

## 외부자장에 의한 초전도체의 전기적 특성 변화 기구

이 상 현\*

선문대학교 공과대학 전자공학부

### Effects of Applied Magnetic Field on the Electrical Properties of High T<sub>c</sub> Superconductor

Sang Heon Lee\*

Department of Electronic Engineering, Sun Moon University, Asan, Chung Nam, Korea 336-708

(Received May 22, 2006; Accepted June 20, 2006)

**Abstract** The relationship between electrical properties of superconductor and externally applied magnetic field was studied to develop a magnetic field sensor. The electrical resistance of the superconductor was increased by applying external magnetic field and even after removal of the magnetic field. This behavior was related to the magnetic flux trapped in the superconductor, which penetrated through the material by the external magnetic field. Some portion of the superconductor was changed to a normal state by the trapped magnetic flux. The appearance of the normal state yielded to enhance the electrical resistance.

**Keywords** : Electromagnetic effect, Magnetic flux, BiSrCaCuO

#### 1. 서 론

카멜린-온네스가 1911년 초전도 현상을 발견한 이후, 단원자 물질인 많은 금속계 초전도체로부터 합금, 금속간의 화합물계 초전도체에 이르기까지 많은 연구가 진행되어 1973년에는 초전도체의 최고 임계온도가 23.2 K에 달하였다. 그러나, 그후 10년이 지나도록 임계온도의 상승은 이루어지지 않았는데 1986년의 층상 Perovskite형 구조를 갖는 (La, A)<sub>2</sub> CuO<sub>4</sub>계 산화물 (A=Ca, Sr, Ba)의 발견을 계기로 하여 초전도체의 임계온도는 급격하게 상승하였다. 특히 1987년 이트륨, 바륨, 구리산화물계 초전도체의 발견에 의해 액체질소 중에서 초전도성이 얻어져 고온 초전도의 시대가 열리게 되었다. 이후 LaBaCuO계<sup>1)</sup> 및 YBaCuO계<sup>2)</sup> High-T<sub>c</sub> 산화물에 대하여 기초물성, 결정구조, 합성법 등에 관한 방대한 연구가 이루어졌고, 임계온도가 100 K를 넘는 BiSrCaCuO계<sup>3)</sup> 및 120 K를 넘는 TlBaCuO계가 잇달아 발표되는 등 매우 급속한 발전이 이루어지고

있는데다가 10 T 이상의 고자장 환경에서 10<sup>8</sup> A/m<sup>2</sup> 이상의 임계 전류밀도를 갖는 BiSrCaCuO 선재가 실용화 할 수 있을 정도의 긴 길이로 제작되어 그 활용도는 앞으로 무한히 확장될 것으로 보인다. 고온초전도체는 임계온도 이외에도 여러 가지 성질이 종래의 금속초전도체와는 판이하게 다른 것으로 알려져 있다. 세라믹의 특성인 층상구조로 인하여 여러 가지 물리적 성질, 전기저항, 임계자장, 간섭길이, 에너지 간격 등이 심한 이방성을 나타내며 부서지기 쉽고 원하는 모양으로 만드는데 어려움이 있다. 그러나 유리한 점은 고온 초전도로서 전체 혹은 일부시스템을 운영할 경우 액체 헬륨 대신 액체질소를 냉매로 쓸 수 있기 때문에 저온 초전도 시스템과 비교해 볼 때 열적 단열을 위한 비용의 감소 뿐 아니라 전체적인 비용도 상당히 감소되는 것이다. 이러한 점 때문에 고온초전도체의 응용은 많은 분야에서 시도되고 있으며 그중 가장 실용화에 근접되어 있는 것으로 초전도 센서 분야가 주목을 받고 있다. 이는, 초전도 상

\*Corresponding Author : [Tel : +82-41-530-2357; E-mail : shlee@sunmoon.ac.kr]

태에서 상전도 상태로 혹은 상전도 상태에서 초전도 상태로의 상전이때 발생하는 저항의 변화를 디바이스의 동작으로 응용할 수 있기 때문이다. 따라서 고온초전도체의 전자소자로서의 응용은 초전도 산업화를 위해서도 대단히 중요한 의미를 갖는다. 특히 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 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, 초전도체의 자속 트랩 현상을 이용한 공학적 응용에 대하여 정성적으로 설명하고자 한다.

