

超電導 研究開發의 各國現況

The Present Status of Research and Development
on Superconductive in the World

李 承 院

大韓電氣協會誌 編修委員長 · 工學博士
서울大學校 電氣工學科 教授

1. 超電導性的 發見과 低温超電導體

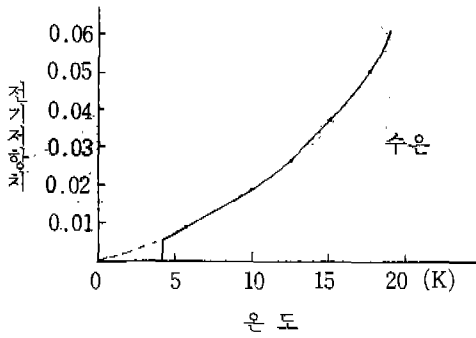
1911년 Leiden 대학의 Kamerling Onnes 교수는 수은을 사용하여 그 전기저항을 측정함으로써 액체 He의 온도를 측정했다.

온도측정 매체로서 수은을 사용했던 이유는 순수금속이어야만 열운동 정지후에도 원자배열 격자가 이그러지지 않아 전기저항이 최소상태가 되는데, 수은은 실온에서도 유동성을 가진 액체 금속이므로 이를 증류, 순도가 높은 금속으로 만들기가 용이하였기 때문이다. 이때 Onnes 교수가 측정한 수은의 온도저항곡선이 그림1과 같이 되었다. 고전물리학에 따르면 불순물에 의한 금속격자의 결함으로 인한 전자의 충돌 때문에 저온부에서는 그림2의 점선과 같이 되어야 하며 불순물이 없다하더라도 파선과 같이 되어야 하는데, 이 그림 1을 살펴보면 4.2K까지는 상상했던 대로 온도의 감소에 따라 전기저항이 비열적으로 감소했는데, 4.2K 근처에서 전기저항이 급감하여 거의 영 상태에 이르렀다. 이것

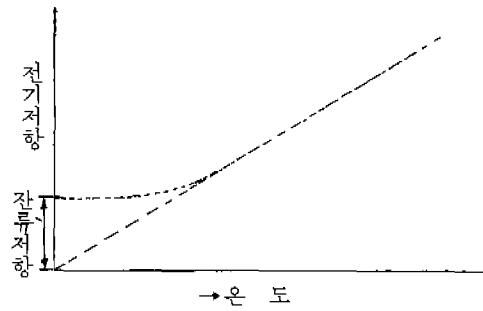
이 바로 초전도현상으로서, 이제까지의 고전 물리학으로서는 해명이 되지 않는 현상이었으나 때마침 발달하기 시작한 양자론적 해석이 가능하게 되었고 이 현상을 초전도현상이라고 부르게 되었다.

극저온에서 초전도현상을 나타내는 물질은 Onnes의 수은 이후 거듭되는 연구에 의하여 표 1과 같이 많은 순수물질들이 발견되었다. 그런데 초전도물질의 이용상 가장 큰 소망은 고자계의 실현인데, 이 순수물질들은 극히 저자계에서도 자계의 침입으로 말미암아 그 초전도를 상실하고 만다. 그래서 저임계 자계 때문에 초전도에 관한 흥미 상실로 초전도현상의 발견 이후 50년의 세월이 헛되게 지나갔다.

그런데, 1954년에 이르러 B. T. Mathius 등이 순수물질이 아닌 Nb₃Sn이라는 화합물이 초전도성을 가짐을 발견하고 이에 의하여 J. E. Kunzler가 8.8T의 고자계 발생에 성공함으로써 저미상태에서 깨어나게 되었다. 그리하여 미국 공업계에서는 이 고자계의 발생가능성 때문



〈그림 1〉 수은의 온도저항곡선



〈그림 2〉 불순물 혼입물질의 저항곡선

〈표 1〉 제 1종 초전도 재료

| 원소 | Tc (K) | 원소 | Tc (K) |
|----|--------|----|--------|
| Al | 1.18 | Ru | 0.49 |
| Ga | 1.08 | Ta | 4.39 |
| In | 3.41 | Tc | 8.22 |
| Ir | 0.14 | Tl | 2.38 |
| La | 4.80 | Th | 1.37 |
| Pb | 7.23 | Ti | 0.42 |
| Hg | 4.15 | W | 0.01 |
| Mo | 0.92 | U | 0.08 |
| Nb | 9.17 | V | 5.3 |
| Os | 0.66 | Zn | 0.85 |
| Re | 1.70 | Zr | 0.55 |

