

The Trapped Field Decay of YBCO Superconductor Composite with Times

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

^a Department of Advanced Materials Engineering Chungbuk National University,
Cheongju 361-763, Korea

^b Korea Atomic Energy Research Institute Superconductor Laboratory,
Daejeon 305-353, Korea

^c Superconductivity Lab., Korea Electrotechnology Research institute,
Changwon 642-120, Korea

^d Transmission and Distribution Lab., Korea Electric Power Research Institute,
Daejeon305-380, Korea

(Received 1 March 2011 revised or reviewed 18 March 2011 accepted 21 March 2011)

시간 경과에 따른 YBCO 초전도 복합체의 포획 자기장 감쇄

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

Abstract

We studied the trapped field properties of bulk Y-Ba-Cu-O superconductors by applying 3 T of the permanent or Nb₃Ti superconducting magnet. The 28 mm circular type of YBCO bulk superconductor was prepared and then hole at the center of bulk, parallel to the c-axis, was mechanically drilled. Typical size of hole in YBCO bulk was 10 mm in diameter. In order to examine the trapped field variation in terms of different impregnated materials, a hole in YBCO bulk was filled with resin and indium respectively. The trapped field decay due to flux flow was determined in terms of time. Our preliminary result indicates the trapped field value measured on the YBCO without hole after 30 minute by applying 3 T, was 6,500 G, which is much higher than that, 4,500 G, measured on YBCO with hole. Also, we confirmed that the tendency of a trapped field decrement with time was almost the same regardless of the impregnated materials in YBCO.

Keywords : YBCO, bulk, trapped field, artificial hole, impregnation, superconducting magnet.

I. Introduction

* Corresponding authors. Fax : +82 43 261 2412
e-mail : gejang@chungbuk.ac.kr

근래 Top-seeded melt growth (TSMG) 제조 공

법의 발전으로 인해 RE-Ba-Cu-O (RE: rare earth elements) 초전도체의 단결정 크기와 임계전류밀도 값은 크게 향상되었다 [1, 2]. 따라서 magnetic bearing, flywheel energy storage system, fault current lead, trapped-field magnets 등의 전류기기에 고자기장에서 고전류 통전 능력을 지닌 고온 초전도체를 이용한 많은 응용 연구 사례가 보고되고 있다 [3, 4].

전력기기에 응용될 bulk형 초전도체는 두 개의 중요한 재료적 특성을 지녀야 한다. 하나는 levitation force로서 외부에 대한 적절한 기계적 반발력이 필요하며, 다른 하나는 포획 자장으로서 maximum field를 결정하는 요소이다 [5].

그러나 이러한 bulk형 초전도체의 특성은 초전도체의 물리적인 특성으로 인해 많은 제약을 받고 있다. bulk형 초전도체는 pseudo-single crystal 형태의 취성을 가진 세라믹으로, melting process시 결정성장 온도로부터 생각할 때 균열이 생겨 결정성장이 완료된 초전도체 내에 균열을 포함할 가능성이 있다.

따라서 큰 전자기력이나 열응력에 버틸 수 있는 초전도체의 물리적인 특성을 확립하는 것이 중요시 되고 있다 [6]. 최근에 이러한 특성을 보완하기 위하여 YBCO의 crack이나 void에 레진, Ag등을 보강하여 자기적 및 기계적 특성을 향상시킨 연구사례들이 발표되고 있다 [7-11].

본 연구에서는 원통형의 YBCO 초전도체 중앙에 c축 방향의 인위적인 홀을 가공한 후, 홀에 레진과 인듐을 주입하였다. 이후 홀 가공 전과 후 그리고 레진과 인듐을 보강한 벌크 복합체에 외부 자기장을 인가 한 후 각 시편의 보강 조건에 따른 포획 자장을 측정, 홀이나 보강재에 따른 영향을 비교, 분석하고자 하였다. 또한 동일한 시편에 대하여 Nb₃Ti 저온 초전도 자석을 이용하여 인가된 외부 자기장을 제거 하여 시간에 따른 포획 자장 변화를 조사하였다.

