

## 고성능 선박을 위한 고온 초전도 모터 개발

이 진 태 · 한국해양연구원 해양시스템안전연구소

무역, 문화교류 및 전쟁 수행에 사용되고 있는 대형 고성능 선박의 역할은 현재 뿐 아니라 과거에도 매우 중요하였으며, 그 시대의 최첨단 기술을 활용하여 최고의 성능과 경쟁력을 유지하고 있다. 19세기 선박 설계자들은 지난 5,000년간 선박의 추진 동력원으로 사용되었던 돛을 대체하는 스팀엔진을 설치하여 획기적인 성능향상을 이룬 바 있으며, 그 이후 디젤엔진과 원자력 엔진을 설치하여 더욱 고성능의 선박을 개발하여 사용 중이다.

최근 미 해군은 7,800만\$를 투자하여 최첨단 선박추진 장치 개발사업을 추진 중이다. 당 사업이 성공한다면 군사용 함정 뿐 아니라 화물선, 여객선에 활용될 수 있으며, 발전사업에도 커다란 영향을 주리라 예상되어 본 고에서 소개코자 한다. 미 해군 연구성 (ONR, the U.S. Office of Naval Research)은 현재 무게 23ton 용량 5,000KW의 선박용 초전도 모터를 개발하여 시험 중이며, 실선용 36,500KW의 초전도 모터의 설계를 완성하였다. 해군성 장관인 코헨소장은 초전도기술을 사용하여 모터, 발전기 및 동력전달장치의 무게와 크기를 대폭 축소시킬 수 있으며, 미 해군이 추진 중인 기계적 추진동력에서 전기적 추진동력으로의 변환을 가속화시킬 수 있다고 말하였다.

개발 중인 초전도 모터는 초전도 유지를 위한 냉각시스템을 포함하여도 일반 모터 대비 약 70%의 크기와 무게로 동일한 동력을 낼 수 있다. 절감된 무게와 공간을 활용하여 화물 혹은 무기를 더 많이 운반할 수 있으며, 여객선의 경우 약 20개의 침실

을 추가 설치 할 수 있다. 또한 모터 효율이 1~2% 증가하여 연간 수십만\$의 연료비를 절감할 수 있다. 초전도 모터의 개발사는 American Superconductor 사 (Westborough, Mass. 소재)이며, 핵심부품인 초전도 코일을 제작한다. 800만\$에 제작된 5,000KW 초전도 모터는 2004년 7월에 해군에 인도되어 플로리다 주립대 CAPS(Center for Advanced Power Systems at Florida State Univ.)에서 실험중이다. 추후 약 9개월 동안 실시간 전자 시뮬레이터를 활용하여 극한 운전상태에서의 성능을 검증할 예정이다. 시험결과는 36,500KW급 모터개발 사업(계약액 7,000만\$)에 활용될 예정이다.

시험의 결과가 설계자의 의도와 같이 확인된다면, 17년 전에 엄청난 주목을 받으며 발견되었던 '고온 초전도체'를 활용한 최초의 대형 실용화 사업으로 연결되리라 예측된다. 그동안 Sumitomo, Ultera, Pirelli, Southwire 등 여러 업체들이 고온 초전도체를 활용한 전선을 개발하고 시험을 수행하였으나 상용 실용화 사례는 거의 없었다. 고온 초전도체에서 의미하는 '고온'이라는 언어적 의미는 매우 상대적이다. 즉 '고온'이란 1987년 발견 이전 초전도체가 초전도성질을 유지하기위한 온도 보다 고온이라는 뜻이다. 즉 고온 초전도체는 전기저항이 0이 되어 초전도 성질을 갖게 되는 온도가 절대온도 100도(100°K)로서, 일반 초전도체가 초전도 상태가 되는 10°K에 비해 상대적으로 고온이라는 점이다. 그러나 이 온도는 -173°C로서 여전히 매우 낮은 온도이며 이 온도를 유지하기 위해 기체 헬륨, 네온

혹은 액체 질소 등을 사용한다. 일반 초전도체를 위한  $-263^{\circ}\text{C}$ 를 유지하기 위해서는 액체 헬륨과 같은 비싼 냉매가 필요하며, 이 온도를 유지하기 위해서는 고온 초전도체 온도 유지를 위한 비용보다 약 10배의 비용이 소요된다. 초전도 전선의 경우 전선 전체 길이를 냉각시켜야 되므로 액체 질소를 사용한 냉각방법도 어려운 점이 많다. 모터 혹은 발전기와 같은 회전기계의 초전도 코일의 경우 중요한 회전 부품 부분만 약  $32^{\circ}\text{K}$ 의 온도로 유지시키면 된다.

실용화를 위한 적용범위는 매우 넓으며, 유람여객선의 경우 몇 년 전부터 이미 전기추진방식으로 전환 중이어서 초전도 모터를 활용하는 것은 매우 자연스럽다. 해군이 5,000KW 모터를 개발하고 있지만 초전도 모터를 추진장치로 사용한 최초의 선박은 상선이 될 가능성이 많다. American Superconductor사의 CEO인 Greg Yurek 사장은 5,000KW 고온 초전도 모터는 이미 1년 전에 주문되었으며 이를 장착한 선박은 2005년 상반기 중 건조 될 것이라고 말하였다. 그러나 모터를 주문한 업체의 이름은 밝히기를 거부하였다.

