

고온 초전도 기술의 상용화를 위한 극저온 냉각장치의 연구 방향

정 상 권
한국과학기술원 기계공학과

1. 머리말

초전도 현상이 발견된 후로 저온 냉각장치(cryogenic cooling device)는 이러한 초전도 물질을 응용하는 장치에 꼭 필요한 요소가 되었다. 현재와 같이 액체 질소 온도(77 K) 이상에서 초전도 현상이 가능한 고온 초전도체(HTS, High Temperature Superconductor)를 응용하는 경우에는, 저온 초전도체(LTS, Low Temperature Superconductor)와 달리 매우 극저온인 4.2 K의 액체 헬륨으로 냉각할 필요가 없으므로, 저온 냉각 장치의 구조가 좀 더 간단해지고 경제적이라는 장점이 있다. 하지만, 근본적으로 극저온 냉각기 또는 저온 유체가 필요하다는 사실은, 초전도 응용 장치 전체를 복잡하게 만드는 것이기도 하다. 또한 저온 냉각 장치가 전체 초전도 응용장치 시스템의 신뢰성을 좌우할 수도 있기 때문에, 저온 냉각 장치는 전체 초전도 응용장치 시스템에서 매우 중요한 부분이라 할 수 있다. [1, 2, 3]

우리나라에서 초전도 기술의 응용과 관련해서는 KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) 및 21세기 프론티어 사업을 통해서 초전도의 원천 기술인 극저온 냉동 기술에 대한 관심이 국내에서도 고조되고 있는데, 아직도 국내의 산업기반이 워낙 뒤져있어서 외국의 기술력에 많은 의존을 하고 있는 안타까운 현실이다. 따라서 프론티어 사업에서 극저온 냉동 기술의 중요성이 부각되어, 이전보다 좀 더 심각하게 이 분야의 국내 연구를 고취시키고자하는 움직임은 매우 바람직하다고 할 수 있다.

초전도의 역사를 보면 지난 100 년 동안 그 현상의 신기함과 커다란 잠재성으로 인하여 많은 과학자와 엔지니어들이 연구 개발을 해왔고, 최근에 저온 초전도체와는 달리, 고온 초전도체(HTS)가 더욱 높은 온도에서 초전도 현상을 가능하게 함으로써 응용 초전도

체의 상용화는 더욱 가속화되고 있다. 그러나, 현재까지 그 많은 초전도의 응용 분야에서 MRI(Magnetic Resonance Imaging)와 NMR(Nuclear Magnetic Resonance) 기기만 상용화되어 있다는 사실은 우리에게 시사하는 바가 매우 크다. 즉, 일반적으로 첨단 기술이 연구 개발되어 탄생하고 발전하는 과정을 보면, 그 특성에 따라서 상용화가 되느냐, 못 되느냐가 결정된다. 그 특성이란 이 기술이 원천 기술(enabling technology) 역할을 하는 것인지, 대체 기술(replacing technology) 역할만 하는 것인가 하는 것이다. 대부분의 응용 초전도 기술은 대체 기술적인 측면에서는 큰 장점이 있지만, 기존 기술을 대체하기 위해서는 경제성, 신뢰성, 사용의 용이성 등 기술 외적인 측면도 많이 고려되어야 하므로 쉽게 상용화되지 못하였다. 한편, MRI와 NMR은 독특한 원천 기술이면서, 예전에는 존재하지 않았던 특수한 기술 분야이기 때문에 그 효용성을 발휘하여 현재 널리 상용화되어 있는 상황이다. 주지하는 바와 같이 상용화된 초전도 응용 기술은 매우 큰 파급 효과를 발휘하며, 타 분야의 첨단 연구에도 막대한 공헌을 하고 있다. 여기서 극저온 냉동 기술은 응용 초전도 기술이 더욱 발전되어 사회에서 많이 사용될 수 있도록 하는 필수적인 역할을 한다. 즉 응용 초전도 시스템의 경제성, 신뢰성, 사용의 용이성과 같은 특성은, 모두 그것을 냉각하는 극저온 냉각 시스템이 얼마나 효율적이며, 고장을 일으키지 않고 수명이 길며, 사용자가 용이하게 이용할 수 있느냐하는 사실인 것이다. 따라서 앞으로 응용 초전도 기기의 상용화를 확대하기 위해서는 각각의 특성에 맞는 극저온 냉각 시스템이 저가이면서도 수명이 긴 장치로서 개발되어야만 한다.

