

주행조건을 고려한 견인전동기의 기본 설계

The Basic Design of Traction Motor, Considering Running Condition

김동명*
Kim, Donb-Myung

박영호*
Park, Yeong-Ho

윤종학*
Yoon, Jong-Hack

한성수
Han, Sung-Soo

ABSTRACT

This paper deals with the basic design of the traction motor(TM) by performing the train performance simulation(TPS). The TPS, considering running condition, provides some important information about selecting the rating of TM such as current, power and frequency, etc. Especially, calculating the current flowing into the TM by the TPS in the situation of normal condition and M-car cut out respectively, we can inspect whether the TM endures thermally under the contingency or not. This paper reviews the tractive effort of the train to meet the demands of consumer and then designs the TM electrically. Finally, performing the TPS under emergency condition, it checks the thermal capacity of the TM to insure the justice of the TM under construction.

1. 서론

일반적으로, 열차 주행 성능 시뮬레이션(Train Performance Simulation)을 통해 차량 성능과 경제성을 고려한 최적의 차량 편성을 구성할 수 있으며, 열차가 운행될 실노선을 대상으로 주행중의 소비에너지, 회생에너지를 예측할 수 있으며, 열차의 운행 시간 및 운행 간격, 표정속도, 신호기의 연결위치, 비상시 열차의 회복여유율, 선로의 개량 여부 등 열차의 전반적인 운전 계획을 세우는데 다양한 자료를 제공할 수 있다. 뿐만 아니라 열차의 인장력을 발휘하는 견인전동기의 입장에서 주어진 조건에서의 견인 성능의 양부와 그 정격의 결정에 필요한 정보를 제공할 수 있다.

견인용 유도전동기의 정격은 출력, 전압, 전류, 주파수, 슬립으로 정의되며, 그 정격의 종류를 연속 정격과 단시간 정격으로 구분하는데 철도차량용 견인전동기의 경우에는 단시간 정격, 특히 1시간 정격을 주로 사용한다. 전동기의 정격 전압은 대체로 가선 전압과 컨버터에 의해 결정되며, 정격 주파수는 차량의 표정속도 또는 평균속도를 고려하여 설정된다. 결과적으로, 전동기의 출력 및 열용량을 결정하는 중요한 인자로 남는 것이 전류가 된다. 정격 전류는 전동기의 열적 용량을 초과하지 않으면서 연속으로 동작할 수 있는 값으로 선로조건, 차량조건, 운전조건 등을 만족하면서 열적으로 문제가 되지 않는 범위에서 설정되는 것이 바람직하다. 다시 말하면, 주어진 조건을 전제로 주행시뮬레이션을 통해 전동기의 실효전류치를 구한 다음, 여기에 약간의 여유치를 두어 설정한다. 그리고 비상운전 조건에서도 전동기가 열적으로 견딜 수 있는가의 여부도 매우 중요하게 검토되어야 한다. 즉, 동력차의 개량과 같은 비상운전 조건을 상정하여 전동기의 실효전류치를 계산함으로써 상정된 악조건에서도 견인전동기가 열적으로 견딜 수 있도록 설계되어야 한다.

본 논문에서는 현재 KOROS에서 수행중인 프로젝트의 수요처에서 요구하는 사양에 차량의 성능이 부합하는지를 검토하고 견인전동기의 전기 설계치를 설정한 다음, 열차의 실주행노선, 특히 구배가 심한 산악구간을 대상으로 하여 정상조건, 비상운전 조건을 상정한 다음, 열차 주행 성능

* 한국철도차량(주) 중앙연구소, 비회원

시뮬레이션을 수행하여 견인전동기의 출력과 열적 용량을 살펴봄으로써 현재 설계·제작중인 중장거리용 견인전동기의 설계가 적합함을 검증하고자 한다.

