

# Measurement and Analysis of the Flux Profiles of the Coated Conductors using Magneto-optical Image and Scanning Hall Probe

H. Y. Lee\*, K. S. Kwak, J. K. Rhyee, J. Yoo, D. Youm

*Department of Physics, KAIST, 305-701, Taejeon*

(Received 9 March 2010 revised or reviewed 16 April 2010 accepted 20 April 2010)

## Coated conductor에서 magneto-optical image와 scanning hall probe를 이용한 flux profile의 측정 및 분석

이효연\*, 광기성, 이준규, 유재은, 염도준

### Abstract

The magnetic flux profiles in SmBCO and YBCO coated conductors(CC) in the presence of the external field were comparatively investigated by magneto-optic image and scanning hall probe measurements. The current distributions calculated by using the inversion method from measured field profiles show that the decrease of current densities near the edges of SmBCO CC is more significant than those of YBCO CC. Through the comparison of the numerical analysis based on Kim's critical state model and the Brandt and Indenbom's solution, we found that this feature is related to their different field dependant properties of the critical current densities.

*Keywords* : coated conductor, magnetic flux profiles, magneto-optical image, scanning hall probe, magnetic field dependence of critical current densities

### 1. 서 론

전력기기에 2세대 고온초전도 선재인 ReBCO coated conductor(CC)의 사용화가 최근 이루어지고 있다. 이러한 초전도선재 기반의 기기를 사용할 때 고려해야 할 가장 중요한 특성 중 하나는 자기장에 의존하는 임계전류밀도( $j_c$ ) 이

다. 높은  $j_c$ 의 선재가 더 큰 전류를 수송할 수 있으나 자기장에 따라 감소하는 경향이 크다면 다양한 자기장 조건 하에서 안정적으로 사용하기 어렵기 때문이다. 본 논문에서는 SmBCO CC와 YBCO CC에 수직 자기장을 가하여 침투된 자기장 분포를 MOI(Magneto Optical Image)방식과 SHP(Scanning Hall Probe)을 이용하여 관측하고 이를  $j_c$ 의 자기장 의존성과 관련하여 비교 분석하고자 한다.

\*Corresponding author. Fax : +82 42 350 5330

e-mail : lhy0312@kaist.ac.kr

2. 이론 및 시뮬레이션

박막형태의 초전도내부의 자기장 분포는  $j_c$  가 자기장에 상관없이 일정하다는 가정하에 E. H. Brandt에 의하여 해석적 방법으로 계산 되었다 [1]. 비록  $j_c$ 의 자기장 의존성을 고려하지 않았으나 그의 계산은 얇은 박막형태의 초전도체에 유도되는 전류의 분포와 자기장의 침투양상에 대한 기본적인 물리적 개념을 제공 하며, 간단히 설명하면 다음과 같다.

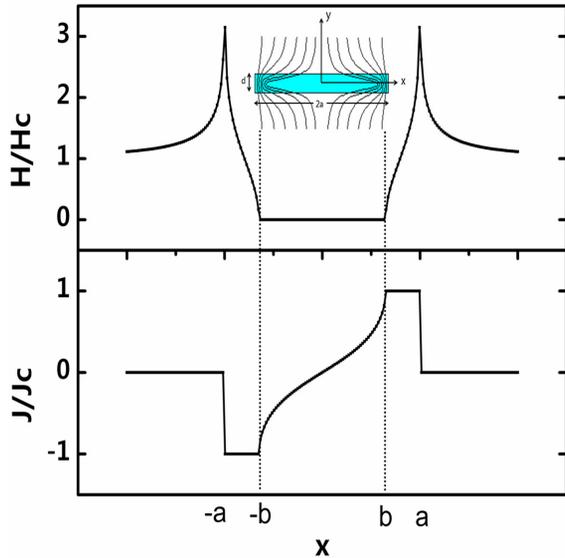


Fig. 1. 외부 수직자기장  $H_a = H_c$  일 때, 폭 2a, 두께 d, 무한히 긴 초전도 박막의 자기장(위) 및 전류밀도(아래)에 대한 Brandt계산.

