

공정변수에 따른 초전도 튜브의 전기적 특성

Electrical Characteristics of HTS Tube Depending on Processing Parameters

박치완¹, 장건익^{1,a}, 하동우², 성태현³

(Chi Wan Park¹, Gun Eik Jang^{1,a}, Dong Woo Ha², and Tae Hyun Seung³)

Abstract

High-temperature Superconductor(HTS) tubes were fabricated in term of different processing variables such as preheating temperature, speed of mold rotation and cooling rate by centrifugal forming method. For powder melting by induction the optimum range of melting temperatures and preheating temperature were 1050 °C~1100 °C and 550 °C for 30 min, respectively. The mould roating speed was 1000 rpm. A tube was annealed at 840 °C for 72 hours in oxygen atmosphere. The plate-like grains were well developed along the roating direction and typical grain size was about more than 40 μm. It was found that Ic values increased with increasing the preheating temperature and speed of mold rotation. While Ic decreased with increasing the cooling rate. The measured Ic in 50 mm×70 mm×2.5 mm tube was about 896 Amp.

Key Words : Preheating temperature, Speed of mold rotation, Cooling rate, Ic

1. 서 론

전력 기기에서 가장 유망 있는 HTS의 응용 분야중 하나는 유도형 및 저항형 초전도 한류기(SCFCL)로 전 세계적으로 많은 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 초전도 한류기(SCFCL)는 고장전류 발생시 선로에 상전이로 인한 임피던스를 투입하여 전류를 제한하는 것으로, 적용범위 및 방식에 따라 선재, 박막, 튜브형태의 벌크재료가 사용되고 있다. 고온초전도체가 전력분야에 응용되기 위해서는 낮은 Jc 문제를 해결해야 하므로 C-축 입자배열을 비교적 쉽게 얻을 수 있는 BSCCO계 위주로 연구가 진행되고 있다[1-3]. Vladimir Plechacek 등은 CIP(Cold Isostatic Press)로 내경 6.4 mm 두

께 1.6 mm 길이 29.4 mm의 Bi-2223 튜브를 제조하여 77 K에서 1200 A/cm²의 Jc를 얻었다. 또한 시편의 두께가 얇아수록 높은 배향성의 미세구조와 Jc를 나타낸다고 보고하였다[4]. J. Bock 등은 BSCCO 고온초전도 튜브를 MCP(Melt Casting Process)법으로 제조하여 시편의 크기에 따라 600~4000 A/cm²(77 K, B=0T)의 Jc를 얻었다[5]. 위 결과는 일반적인 소결방법으로 얻어진 시편보다 높은 Jc를 나타내고 있으며 현재까지 벌크를 이용한 공정 중에서 경제성 면에서나 특성 면에서 가장 재현성이 높다고 평가되고 있다. 특히 임의의 크기나 두께 조절이 용이하고 제조가 용이하여 다양한 형태의 초전도체 제조가 가능하다고 보고되고 있다.

본 연구에서는 MCP법을 응용한 원심성형로를 자체 설계 제작하여 Bi2212 초전도 튜브를 제조하고 물드의 예열온도 및 회전속도, 냉각속도의 변화에 따른 초전도 튜브의 전기적 특성을 평가하고자 하였다. 또한 XRD와 SEM, EDS를 통하여 시편의 미세구조와 상분석을 하였다.

1. 충북대학교 재료공학과

(충북 청주시 흥덕구 개신동 산 48)

2. 한국전기연구원 고온 초전도팀

3. 한국전력공사 전력연구원

a. Corresponding Author : gejang@chungbuk.ac.kr

접수일자 : 2005. 2. 28

심사완료 : 2005. 4. 1

2. 실험

본 실험의 전반적인 공정은 그림 1에 나타내었다. $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{Sr}_2\text{OCa}_{1.0}\text{Cu}_2\text{O}$, 분말에 SrSO_4 를 첨가하여 고주파 유도로를 이용 $1,050\text{ }^\circ\text{C}$ 까지 가열하여 용융시킨후 원심성형법으로 초전도 튜브를 제조하였다. 제조된 튜브는 $840\text{ }^\circ\text{C}$ 의 산소분위에서 72시간 열처리 시켜 주었다. 그림 2는 열처리 과정을 나타낸 표이다.

