

## BiPbSrCaCuO 초전도 벌크의 Magnetic Suspension

### Magnetic Suspension Effect of BiPbSrCaCuO Superconducting Bulk

이상현<sup>1,a</sup>

(Sang Heon Lee<sup>1,a</sup>)

#### Abstract

Magnetic suspension effect has been studied by using superconductor of BiPbSrCaCuO ceramics containing Ag<sub>2</sub>O. Magnetic flux measurements of a toroidal magnet revealed a concave shaped field distribution with a null field along the axis of the torus at the point where the field reversed. The suspension effect was observed only for the Ag<sub>2</sub>O doped and field cooled sample which is attributed to the enhanced flux pinning due to the field cooled condition. It has been cleared that Ag<sub>2</sub>O acts as pinning center which plays an important role to the magnetic suspension effect. Magnetic repulsive force which affects a superconductor located in magnetic flux from toroidal magnet has been investigated. It has been concluded that the magnetic suspension effect arises from the interaction between the pinning effect and the diamagnetic effect.

**Key Words** : Magnetic suspension , Pinning center, Ag<sub>2</sub>O, BiPbSrCaCuO superconductor

#### 1. 서론

초전도체는 외부로부터 인가되는 자계를 물질내부로부터 완전히 배제하는 현상인 완전 반자성효과가 널리 알려져 있으며 이 현상을 Meissner 효과라고 한다. 한편 산화물 초전도체가 발견된 이래 영구자석의 하부에 초전도체가 매달리는 흥미 있는 자기적 현상이 발견되었는데 이 현상을 Fishing 효과 또는 Magnetic Suspension 효과라고 하며, 본 연구에서는 이 현상을 자기부양효과라고 명명한다.

자기부양효과는 P. N. Peter에 의하여 발견되었으며[1], 이 현상은 덩어리형 산화물 초전도체를 응용하기 위한 연구로 가장 쉽게 응용할 수 있는

분야인 자기 베어링과 플라이휠 에너지 저장장치와 같은 초전도체의 자기력을 응용한 분야에 있어서 중요한 현상으로 인식되고 있다[2-6]. 따라서 본 연구는 toroidal형 영구자석에서 발생하는 BiPbSrCaCuO계 초전도체의 Magnetic suspension을 명확하게 조사하는 것을 연구의 목적으로 한다.

BiPbSrCaCuO계 초전도체에 pinning center를 도입하는 것을 목적으로 초전도체에 산화은(Ag<sub>2</sub>O)을 첨가하였다. 산화은은 초전도체와 반응하지 않으며 초전도체에 첨가되어도 시료의 초전도 특성이 저하되지 않는 물질로 여겨지고 있으므로, 본 연구의 목적인 pinning center의 도입에 있어서 적합한 재료로 생각된다. 따라서 본 연구에서는 산화은(Ag<sub>2</sub>O)을 첨가한 소결체를 시료로 하였다. 이 시료와 산화은을 첨가하지 않은 초전도체에서 나타나는 자기부양효과를 비교하여 본 연구의 목적인 자기부양효과의 발생에 있어서 pinning center의 필요성을 검토하였다.

1. 선문대학교 전자정보통신공학부  
(충남 아산시 탕정면 갈산리 100)

a. Corresponding Author : shlee@sunmoon.ac.kr

접수일자 : 2003. 12. 2

1차 심사 : 2004. 1. 29

심사완료 : 2004. 3. 2

## 2. 실험 방법

시편은 99.9 % 순도의  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{SrCO}_3$ 와  $\text{CuO}$  분말을 혼합과 하소의 공정을 포함하는 고상 반응법으로 제조하였다. 저울에서 정량한 분말을 알루미늄이나 막자 사발에서 균일하게 혼합하였다. 재료의 조성은 고온초전도상을 생성하기 용이한 것으로 알려진  $\text{Bi} : \text{Pb} : \text{Sr} : \text{Ca} : \text{Cu} = 1.84 : 0.34 : 1.92 : 2.03 : 3.06$ 을 선택하였다.

혼합된 분말은  $840^\circ\text{C}$ 에서 24시간 하소하였다. 하소된 분말은 알루미늄이나 막자사발에서 분쇄한 후 1-5 wt%은 산화물( $\text{Ag}_2\text{O}$ )분말과 함께 혼합한 후 원판형 시편을 만들었다. 이 시편들은  $830\text{--}850^\circ\text{C}$ 에서 산소분위기,  $\text{O}_2 / \text{Ar} = 1 / 13$ 의 분위기에서 100시간 소결 하였다. 완성된 시료는 반경 10 mm, 두께 1 mm의 흑색 원판형을 하고 있다.

