

초전도 벌크의 자기적 특성을 위한 간편한 시스템

이상헌 

선문대학교 전자공학과

Magnetic Force Properties of Superconducting Bulk

Sang Heon Lee

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

(Received September 27, 2022; Revised November 2, 2022; Accepted November 8, 2022)

Abstract: To improve superconductor properties, the size of the crystal grains of the superconductor should be adjusted, the amount of electricity flowing through the superconductor should be increased, and the superconductor should be designed to withstand external magnetic fields. It is necessary to control the microstructure so that many flux pinning centers are developed inside the superconductor so that defects are generated physically or chemically, and the micro secondary phase for trapped magnetic flux must be dispersed inside the superconductor. In order to measure the superconducting magnetic force of the superconducting bulk in a simplified manner, the superconducting magnetic force was analyzed using an Nd-Fe-B permanent magnet of 3.80 kG. In particular, by delaying the growth of partially melted Y_2BaCuO_5 particles, we devised a plan to refine Y_2BaCuO_5 particles to effectively improve superconducting magnetic force, and analyzed superconducting magnetic force in a single crystal $YBa_2Cu_3O_{7-y}$ superconducting bulk using a gauss meter. The melted superconducting bulk traps 80% or more of the applied magnetic field, and can be used as a bulk magnet of high magnetic field magnetization applicable to electric power equipment.

Keywords: Superconducting specimen, Magnetic force, Levitation force

1. 서론

초전도 벌크 소재는 친환경, 고효율 에너지 배터리에 적용할 수 있는 기능성 부품 소재에 해당하며, 초전도 에너지 저장기에 응용되고 있다 [1,2]. 초전도 플라이 휠 배터리는 전기에너지를 회전에너지로 저장하거나, 또는 그 반대로 회전에너지를 전기에너지로 변환시키는 장치다. 이 장치는 전철에서 생산되는 전기에너지를 저장하거나, 태양광

이나 풍력의 전력 안정화, 밤 시간에 남은 전기에너지를 운동에너지로 저장, 낮 시간에 재활용하는데 사용된다 [3,4]. 이 장치의 핵심부품인 초전도체 베어링(superconductor bearing)에 고부가가치 초전도 소재가 사용된다. 초전도체와 영구자석의 반자성을 이용해서 중량체를 떠받치면서 마찰을 최소화하는 초전도 소재의 필요성이 대두된다 [5,6]. 초전도 소재의 특성은 에너지 저장용량을 결정하는 주 인자이며, 큰 에너지를 저장하려면 많은 중량을 공중에 띄워야 한다. 그러기 위해서는 영구 자석인 회전자와 고정자로 사용되는 영구자석과 초전도체의 성능이 우수해야 한다. Nd-B-Fe 영구자석의 자력은 0.4 T이하로 고정되어 있으므로 초전도체의 자기 반발력을 높여야 초전도 배터리에 많은 에너지를 저장할 수 있다. 초전도체 성능을 높여

✉ Sang Heon Lee; shlee1879@hanmail.net

Copyright ©2023 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.

면 초전도체의 결정립의 크기를 조절하여야 하고, 초전도체에 흐르는 전기량을 높이고, 외부자기장에 견딜 수 있도록 초전도체를 설계해야 한다. 기존의 상전도 전력기기는 전자석 가동 및 전력 제어로 인한 전력 소모가 전력 기기의 산업화를 저해하는 요인이 된다. 성능 및 배어링의 단순화 등을 고려할 시 경제적인 초전도 자기력 특성의 기능 측정이 필수적이다. 이를 위해 고가의 자기력 측정장비의 지원 없이도, 초전도 벌크의 자기부상력과 포획 자력등의 자기력 관련 기초 정보를 얻을 수 있도록, 3.80 kG의 영구자석과 간편한 가우스미터만을 사용하여 간소화된 기초 실험만으로도 $YBa_2Cu_3O_{7-y}$ 초전도 벌크의 자기력을 측정하고 결과값을 분석할 수 있음을 설명하였다.