튜브는 직경 30 mm, 길이 60 mm, 두께 4.8 mm 크기의 튜브형태로 제조 하였으며, 몰드의 예열온도와 회전속도, 냉각속도등의 공정변수를 제어하였다. 제조된 튜브는 T_c , I_c 값을 측정, 비교하였

Powder preparation 1. Bi : Sr : Ca : Cu = 2.0 : 2.0 : 1.0 : 2.0 2. Bi2212 + 0, 5, 7, 10, 15 % SrSO_4 addition
Powder melting by HF induction ($1,050\text{ }^\circ\text{C}$)
Mold preheating & rotating ($500\text{ }^\circ\text{C}$ for 30 min , 1,000 rpm)
Melt charging into mold
Solidification
Separation from mold
Heat treatment (100 % O_2 , $840\text{ }^\circ\text{C}$ for 72 hrs)
Levitation test
Electrical property measurement
Microstructure and Phase analysis : XRD, SEM, EDS

그림 1. 실험 공정도.

Fig. 1. Process abridged general view.

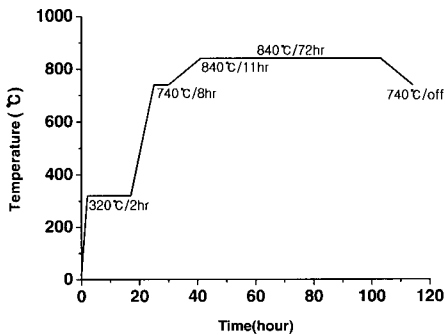


그림 2. 초전도 튜브의 열처리 과정.

Fig. 2. Heat treatment history.

으며 SEM, XRD, EDS를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 3은 제조된 초전도 튜브의 다양한 사진이다.

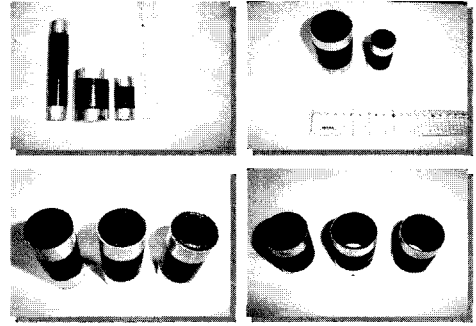
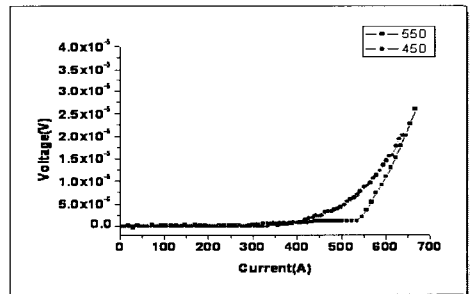


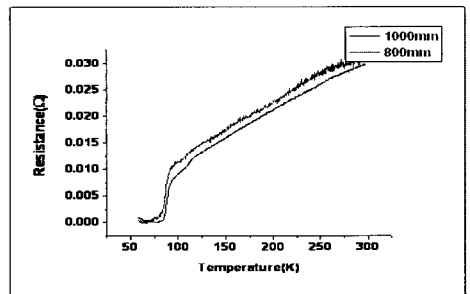
그림 3. 다양한 형태로 제조된 초전도 튜브.

Fig. 3. Manufactured superconductor tube.

그림 4는 몰드의 예열온도에 따른 전기적 특성을 나타낸 그림이다.



(a) I_c 값



(b) T_c 값

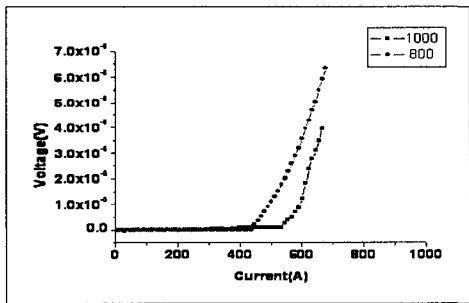
그림 4. 몰드의 예열온도에 따른 전기적 특성.

Fig. 4. Electronic characteristic by diameter pre-heating temperature of mold.

