

헬륨액화와 초전도

김 동 호
영남대학교 물리학과

1. 서 론

초전도는 헬륨 액화과정에서 관측된 수은의 저항이 영이 되는 현상으로부터 출발한다. 액화헬륨이 제공하는 저온이 현실화되지 않았다면 초전도라는 분야 자체가 존재하지 않았을 것이다. 초전도라는 말 자체가 의미하듯이 초전도체는 전도체의 전도성을 뛰어 넘어 임계온도(T_c)라고 불리는 특정온도 이하에서 직류 저항이 영이 되는 물질을 말한다. 수은이 초전도체임이 확인된 후 먼저 모든 원소들에 대한 조사가 이루어졌고 이 과정에서 많은 원소들이 초전도체임이 확인되었다. 그 후 합금과 다양한 화합물에서 초전도 현상이 속속 발견되었다. 특히 1986년부터 [1] 수 년 간에 걸쳐 발견된 산화물 고온초전도체들은 임계온도가 액화질소온도보다 높아 응용가능성에 많은 기대를 불러 일으켰다. 최근에는 MgB_2 와 [2] Fe-As 기반의 [3] 새로운 초전도체가 등장하여 현재 이들 물질에 대한 활발한 연구가 수행되고 있다.

그 외 다양하고 특이한 성질을 보이는 초전도체로 heavy Fermion system, 유기초전도체 등 그 종류가 매우 많지만, 이 글에서는 모든 초전도의 특성을 다루지 않고 현 시점에서 시장 진입 가능성이 높은 초전도체를 중심으로 기술하고자 한다. 먼저 초전도 현상에 대한 간단한 소개와 현재의 연구동향을 기술한 후 향후전망에 대해 논의하고자 한다.

2. 초전도 현상의 특징

초전도란 우선 전기 저항이 영이 되는 현상을 주로 의미하지만, 초전도체에 침투하는 자속을 밀어내는 Meissner 현상도 초전도체 특성을 정의하는 중요한 항목이다. 20세기 초만 하더라도 초전도체가 나타내는 위의 두 가지 특이한 현상을 기존의 전자기 법칙으로

는 도저히 설명할 수 없었다. 이에 London 형제들은 기존의 4개의 Maxwell 방정식에 추가로 2 개의 방정식을 제안하였고 [4], 이 방정식들은 각각 초전도의 영의 저항과 자속 배제 현상을 설명하도록 고안되었다. 그러나 초전도 현상이 일어나는 근본 원리에 대해서는 아무런 대답을 하지 못하였다. 그 후 많은 연구 끝에 1957년에 초전도의 근본 원리를 설명하는 BCS이론이 발표되었다 [5]. 일반 금속에서 두 개의 전자 사이에 비록 다른 자유전자들의 screen에 의해 약화되긴 하지만 Coulomb 반발력이 작용한다. 그러나 포논으로 알려진 격자의 진동을 매개로 두 전자 사이에 인력이 존재함이 알려졌고, 특정한 물질에서는 포논을 매개로 한 인력이 반발력보다 더 크게 되어 두 일반전자가 하나의 Cooper 쌍을 이루게 되는데, 이러한 Cooper 쌍의 형성이 초전도를 나타내는 근원이 된다. 따라서 초전도를 나타내는 임계온도는 포논과 전자간의 상호작용의 크기에 의해 결정된다.

일반금속내의 자유전자는 외부전기장에 의하여 가속되지만 아주 짧은 시간 안에 주로 포논에 의해 반대방향으로 산란되므로 외부 전기장이 계속 가해지더라도 전자의 속도는 계속 증가하지 않고 일정한 값을 유지하는 상태가 된다. Cooper 쌍을 이루는 각 전자들도 일반전자처럼 포논에 의해 산란되어 운동량이 변하게 되지만, 산란 후의 총 운동량은 항상 일정하게 유지되는 특성을 가진다. Cooper 쌍의 총운동량이 보존됨은 전기장이 없더라도 원래의 운동상태를 유지함을 의미하고, 즉 전압강하 없이 전류가 흐르므로 저항이 없는 상태가 된다.

한편 고온 산화물초전도체는 기존의 금속을 바탕으로 한 초전도체와는 달리 BCS 이론이 잘 맞지 않은 것으로 알려져 있다. 고온초전도체는 반강자성 절연체에 전하운반자로 정공이 첨가된 상태로 해석되고 있

으며, 지금도 고온초전도체의 원리를 이해하기 위해 활발한 연구가 진행되고 있다.

