

고속전철용 고속 견인유도전동기 개발

■ 윤 중 학 / 주식회사 로텐, 중앙연구소 책임연구원

서 론

우리나라에 철도가 들어온지 100년이 지난 지금, 늘어나는 인구, 차량 증가에 의한 교통체증을 해소하고 또한 국민소득이 향상됨에 따라 고급교통수단 즉 쾌적

하고 보다 빠른 교통수단을 선호하는 의식구조로 변화함에 따라 적절한 교통서비스 수준향상의 요구로 경부 고속전철이 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 각국의 개발상황을 살펴

표 1 견인전동기 방식에 따른 장점 및 단점 비교⁽¹⁾

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

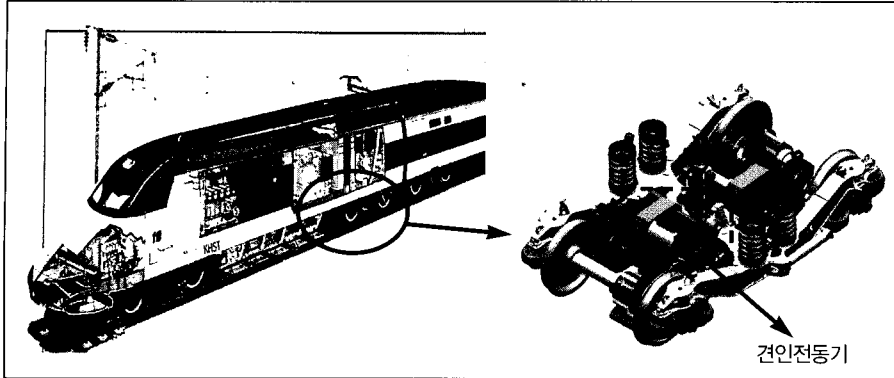


그림 1 고속전철용 지령 및 대차 쉘부 모습

보고, 국내기술로 설계한 고속전철용 유도전동기 개발에 대해 소개하고자 한다.

고속전철용 견인전동기

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

우선 고속전철용 견인전동기는 기본적으로 속도에 따른 운전특성을 충분히 만족시킬 수 있어야 한다. 또한 그림1에서와 같이 바퀴와 이를 지탱해주는 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 최소화하거나, Frameless 형식을 사용하며, 고정자 권선의 절연에 있어서는 신뢰성 향상, 기계적 강도 향상, 내열성 및 냉각 성능 등의 향상을 도모하기 위하여 진공함침용 Resin 및 절연재료를 H종 이상으로 사용한다. Bearing은 수명을 길게하고, 유지 및 보수가 간편한 구조로 하여야 하며, 전동기를 취

부한지 일정기간동안 전동기를 분해하지 않기 위하여 그리이스를 재 주입하거나 오일순환구조로 설계를 해야 한다.

세계 각국의 고속전철용 견인전동기

일본 고속전철

1872년 일본은 신바시와 요코하마 29km 구간

을 개통함으로써 최초의 관영철도를 갖추게 되었다. 이로부터 약 100년 후 일본은 새로운 철도의 움직임이 시작되었다. 이른바 신간선의 시대가 열리게 된 것이다. 일본의 고속철도는 1964년 도카이도 신간선의 개통 이래 점차 그 규모가 확대되었다.

탄환열차(bullet trains)라 불리기도 하는 신간선은 도카이도, 산요, 도호쿠, 아마가타, 죠에츠, 아키다 등이 있으며, 각 구간마다 자연적, 지리적 환경에 따라 각각 다른 특징을 가진 신간선이 운행되고 있다. 히카리라 불리는 0계 신간선 전차는 전체가 전동차 편성으로 2량을 1유닛으로 하며, 판토틀라프와 변압기 및 정류기를 2량에 1세트 탑재하고, 각축에 직류 직권전동기를 부착하였으며, 연속 정격 출력은 185kW이며 편성당 64대가 장착되었다.

