

YBCO 초전도 벌크 합성

이상헌 

선문대학교 전자공학과

Fabrication of YBCO Superconducting Bulk Magnets

Sang Heon Lee

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

(Received February 19, 2024; Revised February 28, 2024; Accepted February 28, 2024)

Abstract: In this study, we fabricated single grain YBCO bulk superconductors with control of the distance between the seed and the upper surface of the YBCO compacts. The magnetic levitation force of the $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ superconducting bulk, which corresponds to the energy amount of the superconducting bulk, was measured to be 32.634 N at the center of the bulk where the seed was placed. Under field cooling conditions, a capture magnetic force of 2.17 kG was observed at the center of the bulk. The trapped magnetic force curve corresponding to the stability of the superconducting bulk means that the superconducting specimens were well grown in the form of single grains.

Keywords: YBCO bulk, Magnet, Y_2BaCuO_5 particles, Magnetic force

1. 서론

초전도를 이용한 전력응용기술이 가속화됨에 따라 초전도의 자력을 응용한 전력 관련 기기(초전도 차폐기, 모터 용 회전자 자석, 벌크 자석 등)에 사용되는 초전도 벌크재의 수요가 증가하고 있다 [1]. 고온 초전도체 연구는 물리학적 중요성과 전력 에너지 관련 산업에서 핵심적인 위치를 차지하고 있어 각국에서 국가적으로 집중적인 지원을 하고 있다. 벌크 초전도체는 초전도체의 우수한 전류 통전성 및 열전도도 특성으로 전류 인입선, 전력계통의 사고 방지를 위한 초전도 한류기, 영구자석을 대체할 수 있는 견고한 초전도 벌크 자석의 자기 부상을 활용하는 플라이휠 전력 에너지 저장 및 magnetic levitation car, 초전도체가 외부자장을 차폐하는 성질을 활용한 자기 차폐, 초전도

체 내부에 자력을 속박하여 영구자석으로 상용하는 초전도 영구자석 응용 등에 사용된다 [2-5]. 초전도체의 응용 분야는 선재 응용과 박막 응용으로 나뉘는데 응용 물질의 형태에 따라 달라진다. 선재 응용에는 많은 전류를 발생하거나 수송하는 전력계통 응용과 교통 분야 응용 등이 있는데, 전력계통 응용은 손실이 없는 송전선, 강한 자기장을 발생시키는 초전도 벌크 자석, 전력 에너지 저장, 초전도 모터, 발전기 등이 있고 교통 분야 응용은 초전도 자기 부상열차, 초전도 추진 선박 등이 있다 [6-10]. 초전도 차단기 및 한류기 적용을 위한 자기 부상력 및 포획 자력 확보를 위한 연구를 위하여 열처리 후 따른 초전도 자기 부상력을 연구하고, 결정 성장에 의한 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 초전도 벌크 자석의 개발을 연구한다. 벌크형 초전도체는 일반적 세라믹 제조공정으로 제작할 수 있고, 초전도체에 연속적인 전류를 흘려줄 필요도 없고, 높은 기계적 강도 또한 크게 요구되지 않는다. 벌크 YBCO 초전도체는 높은 임계전류밀도, 강한 플렉스 피닝력, 초전도 단결정의 큰 크기로 영구자석보다 뛰어난 높은 자기 부상력을 보여준다 [1-3]. 따라서

✉ Sang Heon Lee; shlee@sunmoon.ac.kr

Copyright ©2024 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.

YBa₂Cu₃O₇ 벌크 자석은 우수한 초전도 특성으로 인하여 불균일한 입계적 약 결합 입계로 인한 초전도 특성을 개선함으로써 동시 퀀치 및 전력분담의 균일성을 가능하게 한다. 본 논문에서는 초전도 전력기기의 소형화 및 증가 용량을 위한 초전도 자력 발생기로서 YBa₂Cu₃O₇ 벌크 자석을 제안하였다.