## 3. 결과 및 고찰

본 연구에서 제작한  $\text{BiPbSrCaCuO}$ 계 초전도시료에서는 그림 1에서 제시하는 자기부양 효과가 관측되었다. 이 그림은 초전도체가 반자성효과에 의하여 자석 상부에 자기 부상하는 현상과 자기부양 효과에 의해서  $\text{BiPbSrCaCuO}$ 계 시료가 toroidal 영구자석의 하부에 매달리는 현상을 동시에 나타낸 것이다. 그러나 ring 형태를 취하고 있지 않는 원추형 자석에서는 자기부양 효과가 관측되지 않았다. 본 연구에서는 pinning center로서 작용하는 첨가물로 산화은( $\text{Ag}_2\text{O}$ )를 선택하여 산화은 첨가량과 시료의 소결 온도를 변수로 자기부양 효과가 발생하는 최적의 초전도 시료 제작조건을 조사하였다. 자기부양 효과가 발생하는 초전도시료에 있어서 산화은의 최적의 첨가량을 구하기 위하여 산화은의 첨가량을 변수로 하였다. 시료 전체 중량의 0~5 % 까지 산화은을 첨가하면서 자기부양 효과가 발생하기 시작하는 초전도 시료의 중량을 측정하였다. 이 결과를 그림 2에 나타낸다. 그림 2의 결과로부터 초전도 시료에 2 %의 산화은을 첨가하였을 때 자기부양 효과가 가장 현저하게 나타났다.

자기부양 효과의 발생에 있어서 pinning center의 역할을 검토하기 위하여 산화은이 2 % 첨가된 시료와 산화은이 첨가되지 않은 2종류의 시료를 준비하였다. 이 결과를 표 1에 제시한다.

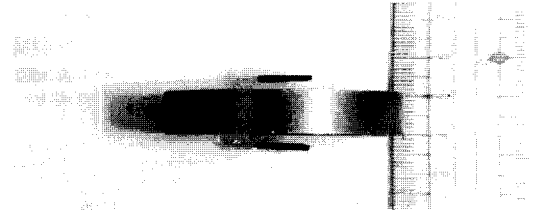


그림 1. 자기 부상 현상과 자기 부양효과.

Fig. 1. Magnetic levitation effect and magnetic suspension effect.

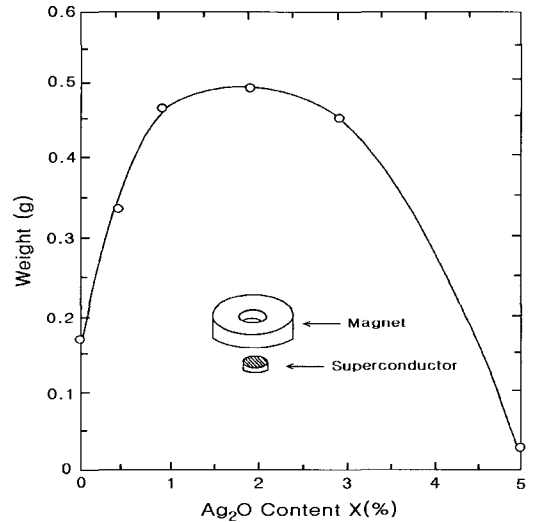


그림 2. 초전도 시료의 중량변화.

Fig. 2. Changes in the weight of the superconductor sample.

표 1. 산화은을 첨가한 시료와 첨가하지 않은 시료의 조건별 자기 부양 효과.

