

Bi계 초전도체의 자기부양효과

Magnetic Suspension Effect of BiPbSrCaCuO Superconductor

이상현

(Sang Heon Lee)

Abstract

Suspension effect has been studied by using superconductor of BiPbSrCaCuO ceramics containing Ag_2O . It has been clear 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. 서론

1986년 Bednorz와 Muller에 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. 특

히 초전도체는 외부로부터 인가되는 자계를 물질내부로부터 완전히 배제하는 현상인 완전 반자성 효과가 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[2-7]. 본 연구에서는 toroidal형 영구자석에서 발생하는 BiPbSrCaCuO계 초전도체에서 pinning center의 필요성을 명확하게 조사하는 것을 연구의 목적으로 한다. BiPb-SrCaCuO계 초전도체에 pinning center를 도입하는 것을 목적으로 초전도체에 산화은(Ag_2O)을 첨가하였

선문대학교 전자정보통신공학부

(아산시 당정면 갈산리 100)

Fax : 041-530-7426

E-mail : shlee@email.sunmoon.ac.kr)

2001년 12월 28일 접수, 2002년 2월 14일 1차 심사 완료

2002년 3월 6일 최종 심사 완료

다. 산화은은 초전도체와 반응하지 않으며 초전도체에 첨가되어도 시료의 초전도 특성이 저하되지 않는 물질로 여겨지고 있으므로, 본 연구의 목적인 pinning center의 도입에 있어서 적합한 재료로 생각된다.

2. 실험방법

시편은 99.9% 순도의 Bi_2O_3 , PbO , SrCO_3 와 CuO 분말을 혼합과 하소의 공정을 포함하는 고상 반응법으로 제조하였다. 저울에서 정량한 분말을 알루미늄나막자 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°C 에서 24시간 하소하였다. 하소된 분말은 알루미늄나막자사발에서 분쇄한 후 1-5wt% 산화은(Ag_2O)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 소결하였다. 완성된 시료는 반경 10 mm, 두께 0.1 cm의 흑색 원판형을 하고 있다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 제작한 BiPbSrCaCuO 계 초전도시료에서는 그림 1에서 제시하는 Suspension 효과가 관측되었다.

이 그림은 초전도체가 반자성효과에 의하여 자석 상부에 자기 부상하는 현상과 자기부양 효과에 의해서 BiPbSrCaCuO 계 시료가 toroidal 영구자석의 하

부에 매달리는 현상을 동시에 나타낸 것이다. 그러나 ring 형태를 취하고 있지 않는 원추형 자석에서는 자기부양 효과가 관측되지 않았다. 본 연구에서는 pinning center로서 작용하는 첨가물로 산화은(Ag_2O)를 선택하여 산화은 첨가량과 시료의 소결온도를 변수로 Suspension 효과가 발생하는 최적의 초전도 시료 제조조건을 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 그림2에 나타낸다. 자기부양 효과는 시료에 작용하는 중력, 자기반발력 및 시료의 중량보다 초전도체와 자석간의 흡인력이 상대적으로 크게 나타날 때 발생하는 현상으로 생각된다. 그림 2의 실험에서 세로축 weight(g)은 자기부양효과가 발생하기 시작할 때의 시료의 중량을 의미하며 산화은의 첨가량에 따라 중량변화를 조사한 결과이다. 그림2의 결과로부터 초전도 시료에 2%의 산화은을 첨가하였을 때 자기부양 효과가 가장 현저하게 나타났으며 첨가량이 5%로 증가하면 이 효과가 감소한다. 이 결과로부터 산화은을 첨가하지 않은 시료와 비교하여 산화은을 첨가하였을 때 자기부양효과를 발생하는 pinning force가 크게 나타남을 알 수 있다. 이후 본 연구에서는 자기부양효과

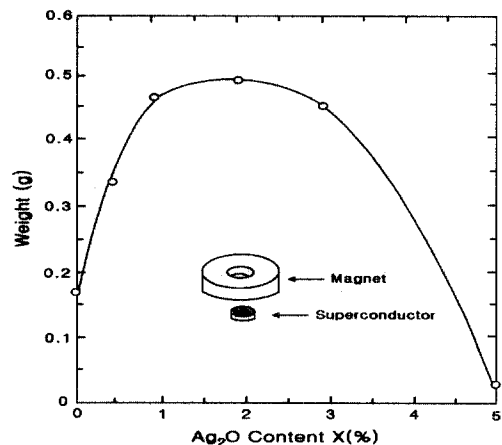


그림 2. 자기 부상 효과가 나타나기 시작하는 시료의 중량변화.

Fig. 2. Changes in the weight of the superconducting sample which begin to suspend beneath a magnet versus content of Ag_2O .

그림 1. 자기 부상 현상과 자기 부상효과.

Fig. 1. Magnetic levitation due to diamagnetic effect and magnetic suspension due to the magnetic suspension.

가 가장 현저하게 나타나는 2%의 산화은을 첨가한 Bi계 초전도체를 시료로 하였다.

본 연구에서 사용하고있는 자석은 ring형태의 toroidal 자석이며 자석의 재질은 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 그림 3의 측정장치를 고안하였다. 이 장치는 초전도체에 외부로부터 자계를 인가하면서 시료에 작용하는 자기반발력과 자기 부양 효과에 의한 자기흡인력을 동시에 측정할 수 있도록 제작되었다. 본 실험장치는 시료에 외부로부터 자계가 인가됨에 따라 초전도시료가 반자성 효과로 인하여 자기적으로 반발될 경우 초전도 시료의 자기 반발력이 seesaw를 통하여 전달되어 전자 저울을 밀어 올린다. 한편 자기부양 효과에 의하여 초전도 시료와 자석 사이에서 자기 흡인력이 작용하게되면 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 그림4에 나타낸다.

