

초전도 현상

김 정 구

서울대학교 물리학과

I. 초전도 현상이란?

인간두뇌의 퇴화 또는 비정상 작동과 관련된 치매증상이나 간질 등에 관한 관심이 최근 높아지고 있다. 정신질환이 심한 경우, 외과적인 방법으로 뇌의 각 부분에 전극을 심고서 다시 봉합 후, 발작이 일어날 때 뇌의 전기 신호를 측정함으로써, 손상된 뇌부분을 찾아 치료하는 방법이 동원되고 있는 실정이다. 이처럼 끔찍한 외과적인 방법대신 뇌의 활동—즉 뇌의 미세한 전류 흐름—에 따라 발생하는 뇌파를 측정하여 진단하는 방법은 없을까? 초전도체의 조셉슨 효과를 이용하면 미세한 자기장(감도는 지구자기장의 100억분의 1 수준)을 측정할 수 있기 때문에 위에 언급한 사람의 심장이나 뇌에서 나오는 미세한 파를 검출 진단하는데 응용될 수 있다.

이처럼 유용하게 응용될 수 있는 초전도 현상의 발견은 1900년대 초로 거슬러 올라간다. 네덜란드의 H. K. Onnes는, 1911년 불활성 기체로 가장 낮은 온도까지 기체로 존재하던 헬륨을 액화시키는데 성공하여, 극저온 영역에서 온도를 측정할 필요가 생겼다. 따라서 금속의 전기저항이 온도에 비례한다는 사실을 이용하여 극저온용 온도계로 사용할 목적으로 대학원생과 함께 수은(Hg)의 전기저항이 4.2K에서 갑자기 전기적 short 가 일어나는 실수를 계속하였다. 계속 그 원인을 조사한 결과 4.2K에서 일어난 전기적 short 현상은 실수로 일어난 것이 아니라 그때까지 알려지지 않은 새로운 현상 즉 초전도 현상임을 밝혔다. 이후 여러가지 다른

금속 원소도 초전도 현상을 보임이 밝혀졌으나 그 임계온도가 ~20K이하여서 초전도현상의 응용을 위하여서는 냉각제로 액체 헬륨이 꼭 필요하여 용도가 극히 제한적일 수밖에 없었다.

그러나 10년전 액체 질소의 끓는 온도보다 더 높은 임계온도를 가진 고온초전도체가 발견된 이래, 고온초전도체는 관련학계뿐만 아니라 대중매체를 통하여 자주 소개되어 상식적인 용어가 되어 버릴 정도로 일반인의 관심의 대상이 되었다. 이처럼 고온초전도체가 과학기술계뿐만 아니라 일반인의 관심의 대상이 되는 가장 큰 이유는 초전도 임계온도가 왜 이처럼 높은가라는 학문적인 측면 이외에 고온 초전도체가 지니고 있는 무한한 실용가능성 때문이라고 생각된다.

일부 금속도체의 온도를 절대온도 0K(절대온도 0K는 섭씨 영하 273도에 해당함) 가까이 내리면 갑자기 전기적 저항이 사라진다. 뿐만 아니라 외부에서 자기장을 가하더라도 도체 표면에 외부 자기장을 상쇄시키는 방향으로 유도 전류가 생겨 내부에는 자기장이 존재하지 않는다는 사실이 밝혀졌다. 이와 같이 물질에 따라 다른 특정한 온도(이를 초전도 임계온도라고 부른다) 이하에서 저항이 없는 완전 도체 성질과 내부에 자기장이 존재하지 못하는 반자성 성질은 기존의 이론으로는 이해할 수 없는 새로운 질서를 가진 상태이며 이를 초전도상태라고 부른다.

초전도체는 온도가 임계온도보다 낮아지면 정상상태보다 전체 에너지가 낮아져 새로운 질서가 있는 상태(초전도 상태)로 된다. 이 때 전자들은 짝(Cooper pair)을 이루어 운동하며 정상상태보다 낮은 에너지 상태에 있으며, 이 에너지 차이 즉 에

너지간격(energy gap)은 새로운 질서 매개변수(order parameter)로서 상당히 긴 길이 동안 결맞음 현상(coherence 현상)을 보이고 있다. 초전도체 응용의 기초가 되는 Josephson 효과는 이러한 질서 매개 변수의 결맞음 때문에 생기는 현상이다.

초전도체의 임계온도와 상온에서의 전기전도도를 비교하면 이해하기 어려운 사실이 발견된다. 즉 상온에서 전기적 전도도가 상대적으로 나쁜 도체일수록 초전도 현상이 나타나는 임계온도가 높다는 사실이다. 예를 들어 상온에서 전기적 전도도가 높은 구리, 은, 금은 온도를 아무리 낮추더라도 초전도 현상을 보이지 않는다. 반면 납이나 수은 나이오비움등 전기적 전도도가 구리에 비하여 10-100배 낮은 물질들은 초전도 임계온도가 7-10 K (K는 절대온도를 가리키며 절대온도 0 K는 -273 °C에 해당한다)에 이르고 있다. 더우기 쉽게 부서지고 통상적으로 부도체로 알려진 세라믹(구리산화물)에서 고온초전도성이 발견되었다는 사실은 우리들의 통상적인 개념을 뛰어넘는 자연의 무한한 가능성과 함께 고온초전도 메커니즘에 대한 의문을 제시하고 있다.

