

한국형 고속전철용 견인전동기 개발

Development of the Traction Motor for High Speed Train

이상우*
Lee, Sang-Woo

윤종학**
Yoon, Jong-Hack

최종목***
choi, Jong-Mook

박계서****
Park, Gye-Seo

ABSTRACT

An inverter-driven induction motor is usually adapted to the traction motor for a high speed drive system requiring safety, reliability, performance, compact size owing to the space and weight allotted for attaching to train, etc. and AC Traction motor for G7 train will be operated in the worst condition such as mechanical vibration, limited mounting space, severe thermal stress, inverter with non-sinusoidal voltage waveform, dust and so on. therefore, design procedure must be carefully carried out with considering the motor size, vibration and thermal expansion of rotor bars, insulation system, reliability of frame, as well as output characteristics. In this paper, we will inform the characteristics and design of the traction motor for G7 train and also analyze the test result of it.

1. 서론

우리나라에 철도가 들어온지 100년이 지난 지금, 늘어나는 인구, 차량 증가에 의한 교통체증을 해소하고 또한 국민소득이 향상됨에 따라 고급교통수단 즉 쾌적하고 보다 빠른 교통수단을 선호하는 의식구조로 변해감에 따라 적절한 교통서비스 수준향상의 요구로 경부고속전철이 건설중에 있다.

이러한 고속전철은 고속대용량 수송으로 운송력을 획기적으로 증대하며, 열차운행의 시간단축으로 전국토의 반일 생활권이 형성되어 국토의 균형있는 발전을 촉진시키며, 다른 교통수단과 비교하여 에너지가 적게 들고 환경오염에도 가장 적합한 운송수단일 뿐만 아니라, 전기, 차량, 전자, 제어, 토목 등의 최첨단기술의 집합체이므로 관련사업의 기술파급효과가 대단히 크다고 할 수 있다.

이에 맞추어 고속전철의 국산화가 진행중에 있으며, 특히 고속전철에서 추진시스템의 핵심부품인 견인전동기는 높은 에너지 효율과 고속운전에서도 견딜 수 있는 신뢰성과 안정성이 요구된다. 이러한 요건을 만족시키기 위해 일본, 독일, 프랑스 등의 선진국에서는 수십년간의 개발경험과 운행실적을 바탕으로 전세계 시장을 석권하고 있다. 따라서 개발상황을 살펴보고, 국내기술로 설계한 고속전철용 유도전동기 개발에 대해 소개하고자 한다.

* : (주)로템, 중앙연구소 주임연구원
** : (주)로템, 중앙연구소 책임연구원
*** : (주)로템, 중앙연구소 수석연구원
**** : (주)로템, 중앙연구소 이사

2. 고속전철용 견인전동기

기존의 철도차량용 견인전동기로는 직류직권전동기가 주류를 이루었으나, 근래에 와서는 전력전자 및 반도체 소자의 급속한 발전으로 출력이 좋고, 중량이 가벼우면서 높은 회전력을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 유지 및 보수가 용이한 농형유도전동기를 사용하고 있다.

우선 고속전철용 견인전동기는 기본적으로 속도에 따른 운전특성을 충분히 만족시킬 수 있어야 한다. 또한 그림1에서와 같이 바퀴와 이를 지탱해 주는 대차라고 하는 기계구조물 사이에 장착되기 위해서 부피 및 무게의 제한이 수반되며, 반도체소자의 용량한계에 의한 입력전류의 한계, 전동기의 발열량, 병렬운전을 위한 적정슬립 등을 만족시키면서, 고속운전에서의 안정성과 신뢰성을 가지기는 매우 어렵다.

실제 견인전동기의 설계에서 무게를 경량화 하기 위하여 Frame의 두께를 최소화 하거나, Frameless형식을 사용하며, 고정자 권선의 절연에 있어서는 신뢰성 향상, 기계적 강도 향상, 내열성 및 냉각 성능 등의 향상을 도모하기 위하여 진공합침용 Resin 및 절연재료를 H종 이상으로 사용한다. Bearing은 수명을 길게하고, 유지 및 보수가 간편한 구조로 하여야 하며, 전동기를 취부한지 일정기간 동안 전동기를 분해하지 않기 위하여 그리이스를 재 주입하거나 오일순환 구조로 설계를 해야 한다.

