

## 벌크형 초전도체의 전기자기적 특성

이상헌<sup>a</sup>

선문대학교 전자공학과

### Electromagnetic Properties of Bulk High-Tc Superconductor

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

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

(Received January 2, 2017; Revised January 4, 2017; Accepted January 9, 2017)

**Abstract:** In this research, the development of fabrication technique of bulk YBaCuO superconductors for application was studied. In fluence of BaZrO<sub>3</sub> addition on magnetization characteristics of thermal pyrolysis textured YBaCuO superconductor was investigated. Fine BaZrO<sub>3</sub> particle were dispersed within the textured YBaCuO matrix by means of the thermal pyrolysis processing. Magnetic levitation force for YBaCuO superconductors were obtained using Nd-B-Fe permanent magnet, at 77 K and at the magnetic field from 0 to 5.3 K gauss. In the unadded superconductor and 5 wt% BaZrO<sub>3</sub> addition, anomalous magnetization behavior, which is characterized by the intermediate magnetic field, was observed at 77 K. Critical current density was about few hundreds A/cm<sup>2</sup> and the magnetic characteristics increased slightly by addition of BaZrO<sub>3</sub> powder. Maximum magnetic force was obtained in the YBaCuO superconducting bulk with 3 wt.% BaZrO<sub>3</sub> addition.

**Keywords:** YBaCuO superconductor, Bulk, Magnetic field

### 1. 서론

급속한 산업발전으로 인한 석탄, 석유 등 천연자원이 고갈되고 있으며, 또 이러한 자원의 사용으로 인해 오염 물질들이 발생하고 있다. 이런 문제점을 해결 하고자 자원고갈 문제도 없고, 공해를 발생시키지 않는 친환경 소재 개발이 활발하게 진행되고 있으며, 고효율 에너지 저장 소재인 고온 초전도체의 합성에 대한 관심이 고조되고 있다. 초전도 재료를 에너지, 기계, 수

송, 의료, 전자산업 등에 실용화하기 위해서는 재료의 초전도 전이온도, 임계 전류밀도 등의 특성을 향상 시켜야 하며, 각각의 용도에 맞게 적합한 형태인 선재나 박막 등의 형태로 가공하는 기술이 개발되어야 한다. 최근에는 선재, 박막 이외에도 벌크형 초전도체를 특별한 가공 없이 직접 활용할 수 있는 제조기술이 개발되어 여러 응용분야에 다양하게 활용될 전망이다. 특히 이 분야의 연구는 에너지 저장과 산업 전반에 혁신적인 변화를 가져올 수 있기 때문에 초전도 재료의 제조 기술의 확립이 시급하게 되었다. 본 연구에서는 초전도 재료의 제조 단가가 저렴하고 초전도 입자 크기가 균일하고 조성 제어가 우수한 thermal pyrolysis를 이용하여 경제성 있는 초전도 벌크 제조 기술로의 적용 가능성을 조사하고자 한다.

a. Corresponding author; [shlee@sunmoon.ac.kr](mailto:shlee@sunmoon.ac.kr)

Copyright ©2017 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.

## 2. 실험 방법

출발원료로는 순도 99.99%의  $Y_2O_3$ ,  $BaCO_3$ ,  $CuO$  분말과 순도 99%의  $BaZrO_3$  분말을 소성하여 출발조성이 화학양론적 조성이 되도록 평량한 후, 질산에 용해하였다. 질산으로 완전히 용액으로 용해한 후, 시트르산 수화물 ( $C_6H_6O_7 \cdot H_2O$ , 특급시약, 함량 65%) 및 에틸렌글리콜( $(CH_2OH)_2$ , 특급시약, 순도 99.9%)을 첨가하였다. 시트르산 및 에틸렌글리콜은 출발 원료중에 포함되는 금속이온의 총 원자가수 및 polymer상 화합물의 최적비에 대응하는 필요량을 첨가하였다. 혼합용액을 hot plate위에 놓고 약  $100^\circ C$ 의 온도에서 3시간 가열 각반하였다. 반응이 시작되면, 용액은 푸른색의 sol 상태로 되며, 반응이 종료되면, 탈수되어 옅은 청색의 gel 상태로 변화하였다. 반응 종료 후, gel 상태의 혼합물을 전기로에서  $550^\circ C$ 에서 1시간 thermal pyrolysis를 수행하여, 회색의 초전도 전구체를 얻을 수 있었다. 이 전구체를 전기로에서  $950^\circ C$ , 10시간 하소하여, 초전도 합성 분말을 얻었다. 합성분말을 직경 22 mm, 두께 10 mm의 펠렛으로 일축 프레스 성형하여, 열처리를 하였다. 제조된 초전도체의 미세조직과 초전도 특성( $77 K$ 에서의 자기부상력과, 포획자력)의 관계로부터 초전도 기초물성에 관한 첨가물의 효과를 알아보았다.

