

The study on characterization and fabrication of current limiting device using HTSC-thick film

고온초전도후막을 이용한 전류제한소자제작 및 특성연구

Sung-Hun Lim*, Hyeong-Gon Kang, Dong-Chul Chung, Ho-Ik Du, Byoung-Sung Han

임성훈*, 강형곤*, 정동철*, 두호익**, 한병성***

Chonbuk national Uni. electrical engineering in Korea

*Doctor degree course, **Master degree course, ***professor of electrical engineering

전북대학교 전기공학과

*박사과정, **석사과정, ***전기공학과 교수

Abstract - For the fabrication of fault current limiting device using HTSC thick film, $YBa_2Cu_3O_x$ superconducting thick film was formed by surface diffusion process of the Y_2BaCuO_5 and the mixed compound of $(3BaCuO_2+2CuO)$ expected to be liquid phase above the peritectic temperature of $YBa_2Cu_3O_x$. For the surface diffusion, the compounds of $3BaCuO_2+2CuO$ mixed with binder material was patterned on Y_2BaCuO_5 substrate by the screen printing method. After proper sintering, the characteristics of current limit on thick film fabricated was measured. The thick film was able to limit the current from 2.8213 mA_{rms} to 4.2034 mA_{rms} with 500Ω load resistance, and from 4.1831 mA_{rms} to 4.2150 mA_{rms} with 10Ω load resistance.

1. 서 론

고온초전도체는 산화물로 이루어져 있어 금속합금으로 이루어진 저온초전도체보다 초전도성이 깨졌을 때, 즉 상온에서 전기적저항이 훨씬 큰 값을 갖는다. 따라서 초전도상태와 상전도상태의 차이(퀵치)를 이용할 경우 큰 전류를 제어할 수 있게 되고 이와 같은 특성은 전류제한이나 정류기 그 밖에 전류스위치와 같은 인버터등의 전력전자회로에 적용할 수 있다. 실제로 미국 NASA를 포함한 일본, 독일 등지에서는 전력전자회로에 고온초전도후막을 결합시켜 그 효율성을 입증하였지만 우리나라의 경우, 박막형태로 제작한 SQUID, 초전도필터 그리고 안테나 등으로 많은 시도와 성과를 올린 것에 비해 전력소자나 스위치와 같은 전력전자회로등으로 응용은 이루어지지 않고 있는 형편이고 박막으로 제조시 증착을 위한 공정의 복잡성과 식각공정의 까다로움등이

어려움을 더해주고 있다.

이를 위해서 박막제조법에 비해 제조공정이 비교적 간단한 후막제작을 위한 공정확립과 함께 제작된 고온초전도후막을 전력전자회로에 결합시킨 회로설계 및 후막형전력소자개발은 기존의 전력전자회로가 갖지 못하는 성능과 효율향상을 위해 필수적이라 하겠다.

따라서 본 논문에서는 고온초전도후막을 응용하기 위한 기본특성인 퀵치특성을 이용한 전류제한 특성에 대해 고찰한 다음 이를 적용할 수 있는 방법등에 대해 논하고자 한다. 먼저, 전류제한특성을 고찰하기 위해 부분용융물질을 포함한 혼합분말원료와 바인더를 혼합하여 페이스트를 제조하고 스크린 프린팅기술로 Y_2BaCuO_5 기판위에 일정한 패턴을 갖는 후막을 입힌 다음 적절한 열처리를 통해 YBCO후막형 전류제한소자를 제작하였다.

마지막으로 제작한 후막소자에 대한 전류제한특성을 실험 및 고찰하고 이를 전력전자회로에 적용시키기 위한 방법에 대해 논하고자 한다.

