

A Study on the Electric Characteristics of High Tc Superconductor

李 尙 憲[†]
(Sang-Heon Lee)

Abstract - The electric properties in YBCO superconductor was studied. In the measurement of current-voltage characteristics, a voltage across the superconducting sample was observed on applying an external magnetic field. The voltage increases with increase in applied magnetic flux, but it becomes constant at about 10^{-2} T. The voltage continues to appear the removal of the magnetic field. The appearance of the voltage is ascribed to the trapping of magnetic flux. Depending on the direction of applied magnetic flux less than 2.5×10^{-5} T, the voltage in the magnetized sample increases or decreases.

Key Words : YBCO, 전자기특성, 자기 플럭스

1. 서 론

초전도 재료는 선재의 형태로 가공하면 송전선이나 변압기, 발전기 그리고 전력저장장치 등의 개발에 사용되어 전력계통의 효율을 극대화시킬 수 있는 재료로서, 인류의 에너지 문제해결에 크게 기여할 재료로 기대되고 있다[1-3]. 더욱이 1980년대 후반에 개발된 고온 초전도재료는 액체질소의 비등점인 77K 이상에서 초전도 현상을 나타내어 초전도 전력기기의 실용화에 대한 기대를 고조시켜 관련 연구를 더욱 활성화시키고 있다. 초전도 선재는 초전도 전력기기 개발의 핵심 소재로서 고온 초전도 재료의 개발 초기부터 많은 연구가 수행되어 열적-기계적 PIT(Powder in tube) 가공법에 의한 Ag/Bi-2223 선재가 개발되어 현재 수km의 장선재가 시판되고 있으며, 이를 이용한 전력기기 개발이 진행 중이다.

초전도재료는 모든 전기, 전자 및 통신 산업의 핵심 기초 부품이 되며, 향후 21세기에서도 전력산업의 증가, 전자기 응용 및 정보통신기기의 발전 등으로 인해 모든 산업의 기초 소재로서 이에 대한 수요는 크게 증가할 것으로 예측된다. 특히 초전도재료 분야는 향후 기술 선진국으로의 진입을 위해서는 무엇보다도 많은 투자와 연구 개발이 필요한 분야라 할 수 있다. 따라서 신 기능 소재로의 응용이 가능하며, 특히 절연내압 특성을 크게 향상시킨 전력용 재료로, 전류특성을 크게 향상시킨 conductor 전기재료의 핵심 요소 기술이라 할 수 있으며, 또한 첨단 신소재 개발 및 산업화에 따른 전력기기 및 각종 전기 부품 소재에 있어 국내의 기술 선점화를 이룸으로써 산업, 경제적으로 파급효과가 매우 큰 기반기술이라 할 수 있다.

본 연구에 의하여 합성한 YBCO 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 연구는 YBCO 초전도 소결체에서 관측되는 전도 메커니즘을 해석하여 초전도 전기자기적 특성을 명확하게 조사 하는 것을 연구의 목적으로 하며, 초전도상태에 있는 시료가 자속에 의한 메모리의 기입이 가능하며 이러한 전기 자기적 효과의 기초물성에 대하여 정성적으로 고찰하고자 한다.

2. 실험 방법

시료는 99.9% 순도의 Y_2O_3 , $BaCO_3$, CuO 분말을 소성하여 출발 조성이 $Y_1Ba_2Cu_3O$ 가 되도록 평량 한 후 질산에 용해하였다.

본 용액에 시트르산 및 에틸렌글리콜을 첨가 하였다. 첨가한 시트르산은 용액 중에 포함되어 있는 금속 이온의 총 원자 가수를 계산하여 필요량을 첨가 하였다. 에틸렌글리콜은 금속 시트르산염이 에틸렌글리콜과 탈수 중합 반응을 일으키므로 polymer상 화합물 생성의 최적 비를 계산하여 필요량을 첨가하였다. 본 원료 용액을 약 90℃의 hot plate에서 2시간동안 가열 각반 하였다. 반응 종료 후 전기로에서 350℃에서 2시간동안 가열하여 전구체를 얻었다. 전구체 분말을 press 성형하여 860℃로 20시간동안 열처리하면 최종적으로 고온 초전도체가 얻어진다.

