

# YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-y</sub> 초전도 벌크의 중성자 조사 효과

이상헌 

선문대학교 전자공학과

## Neutron Irradiation Effect of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-y</sub> Superconductor

Sang Heon Lee

Department of Electronic Engineering, Sunmoon University, Asan 31460, Korea

(Received July 9, 2021; Revised July 28, 2021; Accepted July 29, 2021)

**Abstract:** The electrical characteristics of single-crystal composite superconductors produced by a melting process were studied by neutron irradiation. In order to improve the current characteristics of the YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-y</sub> superconductor, it is necessary to form an effective flux pinning center inside the superconductor. In this study, an increase in flux pinning was attempted through neutron irradiation onto YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-y</sub> superconductors. The neutron irradiation was performed at 30 MeV for 500 sec, The electrical properties of the superconductors were measured in a magnetic field of 5 Tesla at 50 K using a magnetic properties measurement system (MPMS). After neutron irradiation, the critical current density of the YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-y</sub> superconductor in a 1 Tesla magnetic field was  $1 \times 10^5$  A/cm<sup>2</sup>. Once neutrons were irradiated at 30 MeV and 10  $\mu$ A for 500 sec, the critical current density was observed to increase significantly. When neutrons are irradiated to a superconductor, micro-defects are created in the superconductor, and they act as flux pinning centers that hold the magnetic field generated when an electric current flows.

**Keywords:** YBCO, Bulk, Neutron, Irradiation, Magnetic properties measurement

### 1. 서 론

중성자를 이용한 전기 소재 연구는 기초과학의 핵심분야이며, 중성자 조사 및 산란에 관한 기술의 활용 분야는 초전도, 자성재료, 나노, 바이오 등 기초과학뿐만 아니라 자동차, 수소 연료전지산업 등의 일반 산업과 핵연료 및 핵심부품의 원자력 기술개발 분야의 국가 핵심연구분야 등 매우 다양하게 적용된다. 중성자를 이용하면 물질의 구조나 자성체의 자성에 대한 정보를 얻어낼 수 있기 때문에 중성자 조사 관련으로 전기 소재 응용 연구가 진행되고 있다.

✉ Sang Heon Lee; [shlee@sunmoon.ac.kr](mailto:shlee@sunmoon.ac.kr)

Copyright ©2021 KIEEME. All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

그러한 응용을 위해서는 초전도 재료의 임계 전류밀도, 전이온도 등의 전기 자기적 성질의 향상이 매우 시급하다. 초전도체의 전기 자기적 성질은 초전도 내부의 형성되는 나노 결함의 영향을 받는다. 결함의 크기가 나노 사이즈로 미세하고 균일하게 분산되어야 초전도 임계 특성을 향상시킬 수 있는데 이는 초전도체의 짧은 코히렌스의 길이에 기인한다 [1,2]. 따라서 초전도체의 임계 특성을 향상시키기 위하여는 외부로부터 인가되는 자기장을 포획하는 피닝 센터를 초전도 내부에 형성시키는 것이 필요하며 이를 위해서는 결정 내부에 균일하게 분산되는 결함을 생성시켜야만 한다. 이러한 결함을 효과적으로 제어하기 위하여 중성자 조사가 시도되고 있다 [3]. 금속과 같은 대부분의 전기 재료는 고에너지의 조사 빔을 맞으면 결함이 생성되어 모든 전기 물성이 저하된다. 그러나 초전도체에는 중성자 조사로 인하여 미세 결함이 생성되면 이러한 결함들이 전류

가 흐를 때 발생하는 자기장을 포획하는 플럭스 피닝 센터로 작용하므로 초전도 물성이 크게 개선되는 순기능 효과를 기대할 수 있다 [4-7]. 따라서 본 연구에서는 비교적 높은 온도에서 초전도 현상을 갖는  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$  (YBCO) 초전도체에 대한 중성자 조사를 실시하여 초전도 임계 특성을 향상시키고자 한다. 본 연구에서는 YBCO 초전도체의 중성자를 조사하였을 때 초전도체에 가해지는 임계전류밀도와 전이 온도의 변화를 측정하였으며, 중성자 조사에 따른 임계온도 및 임계전류밀도와의 관련성을 실험하였다.

