

실험적 측면에서 본 2003 노벨 물리학상 수상자의 업적

김 동 호

2003년 노벨 물리학상은 초전도와 초유체 이론에 현격한 공헌을 한 세 명의 이론물리학자, Alexei A. Abrikosov, Vitaly L. Ginzburg, Anthony J. Leggett에게 돌아갔다. 알파벳 순서로는 수상자의 순서가 위와 같지만 연구 업적의 순으로 본다면 Ginzburg의 Ginzburg-Landau 이론, Abrikosov의 vortex에 관한 이론, 그리고 Leggett의 초유체 ^3He 에 관한 이론이 될 것이다. 이들 이론에 관해서는 앞선 해설서에서 상세히 설명되었기에 본 해설에서는 이들 이론을 간단하게 요약한 다음 이들과 관련된 전반적인 실험에 관하여 소개하겠다.

Ginzburg의 Ginzburg-Landau 이론

1950년에 제창된 Ginzburg-Landau(GL) 이론은^[1] 자기장이나 전류에 의하여 초전도 현상이 소멸되는 현상을 설명하기 위한 현상학적 이론임은 앞선 해설서에서 자세히 설명된 바 있다. 특히 GL 이론은 이전에 발표된 London 이론으로는 설명되지 못한 여러 가지 현상, 예를 들면 자기화의 자기장에 대한 비선형 의존성, 시료크기에 대한 의존성, 자기장의 방향에 대한 의존성 등을 성공적으로 기술하고 있다. 이 이론의 중심은 초전도 전자들을 기술하는 유효파동함수로서 질서매개변수(order parameter: ψ)에 관한 방정식이다. 이 방정식은 Landau의 2차 상전이를 설명하는 식에 자기장에 의한 효과를 가미한 식으로 상전이 근치에서는 ψ 가 작음으로 고차항이 생략되어 자유에너지 밀도는

$$f_s = f_n + a|\psi|^2 + \frac{\beta}{2}|\psi|^4 + \frac{1}{2m^*} \left| \left(\frac{\hbar}{i} \nabla - \frac{e^*}{c} \vec{a} \right) \psi \right|^2 + \frac{h^2}{8\pi} \quad (1)$$

으로 주어지며 여기서 아래첨자 n 과 s 는 정상 상태와 초전도

상태를 각각 의미하고 h 는 자기장, \vec{a} 는 벡터 퍼텐셜이다.^[2] 여기서 안정한 초전도 상태가 일어나기 위해서는 β 가 양수이고 $a = a_0(T - T_c)$ 가 되며 T_c 는 초전도 상전이가 일어나는 임계온도이다. 전체 자유에너지는 식 (1)을 부피에 대하여 적분하면 되는데 이 값을 ψ, ψ^*, \vec{a} 에 대해 최소화하면 식 (1)의 미분방정식 형태가 주어지며 양자역학에서 사용되는 슈레딩거 파동방정식과 유사한 형태이다. GL 이론에 나타나는 매개변수 α 는 초전도체의 결맞음 길이(coherence length: ξ)와 연관되며 α 는 β 와 더불어 자기장의 침투깊이(penetration depth: λ)를 결정한다. 이 두 물리량은 초전도체의 특성을 가늠하는 가장 중요한 변수로서 이 두 변수의 비 $\kappa = \lambda/\xi$ 를 Ginzburg-Landau parameter라고 한다. 이 κ 는 초전도 영역과 정상 영역 사이에 존재하는 표면에너지의 부호를 결정하는데 $\kappa < 1/\sqrt{2}$ 이면 표면에너지가 양이 되고 $\kappa > 1/\sqrt{2}$ 이면 표면에너지가 음이 된다. 즉 $\kappa < 1/\sqrt{2}$ 이면 두 영역 사이의 표면이 작을수록 에너지 측면에서 유리함으로 정상 상태가 초전도 내부에 존재하지 못하게 되며 이러한 특성을 가진 초전도체를 제 1종 초전도체라 하고 주로 단일 금속 초전도체가 이에 해당한다. 반대로 $\kappa > 1/\sqrt{2}$ 이면 정상 상태가 초전도 내부에 존재할 수 있는데 Abrikosov는 이런 정상 상태가 자속 튜브의 형태로 존재하며 이들 자속 튜브는 격자 형태로 정렬되어 있어야함을 보였다.^[3] 이러한 초전도체를 제 2종 초전도체라 하며 거의 모든 화합물 초전도체가 제 2종에 해당한다. GL 이론은 초전도의 모든 특성과 연관됨으로 이와 관련된 실험 결과를 열거하자면 지면이 부족하다. 여기서는 GL 이론을 이용하여 쉽게 이해될 수 있는 세 가지 물리적 현상을 대표적으로 기술하겠다.