온도에 따른 저항의 변화를 측정하기 위하여 측정부분에 실리콘 다이오드 온도 센서를 설치하여 온도변화와 저항과의 관

[†] 교신저자, 正會員 : 선문대학교 전자공학부 교수

E-mail : shlee@sunmoon.ac.kr

接受日字 : 2006年 8月 23日

最終完了 : 2006年 9月 14日

계를 AC 4 단자 범을 이용하여 전기저항을 측정하였다. 전류 및 전압 단자는 접촉저항을 줄이기 위하여 In을 전극 재료로 사용하였고, 리드 선은 약 0.08 mmΦ의 구리선을 사용하였다. 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.

3. 결과 및 고찰

초전도 소결체는 많은 초전도 grain의 집합으로 되어 있다. 임계전류로는 grain의 내부를 흐르는 입자내부의 임계전류와 grain간을 흐르는 임계전류로 2종류가 있다. 입자내부의 임계전류는 비교적 크고, grain간을 흐르는 임계전류는 작다. grain간을 Josephson 결합으로 되어 있다고 생각되며, weak link로 모델링 된 결합이 약결합 모델이다. Josephson 약 결합 모델에 의하면 전류전압특성은

$$V \sim I^n \quad (I_c=0) \tag{1}$$

식이 된다. 이 식을 산화물 초전도체에 적용하게 되면,

$$V \sim (I - I_c)^n \tag{2}$$

식이 된다. 이 식에서 n은 1~ 3이다. 이식을 사용하여 임계전류Ic를 결정하면, 얻어진 지수에 의하여, 실제의 전류전압특성을 Josephson 약 결합 모델 특성으로 평가 할 수 있다.

액체 질소온도와 액체 헬륨 온도를 비교하면, 열에너지가 약20배의 차이가 있으며, 약 결합 부분에 대한 열요동 현상을 무시 할 수 없다. V.Ambegaokar는 열적 요동 현상에 대하여 이론적 해석을 수행 하였다. 소결체의 많은 부분을 Josephson 접합으로 정렬되어 있다고 가정 한다. 시료의 전류와 임계전류, 전압을 각각 I, Ic, V로 하면, 1개의 접합을 I, ic, v라고 가정하며, 접합저항을 r로 한다. 시료의 단면적을 S, 길이를 L이라고 하며, 시료 단면의 접합 밀도를 n1, 길이 방향의 접합밀도를 nL로 한다. 시료전류 I 및 시료전압 V는

$$I = I_c n_L S \tag{3}$$

$$V = icr (n_L^{1/2}) Lv \tag{4}$$

식이 된다. 따라서 본 연구의 전류 전압특성을 Josephson 모델에 적용하여 설명하도록 한다.

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.

산화물 초전도체의 단결정은 자계특성의 큰 이방성이 존재한다. 임계전류는 결정의 C축에 대하여 수평으로 인가한 특성과 비교하여 수직으로 인가한 특성에서 크게 나타난다.

그림1에 초전도 소결체의 인가자계 의존성을 조사 하였다. 그림1의 실험결과로부터, 시료전압은 10mT의 약자계에서 90°와 270° 부근에서 인가 자계와 시료면이 수직일 때 초전도 시료 전압은 가장 크게 나타나고, 0°와 180° 부근에서 인가 자계와 시료면이 평행일 때 초전도 시료 전압은 가장 작게 나타난다. 그러나, 열처리 공정을 수행한 초전도 시료의 인가 자계 의존성을 그림2에 나타낸다.

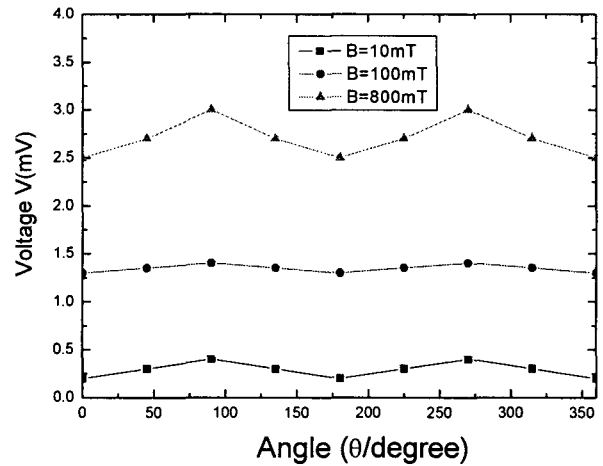


그림 1. YBCO 초전도체의 인가자계 각도 의존성
Fig. 1. Dependence of YBCO superconductor with magnetic field.

