

세라믹 자성 센서 제조기술에 관한 연구

이상헌, 이성갑*

(선문대학교 전자정보통신 공학부, 서남대학교 전기전자멀티미디어공학부*)

Study on the Ceramics Magnetic Sensor Fabrication Technology

Sang-Heon Lee, Sung-Gap Lee*

Department of Electronics Information Communications Engineering Sun Moon University,

Department of Electronics and Electrical Engineering, Seonam University*,

Abstract

A magnetic field sensor is fabricated with superconducting ceramics 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 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.

Key word : magnetic field sensor, ceramics, superconducting material.

1. 서론

종래의 금속계 초전도체를 이용한 자기 검출소자로는 초전도 양자간섭 장치(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, 절연 막이 열 또는 기계적 스트레스를 받아 박리현상이나 균열등으로 인하여 파괴되기 쉽고 극저온하에서 고가의 장치를 필요로 하는 단점이 있다. 그러나 베드로노르즈와 플러에 의해 산화물에서 고온 초전도성의 가능성이 발견되고4), 액체질소 온도 이상의 임계온도를 갖는 이트륨계 산화물(YBaCuO)

이 발견된 이래로5), 비스무스계, 탈륨계, 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 산화물계 초전도체는 란탄(La), 스트론튬(Sr), 이트륨(Y), 비스무스(Bi),바륨(Ba), 및 구리의 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 것은 매우 어려운 작업이다. 이 때문에 임계 온도가 액체질소의 비등점(77K)보다 높은 온도적 이점은 있으나 안정된 Josephson 접합의 형성이 어려우므로 산화물 초전도체로 SQUID가 실현되지 않는 이

유가 된다.

본 연구의 목적은 산화물계 제2종 초전도체의 특징을 효과적으로 이용하여 Josephson접합을 필요로 하지 않는 자기검출 소자를 개발하는데 있다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 초전도재료의 제작 방법과 소자의 구조에 대하여 기술한다. 제3장에서는 본 연구의 주목적인 초전도체의 자기특성에 대하여 고찰한다. 제4장에서는 결론으로서 본 연구에서 개발된 자기검출 소자의 기대효과에 대하여 설명한다.

2. 실험방법

본 연구에서 사용된 초전도체의 원료는 산화이트륨(Y_2O_3), 탄산바륨($BaCO_3$), 산화제2동(CuO)이다. 초전도체의 제작과정은 다음과 같다.

- (1) Y_2O_3 0.6g, $BaCO_3$ 1.5g 및 CuO 1.0g의 비율로 정량한다.
- (2) 상기의 재료를 막자사발에서 1시간 혼합한다.
- (3) 혼합한 재료를 약 $960^\circ C$ 에서 20시간 소성한다.
- (4) 소성한 재료중에서 녹색부분을 제거하여, 흑색부분만을 분말로 한다.
- (5) (4)에서 형성된 분말을 펠렛상으로 성형한다.
- (6) 펠렛을 약 $960^\circ C$ 의 전기로에서 10시간 소결한다.
- (7) $400^\circ C$ 까지 서냉한다.
- (8) $400^\circ C$ 에서 24시간 열처리한다.
- (9) 실온까지 냉각한다.

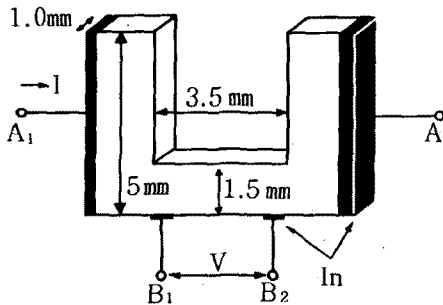


Fig.1 The geometrical structure of the magnetic field sensor. Indium is used as the electrode material.

이상의 공정으로 초전도체가 완성된다. 또한 (1)

에서 (9)까지의 공정은 공기 중에서 수행하였다. 완성된 시료는 반경 0.5cm, 두께 0.1cm의 흑색 원반형의 형태를 하고 있으나 가공하여 Fig.1과 같은 4자형의 시료를 제작하였다.

Fig.1은 자기검출에 이용한 소자의 구조를 나타낸다. 외측단자 A1과 단자 A2에 전류 I를 흘리고 내측 단자 B1과 B2사이의 전압강하 V를 측정한다. 각각의 단자를 전류단자 ($A_1 - A_2$)와 전압단자($B_1 - B_2$)라고 한다. 본 실험에서는 소자의 일부를 4자형으로 가공하여 전압단자 부분의 전류밀도를 높게 하였다. 그리하여 자계의 인가에 의해서 용이하게 초전도상태에서 상전도 상태로 천이하기 쉽게 하고 그 부분에 있어서 전기저항이 자계에 의해 크게 변화하는 현상이 기대된다. 전극은 인듐(In)으로 형성하였다.

