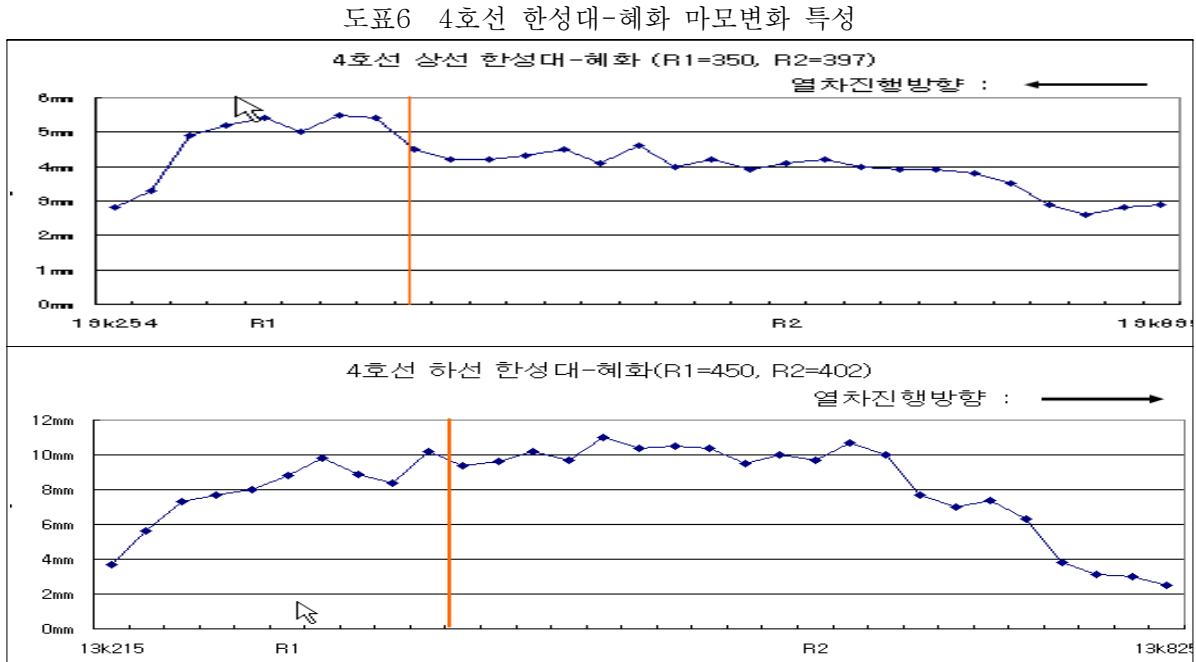
마모변화 특성은 상선일 경우 곡선주행 완료지점인 18k399에서 열차8,9차량 위치인 18k575지점에서 나타났으며 하선은 도표4 및 도표5와 같이 18k770~18k790 사이에서 최대로 발생되어 곡선중점부에서 마모가 심하게 나타났다

도표5 안국-종로3가간 마모변화량



2.5 타곡선 마모변화 특성 비교

Rail마모는 곡선별 특성에 따라 다르게 나타날 수 있어 특성을 비교 할 수 없지만 한성대~혜화간 복심곡선 마모분포는 상하선 모두 도표6과 같이 곡선 R₁과 곡선 R₂에서 고루게 나타났다.



III. 검토

3.1 검토방향

곡선관리에서 궤도틀림량은 변화가 심하지 않으나 Rail마모는 이상마모 현상을 나타남에 Slack 및 열차속도와 Cant, 도유기 상태등을 검토 개선방향을 모색 Rail이상마모 발생을 저감시키고자 함.

3.2 Slack

Slack은 곡선에서 차륜의 Rail 승월현상을 방지하고 고정된 차축이 원활히 곡선을 통과할 수 있도록 곡선 크기에 따라 내측Rail로 궤간을 벌려 차륜이 궤간에 끼이지 않도록 하여야 한다. 차축이 곡선을 통과할 때 고정된 고정축거에서 차축간의 간격이 클수록 Rail과 차륜Flange간의 접촉각이 커지고, 축간거리가 짧아지면 접촉각이 작아진다.