Table 1. Magnetic suspension effect of  $\text{Ag}_2\text{O}$  doped and undoped sample.

| Sample \ Condition | Condition       |                         |
|--------------------|-----------------|-------------------------|
|                    | $T=77\text{ K}$ | $77\text{ K} < T < T_c$ |
| Ag-doped(2 %)      | ○               | ○                       |
| Undoped            | ×               | ○                       |

표 1에서 ○표는 자기 부양 효과가 발생하는 경우이며, ×표는 자기 부양 효과가 발생하지 않는 경우를 나타낸다. 표 1에 제시되어 있듯이 산화은을 첨가하지 않은 Bi계 초전도체는 액체질소(77 K)에서 자기 부양 효과가 발생하지 않으나, 시료를 액체질소에서 꺼낸 후 시료의 온도가 상승된 후(임계온도 이하)에는 현저하게 발생하였다. 반면에, 산화은을 첨가한 시료에서는 어느 실험조건에서나 자기 부양 효과가 관측되었다. 이 결과는 시료에 첨가된 산화은이 외부로부터의 자속을 포획하는 pinning center와 같은 역할을 이루어 자기부양 효과를 발생하고 있는 것으로 여겨진다. 따라서 산화은이 첨가된 초전도 시료에서 자기부양 현상이 현저하게 나타난 것으로 생각된다. 이 결과로부터 자기 부양 효과의 발생에는 pinning center가 중요한 역할을 이루고 있는 것으로 사료된다.

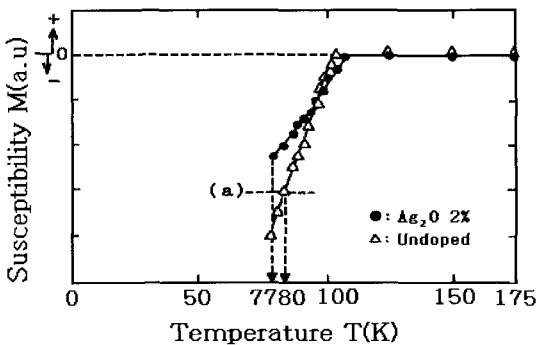


그림 3. 직류자화율의 온도의존성.

Fig. 3. Temperature dependence of the DC susceptibility.

그림 3에서는 본 시료의 직류 자화율을 조사하여, 자기부양효과 발생에 미치는 pinning center의 역할에 관하여 고찰하였다. 그림 3에서 시료온도 100 K에서 77 K까지의 온도범위에 주목하면 산화은을 첨가하지 않은 시료의 자화율이 산화은을 첨가한 시료와 비교하여 크게 나타남을 알 수 있다. 온도 80 K에서 산화은을 첨가하지 않은 시료의 자화율(그림 3의 점선 (a)의 값)을 기준으로 고찰한다. 즉 77 K에서는 산화은을 첨가하지 않은 시료는 산화은을 첨가한 시료와 비교하여 반자성이 크게 나타난다. 그로 인하여 시료는 자속이 진입하기 어려운 상태로 사료되며, 자기부양효과는 발생하지 않는다. 그러나 시료의 온도 상승과 더불어

어 산화은을 첨가하지 않은 시료의 반자성이 약해짐에 따라 외부 자계로 부터의 자속의 진입이 수월하게 된다. 따라서 시료에 진입된 자속이 pinning center로서 작용하여  $77 K < T < T_c$ 의 온도영역에서 자기부양효과가 발생하게 된다.

본 연구에서 사용하고 있는 자석은 ring 형태의 toroidal 자석이며 자석의 재질은 Nd-Fe-B 이고, 자석의 세기는 0.1 T 이다. 다음으로 자기부양 효과의 메커니즘을 규명하기 위하여 자기부양 효과의 발생과 밀접하게 관계하고 있는 것으로 사료되는 toroidal 자석과 초전도체 사이에 작용하는 자기 반발력과 흡인력의 관계를 조사하였다. 이 실험을 위하여 그림 4의 측정 장치를 고안하였다.

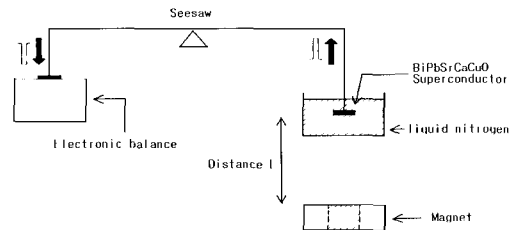


그림 4. Seesaw에 의한 자기력 측정 장치.

Fig. 4. Schematic diagram of the apparatus for the magnetic force measurement by seesaw.