2. 실험 방법 및 측정

확산법을 이용한 $YBa_2Cu_3O_x$ (Y123) 후막제작을 위해 먼저 $Y_2O_3:BaCO_3:CuO = 1:1:1$ 이 되도록 혼합하여 하소 및 소결을 걸쳐 Y_2BaCuO_5 (Y211) 단상을 준비하였다. Y211분말을 약 $3\text{ton}/\text{cm}^2$ 의 압력으로 가압하여 지름15mm인 원형 기판을 제작하였다. $3BaCuO_2 + 2CuO$ 의 반응물질은 $BaCO_3$ 와 CuO 의 몰비가 3:5가 되도록 혼합한 후 ethanol을 이용하여 milling하였다. 이 시료를 산소분위기($\text{in } O_2$), 860°C 에서 24시간동안 1차 하소한 후 다시 분쇄하여 900°C 에서 24시간동안 2차 하소하여 미세 분말로 분쇄하였다. 준비된 분말에 Ethyl cellulose를 첨가하고 milling하여 분말과 Ethyl cellulose가 균일하게 혼합되도록 하였다. 균일하게 혼합된 파우더에 Butyl carbitol를 혼합하여 기판위에 도포할 끈끈한 점도를 갖는 프린팅용 paste를 제조하였다. 표 1에 본 논문에서 사용한 첨가제의 조성비(wt%)를 나타내었다.

표 1. 페이스트의 조성비
Table 1. The ratio of additives in the paste.

compound	조성비 (wt%)
원료분말 ($3BaCuO_2 + 2CuO$)	56
Butyl carbitol	40
Ethyl cellulose	4

기판위에 입힐 그림 1과 같은 패턴을 200mesh 실크망에 형성시키기 위해 실크망에 감광액을 고무 입힌 후 감광기를 통해 일정시간 감광시켜 물로 세척한 후 건조기를 통해 건조시켰다. 마지막으로 실크망들과 squeezer를 이용하여 위에서 준비된 paste를 Y_2BaCuO_5 기판위에 프린팅을 실시하였다.

기판에 도포된 Barium Cuprate와 기판간에 확산을 통한 YBCO초전도상을 형성시키기 위해 다음과 같이 열처리를 실시하였다. 먼저 용매성분을 제거하기 위해 140°C 에서 45분유지하고 용질을 연소시키기 위해 350°C 에서 약 20분간 유지하였

다. 그 후 포정반응을 이용하여 YBCO를 형성시킨 후 460°C 에서 상전이를 위한 산소함량을 증가시키기 위해 약 6시간동안 산소분위기하에서 열처리를 실시하였다.

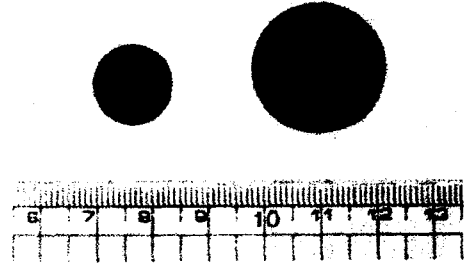


그림 1. 후막형 전류제한 측정모델
Fig. 1. Model for measurement of current limit formed by thick film

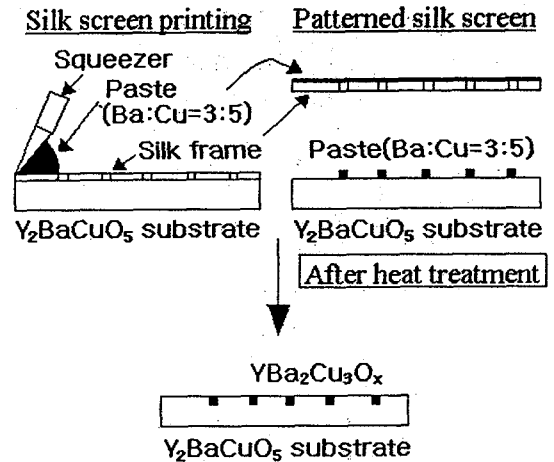


그림 2. 실크스크린 프린팅제작과정
Fig. 2. The process of fabrication for the silk screen printing

전류제한특성을 측정하기 위해 먼저 준비된 시편과 은선과의 접촉저항을 최소화하기 위해 전압, 전류단자부분을 금(Au)코팅을 실시한 다음 은풀을 이용하여 은선을 코팅된 전극과 접촉시켰다. 그리고 홀더에 부착시킨 다음 액체질소에 담가 교류전압이 최대가 되는 점에서 전류제한특성을 조사하였다.