3. 결과 및 고찰

일반적으로 초전도상태의 발생을 확인하는 방법으로는 2가지 방법이 이용된다. 하나는 온도저하에 의해 전기저항이 0이 되는 현상을 확인하는 방법이며, 다른 하나는 Meissner효과에 의한 자기부상을 확인하는 방법이다. Fig. 1에서 설명한 바와 같이

$A_1 - A_2$ 단자 사이에 전류 I를 흘리면서 $B_1 - B_2$ 단자간에서 발생하는 전압 V를 측정한다. 전류에 대한 전압의 비, 즉 V/I 는 단자 B_1 과 단자 B_2 에 사이의 전류경로에서 발생하는 전기저항 R이 된다. Fig. 2는 온도를 저하시키면서 시료의 전기저항 R의 변화를 측정된 결과이다. Fig. 2를 보면 소자의 주위온도가 95K부근이 되면 전기저항이 급격히 감소하여 0이 되는 현상을 확인 할 수 있었다. 본 논문에서는 특히 사진으로 제시하지 않으나 약 0.15T의 자속 밀도를 보유하는 영구자석 위에 소자를 두고 액체질소로 냉각시킨다. 온도가 95K이하가 되면 시료가 부상하는 현상을 확인할 수 있었다. 또한 95K 이하로 냉각한 후 시료를 영구자석 위에 놓아도 자기부상이 확인되었다. 전기저항이 0이 되는 완전 전도성과 자기부상으로 설명되는 Meissner효과가 확인 되었으므로 본 연구에서 제작된 산화물 재료는 초전도 상태를 만족하는 재료로 판단되었다.

본 실험에서는 Fig. 1의 소자에 외부 자계를 인가하면서 소자의 전류-전압특성을 측정하였다. Fig. 3은

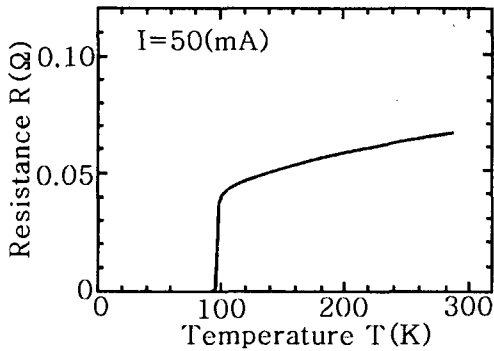
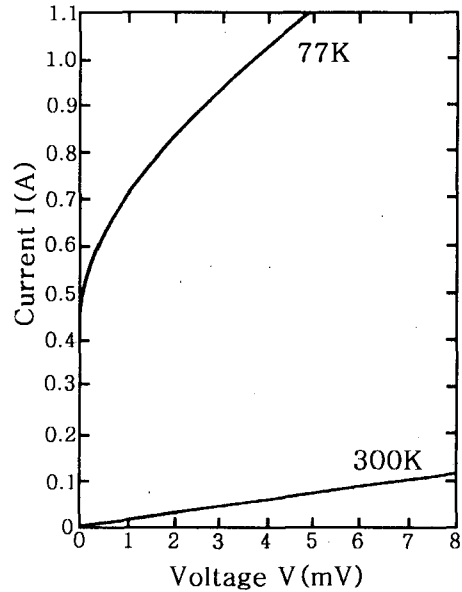


Fig.2 The temperature dependence of electrical resistance of the magnetic field sensor.

A1 - A2 단자간에 흐르는 전류 I와 B1 - B2 단자간에 발생하는 전압강하V의 관계를 측정한 결과로서 300K에서의 전류-전압특성은 ohm성을 보이며 전기저항은 약 0.067Ω이 되었다. 소자의 주위 온도가 액체질소 온도 77K가 되면 300K의 특성으로부터 현저하게 변화한다. 77K에서 측정된 곡선에 있어서, 전류치가 0.425A까지는 전압이 단자간에 발생하지 않는다. 즉 0.425A보다 전류치가 높아지면 전압강하는 적은 수치가나 관측되기 시작한다.

이러한 전압강하의 발생은, 소자에 흐르는 전류와 이로 인해 발생하는 자계의 상호작용으로 인하여 초전도 상태의 파괴, 즉 일부의 영역이 초전도 상태에서 상전도 상태로 천이 되는 현상에 기인한 것으로 사료된다. 전압강하가 발생되지 않는 경우의 최대전류를 임계 전류(본 논문에서는 I_C 로 표기한다)라고 한다. 소자를 흐르는 전류치로서 I_C 를 유지하면서 전류경로에 대하여 수직으로 외부 자계를 인가하면 B1 - B2 단자간에서 전압강하(본 논문에서는 V_M 라고 표기한다)가 발생하게 된다. Fig. 4는 외부 자계 인가에 따른 자속밀도 B에 대한 V_M 의 변화를 나타낸 결과이다. Fig. 4중의 삼입도는 I_C 와 V_M 의 의미를 정의하고 있다.

