

에너지 손실 '제로' 에 도전 초고속 정보 · 통신 사회 앞당긴다

글_류강식 차세대초전도응용기술개발사업단 단장 ksryu@keri.re.kr

기획연재순서

- ① DNA
- ② 반도체
- ③ 자동차
- ④ 항공
- ⑤ 로봇
- ⑥ 차세대 전지
- ⑦ 토목
- ⑧ 바이오신약
- ⑨ 스마트 무인기
- ⑩ 인간유전체기능연구
- ⑪ 21세기 차세대 초전도기술
- ⑫ 지능형 홈네트워크
- ⑬ 디지털콘텐츠, SW솔루션
- ⑭ 디지털 TV

전 기난로나 전기스토브의 전원을 연결하면 코일이 빨갛게 달아오른다. 전기가 코일로 흐를 때 전기의 흐름을 방해하는 높은 저항이 발생하고 이 저항이 열로 나타나기 때문이다. 이것보다는 약하지만 냉장고, 텔레비전, 세탁기, 진공청소기 등 전기를 사용하는 모든 제품은 열을 발생하고 있다. 전기는 전깃불을 밝히고 전기제품을 가동시키는 에너지로서 이용되지만, 전기를 전기제품까지 옮기고 전기제품을 가동시키는 과정에서 발생하는 열은 근본적으로 전기에너지의 손실을 의미하는 것이다.

전기를 생산하는 발전소에서 석탄이나 오일 등의 1차 에너지를 전기에너지로 바꾸는 과정에서 나타나는 손실만도 이미 60~70%에 달하고 이렇게 해서 생산된 전기를 가정이나 공장, 사무실 등의 전기를 직접 사용하는 '최종 수용가' 까지 보내는 데도 7~8%의 손실을 가져오게 된다. 이와 같은 손실은 지구의 에너지 자원의 부족을 더욱 유발시키고 지구 온난화를 가속시키는 역할을 하고 있기 때문에 손실을 줄이기 위한 다양한 노력을 하고 있다. 그러나 전기를 생산하고 수송하고 저장하고 이용하는 데서 발생하는 전기적 손실의 대부분은 전기기기를 구성하는 구리(Cu)도체의 전기저항 때문으로, 근본적으로 구리도체를 이용한 20세기 과학기술로는 전기저항의 한계를 극복할 수 없다.

이런 문제를 해결하기 위하여 오래 전부터 과학자들은 전기저항이 없는 초전도 연구에 매달리고 있다. 초전도체는 전기저항이 제로이기 때문에 원론적으로는 발전소에서 생산된 전기를 하나도 잃어버리지 않고 목적지까지 100%를 보낼 수 있다. 바로 초전도의 이런 점이 20세기 구리시대를 벗어나 '전기저항 제로, 에너지 손실 제로' 라는 21세기 과학기술 혁명을 열어갈 돌파구로 인식되고 있는 이유이다.

'사용온도 제한성' 이 상업화 걸림돌

초전도현상은 1911년 네덜란드 출신 과학자 카머링 오네스에 의해 액체 수은에서 처음 발견된 이래 수많은 과학자들에 의해 보다 높은 온도에서의 초전도 현상을 실현시키기 위한 노력과 함께 실용 초전도재료 개발을 위한 연구가 지속적으로 이루어져 왔다. 그 결과 1950년대말부터 실제로 초전도재료가 사용되는 초전도응용 환경 조건에서 견딜 수 있는 높은 임계자장값을 갖는 NbTi합금이나 Nb₃S_n 금속간화합물 등의 금속계 초전도재료가 속속 발견되면서 이들 초전도재료를 이용한 다양한 분야의 응용연구가 본격적으로 시작되었으며, 초전도현상이 발견된 이후 약 70년이 지난 1980년대초, 오늘날 병원에서 질병의 조기진단을 위해 없어서는 안 될 첨단 영상의료진단 장비인 MRI 진단장치가 개발되게 된다.