이 장치는 초전도체에 외부로부터 자계를 인가하면서 시료에 작용하는 자기반발력과 자기부양효과에 의한 자기흡인력을 동시에 측정할 수 있도록 제작되었다. 본 실험 장치는 시료에 외부로부터 자계가 인가됨에 따라 초전도시료가 반자성 효과로 인하여 자기적으로 반발하게 될 경우 초전도 시료의 자기 반발력이 seesaw를 통하여 전달되어 전자 저울을 밑으로 누르게 된다. 한편 자기부양 효과에 의하여 초전도 시료와 자석 사이에서 자기 흡인력이 작용하게 되면 자기 흡인력은 seesaw를 통하여 전달되어 전자저울을 위로 끌어 올리는 힘으로 나타난다.

이 장치를 이용하여 초전도 시료와 toroidal 자석에서 발생하는 자기 반발력과 자기 흡인력의 변화를 측정하였다. 시료로서는 산화은을 2% 첨가한 BiPbSrCaCuO계 초전도체를 이용하였으며, 액체 질소로 시료를 냉각하면서 자석을 접근하였다. 이 결과를 그림 5에 나타낸다.

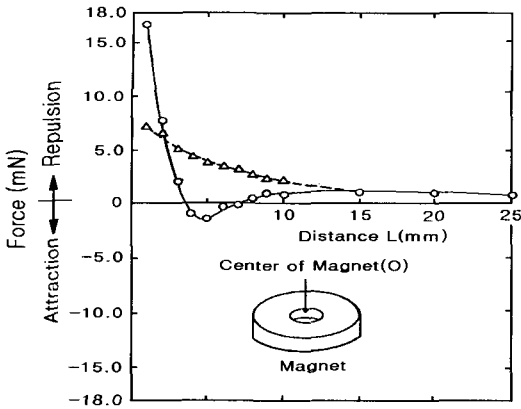


그림 5. 시료와 자석과의 거리에 대한 자기력 변화.

Fig. 5. Changes in the magnetic force versus the distance.

그림에서 자석의 ring부분을 초전도 시료에 접근한 경우(△)에는 반자성 효과에 의한 자기 반발력이 관측되었으며, 자석과 초전도체의 거리가 가까워질수록 자기 반발력은 증가하였다. 한편 자석의 중심부에 초전도 시료를 접근한 경우(○), 자석과 초전도 시료의 간격이 약 7 mm 이상에서는 자기반발력이 관측되었다. 그러나 거리가 약 3 mm에서 7 mm의 범위에서는 자기 반발력이 측정되지 않았으며 자기부양 효과에 의한 자기 흡인력만이 관측되었다. 또한 자석과 초전도 시료와의 거리가 약 3 mm 이하가 되면 자기 반발력만이 발생하게 된다. 본 연구에서 관측되는 자기부양 효과는 toroidal 자석의 ring부분에서는 발생하지 않으며, 자석의 중심부분에서만 관측된다. 이 결과는 toroidal 자석의 자력선 분포가 반 자성효과 및 자기부양효과에 밀접하게 관계하고 있음을 시사하고 있다.

그림 6은 자력선 분포 모델로 제시한 것으로서, toroidal 자석의 단면과 자석으로부터의 자력선을 나타냈다. 자석의 중심부분은 철분이 존재하지 않는 자력선의 밀도가 적은 부분을 의미한다.

본 연구에서 관측되는 자기부양 효과는 toroidal 자석으로부터 발생하는 △영역이 밀접하게 관계하고 있는 것으로 생각된다. 이 현상을 증명하기 위하여 다음과 같은 실험을 수행하였다. 이 장치를 이용하여 초전도 시료와 toroidal 자석에서 발생하는 자기 반발력과 자기 흡인력의 변화를 측정하였다. 시료로서는 산화은을 2 % 첨가한 BiPbSrCaCuO계 초전도체를 이용하였으며, 액체 질소로 시료를

냉각하면서 자석을 접근하였다. 이 결과를 그림 7에 나타낸다.

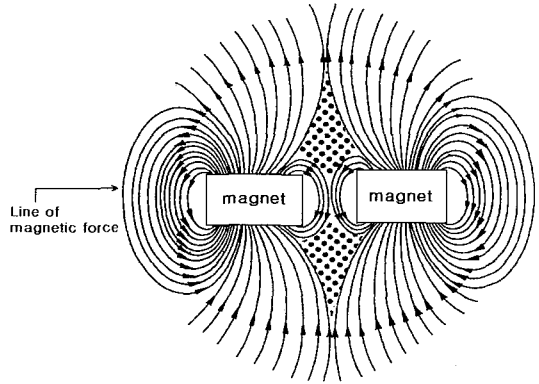


그림 6. Toroidal 자석의 자력선 분포 모델.

