



“高温 超傳導體의 電磁氣的 性質”

The Electromagnetic Properties of High T_c Superconductor

姜 元 浩*
Kang, Won Ho

I. 서 론

1911년에 K. Onnes에 의해 수은에서 초전도 현상이 발견된 이래 초전도체에 대한 연구가 꾸준히 진행되어 왔으며 실제로 일부 의료용이나 계측용, 또는 전자석 등 제한된 특수 용도로서만 활용되어 왔다.

그러나 극저온으로 냉각시키는 데에 따른 경제성 문제로 크게 실용화되지 못하고 있었던바, 1986년 초에 IBM사 Zürich 연구소의 Bednorz와 Müller에 의해 La-Ba-Cu-O계 산화물을 이용하여 30K 근처에서 초전도 전이를 나타내는 초전도체가 발견된 이후 초전도체의 연구는 오랜 동면에서 깨어 활기를 띠게 되었다.

1987년에는 C.W. Chu 등에 의해 98K의 전이온도를 갖는 초전도체($Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$)가 발견되었으며, 1988 초에는 MAEDA 등에 의해 110K의 전이온도를 갖는 초전도체($Bi_1Sr_1Ca_1Cu_2O_y$)가 개발되는 등 현재 9계통 약 50종에 이르는 신물질이 개발되었다.

초전도 현상이 일어나는 임계온도(T_c)가 액체 질소의 비등점(77K= -196°C)보다 훨씬 높아서 기존에 값 비싼 액체 헬륨을 냉각제로 사용하던 것을 값싼 액체 질소로 대체할 수 있게 되어 경제적인 초전도체의 응용 가능성을 제시하게 되었고, 더 나아가서 실온(300K)에서 응용이 가능해질 경우 산업계에 미치는 파급효과는 상상 이

상의 것이라 추측된다.

이 글에서는 초전도체의 전기, 자기적 성질에 대해서 기술하고 그 특성을 측정할 수 있는 측정방법에 대하여 논하고자 한다.

II. 본 론

1. 초전도체의 전기적, 자기적 성질

금속을 극저온으로 냉각시키면 관측되는 초전도 현상은 첫째, 전기적 저항이 없는 완전 도체 성질과 둘째, 외부에서 자기장을 가하더라도 도체 내부에는 자기장이 투과할 수 없는 완전 반자성 성질의 2가지 기본적인 성질로 특징지어진다. 또한 2개의 초전도체 사이에 얇은 절연체를 끼우면 전류가 통하게 되나, 여기에 약한 자기장이나 외부 전류를 가하면 쉽게 저항 상태가 되는 Josephson 효과도 초전도체의 한 성질로 이를 이용하여 초고속의 반도체 소자를 만든다.

(1) 초전도체의 전기적 성질

가. Zero Resistance

모든 금속과 물질화합물을 냉각시키게 되면 전기적 저항이 감소하게 된다. 온도가 증가하게 되면 열에너지에 의해 물질을 구성하고 있는 격자가 진동하게 되며, 그 진동에 의해 움직이는 Conducting electron과의 충돌로 저항이 높아지게 된다.

전도체에서 전류는 물질속을 자유롭게 움직이는 Conduction electron의 이동에 의해 생기는

* 産業應用(窯業)技術士, 三星코닝 研究所 所長

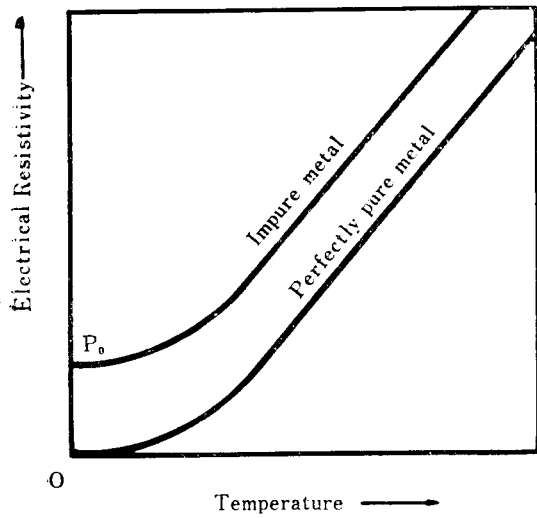


그림 1. 온도에 따른 금속의 저항변화

때, 전자는 파동의 성질을 지니고 있고, 물질은 일정한 간격을 두고 원자가 규칙적으로 반복되어 나열되어 있으므로 전자의 평면파 성질로서 완전한 crystal의 경우, 전자는 에너지 손실 없이 원래의 방향으로 움직일 수 있다. 다시 말하면 완전한 결정입자에서는 저온의 경우 저항없이 전류를 흘릴 수 있다.

그러나 결정의 주기가 일정하지 않으면 전자 파와 충돌을 일으켜 저항을 생기게 하고, 또한 물질내의 온도가 올라가게 되면 격자의 열진동에 의해 저항은 높아진다.

물질의 저항(ρ)은 온도에 따라 변하게 되는데 그림 1에서 보는 바와 같이 온도가 올라감에 따라 선형적으로 증가하게 된다. 그림 1에서 ρ_0 는 금속내의 불순물에 의한 저항값이다.

일반적으로 전기저항은 다음의 식으로 주어진다.

$$\rho = \frac{m^*}{Ne^2} \frac{1}{\tau} \dots \dots \dots (1)$$

- ρ ; resistivity
- m^* ; effect mass of the electron
- τ ; collision time

(1)식의 collision time은 각각 독립적으로 격자원소인 phonon과 impurity에 의한 것으로 나뉘게 된다.