2. 차량의 견인 성능의 검토 및 견인전동기 기본 설계

철도차량 발주처가 기존의 노선에 대하여 추가로 발주할 경우, 차량에 대한 사양을 기존과 거의 동일한 수준으로 채택하고 있으며, 신노선에 대하여 발주내는 경우라도 기존의 경험을 통해 차량 성능에 관한 사양을 대략적으로 구성할 수 있으며, 차량 메이커측에서는 그 동안의 축적된 경험과 노하우를 통해 보다 구체적이고 실질적인 사양을 구성하여 발주처에 제안할 수도 있다. 현재 KOROS가 진행하고 있는 프로젝트E는 전자의 경우에 속하며, 그 차량 시스템이 기존과 동일하고 또한 차량 성능도 기존과 비슷하다. 그림 1은 프로젝트E의 차량 시스템을 간략하게 나타내고 있으며, 표 1은 발주처에서 제시하고 있는 차량 성능의 주요 사양을 원문으로 인용하고 있다.

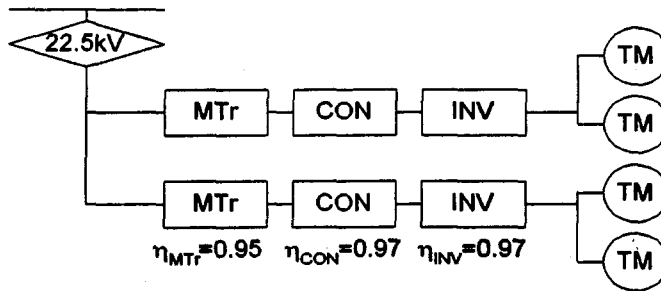


그림 1. 프로젝트E의 차량 시스템(M차)

표 1. 차량에 요구되는 중요 사양

ITEM	DESCRIPTION						
1. Starting Traction Effort	① A fully laden EMU with new wheels shall be able to start and accelerate from standstill on a 2.0% upgrade with 25% of the traction motors cut out. ② A tare weight condition EMU with new wheels shall be able to start standstill on a 1.0% upgrade with 75% of the traction motors cut out, and keeping maximum output 5 minutes the speed of the EMU shall not be less than 60km/hr.						
2. Traction Effort for Normal Running	① The EMU shall be capable of achieving and maintaining at least the following normal running speeds on the specified gradient under crush laden conditions. ② The service speed of the EMU shall not be less than 110km/hr with fully worm(780mm diameter) wheels on the straight and level track(including +/- 0.5% grade) <table style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td style="text-align: center;">Grade(+%)</td> <td style="text-align: center;">Speed(km/hr)</td> <td style="text-align: center;">Rating</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1.5</td> <td style="text-align: center;">110</td> <td style="text-align: center;">continuous</td> </tr> </table>	Grade(+%)	Speed(km/hr)	Rating	1.5	110	continuous
Grade(+%)	Speed(km/hr)	Rating					
1.5	110	continuous					
3. Service Speed	① The service speed of the EMU shall be 110 km/hr, with fully worm driving wheels.						
4. Train Resistance	① The running resistance of a EMU as a function of speed may be calculated using the following formula : $R_r = 13.3817 + 0.0913V + 0.0039V^2 \text{ [N/ton]}$ ② The gradient resistance may be calculated as follows : $R_g = \text{gradient}(\%) \times W \text{ [N]}$ ③ The break away force(R_b) is assumed to be $9.81 \times 3/\text{ton}$ [N].						
5. Line Data	① The minimum altitude of the West Line is 33 meter, the maximum is 276 meters. ② The longest gradient section is about 15km with an average grade of about 1.62%, including a maximum gradient of 2.0% over a length of 5.96 km						

- * Crush laden is defined to be tare condition plus maximum payload (300 passengers per car)
- * Fully laden is defined to be tare condition plus full normal payload (180 passengers per car)
- * The weight of a passenger is to be taken as 60 kg.
- * New wheel : 860mm, Wheel for the performance calculation : 820mm.
- * Tare weight : 164.4 ton, Fully laden weight : 207.6 ton, Crush laden weight : 236.4 ton

그림 1에서, MTr은 주변압기, CON은 컨버터, INV는 견인인버터, TM은 견인전동기를 나타내고 있으며 또한 효율도 표시하고 있다. 전체 차량 편성은 2M2T로 구성되어 있으며, M차당 견인인버터 2대, 인버터당 견인전동기 2대로 구성되어 M차당 4대의 전동기가 열차를 견인하고 있다.

