

# 초전도와 물리학

기술해설-1

## Superconductivity and Physics

오범환

(Beom-Hoan O)

**Key Words(중요 단어):** Superconductivity(초전도), High  $T_c$  Superconductivity(고온초전도), Application of Superconductivity(초전도 응용), Symmetry(대칭성), Superconducting Magnet(초전도 전자석), Josephson Junction(조셉슨 접합)

### 1. 서론

네덜란드의 온네스(H. Kamerlingh Onnes)가 1911년에 4.2K이하에서 수은의 초전도현상을 처음 발견하고 1980년대까지는 여러 원소와 합금재료의 개발에 힘입어 초전도의 임계온도가 매년 조금씩 꾸준히 증가하다가 1980년대 중반에 산화물 고온초전도체를 발견한 이후 임계온도의 급격한 상승기를 맞아 본격적인 고온초전도 시대의 막을 올린 후 현재까지 초전도에 대한 지대한 관심과 연구가 계속되고 있다. 1980년대 중반에는 임계온도를 획기적으로 높이려는 과욕(?)에 찬성급한 발표들로 인해 실망이 반복되기도 하는 등 초전도에 대한 불신감이 커지면서 학계의 관심이 떨어지기도 하였다. 게다가 초전도의 형성 원인을 체계적으로 설명한 소위 BCS이론에 의하면 전자와 격자진동의 상호작용에 의한 임계온도는 40K 정도가 극한일 것으로 계산되어 더 이상의 임계온도 상승에 대한 희망이 없는 것으로 생각되는 등 초전도에 대한 관심과 연구가 식어갈 무렵인 1986년, 약 40K의 임계온도를 갖는 산화물 고온 초전도체(La 2-1-4)의 발견은 다시금 학계의 관심과 연구 노력을 집중시켰고 임계온도의 급상승을 이루는 발판을 마련하였다. 이듬해에는 액체질소의 비등점인 77K를 훨씬 상회하는 90K의 임계온도를 갖는 YBCO가 발견되어 BCS이론을 넘어서는 본격적인 고온초전도 시대의 막이 올랐다.(그림.1 참고) 값비싼 액체헬륨에 비하여 훨씬 경제성이 좋은 액체질소를 이용하여 초전도성을 얻을 수 있다는 매력을 지닌 산화물 고온초전도체의 등장으로 초전도체의 응용에 대한 연구에 불이 붙었고, 고전적인 초전도체들의 물

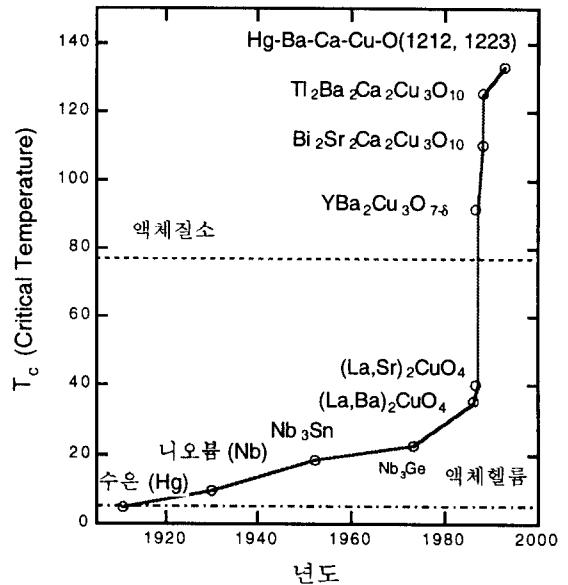


그림 1. 임계온도 상승추이

Fig. 1. Progress on Critical Temperature.

성이 BCS이론으로 만족스럽게 설명되던 것과는 달리 산화물 고온 초전도체는 BCS이론을 넘어서는 여러 가지 비정상적인 물성들을 보여 많은 연구자들의 도전의 대상이 되었다. 보다 양질의 연구환경과 개념의 정립을 위해 다음의 본문에서는 고온초전도체의 학문적인 발전과정과 그 응용분야를 간략히 살펴보려고 한다.

