

# 고온초전도후막의 확산두께에 따른 전류제한 특성연구

論 文

49C-4-2

## The Study on Characterization of Current-limiting with Diffusion Thickness of High- $T_c$ Superconductor Thick Film

林成勳\*·姜亨坤\*·韓太熙·牟昌浩·林錫珍·韓秉誠\*\*

(Sung-Hun Lim · Hyeong-Gon Kang · Tae-Hee Han · Chang-Ho Mo · Suk-Jin Lim · Byoung-Sung Han)

**Abstract** - For the fabrication of  $YBa_2Cu_3O_x$  thick film, a substrate of  $Y_2BaCuO_5$  was fabricated by adding  $CeO_2$  into  $Y_2BaCuO_5$  and two types of doping materials added with binder material were prepared. Each doping material was patterned on  $Y_2BaCuO_5$  substrate by the screen printing method and then was annealed at the temperature with a few step. It could be observed by X-ray diffraction patterns and SEM photographs that through the diffusion process of the  $Y_2BaCuO_5$  and each doping material, the  $YBa_2Cu_3O_x$  phase was formed. And with an additive of  $CeO_2$ , the thickness of formed  $YBa_2Cu_3O_x$  decreased. From the experiment of current limiting on thick film, the sample with thinner thickness of  $YBa_2Cu_3O_x$  showed the more effective characteristics of current limiting.

**Key Words** : the screen printing method, the diffusion process, characteristics of current limiting

### 1. 서 론

고온초전도체의 낮은 임계전류밀도는 실제의 응용에 있어 큰 장애물이 된다. 고상소결법을 통해 벌크형태로 제작할 경우, 낮은 임계전류밀도의 요인이 되었던 결정립간의 약결합을 MTG나 MPMG등과 같은 용융공정을 통해 향상시킬 수 있었다[1]. 선재형태로 제작한 고온초전도체는 실제의 전력응용을 위한 임계전류값을 얻을 수 있으나 고온초전도체가 갖는 기계적 취약성 때문에 실제응용을 위한 장산화나 접합성향상을 위한 노력이 이루어지고 있다[2][3].

증착장비를 이용하여 제작되는 고온초전도박막은 일반적으로 성장시키는 것이 가능하여 높은 임계전류밀도값을 얻을 수 있으나 고가의 장비를 필요로 하고 복잡한 공정조건제어가 필수적이다. 또한 증착속도가 낮아 원하는 두께를 갖는 막을 형성하기 위해서는 장시간의 공정시간을 필요로 하는 문제점이 있고 기판의 선택에 있어 단결정기판을 필요로 하기 때문에 전력응용을 위한 대면적박막제작이 어려운 단점이 있다[4].

따라서 고가의 박막제조장비를 사용하지 않고 경제성이 있는 기판의 선택과 함께 대면적의 막을 제작할 수 있을 뿐 아니라 두께의 제어가 용이한 후막제조법에 관한 연구가 요구되고 있다. 그러나 후막제작시  $MgO$ 나  $SrTiO_3$ 기판은 상대적으로 고가이고 그 제작할 수 있는 치수가 작기 때문에 실제적인 디바이스응용에 제한이 되고 있다. 알루미늄이나 실리콘 석영과 같은 기판위에 초전도상을 형성시키려는 노력도

높은 온도에서 기판과의 상호확산으로 인한 반응때문에 크게 성공적이지 못했다. 그렇지만 이와 같은 문제점들은 기판물질로 고온초전도상성분의 조성일부를 사용함으로써 해결될 수 있었다[5][6].

이와 같은 방법을 이용할 경우 우선 기판가격이 저렴하고 원하는 임의의 모양으로 만들기가 용이하며 원하는 상의 일부성분을 기판으로 사용하기 때문에 기판과 도포물질과의 상호반응이 더 이상 중요치 않게 되고 기판과의 응집력 또한 향상된다.

본 연구에서는  $YBa_2Cu_3O_x$ 초전도체의 포정반응물질인  $Y_2BaCuO_5$ 과 액상성분을 기판과 도포물질로서 선택하여 이 두 물질의 포정온도부근에서 용융과정과 확산과정을 이용하여  $YBa_2Cu_3O_x$ 후막을 제작하였다. 또한 다른 도포물질로서, 소결과정을 거쳐 얻어진  $YBa_2Cu_3O_x$ 로 도포하였을 경우와 비교 및 분석하였다.

또한 용융공정에서  $YBa_2Cu_3O_x$ 내에  $Y_2BaCuO_5$ 상의 도입을 더욱 미세화하고 균일화시켜 주는 역할을 한  $CeO_2$ 물질을 기판물질에 각각 첨가하여 X선회절패턴을 통해 형성된 상의 변화를 분석하였고 전자현미경사진을 이용하여 미세구조 및 형성된 막의 두께를 관찰하였다.

후막공정에서도 형성될 막의 두께와 이에 따른 임계특성에 영향을 주는 파라미터로서 도포물질에 포함시킬 바인더양이나, 프린팅의 횟수, 스퀴지에 가하는 압력 등이 있지만 이들은 기본적인 후막제작을 위한 기술적인 문제로 몇번의 반복 실험을 통해 극복할 수 있지만 도포물질과 기판에 첨가될 물질에 따라 형성될 막의 두께와 임계특성의 변화를 기대할 수 있다면 두께변화를 통한 임계특성을 제어할 수 있다는 점에서 이에 대한 연구는 의의가 있을 것으로 사료된다.

마지막으로 고온초전도후막을 응용하기 위한 특성조사로, 랜치현상을 이용한 전류제한을 실험 및 관찰하였고 형성된 막의 두께변화에 따른 전류제한특성을 비교분석하였다. 두께제어를 통한 전류제한특성을 변화시킬 수 있음을 조사함으로써 고온초전도 후막소재개발과 함께 이를 전력전자회로에 적용시키기 위한 연구의 기초를 마련하고자 한다.

\* 正 會 員 : 全北大 工大 電氣工學科 博士科程

\*\* 正 會 員 : 全北大 工大 電氣工學科 敎授 · 工博

接受日字 : 1999年 11月 23日

最終完了 : 2000年 3月 20日

## 2. 실험방법 및 특성평가

### 2.1 실험방법

확산을 이용한  $YBa_2Cu_3O_x$  후막을 제작하기 위해  $Y_2O_3$ ,  $BaCO_3$ ,  $CuO$  분말의 몰비가 1 : 1 : 1이 되도록 혼합하여 하소를 거친 다음 지름 15 mm, 두께 1.5mm 가량의 원형펠렛을 준비하였다. 이와 같이 준비된 원형기판위에 도포할 첫 번째 물질로  $BaCO_3$ 와  $CuO$ 의 몰비가 3:5가 되도록 혼합하여 산소분위기에서, 860 °C와 900 °C로 각각 24 시간동안 하소한 후 이를 시브레이커를 이용하여 미세하게 분쇄시켰다.