Fig. 6. A model of distribution of the magnetic force in toroidal magnet.



| Condition           | Ceramics   |   |
|---------------------|--|---|
| Sample shape        | <br>Diameter: 10mm | <br>Outside diameter: 13mm<br>Inside diameter: 10mm |
| Weight              | 0.39g  | 0.35g   |
| Magnetic levitation | ○  | ○   |
| Magnetic suspension | ○  | ×   |

그림 7. 자기부양효과와 자기 부상효과.

Fig. 7. The magnetic suspension effect and magnetic levitation effect.

실험에 사용한 시료형상은 그림 7에서 제시하는 것과 같이 원판형과 toroidal형이다. 원판형의 시료는 직경이 10 mm, 중량이 0.39 g으로 시료 전체가 그림 6에서 제시한 △영역에 포함되는 크기이다. 한편 toroidal형의 시료는 △영역으로부터 벗어나는 크기로서 외경과 내경이 각각 13 mm, 10 mm이며 중량은 0.35 g이 된다. 그림 7에서 ○표는 자기부상 현상과 동시에 자기부양 효과가 발생하는 현상을 나타낸 것이며 ×표는 이러한 효과가 발생하지 않는 경우를 나타낸다. 그림에서 제시하고 있

는 것과 같이 모든 시료에서 자기부상 현상은 관측되었으나 자기부양 효과는 시료의 크기가  $\Delta$  영역안에 포함되는 원판형 시료에서만 발생하였다. 이 결과는 본 연구에서 관측되는 자기부양 효과의 발생에는 toroidal 자석으로부터 발생하는  $\Delta$  영역이 관여하고있는 것을 의미한다. 즉 자기부양 효과가 발생하기 위하여는 초전도 시료가 자속 밀도가 낮은  $\Delta$  영역에 포함되어야 만 한다. 다음으로 toroidal 자석으로부터 발생하는  $\Delta$  영역의 어느 부분에서 자기 부양 효과가 발생하는가를 조사하였다. 따라서  $\Delta$  영역에 포함되는 원판형 시료의 직경을 변수로 하여, 초전도 시료가 toroidal 자석의 하부로부터 어느 정도 위치한 거리에서 자기부양 효과가 발생되는가를 실험하였다. 이 결과를 그림 8에 나타냈다.

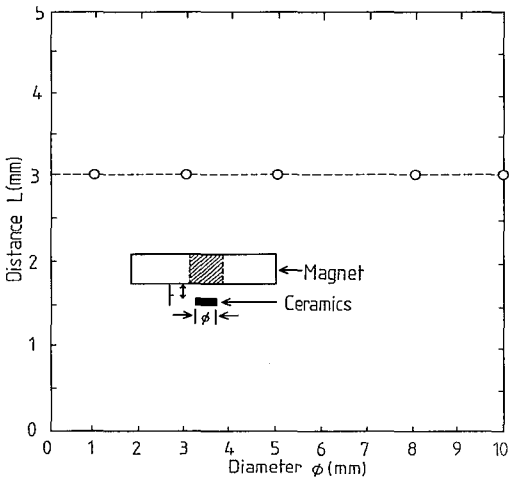


그림 8. 자기 부양 현상의 거리 의존성.  
 Fig. 8. Dependence of suspending distance on diameter of a superconducting sample.

그림에서 초전도 시료가 toroidal 자석의 하부로부터 부양하고 있는 거리는 시료의 직경에는 관계하지 않으며 자석의 하부로부터 3 mm의 거리에서 일정하게 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한 산화 은을 첨가 하지 않은 초전도 시료에서도 toroidal 자석의 하부로부터 3 mm의 위치에서 자기 부양 효과가 발생하였다. Gauss meter를 사용하여 toroidal 자석의 중심부분과 자석의 ring 부분에 대하여 각각의 자속 밀도를 측정하였다. 이 결과를 그림 9에 나타낸다.

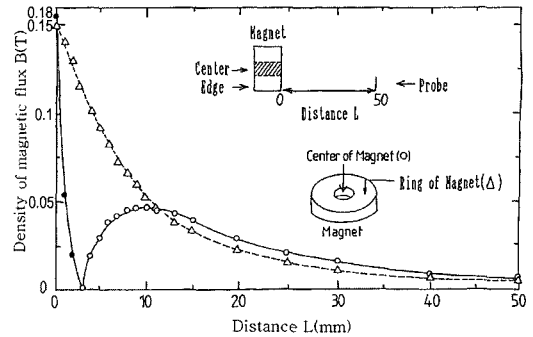


그림 9. Toroidal 자석의 자속 밀도 분포.  
 Fig. 9. Distribution of magnetic flux density arised from the toroidal magnet.

