

경량전철 고무차륜용 선로선형기준에 관한 연구

A Study on the Track Layout Criteria for the Light Rail Transit with Rubber Wheel

오지택* , 한승용** , 이안호*** , 윤태양****

Oh, Ji-Taek Han, Seung-Young Lee, An-Ho Yoon, Tae Yang

Abstract

This paper proposes the track layout criterion for the LRT(light rail transit). All criterions established concerning dimension and performance of LRT vehicles with rubber wheel. Using theoretical approach, adaptation and validity of criterions are verified. Especially, it were modified according to change of vehicle performance that criterions proposed previous version. Proposed criterions may provide a standard scheme for design and construction of the track layout on LRT.

1. 서론

경량전철은 지하철이나 전철보다는 규모가 작고 차량 운행이 자동화된 첨단 신교통 시스템을 말한다. 선진국에서는 대도시 내부 및 대도시와 소도시간 교통문제를 해결하기 위하여 기존 교통망에 최소의 영향을 주는 경전철 건설 수요가 급증하는 추세에 있으며 국내에서도 여러 도시에서 경전철 건설이 계획되고 있으며 이러한 건설은 지속적으로 증가될 것으로 예상된다. 또한 경량 전철 시스템은 기존 지하철 건설비용의 3분의 1 수준인 km 당 약 200억 원 내외 정도 소요되므로 지하철과 같은 대용량 운송에 비해 효율적일 수 있고 대도시의 지하철이 미치지 않는 지역 및 중소도시 등을 중심으로 그 수요가 점점 높아질 것으로 판단된다. 고무차륜용 경량전철의 선로선형의 경우 도로선형의 특성과 철도고유의 특성이 혼합되어 있다. 도심지에 건설될 경량전철의 경우 타 철도시스템에 비하여 선로선형제약이 크게 작용하는 관계로 선로선형기준의 타당성과 범위는 공사비, 공사기간 등과 매우 밀접한 중요한 인자가 된다. 본 연구에서는 고무차륜용 경량전철 차량의 성능과 제원을 고려하여 곡선 통과속도, 시·제동에 따른 선형길이, 종곡선 및 원곡선 등을 검토하였다.

* 한국철도기술연구원, 철도구조물연구팀장, 공학박사, 031-461-0234(교265), jttoh@krii.re.kr

** 한국철도기술연구원, 철도구조물연구팀, 연구원, 공학석사, 031-461-8531(교287), aceno2000@yahoo.co.kr

*** 한국철도기술연구원, 경량전철연구팀, 선임연구원, 공학석사, 031-461-8531(교427), ahlee@krii.re.kr

**** 포항산업과학연구원 토목연구팀장·공학박사

2. 경량전철 고무차륜용 차량제원 및 목표사양

현재 개발중인 한국형 경량전철차량은 AGT시스템 고무차륜 차량으로 목표사양(안)은 다음 표 1에 나타내었다. 그림 1은 고무차륜용 차량 4량 및 6량 1편성에 대한 하중선도를 나타낸다.

표 1. 경량전철 고무차량 목표사양(안)

항 목	표준사양	항 목	표준사양	
차 량 편 성	4량 혹은 6량 1편성	최고운행속도	60km/h 이상	
최 급 구 배	58%	가 속 도	3.5km/h/s	
최소곡선반경	본선 40m, 측선 30m	감속도	상용	3.5km/h/s
			비상	4.5km/h/s
계 간	1,700mm	승강장연단높이	1,050mm(주행면기준)	
최대승객하중	6톤/량	연결면간거리	9,640mm(1량기준)	
만 차 중 량	18톤	차 체 길 이	9,140mm(1량기준)	
공 차 중 량	12톤	대차중심간거리	5,300mm	
최대축중(만차)	9톤	대차축간거리	-	
최대축중(공차)	6톤	최 대 차 체 폭	2,400mm	
성능최고속도	70km/h이상	지 붕 높 이	3,500mm(주행면기준)	