2. 실험방법

시료는 99.9% 순도의  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SrCO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CuO}$  분말 과  $\text{Pb}_3\text{O}_4$  분말을 소성하여 출발 조성이  $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.2}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  가 되도록 평량 한 후 질산에 용해하였다. 본 용액에 시트르산 및 에틸렌글리콜을 첨가 하였다. 첨가한 시트르산은 용액 중에 포함되어 있는 금속 이온의 총 원자 가수를 계산하여 필요량을 첨가 하였다. 에틸렌글리콜은 금속 시트르산 염이 에틸렌글리콜과 탈수 중합 반응을 일으키므로 polymer상 화합물 생성의 최적비를 계산하여 필요량을 첨가하였다. 본 원료 용액을 약 90°C의 hot plate에서 2시간동안 가열 각반 하였다. 반응 종료 후 전기로에서 350°C에서 2시간동안 가열하여 전구체를 얻었다. 전구체 분말을 press 성형하여 860°C로 20시간동안 열처리하면 최종적으로 고온 초전도체가 얻어진다. 온도에 따른 저항의 변화를 측정하기 위하여 측정부분에 실리콘 다이오드 온도 센서를 설치하여 온도변화와 저항과의 관계를 AC 4단자법을 이용하여 전기저항을 측정하였다. 전류 및 전압 단자는 접촉저항을 줄이기 위하여 In을 전극 재료로 사용하였고, 리드선은 약 0.08 mmΦ의 구리선을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

시료가 초전도 상태에 있으며 외부로부터 자계를 인가하지 않는 경우 초전도시료의 전류-전압 특성은 그림 1의 (A)가 된다. 초전도시료에 외부로부터 0.1 T의 자계를 인가하면 특성 (A)는 일점체선으로 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 (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. 본 논문에서는 이러한 현상을 초전도체의 자기적 효과라고 한다. 특성 (A)와 (C)의 상이점은 다음과 같이 설명할 수 있다. 특성 (A)는 임계전류 이하의 전류를 인가한 경우로서 초전도 시료의 양단에서는 전압이 발생한다. 이것은 초전도체를 흐르는 전류와 더불어 발생한 자계로 인하여 초전도 영역의 일부가 상전도 영역으로 천이 된 결과로 생각되며, 초전도 입계의 Josephson 접합이 전압상태가 되는 것에 기인하여 저항성분이 발생하는 것으로 사료된다. 특성 (C)는 초전도 시료에서 발생하는 전압이 크게 증가되어 나타난 결과이다. 이것은 특성 (A)와 비

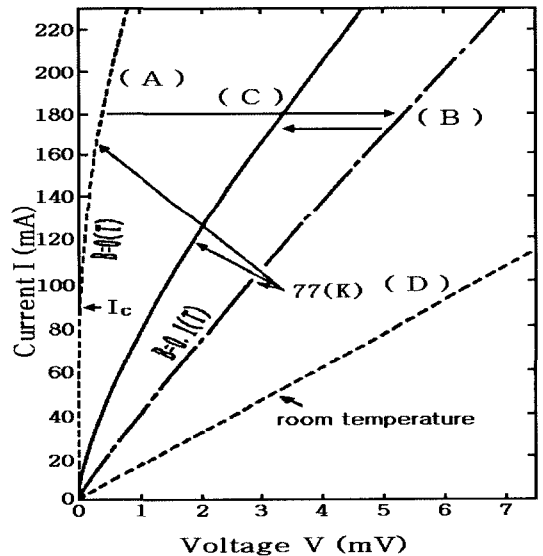


Fig. 1. Current-voltage characteristics of the superconducting ceramics.

