

# Development of 3 T-class Large Area YBCO Superconductor Bulk Magnet

S. C. Han<sup>\*</sup>, S. Y. Jeong, B. J. Park, Y. H. Han

KEPCO Research Institute, Daejeon, Korea

(Received 13 August 2012; revised 20 August 2012; accepted 21 August 2012)

## 3 T급 대면적 YBCO 초전도 벌크자석 개발

한상철<sup>\*</sup>, 정세용, 박병준, 한영희

### Abstract

For the practical application of a YBCO superconductor bulk magnet, the superconductor bulk magnet with strong and stable magnetic field on a large area surface should be fabricated. To satisfy these requirements, we have designed a conduction-cooled bulk magnet system using six single grain YBCO bulk superconductors. Six rectangular-shaped YBCO bulk superconductors with a dimension of  $38 \times 38 \times 15 \text{ mm}^3$  were field-cooled at 20 K using a superconductor magnet with maximum operating magnetic field of 4 T. The magnetic flux of 3.0 T and 2.8 T were achieved on the surface of bulk superconductors and over the vacuum chamber surface of the refrigerator, respectively.

*Keywords* : YBCO Superconductor Bulk Magnet, Magnetization, Conduction Cooling, Superconductor Actuator

### I. 서론

초전도 벌크 자석 기술은 초전도 벌크를 제조하는 초전도재료 기술을 핵심으로 하고 착자 기술과 냉동기술을 주변기술로 갖고 있다. 최근에 YBCO 초전도재료의 기계적 특성 향상 연구의 결과로 초전도 벌크의 포획자장이 획기적으로 향상되었다 [1-4]. 고온초전도 벌크제조 기술은 용융-응고법이 개발된 이후로 비약적으로 발전하였고 현재 직경 10 cm급의 YBCO 초전도 단결정이 개발되어 있는 수준이지만 포획

자장능력 등의 자기적 특성은 뛰어나지 않다.

고자장을 포획할 수 있는 초전도 단결정 제조 연구는 RE-Ba-Cu-O 계 단결정 제조 및 대면적화 연구와 Y-Ba-Cu-O 계에서 고자장 포획 시 견딜 수 있는 기계적강도를 유지하기 위하여 Ag 등을 첨가하여 취성을 낮추는 연구가 진행되고 있다.

고자장 초전도 자석 기술은 세계 최첨단의 기술로 초전도모터, 자기분리기 등에 바로 적용이 가능하고, 전력산업분야에서는 초고압 및 송전급 차단기에 적용되어 신뢰성과 안정성 향상에 지대한 공헌을 할 것으로 기대되며, 부가 기술인 냉동기술은 초전도 전력기기의 상용화를 앞당길 것으로 기대되고 있다.

본 연구에서는 종자를 사용한 용융-응고법으

<sup>\*</sup>Corresponding author. Fax : +82 42 865 7804

e-mail : schan@kepri.re.kr

로 4 cm크기의 YBCO 단결정을 제조하여 초전도 벌크 자석용 시편을 준비하였고 6 개의 단결정을 배열한 대면적을 전도냉각으로 20 K까지 냉각하여 4 T급 초전도 작자기를 사용하여 최대 3 T급 대면적 YBCO 초전도 벌크자석을 개발하였다.

## II. 고품성 YBCO 초전도 단결정 제조

YBCO123 단결정을 제조하는 대표적인 방법은 전구체분말보다 용융온도가 높은 Sm123 ( $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ ) 또는 Nd123 ( $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ ) 초전도 단결정 종자를 사용하여 적절한 열처리 공정을 적용한 용융-응고법을 이용하는 것이다 [5]. 이때 사용되는 전구체분말은 Y123 ( $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ ) 초전도분말과 적당량의 Y211 ( $\text{Y}_2\text{BaCuO}_5$ ) 분말을 혼합하고 초전도체의 자성특성에 큰 영향을 미치는 Y211 입자의 미세화를 위해 소량의  $\text{CeO}_2$  또는 Pt를 첨가한 것이다. 그러나 Y123-Y211계를 이용한 단결정 성장 시 단점은 포정반응이 온도와 조성이 정해진 불변반응이기 때문에 준안정상태에서 성장과정의 안정성을 보장하는 과냉 온도가 크지 않다는 것이다. 즉 입자성장이 온도의 변동에 대한 불안정성에 매우 민감해서 재연성있는 대면적 단결정을 성장시키기 어렵고 Y123 단결정 내에 존재하는 Y211 입자를 미세화시키기 어렵다는 것이다. 따라서 본 연구에서 초전도 벌크자석을 위해 사용된 YBCO123 단결정은 Y123 분말과  $\text{Y}_2\text{O}_3$  분말을 혼합한 것을 전구체분말로 하여 용융-응고법으로 제조하였다.  $\text{Y}_2\text{O}_3$  조성은 실험을 통해 0.3 mol로 정하였고 역시 단결정 내 Y211 입자 미세화를 위해 1wt%  $\text{CeO}_2$ 를 첨가하였다. Y123- $\text{Y}_2\text{O}_3$ 계는 단결정 제조 열처리 공정에서 과냉온도를 높게 할 수 있어서 단결정 내 Y211입자의 크기를 Y123-Y211계 보다 줄일 수 있어서 포획자장 능력이 뛰어난 단결정을 제조할 수 있다.

