

The Trapped Field Characteristics of YBCO Superconductor Composite in Terms of Applied Magnetic Field

M. S. Lee^{*,a}, G. E. Jang^a, Y. S. Choi^b, B. H. Jun^c, Y. H. Han^d, B. J. Park^d

^a Chungbuk National University, Cheongju, Korea

^b Korea Basic Science Institute, Daejeon, Korea

^c Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, Korea

^d Korea Electric Power Research Institute, Daejeon, Korea

(Received 4 August 2010 revised or reviewed 15 October 2010 accepted 15 October 2010)

인가 자기장에 의한 YBCO 초전도체 복합체의 포획 자기장 특성

이만수^{*,a}, 장건익^a, 최연석^b, 전병혁^c, 한영희^d, 박병준^d

Abstract

We have measured the trapped field of YBCO bulk with different configuration by applying the magnetic field of Nb₃Sn superconducting magnet. Initially the circular type of YBCO bulk superconductor was prepared and then hole, parallel to the c-axis and located at the center of bulk was mechanically drilled. The YBCO bulk with hole was filled with resin. Typical size of hole in YBCO bulk was 10 mm in diameter. Trapped field characteristics were compared with different specimen conditions. Our preliminary result indicates the increment rate of trapped field, 0.232 kG, measured on the YBCO without hole was much higher than that, 0.011 kG, measured on YBCO with hole.

Keywords : YBCO, bulk, trapped field, artificial hole, impregnation

I. Introduction

Top-seeded melt growth (TSMG)법으로 제조된 Y_{1.5}Ba₂Cu₃O_{7-y} + 1 wt% CeO₂ 벌크 초전도체는 oxygen formation과 gas trap으로 많은 void가 형성되어 부서지기 쉬운 성질을 가지고 있으며

oxygen annealing시 상의 변형으로 인한 crack의 발생으로 초전도체의 물리적 특성을 감소시킨다.

최근 초전도체를 제작함에 있어 높은 임계 전류 밀도를 가지는 제조법이 많이 발견되었다 [1, 2]. 그러나 maximum trapped field는 초전도체의 물리적인 특성으로 인해 많은 제약을 받고 있다. 따라서 큰 전자기력이나 열응력에 버틸 수 있는 초전도체의 물리적인 특성을 확

*Corresponding author. Fax : +82-43-271-3222

e-mail : gejang@chungbuk.ac.kr

립하는 것이 중요시 되고 있다 [3].

첨단 산업에서 쓰이는 초전도체 응용 기기들은 액체질소나 액체헬륨의 저온에서 높은 자기장이나 급격한 온도 변화에 의한 crack과 void에 응력집중 현상이 발생하여 YBCO 초전도체의 자기적 특성을 저하시키거나 초전도체 물질의 파괴를 야기시킨다. 이러한 특성을 보완하기 위하여 현재 YBCO의 crack이나 void에 resin, Ag등을 보강하여 자기적 및 기계적 특성을 향상시킨 연구사례들이 발표되고 있다 [4-8].

본 연구에서는 원통형의 YBCO 초전도체 중앙에 인위적으로 홀을 가공, resin을 주입하였다. 이후 홀 가공 전과 후 그리고 resin을 보강한 벌크 복합체에 외부 자기장을 인가 한 후 각 시편 조건에 따른 trapped field를 측정, 홀이나 보강제에 따른 영향을 비교, 분석하고자 하였다. 또한 동일한 시편에 대하여 외부 자기장을 제거한 후 시간에 따른 trapped field 변화를 조사하였다.

II. Experiment

Top-seeded melt growth (TSMG)법으로 $Y_{1.5}Ba_2Cu_3O_{7-y}$ (YBCO) 초전체를 제조하였다. 이후 초전도체에 홀을 가공하지 않은 시편, 가운데 홀을 가공한 시편, 가공한 홀에 에폭시를 채운 시편을 준비 하였고, 홀은 drilling을 통해 c 축 방향으로 10 mm의 직경으로 가공하였다. 시편 상부의 사진과 크기 및 주입 물질을 Fig. 1과 Table 1에 도시하였다.

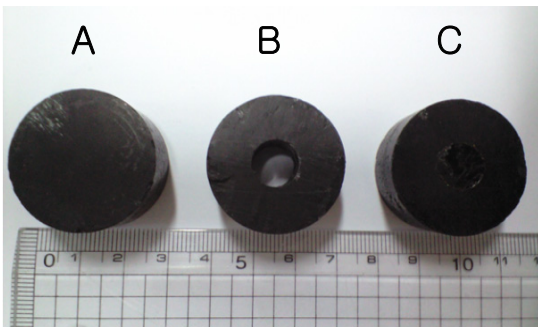


Fig. 1. The preparation of YBCO bulk; (A) without hole, (B) with hole, and (C) impregnated by epoxy resin at the hole.