II. Experiment

Top-seeded melt growth (TSMG)법으로 Y_{1.5}Ba₂Cu₃O_{7-y} (YBCO) 초전체를 제조하였다. 제조한 YBCO 시편 중 일부에 mechanical drilling

을 하여 c축 방향에 10 mm의 직경의 홀을 가공하였다 또한 가공한 홀에 에폭시와 인듐을 각각 주입하였다. Fig. 1은 TSMG 법에 의해 제조된 YBCO, 그리고 중앙에 홀이 가공된 YBCO, 또한 홀에 에폭시와 인듐이 채워진 각각의 시편을 보여주고 있다. 또한 보강재의 일반적인 공정을 Table 1에 나타내었다.

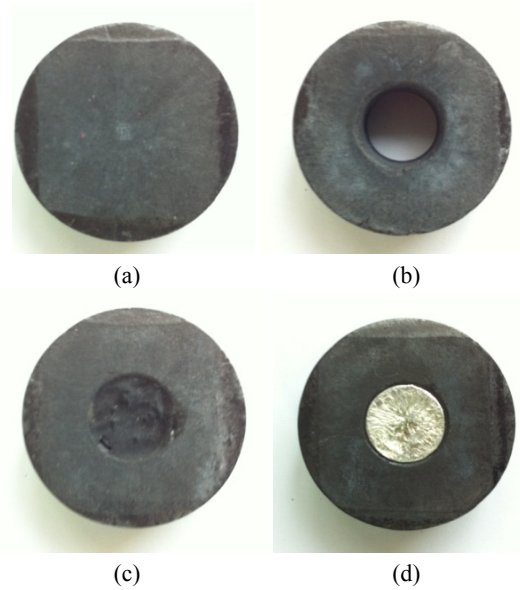


Fig. 1. The preparation of YBCO bulk; (A) without hole, (B) with hole, (C) impregnated by epoxy resin at the hole, and (d) impregnated by indium at the hole.

Table 1. Typical specification of YBCO bulk.

	diameter and thickness	inner hole size	impregnated material
(a)	28 X 10 mm	•	•
(b)		10 mm	•
(c)		10 mm	resin : STYCAST hardening time – 12 hr
(d)		10 mm	indium : purity 99.99 % grains 3-6 mm

이후 3 kG의 영구자석과 Nb₃Ti 초전도 자석 등 각기 다른 자석을 이용하여 시편 상부나 시편 중앙에 인가 자장의 중심부를 위치시키고 액체질소로 냉각한 후 인가한 자기장을 제거하는 FC(field cooling) 방식을 이용, 시편의 포획 자기장 결과치를 비교하였다. 특히 홀 가공 전과 후 또한 홀 가공으로 인한 잠재적 macro-crack 등에 따른 자기적 변화를 확인하고자 하였다.

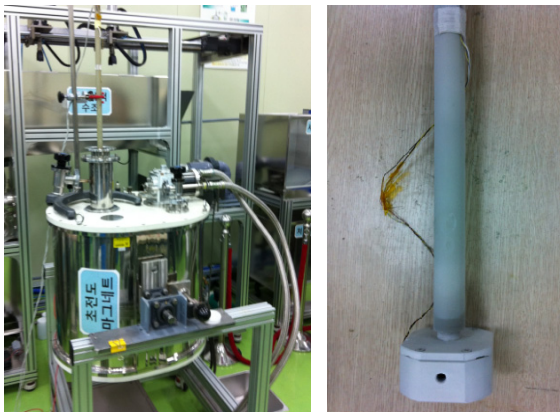


Fig. 2. Nb₃Ti superconducting magnet and sample holder.

Fig. 2는 본 실험의 자기장 인가를 위해 사용한 Nb₃Ti 초전도 자석(좌)과 초전도 자석 내부에 들어가 시편과 홀 센서를 고정할 수 있는 장치(우) 사진이다. 100 mm의 직경을 가진 초전도 자석 보어 내부의 중심 자장 위치에 자기장 측정 센서(Gauss meter)와 시편 고정 장치를 놓았다. 시편은 보어 내 자기장 중심에 위치하였고, 포획 자장값은 센서가 시편의 상부 표면과 밀착하게 만들어 측정하였다. 초전도 자석으로 특정한 외부 자장을 인가하여 hall sensor가 부착된 시편에 액체질소를 주입해 냉각한 후에 초전도자석의 외부 인가 자장을 제거 한 후 시편의 포획 자장값을 측정하였다. 먼저 3 kG의 자장을 인가하여 모든 시편의 중앙부위의 포획 자장값을 측정하여 영구자석에서 측정한 값과 비교하였다. 또한 모든 시편에 3 T의 자장을 인가하여 각 측정 시 외부 자장이 완전히 제거되는 순간부터 30분 동안 1분 간격으로 각 초전도체 시편의 감소하는 포획 자기장을 측정하였다.

