

# YBaCuO계 초전도체의 자기적 성질

12-6-11

## Magnetic Properties of YBaCuO Superconductor

이상헌\*

(Sang Heon Lee\*)

### Abstract

An electromagnetic characteristics in YBaCuO superconductor is studied. In the measurement of current-voltage characteristics, a voltage across the superconducting sample is observed on applying an external magnetic field. The voltage continues to appear after the removal of the magnetic field. This phenomenon is considered as a nonvolatile magnetic effect. The voltage increases with increase in applied magnetic flux, but it becomes constant at about  $10^{-2}$  T. The appearance of the voltage is ascribed to the trapping of magnetic flux. Depending on the direction of applied magnetic flux less than  $2 \times 10^{-3}$  T, the voltage in the magnetized sample increases or decreases. The fact that the material used is porous and contains many grain boundaries suggests a junglegym-like path in a current flow model. The mechanism of magnetic effect can be explained by applying this model.

**Key Words(중요용어) :** Electromagnetic effect(전기자기적 효과), Magnetic flux(자속), Grain boundary(결정 입계), YBaCuO superconductor(YBaCuO 초전도체)

### 1. 서 론

1986년 Bednorz와 Muller에 의해 산화물 고온 초전도체가 발견된 이래<sup>1)</sup> 세계도처에서 산화물 고온 초전도체에 관한 수많은 연구가 수행되어 왔다. 현재까지 여러 종류의 초전도체 재료가 제안되어 왔으나 특히 YBaCuO계 재료는 95 K 정도에서 초전도 상태가 비교적 안정되어 실용화에 큰 주목을 받고 있다<sup>2)</sup>. 액체질소 온도이상의 고온에서 초전도상태를 관측할 수 있는 것은 다음과 같은 유용한 의미가 있다. 고가의 장치를 이용한 극저온에서 수행하는 금속계 초전도체와 비교하여 간단한 장치를 사용하면서 많은 실험을 수행할 수 있고, 이와 수반되는 물리현상을 용이하게 관측할 수 있다는 것은 산화물계 고온 초전도체가 갖는 이점이다. 특히 YBaCuO계 초전도체에는 외부로부터 자계를 인가하면 전압이 발생하

게 되는데 외부 자계를 소거한 후에도 출력전압이 유지되는 물리적 현상이 있다. 본 연구에서는 이 현상을 자기적 효과라고 명명한다. 이 현상은 다결정입계로 구성되어 있는 산화물 초전도체가 갖는 특징이며 자계를 인가함과 동시에 초전도체에 발생하는 출력전압이 변화하는 현상을 주목하면 간단한 고감도 초전도 자기 센서로서 응용할 수 있는 가능성을 내포하고 있다.

따라서 본 연구에서는 초전도상태에 있는 시료가 자속에 의한 메모리의 기입이 가능하며 이러한 자기적 효과가 초전도체에 트랩된 자속과 밀접하게 관계되어 있는 것을 조사하여 자기적 효과의 메카니즘에 대하여 정성적으로 설명하고자한다.

### 2. 실험방법

YBaCuO계 초전도체는  $Y_2O_3$ ,  $BaCO_3$ 와 CuO 분말을 혼합과 하소의 공정을 포함하는 고상 반응법으로 제조하였다. 저울에서 정량한 분말을 알루미나 막자 사발에서 균일하게 혼합, 공기중 910~930 °C에서 24시간 하소한 후 서냉하였다. 하소 분말은 분쇄하여 200 mesh의 sieve로 채질하였다. 혼합 분

\* : 선문대학교 공과대학 전자정보통신공학부  
(충남 아산시 당정면 갈산리 100번지, Fax : 0418-541-7426 E-mail : shlee@omega.summoon.ac.kr)  
1998년 10월 2일 접수, 1999년 5월 27일 심사완료

말은 직경 2 mm steel die에서 원판형으로 성형한 후 940~950 °C 공기중에서 24시간 소결한 후 450 °C에서 24시간 유지하였다. 모든 공정은 대기 중에서 수행하였으며, 완성된 시료는 반경 10 mm, 두께 0.1 cm의 흑색 원판형을 하고 있으며 이를 가공하여 그림 1과 같은 U형의 시료를 제작하였다. 4개의 단자는 In을 전극 재료로 사용하였고, 외측의 2개 단자는 전류를 흘리고 중앙 부분의 전압 강하를 내측의 2개 단자로 측정한다. 각각의 단자를 전류 단자 및 전압 단자라 한다. 시료는 U형으로 가공하여 전압

단자 부분의 전류 밀도를 높게 하였다. 그리하여 자체의 인가에 의해서 초전도 상태에서 상전도 상태로 천이 하기 쉽게 하여 전압 단자 부분의 전기 저항이 자체에 의해 크게 변화하는 현상이 기대된다.

