

# 열차운행속도 상승에 따른 레일마모 및 캔트조정 연구

## A Study on Wearing of Rail and Adjustment of Cant in Accordance with Increase in Running Speed of Train

신길철\*                      주봉규\*\*                      정성현\*\*\*  
Shin, Gil-Cheol              Joo, Bong-Gyu              Chung, Sung-Hyun

### ABSTRACT

Subway routes 1~4 were constructed in gravel roadbed track structure in consideration of the technological capabilities, construction cost and duration at the time of the initial construction. As such, 224.8km, approximately 81.2% of entire length, of total length of railway track at 276.9km was constructed on gravel roadbed. However, improvement of gravel roadbed to concreted roadbed began in 1998 due to problems including frequent repair works and limited time application for such works caused by occurrence of track distortion during operation as well as lowering of roadbed functions and generation of dust caused by frictional power, impact absorption capabilities, abrasion and crushing of gravel on roadbed. Currently, this improvement is continuing with target of converting entire route into concreted roadbed structure. Therefore, this Study modifies formula for setting cant, analyze the correlation between wearing of rail side of the curvature and cant insufficiency following increasing of the running speed of the train, and to present the directions for fundamental review for adjustment of cant insufficiencies at the time of improvement of gravel roadbed to concreted roadbed that is being implemented on the operational tracks of the railway trains.

### 1. 서론

#### 1.1 연구배경 및 목적

지하철 1~4호선은 초기 건설당시 기술능력, 건설비, 공사기간을 감안하여 자갈도상 궤도구조로 건설하게 되어 본선 약81.2%에 달하는 224.8 km가 자갈도상으로 시공되었다. 그러나 운영 중 궤도틀림 발생 등에 따른 제한된 작업시간 등 열악한 작업 환경 하에서 빈번한 보수작업으로 인해 유지보수비가 많이 소요되고, 또한 도상자갈이 마모, 과쇄됨에 따라 마찰력과 충격흡수력 등 도상기능이 저하되어 열차안전운행을 저해함은 물론 분진이 발생 지하 환경을 악화시키는 등의 단점이 있었다. 이에 '98년부터 우선적으로 급곡선부의 자갈도상을 콘크리트도상으로 개량하기 시작하여 전 구간을 콘크리트 도상화 구조로 추진하고 있다. 본 연구에서는 '04년 7월 개정된 운전취급규정에 의한 열차운행속도 상향조정 및 캔트공식 변경 후 곡선부 레일 마모와 캔트부족량과의 상관관계를 분석하고 부족 캔트량을 사전에 검토하여 콘크리트 도상개량 시 적정 캔트량 설정을 위한 체계적인 캔트조정 방법을 검토하고자 하였다.

#### 1.2 연구범위 및 방법

전동차가 운행하는 열차운행선상의 캔트조정은 여러 가지 어려움이 있으며, 과거 캔트조정을 위한 체계적인 검토방법이 도출되지 않은 상태에서 유지보수 시 현장 자체적으로 캔트를 상승하여 관리하므로써, 레일유지관리 효과 등이 미비했었다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 체계적인 자료조

\* 서울메트로 기술연구센터 대리. 정회원

E-mail : shingc1@hanmail.net TEL : (02)520-5986 FAX : (02)520-5969

\*\* 서울메트로 제2철도토목사무소 궤도차장.

\*\*\* 서울메트로 기술연구센터 주임. 정회원

사 및 검토를 통한 곡선부 외측 레일마모인 측마모와 열차운전속도 상승에 따른 부족캔트량과 레일마모관계를 분석하고 자갈도상에서 콘크리트 도상으로 개량 시 부족 캔트량을 사전에 검토하여 기존 시설물을 변경하지 않는 범위 내에서 적정캔트량 확보를 위한 체계적인 캔트 조정방법을 제시하고자 한다.

### 1.2.1 대상구간 및 조사기간

레일마모측정 구간은 3호선 중에서 R=600이하 곡선반경대별로 레일마모측정장치 도입 후, 곡선 전 연장에 걸쳐 레일을 교환한 개소로 선정하였는데, 이는 기존의 인력 마모측정 시 발생할 수 있는 측정오차를 줄이기 위함으로 레일마모 측정 장치로 측정된 데이터를 활용하기 위함이며, 부족 캔트량 검토 대상 구간은 자갈도상에서 콘크리트도상으로 개량 예정 구간을 조사대상으로 하였다.

### 1.2.2 레일마모측정 및 측정 장치

본 연구에서는 캔트부족량이 레일마모에 미치는 영향을 분석하기 위해 곡선반경대별 레일 마모량 측정을 통한 원래의 단면과 레일마모량에 초점을 맞췄으며, 이를 위해 레일마모측정장치를 이용하였다. 또한 측정위치는 레일측면 R=13지점을 측정하였으며, 측정간격은 1m로 하고, 자료정리는 20m거리를 합산하여 레일마모 평균값과 최대값으로 조사하였다.

