

차세대 고성능 고온 초전도 모터 개발

권영길
한국전기연구원 책임연구원

1. 개발의 배경

오늘날 첨단기술의 발달과 함께 지속적으로 증가하는 에너지 수요와 이에 동반하여 대기오염의 주범인 CO₂가스의 배출량에 급격한 증가에 대해 세계 각국은 서로를 감시하며 지구의 지속가능한 발전을 위한 대책을 마련하고 있다. 이와 같이 친환경적이며 에너지 저소비형의 산업기반 조성을 위해 총 전기에너지 소비의 25%이상을 차지하는 1,000마력 이상 산업용 모터의 효율향상과 크기, 무게 등을 저감하는 기술 개발을 꾸준히 개발해 왔다.

그러나 기존 산업용 모터의 경우 자로(磁路)의 형성과 자장의 집중을 목적으로 회전자와 고정자에 상당량의 철심을 사용하는데, 철심의 자기(磁氣) 포화에 의해 고자장 발생에는 한계가 있어 산업용 모터의 고성능, 고출력화에 걸림돌이 된다. 또한, 철심의 사용은 회전자의 무게증가, 와전류, hysteresis 손실 발생으로 전력손실을 초래하여 산업용 모터의 효율 저하의 원인이 되기도 하며, 산업용 모터를 대용량화할 경우 전체의 무게와 부피 증가는 필연적이며 이는 더 넓은 설치공간, 제작비용뿐만 아니라 운반 및 설치비용의 증가를 초래한다.

따라서 기존 모터 기술은 이미 한계점에 접근하여 더 이상의 기술향상을 기대하기 어렵기 때문에, 이러한 기술적 한계를 돌파하기 위한 신기술로서 초전도 기술을 응용하는 연구가 활발히 진행되게 되었고, 이미 미국, 독일 등 선진각국에서는 초전도모터의 핵심 기술을 확보하고, 대용량 실용화기 개발을 위한 연구가 활발히 진행 중이다. 이에, 우리나라도 차세대 초전도모터 개발을 위한 핵심 기술을 확립하고, 세계시장에서의 기술경쟁력을 확보하기 위해 2001년부터 상용화 모델을 축소한 100마력급 고온초전도 모터 개발을 목표로 연구개발에 착수하였다.

2. 개발 현황

가. 기술의 특징

(1) 고온초전도 모터의 구조

초전도 모터는 기존의 회전자에 사용되는 구리선 대신에 전기저항이 0(제로)인 초전도선을 사용함으로써 대전류 통전 및 고자장 발생이 가능하며, 고정자와 회전자에 사용되는 철심을 제거함에 따라 무게, 부피 및 각종 손실을 대폭 줄인 고성능, 고출력의 첨단 모터로서 대략적인 구조는 그림 1과 같다. 초전도 모터는 초전도 도체를 사용한 계자코일, 토크튜브, 저온냉매 및 진공층을 가진 회전자와 전기자 코일과 기계실드로 이루어진 고정자 그리고 계자코일을 초전도 상태로 유지하는 냉각시스템과 모터의 구동 및 이상 유무를 감지하는 구동 및 감시시스템으로 구성된다.

계자코일이 초전도 상태가 되기 위해서는 극저온으로 냉각되고 유지되어야 하기 때문에 극저온 냉각시스템과 연결되는 회전자는 극저온 단열을 위한 복잡한 구조를 가지며, 고정부에서 회전부로 냉매가 지속적으로 공급되기 위해서는 특별히 고안된 결합장치도 필요하다. 저온냉매는 초전도 계자코일이 외부로부터의 교란 자계에 영향을 받지 않도록 차폐하는 동시에 복사열 차단 기능을 가지며, 진공층 내부에 복사열 차단을 위해 열차폐층(superinsulation)을 설치한다. 계자코일에 작용하는 회전력을 구동 샤프트에 전달하는 역할을 하는 토크튜브는 외부로부터의 전도열침입을 최소화 하기 위해 전도열전달계수가 작은 재질로 만들어 진다. 회전자계를 발생시키는 고정자의 전기자 코일은 계자코일의 직류 자계와 서로 쇠교하여 회전력을 일으키는데, 계자에서 발생하는 자장의 세기가 철심의 포화자속밀도를 훨씬 넘어서기 때문에 철심을 사용하지 않는 공심(air-core)형 구조를 가진다.