III. Result and discussion

Fig. 3과 4는 4개 초전도시편에 인위적인 홀을 가공하기 전과 후 포획 자기장 분포를 2, 3차원의 공간으로 표현한 도표이다. 먼저 각 시편에 3 kG의 세기의 영구자석으로 FC 과정을 거친 시편 표면에 hall sensor를 부착하여 자기장 변화를 측정하였다. 그림에서와 같이 4개의 시편 모두 중심 자장에서 둥근 원형으로 중심부가 높은 형태의 자장 분포를 보이고, 단결정으로 형성되어 있음을 알 수 있다. 각 시편 중앙 부위의 최대 포획 자장의 크기는 (a) 2,771 G, (b) 2,752 G, (c) 2,765 G, (d) 2,757 G로 시편을 가공하기 전에는 대략 2,760 G 정도의 높은 포획 자장값을 보였다.

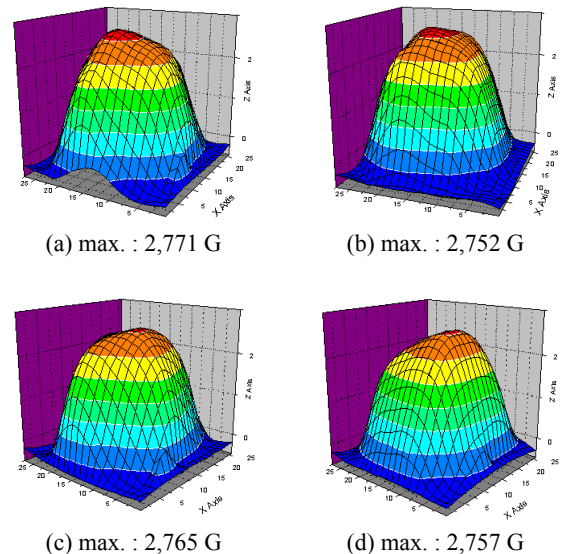


Fig. 3. 3-dimensional field mapping profile of YBCO bulks before drilling the hole.

Fig. 5과 6은 홀을 가공 한 이후, 각 시편의 포획 자기장 분포이다.

4개의 초전도 시편 중 (b), (c), (d) 3개의 시편 중앙에 10 mm 직경의 인위적인 홀을 만들고 이 중 2개의 시편 (c), (d)은 레진과 인듐을 채워 포획 자장을 측정하였다. 홀을 가공한 시편과 홀에 레진과 인듐을 채운 시편 모두 가공하기 전과 비교하였을 시 중심부의 자장이 감소한 것을 볼 수 있었다. 이는 가공한 시편 중심

부 초전도체 물질의 부피가 줄어들어 자기적 특성이 저하된 것으로 판단된다. 또한 분포 곡선의 면과 폭이 일부 일그러지거나 변형되어 이는 홀 가공 시 mechanical drilling으로 인한 영향으로 판단된다.

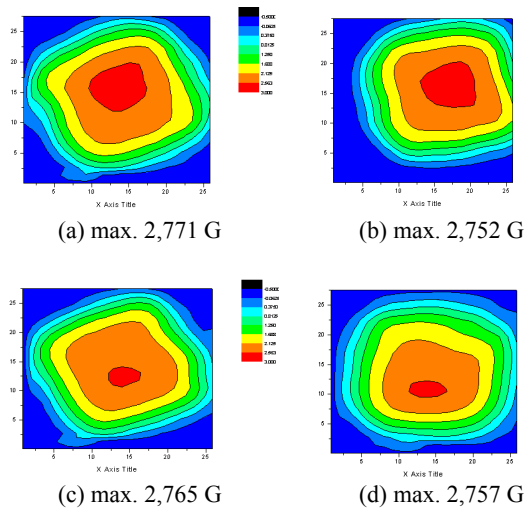


Fig. 4. 2-dimensional field mapping profile of YBCO bulks before drilling the hole.