### 2. 본론

#### 2.1. 고온초전도체의 산화구리 평면 구조와 도핑 대칭성

고온초전도체는 응용분야의 희망이자 순수학문 분야의 물리현상 연구의 보고가 되었으며 기초

학문인 물리학의 주관심은 이제 당연히 고온초전도체의 높은 임계온도의 근본이유를 알고자 하는 방향으로 전개되었다. 산화물 고온초전도체의 발견으로 전자와 격자진동의 상호작용에 의한 초전도 전자쌍의 형성이론이 모든 것을 설명해주지 못하자 여러 가지 이론이 대두되었고, 엄밀한 실험적인 검증과 논쟁을 통해 많은 이론들이 명멸하였다. 아직도 heavy fermion 이론, t-J model 이론, magnon 이론 등의 초전도 이론이 논의되고 있으나, 고온초전도체의 초전도전자쌍의 형성원리를 만족스럽게 설명하지는 못하고 있다. 이들은 거의 모두 산화구리 평면구조와 밀접한 연관을 갖는다는 점에서 주목할 만하다. 구체적인 모양은 조금씩 틀리지만 대다수 고온초전도체들은 공통적으로 구리원자와 산소들이 평면을 이루어 층구조를 가지고 있는데 이러한 구조에 의한 특성이 고온초전도의 형성원인과 밀접한 연관이 있을 것으로 예견되어, 산화구리 평면의 성질을 이해하기 위한 많은 노력이 경주되었음은 매우 당연하다고 하겠다. 그리하여 산화구리 평면을 갖지 않는 초전도체의 발견이 매우 주목을 받기도 하였다. 대다수의 초기 산화물 고온초전도체들의 전하운반자는 전자가 아닌 정공에 의한 초전도성을 보여주어, 고온초전도는 산화구리 평면에서의 정공만에 의한 것이 아닐까 하는 의심도 있었으나, 1989년에 전자도핑 초전도체인 Nd-Ce-Cu-O의 발견으로 초전도성에 대한 전자와 정공의 도핑 대칭성이 확립되어짐으로써 정공에 특별한 마술이 있는 것은 아님이 밝혀졌다. 이것은 기존의 원형구조(mother compound)에 무조건 전자를 첨가해 넣어서는 가능하지 않았고, 산화구리 평면과 그 사이에 있는 희토류 원소의 원자크기에 의한 구조와 결합상태의 변화를 적절히 이용함으로써 전자를 도핑 하는 것에 성공할 수 있었던 새로운 초전도물질의 발견으로서 물성의 정확한 이해에 의해 가능해진 중요한 실험이었다.

2.2. 전자쌍의 상태(s?, d?)논의

최근의 논의는 전자쌍의 상태가 s-wave인지 d-wave인지의 검증에 주력되고 있다. 고전적인 초전도체들은 이미 초전도 전자쌍의 파동함수가 isotropic하여 s-wave임이 잘 알려져 있으나,

YBCO를 대표로 산화물 고온 초전도체들의 전자쌍 파동함수가 anisotropic하여 d-wave이거나 anisotropic-s-wave임이 주장되고 있다. 전자쌍 상태의 성질을 아는 것이 그 전자쌍의 형성의 근원을 설명하지는 못하나, 제안되어 있는 mechanism들의 가능성에 중요한 제한 조건을 제시하여 추려낼 수 있다는 기능이 있어 이 논의의 학문적 의의를 찾을 수 있으며, 실제로 미세이론의 검증에 그간 기여한 공이 크다. 그간 고온초전도체에서의 초전도 전류전자쌍의 파동함수에 관한 논의가 매우 격렬하였고, 위상에 관한 실험자료들이 쌓이면서 고온초전도체의 파동함수에 관한 성질들이 점차 확립되고 있으나 아직 모든 면에서 잘 들어맞지는 않는다. 최근의 실험결과들은 대체로 d-wave라는 입장을 보이나, s와 d의 혼합이라는 주장과, 아직도 실험증거가 더 필요하다는 의견도 있다.