초전도체가 보이는 대표적인 성질은 다음과 같다.

1. 완전 도체성질

초전도체의 중요한 특성중의 하나로 물질에 따라 다른 임계온도(T_c) 이하에서 전기저항이 사라지는 완전도체 성질을 보인다. 완전도체 성질이야말로 고자기장 자석 제작, 송전선 등 대규모 응용의 기초가 되는 중요한 특성이다.

고리 도선에 전류가 흐를 때 외부 기전력을 제거하면 전류는 곧 사라지는 것이 우리의 경험이다. 실제 전류는

$$I(t) = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1)$$

형태로 저항에 의하여 감소하게 된다. 그러나 초전도체의 경우 고리 도선에 순환 전류를 흘릴 때 전류의 감쇄를 측정할 수 없었다. 즉 초전도상태에서는 저항이 없음을 의미한다. 실험 오차를 고려한다

하더라도 즉 초전도체의 저항이 있다 하더라도 $10^{-23} \Omega m$ 보다 작을 것으로 추정되고 이 값은 순수한 구리의 비저항 $10^{-9} \Omega m$ 에 비하면 0으로 볼 수 있다. 초전도체내에 부분적으로 자기장은 자속이 침투할 수 있는 초전도체를 제 2종 초전도체라고 하는데 자속의 이동은 저항을 유발할 수가 있다. 그러나 이 경우에도 자속고정(pinning)효과를 고려하면 초전도 전류가 10^{10} 년간 지속될 것이라는 계산 결과가 있다.

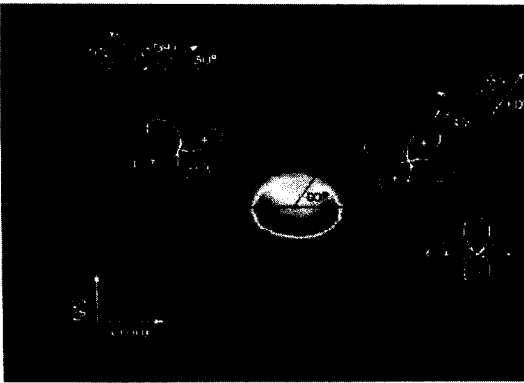
그러나 초전도체라하여 무한정 많은 전류를 흘릴 수 있는 것이 아니라 어떤 특정한 전류 밀도 이상을 흘리면 저항이 있는 정상상태로 전환하게되며 이를 임계전류밀도(J_c)라고 한다. 최근 개발된 고온 초전도체의 경우, 자속의 이동이 쉬워서 저항이 없이 흘릴 수 있는 전류의 크기가 작은 단점이 있다. 따라서 고온 초전도체에서는 임계전류밀도를 높이기 위한 자속 고정 필요성이 매우 높으며 이는 대규모 응용을 위한 선재화에 있어서 아주 중요한 문제점이다.

2. 완전 반자성 성질

Meissner 와 Ochsenfeld 가 1933년 발견한 완전 반자성 현상은 초전도체를 규정하는 가장 근본적인 현상이다. 이 현상은 임계온도 이하의 초전도체에 자기장을 가하면 초전도체 표면에 외부 자기장을 상쇄하는 방향으로 초전도 전류가 유도되어 초전도체 내부에는 자기장이 0이 된다는 즉 외부 자기장이 초전도체 내부로 침투할 수 없다는 것이다. 뿐만 아니라 임계온도보다 높은 상태에서 자기장을 가하면 아직 초전도 상태가 아니기 때문에 내부로 자기장이 침투해 들어가 있지만 온도를 낮추어 초전도 상태가 되면 내부의 자속이 완전히 추방된다. 그러므로 초전도체 내부의 자기장 $\vec{B} = \vec{H} + 4\pi\vec{M}$ (CGS 단위)는 0이기 때문에 초전도체의 자화 (magnetization) \vec{M} 은 $-\frac{1}{4}\vec{H}$ 로 완전 반자성을 나타낸다. 초전도체에 외부 자기장을 가하더라도 초전도체 내부에 자기장이 없는 (완전 반자성 상태) 현상을 Meissner 현상이라고 한다.

외부 자기장을 가하더라도 초전도체 내부 자기

장이 없다는 것은 초전도체 표면에 외부 자기장을 상쇄하는 방향으로 차폐 전류가 흐른다는 것을 의미하며 따라서 초전도체에 저항이 있으면 이러한 차폐 전류가 점차 감쇄하여 반자성 성질이 사라지게 될 것이다. 따라서 외부 자기장이 초전도체 내부에 침투하지 못 한다는 사실은 초전도체가 완전도체가 아니면 성립할 수가 없는 성질이기 때문에 완전 반자성 성질이야말로 초전도체의 가장 대표적인 성질이라고 말할 수 있다. 그림 1은 자석위에 둔 초전도체가 반자성성질에 의하여 밀쳐내는 힘 때문에 부상되는 모습이다.



(그림 1) 자석위에 둔 고온초전도체가 반자성 성질에 의하여 부상되는 모습.