고정된 한 Bogie에서 차축간의 간격으로 인한 Rail과 차륜Flange 접촉각의 크고, 작음 현상에서 상호 삐걱거림과 열차동요가 발생되며, 그로인한 Rail에 불규칙적인 횡압작용으로 궤도 각부 체결장치의 훼손 증가와 궤간 및 줄틀림의 발생, 또한 Rail마모에 큰 영향을 주게된다. 도표7은 현장 적용 Slack이다 $S=1,250/R-S_1$ (S=스랙, R=곡선반경, S₁=조정치:0~4mm)

도표7 현장 적용 Slack

선별	구간	상하	곡선반경	조정치		현장Slack량	비고
				최소적용	최대적용		
3호선	안국~종로3	상선	R ₁ =200.35	6. 2mm	10. 2mm	9mm	
			R ₂ =188.225	6. 6mm	10. 6mm	9mm	
		하선	R ₁ =199.225	6. 3mm	10. 3mm	9mm	
			R ₂ =199.355	6. 3mm	10. 3mm	9mm	

3.3 Cant

직선에서 곡선진입시 열차무게 중심의 변화와 Cant에 의해서 Rail과 차륜사이의 접촉위치가 변한다 Cant는 열차가 곡선 왼 운동에서 원심력과 구심력이 서로 조화로운 균형 유지와 열차하중이 궤도중심선에서 주행하도록 내측Rail를 기준하여 외측Rail을 곡선반경과 열차속도에 따라 높여주되 열차가 곡선상에서

정차시 내방으로 전도되지 않도록 최대 Cant을 160mm 이내로 제한한다. 한편 제한된 Cant량이 일정량 이상 부족하지 않도록 정하고 있으나 곡선 종점부에서 탄력 가속도 발생으로 횡압력 증가될 시 부족Cant영향을 받지 않도록 해야된다. 도표8은 현장 적용 Cant이다

$$C=11.8*V^2/R-C_1(C=Cant, V=열차속도, R=곡선반경, C_1=Cant조정치:0\sim 100mm)$$

도표8 현장 적용 Cant

선별	구간	상하	곡선반경	적용Cant량	조정량	현장Cant량	비고
3호선	안국~종로3	상선	R ₁ =200.35	94.2 mm	14.2mm	80 mm	현장Cant량 설정근거 11.8*(40*40)/188.25을 적용하여 현장부설시 최대Cant량 100mm로 설정필요
			R ₂ =188.225	100.3 mm	20.3mm	80 mm	
		하선	R ₁ =199.225	94.8 mm	14.8mm	80 mm	
			R ₂ =199.355	94.7 mm	14.7mm	80 mm	

3.4 복심곡선

본선에서 2개의 곡선이 접속하는 경우 곡선 중심선이 같은 방향이든 다른 방향이든 2개의 곡선이 접속되는 개소에는 캔트 체감후 20m이상의 직선을 삽입하여야 한다. 다만 인접한 2개의 곡선에서 곡선 중심이 같은 방향이고 지장물등 지형상 불가피한 경우 직선을 삽입할 수 없을 경우 다음의 범위안에서 복심곡선으로 부설할 수 있다.

$$\left| \frac{R_1 \times R_2}{R_1 - R_2} \right| \geq 1,200$$

이는 두곡선 R₁, R₂에서 곡선반경의 차가 적을수록, 또한 곡선반경이 클수록 주행저항이 적어진다 열차 주행시 차량별 직, 곡선별 진동주기(고유 주행Cycle)가 존재한다 두 곡선에서 곡선반경의 차가 클수록 열차운행시 횡방향 가속도와 열차 진동주기의 급격한 변화로 높은 수직압 발생과 마모계수의 상승이다

3.4.1 복합적 특성

안국~종로3가간의 곡선은 일반곡선의 특성과 복심곡선의 특성을 복합적으로 갖고 있다. 열차탄력 특성과 복심곡선 R₁, R₂ 주행Cycle의 변화되는 특성이다. 이 복합적인 특성이 곡선종점부에서 나타난다.

