

## BiPbSrCaCuO 초전도체의 전자기 특성

### Electromagnetic Properties of BiPbSrCaCuO Superconductor

이상헌<sup>1,a</sup>

(Sang Heon Lee<sup>1,a</sup>)

#### Abstract

The Electromagnetic properties in BiPbSrCaCuO superconductor was studied. In the measurement of current-voltage characteristics, a voltage across the superconducting sample was observed on applying an external magnetic field. The voltage continues to appear the removal of the magnetic field. The appearance of the voltage is ascribed to the trapping of magnetic flux. Depending on the direction of applied magnetic flux less than  $2.5 \times 10^{-5}$  T, the voltage in the magnetized sample increases or decreases. It is considered that mechanism of voltage occurrence can be explained by applying filament model.

**Key Words** : BiPbSrCaCuO superconductor, Magnetic field, Electromagnetic properties

#### 1. 서론

1986년 고온초전도체의 발견은 산업전반에 무한한 응용성 때문에, 학문적인 측면뿐만 아니라, 초전도 소자들의 실현을 위해 electronics, computer technology 및 반도체와 초전도 현상을 응용한 hybrid 소자 등 다양한 분야에서 전세계적으로 연구되고 있다[1-3]. 이와 같이 고온초전도체의 응용은 현대 산업의 많은 분야에서 시도되고 있으며 그중 가장 실용화에 근접되어 있는 것으로 초전도 센서 분야가 주목을 받고 있다. 이는, 초전도 상태에서 상전도 상태로 혹은 상전도 상태에서 초전도 상태로의 상전이때 발생하는 저항의 변화를 디바이스의 동작으로 응용할 수 있기 때문이다. 고온초전도체의 전자소자로서의 응용은 초전도 산업화를 위해서도 대단히 중요한 의미를 갖는다[4,5].

BiPbSrCaCuO계 초전도체에는 외부로부터 자계를 인가하면 전압이 발생하게 되는데 외부 자계를

소거한 후에도 출력전압이 유지되는 물리적 현상이 있다. 이 현상은 다결정 입계로 구성되어 있는 산화물 초전도체가 갖는 특징이며 자계를 인가함과 동시에 초전도체에 발생하는 출력전압이 변화하는 현상을 주목하면 간단한 초전도 자기 검출소자로서 응용할 수 있는 가능성을 내포하고 있다. 따라서 본 연구에서는 초전도상태에 있는 시료가 자속에 의한 메모리의 기입이 가능하며 이러한 전기 자기적 효과의 메커니즘에 대하여 정성적으로 고찰하고자 한다.

#### 2. 실험 방법

시료는 99.9 % 순도의  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{SrCO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ 와  $\text{CuO}$  분말을 혼합과 하소의 공정을 포함하는 고상 반응법으로 제조하였다. 저울에서 정량한 분말을 알루미늄이나 막자 사발에서 균일하게 혼합하였다. 재료의 조성은 고온 초전도상을 생성하기 용이한 것으로 알려진  $\text{Bi} : \text{Pb} : \text{Sr} : \text{Ca} : \text{Cu} = 1.84 : 0.34 : 1.92 : 2.03 : 3.06$ 을 선택하였다. 혼합된 분말은  $840^\circ\text{C}$ 에서 24시간 하소하였다. 하소된 분말은 알루미늄이나 막자사발에서 분쇄한 후 원판형 시료를 만들었다. 완성된 시료는 직경 15 mm, 두께

1. 선문대학교 전자정보통신공학부  
(충남 아산시 탕정면 갈산리 100)

a. Corresponding Author : shlee@sunmoon.ac.kr  
접수일자 : 2004. 4. 7  
1차 심사 : 2004. 5. 27  
심사완료 : 2004. 6. 1

1 mm의 흑색 원판형을 하고 있다. 소자는  $\square$ 형으로 전압단자가 위치하는 부분을 오목하게 가공하여 전압단자 부분의 전류밀도를 높게 하였다. 그리하여 시료에 전류를 흘리거나, 외부로부터 자계를 인가함으로써 초전도 상태에서 상전도 상태로 전이하기 쉽게 하고 그 부분에 있어서 전기저항이 자계에 의하여 크게 변화하는 현상이 기대된다. 전류 및 전압 단자는 접촉저항을 줄이기 위하여 In을 전극 재료로 사용하였고, 리드선은 직경 약 0.08 mm $\phi$ 의 구리선을 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

본 연구에서 제작한 BiPbSrCaCuO계 초전도시료의 전류-전압특성의 결과를 그림 1에 나타낸다.