그림 2는 온도를 저하시키면서 시료의 전기저항 R의 변화를 측정한 결과이다. 시료의 주위온도가 95 K이 되면 전기저항이 급격히 감소하여 0이 되는 현상을 확인할 수 있었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 자기적 현상

본 연구에 제작한 YBaCuO계 초전도 시료의 전류-전압 특성의 결과를 그림 3에 나타낸다. 특성 (A)는 외부자계를 인가하지 않은 경우의 특성이며 저항값은 0.067 Ω이 된다. 액체질소 온도에서는 전류가 425 mA까지 전압강하가 관측되지 않으나 임계전류치 ( $I_c = 425$  mA) 보다 큰 전류를 인가하면 초전도 시료의 양단에서는 전압이 발생한다. 이것은 초전도체를 흐르는 전류와 더불어 발생한 자계로 인하여 초전도 영역의 일부가 상전도 영역으로 천이된 결과로 생각되며, 초전도 입계의 Josephson 접합이 전압상태가 되는 것에 기인하여 저항분이 발생하는 것으로 사료된다. 시료의 주위온도를 77 K로 하고 그림 3의 삽입도에서와 같이 YBaCuO계 초전도 시료에 외부로부터 0.1 T의 자계를 인가하면 특성 (A)는 일직선으로 표시된 특성 (B)로 변화된다. 즉, 자계인가로 인하여 초전도 시료의 전압이 증가되고 동시에 저항도 증가하게 된다. 다음으로 외부자계를 소거하면 시료에서 발생하는 전압은 감소하나 원래의 특성 A의 상태로는 돌아가지 않고 (C)의 특성에 머무르게되며 임계전류는 23 mA로 감소하게 된다. 이 상태에서 전압을 0으로 하고 다시 전압을 인가하여도 동작점은 C의 특성을 나타낸다. 본 논문에서는 이러한 현상을 자기적 효과라고 한다.

자기적 현상은 초전도 시료가 77 K를 유지하는 한 지속되나 시료를 일단 상온으로 되돌려 상전도 상태로 하면 소거된다. 그러나 초전도 시료를 77 K로 냉각하여 외부자계를 인가한 후에는 다시 특성 C가 얻어져 자기적 특성이 재현된다. 자기적 효과는 자석의 N극과 S극에 대하여도 같은 정도로 발생하게 된다. 외부자계의 인가에 의한 초전도 시료의 전압  $V_{MAG}$ 의 변화와 인가되었던 외부자계를 소거한 후 발생하는 전압  $V_{MEN}$ 의 관계를 그림 4에 나타낸다.  $I_C = 425$  mA의 조건에서 측정하였다.

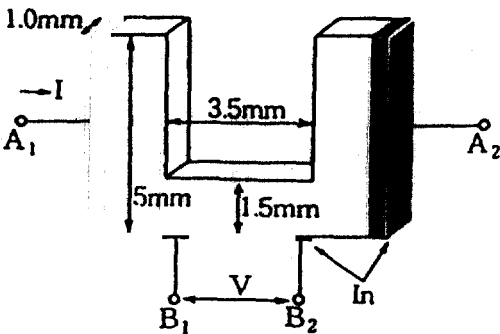


그림 1. 초전도 소자의 개략도  
Fig. 1. Schematic of the superconducting sample.

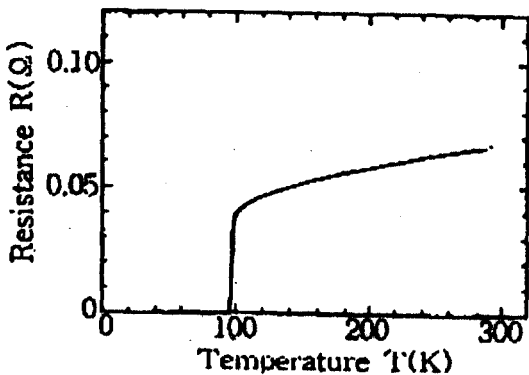


그림 2. YBaCuO 초전도체의 저항의 온도 의존성  
Fig. 2. Schematic of the superconducting sample.

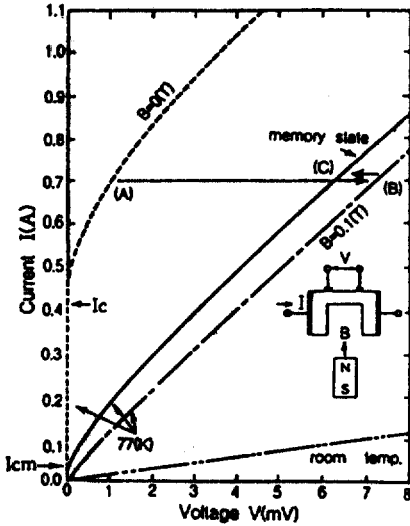


그림 3. YBaCuO계 초전도체의 전류-전압특성  
Fig. 3. Current-voltage characteristics of the YBaCuO ceramics.