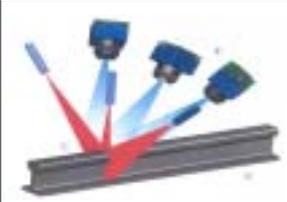
			
· 장비명	레일 마모 측정장치		
· 측정원리	기존에 운용중인 선로검측차에 부착하여 선로검측과 레일마모 측정을 병행 실시하고 있으며, 레이저(비접촉식)로 레일의 상태를 측정하고 고속 디지털 카메라로 레일상태를 촬영하여 연산프로세서에 의해 데이터로 출력하여 관리하는 장치.		
· 측정주기	년 4회		
· 측정범위	레일단면마모 측정 및 레일파상마모 측정		

그림1. 레일마모 측정 장치

## 2. 레일 측마모

### 2.1 레일 측마모 현상

레일에는 차륜에 의한 윤증, 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 윤활 조건 등과 복잡하게 영향을 주어 레일두부면 및 궤간 내측면이 마모된다. 특히, 곡선 외측 레일에서는 차륜플랜지에서 레일의 게이지 코너로 횡압을 받으면서 차륜의 회전에 수반하여 미끄러짐을 일으키며 측마모가 발생한다.

### 2.2 곡선반경별 레일 마모

레일 측마모는 앞에서 설명되었듯이 곡선 외측레일에 발생하며, 그림 2번과 3번에서 보듯 곡선반경이 다른 4개소를 선정하여 측정한 결과 레일교환 이후 측정기간의 차이가 있음에도 곡선반경 598m와 곡선반경 331m의 외측레일 마모량을 비교했을 때 마모량이 약2배 정도 크게 나타남을 알 수가 있었다. 이는 곡선반경이 작을수록 마모량이 크게 나타난다는 것을 의미한다. 다만, 그림에서 보듯 곡선반경 300m미만에서 레일마모량이 작게 나타나는 것은 레일도유기와 열처리레일을 사용했기 때문인 것으로 판단된다. 이는 서울메트로 선로정비규정에 의해 곡선반경 300m미만 급곡선 구간에 레일마모를 저감하기 위해 열처리 레일을 우선 사용하고 있기 때문으로 사료된다.

표1. 레일마모 측정개소

구 간	곡선반경 (R)	상하	1회차		2회차		3회차		4회차		측정 기간
			최대	평균	최대	평균	최대	평균	최대	평균	
금호-옥수	598	상	2.2	1.2	3.5	2.0	4.7	2.6	5.9	3.4	16개월
옥수-압구정	401	상	3.6	1.1	3.8	2.0	4.4	3.3	7.1	4.8	12개월
잠원-고속터	331	하	2.5	1.5	4.4	2.7	7.7	5.1	11.4	7.2	12개월
독립문-경복궁	263	상	4.5	1.9	4.7	3.3	5.8	4.0	6.2	4.1	14개월

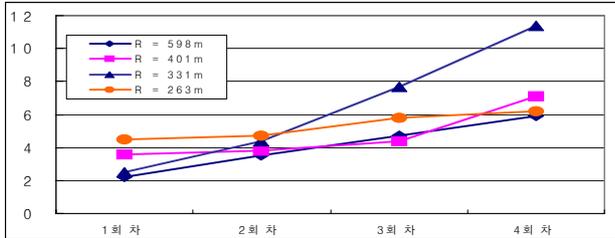


그림2. 최대마모량(회차별)

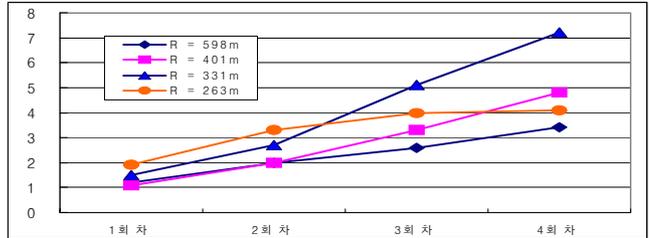


그림3. 평균마모량(회차별)

### 2.3 곡선부 레일마모 분포

곡선부의 레일마모 분포도를 보면 그림4에서 보듯 열차 진행방향에 따라 원곡선 중점부에서 마모량이 크게 나타나는 것을 볼 수가 있다. 이는 열차가 곡선을 통과하면서 곡선을 미쳐 빠져 나가기 전에 열차 운행속도를 높이는데 원인이 있을 것으로 판단된다. 또한 곡선별 선로조건에 따라 마모량의 차이가 발생하는데, 이를 살펴보면 수평구간 보단 구배구간에서 그리고 구배 위치에 따라 하 구배에선 제동에 따른 마모가, 상 구배에선 속도상승에 따른 레일 마모량이 증가한다는 것을 알 수가 있다.

