

차단기 적용을 위한 초전도체의 합성

이상현^a

선문대학교 전자공학과

Electric Properties of High-Tc Ceramic Superconductor for Breaker

Sang-Heon Lee^a

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

(Received December 26, 2017; Revised January 3, 2018; Accepted January 8, 2018)

Abstract: This aim of this study was to develop a process for creating bulk single-crystal YBaCuO superconductors in a high magnetic field. To support the bulk unidirectional growth of $YBa_2Cu_3O_{7-y}$, $SmBa_2Cu_3O_{7-y}$ seeds were planted inside YBaCuO composites and samples were produced by melting, enabling the growth of two YBaCuO superconductors. Due to the magnetism generated inside the superconductor of the upper sample, the magnetization inside the superconducting single crystals was evenly distributed, the sharpness of the induced magnetic force was improved, and the superconducting magnetization were significantly improved. This approach is widely applicable for the production of superconducting wires and current leads used for DC power breakers.

Keywords: YBaCuO superconductor, Single crystal, Magnet, Magnetic force

1. 서론

고온 초전도체 연구는 그것이 갖는 물리화학적 중요성과 더불어 미래의 에너지 관련 산업에서 중요한 위치를 차지하기 때문에 각국이 국가적인 차원에서 집중적으로 지원하고 있다. 초전도 재료는 초전도 송전, 전기 저장, 초전도 발전, 핵융합과 같은 기존 에너지 계통의 효율을 높일 수 있는 기술의 핵심적인 소재이며, 이 외에도 자기부상열차, 핵자기 단층촬영, 주요 지원 회수용 자기분리장치, 초고속 연산 컴퓨터와 무접촉 베어링, 초전도 전도선 등, 기타 산업 분야에서도 그 용도가 점차 확장되어 가고 있다. 강한 자계를 이용한

초전도 발전, 자기부상열차, 초전도 추진 선박, 자기공명 단층촬영 등 여러 산업 분야에 응용되고 있다. 한편 전력분야에 있어 그 중요성이 증대되고 있는 핵융합 기술에도 실용적인 연속 운전을 위해서는 강자장의 초전도 자석 활용이 필수적이기 때문에 이에 대한 연구가 각국의 에너지 관련 기관을 중심으로 활발히 진행되고 있다. 한편, 송전선이나 변압기, 발전기 그리고 전력 저장장치 등을 초전도체를 이용한 시스템으로 대체하면 전력 계통의 효율을 극대화시킬 수 있다 [1-5]. 특히, 액체질소의 비등점인 77 K 이상에서 초전도 현상을 나타내는 고온 초전도 재료의 개발은 초전도 현상의 응용에 대한 기대를 고조시키고 있다. 지난 수년 동안 초전도 선재를 상업화하기 위한 노력들의 성과로 초전도체의 전류 특성은 많이 향상되었지만 아직도 초전도 결정 간의 약결합이나 플럭스 크립과 같은 문제들이 해결되어야 하는 과제로 남아 있다. 벌크 초전도체 연구 분야는 초전도체의 어떤 성질을 이용하느냐에 따라 여러 분야로 나누어진다. 우수한 통전성 및 낮은

a. Corresponding author; shlee@sunmoon.ac.kr

Copyright ©2018 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.

열전도도를 이용하는 전류 인입선 응용, 자석과 초전도체 간의 부상을 이용하는 자력부상 응용(플라이휠 에너지 저장, 자기부상열차, 운송 시스템, 무접촉 베어링, 고속 회전 모터, 천체 관측기기 등), 초전도체가 외부 자장을 차폐하는 특성을 이용한 자기차폐, 초전도체에 자력을 속박시켜 영구자석으로 사용하는 초전도 영구자석 응용 등이 있다. 본 연구는 현재 초전도 연구 개발 동향에 따라 곧 도래할 DC 전력기기에 적용할 수 있는 자기장을 나타낼 수 있는 DC 차단기 적용 기술 개발에 응용하기 위해서 대면적의 초전도 결정 성장을 연구하였다. 본 연구에서는 초전도 결정 내의 기공과 균열 같은 결함을 제거하기 위하여 공기 중에 포함되어 있는 수분에 비교적 안정성을 확보할 수 있는 Nd계 초전도 단결정을 사용하였고, 내부 종자 결정 성장을 고안하여 연구 목적과 부합되는 고자장 재료로 응용이 가능한 YBaCuO계 고온 초전도체의 결정 성장을 수행하였다.