초전도체의 자속 추방현상은 특정한 임계 자기장 H_c 이하에서만 가능하다. 임계 자기장 보다 큰 자기장을 가하면 비록 온도는 임계온도 이하이더라도 초전도 상태가 깨어져서 저항이 있는 정상상태로 환원된다. 정상상태와 초전도상태의 자유에너지 차이,

$$F_N - F_S(0) = \frac{H_c^2}{8\pi} \quad (2)$$

를 흔히 초전도 상태의 응축 에너지(condensation energy) 라고 한다. 즉 초전도 상태는 정상상태보다 단위체적당 $\frac{H_c^2}{8\pi}$ 만큼 에너지가 낮은 상태임을 알 수 있다. 초전도체에 외부자기장을 가하면 자기 에너지가 증가 하는데 이 에너지 증가 $\frac{H^2}{8\pi}$ 가 응축

에너지 보다 크면 정상상태로 환원하게된다.

단일원소 금속 초전도체는 대개 완전 반자성 성질을 보이며(제1종 초전도체), 완전 반자성을 보이는 최고 임계 자기장은 대개 500 gauss 정도로 낮은 편이다. 한편 여러 원소 합금 또는 산화물 초전도체는 외부 자기장을 가하면 일부분은 자속이 침투하고 나머지 부분에는 자속이 침투하지 못하여 초전도성을 보이는 혼합상태(mixed state)의 “제2종 초전도체”이며, 이 경우 초전도성이 사라지는 최고 임계 자기장은 물질에 따라 수십~수백 tesla로 높아서 도선등 실용성이 높다.

3. 조셉슨효과

초전도체가 보이는 여러 가지 현상 중 가장 놀라운 현상은, 실은 완전도체 현상이라기 보다는 1962년 영국의 대학원생인 B. Josephson 이 발표한 초전도체 위상의 결맞음 (phase coherence)의 결과로 나타나는 조셉슨 효과라고 생각된다. 조셉슨 효과는 두 초전도체 사이에 얇은 부도체 막이나 정상상태의 도체가 있어서 두 초전도체가 약하게 결합된 경우 (이를 조셉슨 접합이라고 부른다.), 쿠퍼 전자쌍이 두 초전도체 사이로 꿰뚫기하기 때문에 생기는 현상이다.

두 초전도체의 질서 계수(여기서는 쿠퍼 전자쌍 또는 에너지 간격)의 파동함수를

$$\psi_i = |\psi| \exp[i\phi_i] \quad (i=1,2) \quad (3)$$

라 하면 쿠퍼 전자쌍의 꿰뚫기 결과로 나타나는 초전도 전류밀도(이를 조셉슨 전류밀도라고 부름)는 양쪽 초전도체의 질서계수의 위상차에 의하여

$$J = J_c \sin(\phi_2 - \phi_1) = J_c \sin\phi. \quad (4)$$

로 주어진다. 외부의 전압이 가해지지 않더라도 단순히 위상차에 의하여서 나타나는 초전도 전류의 흐름 현상을 직류 조셉슨 효과라고 부른다.

한편 조셉슨 접합에 전압 V 를 가하면 두 초전도체의 위상차이가 변하여

$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega_j = 2eV / \quad (5)$$

의 관계를 만족시키게 되어 두 초전도체 사이의 위상차이는

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \left(\frac{2eV}{\hbar}\right)t + \varphi_0 \quad (6)$$

가 된다. 이를 조셉슨 관계식에 대입하면 조셉슨 전류는

$$J = J_0 \sin\left[\left(\frac{2eV}{\hbar}\right)t + \varphi_0\right] \quad (7)$$

형태로 됨을 알 수 있다. 즉 전압 V 를 가하면 조셉슨 접합사이에 교류 전류가 흐르게 되며 이를 교류 조셉슨 효과라고 부른다. 예를 들어 조셉슨 접합에 $1\mu V$ 를 가하면 $483.6MHz$ 의 교류 전류가 나타난다.

위상차 때문에 직류 및 교류 전류의 형태로 나타나는 조셉슨 효과가 중요한 이유는 크기가 수 μm 에 이르는 준 거시적 계임에도 불구하고 질서계수의 위상차 때문에 양자역학적인 현상이 나타난다는 사실뿐만 아니라 조셉슨 효과야말로 초전도체를 실제적으로 응용할 수 있는 기본적인 성질이기 때문이다. 예를 들어 미세 자기장의 검출, 마이크로 파의 검출 등에는 반드시 조셉슨 효과를 활용하는 것이다.

II. 초전도체에 대한 이해 : BCS 이론

초전도체에 대한 이론적 이해는 흔히 Cooper pair라고 부르는 전자쌍의 개념에 근거한 BCS이론(Bardeen, Cooper, Schrieffer)에 의하여 해석되고 있다. 고온초전도체의 경우에는 아직 기본 메커니즘이 밝혀지지 않았다. 그러나 고온초전도체 역시 전자들의 pairing 현상이 있음이 밝혀져서 비록 전자쌍을 이루게 하는 상호작용은 불분명하

라도 전자쌍의 개념은 그대로 적용되리라 짐작된다.

1957년 발표된 BCS이론은 도체내의 두 전자가 하나의 전자쌍(Cooper pair)을 이룬다는 개념을 토대로 하고 있다. 전하 $-e$ 를 가진 전자들이 어떻게 쌍을 이룰 수 있나를 이해하기 위하여 도체 내부를 움직이는 전자가 겪는 중요한 상호작용을 살펴보면,

- i) 열에너지($1K$ 의 온도에 해당하는 에너지는 $0.086 meV$ 이다)에 의하여 진동하고 있는 원자(이를 격자진동 또는 양자화된 격자진동을 포논이라고 부름)와의 충돌,
- ii) 도체 내부에 있는 불순물과의 충돌,
- iii) 서로 차폐되어 약하지만 전자-전자간의 배척력으로 작용하는 전기적 상호작용 등이 있다.