2. 실험 방법

초전도체의 자기력 특성을 향상시키기 위해서는 초전도 결정 입계의 면적을 최소한으로 제어하고, 전류가 흐르는 방향에 single grain의 c축이 놓이지 않게 하는 작업이 중요하다. 용융공정은 이러한 관점에서 초전도 벌크를 일단 용융시켰다가 포징 반응 온도 구간에서 초전도 단결정으로 성장시키는 방법으로 용융된 상태에서 온도구배를 주어 서서히 서냉하며 응고시키면 온도구배의 결정 성장 방향으로 초전도 단결정이 형성된다. YBa₂Cu₃O₇ 초전도상은 포징온도 이상에서 Y211과 액상의 영역으로 부분 용융

되는데, 냉각 속도에 따라 초전도 입자의 생성과 single grain 성장 속도가 결정되기 때문에 냉각속도를 서냉하여 (1°C/h) 냉각시키면 성장되는 초전도 입자의 배열성이 향상되어 YBa₂Cu₃O₇ 단결정 그레인의 크기가 개선되고, 일 방향으로 배열된 단결정 조직으로 형성된다.

YBa₂Cu₃O₇ (Y123) 초전도 분말은 펠렛형 초전도 벌크체를 만들기 위하여 성형체를 제조하였다. 스틸 몰드를 이용하여 YBa₂Cu₃O₇ (Y123) 초전도 분말을 910°C에서 8시간 동안 하소하고 밀링 하였다. 초전도 분말을 정량하여 직경 40 mm 크기의 스틸 몰드에 넣어준다. 이 과정에서 분말 간 공간을 없애고 일축 가압을 위해 수평을 맞추어 주기 위하여 고무망치를 이용하여 두드려 주었으며, 시편 내부에 공간을 만들어 산소의 주입을 원활하게 하였다. 고무판을 일축 가압 시 몰드에 넣어줌으로써 종자를 놓을 공간을 제조하였다. 성형체의 제작이 완료되면, 최종적으로 진공 포장 단계를 거친 후 CIP (cold isostatic press) 과정을 통하여 벌크를 냉방 압착시킨다. CIP 과정을 거친 초전도 시편은 소결을 위해 열처리를 진행한다. 그림 1에 열처리 조건을 제시한다. 본 열처리 공정에서는 온도구배에 따른 peritectic reaction을 이용하여 시편에 단결정을 고르게 성장하는 것을 유도하였다.

그림 2에는 열처리 과정을 거친 시편은 초전도체로 제작하기 위하여 초전도 벌크의 산소 열처리를 수행한다. 산소 열처리 과정을 통하여 초전도 벌크에 충분한 산소를 공급한다. 그림 3에 본 연구의 용융 열처리공정으로 제작한 40 mm 크기의 YBa₂Cu₃O₇ 단결정형 대면적 시편을 제시하였다.

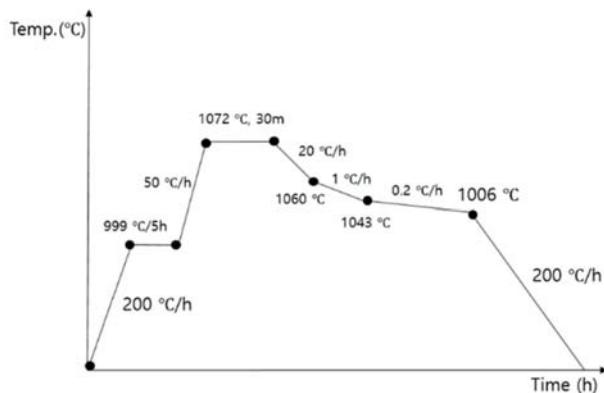


Fig. 1. Heat treatment conditions of YBa₂Cu₃O₇ superconducting bulk.

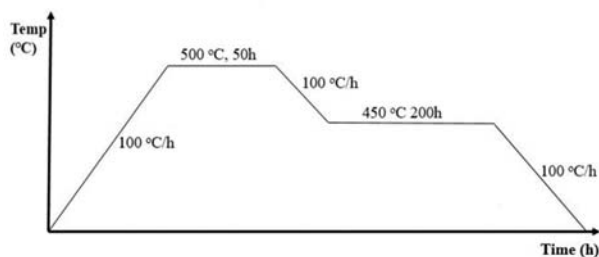


Fig. 2. Oxygen heat treatment of YBa₂Cu₃O₇ superconducting bulk.



Fig. 3. YBa₂Cu₃O₇ superconducting bulk by top seeded melt growth.