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{ph}} + \frac{1}{\tau_{im}} \dots \dots \dots (2)$$

(1)과 (2)식으로부터 물질내의 비저항(ρ)은 impurity와 lattice 진동에 의한 것으로 양분할 수 있다.

$$\rho = \rho_i + \rho_{ph}(T) = \frac{m^*}{Ne^2} \frac{1}{\tau_i} + \frac{m^*}{Ne^2} \frac{1}{\tau_{ph}} \dots \dots \dots (3)$$

매우 낮은 온도에서는 격자의 진동이 극히 작으므로 Matthiessen rule (아주 낮은 온도(≈ 10 K)에서 비저항 값은 ρ_i 로 일정하다)에 의해 비저항 값은 impurity에 의한 ρ_i 로 일정함을 알 수 있다. 그림 1에서 알 수 있듯이 아주 낮은 온도에서 impure metal의 경우 ρ_0 값이 있는 반면 perfectly pure metal의 경우 전기 저항 값은 0이다.

그러나 순수한 물질 모두를 생각시킨다고 해서 전부 저항이 0이 되는 것은 아니다. copper, iron, sodium 등은 아주 낮은 온도에서도 저항이 완전 0이 되지 않는 반면 어떤 물질을 생각시키면 그림 2에 나타나듯이 절대영도에 이르기 전에 전기저항이 완전 0이 된다. 이때의 온도를 임계온도(T_c)라고 하며 이 물질은 초전도 상태(superconducting state)에 있다고 말한다.

또 한가지 재미있는 사실은, 초전도 현상을 일으키지 않는 원소들의 화합물도 초전도체를 이룬다는 것이다(ex ; Bi-Pb).

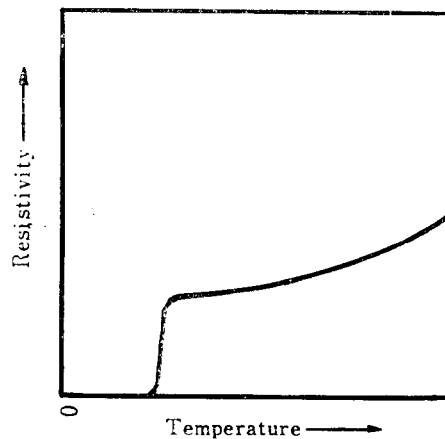


그림 2. 초전도체의 전기저항

표 1. 원소 및 화합물의 임계온도 비교

	Ta-Nb	Pb-Bi	3Nb-Zr	Nb ₃ Sn	Nb ₃ Ge		
T_c (°K)	6.3	8	11	18	23		
	Nb	Pb	Ta	Sn	Zr	Bi	Ge
T_c (°K)	9.3	7.2	4.5	3.7	0.8	not s/c	not s/c

표 1은 금속과 화합물의 T_c (임계온도 : Critical Temperature)값을 나타낸다.

한편 금속의 경우 전류를 흐르게 하는 주체가 conduction electron 이지만 산화물 초전도체의 경우에는 아직 알려지지 않은 상태이다. 기존의 초전도체 이론인 BCS 이론에 의하면, 어떤 임계온도 이하에서는 전자들이 격자진동(phonon)과의 상호작용때문에 전자-전자 사이에 인력이 작용하여 두 전자가 하나의 전자쌍(Cooper 전자쌍)을 형성하여 전기적 저항이 없는 초전도 상태를 이룬다고 하나 이는 산화물 고온초전도체에는 적용되지 않아 이론의 수정이 요구된다.

이외에 electron 과 hole 의 band 에 의해 초전도성을 설명하는 Two Band model 등 여러가지 이론이 제시되고 있으나 아직 어떤 모델이 맞다고 주장할 수 있는 확실한 실험적 증거가 없다.

(2) 초전도체의 자기적 성질

가. 완전 반자성(perfect diamagnetism)

어떤 물질을 임계온도 이하로 냉각시키게 되면 완전한 도체가 되고 그 물질내부 폐경로 주위의 전기저항은 0이 된다는 것은 앞절에서 살펴보았다. 또한 이 경우에 그 폐경로안의 자속 밀도(magnetic flux)의 양은 시간이 지나도 변하지 않고 항상 일정한 값을 지닌다. 즉 Maxwell equation 으로 부터

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \dots\dots\dots(4)$$

가 된다.

결과적으로 어떤 물질에 자기장을 걸어준 후 냉각시키게 되면 flux distribution 은 변하지 않고 남아있게 된다. 또한 완전도체를 냉각시킨후 자기장을 걸어 주면 식(4)로부터 자속밀도는 변하지 않으므로 시료내부에는 magnetic flux 가 존재하지 않게 된다. (그림 5 참조) 이와같은 현

상은 Lenz 의 법칙에 의해 설명되어 진다. 자기장을 걸어주면 시편 주위에 전류가 유도되고 이 전류는 다시 magnetic flux 를 형성시키는데 시편 내부에서 이 자기장은 걸어준 자기장과 크기가 같고 방향이 반대가 된다. 완전도체의 상태에서는 이 전류가 없어지지 않으므로 물질 내부의 flux density 는 zero 가 된다.