도포할 두 번째 물질은  $Y_2O_3$ ,  $BaCO_3$ ,  $CuO$  분말로부터 Y, Ba, Cu 의 각 몰비가 1:2:3이 되도록 혼합한 후 산소분위기 920 °C에서 24 시간씩 2차례에 걸쳐 하소하여 준비하였다.

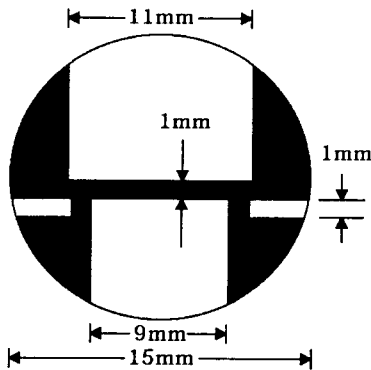


그림 1 후막형 전류제한 측정모델  
Fig. 1 Model for measurement of current limit of thick film type

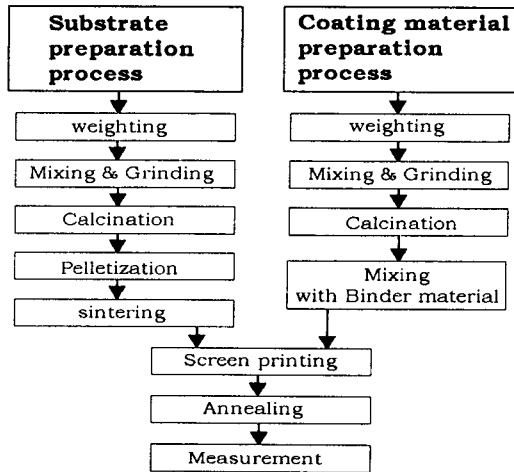


그림 2 초전도후막제작공정도  
Fig. 2 The diagram of preparation for superconducting thick film

위에서 준비된 각각의 도포물질에 용질로 ethyle cellulose 를 4wt%가량 첨가하여 isopropyl alcohol를 매개로 2시간에 걸쳐 균일하게 혼합되도록 밀링하였다. 이와 같이 균일하게 혼합된 분말에 용매로 n-butyl carbitol acetate 40wt%가량을 첨가하여 기판위에 도포할 끈끈한 점도를 갖는 페이스트를 준비하였다.

전류제한 특성실험을 위한 기판위에 입힐 그림 1과 같은 패턴을 200메쉬 실크망에 형성시키기 위해 실크망에 감광액을 고루 입힌 다음 감광기를 통해 일정시간 감광시켰다. 감광된 실크망을 물로 세척한 후 건조기를 통해 건조시켰다. 마지막으로 실크망틀과 스퀴저를 이용하여 위에서 준비된 각각의 페이스트를  $Y_2BaCuO_5$  기판위에 프린팅을 실시하였다.

기판에 도포한 물질과 기판간에 확산을 통한 YBCO 초전도상을 형성시키기 위해 다음과 같이 열처리를 실시하였다. 먼저 용매성분을 제거하기 위해 140 °C에서 45 분 유지하고, 용질을 연소시키기 위해 350 °C에서 약 20 분간 유지하였다. 그 후 포정반응을 이용하여 YBCO를 형성시킨 후 460 °C에서 상전이를 위한 산소함량을 증가시키기 위해 약 6 시간동안 산소분위기하에서 열처리를 실시하였다.

### 2.2 특성평가

전류제한특성을 측정하기 위해 먼저 준비된 시편과 은선과의 접촉저항을 최소화하기 위해 진압, 전류단자부분을 금(Au)코팅을 실시한 다음 은풀을 이용하여 은선을 코팅된 전극과 접촉시켰다. 그리고 홀더에 부착시킨 다음 액체질소에 담가 교류전압이 최대가 되는 점에서 전류제한특성을 조사하였다. 그림 3에 전류제한특성측정을 위한 실험장치회로를 나타내었다.

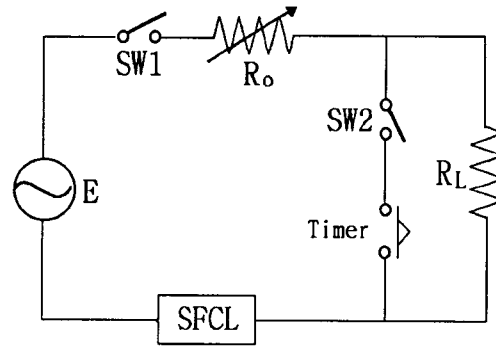


그림 3 전류제한측정을 위한 실험장치회로  
Fig. 3 The experimental device circuit for measurement of current limit

그림에는 나타나지 않았지만  $SW_2$ 를 on 했을 때 릴레이가 동작되어 원하는 전원각에서 timer 스위치가 on이 되도록 제어하는 회로가 부가적으로 연결되어 있다. 직렬저항  $R_0$ 은  $SW_1$ 가 on되었을 때 전원으로부터 공급되는 전류가 SFCL의 임계전류이상을 넘어서지 않도록 조절하기 위한 가변저항이다. 본 논문에서는 부하저항  $R_L$ 값이 500Ω일때와 100Ω일 경우에 전류제한효과를 조사하였다.

$SW_1$ 이 on,  $SW_2$ 가 off 상태일때의 SFCL양단의 전압은 식 (1)과 같다. 이상적인 경우라면 즉 양질의 후막이라면  $V_s=0$ 에 가까운 값을 보여야 하지만 실제 실험에서는 완전하지 못한 접촉에 기인한 접촉저항과 매끄럽지 못한 패턴형태 등으로 무시할 수 없는 전압강하가 나타나므로 이때의 초전도 후막양단의 저항을 고려하여 나타내었다.  $SW_1$ 이 on,  $SW_2$ 가 on일 경우의 SFCL양단전압은 식 (2)와 같고 부하가 회로로부터 제거되었을 때 SFCL양단에 나타나는 전압이다.

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

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

### 3. 실험결과 및 고찰

YBCO 부분용융물질을 포함한 혼합분말원료와 바인더를 혼합하여 페이스트를 제조하였고 스크린 프린팅기술로  $Y_2BaCuO_5$ 기판위에 일정한 패턴을 갖는 막을 도포한 다음 적절한 열처리를 통해 YBCO후막을 제작하였다.

용융공정에서  $YBa_2Cu_3O_x$ 내에  $Y_2BaCuO_5$ 상의 도입을 더욱 미세화하고 균일화시켜 주는 역할을 하는  $CeO_2$ 물질을 기판 물질에 첨가하여 X선회절패턴을 통해 형성된 상의 변화를 분석하고 전자현미경사진을 통해 미세구조 및 형성된 막의 두께를 관찰하였다.