1985년 제작된 도카이도 신간선과 산요 신간선의 0계 신간선 전차의 교체용으로 개발된 100계 신간선 전

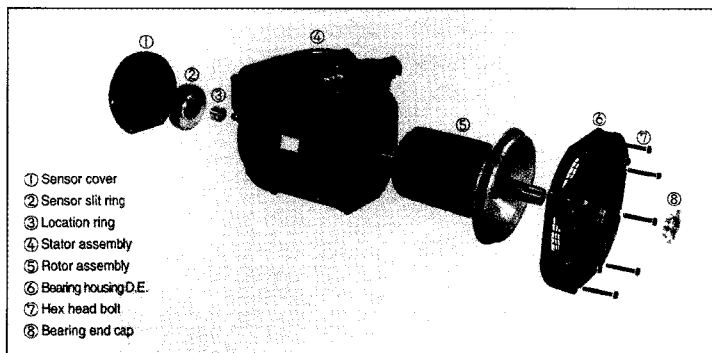
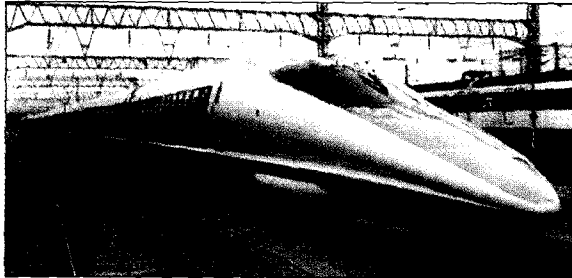
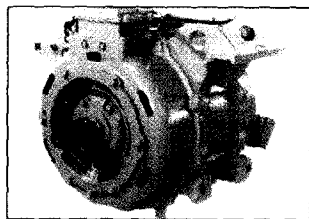


그림 2 견인전동기 부품 및 조립구성도



차는 직류 직권전동기를 사용하였으며 연속 정격 출력은 230kW이며, 편성당 48대가 장착되었다. 또한 200계, 400계 신간선 전차에는 사이리스터 연속위상제어 방식을 사용한 직류 직권전동기가 이용되었다. 이후 300계, E1계 신간선 전차는 3상 박스형 유도전동기를 도입하였다. 각각 300kW, 410kW의 출력을 가졌으며, 모두 VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) 인버터 제어방식을 사용하였다. JR동해는 1992년부터 300계를 사용한 도카이도 신간선에서 270km/h 운행을 개시하였으며, 다음 해에는 산요 신간선에도 확대되었다. 특히 1994년부터 운행된 E1계 신간선은 2층 차량의 특성에 따라 주전동기의 소형화, 고성능화를 추진하여 연속 정격 출력이 410kW에 이르는 전동기를 장착하였다. 현재 신간선에서 운행되는 전차 중 가장 큰 연속 정격 출력을 가지고 있다.

JR서일본은 1990년 시험차량으로 350km/h를 목표로 한 신간선 전차 제작을 발표하여 1992년 완성하였다. WIN350 이라 이름지어진 이 차량은 VVVF 제어에 의한 3상 교류 유도전동기, 알루미늄 합금제 차체를 채용하였다. 동력 분산형으로 각 차량에는 연속 정격 출력 300kW 전동기를 4개 장착하여 6량 편성의 출력은 7200kW를 낼 수 있었다. 또한 JR동일본은 1993년 STAR21을 개발하여 최고속도 425km/h를 기록하였으며, 1996년 JR동해는 300X 차량을 개발하여 최고속도 443km/h를 기록하였다. WIN350의 성과로 JR서일본은



500계 신간선 전차를 개발하여, 1997년 영업운전으로 일본 최초로 300km/h를 달성하였다. 500계 신간선 전차는 VVVF 인버터 제어에 3상 농형유도전동기 구동 방식을 채택하였으며, 냉각방식은 강제 냉각방식을 사용하였다. 또한 JR동해와 JR서일본은 그간의 성과를 활용하여 두 회사 공동으로 700계 신간선 전차를 개발하였다. 현재 운행되는 700계 신간선 전차는 JR동해와 JR서일본 모두 3상 농형유도전동기를 사용하고 있으나, JR서일본은 275kW, JR동해는 285kW의 다른 출력으로 설계되었다.



독일의 고속전철

독일은 유럽 최초로 1965년 6월 200km/h 운전이 가능한 E103형 전기 기관차를 완성하였다. 견인전동기는 직류정류자 전동기를

사용하였으며, 차량의 출력은 6000kW를 낼 수 있었다. 그러나, 영업운전은 신호와 궤도의 문제로 인해 1978년에 이르러서야 비로소 본격적으로 이루어 졌다. 또한 E103은 정류자와 브리쉬의 보수가 항상 문제가 됨에 따라 독일은 새로운 구동용 전동기를 개발할 필요가 있었으며, 이에 따라 VVVF 인버터 제어의 유도전동기 구동 방식의 E120형 전기기관차를 개발하게 되었다.