그림 3은 이러한 현상을 잘 설명해주는데, 표면전류 i 가 flux density B_i 를 형성시키고, 물질

————— Flux of applied field
 - - - - - Flux from magnetization

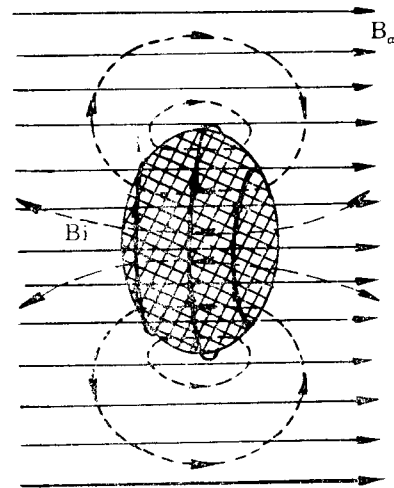


그림 3. 완전 반자성체의 자속분포
 Net flux distribution

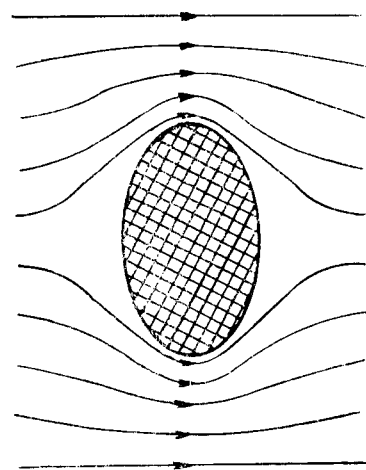
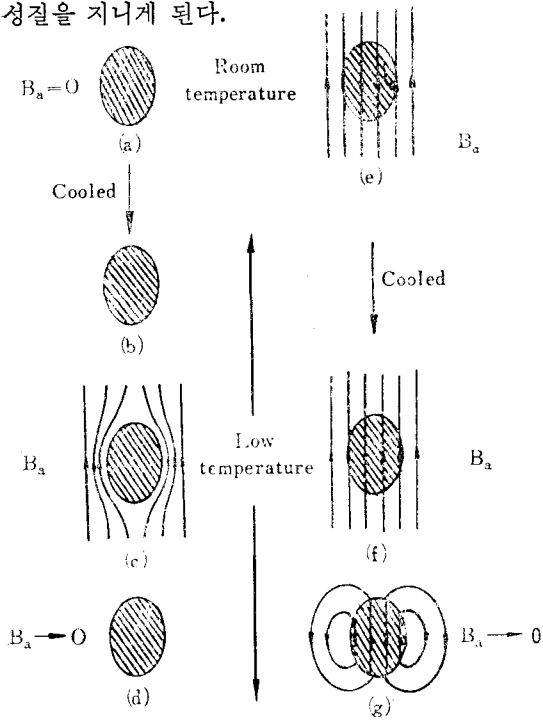


그림 4. 완전 반자성체의 자속분포

내부의 B_i 의 크기는 가해진 자장 B_a 와 같고 방향이 반대이므로 B_a 를 상쇄시킨다. 결과적으로 그림 4와 같이 되어 이 물질은 완전 반자성의 성질을 지니게 된다.



(a)-(b); 시편을 냉각시킴으로써 저항이 0이 된다.
 (c); 저항이 0인 시편에 자기장을 가한다.
 (d); 자장을 제거한다.
 (e)-(f); 자장을 걸어준 상태에서 시편을 냉각시킨다.
 (g); 가해진 자장을 제거한다.

그림 5. perfect conductor의 자기적 성질

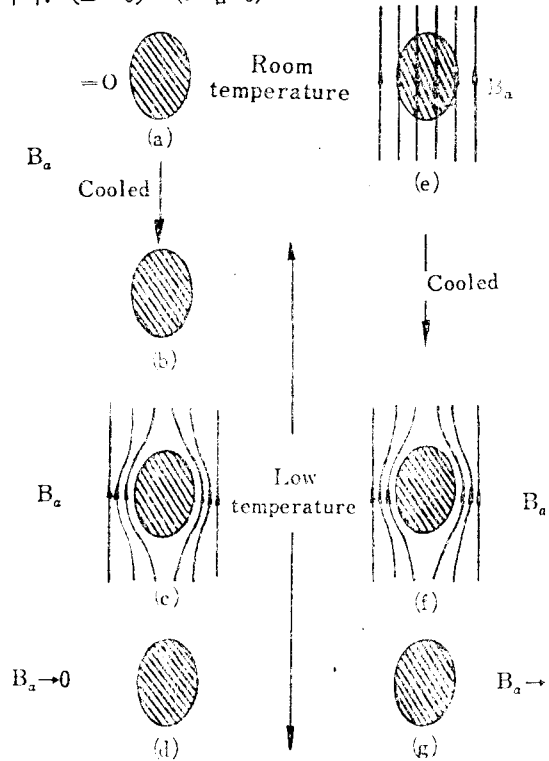
그림 5을 보게 되면 (c)와 (f)의 Sample은 같은 온도 같은 자장의 조건에서 실험하였지만 자장을 걸기 전에 냉각시킨 것과 진후에 냉각시킨 것의 magnetization은 현저하게 다르다. (d)와 (g)의 비교도 마찬가지이다.

나. Meissner 효과

1911년 네덜란드 라이덴 대학의 Onnes 교수에 의해 극저온 상태에서의 perfect conductor 성질이 발견된 후 1933년에는 Meissner와 Ochensfeld에 의해 초전도체는 resistanceless metal이 갖고 있지 않는 새로운 성질을 지니고 있다는 것이 발견되었다. 이것을 Meissner 효과라 하고 다음과 같이 기술한다.

“초전도 상태에 있는 물질 내부에는 자속밀도

(Magnetic flux density)가 존재하지 못한다. 다시 말하면 초전도 물질의 내부 자기장은 항상 0이다. ($B=0$)” (그림 6)



(a)-(b); 자장을 가하지 않은 상태에서 냉각시킨다.
 (c); 시편에 자장을 가한다.
 (d); 자장을 제거한다.
 (e)-(f); 자장을 가한 상태에서 냉각시킨다.
 (g); 가해진 자장을 제거한다.