곡선 종점부에서 주행탄력의 증가되고 주행 Cycle이 변화됨으로 외측 Rail에 부담력이 크게 작용하여 피로 한도가 조기에 도래된다.

상선 운행시 곡선R₂에서 곡선R₁방향으로 열차가 진행한다. 복심곡선R₂는 반경이 188.225m이고, R₁는 200.35m이다. R₁, R₂ 두곡선 통과시 주행Cycle의 변화됨은 곡선반경이 다르기 때문이다. 종로3가역에서 규정속도로 열차 출발후 365m운행(18k822)지점에서 곡선이 시작된다. R₁, R₂반경이 다른 두 복심 곡선의 시작이다 곡선423m거리를 열차제한속도 40km/h로 제한하지만 곡선종점부에 탄력속도가 작용될 수 있다.

하선 운행은 곡선R₁에서 곡선R₂방향으로 진행한다. R₁는 반경이 199.225m이고, R₂는 199.355m로 곡선반경은 비슷하다. 그러나 외측Rail 부담력은 상선은 R₁ > R₂ 이며, 하선은 R₁ < R₂ 로 곡선 종점부에서 이상마모 현상으로 나타났다

3.5 도유기

곡선부에서 Rail과 차륜Flange간의 마찰저항을 감소시킬 수 있도록 외측Rail 내측Coner부에 기름을 분사 곡선종점부까지 도포 되도록하여 Rail 마모발생 저감으로 Rail수명 및 보수주기 연장이다. 특히 안국~종로3가간 복심곡선에서의 Rail마모발생 특성은 완화곡선부에서의 변화량이 미세한 반면 원곡선 상에서 이상마모형태로 특이하게 나타남에 도유기 부설위치를 원곡선 시점쪽으로 이동설치 검토

진동감지식 도유기 : 도유기에서 분사된 도유기유가 차륜과 Rail과의 접촉이 불충분한 완화곡선 시점 또는 완화곡선 중앙에 설치시 곡선 종점부까지 충분히 도포되지 못하는 경우가 있다. 또한 완화곡선에서는 대체로 마모발생이 적고 비효율적이므로. 마모발생이 시작되는 원곡선시점 쪽에 설치하는 것이 효과적이다

용출식 도유기 : 용출식 도유기는 열차접근시 열차진동 감지방식에서 열차이동을 감지하여 분사하는 방식으로 진동감지식 도유기의 진동 감지방식을 개량한 도유기로 분사된 도유기유가 마모발생개소등 곡선전반에 걸쳐

도포됨으로 성능이 향상되어 보다 효율적인 도유기 이다.

IV. 개선대책

4.1 궤도중량화

Rail을 50kgN에서 60kg로 교환하되 외측레일은 열처리한 경두Rail을 사용하였으며, 침목은 PCT로 개선하되 곡선부 Slack을 조정할 수 있도록 개량된 SKL12체결구용으로 부설하였고 도상 자갈이 이완되지 않도록 도상안정제를 살포하였다.