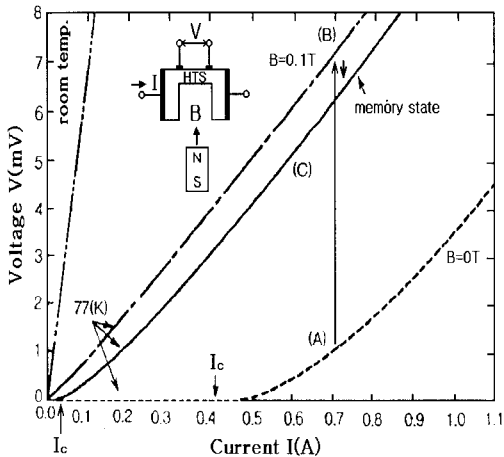


그림 1. BiPbSrCaCuO 초전도체의 전류-전압특성.  
Fig. 1. Current-voltage characteristics of BiPbSrCaCuO superconductor.

특성 (A)는 외부로부터 자계를 인가하지 않는 경우의 특성이며, 저항값은 0.067  $\Omega$ 이 된다. 액체 질소 온도에서는 전류가 425 mA 까지 전압강하가 관측되지 않으나, 임계전류( $I_c=425$  mA) 보다 큰 전류를 인가하면 초전도 시료의 양단에서는 전압이 발생한다. 이것은 초전도체를 흐르는 전류와 더불어 발생한 자계로 인하여 초전도영역의 일부가 상전도 영역으로 전이된 결과로 생각된다. 시료의 주 위온도를 77 K로 하고 그림1의 삼입도에서와 같이 BiPbSrCaCuO계 초전도시료에 외부로부터 0.1 T

의 자계를 인가하면 특성 (A)는 일점쇄선으로 표시된 특성 (B)로 변화된다.

즉, 자계 인가로 인하여 초전도 시료의 저항이 증가되고 동시에 전압도 증가하게 된다. 다음으로 외부 자계를 소거하면 시료에서 발생하는 전압은 감소하나 원래의 특성 (A)의 상태로는 돌아가지 않고 (C)의 특성에 머무르게되며 임계전류는 감소하게 된다. 이 상태에서 전압을 0으로 하고 다시 전압을 인가하여도 동작점은 (C)의 특성을 나타낸다. 이러한 자기현상은 초전도 시료가 77 K를 유지하는 한 지속되나, 시료를 일단 상온으로 되돌려 상전도 상태로 하면 소거된다. 그러나 초전도 시료를 77 K로 냉각하여 외부 자계를 인가한 후에는 다시 특성 (C)가 얻어져 자기 특성이 재현된다. 이러한 자기 현상은 자석의 N극과 S극에 대하여도 같은 정도로 발생하게 된다.

이를 회로 모델로 대응하여 보면 접합은 직렬, 병렬로 입체적이며 복잡하게 접속된 회로라고 할 수 있다. 또한 결정 입계의 결합정도에 의해 Josephson접합의 자기적 특성이 다르다고 하면 초전도 시료에 인가되는 자계의 강도가 커짐에 따라 Josephson접합에서 저항이 발생되므로 저항이 발생하는 접합수가 증가하게 된다. 따라서 초전도 시료에서 자계의 증가에 의하여 발생하는 전압은 증가하게 된다.