선박 적용에 많은 이점이 있지만 산업용 전기모터 활용분야에도 연 12억\$의 시장이 있다. 고온 초전도체를 활용하여 소형화, 경량화 및 고효율화를 달성한다면 산업용 전기 모터 및 발전기 분야에도 많이 활용될 것이다. General Electric사 (Fairfield, Conn. 소재)는 미 에너지성으로부터 100MVA 용량의 초전도 발전기 제작을 위한 사업을(사업비 1,230만\$) 수주하였다. ONR의 Scott Littlefield는 상기 발전기 제작사업에 관심을 갖고 있으며 선박에 활용이 가능한지에 대하여 검토하고 있으나 미 해군은 모터 개발에 더 많은 관심을 갖고 있다고 말하였다.

해군이 초전도 모터개발에 매력을 갖고 있는 이유를 이해하기 위해서 미 해군의 대표적 구축함(Spruance class)을 살펴보자. 이 구축함은 디젤유를 사용하는 7대의 가스터빈을 장착하고 있다. 4대의 대형 가스터빈은 7~8만KW의 동력을 발생시켜 기어박스과 추진축을 통하여 2개의 프로펠러를 작동

시켜 선박을 추진시킨다. 나머지 3대의 가스터빈은 7,500KW의 전력을 생산하여 선박의 레이더, 컴퓨터, 통신기기, 운항기기, 전등 및 일반 전기용품의 동력으로 사용된다. 상기 합정 운항시간의 90%는 순항속도로 운항되며, 이때 4대의 가스터빈 중 2대만이 사용되며 길이 60m가 넘는 축계를 통하여 동력이 전달된다. 즉 90%의 운항시간 중에는 사용하지 않는 가스터빈 2대 및 용량을 초과하는 축계, 기어박스 등 중량물을 싣고 다니며 운송능력을 허비하고 있다.

미 해군의 차세대 구축함(DDX)의 개발방향은 전전선박(All electric ship)으로 설정되었으며, 주 추진을 포함한 모든 동력은 전기를 이용하도록 하였다. 또한 전력수요에 따라 동력발생장치의 개수를 결정하여 가장 효율이 높은 상태에서 전기를 발생시키도록 하였다. 기계에너지를 전기에너지로 변환하고, 프로펠러를 구동하기 위해 다시 기계에너지로 변환시키는 과정에서 약 10%의 에너지가 손실되지만 더 큰 이득을 얻을 수 있다. 즉 동력원인 발전기와 가스터빈의 배치를 유연하게 하여 공간손실을 최소화 할 수 있으며, 추진축의 길이를 최소화 할 수 있다. 또한 극대동력 초단파 방어시스템, 치명적 강력 레이저, 전기 방사 탄환 등 과학 공상소설에서 나오는 대규모 전기가 필요한 첨단 무기시스템을 장착할 수 있다는 이점이 있다. 미 해군은 아직 초전도 모터를 차세대 구축함에 적용하는 것을 공식적으로 결정하지는 않았지만 초전도 모터의 개발이 완성된다면 현재 설치가 계획되어 있는 영구자석 모터를 대체할 수 있을 것이다.

초전도 모터의 장점을 이해하기 위해 모터 작동 원리를 간단히 설명한다. 모터는 전기에너지를 기계에너지로 변환시키기 위해 고정자(Stator)와 회전자(Rotor)를 설치한다. 고정자와 회전자는 일반적으로 전기에 의해 자력을 갖게 되는 전기자성체(Electromagnets)이다. (일부 모터는 회전자에 영구자석을 설치하는 경우도 있음) 일반적인 대형 모터에서는 고정자와 회전자에 구리 코일을 감아 전기