전류제한특성측정을 위한 시험장치회로를 그림

3에 나타내었다. 그림에는 나타내지 않았지만 SW2를 on 했을 때 릴레이가 동작되어 원하는 전원각에서 Timer스위치가 on이 되도록 제어하는 회로가 부가적으로 연결되어 있다.

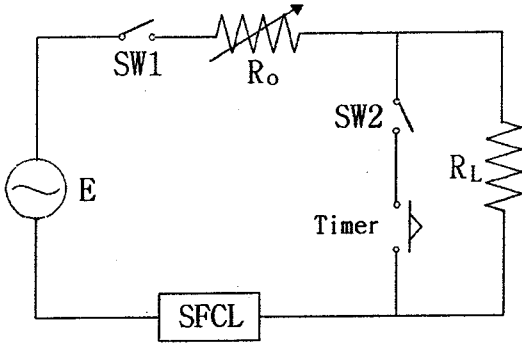


그림 3. 전류제한측정을 위한 실험장치회로
Fig. 3. The experimental device circuit for measurement of current limit

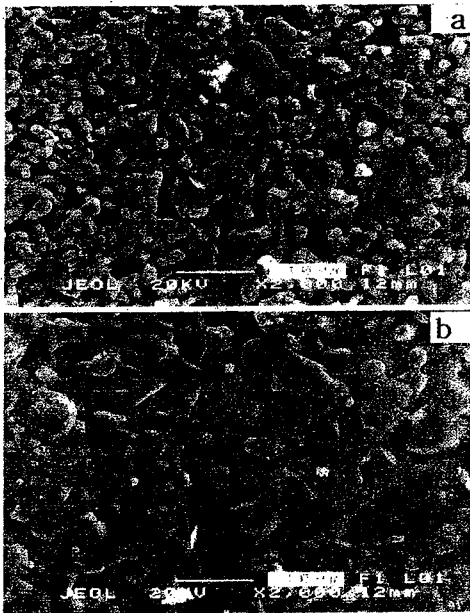


그림 4. 제작한 초전도후막표면의 전자현미경사진
(a) 패턴되지 않은 표면의 전자현미경사진
(b) 패턴된 표면의 전자현미경사진
Fig. 4. SEM micrograph of surface of superconducting thick film fabricated
(a) SEM micrograph of surface non-patterned
(b) SEM micrograph of surface patterned

직렬저항 R_o 은 SW1가 on되었을 때 전원으로부터 공급되는 전류가 SFCL의 임계전류이상을 넘어서지 않도록 조절하기 위한 가변저항이다.

본 논문에서는 부하저항 R_L 값이 500Ω 일때와 10Ω 일경우에 전류제한효과를 조사하였다.

SW1이 on, SW2가 off 상태일때의 SFCL양단의 전압은 식 (1)과 같다. 이상적인 경우라면 즉 양질의 후막이라면 $V_s=0$ 에 가까운 값을 보여야 하지만 실제실험에서는 완전하지 못한 접촉으로 인한 접촉저항과 매끄럽지 못한 패턴형태등으로 무시할수 없는 전압강하가 나타나므로 이때의 초전도후막양단의 저항을 고려하여 나타내었다.

SW1이 on, SW2가 on일 경우의 SFCL양단전압은 식 (2)와 같다.

$$V_s = \frac{R_s}{R_o + R_L + R_s} \cdot E \quad (1)$$

$$V_s = \frac{R_s}{R_o + R_s} \cdot E \quad (2)$$

그림 4에 제작한 초전도후막의 패턴되지 않은 부분(Y_2BaCuO_5)과 패턴된 부분(즉 확산에 의해 형성된 $YBa_2Cu_3O_x$)의 표면을 보여주고 있다.