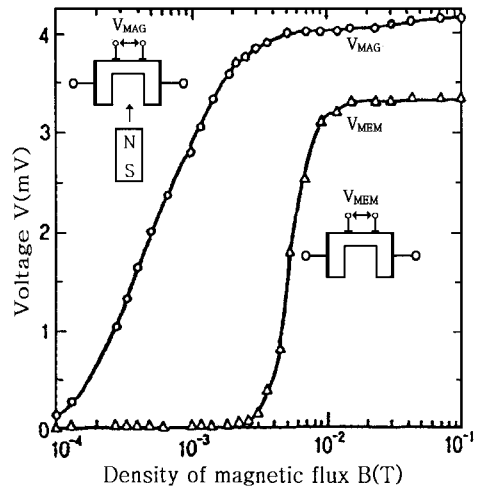


그림 2. 77 K에서 인가된 외부 자계로 인하여 발생하는 전압 의존성.  
Fig. 2. Dependences of the voltage V on externally applied magnetic field at 77 K.

외부 자계의 인가에 의한 초전도 시료의 전압  $V_{MAG}$ 의 변화와 인가되었던 외부 자계를 소거 한 후 발생하는 전압  $V_{MEM}$ 의 관계를 그림 2에 나타낸다.  $I_c = 425$  mA의 조건에서 측정하였다.

이 결과로부터 약  $2 \times 10^{-3}$  T이하의 자계에서는 자기적 특성이 발생하지 않는다. 즉  $2 \times 10^{-3}$  T이하의 자계에서는 초전도 시료에 자계를 인가하였을 경우 단자간에 전압이 발생하나 자계를 배제하면 전압은 0이 된다. 이것은 자계를 배제한 후의 특성이 다시 초전도 상태로 천이 되어 메모리 되지 않는 것을 의미한다. 그러나  $2 \times 10^{-3}$  T이상의 자계를 소거한 후 시료에서 발생하는 전압  $V_{MEM}$ 은 급격히 증가하고 약  $10^{-2}$  T에서 포화된다.

이 결과로부터 외부 자계로 인하여 시료의 초전도 영역의 일부가 상전도 영역으로 천이 되어 시료를 흐르는 전류가 저항을 감지하는 것으로 생각되며 외부 자계가  $2 \times 10^{-3}$  T 이하에서는 자계를 소거하면 자계에 의하여 형성되었던 상전도 영역이 원래의 초전도 영역으로 되돌아가 전압  $V_{MEM}$ 은 0이 된다. 한편  $2 \times 10^{-3}$  T 이상에서는 자계에 의하여 형성되었던 상전도 영역의 일부만이 초전도 영역으로 되돌아가고 다른 부분은 자계를 배제하여도 상전도 상태를 계속적으로 유지하므로 전압  $V_{MEM}$ 이 발생하게 된다.

전기 자기적 효과가 발생하는 시료내부에 트랩된 자속을 확인하기 위하여 메모리 되어 있지 않은 U자형의 시료를 자기센서로 하여 실험 하여 그 결과를 그림 3에 제시한다. 자기센서로 사용되는 시료의 전류-전압 특성은 실선으로 표시되어 있다. 삽입도에서와 같이 메모리 되어 있으나, 전류를 흘리지 않은  $\Pi$ 형 시료를 U자형의 자기센서에 근접시키면 전류-전압특성은 점선의 특성으로 변화하고 멀리 가져가면 원래의 특성으로 되돌아온다. 이 현상은 외부자계에 의하여 초전도체에서 발생하는 전압이 증가하는 현상과 같은 결과로서 자기적 특성이 발생하는 초전도 시료에 자속이 트랩되어 있는 것으로 사려 된다.

