

## BiPbSrCaCuO 초전도 자기검출소자

### Magnetic Field Sensor using BiPbSrCaCuO Superconductor

이상현\*, 이성갑\*\*, 이영희\*\*\*

(Sang Heon Lee\*, Sung Gup Lee\*\*, and Young Hie Lee\*\*\*)

#### Abstract

The magnetic field sensor was fabricated with superconducting ceramics of BiPbSrCaCuO system. The sensor at liquid nitrogen temperature showed the increase of electrical resistance by applying magnetic field. Actually, the voltage drop across the sensor was changed from zero to a value more than 100  $\mu$ V by the applied magnetic field. The change of electrical resistance depended on magnetic field. The sensitivity of this sensor was 2.9  $\Omega$ /T. The sensing limit was about  $1.5 \times 10^{-5}$  T. The increase of electrical resistance by the magnetic field was ascribed to a modification of the Josephson junctions due to the penetrating magnetic flux into the superconducting material. Considering the observed properties of the superconductor with trapped magnetic flux, a magnetic sensor was fabricated to detect simultaneously both the intensity and the direction of the magnetic field.

**Key Words** : BiPbSrCaCuO superconductor, Magnetic field, Magnetic field sensor

#### 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 디바

이스의 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 자기적 현상을 효과적으로 이용하여, 고가의 장비를 필요로 하지 않는 간이형 자기검출소자를 도출하는데 있다.

\* : 선문대학교 전자정보통신공학부  
(아산시 탕정면 갈산리 100)  
Fax : 041-530-2910

Corresponding Author : shlee@email.sunmoon.ac.kr)

\*\* : 서남대학교 전기전자멀티미디어공학부

\*\*\* : 광운대학교 전자재료공학과

2002년 10월 11일 접수, 2002년 11월 18일 1차 심사완료,  
2002년 12월 24일 2차 심사완료, 2003년 2월 4일 최종 심사완료

#### 2. 실험 방법

시료는 99.9% 순도의 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, PbO, SrCO<sub>3</sub>,

CaCO<sub>3</sub>와 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 Bi : Pb : Sr : Ca : Cu = 1.84 : 0.34 : 1.92 : 2.03 : 3.06을 선택하였다. 혼합된 분말은 840°C에서 24시간 하소하였다. 하소된 분말은 알루미늄이나 막자사발에서 분쇄한 후 원판형 시료를 만들었다. 이 시료들은 830-850°C 공기중에서 100시간 소결하였다. 완성된 시료는 직경 15mm, 두께 1mm의 흑색 원판형을 하고 있다. 소자는 凹형으로 전압단자가 위치하는 부분을 오목하게 가공하여 전압단자 부분의 전류밀도를 높게 하였다. 그리하여 시료에 전류를 흘리거나, 외부로부터 자계를 인가함으로써 초전도 상태에서 상전도 상태로 천이하기 쉽게 하고 그 부분에 있어서 전기저항이 자계에 의하여 크게 변화하는 현상이 기대된다. 전류 및 전압 단자는 접촉저항을 줄이기 위하여 In을 전극 재료로 사용하였고, 리드선은 약 0.08mm $\phi$ 의 구리선을 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

본 연구에서 제작한 BiPbSrCaCuO계 초전도시료의 전류-전압특성의 결과를 그림1에 나타낸다.

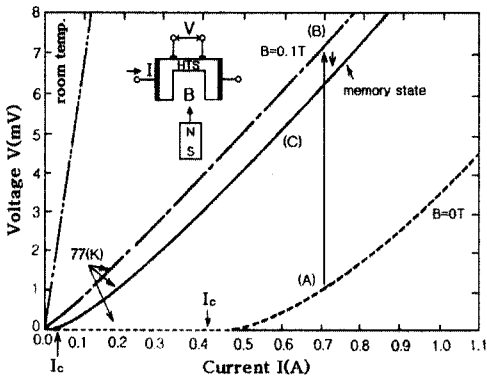


그림 1. BiPbSrCaCuO 초전도체의 전류-전압특성.  
Fig. 1. Current-voltage characteristics of BiPbSrCaCuO superconductor.