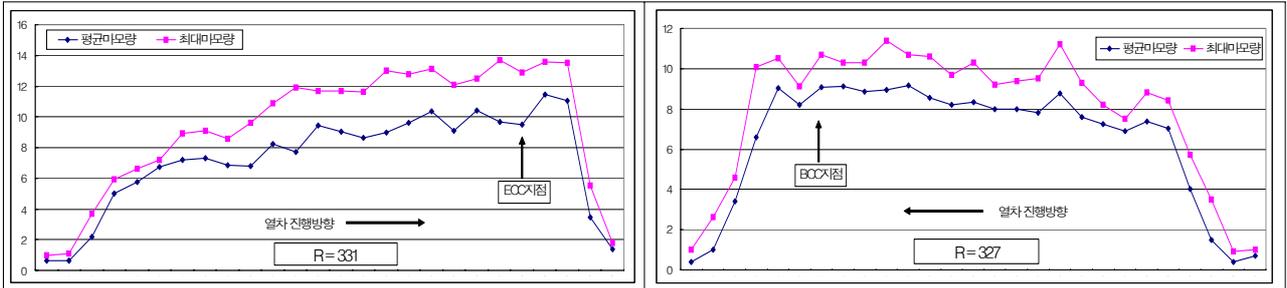


그림4. 곡선장 마모분포도

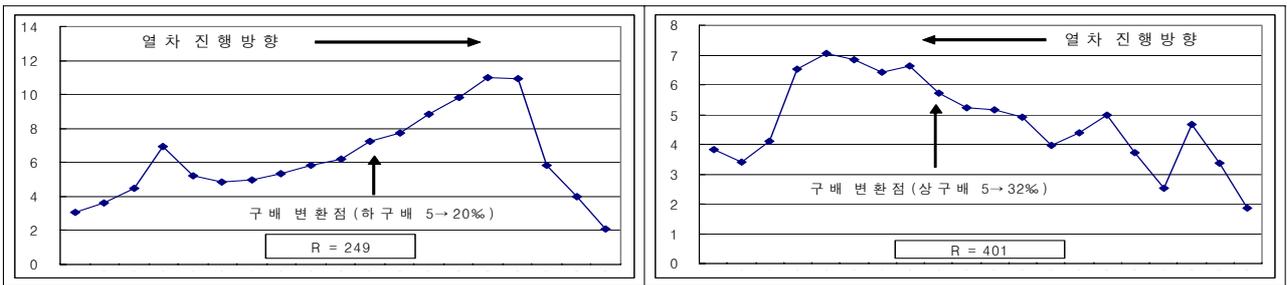


그림5. 구배 변환점에서의 레일마모

## 3. 부족켄트 조정

### 3.1 켄트의 정의

차량이 어느 속도로 곡선을 통과하는 경우에 원심력이 외측으로 작용하기 때문에 차량이 곡선 외방으로 전복할 위험이 있으며, 외측 레일에 큰 윤증이 작용함과 함께 차량의 전향에 의하여 큰 횡압이 생기고, 더욱이 원심력에 의하여 횡압이 가해지며 궤도파괴가 크게 되어 보수량이 증가하고, 승차감이 나빠지며 열차의 저항이 증가한다. 이처럼 원심력에 의한 문제점을 방지하기 위해 이 힘을 상쇄 또는 경감하도록 곡선 선로에서는 외측레일을 내측레일 보다 높게 하여 차량중심에서 작용하는 원심력과 중력

과의 합력 작용선이 궤도중심을 통하도록 함으로서 열차운전의 안전, 궤도부담의 평균화를 피하고, 승차감을 좋게 한다. 이처럼 궤도에 경사를 붙인 것, 즉 외측레일과 내측 레일의 고저차를 캔트라고 한다. 또한 캔트부족은 설정Cant량이 균형Cant보다 작을 경우에 생기는 것으로서, 차량이 곡선을 통과 시 초과 원심력에 의한 승차감의 저하, 차량의 진동이나 곡선 내측으로부터의 횡력의 작용에 따른 곡선 외측으로의 전도 등을 고려하여 정해진다. 우리나라의 경우 고속철도는65(부득이한 경우85)mm이며, 국철 및 지하철은 100mm로 규정하고 있다.

### 3.2 부족 캔트량

레일에는 윤중, 역행, 제동에 따른 접선력 및 곡선통과 시 발생하는 축압력, 좌우 차륜의 주행로차에 의한 윤축틀림에 따른 접속력 등의 외력은 물론 기상, 레일의 운할상태 등 다양한 요인에 의거 두부 및 궤간 내측면에 마모가 발생하게 된다. 따라서 외력은 설정된 캔트량에 따라 그 크기가 변하기 때문에 캔트부족량은 레일의 마모에 영향을 미친다고 할 수가 있으며 곡선속도가 캔트에 대응하는 속도를 넘어 상승하면 캔트부족량으로 인한 초과 원심력이 생기므로, '04년 7월 개정된 운전취급규정 제113조에 따라 열차운행속도를 상향조정 후 곡선부 레일측마모 발생에 대한 캔트부족량 검토가 필요하다고 사료된다.