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

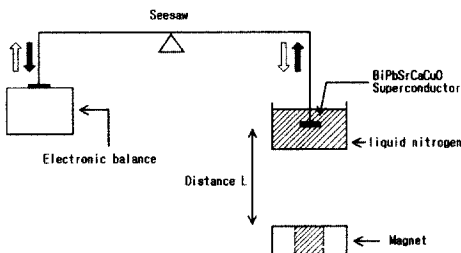


그림 3. 자기력 측정장치.

Fig. 3. Schematic diagram of the apparatus for the magnetic force measurement by seesaw.

시료의 간격이 약7mm 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 발생하게된다.

본 연구에서 발생하는 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.

다음으로 본 연구에서 관측한 자기부양 효과의 발생 메커니즘을 고찰한다. toroidal 자석의 중심부분에서 측정된 자속밀도로부터 추정되는 자력선 분포를 모식적으로 나타내면 그림5(a)가 된다. 자력선의 방향은 그림에서 표시한 점선을 경계로 아랫 방향의 자력선과 자석의 중심부분으로 들어가는 윗 방향의 자력선으로 나뉘게 된다. 그림5(b)에서는 toroidal 자석의 중심부분에서 관측한 자속밀도 분포를 나타내었다. 그림5(b)와 같이 불균일한 자속밀도를 나타내는 toroidal 자석의 하부로부터 약 3mm의 부분, 즉 자속밀도 분포의 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

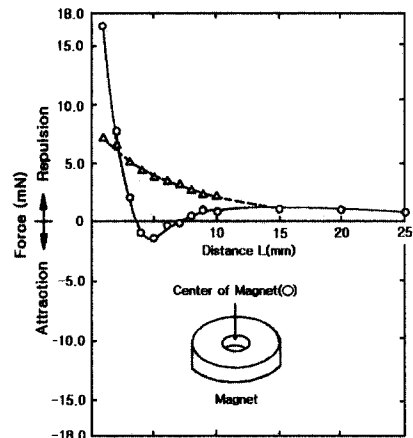


그림 4. 시료와 자석과의 거리에 대한 자기력 변화.

Fig. 4. Changes in the magnetic force versus the distance between the superconducting sample and the magnet.

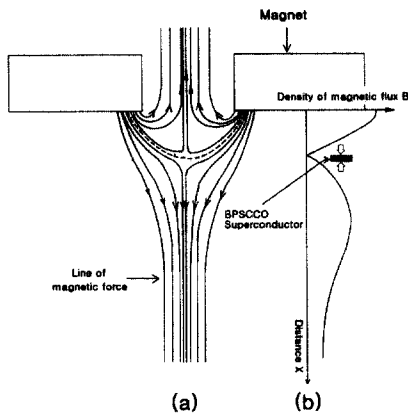


그림 5. 자력선 분포와 자속 밀도 분포.

- (a) Toroidal 자석의 중심 부분에서 관측되는 자력선 분포.
- (b) 중심축 방향의 자력선 분포와 초전도체에 작용하는 자기력.

Fig. 5. 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.

작용하게 된다. 결과적으로 자석 하부로부터 초전도체가 위치하여 자석에 매달리는 자기부양효과가 나타나게 된다.

또한 산화은을 첨가하지 않은 BiPbSrCaCuO계 초전도체와 산화은을 첨가한 시료를 이용하여 자기부양효과를 측정하여 pinning center의 필요성을 검토하였다. 산화은을 첨가하지 않은 BiPbSrCaCuO계 초전도체의 경우 자기부양효과는 액체질소 온도에서는 발생하지 않았다. 그러나 시료의 온도가 상승함에 따라(임계온도이하) 자기부양현상이 나타나게 된다. 이 결과가 본 연구에서 관측되는 자기부양효과에는 pinning center가 발생 메커니즘으로서 작용할 가능성을 시사하고 있다.

4. 결론

BiPbSrCaCuO계 초전도 소결체에 산화은을 첨가

하여 자기 부양 효과를 나타내는 시료의 제작 조건을 조사하였다. 2%의 산화은이 첨가된 시편에서 자기 부양 효과가 가장 효과적으로 관측되었다. toroidal자석에서 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 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 중요함을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국전력의 위탁을 받아 기초전력공학 공동연구소의 지원하에 2001년도 전력기술기초연구(과제번호 01-025)로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] P. N. Peter, R. C. Sick, E. W. Urbon, C. Y. Huang, and M. K. Wu, "Observation of enhanced properties in samples of silver oxide doped $YBa_2Cu_3O_x$ ", Appl. Phys. Lett., Vol. 52, No. 24, p. 2066, 1988.
- [2] P. J. Oueph, "Effect of an external force on levitation of a magnet over a superconductor", J. Appl. Phys. A, Vol. 50, p. 361, 1990.
- [3] 이상현 "YBaCuO계 초전도체의 자기적 성질", 전기전자재료학회논문지, 12권, 6호, p. 542, 1999.
- [4] 박성재, 김용선, 김채욱, "회전실험에서의 다결정 $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ 초전도체내의 Vortex flux의 거동", 전기전자재료학회논문지, 11권, 9호, p. 751, 1998.
- [5] 이상현, "자기적 성질을 응용한 YBaCuO계 초전도자기센서", 전기전자재료학회논문지, 14권, 6호, p. 491, 2001.