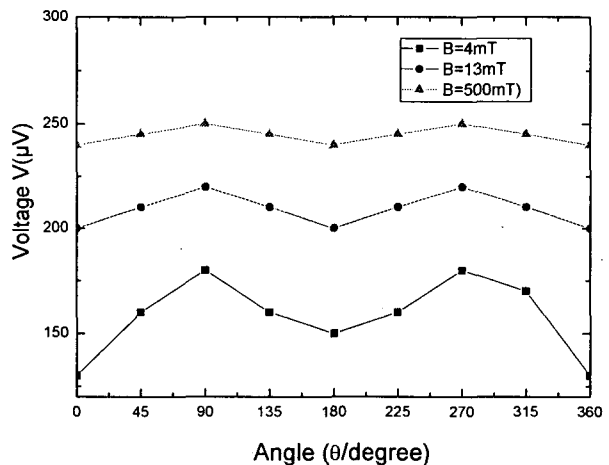


그림 2. YBCO 초전도체의 인가자계 각도 의존성
Fig. 2. Dependence of YBCO superconductor with magnetic field.

그림2의 결과로부터, 약한 자계에서는 그림1과 같은 결과의 특성이 관측되고 있다. 인가 자계 800 mT의 고 자계영역에서는 인가자계 의존성의 변화가 관측되지 않는다. 인가 자계의 세기가 커짐에 따라 초전도 시료 전압의 크기는 증가 하였으며, 특성 곡선도 정리 되어 있다. 이 결과를 약결합 모델에 적용하여 검토하여보면, 열처리 공정을 수행한 그림3의 특성은 초전도 grain 간의 결합이 증가하여, 인가 자계에 대하여도 결합이 유지되어 의존성에 변화가 없는 것으로 사료된다.

전류 전압 특성의 자계의존성의 대표적인 결과를 그림3에 나타낸다. 그림3(a)는 자계를 증가 하였을 때의 저 전압 영역(100 μ V)에 있어서의 특성이다. 수mT의 약자계의 전류 전압 특성은 크게 변화하고, 임계전류가 급격히 감소한다. 그러나, 100mT의 고 자계에서는 자계의존성이 약해지며, 임계 전류의 변화는 거의 관측 되지 않는다. 임계전류의 크기 도 거의 zero에 가깝게 관측 된다. 그림3(b)는 수mV의 고전압 영역에서 관측한 결과이다. 그림에서 약 1mV이상이 되면 이 영역에서는 linear한 부분이 관측 된다. 이러한 현상은 인가 자계를 작게 한 실험 조건에서도 같은 결과가 관측된다. 그림3(c)는 zero 자계에서 관측한 전류 전압 특성이다. 임계 전류는 매우 크고, 자계의존성이 0~1mT의 범위에서 도 현저하게 나타난다.

