

경량전철 선로설계기준에 관한 연구

A Study on Track Design Criteria of Light Rail Transit System

이안호*
Lee, An Ho

이덕영**
Lee, Duck Young

ABSTRACT

Recently Light Rail Transit(LRT) systems, especially full automatic systems are strongly issued by many provinces and major cities due to it's own characteristic for economical, environmental and sufficient transportation capacity. But LRT design criteria should be modified according to Rolling Stock's properties. -size, arrangement of bogie and wheel, power of traction motor etc,

This thesis suggest for basic standard design criteria of Rubber Tired Light Rail Transit system.

1. 서론

현재 우리나라에서 그 필요성이 크게 부각되어 관심이 부각되고 있는 경전철과 관련, 설계기준의 정립이 되지 않아 발주기관별로, 사업 시행자별로 동일한 차량형식이어도 설계시에는 많은 차이가 발생할 수 있는 가능성이 많다. 따라서 이제 본격적으로 건설이 추진되고 있는 경량전철에 대하여 선로 설계기준을 제시함으로써 우리나라에서 일관성 있는 경량전철 사업이 추진될 수 있기를 기대합니다.

설계기준을 이해하기 위하여 간단히 경량전철의 특징에 대하여 2장에서 언급하였으며, 3, 4장에서는 현재 개발중인 측방안내방식의 고무차륜 AGT 시스템에 대한 목표사양 및 선로선형기준을 경량전철 시스템 기술개발사업의 연구결과를 요약하여 정리하였다.

2. 경량전철의 특징

(1) 경량전철의 특징

- ① 지가가 비싼 도시의 지형에 맞도록 기존 지하철 및 전철에 비하여 급구배, 급곡선 주행성이 우수하고 정거장길이가 기존지하철 및 전철에 비하여 1/2이하로 짧고, 차량크기, 구조물의 크기가 작아 기존 지하철보다 토목, 건축 등 고정 시설비가 적게 소요된다.
- ② 가·감속 능력이 뛰어나 지하철에 비하여 정거장 간격(약500m)의 축소가 가능하여 접근성이 양호하다.
- ③ 제3궤조의 적용으로 미관이 우수하지만 평면교차의 기술적 어려움으로 지상구간에 적용은 제한적이다.
- ④ 철저한 시스템간 인터페이스 관리
토목, 궤도, 신호, 통신, 전차선, 제어 등 여러 관련분야가 상호 밀접하게 연계되어져야 하므로 완벽한 Coordination 시스템이 구축되어져야 한다.

3. 경량전철 고무차륜용 차량제원 및 목표사양

현재 개발중인 한국형 경량전철차량은 AGT시스템 고무차륜 차량으로 목표사양(안)은 다음 표.1에 나타내었다.

*정회원 · 한국철도기술연구원 경량전철연구팀장

**정회원 · (주)유신코퍼레이션 교통시설연구실

표.1 경량전철 고무차량 목표사양(안)

항 목	표준사양	항 목	표준사양	
차 량 편 성	2, 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
케 간	1,700mm	승강장연단높이	1,080mm(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)	

4. 경량전철 고무차량의 선로선형기준(안)

4.1 속도규정

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

$$V^2 \leq 127R(f+i) \quad (1)$$

여기서 V =곡선주행속도(km/h), R =곡선반경(m), f =차륜과 바닥면의 마찰계수로 0.3(습윤상태, 80km/h 주행 중 정지시)을 사용하였고 i =횡단구배이다. 경량전철 고무차륜 차량의 목표사양(안)에 근거하여 최대구배(58%) 및 평지 주행시 고무차륜의 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 80km/h로 주행시 동마찰계수는 0.3이 나온다. 표.2는 마찰계수를 0.3, 횡단구배를 60%로 사용하여 구하였다.

표.2 곡선반경에 따른 곡선통과 속도

곡선 반경	구배운행속도 (i=60%)	곡선 반경	구배운행속도 (i=60%)
30	37	40	42
50	47	60	52
70	56	80	60
90	64	100	67

표.3 차량의 가속시 소요시간 및 주행거리

속도 (km/h)	10	20	30	40	50	60
소요시간 (sec)	2.86	5.72	8.57	11.43	14.29	17.15
주행거리 (m)	3.97	15.88	35.72	63.51	99.23	142.89

경량전철 고무차륜 차량 가속속도는 가속도는 3.50km/h/s이며 감속도는 상용시 3.50km/h/s, 비상시 4.50km/h/s이다. 고무차륜 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

4.2 최소곡선반경

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

$$L = V \cdot T = \frac{V}{3.6} (m \cdot sec) \times T(sec) \quad (2)$$

식 (2)에서 V =열차속도(km/h), L =곡선길이(m)이며 T =차량횡진동주기(sec)이다. 경량전철 고무차륜 차량(만차조건)의 차량횡진동주기를 2.17≈2.22sec로 가정시 원곡선의 길이 및 원심가속도는 다음 표. 5 같다.