### 2. 실험 방법

본 실험에서 사용된  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$  (YBCO) 분말은 99.9% 순도의  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaCeO}_3$ 와  $\text{CuO}$  분말을 사용하여 초전도 소결반응으로 제조하였다. 전자저울에서 칭량한 분말을 아세톤을 용매로 2시간 동안 불-밀링하여 균일한 분말을 얻고자 하였다. 혼합 분말은 공기 중  $910^\circ\text{C}$ 에서 20시간 하소하였다. 하소된 분말은 분쇄하여 몰드에 넣어서 정수압으로 압축하여 초전도 펠렛으로 제작하였다. 성형체는 공기 중  $950^\circ\text{C}$ 에서 5시간 소결한 후 로냉하였다. 이후 시편을  $1,100^\circ\text{C}$ 에서 30분간 유지한 후,  $30^\circ\text{C}/\text{h}$ 의 속도로  $1,000^\circ\text{C}$ 까지 냉각시켰다. 이 시편을 다시  $2^\circ\text{C}/\text{h}$  속도로  $950^\circ\text{C}$ 로 냉각시킨 후 10시간 유지하였다. 중성자 조사는 원자력의 학원의 MC 50의 사이클로트론을 이용하여 초전도 벌크에 대한 고속 중성자 조사 실험을 수행하였으며, 중성자 조사 조건은 30 MeV, 10  $\mu\text{A}$ 로 수행하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

그림 1은 중성자 조사 전과 후의 YBCO 초전도체의 X선 회절 결과이다. 모든 시편에서 전반적으로 c축으로 YBCO 상이 생성된 것으로 나타나며, 중성자를 조사한 경우에는 중성자 조사 전과 비교하여 YBCO의 회절 패턴이 같게 나타난다. 또한 다른 제2상의 X선 회절 패턴은 관찰되지 않는데, 이는 중성자 조사로 인하여 YBCO 초전도상에는 변화가 없음을 의미한다.

용융공정으로 제작한 Yttrium의 몰비를 1.1~1.3로 변화시킨 후 YBCO 초전도체를 상온에서 30 MeV의 중성자 에너지 범위에서 500 sec 간 중성자를 c축에 평행하게 조사하였다. 그림 2는 MPMS (magnetic properties measurement system)을 사용하여 초전도 전이 온도를 측정한 결과를 나타낸다. 그림에서 중성자 조사 전과 비교하여 중성자 조사 후의 초전도체 임계 온도는 증가하였

며, 임계온도 증가의 전이 폭은 YBCO 초전도체의 구성 원소인 Yttrium의 몰비가 증가할수록 임계 온도의 증가 폭은 크게 나타났다.

그림 3은 YBCO 초전도체를 상온에서 30 MeV의 중성자 에너지 범위에서 500 sec 간 중성자를 조사한 후, 50 K의 온도에서 중성자 조사 전과 후의 임계전류밀도의 변화를 측정하였다. 그림에서 인가 자장이 2.5 테슬라에서 중성자 조사 전과 후의 임계전류밀도( $J_c$ )의 변화폭이 크게 나타났으며, 중성자 조사 전의 YBCO 초전도체의 임계전류밀도는  $4 \times 10^4 \text{ A}/\text{cm}^2$ 로 측정되었으며 조사 후의 임계전류밀도는  $2 \times 10^5 \text{ A}/\text{cm}^2$ 로 증가하였다.