그림에서 자석의 ring 부분에서 측정된 경우( $\Delta$ )에는 자석과 Gauss meter의 측정 probe와의 거리가 가까울수록 toroidal 자석의 자속 밀도가 증가하고 있음을 알 수 있다. 반면에 자석의 중심 부분에서 측정된 경우( $\circ$ ), 자속 밀도는 자석과 Gauss meter의 측정 probe의 거리가 50 mm에서부터 10 mm 까지의 범위에서는 단조롭게 증가하는 경향이 있으나, 10 mm 이하에서는 역으로 감소하여 약 3 mm의 거리가 되면 자속 밀도는 0이 된다. 거리가 3 mm 이하가 되면 자속 밀도는 다시 증가 하게 된다. 3 mm 이하의 거리에서는 Gauss meter의 지시가 -가 되므로 측정 probe를 반대 방향으로 하여 측정하였다( $\bullet$ ). 이 부분에서는 측정거리가 3 mm이상의 자력선 방향과 3 mm이하의 자력선 방향이 180°반전하고 있다. 따라서 toroidal 자석으로부터 하부 3 mm에 위치한 부분을 경계로 하여 자력선의 방향이 자석을 중심을 향하는 상 방향과 자석의 하부를 향하는 자력선으로 나뉘게 된다. 이 결과를 그림 5에서 제시한 결과와 비교하여 고찰한다. 그림 5의 결과에서와 같이 toroidal 자석의 중심 부분에서는 시료와 자석 사이의 거리가 3 mm에서 7 mm의 사이에서는 자기 부양 효과에 의한 자기 흡인력이 관측되고 있으며 이 영역은 그림 9의 자속 밀도의 분포가 +의 기울기를 나타내고 있는 영역과 일치하고 있음을 알 수 있다.

또한 그림 5와 그림 9의 결과로부터 -의 기울기를 갖는 자속밀도의 분포 범위에서는 반자성 효과에 의한 자기 반발력이 관측되고 있음을 알 수 있다. 이상의 실험결과로부터 본 연구에서 관측한 자

기부양 효과의 발생 메커니즘을 고찰한다. 그림 9와 같이 toroidal 자석의 중심부에서 측정된 자속 밀도로부터 추정되는 자력선 분포를 모식적으로 나타내면 그림 10(a)가 된다. 자력선의 방향은 그림에서 표시한 점선을 경계로 하여 아래방향의 자력선과 자석의 중심부분으로 들어가는 위 방향의 자력선으로 나뉘게 된다. 그림 10(b)에서는 그림 9의 toroidal 자석의 중심부에서 관측한 자속 밀도 분포를 나타내었다.

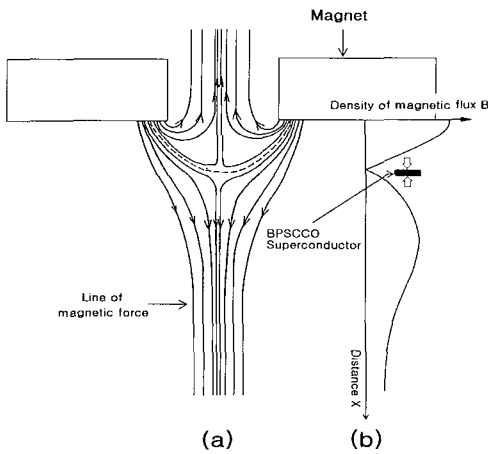


그림 10. 자력선 분포와 자속 밀도 분포.  
 (a) Toroidal 자석의 중심 부분에서 관측되는 자력선 분포.  
 (b) 중심축 방향의 자력선 분포와 초전도체에 작용하는 자기력.

Fig. 10. Distribution of magnetic force line and magnetic flux density in the central region of a toroidal magnet.  
 (a) Schematic distribution of the magnetic force line in the central region of a toroidal magnet.  
 (b) Distribution of the magnetic flux density on the central axis.