표.5 최대 횡간구배시 원곡선의 최소길이

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%	2.17sec	23	26	29	32	34	37	39	41	50
		2.20sec	23	26	29	32	35	37	40	41	51
	80%	2.17sec	18	21	23	26	27	29	31	33	40
		2.20sec	19	21	23	26	28	30	32	33	41

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.

4.3 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 1,000m이상(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 인접차량으로 밀려지면 상향의 힘을 받는다. 직선부에 있어서 반경 1,000m의 종곡선을 삼입한 경우에 차량이 상향력 때문에 부상하려고 할 때의 안전율을 고려하면 다음과 같다. 다음 그림 2에서 평형방정식을 적용하면

$$Vl - \frac{Wl}{2} + Al_0 = 0 \quad \text{와} \quad A = W - V \quad V = \sin \phi \quad l_0 = \frac{l}{4} \quad \text{을} \quad \text{식에} \quad \text{대입하면}$$

$W = 3.00F \sin \phi$ 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 0.259톤으로 매우 작은 값을 나타내었다. 이를 만차하중과 비교하면 종곡선 반경이 1000m인 경우 표.6과 같이 안전율은 약 46로 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 $R_{\text{원심}} = 283.5\text{m} < 1,000\text{m}$ 가 이므로 종곡선 반경 1,000m는 충분하다고 할 수 있다.

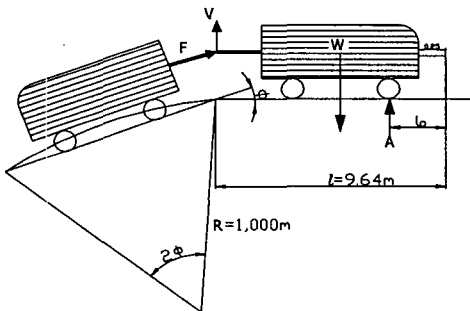


그림.1 종곡선 통과시 부상안전도 평가

표.6 종곡선반경 1000m에 대한 부상안전율

	차량 길이	공차 중량	$\sin \phi$ 최대치	$W(t)$	안전율
고무차륜	9.64m (1량기준)	12t	0.0048	0.259	≈46

4.4 완화곡선(Clothoid)

Clothoid의 기본식은 $R.L = A^2$ 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

4.5 캔트

최대 캔트량을 160mm, 허용캔트부족량을 100mm라고 하였을 때 곡선통과조건은 다음 표.8과 같다.

- 경량전철 본선 급곡선부 주행 목표 속도
 $70\text{km/h} \times 0.8 = 56\text{km/h}$ (본선속도 대비 80% 수준),
 $70\text{km/h} \times 0.7 = 49\text{km/h}$ (본선속도 대비 70% 수준)

표.8 최고속도의 80% 및 70% 주행에 대한 최소곡선반경(Rmin)

		49km/h	56km/h
C=160mm	C' = 0mm	177m	232m
	C' = 100mm	109m	143m

표.9 경량전철 구배 사양

	구배
본 선	58‰이하
정거장	5‰이하
측 선	58‰이하

4.6 구배

구배의 완급은 철도에서는 일반적으로 고저차를 수평거리로 나눈 값을 1,000분율(‰, Permillage)로 나타내며, 진행방향에 따라 상구배, 하구배로 구별한다. 경량전철의 구배의 목표(안)은 표.9와과 같다.