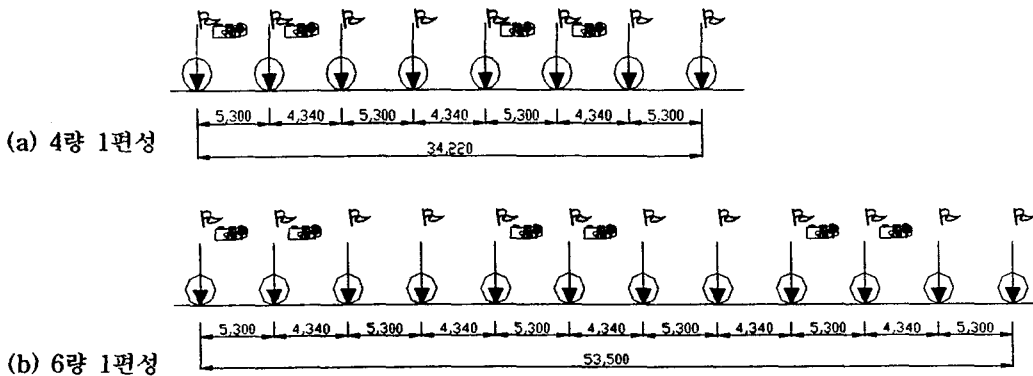


그림 1. 고무차륜용 하중선도 (W=공차 또는 만차중량)

3. 경량전철 고무차량의 선로선형기준(안)

3.1 속도규정

경량전철 고무차량 차량의 성능 최고속도는 70km/h이며 운행 최고속도는 60km/h로 설계되어 있다. 곡선 반경별 주행속도(안)은 다음과 같은 식 (1)을 이용한다.

$$V = \sqrt{127R(f+i)} \quad (1)$$

여기서 V =곡선주행속도(km/h), R =곡선반경(m), f =차륜과 주행면 마찰계수로 0.3(습윤상태, 80 km/h 주행 중 정지시)을 사용하였고 i =횡단구배이다. 경량전철 고무차량 차량의 목표사양(안)에 근거하여 최대구배(58%) 및 평지 주행시 고무차량의 곡선반경별 통과속도는 다음 표 2보다 작아야 한다. f 의 값은 콘크리트 포장에는 0.4~0.6, 아스팔트 포장에서는 0.4~0.8이다. 콘크리트 포장의 경우 습윤상태에서 시속 70km/h로 주행시 동마찰계수는 0.3이 나온다. 표 2는 마찰계수를 0.3, 횡단구배를 58%로 사용하여 구하였다.

표 2. 곡선반경에 따른 곡선통과 속도

곡선 반경	곡선통과속도		곡선 반경	곡선통과속도	
	평지	구배		평지	구배
40	39	42	50	43	47
60	47	52	70	51	56
80	55	60	90	58	64
100	61	67	150	75	82

표 3. 차량의 가속시 소요시간 및 주행거리

속도 (km/h)	10	20	30	40	50	60
소요시간 (sec)	2.78	5.56	8.33	11.11	13.89	16.67
주행거리 (m)	3.97	15.88	35.72	63.51	99.23	142.89

경량전철 고무차량 차량 가속속도는 가속도는 3.50km/h/s이며 감속도는 상용시 3.50km/h/s, 비상시 4.50km/h/s이다. 고무차량 차량의 가·감속도 능력에 따른 소요시간($V(t)$) 및 주행거리(S)는 다음 표 3, 표 4 와 같다.

표 4. 60km/h에서 제동시 소요시간 및 주행거리

속도 (km/h)	상용감속시(3.5km/h/s)						비상감속시(4.5km/h/s)					
	50	40	30	20	10	0	50	40	30	20	10	0
소요시간(sec)	2.86	5.72	8.57	11.43	14.29	17.15	2.22	4.44	6.67	8.89	11.11	13.33
소요길이(m)	43.7	79.4	107.2	127.0	138.9	142.9	34.0	61.7	83.3	98.8	108.0	111.1
소요길이(m)*	99.2	63.5	35.7	15.9	4.0	0.00	77.2	49.4	27.8	12.4	3.1	0.0

* 소요길이: 각 주행속도대에서 정지시까지의 소요길이

3.2 최소곡선반경

경량전철 고무차륜용 차량의 최소곡선반경은 본선 40m, 측선에서는 30m를 목표로 설계되어 있다. 원곡선의 길이는 다음의 식 (2)를 이용하여 구할 수 있다.