본 연구에서 사용된 초전도 단결정은 Y123 + 0.3mol  $\text{Y}_2\text{O}_3$  + 1wt%  $\text{CeO}_2$  조성의 전구체를 900°C에서 6시간 부분용융 시킨 다음 1050 °C에서 20분유지 후 1010 °C까지 냉각하여 960 °C까지 0.3/hr의 냉각속도로 서냉하여 제조 하였

다. Fig. 1은 제조된 단결정과 Nd자석으로 field cooling한 후 측정된 포획자장 분포이다.

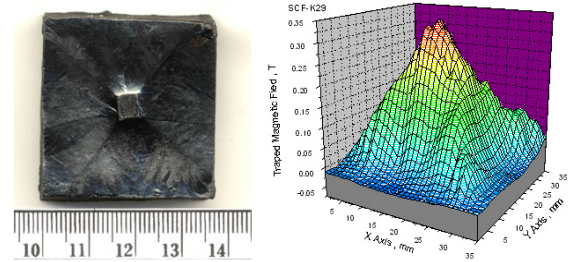


Fig. 1. Y123+0.3mol  $\text{Y}_2\text{O}_3$ +1wt% $\text{CeO}_2$  (1050 °C, 0.3 °C/hr) superconductor bulk and trapped magnetic field by NdFeB magnet.

## III. YBCO 초전도 벌크 자석 개발

### 1. YBCO123 단결정 전도냉각

시편을 장착하는 시편 지지대의 재료는 열전달 특성이 우수한 무산소동으로 제작하였으며, 시편 지지대 및 복사차폐막은 G-10 봉을 이용하여 수직방향으로 지지되도록 설계하였다. 그리고 시편 지지대의 하단부와 복사차폐막 및 복사차폐막과 진공조 사이에 FRP 원판을 조립하여 시편 지지대가 수평방향으로 힘을 받을 때 전달되는 힘이 진공조 내벽에서 지지되도록 하였다. 저온 영역을 상온인 외부로부터 단열하는 진공용기는 스텐레스 스틸을 사용하여 제작되며, 300 K 온도영역인 진공조로부터 최저 20 K 온도영역인 시편으로의 복사열침입은 두께 2 mm인 알루미늄을 이용하여 복사열을 차폐하도록 하였다.

Fig. 2는 YBCO 초전도 단결정을 전도냉각하기 위하여 제작한 시편 냉각용 저온용기의 내부 조립모습을 나타낸다. 진공조 상판 플랜지에 냉동기를 부착하였으며, 복사차폐의 상판 플랜지는 G-10 봉을 통하여 진공조 상판 플랜지에 조립하였다. 복사차폐 상판플랜지와 냉동기 1단 그리고 냉동기 2단과 시편 지지대는 연성이 높은 동 연선으로 연결하여 열전달을 시키는 동시에 냉동기로 힘이 전달되는 것을 방지하도록 하였다. 복사차폐의 외주에 다층 단열을 시공하여 복사열침입을 최소화 하였다.



Fig. 2. Internal view of cryogenic vessel for conduction cooling superconductor bulk.