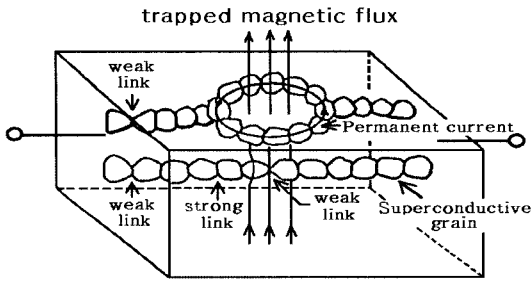


Fig. 2. Model responsible for the occurrence of the voltage.

교하여 상전도 영역이 확장되어 저항성분이 크게 증가한 결과로 사료된다. 상전도 영역이 확장되는 원인으로서는 초전도 시료에 인가되었던 외부 자장으로 인하여 시료에는 자속이 트랩되며 외부 자장을 소거한 이후에도 트랩된 자속에 의하여 초전도 소결체의 약 결합 부분이 초전도 상태에서 상전도 상태로 천이 함으로서 초전도체의 저항값이 증가하게 된다.

그림 2에 필라멘트 형상을 고려한 전압 발생 모델을 나타낸다.

본 연구에서 대상으로 하고 있는 초전도체는 미세한 입자들의 집합체이므로 그림 2에서와 같이 시료내부에는 초전도 입자간의 결합강도가 강한 부분과 약결합 부분이 혼합되어 존재한다. 이러한 초전도 입자는 그림에서 나타내는 것과 같이 양 단자간을 연

결하고 있거나 ring 형태로 연결되어 있는 부분도 존재하는 것으로 생각할 수 있다. 이와 같은 시료에 외부로부터 자계가 인가되면 ring 형태의 결합을 하고 있는 초전도 입자 사이에는 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 천이 되어, 초전도 상태의 단자간을 연결하는 초전도 필라멘트는 분단된다. 결과적으로 초전도 소결체의 단자간에는 전압이 나타나게 되고, 그림 1의 (C)와 같은 특성이 발생하는 것으로 사료된다.

다음으로 이와 같은 초전도체에 트랩된 자속과 약 결합과의 상호작용을 고려한 필라멘트모델을 그림 3에 나타낸다.

그림 중의 × 표시는 초전도체 내부에 포함되어 있는 결합을 나타낸다. 필라멘트의 두터운 부분과 가는 부분은 각각 초전도 입자간의 결합 강도가 강한 부분과 약 결합 부분을 의미한다.

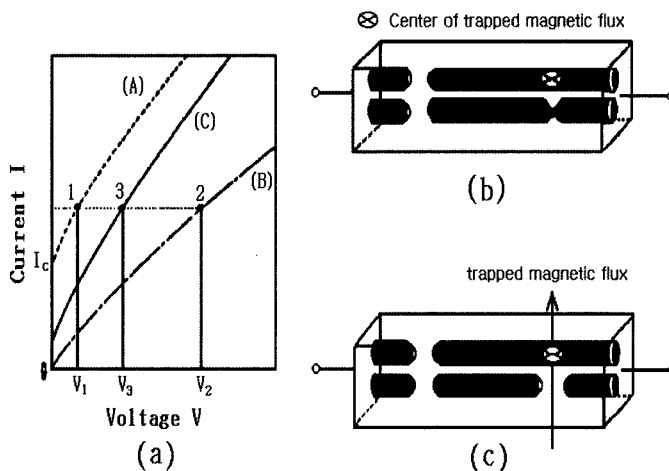
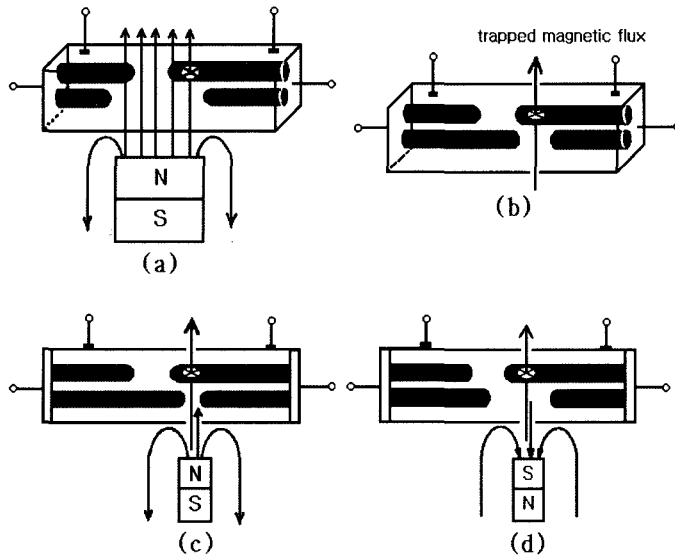