Table 1. Typical specification of YBCO bulk.

	Diameter and thickness	Inner hole size	Impregnated material
A	30 x 14mm	.	.
B	30 x 14mm	10mm	.
C	30 x 14mm	10mm	epoxy -stycast curing time: 12h

각 시편의 trapped field 값을 측정 시, 시편 외부에 특정 자장을 인가하여 액체질소를 부어 냉각하는 field cooling을 한 후 외부의 인가 자기장을 제거하고 액체질소에 담겨있는 벌크 시편의 trapped field 값을 측정하였다. Nb_3Sn 저온초전도 자석으로 측정 하기 전, 0.3 T의 영구자석을 시편 상부에 올려놓고 액체질소로 냉각 후 시편에서 영구자석을 떼어내어 시편의 trapped field를 측정하는 착자 실험을 하였다. 이를 통해 2차원과 3차원 형태의 trapped field 분포를 얻어내어 시편을 가공하면서 생긴 물리적 손상과 macro-crack등을 파악하였다.

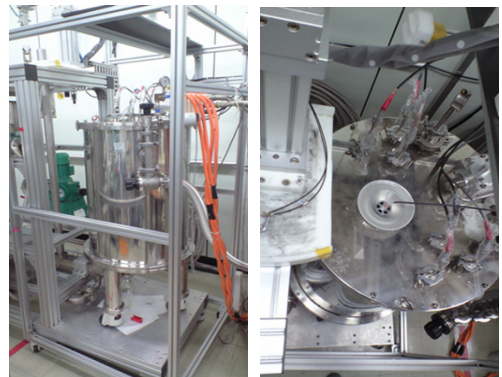


Fig. 2. Superconducting magnet of Nb_3Sn .

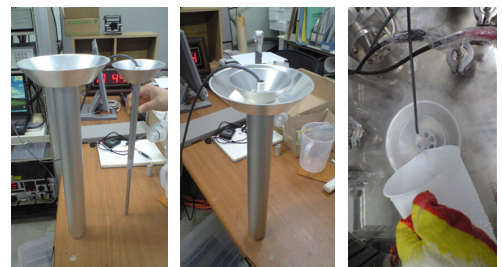


Fig. 3. Equipment of sample and sensor holder.

Fig. 2와 Fig. 3은 본 실험의 자기장 인가를 위해 사용한 Nb₃Sn 초전도 자석의 측면(좌)과 상부(우), 또한 시편의 측정 지그 사진이다. 초전도 자석 장치 내부의 중심 자장 위치인 상은 보어의 중심부에 자기장 측정 센서(Lake shore 460 3-channel Gauss meter)와 시편을 Fig. 3의 고정 장치를 이용하여 위치시켰다. 시편은 자기장 중심에 위치시켰으며 trapped field는 시편의 상부 표면으로부터 13 mm 떨어진 거리에서 측정하였다. 먼저 시편의 최대 trapped field 값을 찾아 내기 위해 4.5 kG에서 10 kG까지 인가 자기장을 점차적으로 증가시켜 측정하였다. trapped field가 saturation 되는 인가 자장 값을 기준하여 이 때의 인가 자기장 값을 100%라 했을 시 이 값의 60 %, 80 %, 100 %, 120 %의 인가 자기장에 따른 trapped field를 측정하였다. 또한 각 측정 시 외부 자장을 제거하는 순간으로부터 3분이 지난 시점에서 매 1분씩 5분 동안 감소하는 자기장을 측정하였다.

III. Result and discussion

먼저 일차적으로 시편 가공 전, 후 물리적인 손상 여부를 파악하기 위하여 초전도 자석이 아닌 영구자석을 이용하여 시편의 상태를 점검하고자 하였다.

Fig. 4는 0.3 T의 자기장을 가진 영구자석을 이용하여 측정한 각 시편의 2차원과 3차원 형태의 trapped field 분포이다.

홀을 가공하지 않은 A 시편은 seed 부분인 가운데 부분에서 가장 높은 자기장을 보여주고 있다. 반면에 홀을 가공한 시편 B와 가공한 홀에 resin을 채운 C 시편은 중앙 부분에 홀을 가공함으로써 정 중앙 부위에서 자기장 세기 부분적으로 줄어드는 양상을 보였다. 중심부에 가까운 부분의 자기장 세기와 전체적인 분포를 보았을 때 시편 전체에 걸친 굴곡이나 입계면은 확인 할 수 없어 가공 시 물리적 손상은 크게 받지 않은 것으로 판단하였다.

