

# 주행조건을 고려한 고무차륜 경량전철의 기본설계

## The Basic Design of Rubber tire AGT Considering Running Condition

이은규<sup>1</sup>, 김상용<sup>2</sup>, 한석윤<sup>3</sup>

Lee, Eun-Kyu Kim, Sang-Young Han, Seok-Youn

**Key Words** : Rubber tire(고무타이어), Light-rail train(경량전철), Traction Control(추진제어)

### Abstract

A number of variables and environment are concerned for the basic design of train. The design of train can be optimized by the running simulation. And using the simulation result the consuming energy, regenerating power, adhesion coefficient, train traction control capacity are respectable. Considering these variables and for more information operating time, operating period, standard velocity and limit speed, the all factors of train are optimized. The light-rail train is mainly divided into linear motor train, road surface train, iron wheel train and rubber tire train, and the most profitable one for adhesion coefficient is rubber tire train and the train will be designed.

### 1. 서 론

차량의 기본설계를 하기 위해서는 수많은 항목의 변수와 환경을 고려하게 된다. 그 중에서 열차의 주행성능은 시뮬레이션을 통하여 차량의 성능과 운행을 고려한 최적의 편성을 구성할 수 있으며 열차가 운행될 실 노선을 대상으로 주행중의 소비에너지, 회생력, 점착 계수, 차량 추진 제어장치의 용량 등을 예측할 수 있으며, 열차의 운행시간 및 운행 간격, 표정속도, 열차의 속도제한 등이 고려된 차량의 용량을 예측하여 설계 할 수 있다. 경량전철의 종류로는 리니어 모터형 경전철과 노면전철, 철제차륜 경전철, 고무차륜 경전철로 크게 구분할 수 있지만 그 중에서도 점착계수에 가장 유리한 고무차륜의 경전철에 대하여 차량의 기본 설계를 검토하기로 한다. 고무차륜 경전철을 설계하는데 가장 중요한 항목은 차량의 하중과 운행노선 조건, 주행저항, 허용 점착계수 등을 고려한 차량운행 조건이 필요하게되며 이를 고려하여 차량의 성능을 계산하고 추진장치의 용량과 회생량을 고려하게 되고 제동치와 견인 전동기의 용량 등을 결정할 수 있게 되며 이를 토대로 선로조건, 운전조건, 차량조건 등을 고려한 주행 시뮬레이션을 통하여 차량의 성능을 검토하게 된다.

---

\*1 우진산전 기술연구소 책임연구원, 정회원

\*2 우진산전 기술연구소장, 정회원

\*3 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

본 논문에서는 현재 (주)우진산전에서 수행중인 경량전철 개발 프로젝트에서 고무차륜 경량 전철의 성능이 표준 사양에 부합하는지를 검토하고 경전철의 특성상 높은 구배 조건과 급한 곡선이 존재하는 노선조건을 고려하여 정상조건과 비상조건에서 차량의 성능을 시뮬레이션하여 차량의 성능을 검토한다. 또한, 장치의 용량을 고려하여 System의 설계를 추진하여 고무차륜 경전철의 성능을 검증하고자 한다.

## 2. 고무차륜 경량전철 차량의 성능 검토 및 차량 기본 설계

경량 전철은 기존의 통근형 전동차와는 기본적으로 차량의 사양과 운영방식이 차이를 가지고 있다. 기존의 철도는 대량 수송을 위해 차량의 성능을 고려한다면 경량전철은 차량의 운영이 편리성을 고려하여 성능의 기본설계를 하고 있다. 고무차륜 경량 전철은 최소 편성인 2량 1편성과 기본 편성인 4량 1편성과 6량 1편성으로 그 편성을 운영의 편리에 따라서 구성할 수 있다. 차량의 기본성능을 설계하기 위하여 기본적으로 고려하여야 하는 중요 사양을 Table 1에 나타내고 있다. 본 논문에서는 차량의 성능을 기본 편성인 4량 1편성을 기준으로 하여 검토하기로 한다. Fig. 1은 고무차륜 경량 전철의 주 회로 시스템을 간략하게 표시하고 있다.

