

## Bi계 초전도체의 Magnetic Suspension

### Magnetic Suspension Effect of BiPbSrCaCuO Superconductor

이 상 현

(Sang Heon Lee)

#### Abstract

Suspension effect has been studied by using superconductor of BiPbSrCaCuO ceramics containing  $Ag_2O$ . It has been cleared that  $Ag_2O$  acts as pinning center which plays an important role to the 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 suspension effect arises from the interaction between the pinning effect and the diamagnetic effect.

**Key Words :** BiPbSrCaCuO ceramics, suspension, pinning center, repulsive force, toroidal magnet, diamagnetic effect

#### 1. 서 론

1986년 Bednorz 와 Muller 에 의해 산화물 고온 초전도체가 발견된 이래 세계도처에서 산화물 고온 초전도체에 관한 수많은 연구가 수행되어 왔다. 현재까지 여러 종류의 초전도체 재료가 제안되어 왔으나 특히 YBaCuO계 및 BiPbSrCaCuO계 초전도체는 액체질소 온도이상의 고온에서 초전도상태를 관측할 수 있으며 초전도 상태가 비교적 안정되어 실용화에 큰 주목을 받고 있다. 액체질소 온도이상의 고온에서 초전도상태를 관측할 수 있는 것은 다음과 같은 유용한 의미가 있다. 고가의 장치를 이용한 극저온에서 수행하는 금속계 초전도체와 비교하여 간단한 장치를 사용하면서 많은 실험을 수행할 수 있고, 이와 수반되는 물리현상을 용이하게 관측할 수 있다는 것은 산화물계 고온 초전도체가 갖는 이점이다. 특히 초전도체는 외부로부터 인가되는 자계를 물질내부로부터 완전히 배제하는 현상인 완전 반자성 효과

가 널리 알려져 있으며 이 현상을 Meissner 효과라고 한다. 한편 산화물 초전도체가 발견된 이래 영구 자석의 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. 따라서 자기부양효과의 메커니즘 및 자기적 특성, 자석과 초전도체간의 부상특성에 관한 많은 물성 연구가 수행되고 있다[2-4]. 본 연구에서는 toroidal형 영구자석에서 발생하는 BiPbSrCaCuO계 초전도체에서 pinning center의 필요성을 명확하게 조사하는 것을 연구의 목적으로 한다. BiPbSrCaCuO계 초전도체에 pinning center를 도입하는 것을 목적으로 초전도체에 산화은( $Ag_2O$ )을 첨가하였다. 산화은은 초전도체와 반응하지 않으며 초전도체에 첨가되어도 시료의 초전도 특성이 저하되지 않는 물질로 여겨지고 있으므로, 본 연구의 목적

선문대학교 전자정보통신공학부  
 (아산시 탕정면 갈산리 100,  
 Fax : 041-530-7426  
 E-mail: shlee@webmail.sunmoon.ac.kr)

인 pinning center의 도입에 있어서 적합한 재료로 생각된다

## 2. 실험방법

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 정량 한 분말을 알루미늄이나 막자 사발에서 균일하게 혼합하였다. 재료의 조성은 고온 초전도상을 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 알루미늄 막자사발에서 분쇄한 후 1-5wt%은 산화물( $\text{Ag}_2\text{O}$ )분말과 함께 혼합 한 후 원판형 시편을 만들었다. 이 시편들은  $830\text{--}850^\circ\text{C}$ 에서 산소분위기,  $\text{O}_2/\text{Ar}=1/13$ 의 분위기에서 100시간 소결하였다. 완성된 시료는 반경 10 mm, 두께 0.1 cm 의 흑색 원판형을 하고 있다.

## 3. 결과 및 고찰

본 연구에서 제작한  $\text{BiPbSrCaCuO}$ 계 초전도시료에서는 그림 1에서 제시하는 Suspension 효과가 관측되었다.

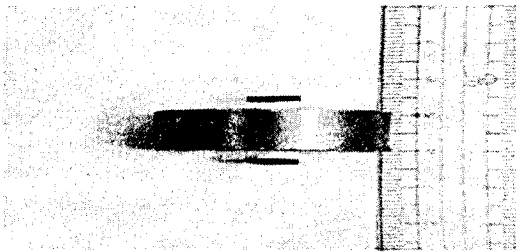


그림 1. 자기 부상 현상과 자기 부양효과  
Fig. 1. Magnetic levitation due to diamagnetic effect and magnetic suspension due to the magnetic suspension.

이 그림은 초전도체가 반자성효과에 의하여 자석 상부에 자기 부상하는 현상과 Suspension 효과에 의해서  $\text{BiPbSrCaCuO}$ 계 시료가 toroidal 영구자석의 하부에 매달리는 현상을 동시에 나타낸 것이다. 그

러나 ring 형태를 취하고 있지 않는 원추형 자석에서는 Suspension 효과가 관측되지 않았다. 본 연구에서는 pinning center로서 작용하는 첨가물로 산화은( $\text{Ag}_2\text{O}$ )를 선택하여 산화은 첨가량과 시료의 소결 온도를 변수로 Suspension 효과가 발생하는 최적의 초전도 시료 제작조건을 조사하였다. Suspension 효과가 발생하는 초전도시료에 있어서 산화은의 최적의 첨가량을 구하기 위하여 산화은의 첨가량을 변수로 하였다. 시료 전체 중량의 0~5% 까지 산화은을 첨가하면서 Suspension 효과가 발생하기 시작하는 초전도 시료의 중량을 측정하였다. 이 결과를 그림 2에 나타낸다. 그림2의 결과로부터 초전도 시료에 2%의 산화은을 첨가하였을 때 Suspension 효과가 가장 현저하게 나타났다.

