

도시철도 열차운행속도와 레일마모 상관관계 분석

An analysis of the Correlation between the Urban Railway Train Speed and the Rail Wear

신정환*[†], 김태준*, 박용걸**, 최일윤***

Jeong Hwan Shin*[†], Tae Jun Kim*, Yong Gul Park**, Il Yoon Choi***

Abstract On the curved track of urban railway, appropriate cant according to curve radius and design speed should be considered in order to improve ride quality and prevent train derailment. But, the actual cant installed in the field is different from the balanced cant by reason of scheduled speed improvement, ride quality improvement at the reversed curve, noise reduction and speed down by ATO. In this study, to find out the impact of cant excess or deficiency which would be varied by the train running speed on rail wear, the correlation between the progress of rail wear and the amount of cant excess or deficiency was analyzed.

Keywords : Actual train speed, Cant, Side wear,

초 록 도시철도 곡선 궤도에서 승차감 향상 및 열차 탈선 방지를 위하여 적절한 캔트 부설이 고려되어야 한다. 그러나 표정속도 향상, 반향곡선에서의 승차감 향상, 소음저감 및 ATO 운전 에 따른 속도저하 등의 이유로 현장에 설치된 실제 캔트는 균형 캔트와 다르게 부설되어 있다. 본 연구에서는 열차 실제 주행 속도에 따른 캔트 과부족이 레일 마모에 미치는 영향을 파악하기 위하여 레일 마모 진행과 캔트 과부족량의 상관관계를 분석하였다.

주요어 : 차량운행속도, 캔트, 편마모

1. 서 론

열차를 운행하는 철도운영기관에서는 열차성능, 선로상태, 운행환경을 고려하여 구간별 열차 운행속도를 결정한다. 서울도시철도 5~8호선은 열차자동운전(ATO) 시스템에 의해서 열차가 운행되는데, 이때 ATO시스템의 구간별 열차 운행속도가 상기의 조건들이 반영된 것이다. 하지만 실제 열차의 운행속도는 ATO시스템에서 전달되는 속도 명령보다 3~5km/h 낮게 운행된다.

궤도의 곡선부에는 열차의 탈선방지와 승객의 승차감 향상 등을 위해서 적정의 캔트를 부설하게 되는데, 이때 캔트의 크기는 열차의 운행속도와 곡선반경에 따라서 결정된다. 하지

† 교신저자: 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 석사과정(2000989@smr.t.co.kr)

* 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 석사과정

** 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 교수, 공학박사

*** 한국철도기술연구원 고속철도연구본부 연구단장, 공학박사

만 운영단계에서의 실제 열차운행속도는 표정속도향상, 소음감소, 속도명령보다 낮은 열차운행 등으로 인해서 계획속도와 다른 구간이 나타난다.

이에 이 연구에서는 궤도 설계 및 시공시 계획된 열차 운행속도와 실제 주행하는 열차운행속도 차이로 인한 캔트의 과부족이 곡선부 레일관리의 중요 요소인 마모에 미치는 영향을 분석하는데 목적이 있다

2. 본 론

2.1 레일마모의 이론과 종류

레일마모는 차륜과 레일이 상대 운동을 하며 작용하는 표면간에 일어나는 연속적인 레일 표면의 제거현상이며, 응력 상호작용에 의한 연삭 마모와 표면피로, 물질 상호작용에 의한 응착마모 등으로 분류할 수 있다.

레일에 나타나는 마모의 형태는 직마모 및 편마모와 과상마모의 두가지로 분류할 수 있고, 이중 직마모 및 편마모는 차륜의 윤하중, 제동과 역행에 따른 접선력, 곡선 통과시 횡압, 윤축의 비틀림에 기인하는 접선력 등의 외력에 의해서 발생하는 레일 두부면과 궤간 내의 측면 마모로 곡선 외측 레일의 게이지 코너부는 차륜 플랜지로부터 횡압을 받아 큰 편마모가 발생하게 된다. 과상마모는 레일 두부 상면에 어떤 일정한 간격의 요철을 가진 과상으로 마모하는 현상으로 과상마모가 진행되면 진동, 소음이 크게 되어 승객에게 불쾌감을 주고 궤도재료의 마모, 이완이 촉진되어 보수량이 증대하는 외에 재료의 수명이 단축된다.

