

진동정렬 EPD YBCO 후막테이프의 초전도 특성 개선

소대화, 조용준, 박성범, 전용우*
명지대학교, 성덕대학*

Superconducting Properties of Shaky-aligned EPD Thick Film of YBCO Tape

Soh Dea-Wha, Cho Yong-Joon, Park Seong-Beom, and Jeon Yong-Woo*
Myongji University, Sungduck College*

Abstract

In order to improve the surface uniformity and the conduction properties of the fabricated YBCO thick films, a system that applies alternating field vertically to the EPD field has been developed for the first time and applied to the electrophoretic deposition process. The applied alternating electric field caused a force to be exerted on each YBCO particle and resulted in a shaking of the particle in the direction of applied electric field, accomplishing a uniform particle orientation. The usual commercial electrical power was used for the vertically applied alternating voltage and the induced electric field was 25-120 V/cm at 60Hz. The thick film fabricated by the method developed in this paper showed better surface uniformity without crack and porosity and improved film characteristics such as critical temperature ($T_{c,zero} = 90$ K) and critical current density (2354 A/cm²). Therefore, it is expected that the shaky-aligned electrophoretic deposition method can be used to fabricate superconductor films through a simpler process and at less expense.

Key Words : YBCO thick films, alternating field, particle orientation, surface uniformity, shaky-aligned EPD, electrophoretic deposition

1. 서론

전기영동전착법에 의한 후막 제조기술은 상온 습식 공정으로 비교적 간단한 장치를 사용하여, 다양한 크기와 형태 및 후막두께의 제어가 용이한 특징을 가지고 있다[1]. 전기영동전착법을 이용한 초전도 막의 제작공정에서 요구되는 중요한 핵심 요소 중의 하나는 현탁액내의 초전도 분말의 전착 과정에서 입자의 방향성을 일정하게 유지시킴으로써 초전도 특성을 향상시키는 것이다. 이는 다른 공정기술에서도 매우 중요하게 요구되는 기술 요소로 작용되고 있으며, 공정과정에서 전착입자의 방향성 정렬을 위한 연구들이 매우 활발하게 진행되고 있다[2]. 전기영동 후막제작에 일반적으로 사용되는 직류전착전계인가 전기영동전착 방식은 전착공정 과정에서 용매 내에 현탁된 분말입자가 모

재의 c축 방향으로 정렬되지 못하고 매우 무질서하게 전착되는 한계가 있다[3]. 즉 현탁 분말입자의 정렬전착(aligned deposition) 또는 배향전착(oriented deposition)을 위한 공정이 매우 어려운 단점을 가지고 있다. 따라서 후막의 임계전류밀도 향상을 위해서는 전착공정의 개선이 무엇보다도 중요하며 전기영동전착 후막의 제작공정에 적용을 위한 응용연구의 필요성이 요구된다[4]. 본 논문은 초전도 후막의 균일한 표면 확보와 전기적 특성을 향상시키기 위한 방법으로 측면보조전계 인가방식의 전기영동전착 기술을 개발 적용하였다.

2. 실험

초전도후막 제조를 위한 측면보조전계인가 전착 시스템은 그림 1의 개략도와 같으며 전착모재로는

Ag선을 (-)전극으로 사용하였으며, 측면보조전계인 교류전계 인가를 위하여 전착전계 인가방향의 수직(90°) 방향에서 인가할 수 있도록 제작하였으며, 현탁용매로는 아세톤을 사용하였다.

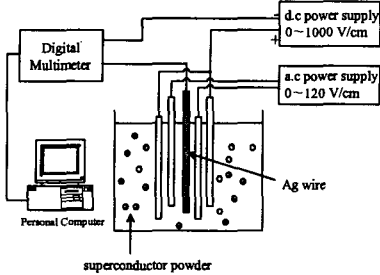


그림 1. 보조전계를 이용한 전착 장치의 개략도.