본 연구에서 대상으로 하고 있는 BiPbSrCaCuO 초전도 소결체는 분말을 소결하여 제작한 시료이므로 내부에는 격자 결함이 발생하며, 산화물 등의 화학적 불순물이 다수 존재하는 것으로 사려 된다. 이 점은 본 시료가 임계온도 이하에서 초전도 상태가 되는 영역과 상전도 상태를 유지하는 영역 또는 메모리효과를 발생하는 자속을 트랩 하는 영역으로 혼합되어 있는 제2종 초전도체임을 의미한다. 제2종 초전도체의 전압 발생 메커니즘에 관하여는 여러 이론이 발표되어 있으나, 본 연구에서는 산화물 초전도체의 자기적 효과의 발생 메커니즘으로서

초전도 소결체의 격자 결함과 결정 입계의 결함 강도를 고려한 필라멘트 모델을 제안한다.

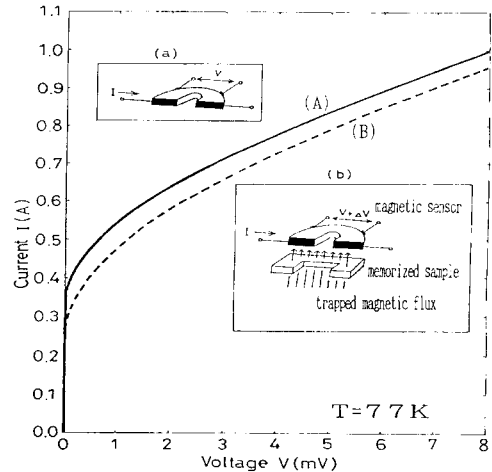


그림 3. 전자기적 방법에 의한 자속 트랩의 확인.

Fig. 3. Confirmation of trapped magnetic flux using electromagnetic method.

본 시료는 초전도영역이 필라멘트 상으로 구성 되어 있고, 이 필라멘트가 시료 내부를 그물망처럼 복잡하게 연결되어 있다고 생각된다. 그 이유는 본 시료가 소결체이며, 입자 간에는 많은 공공이 존재하며 초전도 영역은 입자들이 접촉되어 연결된 형태이므로 결과적으로 그물망과 같은 초전도 전류 경로가 발생하는 현상은 충분히 고려할 수 있다. 이러한 상태를 그림 4에서 모델화 하였다. 이점을 고려하여 초전도 소결체의 전압 발생 모델을 구체적으로 고찰한다. 그림.4에 필라멘트 형상을 고려한 전압발생 모델을 나타낸다.

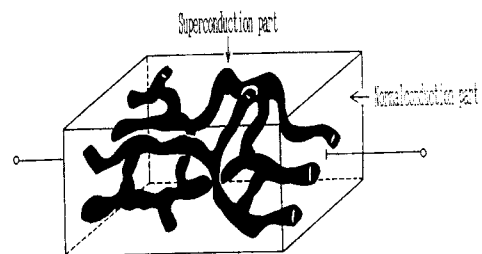


그림 4. 초전도 소결체의 필라멘트 전류경로.

Fig. 4. The filament current path of superconducting bulk.

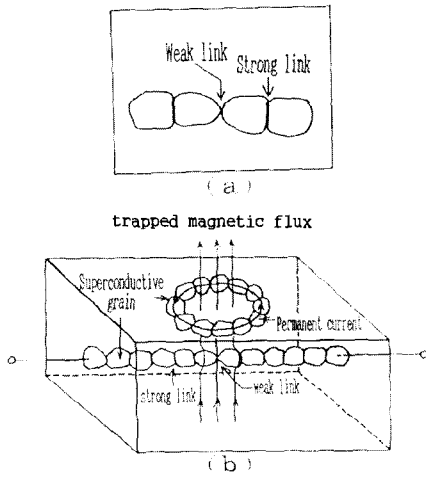


그림 5. 초전도 소결체의 전압 발생 모델.

Fig. 5. Voltage occurrence model of superconducting bulk.