#### 가) 열차 운행속도 상승

· 본선에서의 곡선제한속도(운전취급규정 제113조, 개정'04.3.29)

곡선반경(m)		130	135	140	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	제한 최고 속도
		선로조건 및 속도	134	139	149	199	249	299	349	399	449	499	549	599	
분기기에 접속하지 않는 곡선의 경우 (km/h)	개정 전	35	35	35	40	50	55	60	65	70	75	80	-	-	80
	개정 후	35	35	35	40	55	60	65	70	75	75	80	85	90	90

※ '04.07.01부터 곡선부 열차 운행속도 상향조정

#### 나) 캔트 설정 공식 변경(도시철도건설규칙 개정)

- 변경 전 :  $11.3 \times V^2/R - C'$  ( $C'=0-40\text{mm}$ )
- 변경 후 :  $11.8 \times V^2/R - C'$  ( $C'=0-100\text{mm}$ )

### 3.3 부족캔트 조정 범위

전동차가 운행하는 열차운행선상의 캔트조정은 여러 가지 어려움이 있으며 이를 해결하기 위해서는 구조물내의 종합적인 현장상황을 확인 후 건축한계 검측과 차량의 편기량 및 전차선 편위량 측정 등, 현장여건 확인을 철저히 시행 후 검토하여야 한다. 이처럼 운행선상에서의 캔트량 조정은 충분한 현장검토가 선행되어야 하고 기존구간 캔트 상승 시 전차선 편위와 전차선 높이 등도 검토하여 기존의 시설물을 변경하지 않는 조건으로 캔트량을 조정하는 것이 필요하다고 사료된다. 또한 캔트조정으로 인한 타 분야와 열차운행에 아무런 문제점이 발견되지 않아야 한다. 이를 위해 도상개량공사 추진시 표본대상 개소를 현장분소에서 유지보수 시 분소 자체적으로 캔트를 상승하여 유지관리하고 있는 개소로 표본조사하였다.

### 3.4 부족캔트량과 레일마모

현재 부설된 곡선반경별 부족 캔트량을 살펴보면, 각 곡선별로 어떤 규칙성이 발견되지 않고 있다는 것을 알 수가 있다.(표2) 이는 부족 캔트량이 정해진 기준에 의해 설정되기 보다는 임의적으로 설정되어 있다는 것을 말하며, 캔트 부족량 발생요인을 살펴보면 그 중 토목구조물 설계시 부족캔트량 적용이 한 요인인 것으로 사료된다. 그림6에서 보면 레일마모는 곡선반경과 캔트량에 따라 마모량 차이가 발생하는 것을 볼 수가 있는데, 곡선부의 캔트부족이 마모발생에 적지 않은 영향을 주고 있다는 것으로 유추된다. 곡선반경이 399m인 곡선구간에서 마모가 가장 심하게 발생하고 있는 것을 보면, 마모는 곡선반경과 캔트부족량과 관련이 있는 것으로 사료되며, 반경 300m미만 급곡선인 경우 마모율이 적은 것은 캔트부족량이 많지 않고 이 구간에 사용된 레일이 열처리레일이기 때문으로 보인다. 이를 통해 부족 캔트량은

가급적 현장상태에 적합하도록 구간별 적정속도에 따른 균형켄트로 설정되어야 할 것으로 판단되며 부족켄트를 상향 조정하므로써 레일마모저감 및 유지관리상 유리할 것으로 사료된다.

표2. 곡선반경별 부족 켄트량

구 간	상,하	곡선반경	부족 켄트량	분기별 평균 마모량
경북공-안국	상	241	25	1.24mm
경북공-안국	하	256	16	1.40mm
을지3가-충무로	하	399	45	1.90mm
일원-수서	하	402	25	1.54mm

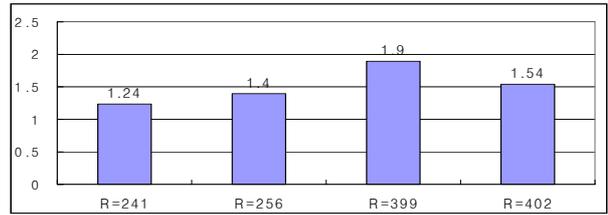


그림6. 곡선부 분기별 평균 마모량

### 3.5 켄트조정 검토

#### 3.5.1 구조물 내공치수

켄트 조정시 켄트량을 과다하게 설정할 경우 전동차 편기로 인한 건축한계 침범 및 구조물에 접촉할 우려가 있으므로 우선 이를 반드시 확인하여야 한다. 지하철의 경우 한정된 지하공간에 의한 구조물 시공오차 한계는 건축한계 보다 약500mm폭을 확보하도록 하고 있다. 그러므로 구조물 내공치수표(표3) 확인하고 켄트량 조정시 증, 감 치수를 반드시 확인하여 시공전 켄트량을 조정하고자 할 경우 전동차 편기로 인한 구조물의 내공치수를 검토하여야 한다.