1. 결맞음 길이

결맞음 길이는 ψ 가 위치에 따라 변하는 기준 거리로 정의되는데, 예를 들어 초전도 영역과 정상 영역이 경계를 이루고 있으면 초전도 전자의 밀도가 정상 영역에서는 영이다가 초전도 영역에서 갑자기 증가하는 것이 아니라 어떤 길이에 걸쳐

김동호 교수는 1989년 University of Minnesota에서 이학박사학위를 취득하였고 그후 Argonne National Laboratory(1989-92), KIST(1992-94)에서 근무하였고 현재 영남대학교 자연과학부 교수로 재직 중이다. 관심분야는 초전도 vortex 특성, 초전도 digital 소자, 묶은자성반도체 분야이다. (dhkim@yumail.ac.kr)

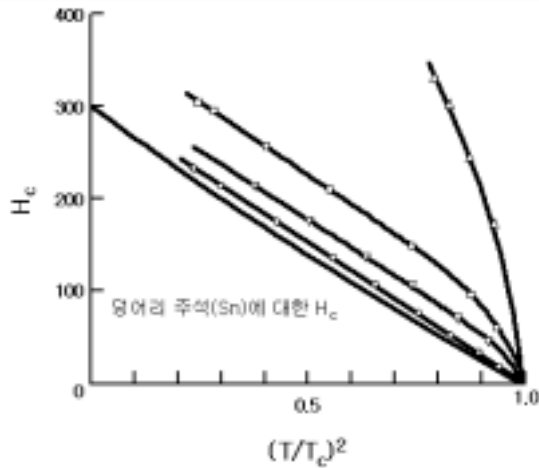


그림 1. 여러 가지 두께의 Sn 박막에서 임계자기장의 변화. 원은 1000 nm, 역삼각형은 500 nm, 사각형은 200 nm, 삼각형은 100 nm에 해당하고 실선은 덩어리 Sn에 해당한다.

서 점차적으로 증가하는데 이 길이가 결맞음 길이 ξ 이다. 결맞음 길이는 초전도 전자쌍의 대체적인 크기로도 볼 수 있다. ξ 는 실험에서 구할 수 있는데, 제 1종 초전도체에서는 침투 깊이와 임계자기장을 실험으로 구한 뒤 이를 GL 이론에 대입하면 ξ 를 구할 수 있다. 제 2종 초전도체에는 보다 단순한 방법으로 ξ 를 구할 수 있다. GL 이론에서 상부 임계자기장 H_{c2} 은 $H_{c2} = \Phi_0 / 2\pi \xi^2$ 으로 정의됨으로 H_{c2} 를 실험에서 구하면 ξ 가 얻어진다. 여기서 Φ_0 는 양자단자속(single flux quantum)으로 상수이다. H_{c2} 를 구하는 방법은 자기장 속에서 시료의 자기감수율을 측정하여 시료가 더 이상 반자성을 나타내지 않는 지점의 온도를 구하면 그 온도에서의 H_{c2} 가 바로 그때 가해진 자기장의 크기이다. 자기장의 크기를 변화하면 다른 온도에서 반자성이 사라지게 되고 따라서 새로운 온도에서의 H_{c2} 를 결정할 수 있다. 물론 자기장 속에서 저항의 온도변화를 측정하여 저항이 영으로 떨어지기 시작하는 점의 온도를 구해서도 H_{c2} 를 얻게 된다. 이러한 실험을 계속하면 여러 온도에서 H_{c2} 를 구하게 된다. 이렇게 구한 H_{c2} 는 임계온도 근처에서 온도 감소에 따라 선형적으로 증가함을 볼 수 있는데 이는 GL 이론과 잘 일치한다. 즉 ξ^2 은 α 에 반비례함으로 $H_{c2} \propto \alpha \propto T_c - T$ 가 된다. 대부분의 문헌에서 인용되는 결맞음 길이는 GL 이론을 적용하여 구한 양이다. 결맞음 길이는 금속 초전도체에서 약 1 μm 정도이나 고온초전도체에서는 2-3 nm 정도이고 결정축의 방향에 따라서는 이보다도 더 작은 값을 가진다. 이는 고온초전도체의 임계자기장 크기가 일반 초전도체에 비해 매우 크다는 사실과 동일하다. 결맞음 길이는 시료의 순도에 의존하는데 불순물이 증가할수록 결맞음 길이는 줄어든다. 즉 결맞음 길이는 초전도체의 종류 뿐 아니라 제조방법에도 민감하게 의존한다.

2. 박막의 임계 자기장

박막에서 초전도성이 사라지는 임계자기장을 측정하면 자기

장이 박막에 대해 가해진 방향에 따라 아주 민감하게 의존함을 관측할 수 있다. 자기장이 박막면과 평행할 때 임계자기장은 덩어리 시료인 때에 비하여 증가하는데 박막이 얇을수록 그 비가 증가한다. 그림 1은 Sn 박막의 두께가 변함에 따라 임계자기장이 어떻게 변하는가를 나타내고 있다. 박막의 두께가 1000 nm일 때는 덩어리의 경우와 매우 유사하나 두께가 얇아질수록 임계자기장이 증가하면서 그 온도 의존성도 바뀔 수 있다. 덩어리의 경우 임계자기장은 대개 $1 - (T/T_c)^2$ 에 비례함으로 $(T/T_c)^2$ 에 대해 직선으로 나타난다. 이러한 두께 의존성을 London 모델에서는 설명을 하지 못하였으나 GL 이론은 이 현상을 잘 설명하고 있는데, 그 이유는 박막의 두께가 침투깊이 보다 아주 작으면 박막내부의 자기장이 외부 자기장과 거의 같음으로 반자성을 유지하는데 필요한 에너지가 덩어리 시료에 비하여 상대적으로 줄어들어서 초전도에너지의 대부분을 자기에너지 증가에 대항하여 사용할 수가 있기 때문이다. 따라서 외부 자기장이 덩어리 때의 임계자기장에 비하여 어느 정도 더 증가하더라도 초전도성을 계속 유지할 수 있다. 특히 100 nm 경우는 다른 시료에 비해 현저히 다를 수 있는데 이는 3차원에서 2차원 거동의 전환으로 설명된다. (2차원의 거동은 박막의 두께가 결맞음 길이 정도가 되거나 이보다 작을 때 일어난다) 여기서 유도되는 또 하나의 재미있는 현상은 박막의 두께가 침투깊이의 $\sqrt{5}$ 배 보다 작으면, 비록 덩어리일 때 제 1종 초전도체라 할지라도 박막이 되면 평행자기장 속에서는 제 2종 초전도체의 특성을 나타낸다.