마지막으로 고온초전도후막을 응용하기 위한 기본특성조사로서, 켈치현상을 이용한 전류제한특성을 실험 및 고찰하였으며 형성된 막의 두께변화에 따른 전류제한특성을 비교분석하였다.

#### 3.1 BaO+CuO 도포에 따른 후막특성

그림 4는  $Y_2BaCuO_5$ 기판에  $CeO_2$ 의 첨가에 따른 기판위에 성장된  $YBa_2Cu_3O_x$  후막의 표면사진을 보여주고 있다. 그림 4-(a)에서는 액상성분과  $Y_2BaCuO_5$ 기판의 확산에 의해 성장된 것으로 보이는 구상의  $YBa_2Cu_3O_x$ 를 관찰할 수 있다.

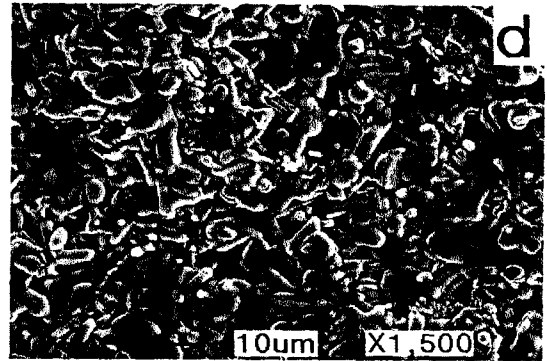
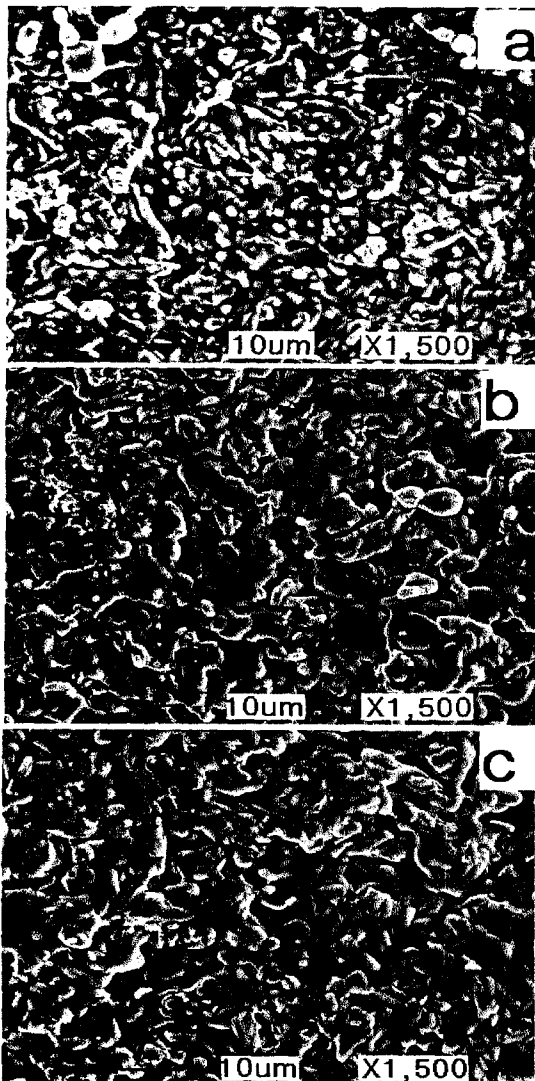


그림 4  $Y_2BaCuO_5$ 기판에  $CeO_2$ 첨가에 따른 YBCO 후막 표면의 전자현미경사진

- (a)  $Y_2BaCuO_5 + CeO_2$  0wt%
- (b)  $Y_2BaCuO_5 + CeO_2$  1wt%
- (c)  $Y_2BaCuO_5 + CeO_2$  2wt%
- (d)  $Y_2BaCuO_5 + CeO_2$  3wt%

Fig. 4 SEM micrograph of surface of YBCO thick film

- (a)  $Y_2BaCuO_5 + CeO_2$  0wt%
- (b)  $Y_2BaCuO_5 + CeO_2$  1wt%
- (c)  $Y_2BaCuO_5 + CeO_2$  2wt%
- (d)  $Y_2BaCuO_5 + CeO_2$  3wt%

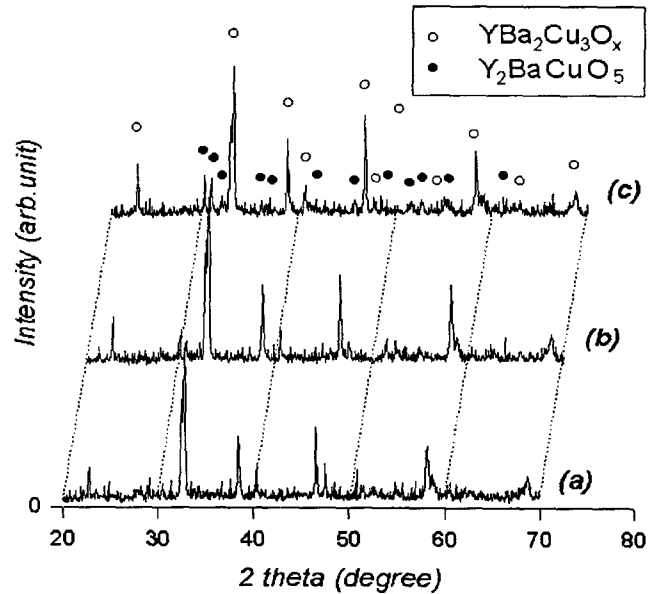


그림 5 기판에  $CeO_2$ 첨가량에 따른 YBCO후막의 X-ray 회절패턴

- (a)  $Y_2BaCuO_5 + CeO_2$  1 wt%
- (b)  $Y_2BaCuO_5 + CeO_2$  2 wt%
- (c)  $Y_2BaCuO_5 + CeO_2$  3 wt%

Fig. 5 X-ray diffraction patterns of YBCO thick film with  $CeO_2$  addition amount into substrate

- (a)  $Y_2BaCuO_5 + CeO_2$  1 wt%
- (b)  $Y_2BaCuO_5 + CeO_2$  2 wt%
- (c)  $Y_2BaCuO_5 + CeO_2$  3 wt%

$CeO_2$ 첨가량이 1wt%, 2wt%인  $YBa_2Cu_3O_x$ 사진(그림 4-(b), 4-(c))에서는  $CeO_2$ 첨가량이 증가됨에 따라 성장된 입자의 크기가 상당히 증가되는 것을 볼 수 있으며 전체적인

YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub>입자수는 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 CeO<sub>2</sub>첨가량이 3wt%인 표면사진(그림 4-(d))에서는 다시 입자크기가 감소하고 미반응한 상으로 보이는 입자들을 관찰할 수 있었다.