표3. 지하 복선구조물 내공치수표

구분 반경 R	속도 V	곡선 반경 C=11.3* V <sup>2</sup> /R - 40 최대 160mm	완화 곡선장 L=600* C	확폭량 W=24,000/R	내측 편기 qc	외측 편기 qe	확도 W=2,250/R	높이 증량 h	내측 총증량 a=W+qc+S	외측 총증량 β=W-qe	구조물 치수					
											A	B	A'	B'	E	H
M	km/h	mm	m	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	A	B	A'	B'	E	H
120	33	63	38	300	181	51	19	70	400	149	2,500	2,350	2,600	2,250	4,850	5,320
130	37	79	47	185	235	64	17	87	428	121	2,530	2,380	2,630	2,230	4,860	5,340
140	39	83	50	171	238	68	16	91	425	100	2,530	2,310	2,630	2,230	4,840	5,330
150	40	81	49	160	232	66	15	88	407	94	2,510	2,300	2,630	2,200	4,810	5,340
200	50	104	61	120	280	83	11	108	420	37	2,530	2,240	2,630	2,140	4,770	5,300
250	60	123	74	96	300	103	9	128	455	0	2,560	2,200	2,660	2,100	4,760	5,380
300	65	139	71	80	339	100	8	124	427	0	2,530	2,200	2,630	2,100	4,730	5,380
350	70	158	71	69	336	99	6	123	411	0	2,520	2,200	2,620	2,100	4,720	5,380
400	75	175	71	60	339	100	6	124	405	0	2,510	2,200	2,610	2,100	4,710	5,380
500	80	195	63	48	300	97	5	112	353	0	2,490	2,200	2,600	2,100	4,690	5,370
600	80	81	49	40	232	95	4	89	276	0	2,380	2,200	2,480	2,100	4,580	5,340
700	80	63	38	34	181	51	3	70	218	0	2,320	2,200	2,430	2,100	4,520	5,320
800	80	50	30	30	144	40	3	57	177	0	2,280	2,200	2,380	2,100	4,480	5,310
1,000	80	32	19	24	92	25	2	37	118	0	2,220	2,200	2,330	2,100	4,420	5,290
1,200	80	25	12	20	58	16	2	23	80	4	2,180	2,210	2,280	2,110	4,390	5,280
1,500	80	8	5	16	23	6	2	9	41	10	2,150	2,210	2,250	2,110	4,360	5,260
2,000	80	0	0	12	0	0	1	0	13	12	2,120	2,220	2,220	2,120	4,340	5,250
최선	80	0	0	6	0	0	0	0	0	0	2,200	2,200	2,200	2,100	4,300	5,230

표4. 지하복선구조물 켄트량 조정 전, 후 내공치수표

구분	반경	속도	켄트	완화 곡선장 (L=600×C)	확폭량 W=24,000/R	내측 편기 (qc)	외측 편기 (qe)	스랙 S=2,250/R	높이 증량 (h)	내측 총증량 (a=W+qc+S)	외측 총증량 (a=W-qe)	A	B	A'	B'	E	H
단위	R	km/h	C	m	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
켄트량 조정전	250	60	123	74	96	350	103	9	128	455	0	2,560	2,200	2,660	2,100	4,760	5,380
켄트량 조정후	250	60	143	86	96	407	120	9	149	512	0	2,610	2,200	2,712	2,100	4,760	5,399
증,감	-	-	+20	+12	-	+57	+17	-	+21	+57	-	+50	-	+52	-	-	+19

표5. 캔트 인상시 차량 및 승강장 편기량

구 분	캔트10mm 인상시 편기량 산출	캔트30mm 인상시 편기량 산출	비 고
차량	높이 편기량(hc) $hc = L \times \sin\theta - Ho(1-\cos\theta)$ $L = G/2 + 904 = 1,654\text{mm}$ $\theta = \tan^{-1} \cdot C/G (=0.381966)$ $C = 10\text{mm}, G = 1,500\text{mm}$ $Ho = 4,750(\text{차량높이})$ $\therefore hc = 10.92 \approx 11\text{mm}$	$hc = L \times \sin\theta - Ho(1-\cos\theta)$ $L = G/2 + 904 + 1,654\text{mm}$ $\theta = \tan^{-1} C/G (= 1^\circ 08' 44.75'')$ $C = 30\text{mm}, G = 1,500\text{mm}$ $Ho = 4,750\text{mm}(\text{차량높이})$ $\therefore hc = 32.12 \approx 32\text{mm}$	
	내측 편기량(qc) $qc = H_1 \times \sin\theta - b_1 (1-\cos\theta)$ $H_1 (\text{차량상단 모서리 높이}) = 3,750\text{mm}$ $\theta = \tan^{-1} \cdot C/G (=0.381966)$ $C = 10\text{mm}, G = 1,500\text{mm}$ $b_1 = (\text{건축한계} -G)/2 = 1,050\text{mm}$ $\therefore qc = 24.99 \approx 25\text{mm}$	$qc = H_1 \times \sin\theta - b_1 (1-\cos\theta)$ $H_1 (\text{차량상단 모서리 높이}) = 3,750\text{mm}$ $\theta = \tan^{-1} \cdot C/G (1^\circ 08' 44.75'')$ $C = 30\text{mm}, G = 1,500\text{mm}$ $b_1 = (\text{건축한계} -G)/2 = 1,050\text{mm}$ $\therefore qc = 74.77 \approx 75\text{mm}$	
	외측 편기량(qe) $qe = H_2 \times \sin\theta + (G + b_1)(1-\cos\theta)$ $H_2 (\text{차량하단 모서리 높이}) = 400\text{mm}$ $\theta = \tan^{-1} \cdot C/G (=0.381966)$ $C = 10\text{mm}, G = 1,500\text{mm}$ $b_1 = (\text{차량한계} -G)/2 = 850\text{mm}$ $\therefore qe = 2.72 \approx 3\text{mm}$	$qe = H_2 \times \sin\theta + (G + b_1)(1-\cos\theta)$ $H_2 (\text{차량하단 모서리 높이}) = 400\text{mm}$ $\theta = \tan^{-1} \cdot C/G (1^\circ 08' 44.75'')$ $C = 30\text{mm}, G = 1,500\text{mm}$ $b_1 = (\text{차량한계} -G)/2 = 850\text{mm}$ $\therefore qe = 8.46 \approx 8\text{mm}$	
승강장 내측편기량(qf)	$qf = H_3 \times \sin\theta - b_2 (1-\cos\theta)$ $H_3 (\text{승강장높이}) = 1,100\text{mm}$ $\theta = \tan^{-1} \cdot C/G (=0.381966)$ $C = 10\text{mm}, G = 1,500\text{mm}$ $b_2 = (2,500-G)/2 = 500\text{mm}$ $\therefore qf = 7.32 \approx 8\text{mm}$	$qf = H_3 \times \sin\theta - b_2 (1-\cos\theta)$ $H_3 (\text{승강장높이}) = 1,100\text{mm}$ $\theta = \tan^{-1} \cdot C/G (1^\circ 08' 44.75'')$ $C = 30\text{mm}, G = 1,500\text{mm}$ $b_2 = (2,500-G)/2 = 500\text{mm}$ $\therefore qf = 21.89 \approx 22\text{mm}$	