폭 2a, 두께  $d (\ll a)$ , z방향으로 무한히 긴 박막형태의 초전도체에 수직방향의 외부 자기장 ( $\vec{H}_a = H_a \hat{y}$ )을 가한 경우  $|H_y| \gg |H_x|$ 이므로 자기장의 y방향의 성분만 고려한다. 또한 여기서  $d \ll a$ 이므로 자기장 분포의 y방향으로의 변화는 매우 작다. 따라서 표면의 자기장 ( $H(x)$ )만 고려하였다. 같은 이유로 전류밀도 ( $j(x, y)$ ) 대신에 다음으로 정의된 박막전류밀도,  $J(x)$  (Sheet current density [A/cm])를 주로 다룬다.

$$J(x) = \int_{-d/2}^{d/2} j(x, y) dy, \quad J_c = j_c d \quad (1)$$

자기장은 초전도박막의 양 끝부분부터 내부로 침투하면서 급격히 0으로 감소하여 가운데에 자기장이 없는 영역을 형성한다. 자기장이 침투된 영역을 임계상태(Critical state)라고 하며, 이 영역에서 흐르는 전류를 임계전류라 한다. 한편 자기장이 0인 영역을 마이스너 상태(Meissner state)라고 하며 마이스너 전류가 흐른다. 이들의 경계위치는 다음과 같이 주어진다.

$$|x| = b = a / \cosh(H_a / H_c) \quad (2)$$

여기서  $H_c = J_c / \pi$ 이다. 각 영역에서의 자기장 및 박막전류밀도 분포는 다음과 같다.

$$H(x) = \begin{cases} 0 & |x| < b \\ H_c \operatorname{arctanh} \frac{(x^2 - b^2)^{1/2}}{c|x|} & b < |x| < a \\ H_c \operatorname{arctanh} \frac{c|x|}{(x^2 - b^2)^{1/2}} & a < |x| \end{cases} \quad (3)$$

$$J(x) = \begin{cases} \frac{2J_c}{\pi} \arctan \left[ \frac{cx}{(b^2 - x^2)^{1/2}} \right] & |x| < b \\ J_c x / |x| & b < |x| < a \\ 0 & a < |x| \end{cases} \quad (4)$$

여기서  $c = \tanh(H_a / H_c)$ 이다. Fig. 1은 외부 자기장  $H_a = H_c$  하에서 Brandt의 계산에 의한 자기장 및 전류분포이다. Fig. 1의 임계 영역에서 일정한  $J(x) = J_c$ 가 흐르고 있는 것을 볼 수 있는데, 이것은 Brandt의 계산에서 자기장의 의존성이 없는 일정한  $j_c$ 를 가정한 Bean 모델 [2]을 사용했기 때문이다. 실제로는 임계전류가 일정하지 않고 자기장에 크게 의존하게 되며 이는 본 연구실에서 이전에 수행된 실험 [3]을

통해서도 확인한 바 있다.

이러한  $j_c$ 의 자기장 의존성을 고려한 Kim 모델 [4]은 다음과 같다.

$$j_c(H) = j_c(0)/(1+H/H_k) \quad (5)$$

여기서  $H_k$ 는 물질마다 달라지는 파라미터이다. 식(5)는 자화 이력곡선에 대한 실험결과와 잘 일치하나 초전도 박막 내에 형성되는  $H(x)$ ,  $J(x)$ 에 관한 해가 아직 없다. 따라서, 유한요소법(FEM, Finite Element Method)에 기반한 상용화된 소프트웨어, *Comsol Multiphysics 3.5*를 이용하여 수치적으로 계산하였다.