이 결과로부터 약  $2 \times 10^{-3}$  T 이하의 자계에서는 자기적 특성이 발생하지 않는다. 즉,  $2 \times 10^{-3}$  T 이하에서는 초전도 시료에 자계를 인가하였을 경우 단자간에 전압이 발생하나 자계를 배제하면 전압은 0이 된다. 이것은 자계를 배제한 후의 특성이 다시 초전도 상태로 천이되어 메모리 되지 않는 것을 의미한다. 그러나  $2 \times 10^{-3}$  T 이상의 외부자계를 소거한 후 시료에서 발생하는 전압  $V_{MEM}$ 은 급격히 증가하고 약  $10^{-2}$  T에서 포화된다. 즉  $2 \times 10^{-3}$  T 이상의 영역에서 자기적 효과가 발생함을 알 수 있다. 이 실험 결과로부터 다음과 같은 추론을 생각할 수 있다.

외부자계로 인해 시료의 초전도 영역의 일부가 상전도 영역으로 천이되어 시료를 흐르는 전류가 저항을 감지하는 것으로 생각되며 외부자계가  $2 \times 10^{-3}$  T 이하에서는 자계를 배제하면 자계에 의하여 형성되었던 상전도 영역이 원래의 초전도 영역으로 되돌아가 전압  $V_{MEM}$ 은 0이 된다. 한편  $2 \times 10^{-3}$  T 이상에서는 자계로 인하여 형성되었던 상전도 영역의 일부만이 초전도 영역으로 되돌아가고 다른 부분은 자계를 배제하여도 상전도 상태를 계속적으로 유지하므로 전압  $V_{MEM}$ 이 발생하게 된다. 따라서 같은 자속밀도에서 발생하게 되는  $V_{MEG}$ 과  $V_{MEM}$ 는 저항의 감소로 인한 전압의 감소분에 해당하는 것으로 사료된다.

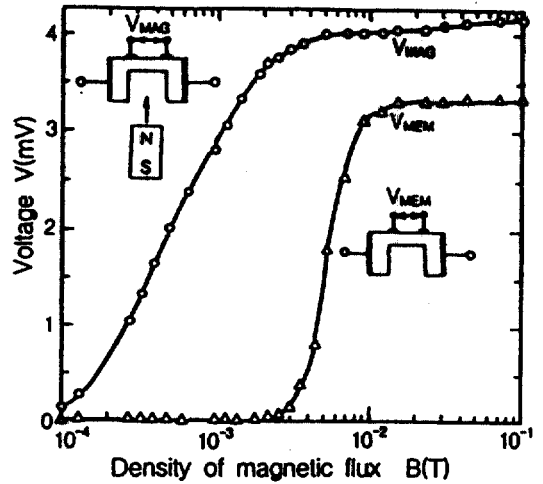


그림 4. 초전도체에서 발생하는 전압의 외부자계 의존성  
Fig. 4. Dependences of the voltage V on externally applied magnetic flux B at 77K. Symbols  $V_{MAG}$  and  $V_{MEM}$  are defined in the inserted figures.

### 3.2 자속 트랩의 확인

제 2종 초전도체에서는 초전도 영역의 일부가 상전도 상태로 천이하는 메카니즘으로서 외부자계에 의한 자속의 소용돌이가 발생하는 기구가 있다<sup>10)</sup>. 이 기구는 외부자계가 커지게 되면 자속은 초전도체를 관통하게 되고 자속에 의하여 관통된 영역은 상전도 상태로 천이된다. 그러나 결함이 없는 재료에서는 외부자계를 배제하면 상전도 상태는 초전도 상태로 회귀된다. 그러나 자기적 효과가 발생하기 위해서는 외부 자계가 제거된 후에도 자속이 초전도 재료에 트랩되어 있는 현상을 확인하여야 한다. 초전도 재료 내부에 결함이나 산화물 등의 화학적 불순물이 있으면 그곳에 자속이 트랩된다. 자기적 효과가 발생하는 시료 내부에 트랩된 자속을 확인하기 위하여 메모리 되어 있지 않는 U자형의 시료를 자기 센서로 하여 실험하였다. 그 결과를 그림 5에 제시한다. 자기 센서로서 사용되는 시료의 전류-전압 특성은 실제로 표시되어 있다. 삽입도에서와 같이 메모리 되어 있으나 전류를 흘리지 않는 U자형 시료를 U자형 자기센서에 근접시키면 전류-전압특성은 점선의 특성으로 변화하고 멀리 가져가면 원래 특성으로 돌아온다. 이는 외부자계에 의하여 초전도체에서 발생하는 전압이 증가하는 현상과 같은 결과로서 자기적 특성이 발

생하는 초전도 시료에 자속이 트랩되어 있는 것으로 생각할 수 있다.

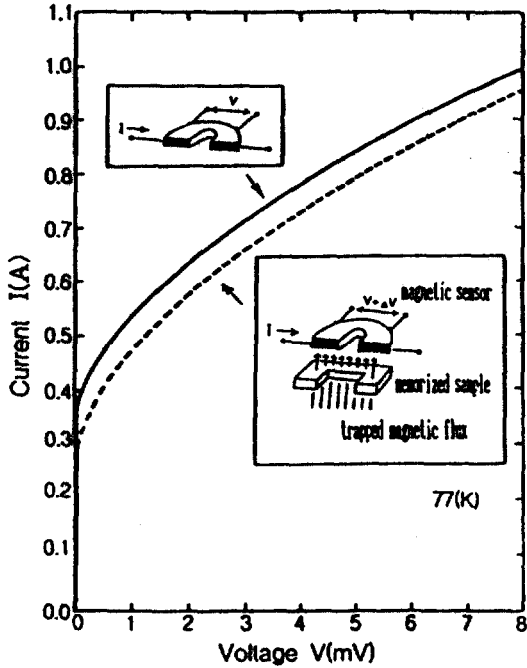


그림 5. 전기·자기적 방법에 의한 자속 트랩의 확인  
Fig. 5. Current-voltage characteristics of the superconducting sample used as a magnetic flux sensor.