특성(A)는 외부로부터 자계를 인가하지 않는 경우의 특성이며, 저항값은 0.067 $\Omega$ 이 된다. 액체질소

온도에서는 전류가 425mA 까지 전압강하가 관측되지 않으나, 임계전류( $I_c=425mA$ ) 보다 큰 전류를 인가하면 초전도 시료의 양단에서는 전압이 발생한다. 이것은 초전도체를 흐르는 전류와 더불어 발생한 자계로 인하여 초전도영역의 일부가 상전도영역으로 천이된 결과로 생각된다. 시료의 주위온도를 77K로 하고 그림1의 삽입도에서와 같이 BiPbSrCaCuO계 초전도시료에 외부로부터 0.1 T의 자계를 인가하면 특성 (A)는 일점체선으로 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 동적점운 (C)의 특성을 나타낸다. 이러한 자기현상은 초전도 시료가 77K를 유지하는 한 지속되나, 시료를 일단 상온으로 되돌려 상전도 상태로 하면 소거된다. 그러나 초전도 시료를 77K로 냉각하여 외부 자계를 인가한 후에는 다시 특성(C)가 얻어져 자기 특성이 재현된다. 이러한 자기 현상은 자석의 N극과 S극에 대하여도 같은 정도로 발생하게 된다.

자계인가에 의해서 초전도체에는 전압이 출력되나, 그 메커니즘에 대하여는 다음과 같이 생각할 수 있다. 고온초전도체는 다결정 입체로 구성되며, 이들 많은 입체는 초전도의 약결합으로 가정할 수 있다. 인가되는 자계가 작을 경우는 초전도 전류는 Josephson 효과에 의해 약결합을 저항이 발생하지 않는 상태로 통과할 수 있다. 그러나, 어느 일정한 값 이상의 자계가 인가되면, 초전도 전류는 이들 약결합을 저항 0의 상태로 통과할 수 없게 되어 저항이 발생하게 된다. 이 원인으로 다음과 같은 요소가 생각된다.

- (i) 자계에 의한 약결합 부분의 초전도 상태 변화
- (ii) 자계에 의한 초전도 상태의 coherence 길이 감소.
- (iii) 자계에 의하여 유기된 차폐 전류에 의한 약결합 파괴.
- (iv) 전류에 의하여 유기된 내부전계가 (i), (ii)에 미치는 영향.

이러한 요소에 대한 상세한 검토는 앞으로 연구를 계속 진행하여 규명해 갈 필요가 있다.

앞에서 설명한 바와 같이 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 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.

외부 자계의 인가에 의한 초전도 시료의 전압  $V_{MAG}$ 의 변화와 인가되었던 외부 자계를 소거한 후 발생하는 전압  $V_{MEM}$ 의 관계를 그림2에 나타낸다.  $I_c = 425mA$ 의 조건에서 측정하였다.

이 결과로부터 약  $2 \times 10^{-3} T$  이하의 자계에서는 자기적 특성이 발생하지 않는다. 즉  $2 \times 10^{-3} T$  이하의 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  $2 \times 10^{-3} T$  이상의 자계를 소거한 후 시료에서 발생하는 전압  $V_{MEM}$ 은 급격히 증가하고 약  $10^{-2} T$ 에서 포화된다.

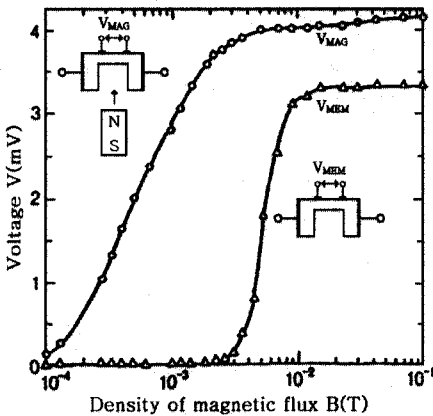


그림 2. 온도 77K에서 인가된 외부자계로 인하여 발생하는 전압 의존성.