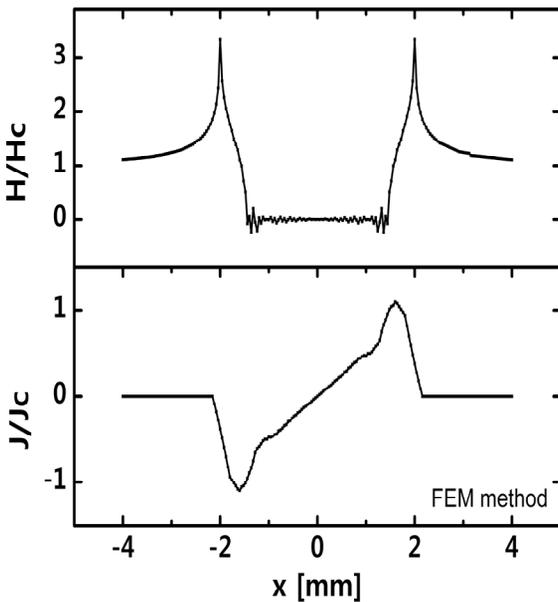


Fig. 2. FEM 계산 결과( $2a = 4[\text{mm}]$ ,  $d = 2.2[\mu\text{m}]$ ,  $H_a = H_c = 140[\text{A/cm}]$ ,  $H_k = 1430[\text{A/cm}]$ ,  $j_c(0) = 2 \times 10^6[\text{A/cm}^2]$ ).

여기서  $j_c$ 의 자기장 의존성은 기존에 수행된 실험 [3]에 사용된 샘플 SmBCO의  $J_c(H_a)$ 를 사용하였다. 계산 결과는 Fig. 2에 나타났다. Brandt의 계산 결과와 비슷하게 임계 영역의  $H(x)$ 는 초전도체의 양 끝에서 내부로 들어갈수록 급격히 감소하고, 마이스너 영역에서는 0이 된다. 그러나  $J(x)$ 는 확연한 차이를 보인다.

다. 임계 영역에서 흐르는 임계전류는 양 끝으로 갈수록 감소하는데 이는 이 곳에서의 자기장이 더 크기 때문이며 실험 데이터 [3]에서 보여진 경향과 잘 일치한다.

### 3. 실험방법

우리는 실제로 두 종류의 CC, SmBCO CC와 YBCO CC에 대하여  $j_c(H)$ 의 차이가 전류분포의 특성에 미치는 영향을 MOI(Magneto Optical Image)와 SHP(Scanning Hall Probe)을 이용하여 측정하고 비교분석 하였다. SHP 방식은 수직성분 자기장의 분포를 정확한 값으로 직접 관찰할 수 있으나 스캔하는 시간이 필요하므로 실시간으로 자기장을 변화시키면서 자기장 침투모습을 관찰하기는 어려움이 있다. 이에 비하여 MOI 방식은 스캔 할 필요가 없으므로 실시간으로 이미지를 볼 수 있다. 하지만 광학적인 세기를 측정하는 것이므로 자기장으로 정확히 환산하는 복잡한 작업이 필요하다. 따라서 이러한 두 가지 방법은 서로 보완적이라 할 수 있다.

#### 3.1 샘플 특성

YBCO CC는 RABiTS (Rolling Assisted Biaxially textured Substrate) 방식으로 만들어진 AMSC사의 제품을 사용하였다. 기판은 니켈-텅스텐 합금으로 자성을 띠므로 외부 자기장에 반응하게 된다. 따라서 초전도 층에 의한 반응만을 구별하기 위해서 100[K]온도에서 기판 자성에 의한 신호를 따로 측정하였다. 더 정확한 측정을 위해서 안정화 목적으로 증착된

SUS층을 약하게 가열해서 벗겨내는 방식으로 제거 하여 측정을 수행하였다.

SmBCO CC는 IBAD(Ion Beam Assisted Deposition)방식으로 한국전기연구원에서 제작된 샘플을 사용하였다. 안정화를 위한 Ag층을 벗겨내지 않고 사용했으며, Hastelloy 기판은 자성이 없으므로 기판자성에 의한 보정은 필요 없었다.