2. 실험방법

$YBa_2Cu_3O_{7-y}$ 초전도 분말은 원형의 벌크 초전도체를 제작하기 위하여 원형 몰드를 이용하여 $YBa_2Cu_3O_{7-y}$ 초전도 벌크 성형체를 제조하였다. $YBa_2Cu_3O_{7-y}$ 초전도 분말을 950°C에서 8시간 동안 하소하고 milling 작업을 수행하였다. $YBa_2Cu_3O_{7-y}$ 초전도 분말을 칭량하여 직경 40 mm 크기의 steel mold를 이용하여 치밀한 구조의 초전도 벌크를 형성하기 위하여 5 ton의 압력으로 일축 가압하여 펠렛형의 초전도 벌크 전구체를 제작하였다. 본 연구에서 초전도 벌크 제작에는 열처리중 초전도 벌크 성형체 시편 내부에 원활한 산소공급을 위하여 대기중의 산소가 통과할 수 있는 경로를 제공하였다. 따라서 특수 제작한 고무판을 일축 가압 시 몰드에 설치함으로써 종자가 위치할 공간을 확보하였다. 초전도 벌크 성형체의 제작이 완료되면, 초전도 벌크 성형체의 밀도를 향상시키기 위하여 우레탄 비닐을 이용하여 성형체를 진공포장하여 cold isostatic press을 시도하여 초전도 벌크를 냉방 압착하였다. 성형체를 진공포장하여 cold isostatic press을 시도하여 초전도 벌크를 냉방 압착하였다. 벌크 초전도체는 직경 30 mm의 pellet type과 30 mm의 사각 벌크로 제작하였다. 벌크 초전도체의 자기 부상력 및 표면 자력의 측정에는 Hall probe를 이용하였다. 자기적 특성의 측정은 액체 질소온도에서 진행하였고, 간소화한 방법으로 초전도 벌크의 초전도 자력을 측정하기 위하여 3.80 kG의 Nd-Fe-B 영구 자석과 가우스 미터를 이용하여 초전도 자력을 분석하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

성형체 제조 과정에서 일축 가압 과정을 거친 이후, 우레탄 비닐을 이용하여 cold isostatic press를 시도한 $YBa_2Cu_3O_{7-y}$ 초전도 시편 표면 사진이다. $YBa_2Cu_3O_{7-y}$ 초전도 시편에 450°C의 열처리 온도에서 산소를 공급하여 초전도 특성을 보완하였다. 산소 열처리 이후, 초전도 현상을 확인하기 위하여 고가의 자기력 측정장치를 적용하는 대신에 자기력 측정을 간소화하기 위하여 그림 1에서 벌크 초전도체의 자기 부상력 및 표면 자력을 측정할 수 있는 장비를 고안하였다.

자기력 측정에는 전자 저울과 Hall probe를 이용하여 측정하였다. 자기적 특성의 측정은 액체 질소온도에서 진행하였고, 실험에 사용된 영구 자석의 스펙은 3.80 kG이다. 본 자기력 측정장치를 적용하게 되면, 마이스너 효과에 의해 초전도 벌크가 Nd-Fe-B 자석을 밀어내는 척력을 측정할 수 있으며, 초전도체와 영구자석의 거리가 최소일 때 자기 척력은 최대값이 되며, 두 실험체의 이격 거리가 증가하게 되면 초전도 벌크에서 관측되는 자기 척력은 감소한다. 영구 자석이 초전도체에 근접하면 초전도 벌크의 자기력은 제2종 초전도체의 임계자기범위보다 크게 되므로 영구자석으로 인가되는 자기장 일부가 초전도 벌크의 내부에 진입하여 이로 인한 에너지 손실로 인하여 전체적인 초전도 자기력의 거리 변화 의존성을 구할 수 있다. 초전도 벌크의 자기 부상력은 zero field cooling을 이용하여 측정할 초전도체를 액체질소온도에서 냉각시킨다. 액체질소 온도로 냉각시킨 초전도 벌크 시편과 영구자석간의 거리 변화에 따른 자기 반발력 특성을 측정하였다. 영구자석을 초전도체에 접근시키는 실험조건에서는 초전도 벌크가 자석을 밀어내는 척력과 자력 냉각 시 초전도체 내부

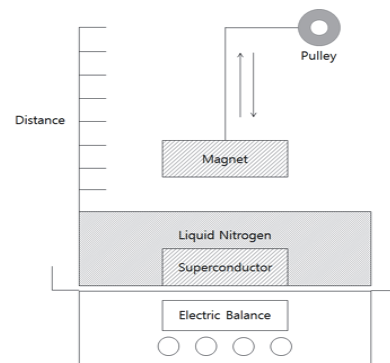


Fig. 1. Simplified measurement device for magnetic levitation force.