2.2 곡선구간의 균형캔트

열차가 곡선을 통과할 때 발생하는 원심력의 악영향을 방지하기 위해서 열차하중과 원심력의 합력이 궤간 내에 작용토록 외측레일을 내측레일보다 높게 경사를 붙이는데, 이를 캔트(Cant)라고 한다. 이때 합력이 궤간의 중심에 작용하도록 할때의 캔트를 균형캔트라고 한다.

Fig. 1에서 균형캔트의 크기를 계산하는 식은 다음과 같다

$$L = \sqrt{F^2 + W^2} = \sqrt{\left(M \frac{V^2}{R}\right)^2 + (Mg)^2} = M \sqrt{\left(\frac{V^2}{R}\right)^2 + g^2} \quad (1)$$

$$b = H \left(\frac{V^2}{Rg} - \frac{C_0}{G} \right) \quad (2)$$

식(2)에서 b=0가 될 때 균형캔트가 되므로,

$$C_0 = \frac{GV^2}{Rg} = \frac{GV^2}{Rg} \times \left(\frac{1}{3.6}\right)^2 = \frac{GV^2}{127R} \quad (3)$$

식(4)에서 $G=1,500\text{mm}$ 를 대입하면,

$$C_0 = \frac{1,500V^2}{127R} = 11.8 \frac{V^2}{R} \quad (4)$$

여기서 F = 원심력, W = 차량중량, M = 차량 질량, V = 열차속도, g = 중력가속도($9.8\text{m}/\text{sec}^2$)
 G = 궤간(차륜과 레일 접촉면과의 거리), H = 열차 중심 높이, R = 곡선반경

2.3 곡선의 열차운행속도에 따른 캔트량 분석

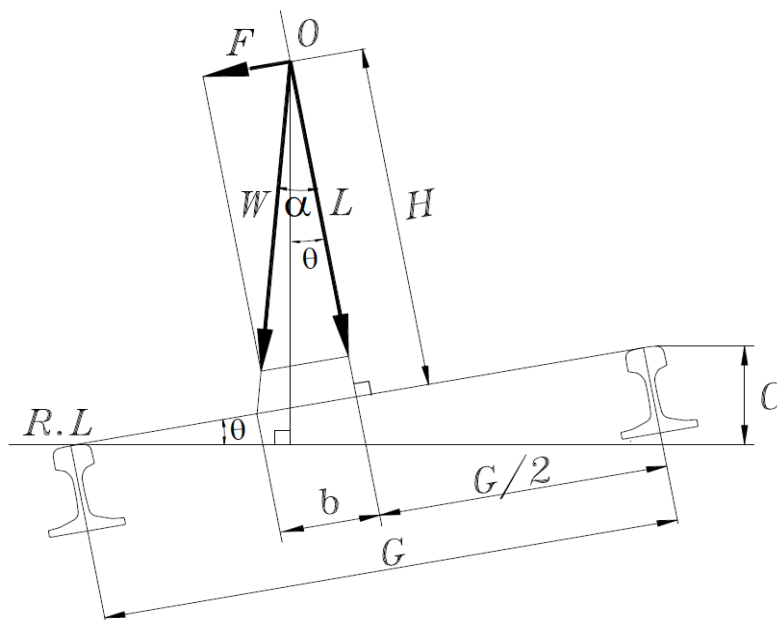


Fig. 1 Cant and Force

서울도시철도 5호선 방화역~강동역 구간 곡선부에서 궤도의 설계 캔트량과 열차의 실제 운행속도를 조사하고, 열차운행속도에 따른 균형캔트량을 계산하였다. 곡선은 $R=300$, $R=400$, $R=500$, $R=600$ 의 네가지로 분류하였고, 곡선내에 정거장이 포함된 개소는 분석 대상에서 제외하였다.