바로 이 MRI가 오늘날 초전도 상용화 제품의 효시로서 이 뒤를 이어 핵자기공명(NMR), 초전도에너지저장(Micro-SMES), 초전도양자간섭장치(SQUID)응용, 단결정성장용 초전도마그넷 등이 상용화 개발된다. 그러나 이들 응용제품들은 초전도현상이 나타나는 최대 허용온도인 임계온도가 낮은 금속계 초전도재료를 사용하고 있기 때문에 경제성과 신뢰성이

매우 낮은 액체헬륨 온도(4.2 K: -269℃)로 냉각할 수밖에 없다.

상업적으로 이용 가능한 이들 금속계 초전도재료가 발견될 당시만 해도 초전도체가 가지고 있는 전기저항 제로로 인한 무한한 잠재성 때문에 많은 사람들은 20세기 안에 초전도현상을 이용한 다양한 응용분야의 산업화가 이루어질 것으로 예상하였는데 거의 반세기가 지난 지금까지도 그다지 상용화에 성공하지 못하고 있는 이유는 무엇일까?

그 이유는 앞서 언급한 초전도재료의 사용온도 제한성에 있다. 초전도체는 우리가 극저온이라 부르는 일정온도 이하에서만 초전도현상이 나타나는데, 바로 이 극저온을 발생시키고 유지하기 위한 기술이 초전도 응용제품의 경제성과 신뢰성 및 응용의 다양성을 저해하는 가장 큰 요소이기 때문이다. 그러면 누구나 초전도 기술의 실용화 제약요소를 제거하기 위해서는 당연히 임계온도가 높은 초전도체를 개발하면 될 것으로 생각할 것이다.

초전도연구자들의 오랜 숙원이 바로 높은 임계온도를 갖는 초전도체의 개발로서 그 숙원은 1986년 스위스의 물리학자 알렉스 뮐러와 독일의 물리학자 베트노르츠에 의해 당시까지의 임계온도보다 12K나 높은 35K(-238℃)에서 초전도현상이 나타나는 새로운 물질인 La계 산화물 초전도체가 발견되면서 이루어졌고, 이 때부터 초전도연구의 새로운 지표를 열게 된다. 이들이 발견한 새로운 물질은 금속이 아닌 산화물 재료인 세라믹로서, 금속에서만 초전도현상이 일어난다고 믿고 있던 과학자들에게 커다란 충격을 주었고 20세기 최대의 발견으로 일컬어지는 고온초전도체의 가능성을 처음 제시하였다



2T급 초전도 MRI(한국전기연구소)



1GHz급 High Field NMR (일본 COBELCO)

초전도의 대표적 응용인 MRI와 NMR



초전도분야의 4번째와 5번째 노벨 물리학상

는 공로가 인정되어 두 사람은 1987년 노벨물리학상을 수상하게 된다.

La계 산화물 초전도체 발견 · 실용화

이 때를 시작으로 고온초전도체의 실용화기술개발에 세계 각국이 총력을 기울여 왔으며, 우리가 마시는 콜라보다 가격이 싸고 액체헬륨에 비해 수십 배나 신뢰성이 우수한 액체질소 온도(77K: -196℃) 부근에서의 초전도 물질인 Y계, Bi계 산화물 초전도체 등이 속속 발견되면서 초전도기술의 상용화 제약요소인 낮은 임계온도문제가 해결되었다. 그럼에도 불구하고 그로부터 약 20년 가량 지난 지금까지도 피부에 와 닿을 정도의 산업화로 진전되지 못하고 있는 이유는 또 무엇일까?

그것은 바로 대규모 초전도 응용에 있어서 가장 중요한 요소인 실용 고온초전도선이 아직까지 개발되고 있지 못하고 있기 때문이다. 실용 고온초전도선이란 실제로 초전도기기를 운전하는 환경에서 사용가능한 정도의 높은 임계자장 및 임계전류 특성을 갖고 동시에 경제성을 만족시킬 만한 수준의 가격으로 공급이 되어야 한다.