확산에 의해 형성된 부분(그림 4.(b))을 보면 Y_2BaCuO_5 기판의 기공사이로 도핑한 물질이 확산되므로서 기판과 반응하여 $YBa_2Cu_3O_x$ 상을 형성한 것을 관찰할 수 있다. 또한 사진에서 부분적인 크랙을 관찰할 수 있다. 이는 본 SEM사진을 위한 시편은 전류제한특성을 실험한 뒤의 시편으로 액체질소에 담가 실험하면서 썬치현상이 일어나 형성된 것으로 사료되고 기판과의 열팽창 계수의 차이로 발생된 것으로 사료된다.

그림 5는 패턴된 부분의 확산에 의해 Y_2BaCuO_5 기판위에 형성된 $YBa_2Cu_3O_x$ 층의 단면을 보여주고 있고 대략 10μ 두께의 층이 형성된 것을 볼 수 있다.

부하저항(R_L)이 500Ω 일때와 10Ω 일 경우의 초전도양단의 전압강하특성을 그림 6, 7에 나타내었다.

이론적으로는 SW2을 on하기 전에는 초전도후막 양단의 전압강하는 무시할만한 크기가 나타나야 되지만 그림에서는 각각 $16mV_{peak}$, $26mV_{peak}$ 가 나타나는 것을 볼 수 있는데 이는 무시할 수 없는 접촉저항과 완전하지 못한 초전도상때문으로 여

겨진다. 따라서 식 (1)에서 R_s 를 고려하여 계산한 결과 초전도후막양단저항과 접촉저항의 합이 각각 4.012Ω , 4.394Ω 가량이었고 이때 전원으로 부터 공급되는 전류는 각각 $2.8213\text{mA}_{\text{rms}}$, $4.1831\text{mA}_{\text{rms}}$ 로 계산되었다.



그림 5. 기판과 도핑물질의 확산에 의해 형성된 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 층의 주사현미경사진
Fig. 5. SEM micrograph of layer of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ formed by diffusion of doping material and substrate

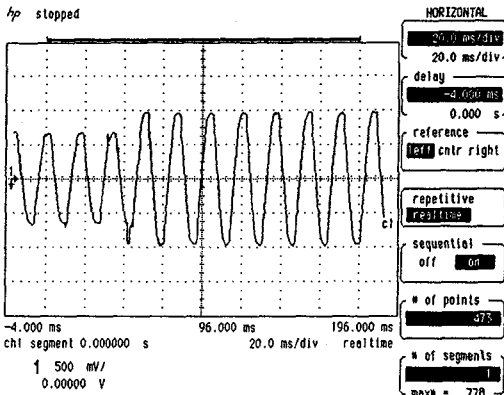


그림 6. 초전도후막의 양단전압파형($R_L = 500\Omega$)
Fig. 6. Voltage waveform of superconducting thick film($R_L = 500\Omega$)

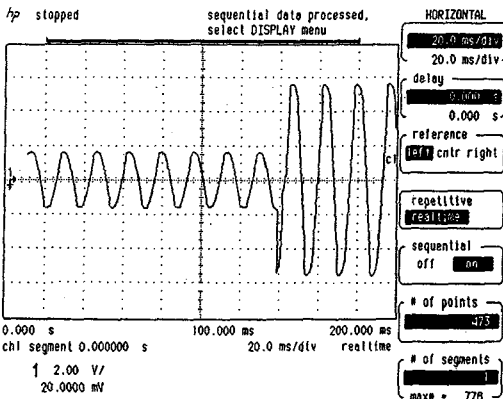


그림 7. 초전도후막의 양단전압파형($R_L = 10\Omega$)
Fig. 7. Voltage waveform of superconducting thick film($R_L = 10\Omega$)

SW2가 on되는 순간 켄치가 극히 짧은 순간 발생하는 것을 관찰할 수 있으며 부하저항이 제거되는 순간 증가된 전류로 발생된 열이 다른 부분으로 분산되지 못하고 초전도체로 바로 유입된 결과로 여겨진다.