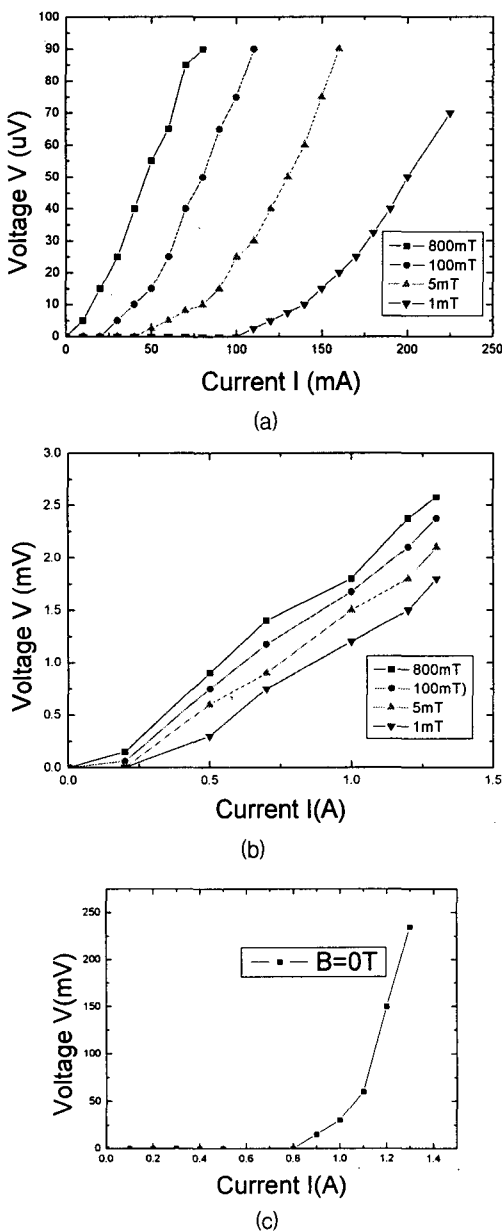


그림 3. YBCO 초전도체의 인가자계 의존성
 Fig. 3. Dependence of YBCO superconductor with magnetic field.

그림3의 측정 결과로부터 임계전류를 정량적인 관점에서 해석한다. Kosterlitz 이론에 의하면 전류 전압 특성은

$$V = a(I - I_c)^n \quad (3)$$

으로 가정 할 수 있다. a는 정수이다. 이 식으로부터 실험결과와 비교하여 임계전류를 결정하고 지수 n에 의하여 전류 전압 특성의 자계의존성을 해석 한다. a, n은 (3)식으로부터 결정한다.

본 연구에서 제작한 YBCO 초전도시료의 전류-전압특성의 결과를 그림4에 나타낸다.

그림4는 자계를 인가한 실험결과이며, 인가한 자계를 감소하면서 실험한 결과이다. 100 μ V이하의 전압 영역에서는 실험결과와 일치하고 있다. 이 결과로부터 본 실험결과는 Josephson 약 결합 모델로 생각할 수 있다. 자계 의존성은 인가 자계에 의하여 Josephson 약 결합이 전압상태가 되었음을 의미한다. 임계전류 I_c 의 인가자계 의존성을 나타낸다. 결과로부터 임계전류 밀도가 인가자계에 밀접하게 관계하고 있음을 알 수 있다. n값도 인가자계에 의존하고 있다. 일반적으로 n값은 수10으로 알려져 있다. 본 실험에서는 n값은 1~5사이에 있다. n값은 임계전류 밀도의 자계의존성을 의미하는 파라미터이며, n값이 1일 경우는 초전도 상태가 상전도 상태로 변화하였음을 의미하므로 n값은 비 선형성을 나타내는 파라미터라 할 수 있다.

특성(A)는 외부로부터 자계를 인가하지 않는 경우의 특성이며, 저항 값은 0.067 Ω 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 상전도 영역으로 천이된 결과로 생각된다. 시료의 주위온도를 77K로 하고 그림1의 삽입도 에서와 같이 BiSrCaCuO계 초전도 시료에 외부로부터 0.1 T의 자계를 인가하면 특성 (A)는 일 점쇄선으로 표시된 특성 (B)로 변화된다.

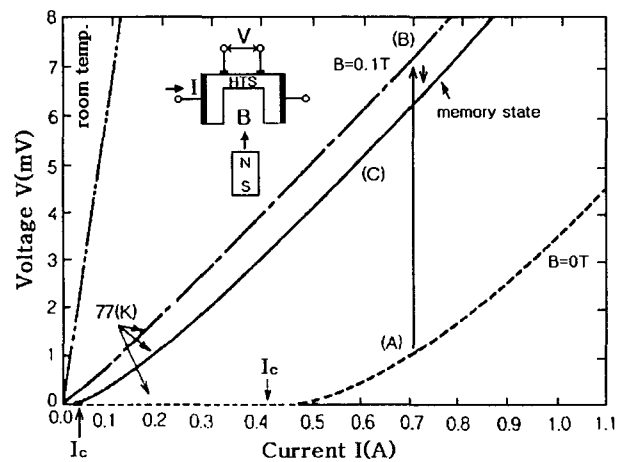


그림 4. YBCO 초전도체의 전류-전압특성.
 Fig. 4. Current-voltage characteristics of YBCO superconductor.