운동량공간에서 페르미면에서의 전자쌍이 느끼는 에너지 갭은 Order parameter와 직접 연관되고 이에 의해 파동함수가 기술된다. 전자쌍 전자들의 상대적 위치의 분포에 따라 이들을 k-space(운동량공간)에서 1.등방 s-상태, 2.d-상태, 3.비등방 s-상태의 세 가지로 나누어 생각할 수 있는데, 이를 그림.2에 나타내 보았다. 산화물 고온초전도체의 페르미면이 사각모양에 가까워 이를 사각으로 그리는 경우도 많으나 편의상 원형으로 표현하였다. Order parameter가 영이 되는 node의 유무가  $d_{x^2-y^2}$  상태와 비등방 s 상태와

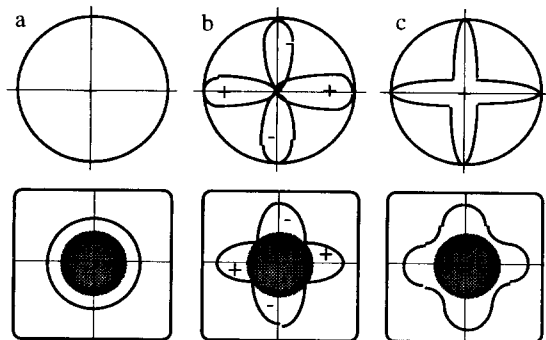


그림 2. a. isotropic s-wave  
 b. d-wave  
 c. anisotropic s-wave

Fig. 2. Fermi surface and energy gap.

의 차이를 주는데, node가 있는 경우 전자들은 그 방향의 에너지 갭이 0 이어서 열 적으로 흥분되기 수월하므로 열 적인 자극에 반응하는 양상에 차이가 있으므로 들뜬 상태의 밀도와 관련된 물리성질들의 온도의존성은 s 상태 초전도체와 다르고 이것은 초전도 전자쌍의 파동함수가 어느 것에 해당하는지를 검사하는 간접증거가 될 것이다. 1993년에 Hardy는 온도에 따른 런던침투깊이(London penetration depth)의 변화를 측정하여, 에너지 갭이 s 상태인 경우와는 현저히 다른 온도의존성을 보임을 발표하였다.<sup>1</sup> 한해 뒤엔 Moler가 비열과 DOS(Density of state)를 측정하여 d-상태인 것으로 추론되는 결과를 발표했다.<sup>2</sup> 즉 에너지 갭이 균일하다면 비열이  $e^{-d/T}$ 의 온도의존성을 보일 것이나 측정된 결과 온도의 제공에 비례하여 node의 존재를 시사하였다. 이외에도 중성자 산란실험들의 실험결과들이 많은 간접적 증거들을 제시해 주었는데,<sup>3</sup> 그보다도 파동함수의 위상과 크기를 직접 확인해 볼 수 있는 Josephson-coupling 실험과<sup>4,7</sup> Photoemission 실험의 결과들이<sup>8-10</sup> 매우 흥미롭다. Stanford 대학의 Shen등에 의해 수행된 BSCCO와 YBCO의 Photoemission 실험 결과가 위상공간의  $|k_x|=|k_y|$  방향에서 node의 존재를 시사하였고, 이어서 미국 Argonne Lab.과 일본 Tohoku 대학 등지의 실험결과가 이를 지지하였으나 이 에너지 갭의 크기가 정말 0인지는 밝혀낼 수 없는 약점을 지녔다. 반면 Illinois 대학의 Harlingen등에 의해 수행된 Josephson-coupling 실험은 두 직각방향의 접합을 이용, 위상차이  $\pi$ 를 측정하여 파동함수가 d-상태임을 주장하였다. 미국 IBM의 C.Tsuei 등은 박막에서의 자발자기화를 측정하여 파동함수가 d-상태임을 주장하였는데, 이는 다른 방향의 박막들을 link하여 홀수개의 junction을 통과하면 d-wave에 의한 위상 차이가 반정수의 flux 양자를 생성할 것이라는 가정을 만족하는 결과이다. 반면, 미국 UCSD의 R.Dynes등은 c 축방향으로의 초전도접합을 통한 실험을 수행하여 이중방향경계(twin boundary)에 따른 조셉슨 전류의 상쇄가 없음을 보여 s-wave임을 주장하였고, Watson 연구소의 P.Chandhari등은 반도체 박막 기술과 신 소재 성장기술을 활용, 육각모양 YBCO 접합을 제작하여 각 접합들의 소멸에 따