초전도 소결체는 미세한 입자들의 집합체이므로 그림 5(a)와 같이 시료 내부에는 초전도 입자간의 결합강도가 강한 부분과 약 결합 부분이 혼합되어 존재한다. 이러한 초전도 입자는 그림 5(b)에서 나타내는 것과 같이 양 단자 간을 연결하고 있거나 ring 형태로 연결되어 있는 부분도 존재하는 것으로 생각할 수 있다. 이와 같은 시료에 외부로부터 자계가 인가 되면 ring 형태의 결합을 하고 있는 초전도 입자 간에는 영구전류가 흐르게 되며, 이 영구전류에 의해 외부 자장이 소거된 이후에도 시료에는 자속이 트랩 된다. 또한 이 같은 자속은 ring 형태의 결합을 하고 있는 초전도 입자뿐만 아니라 개개의 초전도 입자의 결합에도 트랩 되어 있는 것으로 사려 된다. 이 결과로서 초전도체에 트랩된 자속이 인접한 초전도 필라멘트의 약 결합 부분에 들어가 그 부분의 초전도성을 파괴하는 것으로 생각된다. 그리하여 시료에 인가된 자장 및 트랩된 자속에 의하여 초전도 소결체의 약 결합 부분이 초전도 상태에서 상전도 상태로 천이되어 초전도 상태의 단자 간을 연결하는 초전도 필라멘트는 분단된다. 결과적으로 초전도 소결체의 단자 간에는 전압이 나타나게 되고, 자기적 현상이 발생하는 것으로 사려된다. 즉 자기적 현상은 시료에 트랩된 자속과 초전도 입자 간에 존재하는 약 결합과의 상호작용으로 인하여 발생하는 현상으로 생각된다.

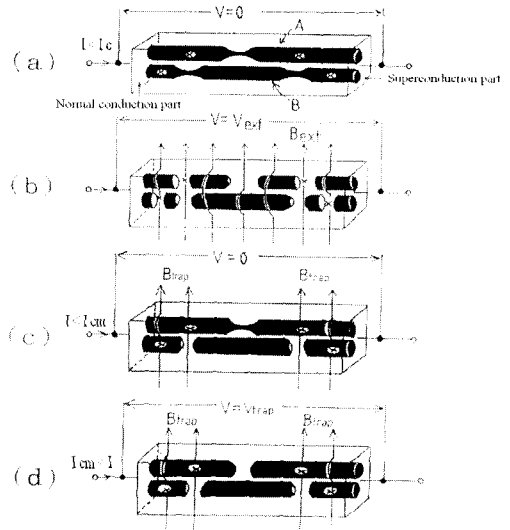


그림 6. 필라멘트전압 발생 모델.

Fig. 6. Filament voltage occurrence model.

본 연구에서는 그림 6에서와 같이 그물망 형태로 되어 있는 필라멘트형의 초전도 영역을 2개의 필라멘트 A, B로 간단화 하였다. 초전도 필라멘트 A, B 이외의 영역은 상전도 상태로 한다. 그림중의 ×표시는 초전도체 내부에 포함되어 있는 결함을 나타낸다. 필라멘트 A, B의 두터운 부분과 가는 부분은 각각 초전도 입자간의 결합강도가 강한 부분과 약 결합 부분을 의미한다. 그림 6의 (a)는 외부자장을 인가하지 않은 상태로서 임계전류 이하의 전류를 시료에 흘린 경우로서 이 상태에서는 시료 내부의 초전도 영역은 필라멘트 상으로 단자간을 연결하고 있으므로 전류-전압특성에서 단자간 전압은 0이 된다. 그림 6 (b)는 외부로부터의 자장을 시료에 인가한 경우로서, 외부 자장에 의한 자속 ( $B_{ext}$ )이 초전도 시료를 관통하고 있다. 시료에 인가된 자속밀도가 증가하면 필라멘트 초전도 영역 A, B에도 자속이 진입하게 되어 초전도 입자의 약 결합 부분은 파괴되어 상전도 영역으로 천이한다. 그 결과로서 시료에 전류를 흘리면 시료의 양 단자 간에는 전압 ( $V_{ext}$ )이 발생하게 된다. 그림 6 (c)는 초전도 시료에 인가되었던 외부 자장을 소거한 후 시료가 자기적 상태로 되었을 때의 임계전류 ( $I_{cm}$ ) 이하의 전류를 흘린 경우를 나타낸다. 이 상태에서는 필라멘트 내부의 결합부분은