BCS이론에 의하면, 저온에서 도체내를 움직이는 전자가 운동에너지 때문에 주위의 원자에 진동을 유발시키고 그 부근의 다른 전자가 이를 흡수하는 이중 상호작용이 있을 수 있으며, 이와 같이 격자진동을 교환하는 간접적 전자-전자 상호작용은 서로 당기는 인력으로 작용한다는 사실을 밝혔다. 그러므로 만약 격자진동의 교환에 의한 전자-전자간의 인력이 배척력으로 작용하는 전자간의 쿨롱 상호작용보다 크다면 두 전자사이에는 서로 당기는 힘이 존재하여 두 전자가 하나의 쌍으로 묶여져 운동하게 된다. 이러한 전자쌍을 Cooper pair라고 부른다. 정상상태에서는 독립적으로 움직이던 전자가 두 전자가 하나의 쌍을 이루는 초전도 상태로 상변환(Phase transition)을 하는 과정에서 전자들의 에너지는 낮아져서 페르미 에너지 준위에는 아무런 여기상태도 존재할 수 없는 에너지간격(흔히 $E_g = 2\Delta$ 라고 표시한다)이 생긴다는 것이 BCS이론의 중요한 결과이다. 이 에너지 간격 때문에 초전도체에 전류를 흘리면, 페르미 에너지상에서 움직이는 전자(즉 Cooper pair)의 에너지증가가 에너지 간격(2Δ)보다 적으면 아무런 여기상태가 있을 수 없기 때문에 산란될 수가 없어서 계속 전류가 흐르게 된다. 즉 저항이 없는 완전도체의 성질을 지니게 된다.

BCS 이론에 의하면 초전도체에는 에너지 간격이 존재하며, 에너지 간격 Δ 때문에 전자쌍으로 이루어진 초전도체에 전자(또는 정공)를 생성시키기 위해서는 정상상태 전자의 여기에너지 ξ_k 보다 더 큰 에너지

$$E = (\xi_k^2 + \Delta^2)^{1/2} \quad (8)$$

가 필요하다. 또한 에너지 간격이 생기기 시작하는 온도 즉 임계 온도는

$$T_c = 1.13 \frac{\omega_c}{k_B} \exp\left(-\frac{1}{N(0)V}\right) \quad (9)$$

으로 주어지며, 온도가 영일 때 에너지 간격의 크기는

$$\Delta_0 = 2 \omega_c \exp\left(-\frac{1}{N(0)V}\right) \quad (10)$$

이어서 에너지 간격과 임계온도와의 비율은

$$2 \Delta_0 / k_B T_c = 3.52 \quad (11)$$

가 된다. 여기서 ω_c 는 격자 진동에 의한 Debye 에너지, $N(0)$ 는 페르미 에너지에서 전자의 상태 밀도, V 는 전자간의 상호작용의 크기를 의미하고 있다. 이 이론에서 에너지 간격과 임계온도의 비율은 Al, Zn, Cd 등 저온초전도체의 경우 실험치와 아주 잘 맞고 있다. 한편 상온에서 저항이 큰 Pb, Nb 등 전자와 격자진동의 상호작용이 강한 경우, 임계온도는

$$T_c = \frac{\Theta_D}{1.45} \exp\left[\frac{1.04(1+\lambda)}{\lambda - \mu^* (1+0.62\lambda)}\right] \quad (12)$$

로 주어진다. 여기서 Θ_D 는 물질의 Debye 온도, μ^* 는 Coulomb 배척력 그리고 λ 는 전자-격자 진동의 결합상수를 나타낸다.

BCS 이론의 초전도 임계온도 식 (12)에서 알 수 있듯이 임계온도나 에너지 간격의 크기는 물질

내의 전자와 격자진동과의 상호작용 (여기서는 λ)의 세기에 의하여 결정된다. λ 가 μ^* 보다 작은 물질에서는 아무리 온도를 낮추더라도 초전도성이 나타나지 않으며 λ 가 μ^* 보다 큰 물질에서만 유한한 임계온도가 존재하게 된다. 이것이 바로 상온에서 저항이 큰 물질(즉 전자-격자진동 상호작용이 큰 물질)일수록 임계온도가 높은 이유이다.

BCS 이론은 당시 저온초전도체의 성질을 거의 완벽하게 설명할 수 있는 성공적인 이론이었다. 격자진동의 상호교환을 매개로 한 BCS 이론에서는 몇 가지 가정이 있다.

첫째, 전자-격자진동 상호작용이 전자간의 Coulomb 상호작용보다는 크지만 그러나 약한 상호작용이며,

둘째, 전자 밀도가 높아서 페르미 에너지가 전자간 상호교환 매체인 격자진동 에너지보다 훨씬 크며,

셋째, 전자쌍(Cooper pair)을 이루는 전자의 spin 상태는 up 및 down으로 구성되어 결과적으로 에너지 간격의 대칭성이 s-wave 형태로 주어진다는 사실이다.