른 변화 등을 측정하였고, 실험결과는 s-wave 파동함수를 지지하였다. 이러한 실험은 반도체 박막기술이나 정교한 레이저 ablation 기술 등이 없이는 불가능한 고도의 측정실험이라는 점에서 순수학문과 공학기술과의 긴밀한 연관성을 재삼 일깨워 주고 있다. 또한 이러한 학문적 논쟁 결과 밝혀질 초전도 파동함수의 상태는 이를 응용한 새로운 공학기술에의 활용을 기다리고 있다.

### 2.3. 초전도의 응용 분야

이제 이러한 학문적 발전의 길을 거친 초전도의 응용 분야를 살펴보자. 초전도의 응용은 에너지관련, 교통, 의료 및 가속기, 각종 센서, 전자공학등의 중요한 과학기술의 거의 전반에 걸쳐 두루 연구되고 있다. 초전도체를 발견한 직후에는 직류전압에 대해서 저항이 없는 특성을 이용하려고 여러 가지 구상을 하고 실험해 보았으나 전류를 많이 흘리면 초전도성이 깨어진다는 것(임계전류의 개념)을 곧 알 수 있었다. 그리고 자기장을 가했을 때에는 극성에 상관없이 항상 완전히 반발하는 자기장을 형성하는 것(마이스너 효과)과 더욱 세게 가하면 초전도성이 깨어진다는 것(임계자기장의 개념)을 발견하여, 이들을 적절히 개선하고 응용하려는 많은 노력이 경주되어왔다. 또한 물리학의 발전에 힘입어 거시적 양자 계를 이루는 파동함수등 새로운 물리개념이나 현상의 발견(조셉슨 현상)과 응용이 이루어졌다. 물리현상의 정확한 이해가 SQUID라는 초고감도의 자기측정기기의 초석이 되는 조셉슨 접합의 탄생을 이룬 것이다. 이미 넓어진 초전도체의 응용분야를 더욱 확장하고, 성능과 특성조건의 개선을 효과적으로 수행하며, 기술혁신등의 차원 높은 발전을 위해서는 현재의 응용분야들에 대한 전반적인 지식과 첨단 물리학의 연구진행 방향 등에 대한 세심한 관찰이 필요한 것임을 알 수 있다. 편의상, 이들 응용분야들을 초전도체에 의해 새로운 개념의 기계기술이나 소자기술을 이루어 내는 개발분야와 기존의 장치나 기술에 초전도를 응용하여 효율이나 성능을 향상시킬 수 있는 개선분야의 두 부류로 분류하기도 하나 경계가 그리 명확하지는 못하다. 강력한 자기장을 제공하는 초전도 전자석을 이용한 응용분야로 자기부상 열차, 핵융합로, MHD 발전 등이 있고, 초전도의

기본특성인 무저항을 이용한 응용분야로 초전도 트랜지스터, 믹서, 필터(휴대용 전화기 지상송수신국), 안테나, 광검출, A/D 변환기, 송전선, 배선, 한류계(current limiter)등이 있으며, 양자간섭의 특성을 이용한 응용분야로는 SQUID(양자간섭계), 전압표준( $10^{-9}$ V), 논리, 기억소자, 조셉슨 컴퓨터, 고주파검출, 광검출, 공진기등이 있다. 산화물 고온초전도체 Bulk의 자체특성을 이용하려는 시도로 베어링, 자기차폐재등이 있어 이들을 도표. 1에 간략히 정리해 보았다.