Table 1 고무차륜 경량전철의 주요 사양

항 목	사 양	
선로 조건	궤 간	1700 mm
	차량 축중	9.5 TON
	최대 구배	58%
	최소 반경	본선 60m 6측선 40m
하중 조건	공차 하중	12 TON
	만차 하중	19 TON
전기 방식	가선 전압	DC 750V(변동범위 : DC 500~900V)
	급전 방식	제 3궤조 방식(수평·측방향 집전방식)
주요 성능	최고 운행속도	70km/h 이상
	가속도	3.96 km/h/s
	감속도	4.68 km/h/s
	표정 속도	30 km/h 이상
	저크 한계	0.8 m/sec <sup>3</sup> 이하
구배 구원 능력	58% 구배에서 만차 만차 구원가능할것	
차량 주행 저항	$R = 114M + (0.2 + 0.3 \times M) \times V^2$ [N]	
차량 편성	최소 편성 2량 1편성 (2량 단위증설)	

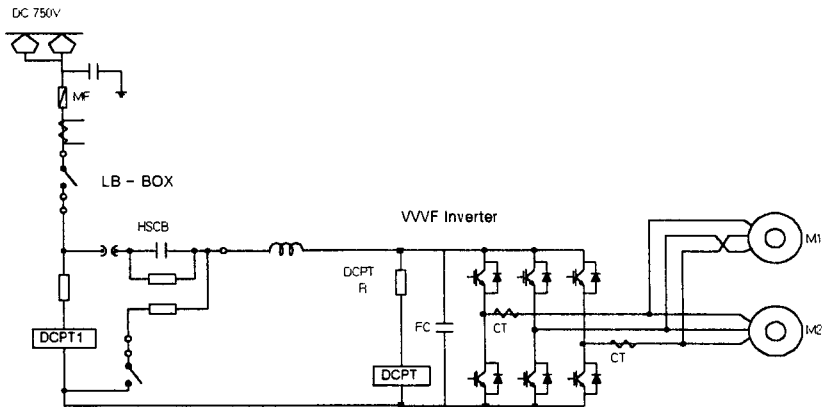


Fig. 1 VVVF 인버터의 주회로 System

Fig. 1에서 가선 전압은 DC 750V를 수전받는 것으로 하고 있고 IGBT를 사용하여 IC2M (1CONTROLLER 2MOTOR)로 구성되고 있으며 기본적인 차량의 제어는 VVVF 제어 방식으로 회생 제동으로 기본제동력을 사용한다. Fig. 1에서 인버터는 2개의 모터를 제어하는 구조로 구성하며 차단장치와 고속도 차단장치를 갖고 있고, 필터 리액터와 주회로 차단장치를 갖는 System임을 알 수 있다.

### 3. 경량전철의 차량 성능 검토

고무차륜 경량전철의 성능을 검토하기 위해서는 급한 구배에서 일정한 값 이상의 가속력을 가질 수 있도록 하여야 하며 Table 1의 조건에 따른 견인력을 만족하는지를 검토한다. Fig. 2는 고무차륜 경량전철의 견인력을 나타내며, Fig. 3은 제동력을 표시한 것으로 속도에 따른 차량의 견인력과 제동력을 보인다.

고무차륜 경량전철에서 주행 저항은 다음과 같이 나타낸다.

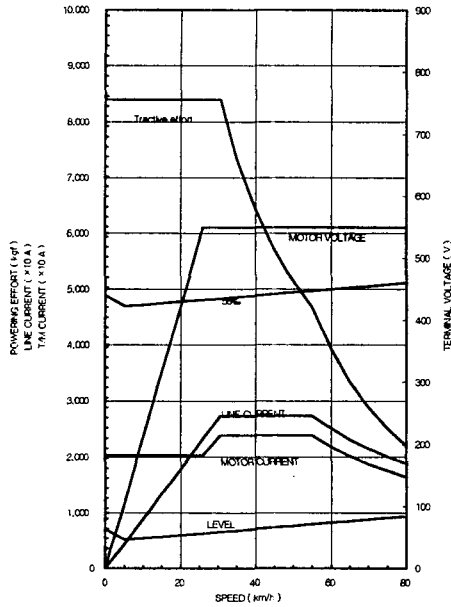
$$R = 114 \cdot M + (0.2 + 0.3 \cdot N) \cdot V^2 \quad [N] \quad (1)$$

단, M : 차량중량 [ton], N : 편성당 차량수, V : 차량속도[Km/h]