3. 초전도 응용분야의 연구동향

초전도체 응용분야를 구분하는 방법은 여러 가지가 있으나, 사용 전류를 기준으로 크게 소전류 분야와 대전류 분야로 나눌 수 있다. 소전류 분야의 대표적인 예로는 Josephson 소자를 기반으로 하는 미세자기장 측정분야와 연산을 수행하는 논리소자, 그리고 초고주파 발전기, 필터 등이 있다.

Josephson 소자는 두 개의 초전도체가 얇은 장벽으로 갈라진 구조로 이루어져 있으며 외부 자기장에 따라 전류 수송특성이 특이하게 변하는 특성을 가진다. Josephson 소자를 사용하는 대표적인 연구 및 응용분야로 우선 초전도 양자간섭장치 (Superconducting QUantum Interference Device: SQUID)를 들 수 있다. 주로 Nb을 사용하는데, SQUID는 지상에 현존하는 자기센서 가운데 가장 감도가 높아 미세자기장 측정에 많이 이용된다. 이를 이용한 자력계가 시판되어 자성분야 연구에 매우 중요하게 사용되고 있다. 특히 사람의 뇌와 심장에서 발생하는 미세 자기장 측정도 가능하여 의료용으로 개발되어 왔으며, 현재 뇌자도와 심자도를 측정하는 장비가 한국표준연구원에서 개발되어 설치 운영되고 있다 [6]. 고온초전도체를 이용한 SQUID 개발도 한국표준연구원을 중심으로 수행되어 왔으나, 고온초전도체가 가진 약점 때문에 Nb을 사용한 SQUID에 비해 응용성이 낮은 편이다.

Josephson 소자를 사용하는 또 다른 대표적인 연구분야는 초전도 논리소자이다. 반도체를 사용하는 논리소자의 속도는 CMOS로 대변되는 소자의 RC 상수에 의해 결정된다. 그러나 현 기술로 수십 GHz 이상의 논리소자를 구현하는 데는 문제가 발생한다. 반면 Josephson 소자를 사용하면 연산속도가 수백 GHz 까지 가능하게 되므로 이를 슈퍼컴퓨터에 적용하기 위한 연구가 많이 되어왔다. 이와 더불어 아주 빠른 analog-digital 변환기 등이 한국광기술원을 중심으로 연구되어 왔으나, 현재 진행이 중단된 상태이다. 이 외에도 Nb Josephson 소자는 전압표준에 사용되고 있다.

초전도체는 대표적 일반금속인 구리에 비해 마이크로파 표면저항이 적어도 수십~수백 배 작다. 이러한 장점은 초전도체를 이용한 공진기, 발전기, 필터 등에 효과적으로 적용될 수 있다. 건국대와 Rftron 등이 중심이 되어 마이크로파 영역 응용에 대한 연구가 진행되고 있다. 최근 초소형 냉동기가 개발됨에 따라 냉각문제를 쉽게 해결할 수 있어, 현재 미국에서는 고온초전도 필터를 장착한 무선기지국이 시험 운영되고 있다.

대전류 분야의 대표적인 예는 초전도 선재이다. 초전도 선재는 같은 크기의 구리에 비해 수백~수천배의 전류를 저항없이 흘릴 수 있으므로 많은 분야에 사용되고 있다. 현재 액화헬륨을 사용하는 Nb-Ti 합금과 Nb₃Sn 초전도 선재는 이미 상용화 되었으며, Bi-2223 고온초전도체를 사용한 선재도 시판되고 있다. 그러나 Bi-2223로는 전류수송능력의 한계가 있어 보다 큰 임계전류밀도를 가지는 고온초전도선재 개발이 한국전기연구원과 한국과학기술원을 중심으로 수행되어 왔다. 특히 액화질소 온도에서 100 A/cm 이상의 임계전류를 가지는 Sm-Ba-Cu-O계열의 coated conductor 개발에 성공하여 [7], 현재 상용화를 위한 장선개발에 박차를 가하고 있다. 최근에는 40 K 초전도체인 MgB₂ 선재에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 기존의 Nb₃Sn에 비해 아직 그 특성이 약간 떨어지긴 하지만 MgB₂의 경우 값비싼 액화헬륨대신 비등점이 20 K인 액화수소를 사용할 수 있는 장점이 있다.

