

초전도 자기부상 시스템

論文
55C-4-10

Magnetic Levitation System of High Tc Superconductor

李尙憲^{*}
(Sang-Heon Lee)

Abstract – The magnetic levitation effect a high Tc superconductor beneath the toroidal permanent magnet was examined by means of a improved magnetic seesaw method. Magnetic effects associated with penetration and pinning in superconductor. One of these was focussing of magnetic field by superconductor and the other was magnetic levitation. The existence of equilibrium was shown to be related to hysteresis observed in the force separation for a toroidal permanent magnet and superconductor. Obtained results indicate that magnetic levitation effect in the present case was mainly due to diamagnetic effect.

Key Words : Magnetic Levitation, Magnetic Seesaw, Toroidal Permanent Magnet

1. 서 론

에너지 분야에서 혁신적인 기술혁명을 일으킬 수 있는 고온 초전도 재료 개발이 부분적으로 성공함에 따라 국내에서의 소재개발 및 실용화 기술 개발이 시급하게 되었다. 초전도 재료는 발전기, 송전케이블, 전기에너지 저장 등의 초전도 전력시스템과 핵융합, MHD 발전 등의 신에너지 기술의 핵심 소재로 사용되며, 자기부상열차, 핵자기 단층촬영, 주요 자원 회수용 자기분리장치, 무접촉 베어링 등 산업체 전반에 응용될 수 있다. 전기 에너지 저장의 실현을 위해서는 높은 전류밀도를 갖는 초전도체의 실현이 요구되며 이를 위해서는 자기력 효과가 큰 초전도체의 개발이 시급하다. 자기력을 응용한 기계요소로는 Bulk형 고온초전도체를 이용한 무접촉 베어링과 진동흡수를 위한 감쇠기 등이 있으며, 초전도 베어링은 회전시 회전력의 손실을 최소화시키기 위한 에너지 전달 장치에 사용되는 기계요소로서 그 응용 가능성은 무한하다고 할 수 있다. 이 분야의 연구는 별크형 초전도체를 특별한 가공없이 직접 활용할 수 있는 제조기술을 개발함으로서 여러 응용분야에 다양하게 활용될 수 있으며, 에너지저장 및 산업전반에 혁신적인 변화를 가져올 수 있다. 자기 부상효과는 P.N.Peter에 의하여 발견되었으며[1], 이 현상은 별크형 산화물 초전도체를 응용하기 위한 연구로 가장 쉽게 적용할 수 있는 분야인 자기 베어링과 플라이휠 에너지 저장장치와 같은 초전도체의 자기력을 응용한 분야에 있어서 중요한 현상으로 인식되고 있다. 따라서 자기부상효과의 메커니즘 및 자기적 특성, 자석과 초전도체간의 부상특성

에 관한 많은 물성 연구가 수행되고 있다[2-4]. 본 연구에서는 toroidal형 영구자석에서 발생하는 초전도체에서 자기부상 효과의 분석을 연구의 목적으로 한다.

2. 실험방법

초전도 시료는 99.9% 순도의 Y_2O_3 , $BaCO_3$ 와 CuO 분말을 혼합과 하소의 공정을 포함하는 고상 반응법으로 제조하였다. 저울에서 정량 한 분말을 알루미나 막자사발에서 균일하게 혼합하였다. 혼합된 분말은 840°C에서 24시간 하소하였다. 하소된 화합물을 탄산염의 혼합물을 전한 질산염으로 용해하여 질산염으로 한다. 이 혼합 용액에 구연산과 에틸렌글리콜을 첨가하여 가열각반을 하였다.

가열각반을 계속하면 혼합용액중의 수분이 증발하고 용액이 재 용해되어 이온상태가 된다. 즉 용질인 구연산염이 용매 중에 균일하게 분산된 상태가 된다. 반응을 계속하면 생성된 gel화합물을 스펀지 상으로 변화하여 반응이 종료된다. gel화합물을 열분해 하면 회색의 전구체가 형성된다. 전구체 분말을 가열처리하면 최종적으로 고온 초전도체가 얻어진다. 완성된 시료는 반경 10 mm, 두께 1 mm의 흑색 원판형을 하고 있다. 본 연구에서 사용하고 있는 자석은 ring형태의 toroidal자석이며 자석의 재질은 Nd-Fe-B이고, 자석의 세기는 0.11T이다. toroidal 자석과 초전도체 사이에 작용하는 자기 반발력과 흡인력의 관계를 조사하기 위하여 seesaw를 응용한 자기력을 측정할 수 있는 기구를 고안하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 제작한 초전도 시료에서는 그림 1에서 제시하는 자기부상 효과가 관측되었다. 이 그림은 초전도체가 반자성효과에 의하여 자석 상부에 부상하는 현상과 toroidal