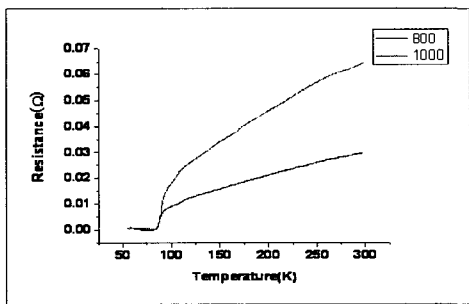
몰드의 예열온도를 450 ℃와 550 ℃로 변화하여 30 mm×60 mm×4.8 mm의 튜브를 제조하였다. 몰드를 450 ℃로 예열하였을때의 제조된 튜브의 전기적 특성은 $I_c=414(A)$, $T_c=78(K)$ 의 값을 나타내었으며, 550 ℃로 예열한 몰드에서 제조된 튜브의 전기적 특성은 $I_c=550(A)$, $T_c=84(K)$ 을 나타내었다. 몰드를 550 ℃에서 예열하여 제조된 튜브의 전기적 특성이 높은 값을 나타내었다.

다음은 몰드의 회전속도가 전기적 특성에 미치는 영향을 알아보고자, 몰드의 회전속도를 800 rpm과 1000 rpm으로 변화하여 30 mm×60 mm×4.8 mm의 튜브를 제조하였다. 이때 몰드는 550 ℃로 예열하였다. 그림 5는 몰드의 회전속도에 따른 전기적 특성을 나타낸 그림이다.

몰드를 800 rpm으로 회전하여 제조된 튜브의 전기적 특성은 $I_c=420(A)$, $T_c=84(K)$ 의 값을 나타내었으며, 1000 rpm으로 회전하여 제조된 튜브의 전기적 특성은 $I_c=550(A)$, $T_c=85(K)$ 의 값을 나타내었다. 몰드를 1000 rpm의 높은 회전속도에서 제조된 튜브의 전기적 특성이 높은 값을 나타내었다.



(a) I_c 값



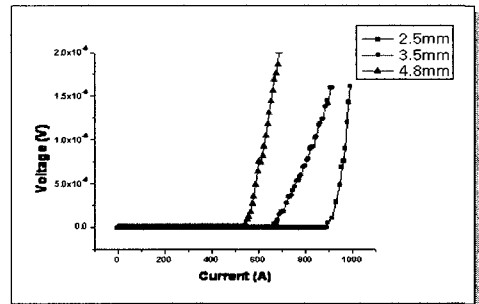
(b) T_c 값

그림 5. 몰드의 회전속도에 따른 전기적 특성.
Fig. 5. Electronic characteristic by speed of mold.

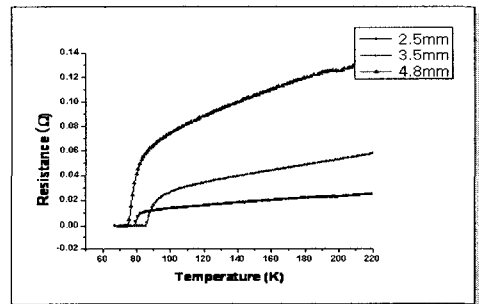
MCP법을 이용한 원심성형공정에서 몰드의 예열온도와 회전속도가 초전도 튜브의 전기적특성에 영향을 주며, 이는 튜브 제조시 초전도 튜브내의 미세구조나 초전도상의 형성에 영향을 미치는 것으로 사료된다.

다음은 튜브의 두께가 전기적 특성에 미치는 영향을 알아보고자 하였다. 그림 6은 튜브의 두께에 따른 전기적 특성을 나타낸 그림이다.

튜브는 예열온도 550 ℃, 회전속도 1000 rpm의 공정조건에서 제조하였으며, 직경 50 mm, 길이 70 mm, 두께 2.5 mm~4.8 mm의 형상으로 제조하였다. 그림 7에서 튜브의 전기적 특성은 두께가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다. 이때 두께 2.5 mm 튜브의 $I_c=896(A)$ 의 값을 나타내었다. 그림 8은 냉각속도에 따른 전기적 특성을 나타낸 그림이다.



(a) I_c 값



(b) T_c 값

그림 6. 튜브의 두께에 따른 전기적 특성.
Fig. 6. Electronic characteristic by thickness.