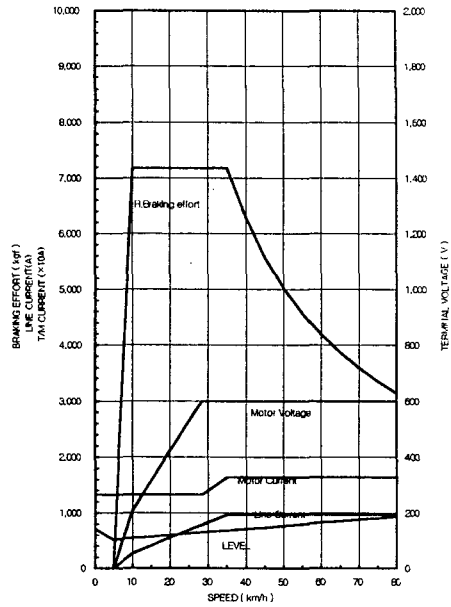
표정속도 30[Km/h]에서는

$$\therefore R = 114 \times 76 + (0.2 + 0.3 \times 4) \times 30^2 = 9924 [N] = 1012 [kg]$$

**Fig. 2 Powering Performance of Rubber tire AGT**



**Fig. 3 Braking Performance of Rubber tire AGT**



따라서, 각 속도에서의 주행저항을 구하면 다음과 같다.

**Table 2 각 속도에서의 주행저항**

속도[Km/h]	0	10	20	30	40	60	70
주행저항[N]	9652	8804	9224	9924	10904	13704	15524
[Kg]	988	898	941	1012	1112	1398	1583

### 3.1 정상 기동시

기동시에 필요한 견인력은 다음과 같이 표현한다.

$$TE = [28.35 \cdot (1.1 \cdot W_m + 1.05 W_t / W_o) \cdot \alpha + R_o] W \quad (2)$$

$$W_m = W_t : 48/2 \quad W_o : 48$$

$$\alpha : 3.96 \quad R_o : 10 \quad W : 76$$

$$\therefore TE = 9933 \text{ [kg]}$$

$$\text{전동기당 견인력 } T_m = 9933/4 = 2483 \text{ [Kg/Motor]}$$

고무차량의 점착 계수는 다음과 같이 표시된다.

$$\mu = T_m / W_{mm} = 2483/9500 = 26.1\% \quad (3)$$

차량의 성능을 검토하기 위해서는 상기에서 계산된 정상시의 기동 견인력과 비상시의 견인력을 고려하여 차량의 구배 기동을 검토한다.

### 3.2 비상운전 1

경량 전철운행시 Motor 단위의 CUT을 고려한 견인력을 검토한다. 개방운전시 58%구배 기동에 대한 기동 견인력을 계산하면 다음과 같다.

$$F T_g = (30.48 \cdot \alpha + R_o + G) \cdot W \quad (4)$$

$$\alpha : 0.3 \quad R_o : 10 \quad W : 76 \quad G : 58$$

$$\text{전동기당 인장력 } T_m = 5863/2 = 2931 \text{ [Kg/Motor]}$$

$$\text{점착계수 } \mu = T_m/W_{mm} = 2931/9500 = 30.8[\%]$$

개방 운전시 MOTOR 단위로 CUT 하는 방법으로 운전한다.

$$\text{전동기 1대당의 소요인장력 } T_m = 5863/3 = 1954 \text{ [Kg/Motor]}$$

$$\text{점착계수 } \mu = T_m/W_{mm} = 1954/9500 = 20.57[\%]$$

### 3.3 비상운전 2

경량전철 운행시 차량 고장 등의 조건에 따라서 구원 운전을 통한 차량의 견인력을 계산하며, 이때는 8량 1편성의 구성이 된다. 구배 기동이 가능한 최소의 가속도를 0.3[Km/h/s]로 설정하고, 다음의 조건을 식(4)에 대입하면

$$\alpha : 0.3 \quad R_o : 10 \quad W : 76+76=152 \quad G : 58$$

$$\text{전동기당 인장력 } T_m = 11726/4 = 2931 \text{ [Kg/Motor]}$$

### 3.4 고속영역

운전최고속도 70Km/h로의 가속여력을 0.5Km/h/s로 설정한다. 이에 따른 소요 견인력은

$$F T = 2741 \text{ [Kg]}$$

$$P = F T \cdot V/367 = 2741 \cdot 70/367 = 522 \text{ [KW]}$$

역행성능을 검토한 것을 Table 3에 표시하였다.