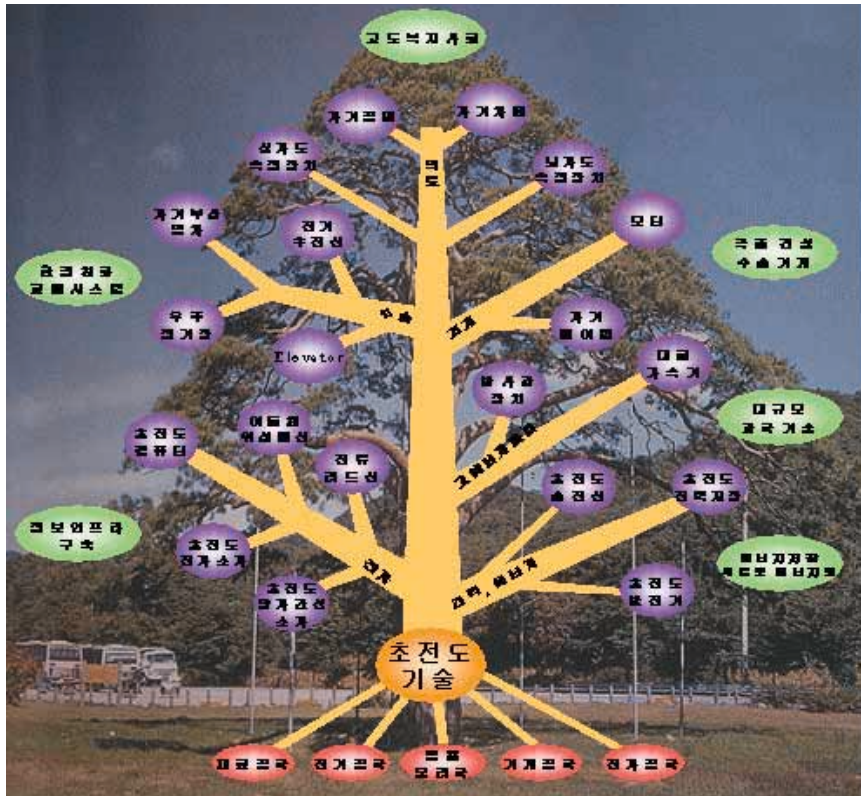
그러나 세계는 분명한 목표와 시기를 알고 있었고 기술개발로 완벽히 대비해 왔다. 그 결과 눈부실 정도의 급격한 기술 발전에 힘입어 현재 초전도 케이블, 초전도 모터 등의 초전도응용 시스템기술개발을 위한 시제품개발용으로서 이용될 수 있는 수준(가격\$: 200/km · A, 임계전류:

기 **희시리즈 | 미래를 여는 기술 |**
① 21세기 차세대 초전도기술

100A 이상, 공급 길이: 500m/piece 이상)의 제1세대 초전도선이 개발되어 이미 세계적으로 3~4개 회사에서 시판·공급되고 있다. 제1세대 초전도선은 인발, 압연 등의 기계적 가공으로 제작한 Bi계 고온초전도선으로 실제 상용화될 실용 고온초전도선으로는 한계가 있다.

또한 제1세대 초전도선을 대체하여 실제 상용화를 주도할 것으로 예상되는 제2세대 초전도선에서도 현재 100m에서 임계전류 120A 정도를 흘릴 수 있는 초전도선이 개발되고 있다. 제2세대 초전도선은 PVD, MOD 등의 박막공정을 이용한 Y계 고온초전도선, 제1세대 초전도선에 비해 가격과 성능이 월등히 우수하다.

이 정도의 개발 속도라면 고온초전도선의 상용화 목표(가격\$: 10~20/km·A, 임계 전류: 300~500A, 공급 길이:



초전도 응용분야

● 미래 초전도사회의 모습

핵융합 등 몇몇 거대 응용분야를 제외한 거의 모든 실생활 분야에서 초전도기술이 적용될 2020년경 어느 날 부산에 사는 30대 가정주부 김 유리(가명) 씨는 아침에 일어나자마자 거실 벽에 붙어 있는 디지털 전력계를 체크한다. 이것은 가정에서 필요한 전기를 자체적으로 발전하고 저장하기 위한 소형 초전도 에너지저장장치(SMES)와 태양광 발전시스템을 연계시킨 초전도 자가발전 저장시스템의 전기 저장 및 소비 상태를 확인하기 위해서다. 많은 양의 전기를 효율적으로 저장하고 소비한다면, 이 또한 가계소비량을 줄이는 방법이기도 하다. 에너지 저장효율이 좋은 SMES와 에너지 변환효율이 좋은 태양광 발전시스템이 소비자들에게 특히, 주부들에게 크게 인기를 누리고 있다. 요즘은 결혼할 때의 필수 혼수용품이기도 하다.