1981년 프랑스의 TGV가 시험운행으로 380km/h를 달성함에 따라, 독일도 고속전차 개발에 박차를 가하여 1985년 ICE(Inter City Experiment)로 명명된 고속열차를 완성하였다. 그러나 재래선에서는 충분한 고속 주행시험을 하는 것이 불가능함에 따라 고속신선이 완성된 이후부터 속도기록에 도전하여 1988년 철도로는 처음으로 400km/h의 벽을 넘어 406.9km/h를 기록하였다.

독일의 고속전철은 이전의 시작차 ICE를 개량하여 1991년 운행을 개시하였다. 처음 독일 국내 운행용으로 개발된 ICE-1은 동력 집중 방식으로 두 대의 전기기관차가 객차를 견인하는 방법이 이용되었으며, 전기방식은 교류 15kV, 16 2/3 Hz가 채택되었고, VVVF 인버터 제어의 유도전동기 구동이 이용되었다. 상업 운행

최고속도는 280km/h이며, 정격 출력은 1200kW을 낼 수 있다. 여객 수요가 적은 구간에서의 ICE 열차 편성을 확대하기 위해 ICE-1의 편성을 짧게 한 ICE-2가 1997년부터 등장하였다. 기관차 1량, 객차 7량으로 된 8편성으로 기관차와 반대측은 운전대가 부착된 객차로 push-pull 편성이 이루어졌다. 최고속도는 280km/h이며, 차량의 동력은 교류전원인 15kV, 16궤 Hz에서 4800kW를 낼 수 있다.

ICE-3는 제3세대 ICE 전차로 최고속도 330km/h로 주행이 가능하며, 견인 전동기는 강제냉각방식의 3상 4극 농형 유도전동기의 출력은 500kW에 최대 회전 속도 6000rpm을 낼 수 있다. 구배 등판 속도 향상과 가감 속도 향상에 의한 도달 시간 단축을 목표로 하여, 단위 중량당 출력을 기존 ICE-2의 두배인 20kW/ton으로 하였다.

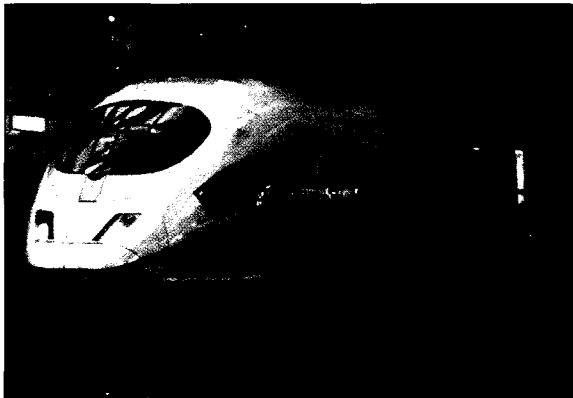


그림 6 ICE-3 (Class 406)

유럽은 각 국가마다 다른 전력 시스템이 운영되고 있다. 따라서 독일철도회사는 국제선 운영을 보다 빠르고 효율적으로 하기 위해 각기 다른 전력 시스템 - AC 15kV 16궤 Hz, AC 25kV 50Hz, DC 1500V, DC 3000V - 에 적합한 새로운 고속 전차 ICE-3 (Class 406)을 개발하였다. 이는 교류에서 8000kW, 직류에서 4300kW의 차량출력을 낼 수 있게 설계되어 프랑스, 네덜란드, 벨기에 등을 연결하는 국제선 운행도 가능하게 되었다.

프랑스 고속전철

프랑스는 세계에서 두 번째로 1832년 철도 운영을 개시하였다. 오랜 철도 역사에 힘입어 프랑스 국철 (SNCF)는 유럽 최초의 고속 열차 전용선인 LGV를 1981년 파리(Paris)~리옹(Lyon) 사이에 개설하였다. LGV는 교류 25kV, 50Hz로 전철화 하였으며, 최고운전속도는 300km/h로 되어 있다. 프랑스 고속철도는 최초 선로는 LGV, 차량은 TGV로 분리하여 사용했지만 현재는 두 개 모두 TGV로 불리어지고 있다.