2.1 차량 견인 성능의 검토

본 프로젝트는 과거의 경험들을 충분히 활용할 수 있는 장점을 갖고 있을 뿐만 아니라 현재 운행되고 있는 차량과 연결 운전이 가능하도록 동일한 가속력을 지녀야하기 때문에 KOROS에서는 기존의 경험치를 바탕으로 차량의 견인력을 설정하여 표 1의 1항과 2항의 비상조건에서의 기동 인장력과 정상조건에서의 주행 인장력을 만족하는 지를 살펴본다. 그림 2는 기존 차량과 연결 운전이 가능하도록 설정한 견인력과 제동력을 도시한 것으로, 근거리 통근형의 전동차보다 가속력은 작지만 정토크 구간을 45km/h까지 확장한 증장거리 특성을 보이고 있다.

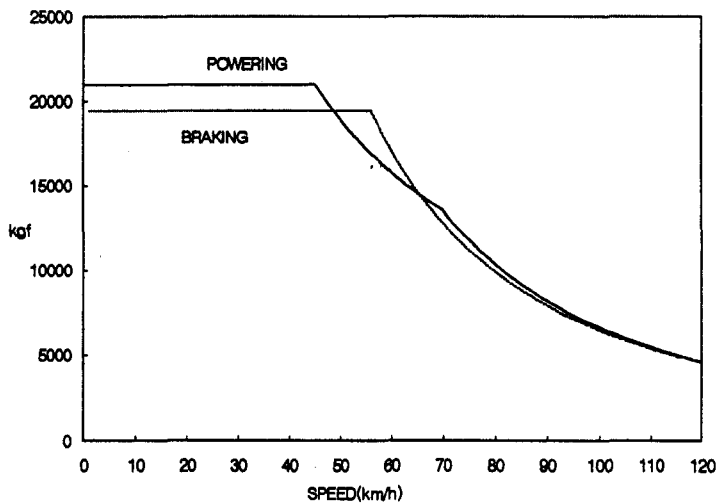


그림 2. 차량의 견인력 및 제동력 곡선

기동시 필요한 최소 견인력은 식 1과 같이 구배저항, 출발저항(break away force), 주행저항의 합으로 표현된다.

$$F_{min} = (R_g + R_b + R_r) [N] \quad (1)$$

사양 1 - ①)

최소 견인력(F_{min})과 전동기당 최소 견인력($F_{min,m}$)은 다음과 같다.

$$F_{min} = 49571.1 [N] = 5053.1 [kgf]$$

$$F_{min,m} = 8261.8 [N] = 842.2 [kgf]$$

사양 1 - ②)

최소 견인력(F_{min})과 전동기당 최소 견인력($F_{min,tm}$)은

$$F_{min} = 23165.9 \text{ [N]} = 2362.3 \text{ [kgf]}$$

$$F_{min,tm} = 11582.9 \text{ [N]} = 1180.7 \text{ [kgf]}$$

위의 두 사양을 비교해보면, 사양 1 - ②의 조건이 더 가혹하다는 것을 알 수 있다. 한편, 가속도 (a)와 일정 속도에 이르는 데 필요한 시간(t)은 식 2와 식 3으로 표현된다.

$$a = F - (R_r + R_g + R_c) \quad (\text{단, } F \text{는 지정 속도에서의 차량의 견인력}) \quad (2)$$

$$t = (v_1 - v_0)/a \quad (3)$$

식 2에서, F 는 차량의 견인력, R_c 는 곡선 저항을 나타낸다.

따라서, 60km/h의 주행저항을 고려한 가속도 (a_{60})와 60km/h가 되는 시간(t_{60})을 계산하면,

$$a_{60} = 0.072 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

$$t_{60} = 16.67/0.072 = 232 \text{ [sec]} = 3.87 \text{ [min]}$$

사양 2 - ①)

차량속도 110km/h에서 가속여력이 있는가에 대한 판단이므로, 이 속도에서 가속도를 구하면, 식 2로부터,

$$a = 0.022 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

이는 속도가 더 증가할 수 있음을 나타낸다.

그림 3은 사양 1 - ②조건에서의 견인력과 주행저항을 도시한 것으로 82km/h에서 속도가 균형을 이루고 있음을 알 수 있다.