Fig. 3. Graphical explanation of an increase in electrical resistance of superconductor caused by magnetic flux. (a) I-V curve. (b) State of superconducting filament before application of external magnetic field. This state correspond to the point 1 in curve (A). (c) State of superconducting filament correspond to the point 3 in curve (C). Shift of curve(B) is caused by application of external field. This shift yields to the increase in electrical resistance.



**Fig. 4. Definitions of memory by trapping magnetic flux and adding methods of external magnetic field. (a) application of external magnetic field. (b) removal of external magnetic field. (c) application of small external magnetic field of which polarity is same as one of trapped flux.(application of same polarity) (d) application of small external magnetic field of which polarity is opposite as one of trapped flux.(application of opposite polarity)**

그림 3(a)는 그림 2에서 측정된 전류-전압특성을 모식적으로 표현한 모델이다. 그림 3(b)는 특성 (A)의 점1을 나타내는 초전도 시료 내부상태를 설명한다. 그림에서 전압  $V_1$ 이 발생하게 되는 원인으로서 임계전류 이상의 전류가 시료의 일부를 흐르고 있으며 양전극이 초전도 영역만으로 연결되어 있지 않는 점을 들 수 있다. 그림 3(c)는 초전도 시료 내부에 트랩된 자속에 의하여 초전도영역의 일부가 상전도 상태로 변화되는 과정으로서 시료에는 점1의 상태보다 큰 전기 저항이 발생한다. 그러므로 시료 양단에는 전압  $V_1$  보다 큰 값의 전압  $V_3$ 가 발생하게 된다. 트랩된 자속에 의하여 초전도 시료 내부에 전극간을 연결하는 초전도 전류경로의 일부가 파괴되면 외부로부터 자계가 인가되지 않은 상태에도 그림 1(C)와 같은 전압이 발생한다. 그림 1(C)와 같은 특성을 나타내는 초전도 시료에 미소한 외부 자계를 인가한 경우 나타나는 특성의 변화를 측정하였다.

초전도 시료에 자속을 트랩시키기 위하여 0.1 T의 외부 자계를 인가한다. 초전도 시료에 자속이 트랩된 상태에서 시료에 인가되는 미세 자계의 크기는  $10^{-3}$  T 이하로 한다. 자석에 의하여 인가되는 자계는 물론 트랩된 자속에도 방향성이 있으므로 본 논문에서는 자기 메모리 방법 및 미소한 외부 자계의 인

가 방법을 그림 4에서 명확하게 정의한다.

그림 4(a)는 초전도 시료 내부에 존재하는 초전도 전류경로 모델이다. 자속이 통과하지 않는 부분은 초전도 상태(흑색경로)를 나타내며 이외의 영역은 상전도 상태이다. 그림 4(b)는 외부 자계를 소거한 경우이며 자속이 트랩중심에 pinning 되어있다. 본 논문에서는 그림 4(a)와 같이 자석의 N극이 초전도 시료에 근접되어 자기 메모리 된 상태에 대하여 설명하고자 한다. S극이 근접된 경우에도 같은 결과를 나타낸다. 그림 4(c)는 N극으로 자기 메모리 된 초전도 시료에 약한 자계를 발생하고 있는 자석의 N극을 근접시킨 결과이다. 그림 4(d)는 그림 5(c)의 상태와는 반대로서 S극을 인가한 경우이다. 그림 5(a)의 경우가 그림 4(b)보다 상전도 영역이 크게 나타난다. 상전도 영역은 시료를 통과하는 자속의 수가 많을수록 크게 나타나는 것을 의미한다.

