# YBaCuO계 초전도소결체 자기소자

이 상헌

선문대학교 공과대학 전자정보통신공학부

# Preparation of Magnetic Field Sensor with YBaCuO Superconducting Ceramics

Sang Heon Lee
Department of Electronics Information Communication Engineering
Sun Moon University

email : shlee@omega.sunmoon.ac.kr

ABSTRACT - A magnetic field sensor is fabricated with superconducting ceramics of Y-Ba-Cu-O system. The prepared material shows the superconductivity at about 95K. The sensor at liquid nitrogen temperature shows the increase in electrical resistance by applying magnetic field. Actually, the voltage drop across the sensor is changed from zero to a value more than 100$\mu$V by the applied magnetic field. The change in electrical resistance depends on magnetic field. The sensitivity of this sensor is 2.9 ohm/T. The sensing limit is about $1.5\times10^{-5}$T($=1.5\times10^{-1}$G). The increase in electrical resistance by the magnetic field is ascribed to a modification of the Josephson junctions due to the penetrating magnetic flux into the superconducting material.

## 1. 서 론

종래의 금속계 초전도체를 이용한 자기 검출소자로는 초전도 양자간섭 소자(Superconductive Quantum Interference Device, SQUID)가 있다. [1],[2],[3] 이것은 Josephson 접합을 응용한 장치로서, 검출 분해능이 $10^{-14}$T 이하가 되며, 이는 현재 최고의 검출 분해능이다. 그러나 Josephson 접합을 형성하기 위해서는 약 10nm 두께의 절연 층이 필요하다. 더우기 금속계 초전도체를 이용한 SQUID는 일반적으로 극저온(4K)에서 사용되므로, 접합부분의 온도변화는 실온에서부터 4K까지 현저하게 변화하므로, 절연막이 열 또는 기계적 스트레스를 받아 박리현상이나 균열등으로 인하여 파괴되기 쉽고 극저온하에서 고가의 장치를 필요로 하는 단점이 있다. 그러나 베드로노르즈와 뮬러에 의해 산화물에서 고온 초전도성의 가능성이 발견되고[4], 액체질소 온도 이상의 임계온도를 갖는 이트륨계 산화물(YBaCuO)이 발견된 이래로[5], 비스무스계, 타륨계, 수은계 산화물 초전도체등 임계온도가 높은 물질들이 계속 발견되었지만, 아직도 이트륨계 산화물 초전도체는 계속 적지않은 관심하에 연구가 되고 있다. 이트륨계 산화물 초전도체는 초전도 상태가 비교적 안정되며, 금속계 초전도와 비교하여 간단한 장치를 이용하여 초전도 현상의 관측이 가능한 기술적 이점이 있다. 이러한 이트륨계 산화물 초전도체는 란탄(La), 스트론튬(Sr), 이트륨(Y), 비스무스(Bi), 바륨(Ba), 및 구리(Cu)의 산화물을 균일하게 혼합하여 성형 가공한 것을 950℃ 전후에서 소성하는 방법으로 제작된다. 이와 같은 방법으로 제작된 산화물의 표면에는 요철이 생기기 쉽고, 표면에 수 10nm 두께의 절연 막을 균일하게 제작하는 것이 매우 어려운 작업이다. 따라서 안정된 Josephson접합의 형성이 어려우며 이 때문에 임계 온도가 액체질소 온도(77K)보다 높은 이점은 있으나 SQUID가 실현되지 않는 이유가 된다.

본 연구의 목적은 산화물계 제2종 초전도체의 특징을 효과적으로 이용하여 Josephson접합을 필요로 하지 않는 자기검출 소자를 개발하는데 있다.

## 2. 실험방법 및 결과고찰

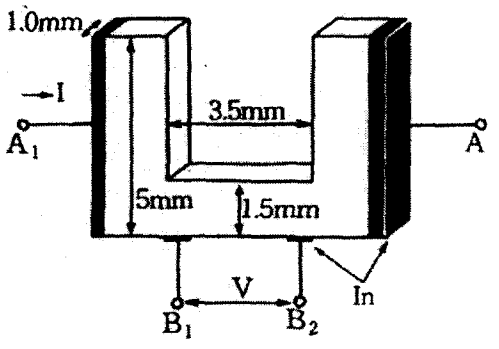


Fig.1. The geometrical structure of the magnetic field sensor. Indium is used as the electrode material.