프랑스 국철은 1967년 전기기관차 견인에 의한 200km/h 운영을 실시하였다. 이후 프랑스에 적합한 고속열차를 개발하기 위해 1970년대부터 TGV 개발을 시작하였다. 1972년 5차체 연접구조로 발전기와 직결한 2대의 가스 터빈으로 3760kW 출력으로 318km/h의 속도를 낼 수 있는 시작차 TGV001을 완성하였다. 이후 전기를 동력으로 하는 TGV는 꾸준한 개선 과정을 겪은 후, 1982년 운영되기 시작한 TGV-PSE가 최고속도 380km/h를 기록하여 속도면에서 세계 기록을 갱신했으며, 1990년 개발된 TGV-A(Atlantique)는 515.8km/h를 기록하여 세계 최고 속도를 달성하였다.

현재 운행중인 TGV는 크게 3가지로 나눌 수 있다. 우선 남동선용 TGV-PSE는 전기기관차 2량으로 연접식 객차 8량을 연결하여 운행한다. 견인 전동기는 직류 직권 전동기 구동 방식을 채택하였으며, 전기방식은 교류 25kV, 50Hz 및 직류 1500V 인 2전원 방식으로 운영되며, 견인전동기의 연속정격은 625kW이다. 대서양

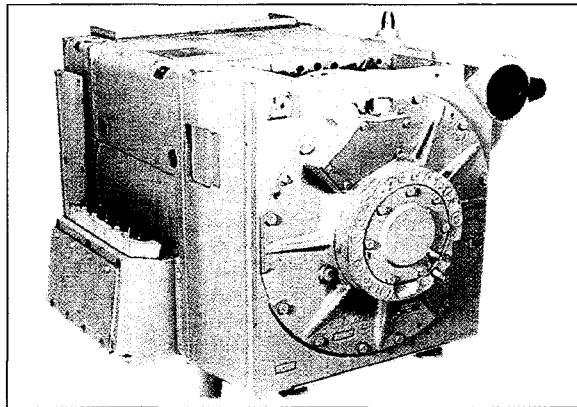


그림 7 경부고속전철용 견인전동기(동기전동기)



선용인 TGV -A는 TGV-PSE의 약점인 직류전동기의 정류자를 없애기 위한 방안으로 동기전동기를 선택하였다. 견인전동기의 출력은 1100kW로 되어 있으며, 차량의 출력은 교류전원 25kV,50Hz에서 8800kW, 직류전원 1500V에서 3600kW를 낼 수 있으며, 기관차 다음의 객차의 대차에는 전동기가 설치되어 있지 않다. 또한 1994년 개발된 북유럽선 TGV-R은 2전기식과 3전기식이 있으며, TGV-A와 기본적인 차량 자체는 동일하게 구성되었다.

이외에도 2층차 TGV-Duplex는 남동선의 수송력 증가의 필요에 따라 1996년 영업운전을 개시하였다. 견인전동기 정격출력은 1100kW 이며, 동기전동기를 사용하였다. 벨기에와 네덜란드를 운행하기 위해 4전원 방식을 사용하는 TGV -Thalys는 TGV-Duplex와 동일한 편성 정격출력을 가지고 있으며, 최고속도 320km/h를 낼 수 있고, 강제 냉각방식을 이용한 1100kW의 출력을 가진 동기전동기를 사용하였다. 또한, 우리나라 경부고속전철에 도입된 TGV는 강제냉각 방식의 1130kW 동기전동기를 이용하였다.

현재 개발중인 유럽형 차세대 TGV인 AGV (Automatic a Grande Vitesse) 600kW의 출력을 가진 3상 유도전동기를 사용하였다. 낮은 에너지를 사용하고, 고속운행을 하기 위한 목적으로 개발중인 AGV는 350km/h의 상업운전에 도전하고 있다.