## 3. 결과 및 고찰

그림 1에서는 초전도체의 자기 특성을 평가하기 위하여 영구 자석을 사용하여 자석과 YBaCuO 벌크사이의 반발력 및 포획자력을 측정하였다. 반발력 측정을 위해서 제조된 시편을 자력냉각(FC)으로 액체질소 온도까지 냉각한 다음에 표면 자력이 5.3 kG Nd-B-Fe 계 영구자석을 사용하여 측정하였다. field cooling 된 YBaCuO 벌크 초전도체의 포획자력 분포와 자장의 세기를 측정하였다. 본 실험은 Nd-Fe-B 영구자석과 초전도 시편이 서로 접한 상태에서 냉각시킨 후 자석을 떼어내고, hall sensor로 2 mm 간격으로 스캔하며 포획 자력의 크기를 측정하였다.

그림 2는  $BaZrO_3$ 를 넣지 않은 시편과  $BaZrO_3$ 를 첨가한 시편에 대해 자력 냉각법으로 영구자석을 이용해 측정된 힘-거리(F-d) 곡선이다. 그림에서 (a)는  $BaZrO_3$ 를 첨가하지 않은 시편의 F-d 측정결과이며, (b)는  $BaZrO_3$  분말을 첨가한 시편의 F-d 측정결과이다.

자력냉각의 경우는 초전도체에 영구자석이 포획된

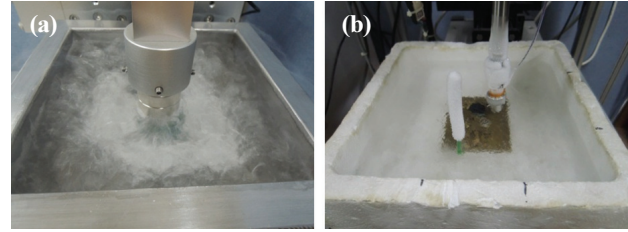


Fig. 1. Measurement of magnetic levitation force and trapping magnetic force of YBaCuO superconductor. (a) Magnetic levitation and (b) trapped magnetic force.

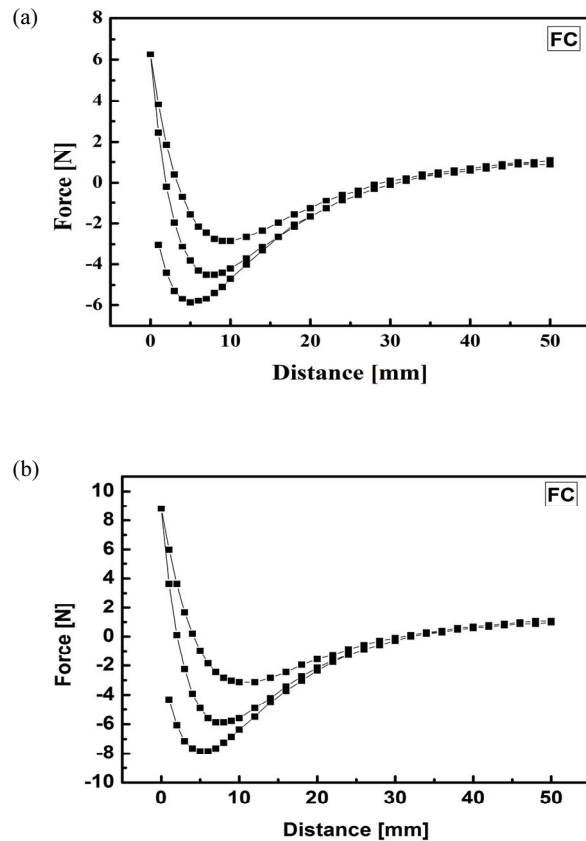


Fig. 2. Magnetic hysteresis curves of  $BaZrO_3$  added YBCO Superconductor. (a) Unadded and (b)  $BaZrO_3$  added.