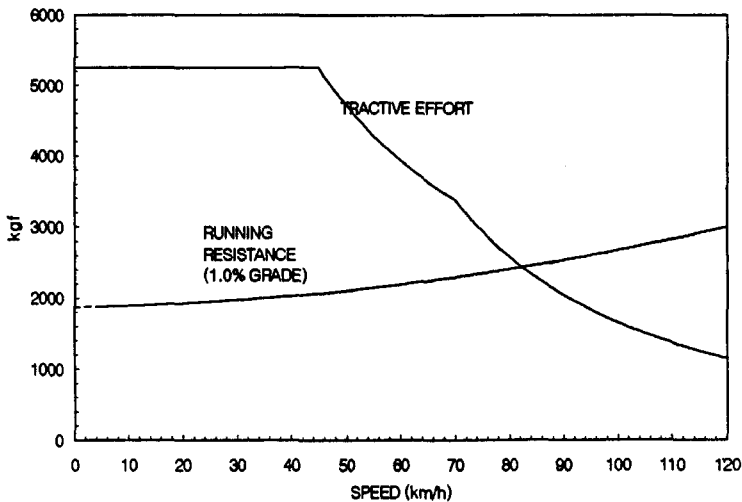


그림 3. 견인전동기의 75% CUT OUT시 견인력과 주행저항

지금까지 그림 2와 같이 설정한 견인력 곡선이 수요처의 요구 사양에 만족함을 검토하였고, 이를 바탕으로 전동기의 특성 곡선을 유도하여 주행시물레이션을 행한다.

2.2 견인전동기의 특성 곡선 및 1차 주행시뮬레이션

전동기의 효율과 역률을 차량의 속도와 무관하게 0.92, 0.88로 일정하다고 가정한 다음, 차량의 견인력 곡선으로부터 유도한 견인전동기의 역행 속도-특성 곡선을 그림 4에 도시하였다.

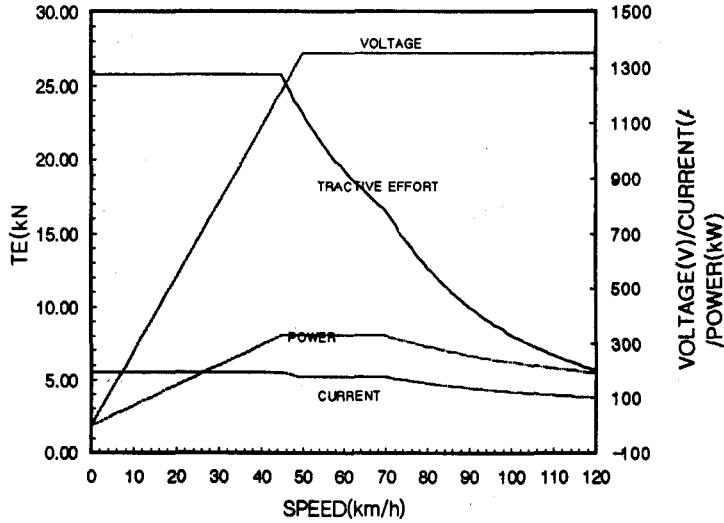


그림 4. 견인전동기의 역행 속도-특성 곡선(효율, 역률 일정)

그림 4의 특성 곡선을 이용하여 1차적인 주행시뮬레이션을 행하여 전동기의 출력, 회전수 등의 정격을 결정한다. 주행시뮬레이션에 이용되는 프로그램은 당사에서 오랜 기간 보유하면서 꾸준히 업그레이드한 프로그램이다. 표 2는 주행 시뮬레이션에 필요한 입력 데이터를 정리한 것으로, 일반적으로 사양서에 제시된다.