BCS 이론은 당시 초전도체의 성질을 거의 완벽하게 설명할 수 있는 성공적인 이론이었다. BCS 이론 발표 이후 더 높은 임계온도를 가진 초전도체 개발을 위한 많은 노력이 있었지만 Nb₃Ge의 $T_c = 23.4K$ 가 가장 높은 임계온도였으며, 더우기 BCS 이론의 임계온도식의 최적화 조건에서 얻을 수 있는 최고 임계온도는 40K에 불과하다는 예상이 발표되기도 하였다.

그러나 86년 Bednorz와 Müller에 의하여 고온 초전도체가 개발된 이래 지금은 임계온도가 165K까지 이르고 있음은 주지의 사실로서 BCS 이론으로 예상할 수 있는 최고 임계온도를 훨씬 상회한다. 그렇다면 고온초전도체의 임계온도가 이렇게 높은 이유는 무엇인가? 기본 메커니즘이 무엇인가? 라는 의문이 야기된다. 이러한 의문은 20세기말의 과학계의 최대 현안이라고 할 수 있다.

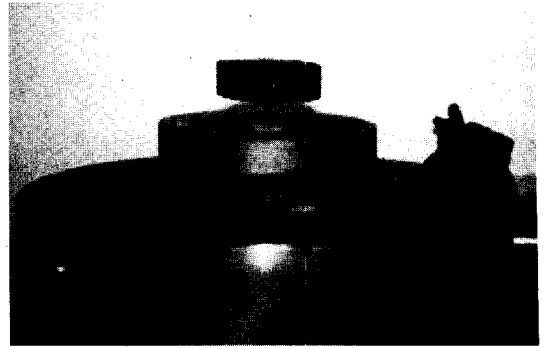
III. 고온초전도체

고온초전도체는 고온이라는 표현때문에 초전도 현상이 일어나는 임계온도가 아주 뜨거운 온도영역이라고 오해하는 사람들이 많다. 하지만 고온초전도체의 임계온도는 아직 영하 150~170 °C의 차가운 저온영역이다.

고온초전도체의 발견이전에도 임계온도는 10 K 부근에 불과하지만 새로운 초전도체의 개발의 일환으로 ABO₃ 구조 (이를 perovskite 구조라고 부름)를 가진 Ba(PbBi)O₃ 및 spinel 구조를 가진 LiTi₂O₄ 등 산화물 초전도체의 개발에 대한 노력이 있었다.

본격적인 고온초전도체 개발은 1986년 IBM Zurich 연구소의 Bednorz와 Müller가 LaBaCuO에서 26K의 초전도성을 발견함으로써 시작하였다. 곧이어 Chu 등이 YBCO에서 질소의 끓는 온도(77K)보다 높은 90K의 고온초전도 현상을 발견함으로써 고온초전도체에 대한 개발 및 연구 열풍은 견잡을 수 없을 정도로 확산되었다. 선재(wire)로 응용 가능성이 높은 BiSrCaCuO(BSCCO)가 1988년 일본의 Maeda에 의하여 개발되었으며, 미국의 Herman에 의하여 임계온도가 125K인 TlBaCaCuO가 개발되고 1993년에는 독성이 강한 HgBaCaCuO가 개발되어 임계온도가 133K에 이르렀다. 임계온도가 133K인 HgBaCaCuO에 압력을 가하면 임계온도가 165K까지 상승한다는 사실은 더 높은 임계온도를 가진 새로운 초전도체의 개발 가능성이 있다는 점을 강력히 시사하고 있다.

고온 초전도체는 Cu-O 팔면체(octahedron)를 기본으로 층상구조를 가진 세라믹이다. 따라서 전기적으로는 Cu-O 평면에 수직인 방향과 수평방향으로는 강한 이방성을 보이는 준 2차원 성질을 보이고, 기계적으로는 단단하기는 하나 쉽게 부서지기 때문에 기계적 연성이 나쁘다. 그림 2는 대표적 고온초전도체인 YBCO의 구조를 보이고 있다. 가운데 있는 CuO 면때문에 초전도성이 생긴다고 믿고 있다.



(그림 2) 고온초전도체 YBCO의 구조.

고온초전도체의 응용에 필수적인 박막성장에서도 많은 진전이 있어서 임계전류 밀도가 10⁶A/cm² 이상이고, 지름이 8" 이상인 대면적 YBCO 박막 성장도 가능하게 되었다. 박막제작 방법은 sputtering, coevaporation, laser ablation 등의 방법이 주로 사용되고 있다. 대면적 박막제작에는 coevaporation 방법이 많이 쓰이고, 빠른 박막제작에는 주로 laser ablation 방법이 쓰인다.

한편 고온초전도체 선재(wire) 제작은 주로 YBCO 및 BSCCO 은 tube 를 활용하거나, tape 형태로 제작하여 임계전류 밀도가 10⁵A/cm² 이상이며 길이가 km 이상인 선재가 개발되었다. 인위적으로 자속 고착(columnar pinning center)을 시켜 임계전류밀도를 높이기도 한다.