직류전착전계 이외에 교류전계가 병행 인가되므로 전착전계와 교류전계 사이의 전압의 크기 및 입자의 형상에 따른 거동과 그 응답성 및 그에 따른 교류전계의 범위를 60 Hz의 상용전압으로 국한하였다. Ag 모재에 전착전압을 인가하여 전착방향으로 200 V/cm의 직류전착전계를 형성하고, 동시에 25~120 V/cm의 교류전계를 인가하여 초전도 전착후막 시편을 제작하였다. 각 조건별로 제작된 시편을, 동일한 제작조건으로 직류전착전계방식이 적용된 초전도 후막 시편과 특성을 비교 분석하였다. 현탁용매의 선택과 직류전착전계 인가에 관한 기준은 선행연구과정에서 가장 우수한 후막제작 조건으로부터 얻어진 결과로 이를 본 실험에 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 전기영동전착 후막제작을 위한 기본 특성

그림 2는 YBCO초전도 분말을 현탁상태에서 60 초 동안 전착을 수행하면서 인가전압에 따른 전착 전류의 변화 값을 측정한 그림으로 전착 현상에 대한 전착분말의 입자분포 및 전착조건을 결정할 수 있는 중요한 인자의 하나로 작용함을 알 수 있다. 이 결과로부터 주 전착은 10초 이내에 이루어지며, 그 이후의 전착상태는 음극 주변이 전착 분말로 도포 되면서 급격한 전계의 분포 변화로 인하여 전류 값의 변화가 지수함수 적으로 감소되어 나타나므로, 시간이 경과할수록 전착 분말입자의 크기는 점차 작아지는 분포를 형성하면서 음극 표

면으로부터 전착 두께가 증가할 수록 전착밀도는 감소될 수밖에 없음을 확인할 수 있다.

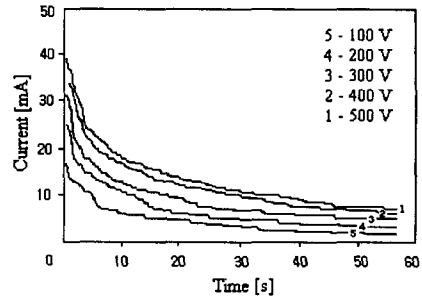


그림 2. 인가전압에 따른 전착전류와 전착시간 관계.

그림 3에서 YBCO 초전도체의 최적 흡착온도는 400℃임을 알 수 있으며 산소흡착온도가 400℃보다 낮으면 무게변화량이 오히려 낮아지는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 온도가 너무 낮으면 평형 흡착량이 낮아진다는 것을 의미한다. 이러한 이유로 YBCO 초전도체의 전기적 성질은 변화될 수 있다. 이 결과로부터 400℃에서의 산소흡착공정이 임계 전류밀도를 향상시킬 수 있는 최적 조건임을 확인하였다[5]

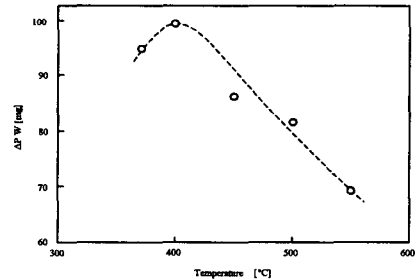
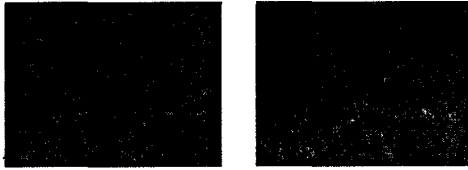


그림 3. 산소흡착온도에 따른 초전도 시편의 중량 변화 관계.

3.2 측면보조전계 인가방식을 적용한 후막특성

앞에서 분석된 초전도 후막제작을 위한 조건 및 특성을 바탕으로 측면보조전계 방식의 후막을 제작하였다. 그림 4는 직류전계인가 방식과, 측면보조전계인가 방식을 적용한 후막시편을 각각 제작하여 표면 특성을 비교 관찰하였다. 직류전착전계 인가방식의 후막제작 조건은 아세톤 현탁용액에 직류전계를 전착방향으로 200 V/cm의 세기로 형성하였고, 측면교류보조전계 인가방식의 경우는 앞의

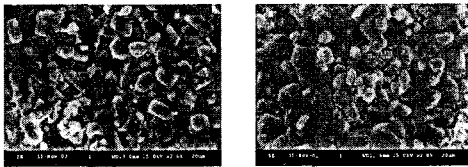
경우와 동일한 조건 외에 100 V/cm의 교류보조전계를 동시에 인가하여 직·교류 혼합전착방식으로 초전도 전착후막 시편을 제작하였다.



(a) (b)

그림 4. 전계인가 조건에 따른 후막의 표면 사진
(a) DC 200 V/cm + AC 100 V/cm
(b) DC 200 V/cm.