곡선별 캔트량과 열차운행속도는 다음과 같다.

Table 1 Train speed and Cant of R=300~600mm

구간	상하선 구분	시점 (km)	종점 (km)	곡선반경 (m)	부설칸트 (mm)-①	열차운행속도 (km/h)	균형칸트 (mm)-②	①-②
방화~개화산	상	2k918	3k316	300	153	32	40	113
마장~답십리	하	34k491	34k958	311	120	42	67	53
방화~개화산	하	2k910	3k320	300	120	49	94	26
답십리~장한평	상	35k722	35k986	299	120	55	119	1
답십리~장한평	하	35k718	35k982	299	120	55	119	1
까치산~신정	하	12k169	12k651	311	126	62	146	-20
아차산~광나루	상	39k047	39k352	397	126	50	74	52
청구~신금호	하	30k792	31k185	399	105	44	57	48
청구~신금호	상	30k792	31k185	399	105	55	89	16
영등포시장~신길	하	17k374	17k721	397	129	62	114	15
서대문~광화문	상	26k305	26k668	409	122	62	111	11
서대문~광화문	하	26k315	26k679	409	122	66	126	-4
영등포시장~신길	상	17k367	17k717	400	125	70	144	-19
발산~우장산	상	8k875	9k086	496	112	60	86	26
오목교~양평	하	14k595	14k976	502	115	63	93	22
애오개~충정로	하	24k082	24k351	500	111	63	94	17
애오개~충정로	상	24k087	24k358	510	111	65	98	13
동대문역사~청구	하	30k383	30k668	500	111	65	100	11
발산~우장산	하	8k885	9k079	496	112	75	133	-21
장한평~군자	상	37k237	37k427	600	86	65	83	3
서대문~광화문	상	25k963	26k127	600	86	68	91	-5
장한평~군자	상	36k981	37k162	600	86	72	102	-16
장한평~군자	상	36k600	36k810	600	86	74	108	-22
장한평~군자	하	36k956	37k137	600	86	74	108	-22
장한평~군자	하	36k575	36k786	600	86	75	110	-24
장한평~군자	하	37k210	37k401	600	86	75	110	-24

2.4 부설칸트와 열차운행속도에 따른 균형칸트와의 차이에 따른 편마모 분석

Table 1의 곡선별 부설칸트와 균형칸트와의 차이에 따른 레일마모 영향을 분석하기 위해서 2012년~2015년간 궤도검측차를 통해서 검측된 편마모량의 변화를 살펴보았다. 편마모 변화는 각 곡선별 최대 마모의 진행량을 기준으로 분석하였다.

각 곡선별 연간 편마모 진행량은 Table 2와 같다.

Table 2 Annual amount of rail wear in curves

구분	구간	년간 편마모 진행량	구분	구간	년간 편마모 진행량
R=300	방화~개화산(상)	0.99	R=500	발산~우장산(상)	1.17
	마장~답십리(하)	0.90		오목교~양평(하)	0.81
	방화~개화산(하)	0.76		애오개~충정로(하)	1.44
	답십리~장한평(상)	0.73		애오개~충정로(상)	1.96
	답십리~장한평(하)	0.36		동대문역사~청구(하)	1.33
	까치산~신정(하)	0.49		발산~우장산(하)	0.57
R=400	아차산~광나루(상)	0.65	R=600	장한평~군자(상)	0.50
	청구~신금호(하)	0.61		서대문~광화문(상)	0.88
	청구~신금호(상)	0.48		장한평~군자(상)	1.08
	영등포시장~신길(하)	0.43		장한평~군자(상)	1.37
	서대문~광화문(상)	0.48		장한평~군자(하)	1.20
	서대문~광화문(하)	0.24		장한평~군자(하)	3.56
	영등포시장~신길(상)	0.62		장한평~군자(하)	2.98

편마모 진행량을 곡선 반경별로 부설칸트와 열차속도에 따른 균형칸트의 차이에 따라 그래프로 나타내면 Fig. 2~Fig. 4 에서 보는바와 같이 R=500 곡선을 제외하고 차이의 절대값이 커질수록 연간 편마모 진행량도 커지는 경향을 보이고 있다.

