

## 나노 복합전도체의 전기자기적 특성 연구

이상헌<sup>a</sup>

선문대학교 전자공학과

### Electromagnetic Properties of Nano Composite Conductor

Sang-Heon Lee<sup>a</sup>

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

(Received January 18, 2016; Revised January 20, 2016; Accepted January 22, 2016)

**Abstract:** The YBaCuO superconducting bulks were prepared by the thermal diffusion process involving the peritectic reaction to investigate the effect on microstructure and superconductivity. All the diffused YBaCuO could be successively separated from superconducting 123 phase by applying the thermal diffusion process. Electromagnetic properties of treated and untreated YBaCuO superconductor were evaluated to investigate the pinning effect. It was confirmed experimentally that a large amount of magnetic flux was trapped in the thermal treated superconducting bulk than that in the untreated one, indicating that the pinning centers of magnetic flux are related closely to the occurrence mechanism of the magnetic effect.

**Keywords:** Pinning, Ceramic oxides, Superconducting property

#### 1. 서론

액체질소의 비등점 77 K 이상에서 초전도성을 발현하는 고온 초전도체가 발견된 이후로 많은 연구가 이루어져 오고 있는데 초전도체가 지닌 기술적 경제적 가능성과 물리현상의 관심이 고조되고 있다. 희토류계 산화물 초전도체는 전이온도가 높고, 자장하에서 전류 밀도가 높아 응용 가능성이 고조되고 있으며, 산업응용을 위해 많은 연구가 진행되고 있다 [1-6]. 특히 산업용 초전도 전력기기의 핵심은 초전도체 벌크의 개발이다. 성능 및 초전도 전력기기의 단순화, 경제성 등을 고려할 시 초전도 베어링용 YBCO 벌크 초전도체의 개발이 필수적이다. 초전도체는 전기에너지의 발전, 저장

및 수송 등 여러 전력계통분야에 응용 될 것이 기대되어 많은 연구가 이루어지고 있다. 나노 복합합성 기술은 전류 통전 효과의 향상을 개선 할 수 있는 전기에너지 응용을 위한 기초기술이며, 메커니즘의 해석과 조성제어 해석에 있어소 필요한 기술이다. 화학 프로세스 중에서도 저렴하고 시료제작이 용이한 제작법을 적용하여 균질하고 미세한 초전도 나노 전구체를 합성하여 초전도 나노 복합 전도체의 원료로서 활용 할 수 있도록 한다. 본 연구에서는 전력기에 활용할 수 있도록 초전도체의 전기자기적 특성을 향상 시켜 전력기기 적용을 위한 경제적인 초전도 나노 복합 전도체를 개발하고자 한다.

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

#### 2. 실험 방법

Copyright ©2016 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.

출발원료로는 순도 99.99%의  $Y_2O_3$ ,  $BaCO_3$ ,  $CuO$ 를 사용하였다. 원료분말을 질산에 용해한 후,  $(C_6H_6O_7)$ .

H<sub>2</sub>O) 및 (CH<sub>2</sub>OH)<sub>2</sub>를 첨가하였다. 시트르산 및 에틸렌 글리콜은 출발 원료 중에 포함되는 금속이온의 총 원자가수 및 polymer 상 화합물의 최적비에 대응하는 필요량을 첨가하였다. 혼합용액을 hot plate 위에 놓고 약 90°C의 온도에서 2~3 시간 가열 각반 하였다. 반응이 시작 되면, 용액은 푸른색의 졸 상태로 되며, 반응이 종료 되면, 탈수 되어 옅은 청색의 겔 상태로 되었다. 반응 종료 후, 겔 상태의 혼합물을 전기로에서 350°C에서 1.5시간 가열분해를 수행하여, 회색의 전구체를 얻을 수 있었다. 이 전구체를 전기로에서 750°C, 8시간 하소하여, 메노유발에서 3시간 분쇄하는 작업을 2회 되풀이 하여 합성 분말을 얻었다. 이 전구체는 목적 조성과 같은 미세한 입자의 집합체이며, 부서지기 쉽고 분쇄가 용이하다. 전구체 분말을 가열처리 하게 되면 고온 초전도 원료 분말이 얻어진다. 본 연구에서는 균질하고 치밀한 초전도체를 얻기 위하여 용융법으로 초전도체의 제작을 시도 하였다. 용융법으로 제작할 때 냉각 속도를 아주 천천히 하여 서냉시키면 수 cm의 사각형 단결정 성형품으로 제작할 수 있었다. 열처리가 끝난후 초전도벌크 내부로의 열처리 효과를 검토하기 위하여 초전도 자기 부상력, 미세조직, 포획 자력 특성을 측정하였고, 그 결과를 플렉스 피닝공정의 기초 자료로 활용 하였다. 전기적 특성은 In을 전극재료로 사용하여 직류 4단자법으로 임계온도와 임계전류를 측정하였다. 초전도체의 전이온도를 확인하기 위하여 시편을 직육면체 형태로 만들어 MPMS (magnetic property measurement system)을 사용하여 시편의 자화율을 측정하였고, 온도를 77 K로 고정한 상태에서 자기장을 서서히 인가하여 시편의 M(magnetic moment)값을 측정하였다. 초전도 시편의 자기적 특성을 판단하기 위하여 자기 포획 특성을 측정하였다. 초전도 시편을 자력 냉각법을 이용하여 초전도 내부에 포획된 자력을 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