그림 5는 그림 4(b), (c), (d)의 전류-전압 특성을 나타낸다. 특성 (b), (c), (d)는 각각 그림 4(b), (c), (d)에 대응한다. 그림에서 초전도시료에서 형성되는 상전도 영역의 크기는 전기저항의 크기와도 비례하며 상전도 영역의 크기는 (d)의 경우가 가장 크게 나타나며, (c)의 경우가 최소가 되는 것을 추론할 수 있다. 즉 (b)상태의 시료에 N극을 인가하면 상전도

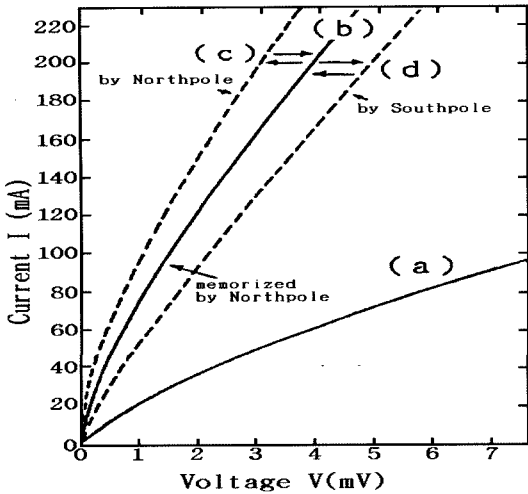


Fig. 5. Schematic I-V curve which correspond to state (a)~(d) in Fig.4 (a) application of external magnetic field. (b) application of small external magnetic field of which polarity is same as one of trapped flux.(application of same polarity) (c) application of small external magnetic field of which polarity is opposite as one of trapped flux.(application of opposite polarity)

영역은 감소되며 초전도 영역이 증가한다. 따라서 시료의 전기저항의 감소를 가져와 (b)의 상태와 비교하여 전류가 흐르기 쉽게되어 (c)의 특성을 나타낸다. (d)의 상태는 저항이 증가하므로 (b)의 특성보다 전류가 흐르기 어려워지므로 (d)의 특성이 된다. 이 경우 외부 자계의 세기가 약하므로 초전도 영역에 진입할 수 없는 것으로 생각된다. 따라서 자속이 시료내부에 트랩 되지 않으므로 외부 자계가 소거된 이후에는 (c), (d)의 특성은 (b)의 특성으로 된다.

그림 5 특성 (b)로부터 (c)와 특성 (b)로부터 (d)로 특성이 천이 되는 메카니즘에 대하여 고찰한다. 초전도 상태에 있는 물질에 외부 자계를 인가하면 자계의 진입을 방해하기 위하여 초전도 시료에는 반자성 전류가 흐르게 된다. 외부 자계의 방향에 따라 반자성 전류에 의하여 초전도체에는 역 방향의 자계가 유기되어 초전도 상태에 있는 물질의 자계는 서로 상쇄되는 결과가 된다. 따라서 초전도 시료에는 외부 자계가 진입하지 않게 된다. 이러한 효과를 근거로 초전도 특성이 (b)에서 (c)로 천이 하는 이유를 고찰한다. 그림 4(c)의 트랩 자속 부분을 확대하여 그림 6에 나타낸다.

그림 6(a)는 초전도 시료에는 자속이 트랩되어 있

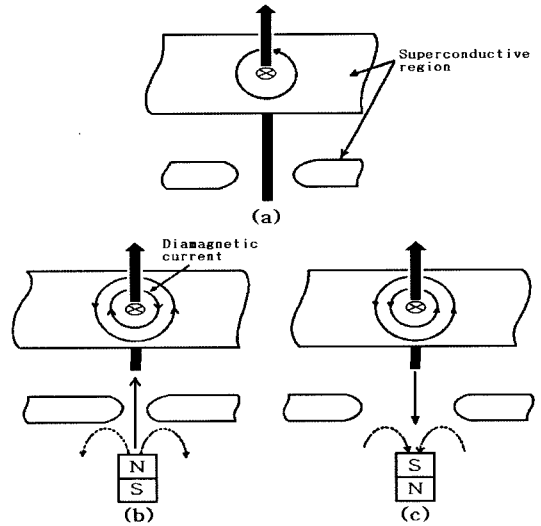


Fig. 6. Mechanism of change in electrical resistance caused by small external magnetic field. (a) zero external magnetic field. (b) application of same polarity. (c) application of opposite polarity.