한국형 고속전철용 견인전동기

최근까지 국내에서는 견인전동기에 대한 국내보유기

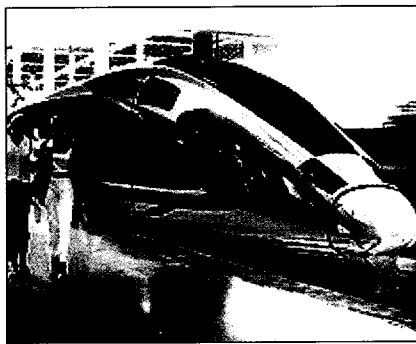
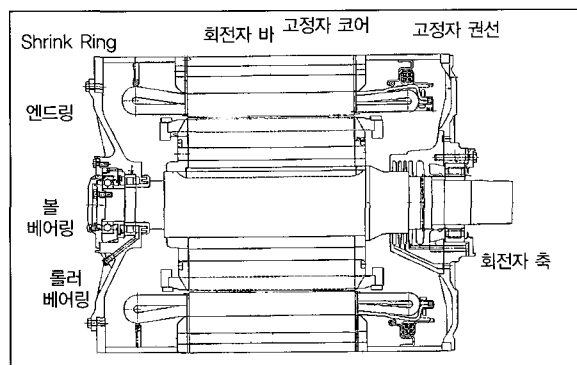


그림 8 프랑스 차세대 고속전철 AGV

술은 지하철용 200kW급 유도전동기에 대한 설계 및 제작기술이 확보되었으나, 500kW급 이상의 대용량 유도전동기에 대한 설계 및 제작기술은 확보되지 않은 실정이었다. 특히 고속전철용 견인전동기에 대한 자료는 경부고속전철용 동기전동기에 대한 제작기술이 유일하였다. 따라서 본 개발에서는 선진국에서 기술이전이 아닌 독자적으로 한국형 고속전철에 사용할 견인전동기를 개발하였다.

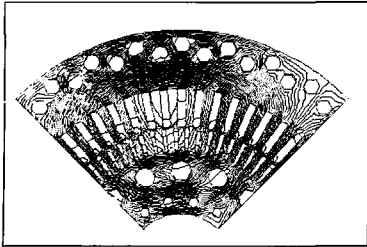
표 2 한국형 고속전철용 견인전동기 사양

극 수	4극	상 수	3상
출 령	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



철 심(Core)

고정자 및 회전자의 철심은 전기에너지를 기계에너지로 변환하는데 있어서 매개역할을 하는 자기에너지의 효율적인 활용이 중요하며, 이러한 자기에너지를 저장, 변환하는 철심의 설계는 전동기의 성능 및 경제적인 설계에 있어서 매우 중요한 요소이다. 따라서 전동기의 특성, 손실, 온도상승, 회전자 철심의 최대원심력 등을 전반적으로 검토하여 철심설계가 이루어 졌다. 특히, 슬롯조합은 전동기의 진동, 소음, 고조파 손실 등과 밀접한 관계에 있으므로, 선진국의 고속전철용 견인전



동기의 비교분석과 FEM 전자장해석을 통하여 선정하였다.

절연

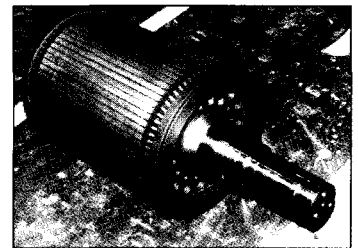
전동기에 있어서 절연은 구조, 재료, 냉각 등에 따라 수명과 성능을 결정하는 핵심 요소이다. 일반적으로 전동기의 손실이 열로 변환되기 때문에 적절한 발열구조와 더불어 최적의 절연물 선정과 구성을 함으로써 단위체적당 용량 증가와 수명을 연장시킬수 있다. 또한 한국형 고속전철용 견인전동기는 인버터의 DC Link단 전압 2800V, 스위칭주파수 수백 Hz의 인버터전원으로 운전되고 있다. 이 경우 고정자 권선인버터의 고속 스위칭에 따른 다량의 서지전압이 발생하며, 이러한 서지전압이 견인전동기의 운전 전압과 중첩되어 단자에 걸리는데 서지전압이 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.

진공가압함침(V.P.I.)방식은 현재까지 함침 절연방법으로 가장 좋은 방식으로써, 먼저 전동기를 건조로에서 습기를 제거하고 함침기에 레진과 함께 넣어 진공을 가

한 후에 다시 압력을 가한다. 이로써 전동기 코일 내부의 절연재 사이사이에 기포없이 균일하게 레진으로 채워져, 열전도도, 기계적인 안정성, 내전압, 내코로나 특성이 증가하게 된다.