위의 결과로부터 Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub>기판에 CeO<sub>2</sub>첨가는 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub>상의 성장을 향상시켜주는 역할을 하며 그 첨가량을 3wt%로 했을 경우에는 약간의 미반응한 상들이 표면 위에 관찰되는 것으로 보아 적합한 첨가량은 2wt%인 것으로 판단된다.

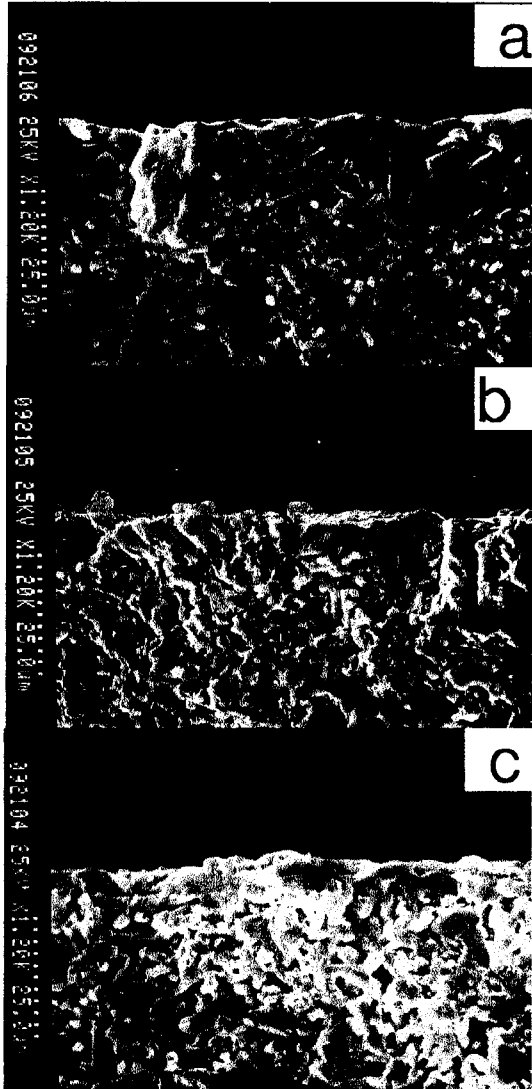


그림 6 기판에 CeO<sub>2</sub>첨가량에 따라 형성된 YBCO 후막층의 주사전자현미경사진  
 (a) Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> + CeO<sub>2</sub> 1 wt%  
 (b) Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> + CeO<sub>2</sub> 2 wt%  
 (c) Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> + CeO<sub>2</sub> 3 wt%

Fig. 6 SEM micrograph of layer of YBCO formed with CeO<sub>2</sub> addition amount into substrate  
 (a) Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> + CeO<sub>2</sub> 1 wt%  
 (b) Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> + CeO<sub>2</sub> 2 wt%  
 (c) Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> + CeO<sub>2</sub> 3 wt%

기판에 CeO<sub>2</sub>첨가량에 따른 BaO+CuO와 기판의 확산두께 변화에 대한 관찰(그림 6)에서도 볼 수 있듯이 CeO<sub>2</sub>첨가량에 따라 액상도포물질과 기판과의 반응이 활발하게 일어나 생성된 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub>두께가 점점 감소되는 사실을 알 수 있었다. 위와 같은 사실은 Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub>기판에 CeO<sub>2</sub>첨가가 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub>상의 성장을 향상시켜주는 역할을 함을 뒷받침해 준다. CeO<sub>2</sub>첨가량에 따른 X-ray 회절패턴에서도 Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub>에 해당하는 피크와 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub>에 해당하는 피크강도가 증가되는 것을 관찰할 수 있었다.

위에서 관찰한 시편의 전류제한특성을 조사하기 위해 그림 3에 나타난 회로와 연결하여 부하저항(R<sub>L</sub>)이 500 Ω일때와 100 Ω일 경우의 전류제한특성을 조사하였다. 기판에 CeO<sub>2</sub>가 첨가되지 않은 시편에서 부하를 제거하기 전후에 측정된 YBCO초전도후막양단의 전압강하특성을 그림 7, 8에 나타내었다.

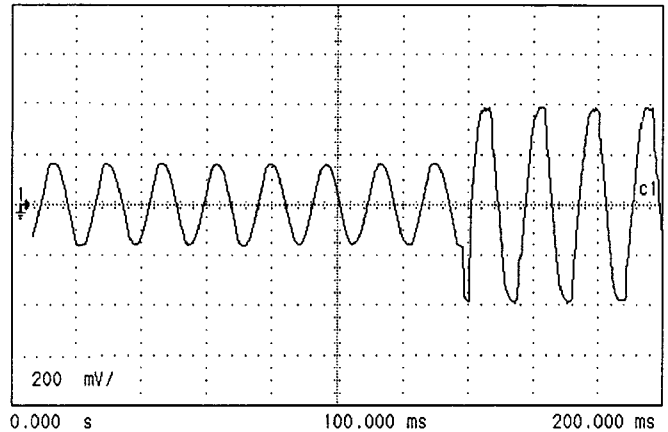


그림 7 YBCO고온초전도후막의 양단전압파형  
 기판 : Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> + CeO<sub>2</sub> 0 wt%  
 부하저항 : R<sub>L</sub> = 500 Ω

Fig. 7 Voltage waveform of YBCO superconducting thick film  
 substrate : Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> + CeO<sub>2</sub> 0 wt%  
 load resistance : R<sub>L</sub> = 500 Ω

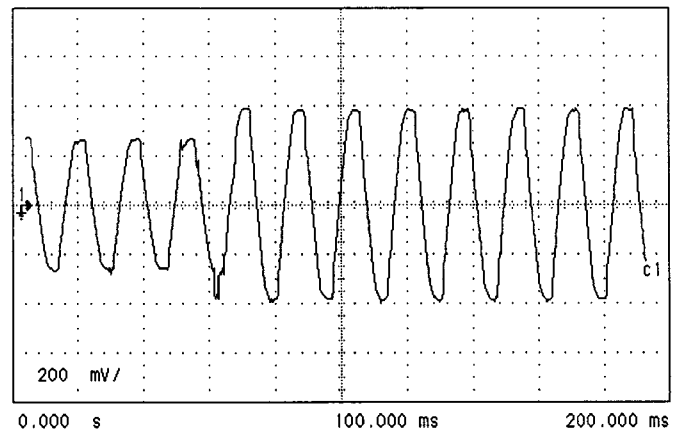


그림 8 YBCO고온초전도후막의 양단전압파형  
 기판 : Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> + CeO<sub>2</sub> 0 wt%  
 부하저항 : R<sub>L</sub> = 100 Ω