액체질소의 비등점보다 높은 임계온도를 가진 고온초전도체의 발견은 액체질소를 냉매로 사용하여 초전도성의 경제적인 응용가능성뿐만 아니라 임계온도가 그처럼 높은 근본 메커니즘에 대한 학문적 탐구로 인하여 큰 주목을 받았다. 그러나 고온 초전도체가 발견된지 10년이 지난 지금 고온 초전도체의 기본 메커니즘에 대한 이해와 실용화는 시작단계에 머물고 있어서 기대에 못 미친다. 이처럼 고온 초전도체에 대한 이해 및 실용화가 당초의 기대에 못 미치는 이유는 고온초전도체가 가지는 특이한 특성 때문이다. 고온초전도체가 기존의 저온 초전도체와 다른 두가지 특이한 특성은,

1. 극히 짧은 결맞음 길이(coherence length) 초전도체의 질서계수가 변할 수 있는 길이를 결

맞음길이라고 부른다. 고온 초전도체의 경우 결맞음 길이는 약 $\sim 10\text{\AA}$ 정도로 저온초전도체의 $\sim 500\text{\AA}$ 에 비하여 아주 짧다. 이처럼 짧은 결맞음길 때문에 자속이 움직이는데 필요한 activation energy가 작아서 자속의 움직임에 의한 손실이나 잡음이 강해진다. 또한 결맞음 길이가 긴 경우 문제가 되지 않던 시료내의 grain boundary가 결맞음 길이 짧은 경우 조셉슨 접합 역할을 하기 때문에 소자 제작방법에도 큰 제약을 가한다.

2. 에너지 간격의 대칭성

저온 초전도체 경우 Cooper 전자쌍은 spin up 과 down으로 구성되어 질서계수인 에너지 간격은 s-wave 상태이지만, 고온 초전도체의 에너지 간격은 d-wave상태라고 믿어진다. NMR의 relaxation 시간측정, photoemission 에 의한 에너지 간격 측정, tricrystal 상의 조셉슨 접합에서 flux 실험결과는 d-wave 상태를 지지하고 반면 일부 proximity tunneling 실험, STM 에 의한 실험은 s-wave상태를 지지하고 있어서 아직 약간의 논란이 있다. 고온초전도체의 특이한 성질 중의 하나는 일부 underdoped 초전도체의 경우 T_c 이상에서도 상태밀도(DOS)가 현저히 감소하는 pseudogap 이 나타난다는 사실이다.

고온초전도체는 앞에서 말한대로 질서계수가 d-wave 대칭성을 보이고, antiferromagnetic 상태에서 도체 상태로 상전환하는 부근에서 높은 임계 온도를 보여 instability와 밀접한 관계가 있기 때문에 고온초전도체의 근본 메커니즘은 저온초전도체의 격자진동(포논) 상호작용과는 다르리라고 짐작되고 있다.

구리 산화물 초전도체는 대부분 반자성부도체에 전하운반체를 doping 하여 만든 것이다. 구리산화물에서 초전도 현상 및 전하의 이동은 CuO_2 평면에서 일어나는 것으로 알려져 있으며 특히 Cu 의 $3d_{x^2-y^2}$ band와 O의 $2p_x$ 및 $2p_y$ band에 전하운반체가 모여있는 것으로 알려져 있다. 따라서 가장 간단한 모델이라도 이 세 개의 orbital 을 모두 포함하는 것이어야 한다^[3] band p-d model 혹은 3

band Hubbard model). 또한 질서계수의 대칭성이 d-wave symmetry 임을 입증하는 여러가지 실험적 사실을 설명할 수 있어야 한다.

따라서 고온초전도체를 기술하기 위하여 포논에 의한 상호작용대신, 강한 on-site Coulomb 척력 U의 영향을 고려하여 이웃한 site사이에서 전하가 옮겨갈 수 있는 정도를 나타내는 hopping integral t 와 이웃한 site 에 있는 전하운반체 스핀의 반자성 결합 J 두 개의 계수로 기술하는 t-J model이 많이 연구되고 있다. 그러나 아직 고온초전도체의 근본적인 메커니즘 규명을 위해서는 많은 연구가 있어야 할 것이다.

IV. 초전도체의 응용

초전도체의 응용은 교통, 에너지 저장, 송·배전, 미세 신호의 검출 및 컴퓨터 소자 등 광범위하게 활용될 가능성이 있다. 이러한 초전도체의 응용은 크게 나누어서 대규모 응용과 소규모 응용으로 구분할 수 있다.

대규모 응용은 초전도체의 완전도체 성질을 이용하는 것으로써 초전도 도선을 제작하여 많은 양의 전류를 흘리거나 높은 자장을 얻을 수 있는 전자석을 제작하는 것이 대표적 예이다.

반면 소규모 응용은 주로 초전도 박막으로 Josephson 효과를 이용한 active 소자로서 미세 신호 검출 소자, 고속 스위치 소자, 단일 자속의 포획을 이용한 logic 회로 소자 등이 있으며 passive 소자로는 초전도체의 표면 저항이 작음을 이용한 마이크로 파의 필터 또는 안테나등을 들 수 있다.