Fig. 3은 이러한 SmBCO CC와 YBCO CC에서의 임계전류의 자기장 의존성을 보여주는 데이터이다.

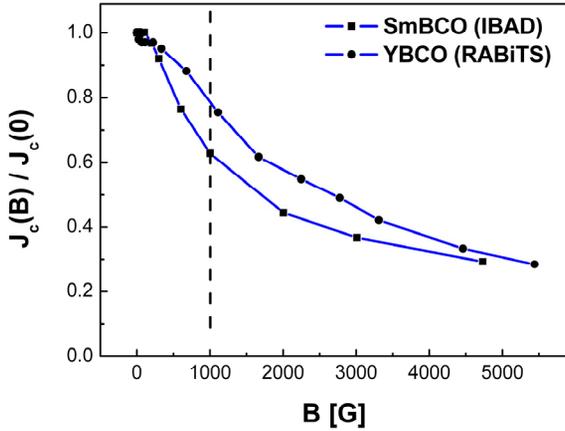


Fig. 3. SmBCO CC와 YBCO CC에서 임계밀도의 자기장의존성 비교(77[K]에서 측정).

자기장의 크기가 1000[G] 이하일 때 SmBCO CC의 임계전류가 자기장에 대하여 더 급격히 감소함을 알 수 있다. 그러나 자기장이 1000[G] 이상 커질 경우 이러한 양상은 뒤바뀌어 YBCO CC의 임계전류가 비교적 더 크게 감소한다. 이러한 특성은 IBAD 혹은 RABiTS 방식과는 무관하게 SmBCO 및 YBCO의 물질특성임을 우리의 실험에서 여러 번 확인한 바 있으므로 본 논문에서는 초전도층의 성장 방식의 차이는 무시할 것이다. 또한 우리의 연구에서 SmBCO CC의 자기장 의존도가 더 강한 영역인 1000[G]이하의 자기장만 고려했다.

### 3.2 Scanning Hall Probe(SHP) 방법

본 실험에서 이용한 SHP 측정 장치는 Fig. 4a와 같다. 샘플 표면은 50[ $\mu\text{m}$ ] 두께의 테이프로 덮여 고정되어 있으며, 그 위에 홀 프로브 센서가 원거리 이동장치에 의하여 미끄러지며 이동한다. 온도의 정확성을 위하여 액체질소 속에서 측정하였다. 홀 프로브의 위치를 알려주는 2[kHz] 신호 코일이 샘플 양쪽에 설치되어 있다. 센서의 감지 영역으로 결정되는 공간적 분해능은 100[ $\mu\text{m}$ ]이다. 그러나 센서를 보호하기 위한 보호층의 존재로 인해 센서와 샘플 표면 사이의 수직거리가 약 400[ $\mu\text{m}$ ] 정도 떨어져 있으므로 분해능은 이 정도로 커진다. 전류단자는 자체 자기장을 최소화하기 위하여 대칭적인 4개의 전선으로 되어 있다. 전자석에

서 생성되는 외부 자기장,  $H_a$  이 샘플 표면에 수직으로 가해진다. 홀 프로브 신호는 자기장의 수직성분을 정확히 나타내므로 측정된  $B(x) = \mu_0 H(x)$  로 부터  $J(x)$  를 계산할 수 있다.

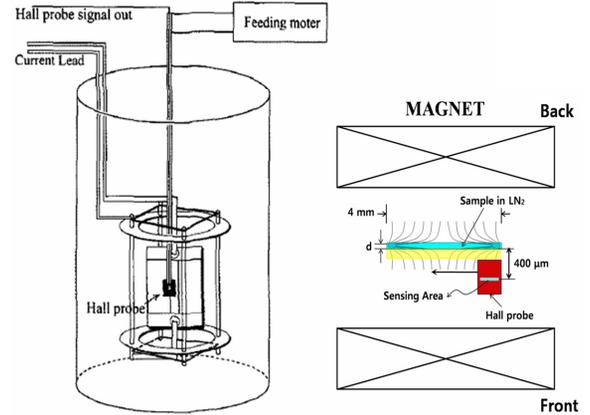


Fig. 4a. SHP 실험장치.