Fig. 5는 field cooling 조건에서 실험한 인가 자장에 따른 trapped field 측정 결과이다. 홀을 가공하지 않은 시편의 표면 상부에서 수직으로 13 mm 떨어진 거리에서 시편의 maximum trapped field 값을 찾아내기 위해 4.5 kG를 시작

으로 10 kG까지 0.5 kG씩 자기장을 점차적으로 증가시켰다. Fig. 5의 측정치를 고려 시 7.5 kG의 인가 자장에서 trapped field 값이 saturation 되는 것을 확인 할 수 있었다.

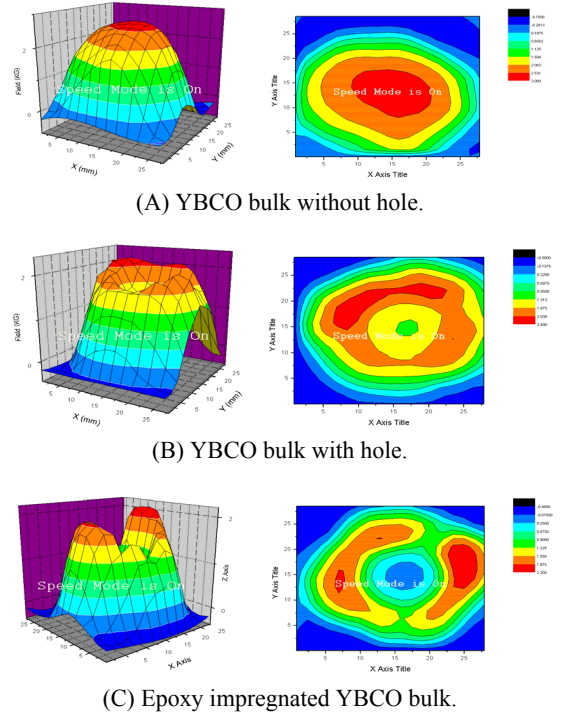


Fig. 4. 3, 2-dimensional field mapping profile of YBCO bulk.

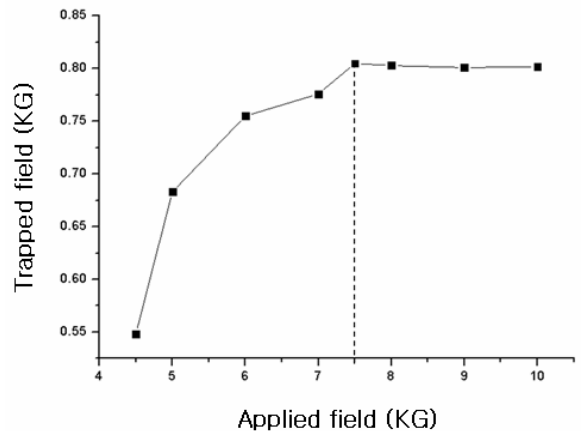


Fig. 5. Saturation value of applied field at maximum trapped field.

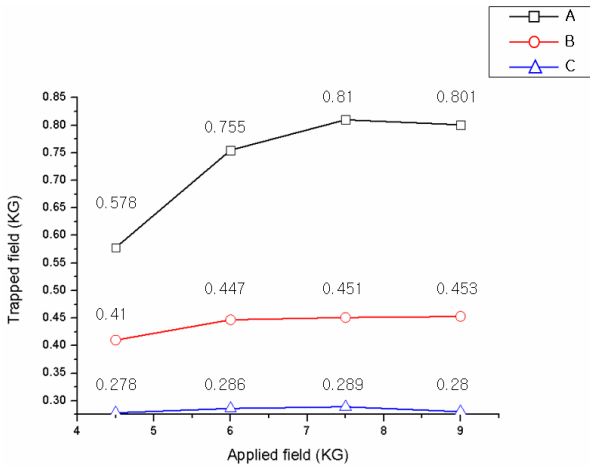


Fig. 6. Trapped field of YBCO sample in terms of applied magnetic field.

Fig. 6은 maximum trapped field, 7.5 kG를 100 % 기준하였을 시 이 값의 60 %, 80 %, 100 %, 120 %의 인가 자장에서 각 시편의 trapped field 값을 보여주고 있다. 인가 자장이 증가함에 따라 A시편은 0.578 kG에서 0.81 kG로 증가폭이 0.232 kG로 가장 크며 B시편은 0.41 kG에서 0.453 kG로 증가폭이 0.043 kG이다. C시편은 0.278 kG에서 0.289 kG로 0.011 kG의 증가폭을 가져 가장 낮은 자장 값이 측정되었다. 홀이 없는 A와의 차이를 제외하고 홀을 가공한 B, C 시편에서의 미미한 차이는 resin이 경화되는 과정 혹은 주입하는 과정에서 시편과 작용한 응력에 의해 물리적 손상을 입어 자기적 특성이 일부 저하 된 것으로 판단되며 B, C 시편에 비해 홀을 가공하지 않은 A시편의 maximum trapped field 값은 두 배 이상의 차이를 보였다.