몰드의 예열온도 550 ℃, 몰드의 회전속도 1000 rpm의 조건에서 30 mm×60 mm와 50 mm×70 mm의 두가지 형상으로 튜브를 제조하고 열교환기를 사용하여 냉각속도를 빠르게 하였다. 30 mm

×60 mm 튜브의 전기적 특성은 Ic 값이 460(A)에서 550(A)로 증가하였으며, 50 mm×70 mm 튜브의 전기적 특성은 Ic 값이 480(A)에서 597(A)로 증가하였다. 튜브의 전기적 특성은 냉각속도를 빠르게 하였을 때 전기적 특성이 증가하였다. 이는 냉각속도가 초전도 튜브의 미세구조와 초전도상 형성에 영향을 미치는 것으로 보여진다.

그림 6에서 튜브의 두께가 증가할수록 Ic 값이 증가하리라 예상하였으나, 반대로 2.5 mm의 가장 얇게 제조된 튜브에서 가장 높은 Ic 값을 나타내었다. 이는 튜브의 두께가 증가할수록 상대적으로 낮은 냉각속도를 갖는 것으로 사료되며, 반대로 두께 2.5 mm로 제조된 튜브에서는 보다 빠른 냉각에 의해 높은 전기적 특성값을 나타낸 것으로 사료된다.

그림 8과 그림 9에는 50 mm×70 mm×2.5 mm의 형태로 제조된 초전도 튜브의 Ic 값과 SEM 사진을 나타내었으며, 그림 10과 그림 11에는 튜브 두께에 대해 바깥부, 중간부, 안쪽부의 3가지 영역에서 XRD와 EDS 결과를 나타내었다.

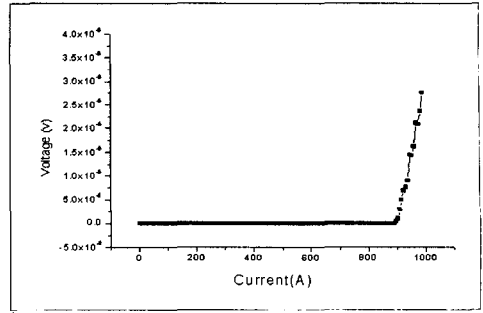


그림 8. 초전도 튜브의 Ic 값.
Fig. 8. Ic date of superconductor tube.

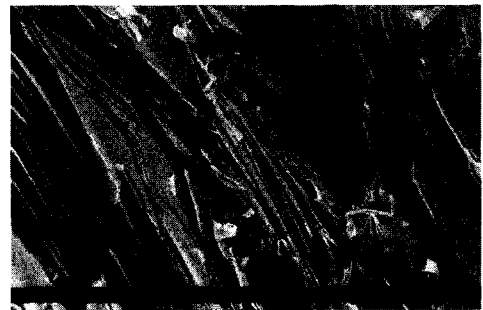
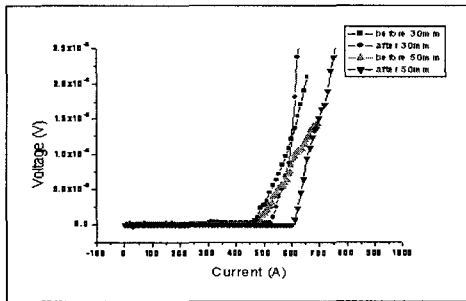
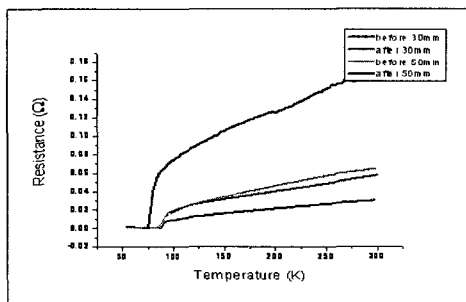


그림 9. 초전도 튜브의 SEM 사진.
Fig. 9. SEM date of superconductor tube.



(a) Ic 값



(b) Tc 값

그림 7. 냉각속도에 따른 전기적 특성.
Fig. 7. Electronic characteristic by cooling rate.