Fig.1은 자기검출에 이용한 소자의 구조를 나타낸다. 외측단자 $A_1$과 $A_2$에 전류 I를 흘리고 내측 단자 $B_1$과 $B_2$사이의 전압강하 V를 측정한다. 각각의 단자를 전류단자( $A_1-A_2$ )와 전압단자( $B_1-B_2$ )라고 한다. 소자는 凹형으로 가공하여 전압단자 부분의 전류밀도를 높게하였다. 그리하여 자계의 인가에 의해서 용이하게 초전도상태에서 상전도 상태로 천이하기 쉽게하고

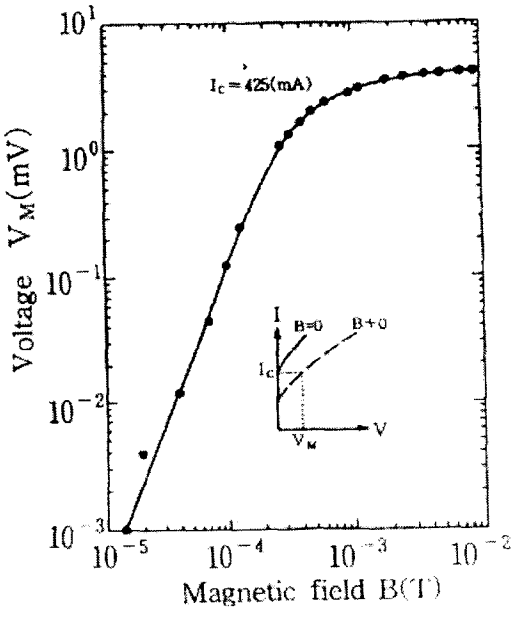


Fig.2. Current-voltage chracteristics of the magnetic field senosr at 300K and 77K

그 부분에 있어서 전기저항이 자계에 의해 크게 변화하는 현상이 기대된다. 전극은 인듐(In)으로 형성하였다.

Fig. 1의 소자에 외부 자계를 인가하면서 소자의 전류-전압특성을 측정하였다. Fig. 3은 $A_1-A_2$단자간에 흐르는 전류 I와 $B_1-B_2$단자간에 발생하는 전압강하V의 관계를 측정한 결과로서 300K에서의 전류-전압특성은 ohm성을 보이며 전기저항은 약 0.067Ω이 되었다. 소자의 온도가 액체질소 온도 77K가 되면 300K에서의 특성으로부터 현저하게 변화한다. 77K에서 측정된 곡선에 있어서, 전류치가 0.425A까지는 $B_1-B_2$단자간에 전압이 발생하지 않는다. 즉 0.425A보다 전류치가 높아지면 전압강하는 적은 수치이나 관측되기 시작한다.

이러한 전압강하의 발생은, 소자에 흐르는 전류와 이로 인해 발생되는 자계의 상호작용으로 인하여 초전도 상태의 파괴, 즉 일부의 영역이 초전도 상태로부터 상전도 상태로 천이되는 현상에 기인한 것으로 생각된다. 소자에 흐르는 전류치

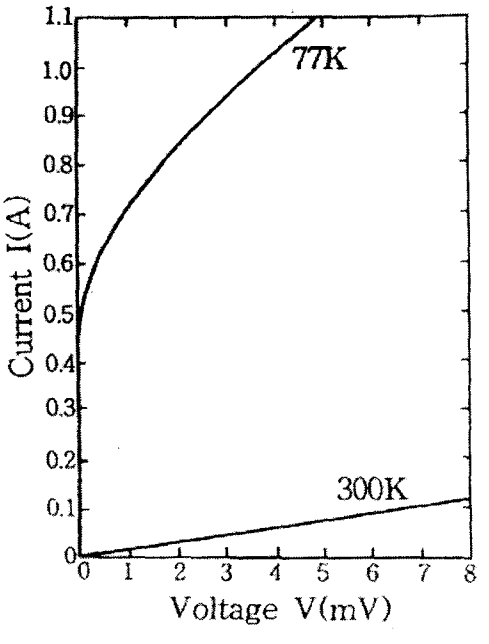


Fig.3. The dependence of $V_M$ on the density of magnetic flux B. Symbols $I_C$ and $V_M$ are explained in the figure as inserted.

로서 $I_C$를 유지하면서 전류경로에 대하여 수직으로 외부 자계를 인가하면 $B_1-B_2$단자간에서 전압강하(본 논문에서는 $V_M$라고 표기한다)가 발생하게 된다. Fig. 3는 외부 자계 인가에 따른 자속밀도 B에 대한 $V_M$의 변화를 나타낸 결과이다. Fig. 3중의 삽입도는 $I_C$ 와 $V_M$의 의미를 정의하고 있다.

자속 밀도가 $2\times10^{-3}$ T 까지는 전압강하의 증가분 $V_M$은 자계를 제거함과 동시에 자계를 인가하기 이전의 상태로 되돌아온다. 그러나 $2\times10^{-3}$ T 이상의 자속밀도 영역에서는 외부 자계를 제거하여도 전압강하는 0이 되지 않는다. Fig. 3의 곡선으로 부터, 자속밀도가 $3\times10^{-4}$ T 이하에 있어서 $V_M$의 증가는 자속밀도 B에 대

하여 $V_M \propto B^{2.5}$의 관계로 증가하나, $3\times10^{-4}$ T 보다 크게 되면 $V_M$은 포화되는 경향을 알 수 있다. $V_M$의 포화치는 4mV가 된다. $V_M \propto B^{2.5}$의 관계가 성립되는 영역에서 $10^{-4}$T(=1G)의 자속밀도의 자계를 인가하면, $V_M$은 약 125$\mu$V가 된다. 한편 1$\mu$V의 출력으로는 약 $1.5\times10^{-5}$ T의 자기가 검출된다. 이 값은 지구자기와 비교해서 거의 같은 정도의 세기를 나타낸다.