표4에서와 같이 터널구간(Box포함) 곡선반경 R=250m의 구조물 내공치수 검토내용을 살펴보면, 캔트 20mm인상 시 차량의 편기량은 내측 약57mm, 외측 약17mm가 기울어지나 캔트량 인상으로 인한 건축한계의 침범우려가 없는 것으로 나타났으며, 또한 시공 전 캔트량을 조정하고자 캔트 인상시 전동차 편기로 인한 구조물의 내공치수를 검토한 결과(표5)를 살펴보면, 캔트 10mm, 30mm인상시 각각 내측편기량(qc) 약25mm, 75mm, 외측편기량(qe) 약3mm, 8mm, 높이편기량(hc) 약11mm, 32mm, 승강장 내측편기량(qf) 약 8mm, 22mm로 캔트 인상 시 구조물(건축)한계로 인한 문제가 없는 것으로 나타났다.

### 3.5.2 캔트량 인상에 따른 전차선 편위 변화

캔트량 변경시 전동차 판타그래프가 전차선 이탈우려가 있으므로 이 부분을 검토한 결과, 캔트 10mm 인상 시 전차선 편기량 약32mm 편위 변화가 생기며, 캔트20mm인상 시 약64mm 편위 변화가 있는 것으로 나타났다. 이처럼 전차선 편위량은 캔트량의 약3.2배가 된다는 것을 알 수가 있다. 이를 통해 현재 서울도시철도 건설기준에 관한 규칙 제4장 전기설비 제18조(전차선로) 제3항 전차선의 편차(편위)를 보면 궤도중심으로부터 좌우로 각각 250mm 이내로 규정되어 있어 캔트 인상에 따른 전차선 편위 문제점은 없다고 생각된다. 그러나 시공 시에는 반드시 관련부서와 협의 후 시행하는 것이 바람직하리라 사료된다.

### 3.5.3 승강장연단과 건축한계

승강장 연단에서의 캔트량 변경 시 건축한계와 차량한계(표6)를 참고하여 전동차 편기로 인한 승강장연단 접촉우려에 대해 캔트30mm, 슬랙4mm인 곡선반경 R=399m를 선정하여 캔트10mm 인상 시 차량이 홈 쪽으로 기울일 때와 홈 반대쪽으로 기울일 때의 증, 감량을 살펴보면 표7과 같다.

표6. 건축한계와 차량한계표(지하부)

구 분	폭	상부 높이	굴곡선 높이	상부 폭	승강장 높이	직선 승강장		곡선부 확폭
						궤도중심폭	간격	
구조물한계	4,100	5,250	4,850	3,100				
건축 한계	3,600	5,150	4,250	2,000	1,100	1,650	50	24,000 R
차량 한계	3,200	4,750	3,750	1,808		1,600		