3. 실험 결과 및 고찰

초전도 자기 부상력을 측정하기 위하여 무자력 냉각 (zero-field cooling, ZFC)을 이용하여 Y123 초전도 벌크를 액체질소(77 K) 이하에서 냉각시킨다. 그림 4에서 초전도 벌크에 표면 자력이 5.25 kG 값을 갖는 Nd-B-Fe 영구자석을 초전도 벌크에 접근시킬 때 초전도체에는 영구자석으로부터 발생하는 자기력을 밀어내는 척력과 초전도체로부터 멀어질 때 초전도체가 자석을 잡아당기는 인력을 로드셀(load cell)로 측정하였다. 측정 실험은 액체 질소로 진행하였고, 초전도 자기 부상력 실험에 사용된 영구자석은 Nd-Fe-B 자석이며, 스펙은 직경 30 mm, 두께 3 mm의 5.25 kG이다.

무자력 냉각법은 마이스너 효과에 의한 초전도 특성을 의미한다. 따라서 마이스너 효과에 의하여 초전도 벌크가

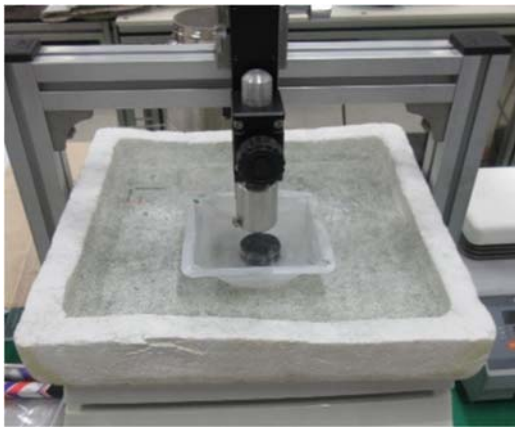


Fig. 4. Superconducting magnetic levitation.

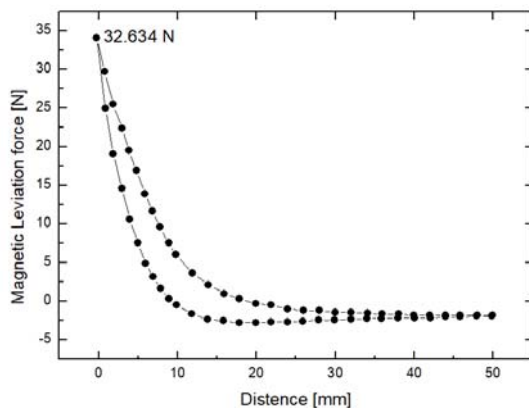


Fig. 5. Magnetic levitation force of YBa₂Cu₃O₇ Superconducting bulk.

영구자석을 밀어내는 최대 반발력을 측정하였다. 액체질소 온도로 냉각된 초전도체에 영구자석이 접근하면 초전도 벌크에 유도되는 초전도 차폐전류에 의해 생성된 유도 자기장의 자기 반발력이 영구자석을 밀쳐내며, 자기 반발력은 영구자석과 초전도체와의 거리가 가까워질수록 증가한다. 이에 비하여 영구자석과 초전도 벌크와의 거리가 최소일 때 자기 반발력은 최대가 되며, 영구자석을 초전도 벌크로부터 멀리 이동시키면 자기 반발력은 감소하게 된다. 영구자석이 초전도 벌크에 근접하면 초전도 벌크의 자기 임계 한계를 넘게 되므로 영구자석의 자기장 일부가 초전도체에 트랩되며, 포획자력으로 인한 에너지 손실이 나타나며 전체적인 자기력과 힘의 특성은 히스테리시스 형태를 나타내게 된다. 그림 5에서는 YBa₂Cu₃O₇ 초전도 벌크의 자기 부상력 측정 결과값을 나타내었다. 자기 부상력의 측정은, 영구자석과 시편과의 거리에 따른 힘으로 측정되며, 시편 상부 표면의 측정값은 종자가 놓인 시편 중심부의 값으로서 32.634 N이다. 종자가 직접적으로 놓였던 시편의 측정값은 상부 표면에서 나타나는 a-c sector가 영향을 미치는 것으로 사료된다.

그림 6에서 YBa₂Cu₃O₇ 초전도 벌크의 포획 자력은 초전도체 내부에 포획되는 자력의 세기를 알기 위하여 3.80 kG의 영구자석을 이용하여 액체질소(77 K) 하에서 냉각시킨 다음, Hall probe를 이용하여 상부 표면과 1 mm의 간격을 두고, 시편의 규격만큼의 범위에서 포획되는 자력의 세기를 측정하였다.