### 3.3. 외부자계의영향

자속 트랩에 의하여 자기적 상태가 실현 가능하다고 하면 자속을 소거하는 방향으로 외부로부터 자계를 인가함으로써 자기적 효과가 소거되는 현상도 기대할 수 있다.

초전도체에 기억된 자기적 특성을 소거하기 위하여 자속을 소거하는 방향으로 초전도체에 자계를 인가한 실험결과를 그림 6에 나타낸다. 이 실험에서도 초전도 시료에는 초기 상태의 임계전류로  $I_c = 425 \text{ mA}$ 의 전류를 흘리고 있으며 외부자계가 0 인 경우에는 3.35 mV의 전압이 관측되었다. 그림에서 외부자계가 인가되어 자속밀도가 증가하게 되면 초전도체의 전압은 감소하며 약  $4 \times 10^{-3} \text{ T}$ 에서 최소가 된다. 이 경우 전압은 1.9 mV가 되며 자기적 상태는 43 % 소거된다. 자기적 상태의 소거 비율은 초전도 시료에

흘리는 전류값이 낮아지면 증가하게 된다. 이와 같은 메모리 소거 효과는 다음과 같이 고찰할 수 있다. 초전도체에 트랩된 자속이 감소하게 되면 자계로 인하여 형성되었던 초전도 시료 내부의 상전도 영역은 다시 초전도 영역으로 변화하게 된다. 따라서 초전도체의 저항은 감소되며 전압도 감소된다. 그러나 외부자계의 세기가  $4 \times 10^{-3} \text{ T}$  이상으로 증가하면 초전도체에서 발생하는 전압이 증가하게 된다. 이 현상은 트랩되어 있는 자속이 소거된 후에 외부자계로 인하여 다른 방향의 자속이 초전도 시료에 트랩되어 자기적 효과를 발생시키는 것으로 생각된다.

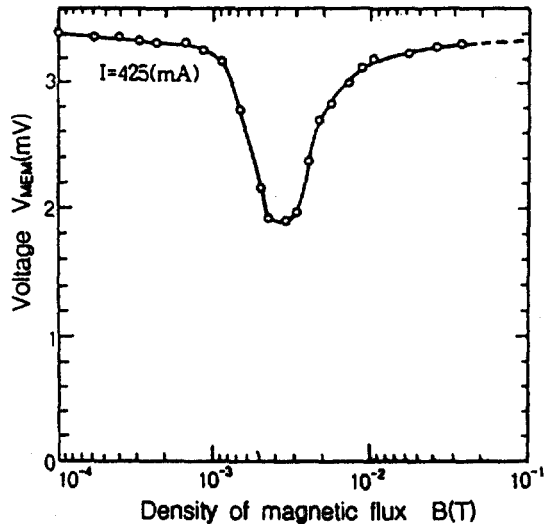


그림 6. 자기적 효과의 소거  
Fig. 6. The voltage  $V_{MEM}$  across the magnetized sample vs. applied magnetic flux density B.

자기적 상태에 있는 초전도 시료에  $2 \times 10^{-3} \text{ T}$  이하의 외부자계를 인가하면서 초전도 시료의 전류-전압 특성을 조사한 결과를 그림 7에 나타낸다. 이 결과에서는 0.1 T의 강한 N극을 초전도 시료에 접근시켜 시료의 특성변화를 나타낸다. 초전도 시료에 인가한 자극과 같은 방향으로 약  $2 \times 10^{-3} \text{ T}$ 의 약한 N극을 초전도 시료에 인가하면 전압은 감소되고 초전도체에 인가된 자극과 반대 방향의 약한 S극을 인가하면 시료의 전압은 증가하였다. 강한 S극으로 메모리 시킨 경우의 약한 자계의 역할은 정반대가 된다. 즉 약한 S극을 인가하면 초전도 시료의 전압은 감소하고

약한 N 극에서는 증가한다. 이 약한 N 극과 S 극은 이미 초전도 시료에 트랩되어 있는 자속을 함께 하거나 또는 적게 하는 기능을 하며 서로 반대의 작용을 하고 있다. 이 결과로부터 자기적 상태는 초전도 시료에 트랩되어 있는 자속이 밀접하게 관여하는 현상으로 생각할 수 있다.