표7. 전동차 편기로 인한 승강장 연단과 건축한계

차량이 홈쪽으로 기울일때의 건축한계	차량이 홈 반대쪽으로 기울일때의 건축한계
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 캔트인상 전(C=30mm)                             <math display="block">W=24,000/R= 60 \quad S=4 \quad C \times h/g = 22</math> <math display="block">= 1,650 + 60 + 4 + 22 = 1,736\text{mm}</math>                             여기서, ① W : 확폭 (W=24,000/R) ② R : 곡선반경                              ③ C : 캔트 ④ S : 스택                              ⑤ h : 레일면에서 승강장 연단높이                              ⑥ g : 레일과 레일중심간의 거리(1,500mm)                         </li> <li>■ 캔트인상 후(C=40mm)                             <math display="block">W=24,000/R= 60 \quad S=4 \quad C \times h/g = 29</math> <math display="block">= 1,650 + 60 + 4 + 29 = 1,743\text{mm}</math>                             여기서, ① W : 확폭 (W=24,000/R) ② R : 곡선반경                              ③ C : 캔트 ④ S : 스택                              ⑤ h : 레일면에서 승강장 연단높이                              ⑥ g : 레일과 레일중심간의 거리(1,500mm)                         </li> </ul> <p>∴ 캔트 30mm에서 40mm로 인상시  <math>= 1,736\text{mm} - 1,743\text{mm} = \text{증}7\text{mm}</math></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 캔트인상 전(C=30mm)                             <math display="block">W=24,000/R= 60 \quad C \times h/g = 22</math> <math display="block">= 1,650 + 60 - 22 = 1,688\text{mm}</math>                             여기서, ① W : 확폭 (W=24,000/R) ② R : 곡선반경                              ③ C : 캔트 ④ S : 스택                              ⑤ h : 레일면에서 승강장 연단높이                              ⑥ g : 레일과 레일중심간의 거리(1,500mm)                         </li> <li>■ 캔트인상 후(C=40mm)                             <math display="block">W=24,000/R= 60 \quad C \times h/g = 29</math> <math display="block">= 1,650 + 60 - 29 = 1,681\text{mm}</math>                             여기서, ① W : 확폭 (W=24,000/R) ② R : 곡선반경                              ③ C : 캔트 ④ S : 스택                              ⑤ h : 레일면에서 승강장 연단높이                              ⑥ g : 레일과 레일중심간의 거리(1,500mm)                         </li> </ul> <p>∴ 캔트 30mm에서 40mm로 인상시  <math>= 1,688 - 1,681 = \text{감} 7\text{mm}</math></p>

이처럼 캔트량 10mm인상 시 홈쪽으로 기울일때의 건축한계는 증7mm로 나타났으며, 차량이 홈 반대쪽으로 기울일때의 건축한계는 감 7mm로 나타났다. 이는 서울메트로 3, 4호선의 승강장과 차량한계 거리기준이 50mm인 점을 감안할 때 승강장구간 캔트10mm인상 시 증, 감 7mm로 승강장에서 캔트 인상 시 문제가 없는 것으로 나타났다. 아래 표8과 그림.7~9는 3호선 R=692.4m구간에서 자갈도상을 콘크리트도상으로 개량 시 실제 캔트를 12mm 조정하기 위해 검토했던 각종 데이터를 나타낸 것이다.

표8. 캔트변경 전, 후 비교(R=692.4m)

구 분	곡 선 장	캔 트	슬 랙	총 거	비 고
변 경 전	315m(완화곡선 123m, 원곡선 192m)	68mm	4mm	21mm	
변 경 후	315m(완화곡선 123m, 원곡선 192m)	80mm	0mm	21mm	

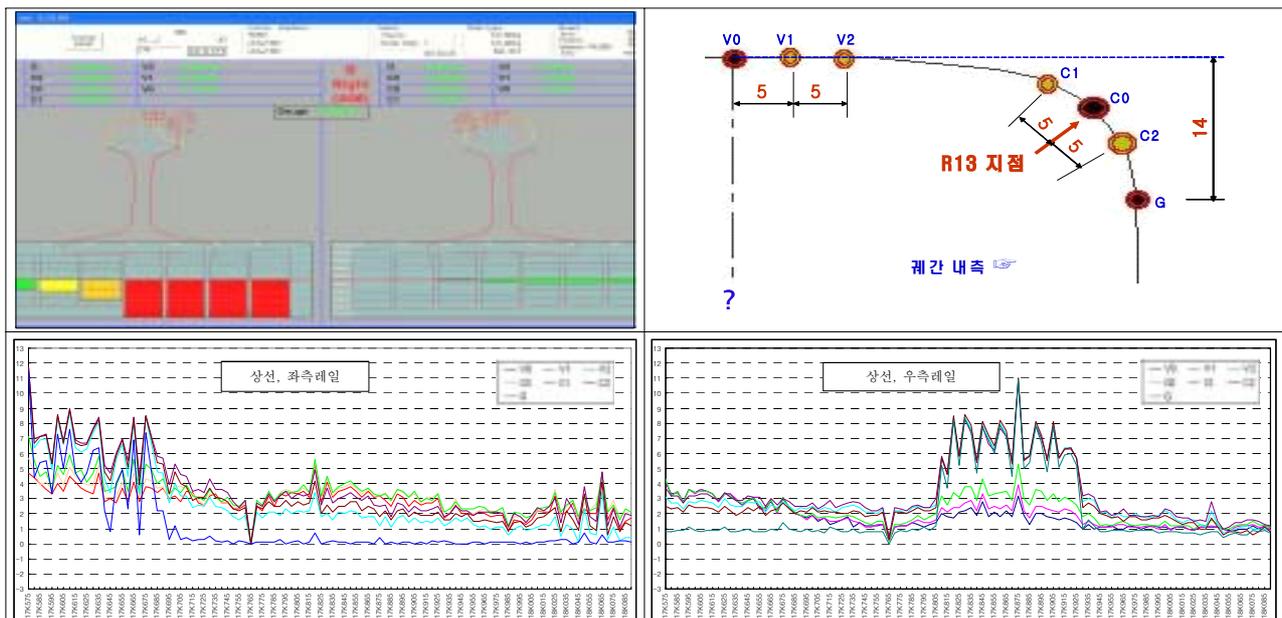


그림7. 마모 측정부위 및 데이터(레일마모측정장치)