Fig. 2. Dependences of the voltage V on externally applied magnetic field at 77K.

이 결과로부터 외부 자계로 인하여 시료의 초전도영역의 일부가 상전도 영역으로 천이 되어 시료를 흐르는 전류가 저항을 감지하는 것으로 생각되

며 외부 자계가  $2 \times 10^{-3} T$  이하에서는 자계를 소거하면 자계에 의하여 형성되었던 상전도 영역이 원래의 초전도영역으로 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.

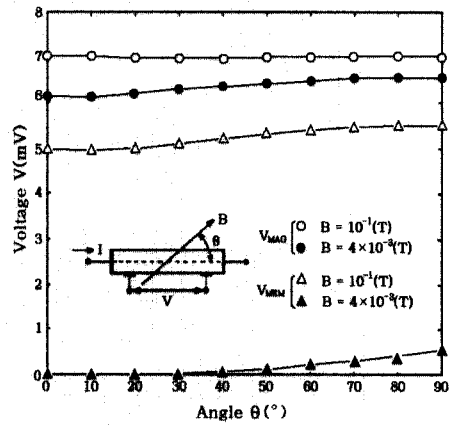


그림 3. 시료에 인가된 외부 자계와 시료를 흐르는 전류와의 각도에 의한 전압 의존성.

Fig. 3. Dependence of the voltage on the angle  $\theta$  between externally applied magnetic field and current flow.

초전도 시료가 외부자계의 영향으로 전압이 발생하는 현상에 대하여는 앞서 설명하였다. 그러나, 본 시료와 같이 초전도 소결체의 경우, 일반적인 Nb<sub>3</sub>Sn와 같은 초전도체와는 다른 특이점을 들 수 있다. 그림 3은 초전도 시료에 인가되는 자계의 방향과 전압과의 관계를 나타낸 결과이다. 그림에서 초전도체에서 발생하는 전압은 인가되는 자계의 방향성에는 크게 의존하지 않는 것으로 생각할 수 있다. 초전도 시료에 흘리는 전류에 대하여, 외부 자계를 수직 또는 수평한 방향으로 인가하여도 전압( $V_{MAG}$ )은 발생하며, 외부자계를 제거한 후, 자속이 메모리 된 상태에서 전압( $V_{MEM}$ )은 발생하였다.

그림4는 외부 자계 인가에 따른 자속밀도 B에 대한  $V_M$ 의 변화를 나타낸 결과이다.  $V_M$ 은 초전도체에 임계전류를 흘리면서 자장을 인가하였을 때 시료에서 발생하는 전압을 의미한다.

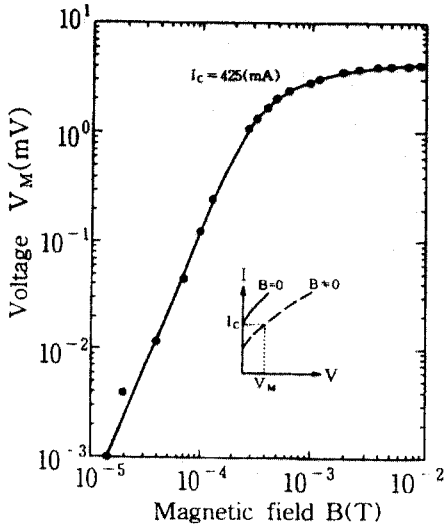


그림 4. 인가된 외부자계에 의한 전압  $V_M$  의존성.  
 Fig. 4. The dependence of  $V_M$  on the externally applied magnetic field  $B$ .