2. 실험 방법

YBa₂Cu₃O_{7-y} 분말을 전자저울로 칭량하고 초전도 원료 분말을 혼합하여 제조하였다. 혼합 방법은 분급기에 넣어 3분간, 혼합기에서 20분간씩 각각 3회 반복하여 완전한 혼합을 하였다. 이 혼합 분말을 7 ton의 압력으로 일축 성형하여 성형체를 만든 후 제작공정으로 단결정을 제조하였다. 초전도 YBa₂Cu₃O_{7-y} (Y123) 분말은 독일 Solvay사에서 구입한 99.9% 순도를 갖는 Y123와 동일한 방법으로 건식 혼합하여 제조하였다. 초전도 분말 150 g을 칭량하여 50×50 mm 몰드에 넣고 15 ton의 압력으로 일축 성형한 후 CIP (cold isostatic press)을 하여 약 50×50×20 mm인 성형체로 만들었다. 열처리 도중, Y123 성형체 아래에 Yb₂O₃ 분말과 Y₂O₃를 3:1로 혼합한 것을 15 g 일축 성형하여 MgO 기판 위에 올려놓았다. 초전도 시료 제작 공정에서 일축 성형된 펠렛의 균질도를 높이기 위한 CIP 공정 중에 시편을 싸고 있는 진공비닐 속으로 물이 들어가지 못하도록 연구를 수행하였다. Y123 성형체 내부에 남게 되는 기공층을 최대한 없애기 위하여, 사용하고 있는 press의 최대 가용 압력인 15 ton으로 일축 성형하였다. CIP 공정 중에 물이 들어가는 것을 예방하고자 그동안 사용하던 진공비닐 대신에 질기고 탄력성이 뛰어난 폴리우레탄 비닐을 사용하여 해결할 수 있었다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 본 연구에서 사용되는 초전도 melt-process 스케줄이다. 각 온도에서의 시편 상태를 살펴보면 996 °C의 온도에서 소결되면서 밀도가 높아지게 되고 수축이 일어나게 된다. 이어 포징 온도를 넘어 1,071°C로 올라가면 Y123 초전도체가 Y₂BaCuO₅ (Y211)+액상으로 바뀌면서 벌크 내에 있던 산소가 빠져나가게 되고 내부에 기공이 생성되게 되어 부피는 커지고 밀도는 낮아지게 된다. 다시 1,007°C로 내려가면서 빠져나갔던 산소가 벌크 내부로 들어오게 되면서 single domain을 갖는 Y123가 성장하게 되는데 이때 냉각속도가 빠른 경우 Y123로 변환할 시간이 충분하지 않게 되어 생성된 기공들이 내부에 그대로 남아 있게 되고 밀도가 1,007°C에서보다는 높지만 소결 후보다는 낮아지게 된다. 실제로 열처리된 시편을 반으로 쪼개 보면 빠른 냉각속도에서 제조된 시편일수록 내부에 기공이 많이 생성되고 미반응한 Y211 상이 증가됨을 확인하였다. 여러 냉각속도로 실험해 본 결과 0.1°C/h의 냉각속도일 때 시편 내부에 기공이 작고 미반응한 이차상이 거의 존재하지 않는 최적의 상태임을 확인하였다.

그림 2는 본 연구의 초전도 결정 성장 공정의 개념도를 나타낸다. 내부 구조의 중요한 기술적인 부분은 초전도체의 내부 구조에 따라 적절한 개방 공간을 제공하는 것이다. 즉 본 연구의 중요한 기술은 seed로 사용되는 초전도체에 공기 또는 산소를 공급하기 위한 공기가 통할 수 있는 경로를 설치하고, seed와 liquid와의 접촉 면적을 최소화하기 위한 공간을 마련한다. 본 공정은 기존의 용융 공정과 비교하여 다음과 같은 이점이 있다. YBaCuO계 초전도체의 seed로부터 상부

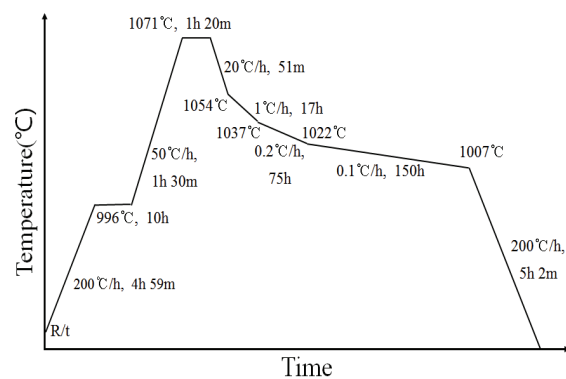


Fig. 1. Experimental process diagram for YBaCuO superconductor fabrication.