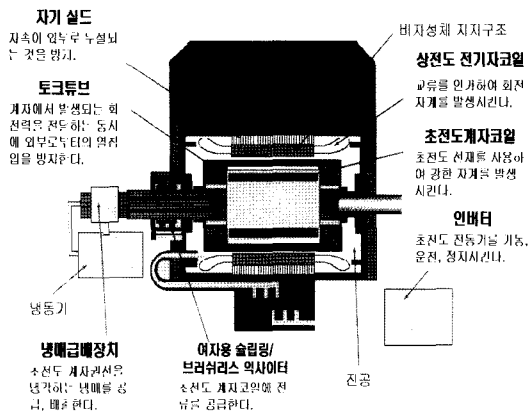


그림 1. 고온초전도 모터의 구조

특히, 초전도 모터는 초전도계자코일과 함께 냉각시스템이 매우 중요하므로, 최적상태에서 운전하기 위해서는 회전자 내부의 계자코일의 온도가 운전온도 이하의 극저온으로 일정하게 유지될 수 있도록 하는 신뢰성 있는 냉각시스템을 구축하여야 하는데, 지금까지 개발된 초전도 모터의 경우 냉동기를 사용하여 극저온으로 냉각한 기체헬륨이나 액체네온을 냉매로 이용하고 있다.

(2) 초전도 모터의 특징

■ 저손실 · 고효율화

초전도 모터는 기존의 구리코일 대신에 고온초전도(High Temperature Superconducting) 도체를 사용한 새로운 형태의 모터이며, HTS 도체는 구리선보다 더 많은 전류를 저항 없이 흘릴 수 있기 때문에 여자 손실은 영(0)이 되고 냉각손실을 고려하더라도 총 손실을 50%이하로 대폭 줄여 전체적으로 약 2% 정도의 효율 향상을 꾀할 수 있다.

■ 소형 · 경량화

초전도 모터의 경우 강자장 발생의 이점 때문에 같은 출력용량일 경우 부피 및 무게를 1/3 이하로 획기적으로 줄일 수 있다. 그 효과는 용량이 커질수록 더 커지는데, 기존 모터가 설치된 공장에서 공간의 제약 때문에 모터의 용량을 증가시키는데 어려움이 있어 생산량 증대를 꾀할 수 없다면 초전도모터가 적합할 것이다. 또한, 소형·경량화의 특징을 활용하여 새로운 응용분야가 생기게 되는 데, 선박의 프로펠러를 초전도 모터와 직결하여 구동하는 pod형 추진방식이 가능하게 되어 선체의 선형설계 개념을 바꾸고 있다.

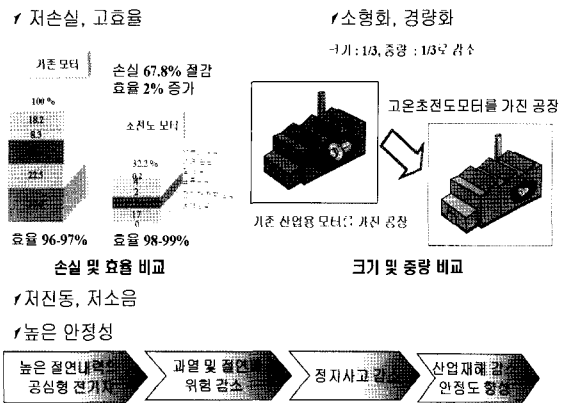


그림 2. 초전도 모터의 특징

■ 저진동 · 저소음화

기존의 동기 모터의 경우 자로의 집속을 위해 철심을 전기자권선에 사용하였다. 이 때문에 회전방향으로 고정자의 슬롯 형상의 요철에 의해 미세하게 회전의 불규칙이 일어나는데 이것이 진동과 소음의 원인이다. 초전도 모터의 경우 철심이 제거된 구조이므로 이것으로 인한 진동과 소음을 획기적으로 줄일 수 있다.

■ 안정도 향상

전기자권선은 높은 전기절연능력을 갖는 재료로 지지가 되므로 대지와 절연 전압용량을 증대시킬 수 있어 충분히 높은 전압에서 운전이 가능하며 과열이나 절연파괴로 인한 정지사고의 위험이 적기 때문에 안정도가 높아진다. 그림 2에 초전도 모터의 기술적 특징을 도식적으로 나타내었다.

나. 국내외 기술현황

■ 미국

미국이 이 분야에서 가장 활발한 연구를 진행 중이며, 세계 최고의 기술을 보유하고 있다. 1990년대 중반에 Bi계열의 고온초전도선재를 이용하여 소형의 직류모터를 제작 시연하는 것으로 시작하여, 1996년에는 Bi-2223 선재를 이용한 200마력급의 동기모터(Synchronous Motor)를 개발하였고, 그 후 AMSC(American Superconductor Corporation)와 같은 초전도 전문 기업이 주가 되어 1000마력, 5000마력의 고온초전도모터를 개발에 성공하였다. 더 나아가 2002년 2월에 미해군의 ONR(Office of Navy Research)으로부터 선박에 장착할 230rpm, 5MW의 고온초전도모터를 8백만 달

