

자성과 초전도의 상관관계

조 병 기, 성 낙 현
광주과학기술원 신소재공학부

1. 서 론

1911년 네덜란드의 H. Onnes가 수은에서 초전도현상을 발견한 이후, 더 높은 임계온도의 초전도 물질과 초전도성을 물리적으로 해석하는 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 초전도성은 J. Bardeen, L. Cooper, J. Schriffer 의 BCS 이론으로 모두 명확하게 설명되는 줄 알았으나 이론적 예상을 뒤엎거나 설명이 되지 않는 실험 결과들로 인해 초전도성을 확실히 이해하는데 아직까지 부족함이 많은 실정이다. 따라서 초전도성을 연구하고 이해하기에 적합한 물질의 발견과 개발은 무척 중요하다.

보편적인 초전도 이론으로 설명되지 않는 고온초전도체인 구리계 산화물 초전도체 발견과 더불어 최근 연구되고 있는 철 기반 고온초전도체로 인해 고온초전도성을 설명하는데 있어서 자기적인 성질이 밀접한 영향이 있는 것으로 파악되어 자성과 초전도성의 상관관계의 중요성이 대두되고 있다. 일반적으로 설명하자면, 물질의 자성은 물질을 이루고 있는 원자내부의 전자들의 자기적 성질인 스핀 때문에 발생하는 경우가 많고, 초전도성도 근본적으로 물질 내부의 어떠한 조건하에서 전자들이 갖는 성질이기에 때문에 이 두 성질은 서로 분리해서 이해하기보다는 포괄적 접근 방법이 필요하다.

본 특집에서는 자성과 초전도성이 공존하는 몇 가지 대표적인 물질에 대한 설명과 논의를 다루고자 한다.

2. 결정 성장 방법

흔히, 초전도체를 연구하기 위하여 시료를 단결정이나 다결정 형태로 성장을 한다. 단결정 시료를 성장시키는 방법 중에 재결정 방법이 제일 보편적이다. 재결정 방법은, 끓는 물

에 소금을 넣어 물에 용해시킨 다음 천천히 냉각을 시키면 자연적으로 소금 단결정이 자라나는 것과 마찬가지로, 용매로 물 대신 금속물질을 사용하여 원하는 물질을 단결정 형태로 만드는 것이다. [그림. 1]은 연구실에서 재결정 방법으로 성장시킨 초전도 단결정의 예시이다.

다결정 시료 성장 방법은 원하는 조성비의 원소들을 고체 상태의 혼합물로 준비하고 전기 아크로 이용하여 하나의 덩어리로 녹여 만드는 방법과 분말 시료를 준비하여 균일하게 섞고, 고온으로 가열 시켜 서로 반응시켜 만드는 고상상태반응법이 보편적이다.

다결정 시료는 성장시키기 수월하다는 장점이 있지만, 물질 고유의 성질을 연구하기에는 물질의 원자 단위에서의 고유 방향성을 지니고 있는 단결정 형태의 시료가 더욱 유용하기 때문에 새로운 물질을 단결정 형태로 성장시키는 것은 물리적으로나 재료학적으로 중요하다.

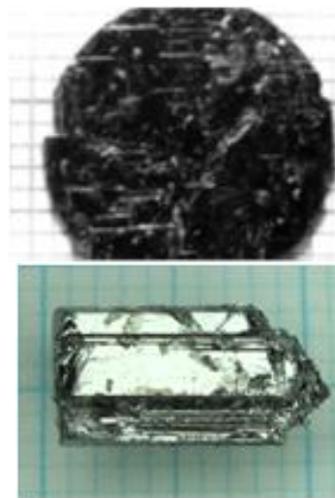


그림 1. 연구실에서 재결정 방법으로 성장시킨 (상) RNi₂B₂C, (하) Pr₂Pt₃Ge₅ 초전도 단결정 (R = 희토류 금속).

3. 자성 초전도체

자성과 초전도성을 함께 갖는 물질을 자성초전도체라 부른다. 흔히, 자성과 초전도성은 서로 상반되는 존재로서 자성 물질은 초전도성을 띠지 못하는 것으로 여겨져 왔기 때문에, 두 성질이 공존하는 물질의 발견은 무척 흥미로울 수밖에 없다.

대표적으로, 희토류금속원소를 포함하는 초전도 물질들에서 자성과 함께 초전도성이 발견되기도 하고, 심지어는 무거운 페르미온 성질을 갖는 물질도 자성과 더불어 초전도성을 나타내기도 한다. 최근 발견된 철기반 초전도체는 도핑이나 압력 실험을 통해 자성의 성질을 조절하면 자성과 초전도성이 공존하는 상태를 구현할 수 있다. 최초로 발견된 고온초전도체인 구리계 산화물에서도 반자성 물질에 도핑을 통해 초전도성을 구현한 바 있어, 자성과 초전도성의 상관관계는 초전도성 뿐 아니라 더욱 높은 임계온도를 갖는데 필수적인 물리적인 이해를 위해 중요하게 여겨지고 있다.