3. 비등방성 GL 이론

대부분의 일반 초전도체는 정육면체구조를 기본으로 하는 구조를 가짐으로 초전도 특성이 대개 등방성이다. 그러나 1986년에 발견된 고온초전도체는 CuO_2 의 층상 구조를 하고 있어 CuO_2 평면방향으로는 전류가 잘 흐르나 이 면에 수직한 방향으로의 전기전도도가 매우 낮다. 이러한 비등방적인 특성도 GL 이론을 확장하면 잘 설명된다. 비등방적인 경우에는 식 (1)에서 유효질량 m^* 을 텐서의 형태, 즉 결정축의 방향에 의존하는 유효질량으로 대체하면 되는데 텐서의 주축 방향으로 식 (1)처럼 1차원의 식으로 표현됨으로 등방적인 경우에 구해진 여러 가지 결과에 비등방성 척도(anisotropy factor: γ)를 추가하면 된다. 비등방성 척도는 주축방향에서의 유효질량 비의 제곱근으로 정의된다.

그림 2는 비등방성 이론이 잘 적용되는 한 예를 보여준다. 이 결과^[4]는 고온초전도체의 하나인 YBCO에서 1 T 자기장의 방향을 변화하면서 시료에 가해지는 토오크를 80 K에서 구한 것이다. YBCO처럼 비등방성이 큰 물질에서는 앞서 언급한 전기전도도의 비등방성으로 인하여 자기장이 주축 방향을 벗어날 때에는 외부자기장의 방향과 시료의 자기모멘트가 일치하지 않아 이로 인하여 시료에 토오크가 발생한다. 그림 2에서 기호는 측정 결과이고 실선은 비등방성 이론으로 구한 값인데 서로 잘 일치함을 볼 수 있다. 이 과정에서 $\gamma = 7.9$ 가 얻

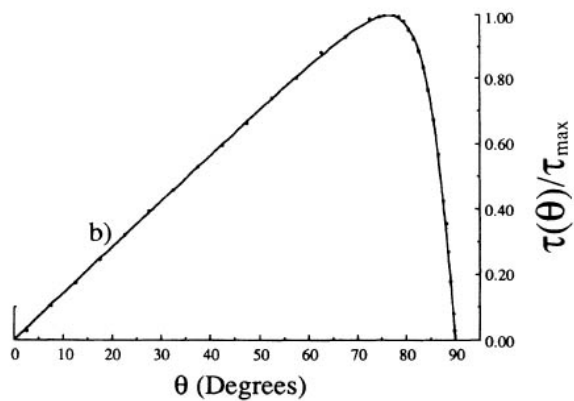


그림 2. 고온초전도체 YBCO에서 측정된 토오크. 외부 자기장이 시료의 주축과 평행하지 않으면 토오크가 발생하며 이를 측정하여 비등방성 인자를 구한다. (참고문헌 [4]에서)

어졌는데 이는 다른 실험에서 추출되는 값들과 잘 일치한다. 각도가 0과 90도인 지점에서는 자기장이 주축 방향임으로 시료의 자기모멘트와 외부 자기장이 평행한 경우가 되어 토오크가 영이 된다. 이런 실험은 비등방성이 좀 더 강한 BSCCO에도 성공적으로 적용되었는데 이 시료에서는 $\gamma=55$ 로 나타났다.

Abrikosov의 vortex에 관한 이론

GL 이론은 κ 가 작은 초전도체의 특성을 설명하기 위하여 도입되었으나 Abrikosov는 또 다른 경우, 즉 κ 가 크게 되면 어떤 일이 일어나는지에 대해 연구하였다.^[3] 이 때는 앞 절에서 설명되었듯이 표면 에너지가 음이 되므로 자기장이 초전도체 내부에서 될 수 있는 대로 넓은 표면적을 확보하기 위하여 잘게 쪼개지는데 식 (1)에서 미분항이 너무 커지지 않을 때까지 계속된다. 이렇게 잘게 쪼개진 자기장은 자속이 Φ_0 이고 이 주위를 에워싸는 초전류를 동반하게 되는데 이를 vortex라 한다. Vortex의 중심은 정상상태로 이루어져 있으며 이 상태의 반지름은 대략 결맞음 길이와 같다. 이 중심에서의 자기장은 최대가 되고 이 자기장의 범위는 대략 침투깊이와 같다. 이런 vortex들은 제 2종 초전도체에서 외부자기장이 하부 임계자기장보다 크고 상부 임계자기장보다 작을 때 시료내부에 격자를 이루면서 존재하는데 이를 혼합상태 혹은 vortex 상태라고 하며, vortex들은 대개 삼각형 격자를 이룬다. 그림 3은 NbSe₂의 vortex의 사진인데 여기서 밝은 부분은 vortex의 중심이 위치한 곳으로 삼각형 격자를 이룸을 확인할 수 있다. 외부 자기장이 증가하게 되면 vortex 밀도도 계속 증가하는데 결국 vortex의 중심이 서로 만나는 자기장까지 계속된다. 이 이상의 자기장에서는 vortex의 중심, 즉 정상상태만 존재함으로 시료는 초전도성을 상실하게 되는데 이 지점의 자기장이 상부 임계자기장이다. 몇몇 원소 초전도체를 제외한 대부분의 초전도체는 제 2종 초전도체이고 이들이 실제 응용되는 영역이 주로 vortex가 존재하는 혼합상태여서 vortex에 대한 연구