〈표 2〉 제 2종 초전도 재료

| 재료명 | Tc (K) |
|--|--------|
| (화합물) | |
| Nb ₃ Sn | 18.2 |
| V ₃ Ga | 16.8 |
| Nb ₃ (Al _{0.3} Ge _{0.2}) | 20.7 |
| Nb ₃ Ge | ~23 |
| Nb ₃ Al | 17.5 |
| (합금) | |
| Nb, Zr | ~10 |
| Nb, Ti | ~9 |
| Nb, Zr, Ti | ~10 |

에 그 후 많은 연구를 강행하여 1963년 10T의 자계를 발생하는 초전도 자석을 만드는데 성공, 이때부터 초전도는 활기를 띠기 시작했다. Nb₃Sn과 같은 초전도재료는 단일원소 금속의 초전도와는 그 현상이 이질적이므로 별도의 이론적 배경을 필요로 한다. 이를 표시한 것이 표 2와 같다. 단일금속으로 된 것은 제 1종 초전도체라고 하며, 화합물 또는 합금으로 된 것을 제 2종 초전도체라고 하는데, 이 제 2종 초전도체의 출현으로 초전도시대가 도래하게 된 것이다.

2. 高温超電導體의 發見

이상과 같이 Onnes 교수에 의해서 개막된 초전도 시대는 그 임계온도가 23K가 최고온도여서 극저온 유지상 많은 불편이 있었는데 1986년 4월 IBM 추리히 연구소의 베도놀쓰, 물러 두 박사가 Ba, La 및 동의 산화물로 된 물체가 과거의 초전도체보다 높은 온도에서 초전도성을 발휘함을 발견해 냈다. 그래서 상기 두 박사는 1987년도 노벨상을 수상하기에 이르렀는데 이것은 이 두 박사의 발견에 이어서 일본, 중국, 미국 등의 학자들에 의해 그 사실이 증명되었기 때문이다.

또 1987년 2월 미국 휴스턴 대학의 휴박사 팀이 94K에서 초전도성을 발휘하는 세라믹 초전

도체를 발견해냄으로써 마침내 77K인 액체질소내에서 초전도체를 이용할 수 있는 가능성을 주어 초전도 시대를 획기적으로 열어 놓았다.

즉 고온초전도시대를 개막케하여 과학기술사에 일대 센세이션을 이르게 되었다. 이것 때문에 위의 두 박사가 노벨상을 수상하게 된 것이다.

그후 여러나라의 과학자들에 의해 더 우수한 고온 초전도체의 발견과 그 이론을 설명하기 위한 연구가 현재 활발히 진행되고 있다. 그 첫째는 임계전류의 향상에 관한 연구이다. 현재로서는 이 전류밀도는 박막상태 초전도체에서 10^5A/cm^2 까지 높아졌다. 그리고 상온에서 초전도성을 띠는 물체도 연구되고 있으나 아직 신뢰성있는 물체는 발견되지 않고 있다.

그러나 이 고온 초전도체의 발견은 초전도 응용분야에도 큰 자극을 주어 각국에서 이 분야의 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 이의 응용분야는 전력분야 뿐만아니라 전자분야, 의료분야, 측정분야 등 광범위하나 본고에서는 세계 각국의 전력분야에 있어서의 개발동향을 기술해 보고자 한다.

3. 各分野別 開發動向

가. 에너지分野

초전도 기술의 전력계통 기기에서의 적용이유는 대전류를 흘릴 수 있고 저항이 없어 손실이 없고 강자계를 만들 수 있기 때문이다. 따라서 고효율화가 가능하고 소형 경량화를 이룰 수 있으며, 또 가까운 장래에 도래할 대전력 수요시대에 대처하여 대용량화 할 수 있으며 각종 기기의 특성을 향상시킬 수 있기 때문이다. 특히 전력을 그대로 저장할 수 있다는 것은 전력의 유일한 결점이었던 저장을 가능케 함으로써 전기 에너지를 완벽한 에너지로 만들었다.

특히 교류용으로 이용할 수 있는 고온 초전도체가 개발될 경우 에너지 시스템의 고 에너지분야, 즉 전력 케이블, 변압기, 전력저장 등에 적

용시킬 수 있어 전력 시스템에 일대 변혁을 가져 올 것이 틀림없다.

그리고 재래의 저온 초전도재료는 이미 MRI 또는 반도체, 단결정 제조장치 등에 실용화되고 있으며 자기부상 열차, 핵융합의 연구개발에 이용되고 있는데, 고온 초전도체가 실용화될 경우에도 이들 분야에 고온 초전도체를 적용할 수 있다.