표 1 견인전동기 방식에 따른 장점 및 단점 비교⁽²⁾

종류	장점	단점
직류 자여자 방식	- 다양한 적용 - 제어가 단순함	- 변속기어장치 요구됨 - 특히 발전제동시 효율이 나쁨
직류 타여자 방식	- 매우 좋은 제어능력 - 제어가 쉬움	- 무게가 무거움
직류 영구자석 방식	- 고효율 - 고토오크	- 제작비가 높음 - 변속기어장치 요구됨
유도전동기	- 강인한 구조 - 유지보수 유리 - 고효율	- 제어가 복잡함
A.C. Variable Reluctance Motor	- 유지보수 유리 - 고효율 - 고토오크 - 냉각 유리	- 매우 복잡한 출력 상태 - 토오크 리플
권선형 동기전동기	- 매우 좋은 제어능력 - 고토오크	- 슬립링 장착 필요 - 제작비가 높음
영구자석형 전동기	- 고토오크 및 고효율 - 냉각 쉬움 - 고토오크 - 구조 및 적용의 유연성	- 제작비가 높음 - 감자 현상(Field Weakening)
Switched Reluctance Motor	- 제작비가 적음 - 효율	- 토오크 리플 - 소음 - 복잡한 제어

3. 한국형 고속전철용 견인전동기

표 2와 그림 1에서 G7 고속전철용 견인전동기로 설계된 1100kW급 3상 농형유도전동기의 사양 및 단면도를 나타내었다. 경부고속전철용 견인전동기인 동기전동기 타입보다 구조가 간단하고, 가격이 싸고, 유지보수 및 신뢰성 측면에서 우수한 유도전동기로 설계하였다.

기존 지하철용 견인전동기와 달리 전동기 냉각을 위한 Fan이 견인전동기 자체에 취부가 되어 있지 않은 강제냉각방식(Forced Ventilation)을 채택하고 있다. 이는 고속주행에서 Fan에 의한 소음을 줄이고, 전동기의 소형화, 저속에서의 냉각성능 향상을 위한 것이다. 또한 구조의 견고성을 위하여 회전자 바(Bar)와 엔드링(End Ring)에 별도의 기계적 지지구조물인 쉬링크링(Shrink Ring)을 부착하였다.

표 2 한국형 고속전철용 견인전동기 사양

극 수	4극	상 수	3상
출 력	1100 kW	주 파 수	143 Hz
고정자 슬롯수	60개	회전자 슬롯수	74개
공 극	2.2 mm	적층길이	380 mm
고정자 외경	670 mm	고정자 내경	400 mm
엔드링 재질	Cu-Cr-Zr	바 재질	Cu-Cr

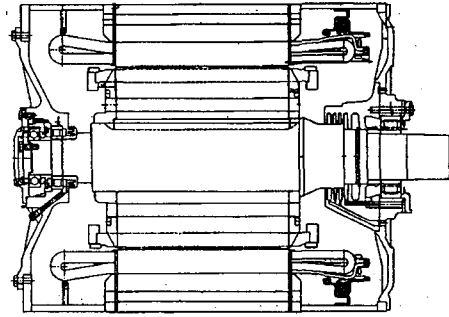


그림 1 고속전철용 견인전동기 단면도

3.1 견인전동기 설계

견인전동기의 경우, 산업용 전동기에 비해 높은 신뢰성, 소형·경량화를 요구하기 때문에 전동기의 전기적 특성, 기계적인 구조 및 부품의 특성을 고려한 설계를 해야한다.

3.1.1 철 심(Core)

고정자 및 회전자의 철심은 전기에너지를 기계에너지로 변환하는데 있어서 매개역활을 하는 자기에너지의 효율적인 활용이 중요하며, 이러한 자기에너지를 저장, 변환하는 철심의 설계는 전동기의 성능 및 경제적인 설계에 있어서 매우 중요한 요소이다. 따라서 전동기의 특성, 손실, 온도 상승, 회전자 철심의 최대인심력 등을 전반적으로 검토하여 철심설계가 이루어 졌다. 특히, 슬롯 조합은 전동기의 진동, 소음, 고조파 손실 등과 밀접한 관계에 있으므로, 선진국의 고속전철용 견인전동기의 비교분석과 FEM 전자기해석을 통하여 선정하였다.