Fig. 8 Voltage waveform of YBCO superconducting thick film  
 substrate : Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> + CeO<sub>2</sub> 0 wt%  
 load resistance : R<sub>L</sub> = 100 Ω

이론적으로는 SW<sub>2</sub>을 on하기 전에는 초전도후막 양단의 전압강하는 무시할만한 크기가 나타나야 되지만 그림에서는 각각 160 mV<sub>peak</sub>, 280 mV<sub>peak</sub>가 나타나는 것을 볼 수 있는데 이는 무시할 수 없는 접촉저항과 완전하지 못한 초전도상 때문에 여겨진다. 식 (1)에서 R<sub>s</sub>를 고려하여 계산한 결과 초전도후막 양단 저항과 접촉저항의 합이 각각 14.28 Ω, 18.45 Ω가량이었고 이때 전원으로부터 공급되는 전류는 각각 7.925 mA<sub>rms</sub>, 10.73 mA<sub>rms</sub>로 계산되었다.

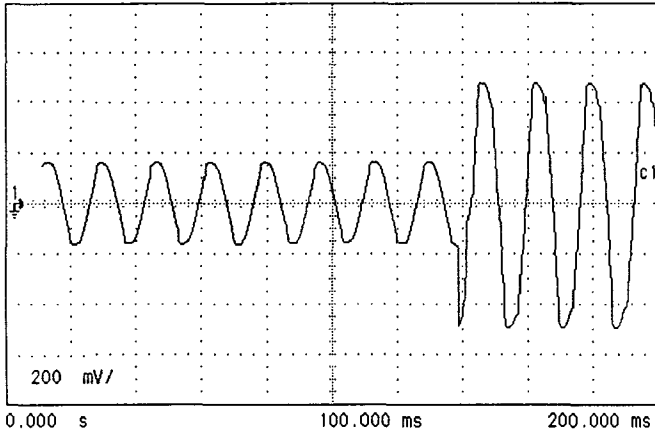


그림 9 YBCO고온초전도후막의 양단전압파형  
기 판 : Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> + CeO<sub>2</sub> 2 wt%  
부하저항 : R<sub>L</sub> = 500 Ω

Fig. 9 Voltage waveform of YBCO superconducting thick film  
substrate : Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> + CeO<sub>2</sub> 2 wt%  
load resistance : R<sub>L</sub> = 500 Ω

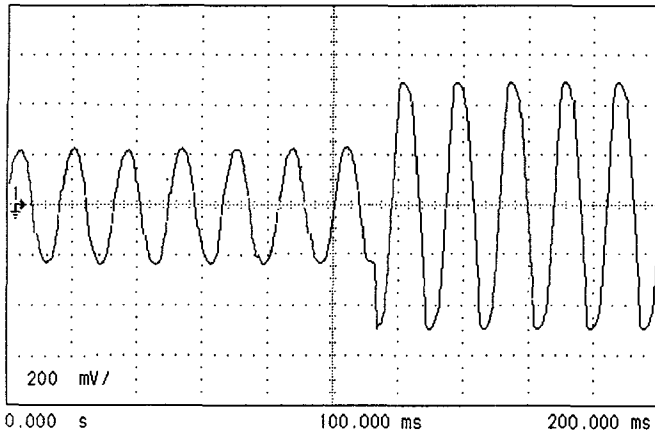


그림 10 YBCO고온초전도후막의 양단전압파형  
기 판 : Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> + CeO<sub>2</sub> 2 wt%  
부하저항 : R<sub>L</sub> = 100 Ω

Fig. 10 Voltage waveform of YBCO superconducting thick film  
substrate : Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> + CeO<sub>2</sub> 2 wt%  
load resistance : R<sub>L</sub> = 100 Ω

SW<sub>2</sub>가 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 초전도후막 양단저항값은 각각 22.91 Ω, 22.905 Ω으로 거의 비슷한 값으로 계산되었으며 여기에는 물론 접촉저항도 포함된 것으로 볼 수 있다. 이때 공급되는 전류값은 부하저항이 500 Ω, 100 Ω이었던 경우 모두, 11.73 mA<sub>peak</sub>로 거의 같은 값이었다.

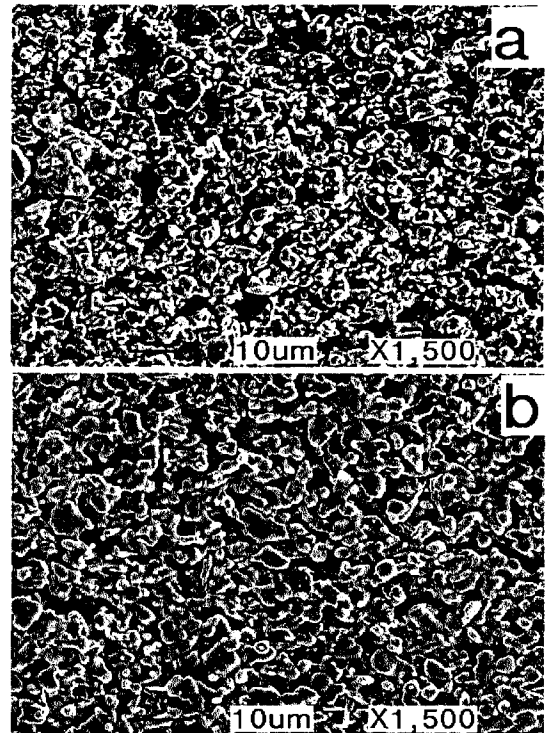
부하저항 R<sub>L</sub>이 클 경우(500 Ω), 후막의 저항변화가 보드 크게 나타나는 것을 얻을 수 있다. 이는 후막양단에 흐르는 전류값이 크게 변할 때 상전도상태로의 저항변화가 커지는 것과 연관되는 것으로 판단된다.

그림 9, 10은 기판에 CeO<sub>2</sub>가 2wt%첨가된 시편에서 부하제거에 따른 YBCO후막양단의 전압파형을 보여준다. 부하가 500 Ω, 100 Ω인 경우에 전압파형으로부터 계산된 저항값은 14.277 Ω, 14.448 Ω으로 나타났고 이때 인가된 전류는 각각, 7.925 mA<sub>rms</sub>, 10.768 mA<sub>rms</sub>로 계산되었다. 부하가 제거된 후에는 YBCO시편내의 저항값이 29.11 Ω으로 동일하게 나타났다. 마찬가지로 제거된 후에 도통되고 있는 전류도 동일한 값인 11.66 mA<sub>rms</sub>로 계산되었다.