4.7 건축한계

경량전철 차량을 제작할 때, 직선의 수평 궤도 또는 주행로상에 정지하여 있는 상태에 있어서 차량의 어떠한 부분도 이 보다 벗어나는 것이 허용되지 않는 한계를 차량한계(vehicle gauge)로 정의한다. 그것에 대하여 선로상을 주행하는 차량에 안전한 일정 공간을 확보시켜 건조물을 포함하여 그 외에 모든 시설이 차량에 접촉하지 않도록 선로에 따라 설정되는 시설의 어떠한 부분도 들어오는 것이 허용되지 않는 한계를 건축한계(construction gauge)로 정의한다. 즉 차량이 선로를 운행할 때 주위에 인접한 건조물 등이 접촉하는 위험성을 방지하기 위하여 일정한 공간으로 설정한 한계를 말한다. 이들의 한계에 의하여 지상측에서의 차량의 접촉 및 차량측에서의 지상 구조물 등에의 접촉을 방지하고 있다. 또한 차량한계가 건축한계의 내측에 포함되는 치수로 되어 운전중에 차량동요 등에 의한 편의에도 안전하도록 설정되어 있다.

곡선상을 주행하는 차량의 전후 양끝은 곡선밖으로, 중앙부는 곡선의 안쪽으로 편기하게 되며 직선부분의 간격과 같게 하기 위해서 곡선에서 발생하는 차량의 편기량만큼 건축한계폭을 확대하여야 한다. 또한 전기차운전구간은 건축한계를 차량상부시설만큼 확대하고 여기에 가공전차선의 시설이 침범하지 않도록 하여야 한다.

- 곡선반경과 차량편기량, 차량길이와의 상관관계

- 차량 중앙부에서의 편기량

$$R^2 = \left(\frac{l}{2}\right)^2 + (R - \delta_2)^2, \quad \delta_2 = \frac{l^2}{8R} \quad (6)$$

- 차량 전·후부에서의 편기량

$$\delta_1 = M - \delta_2 = \frac{m(m+l)}{2R} \quad (7)$$

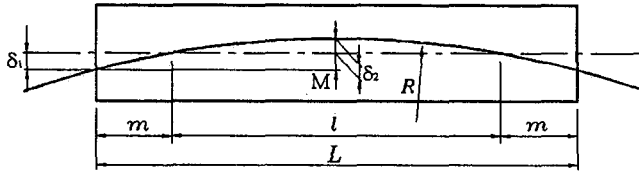


그림 2 곡선에서 차량편기

5. 결론

이상의 결과를 정리하여 고무차륜 AGT 경량전철의 선로설계기준을 제시하고자 한다.

표 2 측방 안내형 고무차륜 AGT 경량전철의 선로설계기준(안)

항 목		기 준	비 고
차량안내방식		측방안내 레도방식	<ul style="list-style-type: none"> 측방안내레일 높이 주행면으로부터 210mm~410mm 측방안내레일면: 레도중심으로부터 1450mm
레 간		1,700mm	주행륜 중심간 거리
최소 곡선 반경	본 선	40m 이상	부득이한 경우 30m까지 축소할 수 있다.
	정거장	-	
곡선 길이	측 선	30m	
	순원곡선	최대 차량길이 이상	
	완화곡선	$L = 6.94VC$	
반향곡선 (직선의 삽입)		최대 차량길이 이상	지형상 직선을 삽입 할 수 없는 부득이한 때에는 상대하는 양 완화곡선을 직접 연결 한다.
횡단구배 (Superelevation)		$i = \frac{V^2}{1.27R}$	i :경사량(%), R :곡선반경(m), V :열차속도(kph)
곡선부에서 건축한계의 확폭량(W)		$W = \frac{6,000}{R}$	<ul style="list-style-type: none"> 곡선부에서의 건축한계의 확대는 곡선반경 500m이하의 곡선에 대하여 고려한다. W=확폭량(mm), R=곡선반경(m)
선로 구배	본 선	58/1000 이하	곡선에 있는 구배는 곡선저항에 따라 보정하는 것으로 한다.
	정거장	5/1000 이하	
	측 선	58/1000 이하	
종곡선 제원	설치장소	구배차 10/1000 초과	
	곡선반경	1,000m 이상	부득이한 경우 열차운행에 지장이 없는 범위로 반경 200m까지 축소할 수 있다.
레도중심간격		3,700mm이상	<ul style="list-style-type: none"> 중간 점검 및 대피통로 폭750mm 설치전제 곡선부에 있어서는 건축 한계의 확폭량을 고려하여 레도중심 간격을 확보하여야 한다.

참고문헌

1. "도시철도차량표준사양", 건설교통부, 1998
2. "경량전철기술" 한국철도기술연구원, 2001
3. "경량전철 기술개발사업 4차년도 연구결과보고서(선로구축물 분야)", RIST, 2002