그림 4(a)는 보조전계 방식으로 초전도 후막을 제작한 시편 표면사진으로 그림 4(b)에 비하여 매우 균일한 표면 현상을 보인다. 직류전착전계 인가 방식으로 제작된 후막의 표면에 크랙현상이 발생하는 근본원인은 아세톤 용매의 빠른 휘발성 때문에 건조과정에서 많은 기공과 크랙을 형성시키는 원인과 함께 전착시 입자의 치밀성을 위한 배면전착의 제어가 어렵기 때문이다. 교류전계인가 방식으로 제작된 후막의 경우는 입자의 초기 현탁상태의 유지와 입자의 흔들림 미세진동에 의한 방향성 정렬 및 입자간의 배향면적 따른 치밀성 증가로 인하여 배면전착이 가능하여 기공과 크랙현상을 최소화할 수 있기 때문에 고른 전착표면 상태를 얻을 수 있는 것으로 판단된다.



(a) (b)

그림 5. 전계인가조건에 따른 후막표면 SEM사진
(a) DC 200 V/cm 및 PEG(1000) 8 vol.%
(b) DC 200 V/cm + AC 100 V/cm.

그림 5의 비교사진은 교류전계인가 방식으로 제작된 초전도 후막의 경우 PEG 및 BaF₂등 첨가물을 첨가되지 않은 순수한 아세톤 용매에서 후막을 제작하였다. 교류전계 인가시 PEG를 첨가하지 않

은 이유는 PEG 첨가 이상의 균일한 후막표면 특성을 얻을 수 있었고, 열처리시 발생하는 PEG가 점유하는 공간을 최소화하기 위한 의미도 포함된다. 따라서 PEG를 첨가하는 공정단계를 줄임으로써 단순화된 제작공정의 장점을 얻을 수 있다. 그림 5(b)의 경우 전착 과정에서 다수의 현탁분말 입자가 교류전계의 영향으로 Ag태이프 면위에 정렬된 상태에서 진동전착됨으로, 입자간의 접촉면을 증가시키며 전착입자간의 빈 공간을 메움으로 인하여 접촉면을 증대시키고 입자간의 결속력을 강화하여 미세 기공이나 표면의 크랙현상을 최소화하였다. 그림 6은 모재의 길이방향으로 전착된 단면을 보인 사진으로 전착두께의 균일한 상태를 확인할 수 있다. 측면보조전계 인가시 현탁 입자들의 부유시간을 충분히 유지할 수 있게 함으로써 초기 현탁 상태를 지속할 수 있는 효과와 고른 배면전착을 유도함으로써 모재의 길이방향인 상단부와 하단부의 전착 두께가 일정하게 유지되는 효과를 얻었다. 즉, 교류전계 방식을 이용한 초전도 후막 전착의 경우 모재의 단면과 길이 방향으로 일정한 두께를 유지함으로써 초전도 특성향상과 함께 제어조건에 대한 부가적 효과를 얻을 수 있었다.

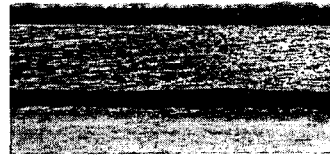


그림 6. 초전도 후막 측면의 현미경 사진.

그림 7은 교류전계인가 방식에서 제작된 초전도 후막의 교류전압에 대한 두께 변화와 임계전류밀도의 관계를 나타냈다. 전착후막 두께의 변화는 교류전계 크기에 따른 영향으로, 전계의 세기가 클수록 전착후막의 두께는 얇아지는 것을 알 수 있다. 후막의 두께가 32.5 μm 이상과 20 μm 이하의 두께에서는 임계전류밀도 특성이 3000 A/cm² 이하로 얻어졌다. 3000 A/cm² 이상의 임계전류밀도 값을 나타내는 교류전계 인가 범위는 75~100 V/cm이며 전착후막의 두께범위는 평균 20~33 μm 임을 확인하였다. 직류전착전계 200 V/cm와 교류전계 100

V/cm를 혼합 인가하였을 때 $T_{c,zero}$ 와 임계전류밀도는 각각 90 K, 3419 A/cm²로 측정되었다. 이는 전착전계만을 인가하여 제작된 후막의 임계전류밀도는 조건에 따라 500~2354 A/cm²로 큰 변화요인을 가지고 있으나, 혼합전계방식에서는 전체적으로 상승된 결과 값을 보인다. 즉, 선행연구과정에서 직류전계인가 방식에서 확인된 2354 A/cm²에 비하여 1000 A/cm² 이상 증가한 것으로 선행결과 대비 45% 이상 향상된 결과를 얻었다.