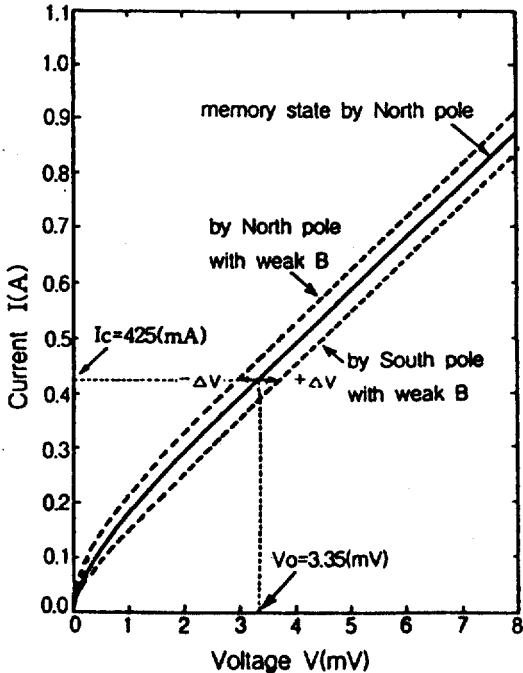


그림 7. 외부 자계에 의한 전기적 특성의 변화  
 Fig. 7. Current-voltage characteristics of the sample memorized by placing North pole near to it. Symbols + $\Delta$  and - $\Delta$  mean the increases and the decrease in the voltage across the sample, respectively.

0.1 T의 강한 N극에 의하여 자기적 상태에 있는 초전도 시료와  $2 \times 10^{-3}$  T의 세기가 약한 자석과의 거리 X를 함수로 하여  $I_c = 425$  mA,  $V_o = 3.35$  mV의 조건에서 전압 강하의 변화( $\Delta V = V - V_o$ )를 조사하였다. 그 결과를 그림 8에 제시한다. 이 결과에서  $-\Delta V$ 와  $+\Delta V$ 는 각각 전압의 감소분과 증가분에 해당된다. 자계 B는 자석의 위치가 X일 때의 초전도 시료 표면에서 관측되어 지는 자속 밀도이며 거리가 X가 작아 질수록 자계 B는 증가한다. 시료에

근접하는 자석은 초전도 시료에 서로 상반되는 효과를 발생시킨다.  $2 \times 10^{-3}$  T 이하의 자속 밀도가 인가되는 거리에서는 자극에 의하여 서로 상반되는 효과가 초전도 시료에 작용한다. S극은 초전도 시료의 전압을 증가시키며 N극은 감소시키는 성질을 나타낸다. 그러므로 시료로부터 약 1cm 이상의 범위에 놓인 자석은 초전도 시료에 트랩되어 있는 자속의 크기를 변화시키는 기능이 있음을 알 수 있다. 한편 자석이 시료로부터 1cm 이내로 근접하면 초전도 시료의 자속 밀도는  $2 \times 10^{-3}$  T 이상이 된다. 특히  $2 \times 10^{-3}$  T 이상에서는 초전도 시료와의 거리가 가까울수록 N극, S극에서 모두 전압을 증가시키는 방향으로 작용한다. 이 경우에는 외부 자계가 초전도 시료 내부에 트랩되어 있는 자속에 영향을 미침과 동시에 메모리 효과를 발생하는 기능을 하고 있다. 따라서 양 방향의 자극에서 전압이 증가하는 것으로 생각할 수 있다. 자기적 효과가 발생하지 않는 초전도 시료에 대하여도 전압의 변화를 조사하였다. 그 결과를 그림 9에 나타낸다. N극, S극에서 모두 전압은 증가시키는 방향으로 작용하며 그림 8에서와 같이 N극과 S극에서 서로 상반되는 효과는 발생되지 않았다. 위의 결과로부터 자속이 트랩되어 있는 초전도 시료에 외부로부터 자계를 인가하면 시료에서 발생하는 전압은 다음과 같은 효과를 나타낸다. 외부 자계가 약한 경우에는 초전도 시료에서 발생하는 단자전압은 시료에 근접하는 자석의 자극이 N극과 S극에서 서로 상반되는 효과를 보이며 이 효과는 초전도 시료 내부에

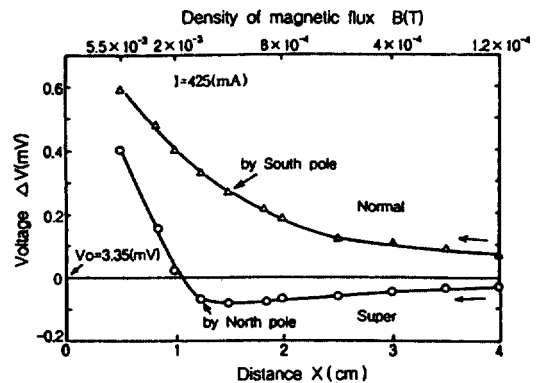


그림 8. 초전도체에서 발생하는 전압의 외부 자계 의존성  
 Fig. 8. The change in the voltage across the sample memorized by North pole vs. the distance x between the sample and the magnetic pole.

트랩 되어 있는 자속에 방향성이 있음을 나타내는 결과로 판단된다. 자석이 근접할수록 인가되는 자계의 세기는 커지며 N극과 S극에서 모두 시료 내부에 자속이 진입하여 전압을 증가시키는 기능을 하고 있음을 알 수 있다.