Fig. 7은 외부 자장을 제거 후 3분이 지난 시점의 trapped field 값을 100 % 기준 시 5분 후 시편의 trapped field 값(외부 자장 제거 후 총 8분)을 백분율로 나타낸 결과이다. 4.5 kG의 인가 자장에서 시편 A: 98.78 %, 시편 B: 97.8%, 시편 C: 97.84%에 비해 9 kG의 인가 자장에서는 시편 A: 97.62 %, 시편 B: 97.57%, 시편 C: 96.78%로 감소하였고 나머지 6 kG, 7.5 kG, 9 kG의 조건에서도 인가 자장값이 클수록 자장 손실값이 더 큰 경향을 보였다. 이는 maximum trapped field인 한계치에서 훨씬 큰 자장 감쇄가 나타나는 것을 보여주었다.

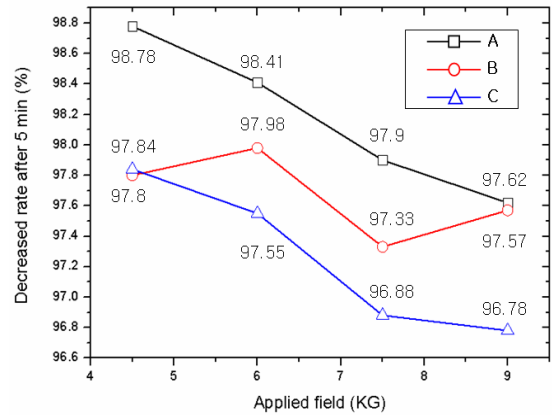


Fig. 7. Decrement rate of trapped field after 5 minute.

IV. Conclusion

홀 가공 전과 후 그리고 홀을 resin으로 채운 세 가지의 시편의 trapped field 특성을 측정할 결과 홀을 가공하지 않은 시편이 인가 자장에 따른 증가폭이 0.232 kG로 가장 컸다. 반면 홀을 가공한 시편에서는 증가폭이 0.043 kG 이었으며, 에폭시를 채운 시편에서는 증가폭이 0.011 kG로 가장 낮았다. 외부 인가 자기장을 제거 한 후 5분 동안 시간을 유지 시에도 홀을 가공하지 않은 시편의 trapped field 값은 98.78 %, 98.41 %, 97.9 %, 97.62 %로 가장 좋았으며 다음으로 홀을 가공한 시편이 97.8 %, 97.98 %, 97.33 %, 97.57 %이고, 홀에 에폭시를 채운 시편은 97.84 %, 97.55 %, 96.88 %, 96.78 %로 세 개의 시편 중 가장 낮은 자장 유지 비율을 보였다. 에폭시가 non-magnetic 물질임에도 홀만 가공한 시편 보다 특성 저하를 일으킨 것은 에폭시 물질이 경화 될 때 발생한 응력이 시편에 미소한 물리적 손상을 야기했거나 주입하는 과정에서 손상을 입히게 되어 시편의 trapped field 특성을 저하 시킨 것으로 판단된다.

Acknowledgments

본 연구는 2008년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.

References

- [1] M. Murakami, N. Sakai, T. Higuchi, S.I. Yoo, "Melt-processed light rare earth element-Ba-Cu-O", *Supercond. Sci. Technol.*, 9, 1015(1996).
- [2] H. Fujimoto, M. Murakami, S. Goto, N. Koshizuka, S. Tanaka, "Melt processing of YBaCuO oxide superconductors", *Advances in Superconductivity*, 2, 285(1990).
- [3] Y. Ren, R. Weinstein, J. Liu, R.P. Sawh, C. Foster, "Damage caused by magnetic pressure at high trapped field in quasi-permanent magnets composed of melt-textured Y-Ba-Cu-O superconductor", *Physica C*, 251, 15(1995).
- [4] M. Tomita, M. Murakami, K. Katagiri, "Reliability of mechanical properties for bulk superconductors with resin impregnation" *Physica C*, 378-381, 783-787 (2002).
- [5] M. Tomita, M. Murakami, "Effect of resin layer on the thermal stress of bulk superconductors", *Physica C*, 392-396, 493-498 (2003).
- [6] M. Tomita, M. Murakami, "High-temperature superconductor bulk magnets that can trap magnetic fields of over 17 tesla at 29 K", *Nature*, 421, 517-520 (2003).
- [7] M. Murakami, M. Morita, K. Doi, K. Miyamoto, "A New Process with the Promise of High J_c in Oxide Superconductor", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 28, 1189-1194 (1989).
- [8] G. E. Jang, W. S. Oh, C. J. Kim, Y. H. Han, S. Y. Jung and T. H. Sung, "The effect of impregnation by resin and CNT compound on the mechanical and magnetic properties of YBCO superconductor", *Physica C*, 468, 1411-1414 (2008).