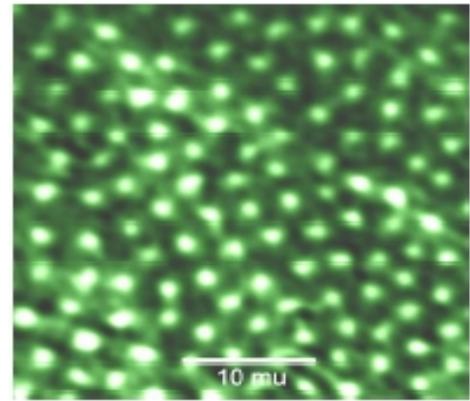


그림 3. NbSe₂의 vortex 배열 사진으로 여기서 밝은 부분은 vortex의 중심이 위치한 곳에 해당한다. Vortex들이 삼각형 격자를 이룸을 확인할 수 있다.

는 아주 활발하게 이루어져 왔다. 본 절에서는 vortex와 관련된 실험들 중에서 흥미있는 몇 가지를 소개하겠다.

1. Vortex 물질의 여러 가지 평형상태

그림 3의 vortex 사진을 들여다보면 vortex들이 삼각형의 격자를 이루고 있다고는 하나 부분적으로 격자의 형태가 깨어지는 곳이 있음도 확인할 수 있다. 이 사진은 4.2 K에서 찍은 것이지만 온도를 임계온도 근처로 올리게 되면 vortex의 모습 이 뚜렷하게 잡히지 않고 배열상태도 점점 무질서해짐을 볼 수 있다. 이러한 사실은 vortex가 항상 고체처럼 격자상태를 유지하는 것이 아니라 조건에 따라 그 상태가 바뀔을 의미한다. 그림 3을 얻는 방법은 시료에 약한 자기장 (작더라도 하부 임계자기장보다는 크다)이 걸린 상태에서 강자성체인 철을 증착하면 철 입자들은 자기장이 강한 곳으로 이끌리게 됨으로 vortex 중심에 주로 몰리게 된다. 이를 전자현미경으로 보면 그림 3과 같이 vortex의 배열과 간격 등을 확인할 수 있다. 만약 증착 과정동안 vortex의 위치가 열에너지에 의하여 변화되면 철 입자들이 vortex 중심을 따라 자리함으로 그림 3과 같은 뚜렷한 이미지를 얻을 수가 없다. 즉 4.2 K에서는 온도가 충분히 낮음으로 열에너지에 의한 효과가 거의 무시되어 vortex 고체 상태로 볼 수 있으나 온도가 증가하면 열에너지에 의해서 vortex들의 위치가 요동되어 뚜렷한 이미지를 얻을 수 없다. 이처럼 열에너지가 vortex 상태를 결정하는 주요 인자이나 이외에도 다음 몇 가지들을 들 수 있는데

- 1) 열에너지는 vortex의 요동을 증가시켜 vortex 고체에서 액체상태로 변하게 한다.
- 2) Vortex 상호간에 서로 미는 힘이 작용하는데 이 vortex 간 상호작용 에너지는 vortex가 격자를 이탈수록 낮아진다.
- 3) 불순물이나 결함에 의한 vortex 피닝에너지(pinning energy)는 vortex 상태가 비정질이나 glass 상태가 되게 한다. 이 외에도
- 4) 최근에 많이 연구되고 있는 고온초전도체에서는 CuO₂

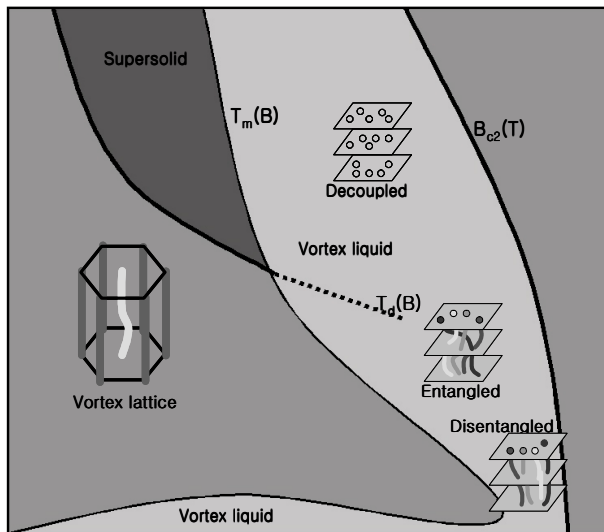


그림 4. 고온초전도체 BSCCO에서 나타나는 vortex의 여러 상태들. 특히 BSCCO는 층상 구조를 하고 있어 일반 초전도체보다 다양한 vortex의 상태를 가진다.