대표적인 초전도 응용 예를 들면,

1. 대규모 응용

- 에너지 저장 및 발전기

초전도체에 에너지를 저장하는 방법은 대형 초전도 자석(예를 들어 축구장 크기의 coil)을 만든 후 전류를 흐르게 하면 전기저항이 없으므로 지속

적인 전류가 흐를 수 있다. 즉, 전기 에너지를 자석의 자기장 에너지 형태로 저장하는 셈이다. 이러한 대형 초전도 에너지 저장 시스템을 활용하면 전기 수요가 적은 밤 시간에는 초전도 자석에 에너지를 저장하고, 전기 수요가 많은 낮 시간에 꺼내어 쓸 수 있어서 발전기의 부하 조절등이 가능하다. 실제 미국에서는 가속기용 소형 초전도 에너지 저장 시스템을 제작한 바가 있다.

또 다른 방법은 초전도체에 침투된 자속은 불순물 등에 의하여 고착화(pinning)되어 잘 움직이지 않는다. 이러한 성질을 이용하면 무접촉 베어링을 만들 수 있으며 이를 이용한 대형 fly wheel로 에너지를 저장할 수 있다.

발전기의 용량을 제한하는 가장 큰 요인은 발전기의 무게이다. 발전기의 rotor가 지나치게 무거우면 회전시 기계적 안정성을 잃기 때문이다. 발전기에 초전도체를 활용하면 초전도 도선의 임계전류 밀도가 크기 때문에 소형화가 가능하여 발전기의 무게를 반으로 줄일 수 있다. 일본, 러시아 등지에서는 200~300MW 급의 초전도 발전기를 개발하고 있다. 이 외에도 송전선으로의 활용 등이 있을 수 있다.

- 교통 수단의 응용

교통 수단으로서의 초전도 응용은 대표적으로 자기 부상 열차와 자기 추진선을 들 수 있다. 자기 부상 열차의 부상원리는 초전도 자석에 의한 강한 자기장이 있는 열차가 도체 판이 깔린 궤도 위를 지날 때 유도되는 와류(eddy current) 때문이다. 도체 판에 유도되는 와류의 방향은 Lenz의 법칙에 의해 항상 외부 자속의 변화를 방해하는 방향이며 크기는 자속의 변화율에 비례하므로 결과적으로 같은 극끼리 자석을 마주보게 놓은 것과 같다. 따라서 고속으로 도체 판 위를 달리는 초전도 자석을 실은 열차는 위로 부상하게 된다. 이 방법으로 시속 500km/h 로 약 10cm 정도 부상하는 것이 가능하며 현재 일본에서 시험 중에 있다.

자기 추진선은 자기장과 수직으로 수중에서 전류를 통하면 플레밍의 왼손법칙을 이용하며 스크류가 없이 추진되는 배를 만드는 것이다. 일본에서 시험적으로 제작하여 1992년 시운전한 바가 있으

나 속력이 8 노트에 불과하여 실용성은 의문이다.

- 의료 및 가속기용 초전도 자석

자기공명 단층촬영 장치의 해상도를 높게 하기 위해서는 고자장 및 균일한(1ppm 이하) 자기장이 필요하기 때문에 2~5T급의 초전도 자석이 사용된다. 현재 사용되고 있는 자석은 주로 저온 초전도 자석으로 액체 헬륨이 필요하지만 만약 앞으로 고온 초전도 선재화가 이루어지면 액체질소를 냉매로 사용하여 이동형 자기공명 단층촬영장치가 가능해질 수 있다.

입자가속기에도 높은 자기장이 필요하기 때문에 최근 새로 건설하거나 입자에너지를 높이는 경우 초전도 자석이 사용되고 있다.

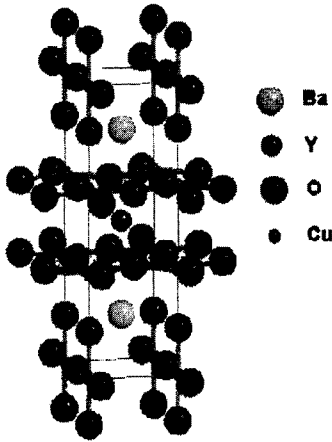
2. 소규모 응용

- 고속 스위치 소자

조셉슨(Josephson) 접합에는 외부 전압 유도 없이 조셉슨 전류가 흐를 수 있다. 일정한 전류가 흐르는 상태에서 외부 자기장을 가하면 조셉슨 전류가 작아지기 때문에 전압이 나타나는 switching 현상 즉 off 상태에서 on 상태로 변하게 된다. 초전도체의 경우 switching time(약 10-11초)이 반도체 소자보다 10~100배 빠르고, 작동전압이 초전도체의 에너지 간격에 의하여 정해지기 때문에 10mV 정도로서 power 소모가 적은 이점이 있다. 그러나 현재 반도체 기술이 빠른 속도로 발전하고 초전도체의 경우 냉각문제 등이 있기 때문에 특수 컴퓨터 분야에 응용될 것으로 짐작된다.

- SQUID(초전도 양자 간섭장치)

조셉슨 접합 두개를 병렬 연결시킨 초전도 양자 간섭 장치는 조셉슨 효과와 자속의 양자화 현상을 이용하여 미세한 자기장(감도는 수 pT로서 지구 자기장의 100억분의 1수준)을 측정할 수 있는 장치이다. 따라서 사람의 심장이나 뇌에서 나오는 파를 검출하여 간질, 치매 등 여러 증상의 진단에 응용될 것으로 기대된다. 또한 지질 탐사, 항공기의 구조물의 균열을 검사할 수 있는 비파괴 검사용으로 SQUID를 사용할 수 있다. 그림 3은 SQUID를 센서로 사용한 scanning squid microscope 를 사용하여 tricrystal에서의 flux 분포를 조사한 사진이다.