$$L = V \cdot T = \frac{V}{3.6} (m \cdot sec) \times T(sec) = V/3.6 \cdot 1.5 = 0.4167 V(km/h) \quad (2)$$

식 (2)에서 V=열차속도(km/h), L=곡선길이(m)이며 T=차량횡진동주기(sec)이다. 경량전철 고무차륜 차량의 차량횡진동주기를 1.5sec로 가정시 원곡선의 길이 및 원심가속도는 다음 표 5 같으며 곡선주행시 원심가속도 $\alpha_{원심}(g)$ 는 다음 식 (3)으로 구할 수 있다.

$$\alpha_{원심} = \frac{V^2}{R} = \frac{V(km/h)/3.6}{R(m)} \quad (3)$$

표 5. 곡선반경에 따른 곡선길이 및 원심가속도

곡선반경(m)		30	40	50	60	70	80	90	100	150
운행속도 (km/h)	100%	37	42	47	52	56	60	64	67	82
	80%	29	33	37	41	44	48	51	53	65
곡선최소 길이(m)	100%	16	18	20	22	24	25	27	28	34
	80%	12	14	16	17	19	20	21	22	27
원심 가속도(g)	100%	0.035	0.030	0.027	0.025	0.023	0.021	0.020	0.019	0.015
	80%	0.027	0.023	0.021	0.019	0.018	0.017	0.016	0.015	0.012

3.3 최소곡선반경

경량전철 고무차륜의 최소곡선반경(안)은 본선에서는 40m, 정거장은 300m이며 측선에서는 30m이다. 최소곡선반경에 대해서는 설계 최고 속도별로 곡선반경이 정해지고 있는 것이 일반적이다. 열차가 설계 최고속도에 가까운 속도를 유지할 수 있도록 하기 위하여 일반적인 차량이 소요 캔트 부족량의 범위 내에서 설계 최고속도의 80% 정도의 속도를 유지할 수 있는 것을 기준으로 하고 있다. 최소곡선반경은 횡단구배를 "0"으로 하여 차량의 곡선의방 전도에 대한 안전율(중력과 원심력 합력의 작용점과 궤도중심으로부터의 거리)을 일정하게 하여 구한 다음 식 (4)를 이용한다.

$$R = \frac{2aHV^2}{127G} \quad (4)$$

여기서 V =열차속도(km/h)로 최고성능 속도의 80%를 사용하며, H =차량 중심 높이(mm), G =궤간(mm)이며 a =안전율로 통상 3을 사용한다. 최소곡선반경을 곡선운행 속도뿐만 아니라 차량의 제원과 캔트의 영향 등을 복합적으로 고려하여야 한다.

3.4 종곡선

경량전철 종곡선의 목표(안)는 다음과 같다. 구배차 5% 초과하는 곳에는 종곡선을 설치해야 하며 곡선에 있는 구배는 곡선보정을 한 구배를 그 한도로 한다. 종곡선의 곡선반경은 300m이상(안)으로 하며 그 길이는 다음 식 (5)와 같다.

$$L = \frac{R}{2} \left(\frac{m}{1,000} \pm \frac{n}{1,000} \right) \quad (5)$$

1) 종곡선 반경의 검토

종곡선은 원곡선으로 고려하여 계산하지만 부설에 있어서는 편의상 2차 포물선을 사용한다. 종곡선 반경을 결정하는 이유는 전후 차량으로부터의 압축력 및 견인력에 의한 차량부상과 볼록형(凸)의 경우 원심력에 의한 차량부상에 대한 검토가 필요하기 때문이다. 볼록부(凸)에 있어서 인접 차량으로 밀려지면 상향의 힘을 받는다. 직선부에 있어서 반경 1,000m의 종곡선을 삽입한 경우에 차량이 상향력 때문에 부상하려고 할 때의 안전율을 고려하면 다음과 같다. 다음 그림 2에서 평형 방정식을 적용하면 $Vl - \frac{W}{2} + Al_0 = 0$ 와 같고 $A = W - V$, $V = \sin \phi$, $l_0 = l/4.44$ 을 식에 대입하면 $W = 2.82F \sin \phi$ 가 된다. 여기서 W =차량의 하중, F =연결기에 걸리는 길이 방향의 최대의 힘이고 ϕ =두 차량이 축 방향으로 만나는 각도이다. F 의 값은 경량전철 고무차륜의 경우 공차하중인 12t에 대한 부상안전도를 종곡선 반경이 1000m인 경우에 대하여 검토하였다. 종곡선 반경이 1000m인 경우 부상을 방지하기 위한 최소차량하중은 0.244톤으로 매우 작은 값을 나타내었다. 이를 만차하중과 비교하면 종곡선 반경이 1000m인 경우 표 6과 같이 안전율은 약 49로 매우 안전함을 확인할 수 있다.