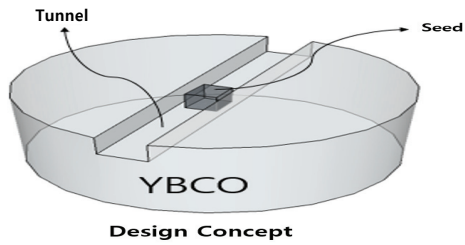


Fig. 2. Concept of superconducting crystal growth process.

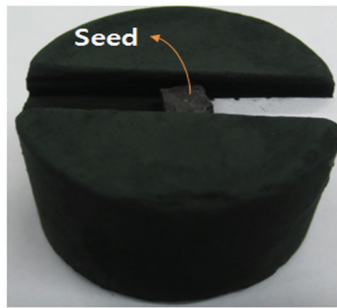


Fig. 3. YBaCuO bulk surface and tunneling process.

와 하부 면으로 동시 성장이 가능하며, ab면의 성장 부분 및 상부면의 ac면의 성장 비율을 제어할 수가 있다. 본 연구에서는 내부에 seed를 위하여 2종류의 펠렛 프로세스를 설계하였다. 1종류의 펠렛 상부에는 공기가 통할 수 있는 개방된 공간을 만들고 상부의 개방된 공간에 seed를 배치하고, 상부 면에 또 다른 펠렛을 상부 면에 설치하였다.

그림 3에서는 $YBa_2Cu_3O_{7-y}$ (YBCO) 일방향 성장 벌크를 용융 공정으로 제작하였다. 분말 성형체 내부에 종자를 넣기 위해 두 개의 분말 펠렛을 만들었으며, 하부 펠렛의 중앙에 홈을 만들어 홈 안에 종자를 넣었다. 상부 펠렛을 하부 펠렛 위에 올려놓아서 종자가 분말 성형체 중앙에 위치하게 하였다.

그림 4에서는 상부 성형체에서 나타나는 YBaCuO 초전도 결정의 성장 거동을 연구하였다. 상부 성형체의 두께가 얇을 경우 내부 결정 성장 공정에서와 같이 a/b면이 발달한 상부 표면 형상이 관찰되었다.

그림 5에서 터널링에 의한 내부 결정 성장법으로 합성한 초전도체의 포획 자력을 측정하였다. 초전도 시료의 포획 자력은 1.75 KG이며, 49.5% 이상의 포획 능력을 나타냈다. 터널링에 의한 내부 결정 성장에 의하여 합성한 초전도벌크의 자력은 그림 5에서와 같이 포

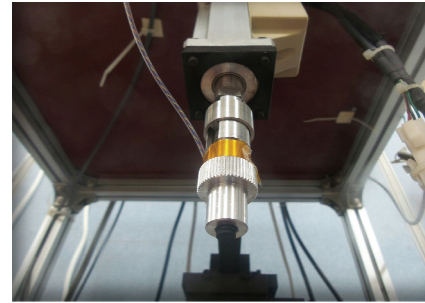


Fig. 4. Measurement of magnetic levitation force and trapping magnetic force of YBaCuO superconductor.

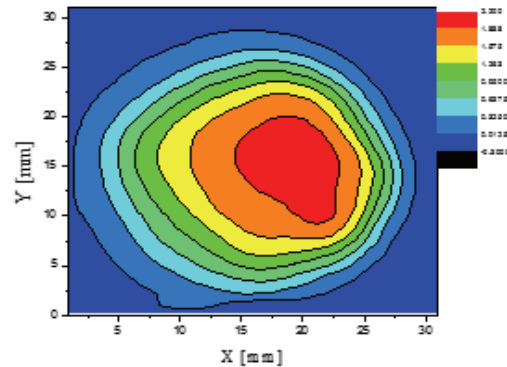


Fig. 5. Measurement of captured magnetic force of YBaCuO Superconductor using tunneling process.

획 자력의 첨예도가 개선되어, 향상된 초전도 자화 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 초전도 시료의 종자 면에 터널링을 설치함으로써, 초전도 내부에 산소의 공급과 원활한 열공급이 전달되어, 초전도 내부의 결정입계가 조절되며, 결정입계가 산소 확산의 통로로서 기능하게 되어 결정입계의 결합을 개선하는 효과를 가져와 초전도 벌크의 포획 자력을 향상시킴으로 판단된다. 초전도 내부 결정 성장에 의하여 합성한 초전도체의 자기 부상력을 측정하였다. 그림 6에서 초전도체의 내부 결정 공정에서 초전도체 내부에 터널링 프로세스를 적용함으로써 초전도 벌크 시료의 zero field cooling 상태에서 측정한 최대인력은 60.15 N으로 나타났다. 따라서 초전도체에 확산된 공기 중의 산소는 초전도 전이온도의 변화에는 관계없이 초전도 플럭스 피닝 효과에 기능하고 있는 것으로 사려된다. 본 연구 결과, 열처리 과정에서 산소 확산 경로를 통하여 결정입계 증으로 확산되면서 초전도 내부에 211 phase의 생성