표 2. 주행 시뮬레이션의 입력 데이터

주행저항	표 1	감속도	0.9m/s ²	전동기전류	그림 4
관성질량계수	1.1	노선조건	산악구간	전동기전압	"
차량길이	20.3	차량편성	2M2T	가선전류	-
차량중량	Fully Laden	견인력곡선	그림 4	제한속도	-
가속도	0.8m/s ²	제동력곡선	"	시스템 효율	그림 1

이러한 전제 조건하에서 수행한 시뮬레이션 결과를 표 3에 정리하였다. 주행시뮬레이션으로부터, 산악구간에 대한 전속주행의 평균속도가 75.6km/h인 점을 고려하여 전동기의 정격회전수를 속도 75km/h인 점으로 선정할 수 있으며, 기어비를 99/14로 선정하면 전동기의 회전수를 3440RPM으로 정할 수 있다. 또한 그림 4의 정토크 중단점의 전동기출력과 기동시 과부하율 및 평균 속도에서의 실효전류치를 고려하여 전동기의 정격 출력을 240kW로 선정할 수 있다.

표 3. 1차 주행시물레이션 결과(Fully Laden)

Station	Distance[km]	Run Time[min]	Run Speed[km/h]	Motor Current[A]	Line Current[A]
101	8.3	5.21	95.54	92.2	62.9
102	6.2	4.04	92.10	105.2	71.5
103	4.6	3.12	88.37	106.3	69.6
104	5.4	3.58	90.60	103.1	69.3
105	6.4	4.33	88.71	111.8	78.1
106	3.4	2.55	79.94	135.0	93.7
107	7.0	4.85	86.61	126.9	96.0
108	4.2	3.18	79.34	137.8	97.3
109	7.2	4.75	90.87	114.9	85.8
110	15.0	9.11	98.79	120.2	94.6
111					
Journey Total	67.7	53.72	75.61	105.3	76.4

3. 견인전동기의 기본 설계 및 주행 시물레이션

3.1 견인전동기의 기본 설계

정격출력 240kW, 전압 1350V, 전류 127A, 효율 92%, 역률 88%를 목표로 견인전동기의 전기설계를 행하였으며, 아울러 절연 등급은 철도차량용 견인전동기의 최고 수준인 CLASS 200을 채택하였다. 설계 시물레이션은 당사 보유의 전기설계 프로그램을 사용하였으며, 연속 정격점에서의 시물레이션 결과를 표 4에 정리하였다.

표 4. 연속 정격점에서의 전기설계 결과

출력(kW)	전압(V)	전류(A)	주파수(Hz)	효율(%)	역률(%)
240	1350	127	117	92	88
슬립(%)	Torque(N)	Max.Torque(N)	무부하전류(A)	회전수(RPM)	차량속도(km/h)
2.06	667	1648	33.11	3438	75.1
자속밀도(T)		전류밀도(A/mm ²)			
Stator-Yoke	1.02	Stator-Coil	6.20		
Stator-Teeth	1.09	Rotor-Bar	4.82		
Air Gap	0.69	End-Ring	3.63		
Rotor-Yoke	0.93				
Rotor-Teeth	1.48				

일반적으로, 철도차량용 견인전동기는 무게당 출력비를 증가시키기 위해서, 고정자 코일의 전류밀도를 3-7A/mm², 엔드링은 9 - 12A/mm², 회전자 바의 경우는 4 - 8A/mm²정도로 선정하는 경향이 있다. 표 4에서 보듯이 연속정격점에서 설계된 견인전동기의 전류 밀도가 일반적인 경향과 일치하고 있으며, 고정자와 회전자 강판의 자속밀도도 여유가 있음을 알 수 있다. 이와 같이 설계된 견인전동기에 대한 역행 속도-특성 곡선을 그림 5에 도시하였다.