그림 6. 초전도체의 자기적 성질

이 현상과 perfect diamagnetism과의 차이는 최초에 자기장을 걸어준 상태에서 냉각을 시키면, perfect diamagnetism의 경우 냉각후에도 물질내부에 최초에 걸어준 자기장이 남아있지만 (그림 5의 (e)~(g)) 초전도체의 경우에는 그 자기장을 밀어내게 되어 0이 된다. (그림 6의 (e)~(g)). Meissner 효과는 초전도체 표면에 약 10^{-5} cm의 두께를 갖는 층에서 자발적으로 발생하는 차단전류 때문에 생긴다.

다. Permeability and Susceptibility

앞에서 알아본 것과 같이 임계온도 이하에 있는 초전도 재료에 낮은 자장을 가했을때 초전도 재료는 반자성 차폐(diamagnetic shielding) 역할을 해서 재료내부로 자속을 침투시키지 못하

게 되는데, 이는 자장으로 인해 재료표면에 초전도 Screening 전류가 유도되어 자장을 재료내부로 침투하지 못하도록 하기 때문이다. 이 전류는 재료의 내부를 통과하지 못하고 표면을 따라서만 흐르게 된다. Maxwell equation 에 따르면 $\text{Curl } \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$ 에서 초전도체 내부에서는 $\vec{B} = 0$ 이므로 $\vec{J} = 0$ 이 된다.

초전도 재료에 자장 \vec{B}_a 를 걸면 Lenz 의 법칙에서 표면전류에 의해 $-\vec{B}_i$ 의 flux density 가 유도되며 $\vec{B}_a = -\vec{B}_i$ 가 되게 하려면 단위길이당 흐르는 circulating surface current 는 $|j| = B_a / \mu_0 = H_a$ (applied field strength) 가 되어야 한다.

이 힘과 관련되어 magnetic material 에 있어서의 flux 는

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H}_a + \vec{M}) \dots \dots \dots (5) \text{이다.}$$

(\vec{M} ; Intensity of magnetization)

초전도체 내부에서 $\vec{B} = 0$ 이므로 (5)식에서 magnetization 은

$$\vec{M} = -\vec{H}_a \dots \dots \dots (6) \text{이 되어}$$

magnetic susceptibility (the rate of the magnetization to the field strength) 는

$$\chi = -1 \dots \dots \dots (7) \text{이 된다.}$$

그러므로 초전도체 내부의 magnetic susceptibility 값은 -1 이다. (cgs emu 단위계에서는 $1/4\pi$)

라. Penetration depth

임계 온도 이하의 초전도 재료에 magnetic flux 를 걸면 재료표면의 10^{-5} cm 정도의 두께를 따라 Screening current 가 생긴다. 이 전류는 Lenz 의 법칙에 의해 내부의 자장을 축출하게 되는데 재료내부의 자속밀도는 갑자기 0 으로 떨어지지 않고 표면전류가 흐르는 범위내에서 서서히 없어지게 된다. 이와같이 표면전류가 흐르는 깊이를 penetration depth (skin depth) 라고 하는데 이는 가해진 자기장이 그 깊이만큼 투과하기 때문이다.

실제로 초전도 재료의 표면에서는 약간의 magnetic flux 가 투과하게 되고, 표면에서 magnetic density 가 줄어드는 정도는 그림 7에서 알 수 있다.

$$\int_0^{\infty} B(x) dx = \lambda B(0) \dots \dots \dots (8)$$

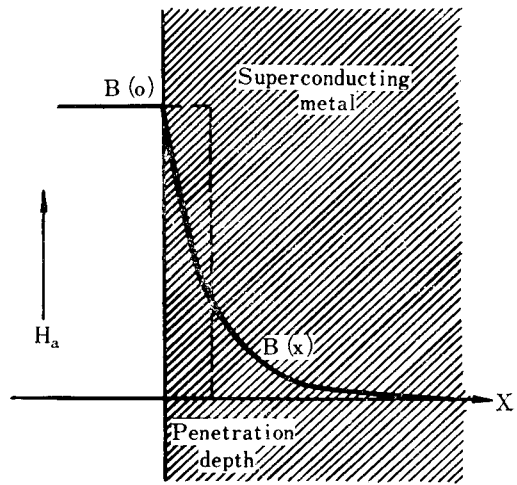


그림 7. 초전도체 표면에서의 자속의 침투

- (λ ; penetration depth
- $B(x)$; x 에서의 magnetic flux density
- $B(0)$; 0에서의 magnetic flux density

초전도체에 대한 London theory 에 따르면 magnetic flux density 는 깊이가 깊어짐에 따라 지수함수적으로 감소하게 된다.

$$B(x) = B(0) e^{-x/\lambda} \dots \dots \dots (9)$$

그러나 penetration depth 는 일반적인 자기 측정에 감지되지 않을 정도로 극히 작아 근사적으로 perfect diamagnetism 이 되어 초전도체 내부에서 $B = 0$ 라 한다.

또한 penetration depth 는 그림 8에서 보는 바와 같이 온도가 증가함에 따라 증가하는 온도 함수이다.

어떤 온도에서의 penetration depth 는

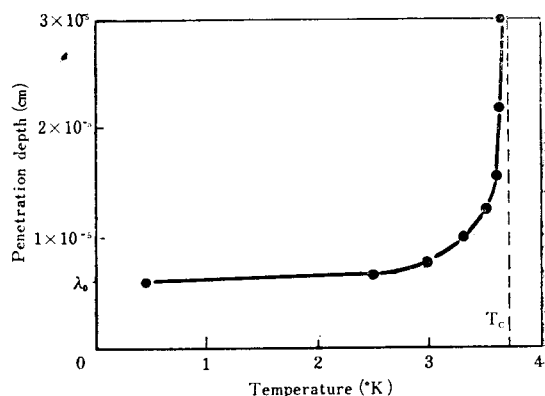


그림 8. 온도에 따른 penetration depth 의 변화

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{(1-t^4)} \dots\dots\dots(10)$$

(λ_0 ; 0°K에서의 penetration depth
 t ; T/T_c)

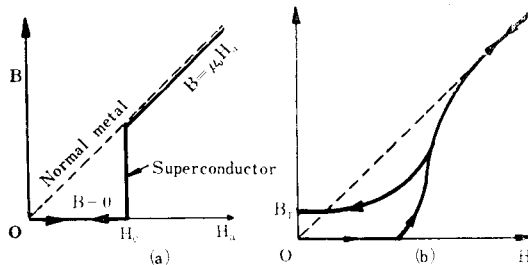
로 주어진다. 또한 물질내에 불순물이 많을수록 깊어지고 순수한 물질일수록 얕아진다.