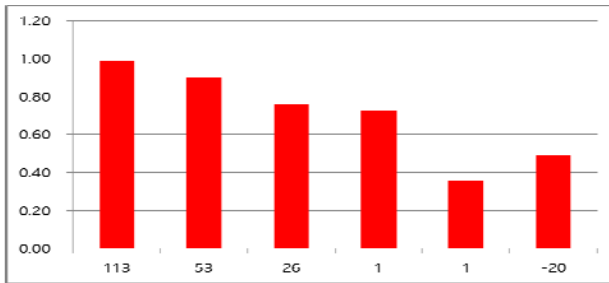


Fig. 2 Side wear graph of R=300m

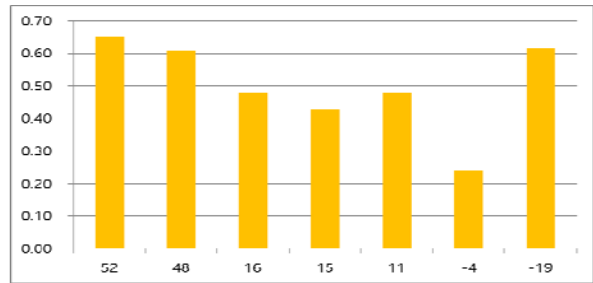


Fig. 3 Side wear graph of R=400m

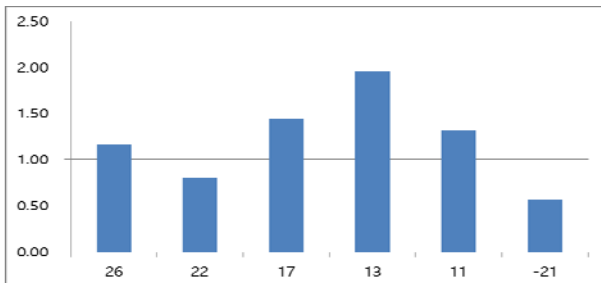


Fig. 4 Side wear graph of R=500m

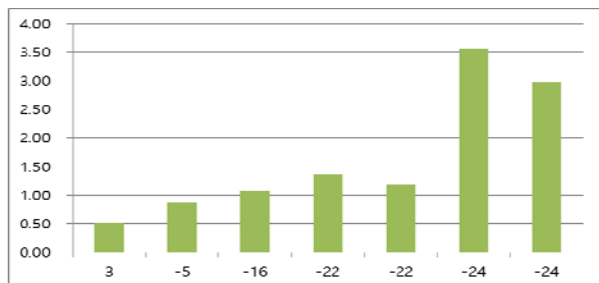


Fig. 5 Side wear graph of R=600m

3. 결 론

본 연구에서는 궤도의 설계시 고려되었던 차량운행속도가 아닌 실제 영업운행 단계에서의 열차 운행속도에 따른 부설캔트와 실제 균형캔트와의 차이를 확인하고, 이에 따른 레일 편마모와의 상관관계를 분석하였다.

그 결과 일반적으로 과캔트와 부족캔트 값이 커질수록 편마모 값이 커지는 것으로 분석되었다. 하지만 추가적으로 캔트값의 과부족으로 인한 레일의 편마모와 직마모 영향을 종합적으로 분석하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) 하관용(2008) 도시철도 차량의 감속도 변화율에 따른 레일마모 분석 및 감소 방안 연구 , 박사논문, 서울시립대학교 pp. 6~10
- (2) 김광은(2013) 도상개량에 따른 부설캔트 조정과 마모상관관계 연구, 석사논문, 서울과학기술대학교 pp. 5~8
- (3) 서울시 도시기반시설본부(2012) 서울지하철 9호선 2단계 궤도실시설계용역 보고서(2012, 서울시도시기반시설본부) pp. 27~33