3.1.2 절 연

전동기에 있어서 절연은 구조, 재료, 냉각 등에 따라 수명과 성능을 결정하는 중요한 요소이다. 일반적으로 전동기의 손실이 열로 변환되기 때문에 적절한 발열구조와 더불어 최적의 절연물 선정과 구성을 함으로써 단위체적당 용량 증가와 수명을 연장시킬수 있다. 또한 G7 고속전철용 견인전동기는 DC Link단 전압 2800[V], 스위칭주파수 수백[Hz]의 인버터전원으로 운전되고 있다. 이 경우 고정자 권선인버터의 고속 스위칭에 따른 다량의 서지전압이 발생하며, 이러한 서지전압이 견인전동기의 운전 전압과 중첩되어 단자에 걸리는데 서지전압이 클 경우에는 반복적인 스위칭에 의한 절연열화 및 주변환경(먼지, 철분, 기름, 진동)에 따른 절연물의 열화도 고려해야 한다. 그러나, 절연확보를 위하여 절연두께가 증가하면 상대적으로 전동기의 철심과 동선의 증가로 이어진다. 따라서 고속전철용 전동기의 절연은 소형, 경량화 및 신뢰성 향상에 핵심이라고 할 수 있다.

표 3 견인전동기의 절연재 구성

구 분	절연재
소선절연	Kapton 250FN029
주절연	Glass Samica Tape
	Glass Woven Tape
Slot Liner	Nomex+kapton
층간절연	Nomex 410
V.P.I. Resin	Silicone

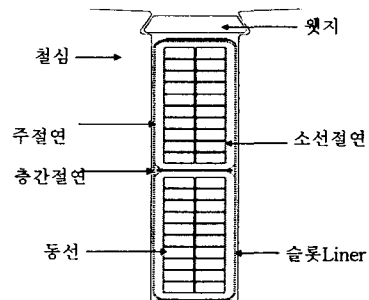


그림 2 전동기 슬롯 단면도

표 2과 같이 G7 고속전철용 견인전동기의 절연재 구성은 내열성을 강조한 200 Class급 절연시스템으로 설계되어 있다. 고정자의 절연은 동각선을 절연하는 소선절연으로 내전압성이 우수한 Kapton, 코일과 철심사이의 주절연으로 내코로나성이 우수한 Mica성분의 Tape, 기계적으로 우수한 Glass Tape, 코일과 코일사이의 층간절연으로 Nomex, 주절연물을 보호하고 절연을 보강하기 위한 슬롯절연으로 Nomex와 Kapton, 슬롯에서 코일을 지지하기위한 켈지(Wedge)는 열적으로 우수하고 기계적 강도가 뛰어난 강화 Glass Epoxy Sheet를 사용하고, 최종적으로 열적인 안정성이 뛰어난 실리콘(Silicone) 레진의 진공가압함침(Vacuum Pressure Impregnation)으로 이루어졌다.

진공가압함침(V.P.I.)방식은 현재까지 함침 절연방법으로 가장 좋은 방식으로써, 먼저 전동기를 건조실에서 습기를 제거하고 함침기에 레진과 함께 넣어 진공을 가한 후에 다시 압력을 가한다. 이로써 전동기 코일 내부의 절연재 사이사이에 기포없이 균일하게 레진으로 채워져, 열전도도, 기계적인 안정성, 내전압, 내코로나 특성이 증가하게 된다.

3.1.3 회전자

견인전동기에서 바와 엔드링은 회전자축에 폐회로를 형성하여 전류를 흐르게 함으로서 고정자 축의 전류와의 상호작용에 의해 전동기 특성을 결정하는 중요한 요소이다. 바와 엔드링은 견인전동기에 사용 될 경우, 요구되는 전기적인 특성뿐만 아니라 열적인 특성, 진동이나 충격에도 견딜 수 있는 기계적인 특성에도 만족되어야 한다. 표 4은 G7 고속전철용 견인전동기에 사용된 회전자 바와 엔드링의 물리적 특성치를 나타내었다.