마. Magnetization

초전도체의 Magnetization은 가해진 field의 세기에 따라 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}_a \dots\dots\dots(11)$$

(\vec{H}_a ; 가해진 자기장의 세기
 μ_0 ; magnetic permeability)



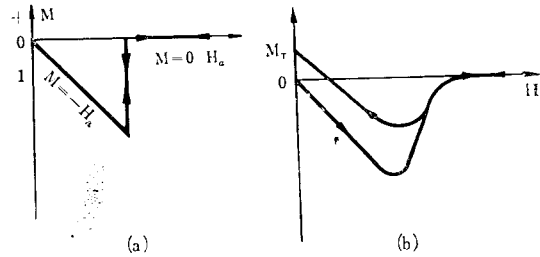
(a) ; ideal specimens
 (b) ; non-ideal specimens

그림 9. 초전도체의 B-H곡선

그림 9에서 보는 바와 같이 normal metal의 경우 내부에서도 H_a 의 증가에 따라 B 가 증가하게 되는데 반해, 초전도체 내부에서는 $B=0$ 이므로 (penetration depth 효과 무시) 임계자장까지는 0을 유지하다가 임계자장 이상에서는 초전도상태가 파괴되어 normal metal과 같은 성질을 지니게 된다.

자장 H 를 감소시켜 0이 될 때에는 자료내부에 자속이 없어지지 않고 잔류 자속밀 B_r 을 갖게 되는데 이러한 자기이력(magnetic hysteresis) 현상은 불순물이나 결함이 있는 실제재료에서 일어난다. 즉 재료내부의 결함에 의해 잔류자속(trapped flux)이 생기게 된다. (그림 9-b) 반면 결함이 없는 이상적인 재료에서는 자장을 감소시키더라도 자장을 증가시킬 때와 같은 경로를 갖는 가역곡선을 유지함으로써 잔류자속은 없다.

다른 방법으로 magnetization을 설명하면 초전도 상태에 있는 재료는 내부의 magnetic flux가 0이므로 시편 주위에 흐르는 전류에 의해 생기는 자화크기 M 은 가해진 자기장의 크기 H_a



(a) ; ideal specimens
 (b) ; non-ideal specimens

그림 10. 초전도체의 H-M곡선

와 정반대가 된다.

$$\text{즉 } \vec{M} = -\vec{H}_a \dots\dots\dots(12)$$

그림으로 나타내면 그림 10-(a)와 같고 불순물이나 결함이 있는 재료인 경우 그림 10-(b)와 같다.

한편 Screen 전류가 흐르는 초전도 재료 표면에 자속이 투과되는 깊이는 온도와 재료에 따라 다르지만 고온 초전도체의 경우 극저온에서 약 0.1 μ m 정도이다. 이러한 투과 깊이가 전자쌍의 유효직경(흔히 coherence length라 하고 결함이 있는 재료일수록 줄어든다.) 보다 큰 경우의 초전도 재료를 제 2종 초전도성이라하고 그 반대인 경우의 초전도 재료를 제 1종 초전도성이라 한다.

그림 11은 임계온도 이하에 있는 초전도재료

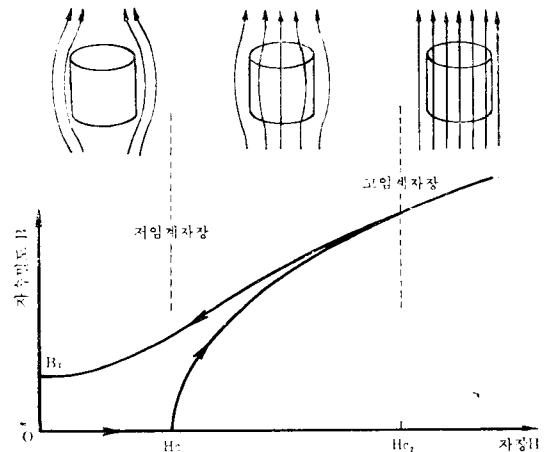


그림 11. 임계온도 이하에서의 자력선투과도 및 자속 밀도-자장곡선

에서 외부 자력선의 투과도 및 자속밀도(B-H) 곡선을 나타낸다. 낮은 자장영역인 저임계자장 H_{c1} 까지는 반자성 차폐효과에 의하여 자장의 투과가 거의 없는 완전 반자성을 보이다가, H_{c1} 이상에서는 자장이 내부로 침입하면서 고임계자장 H_{c2} 까지 계속 초전도성을 유지한다. 고자장영역인 H_{c2} 이상에서는 완전히 자속이 투과되어 초전도성을 잃게 된다. 그러나 침투되는 자속선들은 연속적이 아니라 양자화된 자속양자 $\Phi_0 = h/2e = 2.0679 \times 10^{-11} \text{ T} \cdot \text{cm}^2$ 로 형성되면서 재료 내부로 침투한다.

그림 12는 1, 2종 초전도체의 다른점을 H - $(-M/H_c)$ 의 그림표로 나타낸 것이다.