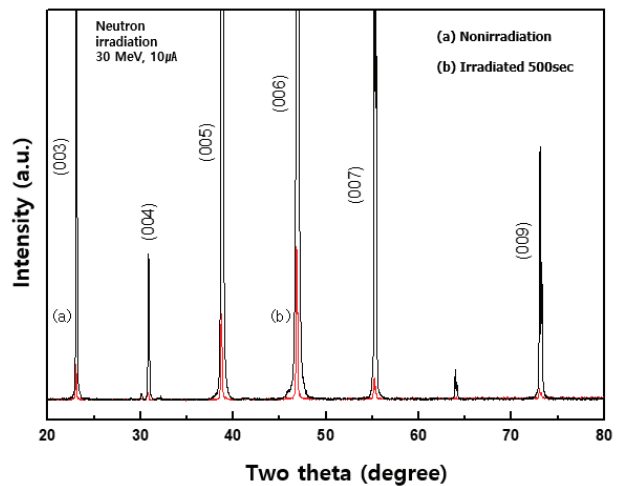


Fig. 1. X-ray diffraction patterns of the YBCO bulk measured. (a) Before irradiation and (b) after irradiation with 30 MeV at 500 sec.

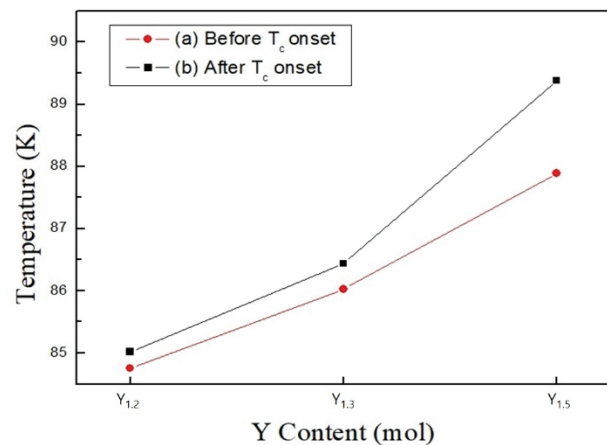


Fig. 2. Resistivity-temperature curves for YBCO bulk measured. (a) Before irradiation and (b) after irradiation with 30 MeV at 500 sec.

일반적으로 초전도체의 임계전류밀도는 외부에서 가해지는 자장이 증가하면  $J_c$ 는 감소하게 된다. 그러나 본 실험 결과에서는 자장이 증가하면 임계전류밀도는 증가하다가 자기장 2.5 테슬라에서 최대치가 된 후 감소한다. 이와 같은 결과는 외부 자장을 포획하는 피닝 센터가 많이 형성되어 있을 때 나타나는 현상으로 사료되며 중성자 조사에 의하여 초전도체 내부에 플렉스피닝 센터가 많이 형성되었음을 의미한다. 따라서 중성자 조사에 의하면 초전도체에는 전류가 흐를 때 자기장을 잡아 주는 플렉스피닝 센터로 작용하므로 오히려 임계 특성이 크게 향상되었다.

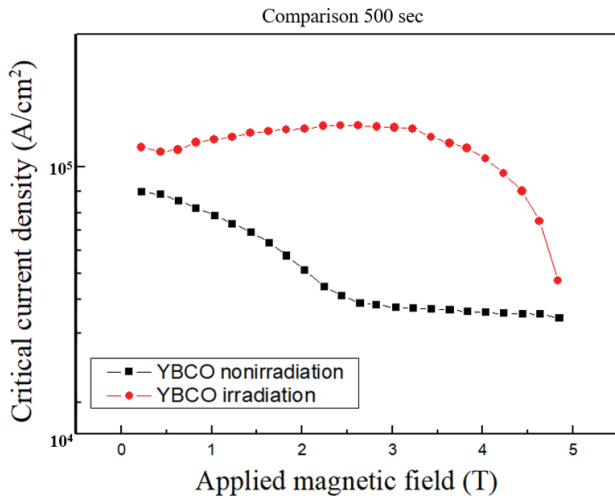


Fig. 3. Critical current density of YBCO superconducting specimens before and after neutrons for 500 seconds.