그림 1에서 보이는 RNi₂B₂C (R = 희토류 금속) 나 Pr₂Pt₃Ge₅ 초전도 단결정 물질에서는 짝을 이루지 못한 희토류 금속 원자 중심부의 4f 전자 스핀으로 인한 자성이 보이면서 동시에 초전도성이 보인다. [1, 2] 심지어, RNi₂B₂C 초전도체는 철기반 초전도체와 마찬가지로 자성을 띠는 Fe 이나 Ni 원소가 포함되어 있기 때문에 이 물질들에서의 초전도 특성은 매우 흥미롭다. 또한, 물질의 초전도 임계온도가 자성 임계온도보다 높을 경우, 전기 저항이 초전도 상태에서 0이 아닌 값을 갖는 경우도 있는데, 이는 초전도성과 자성의 상호작용이 클 때 거시적으로 일어나는 실험적 현상으로서 이해되고 있다.

이렇듯, 고체 내부의 전자와 격자의 상호작용으로 생성되는 Cooper pair 에 의한 초전도성을 설명하는 BCS 이론으로는 설명되지 않는 초전도 메커니즘이나 고온의 초전도 임계온도 등을 설명하기 위하여 초전도성을 구현하기 위해 필수적인 전자 쌍 구성의 매개체로 고체 격자가 아닌 자성 (즉, 전자의 스핀)이 또 다른 주요 매개원인으로 여겨지고 있다. (그림 2 참고)

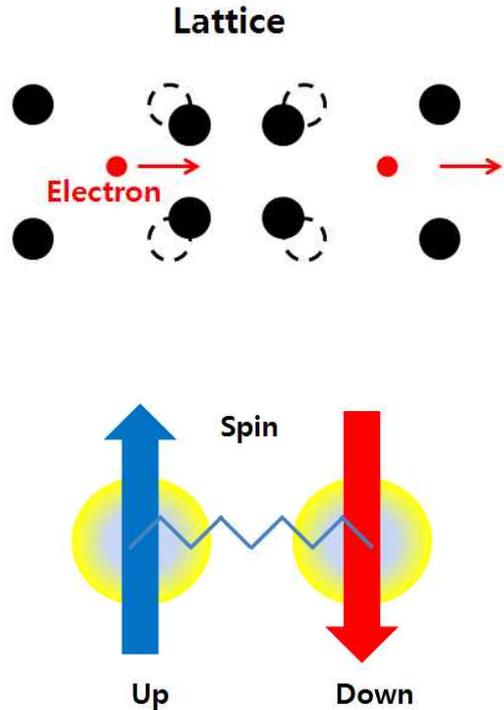


그림 2. (상) BCS 초전도 이론에서 설명하는 Cooper pair: 격자 (lattice) 의 phonon 과 electron 의 움직임. (하) 스핀 요동을 매개로 하는 초전도 메커니즘을 개략적으로 나타내었음.

4. 연구 동향

2008년 일본에서 26 K에서 초전도 임계 온도를 갖는 철기반 초전도체를 발견한 이후 현재까지 물리학계에서는 고온 초전도체 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. [3] 철기반 초전도체의 특이한 점은 구조나 물질이 달라도 FeAs이나 FeSe의 같은 구조를 갖는 층상 구조를 공유한다는 점이다. 이는 구리계 산화물 초전도체가 CuO의 이차원 층상 구조를 갖는다는 점과 비슷하며, 전자나 홀 도핑을 통하여 자성 물질에서 초전도성을 이끌어낼 수 있다는 점도 유사하다. [4]

그림 3에서처럼 철기반 초전도체에서는 도핑을 통하여 자성 특성이 억제되고, 초전도성이 나타나는 현상을 도핑 정도에 따라 정리해보면 초전도 임계 온도는 돔 형상을 띠고 있고, 저온에서 무거운 페르미온 성질을 보이거나 초전도 임계온도 위에

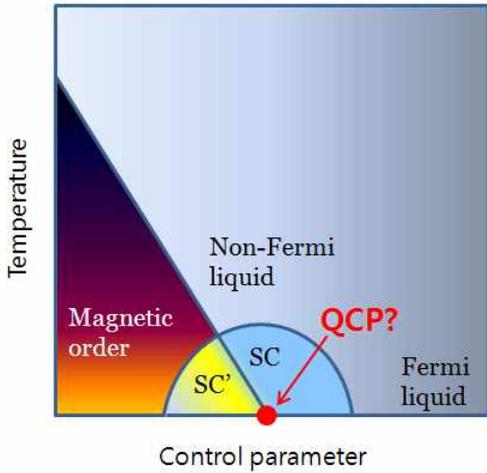


그림 3. 도핑이나 압력 등의 변화인자를 통해 구현할 수 있는 초전도성이 포함되어 있는 흥미로운 상태도.

Non-Fermi liquid 현상을 보이면서 초전도상 안에서 spin density wave 성질을 보이는 구간과 그렇지 않은 구간으로 나뉘어지기도 하는데, 많은 연구자들이 초전도상 안에서의 quantum critical point (QCP) 가 존재할 것으로 생각하고 많은 연구가 진행되고 있다. QCP 는 열적인 변인으로 인한 상변화가 아닌, 압력이나 자기장을 통한 양자적인 상변화를 뜻하는데, 초전도성도 결국 양자적인 현상이므로 QCP 에 관한 이해가 최근에 중요하게 여겨지고 있다.