그림 7은 초전도 시편을 표면 자력 3.80 kG의 영구자석을 사용하여 field cooling으로 액체 질소 온도 77 K에서 각 시편의 표면에서 측정한 포획 자력 분포 곡선이며, 초전도 벌크의 중심부에서 2.17 kG의 포획 자력이 관측되었다.

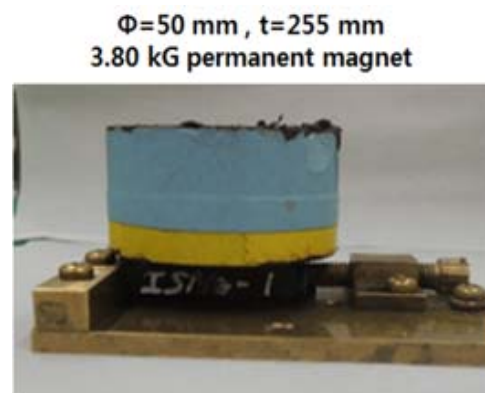


Fig. 6. Trapped magnetic force measurement of YBa₂Cu₃O₇ superconducting bulk.

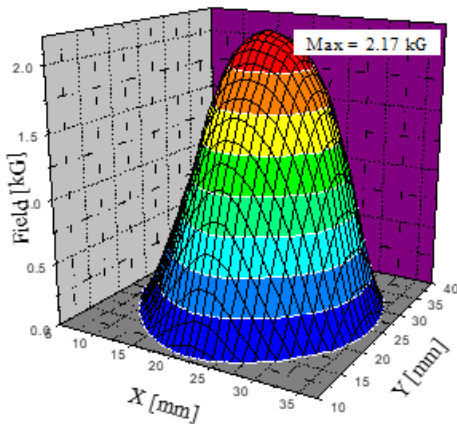


Fig. 7. Trapped magnetic force of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ superconducting bulk.

그림 7에서 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 초전도 벌크의 포획 자력을 측정한 결과 또한, 자기 부상력의 측정 결과와 마찬가지로 종자를 성장시킬 때 시편이 종자와 맞닿는 면의 포획 자력이 상대적으로 종자에서 거리가 먼 상부 표면에서의 포획 자력 측정값보다 높게 측정되었다. 그림 7에서 측정된 포획 자력 곡선의 특징은 포획 자력 곡선의 중심에서 자기력의 최대값을 나타내었다. 초전도 벌크의 중심에서부터 자기력의 동심원 형태를 나타내고 벌크의 중심에서 외곽으로 멀어질수록 포획된 자기력 값이 감소한다. 이런 형태의 포획 자력 곡선은 초전도 시편들이 seed가 위치한 부분으로부터 단결정 형태로 성장되었음을 의미한다. 만약 초전도 결정 내부에 균열 또는 결정 입계가 존재하게 된다면, 결정 입계 부위에서 자기력선의 불연속선이 나타나며, 복수의 동심원 자기력 분포가 나타날 것이다. 따라서 본 연구에서 제작한 초전도 벌크는 single grain의 단결정 형태로 성장되었음을 알 수 있었다.

그림 8에서 초전도 벌크의 자기적 특성을 검토하기 위하여 초전도 single grain에서 나타나는 a-c sector의 분석을 위하여 초전도 시편을 polishing한 뒤 mounting하여 편광현미경을 이용하여 미세조직을 관찰하였으며, 초전도 결정 내부에 분포되어 있는 미세 입자 Y_2BaCuO_5 (Y211) particle을 확인하였다.

a-c sector에 존재하는 Y211 입자의 개수가 a-b sector에 존재하는 Y211 입자의 개수보다 적었다. 또한, 추가적으로 편광을 통하여 미세조직을 관찰한 결과, 상이 다른 부분을 관찰하였고 해당 부분을 고배율로 확대하여 관찰하였다. 그 결과 Y211 입자는 상이 다른 부분의 경계면과 경계면 내부에서 더 적은 성장이 이루어지는 것을 확인하였다.