자기장에서 체적  $V$ , 자화  $M$ 을 갖는 물질에 작용하는 자기력을 1차원으로 나타내면 다음과 같다.

$$F_x = V(M \cdot \frac{\partial B}{\partial x}) \quad (1)$$

(1)식에서  $H$ 는 자속 밀도가 된다. 거리에 대하여 불 균일한 자속 밀도분포를 갖는 자기장에서는 (1)식으로부터 자속 밀도 기울기의 부호가 +와 -에 대하여 물질에 작용 하는 자기력의 방향은 서로 반대가 된다. 그림 10(b)와 같이 불균일한 자속 밀도를 나타내는 toroidal 자석의 하부로부터 약 3 mm의 부분, 즉 자속 밀도분포의 기울기가 +와 -로 나뉘어지는 부분에 초전도체가 위치하게 되면 +의 기울기의 영역으로부터는 상방향(초전도체를 위로 밀어 올리는 방향)의 힘을 받게 된다. 한편 -의 기울기 영역에서는 아래 방향(초전도체를 아래로 밀어 내리는 방향)의 힘이 작용 하게 된다. 결과적으로 자석 하부로부터 3 mm의 자속 밀도가 0이 되는 부분에 초전도체가 위치하여 자석에 매달리는 자기부양효과가 나타나게 된다. 본 연구에서 관측되는 BiPbSrCaCuO계 초전도체의 자기부양 효과는 자속 밀도가 0이 되는  $\Delta$ 영역에 초전도체가 위치하여 주위의 자장의 기울기로부터 자기력을 받아 가장 안정된 장소에서 고정되는 현상으로 생각된다.

산화은을 첨가하지 않는 BiPbSrCaCuO계 초전도체의 경우 자기 부양 효과는 액체질소 온도에서는 발생하지 않았다. 그러나 시료의 온도가 상승함에 따라(임계온도이하) 자기 부양 현상이 나타나게 된다. 온도상승과 함께 초전도 영역이 상전도 영역으로 천이되어 pinning center로서 작용할 가능성을 시사하고 있다.

#### 4. 결론

BiPbSrCaCuO계 초전도 소결체에 산화은을 첨가하여 자기 부양 효과를 나타내는 시료의 제작 조건을 조사하였다. 2%의 산화은이 첨가된 시편에서 자기 부양 효과가 가장 효과적으로 관측되었다. toroidal 자석에서 관측되는 자기 부양 효과는 자석의 중심부분에서만 발생하며, 자석의 ring부분에서는 관측되지 않았다. 이 결과는 본 연구의 자기 부양 효과의 발생에는 자석의 형상 및 자속의 분포 형태와 밀접한 관련성이 있음을 의미한다. 자기 부양 효과에 관한 측정 결과로부터 자속 밀도가 극소가 되는 toroidal 자석의 하부로부터 3 mm의 거리에 위치한 장소에 초전도체가 놓이게 되면 초전도체는 반자성효과로 인하여 초전도체의 상·하로부터 작용하는 자기력을 받게 되어 Suspension 효과가 발생하는 것으로 사려된다.

### 참고 문헌

- [1] 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, "Superconductivity at 91K in a New Mixed-Phase Y-Ba-Cu-O System" *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 58, No. 9, p. 908, 1989.
- [2] Y. Shapira, C. Y. Huang, H. J. Mcniff, P. N. Peter, B. B. Schwartz, and M. K. Wu, "Flux Penetration in high-Tc Seperconductors", *J. Magn. Magn. Materials*, Vol. 78, No. 1, p. 19, 1989.
- [3] J. R Hull and A. Cansiz, "Vertical and lateral tores between a permanent magnet and a high temperature superconductor", *J. Appl. Phys.*, Vol. 86, No. 11, p. 6396, 1999.
- [4] 박성재, 김용선, 김채욱, "회전실험에서의 다결정  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$  초전도체의 Vortex flux의 거동", *전기전자재료학회논문지*, 11권, 9호, p. 751, 1988.
- [5] 류경우, 최병주, "인접교류전류가 Bi2223 테이프의 통전손실에 미치는 영향", *전기전자재료학회논문지*, 14권, 3호, p. 251, 2001.
- [6] 이회갑, 박용필, 이진현, 이준웅, "Evaluation of sticking coefficient in BSCCO thin film fabricated by Co-sputtering" *전기전자재료학회논문지*, 13권, 1호, p. 80, 2000.