러에 공급하는 계약을 체결하여, 2003년에 영국 ALSTOM사와 같이 성능평가를 마치고 미 해군에 납품한 상태이다. 또한 같은 시기에 미 해군으로부터 차세대 해군 군함에 장착할 36.5MW의 고온초전도모터를 개발하기위한 7천만 달러의 계약을 체결하여 1차 설계를 마친 상태이다

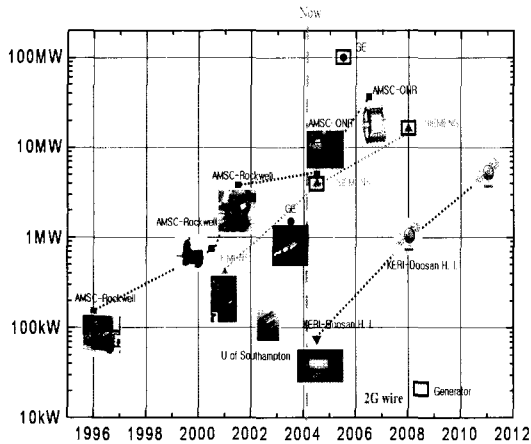


그림 3. 초전도 모터/발전기 개발 추이

그리고, 구조적으로 동일한 초전도발전기 개발은 GE를 주축으로 DoE의 지원을 받아 100MVA급 기존 발전기의 회전자 대체용으로 개발이 진행 중이며, 모델기로서 1.5MVA 급은 성공적인 시험을 마쳤다. 미국의 NASA 와 DoD의 지원으로 조지아 공대(Georgia Institute of Technology) 등이 2003년부터 항공기용 고온초전도 모터 개발을 검토 중이며, 2004년 말에 개념설계가 완료될 예정이다.

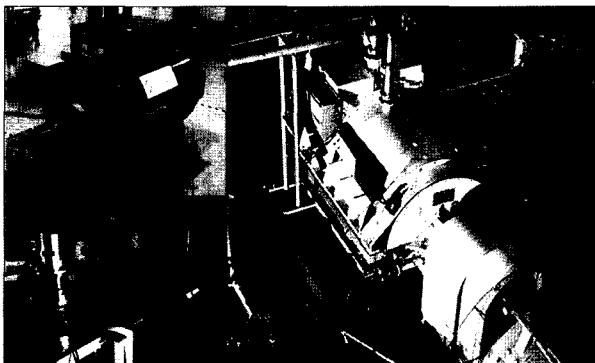


그림 4. 5000마력 산업용 모터(좌상, AMSC), 400kW 고온초전도 모터(좌하, SIMENS) ALSTOM Power Conversion에서 시험 중인 5MW 고온초전도 모터(우, AMSC).

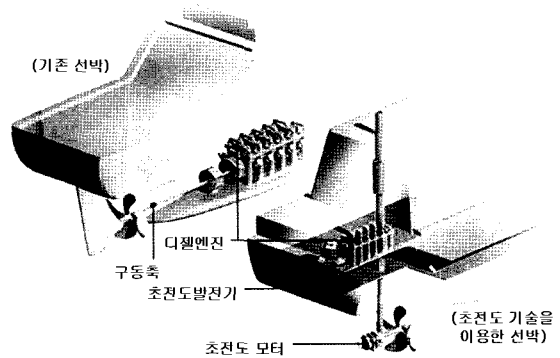


그림 5. 초전도기술을 선박에 적용한 예

□ 독일

유럽에서는 SIEMENS가 독일 정부의 BMBF(Ministry for Education and Research, 교육연구부)로부터 지원을 받아 2001년 400kW 고온초전도 모터를 성공적으로 개발하였고, 현재는 그림 3에 나타나 있듯이 독립된 전력시스템인 선박 내에서 사용할 4MW 초전도 동기 발전기 개발을 진행 중이다. 4MW급 개발을 거쳐 2008년 최종적으로 16MW급개발을 목표로 하고 있다.

□ 영국

영국의 Southampton 대학에서 기존 동기 발전기의 고정자를 사용하고 회전자만 초전도화한 100kVA급 3000rpm동기발전기 설계를 마치고 현재 단품을 제작하고 있는 중이다. 운전온도는 액체질소 혹은 액체공기를 냉매로 사용하여 57-77K으로 할 계획이다.