표 4 회전자 바와 엔드링의 재질특성

	회전자 바	엔드링
재질	크롬동	크롬지르코늄동
도전율 [%]	80 %	80 %
인장강도 [kg/mm ²]	42 이상	43 이상
온도계수 [1/°C]	0.0315	0.0315

회전자의 고속회전과 차량의 진동에 견딜 수 있는 기계적 성질을 가져야 한다. 이에 선진 제작사에서 견인전동기의 엔드링과 바의 재질로써 크롬동, 지르코늄동, 황동, 청동 등을 많이 적용하고 있다. 이때 재질 선정시 고려되어야 할 것은 1대의 인버터로 여러대의 전동기를 병렬운전할 때, 견인전동기의 슬립과 토오크 특성이 민감하게 변하면 토오크 불평형이 문제가 된다. 따라서 이러한 영향을 개선하기 위해 2차축 저항을 적절하게 조절해야 한다.

일반적으로 회전자 바에는 3가지 응력이 작용한다. 첫째, 전동기의 맥동토오크에 의해 발생하는 응력, 둘째, 회전자의 고속회전에 의해 발생하는 원심력, 셋째, 회전자 바의 열팽창에 의한 열응력이다.

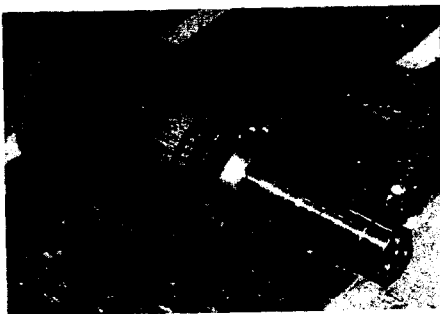


그림 3 고속전철용 견인전동기 회전자

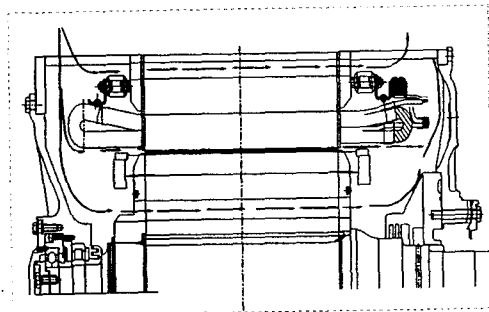


그림 4 견인전동기 냉각구조

3.1.4 냉각구조

그림 4는 냉각공기의 흐름을 견인전동기 단면도에 화살표로 표시하였다.

견인전동기의 냉각구조는 반부하측으로 외부에서 강제공급되는 냉각공기가 고정자 통풍홀, 공극, 회전자 통풍홀의 경로를 통해 부하측으로 나오게 된다. 고정자 통풍홀은 2열로 배치하여 열발산을 중대시켰으며, 슬롯내부의 코일에 의한 온도상승을 효과적으로 대응하기 위하여 공극으로 냉각공기가 최대한 유입되도록 설계하였다.

또한 견인전동기의 경우 움직이는 열차의 하부에 설치되기 때문에 운전중에 Frame외부는 추가적인 냉각이 이루어진다. 이러한 냉각의 효율성과 소형, 경량화를 위하여 견인전동기 구조물을 용접구조물(Frameless) 방식으로 설계하였다.

4. 고속전철용 견인전동기 해석

아래 그림 5는 G7 고속전철용 견인전동기의 운전특성을 나타내었다. G7 고속전철용 견인전동기는 열차운행에 요구되는 견인력 곡선을 만족하도록 설계하였으며, 인버터와의 인터페이스를 고려한 V/f비의 전압패턴을 설정하였다.