상태에서 영구자석을 초전도체로부터 멀리 이동하기 때문에 초전도체에 포획된 자기력과 영구자석의 자기력의 힘을 측정하게 된다. 따라서 측정된 힘은 (-) 부호를 갖는 인력이 되며 초전도체로부터 영구자석을 멀리하게 되면 인력은 거리에 따라 감소한다. 영구자석을

초전도체로부터 멀리 가져갔을 때 측정된 후에 다시 초전도체로 접근시키며 마이스너 반발력에 의한 (+) 부호의 힘이 나타나며 이 힘은 초전도체와 영구자석 간의 거리가 최소가 될 때 최대가 된다. BaZrO<sub>3</sub>를 첨가한 초전도 시료의 field cooling 상태에서 측정된 최대 인력은 8 N이며, 최대 반발력은 9 N이다. BaZrO<sub>3</sub>를 첨가 전과 후를 비교하였을 때, 최대 인력은 15.2% 증가하였다. field cooling의 상태에서 측정된 자기 반발력은 9 N으로 측정되어, 열처리 공정에서 BaZrO<sub>3</sub>를 첨가함으로써 약 12%의 자기특성이 개선되었음을 알 수 있다. 본 연구 결과, 초전도체에 첨가되는 BaZrO<sub>3</sub>입자가 플렉스 피닝으로 작용하여 초전도 자기 특성을 개선하고 있음을 알 수 있다.

그림 3은 thermal pyrolysis 방식으로 제작된 초전도체의 FESEM 사진으로, BaZrO<sub>3</sub>를 첨가한 시편의 단면을 나타낸다. 그림에서 thermal pyrolysis로 인하여 입자가 매우 고른 결합형태를 보이고 있으며, 분말 입자의 정렬에 따른 초전도체 내부의 크랙 현상이 크게 개선되었음을 확인할 수 있다. 따라서 thermal pyrolysis를 통하여 입자들이 방향성을 갖게 함으로써 입자간의 결합력을 증대시켜 초전도 크랙 현상을 최소화하는 효과를 기대할 수 있다. 결국 thermal pyrolysis 방식의 초전도벌크 제작방법을 적용하여 크랙 현상 및 초전도 입자간 결합 상태를 해소하고 초전도 입자간의 전착밀도를 극대화 할 수 있으며, 이를 통하여 임계전류밀도를 향상시킬 수 있는 것으로 판단된다.

그림 4는 BaZrO<sub>3</sub>의 중량변화에 따른 자기적 특성을 측정된 결과이다. 그림 4에서 YBaCuO 123 초전도 시료에 BaZrO<sub>3</sub>를 첨가하게 되면, 초전도체의 자화 특성을 나타내는 초전도시료 중량이 증가하게 된다. BaZrO<sub>3</sub>의 첨가량이 3 wt% 이상으로 증가하게 되면, 자화력에 비례하는 시료 중량은 감소하여 초전도 특성은 저하 된다.

EPMA에 의하여 BaZrO<sub>3</sub>를 첨가한 초전도 시료의 원소 분포 형태를 관측하면, BaZrO<sub>3</sub>는 시료내부를 균일하게 분포하는 것으로 관측되었다. BaZrO<sub>3</sub>는 수 $\mu$ m 이하의 미세한 입자 형태로 분산 되어 있는 것으로 관측 된다. 열처리 시간이 길어지게 되면, YBaCuO 초전도 phase의 결정입자는 조대화 되어, 시료 내부에 분산 되어 있던 BaZrO<sub>3</sub>입자는 서로 응집하여, 입자의 수가 감소하는 것으로 사려된다. 이러한 BaZrO<sub>3</sub>입자의 응집과 Jc와는 밀접한 관련성이 있는 것으로 사려된다. 따라서 BaZrO<sub>3</sub>입자의 크기가 더욱 미세하게 되면, Jc 값은 증가하는 것으로 예상할 수 있다.