□ 우리나라

우리나라에서는 한국전기연구원(개발책임자:權永吉)이 두산중공업(주)과 공동으로 과학기술부의 『21세기 프론티어연구개발사업』의 일환으로 수행중인 “차세대초전도응용기술개발사업”의 지원을 받아 100마력, 1800rpm 고온초전도 모터를 개발하였다. 이번에 개발한 고온초전도모터는 같은 용량의 기존 모터에 비해 크기와 무게를 1/3이하로 줄임과 동시에 기존 모터 대비 2%이상 효율이 높은 미래의 산업용 대용량모터 개발을 위한 축소모델로서 선진 외국에 비해 적은 용량이지만 핵심 부품인 고온초전도 코일의 설계, 보빈 제

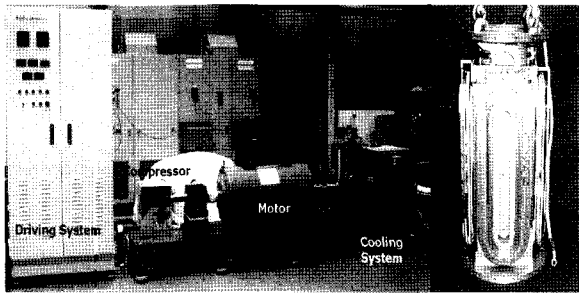


그림 6. 국내에서 개발한 100마력 고온초전도 모터(좌)와 초전도 계자권선(우)

작, 권선, 냉각, 회전자 용기 및 공심형 전기자 제작 등 대부분의 핵심 기술을 독자적으로 개발하였다. 초전도모터는 최근 세계적으로 크게 관심을 모으고 있는 고효율 첨단기기로서 선박 추진용이나 산업용 모터로 활용이 가능하며, 이번에 획득한 핵심 기술은 국내 기술진이 독자적으로 개발한 세계적 수준의 기술로, 향후 초전도 모터 개발에서 세계적 기술 개발 우위를 확보할 수 있는 발판을 마련하였다.

다. 기술적 성과

이번에 개발한 100마력급 고온초전도 모터는 용량 면에서는 2003년 미국 AMSC사의 6500마력급과 2001년 독일의 SIEMENS사의 500마력급 고온초전도모터에 이어 세계 3번째이나, 선진기술국에 비해 10년 정도 늦게 시작하였으면서도 초전도 응용기술 중 가장 난이도가 높은 이 분야에서 독자적으로 개발하였다는 점에서 의의가 크다. 그리고 냉동기일체형 초전도 회전자 기술을 제안(국제특허출원)함으로써 세계적으로 실용 고온초전도모터의 원천핵심기술로 이용될 수 있을 것으로 기대하고 있다.

특히, 전도냉각방식을 이용한 네온 액화기술, 초전도코일 제작용 3축 권선기, 고온초전도 도체 접합 기술 등은 세계적 수준으로 인정받고 있으며, 정지된 냉각시스템에서 고속으로 회전하고 있는 회전자 속으로 냉매를 지속적으로 공급하는 기술과 전도냉각을 좋게 하기 위해 보빈과 냉매가 담기는 통을 일체형으로 만든 회전자축의 개발 등은 본 연구개발의 가장 큰 성과로 볼 수 있다.

라. 산업적 파급효과

■ 경제. 산업적 파급효과

고온초전도모터가 본격 상용화되는 2010년

경의 세계 초기시장 규모는 약 20억불 규모로 예상되며, 현재 국내에서 사용되고 있는 1,000마력 이상의 산업용 모터들을 고온초전도모터로 대체시 연간 약 1억불 규모의 에너지 절약효과를 기대할 수 있다.

미국의 경우 전체 생산된 전기에너지의 사용량 중 30% 정도를 대형모터가 소모하고 있으며, 이 중 70% 정도를 고온초전도 기술을 적용하는데 적합하고, 기존에 설치된 1000마력 이상의 대용량 모터를 초전도모터로 대체시켜 효율을 2% 정도 향상시킬 경우, 연간 최대 20억 불의 에너지 절약효과를 기대할 수 있다.

3. 향후계획

이번에 개발한 100마력급 모델기 개발을 통하여 확보한 핵심기술을 기반으로 향후 2007년까지 1MW급, 2011년까지 3~5MW급의 최적화된 고온초전도모터를 개발하는 대용량화 및 상용화에 매진할 계획이며, 기존의 각종 산업용 모터의 대체 및 선박추진용등과 같은 새로운 적용분야를 모색하여 초전도 모터의 실용화를 본격적으로 추진할 예정이다.

또한 확보된 기술을 에너지절약 및 전력품질의 고효율화를 동시에 추구할 수 있는 초전도 발전기의 실용화기 개발 등으로 활용하여 연구 성과를 극대화할 계획이다.

저자이력



권영길(權榮吉)

1959년 07월 18일생. 1982년 부산대학교 기계공학과 졸업, 1990년 부산대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사), 1992년 한국전기연구원 입원, 현재 초전도응용연구그룹장