자속 밀도가  $2 \times 10^{-3}$  T까지는 전압강하의 증가분  $V_M$ 은 자계를 제거함과 동시에 자계를 인가하기 이전의 상태로 되돌아온다. 그러나  $2 \times 10^{-3}$  T 이상의 자속밀도 영역에서는 외부 자계를 제거하여도 전압강하는 0이 되지 않는다. 그림4의 곡선으로부터, 자속밀도  $B$ 가  $3 \times 10^{-4}$  T보다 크게 되면  $V_M$ 은 포화되는 경향을 알 수 있다.  $V_M$ 의 포화치는 4mV가 된다. 선형영역에서  $10^{-4}$  T의 자계를 인가하면,  $V_M$ 은 약 125  $\mu$ V가 된다.

한편 1  $\mu$ V의 출력으로는 약  $1.5 \times 10^{-5}$  T의 기가 검출된다. 이 값은 지구자기와 비교해서 거의 같은 정도의 세기를 나타낸다.  $I_c$ 를 425 mA로 일정하게 했을 때  $V_M$ 이 125  $\mu$ V이므로, 전기저항은 자계인가에 의하여 0으로부터  $2.9 \times 10^{-4}$   $\Omega$ 으로 증가된 결과가 되며, 자속밀도의 변화에 의한 전기저항의 변화는 2.9  $\Omega$ /T가 된다.

자기감도를 더욱 향상시키는 것은 앞으로의 연구 과제이나, 초전도 임계전류를 인가하는 조건에 있어서 자계에 의하여 발생하는 전압  $V_M$ 은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$V_M = \rho \cdot \frac{L}{S} \cdot I_c = \rho \cdot L \cdot J_c \dots (1)$$

$\rho$ 는 자계를 인가하였을 때 나타나는 시료의 비저항에 대응하는 물리량이며  $L$ 은 시료의 길이,  $S$

는 시료의 단면적,  $I_c$ 는 임계전류,  $J_c$ 는 임계전류밀도가 된다. 식에서 자기감도를 향상시키기 위해서는 우선  $L$ 을 길게할 필요가 있다. 이점은 소자를 박막으로 제작하여 집적회로 기술에 적용하면 실효척도의 길이를 길게할 수 있으므로 시료의 길이는 극복할 수 있다. 다음으로  $\rho$ 와  $J_c$ 를 크게할 필요가 있는데,  $\rho$ 와  $J_c$ 는 산화물 초전도체의 결정입자 크기, 결정입계의 결합강도, 결정입자의 초전도 특성에 크게 의존하는 것으로 생각된다.

자기적 상태에 있는 초전도 시료에  $2 \times 10^{-3}$  T 이하의 외부 자계를 인가하면서 초전도 시료의 전류-전압특성을 조사한 결과를 그림5에 나타낸다.

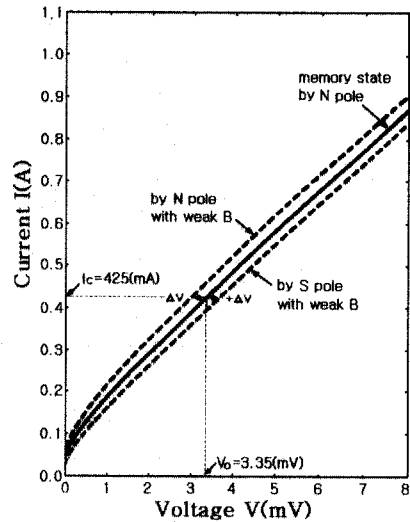


그림 5. 자석 N극에 의하여 메모리된 시료의 전류-전압특성. 기호  $+\Delta$ 와  $-\Delta$ 는 각각 전압의 증가분과 감소분.

Fig. 5. Current-voltage characteristics of the sample memorized by placing N pole near to it. Symbols  $+\Delta$  and  $-\Delta$  mean the increase and the decrease in the voltage, respectively.