극저온 냉동 기술과 관련된 우리나라의 산업기반은 이제부터 만들어 가야 한다. 너무 성급하게 단기간의 효과만 습득하기 위하여

외국의 기술에 계속 의지하거나 만족하지 말고, 기술 선진국으로서 우리나라가 자립하기 위해서는 이 분야에 대하여 체계적이고 지속적인 연구 투자가 이루어질 필요가 있다. 극저온 냉동 기술은 첨단연구장비 및 대형공동연구시설에 자주 응용이 되고 이러한 장비를 이용한 연구의 질적 수준을 획기적으로 향상시키기 위해서는 산학연 모두의 노력이 경주되어야 할 것이다.

2. HTS (고온 초전도) 응용 시스템

HTS 기술은 이미 전통적인 기술에 대한 대체 기술(replacing technology)인 저온 초전도 기술에 대하여, 또 다른 대체 기술(replacing technology)로서, 기존의 시장을 대체하려면 상당한 저항이 따르게 된다. 항상 가격(cost)과 내구성(reliability)이라는 문제가, 시스템의 고성능(high performance)에 의한 초전도 시스템의 상용화 동기를 정당화시키지 못할 수도 있다. 일반적으로 우리는 다음과 같은 초전도 응용 시스템에 대한 연구가 전 세계적으로 이루어져 왔고, 또한 진행되고 있음을 볼 수 있다.

- 초전도 케이블
- 초전도 모터 및 발전기
- 초전도 변압기
- 초전도 한류기
- 초전도 RF 필터
- 초전도 양자 간섭 장치(SQUID)
- 고자장 NMR 자석의 내부 코일
- 자기 분리 장치용 초전도 자석
- 초전도 전자 소자
- 고에너지 입자 감지용 초전도 자석
- 플라이 휠 에너지 저장 장치
- μ -SMES

이러한 다양한 HTS 기술의 응용 시스템은, 가격의 제한성이 가장 적은 순서를 따라서, 다음에 열거하는 분야와 같이 현실적인 응용이 기대된다고 볼 수 있다.

군사분야 -> 우주분야 -> 의료분야 -> 특수 에너지분야 -> 산업 에너지분야 -> 일반(대중) 에너지분야
 즉, 이러한 예상은, 초전도 연구 결과가 아

무리 훌륭한 기술적인 우수성을 보인다 할지라도, 그것의 효과적인 파급 효과는 경제성에 따라서 좌우될 수도 있다는 것으로서, 일반 에너지 분야에서 적용이 기대되는 초전도 기술은 기존의 상전도 기술에 의하여 매우 큰 저항을 받을 것임이 확실하다고 말할 수 있다. 즉, 상전도 기술과 초전도 기술의 가장 근본적인 차이는 그들의 동작 온도 범위이며, 상온 초전도체가 개발되지 않는 이상, 초전도 기술의 응용 시스템에서 극저온 냉각장치의 추가는 사용자에게 부담이 되는 것이다. 따라서, 다음 절에서는 이러한 초전도시스템의 상용화 또는 대중화를 위하여 어떠한 연구가 수반되어야 하는지, 좀 더 구체적으로 살펴보기로 한다.

3. 초전도 응용 시스템과 관련한 극저온 냉각장치의 개발 방향

(1) 초전도 시스템을 냉각하는 극저온 냉동 시스템은 보이지 않는 것이 좋음 (INVISIBILITY).