YBaCuO 세라믹 초전도체의 전자기 특성은 초전도 결정 내부에 존재하는 결함의 종류와 형태에 따라 변화한다. 초전도체의 플렉스 피닝센터(flux pinning center)는 화학적 및 물리적 방법을 사용하여 제어 할 수 있다. 초전도 특성의 향상을 위하여 용융법으로 제조한 YBaCuO 를 도가니에 넣어서 900°C에서 열처리 하여 초전도 벌크내부로의 플렉스 피닝의 확산을 유도

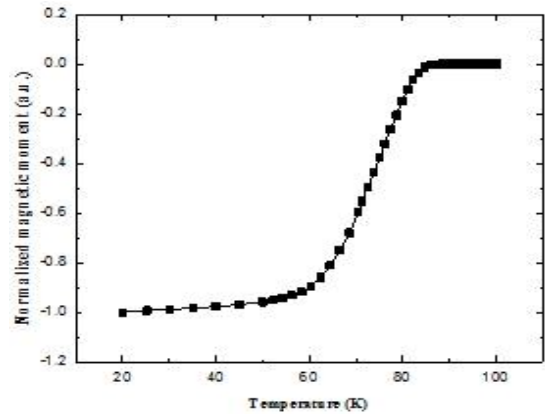


Fig. 1. Changes in the temperature of the superconducting sample which begin to s zero resistance.

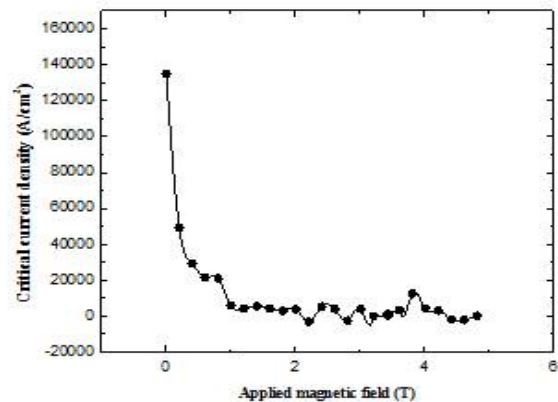


Fig. 2. Changes in the critical current density of the superconducting sample with external applied field.

하였다. 초전도 단결정 벌크를 열처리 한후 임계 전이 온도와 임계 전류밀도를 각각 측정 하였다.

그림 1에서 초전도 개시온도는 91.5 K로 매우 높게 관측 되었다. 따라서 초전도 열처리 공정에 의하면 초전도 전이온도의 변화에는 관계없이 초전도 플렉스 피닝 효과에 기능하고 있는 것으로 사려 된다. 기존의 초전도 시료의 특성과 비교하여, 초전도 시료의 임계전류밀도, 임계온도가 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 본 연구 결과, 열처리 과정에서 산소 확산에 의하여 초전도 플렉스 효과의 향상을 가져와 초전도 전이온도를 크게 개선하고 있음을 알 수 있다.

그림 2는 자장에 대한 자화율 곡선으로부터 Bean 모델을 적용하여 구한 초전도 시편의 임계전류밀도

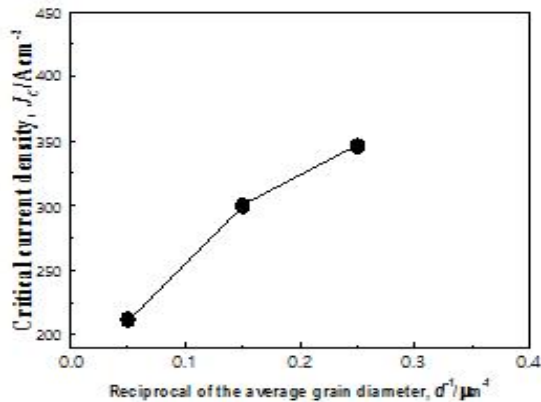


Fig. 3. Changes in the critical current density of the superconducting sample with external applied field.

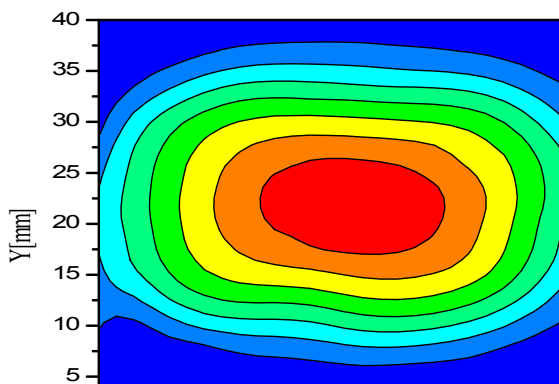


Fig. 4. Trapped magnetic force distribution of melt growth superconducting sample.