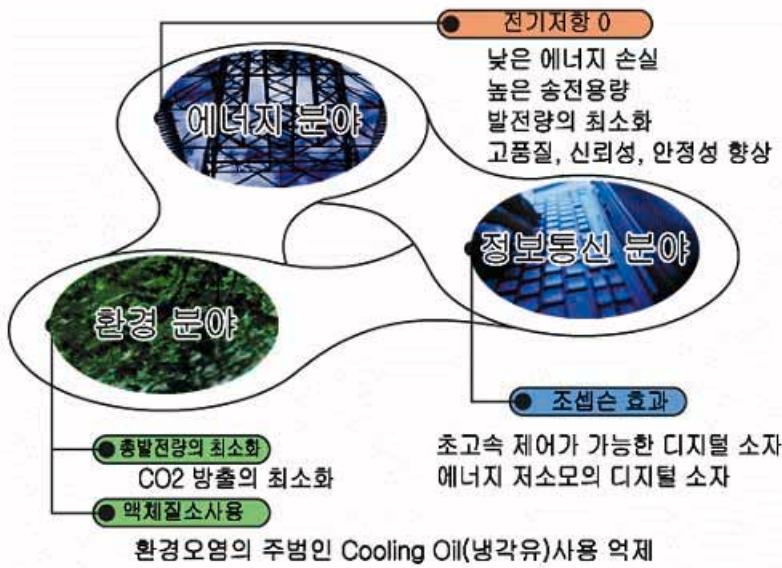
김 씨는 남편 조유원(가명) 씨를 잠에서 깨운다. 그리고 전날 맑은 날씨로 인해 높아진 SMES의 전력예비율에 대해 이야기하며 상쾌한 마음으로 모처럼 가족 모두가 함께 아침식사를 한다. TV에서는 우리나라에서 처음으로 중국과 러시아에 초전도케이블을 통해 초전도에너지저장장치에 저장된 잉여 전력을 수출한다는 뉴스가 흘러나온다. “이제는 전기

도 수출하는 시대가 왔구나!”라는 생각에 새삼 지구는 좁아졌다는 생각이 든다. 지금까지는 전기를 필요로 하는 이웃 나라에 전기를 수출하고 싶어도 공급하는 거리가 멀어 전력수송 도중에 공급하고자 하는 전력이 대부분 손실되기 때문에 수출이 불가능하였다.

초전도 자가발전 이용해 가정 전기·난방 해결
수소에너지 전기자동차 타고 회사 출·퇴근
인텔리전트빌딩에서 초전도 슈퍼컴퓨터로 업무 시작

아침식사를 마친 남편 조 씨는 근무지로 출발한다. 물론, 출근은 수소 연료를 사용, 전기분해를 이용한 수소에너지 전기자동차를 이용한다. 집에서 회사까지 가는 도중 20분 거리에 위치한 해상도로를 지나면서 우측 멀리 해상에는 스크류의 힘이 아닌 전자기력만으로 스스로 소리 없이 움직이는 초전도 전자추진선이 한 폭의 그림처럼 눈앞에 보인다.

5년 전 TV뉴스에서 서울과 평양을 일일 생활권으로 만들기 위해 2025년 완공을 목표로 평양과 부산간을 1시간 반에 주파하는 초전도 자



DAPAS사업의 기대효과

300~500m/개)인 구리선과 같은 가격대의 제2세대 초전도선 개발이 2007년말까

지는 가능할 것으로 예상된다. 그렇게 되면 초전도응용 측면에서도 초전도특성을

가장 잘 발휘할 수 있는 에너지, 환경 및 정보통신 분야 등을 중심으로 우선 실용화되어 2010년대면 본격적인 상용화에 이르면서 2020년 이후에는 산업 전분야 걸쳐 응용범위가 확대됨으로써 21세기 산업 및 경제발전에 획기적인 전환기를 맞이할 것이다.