- 응용 초전도 시스템은 그 자체도 상전도 전력기기에 비하여 복잡한 장치일 뿐 아니라, 부가적인 극저온 냉동기는 사용자가 관리하는 데에 부담이 되므로, 그 사용에 있어서 전혀 어려움을 느끼지 못하도록 하여야 한다. 이러한 예는 그림 1과 같은 MRI 시스템의 초전도 자석에서 적나라하게 볼 수 있는데, 사용자인 의사나 간호사는 4.2 K인 액체 헬륨 냉각 시스템에 대하여

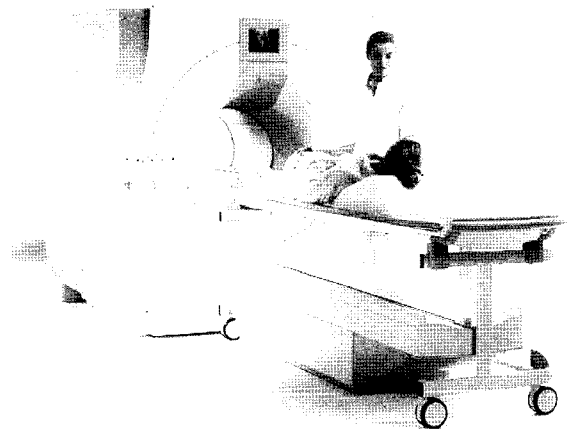


그림 1. 초전도 자석을 사용하는 MRI 시스템의 응용 예

전혀 의식을하고 있지 않도록 만들어져 있다.

(2) HTS 기술의 진정한 상용화를 위하여 극저온 냉동 시스템은 경제적이어야 함 (ECONOMICS).

- 연구 개발 단계부터 현재 개발된 냉동기의 기술 수준을 정확히 이해하고, 어떠한 종류의 냉동기 방식이 경제적인지 결정하고 접근한다.

- 극저온 냉동 시스템도 일반적인 기계와 마찬가지로, 대량 생산을 통한 가격 하락의 효과에 대한 고찰이 필요한데, 이 때 재료비가 저렴한 극저온 시스템이 궁극적으로 가장 선호될 가능성이 있다.

- 액체 질소 부근의 온도를 가능하게 하는 극저온 냉각기의 가격은 약 수 \$10,000 정도로서 (냉각 용량은 1~10 W), 이는 년 간 100대 정도의 생산을 기준으로 한 것이며, 산업체에서는 대략 매 년 10,000 대를 생산한다면, 대 당 가격을 약 수 \$1,000 정도의 단위로 낮출 수 있다고 예측하고 있다.

(3) 극저온 냉동 시스템의 단순성과 내구성 (SIMPLICITY AND RELIABILITY).

- HTS 시스템을 위한 전도 냉각 방식은 전체 냉각 시스템이 단순해질 수 있는 장점이 있으므로 그의 적합성을 판단한다.

- 저온 유체를 강제 순환하는 방식에 비하여, 자연 대류를 이용하는 단순하고 내구성이 큰 수동적인 냉각 방식에 대한 검토 또한 필요하다. 강제 순환에 필요한 극저온 펌프는 부가적인 냉동 부하의 증가, 전체 시스템 가격의 증가, 초전도 기기의 내구성 및 수명에도 영향을 미친다.

- 선진국에서 이루어진 선행 연구의 내용을 그대로 답습하는 것 보다, 그 내용을 잘 소화하고, 좀 더 혁신적인 아이디어로써 창의적인 새로운 냉각 기술에 대한 연구가 바람직하다.

(4) 노력과 재원의 투자 방향에 대한 현명한 선택 필요(WISE DECISION).

- HTS 기술의 냉각 온도 범위는 그 응용

목적에 따라서 다양하므로 이에 적합한 극저온 냉동기의 종류(J-T 냉동기, 역 브레이튼 냉각기, Stirling 냉각기, G-M 냉동기, pulse tube 냉동기 등)를 매우 신중하게 선정하고, 집중적인 연구 개발을 수행하는 것이 바람직하다.

- 연구 개발할 극저온 냉동기의 종류를 선정한 후에도, 어떠한 부품(압축기, 열교환기, 팽창기, 재생기 등)에 대한 집중적인 연구가 국내에서 더 필요한 것인지, 전문가의 의견을 참조하여 효율적인 연구 개발이 이루어지도록 하여야 한다.