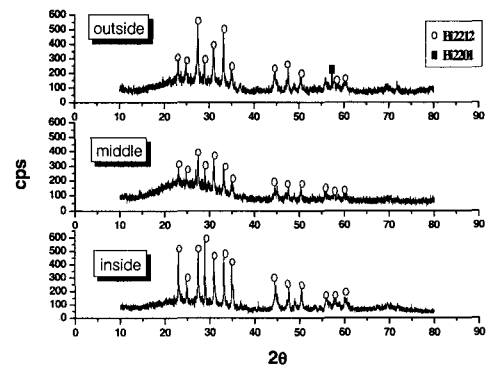


그림 10. 초전도 튜브의 XRD 분석.
Fig. 10. XRD date of superconductor tube.

튜브는 몰드의 예열온도 550 ℃, 몰드의 회전속도 1000 rpm의 조건에서 제조하였으며, 냉각시 열교환기를 사용하여 냉각속도를 빠르게 조절 하였

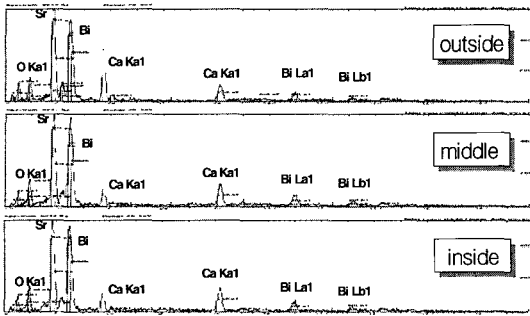


그림 11. 초전도 튜브의 EDS 분석.
Fig. 11. EDS date of superconductor tube.

다. 그림 8에서 전기적 특성은 $I_c=896(A)$ 의 값을 나타내었다. 그림 9의 SEM 사진에서 튜브는 전체적으로 일정한 방향성을 가지는 매우 잘 발달된 미세구조가 관찰되며, 그림 10와 그림 11의 영역별 XRD와 EDS 결과에서는 바깥부와 안쪽부 영역의 초전도상이 보다 잘 발달되어진 것으로 나타내었다. 이는 중간부 영역에 비해 상대적으로 빠른 바깥부와 안쪽부 영역의 냉각속도가 튜브내 미세구조에 영향을 미친 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 Bi2212 고온초전도 튜브를 몰드의 예열온도와 회전속도, 냉각속도등의 공정변수에 따른 전기적인 특성을 측정, 비교해 보고자 하였다.

- 1) SEM과 XRD 분석결과 튜브는 Bi2212 초전도상이 일정한 방향성을 가지며 매우 잘 발달된 것으로 나타내었다.
- 2) 전기적 특성은 높은 예열온도, 높은 회전속도, 빠른 냉각속도의 공정조건에서 제조된 튜브에서 높은 I_c 값을 나타내었다.

- 3) 튜브의 두께가 4.8 mm에서 2.5 mm로 감소할수록 전기적 특성은 증가하였으며, 50 mm×70 mm×2.5 mm의 튜브에서 전기적 특성은 $I_c=896(A)$, $T_c= 80(K)$ 의 값을 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] A. K. Ghosh and A. N. Basu, "The influence of synthesis conditions on $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$ superconductors", Supercond. Sci. Tech., Vol. 11, No. 9, p. 852, 1998.
- [2] X. Sun, W. Wu, L. Wang, G. Zhou, X.-G. Li, and Y. Zhang, "Superconductivity and structure of $Bi_2Sr_2CaCu_2O_y$ single crystals with various oxygen content", Physica C, Vol. 282-287, Part 2, p. 839, 1997.
- [3] T. G. Holesinger, D. J. Miller, L. S. Chu-mbley, "Melt processing of the $Bi_2Sr_2CaCu_2O_y$ superconductor in oxygen and argon atmospheres", IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol. 3, No. 1, p. 1178, 1993.
- [4] V. Plechac, J. Hejtmanek, and V. Sima, "The use of the Bi-2223 superconducting tubes", IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol. 7, No. 2, p. 703, 1997.
- [5] J. Bock, S. Gauss, A. Hobl, D. Krischel, M. Schillo, and P. Schafer, "HTc current leads in commercial magnet systems applying Bi 2212 MCP BSCCO material", IEEE Transactionctivity, Vol. 9, No. 2, p. 495, 1999.