**Table 3 역행 성능 검토**

속도 영역		설정 조건	성능	주전동기당 4개/편성
기동	정상	가속도 3.96[Km/h/s]	9933[Kg]	2483[Kg]
	구원·개방운전시	58%구배, 0.3[Km/h/s]	11726[Kg]	2931[Kg]
고속 영역		70[Km/h]의 가속여력 0.5[Km/h/s]이상	2741[Kg]	522[Kw]

### 3.5 전기제동

제동시 주행저항은 출발 저항치의 70%로 설정한다. 최대 전기제동력은

$$BE. = (30.48 \cdot \beta - 0.7 \cdot R_o) \cdot W \quad (5)$$

$$\beta : 3.5 \quad R_o : 10 \quad W : 76$$

$$= 10309[\text{Kg}]$$

전동기당 Brake력  $BE_m = 10309/4 = 2577[\text{Kg/motor}]$

점착계수  $\mu = B_m/W_m = 2577/9500 = 27.1[\%]$

#### 4. 경량전철의 주행 시뮬레이션

고무차륜 경량 전철에서 차량의 성능을 검토하기 위하여 추진력을 계산하였고, 이를 토대로 주행 시뮬레이션을 통하여 차량의 주행성능을 검토한다. 주행 시뮬레이션에서는 노선의 조건을 고려하여 주행시의 인버터부의 공급 전력과 추진토크, 모터 전류를 계산하며, 노선 데이터를 검토하여 각 구간마다 역행 성능과 회생 제동 성능을 통하여 고무차량의 성능을 확정한다. 그 중에서 차량의 시뮬레이션의 조건이 되는 역간의 거리를 Table 4에 표시하였다. 구간 당 구배를 Table 5에 곡선에 대한 데이터를 Table 6에 나타내었다.

Table 4 고무차륜 경량전철의 역간 거리

구간 번호(역명)	역간 거리		
시점 - 1	40	6 - 7	580
1 - 2	762	7 - 8	640
2 - 3	790	8 - 9	670
3 - 4	2270	9 - 10	560
4 - 5	1300	10 - 기지	560
5 - 6	1000	총연장길이	9172
		평균 역간거리	913.20

Table 5 고무차륜 경량전철의 구배

위치		구배			연장	위치		구배			연장
시점	종점	상향	수평	하향		시점	종점	상향	수평	하향	
0.00	0.42		L		420	4.76	5.30		L		540
0.42	0.70	22			280	5.30	5.48			48	180
0.70	0.90		L		200	5.48	5.88	8			400
0.90	1.06			25	160	5.88	5.98	55			100
1.06	1.28	12			220	5.98	6.22		L		240
1.28	1.50	40			220	6.22	6.42	36			200
1.50	1.70		L		200	6.42	6.68	12			260
1.70	1.86	3			160	6.68	6.86		L		180
1.86	2.10	18			240	6.86	7.10			58	240
2.10	2.34	25			240	7.10	7.34			14	240
2.34	2.52	50			180	7.34	7.48		L		140
2.52	2.70			55	180	7.48	7.92			4	440
2.70	2.88			28	180	7.92	8.32		L		400
2.88	3.04	34			160	8.32	8.58			2	260
3.04	3.18			50	140	8.58	8.76		L		180
3.18	3.52			30	340	8.76	8.94			23	180
3.52	3.78	12			260	8.94	9.14	16			200
3.78	3.96		L		180	9.14	9.32		L		180
3.96	4.26			5	300	9.32	9.56			38	240
4.26	4.58	38			320	9.56	9.92			12	360
4.58	4.76			19	180	9.92	10.10		L		180

**Table 6 고무치륜 경량전철의 곡선 데이터**

위치		곡선반경	곡선장	방향
시점	종점			
144.768	208.608	250	63.84	L
279.553	344.137	250	64.584	R
538.471	970.581	500	432.11	L
3251.054	3295.083	1600	44.029	R
4356.735	4488.386	500	131.651	R
4855.863	4926.549	800	70.686	R
4995.798	5087.373	1400	91.575	L
5202.363	5380.633	150	178.27	R
5539.418	5632.868	150	93.45	L
5718.239	5794.27	250	76.031	L
6024.917	6103.79	400	78.873	L
6251.486	6321.856	80	70.37	R
6473.151	6584.627	500	111.476	L
7227.218	7251.73	4000	24.512	R
7541.428	7610.517	700	69.089	L
7691.604	7760.693	700	69.089	R
7840.296	7973.128	100	132.832	L
8106.281	8221.889	150	115.608	R
8396.779	8496.843	420	100.064	R
8951.385	8989.948	1800	38.563	L
9325.361	9410.766	60	85.405	L
9599.986	9697.279	600	97.293	L
9780.363	9826.137	40	45.774	L
계	23개소		2285.174	