〈그림 3〉 Scanning SQUID Microscope로 조사한 고온초전도체 표면의 flux 분포. 세계의 단결정을 응용한 기관의 가운데에만 flux가 통과하여 이는 고온초전도체의 질서계수가 d-wave 대칭성을 가지고 있음을 보여준다.

– Rapid Single Flux Quantum(RSFQ) 소자

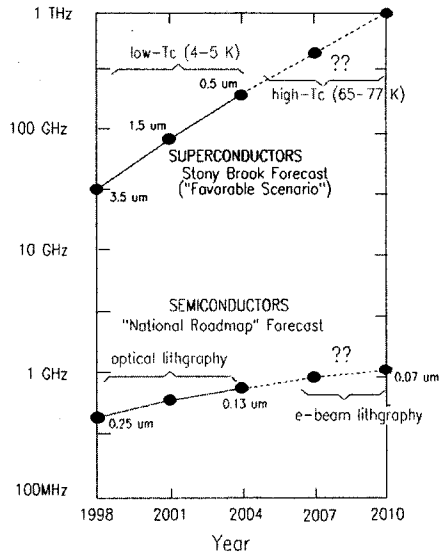
정보통신 수단의 급속히 발전에 의하여 초고속 저전력 손실 switching 소자개발이 필요하다. 조셉슨 고리에 포획된 단일 자속의 효과-즉 지속전류의 방향-를 활용하면 초고속 switching device를 만들 수가 있다. 고온초전도체를 사용할 경우 THz(10¹² Hz)이상의 초고속 network switch를 만들 수 있어서 이 분야 연구가 활발하다. 그림 4는 반도체나 RSFQ 등 switching 소자의 switching time에 대한 비교표이다.

– 기타 전자 소자

조셉슨 소자를 사용하여 고주파 검출기로 응용하면 고성능의 라디오 망원경으로 활용할 수 있다. 실제 미국, 일본에서는 이를 활용하여 sub-millimeter 파의 검출에 활용하고 있다.

그리고 고주파 영역에서도 초전도체의 표면 저항이 상용의 구리보다 1/10이하로 작기 때문에 필터, 공진기, 안테나 등으로 이용할 수 있다. 최근 휴대용 전화기의 대중화로 인하여 지상 송수신국의 수가 많아지고 또 주파수대역의 분할이 필요됨에 따라 우수한 필터의 필요성이 높아져서 초전도

필터가 각광을 받고 있다. 국내외에서 이 분야 연구가 활발하고 가까운 장래에 상용화가 될 것이다.



〈그림 4〉 반도체와 RSFQ 등 switching 소자의 switching time 비교.

V. 맺음 말

자연계에서 초전도체만큼 다양한 특성을 보여주는 것도 드물고, 초전도체의 발견만큼 과학계를 흥분시킨 사례도 드물다.

같은 음전하를 띤 전자들이 쌍을 이루어 움직인 다던가, 상온에서는 전기적 저항의 원인인 원자 진동이 저온에서는 오히려 전자를 도와서 초전도 상태를 만든다던가 하는 사실은 자연 현상에 대한 우리의 통상적인 개념을 여지없이 반전시키는 것이다.

부도체로 알려진 구리 산화물계 세라믹의 초전도 임계온도가 금속 초전도체보다 오히려 높다는 사실은, 자연이란 항상 무한 가능성을 내포하면서 단지 인간의 도전을 기다리고 있다는 것을 암시하고 있다.

고온초전도체가 발견된지 이미 10년이 지났다.

발견된 때부터 지금까지가 고온초전도체의 탐색기였다면 앞으로 10년간은 개발기가 되어 다양한 응용소자 특히 소규모 소자의 개발이 기대되고 있다. 아울러 저온 초전도체에서는 격자진동을 매체로 한 BCS 이론처럼 과연 고온 초전도체의 경우에는 무엇이 매체역할을 하여 고온 초전도 현상을 일으키는가에 대한 해답이 나올 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

- [1] M. Tinkham, Introduction to Superconductivity, 2nd ed. McGraw Hill (1996).
- [2] For the property of HTSC, see C. Poole, H. Farach, and R. Creswick, Superconductivity, Academic Press (1995).
- [3] For a review of SQUID, see J. Clarke, Superconducting Electronics, NATO ASI Series, Springer Verlag (1989).
- [4] For a review on the strong correlation theory of cuprates, see S. G. Ovchinnikov, Physics - Uspekhi, 40, 993 (1997), and D. J. Scalapino, Physics Reports, 250, 329 (1995).
- [5] For a brief summary on pseudogap phenomena, see R. F. Service, Science 278, 1879 (1997).

저 자 소 개



金 廷 九

1947년 12월 10일생, 1971년 2월 서울대학교 전기공학과 학사, 1973년 2월 서울대학교 응용물리학과 석사, 1978년 7월 Univ. of Notre Dame 박사, 1978년 7월~1979년 6월 Univ of Wisconsin 연구원, 1979년 6월~1980년 3월 Iowa state Univ. 연구원, 1980년 3월~현재 서울대학교 물리학과 조교수, 부교수 교수, (주관심 분야: 초전도, Scanning Probe microscope)