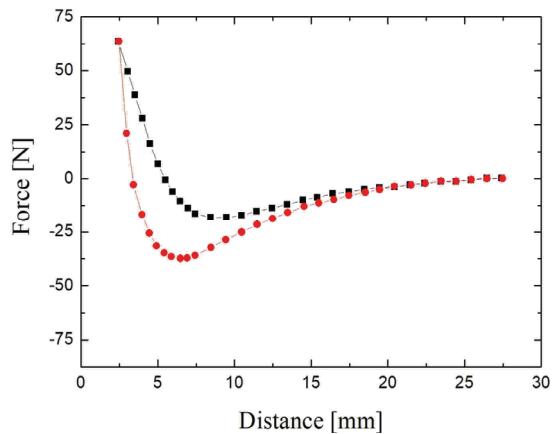


Fig. 6. Measurement of magnetic levitation force of YBaCuO superconductor using tunneling process.

이 활발하게 나타나게 되어 초전도 플럭스 효과의 향상을 가져와 초전도 자력 특성이 크게 개선되고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서 제시하는 터널링 프로세스는 표면으로부터 초전도 내부로 직접적인 플럭스 주입을 가져오며, 초전도 내부의 결정입계의 상태를 개선하는 효과를 가져와 플럭스 피닝의 상승효과를 나타낸다.

4. 결론

기존 한 개의 YBaCuO 초전도 시편 위에 한 개의 seed를 올려 성장시키는 단결정종자성장 공법이 아닌, 한 개의 YBCO 시편 위에 한 개의 seed를 올리고 그 위에 다시 YBCO 시편을 올려 동시에 상하 시편에 성장을 기한다. 내부 결정 성장 공정에 의한 초전도 상부 시편의 높이에 따른 초전도 자기 부상력과 자력 포획 특성을 측정하였다. 본 공정에서는 내부 구조의 중요한 기술적인 부분은 초전도체의 내부 구조에 따라

적절한 개방 공간을 제공하는 것이다. 즉 tunneling 공간을 설치하여 초전도체 내부로 열의 전달을 활발하게 진행하면서 공기 또는 산소를 공급하기 위한 공기 channel를 설치하고, seed와 liquid와의 접촉 면적을 최소화하기 위한 공간을 마련하는 기술이다. 본 공정에 의한 YBaCuO 단결정 벌크의 포획 자력은 1.75 KG이며, 초전도 내부로 산소 전달 channel를 설치한 초전도 시료의 field cooling 상태에서 측정된 최대인력은 60.15 N로 나타났다. 따라서 초전도체에 확산된 공기 중의 산소는 초전도 전이온도의 변화에는 관계없이 초전도 플럭스 피닝 효과에 기능하고 있는 것으로 사려된다. 본 연구에서 제시하는 터널링 프로세스는 표면으로부터 초전도 내부로 직접적인 플럭스 주입을 가져오며, 초전도 내부의 결정입계의 상태를 개선하는 효과를 가져와 플럭스 피닝의 상승효과를 나타낸다.

REFERENCES

- [1] J. Eickemeyer, A. Güth, J. Freudenberger, B. Holzapfel, and L. Schultz, *Physica C*, **471**, 549 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2011.07.001>]
- [2] T. W. Tang, D. J. Wu, X. D. Wu, and K. X. Xu, *Physica C*, **519**, 159 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2015.10.009>]
- [3] X. D. Wu, K. X. Xu, H. Fang, Y. L. Jiao, L. Xiao, and M. H. Zheng, *Supercond. Sci. Technol.*, **22**, 125003 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1088/0953-2048/22/12/125003>]
- [4] K. X. Xu, P. X. Zuo, Y. Cao, S. B. Hu, B. W. Lian, Y. L. Jiao, L. Xiao, M. H. Zheng, and X. D. Wu, *Supercond. Sci. Technol.*, **25**, 075005 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1088/0953-2048/25/7/075005>]
- [5] M. Strasik, J. R. Hull, J. A. Mittlender, J. F. Gonder, P. E. Johnson, K. E. McCrory, and C. R. McIver, *Supercond. Sci. Technol.*, **23**, 034021 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1088/0953-2048/23/3/034021>]