즉, 자계인가로 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 동작점은 (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. 본 현상은 많은 자속이 초전도 시료에 포함되어 있는 피닝 센터에 트랩 되어, 이 부분이 외부 자계가 제거된 이후에도 초전도 입자간의 weak link와 상호 작용을 통하여, 시료 내부의 상전도 영역이 증가시킴으로서 출력전압이 크게 발생 하는 것으로 고찰 된다. 초전도 소결체에서 관측되는 자기적 현상은 소결체 내부에의 초전도 영역이 인가 자계에 의하여 변화 하므로 발생 하는 현상으로 사려 된다.

본 연구에서 대상으로 하고 있는 초전도체는 미세한 입자들의 집합체이므로 시료내부에는 초전도 입자간의 결합강도가 강한 부분과 약결합 부분이 혼합되어 존재한다. 이러한 초전도 입자는 그림에서 나타내는 것과 같이 양 단자간을 연결하고 있거나 ring 형태로 연결되어 있는 부분도 존재하는 것으로 생각할 수 있다. 이와 같은 시료에 외부로부터 자계가 인가되면 초전도 입자 사이에는 영구 전류가 흐르게 되며, 이 영구 전류에 의해 외부 자장이 소거된 이후에도 시료에는 자속이 트랩된다. 또한 이 같은 자속은 ring 형태의 결합을 하고 있는 초전도 입자뿐만 아니라 개개의 초전도 입자의 결합에도 트랩되는 것으로 사료된다. 이 결과로서 초전도체에 트랩된 자속이 인접한 초전도 필라멘트의 약결합 부분에 들어가 그 부분의 초전도성을 파괴하는 것으로 생각된다. 그리하여 시료에 인가된 자장 및 트랩된 자속에 의하여 초전도 소결체의 약결합 부분이 초전도 상태에서부터 상전도 상태로 천이 되어, 초전도 상태의 단자간을 연결하는 초전도 필라멘트는 분단된다. 결과적으로 초전도 소결체의 단자 간에는 전압이 나타나게 된다.

따라서 본 결과는 본 연구의 초전도 Josephson 모델의 타당성을 입증하는 결과로서 많은 weak link가 존재하고 있는 초전도 소결체에 있어서 시료 내부에 자속을 트랩하는 피닝 센터와 같은 상전도 영역이 포함되어 있는 정도를 간단하게 조사할 수 있는 방법을 제시하고 있다.

시료전압의 메모리 효과는 자계인가에 따른 임계전류밀도가 자계 설정 방법에 의존하여 발생하는 현상이다.

4. 결 론

YBCO계 초전도체에 외부자계를 인가하면, 전압 단자간에는 전압이 발생하며, 외부 자계를 소거한 이후에도 전압

이 출력되는 전기 자기적 현상이 관측 되었다. 본 연구에서는 초전도 소결체의 전기 자기적 메모리 효과의 발생 메커니즘으로서 자속의 트랩 현상과 초전도체 내부에 존재하는 약결합을 고려한 Josephson 모델의 타당성을 전기적 특성을 측정하였다. 관측된 전기적 특성은 Josephson 모델에 적용하여 정성적으로 설명 하였다. 초전도체의 전기적 특성은 외부 자계 및 초전도 시료에 트랩된 자속의 상호 작용으로 인하여 초전도 소결체 내부의 약결합 부분이 파괴되어 발생하는 현상으로 사려 된다. 따라서 초전도체의 임계전류와 관련된 약결합이론과 Ambegaokar 이론과의 비교 검토를 수행하여 열요동 현상을 해석하게 되면 자속 크립현상과 관련되어 산화물 초전도체의 메커니즘을 규명할 수 있는 자료로 활용할 수 있다.

참 고 문 헌

- [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, M. Hukutomi, "Bi-based High Tc Superconductors" Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 27, No. 2, p.209, 1988.
- [3] V.Ambegaokar, Phys. Rev. Lett, Vol.22, p.1364, 1969.

저 자 소 개



이 상 헌 (李 尚 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 ISTE(초전도공학연구소) 책임연구원. 1997년~현재 선문대학교 전자공학부 교수.