* 교신저자, 正會員 : 선문대학교 전자공학부 교수

E-mail : shelee@sunmoon.ac.kr

接受日字 : 2006年 2月 13日

最終完了 : 2006年 2月 26日

영구자석의 하부에 매달리는 현상을 동시에 나타낸 것이다. 그러나 ring 형태를 취하고 있지 않는 원추형 자석에서는 자기부상 효과가 관측되지 않았다.

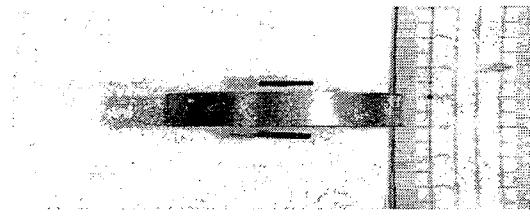


그림 1. 자기 부상 현상.

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

자기장에서 체적V, 자화M을 갖는 물질에 작용하는 자기력을 1차원으로 나타내면 다음과 같다.

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

(1)식에서 B는 자속밀도이다. 거리에 대하여 불균일한 자속밀도 분포를 갖는 자기장에서는 (1)식으로부터 자속밀도 기울기의 부호가 (+)와 (-)에 대하여 물질에 작용하는 자기력의 방향은 서로 반대가 된다. 초전도체에 작용하는 자기력 F는 초전도체의 자화 (M)과 자계분포(H)로부터 자속밀도 분포의 기울기가 (+)와 (-)로 나뉘어 지는 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 작용하게 된다.

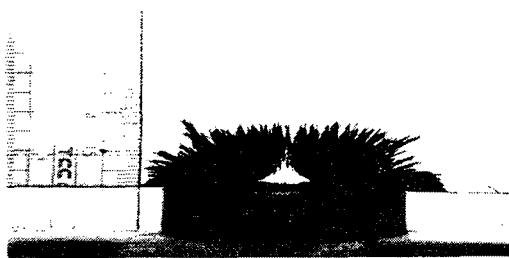


그림 2. Toroidal 자석의 자계분포.

Fig. 2. Distribution of magnetic field of toroidal magnet.

toroidal 자석의 자계 분포 형태를 조사하기 위하여 철분을 이용하여 실험하였다. 이 결과를 그림 2에 제시한다. 그림에서 toroidal 자석의 중심부분에서는 철분이 존재하지 않는 공동부분이 나타났다. 이 현상은 자력선 분포를 가시화한 결과로서 철분의 분포 형태는 toroidal 자석으로부터의 자력선 분포를 의미한다. toroidal 자석의 중심부분은 철분이

존재하지 않는 자력선의 밀도가 적은 부분을 의미한다.

toroidal 영구자석의 자속밀도를 가우스메타로 측정하였다. 가우스메타를 사용하여 toroidal 자석의 중심부분의 자속밀도를 측정하였다. 이 결과를 그림 3에 나타낸다.

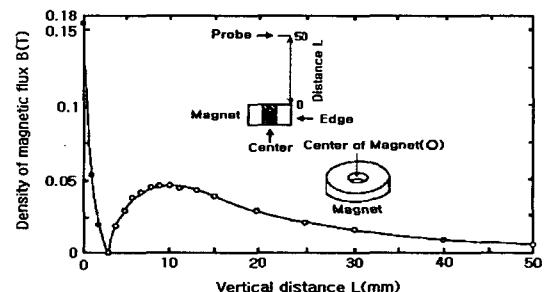


그림 3. Toroidal 자석의 자속 밀도 분포.

Fig. 3. Distribution of magnetic flux density arised from the toroidal magnet.

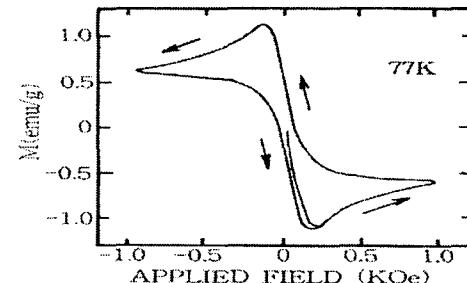


그림 4. 초전도체의 자화곡선(초전도체에 자계를 인가하지 않은 상태에서 냉각).