고온초전도선 · 초전도전력기기 · 초전도 디지털소자 개발 박차

20세기 구리시대를 마감할 수 있는 신 기술로서의 초전도기술은 기술적 한계로 인해 성장이 포화될 것으로 예상되는 케이블, 변압기, 발전기, 모터 등과 같은 기존의 전기공업을 새로운 접목산업으로 발전시켜 성장을 더욱 증가시킬 것이다. 뿐만 아니라 에너지저장, 초전도 자기부상, 초고속 슈퍼컴퓨터 등과 같은 신산업이

기부상열차를 건설한다는 계획을 발표하는 대통령의 모습이 눈에 선하다. 물론 지금 한창 건설중에 있다. 이미 일본은 5년 전인 2015년경부터 해상의 전자추진선과 함께 지상의 초전도 자기부상열차를 상업운전하고 있으나 우리 나라도 5년 후에는 본격적인 초전도 육·해상 운송 체계가 확립되게 된다. 그 날이 하루 빨리 왔으면 좋겠다는 생각과 함께 조 씨는 기존 화석연료를 사용하는 엔진이 없어서 조용해진 실내공간과 완벽에 가까운 승차감에 흡족해 하는 것도 잠시, 집에서 출발한 지 40분이 지날 즈음 근무지에 도착한다.

조 씨가 근무하는 빌딩은 초전도기술을 집약시킨 그야말로 인텔리전트 빌딩이다. 빌딩의 전력에너지는 초전도 전력케이블을 통해서 유입된다. 늘어나는 전력소비량으로 인해 몇 해 전 지하 전력구를 다시 확장해야 한다고 투자비를 계산하던니 결국 초전도케이블의 사용이 훨씬 경제적이고 공사기간도 단축시킨다는 결론에 초전도케이블을 사용하게 되었고 손쉽게 회사의 소비전력량을 늘릴 수 있었다. 앞으로 30년 정도는 전력수급 걱정은 없다고 한다.

또한, 빌딩내에는 초전도 변압기가 설치되어 있다. 조 씨는 20년 전의 변압기 화재사고로 근무하던 빌딩이 전소되었던 끔찍한 그 때를 상기하며, 절연유대신 액체질소를 사용함으로써 화재 및 환경오염의 원인이 사

라진 현재의 초전도 변압기에 너무도 감사하고 있다. 한편, 빌딩내의 전력품질은 대형 SMES를 통해 조절된다. 신입사원시절 자주 발생되던 순간정전으로 메인 컴퓨터가 고장을 일으켜 고객에게 막대한 손해를 끼친 그 때를 생각하면 지금도 고개를 젓게 된다. 이 모든 기억을 뒤로 하고 엘리베이터에 올랐다.

빌딩내의 엘리베이터는 크기가 기존 모터에 비해 1/3 정도 작으며, 효율도 두 배 이상 높은 초전도 모터를 통해서 작동된다. 120층에 위치하고 있고 있는 사무실에 3분 만에 도착하고는 드디어 편안한 자세로 커피한잔을 마시며 초전도기술로 이루어진 편안하고 안전해진 현실에 감사하며, 새로 구입한 초전도 개인용 슈퍼컴퓨터를 신기하게 바라보고 있다.

P씨는 대학에서 경영학을 전공하여 현재 증권회사에 근무중이다. 회사의 심장은 워니워니 해도 모든 거래를 관리하고 투자방향을 예측하는 초전도 초고속 슈퍼컴퓨터이다.

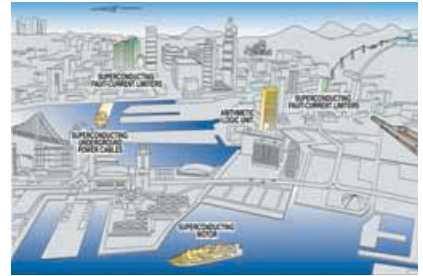
조셉슨효과를 이용해 수백 GHz까지 빨라진 정보 처리속도가 경쟁사에 긴장감을 고조시켰고, 현재 모든 증권회사에서 초전도 초고속 슈퍼컴퓨터를 사용하게 만들었다. 이 초전도 슈퍼컴퓨터의 보급이 점차 일반화되면서 재택근무를 희망하는 사람들이 늘어나고 있고, 지금 P씨도 재택근무를 고민중이다.