CeO<sub>2</sub>가 첨가된 시편에서 부하가 제거되었을 때 첨가되지 않은 시편보다 큰 저항값이 나타남을 볼 수 있으며 이로 인해 도통되는 전류값도 0.07 mA정도 감소되는 것을 알 수 있다. 이로 볼 때 CeO<sub>2</sub>첨가가 이루어진 시편이 전류제한효과가 큼을 고찰할 수 있고 앞에서 관찰한 CeO<sub>2</sub>첨가가 이루어짐에 따라 형성된 후막층의 두께가 감소됨은 액상과 기판의 상호반응이 활발하게 이루어진 결과로 사료된다.

### 3.2 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub>도포에 따른 후막특성

두 번째 실험으로 조성비가 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub>가 되도록 혼합한 다음 하소과정을 거친 물질을 도포하였을 경우 CeO<sub>2</sub>첨가량에 따른 주사현미경사진(그림 11)에서는 비교적 거칠었던 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub>입자들이 CeO<sub>2</sub>첨가량에 따라 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub>초전도상 입자들사이의 결합이 향상되는 것을 관찰할 수 있었다.



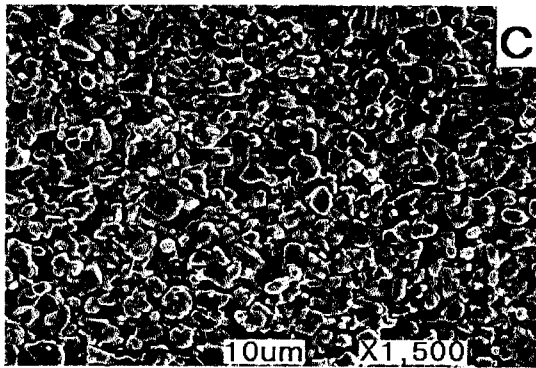


그림 11 Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub>기판에 CeO<sub>2</sub>첨가에 따른 YBCO 후막 표면의 전자현미경사진

- (a) Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> + CeO<sub>2</sub> 0wt%
- (b) Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> + CeO<sub>2</sub> 1wt%
- (c) Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> + CeO<sub>2</sub> 2wt%

Fig. 11 SEM micrograph of surface of YBCO thick film

- (a) Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> + CeO<sub>2</sub> 0wt%
- (b) Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> + CeO<sub>2</sub> 1wt%
- (c) Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> + CeO<sub>2</sub> 2wt%

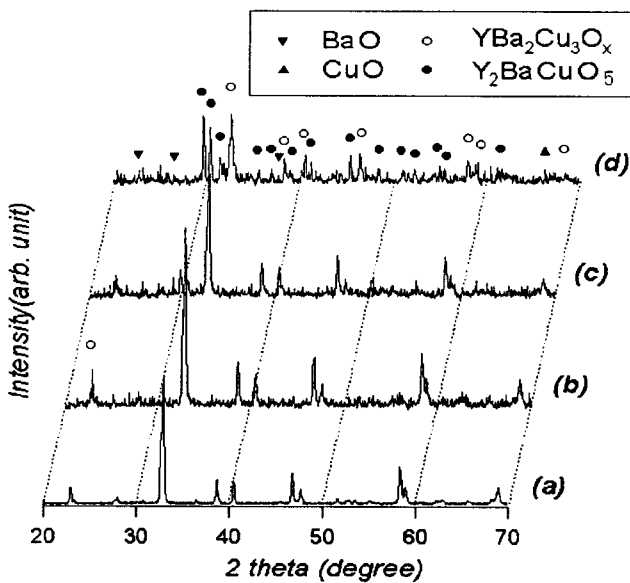


그림 12 Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub>에 CeO<sub>2</sub>첨가량에 따른 YBCO후막의 X-ray 회절패턴

- (a) Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> + CeO<sub>2</sub> 0 wt%
- (b) Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> + CeO<sub>2</sub> 1 wt%
- (c) Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> + CeO<sub>2</sub> 2 wt%
- (d) Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> + CeO<sub>2</sub> 2 wt%

Fig. 12 X-ray diffraction patterns of YBCO thick film with CeO<sub>2</sub> addition amount into substrate

- (a) Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> + CeO<sub>2</sub> 0 wt%
- (b) Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> + CeO<sub>2</sub> 1 wt%
- (c) Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> + CeO<sub>2</sub> 2 wt%
- (d) Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> + CeO<sub>2</sub> 2 wt%

X선회절패턴(그림 12)에서는 CeO<sub>2</sub>첨가에 따라 형성된 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub> 상외에도 Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub>상과 BaO, CuO와 같은 액상물질의 피크가 생성되어 점점 증가되는 것을 볼 수 있었다. 이는 이전의 용융법을 이용한 YBaCuO 초전도벌크 제조법에서도 보고되었던 것처럼 CeO<sub>2</sub>나 Pt첨가는 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub>상 형성시 입계사이의 액상과 Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub>상형성을 촉진시키고 미세화시켜 입계의 약결합을 향상시켜준다는 보고와 일치함을 입증해 주는 결과이다[7].

그림 13은 도포한 시편의 후막두께를 관찰한 주사전자현미경사진으로 CeO<sub>2</sub>가 첨가된 Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> 기판에서 열처리후 형성된 후막의 두께가 감소되는 것을 관찰할 수 있었다.

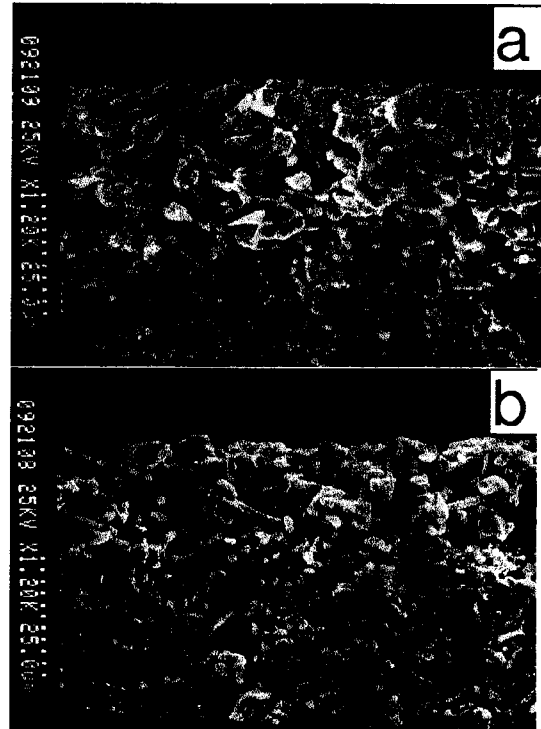


그림 13 기판에 CeO<sub>2</sub>첨가량에 따른 YBCO후막층의 주사전자현미경사진

- (a) Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> + CeO<sub>2</sub> 0 wt%
- (b) Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> + CeO<sub>2</sub> 2 wt%

Fig. 13 SEM micrograph of layer of YBCO with CeO<sub>2</sub> addition amount into substrate

- (a) Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> + CeO<sub>2</sub> 0 wt%
- (b) Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> + CeO<sub>2</sub> 2 wt%

마지막으로 YBCO후막의 전류제한특성을 조사하기 위하여 CeO<sub>2</sub>첨가량이 0 wt%일 경우, 부하저항이 500 Ω(그림 14), 100 Ω(그림 15)인 경우에서 전류제한특성을 조사하였다. 그림 14, 15에 나타난 양단 전압파형에서 볼 수 있듯이, 부하가 제거되기 전에는 각각 330 mV<sub>peak</sub>, 420 mV<sub>peak</sub> 전압이 후막양단에 나타났지만 제거된 후에는 650 mV<sub>peak</sub>, 670 mV<sub>peak</sub>로 변화를 보였다.