실제로 운행될 노선은 약 10Km이며 급한 구배와 곡선으로 이루어진 구간이 대부분이다. 시물레이션에서는 공차 조건과 만차 조건에서 역행 성능과 회생제동 성능을 고려하여 정상 조건에서 시물레이션을 수행하였다. 정상 운행시 차량의 장치의 용량을 검토하기 위하여 Table 7은 공차 조건에서 역 1에서 역 10 방향의 운전을 나타낸다. Table 9는 만차 조건을 나타낸다. Table 8은 역 10에서 1방향의 공차 조건 운전을 Table 10은 만차 조건 운전을 표시한다. 공차 조건에서 가선편류는 실효치로 250A와 240A였으며 모터 쪽 편류는 116A와 114A였다. 만차 조건에서는 가선편류는 360A와 358A를 모터편류는 169A와 168A를 나타낸다 구간별로 상구배가 계속 이어지는 Table 9의 역 4와 5구간 운전에서 모터편류는 182A로 최대임을 알 수 있다. 각 구간별로 표정속도는 공차 조건인 Table 7에서 33.5Km/h를 상행인 Table 8에서 33.4Km/h를 갖었으며, 만차 조건 하행인 Table 9에서 33.3Km/h를 상행의 Table 10에서 33.3Km/h를 나타내었다. 차량의 성능의 지표로써 사용되어지는 표정속도에서 표준사양인 30Km/h를 충분히 만족시키는 것으로 생각되어지며 견인전동기의 실효편류는 정차시간을 고려하여 약 155A로 130Kw급 견인전동기 정격인 169A를 고려하면 충분한 용량으로 생각된다. 추진인버터의 설계에서도 견인전동기의 답면 출력을 중심으로 설계할 수 있다. 직류 입력 회로는 연속정격 편류 360A로 설계 할 수 있다.



**Table 7 주행계산결과 공차 12t/량**

STATION	DISTANCE (M)	STOP TIME (S)	RUNNING TIME (S)	AVERAGE SPEED (KM/H)	ENERGY		RMS	
					POWER (KWH)	BRAKE (KWH)	IPAN(A)	ISTA(A)
ST.1-2	762.0	20.0	75.5	36.3	2.5	0.5	251.3	117.4
ST.2-3	790.0	20.0	66.5	42.8	2.7	0.4	269.9	125.9
ST.3-4	2270.0	20.0	147.5	55.4	5.8	0.8	274.2	121.0
ST.4-5	1300.0	20.0	94.5	49.5	4.1	0.6	285.0	128.4
ST.5-6	1000.0	20.0	99.0	36.4	2.7	0.8	224.2	104.5
ST.6-7	580.0	20.0	71.5	29.2	2.3	0.5	233.8	112.9
ST.7-8	640.0	20.0	60.0	38.4	1.4	0.9	231.9	113.4
ST.8-9	670.0	20.0	81.0	29.8	1.9	0.7	222.3	107.0
ST.9-10	560.0	20.0	67.0	30.1	1.6	0.6	218.9	108.4
ST.10								
TOTAL	8572.0	180.0	762.5	40.5	25.1	5.7	250.1	116.2

표정 속도 = 33.5Km/h

**Table 8 주행계산결과 공차 12t/량**

STATION	DISTANCE (M)	STOP TIME (S)	RUNNING TIME (S)	AVERAGE SPEED (KM/H)	POWER (KWH)	BRAKE (KWH)	IPAN(A)	ISTA(A)
ST.10-9	560.0	20.0	64.0	31.5	1.6	0.5	213.6	105.7
ST.9-8	670.0	20.0	79.5	30.3	2.0	0.5	212.3	102.4
ST.8-7	640.0	20.0	61.0	37.8	3.0	0.4	315.3	144.2
ST.7-6	580.0	20.0	71.5	29.2	1.4	0.9	218.7	107.1
ST.6-5	1000.0	20.0	99.0	36.4	2.9	0.8	231.8	107.6
ST.5-4	1300.0	20.0	94.0	49.8	43.2	0.7	248.1	114.1
ST.4-3	2270.0	20.0	147.50	55.4	6.2	0.7	285.3	125.5
ST.3-2	790.0	20.0	66.0	43.1	1.8	0.5	221.1	107.8
ST.2-1	762.0	20.0	82.0	33.5	2.0	0.7	227.8	110.1
ST.1								
TOTAL	8572.0	180.0	764.5	40.4	24.2	5.8	246.8	114.9