선재를 이용하는 대표적인 응용분야는 초전도 자석, 초전도 전력케이블, 변압기, 모터 등이다. 초전도 자석은 초전도 선재를 대개 solenoid 형태로 감은 것으로 solenoid 내부에 강력한 자기장을 발생한다. 초전도 상태에서는 초전도 자석을 영구모드로 사용할 수 있으므로 외부에서 더 이상 전류를 가하지 않아도 초전도 자석을 흐르는 영구전류에 의해 자기장이 유지된다. 따라서 구리 자석의 경우처럼 일정한 전압과 전류를 항상 유지 않아도 되므로 파워공급기도 상대적으로 소형을 사용할 수 있다. 그러나 고온초전도체의 경우 액화질소온도에서 나타나는 활발한 자속움직임으로 인하여 영구모드로 자석을 사용하는 데는 문제점이 발생한다.

현재 시판되는 Nb-Ti 합금과 Nb₃Sn 초전

도 선재로 제작된 초전도 자석은 많은 분야에서 사용되고 있으며, 특히 질병 진단에 많이 사용되는 MRI(magnetic resonance imaging)는 초전도 자석 없이는 지금처럼의 대중화가 불가능했을 것이다. 초전도 자석은 자기부양 열차, 핵융합장치 등 고자기장이 필요한 영역에 적용되고 있다.

전력케이블은 여러 가닥의 선재를 꼬아 수십 kV 이상에서 수천 A 이상의 대용량 전류가 흐를 수 있도록 만든 형태로 전력계통에 주입하여 사용할 목적으로 제작된다. 이론적으로 저온초전도체로도 전력케이블을 만들 수 있으나 아주 긴 케이블 전체가 항상 액화헬륨의 온도로 냉각되어야 하는 문제점 때문에 실제로는 액화질소에서 작동되는 고온초전도체 선재로 이루어진 전력케이블만 사용되고 있다. 한국전력연구원은 고창시험소에 길이 100 m 급 초전도전력케이블 2기를 설치하여 시험 운영 중이다. 각 케이블은 LS 산전과 Sumitomo의 제품으로 Bi-2223 tape를 여러 가닥 꼬아서 제작한 형태이다.

고온초전도 선재를 사용하는 초전도 변압기와 모터의 경우 이들에 대한 시작품이 제작되었으나 기존 마켓으로의 인입장벽이 아직 크게 높아 상용화가 주춤한 상태이다. 선재분야 외에 가장 시장진입 단계에 근접한 고온초전도 응용기기로는 한류기를 들 수 있다.

4. 향후전망

초전도체의 향후전망을 가름하는 중요 요소는 시장성이다. 초전도는 일반금속에 비해 우수한 특성을 지닌 것이 사실이지만 이 특수성을 사용하기에는 냉각이라는 부담이 동반된다. 따라서 현재 시판되고 있는 기존제품에 비해 그 성능이 현저히 뛰어날 때만 냉각이 필요함에도 불구하고 응용성에 대한 향후전망은 높게 된다. 그 예로 SQUID 자력계를 들 수 있다. 초전도를 사용하지 않는 자력계는 저렴하게 사용할 수 있지만 감도가 1/10 정도 작으므로 아주 정밀한 계측을 위해서는 액화헬륨의 사용하는 SQUID 자력계를 감수할 수밖에 없다.

이런 관점에서 볼 때 기존의 제품에 비해 경쟁력 가능성이 있는 제품은 앞에서 언급되었듯이 고온초전도선재와 이를 이용한 전력

케이블이다. 이들 제품이 상용화되기에 가장 필요한 특성은 높은 임계온도, 높은 임계자기장(B_{c2}), 높은 임계전류밀도(J_c)이다. 이 중에서 임계온도는 물질의 고유한 열역학적 특성이므로 보다 향상된 임계자기장과 임계전류밀도를 가지는 선재를 개발하는 것이 우선이다. 현재 coated conductor나 tape의 경우 100 A/cm 이상의 전류가 흐르는 제품이 개발되었지만 이 값은 depairing 전류로 불리는 초전도의 열역학적 임계전류의 수백분의 일에 불과하다. 따라서 더 높은 임계전류밀도를 가지는 고온초전도 선재 개발의 여지가 충분히 있다.