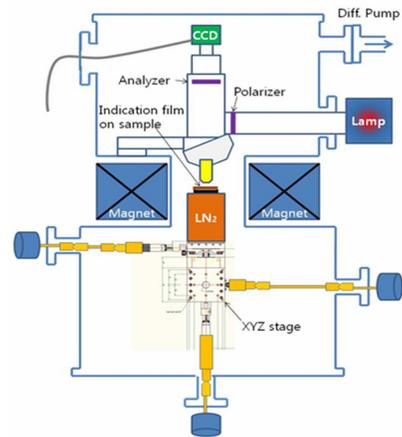


Fig. 4b. MOI 실험장치.

### 3.3 Magneto-optical Imaging(MOI) 방법

한편 본 실험에서 이용된 MOI 측정 장치는 Fig. 4b와 같다. 진공장치 내에 편광현미경이 설치 되어있다. 액체질소에 의해 냉각되는 냉각장치 위에 놓인 샘플은 접촉에 의하여 냉각된다. 샘플 위에는 Faraday 효과를 이용하는 MO필름(Bi-YIG/Al/GGG)이 놓인다. 자기장에 반

응하는 Bi-YIG층을 샘플에 직접 접촉하게 하여 샘플 표면에서의 자기장을 관측할 수 있다. 장치는 샘플의 높낮이 및 좌우 방향을 조절하는 3D-이동장치, LED 램프 광원 및 CCD카메라로 이루어져 있다. 역시 수직 방향의 외부 자기장,  $H_a$  은 전자석을 이용하여 가해준다. 광원에 의한 광량의 분포가 완전히 균일하지 않으므로 CCD신호를 광량분포로 정규화 해야 한다. 또한 이 광량분포를 잘 알고 있는 자기장에 대하여 보정하고 이를 이용하여 CCD로 관측된 이미지를 자기장분포로 환산해야 한다. 그런데 MO필름 자체가 완전히 균일한 것이 아니기 때문에 각 위치, 각 화소별로 보정해야 한다. MO필름의 신호와 자기장의 세기는 선형적 관계가 아니기 때문에 4개의 파라미터로 표현된 다항식을 이용해 각 화소별로 결정한 후 이미지를 자기장 분포로 전환한다. 그런데 더욱 복잡한 것은 MO필름의 광학적 반응이 수직자기장과 수평자기장 모두에 반응하기 때문에, 두 가지 성분을 분리해서 매우 조심스럽게 자기장 계산을 해야 한다. 그러나 외부자기장이 샘플 표면에 수직으로 가해져 있을 경우 샘플 내부에 형성되는 자기장의 수평성분은 수직성분에 비하여 작기 때문에 본 연구에서는 수평성분에 의한 보정은 시도하지 않아 정확한 정량적 전류분포를 계산하지 못하였다. 따라서 전류분포는 SHP측정결과에 의한 계산 값을 사용하였다.

#### 4. 결 과

YBCO CC에  $B_a = \mu_0 H_a$  를 0.4[G]부터 1010 [G]까지 증가시키면서 걸어주고(Fig. 5a, 위) 다시 0.8[G]까지 일정한 간격으로 내리면서(Fig. 5a, 아래) 측정된 MO 이미지를 자기장으로 환산한 모습이다. 그림에서 볼 수 있듯이 외부 자기장이 낮을 때, 가운데 부분은 자기장이 없는 마이스너 영역이고 양 끝 근처에만 자기장이 침투해 있다가 외부 자기장이 세짐에 따라 점점 내부로 침투하는 양상이 보여 지고 있다. 외부 자기장을 다시 낮추면 끝에서부터 자기장이 빠져나가고 외부 자기장이 0이 되면 중앙부

분에 빠져나가지 못한 자기장이 트랩(trap)되어 남아있는 것이 보인다.