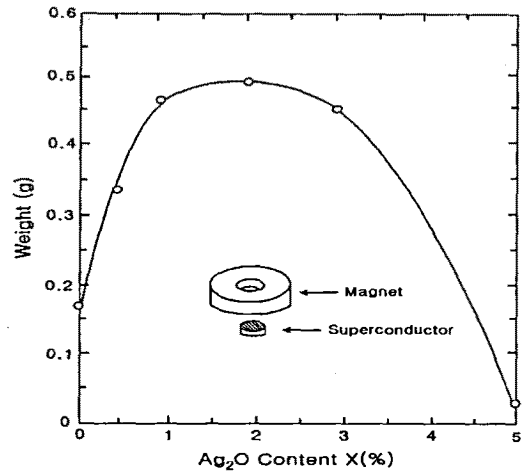


그림 2. 자기 부양 효과가 나타나기 시작하는 시료의 중량변화

Fig. 2. Changes in the weight of the superconducting sample which begin to suspend beneath a magnet versus content of  $\text{Ag}_2\text{O}$ .

본 연구에서 사용하고있는 자석은 ring형태의 toroidal자석이며 자석의 재질은  $\text{Nd-Fe-B}$  이고, 자석의 세기는 0.1T 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 측정장치를 고안하였다. 이 장치는 초전도체에 외부로부터 자계를 인가하면서 시료에 작용하는 자

기반발력과 자기 부양 효과에 의한 자기흡인력을 동시에 측정할 수 있도록 제작되었다. 본 실험 장치는 시료에 외부로부터 자계가 인가됨에 따라 초전도시료가 반자성 효과로 인하여 자기적으로 반발될 경우 초전도 시료의 자기 반발력이 seesaw를 통하여 전달되어 전자 저울을 밑으로 누르게 된다. 한편 자기 부양 효과에 의하여 초전도 시료와 자석 사이에서 자기 흡인력이 작용하게 되면 자기 흡인력은 seesaw를 통하여 전달되어 전자저울을 위로 끌어올리는 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 그림3에 나타낸다.

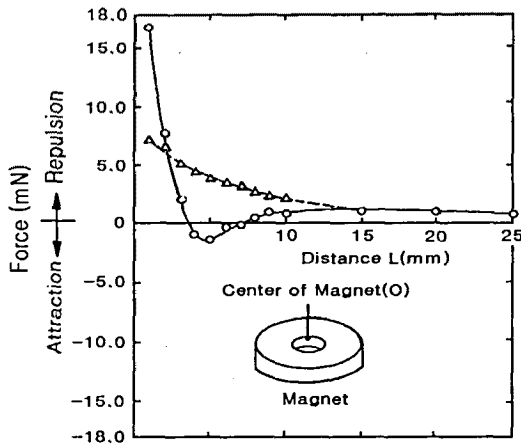


그림 3. 시료와 자석과의 거리에 대한 자기력 변화  
 Fig. 3. Changes in the magnetic force versus the distance between the superconducting sample and the magnet.

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 7mm 이상에서는 자기반발력이 관측되었다. 그러나 거리가 약 3mm에서 7mm의 범위에서는 자기 반발력이 측정되지 않았으며 자기부양 효과에 의한 자기 흡인력만이 관측되었다. 또한 자석과 초전도 시료와의 거리가 약 3mm 이하가 되면

자기 반발력만이 발생하게 된다. 본 연구에서 관측되는 자기부양 효과는 toroidal 자석의 ring부분에서는 발생하지 않으며, 자석의 중심부에서만 관측된다. 이 결과는 toroidal 자석의 자력선 분포가 반 자성 효과 및 자기부양효과에 밀접하게 관계하고 있음을 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 중심부에서만 발생하며, 자석의 ring부분에서는 관측되지 않았다. 이 결과는 본 연구의 자기 부양 효과의 발생에는 자석의 형상 및 자석의 분포 형태와 밀접한 관련성이 있음을 의미한다. 자기 부양 효과에 관한 측정 결과로부터 자속 밀도가 극소가 되는 toroidal 자석의 하부로부터 3mm의 거리에 위치한 장소에 초전도체가 놓이게 되면 초전도체는 반자성 효과로 인하여 초전도체의 상하로부터 작용하는 자기력을 받게 된다. 또한 산화은을 첨가하지 않은 BiPbSrCaCuO계 초전도체와 2%의 산화은이 첨가된 시편의 자기부양 효과를 조사한 결과 pinning center의 역할이 필수적인 조건으로 여겨진다. 본 연구에서 관측되는 자기부양효과는 pinning center의 작용과 +, -의 자속밀도 분포의 기울기를 갖는 toroidal 자석으로부터 받는 초전도체의 반자성효과가 중첩되어 발생하는 현상으로 고찰된다. 이 결과로 본 연구의 자기 부양 효과는 완전 반자성 효과 즉 Meissner 효과만으로 발생되지 않는 현상으로 판단되었다.

#### 참고문헌

- [1] J. G. Bednorz and K. A. Muller, Z. Phys. B64, 189 (1986)
- [2] P. N. Peter, R. C. Sick, E. W. Urban, C. Y. Huang, M. K. Wu, Appl. Phys. Lett., 52, 24, 2066 (1988)
- [3] Y. Shapira, C. Y. Huang, H. J. McNiff, P. N. Peter, B. B. Schwartz, M. K. Wu, J. Magn. Magn. Materials. 78, 1, 19 (1989)
- [4] J. R. Hull, A. Cansiz, J. Appl. Phys. 86, 11, 6396-6404 (1999)