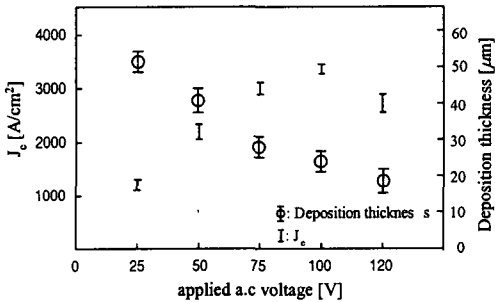


그림 7. 측면보조전계에 따른 임계전류밀도 분포.

표 1. 교류전계 변화에 따른 임계전류밀도.

| 인가보조전계 [V/cm] | 전착후막두께 [µm] | | 임계전류밀도 [A/cm ²] | |
|---------------|-------------|------|-----------------------------|------|
| | 최고치 | 최저치 | 최고치 | 최저치 |
| 25 | 56.6 | 48.2 | 1473 | 1297 |
| 50 | 44.8 | 38.7 | 2460 | 2188 |
| 75 | 32.5 | 26.2 | 3125 | 2903 |
| 100 | 28.7 | 22.3 | 3419 | 3347 |
| 120 | 23.4 | 17.8 | 2872 | 2655 |

결국 교류전계가 초전도 분말의 전착시 입자의 배향성 정렬을 도와주고 전착밀도를 증가시키기 때문에 전착전계만의 공정상에서 일어날 수 있는 후막의 초전도 특성 저하요인을 최소화시킴으로써 초전도 특성이 향상됨을 확인하였다.

따라서 이 결과를 바탕으로 교류보조전계 방식을 적용하여 장선제작을 위한 연속공정의 시도에서 1m 급 선재를 제작하여 임계전류밀도를 측정, 분석하였다. 제작조건은 200 V/cm 직류전계와 100 V/cm 교류진동전계를 인가하여 전착한 선재에서 2753 A/cm²의 비교적 높은 임계전류밀도를 얻었다.

향후 직·교류 혼합전계전착방식과 함께 PEG 첨가에 의한 표면균질화 현상을 동시에 적용한다면 두 방식의 강점에 의한 상승효과를 기대할 수 있을 것이다.

4. 결론

본 논문에서 전기영동전착법에 의한 초전도 후막의 특성 향상을 위한 제작방법으로 직·교류 혼합전계인가 방식을 최초로 제안하여 적용하였다.

혼합전계인가 방식으로 제작된 YBCO초전도 후막의 경우 $T_{c,zero}$ 와 임계전류밀도는 각각 90 K, 3419 A/cm²로 측정되었으며, 이는 직류전계인가 방식에서 얻은 2354 A/cm² 보다 1000 A/cm² 이상 증가한 것으로 선행 연구결과를 크게 갱신하여 종전 대비 45% 이상의 탁월한 개선효과를 얻었다.

따라서 본 연구의 결과로부터 제안된 측면보조전계인가 방식의 전기영동전착법을 적용함으로써 YBCO 후막의 임계전류밀도를 상당 수준으로 개선하였으며, 동시에 PEG 첨가효과를 병행 적용할 경우 두 방식의 강점에 의한 상승효과로 보다 큰 개선효과가 얻어질 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 KISTEP에서 시행한 국제공동연구사업(과제번호: M6-0011-00-0043)과 KOFST의 Brain Pool(022-3-7) 사업 지원으로 수행되었음을 밝히며, 이에 감사를 드립니다.

참고 문헌

- [1] 소대화, 박정철, 이영매, 추순남, "후막전착 YBCO 초전도선재 제조연구(I)", 한국전기전자재료학회지, 12권, 10호, p. 937, 1999
- [2] D. W. Soh, Y. M. Lee, Y. J. Cho, and J. C. Park, "Preparation of superconducting YBCO thick film by electrophoresis", IUMRS-ICAM'99, p. 87, 1999
- [3] Soh D., Shan Y., Park J., Li Y., and Cho Y. "Preparation of YBCO superconducting thick film by electrophoresis", Physica C, Vol. 337, No. 1-4, p. 44. 2000.
- [4] 소대화, 전용우, "보조전계를 이용한 전기영동 초전도 막의 제작" 한국전기전자재료학회지, 16권, 2호, p 157, 2003
- [5] Soh Deawha, Fan Zhanguo, Gao Weiyong, "Zone-melting Process of NdBaCuO under Low Oxygen Pressure", Trans., KIEEME, Vol. 3, No. 2, p. 24, 2002.