이때 계산된 초전도후막양단저항값은 각각 9.421Ω , 6.710Ω 으로 계산되었으며 여기에는 물론 접촉저항도 포함된 것으로 볼 수 있다. 공급되는 전류값은 각각 $4.2034\text{mA}_{\text{peak}}$, $4.2150\text{mA}_{\text{peak}}$ 정도로 계산되었다.

부하저항 R_L 이 클 경우(500Ω), 후막의 저항변화가 보다 크게 나타나는 것을 얻을 수 있다.

이는 후막양단에 흐르는 전류값이 크게 변할 때 저항변화가 커지는 것을 의미한다.

3. 결 론

본 논문에서는 고온초전도후막을 응용하기 위한 기본특성인 켄치특성을 이용한 전류제한특성에 대해 고찰하였다.

전류제한특성을 고찰하기 위해 부분용융물질을 포함한 혼합분말원료와 바인더를 혼합하여 페이스트를 제조하고 스크린 프린팅기술로 Y_2BaCuO_5 기판위에 일정한 패턴을 갖는 후막을 입힌 다음 적절한 열처리를 통해 YBCO후막형 전류제한소자를 제작하였다.

본문에서 고찰한 초전도후막의 전류제한특성으로부터 접촉저항을 최대한 최소화하는 기술과 보다 높은 임계전류를 갖는 후막제작이 무엇보다도 선행되어야 할 것이며 켄치시 발생되는 기판과 생성된 후막간의 열적인 응력을 최소화하는 방법에 대한 연구도 이루어져야 할 것으로 생각된다.

마지막으로 위에서 언급한 문제점들에 대한 연구와 함께 후막의 켄치특성을 전류제한소자나 스위치소자와 같은 전력전자회로에 적용시킬 수 있는 방법에 대한 모색도 병행될 필요가 있다.

본 연구는 99년 기초전력공학공동연구소의 지원하에 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] J. Tabuchi and K. Utsumi, "Preparation of Superconducting Y-Ba-Cu-O Thick Film with Preferred C-axis Orientation by a Screen Printing Method", *Appl. Phys. Lett.*, 53 (7) pp 606-608, 1988.
- [2] D. Bhattacharaya, C. K. Maiti, P. Pramanik, T. K. Dey, S. K. and K. L. Chopra, "Structural and Electrical Properties of Screen Printed Thick Films of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ Superconductors", *Thin Solid Films*, 164, pp 115-118, 1988.
- [3] B. Gudmundsson, H. Wang, R. A. Neiser, B. Katz, and H. Herman, "The Effect of Heat Treatment Environment on the Superconducting Properties of Plasma Sprayed $YBa_2Cu_3O_y$ Deposits", *J. Appl. Phys.*, 67 (5) pp 2653-2655, 1990.
- [4] D. K. Aswai, S. K. Gupta, A. K. Debnath, G. P. Kothiyal, S. C. Sabharwai and M. K. Gupta, "Preparation of Adherent Y-Ba-Cu-O Thick Films and the Effect of Silver Doping", *Supercon. Sci. Technol.* 4 pp 188-191, 1991.
- [5] F. Wellhofer, J. S. Abell, D. Holland and E. A. Logan, "Interface Studies on Screen Printed YBCO Superconducting Ceramics", *Physica C*, 153-155, pp 399-400, 1988.
- [6] N. V. Vuong, E. V. Raspopina and B. T. Huy, "Thick films of $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ prepared on Y_2BaCuO_5 substrates", *Supercon. Sci. Technol.* 6 pp 453-459, 1993.