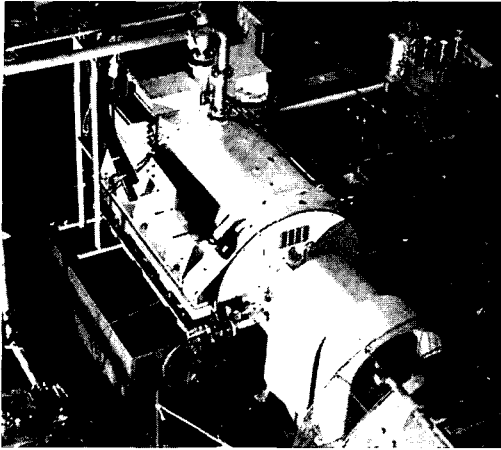


그림 1. 공장시험을 위해 설치된 5MW 모터 및 시험장치

자성을 갖게 한다. 초전도 모터에서는 회전자 구리 코일 대신 고온 초전도체로 만든 BSCCO (bismuth strontium calcium copper oxide)라는 테이프처럼 생긴 물체를 사용한다. 고정자는 구리 코일을 사용한다. BSCCO는 기체 헬륨을 냉매로 사용하는 상용 제품으로 세라믹 재료로 만들어 진다. BSCCO 테이프는 구리 코일에 비해 같은 단면적으로 100배의 전류를 통하게 할 수 있으므로 같은 공간에서 보다 강력한 자장을 발생시킬 수 있어 강력한 토오크 즉 회전력을 발생시킬 수 있다. 또한 초전도 모터는 냉각을 위한 모든 에너지 소모를 고려하더라도 일반 모터보다 약 1% 정도 효율이 높다. 초전도 모터 개발 중 가장 커다란 어려움은 회전자 코일의 냉각 문제이다. American Superconductor사는 회전자 냉각을 위해 냉매를 회전자 코일내부로 순환시키고 냉매를 냉각시키기 위한 냉매 냉각장치를 모터 부근에 설치하였다. 냉매 냉각장치는 2단 파일 캐비닛 크기이어서 작은 공간에도 설치가 가능하다.

5MW 초전도 모터는 Florida State University의 CAPS로 보내져서 실제 선박운용 시 요구되는 모터 성능을 확인하기 위한 시험이 수행될 예정이다. 실제 선박 운용 시 예상되는 시나리오에 의한 시뮬레이션 과정에 따라 운전되며, 모터의 회전속도, 토오크, 온도, 전압 및 전류 등 상세 성능시험 결과를

얻게 된다. 또한 충돌 등과 같은 특수 상황에서의 시험도 수행된다. CAPS에서 1달 동안 모든 조건에서의 시험을 수행한 후, 모터의 수명기간(30~40년) 동안의 내구성을 확인하기 위해서 Philadelphia에 있는 다른 실험실에 보내져서 실제 프로펠러에 연결되어 시험이 수행될 예정이다. 이러한 시험을 수행함으로써 다음 단계의 대형 사업인 36.5MW 초전도 모터의 개발 위험율과 비용을 대폭적으로 감소시킬 수 있다.

초전도 모터의 상용화가 성공한다면 상선에서 활용되고 있는 Pod 추진장치의 실용화에도 커다란 영향이 있으리라 판단된다. Pod 추진장치란 선체의 부수면아래에 설치된 Pod 내부에 모터를 설치하고, 모터 축에 프로펠러를 연결하여 모터가 직접 프로펠러를 구동함으로써 추진력을 얻는 장치이다. 프로펠러가 연결된 Pod 자체를 회전시킴으로써 추진력의 방향을 회전시켜 타 없이 선박의 조종을 쉽게 할 수 있다. Pod 추진장치는 조종성능과 추진효율을 최대화하며, 화물 혹은 무기를 위한 공간을 대폭적으로 증대시킬 수 있다. 예를 들어 프랑스에서 건조가 거의 완료된 Queen Mary II호는 4기의 Pod 추진장치를 설치함으로써 프로펠러축을 설치한 Queen Mary I호 대비 15개의 선실을 증가시켰다. 선박설계자들에 의하면 컨테이너선박의 경우에는 Pod 추진장치를 설치한다면 2.5~4%의 컨테이너를 더 많이 운반할 수 있다고 한다. 만약 초전도 모터의 개발이 완료되어 Queen Mary II호에 사용될 수 있다면 현재 각 400톤 무게의 44MW 모터 2개는 각 75톤 무게의 36.5MW의 초전도 모터로 대체될 수 있을 것이다. 전문가에 의하면 전기추진 선박용 전기 모터와 발전기 시장은 2002년 기준 4억\$ 규모이며 10년 후에는 20억\$가 되리라 예측된다. 유람여객선과 일부 상선은 지난 10년간 저속 대마력 전기모터의 발전에 힘입어 전기추진 방식으로 변환되고 있다. CAPS에서 시험되고 있는 저속(230 RPM), 대 토오크(208 kN-m) 5MW 고온 초전도 모터의 성능이 입증되면 현재 운항중인 여객선, 연구

선, 케이블 설치선 등 많은 선박에 직접 활용될 수 있으리라 판단된다.

상기 선박의 전기추진으로의 변환과 더불어 미 해군은 모든 해군 함정의 전기 추진화를 생각하고 있다. 이는 당 사업을 담당하고 있는 ONR, American Superconductor사, CAPS 뿐 아니라 North Grumman Ship Systems, North Grumman Marine Systems, Ideal Electric, Syntek Technologies와 같은 참여하고 있는 모든 사업자들의 꿈인 120RPM, 36.5MW, 고온 초전도 모터가 모든 시험을 통과하여 그 성능이 검증된 된다면 가능할 것이다.

자 료: Cover Story of SPECTRUM, Publication of IEEE, Jan. 4, 2004.

이진태 | 한국해양연구원 해양시스템안전연구소



- 1953년 8월생
- 1987년 8월 미 M.I.T. 공학박사
- 현 재 : 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 책임연구원
- 관심분야 : 선박추진장치 및 선박시스템 설계
- 연 락 처 : 042-868-7250
- E-mail : ljtpop@kriso.re.kr