이 결과에서는 0.1 T의 강한 N극을 초전도 시료에 접근시켜 시료의 특성변화를 나타낸다. 초전도 시료에 인가한 자극과 같은 방향으로 약  $2 \times 10^{-3}$  T의 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 역

할은 정반대가 된다. 이 약한 N극과 S극은 이미 초전도시료에 트랩 되어 있는 자속을 많게 하거나 또는 적게 하는 기능을 하며 서로 반대의 작용을 하고 있다. 본 연구에서 대상으로 하고 있는 BiPbSrCaCuO 초전도체는 분말을 소결하여 제작한 시료이므로 내부에는 많은 격자결함이 발생하며 산화물 등의 화학적 불순물이 다수 존재하는 것으로 사료된다. 이점은 본 시료가 임계온도 이하에서 초전도 상태가 되는 영역과 상전도 상태를 유지하는 영역 또는 자기적 효과를 발생하는 자속을 트랩하는 영역으로 혼란되어 있는 제 2종 초전도체를 의미한다. 이러한 경우에는 그림6(I)에서 제시하는 모델을 이용하여 그림5의 전류-전압 특성을 정성적으로 고찰한다.

그림에서는 초전도 전류경로를 초전도 영역과 상전도 영역으로 구분하여 검토한다. 즉, 시료 내부를 흐르는 초전도 전류경로를 초전도 필라멘트 A, B로 간단화 하고, 이외의 영역은 상전도 상태로 가정한다. 그림 중 × 표시는 초전도체 내부에 포함되어 있는 자속 trap center를 나타내며, 이 부분에는 외부로부터 강한 자계에 의하여 자속이 trap 되어 있음을 의미한다. 시료에 trap된 자속으로 인하여 시료의 초전도 상태의 일부가 상전도 상태로 천이하여 초전도 필라멘트 B의 약결함 부분이 분단되어 있다.

그림6(I)의 (a)는 강한 자계에 의하여 초전도체에 trap 되어 있는 자속과 같은 방향으로 약한 자계를 인가한 경우이다. 이 경우, 외부로부터 인가되는 자계에 대하여 초전도 시료에는 반자성의 자계가 발생하게 된다. 그러므로 시료에 trap 되어 있던 자속은 외부자계로 인하여 약화된다. 시료에 trap 되어 있던 자속의 감소로 인하여 상전도 상태로 천이되었던 부분의 일부가 초전도 상태로 회귀된다. 따라서 초전도체의 저항이 감소하게 되어 초전도체에서 발생하는 전압도 감소하며 전류-전압 특성은 그림6(I)의 (b)와 같은 특성을 나타낸다.

다음으로 그림6(II)의 (a)에서와 같이 강한 자계에 의하여 시료에 trap 되어 있던 자속과 반대방향인 약한 S극을 인가하였다. 이 경우, 초전도체에서는 시료에 trap된 자속과 같은 방향의 자계가 유도되어, 시료 전체에 있어서 자계의 증가를 가져와 초전도 영역 B의 상전도 부분은 상대적으로 확장된다. 따라서, 자계의 증가는 저항의 증가를 가져와, 초전도 시료 양단간의 전압은 크게 나타나게 된다. 이 상태의 전류-전압 특성은 그림6(II)

의 (b)에 해당하며, 자계의 증가로 인하여 초전도체에서 발생하는 전압은 증가한다.

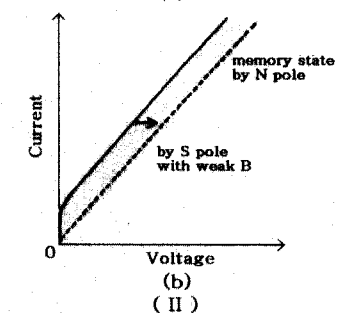
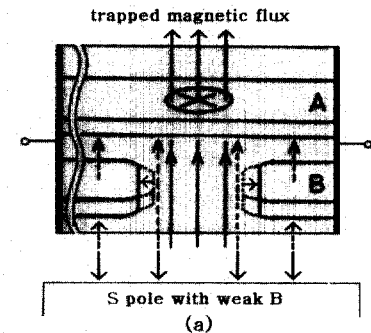
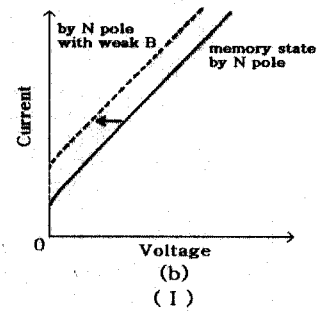
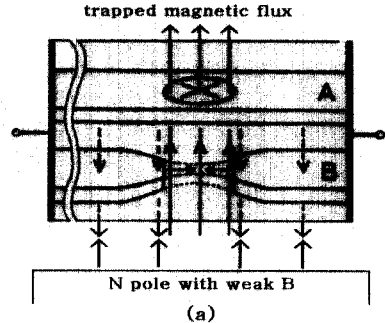