Fig. 4. The magnetization curve for superconducting sample at 77 K. Hysteresis curve was obtained after cooling in zero field.

toroidal 자석의 중심 부분에서 측정한 경우(○), 자속 밀도는 자석과 가우스 메타의 측정 probe의 거리가 50mm에서부터 10mm까지의 범위에서는 단조롭게 증가하는 경향이 있으나, 10mm 이하에서는 역으로 감소하여 약 3.5mm의 거리가 되면 자속밀도는 0이 된다. 거리가 3.5mm 이하가 되면 자속밀도는 다시 증가하게 된다. 3.5mm이하의 거리에서는 가우스메타의 지시가 (-)가 되므로 측정 probe를 반대 방향으로 하여 측정하였다(●). 이 부분에서는 측정거리가 3.5mm 이상의 자력선 방향과 3.5mm 이하의 자력선 방향이 180°반전하고 있다. 따라서 toroidal 자석으로부터 하부 3.5mm에 위치한 부분을 경계로 하여 자력선의 방향이 자석을 중심을 향하는 상 방향과 자석의 하부를 향하는 자력선으로 나뉘게 된다.

그림 4에는 77K에서 VSM(진동 시료형 자력계)로 측정한 YBaCuO 초전도체의 자화곡선을 나타낸다.

초전도체의 자화가 인가되는 자계의 주사방향에 의존하므로 초전도체에 작용하는 자기력도 초전도체에 영구자석을

근접하는 조건과 멀어지는 조건에서 히스테리시스를 나타낸다. 그림 4의 자기 히스테리시스와 (1)식으로부터 초전도 시료에 작용하는 자기력을 계산하였다. 영구자석 표면으로부터 3.5mm 부근에서 toroidal 영구자석과 초전도체 사이에는 자기반발력이 작용한다. 3.5mm 이상의 거리에서는 자기력의 방향이 역전되어, 영구자석과 초전도체 사이에는 자기인력이 작용하게 된다. toroidal 영구자석의 하부에서는 중력 g 와 평형이 되는 위치, toroidal 영구자석 하부로부터 3.5~4mm의 위치에서 자기부상현상이 발생하는 것으로 사려된다. 한편 영구자석 상부로 부상하는 위치는 중력 g 와 평형이 되는 위치, toroidal 영구자석 하부로부터 3.~3.5mm의 위치이며, 초전도체는 toroidal 영구자석이 근접함에 따라 반발력도 증가하는 것으로 사려 된다. 다음으로 toroidal 자석과 초전도체 사이에 작용하는 자기반발력과 흡인력을 관계를 조사하였다. 액체질소에서 냉각한 초전도체를 toroidal 영구자석의 중심축을 따라 이동시켜가며 중량변화를 측정하였다. 그림 6은 초전도체에 외부로부터 자계를 인가하면서 시료에 작용하는 자기반발력과 자기흡인력을 동시에 측정할 수 있도록 제작되었다. 본 실험 장치는 시료에 외부로부터 자계가 인가됨에 따라 초전도 시료가 반자성 효과로 인하여 자기적으로 반발될 경우 초전도 시료의 자기반발력이 seesaw를 통하여 전달되어 전자저울을 밑으로 누르게 된다. 한편 자기부양효과에 의하여 초전도 시료와 자석 사이에서 자기흡인력이 작용하게되면 자기흡인력은 seesaw를 통하여 전달되어 전자저울을 위로 끌어올리는 힘으로 나타난다. 이 장치를 이용하여 초전도 시료와 toroidal 자석에서 발생하는 자기반발력과 자기흡인력의 변화를 측정하였다.

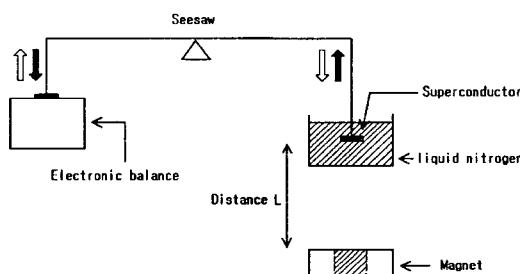


그림 5. 자기력 측정 장치

Fig. 5. Magnetic force measurement by seesaw.