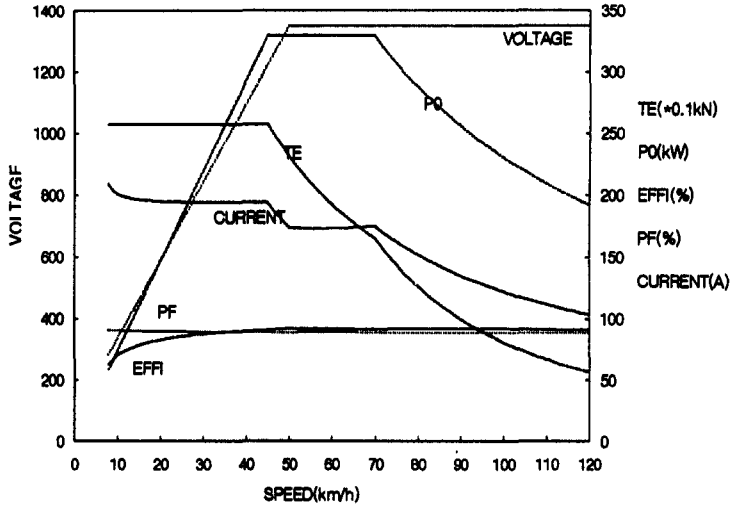


그림 5. 전인전동기의 역행 속도-특성 곡선

그림 5에서 효율(EFFI)은 40km/h지점부터 92% - 93%정도를 만족하며, 저속 영역에서 전동기의 전류치가 높은 것을 보이고 있다. 이와 같은 속도-특성 곡선에 나타난 효율과 역률, 전류 등을 이용하여 차량 성능 주행 시뮬레이션을 여러 조건하에서 수행하여 설계된 전인전동기가 열적 용량을 충분히 확보하고 있는지 살펴보았다.

3.2 주행시뮬레이션을 통한 전동기의 열용량 검토

실제로 차량이 운행될 노선의 총 길이는 약 400km이며, 평탄한 구간으로 이루어진 해안선과 구배가 심한 산악선으로 구성되어 있다. 시뮬레이션에서 고려된 구간은 전인전동기에 나쁜 환경을 제공하는 상구배가 심한 산악구간의 약 53km와 열차 운전시 가장 악조건으로 나타나는 표 1의 5항(15km)을 합한 67km로 한정하였다. 또한 전동기의 열용량이 충분한 가를 검토하기 위해서, Crush Laden의 부하로 정상운전과 비상운전 조건을 상정한 후 전속주행을 실시하여 전동기의 실효전류치를 살펴보았다. 표 5는 정상조건에서의 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 표 5에서 F는 역 101 - 111, B는 역 111 - 101의 방향의 운전을 나타낸다. 상구배가 심한 F방향으로 운전시 전동기의 실효전류치가 111.6A로 계산되었으며, 전동기의 용량이 충분할 것으로 기대된다. 한편, Crush Laden에서 4대의 전동기를 개방시킨 후, 전속 주행한 결과가 표 6에 나와 있다. 표 6으로부터, F방향의 전동기의 실효전류치는 141.7A로써 1350V 공칭 전압에서 268kW의 출력을 내고 있다. 이는 설계된 전동기의 1시간 정격인 270kW 내에 존재하고 있으므로 열적 용량이 충분한 것으로 판정할 수 있다. 또한, 구배의 변화가 심하거나 상구배가 계속적으로 이어지는 구간인 106-107, 108-109, 110-111에서의 실효전류치가 커지고 있음을 보이고 있으나, 각각의 주행시간을 고려해 볼 때, 전인전동기의 15분 정격(약 180A)을 충분히 만족할 것으로 생각된다. 마지막으로, 동력차의 75%의 개방과 Tare부하 조건(전동기 6대 개방)에서 전속주행한 결과를 표 7에 나타냈다. 표 7에서 F방향의 실효전류치는 155A이고 이는 본 전동기의 30분 정격에 해당하는 전류로서 상당히 악조건으로 판정될 수 있다. 그러나, 각 구간별 주행시간과 그 때의 전류치를 고려해 볼 때, 15분 정격 또는 10분 정격에는 만족할 것으로 생각된다.

표 5. 정상조건에서의 열차 성능 주행 시뮬레이션 결과(Crush Laden)

Station	Distance[km]		Run Time[min]		Run Speed[km/h]		Motor Current[A]		Line Current[A]	
	F	B	F	B	F	B	F	B	F	B
101		8.3	5.26	5.19	94.73	95.88	97.6	100.7	67.3	70.8
102		6.2	4.08	4.10	90.09	90.80	111.4	105.6	76.6	70.3
103		4.6	3.14	3.20	87.82	86.16	112.9	121.2	74.4	82.3
104		5.4	3.62	3.57	89.62	90.79	110.6	105.6	74.3	71.1
105		6.4	4.43	4.36	86.66	88.12	116.8	117.4	82.0	82.5
106		3.4	2.61	2.51	78.03	81.44	141.8	125.9	99.2	81.6
107		7.0	5.02	4.83	83.73	86.88	132.3	97.2	99.7	65.3
108		4.2	3.27	3.11	76.97	80.90	143.2	122.9	101.5	79.4
109		7.2	4.80	4.79	89.91	90.15	124.2	92.9	92.5	61.9
110		15.0	9.50	9.58	94.72	93.9	127.7	68.7	100.6	42.5
111										
Journey Total		67.7	54.74	54.25	74.20	74.87	111.6	92.5	81.3	62.0