으며 외부 자계가 인가되지 않은 상태를 의미한다. 그림에서는 초전도 시료에 트랩된 자속을 중심으로 자속 주위를 돌고 있는 전류를 나타내고 있다. 이 전류는 초전도 영역을 흐르고 있으며, 그림 중의 × 표시는 트랩 중심을 의미하며 트랩된 자속에 의하여 인접한 초전도 필라멘트가 분단되어 있다. 분단된 영역은 상전도 상태가 되며 이 영역이 초전도 시료의 저항을 크게 하고 있다. 이 상태에서 측정된 전류-전압 특성은 그림 5의 특성 (b)가 된다. 분단된 영역의 간격이 더욱 확장되면 시료의 저항은 증가하여 그림 5(d)의 특성이 되며 반대로 간격이 축소되면 그림 5(c)의 특성이 된다.

그림 5(c)에서 제시한 자기 방향과 같은 방향의 미세한 자계를 초전도 시료에 인가한 경우 그림 6(b)와 같은 실험조건이 된다. 이 경우 외부 자계를 진입시키지 않기 위하여 초전도 시료에는 반자성 전류가 흐르게 되어 트랩된 자속의 주위를 돌고 있는 전류는 감소한다. 그러므로 트랩된 자속에 의하여 발생하는 자계는 약화되어 초전도 필라멘트의 분단부분의 폭은 더욱 감소하게 된다. 따라서 초전도 시료의 저항값은 감소하여 시료의 전류-전압 특성은 그림 5(c)가 된다.

다음으로 같은 방향의 자계를 0으로 한 경우에는

초전도체의 반자성 전류는 소실되어 특성은 그림 5(b)로 된다. 반대의 자기방향을 인가하였을 경우에는 초전도체를 흐르는 반자성 전류는 트랩된 자속의 주위를 돌고있는 전류와 같은 방향으로 되어 트랩된 자속에 의한 자계의 증가를 가져와 인접한 초전도 필라멘트의 절단부분의 쪽이 더욱 증가하게 된다. 결과적으로 시료의 저항값은 증가하여 시료의 전류-전압 특성은 그림 5(b)에서 (d)로 천이 된다. 자극의 인가 방향의 on과 off 특성에 따라 전류-전압 특성도 그림 5(b)와 (d)사이를 천이 하게 된다.

#### 4. 결 론

0.1 T의 비교적 강한 자계에서 자기 메모리된 초전도체의 전기적 특성을 조사하였다. 자기 메모리의 원인으로 사려되는 자속 트랩을 고정하여두고 외부 자계의 극성에 변화를 주면 임계전류치 이상의 전류가 흐르고 있는 고 전류 영역에서는 자계의 극성에 따라 초전도체의 전기저항이 증가하고 감소하는 현

상을 고찰하였다.

초전도 시료에 트랩된 자속으로 인하여 발생하는 자계와 같은 방향의 외부 자계가 인가되면 트랩된 자속의 실효값이 감소하여 상전도 상태에 있는 영역의 일부가 초전도 상태로 천이 되어 초전도체의 전기저항이 감소하는 현상을 정성적으로 설명하는 모델을 제안하였다. 또한 이 모델에 적용하면 초기 자계와 반대방향의 외부 자계를 인가하면 초전도체의 전기저항이 증가하는 현상의 정성적인 해석도 가능하다.

#### 참고문헌

1. J. G. Bednorz and K. A. Muller: Z. Phys. **B64** (1986) 189.
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** (1989) 908.
3. H. Maeda, Y. Tanaka and M. Hukutomi: Jpn. J. Appl. Phys., **27** (1988) 209.