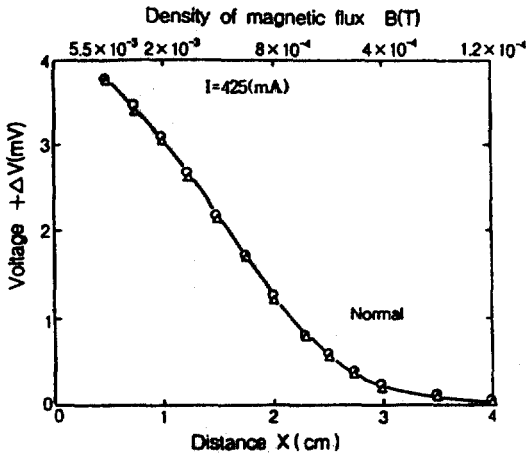


그림 9. 전기·자기적 방법에 의한 자속 트랩의 확인  
Fig. 9. The increase in the voltage the non-memorized sample  $\Delta V$  vs. the distance  $x$  between the sample and the magnetic pole.

### 3.4 자기적 현상의 정상적 해석

본 연구에서 대상으로 하고 있는 YBaCuO계 초전도체는 분말을 소결하여 제작한 시료이므로 내부에는 많은 격자결함이 발생하며 산화물 등의 화학적 불순물이 다수 존재하는 것으로 사료된다. 이점은 본 시료가 임계 온도 이하에서 초전도 상태가 되는 영역과 상전도상태를 유지하는 영역 또는 메모리 효과를 발생하는 자속을 트랩하는 영역으로 혼합되어 있는 제 2종 초전도체임을 의미한다.

제 2종 초전도체의 전압 발생 메커니즘에 대하여는 여러 이론이 발표되어 있으나<sup>3-7)</sup>, 본 연구에서는 산화물 초전도체의 자기적 효과의 발생 메커니즘으로서 초전도 소결체의 격자결함과 결정입계의 결합강도를 고려한 필라멘트 모델을 제안한다. 또한 제작된 시료의 전류-전압 특성이 필라멘트 모델로 정상적으로 해석이 가능함을 설명한다.

본 시료는 초전도 영역이 필라멘트 상으로 구성되어 있고, 이 필라멘트가 시료 내부를 그물망처럼 복

잡하게 연결되어 있다고 생각된다. 그 이유는 본 시료가 소결체이며 입자간에는 많은 공극이 존재하며 초전도 영역은 입자들이 접촉되어 연결된 형태이므로 결과적으로 그물망과 같은 초전도 전류 경로가 발생하는 현상은 충분히 고려할 수 있다. 이러한 상태를 그림 10에서 모델화 하였다. 이 점을 고려하여 초전도 소결체의 전압 발생 모델을 구체적으로 고찰한

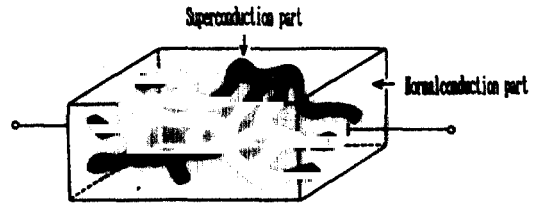


그림 10. 초전도 소결체의 필라멘트 전류 경로  
Fig. 10. A hypothetical representation of current path in the superconducting oxide material.

다. 그림 10에 필라멘트 형상을 고려한 전압 발생 모델을 나타낸다. 초전도 소결체는 미세한 입자들의 집합체이므로 그림 11(a)에서와 같이 시료내부에는 초전도 입자간의 결합강도가 강한 부분과 약 결합 부분이 혼합되어 존재한다. 이러한 초전도 입자는 그림 11(b)에서 나타내는 것과 같이 양 단자간을 연결하고 있거나 ring 형태로 연결되어 있는 부분도 존재하는 것으로 생각할 수 있다. 이와 같은 시료에 외부로부터 자계가 인가되면 ring 형태의 결합을 하고 있는 초전도 입자간에는 영구 전류가 흐르게 되며, 이 영구 전류에 의해 외부 자장이 소거된 이후에도 시료에는 자속이 트랩된다. 또한 이 같은 자속은 ring 형태의 결합을 하고 있는 초전도 입자뿐만 아니라 개개의 초전도 입자의 결합에도 트랩되는 것으로 사료된다. 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 단자간을 연결하는 초전도 필라멘트는 분단된다. 결과적으로 초전도 소결체의 단자간에는 전압이 나타나게 되고, 자기적 현상이 발생하는 것으로 사료된다. 즉 자기적 현상은 시료에 트랩된 자속과 초전도 입자간에 존재하는 약

결합파의 상호작용으로 인하여 발생하는 현상으로 생각된다. 다음으로 이와 같은 초전도체에 트랩된 자속과 약 결합파의 상호작용을 적용하여 본 시료의 전류-전압 특성을 정성적으로 고찰한다.