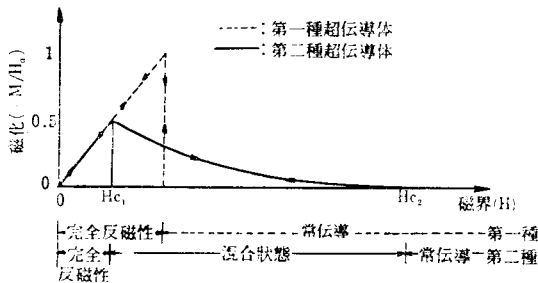


그림 12. 제 1종 초전도체와 제 2종 초전도체의 비교

2. 초전도 특성 측정방법

(1) 저항측정(four probe method)

가. 개요

그림 13은 4단자법의 개요도인데 이방법에서는 각 단자가 특별한 holder를 사용하여 point contact을 이루게 한다.

이 방법으로 시편의 비 저항이나 전도도를 빠르게 측정할 수 있고 시편의 모양이나 크기에 관계없이 측정할 수 있다.

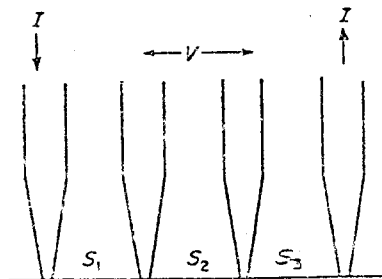


그림 13. 저항측정을 위한 4 단자의 개요도

각 단자사이의 간격이 일정하다고 하고 ($S_1 = S_2 = S_3$), 접촉이 점 접촉이라 가정하여 area contact을 무시한다면 시편의 conductivity는

$$\sigma = \frac{I}{2\pi VS} \dots\dots\dots(15) \text{로 주어진다.}$$

(I ; 전류
 S ; 단자 사이의 거리

만약 point 사이의 거리가 다르다면

$$\sigma = \frac{I}{2\pi V} \left(\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_3} - \frac{1}{S_1+S_2} - \frac{1}{S_2+S_3} \right) \dots\dots\dots(16)$$

로 주어진다. 이 값은 단자사이의 거리가 Sample의 가장 작은 dimension 보다 작고, 각 단자가 Sample의 모서리와 너무 가깝지 않은 경우에 적용된다.

위와같은 전제하에 Sample의 두께가 probe의 간격에 비하여 크지 않다면 그 결과는 그림 14에서 보여준 것과 같은 correction curve 값에 의해 보정하여 주어야 한다.

이 보정에 의하여 실제의 conductivity 값은

$$\sigma = \frac{I}{2\pi VS} \times G_0 (\omega/s) \dots\dots\dots(17)$$

(ω ; Sample의 두께
 s ; probe 사이의 거리

로 주어진다.

four-probe-method는 널리 쓰이는 방법이지만 약 5%의 오차가 있다. 반면 이 방법은 inhomogeneous한 Sample에서도 비교적 정확한

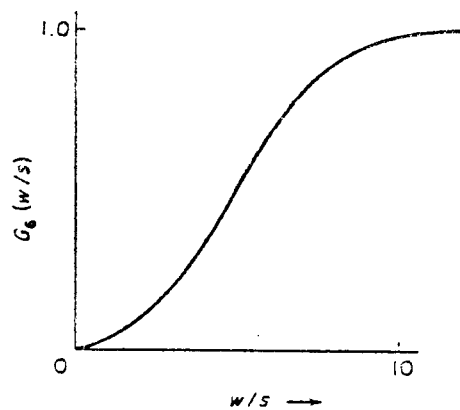


그림 14. Correction factor for probes on a thin slice with a conductive bottom surface

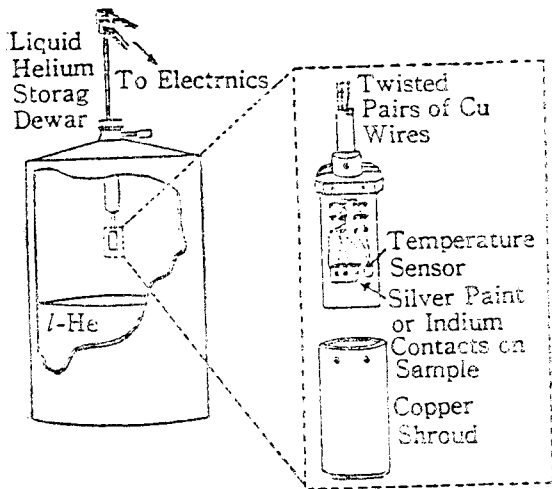


그림 15. 초전도현상을 알아내기 위한 간단한 저온장치

Conductivity를 얻을 수 있다는 장점이 있다.

나. 시료의 저항 측정

Sample의 저항을 측정하기 위해서는 우선 그림 15와 같은 holder를 제작하여야 한다.

그림과 같은 holder를 액체질소 속에 담그어 냉각시키고 서서히 꺼내면서 온도 변화에 따른 시료의 저항을 측정한다.

전기저항을 측정하기 전에 시료에 접점을 만들어 lead를 연결한다. 이때 lead는 접촉 저항을 없애기 위해 4개를 붙인다. 시료와 lead의 연결은 인듐(indium)이나 Silver paste와 같은 연한 금속을 사용하여 연결한다. 4개의 접점중 외각의 2개는 전류측정을 위한 것이고 내측의

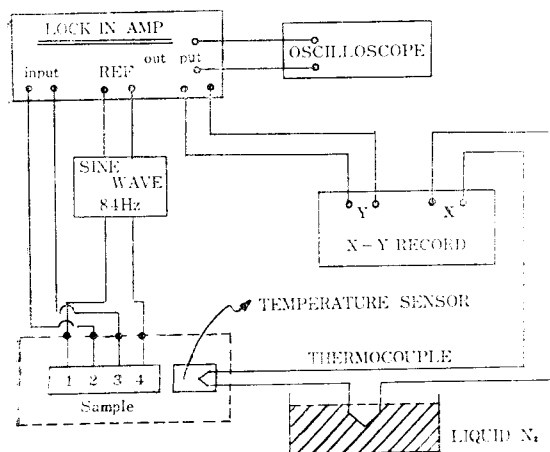


그림 16. AC Method에 의한 저항 측정장치

2개는 전압측정을 위한 것이다.