- 비록 소규모일지라도 세계적인 우수 연구 집단을 키워 나가기 위하여, 새로운 개념의 창의적인 극저온 냉동 기술 연구에 대한 투자도 필요하다.

(5) 극저온 조립 기술 연구(CRYOGENIC PACKAGING)

- 극저온 냉동기의 개발과 사용을 효율적으로 하기 위해서는, HTS 시스템에 대한 극저온 열설계가 매우 중요하다.

- HTS 시스템 자체의 냉동 부하 계산 및 외부로부터 들어오는 열의 차단(thermal anchoring) 기술, 단열 기술(thermal insulation)에 대한 연구가 필요하다. [4, 5]

- 열전달의 효율성을 높이기 위한 히트 파이프(heat pipe) 또는 열 스위치(thermal switch)도 훌륭한 응용 연구 대상이다.

- 극저온 냉동기와 열접촉(thermal contact)과 관련된 경계 열저항(thermal interface resistance) 연구도 냉각 시스템의 성능을 좌우하는 문제이며, 이러한 극저온 조립 기술은 HTS 시스템에 요구되는 냉동기의 용량을 크게 좌우하여 전체 시스템의 가격을 결정할 수도 있으므로, 골프에서 퍼팅 기술과 유사하다고 볼 수 있다.

4. 극저온 냉각장치 관련 인프라 구축과 기술이전

앞에서 언급하였듯이 우리나라의 극저온 냉동 기술 관련 인프라는 매우 취약한 편이므로, 이를 구축하기 위해서는 산업체를 적극적으로 유도하여야 하며, 시장성이 있는 극저온 기술을 개발하는 것이 무엇보다도 필

요하다. 진공 기술과 정밀 가공 기술을 보유하고 있는 산업체를 끌어들이고, 극저온 냉동 기술의 응용에 관심을 가지며 기술력을 중요시하는 중소기업과, 첨단 연구 기술을 보유하고 있는 학계 또는 연구소가 유기적인 협력을 통한 공동 연구를 수행한다면, 비교적 자연스럽게 이 분야의 인프라도 형성될 것이다. 단, 이 과정에서 예산의 효율성만 강조한 나머지, 외국의 기술을 그대로 모방하거나 답습하는 일은 피해야 할 것이다. 고온 초전도 응용 시스템에 필요한 극저온 냉동기를 연구 개발하는데 필요한 기술 인프라를 열거하면 다음과 같다.

- 고효율 전기 모터 설계 및 제작 기술
- 트라이볼로지(tribology) 전문 기술
- 손실이 적은 코일, 플렉서(flexure) 스프링 설계 및 제작 기술
- 내마모성 재료 및 아웃 개싱(outgassing)이 적은 재료 사용 기술
- 저온 재료 특성 전문 기술
- 정밀 용접 기술
- 진공 밀봉 기술
- 저온 단열 기술
- 고효율 열교환기 설계 및 제작 기술
- 동력학적 설계 기술과 진동 및 소음 제거 기술
- 전자기 소음 발생 억제 기술
- 정밀 박판 성형 제조 기술
- 진공 브레이징 기술
- 청정 조립 기술

극저온 냉각장치 연구 개발의 초기 단계에서는 산업체에서 극저온 냉동 기술 전반에 대한 이해가 부족할 수 있으므로, 산학협동 단기강좌를 개최하는 등 산학협력의 기반을 먼저 다져야 한다. 이러한 경험과 여건을 바탕으로 국내 관련 연구진을 유기적으로 연결하고, 어느 정도의 연구 기술에 대한 공감대가 형성이 되면, 관련 산업체의 컨소시엄을 결성하여 산업 정보, 기술 수요 등에 대한 정보를 공유하면서 초기의 국가 지원에 더하여 산업체 참여 및 자원비율이 증가하도록 한다. 극저온 냉동 기술의 발전이 직접적으로 산업발전에 기여하도록 유도하고, 궁극적으로 다양한 극저온 냉각기 제작 기술을 확립하여 전적으로 수입에 의존하던 값 비싼