층 사이의 결합에너지가 주요 인자로 작용한다.

이 세(네)가지 에너지는 그 크기가 비슷해서 복합적으로 작용할 경우 예상치 못했던 새로운 현상들이 vortex 상태에서 계속 관측되고 있다. 이 관점에서 보면 vortex들에 일어나는 현상이 일반물질에서 일어나는 현상과 흡사함으로 vortex들을 일반 원자나 분자물질처럼 동일하게 취급하여 vortex들을 vortex 물질이라고 명명한다.

분자의 운동에너지가 열에너지에 비례하는 것처럼 vortex의 운동에너지도 열에너지에 비례하여 온도가 높을수록 자신의 위치에서 움직이는 요동이 증가한다. 이 요동에 의한 변위가 vortex간의 간격의 약 0.2배 이상이 되면 격자로서의 특성을 상실함으로 더 이상 고체상태로 볼 수 없다. 이때 vortex 물질은 고체에서 액체로 상전이를 하게 되는데 1차 상전이를 함이 관측되었다. 이는 열음이 물로 융해되는 과정과 흡사해서 융해열이 필요하다. 이 상전이는 시료의 저항을 온도의 함수로 측정하면 상전이가 일어나는 온도에서 저항의 급격한 변화를 볼 수 있다. Vortex 물질이 고체이면 vortex가 잘 움직일 수 없어 저항이 작지만 액체상태에서는 vortex가 가해진 전류에 의하여 잘 움직이게 되어 보다 큰 저항이 발생하기 때문이다. 1차 상전이가 일어나는 온도는 외부 자기장의 함수가 되며 자기장이 증가할수록 상전이 온도가 감소한다. 즉 vortex의 밀도가 증가할수록 주어진 온도에서 열에너지에 의한 변위가 vortex 간격에 비해 커지게 됨으로 더 낮은 온도에서도 액체 상태로 상전이 된다. 그림 4는 고온초전도체 BSCCO에 존재하는 vortex 물질의 상태도를 나타낸 것이다.^[5] 그림에서 $T_m(B)$ 로 표시된 고체-액체의 경계선 아래서는, 즉 온도가 낮고 자기장이 작으면 격자를 이루지만, $T_m(B)$ 위에서는 액체 상태가 된다. BSCCO에서는 CuO_2 층사이의 결합에너지가 약하여서 자기장의 세기에 따라 일반 초전도체보다 더 다양한 물성을 띄게 된다. 그림에서 $T_d(B)$ 는 CuO_2 층 사이의 결합에

너지에 따라 vortex의 구조가 3차원에서 2차원으로 변화하는 경계선인데 $T_d(B)$ 위에서는 2차원 vortex, 아래에서는 3차원 vortex 구조를 가진 액체가 된다. 3차원 영역에서도 꼬이지 않은 액체(disentangled liquid), 꼬인 액체(entangled liquid)로 구분되는데 꼬인 액체 상태에서는 점성이 강하여 vortex들이 꼬이지 않은 경우에 비해 자유롭게 움직이지 못한다.

여기서 언급된 상태들은 초전도체가 결함이나 불순물을 포함하고 있지 않은 때에 해당하는 것들로 실제 시료에서는 시료에 포함되어 있는 결함이나 불순물의 효과를 고려하여야 한다. 다시 설명하지만 그림 3을 자세히 보면, 비록 vortex는 고체 상태이지만 이들이 완전한 격자를 이루지 못하고 뒤틀려 있음을 볼 수 있다. 이는 불순물이나 결함들에 vortex가 잡혀 있는, 즉 피닝(pinning)되어 있기 때문이다. 이 현상에 관련된 피닝에너지는 결함의 종류와 크기, 밀도 등에 의존하고, 결함의 종류와 밀도는 시료 제작과정에서 결정됨으로 이에 의한 효과는 다른 세 가지 요인과 달리 extrinsic이다. 우선 왜 결함에 의하여 vortex가 피닝되는지에 대하여 알아보자. Vortex 중심은 정상 상태이므로 vortex가 초전도체 내부에 존재하려면 vortex 중심의 부피에 해당하는 부분을 정상상태로 만들어야 하는데 여기서 에너지 손실이 있다 (임계온도 이하에서는 초전도 상태의 자유에너지, 즉 식 (1)으로 표현된 양이 정상 상태의 자유에너지보다 낮다). 만약 이 중심이 불순물이나 결함이 있는 위치에 자리한다면 이 자리는 원래가 정상 상태이므로 구태여 초전도 상태를 정상 상태로 만드는 수고를 할 필요가 없음으로 그 만큼 vortex 전체의 에너지가 낮아진다. 따라서 vortex들은 될 수 있는 대로 결함이나 불순물에 위치하려는 경향이 있는데 이렇지 않는 경우와의 에너지 차이가 피닝 에너지에 해당한다. 이로 인하여 결함이나 불순물이 포함되어 있는 실제 초전도체에서는 그림 3처럼 vortex가 완전한 격자를 이루지 못한다. 이러한 피닝효과는 vortex 동역학에도 지대한 영향을 미친다.