도표 1. 초전도의 응용분야

Table 1. Application of superconductivity.

|    |             |   |
|----|-------------|---|
| 개발 | 전자석         | 자기부상 열차, 핵융합로, MHD발전, MHD propulsion, SEMS(Superconducting Magnetic Energy Storage) |
|    | 무저항<br>양자간섭 | 초전도 트랜지스터<br>SQUID(양자간섭계), 전압표준( $10^{-9}$ V), 논리, 기억소자, 조셉슨 컴퓨터                    |
| 개선 | 전자석         | MRI, 전자 렌즈, 발전기, 변압기  |
|    | 무저항         | 믹서, 필터(휴대용전화기 지상송수신국), 안테나, 광검출, A/D변환기, 송전선, 배선, 한류계(current limiter)              |
|    | 양자간섭        | 고주파검출, 광검출, 공진기   |
|    | Bulk(자체)    | 베어링, 자기차폐재  |

미국의 SSC(Superconducting Super Collider, 80억불) 계획이 1993년에 취소되어 초전도 전자석 산업이 타격을 받은 적도 있으나, 초전도 전자석의 용도는 여러 분야에 걸쳐 다양하고 연구와 개발이 활발하다. 초전도 전자석은 거대한 전류를 손실없이 흐르게 함으로써 소형, 경량이면서도 강력한 자기장을 얻어낼 수 있다. 가공성은 좋으나 임계자장이 낮은 Nb-Ti합금을 사용하면 약 8 T 정도, 가공성은 떨어지나 임계자장이 높은 Nb<sub>3</sub>Sn이나 V<sub>3</sub>Ga화합물선을 사용하면 약 14~18 T의 초전도 전자석을 제작할 수 있는데, 1987년에 서독에서 21.1 T의 강력한 자장을 내는 초전도 전자석이 제작되기도 하였다. 자기부상 열차, 핵융합로, MHD 발전, MHD propulsion, SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage)등의 개발은 기존의 전자석이 도달하지 못했던 강력한 자기장의 제공과 저 손실이 가능해 짐으로써 활발하게 되었다. 자기부상열차는

마이스너 효과를 응용하는 것이 아니고 초전도 전자석을 제작하여 이용한다. 마이스너 효과에 의한 힘은 열차와 같이 무거운 물체의 부상에는 효율적이지 못하기 때문이다. 보통의 전자석을 이용한 자기부상 열차에 비해 월등하게 높게 부상하여(10cm 이상) 약 500km/h 까지 시험주행에 성공하였다. 이때 추진력은 교류 리니어모터로부터 얻는다. 또한 막대한 전류를 손실없이 흘림으로써 거대한 자계를 형성할 수 있는 초전도 전자석은 핵융합 발전에도 핵심적인 역할을 수행한다. 수소와 중수소의 융합에는 수억 도나 되는 플라즈마 가스를 안정되게 속박하기 위해 10 T (테슬라=일만 가우스, 강판의 포화는 약 2 T 정도) 이상의 강한 자기장이 필요하다. 참고로, ITER계획(국제 열 핵융합 실험로)에는 약 13 T의 Nb<sub>3</sub>Sn 초전도 전자석이 사용될 계획에 있다. 또한 초전도 발전기는 소형, 경량이면서도 대용량의 발전이 가능하고 송전가능전력이 50%나 증가되어 발전효율은 0.5~0.7% 증가하므로(백만 kW급 화력발전의 경우 0.5%가 5천 kW로서 연간 5만 배럴의 석유가 절약) 운전경비과 40%의 발전기 손실 감소의 장점이 있는 반면, 저온을 유지하는 시설이 필요하다는 단점도 있다. 일본은 Super-GM(1988, 200MW급), 독일은 850MW급, 러시아는 300MW급의 초전도 발전기 개발계획을 추진 중에 있다. 강력한 자장을 고온 플라즈마 가스(1700도 이상)에 걸어 로렌츠의 힘에 의해 터빈 없이 직접 발전하며 남은 고온의 가스로 화력 발전과의 이중발전을 하는 MHD (Magneto Hydro-Dynamics) 발전 방식도 계획되고 있다. 1963년 발표되었던 공해 없는 초전도 선박의 개념이 일본에 의해 추진되어, YAMATO-1(1985~1992)이 배수량 185 t, 8 노트의 속력을 내었다. 현재 2 T 정도의 균일 자장(10ppm 이하)을 사용하는 기존의 MRI(자기공명 영상측정장치)는 8-30톤 정도의 중량을 갖는데 초전도전자석의 도입으로 경량화를 이루고 크기 제한에 의해 의료시설의 혜택을 받지 못하던 비만환자들(미국인의 5%에 해당)도 혜택을 받게 할 수 있다. 전자현미경 등에 쓰이는 초전도자석 전자 렌즈는 짧은 초점거리, 소형, 안정된 자계(고가의 전원 안정화 장치 불필요)등의 장점이 있으나 축대칭성이 저하되고 냉매 증발시의 진동