표정 속도 = 33.4Km/h

**Table 9 주행계산결과 만차 19t/량**

STATION	DISTANCE (M)	STOP TIME (S)	RUNNING TIME (S)	AVERAGE SPEED (KM/H)	ENERGY		RMS	
					POWER (KWH)	BRAKE (KWH)	IPAN(A)	ISTA(A)
ST.1-2	762.0	20.0	76.0	36.1	3.7	0.8	360.9	171.0
ST.2-3	790.0	20.0	67.0	42.4	3.8	0.6	381.8	181.1
ST.3-4	2270.0	20.0	148.0	55.2	8.2	1.4	383.8	171.1
ST.4-5	1300.0	20.0	95.5	49.0	5.8	1.0	398.7	182.0
ST.5-6	1000.0	20.0	99.5	36.2	4.0	1.2	328.9	154.9
ST.6-7	580.0	20.0	72.0	29.0	3.6	0.7	353.8	172.1
ST.7-8	640.0	20.0	60.0	38.4	2.1	1.4	350.3	172.6
ST.8-9	670.0	20.0	81.5	29.6	2.8	1.0	324.1	157.9
ST.9-10	560.0	20.0	67.0	30.1	2.4	0.9	328.9	163.3
ST.10								
TOTAL	8572.0	180.0	766.5	40.3	36.4	9.0	360.5	169.6

표정 속도 = 33.3Km/h

**Table 10 주행계산결과 ( 만차 19t/량\*2량 )**

STATION	DISTANCE (M)	STOP TIME (S)	RUNNING TIME (S)	AVERAGE SPEED (KM/H)	POWER (KWH)	BRAKE (KWH)	IPAN(A)	ISTA(A)
ST.10-9	560.0	20.0	64.0	31.5	2.5	0.8	324.3	161.4
ST.9-8	670.0	20.0	79.5	30.3	3.0	0.9	321.4	156.1
ST.8-7	640.0	20.0	61.0	37.8	4.5	0.6	463.7	213.9
ST.7-6	580.0	20.0	71.5	29.2	2.1	1.4	328.4	161.8
ST.6-5	1000.0	20.0	99.0	36.4	4.4	1.2	344.2	180.8
ST.5-4	1300.0	20.0	94.0	49.8	4.6	1.1	357.3	166.3
ST.4-3	2270.0	20.0	149.0	54.8	8.6	1.2	390.8	173.9
ST.3-2	790.0	20.0	66.0	43.1	2.5	0.9	322.6	159.8
ST.2-1	762.0	20.0	83.0	33.1	3.0	1.2	336.0	163.3
ST.1								
TOTAL	8572.0	180.0	767.0	40.2	35.0	9.2	358.4	168.7

표정 속도 = 33.3Km/h

## 5. 결 론

본 논문에서는 고무차륜 경량전철의 기본 성능을 노선조건과 운행조건 및 표준사양에 의거하여 역행 및 제동의 차량 특성 곡선으로부터 정상시와 비상 운전시에 차량의 성능을 계산하여 충분한 점착력과 추진력을 얻는 것을 검토하였다. 차량 특성곡선을 기초로 노선 데이터를 기반으로 주행 시뮬레이션을 통하여 차량의 운전 특성을 구하였고 표정속도 33Km/h 이상으로 충분한 성능을 갖는 것을 확인하였다. 견인전동기의 경우 실효치 전류가 155A로 정격 130Kw급의 모터를 적용하여 차량의 추진력을 공급하기에 충분한 용량을 갖도록 기본 설계를 수행하였고 소비전력에서도 역행시 36Kw를 회생시 9Kw를 사용하는 것으로 검토되었다. 논문에서 제안된 고무차륜 경량전철은 급한 구배와 곡선을 운행하는 차량으로 성능곡선과 노선조건을 고려한 주행 시뮬레이션을 통하여 성능을 검토한 결과 기본 성능과 표정속도 제시된 표준사양을 충분히 만족시키는 것을 알 수 있었다. 앞으로는 본 고무차륜 경량전철의 상세 설계를 통하여 차량의 성능을 입증할 수 있도록 할 예정이며 제작을 통하여 차량의 성능을 검증할 예정이다.