자속 밀도가 2×10^{-3} T까지는 전압강하의 증가분 V_M 은 자계를 제거함과 동시에 자계를 인가하기 이전의 상태로 되돌아온다. 그러나 2×10^{-3} T 이상의 자속밀도 영역에서는 외부 자계를 제거하



Abstract
Fig.3 Current-voltage characteristics of the magnetic field sensor at 300K and 77K

여도 전압강하는 0이 되지 않는다. Fig. 4의 곡선으로부터, 자속밀도가 3×10^{-4} T 이하에 있어서 V_M 의 증가는 자속밀도 B에 대하여 $V_M \propto B^{2.5}$ 의 관계로 증가하나, 3×10^{-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 125μV가 된다. 한편 1μV의 출력으로는 약 1.5×10^{-5} T의 자기가 검출된다. 이 값은 지구자기와 비교해서 거의 같은 정도의 세기를 나타낸다.

I_C 를 0.425 A로 일정하게 했을 때 V_M 이 125 μV이므로, 전기저항은 자계인가에 의하여 0으로부터 2.9×10^{-4} Ω으로 증가된 결과가 되며, 본 연구에 있어서 자속밀도의 변화에 의한 전기저항의 변화는 2.9 Ω/T 이다. Sharp(日)로부터 공표된 자기센서에 있어서 외부 자계 인가에 의한 전기 저항의 변화는

$8 \times 10^{-2} \Omega/T$ 에 불과하다. 그러므로 본 연구에 얻는 결과는 같은 종류의 YBaCuO계 물질의 소결체로 제작된 Sharp(日)의 자기센서와 비교하여도 매우 좋은 특성을 보인다.

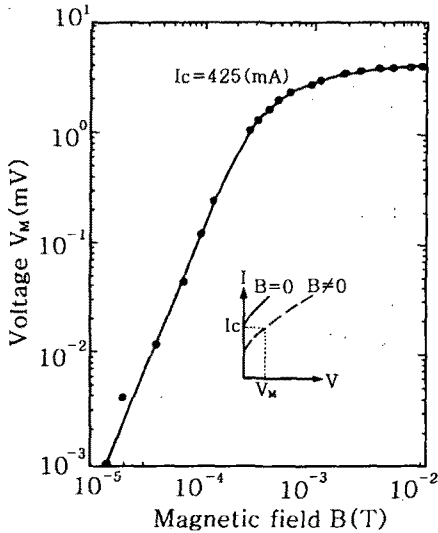


Fig. 4 The dependence of V_M on the density of magnetic flux B . Symbols I_C and V_M are explained in the figure as inserted.

자계인가에 의해서 초전도체에는 전압이 출력되나, 그 메카니즘에 대하여는 다음과 같은 현상이 사료된다.

이하 본 논문에서는 제2종 초전도체에서 나타나는 외부 자계에 의한 초전도체 내부의 자속 진입을 전계로 하고 있다. 산화물 초전도체에는 결정입계가 다수 존재하며, 결정입계에 의해서 Josephson접합이 형성되어 있다고 사료된다. 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 Josephson접합에서 전압이 발생되기 시작하는 것처럼 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 과제

이나, 이점에 대하여 고찰하여 보면 초전도 자기 센서에 임계전류를 인가하는 조건에 있어서 자계에 의하여 발생하는 전압 V_M 은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

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

ρ 는 자계를 인가하였을 때 나타나는 시료의 비저항에 대응하는 물리량이며 L 은 시료의 길이, S 는 시료의 단면적, I_C 는 임계전류, J_C 는 임계전류 밀도가 된다. (1)식에서 자기감도를 향상시키기 위해서는 우선 L 을 길게 할 필요가 있다. 이점은 소자를 박막으로 제작하여 집적회로 기술에 적용하면 실효척도의 길이를 길게 할 수 있으므로 시료의 길이는 극복할 수 있다. 다음으로 ρ 와 J_C 를 크게 할 필요가 있는데, ρ 와 J_C 는 산화물 초전도체의 결정입자 크기, 결정입계의 결합강도, 결정입자의 초전도특성에 크게 의존하는 것으로 사료된다. 이점은 산화물 초전도체의 제작조건과도 밀접하게 관계되는 사항으로서 재료분말의 입자 크기, 분말의 혼합정도 등 여러 제작 조건을 상세히 검토하여 초전도체를 제작함으로써 초전도체의 최적조건을 찾아낼 필요성이 있다.

4. 결론

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 $10^{-5}T$ 정도까지는 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, 병렬접속 회로 모델로 검토될 수 있는 가능성을 설명하였다. 또한 자기감

도를 더욱 향상시킬 수 있는 방법에 대하여 기술하였다.

참고문헌

- [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] J. G. Bednorz, K. A. Muller : Z. Phys B64,189(1986)
- [4] C. W. Chu, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huan, Y. Q. Wang : Phys. Rev. Lett 58, 405(1987)
- [5] NIKKEI NEW MATERIALS 34, 24(1987)