측정 결과를 그림 6에 제시한다. toroidal 영구자석의 표면으로부터 3.5mm 부근까지 toroidal 영구자석과 초전도체 간에는 자기반발력이 관찰되며, 3.5mm 이상에서는 자기력의 방향이 역전되어, toroidal 영구자석과 초전도체 사이에는 자기인력이 작용한다. toroidal 형태의 불균일한 자속밀도 분포를 갖는 자기장에서는 (1)식으로부터 자속밀도 기울기의 부호가 (+)와 (-)에 대하여 물질에 작용하는 자기력의 방향은 서로 반대가 된다. 불균일한 자속밀도를 나타내는 toroidal 자석의 하부로부터 약 3.5 mm의 부분, 즉 자속밀도 분포의 기울기가 (+)와 (-)로 나뉘어지는 부분에 초전도체

가 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 작용하게 된다.

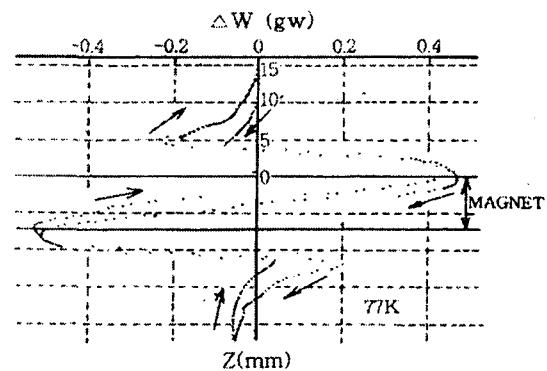


그림 6. 자기력 측정 결과.

Fig. 6. Observed magnetic force exerted upon the permanent magnet.

결과적으로 자석 하부로부터 3.5mm의 자속밀도가 0이 되는 부분에 초전도체가 위치하여 주위의 자장의 기울기로부터 자기력을 받아 가장 안정된 장소에서 자석에 매달리는 자기효과가 나타나게 된다.

4. 결 론

toroidal 형태의 불균일한 자계분포를 갖는 조건에서 관측되는 자기부상효과는 자석의 중심부분에서만 발생하며, 자석의 ring부분에서는 관측되지 않았다. 이 결과는 인가되는 자계의 형상 및 자속의 분포 형태와 같은 외인적인 요소가 크게 작용하고 있음을 의미한다. 자기부상효과에 관한 측정 결과로부터 자속밀도가 극소가 되는 toroidal 자석의 하부로부터 3.5mm의 거리에 위치한 장소에 초전도체가 놓이게 되면 초전도체는 반자성효과로 인하여 초전도체의 상,하로부터 작용하는 자기력을 받게 된다. (+), (-)의 자속밀도 분포의 기울기를 갖는 toroidal 자석으로부터 받는 반자성 효과가 중첩되어 발생하는 현상으로 고찰된다. 이 결과로 본 연구의 자기부상효과는 Meissner 효과가 주된 발생 메커니즘으로 판단되었다.

감사의 글

This research was financially supported by a grant from ETEP.

참 고 문 헌

- [1] P.N.Peter, R.C.Sick, E.W.Urbon, C.Y.Huang, M.K.Wu, "Observation of enhanced properties in samples of silver oxide doped YBaCuO", Appl. Phys. Lett., Vol.

- 52, No.24 (1988), p.2066.
- [2] M.Murakami, "Melt processing of YBaCuO superconductors and critical currents", Modern Physics Letters, Vol. 4, No.3 (1993) PP.163-271.
- [3] F.Hellman, E.M.Gyorgy, D.W.Johnson, J.R.Wang, R.C. Sherwood, " Levitation of a magnet over flat type II superconductor", J.Appl.Phys. Vol. 63, No.2, (1988) p.447.
- [4] D.B.Marshall, R.E.DeWames, P.E.D.Morgan, J.J.Ratto, "High T_c Superconductor Implications for Magnetic Suspension and Shielding", Appl. Phys., Vol. 52, (1989), pp. 87-90.

저 자 소 개



이 상 혼(李尙憲)

1989년 일본 TOKAI University

전자공학과 공학사

1991년 일본 TOKAI University

전자공학과 공학석사 1994년 일본

TOKAI University 전자공학과 공학박사

1994년-1997년 동경전기대학

초전도물성연구센터 연구교수

1995년-1997년 일본

ISTEC(초전도공학연구소) 책임연구원

1997년-현재 선문대학교 전자공학부 교수