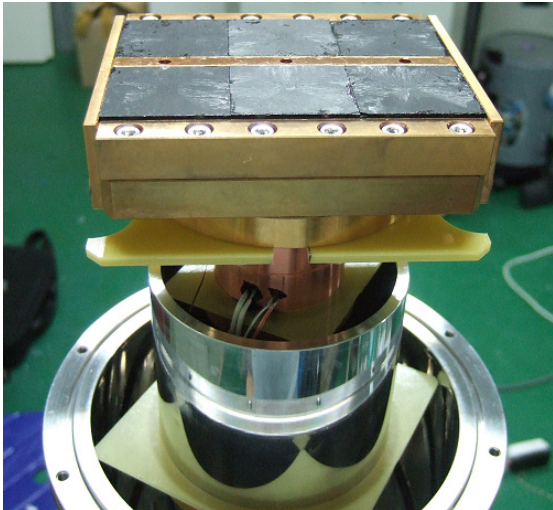


Fig. 3. Six YBCO bulk superconductor attached on Cu holder.

Fig. 3은 YBCO 단결정 6개를 전도냉각 하기 위한 시편 지지대의 확대사진을 나타낸다. 시편 지지대는 열전달 특성이 우수한 무산동판에

사각의 홈을 가공하고 여기에 가로 및 세로가 각각 38 mm 이고 두께가 15 mm인 YBCO 초전도 단결정 시편 6개의 옆면에 경사 가공하여 삽입시키는 구조로 제작하였다. 시편 지지대 및 시편에 각각 온도센서를 부착하여 모니터링 하도록 하였다.

Fig. 4는 진공조를 조립하여 완성한 6개의 YBCO123 초전도벌크 냉각용 전도냉각 저온용기의 외관모습과 초전도 조작기를 구성하게 될 2조의 초전도벌크자석을 착자하기 위해 6개의 초전도 벌크를 전도냉각하는데 걸리는 시간을 나타낸다. 초전도착자기에 전도냉각 저온 용기를 장착하고 착자기에 최고 3.3 T의 고자장을 부가한 상태에서 6개의 초전도벌크를 18 K까지 냉각하는데 15시간이 소요되는 것을 알 수 있다.

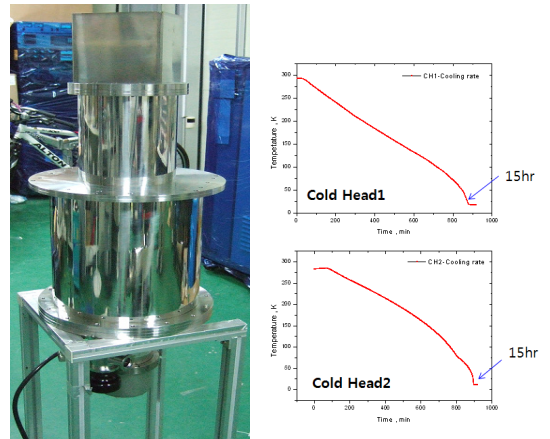


Fig. 4. External view of cryogenic vessel attached YBCO bulk and cooling time to 18K.

## 2. 고온초전도 벌크 착자 및 자화 자기장 측정

YBCO123 고온초전도 대면적 단결정에 자장을 포획하여 영구자석처럼 사용하기 위해서는 Nd계 소결체를 착자하여 영구자석으로 만들듯이 초전도체도 착자라는 단계를 거쳐야한다. 첫 번째로 최대의 자장을 포획하기 위하여 Fig. 5에서 보듯이 초전도체가 장착된 전도냉각 용기를 상온에서 착자기에 장착한다. 착자기에 전류를 통전하여 고자장을 발생시키고 이 자기력이 상온상태의 초전도체 내부로 100% 통과하도록 한 상태에서 전도냉각 용기의 냉동기를 가동하여 초전도체를 전도냉각 시키면 정해진 착자기 능력 하에서 최대 자장을 포획한 초전

도 벌크자석을 만들 수 있다. 본 연구에서는 NbTi계 저온초전도코일을 사용하여 상온보아 300 mm, 최대중심자장 4 T를 인가할 수 있는 초전도 착자기를 설계/제작하여 3.3 T까지 착자기 자장을 인가하고 6 개의 YBCO 초전도 벌크를 착자하는 데 성공하였다. Fig. 5는 6 개의 YBCO123 초전도 단결정으로 이루어진 벌크를 착자하고 있는 모습이다.

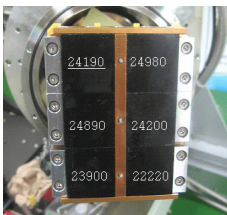


Fig. 5. Magnetization view of cryogenic vessel attached six YBCO bulk by 4 T-class superconductor magnetizer.