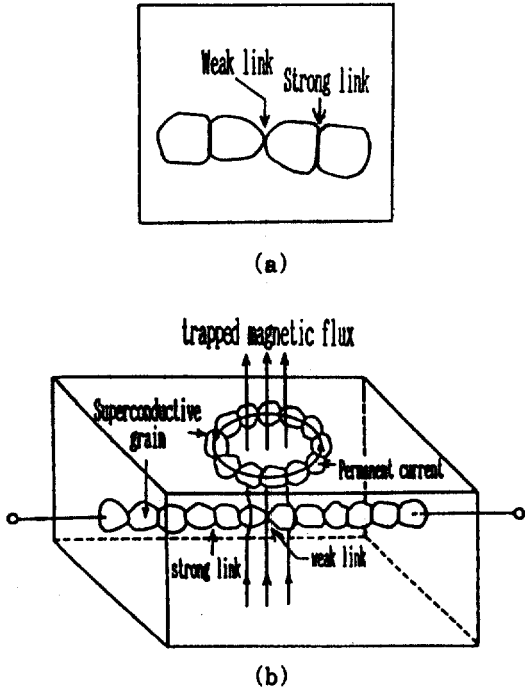


그림 11. 초전도 소결체의 전압 발생 모델  
Fig. 11. Model responsible for the occurrence of the voltage across the sample caused by applied magnetic field.

본 논문에서는 그림 12(I)에서와 같이 그물망 형태로 되어있는 필라멘트형의 초전도 영역을 2개의 필라멘트 A, B로 간단화 한다. 초전도 필라멘트 A, B 이외의 영역은 상전도 상태로 한다. 그림 중의 표시는 초전도체 내부에 포함되어 있는 결합을 나타낸다. 필라멘트 A, B의 두터운 부분과 가는 부분은 각각 초전도 입자간의 결합 강도가 강한 부분과 약 결합 부분을 의미한다. 그림 12(II)는 그림 3의 전류-전압 특성을 나타낸다. 그림 12(I)의 (a)는 외부자장을 인가하지 않은 상태에서 임계전류 이하의 전류를 시료에 흘린 경우로서 이 상태에서는 시료내부의 초전도 영역은 필라멘트 상으로 단자간을 연결하고 있

므로 전류-전압 특성은 그림 12(II)의 (a)에 해당한다. 이 경우 시료의 단자간 전압은 0이 된다.

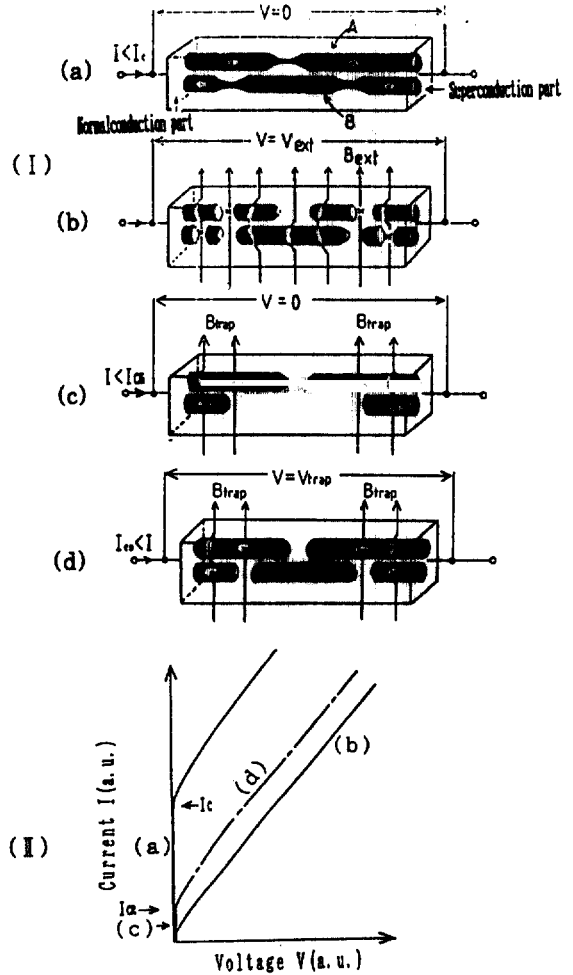


그림 12. 초전도 소결체의 전압 발생 모델과 전류-전압 특성

Fig. 12. Model responsible for the occurrence of the voltage across the sample caused by applied magnetic field.

그림 12(I)의 (b)는 외부로부터의 자장을 시료에 인가한 경우로서, 외부 자장에 의한 자속(B<sub>ext</sub>)이 초전도 시료를 관통하고 있다. 시료에 인가된 자속 밀도가 증가하면 필라멘트 초전도 영역 A, B에도 자속이 진입하게 되어 초전도 입자간의 약 결합 부분은

파괴되어 상전도 영역으로 천이한다. 그 결과로서 시료에 전류를 흘리면 시료의 양 단자간에는 전압 강하 ( $V_{\text{ext}}$ )가 발생하게 되어 전류-전압 특성은 그림 12(I)의 (b)와 같은 특성을 나타낸다.