( $J_c$ )의 측정결과이다. 시편의  $J_c$ -B 곡선에서 자장이 증가할수록  $J_c$ 가 감소한다. 본 결과는 Schazle가 Ag를 첨가한 YBaCuO 초전도 시스템에서 관측한 결과와 일치하며 [7] 결국 초전도 열처리 공정이 초전도체 내부의 기공을 채우거나, 초전도체의 밀도화에 기여한다고 할 수 있다.

그림 3에는 용융법으로 성장시킨 초전도 시료에서 관측된 YBaCuO phase의 평균크기의 역수를 산정하여  $J_c$ 와의 상관 관계를 나타냈다. 그림에서 알 수 있듯이  $J_c$ 와 초전도입자의 크기의 역수와의 관계에는 linear 관계가 성립되며, 평균입자의 크기가 증가함에 따라,  $J_c$ 가 감소하고 있는 것으로 관측되었다. 열처리 공정에 따른  $J_c$ 값의 증가는 초전도체에 형성된 초전도 phase의 평균입자의 크기가 성장에 기인하는 것으로 판단된다.

그림 4에서는 열처리가 완료된 초전도 시편의 자기적 특성을 판단하기 위하여 자기 포획 특성을 측정하였다. 초전도 결정내부에 포획되는 자력의 세기를 측정하고자 표면 자력이 7.25 kG의 Nd-B-Fe 영구자석을 이용하여 초전도 시편을 자력 냉각법으로 액체 질소 온도 77 K까지 냉각 시킨 다음 영구자석을 제거한 후 초전도 시료의 표면을 홀 probe로 초전도 내부에 포획된 자력을 측정하였다. 자기 분포 곡선 중앙에서 최대 자기력이 있고, 중앙에서 거리가 증가 할수록 자기력이 감소하는 전형적인 단결정 형태의 자기력 분포곡선을 가진다. 처리 전 단계의 시료의 포획자력은 1.25 kG이며, 열처리후의 초전도체 내부의 포획자력은 2.53 kG으로 측정 되었고, 포획 자력의 침예도가 개선되어, 초전도 자화 특성이 크게 향상 되고 있음을 알 수 있다. 열처리를 통하여 초전도 결정입계가 조절되며, 결정입계가 산소 확산이 통로로서 기능하게 되어 결정입계의 결합을 개선하는 효과를 가져와 초전도 임계전류의 향상시킴으로 판단된다.

#### 4. 결론

열분해 및 용융성장에 의하여 YBaCuO계 초전도체를 합성 하였다. 균일한 원소 첨가가 가능하리라 사려되는 본 합성법에 의거 하여, 플렉스 피닝 효과를 나타내는 초전도 시료를 제작 하였다. 단결정으로 제작한 YBaCuO 초전도체는 고온에서는 정방정이고 저온에서는 사방정이다. 정방정상이 온도가 내려가면서 사방정상으로 변태한다. 따라서 열처리 후 정방정 구조를 초전도상인 사방정 구조로 천이 하였다. 등온 열처리가 완료된 초전도 시편의 자기적 특성을 판단하기 위하여 자기 포획 특성을 측정하였다. 본 초전도 시편은 자기 분포 곡선 중앙에서 최대 자기력이 있고, 중앙에서 거리가 증가 할수록 자기력이 감소하는 전형적인 단결정 형태의 자기력 분포곡선을 나타내었다. 본 연구에서 제시하는 열처리 방법은 표면으로부터 직접적인 플렉스 주입으로 초전도 내부의 결정입계의 상태를 개선하는 효과를 가져와 플렉스 피닝을 향상시켜 초전도 전이온도 및 초전도 특성을 향상시키는 상승 효과를 나타낸다. 용융공정을 통한 열처리 효과로 인하여 YBaCuO 초전도 시료의 초전도 결정입계가 조절되며, 결정입계가 산소 확산이 통로로서 기능하게 되어 결정입계의 결합을 개선하는 효과를 가져와 초전도 특성을 향상시키는 것으로 판단된다.

## REFERENCES

- [1] J. Yang, D. Shi, X. Wang, A. Liu, and G. Yuan, *Physical C*, **341**, 2499 (2000).  
[DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-4534\(00\)01290-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-4534(00)01290-9)]
- [2] M. Murakami, M. Morita, K. Doi, and K. Miyamoto, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **28**, 1189 (1989).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1143/JJAP.28.1189>]
- [3] M. Murakami, *Mod. Phys. Lett. B*, **4**, 163 (1993).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1142/S0217984990000234>]
- [4] F. Hellman, E. M. Gyorgy, D. W. Johnson, J. R. Wang, and R. C. Sherwood, *J. Appl. Phys.*, **63**, 447 (1988).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.340262>]
- [5] S. Nariki, N. Sakai, M. Matsui, M. Murakami, *Physica C*, **378**, 774 (2002). [DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-4534\(02\)01541-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-4534(02)01541-1)]
- [6] K. Yokoyama, T. Oka, H. Okada, Y. Fujine, A. Chiba, and K. Noto, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **13**, 1592 (2003).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TASC.2003.812799>]
- [7] P. Schazle, G. Krabbes, S. Grub, G. Fuchs, *Transactions on Applied Superconductivity*, **16**, 17 (1999).