(1) 초전도 발전기

발전기의 계자권선에 초전도체를 이용한 초전도 발전기는 손실감소에 따른 효율향상 뿐만 아니라 성능이 향상되어 전력계통의 안정도 향상에도 기여한다. 그래서 현재 일본, 미국, 소련, 서독, 프랑스 등에서 30~300MW의 시험발전기를 제작, 기초연구를 수행하고 있다. 초전도 발전기는 현재의 계통에 삽입할 수 있을 뿐 아니라 30만kW 이상의 용량일 경우 현 발전기보다 저렴한 가격으로 제작할 수 있음이 밝혀지고 있다.

현재 초전도 발전기는 합금계 초전도체 뿐만아니라 산화물계의 초전도체에 의한 연구도 수행되고 있으며, 이를 위한 고 전류밀도의 초전도체의 개발이 추구하고 있다. 또 강한 기계력의 전달, 저온유지를 하면서 회전이 가능한 구조의 설계기술 등이 연구되고 있다.

(2) 초전도 전력 케이블

대용량 전력수송방식으로서 가공 송전선이 경제적으로 유리하나 넓은 토지가 필요하며 유도장해, 전파장해가 있는데다 외관상의 문제도 있어 특히 도시근처에서는 저손실 OF 케이블, SF₆ 가스 절연 케이블 등도 연구되고 있다. 그러나 가장 이상적인 미래의 송전방식으로서 초전도 전력케이블을 증가하는 것은 없을 것이다. 그래서 각국에서 이에 관한 기초 연구가 많이 수행되고 있으나 아마도 전력계통 기기들의 초전도화가 끝난 후에나 실용화가 가능하리라 사료된다.

당면한 연구과제로서는 저손실 교류선재의 개발, 안정도가 높고 제조시공이 편리한 케이블 구조의 개발, 경제성 향상을 위한 냉각 시스템의 개발 등이며 만일 산화물계 고온 초전도체로 교류용 선재가 개발될 경우 단일구조가 간략화될 것이고 또 냉각 시스템이 간략화될 뿐만 아니고 효율이 향상될 것이므로 초전도 전력 케이블의 적정 경제규모가 대폭 인하될 것이므로 그 실용화 시기가 크게 앞당겨질 것이다.

(3) 초전도 변압기

초전도체로 변압기를 만들 경우 소형, 경량화가 이루어지고 효율이 향상될 뿐 아니라 점점 복잡해지고 있는 전력계통의 입장에서 볼 때 초전도 변압기는 적당한 켄치 보호기능을 갖게 할 경우 한류효과가 있어 더욱 많은 장점을 갖게 될 것이다. 초전도 변압기용 선재로서는 비교적 낮은 자계(0.2~0.5T)에서 교류손실이 적고 저온에서 절연율이 높은 재료가 개발되어야 한다.

(4) 에너지 저장장치

초전도체는 손실없이 대전류를 영구적으로 흘릴 수 있으므로 이것으로 코일을 만들 경우, 전기 에너지를 $1/2Li^2$ 의 자계 에너지로 저장할 수 있다.

인류는 자연중에 존재하는 각종 에너지를 전기 에너지로 변환해서 이용하고 있는데, 자연 에너지의 발생기는 인간의 생활과 일치하지 않는 경우가 대부분이다. 그러므로 일단 변환된 전기 에너지를 저장해야 한다. 또, 현재 석유나 원자력 에너지를 전력으로 변환하고 있는데, 이들의 시설비가 고가이기 때문에 특히 원자력발전의 경우 저장의 필요성이 가장 크다.

현재 전기 에너지 저장에 이용되는 것은 양수발전소인데, 이 양수발전소는 효율이 아주 낮다(65~70%). 따라서 초전도 에너지 저장장치로 이를 대체하면 막대한 이득을 얻을 수 있다.

그리고 이 에너지 저장장치는 전력계통에 연결해서 계통안전도를 높이는 작용을 하게 할 수

도 있다. 초전도 에너지 저장장치에 대해서는 세계 각국에서 실험적 기초연구를 하고 있으며, 우리나라에서는 1984년부터 한국전력의 지원하에 서울대학교에서 연구를 수행하고 있다. 그리고 일본과 미국에서는 기술적 기초연구 외에 경제적 연구에도 큰 힘을 기울이고 있다.