2. Vortex 동역학

초전도체의 응용분야는 디지털 전자소자로부터 미세자기장 측정, 초전도 자석, 초전도 베어링, 한류기, 모터, 에너지 저장 장치 등 다양한 분야가 있는데 내부를 자세히 들여다보면 많은 응용분야에 vortex 동역학이 관련되어 있음을 알 수 있다. Vortex 동역학의 기초는 초전도체에 전류가 흐르면 vortex는 전류에 의하여 받는 힘 때문에 운동을 하는 것으로, 이 힘은 전자기학에서 나타나는 Lorentz 힘과 유사하다. 초전도체에서 전류와 초전도체를 통과하는 자속 사이에 발생하는 단위 부피당 힘은 $\vec{F} = (1/c) \vec{j} \times \vec{B}$ 이며, 단위 vortex가 받는 힘은 $\vec{F} = (1/c) \vec{j} \times \vec{\Phi}_0$ 이다. 즉 vortex는 외부자기장과 전류에 수직한 방향으로 힘을 받는다. 이 힘에 의하여 vortex가 움직이게 되면 전류방향으로 전기장이 유도가 되는데 이는 전류에 의하여 일반 도선에 전위차가 발생하는 현상에 해당한다. 만약 아주 작은 전류에 의해서도 vortex가 움직이게 되면 초전

도체에 저항이 발생하게 됨으로 저항 없이 전류를 흘릴 수 없게 된다. 그러면 초전도 자석 같이 대 전류 응용은 불가능할 것이다. 그러나 다행히 위 절에서 언급된 피닝 현상에 의하여 vortex의 움직임이 자유롭지 못함으로 이러한 일이 쉽사리 일어나지 않는다. Vortex가 움직이려면 Lorentz 힘에 의하여 vortex에 가해진 일이 피닝에너지보다 커야만 한다. 피닝힘은 마찰력과 같은 수동적 힘으로 만약 우리가 물체를 밀어서 움직이게 하려면 그 물체에 작용하는 최대 정지 마찰력보다 더 큰 힘을 가해야 하듯이 초전도체에서도 vortex를 움직이게 하려면 최대 피닝 힘보다 더 큰 Lorentz 힘을 외부에서 주어야 한다. 따라서 vortex를 움직이게 하는 전류값이 존재하는데 이를 임계전류로 정의한다. 이 임계전류는 온도와 자기장의 함수가 되며 온도가 낮을수록 자기장이 작을수록 임계전류는 증가하며 유한한 임계전류가 측정되는 영역은 그림 4에서 vortex 격자 상태에 해당된다.

전류가 임계전류보다 작을 때는 Lorentz 힘이 최대 피닝력보다 작으므로 vortex가 움직이지 못하게 되어 저항이 발생하지 않다가 전류가 임계전류에 도달하는 그 순간부터 저항이 급격히 나타난다고 단순하게 생각할 수 있으나 실제로는 자속 크립(flux creep), 즉 자속 기어감 현상에 의하여 임계전류보다 작은 전류 하에서도 비록 작지만 저항이 발생한다. 자속크립은 vortex 동역학의 주요한 연구분야인데 간단히 설명하면 자속크립은 피닝 퍼텐셜 우물에 갇혀 있던 vortex가 열적활성화 현상에 의하여 밖으로 나가게 되는 현상을 말하는 것으로, 이렇게 튀어나온 vortex는 다른 피닝 퍼텐셜 우물에 다시 갇혔다가 이 우물에서도 열적활성화에 의하여 다시 나오는 운동을 되풀이하면서 Lorentz 힘 방향으로 움직인다. 이렇게 움직이는 것이 꼭 자속이 기어가는 것과 같아하여 자속크립이라 부른다. 이에 반하여 자속흐름(flux flow)은 전류에 의한 Lorentz 힘이 피닝력보다 훨씬 커서 vortex 전체가 유체처럼 흐르는 현상이다. 자속크립은 주로 임계온도 근처에서 쉽게 관측되나 비록 미소하지만 저온에서도 일어난다. 따라서 실제 초전도 선재를 설계할 때는 최대 피닝력을 높이는 것도 중요하지만 자속크립에 의하여 발생하는 저항에 의한 열이 효과적으로 분산되게 하여야 한다. 현재 가장 많이 사용되는 초전도 선재는 Nb과 Ti의 합금인데 Nb은 초전도체이고 Ti는 정상 도체이다. Nb의 임계온도는 약 9 K이나 NbTi는 약 12 K이다. Ti는 높은 임계온도와 최대 피닝력을 얻기 위해 사용되는 물질로 피닝중심의 역할을 하며 이들 NbTi 선들은 다시 구리 matrix로 싸여있다. 구리 matrix의 역할은 자속크립에 의하여 발생하는 열을 효과적으로 분산하여 냉매로 전달하고 또 선재에 유연성을 준다. 이렇게 만들어진 선재는 수십 암페어의 전류를 손실 없이 전달한다.