제품을 국산화하고, 수출도 가능하게 하여 국제경쟁력을 제고하도록 한다. 이런 면에서 극저온 냉동 기술에 관한 선행 연구를 수행하고 있는 대학이나 연구소를 중심으로 학제간 공동연구, 국제 협력, 산학협력 등의 효율적인 사업운영으로 산업에 응용 가능한 핵심 기술 연구를 먼저 수행하여, 극저온 냉동 원천기술을 배양한다는 것은 현실적으로 가장 타당하고 효율적인 전략이다. 또한, 극저온 냉동 기술에 대한 연구는 그 특성상 항상 실험 장비 중심의 연구가 진행되어야 한다. 이론적인 해석 기술도 물론 필요하지만, 극저온 온도에서 발생하는 문제들은 대부분 실험을 통하여 규명이 되었고, 그 해결 방안이 모색되었으므로 실험을 통하여 얻는 연구자의 경험이 무엇보다도 중요하게 고려되어야 할 것이다.

극저온 냉동 기술에 대한 연구 개발 수준이 정상 궤도에 오르는 과정 동안, 대학에서는 수 년 정도의 공동 연구를 수행하면서 석사 및 박사 인원을 배출하여 연구소와 산업계에 진출하도록 하여, 장기적으로 국가의 기간 인력으로 활용되도록 해야 할 것이다. 또한, 이는 현실성 있는 공학 교육의 모델을 정립하는 데에도 이바지해야 할 것이며, 이러한 노력이 저온 공학 관련 인프라 구축과 기술이전이라는 소기의 목적을 자연스럽게 달성할 수 있다고 본다.

5. 맺음말

고온 초전도 시스템용 극저온 냉각장치 기술은 기계, 물리, 전기 등 여러 분야의 내용이 조화롭게 어우러졌을 때 효율적인 모습이 된다. 우리는 종종 다학제간 연구 분야에서 각 연구자 들이 협력 연구를 할 때에 서로의 관점이 다른 데서부터 발생하는 문제들을 볼 수 있는데, 이것은 각기 학습 배경이 다른 연구자들 간에 용어나 사고의 차이로 인하여 의사 전달이 명확하게 이루어지지 못한 경우가 많기 때문이다. 또한 초전도 시스템의 응용 분야가 다양한 것처럼, 그것에 맞는 적절한 극저온 냉각장치도 한 가지일 수가 없다. 따라서 본 고에서 언급한 공통적인 극저온 냉각장치의 중요 특성을 살리면서, 또한 각 응용 분야의 요구 조건을 정확하게 분석하여, 가장 경제적이고 효율적인 시스템을 구

성할 수 있을 때에, 고온 초전도 기술은 머지않은 장래에 상용화가 될 것이다.

참고문헌

- [1] C. H. Rosner, 1997, Emerging 21st century markets and outlook for applied superconducting products, *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 43, pp. 1-24.
- [2] J. Yuan, J. Maguire, A. Sidi-Yekhlef and P. Winn, 2000, 30-50 K single stage pulse tube refrigerator for HTS applications, *Cryocoolers 11*, pp. 235-242.
- [3] K. Klundt, C. Leinerth, G. Thummes, F. Steinmeyer, M. Vester, W. Renz and C. Heiden, 1997, Use of a pulse tube refrigerator for cooling a HTS-antenna for magnetic resonance imaging, *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 43, pp. 2085-2092.
- [4] G. Lehmann, J. Ramsden, J. Sochor and G. Beeck, 1997, Cryopackaging for real world products, *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 43, pp. 865-870.
- [5] T. H. Clynne, 1997, Packaging and integration issues for cryoelectronic and superconducting materials, *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 43, pp. 871-880.

저자이력



정상권(丁常權)

1962년 8월 16일생, 1985년 서울대 공대 기계공학과 졸업, 1992년 MIT 기계공학과 졸업(공학박사), 1992~1995년 MIT Plasma Fusion Center 연구원, 2000~2001년 MIT Francis Bitter Magnet Laboratory 방문교수, 1996~현재 KAIST 기계공학과 교수