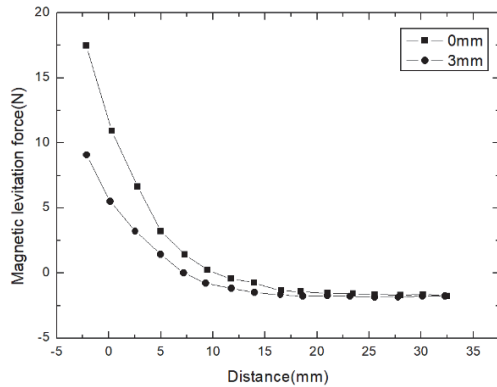


Fig. 2. Magnetic levitation force-distance curves for YBCO superconducting bulk.

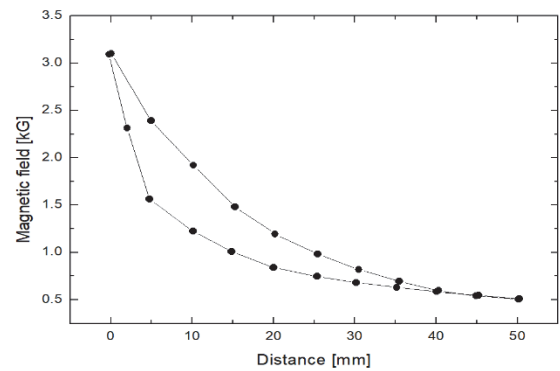


Fig. 3. Trapped magnetic field curves of YBCO bulk measurement on 77 K.

에 포획되는 자기력이 영구자석을 끌어당기는 인력의 크기를 간소화한 자기력 측정장치를 이용하여 초전도체와 영구자석 사이에 작용하는 인력과 자기 척력의 변화량이 전자저울에 전달되는 중량의 변화량을 측정하였다. 초전도 결정 내부에 trap 되는 포획 자력을 측정하기 위하여 초전도 벌크 시편을 field cooling 조건에서 액체질소 온도 77 K의 온도까지 냉각시킨 후에, 영구자석을 제거한 후 초전도 벌크 시편에서 trap되는 자기력을 Hall probe를 사용하여 측정하였다.

초전도체와의 거리 $d = 35$ mm 거리에서 초전도체로 자석을 접근시키며, 전자 저울의 측정되는 무게 변화를 기록하여 자기부상력을 측정하였다. 간소화 한 자기력 측정장치를 적용하여 측정 면에 따른 자기 부상력 측정 결과 값을 제시한다. 자기 부상력은, 영구 자석과 시편과의 거리에 따른 힘으로 측정되며, 초전도 벌크 시편 상부 표면의 중심부에서 17.396 N으로 측정되었다. 초전도체와 자석 간의 거리가 15 mm 이후에는 종자가 직접 적으로 놓였던 하부 시편의 측정값과 유사한 측정 결과를 제시하고 있다.

초전도 벌크 시편의 상부 표면과 종자와 맞닿는 면으로 진행하였다. 초전도 벌크 시편과 영구자석간의 거리에 따른 포획자력을 홀 프로브를 사용하여 측정하였다. 그림 3은 포획자력은 3.80 kG의 영구자석을 사용하여 자력냉각 방법으로 77 K에서 시편의 표면에 대해 측정한 포획자력 분포 결과이다. 초전도자력은 3.12 kG로 나타나며, 포획 자력 측정 결과는 자기 부상력의 측정 결과와 마찬가지로 종자를 성장시킬 때 시편이 종자와 맞닿는 면의 포획 자력 상대적으로 거리가 먼 상부 표면에서의 포획 자력 측정값보다 높게 측정되었다. 자기분포곡선 중앙에서 최대 자기력을 발생하고 있으며, 거리가 증가할수록 trap 되는 자기

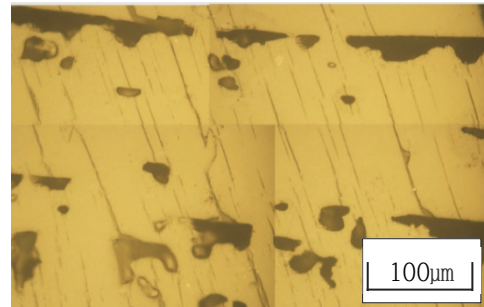


Fig. 4. Result of YBCO superconductor microstructure observation.