그림 6. 자계 인가에 의한 전기저항 발생 모델  
Fig. 6. Model responsible for the occurrence of the resistivity by applied magnetic field.

이 결과로부터 자기적 상태는 초전도 시료에 트랩되어 있는 자속이 밀접하게 관여하는 현상으로 생각할 수 있다.

BiPbSrCaCuO계 초전도체를 가공하여 그림7의 측정회로를 구성하였다. 그림7의 초전도체의 우측 부분과 좌측 부분은 서로 다른 자극으로 자기메모리 되어 있다. 전압 V를 측정회로에 인가하여 회로에 연결된 저항값을 조절하면 전위계 V를 0으로 할 수 있으며 그림7의 회로는 평형상태를 이룰 수 있다.

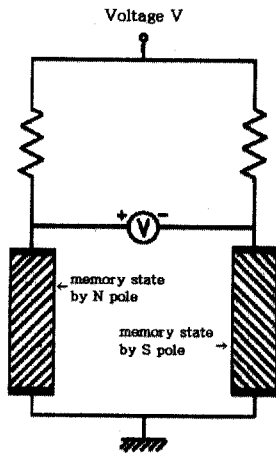


그림 7. 자계 및 자극 측정용 회로.

Fig. 7. Circuit for measuring magnetic field and polarity.

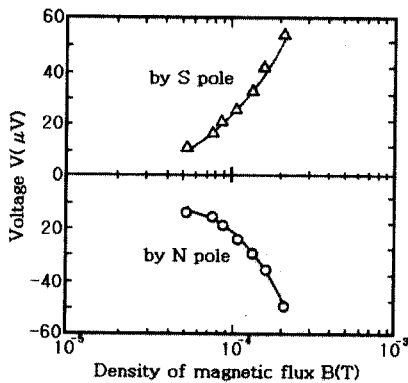


그림 8. 외부자계와 자기센서의 출력전압의 관계.

Fig. 8. Relation between external magnetic field and output voltage of magnetic field sensor.

외부 자계에 의한 자속의 크기는 hole소자형 자속계로 측정하였다. 이 결과를 그림8에 나타낸다. S극 및 N극의 어느 자극을 인가하여도 발생하는 전압은 같은 값을 지시한다.

본 결과에서 주목할 점은, Ag를 첨가한 BiPbSrCaCuO 초전도 시료의 경우, 자속 trap으로 인하여 발생하는 자기검출소자의 전류-전압 특성의 변화가 Ag를 첨가하지 않은 경우와 비교하여 크게 나타난 점이다. 이 결과는 Ag를 첨가한 시료에서 더 많은 자속이 trap 되어 있음을 의미한다. 이와 같이 초전도체로 구성된 저항소자의 전위차를 측정하면 외부 자계의 세기 및 방향을 용이하게 감지할 수 있다.

#### 4. 결론

초전도 시료에 트랩된 자속으로 인하여 발생하는 자계와 같은 방향의 외부 자계가 인가되면 트랩된 자속의 실효값이 감소하여 상전도 상태에 있는 영역의 일부가 초전도 상태로 천이되어 초전도체의 전기저항이 감소하는 현상을 정성적으로 설명하였다. 자기 메모리 된 초전도체를 저항소자로 하여 외부자계의 세기 및 극성을 동시에 감지할 수 있는 자기검출소자를 제안하였다

#### 참고 문헌

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