Leggett의 초유체 ^3He 에 관한 이론

이 이론은 1972년 Lee, Osheroff, Richardson에^[6] 의해 발견된 초유체 ^3He 의 원리에 대한 것이다. ^3He 는 두 개의 양성자,

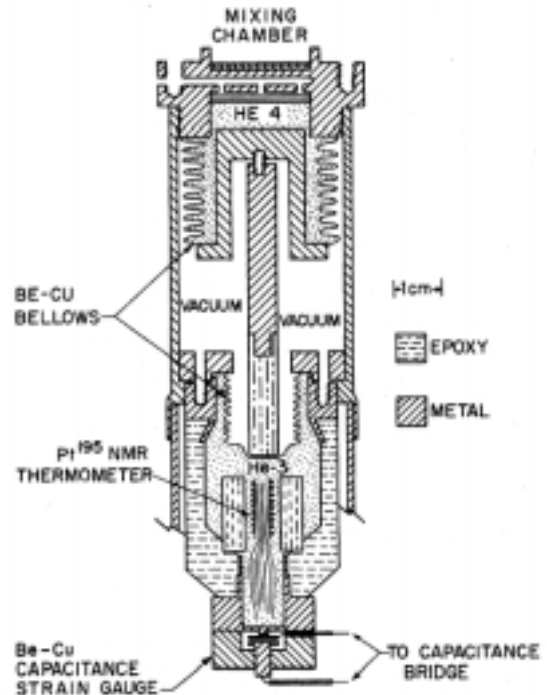


그림 5. Lee, Osheroff, Richardson이 초유체 ^3He 실험에 사용한 Pomerancuk pressure cell. 위 부분의 ^4He 에 가한 압력이 아래의 ^3He 에 전달된다. (참고문헌 [6]에서)

한 개의 중성자, 그리고 두 개의 전자로 이루어진 fermion으로서 스핀이 1/2인 입자인데 서로 간의 상호작용이 강하므로 단지 극저온인 2.7 mK 이하에서만 두 입자가 쌍을 이루어 boson이 되고 초유체성을 나타낸다. 본 절에서는 위 세 사람이 수행한 ^3He 의 발견에 관한 실험 내용에 대하여 소개하겠다. 1957년에 초전도 현상이 fermion인 두 개의 전자가 쌍을 이루고 이들이 Bose 응축을 통하여 초유체가 된다는 사실이 알려진 후 ^3He 에서도 초전도체와 유사한 현상이 일어날 것을 예견하였고 실험적으로 입증하려는 시도가 시작되었다. 한편 1960년 무렵에 러시아 물리학자인 Pomerancuk는 300 mK 이하에서 ^3He 를 단열압축하면 ^3He 가 냉각되어 ^3He 액체를 고체로 변환할 수 있다고 제안하였다.

그 이유는 액체 ^3He 의 엔트로피가 고체 ^3He 의 스핀 엔트로피보다 더 낮기 때문인데, 고체가 생성되면서 열이 필요하게 되고 이 열을 남아있는 액체로부터 공급받는데 이로써 액체는 더 냉각된다. Cornell 대학의 Lee 교수는 이 현상에 관심을 가지고 ^3He 의 냉각에 관한 연구를 시작하였다. 그는 Pomerancuk cell에서 압축할 때 발생하는 내부 마찰을 줄이기 위하여 Be-Cu로 만들어진 bellow를 사용하였으며 개략도는 그림 5와 같다. 위 부분의 ^4He 에 압력을 가하면 이 압력은 아랫 방에 있는 ^3He 를 압축하여 고체가 되게 한다. 이를 이용하여 Osheroff는 ^3He 의 용해곡선을 측정하기 위하여 외부압력을 일정한 속도로 증가하면서 cell 내부의 압력을 시간의 함수로 측정하였다. 그 결과는 그림 6에 나타나있다.

여기서 일정한 속도로 외부 압력을 증가한다는 것은 일정

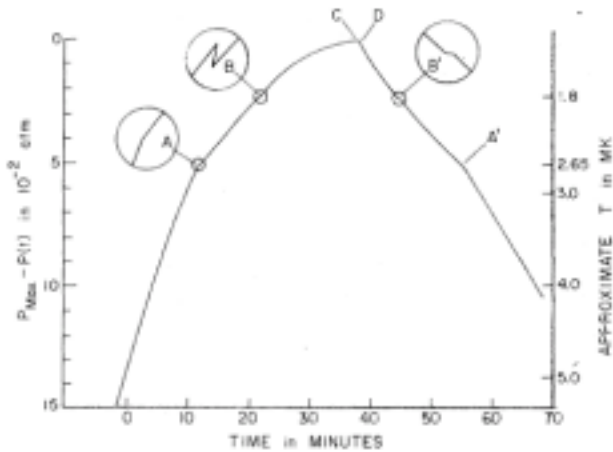


그림 6. 압축과정과 팽창과정 동안 Pomerancuk cell 내부의 압력변화를 시간에 대해 나타낸 그림. (참고문헌 [6]에서)

한 속도로 온도를 내리는 것과 같은 역할을 한다. 처음에는 cell 내부의 압력이 시간에 따라 선형적으로 일정한 비율로 증가하였다. 그러나 그림에서 표시된 A와 B점에서는 특이한 현상이 관측되었고 이 점들은 다른 변수들을 변화함에도 불구하고 같은 위치에서 재현성 있게 나타났다. C의 정점을 지나서 압력을 줄이는 과정, 즉 온도 상승과정에서도 B'와 A'에서 같은 현상이 관측되었다. A점에서 융해곡선의 기울기 변화가 나타났고 B점에서는 작은 압력 감소가 있다가 다시 증가하나 그 기울기는 변하지 않는다. Clausius-Clapeyron 방정식에서 융해곡선의 기울기는 엔트로피의 변화에 해당하므로 A점에서는 새로운 상태가 생성됨을 의미하는데 당시에는 이 엔트로피의 변화가 새로운 고체상의 생성과 관련이 있을 것이라고 추측하였다.