표 6. Crush Laden 조건에서 4대의 전동기를 개방시킨 주행시뮬레이션 결과

Station	Distance[km]		Run Time[min]		Run Speed[km/h]		Motor Current[A]		Line Current[A]	
	F	B	F	B	F	B	F	B	F	B
101		8.3	5.77	5.79	86.35	85.95	126.8	99.1	45.5	31.4
102		6.2	4.70	4.62	79.14	80.49	145.3	114.9	52.8	39.3
103		4.6	3.54	3.77	77.98	73.27	143.3	147.1	50.2	47.7
104		5.4	4.08	3.92	79.34	82.58	143.8	124.2	51.1	42.3
105		6.4	5.33	5.15	72.05	74.58	147.5	149.4	51.9	50.0
106		3.4	3.27	2.86	62.46	71.45	164.0	144.1	58.6	52.1
107		7.0	6.19	5.05	67.84	83.18	158.6	140.3	60.7	50.6
108		4.2	4.38	3.58	57.49	70.30	169.1	151.5	58.7	53.7
109		7.2	5.73	4.99	75.42	86.53	150.9	135.1	57.7	46.2
110		15.0	12.86	9.78	70.00	92.02	162.3	136.3	64.3	50.6
111										
Journey Total		67.7	64.85	58.52	62.64	69.42	141.7	120.1	52.7	41.6

표 7. Tare 조건에서 6대의 전동기를 개방시킨 주행시물레이션 결과

Station	Distance[km]		Run Time[min]		Run Speed[km/h]		Motor Current[A]		Line Current[A]	
	F	B	F	B	F	B	F	B	F	B
101		8.3	6.16	6.42	80.82	77.52	139.7	147.9	27.1	27.7
102		6.2	5.25	5.09	70.82	73.04	154.8	151.8	22.8	26.0
103		4.6	3.86	4.22	71.45	65.43	153.3	160.7	27.3	28.3
104		5.4	4.51	4.27	71.79	75.89	153.5	148.8	21.1	27.1
105		6.4	6.24	5.73	61.55	67.01	161.3	158.7	18.3	28.9
106		3.4	3.77	3.11	54.06	65.57	172.9	158.6	24.7	26.8
107		7.0	7.08	5.21	59.32	80.66	170.3	133.1	31.2	22.7
108		4.2	5.67	3.96	44.41	63.57	182.8	158.7	23.6	25.3
109		7.2	6.51	5.15	66.31	83.81	164.8	124.7	29.1	21.5
110		15.0	15.99	9.91	56.30	90.79	174.8	115.9	33.1	18.5
111 Journey Total		67.7	74.06	62.08	54.85	65.43	155.0	132.4	24.4	23.0

4. 결 론

본 논문에서는 차량 성능 곡선이 수요처의 요구 사항에 부합하는지를 검토한 다음, 그 성능 곡선으로부터 효율, 역률 일정의 견인전동기 속도-특성 곡선을 유도하여 1차적으로 열차 성능 주행 시물레이션을 수행하여 주어진 차량조건, 노선조건 등을 고려하여 전동기의 정격치를 설정하였다. 이를 바탕으로 연속 정격 240kW, 전압 1350V, 효율 92%, 역률 88%, 주파수 117Hz의 견인전동기를 철도차량용의 설계 경향과 유사하게 설계하였으며, 이와 같이 설계된 전동기의 속도-특성 곡선에 따라 열차 성능 주행 시물레이션을 정상조건과 M차 개방과 같은 상정사고 조건에서 재수행하여 설계된 전동기가 열적으로 충분한 용량을 지니고 있음을 확인하였다. 앞으로는 본 견인전동기의 제작 완성된 후의 전동기 시험을 수행하여 제반 특성을 살펴볼 예정이다.