력이 감소하는 단결정의 형성을 의미하는 자기력 분포를 나타낸다. 본 연구에서 제작한 초전도 벌크는 외부로부터 인가되는 자기장의 80% 이상을 trap하고 있으며, 초전도 모터 및 플라이휠 에너지 저장장치 등의 전력기기에 적용될 수 있는 고자장 착자가 가능한 벌크형 자석으로 활용될 수 있다.

그림 4는 광학 현미경을 이용하여 YBCO 초전도 벌크 시편의 미세조직 관찰 결과이다. 그림에서 초전도 플럭스 피닝으로 기능하는 Y_2BaCuO_5 (Y 211) 초전도 입자가 관측되고 있으며, 초전도 벌크 시편의 미세조직에서는 직경 100 μm 이하의 큰 기공들이 분포되어 있으나, 미세조직의 치밀화가 진행되고 있는 것으로 판단된다. 초전도 벌크를 용융하여 성장시킴에 따라 초전도 벌크 내부에서 기공들을 채우며 초전도 벌크에 대한 미세조직의 치밀화를 도출하고 있는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 CIP 프로세스를 적용하여 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 초전도 벌크 시편을 제작하였다. 고가의 자기력 측정 장치에 대체할 수 있는 자기력 측정을 간소화 한 장치를 제안하였다. 자기부상력과 표면 자력은 액체 질소온도에서 측정하였고, 마이스너 효과에 의하여 초전도체가 영구자석을 밀어내는 최대 반발력을 측정하였다. 본 장치에 의하면 초전도체의 차폐 전류에 기반한 유도자기장에 의하여 영구자석에 척력으로 작용되며, 초전도 벌크 시편과 영구자석의 거리가 최소일 때 최대 자기 반발력이 측정되었다. 자력 냉각에 의한 측정된 포획 자력 분포 결과는 3.12 kG로 나타나며, 자기분포곡선 중심에서 최대 자기력을 발생하며, 초전도 벌크 시편의 중심에서 거리가 증가하면 자기력이 감소하는 단결정의 형성을 의미하는 자기력 분포를 나타낸다. 초전도 벌크 시편의 미세조직에서는 직경 100 μm 이하의 큰 기공들이 분포되어 있으나, 미세 조직이 치밀화되고, 기공이 감소됨을 알 수 있다. 본 연구의 초전도 벌크 시편은 외부로부터 인가되는 자기장의 80% 이상이 착자되고 있으며, 초전도 모터에 적용할 수 있는 초전도 벌크 자석의 설계에 기초자료를 제공할 수 있다.

ORCID

Sang Heon Lee

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

감사의 글

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-고온초전도마그네티기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2022M3I9A1073924).

REFERENCES

- [1] N. Saho, N. Nishijima, H. Tanaka, and A. Sasaki, *Phys. C: Supercond.*, **469**, 1286 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2009.05.134>]
- [2] H. Fujishiro and T. Naito, *Supercond. Sci. Technol.*, **23**, 105021 (2003). [DOI: <https://doi.org/10.1088/0953-2048/23/10/105021>]
- [2] M. Hirakawa, S. Inadama, K. Kikukawa, E. Suzuki, H. Nakasima, *Physica C: Superconductivity*, **392**, 773 (2003). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-4534\(03\)01213-9](https://doi.org/10.1016/S0921-4534(03)01213-9)]
- [3] T. Nakamura, D. Tamada, Y. Yanagi, Y. Itoh, T. Nemoto, H. Utumi, and K. Kose, *J. Magn. Reson.*, **259**, 68 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2015.07.012>]
- [4] S. Gruss, G. Fuchs, G. Krabbes, P. Verges, G. Stöver, K. H. Müller, J. Fink, and L. Schultz, *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 3131 (2001). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1413502>]
- [5] D. Mendes, D. Sousa, A. C. Cerdeira, L.C.J. Pereira, A. Marques, J. Murta-Pina, A. Pronto, and I. Ferreira, *Ceram. Int.*, **47**, 381 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.08.143>]
- [6] D. Volochova, K. Jurek, M. Radusovska, S. Piovarci, V. Antal, J. Kovac, M. Jirsa, and P. Diko, *Physica C: Superconductivity and its Applications*, **496**, 14 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2013.04.084>]