시험운행중인 초전도자기부상열차 (일본 미와지카 시험선로)



초전도전자추진선박 상상도



2020년경 미래의 초전도도시

창출되어 21세기 경제패러다임의 변화에 부응하는 새로운 성장 견인 산업을 발굴하게 된다. 세계은행의 예측을 보면 초전도 관련 세계시장은 2010년 이후에 본격적으로 형성될 것으로 보고 있으며, 국제 초전도 산업연맹(ISIS) 또한 세계 초전도 시장이 2010년경 600억~900억 달러, 2020년경 1천500억~2천억 달러에 달할 것으로 전망함으로써 가까운 장래에 효율, 속도, 환경의 3대 성장요소를 축으로 하는 거대 초전도시장의 출현이 임박했음을 알 수 있게 한다.


또한 초전도기술의 가장 큰 특징인 전기저항 제로는 기존의 아날로그식 효율개선을 뛰어넘는 효율혁신을 도모하게 될 것이다. 만약 우리나라의 전력분야에 초전도기술이 도입되는 것을 상정하면 국내 전력공급시스템의 효율을 3.72% 정도 향상시킬 수 있어 2010년경에는 63빌딩 232개의 1년 치 정도에 해당하는 에너지의 사용량을 절감할 수 있을 것으로 보인다. 이것은 단지 에너지 절감만을 의미하

는 것이 아니고 에너지 절감량에 해당하는 화석연료를 사용하지 않는다고 할 때 지구온난화에 기여하는 CO₂가스 배출도 감축시킬 수 있음을 의미하기 때문에 초전도기술의 도입은 에너지위기뿐만 아니라 기후변화협약에도 적극 대응할 수 있는 새로운 성장산업으로 발전할 수 있게 된다.

21세기는 20세기보다 더욱 고도화된 정보통신사회로 디지털 경제하에서 유통되는 막대한 양의 정보처리를 위한 새로운 기반이 조성되어야 하는데 그것은 거대 정보통신 네트워크로 이루어진 경제사회구조의 안정적 유지를 위한 고품질의 전력공급시스템을 구축하는 것과 정보통신·저손실을 달성하는 것이라 할 수 있다. 지금까지 정보·통신 산업의 핵을 이루고 있는 기존 반도체는 무어 법칙의 한계점에 도달하여 클락 주파수가 4GHz 이상은 어려울 것으로 예측되고 있으며, 향후 수십 나노미터 선폭 가공기술이 개발된다고 하더라도 10GHz 이내가 한계가 될 것으로 보이고 이 때도 기존 반도체재료의 특성상 고집적화에 따른 과도한 소비전력문제는 해결이 어려울 것으로 예상된다. 이와 같은 측면에서 볼 때 수백 GHz까지의 속도와 수 μ W까지의 소비전력을 요구할지도 모를 미래의 고도 정보

통신사회는 초고속·저손실이 가능한 초전도디지털소자가 주도하고 있을 것이다.

우리 나라에서는 21세기의 새로운 경제성장엔진을 발굴하고 미래의 막대한 규모의 초전도시장을 선점할 목적으로 과학기술부가 추진중인 21C 프런티어연구개발사업의 일환으로 지난 2001년부터 '차세대 초전도응용기술개발사업(DAPAS Program)'을 진행하고 있다.

이 DAPAS사업은 구리선에 비해 수백 배 이상의 전류를 흘릴 수 있는 고온초전도선과 이를 사용하여 동일 정격의 전기기기의 크기와 중량 및 손실을 50% 이상 절감할 수 있는 초전도전력기기를 개발하고, 반도체에 비해 수십 배 이상의 처리속도가 가능한 초전도디지털소자를 개발하는 것을 목표로 하고 있다. 사업이 성공적으로 마무리되는 2010년 이후 2020년경에는 보다 환경친화적이고 고품질의 안정적인 전기를 공급할 수 있는 저에너지 손실국가 전력공급 체계가 구축되고 차세대 초고속 초전도컴퓨터로 대표되는 꿈의 초고속 정보·통신 사회를 우리나라가 주도하고 있을 것으로 전망된다. 



글쓴이는 한양대 전기공학과를 졸업하고 동대학원에서 박사학위를 받았다. 한국 전기연구원 초전도연구실장, 전력기술연구원장을 역임했으며, 한국초전도저온·공학회 부회장을 겸임하고 있다.