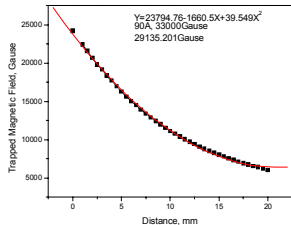
Fig. 6은 3.3 T 착자기를 이용하여 초전도벌크를 착자하고 포획자장을 측정된 결과이다. Fig. 6(a)에서 각 초전도체에서 측정된 포획자장값은 초전도체 표면에서 3 mm 떨어진 저온용기 표면에서 측정된 값이다. 최대값이 2.5 T 정도로 측정되었고 주변에서 상당히 위험할 정도로 강한 자장을 느낄 수 있었다. Fig. 6(b)는 저온용기 표면에서 거리에 따른 포획자장값을 측정된 데이터이고 이 값의 변화로부터 유추한 곡선의 그래프에서 보면 초전도 벌크 표면의 포획자장값은 2.91 T로 계산되었고 본 연구에서 이루고자 했던 목표인 3 T값을 거의 달성했다고 보인다. Fig. 7은 진공조 표면으로부터 거리에 따른 초전도 벌크 자석의 3차원과 2차원 포획자장 분포를 측정된 결과이다.

초전도착자기의 상온보아를 줄여서 성능을 개선하면 더 높은 자장을 인가하여 3 T가 넘는 대면적 초전도벌크자석을 만들 수 있다는 것을 확인하였다. 향후 이러한 대면적 고평상 초전도 벌크 자석은 조자기, 초전도 벌크자석 모터, 초전도 벌크자석 자기분리기 등에서 탁월한 성능을 발휘할 것으로 예상된다.

4T급 착자기 적용 (운전 전류 90A)



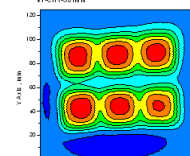
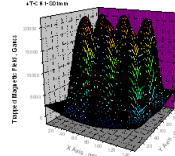
(a) CH1 표면으로부터 3mm 지점의 최대 포획자장, Gauss



(b) CH1 거리 변화에 따른 포획자장 세기 측정 CH1내 초전도체는 2.91T로 착자됨.

Fig. 6. (a) Trapped magnetic field measured on the surface of cryogenic vessel and (b) with distance from vessel surface.

(a) 4T-CH1- 표면으로부터 1mm거리, 최대 22000Gauss



(b) 4T-CH1- 표면으로부터 4mm거리, 최대 18000Gauss

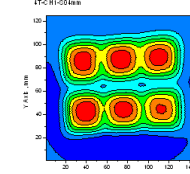
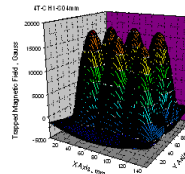


Fig. 7. Trapped magnetic field measured on the surface of cryogenic vessel.

IV. 결론

YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>계를 이용하여 종자를 이용한 용융-응고성장법으로 대면적 고평상 YBCO

초전도 단결정을 성공적으로 제조하였고 6 개의 YBCO 단결정을 배열한 시편 지지대를 냉동기를 이용하여 20 K까지 원활하게 전도냉각하였다. 내부 보아사이즈 큰 4 T급 초전도 착자기를 이용하여 3.3 T 자장하에서 6 개의 YBCO 벌크가 배열된 대면적 초전도체를 착자하여 2.9 T급 대면적 YBCO 초전도벌크자석을 만드는데 성공하였다. 이러한 대면적 초전도 벌크 자석은 조작기, 초전도 벌크 모터, 자기분리기 등의 실용화를 앞당기는 데 기여할 것이다.

### Acknowledgments

본 연구는 한국전력공사와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 전력산업연구개발사업의 연구 결과로 수행되었습니다. 관계 부처에 감사 드립니다.

드립니다.

### References

- [1] H. Ikuta, A. Mase, Y. Yanagi, M. Yoshikawa, Y. Itoh, T. Oka, U. Mizutani, *Supercond. Sci. Technol.* 11 (1998) 1345.
- [2] S. Gruss, G. Fucks, G. Krabbes, P. Verges, G. Stöcker, K.-H. Müller, J. Fink, L. Schultz, *Appl. Phys. Lett.* 79 (2001) 3131.
- [3] M. Tomita, M. Murakami, *Nature* 421 (2003) 517.
- [4] Y. Yanagi, M. Yoshikawa, Y. Itoh, T. Oka, H. Ikuta, U. Mizutani, *Physica C* 412–414 (2004) 744.
- [5] R. L. Meng, L. Gao, P. Gautier-Picard, D. Ramirez, Y. Y. Sun, and C. W. Chu, *Physica C*, Vol. 232, p. 337, 1994.