자속이 소거되어 초전도 상태로 회귀된다. 그러나 결합에 트랩 된 자속(Btrap)은 인접한 필라멘트의 가는 부분(약 결합 부분)에 영향을 미치게 되므로, 결합에 트랩 된 자속과 초전도 필라멘트의 가는 부분이 그림 6(c)에서와 같이 배치되면 초전도 필라멘트 B의 가는 부분은 파괴 된다. 그러나 필라멘트 A의 초전도 영역은 시료의 양 단자 간을 연결하고 있어 시료의 초전도성은 유지된다. 이 상태의 전류-전압 특성에서 단자 간 전압은 0이 된다. 메모리 된 시료에서는 초전도 영역의 실효전류 경로의 단면적이 감소하므로 전류경로에 있어서의 전류 밀도는 증가한다. 따라서 시료의 임계전류는 감소하게 된다. 이 감소된 임계 전류보다 큰 전류를 초전도체에 흘리면 전압 단자 간에는 전압이 발생하게 된다. 이 설명을 그림 6 (d)에 나타낸다. 그림 6 (d)는 그림 6 (c)의 상태에서  $I_{cm}$  이상의 전류를 시료에 흘린 경우로서 초전도 필라멘트 B는 초전도 필라멘트 A에 트랩 된 자속으로 인하여 이미 파괴되어 있으며, 필라멘트 A의 가는 부분도  $I_{cm}$  이상의 전류를 시료에 흘림으로서 파괴되어 상전도 성을 나타나게 된다. 결과적으로 시료 단자를 연결하는 초전도 필라멘트 A, B 는 모두 분단 되므로 시료 단자 간에는 전압 ( $V_{trap}$ )이 발생 한다.

자속 트랩 현상이 유지되는한 전압  $V_{trap}$ 은 발생하게 되며, 이 현상이 자기적 효과를 발생하는 주된 요인으로 작용한다. 초전도 소결체에서 관측되는 자기적 현상은 소결체 내부에의 초전도 영역이 전류 및 인가 자계에 의하여 변화하므로 발생하는 현상으로 사려 된다.

#### 4. 결 론

BiPbSrCaCuO계 초전도체에 외부자계를 인가하면, 전압 단자간에는 전압이 발생하며, 외부 자계를 소거 한 이후에도 전압이 출력되는 전기 자기적 현상이 관측 되었다. 본 연구에서는 초전도 소결체의 전기 자기적 효과의 발생 메커니즘으로서 자속의 트랩 현상과 초전도체 내부에 존재하는 약 결합을 고려한 필라멘트 모델을 제안하였다. 관측된 전기 자기적 현상은 필라멘트 모델에 적용하여 정성적으로 설명하였다. 초전도체의 전기 자기적 효과는 외부 자계 및 초전도 시료에 트랩 된 자속의 상호 작용으로 인하여 초전도 소결체 내부의 약 결합 부분이 파괴되어 발생하는 현상으로 사려 된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] J. G. Bednorz and K. A. Muller, "Possible high  $T_c$  superconductivity in the Ba-La-Cu-O system", Z. Phys. B64, p. 189, 1986.
- [2] H. Maeda, Y. Tanaka, M. Hukutomi, "Bi-based high  $T_c$  superconductors", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 27, No. 2, p. 209, 1988.
- [3] 박성재, 김용선, 김채욱, "회전실험에서의 다결정  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-6}$  초전도체의 Vortex flux의 거동", 전기전자재료학회논문지, 11권, 9호, p. 751, 1988.
- [4] 이회갑, 박용필, 이진현, 이준웅, "Evaluation of sticking coefficient in BSCCO thin film fabricated by co-sputtering", 전기전자재료학회, 13권, 1호, p. 80, 2000.
- [5] 류경우, 최병주, "인접교류전류가 Bi2223 테이프의 통전손실에 미치는 영향", 전기전자재료학회논문지, 14권, 3호, p. 251, 2001.