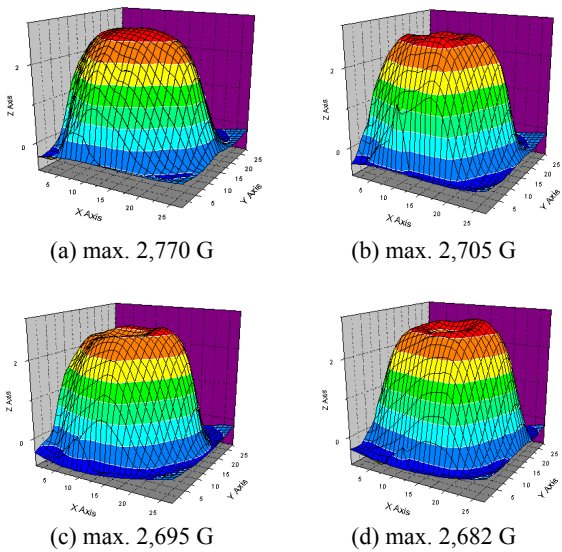


Fig. 5. 3-dimensional field mapping profile of YBCO bulks; (a) without hole, (b) with hole, (c) impregnated by epoxy resin at the hole, and (d) impregnated by indium at the hole.

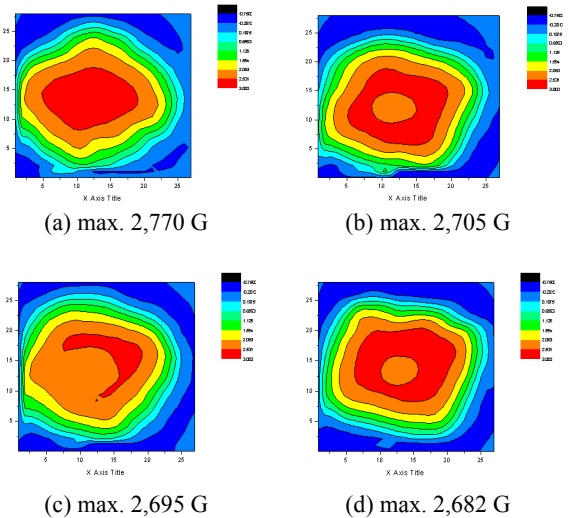


Fig. 6. 2-dimensional field mapping profile of YBCO bulks; (a) without hole, (b) with hole, (c) impregnated by epoxy resin at the hole, and (d) impregnated by indium at the hole.

Fig. 7은 Nb₃Ti 초전도 자석으로 3 kG의 자장을 인가하여 얻은 각 시편의 포획 자장 값을 영구자석 실험결과와 비교한 그래프이다. 영구자석을 착자하여 얻은 포획 자장 값은 홀을 가공하지 않은 시편이 2,770 G, 홀을 가공한 시편은 2,705 G, 가공한 홀에 에폭시를 채운 시편은 2,695 G, 가공한 홀에 인듐을 채운 시편은 2,682 G으로 각기 측정되었다. Nb₃Ti 초전도 자석으로 자기장을 인가 후 측정된 포획 자장 값은 홀을 가공하지 않은 (a) 시편이 2,689 G로 가장 높고 나머지 (b), (c), (d) 시편은 각각 2,480, 2,492, 2,479 G로 (a) 시편보다 낮게 나타났다. 영구자석과 Nb₃Ti 초전도자석에 의한 측정 결과 차이는 자석이 위치한 부위와 측정 위치에 따라 약간씩 달리 나타난 것으로 판단되었다. 즉 Nb₃Ti 초전도 자석을 이용하였을 시에는 시편 중앙의 홀과 상부 표면이 맞닿은 부분에 hall sensor가 위치하였으나 영구자석을 이용하였을 시에는 초전도 벌크 위 직접적으로 바로 맞닿는 부위에 프로브가 위치하였다. 하지만 중심인 홀에서 자장 값은 다소 차이가 있었으나 포획 자장 값의 변화 추이는 비슷하였다. 홀이 가공된 (b) 시편의 경우 영구자석을 이용하여 포획자장을 측정 시 홀 부위를 제외한 초전도체 표면에 프로브가 직접 접하였기

때문에 포획자기장은 홀이 없는 (a) 시편과 65 G의 차이로 다소 낮은 포획자장 값의 차이가 발생하였다. 반면 초전도자석으로 자기장을 인가 한 경우에는 가공한 홀의 중심부위 바로 위에 프로브가 위치하여 초전도체가 아닌 홀 중앙에서 포획자기장이 측정되었다. 그 결과 홀이 없는 (a) 시편에 비해 홀을 가공한 (b) 시편은 약 209 G의 차이로 영구자석을 이용한 (a)와 (b)시편간의 포획자장 값보다 편차가 더 높게 나타난 것으로 판단되었다.