이 분해 능력을 저하하는 단점도 있다. 초전도의 기본 특성인 무저항을 송전선에 이용하면 5~10%에 달하던 기존 송전선의 손실을 없앨 수 있으며 100m 실험 송전에는 성공하였으나, 직류송전에 따른 제반문제로 인해 100km 이상이 되어야 경제적이다. SMES(Superconducting Magnetic Energy Storage)는 전기 에너지를 영구전류에 의한 자기에너지로 보존하는 전기에너지 저장방식인데 90%이상의 저장효율을 갖는다. 현재 국내에서 사용되는 양수저장방식의 60%정도에 비하면 획기적인 효율이다. 1MWh급은 이미 응용이 가능한데, 지하 500m, 직경 200~300m의 크기면 수만 kW 이상의 저장이 된다고 한다.

초전도체와 반도체를 조합한 초전도 트랜지스터도 구상되고 있으며, 알루미늄 배선의 전기저항에 의한 LSI스피드의 한계를 초전도 배선으로 20%정도 성능향상을 할 수 있다고 하며 대형 TFT LCD 배선회로 및 구동회로의 고속화에도 적용이 시도되고 있다. 2개 조셉슨접합의 초전도 루프를 이용하여 논리나 기억소자의 양자 자속 소자 화도 연구되고 있는데 이들은 스위칭 시간이 반도체소자의 1/100 이고, 신호전과시간은 1 게이트당 10.8 ps로 짧으며, 소비전력도 반도체소자의 1/1000 (~1  $\mu$ W) 밖에 되지 않아 초전도(조셉슨) 컴퓨터가 구상되고 있다. 1970년대에 미국 IBM사에 의해 시작되었다가 반도체기술과의 상대적 경쟁력 때문에 1983년에 중단되기도 했던 조셉슨 컴퓨터의 개발은 고온초전도체의 발견이 후에 다시 활발히 연구되고 있으며 FET와 같은 3단자소자의 개발에 주로 치중되고 있다. SQUID(양자간섭계)는 단일 접합의 rf SQUID, 두개 접합의 dc SQUID가 있는데 심자도, 뇌자도등을 수 fT(지자기의 백억분의 1)의 초고감도로 측정할 수 있는 다채널 시스템 의뢰기기로서도 개발되어 이미 64채널과 122채널이 시장 화되어 있고 256채널은 시험중이며 국내에서는 한국표준연구소에서 개발중이다. 이 외에도 조셉슨 소자를 이용한 전압표준기는 무려  $10^{-9}$  볼트(nV)의 정밀도를 가지며, 고주파검출기, 광검출기등도 개발되고 있다. 방사선검출기, 믹서, 휴대용 전화기 지상송수신국의 필터, A/D 변환기, 공진기, 안테나, 한류계(current limiter)등의 개발도 활발하고, bulk의

성질을 이용한 초전도 베어링 등의 개발도 활발하다.