그림 16은 저항을 측정하기 위한 개략적인 회로도이다. 그림에서 보는 바와 같이 일정한 주파수와 크기를 갖는 교류를 선택하여 시료에 흘림으로서 시료의 저항을 측정할 수 있다. 이때 100Hz 정도의 주파수를 선택하면 1/f 정도의 noise에는 안정할 만큼 크고, 전압강하를 측정할 수 있을 만큼 충분히 작은 범위이다. 그리고 Lock-in Amplifier를 이용할 경우에는 잡음을 일으키는 주원인이 되는 직류전압을 피해서 저항을 측정할 수 있다는 장점이 있다.

시료의 전기저항을 측정하는데 유의하여야 할 사항은 시료와 온도 Sensor 사이는 열 평형 상태를 유지해야 한다는 것이다. 가장 이상적인 방법은 온도 Sensor를 시료위에 직접 부착하여 시료 자체의 온도가 Sensor에 나타나야 하는데 이는 많은 시간이 소모된다. 그러므로 온도를 측정하는 Sensor를 시료에 가깝게 위치시킴으로써 Sensor와 시료 사이에 열적 평형을 이루게 하고 짧은 시간에 많은 시료의 저항을 측정할 수 있게 한다.

(2) 자성 측정

초전도체의 자성을 측정하는 기술은 일반적인 자성체의 측정방법과 다름이 없으나 각 방법은 아주 낮은 온도에서도 안정해야 초전도체의 특성을 측정할 수 있다.

자성측정은 가해진 자장의 세기 H 에 따라 자속밀도 B 및 자화정도 M 을 측정함으로써 알 수 있다.

자성을 측정하는 방법은 여러가지가 있으나 초전도체의 경우에는 보통 시편이 소량이기 때문에 감도가 우수한 SQUID magnetometer나 진동시편 magnetometer를 주로 사용하여 측정한다. 이들은 전자석이나 초전도 솔레노이드를 사

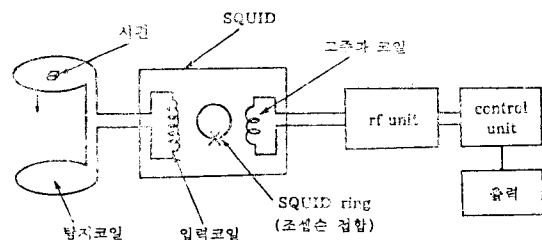


그림 17. SQUID 마그네토미터 개략도

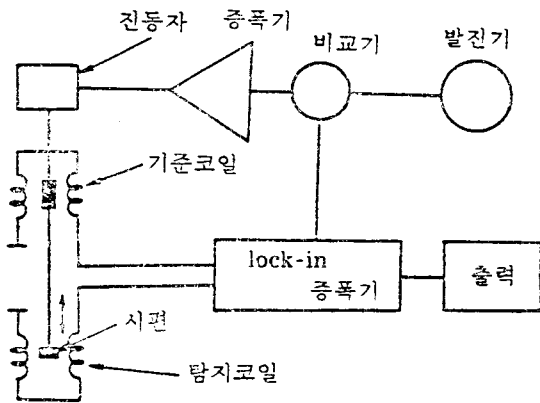


그림 18 진동시편 마그네토미터(V.S.M)의 개략도

용하여 1T 또는 5T 까지 자장의 세기를 변화시킬 수 있고 온도 범위도 4K~300K로 조정 가능하다.

그림 17은 SQUID Magnetometer의 개략도를 나타냈다. 이 장치는 감도가 매우 우수해 자성 측정용으로는 최고의 성능을 자랑하지만 가격이 비싼것이 흠이다.

이런 관계로 그림 18에 나타난 진동시편 마그네토미터(Vibrating Sample Magnetometer; VSM)가 널리 사용되고 있다.

진동 시편마그네토미터는 시편을 탐지코일내에서 일정한 주파수의 진폭으로 진동시키면 코일에 유기되는 기전력이 시편의 자화값에 비례하는 원리를 이용한다. 특히 발전기(80Hz)의 신호가 증폭된 다음, 진동자에 보내 지는데, 이러한 진동은 feed-back 장치를 통하여 발전기 신호와 비교된 후 차이 만큼 진동자로 공급됨으로서 진동자는 항상 일정한 주파수와 위상으로 진동한다.

탐지코일과 기준코일의 교류신호가 잠가진 증폭기(Lock-in Amplifier)에 입력되어 여기서 기준신호의 위상 및 주파수와 같은 탐지코일 신호만을 증폭하여 직류전압으로 변환되며 이 출력전압이 시편의 자화에 비례하게 된다.