이렇듯, 초전도성은 여러 가지 성질들이 복합적으로 혼합되어 있는 물질의 한 성질로서, 독립적으로 이해하기 보다는 자성, 전자구조, 양자역학적 상변화 등과 함께 이해하려는 연구가 진행되고 있다.

5. 관련 연구 전망

이제까지 발견된 고온초전도체인 구리계 산화물과 철 기반 초전도체의 초전도 메커니즘에 서로 다른 차이는 있지만 두 물질 모두 층상구조이며, 물질 내부 d-electron 또는 f-electron 으로 인한 자성특성을 갖는 물질에 전자나 홀 도핑 또는 압력을 가해야 초전도성이 나타나는 유사점을 갖는 것은 또 다른 고온초전도체를 발견하는데

실험적으로 매우 중요한 단서이다. 또한, 층상 구조의 2차원적 물질은 3차원적인 구조를 갖는 물질보다 물리적 원인을 해석하는데 보다 용이하기 때문에 향후 층상 구조이며 자성 특성을 보이는 또 다른 고온초전도체를 탐색하는 실험적 시도들이 꾸준히 이어질 것이다. 층상 구조의 물질은 단결정 형태에서 원자 격자 구조의 방향성에 따라서 이방성을 갖을 수 있는데, 이러한 이방성에 관한 연구를 위해 극저온 또는 고자기장 하에서의 자성 측정, 전기저항 측정 실험 연구가 필수적이다. 또한, 층상 구조의 2차원 계의 물리적 성질을 보다 명확히 이해하기 위해 현재까지 발견된 층상 구조 초전도 물질들을 박막형태로 증착시킨 시료의 중요성도 대두될 것이다.

초전도성을 이해하는데 자성에 관한 이해도가 더욱 요구되면서, 자성 초전도 물질의 자성 구조를 파악하기 위해 미시적인 전자나 스핀 구조를 탐색하는 연구는 더욱 중요해질 것이다. 전자 구조를 탐색하기 위한 광학 측정에는 각도 분해 광전자 분광법 (ARPES), 라만 분광법, THz 분광법 등의 실험 방법이 유용하며, 자성 구조를 탐색하기 위해서는 중성자 산란 실험, 고체 자기 공명 분광 방법이 요구된다.

흥미로운 특성을 갖는 새로운 물질을 발견하는 것은 어려운 일이지만, 본 특집의 서두에서 언급하였듯이, 초전도성을 물리적으로 이해하기 위해 적합한 물질의 발견이 우선시 되어야한다. 그 이후, 여러 가지 실험적 측정 방법으로 근본 원리를 탐색해야 보편적으로 적용되는 이론적 설명이 가능하다. 현재까지 새로운 초전도 물질의 발견은 주로 해외 연구 그룹들에서 이루어져 왔고, 국내에서는 신물질 탐색 보다는 이미 알려져 있는 물질들을 확보하기 위한 노력만 진행되어왔던 것이 현실이다. 반면에, 최근 위상절연체에서의 초전도성이 실험적으로 발견되는 등, 예측하지 못 하였던 현상들이 연구되고 있기 때문에 우리나라에서도 충분히 새로운 물질들을 찾아 세계적인 흐름을 주도할 수 있으리라 기대한다.

참고문헌

- [1] B. K. Cho et al. "Breakdown of de Gennes Scaling in $(R_{1-x}R'_x)Ni_2B_2C$ Compounds", Phys. Rev. Lett. 77, 163 (1996).
- [2] N. H. Sung et al. "Possible multigap superconductivity and magnetism in single crystals of superconducting $La_2Pt_3Ge_5$ and $Pr_2Pt_3Ge_5$ ", Phys. Rev. B 86, 224507 (2012).
- [3] Y. Kamihara et al. "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 (2008).
- [4] G. R. Stewart et al. "Superconductivity in iron compounds", Rev. Mod. Phys. 83, 1589 (2011).
- [5] K. Hashimoto et al. "A Sharp Peak of the Zero-Temperature Penetration Depth at Optimal Composition in $BaFe_2(As_{1-x}Px)_2$ ", Science 336, 1554 (2012).

저자이력



조병기 (趙炳起)

1980-1984년 서울대학교 물리교육학 학사, 1985-1987년 미국 Auburn 대학교 물리학 석사, 1989-1995년 미국 Iowa 주립대학교 물리학 박사, 1995-1996 미국 Cornell 대학교 Post Doc, 현재 광주과학기술원 신소재공학부 정교수.



성낙헌 (成樂憲)

2001-2006년 동국대학교 물리학과 학사, 2006-2008년 광주과학기술원 신소재공학과 석사, 2008-2013년 광주과학기술원 신소재공학부 박사, 현재 광주과학기술원 신소재공학부 Post Doc.