나. 의료기기

핵자기공명을 이용한 MRI의 초전도화는 의료기기의 초전도화에 있어 대표적인 예이다. 이외에도 심자계, 뇌자계, 간자계 등의 센서로 이용되고, NMR에 의한 상분석, 정보처리 기기, 소형 로봇용 모터, 자기 사우나 치료기 등 급후 그 실용 예가 대단히 넓어질 것으로 사료된다.

다. 輸送裝置

(1) 자기부상열차

초전도 자기부상철도는 부상, 안내, 추진용 초전도 자석을 차량에 싣고, 궤도에는 이들을 위한 상전도체로 된 코일을 시설, 시속 500~1,000 km/시로 열차를 비상, 주행시키는 시스템으로서, 종래 차량과 레일 사이의 접촉력에 의해 갖는 300km/시의 한계점을 넘어 주행할 수 있는 것이다. 따라서 무전동기, 무진동기의 쾌적한 교통수단으로 등장한 것이다. 이의 연구는 거의 완료되고 현재는 적용 시험중에 있다(일본).

(2) 전자 추진선

초전도 추진선은 선체에 장치한 초전도 전자석에서 발사한 전력선과 해수에 통전시킨 전류와의 상호작용에 의해서 추진되기 때문에 종래의 선박과 같은 스크류의 회전은 필요 없다. 이 경우 해수에 전류를 흘리기 위해서는 막대한 전력이 필요하게 되는데 이를 적게 하고 큰 추진력을 얻으려면 자계를 세게할 수 밖에 없다.

이것이 전자추진선이 초전도 자석을 필요로 하는 이유인 것이다. 즉 초전도 자석에 의해서 20 T 가까운 자계를 발생시켜야 하는 것이다. 이

경우 해결해야 할 문제는 해수의 전기 분해로 인한 염소 가스의 발생을 어떻게 처리해야 하는 것이다.

(3) 우주 시스템에의 이용

우주에 있어서의 초전도의 이용은 우주선 발사장치에의 초전도의 이용, 초전도 자석을 이용한 우주선 관측 등이 있다.

3. 各國의 研究現況

가. 미 국

미국은 세계에서 가장 깊고 넓게 초전도에 관한 연구를 진행하고 있는 나라이다. 미국 대통령의 주도하에 초전도 연구는 점점 더 강화되고 있으며 1987년에는 수천만불의 정부자금에 초전도 관련연구비로 지출되고 있다.

1988년에 와서는 7월에 개최되었던 연방회의에서 대통령에 의해 초전도 연구의 강화책과 상업화 촉진책이 제시되었다. 그 내용은 기초연구 뿐 아니라 제도가공 기술의 개발에 중점을 두도록 하였고 구체적으로 예산도 배정하였다 한다. 이 연구비 총액은 7,600만불에 달했다 한다. 그리고 미국 학술원(NAS)에서는 미국의 유능한 초전도관련 연구를 수행하고 있는 과학자들로 구성된 연구위원회를 구성, 검토를 거듭한 결과 '88년 10월에 고온 초전도체에 관한 연구결과를 수록함과 동시에 기초에서 응용에 이르기까지의 연구과제를 제시하고 이의 수행을 위한 연구비의 확보책, 산·학협동방안 및 국가연구기관 성과의 민간기업에의 이전문제 등을 계획하고 있다.

나. 일 본

일본도 고온 초전도체의 출현 이전부터 초전도 응용의 각 분야에 걸쳐 연구개발을 진행시키고 있었다. 즉 거의 모든 대학에서 초전도 응용을 위한 기초연구가 진행되고 있었고 각 제조업소도 각기 단극발전기, 교류발전기, 자기 에너

지 저장장치, 자기부상열차, 자기력 추진선박, 전력 케이블, NMR용 전자석, 핵융합용 전자석, 전자부분에서는 크라이오트론 스쿼드 측정장치 등 거의 모든 분야에서 연구가 진행되고 있었는데, 1987년 고온 초전도체가 출현됨에 따라 초전도에 의한 관심도는 크게 향상, 1987년 4월에 공업기술원의 자문기관으로서 초전도 산업기술개발 자문위원회가 구성되었고 이것은 또 초전도체 연구, 전자기술 응용, 초전도 전력응용기술 위원으로 나누어서 초전도기술 개발을 위한 대책을 검토한 결과

(1) 초전도의 기초분야의 과학적 성과가 산업 발전에 크게 기여할 가능성이 지대할 것임에 유의 산·학·원이 협력, 초전도연구를 활발히 진행할 것

(2) 초전도 연구의 국제협력, 국제교류를 추진, 국제적 연구를 해야한다고 의견을 모아 현재 일본에서는 연구를 진전시키는 외에 정부에서 100억엔을 투자하여 고온 초전도체의 개발을 위하여 전력기기 개발에 투자하고 있다.