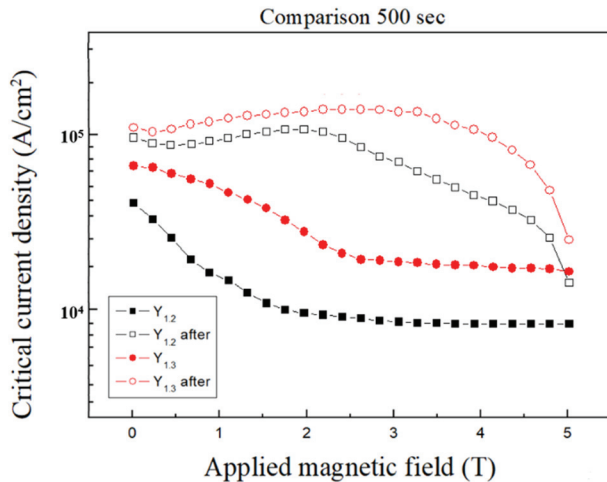


Fig. 4. Critical characteristics of  $Y_{1.2}Ba_2Cu_3O_{7-y}$ ,  $Y_{1.3}Ba_2Cu_3O_{7-y}$  superconducting specimens before and after neutron irradiation.

그림 4는  $Y_{1.2}Ba_2Cu_3O_{7-y}$  초전도체와  $Y_{1.3}Ba_2Cu_3O_{7-y}$  초전도체의 초전도 구성원소 중 Yttrium의 몰비의 변화에 따른 중성자 조사 효과를 측정된 결과이다. 그림에서는 Yttrium의 몰비가 증가할수록 중성자 조사 전과 후의 그 래프 변화폭이 크게 나타나고 있으며 자기장 2~3 테슬라에서 감소한다. 중성자의 에너지가 너무 높은 경우에는 초전도체에서 방사선이 장기간 발생하는 문제가 있고, 중성자 에너지가 너무 낮은 경우에는 임계전류밀도의 개선 효과가 적은 문제가 있다.

본 연구에서는 YBCO 용융체에 중성자를 조사함으로써 YBCO 초전도체의 초전도 임계온도를 0.3~0.5°C 상승할 수 있다. 또한, 중성자 조사 후에도 YBCO 초전도체는 2 T의 자기장 분위기에서  $10^5 A/cm^2$  이상의 임계전류밀도를 나타낸다. 초전도체에 중성자를 조사하는 경우 초전도체 내부의 미세 구조에 영향을 주게 되며 일종의 결함을 생성하게 된다. 이러한 결함은 피닝 센터를 형성하게 되고 상기의 피닝 센터는 전류가 흐를 때 발생하는 자기장을 묶어 두는 기능을 수행함으로써 전류밀도를 증가하게 된다. 본 연구에서는 초전도 물성의 향상을 위하여 중성자를 이용하고 이를 적절한 에너지로 조사함으로써, 조사된 중성자가 초전도체 내외부의 전하에 영향을 받지 않고, 초전도체 전체 영역에 고르게 조사되기 때문에 초전도체 전체 영역에 pinning center를 고르게 형성할 수 있다. 중성자가 아닌 양성자, 전자 또는 이온을 조사하는 경우에는 초전도체 내외부의 전하의 영향으로 인하여 특정 영역에 집중하게 되며 피닝 센터의 형성 문제가 발생할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 비교적 높은 온도에서 초전도 현상을 갖는 YBCO 초전도체에 대한 중성자 조사를 실시하여 초전도 임계 특성을 향상시키고자 하였다. 중성자 조사 시간은 500초이며 평균적인 중성자 에너지는 30 MeV이다. 중성자 조사는 초전도체의 임계전류밀도를 상승시켜 주지만 임계온도에도 영향을 끼친다. 중성자 조사 시편은 Y의 함유량이 늘어날수록 증가하였으며 중성자 조사를 받은 시편은 0~2 T에서  $10^5 A/cm^2$ 의 임계전류밀도 값을 유지하였다. 중성자 조사는 본 연구는 용융결정 성장을 시도하여 조성이 균일하고 불순질이 최소화된 중성자 조사용 단결정을 제조하였다. 인가 자장이 2.5 테슬라에서 중성자 조사 전과 후의 임계전류밀도( $J_c$ )의 변화폭이 크게 나타났으며, 중성자 조사에 따른 YBCO 초전도체의 임계전류밀도는  $2 \times 10^5 A/cm^2$ 로 증가하였으며 전이 온도는 0.2~0.5 K의 증