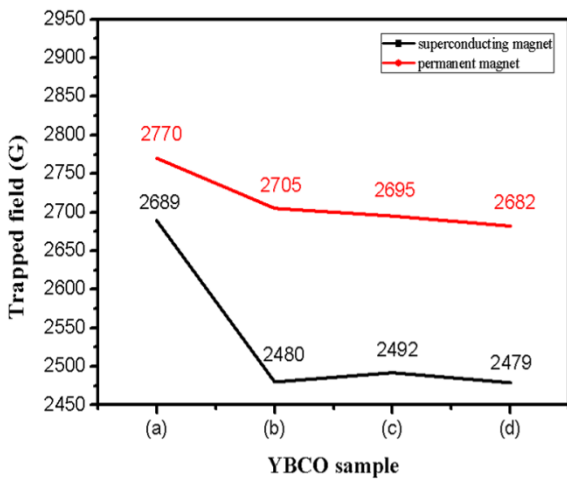


Fig. 7. Trapped field measured by permanent magnet and Nb_3Ti superconducting magnet at 3 kG.

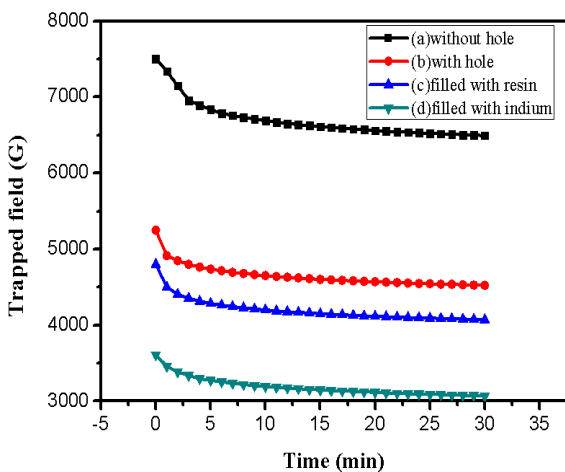


Fig. 8. Trapped field measured by Nb_3Ti superconducting magnet under 3 T as a function of time.

Fig. 8은 Nb_3Ti 초전도 자석으로 3 T의 외부 자기장을 인가 후 각 시편의 최대포획자장을 측정하였다. 시편이 완전히 냉각 된 후 외부 자기장을 제거하여 30분 동안 1분 간격으로 각 시편의 포획 자장을 측정한 결과이다. 홀을 가공하지 않은 (a) 시편은 인가 자장을 제거 하였을 시 7,500 G에서 약 3분 동안 급격히 감소하였고 30분 동안 조금씩 감소하여 30분이 경과하였을 시 6,500 G의 포획 자장값을 보였다. 홀을 가공하지 않은 (a) 시편의 경우 나머지 (b), (c), (d) 시편에 비해 높은 포획 자장 값을 보여주고 있다. 이는 홀을 가공하게 되면서 시편 중앙의 부피가 줄어들어 홀을 가공한 시편의 특성이 저하된 것으로 판단된다. (b), (c), (d) 시편은 약 2분 동안 자장의 세기가 급격히 감소한 반면 홀을 가공한 (b) 시편의 경우 약 5,200 G에서 감소하기 시작하여 4,500 G까지 감소하였으며, 홀에 레진을 채운 (c) 시편은 약 4,800 G에서 시작하여 4,000 G로 감소하였다. 홀에 인듐을 채운 (d) 시편은 약 3,600 G에서 감소하여 3,000 G로 가장 낮은 포획 자장 값을 얻을 수 있었다. YBCO 초전도체에 보강 물질을 채우지 않은 (b) 시편의 경우 30분 후의 자장 세기값은 4,500 G로 나머지 (c), (d) 시편의 결과값보다 높았고, 보강 물질을 채운 (c), (d) 시편의 경우 레진을 채웠을 시 4,000 G로 인듐을 채운 시편의 3,000 G 보다 더 높은 포획 자기장 값을 가지는 것을 알 수 있었다. 위의 결과로 YBCO 초전도체에 홀을 가공하게 되면 초전도체의 부피가 줄어들게 되어 특성이 저하되는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 고분자 재료인 레진이 금속 재료인 인듐 보다 초전도체의 자기적 특성에 좀 더 작은 영향을 미치는 것으로 조사되었다.