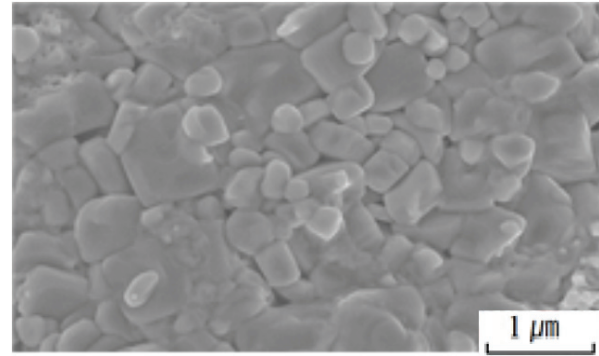


Fig. 3. FESEM images for the cross section of the BaZrO<sub>3</sub> added YBaCuO superconductor.

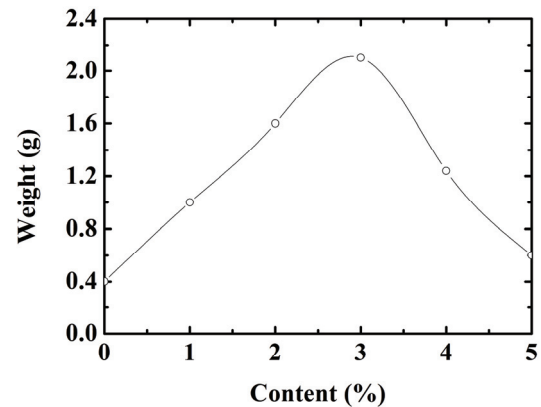


Fig. 4. Weight change of the BaZrO<sub>3</sub> added YBaCuO superconducting bulk.

#### 4. 결론

본 연구에서는 기존의 초전도 합성을 위한 물리적, 화학적 제조 기법의 문제점으로 지적되고 있는 조성 제어를 극복할 수 있는 대안으로써 제조 단가가 저렴하고 입자크기가 균일하고 조성 제어가 우수한 thermal pyrolysis를 이용하여 경제성 있는 초전도 벌크 제조 기술로의 적용 가능성을 조사하였다. 제조된 초전도체의 미세조직과 초전도 특성, 77 K에서의 자기부상력과, 포획자력의 관계로부터 초전도 기초물성에 관한 첨가물의 효과를 알아보았다. YBaCuO 초전도 벌크에 산화물인 BaZrO<sub>3</sub>를 첨가하면, BaZrO<sub>3</sub>를 첨가하지 않은 시료와 비교하여 자기적 특성이 향상되었다. 열처리 공정에서 BaZrO<sub>3</sub>를 첨가함으로써 약 12%의 자기특성이 개선되었음을 알 수 있다. BaZrO<sub>3</sub>의 첨가량이 3

wt%이상으로 증가하게 되면, 자화력에 비례하는 시료 중량은 감소하여 초전도 특성은 저하된다. 본 연구 결과, 초전도체에 첨가되는 BaZrO<sub>3</sub> 입자가 초전도체 내부의 플럭스 피닝으로 작용하여 초전도 자기 특성을 개선하고 있는 것으로 판단된다.

## REFERENCES

- [1] P. Chaudhari, J. Mannhart, D. Dimos, C. C. Tsuei, J. Chi, M. M. Oprysko, and M. Scheuermann, *Phys. Rev. Lett.*, **60**, 189 (1988). [DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.60.1653>]
- [2] K. Yokoyama, T. Oka, H. Okada, Y. Fujin, A. Chiba, and K. Noto, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **13**, 1592 (2003).
- [3] S. Nariki, N. Sakai, M. Matsui, and M. Murakami, *Physica C*, **378**, 774 (2002). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-4534\(02\)01541-1](https://doi.org/10.1016/S0921-4534(02)01541-1)]
- [4] K. G. Li and R. Kobayashi, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33**, 843 (1994). [DOI: <https://doi.org/10.1143/JJAP.33.L843>]
- [5] H. Murakami and T. Suga, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **29**, 2720 (1990). [DOI: <https://doi.org/10.1143/JJAP.29.2720>]