회전자

견인전동기에서 회전자 바와 엔드링은 폐회로를 형성하여 전류를 흐르게 함으로서 고정자측의 전류와의 상호작용에 의해 전동기 특성을 결정하는 중요한 요소이다. 견인전



동기의 회전자에 요구되는 전기적인 특성뿐만 아니라 열적인 특성, 진동이나 충격에도 견딜수 있는 기계적인 특성에도 만족되어야 한다.

특히 견인전동기의 엔드링과 바의 재질 선정시 고려되어야 할 것은 1대의 인버터로 여러대의 전동기를 병렬운전할 때, 견인전동기의 슬립과 토크 특성이 민감하게 변하면 토크 불평형이 문제가 된다. 따라서 이러한 영향을 개선하기 위해 2차측 저항을 적절하게 조절해야 한다.

냉각구조

견인전동기의 냉각구조는 외부에서 강제공급되는 냉

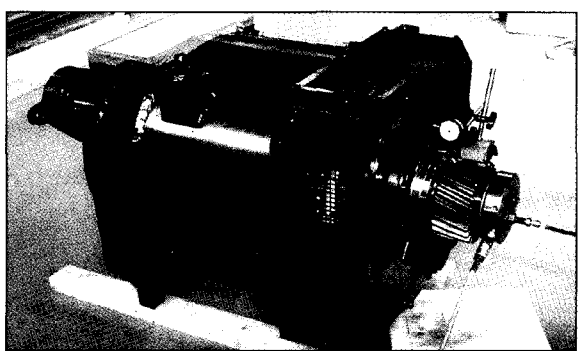
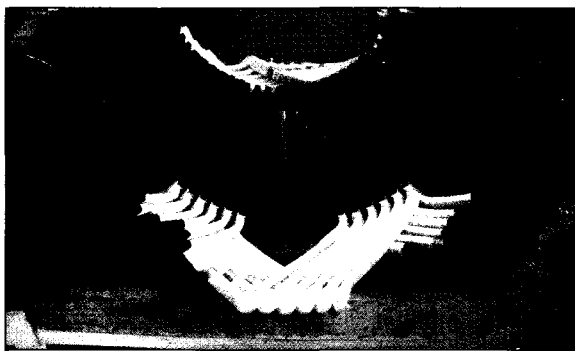


그림 3 한국형 고속전철용 견인전동기



각공기가 고정자 통풍홀, 공극, 회전자 통풍홀의 경로를 통해 나오게 된다. 또한 견인전동기의 경우 움직이는 열차의 하부에 설치되기 때문에 운전중에 Frame외부는 추가적인 냉각이 이루어진다. 이러한 냉각의 효율성과 소형, 경량화를 위하여 견인전동기 구조물을 Frameless 방식으로 설계하였다.

마치며

가까운 시일내에 경부고속전철이 새로운 국가 교통수단으로 운행이 될 것이다. 또한 세계 여러나라에서 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 설계경험을 시작하는 단계라고 할 수 있다. 이에 점점 더 선진국의 기술보호가 심해지고, 이들 업체와 경쟁하기 위해서 핵심부품인 견인전동기의 국산화는 절실하다고 할 수 있다.

그러나, 그동안의 경험과 성과를 바탕으로 기술과 신뢰성을 확보해 나가면, 가까운 시일내에 국산 견인전동

기가 장착된 고속열차를 탈 수 있을 것이다.

후 기

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

[참 고 문 헌]

- [1] "Traction motors for electrically propelled vehicles", G. Brusaglino, RGE-N° 20/93, Nov., 1993.
- [2] "세계의 고속철도와 그 기반 기술", International Tutorial Lecture on High Speed Train, 한국 고속철도 건설 공단, 2001. 7
- [3] "세계의 고속철도와 속도향상 & 자기부상식 철도기술", Sumida Shunsuke, 2001.1
- [4] "세계의 고속철도", 佐藤芳彦, 1999.6
- [5] "Economic benefits of AC inverter propulsion", Kinh D. Pham, Mass transit, september 1994 proceedings.
- [6] "고속전철 견인전동기 개발 2단계 2차년도 연차 보고서", 2001.10