식 (1)를 이용하여 계산한 부하저항제거전의 전원으로 부터 공급전류는 7.844 mA<sub>rms</sub>, 10.639 mA<sub>rms</sub>였고 접촉저항을 포함한 후막양단의 저항값은 29.75 Ω, 27.92 Ω으로 계산되었다. 부하저항이 제거된 후에는 식 (2)에 의해 전원 공급전류는 각각 11.54 mA<sub>rms</sub>, 11.53 mA<sub>rms</sub>값으로 계산되었고 이 때의 저항값은 39.83 Ω, 41.1 Ω에 해당되었다.

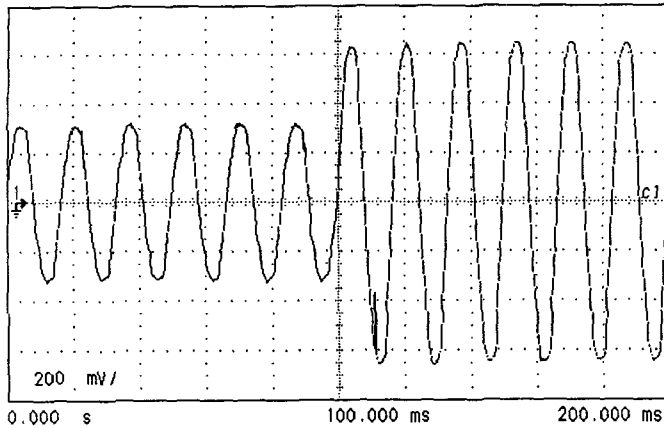


그림 14 YBCO고온초전도후막의 양단전압파형  
기 판 :  $Y_2BaCuO_5 + CeO_2$  0 wt%  
부하저항 :  $R_L = 500 \Omega$

Fig. 14 Voltage waveform of YBCO superconducting thick film  
substrate :  $Y_2BaCuO_5 + CeO_2$  0 wt%  
load resistance :  $R_L = 500 \Omega$

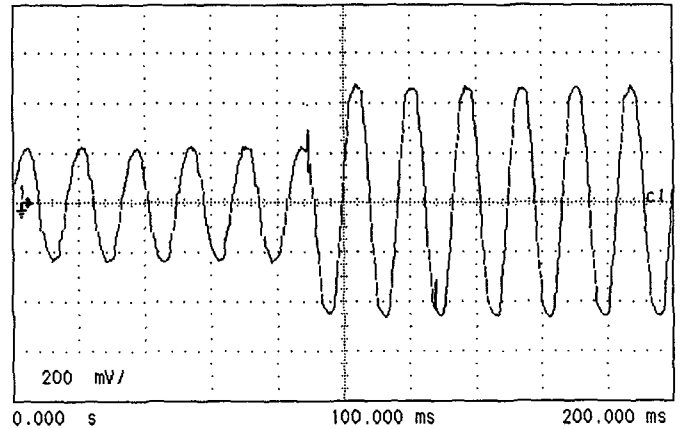


그림 16 YBCO고온초전도후막의 양단전압파형  
기 판 :  $Y_2BaCuO_5 + CeO_2$  2 wt%  
부하저항 :  $R_L = 500 \Omega$

Fig. 16 Voltage waveform of YBCO superconducting thick film  
substrate :  $Y_2BaCuO_5 + CeO_2$  2 wt%  
load resistance :  $R_L = 500 \Omega$

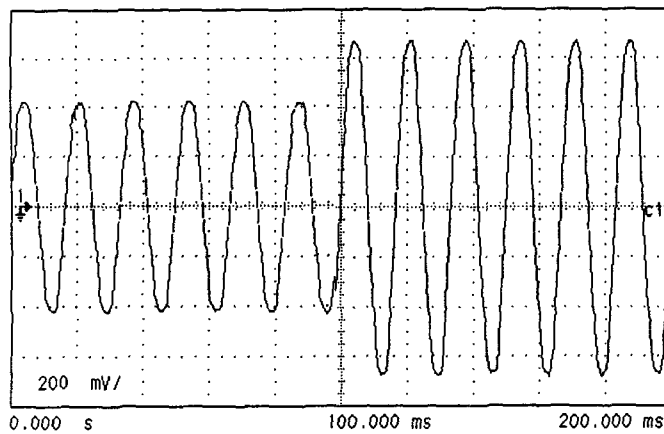


그림 15 YBCO고온초전도후막의 양단전압파형  
기 판 :  $Y_2BaCuO_5 + CeO_2$  0 wt%  
부하저항 :  $R_L = 100 \Omega$

Fig. 15 Voltage waveform of YBCO superconducting thick film  
substrate :  $Y_2BaCuO_5 + CeO_2$  0 wt%  
load resistance :  $R_L = 100 \Omega$

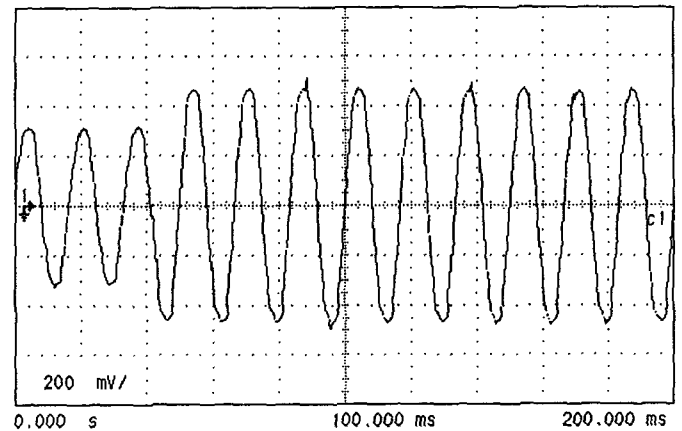


그림 17 YBCO고온초전도후막의 양단전압파형  
기 판 :  $Y_2BaCuO_5 + CeO_2$  2 wt%  
부하저항 :  $R_L = 100 \Omega$