$I_C$를 0.425 A 로 일정하게 했을 때 $V_M$이 125$\mu$V이므로, 전기저항은 자계인가에 의하여 0으로부터 $2.9\times10^{-4}$ Ω 으로 증가된 결과가 되며, 자속밀도의 변화에 의한 전기저항의 변화는 2.9 Ω /T 이다. 현재까지 Sharp(日)사가 발표한 자기센서에 있어서 외부 자계 인가에 의한 전기저항의 변화는 $8\times10^{-2}$ Ω/T 에 불과하다.[7] 그러므로 본 연구에 얻는 결과는 같은 종류의 YBaCuO계 물질의 소결체로 제작된 자기센서중 가장 좋은 특성을 보인다.

자계인가에 의해서 초전도체에는 전압이 출력되나, 그 메카니즘에 대하여는 다음과 같이 생각할 수 있다.

제2종 초전도체에서 나타나는 외부 자계에 의한 초전도체 내부의 자속 전계로 하고 있다. 산화물 초전도체에는 결정입계가 다수 존재하며, 결정입계에 의해서 Josephson접합이 형성되어 있다고 생각된다. 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 자계의 강도가 커짐에 따라 Josephson 접합에서 전압이 발생되므로 전압이 발생하는 접합수가 증가하게 된다. 따라서 단자간에서 전압이 발생하므로 초전도 시료에는 저항이 나타나며 자계의 증가에 의하여 저항이 증가하게 된다. 자기감도를 더욱 향상시키는 것은 앞으로의 연구 과제이나, 초전도 자기 센서에 임계전류를 인가하는 조건에 있어서 자계에 의하여 발생하는 전압 $V_M$ 은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.[7]

$$V_M = \rho \cdot \frac{L}{S} \cdot I_C = \rho \cdot L \cdot J_C \quad ----(1)$$

$\rho$는 자계를 인가하였을 때 나타나는 시료의 비저항에 대응하는 물리량이며 L은 시료의 길이, S는 시료의 단면적, $I_C$는 임계전류, $J_C$는 임계전류밀도가 된다. (1)식에서 자기감도를 향상시키기 위해서는 우선 L을 길게 할 필요가 있다. 이점은 소자를 박막으로 제작하여 집적회로 기술에 적용하면 실효 척도의 길이를 길게 할 수 있으므로 시료의 길이는 극복할 수 있다. 다음으로 $\rho$와 Jc를 크게 할 필요가 있는데, $\rho$와 Jc는 산화물 초전도체의 결정입자 크기, 결정입계의 결합강도, 결정입자의 초전도특성에 크게 의존하는 것으로 생각된다. 이점은 산화물 초전도체의 제작조건과도 밀접하게 관계되는 사항으로서 재료분말의 입자 크기, 분말의 혼합정도등 여러 제작 조건을 상세히 검토하여 초전도체를 제작함으로써 초전도체의 최적조건을 찾아낼 필요성이 있다.

## 3. 결 론

본 연구에서 제작한 YBaCuO계 산화물 초전도체는 약 95K이하에서 Meissner효과에 의한 자기부상과 전기저항이 0이 되는 완전 전도성을 보인다. 4단자 구조를 갖는 소자에 임계전류를 흘리면서 자계를 인가하면, 전압단자간에서 전압이 출력된다. 이러한 전압의 자기특성을 검토한 결과 비교적 고도의 자기센서로서 사용할 수 있으며 $10^{-5}$T정도까지는 용이하게 자기를 측정할 수 있는 결과를 얻었다.

이점은 같은 물질로 제작된 자기센서보다 약30배의 감도가 좋은 결과를 나타내었다. 자계인가에 의해 전압이 발생하는 메카니즘으로서 YBaCuO계 산화물 초전도체의 결정입계를 Josephson접합과 대응시켜 결정입계가 접합의 직렬, 병렬접속회로 모델로 검토될 수 있는 가능성을 설명하였다. 또한 자기감도를 더욱 향상 시킬 수 있는 방법에 대하여 기술하였다.

## [참 고 문 헌]


[1] J. Lambe, A. H. Silver, J. E. Mercereau, R. C. Jakleric : Phys. Lett, 11, 16 (1968)

[2]P. W, Anderson, A. H. Dayen : Phys. Rev. Lett. 13, 195 (1964)

[3] B. D. Josephson : Adv. Phys. 14, 251 (1962)

[4] J. G. Bednorz, K. A. Muller : Z. Phys B64, 189 (1986)

[5] C. W. Chu, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huan, Y. Q. Wang : Phys. Rev. Lett, 58, 405 (1987)

[6] NIKKEI NEW MATERIALS 34, 24 (1987)

[7] S. Tsuchimoto, S. Kataoka, H. Shintake : IEDM Tech. Digest, 867 (1992)