VSM은 시편의 총 자기 모멘트를 emu 단위로 측정하므로 시편의 자화는 다음 관계식으로 알 수 있다.

$$1\text{emu} = 1\text{Gauss} \cdot \text{cm}^3 \dots \dots \dots (18)$$

(18)식에서 자화 M 은 Sample의 moment 값을

부피로 나눈 값으로 결정된다.

$$M(\text{Gauss}) = m(\text{emu} = \text{Gauss} \cdot \text{cm}^3) \div V(\text{cm}^3) \dots \dots \dots (19)$$

자화는 단위 gram 당 magnetic moment 로도 표시되는데, 이것은 Sample의 질량으로 moment를 나눈 값으로 결정된다.

$$\sigma(\text{emu/g}) = m(\text{emu}) \div \text{mass}(\text{g}) \dots \dots \dots (20)$$

M 과 σ 는 다음과 같은 관계가 있다.

$$M(\text{Gauss}) = \sigma(\text{emu/g}) \cdot \rho(\text{g/cm}^3) \dots \dots \dots (21)$$

보통의 경우 시편의 부피측정보다도 질량측정이 용이하므로 단위 질량당 magnetic moment인 σ 를 측정하기 쉬운데 이 경우 (21)식에서 시편의 밀도는 온도와 관계된다는데 주의할 기울여야 한다.

고온 초전도 재료의 자성측정의 기본은 일정한 자장에서 온도변화에 따른 자화곡선이라 할 수 있다. 이 $M-T$ 곡선으로부터 초전도재료의 임계온도를 측정할 수 있음은 물론 마이스너 효과와 반자성 차폐효과를 측정하여 고온초전도체가 이론치인 완전 반자성체로부터 얼마나 벗어난지 규명할 수 있다. 그림 19은 고온 초전도재료의 곡선을 나타낸다.

한편 고온 초전도재료의 자성을 규명하는데 또 하나의 중요한 측정은 자장의 세기 변화에 따른 자화율이다. 그림 20은 초전도재료의 $H-M$ 곡선을 나타낸다.

이로부터 저임계자장 및 고임계자장, 반자성 차폐효과 및 자화율, 자속 pinning 효과 및 임계전류밀도등 다양한 자성을 규명할 수 있다.

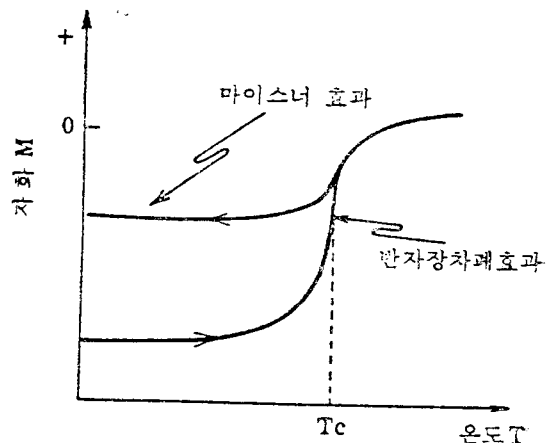


그림 19. 고온 초전도재료의 자화-온도 곡선

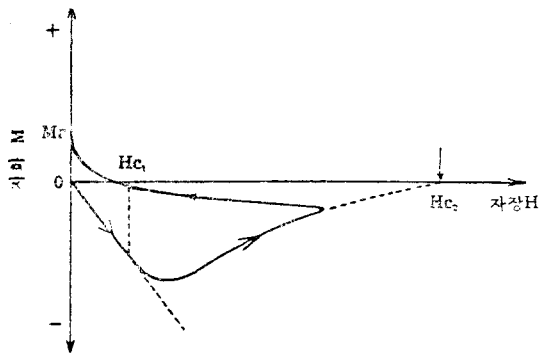


그림 20. 고온 초전도 재료의 H -자화자장

H - M 곡선으로부터 임계 전류밀도 J_c 를 측정하기도 하는데 이는 정상코어와 초전도 영역의 혼합상태를 지닌 고온 초전도 재료에서 J_c 는 재료내부의 결함이나 grain 경계에 정상코어가 pinning 되는 정도에 따라 거의 좌우되기 때문이다. 따라서 J_c 는 주어진 자장에서 음과양의 자화값 차이 및 시편크기를 측정하여 계산할 수 있다.

Ⅲ. 맺음말

이상과 같이 초전도체의 전기적 자기적 성질 및 이 특성을 측정할 수 있는 방법에 대하여 고찰해 보았다.

전기적 성질로는 Zero Resistance, 자기적 성질로는 Perfect diamagnetism, Meissner effect, Permeability, Susceptibility, Penetration 등에 대하여 알아보았고, 측정 방법으로는 Four-probe

method에 의한 저항측정 및 magnetization (자화) 측정에 대해 알아보았다.

고온 초전도체의 개발은 '제 3의 전기발견' 혹은 '새로운 산업혁명'이라 불릴만큼 우리 산업계에 커다란 충격을 가할 것이라 믿어진다. 이는 앞에서 알아본 특성으로 응용이 예상되고 있는 부분이 매우 방대하고 커다란 파급효과를 일으킬 것이라 생각되어지기 때문이다.

예를들면 반자성을 이용한 자기부상열차(시속 500km, 무소음, 무진동), 자기추진 선박, 강력한 자장유도를 통한 핵융합발전, 무저항 성질을 이용한 전력송신, 박막제조를 통한 전자공학 분야 응용인 초고속, 초소형 컴퓨터 소자등을 들 수 있으며 이외에도 에너지 저장, 의료기기응용, 물성연구 응용분야등 인류생활 전반에 걸쳐 응용되어 커다란 혁신을 가져다 줄 것이다.

※Reference

1. A.C. Rose-Innes and E.H. Rhoderick, International series in Solid State Physics Volume 6, Introduction to superconductivity, 2nd Edition.
2. M. ALI OMAR; Elementary Solid State physics 1975.
3. 한국요업학회, 요업재료의 과학과 기술, 3권제 1호, 1988.
4. Academic Press; Methods of Experimental physics. Vol 1. 6. 11, 1965.
5. 伊原英雄, 戸叶一正, 超傳導材料, 東京大學 出版會 1987.