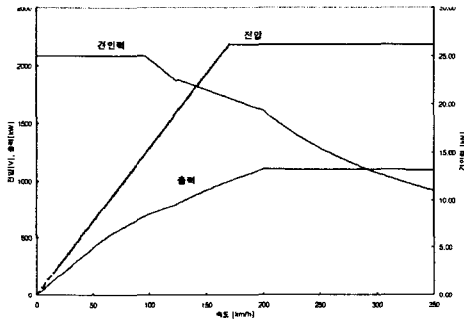


그림 5 G7 고속전철용 견인전동기에 요구되는 운전특성

표 5 운전구간별 전동기특성해석

구분	정토크 종단점	V/F일정 종단점	정격	대용정격
출력[kW]	684	999	1100	450
주파수[Hz]	40	70	143	60
전압[V]	1262	2183	2183	916
전류[A]	370	312.0	341	341
효율[%]	94.2	95.8	95.6	93.0
역률[%]	89.9	88.4	89.1	89.3
슬립[%]	2.00	0.94	1.15	2.79
토크 [kg·m]	566.5	467.8	252.7	250.5

고속전철 견인전동기의 경우, 일반 산업용 전동기와는 달리 V/f종단점(Base Speed)이 정토크 종단점과 일치하지 않는다. 이것은 열차운행에서 초기 기동력을 향상시켜 높은 출발시 높은 가속도를 얻고자 하는 것이다. 따라서 이때 견인전동기의 입력전류가 정격전류보다 높게되지만, 이러한 영역이 전체 운전시간에 비해 극히 일부분을 차지하고 있기 때문에 견인전동기의 과열로 이어지는 않는다. 대용정격에서의 시험은 장치 및 시험장비의 미비 등으로 인하여 정격에서 특성시험을 실시하는 것이 어려운 경우, 정격에서와 동일한 V/f비와 전류를 인가하여 시험할 수 있도록 한다. 표 5는 G7 고속전철용 견인전동기의 운전구간별 특성해석 결과이다. 견인전동기의 정격에서 역률 89.1%, 효율 95.6%이며, 슬립은 1.15%를 보여준다.

5. 시험결과

앞에서 설명한 바와 같이 설계된 G7 고속전철용 견인전동기를 제작하여 특성시험을 실시하였다. 표 6과 같이 측정된 고정자 저항측정치는 설계치에 대해 저항변동 허용한계범위 ±10%를 만족하는 값을 나타내고 있으므로, Forming 작업, 양단부 및 연결부의 설계 및 제작이 적절한 것을 알 수 있다.

표 6 고정자 권선저항측정

구 분	U - V	V - W	W - U
저항 at 22.4 °C	0.05715 Ω	0.05724 Ω	0.05720 Ω
저항 at 150°C	0.08549 Ω	0.08562 Ω	0.08556 Ω
상저항 at 150°C (설계치 0.0428 Ω)	0.04278 Ω		

표 7은 60[Hz] 전원입력에 대한 전압별 무부하 특성시험으로 무부하전류 및 손실을 나타내었다. 이때 속도 1800[rpm]에서 견인전동기의 기계손은 1.8[kW]이다. 표 8은 대용정격에서 부하특성시험을 실시한 결과를 나타내었다. 대용정격에서의 효율 92.88%, 역률 89.9%, 슬립 2.61%와 표 4에서의 해석결과로 효율 93%, 역률 89.3%, 슬립 2.79%를 비교할 때, 전기적 특성이 설계치를 만족시킨다는 것을 알 수 있다.

표 7 무부하 특성시험

전 압 (V)	전 류 (A)	무부하손 (kW)
1005	50.14	7.729
915.3	45.45	6.619
824.2	40.84	5.668
629.1	31.2	4.055
452.7	22.72	2.993
364.1	18.55	2.584
184.0	11.48	1.996

표 8 대용정격에서 부하특성시험

부하율 (%)	전 압 (V)	주파수 (Hz)	전 류 (A)	역 율 (%)	슬 립 (%)	출 력 (kW)	효 율 (%)	토크 (N.m)
50	916	60	163.4	90.70	1.112	222.5	94.6	1194
75	916	60	243.8	91.60	1.802	333.7	94.20	1803
100	916	60	335.8	89.94	2.613	445.0	92.88	2424
125	916	60	445.5	86.55	3.757	556.2	90.94	3066

표 9는 대용정격에서 온도상승시험을 실시한 결과를 나타내었다. 이때 고정자 권선온도는 기준치인 200K보다 적은 100.02K를 나타내었으며, 반부하측 베어링은 온도상승 한계인 55K보다 적은 47K로 측정이 되었으며, 나머지 부위에서도 단품에 영향이 없을 정도로 미비하게 증가하였다. 베어링의 경우 부하측과 반부하측의 온도차이가 발생하는 것은 반부하측에서 외부의 냉각공기가 유입되기 때문에 기계적인 마찰손에 의한 온도상승이 발생하는 반면에 부하측에서는 통풍홀을 통과함에 따라 냉각공기의 온도가 상승하게 되고, 이 온도상승된 공기가 부하측의 베어링 하우징과 만나게 됨에 따라 베어링의 기계적인 마찰손에 비해 온도가 추가로 상승하게 된다.