가 폭을 나타냈다. 또한 중성자 조사 전과 후의 YBCO 초전도체의 X-선 회절을 비교한 결과, YBCO의 회절 패턴이 같게 나타난다. 따라서 적절한 에너지로 조사함으로써, 중성자가 초전도체 내외부의 전하에 영향을 받지 않고, 초전도체 전체 영역에 고르게 조사되기 때문에 초전도체 전체 영역에 피닝 센터를 고르게 형성할 수 있다. 용융공정으로 형성된 초전도소재의 경우 낮은 자장의 온도 50 K에서 대략 5배의 임계전류밀도 향상을 기대할 수 있었다. 사이클로트론을 이용하여 초전도 벌크에 대한 고속 중성자 조사 실험 결과, 중성자 조사로 인해 초전도 격자에 미세 결함과 격자 뒤틀림이 발생하여 자기 플럭스를 향상시키는 역할을 수행하며, 초전도체의 전기적 특성을 개선할 수 있음을 확인하였다.

#### ORCID

Sang Heon Lee

<https://orcid.org/0000-0002-7400-9564>

#### REFERENCES

- [1] D. Behera, T. Mohanty, S. K. Dash, T. Banerjee, D. Kanjilal, and N. C. Mishra, *Radiat. Meas.*, **36**, 125 (2003). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(03\)00108-2](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(03)00108-2)]
- [2] M. K. Marhas, K. Balakrishnan, P. Saravanan, V. Ganesan, T. Srinivasan, D. Kanjilal, G. K. Mehta, M. Vedwyas, S. B. Ogale, S. P. Pai, M.S.R. Rao, R. Pinto, G. M. Rao, S. Senthilnathan, and S. Mohan, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*, **156**, 21 (1999). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(99\)00270-0](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(99)00270-0)]
- [3] R. Vlastou, E. N. Gazis, C. T. Papadopoulos, E. Liarocapis, D. Palles, N. Poulakis, S. Kossionides, M. Kokkoris, G. Kaliabakos, W. Assmann, and P. Berbeich, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*, **136**, 1286 (1998). [DOI: [https://doi.org/10.1016/s0168-583x\(97\)00845-8](https://doi.org/10.1016/s0168-583x(97)00845-8)]
- [4] U. Topal, L. Dorosinskii, and H. Sozeri, *Phys. C*, **407**, 49 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2004.04.009>]
- [5] U. Topal, L. Dorosinskiia, H. Ozkan, and H. Yavuz, *Phys. C*, **388**, 401 (2003). [DOI: [https://doi.org/10.1016/s0921-4534\(02\)02539-x](https://doi.org/10.1016/s0921-4534(02)02539-x)]
- [6] M. E. Amiryar and K. R. Pullen, *Appl. Sci.*, **7**, 286 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.3390/app7030286>]
- [7] J. H. Durrell, A. R. Dennis, J. Jaroszynski, M. D. Ainslie, K.G.B. Palmer, Y. H. Shi, A. M. Campbell, J. Hull, M. Strasik, E. E. Hellstrom, *Supercond. Sci. Technol.*, **27**, 082001 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1088/0953-2048/27/8/082001>]