이들은 계속해서 NMR을 이용하여 이들 새로운 상의 질서 매개 변수를 측정하고자 하였다.^[7] Cornell 연구진이 고안한 실험은 coil에 자기장의 기울기를 주어서 시료에 가해지는 자기장이 위치에 따라 다르게 하는 것이다. 그 이유는 고체와 액체 상태에서 나오는 신호를 구별하기 위함이었다. 일반적인 NMR에서는 외부 자기장을 걸면 스핀이 자기장을 중심으로 세차운동을 하는데 여기에 약한 고주파 자기장을 자기장에 수직으로 가하면 스핀의 자기장 성분이 고주파 자기장으로부터 에너지를 흡수하여 다른 양자상태로 전이된다. 이 전이는 고주파의 주파수가 Larmor 주파수와 일치할 때 일어난다. Larmor 주파수는 자기장에 비례하므로 만약 자기장이 시료의 위치에 따라 다르다면 주어진 주파수의 고주파 자기장과 공명이 일어나는 지점은 coil 내에서 공명조건을 만족하는 곳밖에 없다. 따라서 주파수를 변화하면서 측정하는 것은 coil 방향으로 시료의 공명에 대한 단면도를 얻는 것과 같다. 고체와 액체가 공존하나 만약 고체가 한 부분에만 모여 있다면 이렇게 위치에 따른 흡수율을 구해서 고체와 액체의 신호를 분리하여 조사할 수 있다. 이러한 일련의 실험을 통하여 A와 B사이와 B'과 A' 사이에서는 초유체-A 상이, B와 B' 사이는 초유체-B 상이 존

재함을 확인하였으며, 자기장 하에서는 B 상이 줄어드는 대신 A 상이 점점 커지고 이와 함께 새로운 A₁ 상이 나타남도 관측하였다. 이 세 가지 상태는 특히 Leggett에 의해 규명되었듯이 A 상은 ABM (Anderson-Brinkman-Morel) 상태로 스핀 삼중항 중에서 ($\uparrow\uparrow$)와 ($\downarrow\downarrow$)로 이루어진 상태이고, B 상은 BW(Balian-Wertheimer) 상태로 ($\uparrow\downarrow + \downarrow\uparrow$)/ $\sqrt{2}$ 인 상태이며, A₁ 상은 ($\uparrow\uparrow$)와 ($\downarrow\downarrow$) 중의 하나로만 이루어진 상태이다.

이와 같이 발견된 ^3He 의 새로운 상태가 점성없이 흐르는 초유체 인가에 대한 실험은 두 곳에서 각각 행하여졌다. Lounasma 등은 이 유체 내에서 진동하는 실의 감쇠인자를 측정하여 액체가 2 mK에서 1 mK으로 냉각되는 동안 이 인자가 1000 배 정도 감소함을 발견하였다. 그리고 ^3He 와 분말을 섞어 만든 torus에서 영구 흐름을 측정한 결과 B 상에서는 적어도 수 일간에 걸쳐 아무런 감쇠도 관측되지 않음을 발견하였다. 이러한 형태의 실험은 이 전부터 잘 알려진 ^4He 초유체를 증명한 실험과 같은 종류이다. 이 결과는 ^3He 초유체의 점성이 정상 유체의 점성보다 적어도 12승 보다 더 작음을 의미한다. 한편 Wheatly 등은 음파의 4승 항의 속도를 발견하고 측정하였는데 이 파는 일반적인 음파인 압력파가 아니라 작은 구멍 내에서 나타나는 온도파에 해당한다.

이 초유체의 결맞음을 결정적으로 증명하는 실험은 양자화된 vortex의 관측이다. 초유체가 회전할 때 이 회전속도가 임계치를 넘어가면 앞 질에서 제 2종 초전도체에 Abrikosov vortex가 나타나는 현상처럼 초유체 내에도 vortex가 나타나며 이는 실험에서 직접 관측되었다.

맺음말

본 해설에서는 2003년 노벨 물리학상 수상자들의 업적과 관련된 실험적 현상들을 알아보았다. 여기서는 이들과 관련된 실험적 사실 중에서 독자들이 편하게 이해할 수 있는 부분만을 발췌하여 소개하였고, 독자들이 초유체 분야를 이해하는데 도움이 되었으면 한다. 그리고 여기서 소개된 내용은 초유체 분야의 관심 연구 분야 중에서 빙산의 일각에도 지나지 않는다. 이만큼 이들이 초유체 분야에 공헌한 바는 지대하다 하겠다.

참 고 문 헌

- [1] V. L. Ginzburg and J. D. Landau, Zh. Eksp. Teor. Fiz. **20**, 1064 (1950).
- [2] Tinkham, *Introduction to Superconductivity*, 2nd Ed. (McGraw-Hill, 1996).
- [3] A. A. Abrikosov, Sov. Phys.-JETP **5**, 1174 (1957).
- [4] D. E. Farrell et al., Phys. Rev. Lett. **64**, 1573 (1990).
- [5] G. W. Crabtree and D. R. Nelson, Physics Today, **38** (April 1997).
- [6] D. D. Osheroff et al., Phys. Rev. Lett. **28**, 885 (1972).
- [7] D. D. Osheroff et al., Phys. Rev. Lett. **29**, 920 (1972).