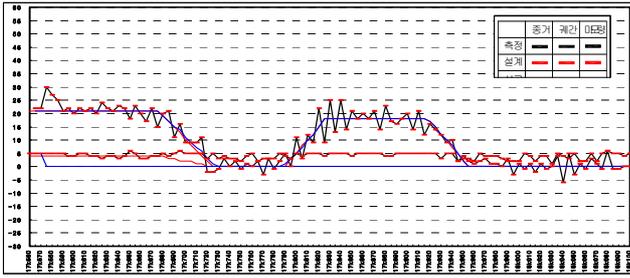


그림8. 궤간, 종거 측정

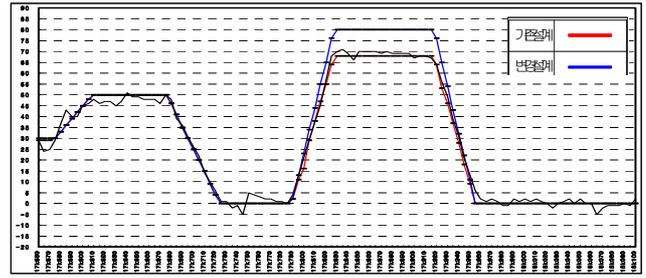


그림9. 설계 및 시공곡선

지금까지 캔트조정을 위한 각종 검토내용을 살펴보았으며, 이를 통해 부족캔트를 사전에 검토하여 현장 상태에 맞도록 캔트를 일정량 상향조정하면 현장 적용 및 열차운행에는 아무런 문제점이 없는 것으로 나타났다. 이처럼 열차운행선상에서의 부족캔트 조정 시 효율적인 레일관리를 위해서는 이론적인 캔트보다는 현장 상태에 적합한 캔트조정으로의 검토가 선행되어야 할 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구를 통해 곡선부 레일 측마모를 검토하고 부족캔트량과 레일마모와의 상관관계를 통해 향후 도상 개량 시 사전에 현장 부족캔트를 파악하여 타 시설물에 변화를 주지 않는 범위 내에서 적정 캔트를 확보함으로써 효율적인 레일관리 및 열차운행선상에서의 적정 캔트량 산출을 위한 구체적인 검토 방향을 제시하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 가) 곡선부 마모분포도 분석을 통해 수평구간보단 구배구간에서 그리고 원곡선 종점부, 정거장 시, 종점부 등 특정구간에서 마모량이 높게 나타나고 있다는 것을 알 수가 있었다. 이에 곡선상태에 맞는 적절한 마모저감 대책이 필요하다고 사료되나, 본문 분석에 사용된 데이터의 측정기간이 레일교환 후 1년 전후라는 짧은 기간과 이에 해당되는 몇 구간에 대하여 제한적으로 이루어졌으므로 향후 구간 별 장기간에 걸친 세부적이고 심층적인 마모분석이 필요하다고 사료된다.
- 나) 캔트설정공식 변경 및 열차운행속도 상승에 따른 레일마모량 분석을 통해 캔트 부족량을 검토한 결과 곡선부 캔트부족량이 레일마모에 일정부분 영향을 주고 있다는 것을 알 수가 있었다. 따라서 곡선별 현장상태에 맞도록 캔트 상향 조정 등을 통한 적정캔트 설정 노력이 필요하다고 사료된다.
- 다) 열차 운행선상에서의 캔트량 조정은 충분한 현장 검토가 선행되어야 하며, 캔트 상승 시 전차선 편위와 전차선 높이 등을 검토하여 기존의 시설물을 변경하지 않는 조건으로 캔트량을 조정하는 것이 필요하다. 또한 부족 캔트량 인상 시 관련부서와 전차선 편차(편위) 변화에 따른 업무 협의와, 캔트량 조정 시 궤도선형에 따른 차량의 내, 외측 편기량 변화로 인한 구조물(건축하계)을 확인하고, 공사시행 전 현장조사와 시공계획서를 통해 캔트조정과 관련 완화곡선 삽입 등을 검토하므로써, 이론적인 캔트보다는 현장에 가장 적합한 캔트조정이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

1. 홍철기, 양신추, 김연태 “부족캔트량과 레일마모의 상관관계 고찰” 한국철도학회 ‘01 추계학술대회 논문집 pp.481-487
2. 이시다 마코토 “레일과상마모의 원인과 대책” 제115회 철도 종합연구소 월례 발표회 요지
3. 이남진, 김정하, 남학기 “곡선 선로에서의 차륜답면과 레일 접촉에 대한 개념적 연구” 한국철도학회 ‘06춘계학술대회 논문집 pp.1128-1133
4. 서울메트로 “선로정비규정”, “도시철도 기술자료 및 현황 Part II”
5. 이희성, 이지하 “차륜/레일 시스템 최적화” 논문집
6. 허현무, 서정원, 권석진, 김남포 “국내철도 차륜/레일 형상 조합에 따른 차량 동특성 분석 연구” 한국철도학회 논문집 제8권 제5호 pp.483-489