일반 철도에서의 부상에 대한 안전율이 통상 10인 점을 감안하여 안전율이 10일 경우에 대한 종곡선 반경 R_{10} 를 역으로 산출하면 다음과 같다. $\sin \phi$ 의 최대치는 $4.82/R_{10}$ 를 $W = 2.82F \sin \phi$ 에 적용하면 $W = 244.66/R_{10}$ 가 된다. 부상방지를 위한 W 와 실 차량의 공차하중 12t에 대한 안전율 10을 고려하면 안전율 10에 대한 종곡선 최소반경 R_{10} 는 202m가 된다.

또한 이와는 별도로 종곡선을 주행하는 속도에 따라 원심부상이 발생가능하며, 이에 대한 검토는 $R_{\text{원심}} = V^2/12.7$ 을 이용하여 검토한다. 여기서 $R_{\text{원심}}$ 은 원심부상에 대한 종곡선 반경이고 V 는 속도(km/h)이다. 고무차륜의 경우 최고 운행속도인 60km/h를 적용하면 $R_{\text{원심}} = 283.47\text{m}$ 가 된다. 본 연구에서는 안전율 10을 만족하며 원심부상을 방지하기 위한 최소 종곡선 반경 $R_{\text{종곡선}}$ 을 300m로 제안하였다.

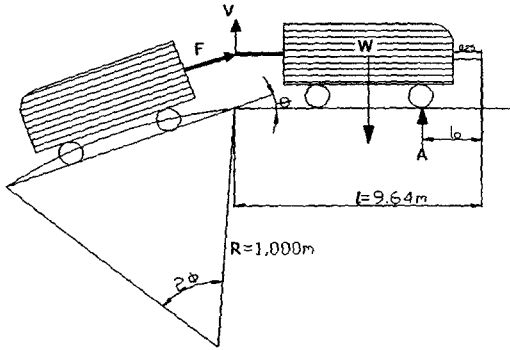


그림 2. 종곡선 통과시 부상안전도 평가

표 6. 종곡선반경 1000m에 대한 부상안전도를

	차량 길이	공차 중량	$\sin \phi$ 최대치	$W(t)$	안전율
고무 차륜	9.64m (1량기준)	12t	0.0048	0.244	≈ 49

4. 완화곡선(Clothoid)

Clothoid의 기본식은 $R \cdot L = A^2$ 이며 여기서 R =원곡선 반경, L =완화곡선의 길이 그리고 A =Clothoid 매개변수이다. 완화곡선의 은 다음 표 7과 와 같다.

표 7. 완화곡선의 최소길이

설계속도(km/h)	완화곡선 최소길이(m)
60	35
50	30
40	25
30	20
20	15

5. 결론

본 제안에서는 경량전철에 대한 필요성이 증대한 현 시점에 있어 경량전철을 건설하고자 하는 지자체 및 산업체에 토목구조물의 선형설계(안)을 향후 개발될 한국형 경량전철차량에 대응하여 제시하였다. 제시된 선형설계(안)은 차량개발기관과의 시스템엔지니어링을 통하여 표준화를 정립 하는데 그 목표를 두고 있다.

참고문헌

1. 鐵道曲線(1991), 교우사, 일본
2. 正矢と曲線の整正(1977), 카네코계측공업주식회사, 일본
3. 도시철도차량표준사양(1998), 건설교통부

감사의 글

본 연구는 건설교통부 “경량전철시스템 기술개발사업(선로구축물분야)”의 일부로서 수행되었으며 주관기관인 포항산업과학연구원의 연구비 및 제반지원에 감사 드립니다.