### 3. 결론 및 요약

이상에서 초전도에 관한 학문적 연구내용의 추이와 그 응용기술의 개발내용을 간략히 살펴보았다. 고온 초전도의 형성원리에 대한 학문적 관심과 응용기술 개발사이의 괴리를 이해하려는 노력의 일환으로 고온 초전도체를 주대상으로 한 각종 연구결과들을 소개하면서 순수학문과 공학기술과의 긴밀한 연관성을 찾았다. 전자와 정공의 도핑 대칭성을 확립한 Nd-Ce-Cu-O의 발견은 물성의 정확한 이해에 기초한 성공이었고, 산화물 고온 초전도체들의 전자쌍 파동함수의 대칭성에 관한 논의들에서 최근 연구의 주종을 이루고 있는 Josephson-coupling과 Photoemission등의 직관적인 결과를 주는 측정 실험들은 고도의 첨단기술과 조셉슨 접합 등의 새로운 초전도 물성 개념의 정확한 이해를 요하는 연구들이었다. 이러한 새로운 초전도 개념들의 토대 위에 현 응용분야들의 추세를 대략 살핌으로써 부실하나마 미래의 차원 높은 수요에 대비한 학문적, 기술적 준비를 시도해 보았다.

### 참 고 문 헌

1. W. N. Hardy, D. A. Bonn, D. C. Morgan, R. Liang, K. Zhang, Phys. Rev. Lett. 70, 3999 (1993).
2. K. A. Moler, D. J. Baar, J. S. Urbach, R. Liang, W. N. Hardy, A. Kapitulnik, Phys. Rev. Lett. 73, 2744 (1994).
3. See, for example, H. F. Fong, B. Keimer, P. W. Anderson, D. Reznik, F. Dogan, I. A. Aksay, Phys. Rev. Lett. 75, 316 (1995).
4. D. A. Wollman, D. J. Van Harlingen, W. C. Lee, D. M. Ginsberg, A. J. Leggett, Phys. Rev. Lett. 71, 2134 (1993). D. J. Van Harlingen, Rev. Mod. Phys. 67, 515 (1995). D. A. Wollman, D. J. Van Harlingen, J. Giapintzakis, D. M. Ginsberg, Phys. Rev.

- Lett. 74, 797 (1995). D. A. Brawner, H. R. Ott, Phys. Rev. B 50, 6530 (1994).
5. A. Mathai, Y Gim, R. C. Black, A. Amar, F. C. Wellstood, Phys. Rev. Lett. 74, 4523 (1995). C. C. Tsuei, J. R. Kirtley, C. C. Chi, L.-S. Yu-Jahnes, A. Gupta, T. M. Shaw, J. Z. Sun, M. B. Ketchen, Phys. Rev. Lett. 72, 593 (1994).
  6. H. Ding, J. C. Campuzano, A. F. Bellman, T. Yokoya, M. R. Norman, M. Randeria, T. Takahashi, H. Katayama, Yoshida, T. Mochiku, K. Kadowaki, G. Jennings, Phys. Rev. Lett. 74, 2784 (1995). M. R. Norman, M. Randeria, H. Ding, J. C. Campuzano, Phys. Rev. B 52, 15017 (1995).
  7. J. R. Kirtley, C. C. Tsuei, J. Z. Sun, C. C. Chi, L.-S. Yu-Jahnes, A. Gupta, T.M. Rupp, M. B. Ketchen, Nature 373, 225 (1995).
  12. J. H. Miller Jr, Q. Y. Ying, Z. G. Zou, N. Q. Fan, J. H. Xu, M.F. Davis, J. C. Wolfe, Phys. Rev. Lett. 74, 2347 (1995).
  8. A. G. Sun, D.A. Gajewski, M. B. Maple, R. C. Dynes, Phys. Rev. Lett. 72, 2267 (1994).
  9. P Chaudhari, S. Y Lin, Phys. Rev. Lett. 72, 1084 (1994).
  10. A. J. Millis, Phys. Rev. B 49, 15408 (1994).
  11. 박종철의 다수, "고온초전도기술 백서", 한국표준과학연구원 (1995)  
백영현, 신재수, "초전도의 모든 것", 고려대출판부 (1992)

**저자소개**



**오범환**

1963년 7월 21일생. 1985년 2월 서울대학교 물리학과 졸업. 1987년 2월 동대학교 대학원 졸업(석사). 1993년 12월 미국 텍사스(오스틴)주립대학교 물리학 박사. 1993년 12월-94년 9월 미국 텍사스주립대 박사후 과정. 1994년

9월-현재 인하대학교 공대 전자재료공학과 재직중.