그림 12(I)의 (c)는 초전도 시료에 인가되었던 외부 자장을 소거한 후 시료가 자기적 상태로 되었을 때의 임계 전류( $I_{\text{cm}}$ ) 이하의 전류를 흘린 경우를 나타낸다. 이 상태에서는 필라멘트 내부의 결합 부분에는 자속이 트랩되어 있으나 결합이 없는 부분은 자속이 소거되어 초전도 상태로 회귀된다. 그러나 결합에 트랩된 자속(Btrap)은 인접한 초전도 필라멘트의 가는 부분(약 결합 부분)에 영향을 미치게 되므로, 결합에 트랩된 자속과 초전도 필라멘트의 가는 부분이 그림 12(I)의 (c)에서와 같이 배치되면 초전도 필라멘트 B의 가는 부분은 파괴된다. 그러나 필라멘트 A의 초전도 영역은 시료의 양 단자간을 연결하고 있어 시료의 초전도성은 유지된다. 이 상태의 전류-전압 특성은 그림 12(II)의 (c)에 해당하며 초전도 시료의 단자간 전압은 0이 된다.

메모리 된 시료에서는 초전도 영역의 실효 전류 경로의 단면적이 감소하므로 그 경로에 있어서의 전류 밀도는 증가한다. 따라서 시료의 임계전류는 감소하게 된다. 이 감소된 임계 전류 보다 큰 전류를 초전도체에 흘리면 전압 단자간에는 전압이 발생하게 된다. 이 설명을 그림 12(I)의 (d)에 나타낸다. 그림 12(I)의 (d)는 그림 12(I)의 (c)의 상태에서  $I_{\text{cm}}$  이상의 전류를 시료에 흘린 경우로서 초전도 필라멘트 B는 초전도 필라멘트 A에 트랩된 자속으로 인하여 이미 파괴되어 있으며 필라멘트 A의 가는 부분도  $I_{\text{cm}}$  이상의 전류를 시료에 흘림으로서 파괴되어 상전도성을 나타나게 된다. 결과적으로 시료 단자를 연결하는 초전도 필라멘트 A, B는 모두 분단되므로 시료 단자간에는 전압( $V_{\text{trap}}$ )이 발생한다. 이 상태의 전류-전압 특성은 그림 12(II)의 (d)에 해당한다.

자속의 트랩 현상이 유지되는 한 전압  $V_{\text{trap}}$ 은 발생하게 되며 이점이 자기적 효과를 발생하는 주된 요인으로 작용한다. 초전도 소결체에서 관측되는 자기적 현상은 소결체 내부의 초전도 영역이 전류 및 자계에 의하여 변화하므로 발생하는 현상이다. 이외에도 자기적 효과의 발생 메카니즘으로서 외부 자장으로 인하여 시료 내부에 트랩된 자속이 미치는 영향만을 고려한 현상도 생각할 수 있다. 그러나 이 경우

는 본 시료와 같은 초전도 소결체 내부의 전류 유송을 저해하는 약 결합의 영향이 고려되지 않는다. 따라서 이 메카니즘에 의하면 본 시료에서 발생하는 전압 강하는 소결체 내부의 약 결합과 관계없이 발생하게 된다. 그러므로 본 연구에서는 초전도 소결체의 자기적 효과의 발생 메카니즘으로서 자속의 트랩 현상과 소결체 내부의 약 결합의 영향을 고려한 필라멘트 모델을 제안한다.

#### 4. 결 론

전류-전압 특성에 있어서 초전도 시료에 외부 자계를 인가하면 전압 단자간에는 전압이 발생하며 외부 자계를 소거한 이후에도 전압이 출력되는 자기적 효과가 관측되었다. 자기적 효과는 시료 내부에 트랩된 자속으로 인하여 발생하는 현상임을 실험적으로 증명하였다. 관측된 자기적 효과를 초전도 필라멘트 모델에 적용하여 정성적으로 해석하였다. 자기적 효과는 외부 자계 및 초전도 시료에 트랩된 자속의 상호 작용으로 인하여 초전도 소결체 내부의 약 결합 부분이 파괴되어 발생하는 현상으로 판단되었다.

#### 참 고 문 헌

1. J. G. Bednorz and K. A. Muller, Z. Phys. **B64**, 189(1986).
2. M. K. Wu, J. R. Ashburn, C. J. Trong, P. H. Hor, R. L. Gao, I. J. Huang, Y. Q. Wang and C. W. Chu, Phys. Rev. Lett., **58**, 9, 908(1987).
3. R. V. Peterson and J. W. Ekin, Phys. Rev. **B37**, 9848(1988).
4. P. England, T. Venkatesan, X. D. Wu and A. Inam, Phys. Rev. **B38**, 7125(1988).
5. H. Kupter, S. M. Green, C. Jiang, Yu Mei, H. L. Luo, R. Meier-Hirmer and C. Politis, Z. Phys. **B71**, 63(1988).
6. B. V. Reddi, K. Jian and B. K. Das, Solid State Commun. **68**, 841(1988).
7. E. G. Zwartq, B. A. Judd and H. Sang, J. Low. Temp. Phys. **74**, 277(1989).