도표9 궤도개선

선별	구간	선별	구분	당초	개량후	비 고
3호선	안국~종로3	상하선	레일	50kgN	60kgK 경두레일(HH370)	궤도보강, 중량화공사 및 도급공사로 궤도개량
			침목	목침목	콘크리트침목 (SKL12체결구용)	
			도상	자갈도상	도상안정제 살포	

4.2 Cant량 상향 조정

Cant조정은 열차속도 40km/h에 최소곡선반경 $R_2=188.225m$ 를 적용하고 $C=11.8*V^2/R-C_1$ 에서 $C=(11.8*40^2/188.225)-0$ $C=100mm$ 로 Cant조정량은 도표10과 같다

도표10 Cant량 조정

선별	구간	선별	적용곡선 반경(m)	산출Cant량 (mm)	조정량 (mm)		적용Cant량 (mm)		비 고
					당초	변경	당초	변경	
3호선	안국~종로3	상하선	$R_2=188.225$	100	20	0	80	100	

4.3 도유기위치 변경 및 개량도유기 교체

도유기장치는 열차통과시 도유기유가 외측Rail 내측Coner부에 정확히 분사되고, 분사된 기름은 곡선 전장에 걸쳐 고루게 도포될 수 있는 위치에 설치되어야 한다. 당초 상하선 3번, 8번 1대씩 설치되었으나 마모발생 저감을 위해 상선 복심곡선 중앙부에 도유기를 추가 설치했다. 그후 도표거리를 효율적으로 관리하기 위해 마모 발생이 시작되는 상선 ECC지점과 하선 BCC지점으로 설치 위치를 변경하였다.

그후 도포거리 및 성능이 더욱 효율적인 용출식도유기로 교체하였다. 도표11에서 2차변경은 용출식 도유기 위치 및 설치일자이며 상선 복심곡선 중앙부 도유기는 중복됨으로 철거되었다.