IV. Conclusion

Bulk형 YBCO 초전도체에 인위적으로 홀을 가공하거나 보강제로 채워 그에 따른 자기적 특성의 변화를 조사하였다. 홀을 가공하지 않은 (a) 시편의 경우 홀을 가공한 (b), (c), (d) 시편보다 높은 포획 자기장 값을 보여주었고, 2, 3-차원의 포획 자장 분포도에서도 (a) 시편이

seed 부분의 중심자장이 높은 형태로, 좋은 분포를 나타내었다. Nb₃Ti 초전도 자석을 이용하여 외부 자기장을 인가 한 후, 시편이 완전히 냉각 된 다음 인가 자기장을 제거하고 30분 동안 측정된 시편의 포획 자장 값을 보면, 홀을 가공하지 않은 (a) 시편은 6,500 G, 홀을 가공한 (b) 시편은 4,500 G, 홀에 레진을 채운 (c) 시편은 4,000 G, 홀에 인듐을 채운 (d) 시편은 3,000 G로 감소하였다. 홀을 가공하게 되면, 영구자석과 Nb₃Ti 초전도 자석을 이용한 포획 자장 실험에서 모두 홀을 가공하기 전보다 특성이 떨어지는 것을 확인하였는데 이는 홀을 가공함으로써 초전도체의 부피가 줄어들어 자장 값이 감소한 것으로 판단된다. 그리고 홀을 가공한 (b), (c), (d) 시편 중에서 보강 물질이 없는 (b) 시편이 4,500 G로 (c), (d) 시편보다 더 높은 자기적 성질을 보여주었다. 또한 보강 물질을 채운 (c), (d) 시편 중에서는 금속물질인 인듐을 채웠을 시 고분자물질인 레진을 채운 경우보다 1,000 G 정도 낮은 포획 자기장 값을 보여주었다. 초전도 복합체에서 보강 물질을 채울 시 고분자 재료인 레진이 금속 재료인 인듐보다 초전도체의 자기적 특성에 좀 더 작은 영향을 미치는 것으로 조사되었다. 영구자석과 Nb₃Ti 초전도자석에 의한 포획자장 결과는 측정 부위에 따라 약간 다르게 나타났다. 영구자석의 경우 hall sensor 위치가 초전도체 표면 바로 위에 위치 하여 포획 자장 값이 높게 나타난 반면 초전도 자석을 이용, 외부 자장을 인가한 경우에는 hall sensor가 시편 상부의 홀 정 중앙에 위치하였기 때문에 후자의 경우에는 포획 자기장 값이 낮게 나타났다. 하지만 각 시편의 시간에 따른 포획 자장 값의 감쇄 폭은 모두 유사하게 나타났다.

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. Ikuta, A. Mase, Y. Yanagi, M. Yoshikawa, Y. Itoh, T. Oka, U. Mizutani, "Melt-processed Sm-Ba-Cu-O superconductors trapping strong magnetic field", Supercond. Sci. Technol. 11 (1998) 1345.
- [3] D. Cardwell, "Processing and properties of large grain (RE)BCO", Mater. Sci. Eng. B 53 (1998) 1-10.
- [4] U. Mizutani, H. Ikuta, T. Hosokawa, H. Ishihara, K. Tazoe, T. Oka, Y. Itoh, Y. Yanagi, M. Yoshikawa, "Applications of superconducting permanent magnets driven by static and pulsed field", Supercond. Sci. Technol. 13 (2000) 836-840.
- [5] J. Hull, "Superconducting bearings", Supercond. Sci. Technol. 13 (2000) R1.
- [6] 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).
- [7] M. Tomita, M. Murakami, K. Katagiri, "Reliability of mechanical properties for bulk superconductors with resin impregnation", Physica C, 378-381, 783-787 (2002).
- [8] M. Tomita, M. Murakami, "Effect of resin layer on the thermal stress of bulk superconductors", Physica C, 392-396, 493-498 (2003).
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] 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).