표 10에서 견인전동기의 전기적 절연시험 및 과속도시험에 대한 결과를 나타내었다. IEC 60349-2 규격에 따라 Megger test, Dielectric test, Surge test를 통하여 절연시스템의 타당성 및 절연물 손상유무를 확인한 결과, 기준치를 만족하였다. 또한 최대속도의 120%에 대한 기계적 이상유무를 검사하는 Over-speed test에서도 통과함에 따라, 개발된 견인전동기의 전기적, 기계적 안정성을 확인하였다.

표 9 대용정격에서 온도상승시험

측정부위	측정치	측정결과 (K)
고정자 권선 (K)		100.02
프레임 (K)		36.3
베어링 (K)	D.E	47.1
	N.D.E	17.3
통풍출구 (K)		29.0
주위온도 (°C)		27.1

표 10 절연시험 및 과속도시험

항목	시험결과
1000V Megger Test	700 MΩ 이상
Dielectric Test (6600V, 1min)	Pass
Surge Test (Ph-Ph, 6000V)	Pass
Over-speed Test (5120rpm, 1min)	Pass

6. 마치며

가까운 시일내에 경부고속전철이 새로운 국가 교통수단으로 운행이 될 것이다. 또한 세계 여러 나라에서 고속전철을 계획하고 있고, 우리나라도 경부선 이외에 호남고속전철 등에 대한 검토가 이루어지고 있다. 이렇게 고속전철은 수요적인 측면에서 미래가 밝다고 할 수 있다. 그러나, 우리의 현실은 지하철용 견인전동기를 독자개발하여 상용화를 진행하는 단계에 진입하였으나, 고속전철용 견인전동기는 제작 및 설계경험이 시작되는 단계라고 할 수 있다. 이에 점점 더 선진국의 기술보호가 심해지고, 이들 업체와 경쟁하기 위해서 핵심부품인 견인전동기의 국산화는 절실하다고 할 수 있다.

이러한 주변여건속에서 개발한 G7 고속전철용 견인전동기에 대한 설계, 해석 및 시험결과를 살펴보고 있다. 대용정격에서 부하시험결과, 당초 설계치를 만족하였으며, 온도상승시험, 절연시험, 과속도시험 등의 견인전동기 신뢰성시험을 실시하여 기준치를 만족시켰다. 현재 시험차량에서 인버터전원을 이용한 12대의 견인전동기가 시험운행중에 있다.

후 기

본 내용은 건설교통부, 과학기술부, 산업자원부 공동 주관 아래 선도기술개발사업으로 시행되고 있는 고속전철기술개발사업의 일환으로 수행되었다.

[참 고 문 헌]

- [1] G7 고속전철용 견인전동기 개발, 연차보고서, 1997~2001.
- [2] Electric Traction - Rotating electrical machines for rail and road vehicles, IEC 60349-2, 1993.
- [3] "인버터·교류전동기구동전기차의 현황", 일본전기학회보고 제325호.
- [4] "Polypase Induction Motors", Paul.L Cochran, 1989.

[부 록]

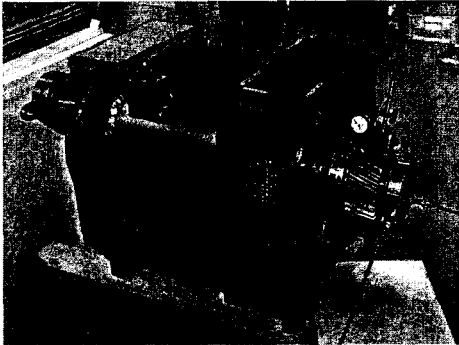


그림 6 한국형 고속전철용 견인전동기



그림 7 절연파괴시험용 모델 코어