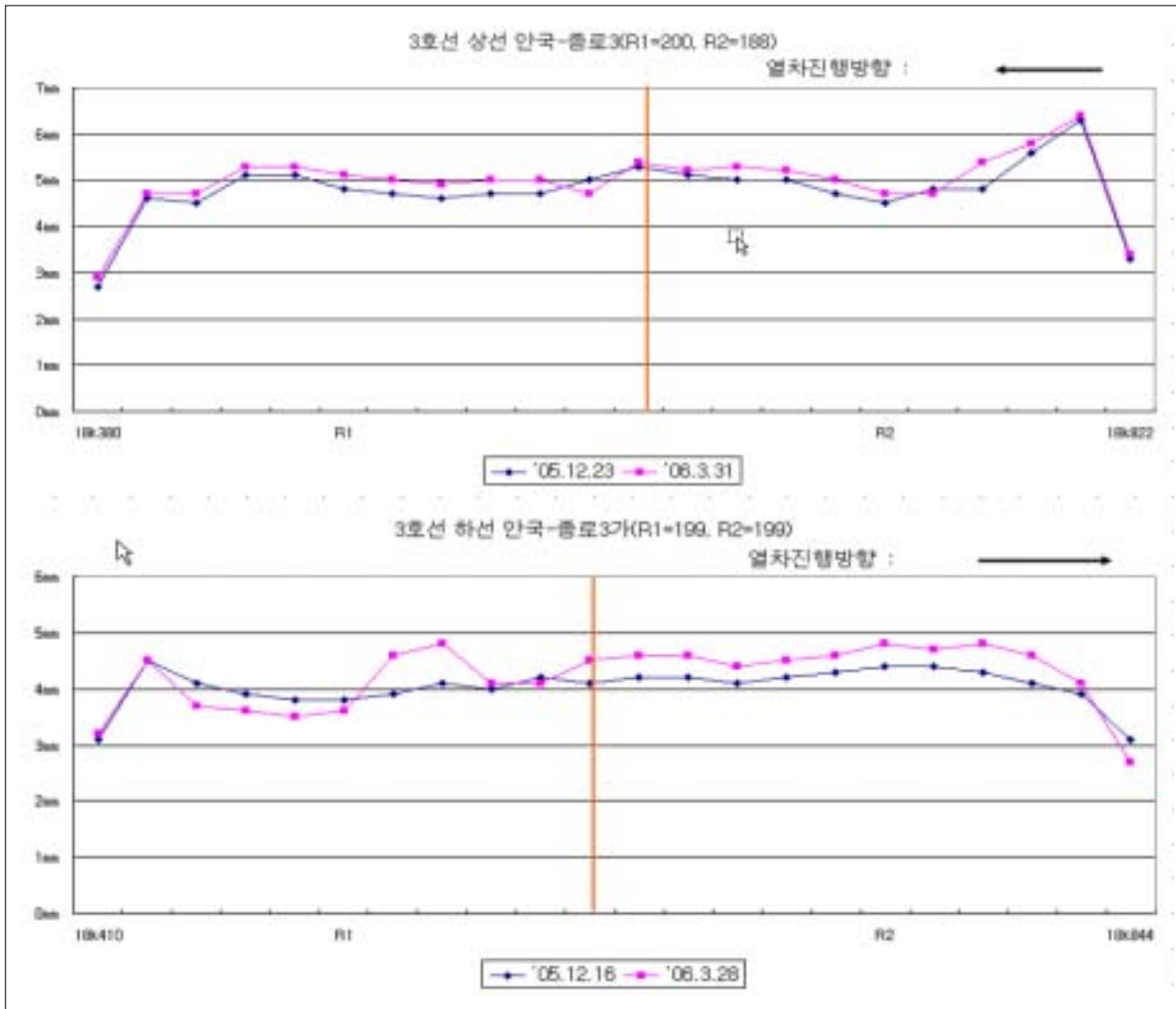
도표11 도유기위치 변경

호선	구간	선별	도유기 번호	설치 위치			변경 설치일		비고
				당초	1차변경	2차변경	1차변경	2차변경	
3호선	안국 ~종로3가	상	3#	18k795	18k762	18k810	'04.08.11	'06. 09. 07	
		상	9#	16k579	18k600	철거	'04.10.15	'06. 09. 07	
		하	8#	18k446	18k475	18k430	'04.10.13	'06. 09. 07	

V. 개선효과

개선효과는 궤도상태가 더욱 최적화 됨으로서 도표12와 같이 이상마모 발생이 저감되었으며, 또한 마모발생 분포도 곡선 시종점부를 포함 복심곡선 R_1 R_2 에서 균등하게 나타남으로서 곡선 전반에 걸쳐 안정적인 궤도상태를 보였다.

도표12 안국~종로3가간 Rail마모 분포도



VI. 결 론

Rail 이상마모 발생 저감 대책은 궤도상태를 최적화 함으로서 보다 향상시키고 개선시킬수 있다. 개선은 끊임없는 연구, 노력결과로 이룩될 수 있다. 곡선부에서 Slack 및 Cant가 마모발생에 상당한 영향을 주고 있으므로 Slack 및 Cant에 있어서 충분한 검토가 요구되고 있다. 그러나 Slack 및 Cant를 검토하기 이전에 먼저 궤도의 수평틀림, 면틀림, 그리고 줄틀림, 평면성틀림 등 궤도 틀림치수가 시공기준 범위 이내에 들도록 정비가 우선해야 될것이다. 또한 Cant에서 조정치 C_1 이 0에 가까울수록 외측 Rail에 횡압력은 감소하지만 내측Rail에 부담을 줄수 있으므로 열차속도에 최적인 Cant값을 도출해 낼수 있도록 연구, 노력이 계속적으로 이어져야 할 것이다.

수송수요는 보다 빠른 속도를 요구하고 있다. 열차속도 상승에 따른 최적인 궤도상태를 유지함으로서 Rail이상마모 발생을 저감시킬수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. 鐵道工學(工學博士 李鍾得 著 노해출판사)
2. “선로정비규정”, “도시철도 기술자료 및 현황” Seoul Metro
3. 서사범 “개정판 선로공학”
4. Rail이상마모분석 및 대책보고(서울메트로 제2철도토목사무소장 방침서)2004년