초전도체는 외부 자기장 하에서 어떤 상태를 갖느냐에 따라 제1종과 제2종으로 나뉘어진다. 그러나 실제 연구되고 응용되는 고온초전도체를 포함한 거의 모든 초전도체는 제2종에 속하며, 이 부류는 일정한 자기장 이상에서 자속이 양자화되어 초전도체 내부에 존재하게 되는 혼합상태(mixed state or vortex state)를 가진다. 이 자속들은 서로간의 반발력에 의하여 규칙적으로 배열된 삼각형 격자를 이루고 있으며, 자속의 중심부분은 일반상태로 중심의 반경은 결맞음 거리(coherence length: ξ)에 해당한다. 혼합상태에서 외부전류가 가해지면 자속들은 Lorentz 힘이라 불리는 힘을 전류의 수직방향으로 받게 된다. 만약 Lorentz 힘이 자속의 움직임에 반발하는 pinning 힘에 비해 더 크다면 자속은 움직이기 시작하게 되고, 이런 자속의 움직임은 전류방향으로 전압강하를 일으키는데, 이 시점의 전류가 제2종 초전도체의 사용영역을 결정하는 임계전류가 된다. 따라서 높은 임계전류밀도를 가지기 위해서는 자속을 고정시킬 수 있는 pinning 힘의 증대가 필요하고, 대부분의 연구개발은 초전도체 내부의 자속고정 현상의 증가에 초점을 맞추고 있다.

혼합 상태에서 자속이 초전도체 내부에 존재하려면 먼저 자속의 중심에 해당하는 부피만큼이 일반상태로 전환되어야 하는데, 이 전환을 위해서는 중심의 부피에 해당하는 초전도응축에너지가 필요하다. 초전도응축에너지는 일반상태와 초전도상태의 열역학적 에너지 차이에 해당하는 에너지로, 초전도상태가 일반상태에 비해 얼마만큼 에너지가 더 낮은가를 나타내는 척도이다. 만약 이 자속

의 중심이 초전도체 내부에 존재하는 불순물 위치에 있다면, 불순물은 원래가 일반상태이므로 이 불순물에 해당하는 부피만큼에서는 구태여 초전도를 일반상태로 전환할 필요가 없다. 따라서 불순물에 위치한 자속의 에너지는 그렇지 않은 자속의 에너지에 비해 더 낮게 되고, 이 에너지 차이가 바로 pinning 에너지(E_p)이다. 이를 수식으로 표현하면 [8],

$$E_p = \alpha \pi \xi^2 d \frac{B_c^2}{2\mu_0} (1 - B/B_{c2})^2 \quad (1)$$

여기서 α 는 pinning의 효율, d 는 pinning 중심의 길이로 $\xi^2 d$ 는 pinning된 부피에 해당하며, 식 (1)로 표현되는 pinning을 core pinning이라 한다. Core pinning 외에도 magnetic pinning이 있지만 여기서는 설명을 생략하겠다. Core pinning을 증대시키기 위해서는 $\xi^2 d$ 크기 정도의 불순물이 필요한데, 주로 사용되는 방법으로 나노입자 첨가, 고에너지 입자 조사, 중성자 조사, seed를 사용한 결함의 형성 등이 있다.

한편 산화물 고온초전도체에서 나타나는 결정입계는 시료의 초전도 특성을 떨어뜨리는 주요원인이 된다. 고온초전도체의 경우 결맞음 길이가 아주 짧을 뿐더러 (< 3 nm), 결정입 간의 사이각이 증가함에 따라 임계전류밀도가 급격히 감소한다 [9]. 이런 점을 보완하는 방편으로 coated conductor의 경우 결정입 간의 배향성을 좋게 하기 위하여 Ni 기판이나 IBAD 기술로 준비한 template를 사용한다. 결정입계 주변에서 산소가 쉽게 빠져 나가 결정입계가 절연성을 띄는 점도 결정입계의 J_c 가 감소하는 이유가 된다.

결정입계에 관한 powder-in-tube 방식으로 제작되는 MgB_2 선재에서는 그 사정이 많이 다르다. 결맞음 길이도 결정입계의 폭보다 큰 5 nm 이상이고, 근접효과에 의하여 결정입계라 하여도 초전도성의 큰 감소는 없다. 더구나 결정입계는 자속 pinning 중심으로의 역할을 잘 하는 것으로 판명되었다. 입자의 크기에 반비례해서 pinning 힘이 증가하는 현상은 이를 잘 증명한다 [10]. 결정입계가 자속을 고정하는 기구는 식 (1)과 달리 전자의 평균자유행로가 결정입계 주위에서

짧아지는 현상에서 기인하는 B_{c2} 의 변화로 여겨진다 [11]. 이와 더불어 C, 특히 SiC가 첨가되면 MgB_2 bulk의 J_c 가 크게 증가함이 관측되었다 [12]. 따라서 C가 첨가된 MgB_2 를 모재로 얼마나 분말 크기를 얼마나 작게 만들어 결정입계의 면적을 크게 하느냐가 큰 임계전류밀도를 갖는 선재개발의 열쇠가 되고 있다.