Fig. 17 Voltage waveform of YBCO superconducting thick film  
substrate :  $Y_2BaCuO_5 + CeO_2$  2 wt%  
load resistance :  $R_L = 100 \Omega$

마찬가지로 그림 16, 17는  $Y_2BaCuO_5$ 에  $CeO_2$ 첨가량이 2 wt%인 경우의 양단전압파형을 보여준다. 그림에서 부하가 제거되기 전에는 후막 양단전압이 각각  $220 mV_{peak}$ ,  $320 mV_{peak}$ 로 나타나지만 제거후에는 동일한  $470 mV_{peak}$ 값을 보였다. 부하저항 제거 전의 전원 공급전류값은  $7.9 mA_{rms}$ ,  $10.7 mA_{rms}$ 였지만 제거된 후에는 두 경우 동일하게  $11.67 mA_{rms}$ 로 증가되었다. 이때 계산된 후막 양단전압은 부하저항이  $500 \Omega$ 인 경우,  $19.7 \Omega$ 에서  $28.49 \Omega$ 으로 증가되었고 부하저항이  $100 \Omega$ 인 경우엔  $21.14 \Omega$ 에서  $29.11 \Omega$ 으로 변화되었다.

도포물질로서 하소과정을 거쳐 제조한  $YBa_2Cu_3O_x$ 를 사용하였을 경우의 전류 제한특성에서는  $Y_2BaCuO_5$  기판에 2 wt%의  $CeO_2$ 첨가가 이루어진 시편에서 부하가 제거되었을 때의 저항값이 첨가되지 않은 시편보다 작아짐을 볼 수 있고 이에 따라 제한되는 전류값도  $0.128 mA$ 가량 증가되었다. 따라서 도포물질로서  $YBa_2Cu_3O_x$ 를 사용할 경우엔 기판에  $CeO_2$ 첨가가  $BaO+CuO$ 액상을 도포한 경우와 달리 효과적이지 못한 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

고온초전도박막제조시 어려움을 감소시키고 전력전자회로의 응용을 모색하기 위해 제조공정이 간단한 스크린 프린팅법을 이용하여 고온초전도후막을 제작하였다.  $YBa_2Cu_3O_x$  부분 용융물질을 포함한 혼합 분말원료와 바인더를 혼합 페이스트를 제조하였다. 기판과 도포물질에  $CeO_2$  첨가량에 따라 형성되는  $YBa_2Cu_3O_x$ 상과 확산두께의 변화를 관찰하였다. 마지막으로 고온초전도 후막을 응용하기 위한 기본특성으로 켄치현상을 이용한 전류제한특성에 대해 고찰하였다.

본 연구에서 고찰한 초전도후막의 전류 제한특성으로부터 접촉저항을 최대한 최소화하는 기술과 보다 높은 임계전류를 갖는 후막 제작이 무엇보다도 선행되어야 할 것이며 켄치시 발생되는 기판과 생성된 후막간의 열적응력을 최소화하는 방법에 대한 연구 역시 앞으로 계속되어야 할 것으로 생각된다. 위에서 언급한 문제점들에 대한 연구와 함께 후막의 켄치특성을 전류제한소자나 스위치소자 등과 같은 전력전자회로에 적용시킬 수 있는 방법에 대한 모색도 진행하고자 한다.

#### 감 사 의 글

본 연구는 1999년도기초전력공학공동연구소 (과제번호 : 98-중기-04)연구비의 지원하에 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] I. Monot, M. Leprope, J. Provost, G. Desgardin, B. Raveau, D. Bourgault, J.M. Barbut, D. Braithwaite and R. Tournier, "High performance in a bulk melt textured  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  ceramic", Supercond. Sci. Technol., pp. 712-718, 1992. 5.
- [2] Z. Han, D. Skov-Hansen and T. Freltoft, "The mechanical deformation of superconducting  $BiSrCaCuO/Ag$  compositers", Supercond. Sci. Technol., Vol. 10, pp. 371-387, 1997
- [3] Jai mooYoo, Hyung sik Chung, Jae Woong Ko, Sung Chang Park, Hai Doo Kim, "Long-length processing of BSCCO2223 tape and its application to multistrand conductor for power cable", Proceedings of the 8th Korean Conference on Materials and Applications of Superconductivity, pp. 318-321, 1998.
- [4] Kwang soo No, Byung Hyuk Jun, Jongwan Choi, Eugene Kim, Tae Hyun Sung, Sang Chul Han, "Fabrication of Epitaxial Superconductor Thick Films Using Partial Melts", Proceedings of the 8th Korean Conference on Materials and Applications of Superconductivity, pp. 250-253, 1998.
- [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.
- [7] Chan-Joong Kim, Ki-Baik Kim, Hai-Woong Park, Tae-Hyun Sung, Il-Hyun Kuk and Gye-Won Hong, "Microstructure of melt-textured YBaCuO oxides with  $CeO_2$  addition and the formation mechanism of the Ba-Cu-O platelet structure", Supercond. Sci. Technol., pp.76-87, 1996. 9.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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
- [11] 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.



저 자 소 개



임 성 훈 (林 成 勳)

1973년 11월 1일 생. 1996년 전북대 전기공학과 졸업, 1998년 전북대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 현재 동대학원 전기공학과 박사과정

E-mail : dolphine@shinbiro.com

모 창 호 (牟 昌 浩)

1966년 7월 2일생. 1994년 2월 대전산업대 졸업. 1998년 8월 전북대 전기공학과 졸업(석사)

강 형 곤 (姜 亨 坤)

1967년 11월 20일생. 1993년 2월 전북대학교 공대 전기공학과 졸업. 1995년 2월 동대학원 석사과정 졸업(석사). 현재 동대학원 박사과정

E-mail : joshuah@shinbiro.com

임 석 진 (林 錫 珍)

1966년 8월 7일생. 1992년 2월 원광대 전기공학과 졸업. 1997년 3월-현재 전북대 산업기술대학원재학중.



한 태 희 (韓 太 熙)

1964년 7월 20일생. 1991년 2월 전북대학교 공대 금속공학과 졸업. 1994년 8월 전북대 전기공학과 졸업(석사) 1999년 8월 전북대 전기공학과 졸업(공학박사)

E-mail : hantaehae@hanmail.net



한 병 성 (韓 秉 誠)

1951년 12월 22일생. 1988년 프랑스 루이 파스퇴르대학 박사학위취득. 1988년 프랑스 CNRS(프랑스 국립과학연구소)연구원. 현재 전북대 공대 전기공학과 교수