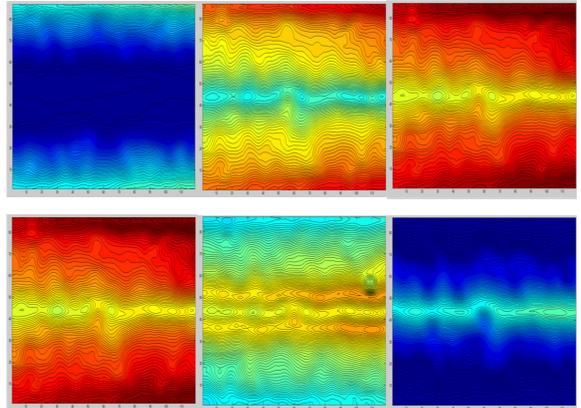


Fig. 5a. YBCO-CC에 외부자기장을 증가(위), 다시 감소(아래)시키면서 측정된 MO 이미지를 자기장으로 환산한 2D 자기장 분포.

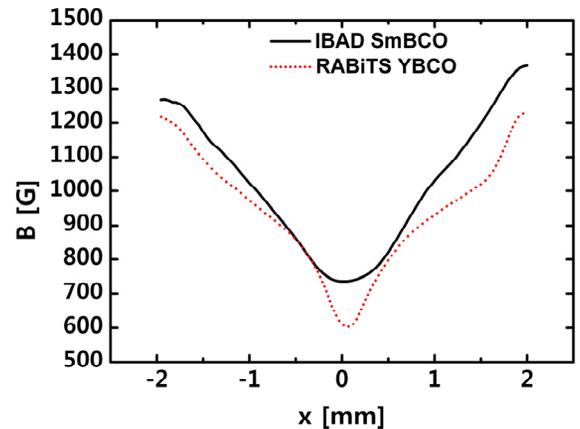


그림 5b. MOI관측에서 얻어진 SMBCO CC와 YBCO CC단면에서의 1D 자기장 분포.

이러한 MOI 방식으로  $B_a = 1000$ [G] 일 때, YBCO CC와 SmBCO CC에 대하여 어떤 특정한 단면의 자기장 분포를 Fig. 5b에 나타냈다. 두 CC에서 관측된 자기장 분포는 뚜렷한 차이가 있다. 중앙부분에서의 YBCO CC의 경우 SmBCO CC보다 자기장이 가파르게 감소하고 있다. 실제 다양한  $B_a$  하에서 측정된 MO 이미지를 비교해 보면 YBCO CC의 자기장 분포가 더욱 굴

곡이 심한 것을 관찰 할 수 있었는데, 이 현상은 그레인(Grain) 구조의 차이로 인하여 발생한다고 생각된다.

본 논문의 목적인  $j_c(H)$  에 의한 차이는  $J(x)$  를 통하여 비교할 수 있다. 이를 위하여, 정확한 정량적 분석이 가능한 SHP를 이용하였다.

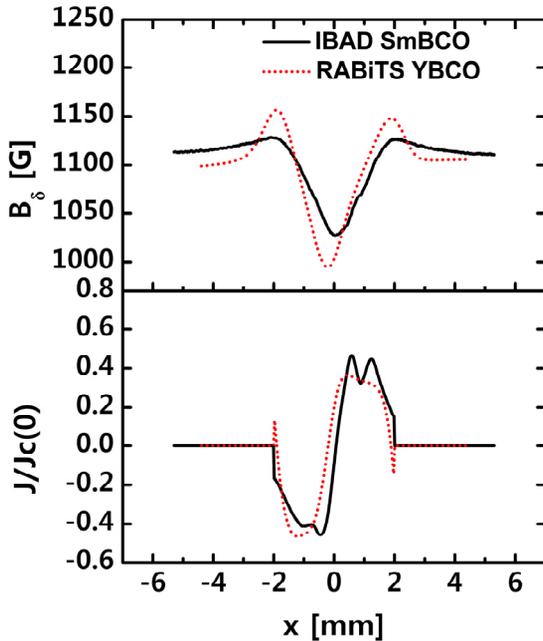


Fig. 6. SHP로 측정된 자기장 분포와 전류밀도 분포.