이와 더불어 이슈가 되고 있는 것은 각 분말간의 연결도(connectivity)이다. MgB_2 분말을 tube에 채워 넣은 후 열처리 과정을 거치는데 이 과정에서 연결도가 결정된다. 연결도에 따라 임계전류밀도가 급격히 변하므로 열처리 과정에서 발생하는 빈 공간을 효과적으로 채워 넣을 수 있는 기술 개발이 필요하다.

5. 맺음말

헬륨액화가 가져온 많은 변화 중에서 초전도체의 발견은 과학, 산업, 기술계에 어느 다른 결과보다 더 큰 영향을 가져다주었다. 초전도의 우수한 특성은 현재 곳곳에서 사용되고 있지만 더 높은 수준의 기술개발과 이에 따른 근본 현상의 깊은 이해는 우리의 생활 수준을 한층 더 향상 시킬 것이다. 짧지만 현재 국내에서 활발히 진행되고 있는 초전도 연구에 관한 동향과 향후전망에 대해 간단하게나마 소견을 적어보았다.

참고문헌

- [1] J.G. Bednorz and K.A. Müller "Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system". Z. Physik, B 64, 189-193 (1986).
- [2] Jun Nagamatsu, Norimasa Nakagawa, Takahiro Muranaka, Yuji Zenitani and Jun Akimitsu, "Superconductivity at 39 K in magnesium diboride" Nature 410, 63 (2001).
- [3] Yoichi Kamihara, Takumi Watanabe, Masahiro Hirano, and Hideo Hosono, "Iron-Based Layered Superconductor $La[O_{1-x}F_x]FeAs$ ($x=0.05-0.12$) with $T_c = 26$ K" J. Am. Chem. Soc. 130, 3296-3297

(2008).

[4] M. Tinkham, "Introduction to Superconductivity", p. 4 (McGraw-Hill, 1996).

[5] J. Bardeen, L.N. Cooper, and J.R. Schrieffer, "Theory of Superconductivity" Phys. Rev. 108, 1175-1204 (1957).

[6] Y.H. Lee, K.K. Yu, J.M. Kim, H. Kwon, K. Kim, and Y.K. Park, "First-order wire-wound SQUID gradiometer system having compact superconductive connection structure between SQUID and pickup coil", Prog. Supercond. 9, 23-28 (2007).

[7] S.S. Oh, H.S. Kim, H.S. Ha, R.K. Ko, K.J. Song, D.W. Ha, N.J. Lee, J.S. Yang, T.H. Kim, Y.H. Jeong, and D. Youm, "SmBCO superconducting tape fabricated using co-evaporation method on Ni-W substrate", 한국초전도저온공학회논문지, 8, 9-12, (2006).

[8] D.H. Kim, K.E. Gray, R.T. Kampwirth, J.C. Smith, D.S. Richeson, T.J. Marks, J.H. Kang, J. Talvacchio, and M. Eddy, "Effect of Cu-O layer spacing on the magnetic field induced resistive broadening of high-temperature superconductors", Physica C 177, 431-437 (1991).

[9] D. Dimos, P. Chaudhari, J. Mannhart, and F.K. LeGoues, "Orientation dependence of grain-boundary critical currents in YBa₂Cu₃O_{7-δ} Bicrystals" Phys. Rev. Lett. 61, 219-222 (1988).

[10] T. Matsushita, M. Kiuchi, A. Yamamoto, J. Shimoyama, K. Kishio, "Essential factors for the critical current density in superconducting MgB₂: connectivity and flux pinning by grain boundaries" Supercond. Sci. Technol. 21, 015008 (2008).

[11] W.E. Yetter, D.A. Thomas, and E.J. Kramer, Phil. Mag. 46, 523-537 (1982).

[12] S.X. Dou, O. Shcherbakova, W.K. Yeoh, J.H. Kim, S. Soltanian, X.L. Wang, C. Senatore, R. Flukiger, M. Dhalle, O. Husnjak, E. Babic, "Mechanism of Enhancement in Electromagnetic Properties of MgB₂ by Nano SiDoping" Phys. Rev. Lett. 98, 097002 (2007).

저자이력



김동호(金東皓)

1975-1979년 서울대학교 물리학과, 1979-1981년 한국과학기술원물리학과, 1984-1989년 University of Minnesota 물리학과Ph.D., 1989-1992년, 미국 Argonne 연구소, 1992-1994년 KIST, 1994년-현재 영남대학교 물리학과 교수.