다. 서 독

서독에서는 연방기술자(BMFT)가 1970년에 극저온 초전도체 연구를 시작, 1986년에는 이에 450만 마르크를 투자, 신초전도체 개발 5프로젝트, 초전도자석 1프로젝트, 냉동기술 2프로젝트, 응용 3프로젝트를 수행하고 있다. 또 에너지 분야에서는 1983년부터 BMFT의 협조하



에 초전도발전기의 개발이 시작되었고 기타 NM R, SQUID 기술개발을 BMFT가 지원하고 있다. 그리고 최근 고온 초전도체의 출현에 자극되어 30개 대학에서 초전도체 연구를 새로 개시하고 있다.

라. 영국

영국에서는 영국통상성(DTI)과 과학기술 연구위원회, 즉 SERC가 주동이 되어 산업계, 학계의 대표자들로 구성된 공동 초전도연구위원회를 구성하여 초전도 연구체제를 정립시키고 있다.

이에 따라 영국 정부는 산업응용 연구에 500만 파운드를 책정, 전자부문 응용연구, 전력응용부문 등에 배정하고 있다. 그 뿐 아니라 산·학협동, 국제협력을 위한 영국공동조정기구가 마련되고 있다.

마. EC

EC 가맹국들은 초전도관련 정보교환을 위해 Work Shop을 개최하는 한편, 연구자의 교류, 정보의 교환 등에 중점을 두고 이를 위하여 EC 내의 기업, 대학, 연구소의 공동연구소로서 1천만 ECU를 배당하고 EC위원회 DGX II에 의해서 운영되고 있다. 그리고 가까운 장래에 초전도 연구개발을 독립과제로 공동연구체제로 도입할 예정으로 있다.

바. 중국

중국은 금년 4월 국무위원을 책임자로 하고 국가과학기술위원회, 국가계획위원회의 위원, 대학, 연구소의 교수, 연구원으로 구성된 초전도개발 팀이 구성되었으며, 실제 연구업무는 중국 과학원 물리연구소에 설치된 초전도 연구 센터의 조정하에 진행되고 있다. 여기에는 각 대학, 연구기관 등에서 1,000명 정도가 연구에 참여하고 있다.

중국은 90~95K 급 고온 초전도체가 많은 대학, 연구소에서 개발되고 있으며, 외국과의 교류는 중국과학원 물리연구소를 통하여 이루어지

고 있다.

사. 소련

소련에 있어서도 초전도 연구가 적극적으로 수행되고 있는데, 초전도 이론에 관한 포텐셜이 있어 기초물리분야에서 큰 성과를 올리리라 예상된다.

아. 한국

우리나라가 처음 초전도에 관한 관심을 가졌던 것은 1980년으로서, 당시의 중요성과 유용성을 감안하여 서울대학교에 초전도연구소를 설치하려는 움직임이 있었으나 관계자의 관심부족으로 이루어지지 못하고 대학원에 초전도 관련 과목을 두개 설치하는 데 그치고 말았다. 그러나 이 시점이 우리나라에 초전도공학이 문을 연 시점임은 틀림없다. 그 후 1984년부터는 한국전력의 지원을 받아 초전도 연구(SMES)가 시작되었고 현재까지도 계속되고 있다. 이 연구에 지원된 연구비만도 거의 2억원에 이르고 있고 박사가 2명, 석사가 16명이 배출되었다. 아마 이들이 앞으로 우리나라가 초전도 과학의 혜택을 받는 시기를 크게 단축시키는 데 기여할 것이라 생각된다.

그러던 중 1987년에 고온 초전도체의 개발로 초전도에 관한 관심은 세계 각국과 더불어 우리나라에서도 크게 고조되었다. 한국전력은 회사 소속 연구원에 초전도 연구부를 설치하고 그 연구분야를 확대하기로 결정하고 초전도발전기 개발연구를 '88년부터 추가, 서울대에 위촉 수행하고 있다. 한편 정부에서도 과학기술처를 중심으로 초전도연구위원회가 구성된 모양인데, 이는 응용연구가 아니라 고온 초전도체의 개발연구를 위주로 한 것으로, 약 15억원의 예산으로 10여개 연구소와 대학의 연구 팀을 지원하고 있는 실정이다. 바라전제 고온 초전도체의 발견과 더불어 산업계에 필연적으로 도래할 초전도시대를 맞이하기 위해 산업, 학계가 혼연일체가 되어 더 많은 노력을 기울이기 바란다.