Fig. 6 (위)는 YBCO CC와 SmBCO CC에 대하여 SHP방법으로 측정된 자기장 분포( $B_\delta(x)$ )이다. MO측정결과인 Fig. 5b와 비교하면 매우 완만하다. 이것은 센서가 샘플 표면에서 400 [ $\mu\text{m}$ ] 이상 멀리 떨어져 있어서 완화 되었기 때문이다. 그러나 중앙 부분에서 YBCO CC가 더 급격한 변화를 보이는 경향은 MO데이터와 잘 일치한다. 앞서 언급했듯이 MO와는 달리 정량적으로 정확하기 때문에 전류 분포를 비교적 정확히 구할 수 있다. SHP에 의하여 측정된  $B_\delta(x)$ 로 부터 이전의 연구에서 제안된 inversion method [5]를 이용하여 박막전류밀도,  $J(x)$ 를 계산 하였다.

계산된  $J(x)$ 를 Fig. 6(아래)에 나타냈다. 더 완만한 자기장 분포를 가지는 SmBCO CC의 전류 분포가 YBCO CC보다 양 끝으로 갈수록 감소 정도가 크다.

이것은 SmBCO CC의 임계전류밀도가 자기장에 더 강하게 의존하는 특성에 의한 것이며 Fig. 3에서 얻은 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

## 5. 결 론

SmBCO CC와 YBCO CC의 임계전류밀도의 자기장 의존성 차이가 자기장 및 전류 분포에 미치는 영향을 MOI(Magneto Optical Image)방식과 SHP(Scanning Hall Probe)을 이용하여 관측하고 비교 분석한 결과를 기술하였다. SHP방식으로 얻은 자기장 분포에서 inversion method로 계산하여 전류분포를 얻었다. SmBCO CC의 전류 분포가 YBCO CC의 전류분포보다 edge로 갈수록 임계전류밀도 감소 정도가 크다. 이것은 SmBCO CC는 YBCO CC보다 임계전류의 자기장 의존성이 더 강하기 때문이라고 할 수 있다. 이러한  $j_c(H)$ 와 전류분포의 상관관계는 Bean 모델을 가정한 Brandt의 계산과 Kim모델을 사용한 FEM 계산결과의 비교를 통해 더욱 확연히 드러난다.

## Acknowledgments

This work was financially supported by CAST and KETEP in the Republic of Korea.

## References

- [1] E. H. Brandt and M. Indenbom, Type II superconductor strip with current in a perpendicular magnetic field, Phys. Rev. B, 48, 12893 (1993).
- [2] C.P. Bean, Magnetization of hard superconductors, Phys. Rev. Lett. 8 (1962) 250-253.
- [3] J. Yoo, J. Y. Lee, D. Youm, Field dependence of current profiles induced in a superconducting film

- under a magnetic field, *Journal of the Korean Physics Society*. 51 (2007) 1776-1781.
- [4] Y. B. Kim, C.F. Hampstead, A.R. Strnad, Critical persistent currents in hard superconductors, *Phys. Rev. Lett.* 9 (1962) 306-309.
- [5] Jaeun Yoo, SangMoo Lee, Yehyun Jung, Kisung Kwak, Joonkyu Rhee, Dojun Youm, Hosup Kim, Hongsoo Ha, SangSoo Oh and Sangjun Oh, *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 22, no. 4, 045001 (2009).