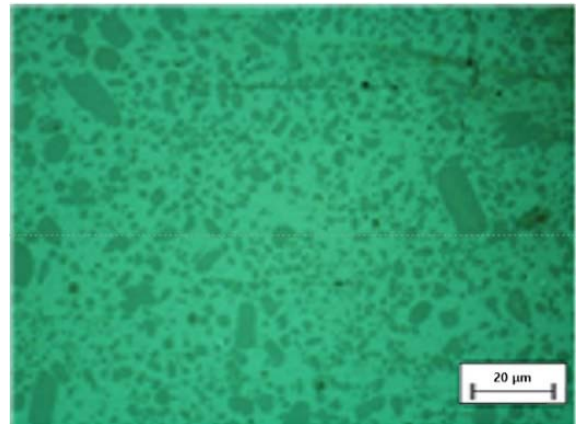


Fig. 8. Microstructure of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ superconducting bulk.

4. 결론

본 연구에서는 초전도 단결정 성장 프로세스에 적합한 종자 성장 결정 공정을 통하여 40 mm 크기의 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 단결정형 대면적 시편을 제작하였으며, 초전도 단결정 벌크를 이용하여 본 연구의 목적인 초전도 전력기기의 소형화에 부합하는 초전도 자력 발생기로서 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 벌크 자석을 제안하였다. 초전도 벌크의 에너지량에 해당하는 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 초전도 벌크의 자기 부상력은 종자가 놓인 벌크의 중심부에서 32.634 N으로 측정되었다. Field cooling 조건으로 포획 자력은 벌크의 중심부에서 2.17 kG의 포획 자력이 관측되었다. 초전도 벌크의 안정성에 해당하는 포획 자력 곡선은 초전도 시편들이 single grain 형태로 잘 성장되었음을 의미한다. 편광 현미경을 통하여 a-b sector와 a-c sector을 관찰하여 미세조직에 존재하는 Y211 입자 형태를 관찰하였으며, a-b sector와 a-c sector의 성장 정도가 초전도 특성에 미치는 영향에 대해 분석하였다.

ORCID

Sang Heon Lee

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

감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 2022년 착수 사외공모 기초 연구 사업에 의해 지원되었음(과제 번호: R22XO05-01).

REFERENCES

- [1] M. D. Ainslie and H. Fujishiro, *Supercond. Sci. Technol.*, **28**, 053002 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1088/0953-2048/28/5/053002>
- [2] J. H. Durrell, M. D. Ainslie, D. Zhou, P. Vanderbemden, T. Bradshaw, S. Speller, M. Filipenko, and D. A. Cardwell, *Supercond. Sci. Technol.*, **31**, 103501 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6668/aad7ce>
- [3] M.P.A. Fisher and D. H. Lee, *Phys. Rev. B*, **39**, 2756 (1989).
doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.39.2756>
- [4] M. Tian, N. Kumar, S. Xu, J. Wang, J. S. Kurtz, and M.H.W. Chan, *Phys. Rev. Lett.*, **95**, 076802 (2005).
doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.076802>
- [5] F. N. Werfel, U. Floegel-Delor, R. Rothfeld, T. Riedel, B. Goebel, D. Wippich, and P. Schirrmeister, *Supercond. Sci. Technol.*, **25**, 014007 (2012).
doi: <https://doi.org/10.1088/0953-2048/25/1/014007>
- [6] X. Wei, R. S. Nagarajan, E. Peng, J. Xue, J. Wang, and J. Ding, *Ceram. Int.*, **42**, 15836 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.07.052>
- [7] K. Yokoyama, T. Oka, H. Okada, Y. Fujine, A. Chiba, and K. Noto, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **13**, 1592 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1109/TASC.2003.812799>
- [8] D.H.N. Dias, G. G. Sotelo, L. A. Moysés, L.G.T. Telles, P. Bernstein, D. Kenfaui, M. Aburas, X. Chaud, and J. G. Noudem, *Supercond. Sci. Technol.*, **28**, 075005 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1088/0953-2048/28/7/075005>
- [9] K. Y. Huang, T. Hlášek, D. K. Namburi, A. R. Dennis, Y. Shi, M. D. Ainslie, J.V.J. Congreve, V. Plecháček, J. Plecháček, D. A. Cardwell, and J. H. Durrell, *J. Am. Ceram. Soc.*, **104**, 6309 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1111/jace.18017>
- [10] J. G. Noudem, S. Meslin, D. Horvath, C. Harnois, D. Chateigner, S. Eve, M. Gomina, X. Chaud, and M. Murakami, *Phys. C*, **463**, 301 (2007).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2007.03.503>